

PUUN MODIFIOINTIMENETELMÄT

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Puutekniikka
Puurakennetekniikka
Opinnäytetyö
Kevät 2008
Markus Laitinen

Lahden ammattikorkeakoulu
Puutekniikka

LAITINEN, MARKUS:

Puun modifiointimenetelmät

Puurakennetekniikan opinnäytetyö, 77 sivua, 2 liitesivua

Kevät 2008

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää puun modifioinnin nykytilaa kokonaisuudessaan. Jos kaikki menee hyvin tulevaisuudessa, puuteollisuudella ja siten myös modifioidulla puulla on valtava markkinapotentiaali. Puu on aina modifioitava jotenkin ennen sen lopullista käyttöä. Työssä keskitytään keskeisiin puun modifiointitekniikoihin ja tutkaillaan markkinoiden tilannetta puurakentamisen kannalta ottaen huomioon kasvava ympäristötietoisuus.

Puun modifiointi on sen kemiallisen rakenteen muuttamista ja modifioitu puu on aina voitava vielä modifioinnin jälkeen luokitella luonnonmukaiseksi puumateriaaliksi. Modifiointitekniikoissa käsitellään muun muassa lämpökäsittelymenetelmiä, asetylointia, furfulointia ja eräitä muita menetelmiä.

Puuaines on epähomogeenistä hygroskooppista ainetta, johon on luonnossa varastoituneena runsaasti vettä. Ennen puun käyttämistä sen kosteus on saatava käyttökohdettaan vastaavalle tasolle. Tämä tarkoittaa yksinkertaisuudessaan sitä, että puunkosteuden alentuessa myös sen mittasuhteet muuttuvat – se kutistuu. Myös puunmodifiointiprosessien aikana puusta poistetaan vettä ja lisäksi puussa tapahtuu paljon muitakin muutoksia. Näille muutoksille tulisi löytää sopiva tasapaino, jotta puuaineksessa ei tapahdu liikaa negatiivisia muutoksia, mutta kuitenkin saavutetaan uudet parannetut ominaisuudet.

Puun modifioinnilla voidaan vaikuttaa esimerkiksi sen kosteusteknisiin ominaisuuksiin, kuten mittapysyvyyteen ja säänkestävyyteen. Nämä ominaisuudet yleensä paranevat modifiointiprosessin aikana, kun taas lujuustekniset ominaisuudet puolestaan lähes heikkenevät.

Avaintekijänä lähitulevaisuuden puunmodifioinnissa on siis löytää sopiva modifiointimenetelmä tiettyyn käyttökohteeseen, sillä on lähes varmaa, että yhtä ylivertaista menetelmää, jossa yhdistyvät kaikki positiiviset puuainekseen saatavat muutokset ei vain voida kehittää.

Avainsanat: puun modifiointi, lämpökäsittely, asetylointi, furfulointi

Lahti University of Applied Sciences
Wood Technology

LAITINEN, MARKUS:

Wood modification methods

Thesis of wooden structures technology, 77 pages, 2 attachment pages

Spring 2008

ABSTRACT

The meaning of this thesis is to report the current state of the field of wood modification. If all goes well in the near future the woodworking industry and the wood modification industry has a huge potential on the everyday markets. Wood as a material always needs to be somehow modified before its final use so this thesis concentrates on the main wood modification technologies. It also includes a brief review on the markets of wooden constructions. Wood modification could also have a significant meaning to the environmentally effective development.

Wood modification as a concept is to change the chemical structure of wood material. However, the altered wooden material always must be able to classify still as organic wood. For the wood modification technologies this thesis will process the heat treatment of wood, the acetylation of wood, the furfulation of wood and some other new modification methods.

Wood as a material is inhomogeneous and hygroscopic. In the nature there is massive amount of water stored inside of wood. Before using of timber its moisture content must be equalized to the level of the environment of its final usage. This means that when the timber is dried it shrinks – and so it shrinks also during its modification. Also other its features are altered during the modification. This is the challenge in the wood modification. Features of the timber must be altered but not too much.

The main point in near future of wood modification is to discover the right type of modification method for the specific target where timber is used. It is almost certain that man can not develop one ultimate product that contains all the positive features obtained through the wood modification.

Key words: wood modification, heat treatment of wood, acetylation of wood, furfulation of wood

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	PUUN MODIFIOINNIN TAUSTATEKIJÖITÄ	3
2.1	Puu ja sen kuivuminen	3
2.2	Puun lämpökäsittely	6
2.3	Energian tuotannosta	11
2.4	Markkinatilanteesta	12
2.5	Trooppiset puulajit	13
2.6	Ympäristönäkökohtia	14
2.7	Yhteenveto puun modifioinnin taustatekijöistä	17
3	LÄMPÖKÄSITTELY TEKNIIKAT	18
3.1	ThermoWood® – menetelmä	18
3.1.1	ThermoWood® – prosessi	19
3.1.2	ThermoWood® – ominaisuudet	20
3.1.3	ThermoWood® – menetelmän yhteenveto ja johtopäätöksiä	22
3.2	Plato – menetelmä	23
3.2.1	Plato – prosessi	23
3.2.2	Plato – ominaisuudet	25
3.2.3	Plato – menetelmän yhteenveto ja johtopäätöksiä	27
3.3	Perdure – menetelmä	29
3.3.1	Perdure – prosessi	29
3.3.2	Perdure – ominaisuudet	30
3.3.3	Perdure – menetelmän yhteenveto ja johtopäätöksiä	32
3.4	Retiwood – menetelmä	34
3.4.1	Retiwood – prosessi	34
3.4.2	Retiwood – ominaisuudet	35
3.4.3	Retiwood – menetelmän yhteenveto ja johtopäätöksiä	36
3.5	Muut lämpökäsittelymenetelmät	37
3.5.1	OHT / Menz Holz öljylämpökäsittelymenetelmä	37
3.5.2	Bi-oleothermal© – öljylämpökäsittely	39
3.5.3	Electroheating – lämpökäsittely sähkökentässä	40
3.6	Yhteenveto lämpökäsittelymenetelmistä	41

4	ASETYLOINTI	45
4.1	Accoya™ – asetylointimenetelmä	46
4.2	Indurite™ - <i>From Osmose UK</i>	49
4.3	Osmose UK – menetelmä	51
4.4	Asetyloinnin yhteenveto	53
5	FURFULOINTI	56
5.1	Kebony ASA – menetelmä	58
5.2	Furfuraalihartsit – impregnointi	59
5.3	Furfulointi – menetelmien yhteenveto	60
6	KEMIALLINEN MODIFIOINTI	61
6.1	DMDHEU ja sitruunahappokäsittely	62
6.2	m-DMDHEU eli N-methylol käsittely eli Belmadur menetelmä	62
6.3	Maleiinikäsittely	63
6.4	Vinyyliesteröinti (transesterification with vinyl esters)	64
6.5	Kemiallisesti modifioidun puun käyttöä	64
7	MUUT MODIFIOINTIMENETELMÄT	65
7.1	Di-happo – impregnointi	65
7.1	Bioswitch – menetelmä	65
7.3	Hydrophobation – menetelmä	66
8	PUUN MODIFIOINTIMENETELMIEN YHTEENVETO	67
8.1	Lahotuskokeissa havaittua	70
9	MODIFIOIDUN PUUN MAHDOLLISUUS RAKENTAMISESSA	71
10	MODIFIOIDUN PUUN TULEVAISUUS	75
	LÄHTEET	79
	LIITTEET	82

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoitus on selvittää puun modifioinnin eri tekniikoita, niillä aikaansaatavien muutosten eroavaisuuksia ja soveltuvuutta eri käyttökohteisiin. Tarkoitus on myös selvittää markkinoiden potentiaalia käyttökohde huomioiden. Lisäksi tavoitteena on pohtia puun modifiointimenetelmien mahdollisuuksia ja tulevaisuudennäkymiä muuttuvassa maailmassa, jossa ympäristöystävällisyyden merkitys kasvaa kuluttajien keskuudessa.

Lämpökäsitelty puu on hiljalleen tehnyt tuloaan ihmisten tietoisuuteen varsinkin rakentamisen yhteydessä, mutta markkinoilla on varmasti vielä kohteita, joissa sillä ja muilla modifiointitekniikoilla muunneltua puuta voisi käyttää tehokkaammin. Yksi kysymys onkin, rajoittavatko modifioidun puun käyttöä ihmisten asenteet vai kenties sen kustannukset? On tosiasia, että modifioitu puu on aina suhteessa kalliimpaa, mutta toisaalta se on myös ympäristöystävällisempää. Tämän ei pitäisi olla käytön lisäämisen kannalta ongelma nykypäivänä ainakaan länsimaissa, joissa ihmiset vaurastuvat ja alkavat pikkuhiljaa kantaa tosissaan huolta ympäristöstä sekä kannattavat kestävästä kehityksestä.

Markkinamahdollisuuksia on varmasti myös suomalaisille ulkomaiden markkinoilla ajatellen koko tuotantoketjua aina sahatavaran jalostuksen laitevalmistajista talotoimittajiin. Mukaan lähteminen vaatii kylläkin tietynlaista pioneerihenkeä ja rohkeutta. Lisäksi tarvitaan taitoa hoitaa oikein ja riittävässä laajuudessa markkinointi. Suomesta löytyy tähän tarkoitukseen valmiita auttajiaakin, kuten esimerkiksi Finpro, joka auttaa ja edistää kaikenlaisten suomalaisyritysten kansainvälistymistä.

Suomi on ollut varsinkin lämpöpuun kehittämisessä kärkimaa jo vuosikausia, mutta esimerkiksi kotimaassa puurakentamista on aikaisemmin voimakkaasti rajoittanut lainsäädäntö. Tästä johtuu, että Suomessa aletaan vasta nykyaikoina päästä tasolle, jossa tuotantoketju nimenomaan asuinrakentamisessa toimii joustavasti.

Ulkomailla on kehitetty myös paljon puun modifiointitekniikoita. Perinteisen lämpökäsittelyn lisäksi maailmalla puuta lämpökäsitellään öljyssä ja sitä käsitellään erilaisten kemikaalien avulla. Puurakentamiseen on puolestaan maailmalla ollut jo pidemmän aikaa paremmat edellytykset.

Vaikka välillä saattaa tuntua, ettei eri menetelmillä saada suuria eroavaisuuksia lopputuloksiin, on silti mahdollista, että yhdellä tavalla modifioitu puu soveltuu johonkin kohteeseen paremmin kuin toisella tavalla modifioitu.

Lämpöpuun ohella muita potentiaalisia modifiointimenetelmiä ovat puun asetylointi ja furfulointi. Nämä muodostavat laajemman perustan modifioidun puun tuotantokentällä, jossa on lisäksi aivan uusiakin menetelmiä – tosin suurin osa niistä vielä laboratorioasteella.

Tarkoitus on siis esitellä samassa työssä johtavia ja potentiaalisimpia puun modifiointimenetelmiä, koska niistä on hyvin vähän tietoa, varsinkaan suomeksi, samoissa kansissa.

2 PUUN MODIFIOINNIN TAUSTATEKIJÖITÄ

Puu on monikäyttöinen ja kaunis materiaali, mutta se on myös orgaanista ainetta ja siksi altis säänvaihteluille sekä biologisille tekijöille. Tämän vuoksi puu on aina modifioitava – tai ainakin kuivattava - ennen sen lopullista käyttöä. (Thermo-Wood® 2003.)

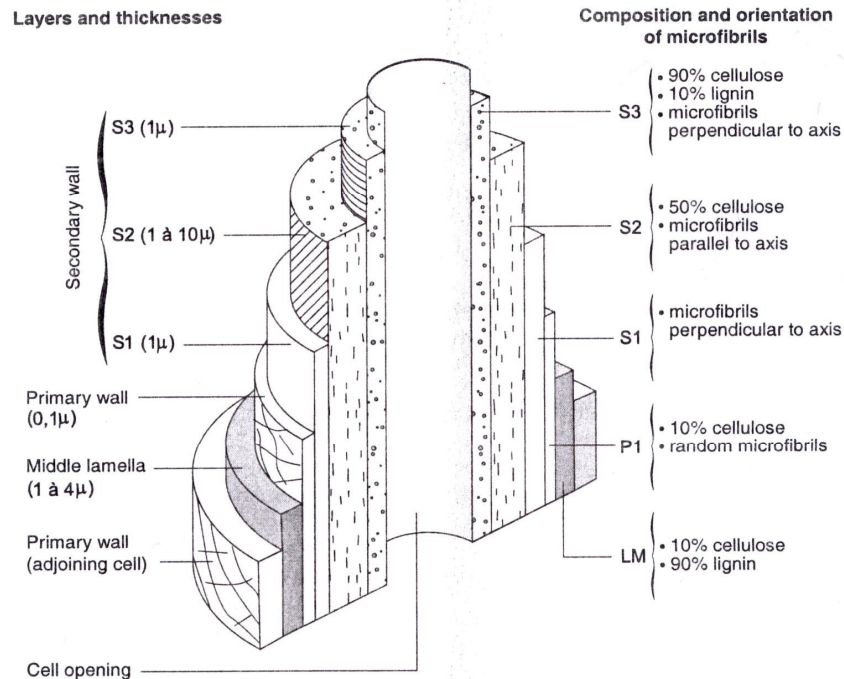
Itse asiassa myös perinteinen puun kuivaaminen on eräänlaista - huomattavasti miedompaa – modifiointia, sillä esimerkiksi sen lujuusominaisuudet muuttuvat kuivauksen aikana jonkin verran. Tunnetumpia modifiointimenetelmiä ovat varmasti lämpökäsittely ja kemiallinen modifiointi, mutta kaikkia yhdistää se, että niillä yritetään jollakin tavalla parantaa jotakin puun tiettyä ominaisuutta. Tässä luvussa käydään läpi puun ominaisuuksia, jotka vaikuttavat sen käyttäytymiseen sitä modifioitaessa. Nämä seikat tulee tietää ennen kuin voi ajatella itse modifiointimenetelmiä. Puun modifiointitapoja on siis useita, mutta ne kaikki perustuvat puun kemiallisen rakenteen muuttamiseen eri menetelmiä hyödyntäen.

Yleinen mielipide alkaa olla, että modifioitu puu tulisi luokitella tarkasti ja ajatella sitä kokonaan uutena puulajia tai materiaalina. Modifioitu puu on kuitenkin käsitteenä vielä tavallista puuta, ja se on voitava ajatella koko elinkaarensa osalta täysin saastuttamattomaksi ilman, että siihen siis olisi lisätty tai siitä vapautuisi mitään myrkyllisiä aineita. (Hill 2006.)

2.1 Puu ja sen kuivuminen

Puuaines koostuu soluista, jotka sisältävät 40–50 % selluloosaa, 20 % hemiselluloosaa ja 25–30 % ligniiniä. Selluloosa on *polymeeri*, hemiselluloosa *hiilihydraatti* ja ligniini *aromaattinen yhdiste*. Pienimpänä puusolun rakennusaineena voidaan pitää mikrofibrilliä.

Heat treated Timber © CTBA 2003



KUVIO 1. Puukuidun soluseinämän rakenne (Chanrion & Schreiber 2003)

Puuaines on epähomogeenistä hygroskooppista ainetta, ja luonnossa siihen on varastoituneena runsaasti vettä soluonteloihin ja soluseinämiin. Puuta kuivataan nykyään yleisesti lämmön avulla, jolloin se alkaa kutistua puunkosteuden laskiessa alle puun syiden kyllästymispisteen (PSKP). PSKP on kaikilla puulajeilla noin 30 % kosteudessa. Aluksi puu kuivuu sen pyrkiessä säilyttämään tasapainokosteutensa, jolloin vettä siirtyy lähinnä kapillaarisesti puun viileämmistä (kosteammista) keski-osista kohti lämpimämpää (kuivempaa) puun pintaa. PSKP:n alapuolisissa kosteudessa siirtyminen tapahtuu diffuusion avulla, jolloin kosteus vuoroin tiivistyy soluseinään ja haihtuu soluonteloon liikkuen samalla ulospäin kohti puuta ympäröivää ilmaa. Tämän diffuusioliikkeen saa aikaan paine-ero puun pinnan ja sisäosan välillä.

Puun pinnalta vesi kulkeutuu pois ilmavirran mukana ja puun kuivuminen riippuu kin kuivausilman nopeudesta ja lämpötilasta, koska lämmin ilma kykenee sitomaan enemmän vettä itseensä. Ongelmallista ei ole veden poiskuljettaminen vaan sen siirtäminen puun sisäosista pinnalle. Veden haihtumisnopeus puun pinnalta ei saa olla liian suuri. Sen tulisi olla yhtäläinen veden siirtymisnopeuteen puussa. Liian

nopea kuivuminen aiheuttaa erilaisia kuivausvirheitä, mutta lämpöenergia on kuitenkin kuivauksen perusedellytys. Lämpöä ei saa olla liikaa, mutta sitä pitää olla riittävästi tehokkaan veden poissiirron aikaansaamiseksi. Yhden vesikilon poistamiseen puusta tarvitaan lämpöenergiaa vähintään 2250-2500kJ, ja talvisin myös jäänyt vesi on myös sulatettava. Tästä johtuen huomattava osa kuivauskustannuksista ja sahatavaran kustannuksista koostuukin lämpöenergiasta. (Raggers 2002; Militz 2002.)

Monet tekijät vaikuttavat kuivauksen onnistumiseen, kuten esimerkiksi rimoitus, sahatavaran dimensio, sahaustapa sekä aikaisemmin mainitut kuivausilman ominaisuudet. Taulukoissa 1 ja 2 on esimerkkejä puun kosteusolosuhteista ja kuivausajoista.

TAULUKKO 1. Erityyppisten puutavaroiden kosteuspitoisuuksia (Salmi 2003)

Puun kosteudet	Kosteus- %
Mänty- ja kuusitukki	95 %
Koivutukki	75 %
Lautatarhakuiva	18–25 %
Vientikuiva	18–20 %
Höyläyskuiva	15–18 %
Rakennuspuusepätkuiva	10–12 %
Huonekalukuiva	7-9 %

TAULUKKO 2. Puun kuivausaikoja verrattuna puun paksuuteen (Salmi 2003)

Kuivausaika, mänty	
Paksuus (mm)	Aika (d)
19–25	2-3
50	4-5
63	5-6
75	6-7

Puun kuivaukseen on kehitetty vuosien saatossa monia eri menetelmiä. Nykyään puuta kuivataan yleisimmin, joko erilaisissa kamari- tai kanavakuivaamoissa. Prosessi on hyvin samankaltainen näissä kaikissa, joissa samaan lopputulokseen vain päästään hieman eri tekniikoilla. Eroja löytyy esimerkiksi käytetyistä lämpötiloista tai ilman puhallussuunnasta. Joissakin kuivaamoissa käytetään höyrytystä tai vesikostutusta. Periaatteena kuitenkin on, että haluttu lopputulos määrää tekniikan ja tietty tekniikka määrää tietyn lopputuloksen. Kuivausta on kokeiltu aina kemiallisesta kuivauksesta mikroaaltokuivaukseen, mutta näillä ei joko päästä tyydyttäviin kosteuspitoisuuksiin, tai sitten ne ovat epätaloudellisia ja liian kalliita. Nykyinen kuivaustekniikka ei tule enää muuttumaan radikaalisti, ellei sitten sähköenergia tule todella edulliseksi mahdollistaen kuivauksen suorittamisen sähkökentässä. (Raggers 2002; Militz 2002.)

Kuivaus tapahtuma ja -prosessi kannattaisi kuitenkin aina pitää mahdollisimman yksinkertaisena.

2.2 Puun lämpökäsittely

Lämpökäsittelyn historia on oikeastaan hyvin pitkä, sillä jo viikingit olivat ymmärtäneet, että polttamalla puun pinnan se kesti pidempään ulkokäytössä. Tieteellisesti lämpökäsittelyä on tutkittu 1930-luvun alkupuolelta lähtien pääasiassa Saksassa, Yhdysvalloissa, Ranskassa ja Alankomaissa. Suomalaisen ThermoWood® prosessin on kehittänyt VTT. (Lämpöpuuyhdistys ry 2003.)

Lämpökäsittelystä voidaan puhua, kun puun fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia muutetaan yli 160 °C lämpötiloissa. Tarkemmin sanottuna käsittely tapahtuu 160 – 245 °C samalla, kun suojakaasun happipitoisuutta vähennetään hallitusti. Tämä aiheuttaa kemiallisia muutoksia puun solurakenteessa. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 183.)



KUVIO 2. Jartek Termo Oy:n toimittama lämpökäsittelylaitos Stora Ensolla Kotkassa (© Jartek)

Pelkkä puun kuivaus muuttaa lähinnä puun mekaanisia ominaisuuksia (kuten lujuutta, jolloin sen kimmomoduuli muuttuu) poistamalla siitä kosteutta, mutta lämpökäsittely muuttaa puun kemiallista rakennetta. Lämpökäsittelyä tehdään perinteisesti kammiossa, jossa sahatavara on ympäröity jollakin suojakaasulla, mutta myös erilaisiin nesteisiin upottamalla. Lämpökäsittelyn aikana puu kuivuu usein absoluuttisen kuivaksi, jolloin siinä tapahtuu *pyrolyysiä*. (ThermoWood® 2003.)

Suurimmat puuaineksessa tapahtuvat muutokset lämpökäsittelyn aikana johtuvat hemiselluloosan hajoamisesta. Puussa olevat uuteaineet hajoavat helpoimmin, selluloosa ja ligniini hitaimmin. (ThermoWood® 2003.)

Puun komponentteja siis hajoaa, mutta myös uusia yhdisteitä ja sidoksia syntyy. Hemiselluloosien O-asetyyliiryhmien hajotessa syntyy etikkahappoja. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 248.)

Ligniini on ikään kuin puun liima-ainetta, joka hajoaa 280–500 °C lämpötilassa, mutta siinä tapahtuu muutoksia jo 150 °C lämpötilassa. Selluloosa ja hemiselluloosa hydrolysoituvat lämmön vaikutuksesta pienimolekyylisiksi sokereiksi, kuten gluukoosiksi ja ksyloosiksi. Selluloosa hajoaa 240–360 °C lämpötilassa ja hemiselluloosa 200–260 °C lämpötilassa. Hemiselluloosan hajotessa syntyvä etikkahappo edistää katalyytin tavoin selluloosan hajoamista. (Raggers 2002; Militz 2002; The Plato Technology 2002; ThermoWood® 2003.)

Mitä enemmän puussa on O-asetyyliryhmiä, sitä herkemmin se hajoaa. Lisäksi lehtipuut hajoavat nopeammin, koska niissä on enemmän hemiselluloosaa ja vähemmän ligniiniä. Asetyyliryhmien hajoaminen vähentää kuitenkin veden imeytyvyyttä, joka tekee puusta mittapysyvämpää suhteessa kosteuden muutoksiin. (ThermoWood® 2003.)

Prosessin aikana molekyylien välillä tapahtuu verkottumista, joka puolestaan kovettaa puuta. Selluloosan kiderakenteen muuttuminen aiheuttaa mekaanisten ominaisuuksien muuttumista, joka käytännössä tarkoittaa mikrohalkeamien syntymistä puuhun. Puristuslujuuden on huomattu kasvavan hieman, mutta puusta tulee samalla ikään kuin kovaa ja haurasta. (Chanrion & Schreiber 2003.)

Puusta siis haihtuu aineita, jotka normaalisti antavat sille lujuutta. Lujuus korreloi tiheyden kanssa, mutta on huomattu, että kun lämpökäsittelyssä sekä lujuus että tiheys laskevat, pysyy paino-lujuus suhde kuitenkin samana. (ThermoWood® 2003.)

TAULUKKO 3. Puusta haihtuvia aineita (ThermoWood® 2003)

PUUSTA HAIHTUVIA AINEITA	
Furaaniyhdisteet	Uuteaineet
Metanoli	Hiilimonoksidi
Terpeenit	Hiilidioksidi
Alfa-pineeni	Fenoliset yhdisteet
Furfuraali	Aromaattiset ei-fenoliset yhdisteet
Kamfeeni	Vesihöyryä
Heksanaali	Tervaa (<400 °C hemi->terva)
TVOC	Happoja
3-kareeni	Muurahaishappoa
Limoneeni	Etikkahappo
Nephtaleeni	Rasvahappoja
	Hartsihappoja

Happi pyritään saamaan kokonaan pois lämpökäsittelykammioista, koska se paitsi lisää tulipalovaaraa, myös edesauttaa selluloosan hajoamista. Selluloosan hajoaminen taas alentaa puun lujuusominaisuuksia. Hapeton tila voidaan luoda käyttämällä suojakaasuna esimerkiksi vesihöyryä tai typpeä. (Militz 2002.)

Tutkimuksissa on havaittu yhtäläisyyksiä puun mikrorakenteissa lämpökäsittelyssä puussa ja 350 vuotta vanhassa puussa. Jotta puun ominaisuudet eivät heikkenisi liikaa, ei lämpökäsittelyä kannata tehdä yli 220–230 °C lämpötiloissa. Sivulla kymmenen olevassa taulukossa (TAULUKKO 4.) on lueteltu puun ominaisuuksissa tapahtuvia muutoksia ja niitä aiheuttavia tekijöitä. (ThermoWood® 2003.)

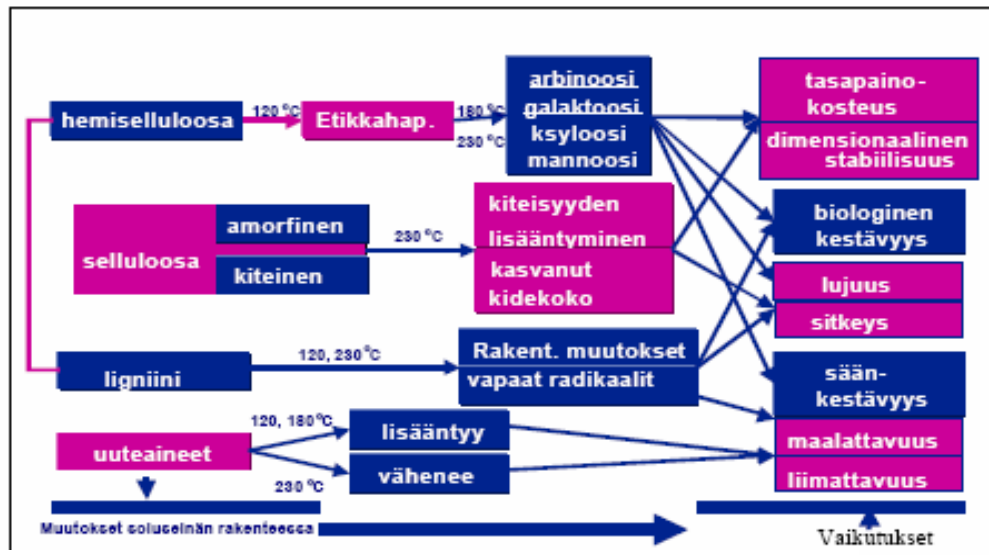
TAULUKKO 4. Puussa lämpökäsittelyn aikana tapahtuvia muutoksia ja käsittelyn lopputulokseen vaikuttavia tekijöitä (ThermoWood® 2003)

PUUSSA TAPAHTUVIA MUUTOKSIA	LOPPUTULOKSEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ
Painohäviöitä	Puunlajin ominaisuudet
Lujuusominaisuudet muuttuvat	Edeltävät vaiheet
Kosteuseläminen pienenee	Esilajittelu
Tasapainokosteus alenee	Esikuivaus
Lämmönjohtavuus vähenee	Kuivauskaava
Lämmöneristävyys paranee	Lämmön nostonopeus
Sisä- ja ulkotalkeamia	Maksimilämpötila
Lahonkesto paranee	Maksimilämpötilan pitoaika
Työstettävyyys muuttuu	Tasaannutus
Väri tummuu	Jäähdytys
Haju muuttuu	Höyryn määrä
pH-arvo alenee	Ilman kiertosuunnan vaihtelu
	Hapen määrä kamarissa
	Kuorman ominaisuudet
	Sijoittuminen kamarissa/tukissa, sahaus
	Rimoitus

Lämpökäsittelyn rajuuden vuoksi siihen käytettävän sahatavaran tulee olla hyvälaatuista ja huolellisesti lajiteltua. Lämpökäsittelyllä puulle pyritään antamaan uusia käyttösovelluksia ja jalopuumaista ominaisuuksia, jolloin voitaisiin korvata ulkomaisten ja trooppisten puulajien käyttöä. Prosessi saattaa joskus synnyttääkin harkakuvan sen tuottamasta laadusta, jolloin tulee muistaa, että lämpökäsittely puu on jo siis valmiiksi korkealaatuista. (ThermoWood® 2003.)

Lämpökäsittelymenetelmissä prosessin kulku on periaatteessa hyvin samanlainen riippumatta menetelmästä, mutta muuttujien kasvaessa saatuun lopputulokseen on olemassa paljon erilaisia variaatioita. Kaavan muodostuminen riippuu esimerkiksi puulajista, sen dimensioista ja alkukosteudesta. Puu kuitenkin aina ensin kuivataan ja seuraavaksi lämpökäsitetään hyvin korkeassa lämpötilassa. Tämän jälkeen puu jäähdytetään ja tasaannutetaan käyttökohdettaan vastaaviin olosuhteisiin. Eri teknologioista kerrotaan myöhemmin tarkemmin.

Lopuksi mainittakoon, että lämpökäsitellyn puun väri muuttuu valon vaikutuksesta. Ligniinin fenoliryhmät absorboivat valoa, joka käynnistää fotokemiallisia reaktioita, jotka johtavat puun rakennemolekyylien hajoamisen. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 57.)



KUVIO 3. Lämpökäsitellyn puun reaktiomekanismit (ThermoWood® 2003)

2.3 Energian tuotannosta

Energiaa kuluu veden poistamiseen puusta noin 2250–2500 kJ/kg. Lisäksi lämpöä menetetään vuotojen kautta, sitä sitoutuu rakenteisiin ja talvisin joudutaan myös sulattamaan jäätä. Haluttaessa lämpöä voidaan ottaa myös talteen erilaisten lämmönvaihtojärjestelmien avulla. (Salmi 2003.)

Tarvittava energia voidaan tuottaa millä tahansa halutulla energiantuottomenettämällä. Koska lämpökäsittelylaitokset yleensä sijaitsevat jonkin toisen teollisuussovelluksen yhteydessä, voidaan energiaa esimerkiksi tuottaa muiden prosessien hukkaenergialla tai vaikkapa polttamalla haketta. Lisäksi prosessin aikana syntyvät prosessikaasut ohjataan nykyään lähes aina jonkinlaiseen polttokattilaan, joka auttaa osaltaan tehokkaan energiataloudellisuuden saavuttamisessa ja estää hajuhaitto-

ja. Kuivaamoissa lämpöenergia siirretään kamariin yleisesti kuumavesipattereilla ja lämpökäsittelylaitoksissa öljypattereilla.

2.4 Markkinatilanteesta

Puun hinta on viime aikoina noussut voimakkaasti, ja nousua on edelleen odotettavissa muun muassa kiristyneiden Venäjän tuontipuutullien takia. Hintaa nostavat myös lisääntynyt kysyntä sekä pienet raaka-aine varastot. Vuoden 2006 huhtikuusta vuoden 2007 huhtikuuhun on tukkien kantohinta yksityismetsistä noussut männyn kohdalla 35 % ja kuusella 29 %. Huhtikuussa 2007 kantohinnat olivat männyllä 60,60 €/m³ ja kuusella 61,71 €/m³. Kuitenkin, 2007 tammi-maaliskuussa metsäteollisuuden tuotannon määrä kasvoi 2 % verrattuna vuotta aikaisempaan, joten kysyntä ei ainakaan ole hiipunut ja tuotteista ollaan tämän perusteella valmiita maksamaan aikaisempaa enemmän. (Salonen & Tenhunen 2007.)

Etelä-Suomen Sanomissa olleen artikkelin mukaan venäläisen puun tuonti voitaisiin korvata kotimaisin hakkuin, joka käytännössä tarkoittaa hakkuiden lisäystä hetkelisesti jopa 20 miljoonaan m³:n vuodessa. Venäjältä on tuotu nyt keskimäärin 11–17 miljoonaa m³ vuodessa. Hakkuiden lisäys kotimaassa onnistuu kuitenkin vain jos samalla parannetaan metsänhoitoa. Suomen metsät kasvavat vuodessa noin 100 miljoonaa m³, josta noin 70 % korjataan talteen tai poistuu luonnollisesti. Näillä näkymin Venäjän puutullit nousevat vuoden 2009 alusta nykyisestä 10 eurosta 50 euroon. (ESS 28.12.2007.)

Suomessa sahatavaran tuotanto oli vuoden 2007 tammi-maaliskuussa 3,3 miljoonaa m³, joka vastaa 4 % kasvua verrattuna vuotta aikaisempaan. Männyn osuus oli 1,7 miljoonaa m³ ja kuusen 1,6 miljoonaa m³. Tästä määrästä on vientiin mennyt mäntyä yhteensä 590 000 m³ ja kuusta 530 000 m³, joten männyn vienti on kasvanut vuodessa lähes 6 % ja kuusen vienti vähentynyt yli 5 %. Mäntysahatavaran vientihinta on kasvanut vuodessa 225€/m³ (kasvua 32 %) ja kuusen 206€/m³ (kasvua 26 %). Myös muissa tärkeissä sahausmaissa, kuten Itävallassa, Saksassa ja Ranskassa, on tuotanto lisääntynyt. (Salonen & Tenhunen 2007.)

Suomessa toimii useampia lämpöpuun valmistajia, jotka valmistavat lämpöpuuta kotimaan markkinoille ja vientiin. Tuotanto on kasvanut viime vuosina tasaisesti ja vuonna 2006 ThermoWood® – tuotanto oli noin 56 000 m³. Tuotannossa käytetään laadukasta sahatavaraa, koska lämpökäsittelyprosessi on raju. Tästä huolimatta hukkatavaraa syntyy aina jonkin verran ja vuoden 2006 tuotannon saavuttamiseksi käytettiinkin raaka-ainetta yhteensä noin 64 000 m³, joten hyötykäyttöön tuotannosta saadaan noin 88 %. (ThermoWood – tuotantotilastot 2006.)

Viimeisenä kolmena vuotena markkinat ovat jakaantuneet siten, että tuotannosta Suomeen jää noin 15 %, EU – alueelle viedään noin 75 % ja muualle maailmaan 10 %. Eniten käsitellään havupuita (mänty ja kuusi), joiden osuus on lähes 90 %. Suomen lämpökäsittelykapasiteetti oli vuonna 2006 yhteensä 98 000 m³. (ThermoWood – tuotantotilastot 2006.)

Suomessa on kymmenen lämpöpuun valmistajaa ja alalla toimii kaksi laitevalmistajaa. Laitevalmistajia ovat Jartek Termo Oy ja Valutec Oy. (Lämpöpuuyhdistys ry 2007.)

2.5 Trooppiset puulajit

Trooppisia puita käytetään niiden ulkonäön, kovuuden ja hyvän luonnollisen säänkestön vuoksi ja koska niiden avulla tuotteista saadaan helpommin ”yksilöllisiä”. Euroopassa trooppisia puulajeja käytetään eniten kalusteisiin, lattioihin, oviin ja ikkunoihin niin sisällä kuin ulkonakin. Vuonna 2001 trooppisia puita käytettiin 2,3 miljoonaa m³, josta puusepäntuotteisiin 48 %, kalusteisiin 43 % ja lattioihin vain 3 % (yhteensä 12 milj. m³ trooppiset + paikalliset). Lisäksi tulee huomata markkinoiden kannalta, että Euroopan lattiamarkkinoista vain 5 % on puulattioita. Vuonna 2005 kulutus oli 100 miljoonaa m², josta 55 % oli tammea ja 16,6 % trooppisia puita. Trooppisten puiden käyttö on – onneksi – vähentymässä johtuen hintojen noususta, saatavuuden laskusta, kasvavasta ympäristötietoisuudesta sekä kalusteiden valmistuksen laskusta. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 13–14.)

Trooppisista metsistä saadut puut ovat harvoin peräisin sertifioiduista metsistä ja ne on usein laittomasti hakattuja. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 14.)

Lämpökäsittelmällä puuta voidaan laskea trooppisten puulajien kulutusta, ja esimerkiksi ainakin Kanadassa on kasvavaa innostusta lämpökäsittelyihin puutuotteisiin. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 183.)

2.6 Ympäristönäkökohtia

Kioton sopimuksen mukaan päästöjä tulee vähentää vuosina 2008–2012 5,2 % alemmaksi vuoden 1990 tasoa. Tähän tavoitteeseen pääsemistä auttaa osaltaan puun käytön lisääminen, jolloin edistetään myös metsien uudistumista. Kasvaessaan metsät varastoivat hiilidioksidia (*hiilenä*), eli metsänhoidolla ja -käytöllä on merkittävä rooli myös ilmastonmuutoskysymyksessä. Puu on uusiutuva materiaali, jolla voidaan korvata päästöjä aiheuttavia materiaaleja. (Wood Focus Oy 2007.)

On laskettu, että Euroopassa on käytössä noin 60 miljoonaa tonnia puutuotteita ja että yksi kuutiometri puuta muun materiaalin sijaan vähentää hiilidioksidin määrää 0,8 tonnilla. Tavallisessa puutalossa on puuta 12–20 m³, joka vastaa noin 13 tonnia hiilidioksidia. Paitsi, että puusta rakentaminen on edullisempaa, niin ympäristöön vapautuu noin 8 kertaa vähemmän hiilidioksidia kuin jos rakennus olisi tehty vaikkapa betonista. Lisäksi puu aiheuttaa paljon vähemmän kustannuksia koko elinkaarensa aikana. Euroopassa on tavoite nostaa puutalojen osuus 10 % vuotuisessa uudisrakentamisessa. (Wood Focus Oy 2007.)

Euroopassa istutetaan enemmän uutta puuta kuin vuodessa kaadetaan, ja metsät ovatkin kasvaneet jo viimeiset 60 vuotta. Koko vuotuisesta kasvusta korjataan vain 65 % ja hiilinielu kasvaa 252 miljardilla m³:llä vuosittain. Kasvava puu imee lähes yhden kilon hiilidioksidia jokaista kasvamaansa kiloa kohti. Energiataloudellisuus tehostuu, jos puu käytettäisiin lopulta polttoaineena ja sillä korvattaisiin fossiilisia

polttoaineita. Puun kierrättäminen lisää nieluvaikutusta, sillä puu sitoo hiilidioksidin niin kauan, kunnes se hävitetään. (Wood Focus Oy 2007.)

Puutuotteiden valmistuksessa tuotetaan jo nyt yli 75 % energiasta puujätteestä ja energiapuusta. Lisäksi puun korjuuseen, kuljetukseen, jalostukseen ja kierrätykseen kuluu vähemmän energiaa kuin muihin rakennusmateriaaleihin verrattuna. Puunjalostus ei vapauta myrkkypäästöjä eikä edistä myrkkujen leviämistä, se ei tuota myöskään kasvihuonekaasuja ei vahingoita otsonikerrosta. (Wood Focus Oy 2007.)

Alla on lueteltu CO₂-päästöjä eri valmistus menetelmien näkökulmasta (kg/rakennus m²) vuonna 2003:

- liimapuu 1,5

- sahatavara 1,4

- teräs 5,2

- teräs malmista 19,3

- betoni 11,1

(Wood Focus Oy 2007.)

Metsien hiilidioksidivarastot vuonna 2003:

- 350 miljardia tonnia maanpinnan yläpuolella
- 800 miljardia tonnia juurissa ja humuksessa
- 760 miljardia tonnia ilmakehässä
- 20 miljardia tonnia Euroopan metsissä
- 10 miljardia tonnia runkokuussa
- yhteensä 1150 miljardia tonnia

Hiilidioksidi palautuu kiertoon vasta kun puu poltetaan tai se hajoaa. Puutuotteenakin puu kasvattaa hiilinielua ja toimii hiilivarastona. (Wood Focus Oy 2007.)

2.7 Yhteenveto puun modifioinnin taustatekijöistä

- Puun solussa on 40–50 % selluloosaa, 20 % hemiselluloosaa ja 25–30 % ligniiniä ja solu kutistuu kosteuden laskiessa alle PSKP:n.
- Vesikilon poistaminen puusta kuluttaa 2250–2500 kJ lämpöenergiaa eikä kuivuminen saa olla liian nopeaa.
- Lämpökäsittely muuttaa puun fysikaalisia ominaisuuksia ja kemiallista rakennetta:
 - Suurimmat muutokset johtuvat hemiselluloosan hajoamisesta.
 - Happi edesauttaa selluloosan hajoamista, jolloin muuttuu lujuus.
 - Kiderakenteen muutokset muuttavat mekaanisia ominaisuuksia.
 - Verkottuminen lisää kovuutta.
 - Veden imeytyvyyttä vähentää asetyyliyhmiä vähentäminen.
- Lämpökäsiteltävä sahatavara oltava hyvälaatuista, Suomessa käsitellään 90 %:sti havupuuta.
- Puun hinta on kasvussa, samoin sahatavaran ja modifioidun puun tuotanto.
- Metsät ja puun käyttö sitoo hiilidioksidia ja puun modifiointi vähentää trooppisten puulajien käyttöä.

3 LÄMPÖKÄSITTELY TEKNIIKAT

Suomi on johtavia maita puun lämpökäsittelymenetelmien tutkimisessa. Suomessa tutkimuksesta on vastannut, sitä kehittäneet ja kehittävät edelleen yhteistyössä VTT, sekä useat alan yritykset ja asiantuntijat.

3.1 ThermoWood® – menetelmä

Prosessin on patentoidut ja kehittänyt teolliseksi VTT ja patentteja hallitsee Licentia Oy. Patentit ovat voimassa Belgiassa, Sveitsissä, Saksassa, Tanskassa, Espanjassa, Ranskassa, UK:ssa, Kreikassa, Irlannissa, Italiassa, Hollannissa, Portugalissa, Ruotsissa, Japanissa ja USA:ssa. Tuotemerkin omistaa Finnish ThermoWood® Association, ja se on rekisteröity EU:n lisäksi Sveitsissä ja Kanadassa. Kanadassa toimii rinnakkainen ThermoHout® -tuotemerkki. Laadunvalvontaa suorittaa Inspecta Oy, joka kerää tietoa ja tarkastaa raakamateriaalin ja modifioidun puun laatua. Lisäksi se ohjeistaa lämpökäsittelyä suorittavia laitoksia käytettävien prosessiparametrien suhteen sekä modifioidun puun varastointia ja pakkausta. 90 % Suomessa lämpökäsittelystä puusta tulee PEFC – sertifioiduista metsistä (Programme of the Endorsement of Forest Certification). (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007.)

ThermoWood® – menetelmässä yleisimmin käytetyllä lämpökäsittelykamarilla voidaan tuottaa vuodessa lämpökäsiteltyä puuta 10 000 m³, pelkkää kuivausta sillä voitaisiin suorittaa 20 000 m³. Maksimilämpötila näillä kamareilla on 230 °C. Uuni kuluttaa energiaa kuivauksessa 300–500 kWh/ m³ ja lämpökäsittelyvaiheessa 100–200 kWh/ m³. Luonnollisesti energiankulutukseen vaikuttavat puun ominaisuudet ja puulaji. (Viktorsson 2007.)

Vuosina 2001 – 2006 toimitettujen kamarien tuotto on yhteensä 90 000 m³ vuodessa. Näistä toimituksista 18 on tuotantolaitoksia ja seitsemän laboratorio laitteita. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007.)

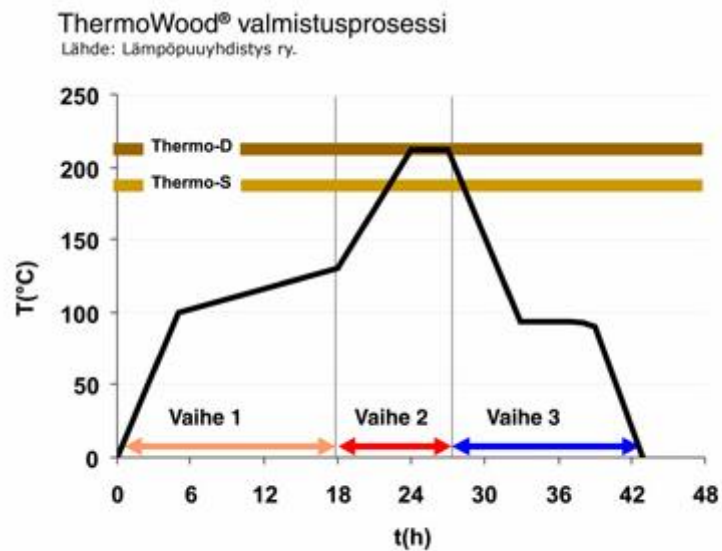
3.1.1 ThermoWood® – prosessi

ThermoWood® prosessi kulkee pääpiirteittäin kaavaa alkulämmitysvaihe, kuuma-kuivausvaihe, lämpökäsittelyvaihe (jossa lämmönnosto- ja lämmönpitovaihe), sekä tasaannutus ja jäähdytysvaiheet. (ThermoWood® 2003.)

Alkulämmitys vaiheessa puun lämpötila nostetaan melko nopeasti noin 100 °C, jolloin puuta kuivataan ennen varsinaista kuumakuivausvaihetta. Vapaa vesi poistuu ja puun kosteus laskee alle PSKP:n, sillä liika kosteus kuumakuivauksessa johtaa huonompaan lopputulokseen.

Kuumakuivauksessa lämpötila nostetaan noin 130 °C neljästä aina 15:sta tunnin ajaksi, eli kuivaus vie vain 20 - 30 % perinteisen kuivauksen vaatimasta ajasta. Tällöin puu plastisoituu, eli kestää paremmin muodonmuutoksia. Lisäksi havupuiden pihka poistuu lähes kokonaan. Seuraavaksi lämpötilaa aletaan nostaa – mikä ei saa tapahtua liian nopeasti - ja puu kuivuu lähes absoluuttisen kuivaksi. ThermoWood® prosessissa puuta käsitellään kahteen eri luokkaan Thermo-S ja Thermo-D, joiden käsittelyasteet riippuvat käytettävästä maksimilämpötilasta. Kun lämpötila on nostettu halutulle tasolle (185–215 °C), se pidetään siinä noin kahdesta kolmeen tuntia. Joskus käytetään myös muuta kuin yllä olevaa käsittelylämpötilaa, jos haluttu lopputulos tai puulaji sitä vaatii. Lämpökäsittelyvaihe on merkittävin lopputuloksen kannalta; se määrää esimerkiksi värin muuttumisen ja sen, kuinka ominaisuudet heikkenevät tai paranevat. Lämpökäsittelyn aikana puusta haihtuu aineita ja hemiselluloosan ja ligniinin hajoaminen kiihtyy. (ThermoWood® 2003.)

Viimeiseksi puuta jäähdytetään ja tasaannutetaan viidestä 15:sta tuntia. Kamariin pumpataan korkeapaineista vettä, joka sitoo koostumuksensa vuoksi hyvin lämpöä ja lämpötila laskee. Tässä vaiheessa puulle annetaan myös sen loppukäyttöä vastaava kosteus, jolla minimoidaan mahdollinen hukka (minimoidaan myöhemmät muodonmuutokset) ja varmistetaan mittapysyvyys. Vaikka lämpötila jääkin kauaksi puun itsesyttymislämmöstä (noin 280 °C), pidetään happipitoisuus silti lämpökäsittelyn aikana kolmen ja viiden prosenttiyksikön välillä. (ThermoWood® 2003.)



KUVIO 4. ThermoWood® prosessi ajan ja lämpötilan funktiona sisältäen päävaiheet 1, 2 ja 3 eli kuivauksen, lämpökäsittelyn ja jäähtymisen (ThermoWood® 2003)

3.1.2 ThermoWood® – ominaisuudet

TAULUKKO 5. ThermoWood® lämpökäsittelymenetelmällä käsitellyn puutavaran ominaisuuksien muutoksia

ThermoWood® ominaisuuksia			
Taivutus lujuus	- 10 – 20 %	UV-valo	Harmaannuttaa
Vetolujuus	- 20 – 50 %	Painohäviö	- 10 – 15 %
Puristuslujuus	+ 10 – 30 %	Tasapainokosteus	alle 6 %
Leikkauslujuus	- 1 – 40 %	Hygroskooppisuus	
MOE	- 4 – 30 %	Kosteuseläminen	- 50 %
MOR		Kestoikä	~ 20 a
Kovuus	ei muutu	Hinnanlisäys	n 33 %

ThermoWood® lämpökäsittely menetelmällä päästään lopputuotteessa alle 6 % loppukosteuksiin. (Viktorsson 2007.)

Huomattakoon, että taivutuslujuudessa tapahtuu merkittäviä muutoksia vasta yli 200 °C lämpötiloissa. Lisäksi lujuusominaisuuksiin vaikuttaa se, että puun elastisuus katoaa ja se muuttuu kovemmaksi mutta samalla hauraammaksi. Lahotuskokeessa on huomattu, että puu ei varsinaisesti enää lahoa käsittelyn jälkeen, vaan se muuttuu pysyvässä vesikosketuksessa hauraaksi ja hajoaa sen vuoksi. Tästä huolimatta myös painohäviöitä tapahtuu jonkin verran lahotuskokeessa. (ThermoWood® 2003.)

Oikein käytettynä ThermoWood® kestää noin 20 vuotta, eli se vastaa painekyllästettyä sahatavaraa.

Kanadassa on tehty suomalaisella laitteistolla ja menetelmällä testejä sikäläiselle Jack Pine männylle, joilla etsittiin eroavaisuuksia kyseisen puulajin ominaisuuksissa lämpökäsittelyn ja normaalisti kuivatun välillä. Tulokset olivat samansuuntaisia kuin on saatu muuallakin muille puulajeille, eli puulajien voidaan olettaa käyttäytymän prosessin aikana hyvin samankaltaisesti (eri männyt esimerkiksi). (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 183-186.)

3.1.3 ThermoWood® – menetelmän yhteenveto ja johtopäätöksiä

TAULUKKO 6. ThermoWood® – prosessin ominaisuuksia ja vaikutuksia puuhun

Vaihe	Lämpötila	Aika	HUOM!
Alkulämmitys	~ 100 °C	N/A	Kuivuu alle PSKP:n
Kuumakuivaus	~ 130 °C	4-15 h	Puu plastisoituu
Lämpökäsittely	~ 185–215 °C	2-3 h	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Absoluuttisen kuivaksi ▪ Happea 3-5 %, vesihöyryssä ▪ Aineita haihtuu ▪ Hemiselluloosa ja ligniini hajoaa ▪ Ominaisuuksien muutos
Jäähdytys	-	5 -	Vesisuihkutuksella
Tasaannutus	-	– 15 h	Kosteus palautuu, päästään alle 6 %

ThermoWood® – prosessin kuivausvaihe siis kuluttaa energiaa 300–500 kWh/m³ ja lämpökäsittelyvaihe 100–200 kWh/m³. Taivutuslujuus muuttuu merkittävästi vasta yli 200 °C lämpötiloissa, jolloin puun elastisuus katoaa. Samalla puu kovenee ja haurastuu. Tämä lämpökäsittelymenetelmä sopii useimmille puulajeille.

Puusta haihtuvien ja kondensoituvien aineiden takia lämpökäsittelyrakennukset on valmistettava ruostumattomasta teräksestä, ja eristyksen on oltava hyvä. Lämpö tuotetaan öljyllä tai sähköllä ja prosessikaasut poltetaan. (ThermoWood® 2003.)

Koska käytettävä maksimilämpötila ei nouse niin korkeaksi, että se vaikuttaisi merkittävästi selluloosan hajoamiseen, on lujuusominaisuuksissa tapahtuvien muutosten oltava seurausta hemiselluloosan ja ligniinin muutoksista. Näiden muutokset vaikuttavat myös kosteusteknisiin ominaisuuksiin, kuten mittapysyvyyteen ja tasapainokosteuteen sekä biologiseen- ja säänkestävyyteen. Pintakäsittelyvyyden muuttuminen johtuu uuteaineiden lisääntymisestä.

3.2 Plato – menetelmä

Plato -lämpökäsittelymenetelmä on kehitetty Hollannissa. Se eroaa muista tekniikoista erityisesti siten, että siinä on kaksi erillistä lämmitysvaihetta, joita erottaa välikuivausvaihe. Molemmilla lämmityskerroilla käsittelykammiossa on vesihöyryä. Alun perin kehittäjänä on toiminut lähteen mukaan SHELL Laboratories. (Chanrion & Schreiber 2003.)

3.2.1 Plato – prosessi

Käsittely alkaa esikuivausvaiheella, jossa sahatavara kuivataan noin 18 % +/- 2 % kosteuteen. Tätä seuraa nk. hydrotermolyysivaihe, jolloin lämpötila nostetaan 150–180 °C välille samalla, kun kammiossa vallitsevaa painetta kasvatetaan. (Chanrion & Schreiber 2003.)

Ensimmäisen lämmityskerran jälkeen puuta kuivataan lämpökäsittelyvaihetta varten normaalilla puunkuivausmenetelmällä 60–70 °C noin 10 % kosteuteen, jonka jälkeen lämpökäsittely suoritetaan normaalipaineessa jälleen 170–190 °C lämpötilassa. (Chanrion & Schreiber 2003.)

Viimeisenä tässäkin prosessissa on tasaannutusvaihe, eli sahatavaran kosteus nostetaan 0-1 % kosteudesta sen lopullista käyttökohdetta vastaavalle tasolle 5-6 %. (Raggers 2002; Militz 2002.)

Prosessi perustuu hemiselluloosan ja ligniinin muuttamiseen kemiallisesti lämmön avulla. Puuhun on jätettävä riittävästi kosteutta esikuivausvaiheessa, jotta voidaan yhdistää kahdella eri lämmityskerralla aikaansaavat muutokset. (Chanrion & Schreiber 2003.)

Kosteutta ei saa kuitenkaan olla liikaa, mutta se mahdollistaa soluseinämissä tapahtuvat muutokset jo suhteellisen alhaisissa lämpötiloissa vähentäen virheiden syntymistä. (Militz 2002; The Plato Technology 2002.)

Hydrotermolyysivaiheessa hemiselluloosa depolymerisoituu, eli polymeerejä muuttuu aldehydeiksi. Samalla muodostuu yhtä tai kahta orgaanista happoa ja ligniinin reaktiivisuus kasvaa. (Chanrion & Schreiber 2003.)

Selluloosa ei muutu hydrotermolyysivaiheessa ollenkaan, sillä se aiheuttaisi mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä. (Militz 2002.)

Toisessa lämmitysvaiheessa aikaisemmin syntyneet aldehydit reagoivat reaktiivisten ligniinimolekyylien kanssa. Tämä synnyttää ei-polaarisia yhdisteitä, jotka verkottuvat puun solurakenteeseen (*cross-linking*). (Chanrion & Schreiber 2003.)

Prosessiajoille on annettu eri lähteissä erilaisia aikoja. Esikuivausaika riippuu luonnollisesti raaka-aineen alkukosteudesta:

- hydrotermolyysivaihe: 4-5 h (Raggers 2002; Militz 2002), 15-45min (Chanrion & Schreiber 2003)
- välikuivaus: 3-5 d, 3-4 d
- lämpökäsittely: 14–16 h, 14–18 h
- tasaannutus 2-3 d, 2-15 d



KUVIO 5. Plato käsittelyä laboratoriossa (The Plato Technology 2002)

Prosessin energia tuotetaan ympäristöystävällisillä menetelmillä ja kondenssivedestä kerätään talteen prosessinaikana haihtuvat aineet. Myös paineistettu höyry otetaan talteen ja käytetään matalapaineisen höyryn kehittämiseen. (Raggers 2002; The Plato Technology 2002.)

3.2.2 Plato – ominaisuudet

TAULUKKO 7. Plato lämpökäsittelymenetelmällä käsitellyn puutavaran ominaisuuksien muutoksia

Plato - ominaisuuksia			
Taivutus lujuus	- 5 - 50 %	UV-valo	
Vetolujuus	- 30 - 50 %	Painohäviö	< 5 %
Puristuslujuus	+ 0 - 5 %	Tasapainokosteus	5 - 6 %
Leikkauslujuus		Hygroσκοoppi-	
MOE	+ 0 - 10 %	suus	+ 30 - 50 %
MOR	- 5 - 20 %	Kosteuseläminen	+ 50 %
Kovuus	alenee	Kestoikä	
		Hinnanlisäys	100 - 400 €/ m ³

Lujuuksien muutoksille on lähteistä riippuen kerrottu eri arvoja, mutta suurusluokka ja muutoksen suunta käyvät selvästi esille, tosin olettaisin tulosten antavan pienemmällä vaihteluvälillä olevia tuloksia.

Plato – prosessissa puun mittapysyvyys kasvaa merkittävästi, koska veden imeytyvyys alenee ja koska käsittely tasoittaa dimensiomuutosten suhdetta tangentiaalisen-radiaalisen suunnan välillä. Lähteen mukaan näin käsitelty puu sopisi jopa maa ja vesikosketuksiin. Prosessi vaikuttaa mielenkiintoisesti sienienvastustuskykyyn, ruskealahon kestoon vaikutetaan tasaannutusvaiheella ja valkolahon kestoon hydrotermolyysivaiheella. MOE:lle (Modulus Of Elasticity, eli kimmomoduuli) on annettu arvoksi $10\,000\text{ N/mm}^2$ ja MOR:lle (Modulus Of Rupture eli murtolujuus) $65\text{--}78\text{ N/mm}^2$. Käytön suhteen mainittakoon, että tiheys saattaa jopa laskea 10 % ja myös iskunkestokyky alenee, millä on merkitystä ainakin lattiamateriaalina käytön suhteen. Plato -menetelmällä käsitellyllä puulla luvataan voitavan korvata esimerkiksi alumiini- ja PVC-materiaaleja, kyllästettyä puuta, sekä trooppisia puulajeja eri käyttökohteissa. (The Plato Technology 2002; Plato Info Blad 2005.)

Plato – lämpökäsittelymenetelmä lisää sahatavaran arvoa noin $100 - 400\text{ €/m}^3$, joka muodostuu esimerkiksi mekaanisen käsittelyn, energian, veden kulutuksen ym. aiheuttamista kustannuksista. Lisäksi $75\,000\text{ m}^3$ vuodessa tuottavan tehtaan kustannusarvioksi on kerrottu jopa 10–15 miljoonaa euroa. Hinnan lisäys on siis suhteellisesti edullisempi, mutta itse laitteiston hankinta todella kallis ja prosessi aikaa vievä. (PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000; Chanrion & Schreiber 2003.)

Herättääkin hieman epäilyksiä, voidaanko kuutiointia pitää noin alhaisena pienimmilläänkään. Yhtiö on tehnyt konkurssin jo kahdesti, mutta ainakin tähän asti toiminta on aina jatkunut ja toimii myös parhaillaan.

3.2.3 Plato – mentelmän yhteenveto ja johtopäätöksiä

TAULUKKO 8. Plato – prosessin ominaisuuksia ja vaikutuksia puuhun

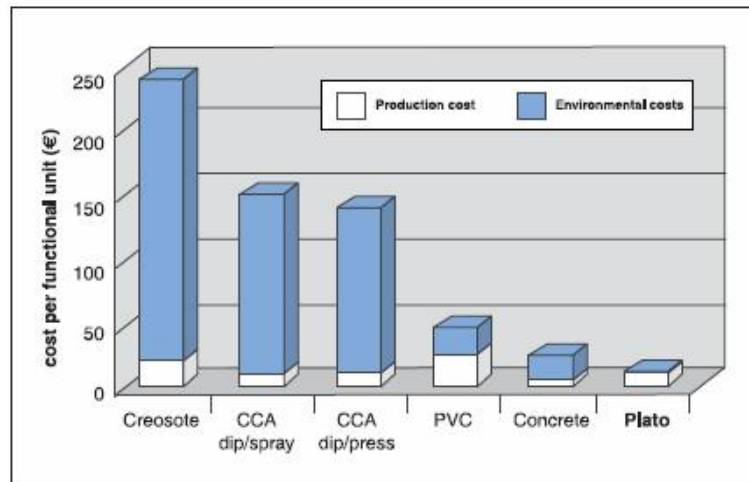
Vaihe	Lämpötila	Aika	HUOM!
Esikuivaus	N/A	N/A	noin 18 % kosteuteen
Hydrotermolyysi	~ 150 - 180 °C	4 - 5 h	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Paineessa, vesihöyry ▪ Vesi + lämpö muuttaa ▪ Hemiselluloosa aldehydeiksi ▪ Orgaanisia happoja ▪ Ligniini reaktiiviseksi
Välikuivaus	~ 60 – 70 °C	3 - 5 d	
Lämpökäsittely	~ 170 – 190 °C	14 – 16 h	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ei painetta, vesihöyry ▪ Aldehydi ja aktiivinen ligniini reagoivat ▪ Ei-polaarisia yhdisteitä ▪ Verkottuu solurakenteeseen
Tasaannutus	N/A	2 – 3 d	Kosteus palautuu

Hydrotermolyysivaiheessa puussa oleva kosteus mahdollistaa tärkeät muutokset alhaisissa lämpötiloissa. Prosessin tavoitteena on muuttaa hemiselluloosaa ja ligniiniä.

Vaikka prosessi ei käytäkään yli 200 °C lämpötiloja, ja se tähtää siihen, ettei selluloosa muuttuisi ollenkaan, niin lujuusominaisuudet ovat huonommat kuin esimerkiksi ThermoWood®:lla. Tämä johtuu todennäköisesti juuri kahdesta lämmityskerrasta. Kaksi lämmityskertaa vie lisäksi paljon energiaa, eikä ole mitään selvää yksittäistä ominaisuutta, joka puhuisi tämän tai paineen käytön puolesta – ellei sitten osoittaudu kokeissa, että näin käsiteltyä puuta voisi todella käyttää maa- ja vesikosketuksissa. Mielestäni menetelmä on liian monimutkainen ja kallis, jotta kehityisi maailmanlaajuisesti menestykseksi, vaikka kapasiteetti laitoksella olisikin suuri.

Hollannissa lämpökäsiteltyä puuta markkinoidaan brandina, ”puuna jolla on yliveritaiset ominaisuudet”. Käytön lisäämisen puolesta puhuu myös ekologisuus, puu ei

aiheuta merkittäviä ympäristökustannuksia enää käytöstä poistettaessa toisin kuin esimerkiksi kyllästetyt puut (ks. KUVIO 6.).



KUVIO 6. Eri materiaalien elinkaari kustannuksia muodossa euroa per toiminnallinen yksikkö (The Plato Technology 2002)

Lähteet aiheuttavat jossakin määrin ristiriitaisia tuloksia; esimerkiksi mekaanisten ominaisuuksien luvataan pysyvän lähes muuttumattomina, mutta samalla kerrotaan, paljonko kukin lujuus on alentunut. Kolmipistetaivutuskokeilla puu on luokiteltu lujuusluokkaan C18 (NEN-EN 228), mutta sitä ei silti suositella kantaviin rakenteisiin. (The Plato Technology 2002; Plato Info Blad 2005.)

Plato – menetelmää aiotaan tutkia sovellettavaksi myös kosteuttakestävien lastulevyjen tuotannossa ja viilu- ja vanerituotteina. Haluttuihin tuloksiin yritetään päästä pelkästään prosessivaiheiden muokkaamisella. Tällä hetkellä tuotannon kapasiteetti on 24 000 m³/a ja Hollannissa on arvioitu lähitulevaisuuden tarpeen maailmanlaajuisesti voivan olla jopa miljoonia m³ vuodessa. Tuotetta aiotaan edelleenkin markkinoida brandina, ja se on ymmärrettävää kun käsittely lisää hintaa 100- 400€/m³. (The Plato Technology 2002 Plato; Info Blad 2005.)

3.3 Perdure – menetelmä

La Bois Perdure – tekniikan on kehittänyt Kanadalainen PCI Industries Inc., jonka tavoitteena oli luoda kemialliset ja myrkylliset käsittelyt korvaava menetelmä. (Raggers 2002) Teknologia on kuitenkin kehitetty ranskalaisen Company BCI-MBS – yhtiön pohjalle. (PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000.)

3.3.1 Perdure – prosessi

Menetelmä sallii prosessin aloittamisen tuoreella puulla, josta saadaan vesihöyryä käsittelykammioon. (PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000.)

Prosessi aloitetaan siis tuoreella puulla esilämmitysvaiheella lämpötilan noustessa 100–200 °C. Puuta kuivataan nopeasti, kunnes vapaa vesi on poistunut ja lämmitetään sen jälkeen jopa 230 °C, jolloin sitoutunut vesi poistuu ja lämpökäsittely tapahtuu. Suojakaasuna käytetään vesihöyryä, joka saadaan puussa alussa olevasta kosteudesta. Viimeisenä prosessissa on jaksotetusti tehtävä jäähdytysvaihe, jossa kammioon suihkutettava vesi höyrystyessään sitoo lämpöä. (Raggers 2002.)

Itse lämpökäsittely tapahtuu inertissä (hapettomassa) olosuhteessa, jolloin puussa tapahtuu pyrolyysiä. Puussa olevat kemialliset sidokset vahvistuvat, joka parantaa fysikaalisia ja mekaanisia ominaisuuksia. (Raggers 2002.)



KUVIO 7. Perdure – lämpökäsittelymenetelmän kamari (PERDURE 2002)

3.3.2 Perdure – ominaisuudet

TAULUKKO 9. Perdure – lämpökäsittelymenetelmällä käsitellyn puutavaran ominaisuuksien muutoksia

Perdure			
Taivutus lujuus	-	UV-valo	Harmaannuttaa
Vetolujuus	-	Painohäviö	1 – 1,5 %
Puristuslujuus	-	Tasapainokosteus	4 – 5 %
Leikkauslujuus	-	Hygroσκοoppi-	
MOE	-	suus	+ 50 %
MOR	- 30 – 40 %	Kosteuseläminen	Paranee
Kovuus		Kestoikä	
		Hinnanlisäys	100 €/ m ³

Lopputulokseen ja käsittelyn kestoajaan vaikuttaa, kuten muissakin teknologioissa, lähinnä puulaji ja sen dimensiot. Parhaiten käsittely sopii puille 6-200 mm paksuille kappaleille. (Raggers 2002.)

Tiheämpiä puita on vaikeampi käsitellä, koska ne halkeilevat enemmän jolloin niistä tulee suhteellisesti huonompilaatuista. (PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000.)

Käsittely on ympäristöystävällinen, josta ei synny lainkaan päästöjä ilmakehään. Kaikki puusta haihtuvat nestemäiset aineet kerätään talteen, ja ilmakehään vapautuu enimmäkseen vesihöyryä sekä todella pieniä määriä erilaisia yhdisteitä. (Raggers 2002.)

Puun lopulliset ominaisuudet riippuvat käytetystä puulajista sekä käytetystä maksimilämpötilasta. 230 °C käsittely aiheuttaa jopa 30–40% laskun MOR:ssa, jolloin puu siis haurastuu, ja sen rakenteessa tapahtuu katastrofaalisia pettämisiä. Testeissä on huomattu, ettei käsittely vaikuta poppelilajeihin yhtä voimakkaasti kuin mäntylajeihin. Tämä tarkoittaa siis, ettei puulajin tiheys ole ainut vaikuttava tekijä prosessin vaikutuksissa puuainekseen. (PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000.) Mäntylajit ovat tiheydeltään pienempiä.

Puu harmaantuu UV-valon vaikutuksesta parissa viikossa, mutta halkeilu tämän aiheuttamana vähenee parantuneen dimensiostabiilisuden ansiosta. Puu on siis pintakäsiteltävä, mutta se on tehtävä erikoisaineilla, koska puun pintajännitys on muuttunut dramaattisesti. Suurimpana ongelmana on hartsin ulostyöntyminen puusta. Hygroskooppisuus asettuu 4-5 % 10–12 % sijasta, jonka ansiosta myös biologinen kestävyys paranee. Käsiteltykin puu voi kuitenkin imeä vettä jopa yli 20 %, mutta se saadaan täysin pois uudelleen kuivattaessa. (PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000.) Tämä johtuu luultavimmin kappaleen avonaisista päistä, jolloin vesi pääsee helposti käsitellyssä muodostuneisiin onkaloihin eli päiden sulkeminen on tehtävä.

3.3.3 Perdure – menetelmän yhteenveto ja johtopäätöksiä

TAULUKKO 10. Perdure – prosessin ominaisuuksia ja vaikutuksia puuhun

Vaihe	Lämpötila	Aika	HUOM!
Esilämmitys	~ 100 - 200 °C	N/A	Alle PSKP
Kuivaus	~ 100 - 200 °C		Kuivataan edelleen
Lämpökäsittely	230 °C		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sitoutunut vesi pois ▪ Hapeton, vesihöyryssä ▪ Pyrolyysia ▪ Kemialliset sidokset vahvistuvat ▪ Fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet paranevat
Jäähdytys	N/A		Vesisuihkutus
Tasaannutus	N/A		Kosteus palautuu

Menetelmästä kertovaa internetsivustoa on viimeksi päivitetty vuonna 2002.

Kustannukset Perdure – menetelmällä toimivalle 8 m³ uunille, joka käsittelee vuodessa 3500 m³, on arvioitu olevan 500 000€ Tämä on jokseenkin edullinen, mutta kapasiteettia ei ole juuri nimeksikään. Kuitenkin kerrotaan, että valmistaja tarjoaa myös kahta erikokoista kamaria, joita voidaan yhdistellä haluttaessa moduulien lailla. Kapasiteetit syklin aikana ovat 8,75 m³ ja 10,5 m³ ja vuositasolla teoreettisesti 5250 m³ ja 6300 m³, eli isompi kamari on vain marginaalisesti suurempi. Tehollinen lämpöenergian tarve kamarille on 240kW. (Raggers 2002.)

Käsitellyn sahatavaran hinta on noin 100 €/ m³ kalliimpi verrattuna käsittelemättömään sahatavaraan. Kamarin energia tuotetaan kaasulla ja prosessin VOC – kaasut johdetaan polttimeen, jotta minimoidaan ilman saastutus. (PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000.)

Tälläkin menetelmällä käsitellyllä puulla pyritään korvaamaan trooppisia puulajeja ja kemiallisesti käsiteltyä sahatavaraa. Ideana on joskus ollut saada tehtyä huonompi-laatusesta puusta parempilaatuista käsittelyn avulla. (Raggers 2002.)

Prosessi kuitenkin on niin raju, että uskon huonolaatuisen sahatavaran virheiden vain korostuvan käsittelyn aikana. Mitä korkeampi käsittelylämpötila on, sitä enemmän säänkesto-ominaisuudet paranevat ja sitä enemmän puun mekaaniset ominaisuudet heikkenevät. Sienienkesto ominaisuuksien on kerrottu olevan jopa kemiallisesti käsitellyn puun luokkaa, mutta se ei silti sovellu käytettäväksi pitkäaikaisissa vesikosketuksissa. Ihmeellistä on, että lähteessä sanotaan ruuvinpitokyvyn pysyvän ennallaan ja naulanpitokyvyn paranevan 44 %. Kuitenkin samaan aikaan mekaanisten ominaisuuksien kerrotaan heikkenevän. Käsittelyn aikana syntyviä uuteaineita voidaan mahdollisesti käyttää lääke ja lannoiteteollisuudessa. (Raggers 2002.)

Tästä menetelmästä löytyi todella vähän merkittäviä tietoja, mutta se vaikuttaa käsittelylämpötilaa lukuun ottamatta hyvin samankaltaiselta verrattuna Thermo-Wood®:n.

3.4 Retiwood – menetelmä

Le Bois Réifié:n sanotaan olevan ensimmäinen puun lämpökäsittelymenetelmä, ja se on kehitetty Ranskassa. (Raggers 2002.)

New Option Wood – eli NOW, osti lisenssit tuotteeseen ja kehitti Retification® -menetelmän teolliseksi. *Retification* sana on yhdistelmä sanoista *reticulation* ja *torrefaction*, jotka tarkoittavat suomeksi *verkkoutumista* ja *kuivausta/paahdamista*. Lämpökäsittelymenetelmä sai alkunsa vuonna 1997, ja se perustuu puussa tapahtuvaan miettoon pyrolyysiin typpi-ilmakehässä. (Chanrion & Schreiber 2003.)

3.4.1 Retiwood – prosessi

Ennen lämpökäsittelyprosessin aloittamista sahatavara lajitellaan ja kuivataan tulevasta prosessista riippuen 10, 12, 14 tai 16 % kosteuteen. Käsittelyssä käytetään suojavaasuna tyyppiä, jota lisätään prosessin aikana tarpeen mukaan. Prosessinkulku määrittyy alkukosteuden, puulajin ja sahatavaran dimension, mukaan. Eniten puuaineksen käyttäytymiseen vaikuttaa sahatavaran paksuus. (Chanrion & Schreiber 2003.)

Aluksi sahatavaralle suoritetaan kuivaus 160–180 °C lämpötilassa, jolloin puuaines ei vielä modifioitu. Tämän jälkeen lämpötilaa nostetaan siis maksimissaan jopa 240 °C:n, jolloin puuaineksessa tapahtuu ns. lasittumista. Happipitoisuus pidetään kammiossa prosessin aikana alle 2 %, sillä lämpötila voi nousta jopa 240 °C. (Raggers 2002.)

Prosessin jäähditys tapahtuu vesisuihkutuksella, joka samalla prosessin loppuvaiheessa vähentää typen kulutusta ja puun ominaisuudet tuntien palauttaa puuhun kosteutta ja stabiloi sen siis lopullista käyttökohdettaan vastaavaan kosteuteen. Vesisuihkutuksen avulla saadaan myös kerättyä talteen prosessikaasuja, jotka myöhemmin erotellaan vedestä. Prosessi kestää (ilman esikuivausta) männyllä kahdeksan tuntia johon on vielä lisättävä kahden tunnin jäähdytysvaihe. Pyökillä aika on

viisi tuntia, ja esimerkiksi tiheällä/paksulla saarnella/pihlajalla 12 tuntia. (Chanrion & Schreiber 2003.)

3.4.2 Retiwood – ominaisuudet

Liimaus vaikeutuu, koska puun pintasolukko muuttuu ja hartsit sekä muut aineet saattavat työntyä pintaan. Myöskään veden imeytyminen puuhun ei ole samanlaista kuin käsittelemättömällä puulla. (Chanrion & Schreiber 2003.)

TAULUKKO 11. Retiwood – lämpökäsittelymenetelmällä käsitellyn puutavaran ominaisuuksien muutoksia

Retiwood -ominaisuuksia			
Taivutus lujuus	– 21 %	UV-valo	Harmaantuu
Vetolujuus	-	Painohäviö	
Puristuslujuus	-	Tasapainokosteus	4 – 5 %
Leikkauslujuus	-	Hygroskooppisuus	+ 50 %
MOE	-	Kosteuseläminen	+ 40 %
MOR	– 40 %	Käyttöikä	
Kovuus		Hinnanlisäys	150–160 €/m ³

Käsittelyn aikana puu haurastuu, koska murtolujuus voi laskea jopa 40 %. Kuten usein muillakin menetelmillä, puusta haihtuu ja poistuu käsittelyn aikana eri yhdisteitä, joka saa aikaan puun tiheyden laskua noin 8 % verran. Dimensiostabiiisuus paranee merkittävästi; yli 40 % niin tilavuudellisesti, säteittäisesti kuin tangentiaalimestikin. Käsittely vaikuttaa mittapysyvyyteen vasta yli 200 °C lämpötilassa käsitellynä ja 210 °C käsitelty voi olla mekaanisilta ominaisuuksiltaan vielä originaalia. Myös puun vastustuskyky sieniä ja hyönteisiä vastaan paranee. Tälläkin menetel-

mällä käsitellään vain jo valmiiksi hyvälaatuista sahatavaraa, koska käsittely korostaa puun luonnollisia virheitä. (Raggers 2002; Militz 2002.)

3.4.3 Retiwood – menetelmän yhteenveto ja johtopäätöksiä

TAULUKKO 12. Retiwood – prosessin ominaisuuksia ja vaikutuksia puuhun

Vaihe	Lämpötila	Aika	HUOM!
Lajittelu	N/A	N/A	
Kuivaus	~ 160 - 180 °C	N/A	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kuivaus 10 – 16 % ▪ Ei modifioitu
Lämpökäsittely	240 °C	8 h	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Typpi-injektio ▪ Happea alle 2 % ▪ Lasittumista ▪ Haihtuu aineita
Jäähdytys	N/A	2 h	Vesisuihkutus
Tasaannutus	N/A	N/A	Kosteus palautuu

Tällä menetelmällä toimivalle 8 m³ kamarille, jonka vuosikapasiteetti olisi 3500 m³, on kustannukseksi annettu noin 750 000€ Vuonna 2001 kapasiteettia on ollut yhteensä 8000 m³ verran vuodessa, joka on saatu kuudella puoliteholla pyörivän 3500 m³ vuodessa tuottavan kamarin avulla. (Raggers 2002; Militz 2002.)

Osasy korkeaan kustannukseen on se, että tekniikan energia luodaan sähköenergialla. (PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000.)

Toisen lähteen mukaan kustannukset ovat 457 300€ - 601 000€, johon sisältyy pelkkä lämpökäsittelykamari ilman suunnittelua, asennusta ja muita työkuluja. (Chanrion & Schreiber 2003.)

Menetelmä lisää sahatavaran hintaa 150–160 €/m³, mikä johtuu ilmakehää korkeamman paineen luomisesta kammioon käsittelyn ajaksi. (PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000.)

3.5 Muut lämpökäsittelymenetelmät

3.5.1 OHT / Menz Holz öljylämpökäsittelymenetelmä

Öljykäsittely tarjoaa toisenlaisen lähestymistavan puun lämpökäsittelyyn. Käsittely mahdollistuu, koska puun luonnollisten öljyjen ja hartsien kiehumispiste on korkeampi kuin käsittelyn vaatima lämpötila. Tunnetuimpia öljykäsittelyn kehittäjiä on saksalainen Menz Holz *OHT* -menetelmällään. (Raggers 2002.)

Menz Holz menetelmässä lämpökäsittelyä tehdään kasviöljyllä tai pellavansiemenöljyllä. Öljyn avulla lämpö saadaan siirtymään puuhun tasaisesti ja tehokkaasti, ja kammiossa vallitsevat olosuhteet pysyvät tasaisina jolloin puuaines saadaan täydellisesti eristettyä hapestä. (Chanrion & Schreiber 2003.)

Käsittely tehdään joko 180 °C, 200 °C tai 220 °C lämpötilassa riippuen halutuista mekaanisista ja kestävyysvaikuttavista ominaisuuksista, sekä öljynkulutuksesta. Käsittely tapahtuu kammiossa johon pumpataan öljyä säiliöstä, minkä jälkeen sitä kierrätetään puun ympärillä ja lopuksi pumpataan takaisin säiliöön. (Chanrion & Schreiber 2003.)

Riippumatta käsittelyasteesta ja käsittelylämpötilasta, haluttu lämpötila on pidettävä puun keskiosassa kahdesta neljään tuntia. Puun dimensio vaikuttaa luonnollisesti lämmön siirtymiseen puun keskiosaan. Öljyn tulee kestää vähintään 230 °C lämpötila. Prosessin aikana öljystä haihtuu aineita, mutta vastaavasti myös puusta liuke-

nee siihen aineita. Tästä huolimatta prosessi on silti erittäin ympäristöystävällinen ja CO₂-vapaa. (Raggers 2002.)

Käsittelysykli kestää kokonaisuudessaan noin 18 tuntia, johon siis sisältyvät lämmönosto-, käsittely- ja jäähdytysvaiheet.

TAULUKKO 13. OHT / Menz Holz öljylämpökäsittelymenetelmällä käsitellyn puutavaran ominaisuuksien muutoksia

OHT / Menz Holz			
Taivutus lujuus		UV-valo	Harmaannuttaa
Vetolujuus		Painohäviö	
Puristuslujuus		Tasapainokosteus	
Leikkauslujuus		Hygroσκοoppi-	
MOE	-	suus	
MOR	- 30 %	Kosteuseläminen	~ 43 %
Kovuus	- 51 %	Käyttöikä	
		Hinnanlisäys	60 – 90 €/m ³

Käsittelyyn kelpaavat kaikki puulajit. Menetelmällä tuotettu puu ei sovellu kovin hyvin ainakaan parketti tai muuhun pintakovuutta vaativaan teollisuuteen, sillä sen iskunkestokyky heikkenee jopa 51 %. OHT – käsitelty puu sopii kuitenkin jopa maaperäkosketuksiin, jos käsittely on tehty korkeassa lämpötilassa ja siihen on imeytetty runsaasti öljyä. (PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000; Raggers 2002.)

Käsittelyn jälkeen sahatavaran kimmomoduuli on enemmän kuin 11 000 N/mm², kun käsittely on suoritettu 200 °C lämpötilassa. Tämä tarkoittaa, ettei MOE:ssa ole tapahtunut ainakaan laskua. MOR laskee jopa 70 %:n alkuperäisestä arvosta, kun käsittely tehdään 220 °C. Maalattavuutta on testattu kahden vuoden sääaltistuskokeessa, josta on saatu hyviä tuloksia. Ainakin akryyli- ja vesipohjaisetmaalit soveltuvat käytettäväksi. Kahden vuoden jälkeen adheesio on jopa parempi kuin ilmalämpö -käsittelymenetelmillä. Liimattavuus muuttuu merkittävästi vasta jos puuhun on imeytetty paljon öljyä ja silloin tarvitaan modifioitua liimaa. Öljykäsitelty puu harmaantuu UV-valon vaikutuksesta. (PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000.)

Tämä menetelmä lisää sahatavaraan kustannuksia 60–90€/m³, ts. 200€/m³ maksava käsittelemätön sahatavara maksaisi käsittelyn jälkeen 265–295€/m³. Kapasiteetillaan 8500 m³ vuodessa tuottava laitos maksaa noin 450 000€ (PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000.)

OHT – tekniikalla käsitellyn puun ASE – arvo, eli mittapysyvyys, paranee noin 43 % niin tangentin kuin säteenkin suunnassa. Öljy siirtää lämmön tehokkaasti puuhun ja eristää sen täydellisesti hapestä. Käsittely tehdään 180 – 220 °C lämpötilassa ja tyhjiöpaineen avulla. Ohuilla kappaleilla koko käsittelysykli on noin 18 tuntia. Jos puuhun imeytetään runsaasti öljyä, voidaan tuotteita käyttää myös maakosketuksissa. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 210.)

3.5.2 Bi-oleothermal© – öljylämpökäsittely

Tässä käsittelyssä öljy impregnoidaan puuhun normaalissa ilmanpaineessa. Ensin puu upotetaan kuumaan 110 °C - 200 °C öljyyn, jolloin puuhun syntyy merkittävästi höyryä siinä valmiiksi olevasta kosteudesta. Toisessa vaiheessa puu upotetaan 20–80 °C öljyyn, jolloin jäähtyminen aiheuttaa veden kondensoitumista. Puun sisään muodostuva tyhjiö siis imee öljyn puuhun. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 87-95.)

Menetelmässä on käytetty erilaisia pellavansiemenöljyjä, joka on parantanut luonnollista kestävyyttä. On myös todistettu, että puusta tulee vastustuskykyistä termiiteille ja *longhorn* -kuoriaisille. Termitit hyökkäävät näin käsiteltyyn puuhun, mutta kuolevat myöhemmin. Kuoriaiset kuolevat 83 % varmuudella *biocide* -vapaille öljyillä ja 100 % *biocide* -pitoisilla öljyillä. Käsittely ei kuitenkaan ulotu läpipuun. Lahotuskokeessa on massahäviöksi todettu 6-21 % 16 viikon aikana, mutta lukua voidaan pienentää, jos käsittely öljyyn lisätään *biocide* -aineita. 12 viikon säänaltistuskokeessa ei havaittu eroavaisuuksia ulkonäössä pelkän öljykäsitellyn ja öljysekä pintakäsitellyn välillä. Tämä on kuitenkin outoa, sillä lähde kertoo UV-valon vaikuttavan jo öljyynkin. Menetelmään tarvittavan tehdas investoinnin kerrotaan olevan edullinen. Koska käsittely tehdään paineenkestoja vaativassa kammiossa, se ei luultavimmin onnistu suurille määrille kerrallaan, mikä rajoittaa kapasiteettia. Menetelmä vaatii vielä lisää tutkimusta, jotta saadaan selville oikea *biocide* määrä, mikäli niitä tarvitaan lopullisessa prosessissa. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 87–95.)

Menetelmä vaikuttaa potentiaaliselta siltä osin, että puusta voidaan saada vastustuskykyistä jopa hyönteisille, mutta rikkooko *biocide* lisääminen modifioinnin määritelmää, ja onko se silloin täysin ympäristöystävällistä?

Käsittely tehdään 110 – 200 °C lämpötilassa, mutta se ei ulotu läpi puun. Painohäviöksi on lahotuskokeissa saatu 6 – 21 % ja sahatavara kestää tuholaisia, mutta käsittelyä ei aina tehdä pelkällä luonnonöljyllä.

3.5.3 Electroheating – lämpökäsittely sähkökentässä

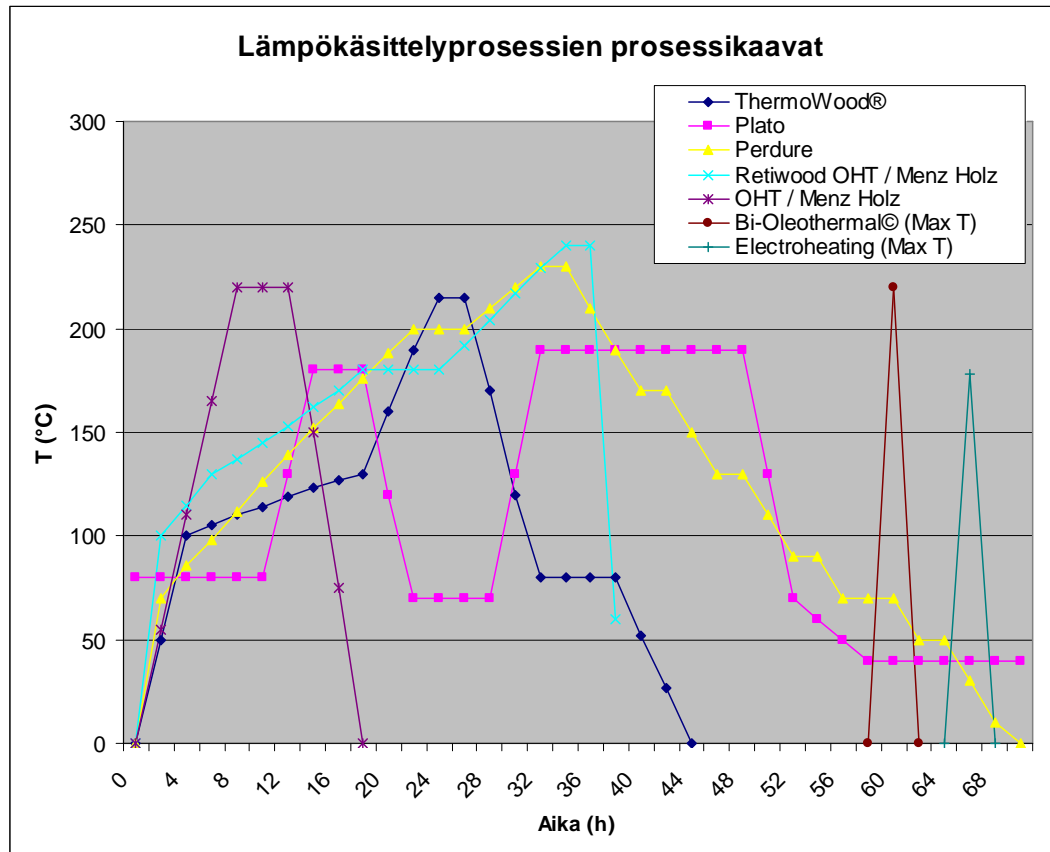
Tällä tarkoitetaan puun nopeaa lämpökäsittelyä sähkökentässä. Menetelmässä hyödynnetään siis sähköenergiaa puun modifioinnissa, joka on kuitenkin vasta hyvin varhaisella kokeiluasteella USA:ssa. Kappaleet käsiteltiin paineistetussa kattilassa, jossa ne olivat upotettuina tislattuun veteen ja niiden päihin asetettujen elektrodien avulla niihin johdettiin vaihtosähköä. Kattila paineistettiin ilmalla eri paineisiin, maksimissaan 552 kPa, jolloin käytetty lämpötila, joka sähköllä saatiin aikaan, oli

178 °C. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 263.)

MOR:ssa havaittiin pieniä muutoksia vasta korkeimmilla käsittelyarvoilla. Merkittävää muutosta mittapysyvyydessä ei tapahtunut. Käsittely muuttaa puun väriä ja sen potentiaaliksi mainitaan mahdollisuus petsauksen korvaajaksi. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 267.) Menetelmä on uusi ja vasta koeasteella, mutta jos ainut saavutettava hyöty on edellä mainittu, niin tulevaisuuden näkymät eivät mielestäni vaikuta kovin hyviltä. Lisäksi prosessi on varmasti suhteellisen kallis isossa mittakaavassa. Menetelmä on koeasteella.

3.6 Yhteenveto lämpökäsittelymenetelmistä

Puun lämpökäsittelyyn on siis olemassa erilaisia prosesseja, joita yhdistää puun lämmittäminen hyvinkin korkeaan lämpötilaan. Alla olevassa kuviossa (KUVIO 8.) on esitetty samassa koordinaatistossa erilaisten lämpökäsittelyprosessien kulku ajan ja lämpötilan suhteen. Kuvaajat ovat suuntaa antavia, koska tarkkoja aikoja ja lämpötiloja ei kaikille prosesseille löytynyt. Taulukosta kuitenkin voi havainnoida, kuinka eri prosessien eri vaiheet sijoittuvat suhteessa toisiinsa.



KUVIO 8. Eri lämpökäsittelyprosessien prosessikaaviot ajan ja lämpötilan funktiona.

TAULUKKO 14. Lämpökäsittelymenetelmien perusominaisuuksia.

Lämpökäsittelymenetelmien vertailua						
	Max T (°C)	Käsittelyperiaate	Paine	Syklin kesto	Kapasiteetti	Arvonlisäys
ThermoWood®	215	Vesi / Ilma	Ei	36 - 72 h	Korkea	33 %
Plato	190	Vesi / Ilma	Kyllä	84 - 108 h	Korkea	100 - 400
Perdure	230	Vesi / Ilma	Ei	-	Heikko	100
Retiwood	240	Typpi / Ilma	Ei	Kuiv. 8 + 2 h	Heikko	150–160
OHT / Menz Holz	220	Kasviöljy	Kyllä	18 h	Heikko	60 – 90
Bi-oleothermal©	200	Kasviöljy	Ei	-	Koeaste	-
Electro-heating	178	Tisl.vesi/sähkö	Kyllä	-	Koeaste	-

ThermoWood® on hyvä esimerkki verrattuna muihin menetelmiin, koska siitä löytyy erittäin runsaasti tietoutta, ja uusia tuloksia päivitetään jatkuvasti. Lisäksi tiedot ovat tarkkoja, kun taas melkeinpä kaikkien muiden menetelmien kohdalla informaatio on kiven alla paljon ja tiedot ovat järjestäen jo vanhentuneita. Tämä on merkittävä kilpailuetu suomalaiselle menetelmälle, koska se antaa välittömästi hyvän kuvan siitä kiinnostuneille.

ThermoWood – menetelmä vaikuttaisi lisäksi kaikkeinärkevimmältä vaihtoehdolta tehdä lämpökäsittelyä puulle. Esimerkiksi Plato menetelmän suurin heikkous on luultavasti sen pitkä prosessiaika, jolla ei kuitenkaan saavuteta mitään merkittävää etua suhteessa lopputulokseen. Prosessissa ei käytetä niin korkeita lämpötiloja kuin muissa menetelmissä ja sen idea onkin hyvä, mutta käytännössä se vaatii liian kauan aikaa. Tämä nostaa lopputuotteen hinnan liiankin korkeaksi, ja vaikka kapasiteetti olisi suuri tällaisella laitoksella, se ei kompensoi tarpeeksi sitä, että suurikapasiteetisella laitoksella on myös huomattavasti suuremmat kustannukset. Muista prosesseista tulee huomioida se, että niiden lämpötila saattaa nousta prosessin aikana jopa järjettömän korkeaksi. Tämä ei puhu lopputuotteen puolesta, koska liian korkea lämpötila tekee prosessista liian rajun ja puutavaran ominaisuudet kärsivät. OHT / Menz Holz – menetelmä saattaa olla ainoa vakavasti otettava kilpailija suomalaisel-

le ThermoWood®:lle, lyhyen prosessiajan ansiosta. Sillä käsitelty sahatavara kuitenkin menettää paljon kovuutta, mikä taas rajoittaa tuotteen käyttöä. Tämä puhuu jälleen sen puolesta, kuinka eri menetelmin käsitelty puutavara tulee luokitella loppukäyttökohteen mukaan ja vasta sitten vertailla niiden ominaisuuksia, kun tiedetään, kuinka ne käyttäytyvät pitkällä aikavälillä. Koeasteella olevista menetelmistä on vielä vaikea sanoa mitään konkreettista. Öljylämpökäsittely saattaa tulevaisuudessa olla avainasemassa käsiteltäessä puutavaraa kosteisiin tiloihin ja kohteisiin, joissa vaaditaan lahonkestoja. Sähkön avulla käsittely tuskin yleistyy, jollei sähkön tuottamiseen keksitä erittäin edullista menetelmää.

Voidaankin todeta, että lämpökäsittelyllä saadaan menetelmästä riippumatta kyllä tuotettua puutavaraa kohteeseen kuin kohteeseen, mutta ennen käsittelyä olisi jo tiedettävä sen käyttökohde, jotta prosessin kulku voidaan säätää siten, ettei se liika heikennä juuri siinä kohteessa vaikuttavia ominaisuuksia. Öljykäsittelymenetelmät tuskin kuitenkaan sopivat lattiamateriaaleiksi niiden pehmeiden vuoksi. Lämpökäsittellyt puumateriaalit sopivat esimerkiksi niin ulko- ja sisäkäyttöön moniin kohteisiin aina kalusteista lattioihin. Pintakäsittely, työstettävyyden ja liimattavuuden onnistuminen, vaikkakin tämä tulee usein huomioida etukäteen tarkasti, koska ne eivät välttämättä onnistu normaaleilla tuotteilla. Tarvittavat tuotteet ovat kuitenkin kohtuullisen helposti saatavilla.

4 ASETYLOINTI

Asetylointi tarkoittaa puun käsittelyä etikka anhydridilla (*anhydrous = vedetön*) ilman mitään katalysoivaa ainetta. Modifioinnin aikana tapahtuu reaktioita puun soluseinän hydroksyyli-, eli OH-ryhmissä ja soluseinä turpoaa jonkin verran. Hydroksyyli-ryhmiä muuttuu asetyyli-ryhmiksi, jolloin sivutuotteena syntyy etikkahappoa. Käsittelyn kerrotaan olevan eniten tutkittu puun modifiointi menetelmä, ja se vaikuttaa ensisijaisesti mittapysyvyyteen ja biologiseen vastustuskykyyn – eli lahonkestokykyyn. Modifioitu puu ei ole lainkaan myrkyllistä. Soluseinämiin sitoutuu kemiallisesti etikkatuotteita käsittelyssä ja menetelmän yhteydessä puhutaankin WPG:stä (Weight Gain Percent), eli painonlisäysprosentista, joka kuvaa käsittelyn astetta. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 71.)

Edellisen perusteella on yllättävää, ettei käsittelyssä tapahtuvaa mekanismia täysin tunneta. Oletetaan, että soluseinän kosteuspitoisuus alenee siihen sitoutuneen asetyylin vuoksi, joka myös aiheuttaa painon lisääntymisen. WPG:n ollessa 20 % luokkaa puusta tulee vastustuskykyinen ainakin ruskealahoja vastaan. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 33–38.)

Puun OH-ryhmiin sitoutuu normaalisti vettä, joka siis estetään asetyloinnilla. Koska hydroksyyli-ryhmät vähenevät merkittävästi, puun tasapainokosteus ja muut kosteustekniset ominaisuudet paranevat. Käsittely siis antaa samansuuntaisia tuloksia kuin lämpökäsittely, mutta ilman korkeita lämpötiloja, ja yksi tavallaan merkittävä tekijä on, ettei puun väri muutu ollenkaan – tosin sitä voidaan halutessa prosessin aikana myös muuttaa. (Chanrion & Schreiber 2003.)

Painonlisäys tarkoittaa käytännössä sitä, että puu stabiloidaan turvonneeseen tilaan. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 154.) Normaalisti puu turpoaa veden vaikutuksesta, mutta nyt se saadaan samaan ”turvonneeseen” tilaan ilman vettä, eli sen tilavuus kasvaa. Tästä käytetään nimitystä ”vihreä tilavuus”, joka vastaa 20 – 25 % WPG – arvoa. Soluseinän tilavuuden

muutos ei kuitenkaan korreloi kappaleen ulkoisten mittojen kanssa. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 135.)

4.1 Accoya™ – asetylointimenetelmä

Accoya™ – menetelmä tunnettiin ennen nimellä Titanwood, ja tällä nimellä toiminut yritys on työskennellyt vuodesta 2003 asti kaupallistaakseen asetyloidun puun. Yritys on myöhemmin nimennyt menetelmänsä Accoya™:ksi, jotta se saisi markkinoilla näkyvyyttä erillisenä tuotteena. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 19.)

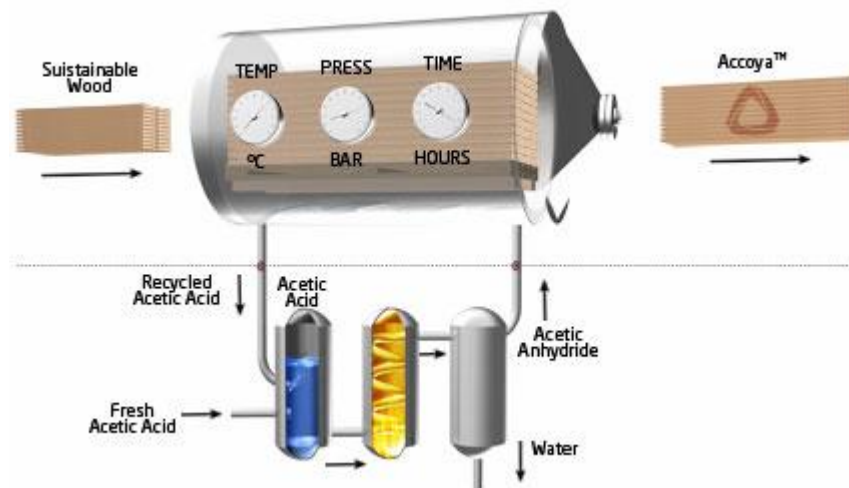
Tällä menetelmällä saatua tuotetta kuvaillaan välillä ominaisuuksiltaan jopa paremmaksi kuin paras trooppinen lehtipuu ja jotkin tiedemiehet pitävät sitä vertailukohtana kaikille muille käsittelymenetelmille. (ACCOYA 2007.)

Accoya™ on puun asetylointiprosessi, jota on tutkittu jo yli 75 vuotta. Prosessissa käytetään sekä havu-, että lehtipuita ja tarkoituksena on lisätä puussa olevien asetyylimolekyylien määrää. Prosessi tapahtuu paineistetussa kammiossa. Luonnollisesti puussa on asetyylimolekyyleja noin kahdesta neljään prosenttia, kun Accoya™ puussa niitä on jopa 20 %. Prosessissa ei siis lisätä puuhun mitään epäluonnollista kemikaalia, vaan kasvatetaan luonnollisestikin puussa esiintyvän asetyyliin määrää. (ACCOYA 2007.)

Puuhun lisättävä asetyyli muuttaa puun vapaat hydroksyyliiryhmät asetyyliiryhmiksi. Tämä vähentää veden imeytymiskykyä puuhun huomattavasti, kun vesi ei enää pysty sitoutumaan näihin ryhmiin. Puu on kuitenkin kuivattava ennen prosessia, jotta hydroksyyliiryhmät saadaan vapaiksi vedestä. Veden imeytymisen pienennyttyä myös lopputuotteen mittapysyvyys ja lahonkesto paranee ja puusta tulee myrkyllistä tuholaisille, muttei luonnolle. Myös puun lämmönjohtavuus alenee. Ainoat sivutuotteet prosessista ovat vähäiset määrät lannoitteita ja uuteaineita, sekä etikka-happoa, mutta nekin on hajotettavissa edelleen biologisesti. (ACCOYA 2007.)

Vuoden 2007 alussa alkoi ensimmäinen teollisen mittakaavan tehdas tuottaa Accoya™:aa. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 403.)

Accoya™ vahvuuksia ovat luotettavuus ja hyvä kestävyys sekä mittapysyvyys ja kesto UV-valon vaikutuksia vastaan. Laadunvalvonta perustuu prosessin aikana muodostuneen asetyyli- % seurantaan, josta voidaan estimoida lopullisen tuotteen ominaisuudet. Tällä menetelmällä voidaan jopa saavuttaa lahotuskokeessa sieniä vastaan kestoiluokka I. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 19–20.)



KUVIO 9. Accoya™ asetylointiprosessin prosessiperiaate (ACCOYA 2007)

Käsittelyssä puu käsitellään läpeensä, ja esimerkiksi sen kovuus paranee. Tämä suosii sen käyttöä ainakin kulutusta vaativissa pinnoissa. Männyn kovuus on 3950 N/mm^2 ja pyökillä 6950 N/mm^2 käsittelyn jälkeen suhteellisen kosteuden ollessa 65 % ja lämpötilan $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Lisäksi puuaines on erittäin mittapysyvää, olipa se sitten upotettuna veteen tai aivan kuivaa – kutistuminen ja turpoaminen vähenevät jopa 75 % tai enemmän. Accoya™ -käsiteltyä puuta luvataan voitavan käyttää jopa pysyvässä vesikosketuksessa - ei kuitenkaan suolavedessä - ja rakenteissa sen hyvän paino-lujuus suhteen ansiosta. (ACCOYA 2007.)

Esimerkiksi Accoya™ – menetelmällä modifioidusta puusta valmistettaville ikkunakarmeille luvataan 50 vuoden takuu kestävyydelle ja 12 vuoden takuu pintakäsittelylle. Käsittely vähentää puun kosteuselämistä ja käsittelee puun läpikotaisin. Raaka-aine saadaan hoidetuista metsistä, mikä edistää kestävästä kulutuksesta ja menetelmän luvataan olevan kaikkein ympäristöystävällisin eli 100 % ei-myrkyllinen. Kesto-ominaisuuksiltaan Accoya™ -puu voittaa Teakin, eikä puun värikään ei muutu UV-valon vaikutuksesta. (Accoya, A Giant Step Forward – esite.)

UK ikkunamarkkinoita hallitsee ei-puu materiaalit, johon on syynä esimerkiksi materiaalien hinta ja yleinen mielipide. Sama pätee myös mutta sama sopii ovi- ja verhoumateriaalimarkkinoille sisällä ja ulkona. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 431.)

Mittapysyvyys on kokeissa todettu 97,7 %, joka siis päihittää jopa käsittelemättömän teakin. *Janka* – kovuusarvon kerrotaan olevan 4000–7000 N/mm² ja taivutuslujuuden 80–115 N/mm². (ACCOYA 2007.)

Tällä menetelmällä käsitellyn sahatavaran mittapysyvyys voi parantua jopa 97,7 % ja sen lahonkesto paranee merkittävästi. Lisäksi sitä voidaan käyttää rakenteissa. Tuotteet eivät harmaannu UV-valon vaikutuksesta ja niiden kovuus paranee. Menetelmällä tuotteille voidaan antaa jopa 50 vuoden käyttöikä. Käsittely tehdään paineistetussa kammiossa, jossa puuhun lisätään aseteylimolekyyleja. Ennen prosessin aloittamista sahatavara on kuivattava, jotta puun hydroksyyliiryhmät saadaan vapaiksi vedestä. Prosessissa syntyvät sivutuotteet on hajotettavissa biologisesti ja niitä voidaan osittain käyttää myös lannoiteaineina.

4.2 Indurite™ - *From Osmose UK*

Alun perin Uusiseelantilaisen Indurite™ – menetelmän kehitys sai alkunsa vuonna 1985, kun etsittiin modifiointimenetelmää plantaasiviljellylle radiatamännylle parantamaan sen ulkonäköä. Lopputuloksena oli ns. synteettistä puumateriaalia. Prosessissa syntyy yhdisteitä, joita lisätään puuhun ”matkimaan” puun hemiselluloosaa ja ligniiniä. Ts. näin syntyi modifiointimenetelmä, jossa puuhun ”lisätään” puuta. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 23.)

Menetelmässä puuaines kyllästetään yhdisteellä, joka kovettaa puuta. Valmistuksen aloittamisen kerrotaan olevan edullista pääomatarpeen kannalta. Puusta tulee mittapysyvää, mutta se ei sovellu pitkäaikaiseen vesikosketukseen. Huomattavaa kuitenkin on, ettei käsittely värjää puuta, mutta toisaalta lahonkestokaan ei parane merkittävästi. Tuotetta voidaan käyttää siis lähinnä sisätiloissa esimerkiksi lattioissa. (Raggers 2002.)

Viljellyllä radiatamännyllä on luonnostaan suuret avoimet syyt ja pehmeä pinta, joka johtuu nopeasta kasvusta. Indurite™ – menetelmässä puusta tehdään kovempaa ja tiheämpää. Huonekaluteollisuudelle on yleensä riittävää jos puu aineksen tiheys on 600–700 kg/m³. Prosessin kehittelyn aikana yritettiin eri tavoin saada muutoksia puun soluseinämiin. Tarkempi selostus vaatisi hieman syvempää kemian tuntemusta, mutta ainakin vinyyli-yhdisteitä, formaldehydi hartseja, furfuraali alkoholia, piioksidi -kemiala, anhydrideja, kaseiinia, happoja, entsyymejä, gelatiinia, ja soijaproteiinia on kokeiltu erilaisten muutosten, kuten puun kovettumisen aikaan saamiseksi. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 24–25.)

Menetelmää kehitettäessä ensin kehitettiin menetelmä tuottaa itse käsittelykemikaalia, jonka jälkeen alettiin tutkia modifiointi vaihetta. 12 %:n kuivattu puu suljettiin paineistettuun kammioon siten, ettei se pääse kellumaan kammion täytyessä nesteellä. Puuta pidettiin -85 kPa paineessa 10 minuuttia, jonka jälkeen kammioon lisättiin käsittelykemikaali. Samalla lämpötila vakiinnutettiin 20 °C, ja paine normalisoitiin. Seuraavaksi painetta puolestaan kasvatettiin 1400 kPa ja pidettiin tässä

tilassa tunnin ajan, minkä jälkeen paineen poistuessa kerättiin myös ylimääräinen käsittelykemikaali talteen. Puu otettiin pois ja lämmitettiin 70 °C lämpötilaan kunnes sen paino ei enää muuttunut (eli kaikki loppukin ylimääräinen kemikaali oli poistunut) ja jäädytettiin. Tästä kehittelystä syntyi InduriteTM – prosessi, joka kovettaa ja vahvistaa alkuperäistä puuta. Lyhyesti sanottuna Indurite – puu on viljeltyä radiata mäntyä, johon lisätään ainetta, jolloin puuaines saa ”kokosolukäsittelyn” ja johtaa kamarikuivauksen jälkeen tuotteeseen jonka tiheys on 650–700 kg/m³. Oikeudet ja lisenssit on myöhemmin siirtynyt yhtiöjärjestelyiden myötä UK:n, jossa InduriteTM – prosessin johdannaista valmistetaan Osmose UK – tuotemerkillä modifioitua puuta. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 25–28.)

Tavoitteena on ollut alusta alkaen tihentää puuta ja prosessissa tuotetaan ns. ”synteettistä puuta”. Toisena vertauksena voidaan käyttää lausetta ”lisätään puuta puuhun”, eli puuhun lisättävillä yhdisteillä jäljitellään hemiselluloosaa ja ligniiniä. Käsittely kovettaa ja tihentää puuta, mutta ei värjää sitä eikä paranna sen lahonkestoa. Menetelmällä käsitellyt tuotteet eivät sovellu vesikosketukseen ja vain käyttöön sisätiloissa, eli ne soveltuvat lähinnä huonekalu ja lattiateollisuuteen.

4.3 Osmose UK – menetelmä

Osmose - käsittelyt perustuvat kupariyhdisteisiin ja orgaanisiin yhdisteisiin. Prosesseissa käsittelykammio täytetään sahatavaralla ja kammioon luodaan tyhjiö, joka sitten täytetään käsittelyaineella eli aine pakotetaan puuhun. Käsittelyn lopussa ylimääräinen aine imetään pois kammioista ja käsittely on valmis.

Puun modifiointimenetelmiä on Osmosella kaksi, kyllästys ja pintakäsittely versio, jotka eroavat toisistaan käyttökohteiden mukaan. Prosessi mahdollistaa muun muassa plantaaseilla kasvatettujen havupuiden hyödyntämisen ja lisää puun vastustuskykyä sieniä ja tuholaisia vastaan.

Osmose Indurite – menetelmä on kehitetty sahatavaralle, jossa puuhun lisätään vesiliukoisia yhdisteitä. Ne ovat samantyyllisiä kuin sahatavaran oma selluloosa. Käsittelyn tarkempi kuvaaminen vaatisi laajaa kemian tuntemusta, mutta esimerkiksi kyllästeaineen molekyylikoko on optimoitu sen imeyttämisen mahdollistamiseksi. Käsittelyn aikana hiukkaset uudelleenjärjestäytyvät luonnollisiksi, jäykiksi ja liukenemattomiksi polysakkarideiksi. Lisäksi yhdisteessä on katalyyttejä, jotka helpottavat ja säätelevät muutoksia polysakkarideissa. Kehittäjät ovat myös tutkineet ja kehittäneet tekniikkaa, jossa orgaanisella selluloosakyllästeellä saataisiin havupuille lehtipuiden ominaisuudet. Prosessissa kovetetaan puuta ja voidaan tarvittaessa myös värjätä sitä, koska käsittely tapahtuu puussa läpikotaisesti. Tuotteet sopivat lattioihin, huonekaluihin, oviin, ikkunoihin, panelointiin ja muihin ulkonäköä vaativiin kohteisiin. Menetelmällä puulle saadaan lisää kovuutta ja lujuutta ja sen mitta-pysyvyys paranee. (Osmose®, Timber Technologies -lehti, 2006, 9.)

Osmose Royal on *oleoterminen* modifiointi prosessi, joka kehitettiin alun perin kuivaustavaksi. Se tapahtuu mineraali- ja kasviöljyjen, lämmön sekä tyhjiön avulla. Tyhjiössä kuivaamisen huomattiin antavan puulle uusia positiivisia ominaisuuksia. Käsittely tapahtuu kuumassa öljyssä, ja käsittelyn aikana kammiossa on hallitusti suhteutettu tyhjiö ja lämpötila, jotta kosteus saadaan puusta pois. Tämän jälkeen kammioon lisätään öljyä, joka lisää puun kuivumista ja samalla puussa olevaa kos-

teutta korvataan öljyllä. Ylimääräinen öljy imetään lopuksi pois kammiosta ja puu kuivataan. (Osmose®, Timber Technologies -lehti, 2006, 8.)

Menetelmällä on tarkoitus luoda stabiloitu materiaali, jossa suljetaan sahatavaran pinta. Tämä vähentää halkeamien ja vikojen esiintymistä, joita aiheutuu puun luonnollisesta turpoamisesta ja kutistumisesta kosteuden vaikutuksesta. Prosessi toteutetaan kupariyhdisteiden, orgaanisten yhdisteiden ja tyhjiöpaineen avulla. Modifiointia tehdään plantaasipuulle, jolla ne suojataan tuholaisia ja sieniä vastaan.

TAULUKKO 15. Osmose Indurite ja Osmose Royal menetelmien ominaisuuksia

Osmose Indurite	Osmose Royal
Havupuille lehtipuiden ominaisuuksia	Oleoterminen prosessi
Lisätään vesiliukoisia yhdisteitä	Öljyn, lämmön ja tyhjiön avulla
Käsittelee läpikotaisin	Stabiloitu materiaali
Kovettaa	Suljettu pinta
Voidaan värjätä	Vähentää kosteuden vaikutuksia
Mittapysyvää	

Osmose®: lla on myös muita kemiallisia käsittelymenetelmiä, jotka eivät kuitenkaan ole varsinaisia modifiointimenetelmiä. (Osmose®, Timber Technologies -lehti, 2006, 10.)

Osmose®:lla on lähteen mukaan tutkimus ja kehityskeskustoja ympäri maailmaa, joista jaetaan tietoutta ja teknologiaa, ja joka edistää maailmanluokan tuotteen kehittämistä. Muita Osmose® -tuotemerkkejä ovat *Protim Clear Choice*, *Osmose Nature Wood* ja *FirePro*. Protim on painekyllästysmenetelmä, joka sopii rakentamiseen ja suojaa esimerkiksi sieniä ja hyönteisiä vastaan maanpäällisissä kohteissa. Ulkona puu on pinnoitettava, ja sitä on huollettava säännöllisesti. Käyttöluokissa päästään luokkiin 1-4 ja jopa 60 vuoden kesto ominaisuuksiin. Nature Woodille ja Clear Choichelle luvataan käyttöluokiksi 3-4 ja kestoiksi 15 vuotta ulkona ja 30 vuotta sisällä. (Osmose®, Timber Technologies -lehti, 2006, 1-5.)

Nature Wood on kyllästämismenetelmä, jota käsiteltäessä on käytettävä suojava-rusteita. Siitä saattaa vuotaa yhdisteitä luontoon ja ihokosketuksessa aiheuttaa ärtymystä. Sitä ei myöskään saa polttaa tai viedä elintarvikkeiden lähelle, joten se ei mielestäni ole työn kannalta merkittävä menetelmä. Clear Choicelle pätee samat säännöt ja lisäksi ne aiheuttavat kiinnikkeisiin korroosiota. FirePro menetelmällä pyritään kasvattamaan puun palonkestoa ja se on enemmän pintakäsittelymenetelmä. (Osmose®, Timber Technologies -lehti, 2006, 11.)

4.4 Asetyloinnin yhteenveto

- Asetyloinnin aikana tapahtuvaa kemiallista mekanismia ei täysin tunneta.
- Käsittelyssä käytetään yleisesti etikka anhydrideja, eli vedetöntä kemikaalia.
- Asetyloinnissa hydroksyyli-ryhmiä muutetaan asetyyli-ryhmiksi.
- Tässä modifointimenetelmässä puun massaa lisätään ja vaikutetaan ensisijaisesti sen kosteusteknisiin ominaisuuksiin.
- Asetyloinnin yhteydessä puu voidaan tarvittaessa värjätä.

Lahotuskokeessa 2x2x0,5cm asetyloituja puukappaleita altistettiin ruskealaholle 16 viikoksi. WPG:n ollessa 20 % havaittiin massahäviöitä vain vähän, samoin 24 viikon testissä. Vertailuna oli käsittelemätön *Corsican mänty*, joka hajosi 24 viikossa siten, että siitä jäi jäljelle pelkkää ligniiniä (70 % massahäviö). (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 35., 37–38.) Mekanismia asetyloinnissa ei siis kuitenkaan vielä täysin tunneta, ja voi olla, että merkittäviä massahäviöitä tapahtuukin vasta 24 viikon jälkeen.

Suomessa ja Ruotsissa parhaillaankin käynnissä olevassa kenttäkokeessa tutkitaan asetyloidun puun ominaisuuksia. Koe alkoi vuonna 1991 ja siinä testataan täysi EN 252 -testi *Scots Pine* männyllä. 22 % (WPG) käsitelty puu on 15 vuoden jälkeen

ollut yhtä kestäväää kuin CCA - kyllästetty puu. EN 257 -testin mukaan tällaisessa puussa on kahdeksan vuoden jälkeen havaittu vain pieniä muutoksia, kun käsittelemättömät kappaleet hajosivat jo vuodessa. Kun jo asetyloidut (WPG 21 %) puut vielä käsiteltiin melamiini hartsilla, ei muutoksia ole havaittu ollenkaan kahdeksassa vuodessa. Lisäksi huomattiin, että asetyloidut ja oikein pintakäsitellyt paneelit (EN 972-3 testi) ovat pitkäikäisempiä 13 vuoden testin perusteella kuin pintakäsitellyt ei-modifioidut paneelit. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 71.)

Asetyloitua pyökkiä tutkittaessa on huomattu seuraavia seikkoja säälle altistettaessa. Ligniini pitää tunnetusti puuta kasassa, mutta sen hajotessa kuituja huuhtoutuu pintakerroksista pois, jolloin paljastuu uusi ligniinkerros ja joka alkaa hajota. Tämä johtaa pitkän ajan kuluessa puun hajoamiseen. Puu altistettiin keinotekoisesti säälle, eli vedelle ja valolle. WPG:n ollessa 18 % asetylointi suojaasi puun pintaa sään vaikutuksilta vähentäen niitä noin 50 %. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 217–220.)

Esimerkiksi Osmose Indurite menetelmällä modifioidun pintapuun on arvioitu olevan 50 – 60 % halvempi lattiamateriaalina kuin tyypillinen lehtipuumateriaali, ja sillä saavutetaan sama toimivuus. (Suttie 2007, 8.)

Asetylointimenetelmällä siis lisätään puuhun jo siinä luonnollisesti esiintyviä aineita, ja lopputuote sopii käytettäväksi lähinnä sisätiloissa. Hyvä ominaisuus prosessissa on, että puuainesta voidaan niin haluttaessa prosessin aikana värjätä.

TAULUKKO 12. SWOT analyysi asetyloidulle puutavaralle (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 444.)

SWOT analyysi asetyloidulle puutavaralle	
Vahvuudet	Heikkoudet
Stabiili tuote	Riippuvainen raaka-aineen toimittajista
Parantunut biologinen kestävyys	Käsittely heikentää joitakin ominaisuuksia
Ympäristöystävällinen	Ei pitkän aikavälin kokemusta
Eurooppalaisista puista	Ei standardeja
Esteettinen	Ei kuluttajien tiedossa hyvin
Pidentynyt huoltosykli	Ei tehokasta markkinointia
	Korkea aloituskustannus
	Modifioitu puu maksaa aina normaalia enemmän
Mahdollisuudet	Uhat
Voi vallata puulle takaisin muille materiaaleille menetettyjä markkinoita	Voidaanko taata riittävän hyvän raaka-aineen saatavuus
Uusia markkina-alueita puulle	Voidaanko taata saanti kemikaaleille ja energialle sekä niiden hinnan pysyminen kohtuullisena
Edistää sertifioidun puun käyttöä	Paljon kilpailijoita samoilla markkinoilla
Alan toimijoiden yhteistyö lisääntyy	Asiakkaat eivät välttämättä halua vaihtaa totuttuja tapoja ja hyväksi todettuja materiaaleja
	Uusia halpoja tuotteita ilmestyy markkinoille

5 FURFULOINTI

Furfulointia pidettiin aikaisemmin kemiallisena modifiointi menetelmänä, koska sen aikana puuhun syntyy lisää kemiallisia sidoksia ligniinin kaltaisten molekyylien ja furfuraalialkoholin välille. Furfuraalialkoholi polymerisoituu lämmön ja katalyytin vaikutuksesta. Merkittävimmät furfuloinnilla saavuttavat muutokset ovat lahonkeston parantuminen, kovuuden lisääntyminen ja mittapysyvyyden paraneminen. Furfuloinnissa siis impregnoidaan puuhun furfuraalialkoholia. Visorwood® on impregnoitua havupuuta ja Kebony® impregnoitua radiatamäntyä. (Suttie 2007, 11; The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 41–42.)

Furfuraalialkoholi valmistetaan maatalousjätteestä, joka sisältää hemiselluloosaa. Kemikaali on CO₂-neutraali ja uusiutuva luonnonvara. Menetelmää on kehitetty jo 1940-luvulta alkaen, mutta sen ongelmat on ratkaistu vasta 1990-luvulla. Menetelmää käyttää ainakin norjalainen Wood Polymer Technologies Visorwood® ja Kebony® –tuotemerkeillä. (Westin & Lande; The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 81.)

Impregnointi on menetelmä, jossa veden avulla toimitetaan kemikaalit puun solurakenteeseen. Käyttämällä prosessissa lämpöä aiheutetaan kemikaalien polymerisointi. Selvin aikaansaatu muutos on kosteuden imeytymisen puuhun vähentyminen ja parantunut lahonkesto, joka aiheutuu tukkeentuneista solun mikrohuokosista. (Raggers 2002.)

Furfuraalialkoholia uutetaan maissista tai sokeriruo'osta. Alkoholi aiheuttaa polymerisointumista ja prosessia katalysoi happo. Käsittely suoritetaan kamarissa, jossa sahatavara se myös tasaannutetaan ja kuivataan. Kuivauksen jälkeen prosessi on valmis ja menetelmän kerrotaan olevan suhteellisen edullinen. Käsittelyssä käytetyn alkoholin määrä määrää tuotteen ominaisuudet ja muun muassa tummumisasteen. Mitä enemmän alkoholia käytetään, sitä tummempaa puusta tulee, ja sitä enemmän se kestää kosteuden vaikutuksia. Lisääntynyt kovuus antaa mahdollisuuden käyttöön kulutusta vaativissa pinnoissa. (Westin & Lande.)

Tuotteen kerrotaan olevan ympäristöystävällinen ja esimerkiksi lähes lahoamatonta jopa 8 vuoden kokeessa. Mittapysyvyys paranee 40–80% ja kovuus lisääntyy. Tuotteella voidaan korvata esimerkiksi trooppisia puulajeja, mutta suurin hyöty tälläkin käsittelyllä saadaan lahonkesto-ominaisuuksissa. Käyttöäksi luvataan 25 vuotta. Uusien tuotantolaitosten myötä valmistuskapasiteetti on noin 10–15 000 m³/a. Vuonna 2000 on avattu Liettuun 500 m³ vuodessa tuottava laitos ja 2003 Norjaan 5000 m³ vuodessa tuottava laitos. (Westin & Lande.)

Furfuroidun puun yksi erityinen vahvuus on, että se on vapaa luontoa vahingoittavista yhdisteistä (*biocide*) ja on vähän huoltoa vaativaa. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 12.)

Menetelmällä yritetään vaikuttaa erityisesti puun kestävyteen, kovuuteen, tasapainokosteuteen ja mittapysyvyyteen, joiden muutokset riippuvat käsittelyasteesta (WPG).

Modifiointi astetta mitataan WPG:llä, eli painon lisääntyminen määrittää käsittelyasteen tässäkin menetelmässä. Painonlisäys aiheutuu furfuraali alkoholin polymerisoitumisesta. Tämä voidaan laskea prosessiparametreista, joka aiheuttaa sen, ettei kolmas osapuoli ei voi suorittaa tarkistuksia esimerkiksi laadunvalvonnallisesti. Tähän on kuitenkin kehitteillä menetelmä - *ThermoGravimetric Analysis*, joka tutkii massamuutoksen näytteestä lämpötilan ja ajan funktiona, kun puu altistetaan hallitulle lämpötilaohjelmalle hallitussa ilmakehässä. Tuloksena on ”*thermogram*”, josta käy ilmi painohäviö suhteessa lämpötilaan ja aikaan. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 423-424.)

5.1 Kebony ASA – menetelmä

Menetelmä tunnettiin aikaisemmin nimellä Wood Polymer Technologies ASA, mutta Kebony ASA aloitti furfuloidun puun kaupallisen tuotannon vuonna 2003 nimellä Kebony Products DA. Menetelmään on kehitetty kaksi erilaista tuotantolinjaa. Tämä on modifiointimenetelmä, jossa puuhun pyritään muodostamaan furaanipolymeerejä kyllästämällä se furfuraalialkoholilla. Menetelmässä käytetään yksinkertaisia organismeja, joilla aine saadaan puuhun ja jotka samalla myös stabi-loivat sitä. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 11.)

VisorWood® tuotenimellä tuotettu modifioitu puu on Scots Pine mäntyä, tarkem-min sanottuna furfuloitua pintapuuta ja ei-käsiteltyä sydänpuuta. Kappaleet on aina profiloitu valmiiksi ennen modifiointiprosessia. Käyttökohteet ovat ulkona kestä-vyyttä vaativissa pinnoissa, kuten terassit, katot ja verhoukset. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 11.)

Kebony® – menetelmällä tuotettu modifioitu puu on tasalaatuiseksi käsiteltyä eri mäntylajien pintapuuta tai lehtipuuta kuten pyökkiä tai pihlajaa / saarnea. Tätä markkinoidaan vaihtoehdoksi trooppisille puille, ja se soveltuu ainakin sisätiloissa lattioihin, panelointiin ja muualle ulkonäköä, kovuutta ja mittapysyvyyttä vaativiin kohteisiin. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 11.)

Kebony tekniikalla tuotettua puuta voidaan liimata ainakin EPI tai MUF – liimoilla, ja pintakäsittelyaineiksi sopivat akryylipohjaiset aineet. Kebony® tuotteet toimivat liimaus, laminointi ja pintakäsittelysovelluksissa. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 234.)

Menetelmässä puuhun lisätään furaanipolymeerejä kyllästämällä puuaines furfuraa-lialkoholilla. Visorwood® tuotemerkillä valmistetaan valmiita tuotteita männystä kulutuskestoa vaativiin kohteisiin ulkokäyttöön. Kebony® tuotemerkillä valmiste-

taan valmiita tuotteita usean puulajin pintapuusta kulutuskestoa vaativiin kohteisiin sisälle.

5.2 Furfuraalihartsit – impregnointi

Tämä suhteellisen uusi menetelmä on kehitetty perinteisen furfurointimenetelmän pohjalta. Siinä ensin normaalisti furfuraalialkoholilla käsitelty puu kuivataan kamariissa, jolloin soluseinään muodostuu jäykkä polymeeriverkosto. Tämä antaa puulle hyvän kestävyuden, parantaa mittapysyvyyttä ja lisää kovuutta; lisäksi väri tummuu hieman. Formaldehydin esipolymeerit muutetaan vesiliukoisiksi hartseiksi. Niissä ei ole VOC-yhdisteitä. (Volatile Organic Compound, eli haihtuvat orgaaniset yhdisteet). (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 81.)

Vesiliukoinen hartsi impregnoidaan puuhun autoklaavissa altistaen puu vaihtelevan paineen sykleille -0,9 - -0,8 bar 7-12 bar. 20–30 % vahvuinen vesi-hartsit -liuos antaa 20–40 % WPG:n. Impregnoinnin jälkeen puu kuivataan normaalisti, kunnes sen kosteuspitoisuus on 15–20 %. Tämän jälkeen puu lämmitetään 130 °C lämpötilaan 16 tunnin ajaksi, jolloin hartsi kovettuu, minkä jälkeen puuhun voidaan jälleen lisätä kosteutta. Jos WPG kasvaa niin myös MOE, eli kimmomoduuli kasvaa. WPG:n ollessa 20 % MOE on yli 10 000 N/mm². Painohäviö on todettu kuuden viikon jälkeen lähes 0 %, kun kyseessä oli ruskealaho ja puulajina Scots mänty. Radiata männyllä painohäviö oli alle 5 % 20 viikon lahotuksen jälkeen. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 83.)

Tämä on uusi menetelmä. Furfuraalialkoholilla käsitelty puu kuivataan, joka antaa sille lisää jäykkyyttä ja parantaa sen ominaisuuksia kosteustekijöitä vastaan.

5.3 Furfulointi – menetelmien yhteenveto

Furfulointi suoritetaan yleisesti kamarissa furfuraalialkoholin ja lämmön avulla. Veden avulla puuhun impregnoidaan furfuraalialkoholi, jota saadaan maatalousjätteestä. Yhdiste muodostaa puuainekseen sidoksia ligniinin tapaisten molekyylien välille kun se polymerisoituu lämmön vaikutuksesta. Merkittävimmät menetelmällä saatavat muutokset tapahtuvat puuaineksen kovuudessa, sen lahonkestossa ja mittapysyvyydessä. Mittapysyvyys voi parantua 40 – 80 %, mikä johtuu tukkeutuneista mikrohuokosista. Menetelmällä voidaan saavuttaa tuotteille noin 25 vuoden käyttöikä. Käsittelyssä käytettävän alkoholin määrän kasvattaminen tummentaa puuta.

6 KEMIALLINEN MODIFIOINTI

Kemiallisen modifioinnin tarkoituksena on parantaa puun mittapysyvyyttä, lahon vastustusta sekä jatkaa sahatavaran käyttöikä. Myös kemiallinen käsittely vähentää puun mekaanisia ominaisuuksia, jotka johtuvat soluseinässä tapahtuvista muutoksista. Tämä tarkoittaa, ettei soluseinä enää kykene yhtä hyvin mukautumaan mekaanisiin muutoksiin, eli se ei sido tai ota vastaan, eli absorboi voimia. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 49.)

Kyllästämällä puuta voidaan saavuttaa sille jopa 30 – kreosoottiöljyllä jopa 50 vuotta - vuoden käyttöikä, mutta niissä käytetyt kemikaalit, kuten vesipohjaiset metallioksidit ovat luonnolle erittäin haitallisia. Kyllästämällä, niin kuin lämpökäsittelylläkin puu voidaan käsitellä kuitenkin läpeensä. (Möller & Otranen 1999.)

Puun kyllästämisessä kemikaaleilla pyritään muuttamaan puun kemiallista rakennetta. Kemikaalien avulla voidaan muodostaa esimerkiksi eettereitä ja lisätä puuhun karbonyylejä ja asetyylejä. Kyllästäminen on monissa tapauksissa hyvin haitallista ympäristön kannalta, minkä vuoksi näiden lähempi tarkastelu tämän työn yhteydessä ole aiheellista. Puun modifiointi kemiallisesti tulee vähenemään markkinoilla. (Raggers 2002.)

Kemiallisesti kyllästetty sahatavara aiheuttaa suurimmat kustannuksensa vasta sen käytöstäpoistovaiheessa. Nämä kustannukset ovat paljon suuremmat kuin sen tuotantoon kuluvat kustannukset. Tämänkään vuoksi kylläste puun käyttö ei tunnu mielekkäältä.

Seuraavassa on esitetty muutamia ominaisuuksia, joita eri kemikaaleilla saadaan aikaan. Testeissä on leikattu ohuita siivuja kappaleista.

Otettakoon huomioon, että ainakin männyllä taivutuslujuus alenee kemiallisessa käsittelyssä saman verran kuin lämpökäsittelyssä voimakkaimmassa luokassa. (KESTOPUU 2007.)

6.1 DMDHEU ja sitruunahappokäsittely

DMDHEU käsittelyllä saadaan aikaan parantunut dimensiostabiilisuus sekä säänkesto, mutta se vaatii aina happokatalyytin. N-metyylimelamiini käsittelyssä tapahtuvaa ilmiötä sanotaan polykondensaatioksi, jolloin puun pH laskee ja formaldehydiä vapautuu. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 49–50.)

DMDHEU – käsittely parantaa mittapysyvyyttä 50–60 %, mutta aiheuttaa lignoselluloosamateriaaleille tehtynä formaldehydipäästöjä, joista voidaan kuitenkin päästä eroon polykarboksyylihappo (PCA) käsittelyllä eli sitruunahappokäsittelyllä. Käsittely tehdään sahatavaralle kemiallisella liuoksella ja altistetaan myös 10 tunniksi 140 °C lämpötilalle. Biologinen kestävyys sitruunahappokäsittelyllä kasvaa merkittävästi kun WPG 12,4 %, mutta tätä lukua voidaan kasvattaa. Sitruunahappokäsittely tarvitsee lisää tutkimusta, joilla selvitetään muut sen aiheuttamat muutokset ominaisuuksissa. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 275-278.)

6.2 m-DMDHEU eli N-methylol käsittely eli Belmadur menetelmä

Tätä kemikaalia on aikaisemmin käytetty tekstiiliteollisuudessa rypyttymisenestoaineena. (Suttie 2007, 11.)

Menetelmässä puuta kyllästetään läpipuun paineessa vesiliukoisella m-DMDHEU kemikaalilla, ja kyllästyksen jälkeen sahatavara kuumakuivataan perinteisessä kuivaamossa.

DMDHEU kemikaali reagoi puun ligniinien ja hemiselluloosan hydroksyyli ryhmien kanssa ja voi muodostaa myös itse polymeerejä (*cross linking*). Mittapysyvyys voi parantua jopa 30–40 % jos WPG on 40 %. Lujuus ei lähteen mukaan juuri tällä menetelmällä muutu. Menetelmä on halpa ja yksinkertainen, mutta lähteen mukaan oikeastaan kukaan ei olisi kaupallistamassa tätä. Normaalit puun ”säilömiseen” eli

kemialliseen käsittelyyn valmistetut laitokset on mahdollista muuttaa soveltuvaksi tälle menetelmälle. Ongelmana DMDHEU kemikaalin kanssa oli formaldehydi emissio, jota m-DMDHEU käsittelyssä ei kuitenkaan tapahdu, koska kemikaalia on muunneltu. (Homan & Jorissen 2004.)

Menetelmä kyllästää puun läpikotaisin, mutta ei värjää puuta ja parantaa jonkin verran sen lahonkestoaa. Myös mittapysyvyys paranee ja pintakovuus kasvaa, ja se sopiikin esimerkiksi puutarhakalusteisiin. Käsittely ei vähennä toimivuutta vesi- tai liuotinpohjaisilla pinnoitteilla ja se paransi ominaisuuksia tarkasteltaessa halkeilua, muodon- ja värinmuutoksia. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 213–216.)

Merkittävin muutos menetelmällä saavutetaan puun mittapysyvyyden parantumisessa. Lisäksi formaldehydi päästöt saadaan eliminoitua.

6.3 Maleiinikäsittely

Menetelmässä sidotaan puun vapaita OH-ryhmiä tyhjiöpainekyllästyksellä, minkä seurauksena veden imeytyminen puuhun vähenee. Tämä tarkoittaa puun kosteuselämisen pienenemistä ja lahonkeston paranemista. Maleiinikäsittely soveltuu kuitenkin vain puulajeille, joiden pintapuu on imukykyistä. Käsittely tummentaa puuta ja alentaa sen tasapainokosteutta ja liimojen tarttuvuutta, sekä lisää kovuutta ja sen kautta kulutuskestävyyttä, jonka vuoksi menetelmä voisi sopia esimerkiksi parketti ja keittiöteollisuuteen.

Mittapysyvyys voi parantua jopa 40 %. (Waldemar & Homan 2004.) Menetelmä sopii vain huokoisille puulajeille.

6.4 Vinyyliesteröinti (transesterification with vinyl esters)

Tämä on uusi menetelmä, jota ehdotetaan puun modifiointimenetelmäksi lähiaikoina. Menetelmää on vasta kokeiltu sellutuotteella, eli sahapurulla. Käsittelyssä tapahtuu reaktio vinyyliestereiden ja hydroksyyliyhymien välillä. Lämpötilan nosto lisää reaktion voimakkuutta ja merkittävä WPG on saavutettu kolmessa tunnissa 90 °C lämpötilassa. Prosessin miinuspuolena on, että sivutuotteena syntyy karboksyylihappoa (*carboxylic acid*), jota ei voida täysin poistaa lopputuotteesta. Lisäksi prosessista syntyy hajuhaittoja sekä lujuuden heikkenemistä puuaineksessa. Käsittely aine myös aiheuttaa korroosiota metallisissa kiinnikkeissä. Menetelmä vaatii vielä paljon tutkimusta, jotta todellinen reaktiomekanismi saadaan selville. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 65–69.)

Menetelmää ei ole kokeiltu sahatavaralla ja siinä syntyy haitallisia sivutuotteita.

6.5 Kemiallisesti modifioidun puun käyttöä

Ainakin yleisesti käytetty *Scots* mänty voidaan kemiallisen käsittelyn jälkeen käsitellä kaupallisilla vesiliukoisilla pinnoitteilla. Jotkin käsittelyt jopa parantavat pinnoitteiden adheesiota, eli ne tarttuvat voimakkaammin. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 213-216.)

7 MUUT MODIFIOINTIMENETELMÄT

Tässä luvussa käydään hieman läpi menetelmiä, jotka ovat vielä tutkimusasteella.

7.1 Di-happo – impregnointi

Tämä on puun stabilointia turvonneeseen tilaan, mittapysyvyys voi parantua jopa 60–70 %. Puussa normaalisti oleva vesi korvataan sen turvotettua puu muilla, ei haihtuvilla aineilla. Prosessissa käytetään *azelaic* – happoa ja liuosta, jossa on hartsia 90 % ja vettä 10 %. Impregnoinnin jälkeen sahatavaran altistetaan noin 4h 105 °C lämpötilaan, jolloin hartsi ”sulaa”. Lopuksi sahatavara kuivataan 20 °C 48 tunnissa. Prosessista voisi saada suhteellisen edullisen, sillä happo maksaa Kiinassa 7 €/kg ja se valmistetaan viljasta ollen siten täysin luonnonmukaista. Menetelmä tarvitsee vielä kehitystä, sillä nyt puuhun jää aina vähän vettä, joka olisi saatava pois tai korvattava kokonaan muulla aineella. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 99–104.)

Menetelmässä on ongelmana, että puuhun jää vielä liikaa vettä, joten se vaatii lisätutkimusta.

7.1 Bioswitch – menetelmä

Tässä menetelmässä puuhun istutetaan kemikaalia, joka vapautuu kun ulkoiset tekijät sitä vaativat. Eli esimerkiksi sienien hyökätessä puuhun varastoitu kemikaali vapautuu ja estää sienien kasvun. Tämä on kuitenkin enemmän puun ”säilömistä” eikä modifiointia. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 304.)

7.3 Hydrophobation – menetelmä

Menetelmässä soluseinämiä yritetään muuttaa hydrofiilisestä hydrofobiseksi, eli vettä imevästä vettä hylkiväksi. Tämä voidaan tehdä öljyillä tai orgaanisilla silikoniyhdisteillä. Menetelmän arviointi ja testit ovat vielä käynnissä, joten tarkempia tuloksia ei ole vielä saatavilla. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007.)

8 PUUN MODIFIOINTIMENETELMIEN YHTEENVETO

Puun modifiointimenetelmien kehittämisessä on ehkä liikaakin kunnianhimoa, sillä välillä tuntuu, että etsinnän kohteena on menetelmä, jossa yhdistyvät kaikki positiiviset ominaisuudet – tämä ei kuitenkaan ehkä ole koskaan mahdollista. Esimerkiksi täysin bioresistentin tuotteen tulisi tavoitteissa lopulta olla kuitenkin biologisesti hajoavaa ja tähän pitäisi vielä päästä luontoa vahingoittamatta. Puun tulisi myös olla kovempaa, mutta samalla helpompaa työstää sekä täysin vettähylykivää, mutta samalla hyvin pintakäsitteltävää. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 297.) Jokaiseen eri käyttökohteeseen puulle tulisikin varmasti valita eri modifiointimenetelmä tai menetelmien yhdisteleminen.

Lähteen mukaan Portugalilaisten puiden kuten *pinus sylvestris* ja *eucalyptus globulus* voidaan olettaa toimivan modifioituina samoin kuin Euroopassa laajalti testatut puulajit. Saavutetut lopputulokset ovat enemmän riippuvaisia modifiointiprosessista suhteessa puulajiin kuin pelkästään puulajin ominaisuuksista. Portugalilaiselle puulle arvellaan sopivan parhaiten furfulointi- tai asetylointimenetelmät, koska ne antavat suhteessa alhaisen tasapainokosteuden korkeissa ilmankosteuksissa ja hyvän mittapysyvyyden. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 241–242.)

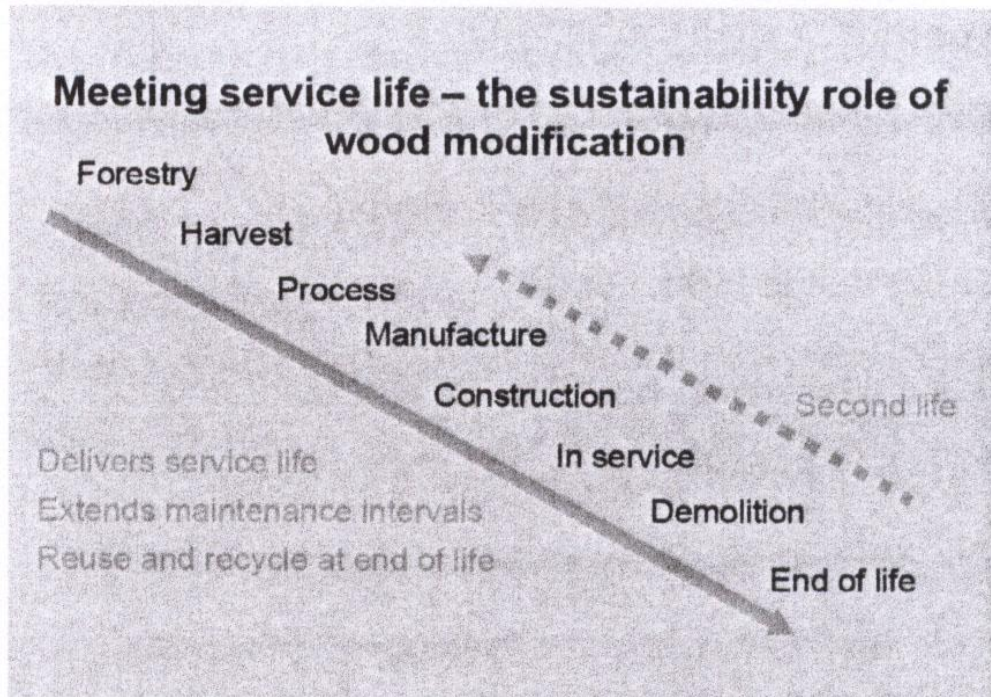
Asetyloitu puu esimerkiksi on vakaata kosteuden suhteen, mutta siinä voi olla vahvoja hajuhaittoja etikkahapon vuoksi. Puun modifioinnista tulee merkittävää liiketoimintaa, vain jos alalle luodaan omat sektorit ja keskitetään kehitys sen mukaan. Tämä tarkoittaisi, että yksi modifiointimenetelmä keskittyisi esimerkiksi puun kovuuden lisäämisen kehittämiseen, toinen pintakäsittelyominaisuuksien kehittämiseen ja kolmas vaikkapa kosteuden aiheuttamien ominaisuuksien parantamiseen. Tämä vaatisi markkinoiden selkeää jakamista käyttökohteiden mukaan, jolloin tietyllä menetelmällä modifioitu puu olisi räätälöity käyttökohde huomioiden. Kaikkien parhaiden ominaisuuksien laitto samaan tuotteeseen ei vain taida onnistua. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 298–299.)

Alan edistämistä varmasti auttaisi tiivis yhteistyö toimijoiden kesken, jos pelisääntöistä päästäisiin jonkinlaiseen yksimielisyyteen. Ei ole mielekästä tavoitella liian isoa palaa pienellä ryhmällä, jos se jarruttaa koko alan kehittymistä. Yksi vaihtoehto olisi ehkä tilanne, jossa markkinat jaettaisiin juurikin omiin sektoreihinsa ja yhdestä prosessista kehitettäisiin erilaisia ”tarkempia” variaatioita, joilla tuotettaisiin lopputuotteita moneen eri loppukäyttökohteeseen. Tämä tarkoittaisi hieman muunneltua prosessia jokaiseen eri käyttökohteeseen.

Rajoittavia tekijöitä puun modifiointi tekniikoissa ovat ne, että huolimatta laajasta tutkimuksesta ei täysin ymmärretä kaikkia pienimpiä puussa tapahtuvia muutoksia. Lisäksi teknologioita on useita rinnakkain, joka saattaa hämärtää kokonaiskuvaa. Menetelmät ovat myös suhteellisen kalliita, sillä ne lisäävät sahatavaran arvoa 150–500 €/m³, eikä niille ole olemassa kattavia yhtenäisiä standardeja saati niistä ole pitkäaikaisia käyttökokemuksia. Edelliset seikat tulevat todennäköisesti kuitenkin lähivuosina korjaantumaan. Markkinoilla on paljon mahdollisuuksia uusien tuotteiden muodossa. Yksi vaihtoehto voisi olla jalostusasteen tehokas kasvattaminen tuotantolaitosten yhteydessä. Lisäksi käyttö-ikäkustannukset saadaan alentuneen huoltotarpeen avulla alas ja menetelmät ovat ympäristöystävällisiä. Uusiutuvuus on kaikessa nykyään arvostettua ja se tulee vain kasvamaan. Aivan aluksi tulisi kehittää ja rakentaa tarkka ja riippumaton tietopankki prosesseista ja ominaisuuksista sekä toimintaominaisuuksista eri käyttöolosuhteissa, jotta ymmärretään pitkäaikais- ta käyttöä. Lisäksi pitäisi päästä kuluttajien tietoisuuteen kehittämällä esimerkiksi koulutukseen liittyviä asioita. Tätä voisi taas edistää erilaiset referenssikohteet. (Suttie 2007, 9.)

Jos siis tavallinen kuluttaja ei tiedä automaattisesti mitä vaikkapa lämpökäsitelty puu on, ei hän sitä osaa koskaan vaatia esimerkiksi uuteen asuntoonsa, eikä silloin myöskään synny suurimittaista kysyntää.

Puun käytön lisäämisellä voidaan kuitenkin vaikuttaa merkittävästi ympäristötekijöihin. Puutuotteet toimivat kauan hiilidioksidinieluinä ja varsinaisen käytöstä poiston jälkeen tuotteet voidaan joko polttaa energiaksi tai kierrättää. Hiilidioksidi on varastoituneena puutuotteeseen niin pitkään, kunnes se viimein hävitetään.



KUVIO 10. Metsäteollisuuden tuotteiden elinkaari ja mahdollisuudet uusiokäytön jälkeen (Suttie 2007)

8.1 Lahotuskokeissa havaittua

Lähteessä oli vertailtu keskenään ThermoWood®, asetylointi, furfulointi ja pellavansiemenöljykäsittellyllä modifioituja kappaleita 24 ja 40 viikon lahotuskokeissa. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 309.)

Tuloksia: (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 302-314.)

- Furfuloitu, asetyloitu ja ThermoWood D -käsittelyt antavat puulle korkean lahonvastuskyvyn.
- Parhaat tulokset asetyloinnissa saavutetaan, kun WPG 23 % ja 30 %.
- Visorwood 25 % ja 37 % WPG:llä antoivat saman toimivuuden kuin ThermoWood D ja D+ -lämpökäsittelyt.
- ThermoWood D ja D+ -käsittelyt toimivat paljon paremmin kuin ThermoWood S+ -käsittely.
- Pellavansiemenöljykäsittely toimi samoin kuin ThermoWood S+ käsittely.
- Lämpökäsitelty puu harmaantuu jopa nopeammin kuin ei käsitelty puu.
- DMDHEU käsitelty puu on altis pintahomeelle.
- Asetyloitu puu kerää sinistäjäsiientä ilman pintakäsittelyä.

9 MODIFIOIDUN PUUN MAHDOLLISUUS RAKENTAMISESSA

Puu on rakennusmateriaalina huomattavasti energiatehokkaampi kuin esimerkiksi teräs tai betoni. Teräs kuluttaa 90 % enemmän energiaa ja betoni 63 %, lisäksi betonirakennuksissa ei ole lainkaan tai todella vähän kierrätettäviä materiaaleja pintamateriaaleina. Energian kulutuksesta 40 % EU alueella lukeutuu rakennusten tiliin. Se mitä tänään rakennetaan, kuluttaa energiaa vähintään 30 vuotta. Rakentamisessa tulisi pyrkiä saavuttamaan seuraavat tekijät tehokkaasti: välttämään lämpöhäviöitä ja optimoimaan ilmainen lämmönsaanti esimerkiksi ikkunoiden avulla, pohjapiirustuksen muokkaamisella ja sisäisiä lämpölähteitä kuten koneita hyödyntämällä. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 236.)

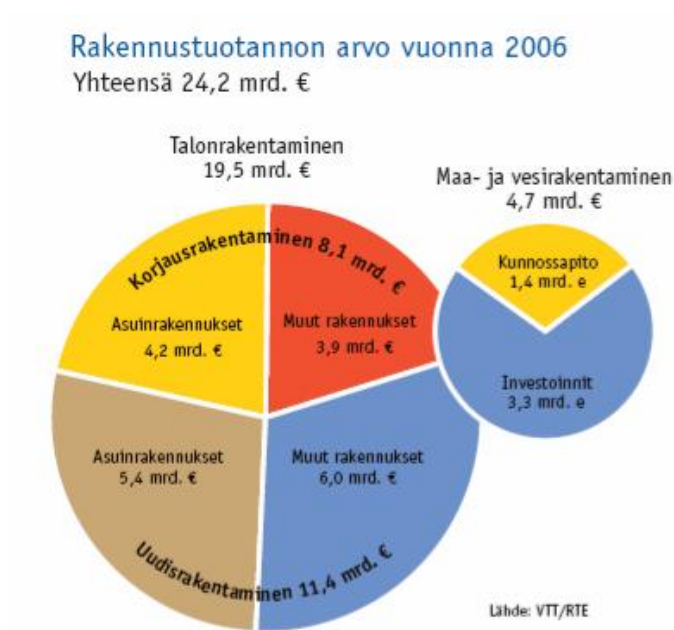
Osana HOLIWOOD – projektia on siinä kehitettävälle talolle asetettu tavoitteeksi vähentää lämmitysenergia tarvetta 60 %:n nykyisestä, vähentää elinkaarikustannuksia 20 %:n nykyisestä ja vähentää CO₂ päästöjä 50 %:n nykyisestä. Tähän voidaan päästä hyödyntämällä esimerkiksi seuraavia keinoja: minimoidaan lämpöhukka kylmäsilloista hyvällä eristyksellä, käytetään heikosti lämpöä johtavia materiaaleja, tehdään huolelliset liitokset, käytetään ekologisia materiaaleja, optimoidaan materiaalien käyttöä ja kehitetään 3D moduulirakentamisjärjestelmää. Projekti on prototyypivaiheessa ja myös pintakäsittelyaineita kehitetään. Sisälle ja ulos kehitetään omia pintakäsittelymenetelmiä, joista kerrotaan olevan lupaavia tuloksia. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 237–238.)

Euroopassa on yli 30 standardikomiteaa ja alajärjestöä liittyen puun käyttöön rakentamisessa, kuitenkin vasta nyt modifioitu puu alkaa olla tosissaan harkinnan alla näillä järjestöissä, jotta sille saataisiin yhtenäiset normit. (Suttie 2007, 3.)

Suomessa puurakentamista rajoittivat pitkään tiukat puurakentamiseen liittyvät rakennusmääräykset. Ne estivät yli kaksikerroksisten tai yli seitsemän metristen talojen rakentamisen, jos ne olivat puurunkoisia, puuverhoiltuja tai puuta käytettiin pääjulkisivumateriaalina. Asenteiden muuttumisen myötä 90-luvun lopulla alettiin vaatia muutoksia asiaan ja niitä on myös saavutettu. Palomääräyksiä on muutettu ja

aivan ensimmäiset puukerrostalot toimivat alalla koerakennuksina. (Karjalainen 2007.)

Puusta rakentaminen on ekologista, ja se sopii suomalaiseen maisemaan. Kasvaessaan puu sitoo ilmakehästä hiilidioksidia, joka on merkittävä kilpailuetu muihin materiaaleihin verrattuna, kun ajatellaan ihmisten kasvavaa huolta esimerkiksi ilmastonmuutoksesta. Lisäksi tulee muistaa, että puutuotteet vaativat suhteellisesti vähän energiaa ja ovat saatavilla kotimaisesta raaka-aineesta.



KUVIO 11. Rakennustuotannon arvo sektoreittain vuonna 2006 (Salonen & Tenhunen 2007)

Pohjois-Amerikassa, Suomessa ja Ruotsissa ihmiset käyttävät vuosittain rakentamiseen noin kuutiometrin puuta (2004), Saksassa ja Keski-Euroopassa luku on 0,2 m³. Markkinoita siis olisi, jos vain tartumme tilaisuuteen, emmekä anna niitä tarjotimella kilpailijoille. (Puutekniikka 8/2004, 6.)

Ainakin Finnforestin toimesta on suomesta toimitettu Keski-Eurooppaan esimerkiksi kokonaan puusta valmistettuja koulurakennuksia ja muita rakennuksia. (Puutekniikka 8/2004, 7.)

Saksassa on rakentamisella vähäinen kansantaloudellinen merkitys. Varsinaisen rakentamisen liikevaihto oli 82,39 miljardia euroa vuonna 2006, josta talonrakennusta 51,14 miljardia euroa. Kasvua oli edellisvuoteen 9,3 %. Saksassa kuitenkin tarvittaisiin lähteen mukaan enemmän asuntoja kuin niille tullaan myöntämään lupia, mikä tarkoittaa, ettei asuntokanta kasva. Ihmiset kuitenkin haluaisivat kakkos asuntoja ja uusia uutta tekniikkaa sisältäviä taloja ja lisäksi lainsäädäntö alkaa edellyttää parempaa rakennusten energiatehokkuutta. (Wilén 2007.)

Puunkulutus Saksassa oli 20 miljoonaa m³ vuodessa, josta yli puolet kuluu rakentamiseen ja rakennusmateriaalien tuottamiseen. Volyymi on kuitenkin kasvamassa, koska rakentaminen piristyy ja puurakentamisen osuus nousee. 2006 rakennettiin 169 000 rakennusta joista 23 000 oli puurakennuksia, kasvua oli siten 13,8 % vuoteen 2004. Omakotitalojen osuus oli 13,8 %, asuinkerrostalojen 1,9 % ja muun talonrakennuksen 17,4 %. Puunkäytön kasvun osuus selittyy arkkitehtien, rakennusinsinöörien ja ostajien alettua tunnustaa puun edut taloudellisesti ja ympäristönsuojelullisesti, eli Saksassa asenteita on jo muutettu. Markkinoille yritetään nyt päästä uusilla innovatiivisilla tuotteilla ja uusilla rakenneratkaisuilla. Nykyään Saksassa rakennetaan jo viisikerroksisia asuintaloja puusta. (Wilén 2007.)

Finpro -yrityksen mukaan, joka on kansainvälisesti toimiva suomalainen konsulttiyritys, puurakentamisen kasvu Etelä-Euroopassa on jopa 30 % vuodessa, joten näillä markkinoilla olisi varmasti tilaa myös suomalaisille. Siellä ihmiset pitävät puurakennuksia terveellisinä ja ekologisina ja myös EU:n tiukentuvat lämpöolosuhtemääräykset suosivat puurakentamista. Etelä-Euroopassa on kasvavaa kysyntää 100 – 500 m² vapaa-ajanasunnoista ja puurakennuksia ajatellaan houkuttelevina vaihtoehtoina. Ne ovat myös kivitaloja edullisempia. Espanjassa rakennetaan vuosittain 1500–2000 kpl puutaloja vuorille ja rannoille sekä suurkaupunkien lähelle. Vienti Suomesta oli vuonna 2005 noin 5 miljoonaa euroa, ja arvio vuodelle 2006 oli 7,5-8 miljoonaa euroa. Italiassa puolestaan rakentamisen liikevaihto oli 140 miljoonaa euroa 1000 kpl vuosivauhdilla, mikä tulee kasvamaan huomasti lähivuosina uusien golfkenttien myötä. Yhteensä ennen vuotta 2010 on tulossa noin 300 uutta kenttää Espanjaan, Portugaliin ja Italiaan samalla kun turistit vanhenevat ja vaurastuvat. Seuraavan 15 vuoden kuluessa ennuste on yli 3000 golfkentälle, joihin

jokaiseen tullaan rakentamaan lukuisia lomaosakkeita. Tämän lisäksi on uusia kasvuaalueita Kreikassa, Kyproksella, Kroatiassa, Turkissa, Tshekeissä, Sloveniassa, Unkarissa ja Slovakiassa. (Heilala & Lankinen 2006.)

Lisäksi tulee muistaa, että laskettelu ja muu turismi ovat kasvamassa huimaa vauhtia kun kohde maana ovat Itä-Euroopan maat Puola ja Bulgaria mukaan lukien. Suuressa osassa maita voitaisiin hyvin rakentaa puurakennuksia, sillä ilmasto ei ole niin erilainen kuin Suomessa. Tietysti tämä vaatisi tarkkaa suunnittelua, jos täältä haluaisi markkinoille lähteä. Puurakentaminen siis kasvaa aivan varmasti todella paljon lähivuosina ja se tarkoittaa myös työtä muulle puuteollisuudelle, ja iso siivu markkinoista olisi tarjolla myös puun modifioinnin alalla.

10 MODIFIOIDUN PUUN TULEVAISUUS

Modifioidun puun kaupallistaminen on edennyt merkittävästi viimeisen vuosikymmenen aikana. Loppukäyttäjät haluavat ympäristöystävällisempiä tuotteita, ja näiden kehitys ajaa hiljalleen myös valmistajia vähentämään ympäristölle haitallisten aineiden käyttöä. Markkinoille pääsyä rajoittavat tällä hetkellä eniten kaikkialla liian korkea modifioidun puun hinta ja se ettei markkinat ole vielä yksi selkeä kokonaisuus. Tähän on osavaikuttajina myös teknologioiden riittämätön kehittyminen (keskittyminen) sekä määräyksien ja standardien puute. Muutoksia ja parannuksia teknologioihin tarvitaan ja kaivataan aina, koska se ajaa markkinoita eteenpäin ja aikaansaa tervettä kilpailua. Merkittävä kehitys vie uudelta tekniikalta aina aikaa 10–15 vuotta, jotta se voi saavuttaa kaupallisen menestymisen mahdollisuuden – tämä tiedetään tutuksi muilta aloilta. Jos jollakulla on hallussaan hyvä tuote, on sitä myös markkinoitava, eli se on saatava ”hyväksytyksi” vaikutusvaltaisilla tahoilla, kuten arkkitehdeillä ja muilla, jotka sitten puhuvat sen käytön puolesta. Markkinoinnin oltava hyvin suunniteltua, eli markkina-alue tulee määritellä tarkkaan, kuten kuka on pääkilpailija ja niin edelleen. Esteenä on jossakin määrin aikaisemmin ollut, että modifioidusta puusta on annettu kuva kaikkien muiden materiaalien ylivertaisena korvaajana. Tietty modifiointi tekniikka pitää siis suunnata tietylle alalle, joka aletaan nyt ymmärtää. Modifioitua puuta pitäisi myös ajatella läpi sen elämänsykli ja analysoida koko elämänsykliä kustannusten kannalta. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 439–444.)

Kun modifioidun puun tuotanto ja saatavuus helpottuvat, myös jotkin sen kustannukset laskevat. Valmistajien pitää päästä markkinoille, joita nyt hallitsevat muut kuin puumateriaalit. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 445.)

Puu on rakennusmateriaalina erinomaista, koska se on pitkäikäinen materiaali ja sillä sitä on helposti saatavilla. Vaikka puuta käytettäisiin paljon, ei kapasiteetti silti ole loppumassa kesken. Puu on myös hyvin ekologinen vaihtoehto jo sen kierrätettävyydenkin ansiosta. Kierrätettävyyttä alentaa jonkin verran puussa käytön jälkeen olevat epäpuhtaudet, kuten liimat, maalit ja pinnoitteet. Tätä ongelmaa voidaan

osaltaan poistaa käyttämällä vaikkapa lämpöpuuta. Lämpöpuun ongelmaksi sanotaan joskus kriittisestikin sen taipumusta harmaantua, mutta tämä ongelma on lähes kaikilla puumateriaaleilla ja siitä on vaikea päästä eroon ilman pintakäsittelyä. Harmaantuminenkaan ei perustasolla ole ongelma vaan epätasainen harmaantuminen. Huomattavaa kuitenkin on, että lämpökäsitelty julkisivumateriaali harmaantuu kenttäkokeissa jopa nopeammin kuin ei käsitelty. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 195–198.)

Puun väri muuttuu, koska ligniinin fenoliryhmät absorboivat valoa, joka käynnistää fotokemiallisia reaktioita, jotka johtavat puun rakennemolekyylien hajoamisen. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 57.)

Säälle altistamisen ei ole kuitenkaan huomattu aiheuttavan mitään muodollisia tai mekaanisia muutoksia, eikä liitosten hajoamisia. Kiinnitys on tehtävä galvanoituja tai ruostumattomasta teräksestä valmistettuja kiinnikkeitä, sillä muut ruostuvat. Lämpökäsitelty puu ei aiheuta värjäntymisiä, vaikka se olisikin suorassa kosketuksessa muuhun materiaaliin. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 195-198.)

Alankomaihin aiotaan rakentaa asetyloidusta puusta liikennesilta moottoritien yli. Siltaa kuvailtiin ”*heavy load-bearing*” siltana, eli modifioitua puuta aiotaan käyttää paljon kuormaa kantavissa rakenteissa. Sillan on tarkoitus kestää vähintään 80 vuotta. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 403.)

Radiatamännyn kerrotaan tarjoavan riittävät ominaisuudet, jotta lujuus määräykset täyttyvät, mutta se vaatii esilajittelua lujuuden suhteen. Asetyloitu radiata mänty täyttää lähteen mukaan lujuusmääritykset puusilloille. Asetyloidussa puussa tapahtuu kiinnikkeiden korroosiota nopeammin, joka pitää huomioida kiinnikkeitä valittaessa. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 410.)

Lämpökäsittelylle puulle ei ole vielä onnistuttu luomaan standardointijärjestelmää, koska tuotevalikoima on hyvin laaja. Lisäksi markkinat ovat vielä suhteellisen pienet eikä informaatiota ja dataa ei ole vielä kukaan tarpeeksi. Kerrotaan, ettei ole mahdollista määrittellä ja luokitella lämpökäsittelyn puun ominaisuuksia järkevästi. Aikanaan tämä kyllä tulee mahdolliseksi ja silloin joka sovellukselle on oltava oma testausmenetelmä ja tuotestandardit. Tämä tarkoittaa jälleen, että markkinat on jaoteltava omiin pienenpiin sektoreihinsa. (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 420.)

Puun modifiointimenetelmät soveltuvat lähes kaikille puulajeille ainakin jollakin tasolla ja jollakin modifiointimenetelmällä. Suurimmat käyttökohteet näille ovat puusepäntuotteissa sisä- ja ulkokäytössä, sekä huonekaluteollisuudessa, eli rakentamisen oheistuotteina, mutta ei kirjaimellisesti itse rakennusmateriaaleina, koska niiden ominaisuudet ovat merkittävästi muuttuneet kriittisiltä ominaisuuksiltaan (lujuus).

TAULUKKO 17. Modifioidun puun käyttökohteita ja sille suositeltu modifiointi menetelmä (Suttie 2007)

Puun suositeltu modifiointitapa suhteessa sen käyttökohteeseen	
Ulkokalusteet	Lämpökäsittely
Ikkunat ja karmit sisälle	Asetylointi
Ovet, ikkunat ja karmit ulos	Asetylointi
Lattiat	Useat menetelmät
Kosteat tilat	Asetyloitu
Rakennustuotteet	Asetyloitu, lämpökäsittely
Sisustustuotteet asuntoautoihin ja veneisiin	Furfulointi
Arkkitehdit	Asetylointi, lämpökäsittely

Kuten aikaisemminkin on todettu, monin eri menetelmin modifioitu puu sopii moneen eri kohteeseen, mutta tässä tulee jälleen muistaa se, että mistään menetelmästä ei ole vielä todella pitkäaikaisia käyttökokemuksia. Tämä kuitenkin tulee korjaantumaan lähivuosina.

Lämpökäsittely puu sopii oikeastaan jokaiseen kohteeseen, ja sen suurimpia haasteita onkin tulevaisuudessa luoda vakaa asiakaskunta ja vahvistaa markkinaosuuttaan muiden materiaalien joukossa, sekä luoda täsmälliset prosessit eri käyttökohteisiin. Tästä voisi hyvänä esimerkkinä olla vaikkapa parkettiteollisuus, jossa lämpökäsittelyllä puulla voidaan periaatteessa luoda lähes rajaton värivalikoima puisiin lattiamateriaaleihin. Samaan voidaan tosin päästä asetylonnilla ja furfuloinnilla, mutta niillä on vielä enemmän väri vaihtoehtoja. Toinen kysymys on, onko muille väreille kuin tummennetulle puulle sitten kysyntää lattiamateriaalimarkkinoilla. Kaikki menetelmät ovat ympäristöystävällisiä, mutta lämpökäsittely eroaa kuitenkin muista siinä, että siinä ei tosiaankaan käytetä mitään muuta kuin lämpöenergiaa ja vettä prosessin aikana. Muissa menetelmissä on aktiivisina osina myös kemiallisia yhdisteitä, vaikkakin niiden myös luvataan olevan ympäristöystävällisiä.

Loppujen lopuksi, vain aika näyttää kuinka modifioitu puu tulee menestymään tulevaisuuden markkinoilla. Työtä ja mahdollisuuksia varmasti riittää, mutta kyse on kuitenkin oikeastaan vain uudesta teknologiasta ja kuluttajien mieltymyksiin vaikuttamisesta.

LÄHTEET

Kirjallisuuslähteet:

Chanrion, P., Schreiber J. 2003. HEAT TREATED TIMBER C CTBA 2003, C Editions CTBA 2003

Hill, C. 2006. Wood Modification, Chemical, Thermal and Other Processes, Bangor, UK: Wiley

Hill, C.A.S, Militz, H. & Ormondroyd, G.A. 2007. The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007. 3rd European Conference on Wood Modification, The Angel Hotel, Cardiff, UK 15th – 16th October 2007

Möller, K., Otranen, L. 1999. Puun Lämpökäsittely, Ympäristötekniikan instituutin julkaisuja 4 1999

Puutekniikka 8 – lehti / 2004

Salmi, M. 2003. Koulutusmateriaali, Puutekniikka 2003–2007, PUU03, Lahden Ammattikorkeakoulu

Suttie, E. 2007. Modified Wood – DG 504 - tiedotelehti

Seminar, PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF HEAT TREATED WOOD IN EUROPE 2000, Tekes, Lahontorjuntayhdistys ry, Kestopuu Oy

Wilén, J. 2007. Toimialakatsaus, Saksa: Rakentaminen, Heinäkuu 2007 / Juha Wilén

Elektroniset lähteet:

Heilala, A.-J., Lankinen, T. 2006. Finpro ry – Suomalaisella puurakentamisella hyvät näkymät myös Etelä-Euroopassa [verkkojulkaisu]. Saatavissa: http://www.temtoimialapalvelu.fi/files/219/3_Heilala_Lankinen_Puurakentamisella_hyvät_nakymat.pdf

Info Blad 2005. PLATO® Wood Norway spruce for Structural Timber [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.platowood.nl/ENG07/StructuralTimber15may05.pdf>

Karjalainen, M. 2007. Suomalainen puukerrostalo [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.edu.fi/oppimateriaalit/puukerrostalo>

Lämpöpuuyhdistys ry 2003. ThermoWood® käsikirja. c/o Wood Focus Oy, Helsinki (Lämpöpuuyhdistys ry 2003) [verkkojulkaisu]. Saatavissa: http://www.thermowood.fi/data.php/200401/914711200401161255_TWkasikirja.pdf

Lämpöpuuyhdistys ry 2007. ThermoWood – tuotantotilastot 2006 [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.thermowood.fi>

Militz, H. 2002. Heat Treatment Technologies in Europe [verkkojulkaisu]. Scientific Background and Technological State-of-Art. Saatavissa: <http://www.wood.uni-goettingen.de/pdf-dateien/heateuropefeps2002.pdf>

The Plato Technology, A novel wood upgrading technology 2002 [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www2.spm.slu.se/bitwon/Plato/The%20Plato%20technology%20A%20novel%20wood%20upgrading%20technology.pdf>

Raggers, J. 2002. 4 Process / Modification [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.ivalsa.cnr.it/euris/english/4/4.pdf>

Salonen, P. & Tenhunen, R. 2007. Puualan tiedote 4/2007 [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.puusuomi.fi>

Viktorsson, E. 2007. Värmebehandlat trä ur ett produkperspektiv [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://epubl.ltu.se/1404-5494/2007/09/index.html>

Wood Focus Oy 2007. Puun merkitys ilmastonmuutoksen hillitsemisessä [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi>

Westin, M., Lande, S. Furfulation of wood – Technology scale-up and commercial status [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.bfafh.de/inst4/45/ppt/3furfufy.pdf>

Perdure 2007. [Verkkosivusto] Kohteessa: <http://www.perdure.com>

Bitus 2007. [Verkkosivusto] Kohteessa: <http://www.bitus.co.uk>

Accoya 2007. [Verkkosivusto] Kohteessa: www.accoya.info

Muut lähteet:

Etelä-Suomen Sanomat 28.12.2007

Accoya, A Giat Step Forward – esite

LIITTEET

LIITE 1 - Sanastoa

LIITE 1 - Sanastoa

Adheesio – kahden eri aineen välinen vetovoima

Aldehydi – orgaaninen yhdisteryhmä

Anhydridi – kemiallinen yhdiste, josta on poistettu H₂O - molekyyli

Aromaattinen yhdiste – kemiallinen yhdiste, jossa on (hiili)rengasrakenne

ASE - Anti-Swelling Efficiency, eli mittapysyvyys

Depolymerisoituminen - polymeerit muuttuvat aldehydeiksi

Ei-polaarinen (molekyyli) – ei muodosta vetysidoksia

EMC = Equilibrium Moisture Content, eli tasapainokosteus

Glukoosi - rypälesokeri

Hiilihydraatti – orgaaninen yhdiste (hiili, vety, happi)

Hydrolyysi - kemiallinen reaktio jossa kemiallinen yhdiste hajoaa reagoidessaan veden kanssa

Hydrotermolyysi - kemiallinen reaktio jossa kemiallinen yhdiste hajoaa reagoidessaan veden ja lämpöenergia kanssa

Ilman suhteellinen kosteus = $(\text{ilman vesimäärä} / \text{suurin mahdollinen vesimäärä}) \times 100$

Ksyloosi - sokeri

Kuivausvoima = puun kosteus / tasapainokosteus

Maltodekstriini - hiilihydraatti

MOE - Modulus Of Elasticity, eli kimmomoduuli

MOR, Modulus Of Rupture, eli murtolujuus

Polymeeri – pienten monomeerien kemiallisin sidoksin muodostama molekyyli

Polysakkaridi – monimutkainen hiilihydraatti

Puun kosteus = (veden massa puussa / kuiva puun massa) x 100 (Mynttinen 1978)

Pyrolyysi – eli kuivatislaus, orgaaninen aine hajoaa lämpöenergian avulla ilman happea