
Alipaineinjektion hyödyntäminen puuveneteollisuudessa

Tomi Rynänen

Opinnäytetyö

Ammattikorkeakoulututkinto



Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Puutekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Tomi Ryyänen	
Työn nimi Alipaineinjektion hyödyntäminen puuveneteollisuudessa	
Päiväys 7.2.2011	Sivumäärä/Liitteet 37
Ohjaaja(t) Risto Pitkänen, pt. tuntiopettaja	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Tero Santala, pt. tuntiopettaja	
Tiivistelmä <p>Työssä tutkitaan epoksihartsin imeytymistä puuhun sekä hartsin kulkeutumista viilukerrosten välissä. Tutkimustulosten perusteella kehitetään viilurakenne, joka mahdollistaa alipaineinjektion soveltamisen puuviilurakenteissa. Tavoitteena on kehittää rakenne, joka mahdollistaa alipaineinjektion käyttämisen puuveneteollisuudessa. Tulosten ollessa lupaavia, perustetaan yritys, joka jatkaa tuotteen kehittämistä valmiiksi teolliseksi tuotteeksi.</p> <p>Valmiin tuotteen mekaanisia ominaisuuksia testattiin Savonia-ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratoriossa. Tuotteelle suoritettiin taivutuslujuus-, sääolosuhde-, COPP- sekä vesiliuotuskokeet. Kokeissa oli mukana myös koivuvaneri-kappaleet, joihin saatuja tuloksia verrattiin.</p> <p>Työn tulosten perusteella alipaineinjektiotekniikkaa voidaan soveltaa puuveneteollisuudessa. Kyseisellä tekniikalla valmistetut rakenteet kestävät vettä ja sääolosuhdevaihteluita tavallista koivuvaneria paremmin. Myös lujuusominaisuudet ovat paremmat kuin koivuvanerilla. Työn tarkoituksena on tutkia alipaineinjektiotekniikan soveltamismahdollisuuksia puuveneteollisuudessa.</p>	
Avainsanat Alipaineinjektio, RTM, puuvene	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Wood Technology			
Author(s) Tomi Ryyänen			
Title of Thesis The Utilisation of RTM Technology in the Wooden Boat Industry			
Date	May 11, 2011	Pages/Appendices	37
Supervisor(s) Mr Risto Pitkänen			
Project/Partners Mr Tero Santala			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this final project was to examine absorption of epoxy resin in wood and spreading of resin between veneer layers. The aim was to develop a new veneer structure which enables the usage of the RTM (resin transfer moulding) application in wooden boat industry. The result being promising, a company will be founded to carry on with product development.</p> <p>First, the properties of the ready-made product were tested in the wood technology laboratory of Savonia University of Applied Sciences. The tests carried out were the tensile strength test, weather condition test, determination of water absorptiveness test using COPP method and moisture absorption test. Same tests were also made on birch plywood for comparison.</p> <p>The results of the tests show that the RTM application is usable in wooden boat industry. The structures stand water and weather conditions better than conventional birch plywood. Also strength properties are better than birch plywood.</p>			
Keywords RTM, wooden boat			

ALKUSANAT

Kiitän projektin onnistumisesta Savon ammatti- ja aikuisopiston muovialaa, muovikomposiittituotteiden ja valmistusmenetelmien kehittäminen-projektia sekä erityisesti Janne Lukkarista ja Esko Miettistä, jotka ovat omien töidensä lisäksi auttaneet minua alipaineinjektioon liittyvissä asioissa ja mahdollistaneet samalla työn toteuttamisen.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	KOESUUNNITELMA.....	9
3	ALIPAINEINJEKTIOTEKNIikka	11
	3.1 Historia.....	11
	3.2 Toimintaperiaate.....	12
	3.3 Muotin rakenne ja valmistaminen	12
4	TEKNIIKAN TOIMIVUUDEN TESTAAMINEN	18
	4.1 Kapilaarisuuden testaaminen	18
	4.2 Hartsin eteneminen muotissa	18
	4.3 Rakenteen testaaminen.....	19
5	TUOTTEEN MEKAANINEN TESTAUS	22
	5.1 Sääolosuhteiden kestävyys	22
	5.2 Taivutuslujuus	24
	5.3 COPP- vedenläpäisevyys.....	25
	5.4 Vesiliuotustesti	26
6	TESTIEN TULOKSET	27
	6.1 Sääolosuhdetesti.....	27
	6.2 Taivutuslujuus	30
	6.3 COPP-vedenimeytyminen	32
	6.4 Vesiliuotus.....	33
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	36
	LÄHTEET	37

1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena on tutkia muoviteollisuudessa käytettävän alipaineinjektion hyödyntämismahdollisuuksia kahteen suuntaan kaarevien puutuotteiden valmistamisessa. Työn taustalla on idea puuviiluneen valmistamisen koneellistamisesta. Tähän saakka puuviiluneet on laminoitu käsin. Onnistuessaan tämä projekti tarjoaa mahdollisuuden käsin laminoimisen poistamiseen.

Työn aihetta minulle tarjosi Savon ammatti- ja aikuisopiston puualan opettaja Tero Santala. Olen itse valmistunut puualalta puusepäksi keväällä 2005, joten puualan opettajat ovat minulle tuttuja. Idea veneen laminoinnin helpottamisesta oli Santalalle tullut oman veneprojektin kautta. Projektille tarvittiin henkilö, joka testaisi alipaineinjektiotekniikan toimivuutta.

Työn tavoitteena on kehittää puuviilurakenne, joka mahdollistaa alipaineinjektiotekniikan soveltamisen puualalla. Alipaineinjektioon tarvittavat laitteet sekä tietotaito löytyy Savon ammatti- ja aikuisopiston muovialalta, jossa kehitystyö suurimmaksi osaksi tehtiin. Muovialalla on meneillään projekti, jossa alipaineinjektiotekniikan käyttämistä Suomessa lisätään. Toimivan tuotteen mekaaninen testaus suoritetaan Savonia-ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratoriossa.

Projektin onnistuessa, idean pohjalta perustetaan yritys, joka kehittää tekniikkaa edelleen. Tulevaisuudessa yrityksen on tarkoitus aloittaa puuviiluneiden sekä muiden tuotteiden, johon tekniikkaa voidaan soveltaa, valmistus.

Työ toteutetaan Savon ammatti- ja aikuisopiston muovialan tiloissa. Muovialalla on alipaineinjektioon tarvittavat laitteet. Työssä testataan hartsin kapilaarista etenemistä alipaineistetussa muotissa sekä etsitään puuviilu rakennetta, joka mahdollistaa hartsin imeytymisen puuviiluihin.

2 KOESUUNNITELMA

Tuotteen kehittäminen aloitettiin projektisuunnittelulla syksyllä 2009. Projektin tarkka suunnittelu on tärkeää sen loogisen etenemisen kannalta. Tarkalla suunnittelulla voidaan projekti toteuttaa mahdollisimman tehokkaasti. Suunnittelun tuloksena syntyi Gant-kaavio (kuva 1), jonka mukaan projekti viedään läpi. Gant-kaaviossa näkyy eri toimenpiteiden ajankohdat.

Projektin nimi: Alipaineinjektio																																												
Tekijä: Tomi Rynnänen Aihe	2009					2010										2011																												
	Mar	Jou	Tam	Hel	Maa	Huh	Tou	Kes	Hei	Elo	Syy	Lok	Mar	Jou	Tam	Hei	Maa	Huh																										
	48	49	50	52	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	35	38	41	43	45	47	50	52	2	4	6	8	10	12	14	16								
Suunnittelu																																												
Koesuunnitelman tekeminen																																												
Kapilaarisuus testaaminen																																												
Testaaminen vedellä																																												
Testaaminen polyesterihartsilla																																												
Testaaminen epoksihartsilla																																												
Rakenteen testaaminen																																												
Työstämättömät viilut																																												
Polypropeeniverkko viilujen välissä																																												
Uritetut viilut																																												
Mekaaninen testaaminen																																												
Taivutuslujuus																																												
Turpoaminen																																												
Vedenimeytyminen																																												
Lomat																																												
Joululoma																																												
Hiihtoloma																																												
Kesäloma																																												
Syysloma																																												
Raportointi																																												
Tulosten analysointi																																												
Raportointi																																												

Kuva 1 Gant-kaavio

Kehittämiseen liittyvät testit aloitettiin marraskuussa 2009 ja ne kestivät kesään 2010 saakka. Ensimmäisissä testeissä tutkittiin nesteen kapilaarista etenemistä muotissa. Kapilaarisuustestejä tehtiin vedellä, polyesterihartsilla ja epoksihartsilla. Vedellä tehdyistä testeistä saatiin vain suuntaa antavia tuloksia johtuen veden pienemmästä viskositeetista verrattuna hartseihin. Polyesterihartsi on hankintahinnaltaan huomattavasti epoksihartsia halvempaa ja viskositeetiltaan se vastaa epoksihartsia, joten se soveltui käytettäväksi testausvaiheessa. Lopulliset testit tehtiin käyttäen epoksihartsia. Testien tulosten perusteella voitiin päätellä tekniikan soveltuvuutta puuviilutuotteille sekä tehdä päätöksiä tulevista testeistä sekä rakenneratkaisuista.

Kapilaarisuustestien jälkeen testattiin erilaisten rakenteiden toimivuutta. Testeissä haettiin rakennetta, jossa viilujen toisiinsa liimautuminen on mahdollisimman hyvä ja samalla hartsin juoksevuus viilukerrostojen välissä pysyy hyvänä. Testeissä testattiin työstämättömistä viiluista koostuvaa rakennetta ja uritetuista viiluista koostuvaan rakennetta. Lisäksi testattiin rakennetta, jossa viilujen välissä käytetään polypro-

peeniverkkoa hartsin juoksevuuden varmistamiseksi. Rakenteeseen liittyvät testit tehtiin syksyn 2010 aikana.

Tuotteen mekaaninen testaaminen suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratoriossa. Suoritettavia testejä olivat taivutuslujuus, sääolosuhdetestaus, COPP-vedenimeytyminen sekä vesiliuotus. Testien avulla selvitettiin tuotteen lujuusominaisuuksia sekä soveltuvuutta veneen rakennusmateriaaliksi. Mekaaniset testit suoritettiin maaliskuussa 2011.

3 ALIPAINIJEKTIOTEKNIikka

3.1 Historia

Alipaineinjektio tulee englannin sanoista resin transfer moulding (RTM). Ensimmäisiä RTM-tekniikkaan viittaavia sovelluksia käytettiin jo vuonna 1946 Yhdysvaltojen tilaamien miehistönkuljetusalusten valmistuksessa. Silloinen tekniikka osoitti, että lasikuitu ja polyesterihartsit ovat muotoiltavissa alipaineen avulla. Lasikuitulujitteet ladottiin kahden muotin väliin ja muotin alareunassa ollut hartsi imettiin alipaineen avulla lujitteiden läpi muotin yläreunaan. Hartsin liikuttamiseen voitiin käyttää myös ylipainetta, jolloin vaadittiin tukevia muotteja. Tällöin huomattiin alipaineinjektio prosessin olevan ongelmallinen ja sopimaton monimuotoisille kappaleille. [1.]

Syyt miksi alipaineinjektioa alettiin kehittää uudelleen, olivat Harold John Pollardin ja John Reesen vuosina 1952–1956 tekemät patentit. Tuolloin ainoat metallia paremmat lujitteet olivat kasvikuuti ja asbesti. Hartsina he käyttivät fenolia vaikkakin polyesteri- ja epoksihartseja oli ollut saatavilla jo muutamia vuosia. Yksi kehityksen kohteista oli asbesti/fenoli esivalmisteiden valmistaminen monimuotoisille komponenteille. Toinen ongelma oli mahdollinen veden kondensoituminen muottiin. Tämä ratkaistiin vuoden 1952 marraskuussa julkaistussa patentissa, jossa hartsi injektioitiin muottiin riittävällä paineella ja näin hartsin oma hydrostaattinen paine ehkäisi veden kondensoitumisen. [1.]

Helmikuussa 1955 julkaistiin patentti, joka on täysin tunnistettavissa RTM-tekniikaksi. Keksintö noteerattiin välittömästi lentokone- ja autoteollisuudessa. Patentoidun tekniikan avulla pystyttiin valmistamaan monimutkaisia kahteen suuntaan kaarevia komponentteja. Samalla saatiin tuloksia hartsin virtausmatkoista. Parhaillaan oli mahdollista päästä jopa 12 jalan virtausmatkaan, mutta käytännössä matka kannattaa kuitenkin rajoittaa 6 jalkaan. Lisäksi patentissa kerrotaan riittävällä tarkkuudella GRP:stä (glass reinforced plastic) eli lasikuidusta valmistetun muotin valmistamisesta sekä muotin jäykkyyden tärkeydestä. Patentin koko idea on todistaa, että RTM tekniikalla voidaan valmistaa monimuotoisiakin osia. [1.]

Seuraavien vuosien aikana julkaistiin patentteja liittyen hartsin injektioimiseen. Laitteiden avulla hartsi voitiin injektoida muottiin koneellisesti ja injektioinnin määrää voitiin säätää ja valvoa sekä sisään- ja ulostuloliitännät sulkea oikea-aikaisesti. Tullessa 1960 luvulle RTM oli yleisesti ottaen kyvykkäin muottitekniikka ja oli odotettavissa,

että tekniikkaa kehitetään edelleen, mutta näin ei kuitenkaan käynyt vaan RTM löydettiin uudestaan vasta 1980-luvulla. Nykyään yleisesti käytössä oleva tekniikka on huomattavasti yksinkertaisempi kuin 1950-luvun patenteissa kuvattu tekniikka. [1.]

3.2 Toimintaperiaate

RTM-tekniikan toimintaperiaate perustuu alipaineeseen sekä jäykkään kaksiosaiseen muottiin. Tekniikka tarvitsee toimiakseen muotin lisäksi alipainepumpun, injektointilaitteen, tarvittavat letkut sekä hartsiloukun.

Halutut lujitteet asetellaan päämuotin pinnalle huolellisesti siten, että lujitteet saadaan tasaisesti muotin kaikkiin kulmiin. Lujitteita voivat olla esimerkiksi lasi- ja hiilikuitumatot. Tämän jälkeen vastamuotti nostetaan päämuotin päälle ja vastamuottiin kytketään alipaineletkut, hartsiloukko sekä injektointiventtiili. Muotti alipaineistetaan alipainepumpun avulla, jolloin muotti sulkeutuu. Muotti on valmis hartsin injektointiin. Injektointi tapahtuu siihen tarkoitetulla laitteella, johon säädetään syötettävän hartsin sekä kovetteen määrä ja hartsin injektointipaine. Laite sekoittaa kovetteen hartsiin ja pumppaa sen muottiin, jonka jälkeen se huuhtelee syöttölinjaston liuottimella, ettei hartsia kovetu syöttölinjastoon. Hartsin annetaan kovettua muotissa, jonka jälkeen muotti voidaan avata.

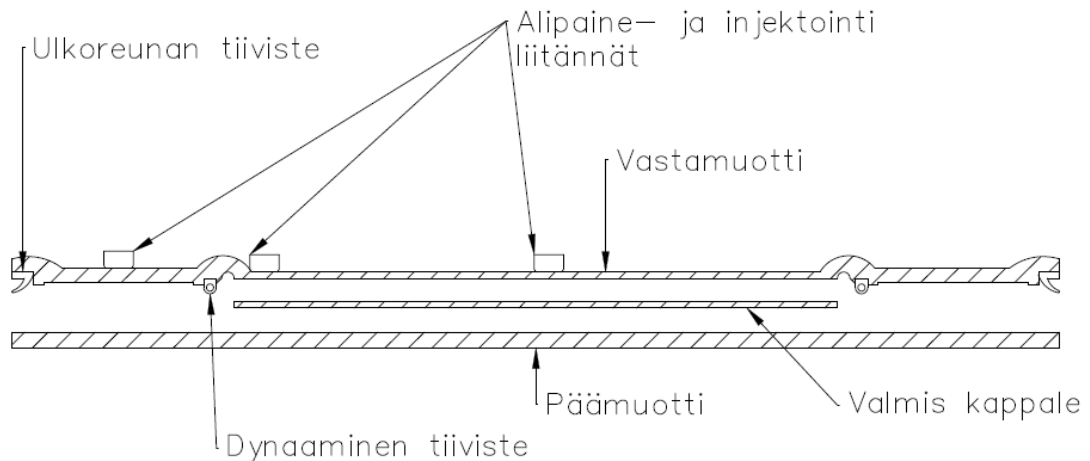
Kovettumisaika riippuu käytettävästä hartsista ja kovetteen määrästä ja voi vaihdella muutamasta tunnista vuorokauteen. Lisäksi jotkin hartsit tarvitsevat kovettuakseen lisälämpöä. Muotin alipaineletkut irrotetaan ja vastamuotin dynaamisen tiivisteeseen sisään puhalletaan paineilmaa, jolloin muotti aukeaa. Vastamuotti nostetaan pois ja valmis kappale nostetaan muotista. Päämuotin ja kappaleen väliin voidaan puhaltaa paineilmaa, jolloin kappale irtoaa muotista helpommin.

Suljetussa muotissa on kaksi erillistä alipainealuetta. Injektointi alueella on 0,5 baarin alipaine joka tuottaa muotille 5 000 kg:n puristusvoiman yhtä neliometriä kohti. Ulomassa alipainekentässä on suurempi 0,8 baarin alipaine. Tämä alipainekenttä imee muotin kiinni ja suuremman alipaineen ansiosta dynaamisen tiivisteiden vuotauksessa injektointialueelle ei pääse ilmaa vaan vuoto tapahtuu toiseen alipainekenttään.

3.3 Muotin rakenne ja valmistaminen

Muotin osat ovat päämuotti, joka on jäykkä ja antaa kappaleelle halutun muodon, sekä vastamuotti, joka on rakenteeltaan päämuottia kevyempi ja hieman elastinen.

Vastamuottiin on kiinnitetty tiivisteet sekä tarvittavat alipaineletkujen liittimet. Injektoitavan kappaleen ulkopuolella vastamuotissa on hartsin juoksutusura, jossa injektoitava hartsi kiertää injektoitavan kappaleen ympäri. Dynaaminen silikonista valmistettu tiiviste eristää alipainealueet toisistaan. Tiiviste on ontto ja sitä voidaan hyödyntää muotin aukaisussa puhaltamalla tiivisteeseen sisään paineilmaa. Ulkoreunalla on vaahdotuovista valmistettu tiiviste. Muotin osat näkyvät kuvassa 2.



Kuva 2. Muotin rakenne. Kuva: Tomi Ryynänen

Muotin valmistaminen aloitetaan valmistamalla lesti, josta saadaan päämuotin muoto. Suoran päämuotin lesti voidaan tehdä lastulevystä. Monimutkaisempien muottien lestit valmistetaan jyrsimällä ne robotilla tai CNC-jyrsimellä styroksista tai MDF-levystä. Levyn pinta ruiskukitataan ruiskukitillä. Pinnan annetaan kuivua ja pinta hiotaan kittauskerrosten välillä. Kitattu pinta hiotaan paineilmahiomakoneella. Hiomapaperin karkeuksina käytetään 240, 320, 400, 500 ja 600. Lestin pinnan tulee olla täysin virheetön, sillä siinä olevat virheet kopioituvat päämuottiin ja sitä kautta lopulliseen valmistettavaan tuotteeseen. Hionnan jälkeen levyn pinta vahataan karnaubapohjaisella Norpol wax x-70 muottivahalla. Vahaa levitetään kuusi kerrosta ja jokaisen vahakerroksen välissä vahan annetaan kuivua vähintään kuusi tuntia. Vaha täyttää ruiskukitin huokokset ja estää muotin kiinnitarttumisen.

Lestin valmistuttua pintaan sivellään vinyyliesteristä valmistettu muottigeeli. Levitysmäärä on 500 g/m^2 . Tarvittava määrä muottigeeliä otetaan erilliseen astiaan ja siihen sekoitetaan 1,5 % kovetetta. Kovete ja muottigeeli sekoitetaan huolellisesti ja muottigeeli levitetään lestin pintaan noin 2 mm:n paksuiseksi kerrokseksi. Muottigeeliä levitetään kaksi kerrosta. Geelin annetaan kovettua vähintään 5 tuntia. Muottigeelin pintaan voidaan aloittaa päämuotin rakenteiden laminointi. Ensimmäisten kerrosten laminoinnissa käytetään vinyyliesterihartsia sekä 300 g/m^2 katkolasikuitumattoa. Ensin

laminoidaan kaksi kerrosta 300 g/m²:n mattoa. Ennen laminointia valmistellaan tarvittavat lasikuitumaton palat, työvälineet sekä sekoitetaan tarvittava määrä vinyyliesterihartsia. Vinyyliesterihartsi levitetään muottigeelin pinnalle telalla. Tämän jälkeen lasikuitumatto asetetaan märälle pinnalle ja sen päälle levitetään lisää hartsia. Lasikuitumatto ilmataan alumiinisella telalla siten, että lasikuitumatto kastuu läpi. Näin jatketaan kunnes haluttu kerrosvahvuus saavutetaan.

Seuraavat kerrokset laminoidaan muottihartsilla. Muottihartsi on polyesterihartsia, johon on sekoitettu sekaan kestopuovia. Kestomuovin avulla hartsin kutistuma pienenee merkittävästi ja muotit pysyvät mittatarkkoina. Hartsi on sekoitettava huolella ennen käyttöä, sillä kestopuovi jaottuu säilytysastian pohjalle. Rakennekerrosten laminoinnissa käytetään 450 g/m²:n katkolasikuitumattoa. Laminoinnissa on otettava huomioon, että laminoidaan neljä mattokerrosta kerralla, jotta hartsi saavuttaa minimissään 40 C:n lämpötilan. Muottiin laminoidaan yhteensä kahdeksan kerrosta 450 g/m² mattoa.

Kun muotin laminointi on valmis, muotti irrotetaan lestistä ja muotin reunat viimeistellään kulmahiomakoneella käyttäen timantti- ja lamellilaikkoja. Lasikuidun työstäminen edellyttää kunnollisia suojavälineitä sekä hyviä hiontapölyn imureita. Muotin pinta hiotaan paineilmahiomakoneella käyttäen paperikarkeuksia 500, 600 ja 1000. Tämän jälkeen muotti kiillotetaan kiillotuskoneella ja kiillotustahnalla. Kiillotettu päämuotti näkyy kuvassa 3. Kiillottamisen jälkeen muotin pinta puhdistetaan zyx surface cleaner -puhdistusaineella ja pintaan laitetaan zyxwax sealer-gp -huokoslakka. Huokoslakkaa levitetään ohuin kerroksin, ylimääräinen aine pyyhitään pois ja pinta kiillotetaan nukkaamattomalla kankaalla. Huokoslakkaa levitetään neljä kerrosta jättäen kerrosten väliin vähintään 15 minuutin kovettumisaika. Seuraavaksi muotin pinta käsitellään zyxwax multishield -irrotusaineella. Irrotusainetta laitetaan kaksi kerrosta 15 minuutin välein ja se levitetään samoin kuin huokoslakka.



Kuva 3. Kiillotettu päämuotti. Kuva: Tomi Rynnänen

Vastamuotin valmistaminen aloitetaan mallintamalla päämuottiin haluttavan komponentin paksuus. Tämä tehdään vahalevyillä. Vahalevyjen koko on 304 x 608 mm ja paksuudet vaihtelevat 0,5–5 mm:iin. Vahalevyissä on liimapinta, jonka avulla vahalevy saadaan kiinnittymään haluttuun paikkaan. Vahalevyt liimataan injektoitavan kappaleen kohdalle ja kappaleen paksuuden verran. Vahalevyn ulkopuolelle jäänyt alue suojataan maalarinteipillä ja siihen kiinnitetään tiivisteet, joiden avulla vastamuottiin saadaan jäämän hartsin juoksutusura sekä urat tiivisteille. Tiivisteet ovat silikonia ja tiivisteillä on tietty profiili, jotta muottiin myöhemmin kiinnitettävä tiiviste istuu hyvin paikoilleen. Tiivisteiden kiinnittämisessä käytetään pikaliimaa. Sisimmäiseksi tiivisteeksi aivan vahalevytetyn alueen viereen kiinnitetään sininen tiiviste (kuva 4), joka tekee vastamuottiin hartsinjuoksutusuran. Seuraava punainen tiiviste kiinnitetään aivan edellisen tiivisteiden viereen (kuva 4). Tämä tiiviste tekee vastamuottiin uran dynaamiselle tiivisteelle. Reunatiivisteelle uran tekevä oranssi tiiviste (kuva 4) kiinnitetään 100 mm:n päähän edellisestä tiivisteestä.

Tiivisteiden välisen tilan suuruus vaihtelee tarvittavan puristusvoiman mukaan. Tiivisteiden väliin jäävään tilaan liimataan ohut vahalevysuikale, joka ei saa peittää koko aluetta. Tämä alue toimii muotissa erillisenä alipainekenttänä, joka sulkee muotin ja samalla rajoitinpintana päämuottia vasten. Maalarinteippipinta käsitellään slippillä, jotta laminoitava vastamuotti irtoaisi helpommin. Tarvittavat alipaine- ja injektointiliittimet kiinnitetään pikaliimalla. Injektoitavan kappaleen keskelle kiinnitetään alipaineli-

tin ja juoksutusuran kohdalle liitin injektointia varten. Lisäksi kiinnitetään vielä yksi liitin alipaineelle ulompaan alipainekenttään. Liittimien paikat tulee suunnitella kappaleen muodon mukaan. Suuremmissa kappaleissa injektointi- ja alipaineliittimiä voi olla useampia.



Kuva 4. Tiivisteet sekä vahalevyt päämuotinpinnalla. Kuva: Tomi Rynnänen

Vastamuotin laminointi aloitetaan muottigeelin levittämällä. Vastamuotissa käytetään kirkasta muottigeeliä, jotta muottia käytettäessä voidaan seurata hartsin etene mistä. Ensimmäinen kerros tiivisteiden päälle laminoidaan ohutta jatkuvakuituista lasikuitumattoa. Jatkuvakuituista mattoa käytetään, jotta matto saadaan ilmatua mahdollisimman hyvin tiivisteiden teräviin kulmiin. Maton alle jäävät suuret ilmakuplat heikentävät vastamuotin pinnan rakennetta ja muotin pinta voi myöhemmin rikkoon tua. Muotin keskiosa laminoidaan normaalilla katkokuituisella matolla. Hartsin kuivutua tiivisteiden reunat kitataan viistoiksi hartsista ja amorfisesta piihaposta eli niin sanotusta enkelinpölystä tehdyllä kitillä. Tämä tehdään myöhempien laminointikerto jen helpottamiseksi. Muottiin laminoidaan vielä yksi 30 g/m^2 matto ja kaksi 450 g/m^2 mattoa vinyyliesterihartsilla.

Vastamuotissa olevien liittimien juuret vahvistetaan laminoinnin yhteydessä lasikuitu nauhalla. Lisäksi tiivisteiden päälle laminoidaan kuusi kerroksinen vahvike muotti hartsilla ja 450 g/m^2 katkolasikuitumatolla. Tämä estää muotin taipumisen käytössä. Kuvassa 5 näkyy valmiiksi laminoitu vastamuotti liittimineen. Kuvasta voidaan myös nähdä vastamuotin vahvennetut reunat sekä läpinäkyvä keskiosa. Laminoinnin jäl-

keen vastamuotti irrotetaan kovasta muotista ja muottiin jääneet vahalevyn palat poistetaan. Muotti puhdistetaan vedellä ja zywax surface cleanerillä. Muotin reunat viimeistellään ja muotti hiotaan ja kiillotetaan samoin kuin toinenkin muotinpuolikas. Myös tarvittavat huokoslakka ja irrotusaine kerrokset levitetään samoin kuin toiseen muotinpuolikkaaseen. Irrotusaineen levittämisen jälkeen vastamuottiin liimataan tiivisteet niille tarkoitettuihin uriin. Silikonista valmistettu dynaaminen tiiviste kiinnitetään sisempään uraan ja vaahtomuovinen ulkoreunan tiiviste kiinnitetään muotin ulkoreunaan. Tiivisteet kiinnitetään pikaliimalla ja tiivisteiden reunoihin laitetaan vielä silikoni varmistamaan tiivisteiden pitävyyden. Tämän jälkeen muotti on valmis käytettäväksi.



Kuva 5. Laminoitu vastamuotti. Kuva: Tomi Rynnänen

4 TEKNIIKAN TOIMIVUUDEN TESTAAMINEN

Alipaineinjektiotekniikan soveltuvuuden testaaminen aloitettiin syksyllä 2009 Savon ammatti- ja aikuisopiston muovialan tiloissa. Syksyn ja seuraavan kevään aikana tehtiin useita kokeita hartsin juoksevuudesta viilukerrosten välissä sekä hartsin kapilaarisesta etenemisestä alipaineistetussa muotissa.

4.1 Kapilaarisuuden testaaminen

Ensimmäisenä kokeena testattiin vanerista ja pleksistä tehdyssä muotissa nesteen kapilaarista etenemistä. Muottiin asetettiin 4,5 mm paksu koivuvanerista valmistettu koekappale, jonka koko oli 200 x 1 200 mm. Koekappaleeseen oli koneistettu 2 mm syviä uria 200 mm:n ja 100 mm:n välein. Muotti alipaineistettiin ja sinne imettiin vesi. Vesi eteni nopeasti kappaletta ympäröivissä juoksutuskanavissa sekä koekappaleeseen jyrskyissä urissa. Vesi eteni kapilaarisesti urien välissä siten, että koko koekappale kastui.

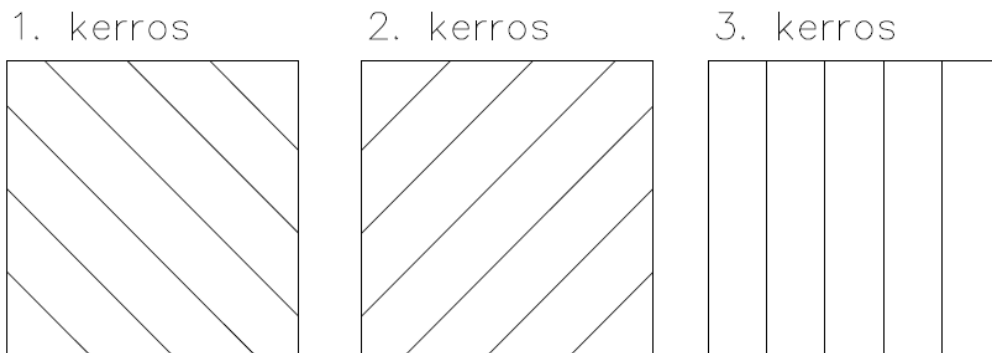
Koe uusittiin käyttämällä veden sijasta polyesterihartsia. Polyesterihartsin viskositeetti on huomattavasti vettä suurempi, joten hartsin eteneminen muotissa oli hitaampaa. Kuitenkin jo noin yhden minuutin kuluttua hartsin injektoimisen aloittamisesta hartsi peitti koekappaleen urien välisen pinnan. Urien etäisyys tässä oli 100 mm. Seitsemän minuutin alipainestamisen jälkeen hartsi peitti lähes kokonaan 200 mm:n etäisyydellä olevien urien välisen pinnan. 10 minuutin jälkeen hartsi peitti koko koekappaleen pinnan. Kappaleen toisella pinnalla hartsin kapilaarinen eteneminen oli vähäistä. Hartsi oli levinnyt vain 100 mm:n päähän kappaleen päistä. Kappaleen pitkillä sivuilla imeytymistä tapahtui vain noin 20 mm:n matkalla.

4.2 Hartsin eteneminen muotissa

Seuraavaksi testattiin hartsin etenemistä viilukerrosten välissä. Koe suoritettiin samalla muotilla kuin aikaisemmatkin kokeet. Koekappale muodostui pitkittäisistä tammiwiiluista sekä poikittaisista 70 mm leveistä koivuwiiluista. Koivuwiilujen välissä oli noin 2 mm:n levyiset raot, jotka toimivat hartsin juoksutusurina. Injektoinnissa käytettiin polyesterihartsia. Kokeessa hartsi tuli pintaviilun läpi ja imeytyi hyvin koekappaleen sisällä viilukerrosten välissä.

4.3 Rakenteen testaaminen

Edellisten kokeiden tulosten perusteella päätettiin valmistaa suurempi koemuotti, jonka koko on 1 000 x 1 000 mm. Päämuotin materiaalina käytettiin edelleen vaneria ja vastamuotiksi laminointiin noin 3 mm paksu lasikuitulevy. Koekappale muodostui kolmesta 2 mm:n paksuisesta kuusiviilukerroksesta. Kuusiviilut olivat 200 mm leveitä ja ne ladottiin muottiin ristiladontana siten, että ensimmäisen kerroksen viilut olivat 45 kulmassa kappaleen sivuun nähden ja toisen kerroksen viilut 90 kulmassa ensimmäiseen kerrokseen nähden. Viimeinen kerros ladottiin kappaleen sivun suuntaisesti. Kuva 6 selkeyttää ristiladonnan rakenteen. Viilujen välissä oli 2 mm:n rako hartsin juoksemisen helpottamiseksi ja viilukerrosten välissä oli polypropeeniverkkoa, joka helpotti hartsin juoksemista viilukerrosten välissä.



Kuva 6. Viilujen suunta ristiladonnassa. Kuva: Tomi Rynnänen

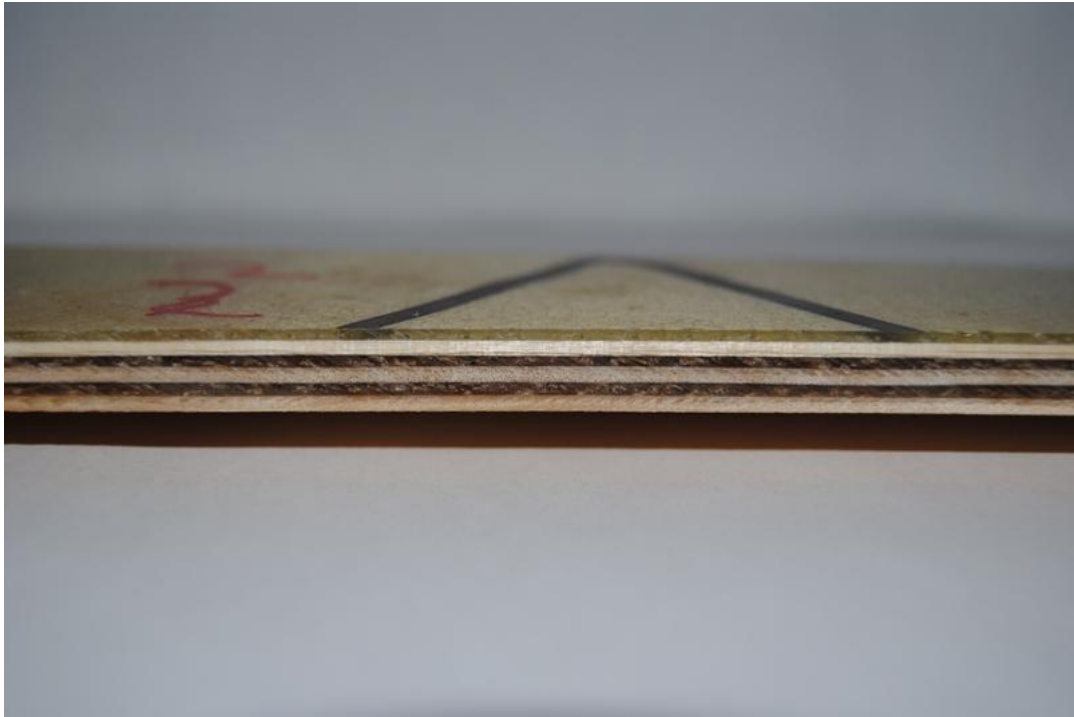
Koe tehtiin käyttäen hartsina Sicomin 8100 epoksia. Hartsiin sekoitettiin kovete ja hartsin injektioitiin alipaineistettuun muottiin. Ohuesta läpikuultavasta vastamuotista voitiin seurata hartsin etenemistä muotista. Koekappaleen vastamuotin puoleinen pinta täyttyi hyvin, mutta päämuotin puoleinen pinta jäi keskeltä kuivaksi. Epoksihartsin imeytyi hyvin puuviiluihin sekä levisi tasaisesti muotin sisällä. Ohuesta vastamuotista johtuen koekappale oli keskeltä huomattavasti paksumpi kuin reunoilta. Koekappaleen keskellä oli paksusti epoksihartsia ja lopputuotteessa tämä johtaa liian korkeisiin valmistuskustannuksiin sekä liian huonoon mittatarkkuuteen.

Edellisten kokeiden perusteella päätettiin valmistaa virallinen lasikuidusta valmistettu muotti. Muotista tehtiin suora ja siinä tehtävien koekappaleiden koko tuli olemaan 600 x 600 mm. Lestinä toimi 30 mm paksu ruiskukitattu lastulevy. Lastulevyn pinta-ala oli 900 x 900 mm, jolloin valmiiseen muottiin saatiin 150 mm leveä laippa tiivisteille. Muotti valmistettiin kappaleessa 2.3 mainitulla tavalla ja se kalibroitiin 6 mm paksulle kappaleelle.

Kokeissa käytettiin 1,5 mm paksua koivuviilua. Ensimmäisessä kokeessa käytettiin ainoastaan koivuviilua. Viilukerroksia oli neljä. Tällöin huomattiin, että muotti puristaa viilut toisiaan vasten niin voimakkaasti, ettei hartsi virtaa tasaisesti koko muotin alueelle. Seuraavassa kokeessa alipaineliitännän kohdalle viiluihin porattiin pieni reikä ja huomattiin, että tämä parantaa hartsin leviämistä huomattavasti. Seuraavassa kokeessa viilukerrosten määrä vähennettiin kolmeen ja viilujen väliin laitettiin Scott&Fyte:n valmistamaa polypropeeniverkkoa. Tällöin hartsi saatiin virtaamaan tasaisesti kaikkialle muottiin. Tähän saakka kokeet oli tehty polyesterihartsilla. Valmis koekappale näkyy kuvassa 7. Kokeiden tulosten perusteella päätettiin tilata 20 kg infuusioepoksia jatkokokeisiin, jolloin nähtäisiin hartsin virtauma oikealla liima-aineella. Samalla tilattiin ohuempaa polypropeeniverkkoa, koska edellisellä verkolla viilujen välissä oleva epoksikerros jäi liian paksuksi (kuva 8).



Kuva 7. Polyesterihartsilla injektoitu koekappale. Kuva: Tomi Ryynänen



Kuva 8. Koekappaleen rakenne Scott&Fyten polypropeeniverkolla. Kuva: Tomi Ryynänen

Seuraavassa kokeessa käytettiin hartsina Axson valmistamaa matalaviskositeetistä Epolam 5015 infuusioepoksia sekä viilujen välissä ohuempaa muoviverkkoa. Kokeessa huomattiin, että hartsi saadaan juoksemaan viilujen väliin ohuemman muoviverkon avulla. Tällöin hartsin tilavuus jää pienemmäksi ja valmistettaessa saadaan aikaan huomattavia säästöjä verrattuna paksumpaan verkkoon. Samalla huomattiin kyseisen epoksin olevan sopimaton meidän sovellukseen epoksin hitaan kovettumisajan vuoksi. Seuraaviin kokeisiin tilattiin uutta ekologista Amroy Oy:n valmistamaa EpoPiox epoksia. Epoksia odotellessa päätettiin testata rakennetta, jossa viilujen välinen muoviverkko korvataan viiluun työstettävillä urilla. Urat työstettiin viiluihin CNC-jyrsimellä. Tässä kokeessa viilukerroksia oli neljä, joista kolmessa oli uritus. Näin saatiin muottipinnoille jäämään ehyet viilupinnat. Koe tehtiin polyesterihartsilla ja hartsi juoksi uritusta pitkin koko muotin alalle. Vain päämuotin puoleinen pinta jäi keskeltä kuivaksi. Epoksin saavuttua testi uusittiin. EpoPiox:lla tehtynä testi onnistui erittäin hyvin. Epoksi imeytyi puuhun erittäin hyvin ja pinnan laadusta tuli hyvä. Hartsi peitti myös kokonaan päämuotin puoleisen pinnan.

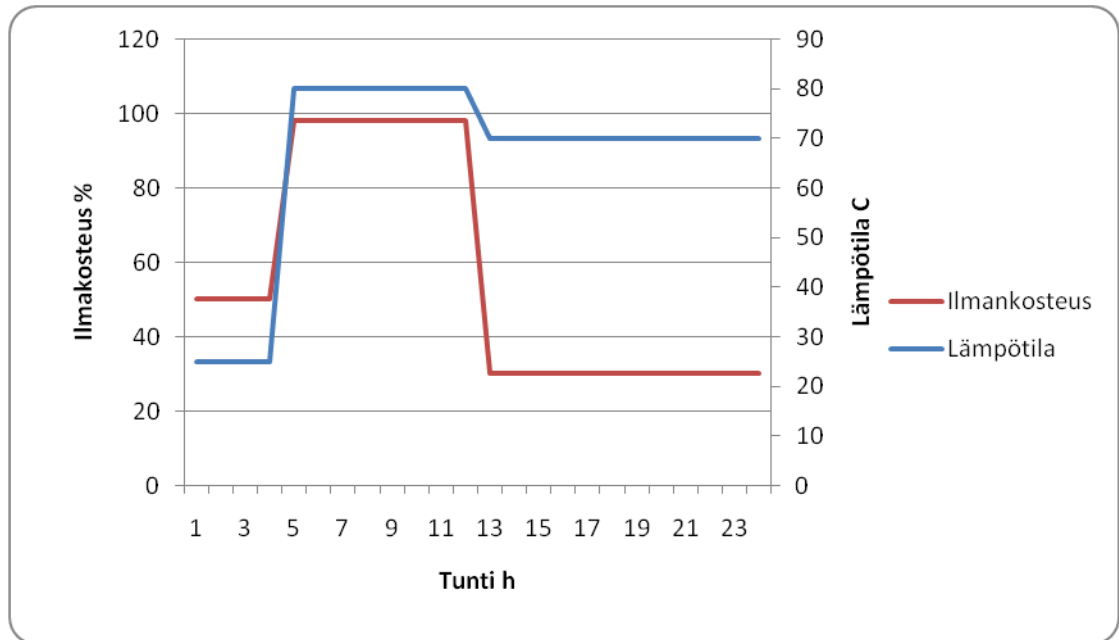
5 TUOTTEEN MEKAANINEN TESTAUS

Valmiin tuotteen mekaaninen testaaminen suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratoriossa. Tuotteesta testattiin sen sääolosuhteiden kestävyys, taivutuslujuus, turpoaminen sekä vedenimeytyminen. Kokeiden tuloksia verrattiin 6,5 mm paksun koivuvanerin tuloksiin.

5.1 Sääolosuhteiden kestävyys

Sääolosuhdetesti tehtiin Vötsch sääkaapissa 26 koekappaleelle. Kymmenen koekappaleen reunat olivat epoksihartsilla kyllästetyt ja kymmenen koekappaleen reunat olivat avoimet. Kokeessa oli mukana kuusi vanerista koekappaletta, joista saatiin vertailukohta koekappaleille. Koekappaleiden koko oli 107 x 290 mm. Ennen koetta koekappaleet punnittiin. Lisäksi koekappaleista mitattiin kiiltoaste sekä väriarvo. Lopuksi koekappaleille suoritettiin visuaalinen arviointi. Testin jälkeen kappaleiden paino, kiiltoarvo sekä väriarvo mitattiin uudestaan ja saatuja tuloksia verrattiin keskenään. Kappaleille suoritettiin vielä visuaalinen arviointi, jonka jälkeen kappaleet sahattiin taivutuslujuuskokeeseen sopiviksi.

Sääolosuhteena testissä käytettiin välimeren ilmastoa mukailevaa kaksi viikkoa kestävää koetta. Ohjelma toistaa 14 kertaa vuorokauden pituisen syklin, jossa sääkaapin lämpötilaa ja ilmankosteutta muutetaan. Ohjelman muutokset yhden vuorokauden ajalta näkyvät kuvasta 9. Lämpötila vaihtelee 25 C:sta 80 C:een ja ilmankosteus 30 %:sta 98 %:iin. Lisäksi ohjelma sadetti kappaleita kahdeksan sekunnin sykleissä kahden minuutin välein sääkaapin lämpötilan ollessa 80 C.



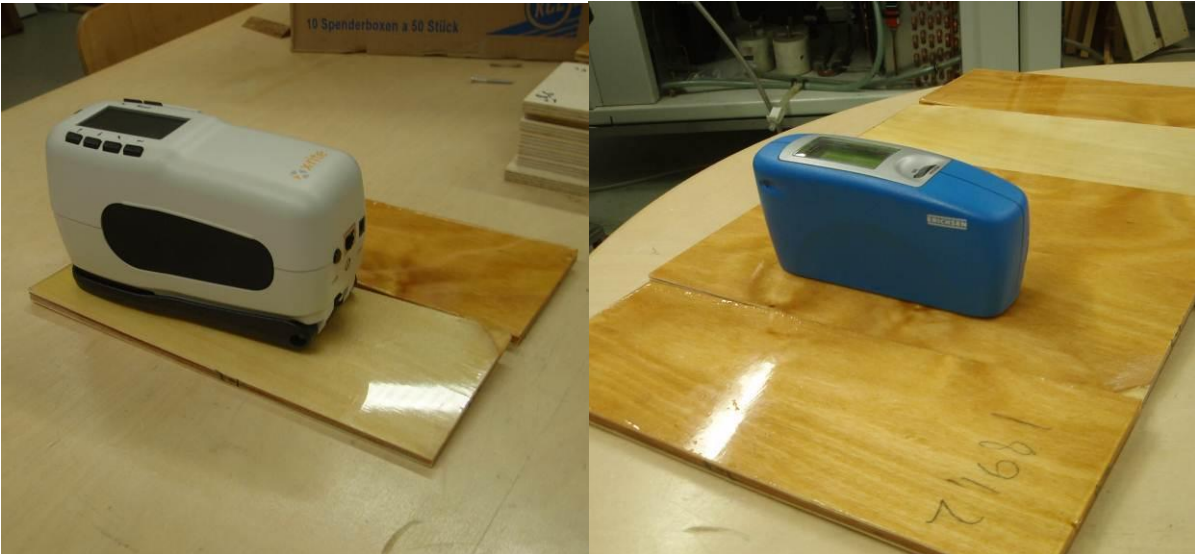
Kuva 9 Ohjelman lämpötilan ja ilmankosteuden vaihtelu

Kappaleiden väriarvot mitattiin x-rite sp62 spektrofotometrillä (kuva 10). Laite antaa L-, a- ja b- arvot väriavaruudesta kolmen mittauspisteen keskiarvona. L-arvo tarkoittaa värin kirkkautta, a-arvo kertoo värin sijainnin vihreän ja punaisen välisellä akselilla ja b-arvo sijainnin keltaisen ja sinisen värin välillä [2.]. Väriarvojen muutos ΔE^*_{ab} laskettiin mitatuista arvoista kaavalla

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{(0,5)} \quad (1)$$

jossa ΔL on L-arvon muutos, Δa on a-arvon muutos ja Δb on b-arvon muutos[3].

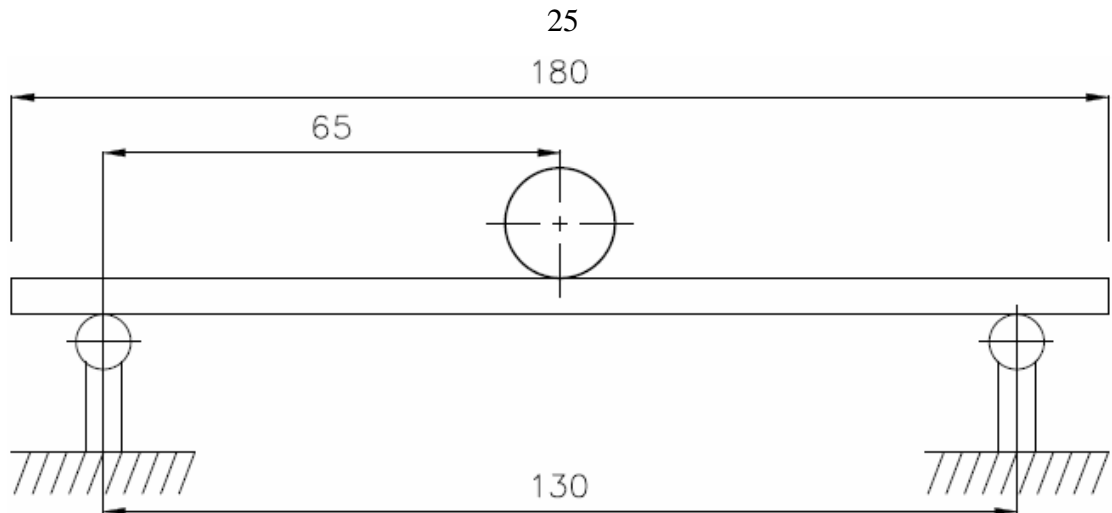
Väriarvot mitattiin jokaisesta kappaleesta. Kappaleiden kiiltoarvot mitattiin Erichsen kiiltomittarilla (kuva 10). Laite mittaa kiiltoarvon 60 kulmassa. Jokaisesta kappaleesta mitattiin kolme arvoa. Mittaustulokset siirrettiin tietokoneelle excel-taulukkoon.



Kuva 10. Spektrofotometri vasemmalla ja kiiltomittauslaite oikealla. Kuva: Tomi Rynnänen

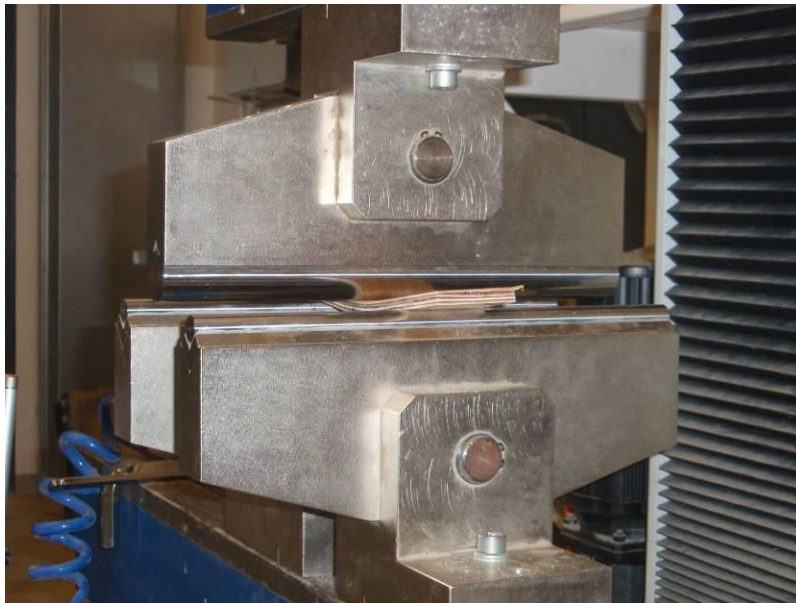
5.2 Taivutuslujuus

Taivutuslujuuskoe tehtiin TIRA aineenkoetuskoneella kolmipistetaivutuksena standardin SFS-EN 310 mukaan [4.]. Koekappaleita oli yhteensä 68, joista 36 oli jälkikövetettyjä joko 60 C:n tai 80 C:n lämpötilassa. Levyistä sahatut 50 x 200 mm:n kokoiset koekappaleet numeroitiin siten, että numeroinnin perusteella nähtiin, mistä kohdasta levyä se oli sahattu. Tällöin voitiin vertailla levyjen välisiä eroja. Koekappaleet tasaannutettiin ennen testaamista. Aineenkoetuskone varustettiin tarvittavilla varusteilla sekä ohjelmoitiin siihen standardin mukainen testausohjelma. Koneen alapuoliset tukipinnat säädettiin 130 mm:n etäisyydelle toisistaan siten, että yläpuolen painin oli keskellä alapuolen tukipintojen välissä. Koekappaleet asetettiin tukipintojen päälle ja kappaletta taivutettiin yläpainimella painamalla kunnes kappale murtui. Kuvassa 11 näkyy painimien asettelu. Aineenkoetuskone piirsi kuvaajan maksimivoimasta ja painimen siirtymästä. Lisäksi kone antoi tulokset kappaleiden taivutuslujuudesta sekä kimmomoduulista.



Kuva 11. Kolmipistetaivutus. [3.]

Sääolosuhdetestissä olleet kappaleet sahattiin 50 x 200 mm:n kokoisiksi. Kappaleet merkattiin ja ne koestettiin samoin kuin aikaisemmat taivutuslujuuskappaleet. Koe-kappaleita oli 40 kappaletta. Näiden kappaleiden taivutuslujuusarvoja verrattiin aikai-semmin saatuihin arvoihin. Kuvassa 12 näkyy taivutuslujuuskappaleiden koestamista.



Kuva 12. Kappaleiden koestamista. Kuva: Tomi Rynnänen

5.3 COPP- vedenläpäisevyys

Testaus suoritettiin standardin EN 20 535 mukaan 168 tuntia kestäväenä [5.]. Levyistä sahattiin 150 x 150 mm:n kokoisia kappaleita. Koekappaleiden painot mitattiin ja kirjattiin excel-taulukkoon. Kappaleiden päälle asetettiin tiivistetyt lyhyet putket, joiden sisään kaadettiin vettä. Putken halkaisija oli 110 mm ja pinta-ala 9 503 mm². Kappa-

leiden paino mitattiin vuorokauden välein. Saatujen tuloksien perusteella laskettiin kappaleen painon muutos. Tuloksia verrattiin filmipinnoitetun(120 g/m²) vanerin tuloksiin.

5.4 Vesiliuotustesti

Vesiliuotustesti tehtiin standardin EN 317 mukaan [6.]. Kokeeseen sahattiin 28 koekappaletta, joiden koko oli 50 x 50 mm. Koekappaleista 12 oli kovettamattomia, 6 jälkikovetettu 60 C:ssa ja kuusi jälkikovetettu 80 C:ssa. Lisäksi mukana oli 4 vaneri koekappaletta, jotta tuloksia voitiin verrata. Koekappaleista mitattiin paino, leveys, pituus sekä paksuus. Tulokset kirjattiin muistiin. Tämän jälkeen kappaleet upotettiin veteen siten, että kappaleiden päällä oli vähintään 25 mm vettä. Kuvassa 13 näkyy upotetut koekappaleet. Koekappaleet mitattiin ja punnittiin vuorokauden välein viikon ajan. Kappaleiden leveys ja pituus mitattiin digitaalisella työntömitalla 0,01 mm:n tarkkuudella, paksuus digitaalisella mikrometrillä 0,001 mm:n tarkkuudella ja paino elektronisella vaa'alla 0,01 g:n tarkkuudella. Tuloksista saatiin arvot kappaleen turpoamalle ja painon nousulle 24 ja 168 h:n kuluttua upottamisesta.



Kuva 13. Vesiliuotuskoekappaleet upotettuna. Kuva: Tomi Ryynänen

6 TESTIEN TULOKSET

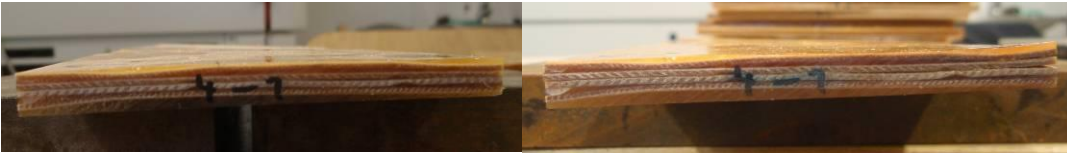
6.1 Sääolosuhdetesti

Sääolosuhdetestin jälkeen kappaleet punnittiin. Kappaleiden paino oli pienentynyt keskimäärin 2,1 %. Painonmuutos oli yhtä suurta reunasuojauksesta riippumatta. Painon aleneminen johtuu pääosin kappaleiden kuivumisesta kokeen aikana. Vertailtaessa kappaleita visuaalisesti voidaan todeta, että koekappaleille tapahtuneet muutokset ovat pieniä. Kappaleiden lappeet olivat tummuneet hieman ja viilun syykuvio oli tullut selkeämmin esiin (kuva 14). Lapepinnoilla reunasuojattujen ja reunasuojamattomien kappaleiden välillä ei ollut eroa.

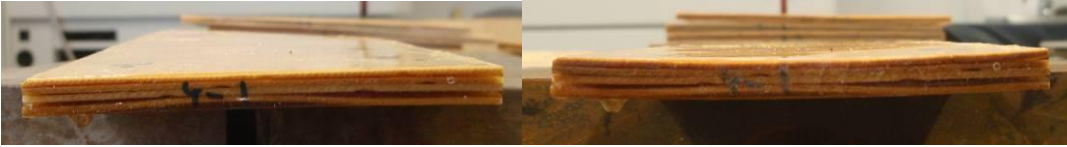


Kuva 14. Koekappaleen lape ennen ja jälkeen sääolosuhdestin. Kuva: Tomi Ryynänen

Tutkittaessa kappaleiden syrjiä reunasuojamattomien kappaleiden syrjissä oli havaittavissa selvää tummumista sekä halkeamia koekappaleiden nurkissa (kuva 15). Viilukerrosten tummumista tapahtui ainoastaan viilun pinnassa. Sahattaessa koekappaleita huomattiin, että viilun väri oli muuttumaton jo 2 mm:n syvyydellä. Reunasuojatuissa kappaleissa ei ollut silmin huomattavia eroja (kuva 16). Lisäksi osassa kappaleista oli huomattavissa elämisen aiheuttamaa muodon muutosta (kuva 16).



Kuva 15. Reunasuojaamattoman kappaleen muutos sääkaapissa. Kuva: Tomi Rynnänen



Kuva 16. Reunasuojatun kappaleen muutos sääkaapissa. Kuva: Tomi Rynnänen

Verrattaessa epoksivanerikoekappaleita tavalliseen vaneriin, ovat epoksivanerin muutoksen huomattavasti vähäisempiä. Tavallinen koivuvaneri tummui sääkaapissa huomattavasti ja sen pintaviilut halkeilivat. Tulosten perusteella voidaan todeta, että epoksivaneri kestää sääolosuhde vaihteluita tavallista vaneria paremmin. Parempi sääolosuhteiden kestävyys johtuu epoksivanerin rakenteesta sekä tuotteen sisältämästä epoksihartsista, joka on hyvin säävaihteluita kestävä.

Kappaleiden kiilto huonontui kokeen aikana. Kiiltoarvojen keskimääräinen muutos oli 24,1 yksikköä (taulukko 1). Kiiltoarvojen keskiarvo testin jälkeen oli 65,7. Tämä tarkoittaa sitä, että kappaleet voidaan kiiltoasteeltaan määrittellä kiiltäviksi. Kiiltävän tuotteen kiiltoarvon tulee olla 60–89 yksikköä. Suurimmillaan kiiltoarvon muutos oli kappaleissa 6.8, 6.5 ja 6.2. Suuri kiiltoarvon muutos johtui kappaleiden pintaan testin aikana kuivuneesta liasta (kuva 17). Likaa yritettiin poistaa liuottimilla ja useilla pesuaineilla tuloksetta. Kappaleet, joissa kiiltoarvo parantui testin aikana, poistettiin keskiarvosta mittausvirheen takia.

Taulukko 1 Kappaleiden kiiltoarvot ennen ja jälkeen testin

Koekpl	Ennen	Jälkeen	Koekpl	Ennen	Jälkeen
6.1	85,4	64,9	7.1	71,6	80,4
6.2	94,0	51,7	7.2	90,3	73,5
6.3	82,7	65,4	7.3	94,7	74,6
6.4	87,0	53,2	7.4	90,1	73,5
6.5	91,1	42,7	7.5	61,3	76,3
6.6	97,1	72,0	7.6	87,8	79,8
6.7	97,5	68,5	7.7	94,5	78,2
6.8	96,1	42,2	7.8	96,6	75,3
6.9	85,4	60,2	7.9	76,3	70,3
6.10	90,5	77,8	7.10	79,0	58,7
			KA	89,8	65,7



Kuva 17. Koekappaleeseen pinttynyttä likaa. Kuva: Tomi Ryynänen

Taulukossa 2 näkyy väriarvojen muutokset. Kahdesta levystä leikattujen koekappaleiden väriarvojen keskimääräinen muutos on 8,39 yksikköä. Levyjen välinen ero on 2,03 yksikköä. Verrattaessa epoksivanerin värinmuutosta koivuvaneriin, on muutos huomattavasti pienempi epoksivanerilla. Suurin väriarvon muutos on koekappaleella 6.10 ja pienin koekappaleella 7.7. Suurimman ja pienimmän muutosarvon erotus on 9,5 yksikköä. Suuri väriarvon vaihtelu johtuu aiemmin mainitusta pinttynneestä liasta, joka vääristää mittaustuloksia. Koelevystä kuusi leikattujen koekappaleiden väri vaihtelu oli pääsääntöisesti tasaista. Koelevystä seitsemän sahatuissa kappaleissa väriarvojen muutoksen hajonta oli suurempi. Suurempi hajonta johtuu puuaineksen luonnollisista värierioista. Väriarvon muutosta voidaan selittää myös epoksihartsin värin muutoksella. Epoksihartsin teknisissä tiedoissa mainittiin, että epoksihartsi muuttuu kellertävämmäksi sääolosuhteille altistettuna.

Taulukko 2 Väriarvojen muutos

Koekpl	Muutos	Koekpl	Muutos	Koekpl	Muutos
6.1	9,21	7.1	9,03	8.1	13,00
6.2	7,29	7.2	6,85	8.2	16,40
6.3	9,74	7.3	7,95	8.3	17,21
6.4	10,00	7.4	5,90	8.4	16,99
6.5	7,29	7.5	8,89	8.5	16,70
6.6	11,27	7.6	7,95	8.6	14,17
6.7	10,30	7.7	2,72	Ka	15,74
6.8	10,31	7.8	11,58		
6.9	6,37	7.9	5,84		
6.10	12,22	7.10	7,01		
Ka	9,40	Ka	7,37		

6.2 Taivutuslujuus

Aineenkoestuskoneen antamista tuloksista laskettiin kappalekohtaiset keskiarvot. Keskiarvot on koottu taulukkoon 3. Tulosten perusteella voidaan päätellä epoksivanerin olevan normaalia vaneria kestävämpää syysuunnan ollessa pitkittäinen. Epoksihartsin jälkikovettaminen parantaa lujuusominaisuuksia jonkin verran. Pintaviilun syysuunnan ollessa poikittainen epoksivaneri on lujuusarvoiltaan huonompaa kuin tavallinen koivuvaneri.

Taulukko 3 Taivutuslujuuskokeen tulokset

Koekappale	Taivutuslujuus N/mm ²	Taipuma mm	Kimmomoduli N/mm ²	Voima N
Epoksivaneri pitkittäisyy	175,55	6,84	26352,53	2473,52
Vaneri pitkittäisyy	92,22	6,25	10616,53	889,00
Epoksivaneri poikittäisyy	41,18	14,57	5426,91	582,27
Vaneri poikittäisyy	63,33	11,13	4546,96	606,30
Epoksivaneri kovetettu 60 C	175,79	7,55	28336,52	2868,17
Epoksivaneri kovetettu 80 C	179,10	8,32	28105,27	2984,62
Epoksivaneri sääkaappi	137,55	9,84	19738,91	2485,45
Vaneri sääkaappi	59,35	6,79	32537,82	1283,43

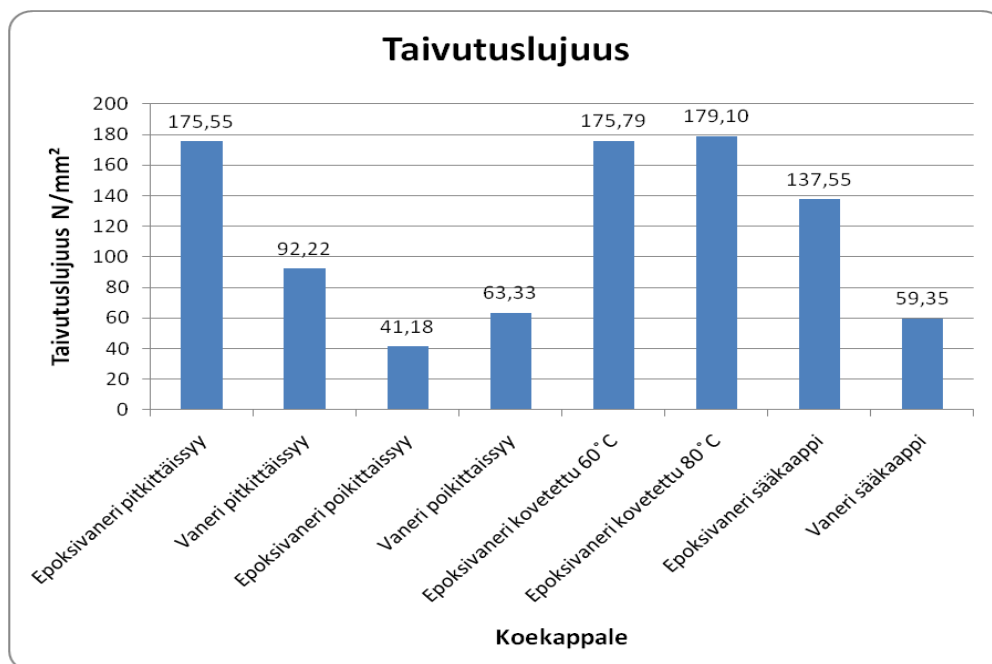
Taulukossa neljä näkyy tulokset epoksivanerilevyjen välillä. Tulosten perusteella erot ovat levyjen välillä pieniä ja epoksivaneri näin ollen tasalaatuista. Koska koekappaleita on otettu vain kolmesta eri levystä, ei tuloksia voi pitää täysin luotettavana vaan testejä olisi suoritettava useammasta levystä otetuista koekappaleista.

Taulukko 4 Levykohtaiset tulokset

Koestettu levy	Taivutuslujuus N/mm ²	Taipuma mm	Kimmomoduli N/mm ²	Voima N
Levy 1	173,79	7,30	27257,85	2578,68
Levy 2	167,13	6,34	24596,13	2221,18
Levy 3	185,73	6,89	27203,61	2620,70

Kuvassa 18 näkyy kappaleiden taivutuslujuusarvot. Verrattaessa epoksivaneria normaaliin koivuvaneriin huomataan, että epoksivaneri on huomattavasti lujempaa kuin pintaviilun syysuunta on pitkittäinen. Epoksivanerin arvo 175,55 on 1,9 kertaa vas-

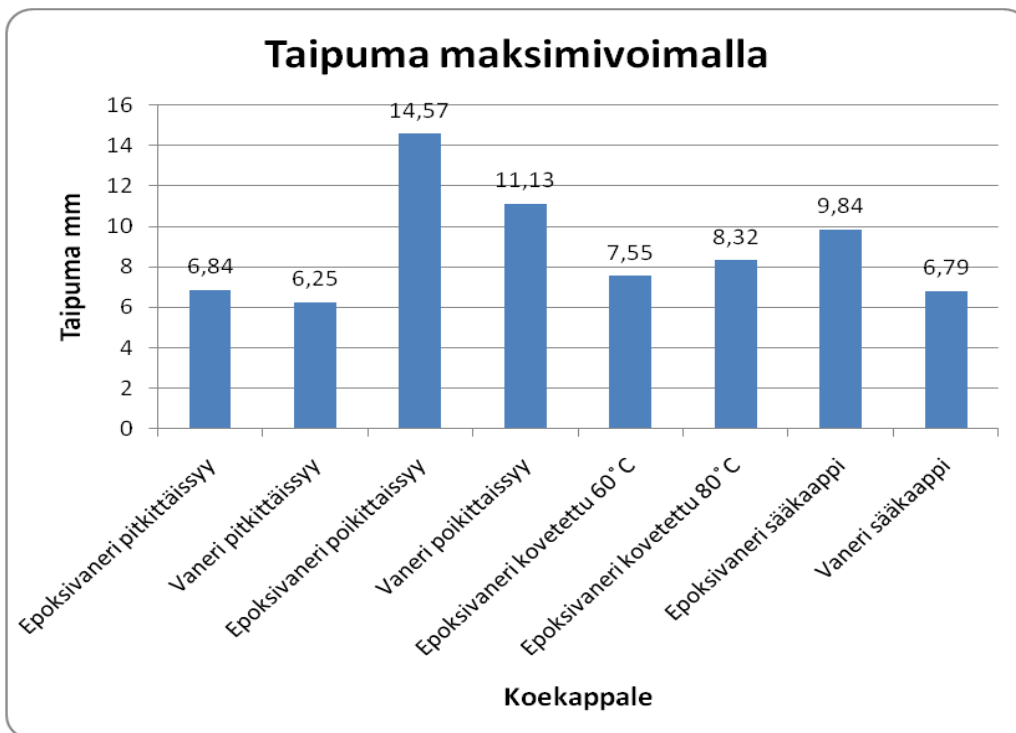
taavaa tavallisen vanerin taivutuslujuusarvoa suurempi. Suurempi lujuusarvo johtuu syvälle puuviiluun imeytyneestä epoksihartsista sekä epoksihartsin hyvistä lujuusominaisuuksista. Epoksivanerissa puuaines on kauttaaltaan epoksihartsin ympäröimä, kun taas normaalissa vanerissa liima-aine on pelkästään viilujen välisessä saumassa. Epoksihartsin mekaanisia ominaisuuksia voidaan parantaa jälkikovettamisella. Verrattaessa kovettettujen ja kovettamattomien kappaleiden lujuusarvoja huomataan, että kovettaminen 80 C lämpötilassa 3 h:n ajan parantaa lujuusominaisuuksia 1,98 %. Muutos on pieni ja koesarjan pienestä koosta johtuen ei voida todeta kovettamisen vaikuttavan lujuusarvoihin merkittävästi. Kovettaminen 60 C:n lämpötilassa vaikuttaa lujuusarvoihin vähemmän kuin kovettaminen 80 C lämpötilassa.



Kuva 18 Taivutuslujuusarvot

Pintaviilun syysuunnan ollessa poikittainen, koivuvaneri on taivutuslujuudeltaan 35 % epoksivaneria kestävämpää. Tämä johtuu epoksivanerin erilaisesta rakenteesta, jossa rakenteen sisällä ei ole yhtään pitkittäistä viilukerrosta, toisin kuin tavallisessa vanerissa, vaan sisällä olevat viilukerrokset ovat 45 kulmassa pintaviiluun nähden. Sääolosuhdetestattujen kappaleiden taivutuslujuusarvot olivat huomontia epoksivanerilla sekä tavallisella vanerilla. Epoksivanerikappaleiden lujuus heikentyi 21,65 % ja vanerin lujuus 35,64 %. Tulosten perusteella voidaan todeta, että sääolosuhteet heikentävät lujuusominaisuuksia. Epoksivanerin heikentyneet lujuusominaisuudet johtuvat epoksihartsin ominaisuuksien muuttumisesta säärasituksessa. Vanerin heikentyneet tulokset johtuvat pintaviilun halkeamasta.

Katsottaessa kappaleiden maksimivoiman taipuma-arvoja (kuva 19) huomataan, että epoksivaneri taipuu enemmän kuin tavallinen vaneri. 80 C jälkikövetettu epoksivaneri taipuu maksimivoimalla 2,07 mm enemmän kuin vaneri. Prosentteina se tarkoittaa 33,1 % parempaa taipuma-arvoa. Hyvät taipuma-arvot johtuvat epoksihartsin ominaisuuksista. Poikittaisen syysuunnan arvot ovat huomattavasti suurempia molemmilla tuotteilla. Suuremmat arvot johtuvat tuotteiden rakenteista, jotka sallivat suuremman taipuman. Sääolosuhte testattu epoksivaneri taipuu 9,84 mm. Taipuma on 18,36 % suurempi kuin 80 C jälkikövetettujen koekappaleiden tulos. Tulos johtuu epoksihartsin mekaanisten ominaisuuksien muuttumisesta sääolosuhteiden vaikutuksesta. Sääkaapissa testatuilla vanerikoekappaleilla taipuma on hieman parempi kuin testaamattomilla kappaleilla. Ero on niin pieni, ettei sillä ole käytännön merkitystä eikä tulosta voida pitää täysin luotettavana pienestä otannasta johtuen.



Kuva 19 Kappaleiden taipuma maksimivoimalla

6.3 COPP-vedenimeytyminen

Verrattaessa koekappaleiden vedenimeytymistä fenolipinnoitteella pinnoitettuun vaneriin huomataan, että vedenimeytyminen on prosentuaalisesti lähes samansuuruista (taulukot 5 ja 6). Fenolipinnoitteinen vaneri tunnetaan tuotteena, joka kestää hyvin kosteutta. Tästä voidaan päätellä, että epoksivanerin kestävä hyvin kosteutta.

Taulukko 5 Epoksivanerin vedenimeytymistulokset

Koekpl	Paino alussa g	Paino lopussa g	Imeytynyt vesi g	Muutos %
1.1	217,87	218,52	0,65	0,30
1.2	202,03	203,18	1,15	0,57
2.1	165,55	166,23	0,68	0,41
2.2	161,90	163,08	1,18	0,73
3.1	177,93	178,71	0,78	0,44
3.2	202,67	203,27	0,60	0,30
		Ka	0,84	0,46

Taulukko 6 Fenolipinnoitteen vanerin tulokset

Koekpl	Paino alussa g	Paino lopussa g	Imeytynyt vesi g	Muutos %
3.1	171,14	171,62	0,48	0,28
3.2	172,89	173,34	0,45	0,26
3.3	170,19	170,93	0,74	0,43
3.4	169,51	170,28	0,77	0,45
3.5	168,05	168,63	0,58	0,35
3.6	173,15	173,93	0,78	0,45
3.7	168,43	169,06	0,63	0,37
3.8	169,25	170,13	0,88	0,52
		Ka	0,66	0,39

6.4 Vesiliuotus

Turpoaman tulokset mitattiin 24 h:n ja 168 h:n kuluttua kappaleiden upottamisesta. Tulokset on esitetty taulukoissa 6 ja 7 prosentuaalisena muutoksena. 24 tunnin kohdalla kappaleiden leveyden muutos on pienin 60 C jälkikövetetuissa kappaleissa ja suurinta vanerissa, tosin ero 60 C ja 80 C kovetetuilla kappaleilla on vain 0,031 prosenttia, joka on käytännössä merkityksetön ero. Pituussuuntaisen turpoaman arvot ovat pienemmät kuin leveyssuunnan tulokset. Tämä oli odotettavissa, koska puun pituussuuntainen eläminen on hyvin vähäistä. Verrattaessa pituussuuntaisten kappaleiden tuloksia toisiinsa, tulokset ovat samankaltaiset kuin leveydessäkin, kovetetut epoksivanerit turposivat vähiten ja vaneri eniten. Kovettamaton epoksivaneri sijoittuu näiden väliin. Paksuussuuntainen turpoaminen on tavallisella vanerilla huomattavasti suurempaa kuin epoksivanereilla. Paksuudessakin vähiten turposivat kovetetut kappaleet. Painonmuutoksen tulokset eroavat toisista tuloksista. Kovettettujen kappaleiden painonmuutos on ollut suurempaa kuin kovettamattomien kappaleiden. Tämä

johtuu kappaleiden jälkikovettamisesta ennen testausta ja kunnollisen tasaamisen puutteesta. Jos kovetetut kappaleet olisi tasaannutettu kunnolla, se olisi todennäköisesti pienentänyt myös muita kovettettujen kappaleiden tuloksia. Erot kovettettujen kappaleiden tulosten välillä ovat niin pieniä, että mittausvirheet voivat aiheuttaa tuloksiin epätarkkuutta. Tarkempien tulosten saamiseksi tulisi koe suorittaa suuremmalle koe-erälle. 24 tunnin arvoissa vanerin muutokset ovat epoksivanerin muutoksia suurempia. Tämä johtuu epoksivanerin suuresta liima-ainemäärästä, josta osa on imeytynyt puun soluseinämiin tehden ne elämättömiksi. Tämän voi huomata myös vanerin suuresta yli 57 % painon noususta. Vanerissa liima-aineen määrä on huomattavasti pienempi ja avointa puusolukkoa on paljon, jolloin vesi pääsee imeytymään puuhun nopeasti.

Taulukko 7 Turpoaminen 24 h kuluttua

Koekappale	Leveys	Pituus	Paksuus	Paino
Epoksivaneri	0,630	0,356	0,563	4,393
Kovetettu epoksivaneri 60 C	0,499	0,239	0,138	4,907
Kovetettu epoksivaneri 80 C	0,530	0,223	0,260	4,923
Vaneri	0,817	0,500	7,857	57,557

168 tunnin vesiliuotustuloksissakin on pääsääntöisesti huomattavissa epoksivanerin pienemmät muutokset. Leveyden osalta vanerin eläminen jää epoksivaneria pienemmäksi. Tämä johtuu vanerin rakenteesta, jossa välissä olevat pitkittäissyiset viilut estävät vanerin leveysuuntaisen elämisen. Pituus eläminen epoksivanereilla on tavallista vaneria hillitympää. Tässä vanerin poikittaiset kerrokset pyrkivät turpoamaan enemmän kuin pitkittäiset kerrokset. Epoksivanerin vinot välikerrokset eivät luo suoraa turpoamissuuntaa pituuden tai leveyden suuntaan. Paksuuden osalta tulokset ovat reilusti epoksivanerin eduksi. Painon osalta tulokset verrattuna 24 h tunnin arvoihin ovat tasoittuneet siten, että kovettettujen kappaleiden tulokset ovat kovettamattomia pienempiä.

Verrattaessa 24 ja 168 tunnin tuloksia toisiinsa voidaan päätellä, että epoksivanerin eläminen on normaalia vaneria pienempää. 168 h:n tuloksissa vanerin leveys- sekä pituussuuntainen turpoaminen ja 60 C:ssa kovetetun epoksivanerin leveysuuntainen tulos on 24 h:n arvoa pienempi. Tulosten voidaan olettaa olevan mittausvirheitä, sillä puutuotteiden mittaaminen 0,01 mm:n tarkkuudella on vaikeaa.

Taulukko 8 Turpoaminen 168 h kuluttua

Koekappale	Leveys	Pituus	Paksuus	Paino
Epoksivaneri	1,674	0,434	3,603	12,961
Kovetettu epoksivaneri 60 C	1,427	0,153	2,877	12,526
Kovetettu epoksivaneri 80 C	1,468	0,309	3,071	12,508
Vaneri	0,653	0,470	8,130	80,325

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia alipaineinjektiotekniikan hyödyntämismahdollisuuksia puuveneteollisuudessa sekä kehittää puuviilurakenne, joka mahdollistaa alipaineinjektiotekniikan soveltamisen puuveneteollisuudessa. Työn tuloksien perusteella voidaan todeta, että alipaineinjektiota voidaan hyödyntää puuveneteollisuudessa sekä puuviilurakenteiden valmistamisessa. Kehitetty tuote soveltuu käytettäväksi puuviiluveneissä sen hyvien lujuus- ja säänkesto-ominaisuuksien ansiosta. Tältä osin työn tavoitteet toteutuivat.

Tulevaisuudessa työn tulosten perusteella perustetaan yritys, joka jatkaa tuotteen kehittämistä teolliseksi tuotteeksi. Tuotteen kehityskohteita ovat sen mittatarkkuuden parantaminen sekä vaihtoehtoisten ja helposti toteutettavien tekniikoiden löytäminen urittamisen tilalle. Tällä hetkellä tuotteessa on paljon paksuusvaihtelua, joka on saatava kuriin epoksihartsin menekin minimoimiseksi. Lisäksi suuret paksuusvaihtelut estävät kokonaisten veneiden valmistamisen.

Viilujen urittaminen on tällä hetkellä työlästä ja hidasta, joten sen korvaaminen nopeammalla tekniikalla nopeuttaa huomattavasti valmistusprosessia. Urituksen korvaamista esimerkiksi karkealla hionnalla tulee tutkia jatkossa. Muita tutkimuskohteita ovat alipaineinjektiotekniikalla valmistetun veneen kustannustehokkuuden sekä kannattavuuden laskeminen.

Työn aikana valmistetut koekappaleet olivat suorina levyinäisiä kappaleita eikä työ kerro, miten tekniikka toimii kahteen suuntaan kaarevissa kappaleissa. Puuviilun taivuttaminen kahteen suuntaan kaareviin kappaleisiin tuo varmasti esiin monia uusia ongelmia, mutta uskon, että kaikki ongelmat ovat ratkaistavissa ja alipaineinjektion avulla tullaan tulevaisuudessa valmistamaan puuviiluveneitä.

LÄHTEET

1. Potter, K.D. 1999. The early history of the resin transfer moulding process for aerospace applications. *Composites: Part A* 30(5), 619–621.
2. Volantis Oy:n www-sivu [viitattu 22.4.2011]. Saatavissa: <http://www.volantis.fi/sivut/color-theory.html>
3. Ford, A. & Roberts, A. 1998. *Colour Space Conversions* [verkkójulkaisu]. Charles Poynton [viitattu 6.5.2011]. Saatavissa: <http://www.poynton.com>
4. SFS-EN 310 1993. Taivutuskimmomodulin ja taivutuslujuuden määrittäminen. 1. painos. Teoksessa *Puulevyt*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 5–9.
5. SFS-EN 20535 1994. Paper and board. Determination of water absorptiveness, Cobb method. Teoksessa *Paperi ja kartonki*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 3–8 .
6. SFS-EN 317 1993. Paksuusturpoaman määrittäminen vesiliuotuksen jälkeen. 1.painos. Teoksessa *Lastulevyt ja kuitulevyt*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 3–7.

www.savonia.fi

