

Viilujen profiloimisen vaikutus vanerilevyn lujuuteen

Aaltovaneri

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Prosessi- ja materiaalitekniikka
Puutekniikka
Opinnäytetyö
Kevät 2018
Teemu Hämäläinen

Lahden ammattikorkeakoulu
Prosessi- ja materiaalitekniikan koulutusohjelma

HÄMÄLÄINEN, TEEMU: Viilujen profiloinnin vaikutus
levyn lujuuteen
Aaltovaneri

Puutekniikan opinnäytetyö, 47 sivua, 9 liitesivua

Kevät 2018

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia viilujen puristamista aaltoprofiili muotoon ja sitä, vaikuttaako aaltorakenne positiivisesti levyn taivutuslujuuteen. Työn toteutuksen suunnittelun aikana taustalla oli ajatus siitä, että tapa jolla profilointi toteutettaisiin olisi, yksinkertaisesti laajennettavissa nykymuotoisen vanerinvalmistuksen tuotantoprosesseihin. Tarkoituksena oli aikaansaada rakenne, joka pyrkisi jakamaan siihen kohdistuvat taivutusjännitykset suuremmalle alalle kappaleen sisällä.

Opinnäytetyön kirjallisessa osuudessa käsitellään vanerin valmistusprosessi yleisellä tasolla, sillä työn kokeellinen osuus koostuu levyn valmistuksesta, joka mukailee vanerin valmistusprosesseja. Muita kirjallisuusosuuden pääkohtia ovat viilun taivutukseen vaikuttavat tekijät ja aaltomuodon käsitteleminen. Edellä mainituissa luvuissa viitataan liimapuurakenteiden valmistukseen, koska liimapuusta valmistetaan kaarirakenteita.

Kokeellinen osa käsittelee puristusmuotin suunnittelun ja rakentamisen vaiheet sekä koelevyjen valmistuksen. Muotin suunnittelu oli monivaiheinen prosessi, jota vietin eteenpäin pienoismallikokeista saatujen tulosten pohjalta. Tulosten analysoinnissa käsitellään taivutuslujuuskokeiden tulokset. Taivutuslujuuskokeiden tulosten perusteella voidaan todeta, että aaltorakenteella on positiivinen vaikutus levyn taivutuslujuuteen. Levyn lujuuden kasvu tosin riippuu aallonsuunnan sekä levyn pintaviilun syysuunnan oikeanlaisesta yhdistämisestä.

Asiasanat: vaneri, viilu, FF-harts, muotti, profilointi, kaarirakenne

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Process and Materials Technology

HÄMÄLÄINEN, TEEMU: The effect of profiled veneers on the strength of
plywood
Wave plywood

Bachelor's Thesis in Wood Technology, 47 pages, 9 pages of appendices

Spring 2018

ABSTRACT

This Bachelor's thesis is experimental research on pressing veneers to a wave shape and investigating whether the wave shape has a positive effect on the bending strength of the plywood board.

During the planning stage the idea was that the way of making the wave profile could be easy to integrate into the current plywood making process. The purpose was to develop a structure which would divide forces to a larger area inside the panel.

The literature part of the thesis has an overview of the plywood making process and the basics of arc structures. Dealing with the plywood making process is important because the experimental part consists of making testboards from veneers. The literature part also includes chapters on veneer bending and the structure of glulam.

The experimental part of the thesis deals with the designing and building phases of the pressing mold and the production of testboards. The results analysis presents the results of the bending strength tests. The results confirmed that waveshaped plywood can receive more bending forces than regular straight plywood.

Key words: plywood, phenol resin, veneer, mold, profiling, arc structure

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	VANERI	2
3	KAARI	9
4	VIILUN TAIVUTUS	12
5	OLEMASSA OLEVIA TUOTTEITA	14
5.1	Studio corelam – Wawewood	14
5.2	Sonae Arauco - Innovus® Wave	15
5.3	Wirkkala – rytmivaneri	15
6	KOESUUNNITELMA	17
6.1	Koelevyt	17
6.2	Mantteli	18
6.3	Liima	22
6.4	Viilut	23
6.5	Ladonta	24
6.6	Esi- ja kuumapuristus	25
6.7	Valmiit levyt	28
6.8	Koekappalaiden sahaus	30
7	TULOKSET	31
7.1	Levyjen kosteuden määrittäminen	31
7.2	Levyjen kierouden määrittäminen	31
7.3	Taivutuslujuuden määrittäminen	32
8	TULOSTEN TARKASTELU	37
8.1	Murtovoima	37
8.2	Jännitys	38
8.3	Tuloksiin mahdollisesti vaikuttaneet poikkeamat	40
8.4	Toteutus teollisessa mittakaavassa	40
8.5	Dekoratiiviset ja rakenteelliset mahdollisuudet	41
9	YHTEENVETO	45
	LÄHTEET	46
	LIITTEET	48

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää vanerin profiloinnin vaikutusta levyn taivutuslujuuteen ja osin myös selvittää keinoa vanerin käyristymisen vähentämiseksi. Työn kirjallisessa osuudessa käsitellään vanerin historiaa ja sen teollista valmistusta, profiloinnin merkitystä metallisten ohutlevytuotteiden valmistuksessa, kaarimuodon statiikkaa sekä viilujen taivutusta rajoittavia tekijöitä. Kokeellisessa osassa kerrotaan muotin ja koelevyjen valmistusprosessit sekä kokeiden tulokset.

Työ alkoi profiloinnin tietoperustan selvittämisellä eli tarkoitus oli löytää perusteluja sille, miksi profilointi voisi olla ratkaisu levyn jäykkyyden kasvattamisessa. Kirjalliset lähteet perustuvat pitkälti lujuusopin teoksiin sekä liimapuukäsikirjaan, jossa käsitellään liimapuisten kaarirakenteiden statiikkaa ja soveltuvuuksia.

Profiloidun vanerin valmistuksen suunnittelu lähti liikkeelle selvitystyöllä siitä, miten vaneriin voisi kuumapuristuksen yhteydessä aikaansaada halutunlaisen aaltomuodon. Muotin valmistuskustannukset oli tarkoitus pitää mahdollisimman alhaisina ja siten myös valmistustapa yksinkertaisena, jotta puristusmuotti olisi mahdollista valmistaa koululla. Useiden erilaisten pienoismallikokeiden kautta päädyttiin yksinkertaiseen metalliseen lattarauta levyyn, jonka karkeat muodot tasattaisiin kumilevyllä sekä uhriviilulla.

Valmistetut levyt sahattiin koekappaleiksi, joille tehtiin EN 310-standardin mukainen taivutuslujuusmittaus aineenkoestuskoneella. Saatujen tulosten analysoinnissa käytettiin referenssimateriaalina Vanerikäsikirjaa, jossa on ilmoitettu teollisten vanereiden keskimääräiset lujuusarvot.

2 VANERI

Vanerituote on puulevy, jonka rakenteessa on käytetty joko sorvattuja, höylättyjä tai sahattuja puuviiluja. Tyypillisimpiä vanerituotteita ovat säle- ja rimalevyt, jotka tunnetaan myös sydänkerroslevyinä, sekä vaneri, joka koostuu kokonaan viiluista. Vaneri koostuu tyypillisesti syysuuntien perusteella ristiinliimatuista viiluista, koska puun lujuus on parhaimmillaan syiden pituussuunnassa, joten ristiinliimaamalla pyritään parantamaan levyn lujuutta sekä pienentämään puun sisäisten voimien vaikutusta levyn muotopysyvyyteen. Vanerin valmistuksessa on mahdollista käyttää useita eri puulajeja, joista Suomessa yleisesti käytetään koivua, kuusta ja haapaa. Vanerilevy on mahdollista koostaa kahden eri puulajin eripaksuisista viiluista yhdistämällä esimerkiksi koivu ja havuviiluja. Tällöin levystä tulee kevyempi ja hieman edullisempi. Näitä sekavanereita kutsutaan combi-, peilikuvacombi- tai twinvanereiksi riippuen viilujen ladontajärjestyksestä. (Metsäteollisuus ry 1999, 25.)

Historia

Vanerin kaltaiset viilutetut puulevyt ovat hyvinkin vanhoja keksintöjä, sillä tuotteita on löydetty Egyptin ja Kiinan muinaisten kulttuurien tutkimusten yhteydessä. Vanhimmat esineet ovat olleet huonekaluja ja arkkuja, joiden pintaan on liimattu ohuita puuviiluja. Tällaisella tekniikalla valmistettuja artefakteja on ajoitettu kolmen ja puolen tuhannen vuoden ikäisiksi. (Heikinheimo 1964, 388.)

Varhaisimpia kirjallisia kuvauksia varsinaisen vanerin valmistukseen liittyen on vuonna 1793 Englannissa hyväksytty höyläkoneen patentti, jossa kuvaillaan koneen ohella tekniikkaa viilujen ristiinliimaamista. Varsinaisten viilusorvien ensimmäiset kehitelmät patentoitiin 1800-luvun ensimmäisten vuosikymmenten aikana, ja jo vuosisadan puoleenväliin mennessä useita tehtaita oli perustettu Ranskaan, Saksaan ja Yhdysvaltoihin. Suomen suuriruhtinaskuntaan ensimmäinen vaneritehdas valmistui Tamperelaisten liikemiesten toimesta Karkkun kuntaan vuonna 1893. Varsinaisen teollisen mittakaavan vanerintuotannon aloitti Schaumannin vuonna 1912 perustama Jyväskylän vaneritehdas. (Heikinheimo 1964, 389 - 392.)

Tuotanto

Vanerin valmistus on monivaiheinen prosessi, jota on pyritty kehittämään jatkuvasti tehokkaampaan suuntaan, jotta tukista saatavan materiaalin saanto olisi mahdollisimman hyvä. Nykyisin tukin saanto vaihtelee 35 ja 45 %:n välillä riippuen siitä, onko kyseessä havu- vai koivutukki. (Varis 2017, 47.)

Tukin hankinta

Tukkipuu pyritään hankkimaan mahdollisimman läheltä tehdasaluetta, jotta kuljetuskustannukset pysyisivät kohtuullisina. Leimikkoa hakattaessa suurin vastuu hankittavan puun laadusta on kaatokoneen kuljettajalla, jonka tulee noudattaa apteeraus-taulukkoa. Apteeraus voidaan suorittaa joko arvo-, jakauma- tai määrärajataulukko perusteisesti. Arvoapteerauksessa rungot pyritään katkomaan siten, että rungosta sahattujen tukkien arvo on mahdollisimman suuri. (Varis 2017, 21 - 23.)

Tyypillisesti tukit kasataan laatujen mukaan leimikolle vievän tien varteen, josta kuljetusliikkeen ajoneuvoyhdistelmä poimii puut kuormaimen avulla mukaansa. Tehdasalueella tukit lajitellaan pituuksien ja paksuuksien mukaan omiin pinoihin, joista puut haetaan tarpeen mukaan prosessin ensimmäiseen vaiheeseen. (Varis 2017, 21-23.)

Tukin haudonta, kuorinta ja katkonta

Viilun sorvaukseen menevät tukit tyypillisesti joko haudotaan vesialtaassa tai höyrytetään isossa kammiossa. Haapatukit tyypillisesti höyrytetään, jotta puuaineksen värvikojen välttämiseksi. Koivu- ja havutukit haudotaan vesialtaassa noin 50 celsiusasteen lämpötilassa suunnilleen vuorokauden ajan. Lämmin vesihaude tekee puusta elastisempaa ja siten helpottaa tulevaa kuorintaa ja sorvausta. (Varis 2017, 49 - 51.)

Noin vuorokauden haudonnan jälkeen tukit nostetaan pois altaasta ja siirretään mekaaniselle kuljettimelle, joka siirtää tukit yksitellen kuorimakoneelle vievälle hihnalle. Kuorimakoneena käytetään nykyisin tyypillisesti roottorikuorimakonetta, jonka toiminta perustuu kahteen erisuuntiin pyörivään kehään, joihin on kiinnitetty useampia teriä. Terien puuhun kohdistamaa painetta säädellään joko pneumaattisesti tai hydraulisesti. Paineen hallinta on tärkeä osa kuorintaa, sillä liian kevyt kuorinta jättää runkoon kuorta ja liian voimakas rikkoo puun pinnan, jolloin tukin saanto vähenee. Heti kuorimakoneen jälkeen linjalla voi olla tukkimittari, jolla mahdollistetaan tukin optimaalinen katkonta. (Varis 2017, 52 - 54.)

Kuorinnan jälkeen tukit katkotaan haluttuihin mittoihin, jotka määräytyvät tehtaan viilusorvien kapasiteettien perusteella. Tyypillisimmät käytössä olevat mitat sorvattaville pöille ovat 260 cm, 160 cm ja 130 cm, jotka perustuvat tuumamittoihin 100", 60" ja 50". Katkonnan operaattori hoitaa käytännössä myös kuorimakoneen ja kuljettimien valvonnan. Katkonnan jälkeen pöllit kulkeutuvat kiramon kautta kuljetinhihnaa pitkin välivarastolle. (Varis 2017, 54.)

Sorvaus

Viilun sorvaus tapahtuu linjakokonaisuudella, joka on hyvin pitkälti automatisoitu. Sorvauksen operaattori hoitaa linjan valvonnan, häiriöiden korjaamisen sekä parametrien muuttamisen. Pöllin sorvaus alkaa XY-keskittäjästä, jonka tarkoituksena on maksimoida pöllistä saatavan viilun määrä. Puu skannataan viuhkalaserilla ja siitä muodostetaan tarkka kolmiulotteinen kuva. Tietokone laskee kuvan perusteella pöllin keskilinjan siten, että puun pyörityksestä muodostuva lieriö on mahdollisimman suuri. Keskittämisen jälkeen siirtovarret vievät pöllin karojen väliin, jonka jälkeen pölli pyöristetään ja sorvataan. (Varis 2017, 56 - 57.)

Viilun sorvaus on tarkka operaatio, sillä parhaimman mahdollisen laadun saamiseksi monen asian on oltava kohdallaan. Leikkavan terän sekä vastaterän on oltava sellaisessa kunnossa, että ne eivät jätä viilun pintaan uria. Samoin terien teroituskulmien on oltava tiettyjen astekulmien mukaisia, jotta leikkuujälki olisi mahdollisimman siisti, mutta myös terien kuluminen ja karojen pyörittämiseen vaadittava tehontarve vähenee. (Varis 2017, 59.)

Sorvauksen jälkeen syntynyt viilumatto leikataan mahdollisimman leveiksi arkeiksi, samalla suurimmat viat leikataan pois. Leikkuusta syntyvät vialliset hukkapalat tiputetaan hakekuljettimelle ja käyttökelpoiset lyhyet kappaleet eli jontit otetaan talteen. Jonteista saumataan myöhemmin halutun levyisiä kappaleita. (Varis 2017, 60.)

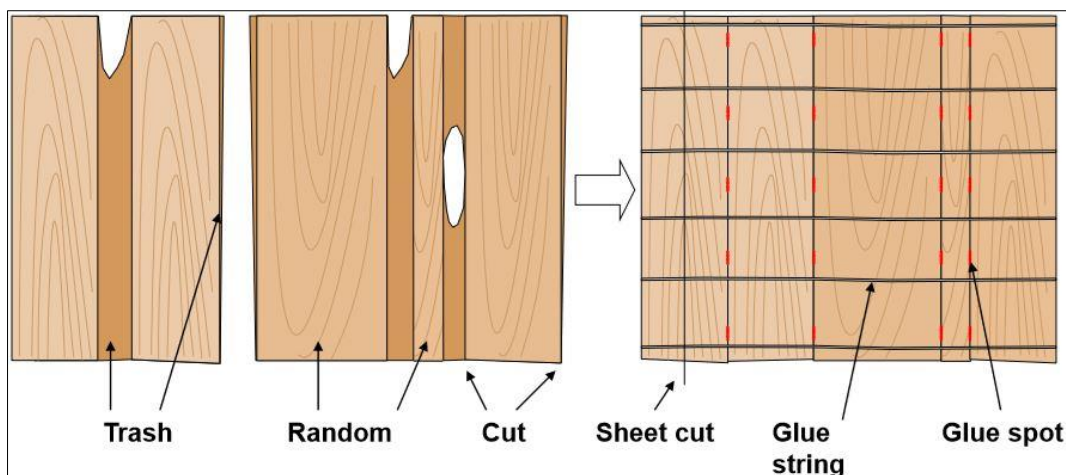
Viilun kuivaus ja lajittelu

Viiluarkkien kuivauksessa käytetään kahta eri tekniikkaan perustuvaa kuivaintyyppiä eli telakuivainta ja verkkokuivainta. Kuivausperiaate on molemmissa sama eli ilmanlämpötilan ja nopeuden avulla pyritään saamaan puuhun sitoutunut vesi haihdutettua. Verkkokuivain sijoitetaan suoraan sorvauslinjan perään siten, että sorvauksesta syntynyt viilumatto kulkeutuu kokonaisuena kuivaimeen. Viilujen leikkuu arkeiksi tapahtuu vasta kuivauksen jälkeen. Telakuivain taas on kehitetty juuri viiluarkkien

kuivaamiseen. Kuivaamisen jälkeen viilut lajitellaan konenäön avulla laatuluokkiin ja myös liian kosteiksi jääneet viilut kierrätetään takaisin kuivauskoneelle. (Varis 2017, 63 - 68.)

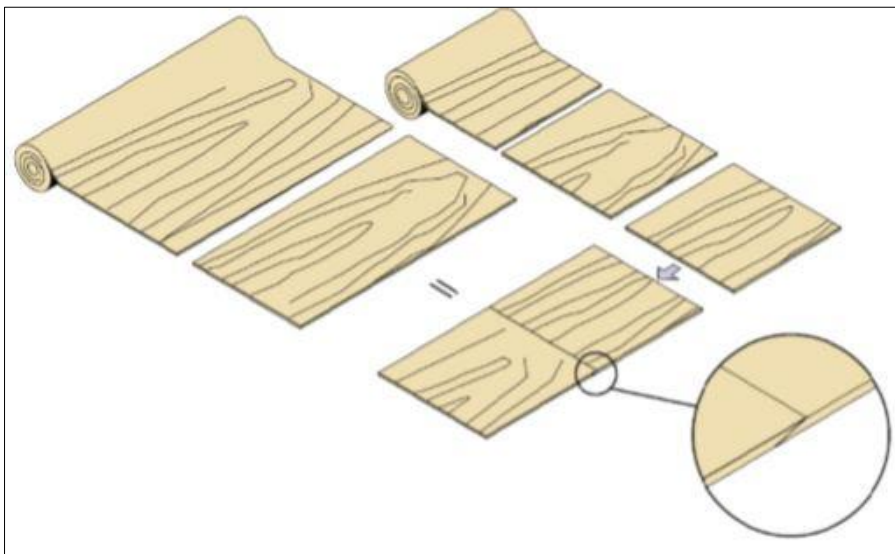
Viilun saumaus ja jatkaminen

Jotta kapeista jonteista voisi saada halutun levyisiä ja laatuksia arkkeja on viilut saumattava (kuvio 1). Vanerin keskiviiluiksi tulevien viilujen saumaus tapahtuu koneella, johon syötetyt viilut tarkastetaan konenäön avulla ja siten viiluista leikataan pois vikaisuudet. Viilujen reunat tasataan ja arkit puskusaumataan muutaman liimapisteen avulla se lisäksi viilujen saumoja lujittamaan liimataan liimalangat, mitkä varmistavat jonttien kiinnipysymisen. (Varis 2017, 71 - 73.)



Kuvio 1. Viilun saumaaminen (Raute Oyj 2015)

Jatkaminen on viiluarkkien yhdistämistä viilun pituussuunnassa (kuvio 2). Jatkaminen mahdollistaa sorvatun viilun nimellispituuden kasvattamisen ja mahdollistaa siten suurempien levyjen valmistuksen. Viilun jatkoslinjalla viilujen päät viistetään viilun paksuuden perusteella määritetyltä pituudelta. Viisteeseen levitetään liima ja sauma kuumapuristetaan yhteen. (Varis 2017, 74 - 75.)



Kuvio 2. Viilun jatkaminen (Raute Oyj 2015)

Viilun paikkaus

Koska oksatonta puuta ei ole olemassa niin väistämättä viiluissa on oksien aiheuttamaa vikaisuutta. Terveistä oksista ei niinkään ole haittaa, mutta kuivat kuolleet oksat haittaavat vanerin valmistusta, sillä reiät viiluissa heikentävät rakennetta ja aiheuttavat puristuksen ja pinnoituksen aikana paineen vajausta. Vanerin pinnoituksen kannalta oksanreiät ovat hyvinkin haitallisia, sillä keskiviilujenkin ontot kohdat läpipeilautuvat ja näkyvät pinnoitteessa 'raakoina' kohtina. Tämän takia viilut pitää paikata. (Varis 2017, 76 - 79.)

Paikkaus tehdään automaattisella konenäköön perustuvalla koneella, joka lyö oksanreiän tai muun vikaisuuden kohdalle puisen paikan. Paikan muoto on sellainen, että sillä on paljon kiinnittymiseen vaadittavaa pinta-alaa. Viiluraina mistä paikat irrotetaan, säilytetään hyvin kuivissa olosuhteissa ennen paikkauskoneeseen laittoa. Tällöin kun paikka on lyöty paikoilleen viiluun, se turpoaa ja kiinnittyy hyvinkin tiukasti paikoilleen. Paikan kiinni pysyminen voidaan varmistaa liimapisaralla tai teipillä. (Varis 2017, 77 - 79.)

Viilujen ladonta

Viilujen ladonnassa halutun levykoon kokoiset viiluarkit ladotaan halutun levyrakenteen mukaiseen järjestykseen. Ladonnassa tapahtuu myös liiman levitys viiluarkkien pinnoille, käytetystä tekniikasta riipuen, liima levitetään joko jokaisen arkin alapinnalle tai sitten, joka

toisen arkin molemmille pinnoille. Jälkimmäistä tekniikkaa käytettäessä on puhuttu ”liimaviiluista” ja ”kuivista viiluista”. Viilut ladotaan nippuun, jossa saattaa olla useita kymmeniä levyaihia. Nippu viedään ladonnasta esipuristimella puolentunnin kuluessa ladonnasta, jotta liiman ominaisuudet eivät kerkeä huonontumaan. Esipuristuksessa liiman tarttuvuus paranee ja liiman kuivuminen estyy. (Varis 2017, 80 - 86.)

Tyypillisesti vanerin liimauksessa käytetään kuumakovettuvaa fenoliformaldehydi hartsia, koska sen säänkesto-ominaisuudet ovat erittäin hyvät. FF-hartsia on väriltään ruskeanpunaista. Jos valmistettavan vanerin käyttökohde on rakennusten sisätiloissa, esimerkiksi pöytätasona, voidaan liimana tällöin käyttää vaaleaa ureapohjaista liimaa. (Koponen 1990, 62 - 66.)

Vanerin kuumapuristus

Esipuristetut levyt viedään varsinaiseen puristukseen, jossa käytetään korkeita lämpötiloja, koska yleisimmin käytössä oleva fenoliformaldehydi hartsi tarvitsee kovettuaan yli 100 celsiusasteen lämpötilan. Käytetty puristusaika koostuu 2 - 3 minuutin perusajasta ja levyn paksuuden perusteella määritetystä ajasta, mikä on noin 30 sekuntia jokaista paksuus millimetriä kohden. Kuumapuristuksen jälkeen levyt jäädytetään, sillä jos levyt niputettaisiin heti puristuksen jälkeen niin liimasauman ominaisuudet kärsisivät ja levyt saattaisivat kieroutua johtuen nipun epätasaisesta jäähtymisestä. Jäähdetytkin levyniput säilyttävät korkean lämpötilan useiden päivien ajan. (Varis 2017, 86 - 88.)

Vanerin viimeistely

Puristetut levyt sahataan haluttuun mittaan tai pinnoitusaihion mittaan, jos levy tullaan pinnoittamaan. Sahauksen jälkeen levyt siirretään kittauslinjalle, joka voi olla automatisoitu tai sitten usean henkilön miehittävä yksikkö. Kittauksessa tarkistetaan levyn molemmat pinnat ja kitillä paikattavissa olevat vikaisuudet korjataan. Kittauksen onnistuminen tärkeää varsinkin, jos levy on menossa pinnoitukseen, sillä väärin sekoitettu kitti tai vajavaisesti kitillä korjattu kolo kostautuu pinnoitteen irtoamisena. Kittauksen jälkeen levyt hiotaan tavoitepaksuuteen. (Varis 2017, 90 - 95.)

Vanerin pinnoitus

Vanerilevyjen pinnoittamiseen käytetään useita erilaisia pinnoitemateriaaleja, mutta yleisin käytössä oleva materiaali on fenolihartsilla impregnoitu paperi. Muita yleisesti käytössä olevia pinnoitteita ovat melamiini, laminaatti ja muovipinnoitteet. Erikoistarkoituksia varten

vaneria pinnoitetaan myös alumiinilevyillä, lasikuidulla ja liukueste pinnoilla. (Varis 2017, 241 - 242.)

Pinnoituksen jälkeen levyt sahataan haluttuun mittaan, jonka jälkeen levyniput lajitellaan. Pinnoitetut vanerit tyypillisesti reunasuojataan, jotta kosteuden imeytyminen levyn sisään kuljetuksen aikana ja myöhemmin estyisi. (Varis 2017, 98.)

Nykyiset tavat lisätä vanerin lujuutta

Vanerin rakenne tulee olla aina symmetrinen, sillä muutoin viilujen sisäiset jännitteet saattavat käyristää levyn. Tyypillisesti viilujen lukumäärä on pariton, jolloin rakenne on keskiviilun suhteen sama. Kun vanerilta vaaditaan suurempia voimien kestävyttä, on levyn paksuutta kasvatettava. Parempia lujuusominaisuuksia on haettu myös rakenteilla, joissa on useampia saman suuntaisia viilukerroksia päällekkäin, jolloin levyn lujuus kasvaa pintaviilujen syiden suunnassa. Tällaisten rakenteiden hyödyntämisen tarkoituksena on pyrkimys saavuttaa ohuemmalla levyllä samat lujuusominaisuudet kuin paksumman rakenteen omaavalla vanerilla. Myös eripaksuisten viilukerrosten käyttöä on hyödynnetty yhdistämällä 1,4 mm paksuisia viiluja ja ohutviiluja limittäisinä kerroksina. (Varis 2017, 80.)

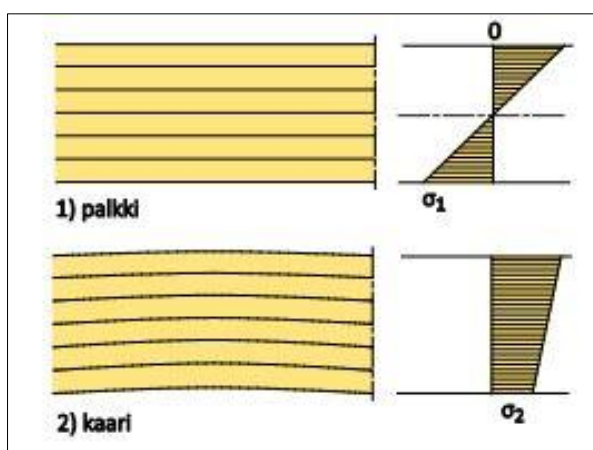
3 KAARI

Kun ympyrän kehälle asetetaan kaksi pistettä, niin tällöin pisteiden väliin jäävää osaa kutsutaan kaareksi. Sama pätee myös muiden matemaattisten käyrien kohdalla, kun niiden jana jaetaan osiin. Kaari on yleisnimike muodoille, jotka pituuden x matkalla poikkeavat suorasta linjasta. (Pyramidi 3. 2005, 62.)

Kaaren mekaniikka

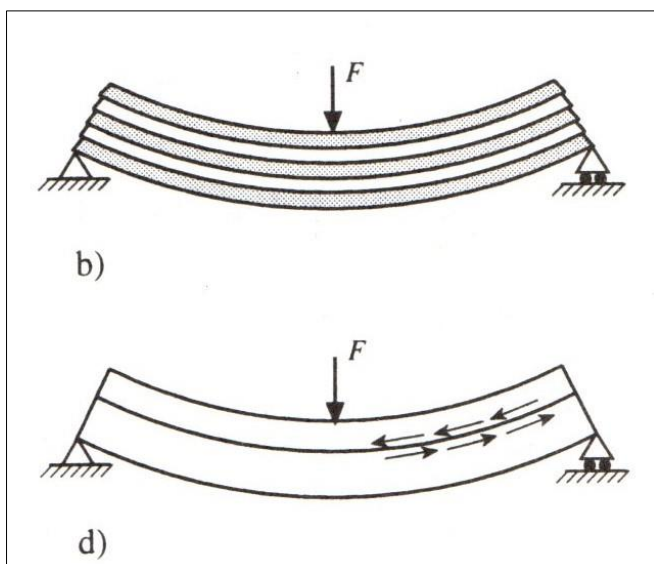
Profiloinnilla tarkoitetaan tasaisen levyn työstämistä siten, että siihen saadaan aikaan kolmiulotteisia muotoja kuten kaaria tai monikulmioita ilman materiaalin poistoa. Muodoilla pyritään kasvattamaan levyn jäykkyyttä ja muotopysyvyyttä. Ominaisuuksien parantuminen perustuu kappaleen korkeuden kasvattamiseen, koska kappaleen kantokyky kasvaa nopeammin korkeutta kuin leveyttä kasvattamalla. (Palasvirta, Hintikka & Valpola 1953, 388.)

Kaari on muoto, jossa materiaalia hyödynnetään tehokkaasti, koska tällöin kappaleen tarvittava poikkileikkauksen korkeus on pienempi kuin suoran liimapuupalkin, joka kestää samat kuormat. Taivutettaessa suoraa palkkia siihen muodostuu puristusjäännityksiä taivuttavan voiman suunnan puolelle ja vetojäännityksiä vastakkaiselle puolelle, kun taas muodoltaan kaarimaista rakennetta taivutettaessa rakenteeseen syntyy ainoastaan puristusjäännityksiä (kuvio 3). (Liimapuukäsikirja osa 2, 3.5.)



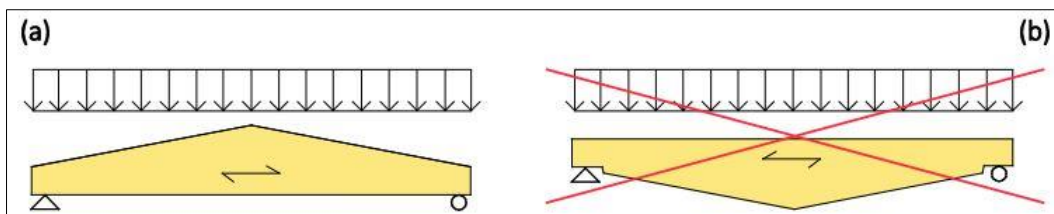
Kuvio 3. Suoran ja kaarevan liimapuupalkin jännitysjaumat (Liimapuukäsikirja osa 2, 3.5)

Liimapuupalkki kuten myös vaneri on valmistettu yhteen liimatuista kerroksista. Kun palkkia taivutetaan (kuvio 4), saumoihin muodostuu leikkausjännityksiä, koska kerrokset pyrkivät liikkumaan kaareutuessaan toistensa suhteen. Liimaamalla kerrokset toisiinsa estetään kerrosten liikkuminen toisiinsa nähden, mutta leikkausvoimat pysyvät edelleen olemassa. Leikkausvoimien takia on liimasauman oltava vähintään yhtä kestävä kuin puu sauman ympärillä. (Pennala 1998, 67.)



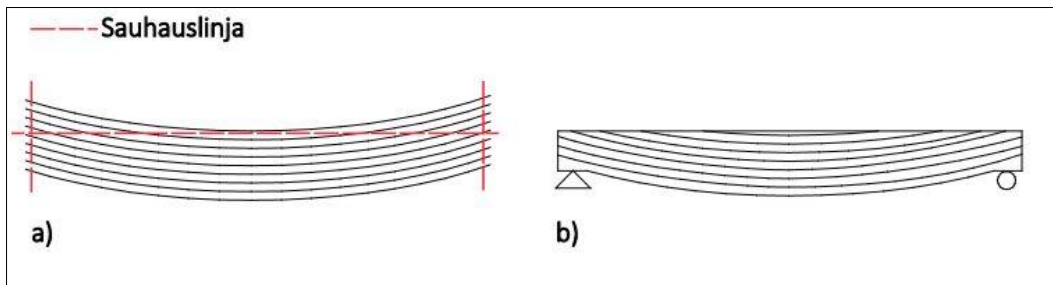
Kuvio 4. Kerrosten liukuminen ja leikkausvoimat (Pennala 1998, 67)

Liimapuista harjapalkkia käytettäessä on palkki aina asennettava harjaosa ylöspäin, (kuvio 5 (a)) koska tällöin palkkia rasitettaessa reunaosiin muodostuu puun syitä vastaan kohtisuoria puristusjännityksiä. Harjapalkkia ei saa koskaan asentaa käänteisesti (kuvio 5 (b)), sillä tällöin rakenteen reunoille syntyy syitä vastaan kohtisuoraan olevia vetojännityksiä. (Liimapuukäsikirja osa2, 7.1.) Tällöin puun kesto on alhaisimmillaan vain 2% - 20% puun syiden suuntaisesta vetolujuudesta (Kärkkäinen 2007, 221.).



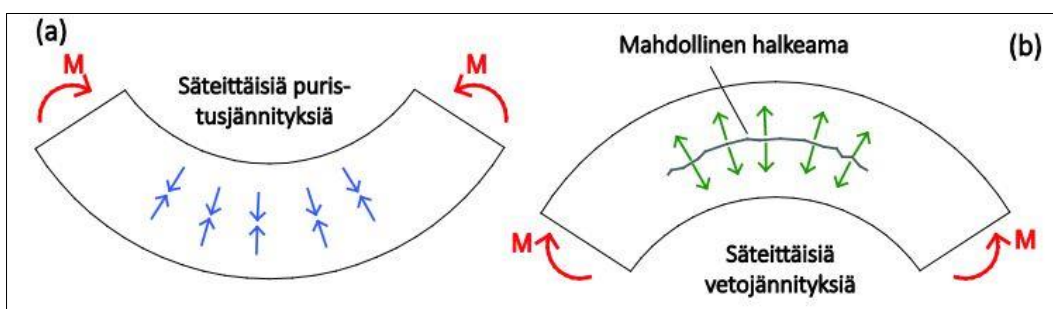
Kuvio 5. Palkin reunaosassa ilmenee syitä vastaan kohtisuora jännitys (Liimapuukäsikirja osa2, 7.1)

Jos kuitenkin on tarve käyttää alaspäin suuntautuvaa palkkia, on harjapalkin tilalla käytettävä alareunastaan kaarevaa mahapalkkia. Mahapalkki on puristettu kaarevaksi useista liimoitetuista lamelleista. Palkin koverapuoli sahataan suoraksi (kuvio 6 (a)), koska tällöin palkkia rasitettaessa ei synny syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä. (Liimapuukäsikirja osa2, 7.1.)



Kuvio 6. Liimapuuisen mahapalkin sahauslinja (Liimapuukäsikirja osa 2, 7.1)

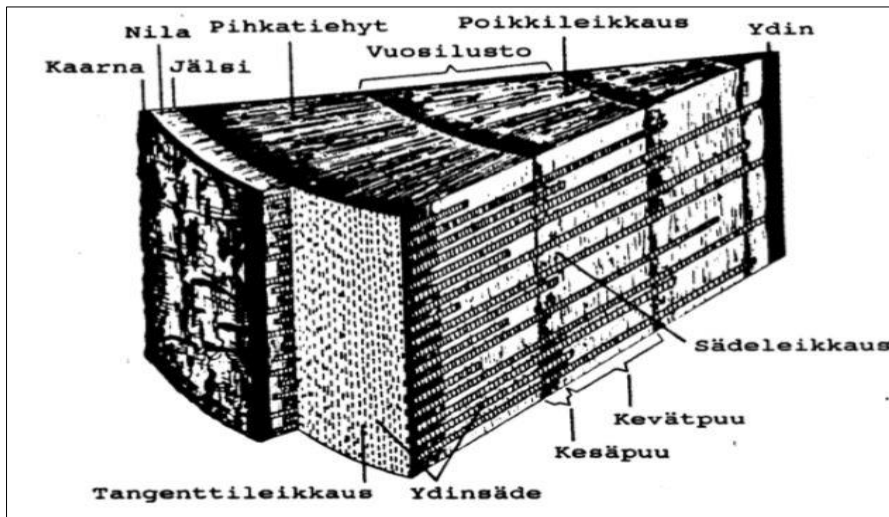
Kaarirakenteessa huomioitavaa on myös se, että kappaleeseen kohdistuvan momentin suunta vaikuttaa rakenteen kestävytyteen. Jos kaarirakennetta rasittava voima pyrkii oikaisemaan kaartaa, rakenteeseen syntyy kuvion 7 (b) mukaisesti säteittäisiä vetojännityksiä, jotka voivat aiheuttaa murtumia. Momentin puristaessa kaartaa (a) rakenteeseen syntyy säteittäisiä puristusjännityksiä eli liimapuun tapauksessa lamellit puristuvat toisiaan vasten. (Liimapuukäsikirja osa 2, 7.2.)



Kuvio 7. Kaareen kohdistuvan momentin vaikutus rakenteeseen (Liimapuukäsikirja osa2, 7.2)

4 VIILUN TAIVUTUS

Puu on useista eri mikrorakenteista koostuva materiaali, jonka ominaisuudet vaihtelevat suuresti tarkasteltavan kohdan perusteella. Puumateriaalin heterogeenisuuden takia puu käyttäytyy eritavoin rasiustilanteissa ja sen takia puuta on tarkasteltava poikkileikkauksen, säteen ja tangentin suunnassa (kuvio 8). Puu voidaan karkeasti rajata sydänpuuksi ja pinta eli mantopuuksi rakenteellisten ominaisuuksien eroavaisuuksien perusteella. Puusta sahatun kappaleen kimmoisuus vaihtelee riippuen siitä, miten se on sahattu irti puun syiden suuntaan nähden. Puun syiden suuntainen kimmomoduuli on lehtipuilla 12 - 62 kertainen ja havupuilla 41 - 122 kertainen säteensuuntaiseen kimmomoduuliin verrattuna. (Kärkkäinen 2007, 220 - 222.)



Kuvio 8. Puun rakenne (Salmi 2006)

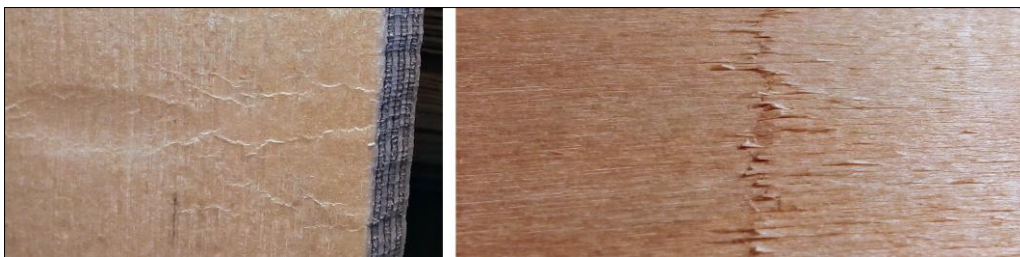
Sorvattaessa viilu irtoaa tukista tangenttileikkauksena, jolloin syiden suunta on sama kuin tukin pituussuunta. Tämän johdosta myös viiluarkin pituus ilmoitetaan syiden suunnassa. Viilujen lujuudenkesto riippuu siitä, miten rasitus kohdistuu viiluun, koska puun kimmomoduuli on suurempi syiden suunnassa.

Koska viilu on sorvattu irti puusta tangentin suuntaisesti, on siinä selvä ero, taivutetaanko viilua syiden suunnassa vai syitä vastaan. Syiden suuntainen taivutus on helppoa koska viilun sisäiset rakenteet eivät vastusta taivutusta koska kyseisessä suunnassa ei ole mitään selvää yhtenäistä rakennetta mikä vastaisi taivutukseen. Viilua taivutettaessa syitä vastaan sen sijaan pitkät toisiinsa kiinnittyneet syyrakenteet pyrkivät vastustamaan

taivutusta. Viilu on ohuutensa vuoksi hyvin soveltuva taivutettavaksi, mutta ilman laminointia toiseen pintaan tai useaan muuhun viiluun muotopalautuma voi olla suurta.

Puun taivuttaminen vaatii oikeat olosuhteet ja välineet, tällöinkin on mahdollista, että muotoon puristuksen jälkeen ilmenee puun palautumista tai puuhun syntyneitä murtumia, jotka ovat tulleet liian pienestä taivutussäteestä tai muotin virheistä. Jotta taivuttaminen onnistuisi täydellisesti, on huomioitava puulajikohtaiset ominaisuudet, joiden perusteella halutun muodon aikaansaaminen muotilla on mahdollista.

Taivutettavaan puuhun syntyviä repeämiä ja murtumia on mahdollista ehkäistä käyttämällä rakennetta, esimerkiksi metallivannetta, joka estää puun pinnan venymistä ja jakaa puristuspainetta tasaisesti. Kaarimaiseen muotoon taivutettaessa puu venyy ulkokehän puolelta ja puristuu kasaan sisäkehänpuolelta. Puristumapuolella puun syyt joutuvat puristumaan kasaan tai painumaan limittäin ja sisäkkäin (kuvio 9).



Kuvio 9. Vanerin pintaviilun murtumia puristuspuolella

Puun murtopuristuma on noin kymmenkertainen verrattuna murtovenymään, mutta jos raja ylitetään niin tällöin puristuma puolelle syntyy ryppyjä sekä poikittaisia murtumajuovia. Jos puun ominaisuudet ovat kohdallaan, mutta taivutustapa on väärä ei taivuttaminen onnistu. Käytettäessä muottia koivun pienimmän taivutus säteen voi laskea kaavalla 1. (Laakkonen 1996, 124 - 126.)

$$r_0 = 2,5 \times s \times k$$

r_0 = pienin taivutus säde (mm)

s = taivutettavan kappaleen paksuus (mm)

k = varmuuskerroin hyvälaatuista puuta käytettäessä 1,5 -2

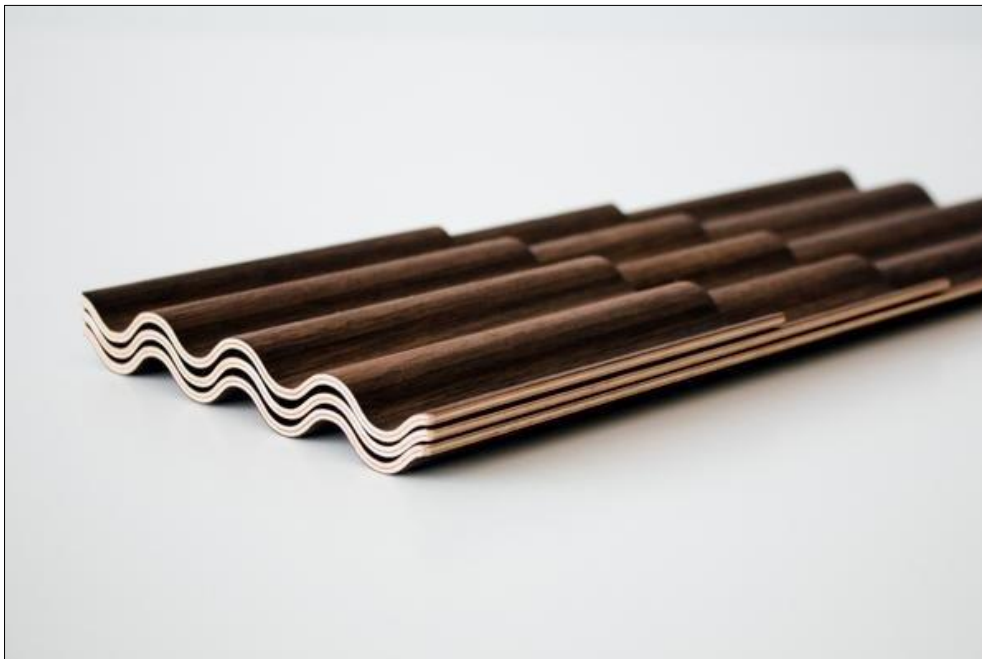
Kaava 1. Koivun taivutussäteen määrittämisen kaava (Laakkonen 1996, 125)

5 OLEMASSA OLEVIA TUOTTEITA

5.1 Studio corelam – Wawewood

Studio Corelam on kanadalainen yritys, joka valmistaa aallotetusta vanerista desing käyttötuotteita. Idea aallotetun vanerin valmistuksesta tuli yrityksen perustajalta Christian Blytiltä, joka opiskeli Helsingissä Aalto-yliopistossa muotoilua 1990-luvulla. Blyt suunnitteli opiskeluaikanaan tuolia, jonka selkänojan hän halusi olevan aalloilla. Ajatus aaltovanerista unohtui, mutta Blytin kollegojen johdosto idea herätettiin uudelleen ja yritystoiminta alkoi. (Studio Corelam 2018.)

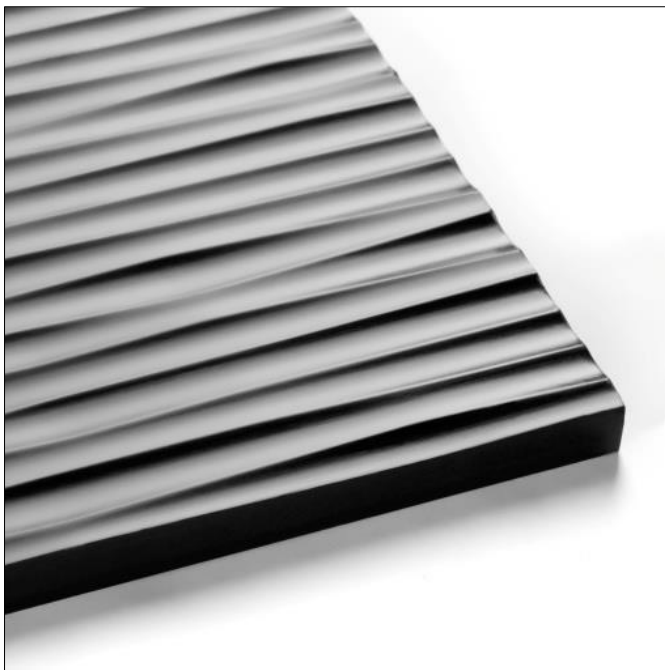
Tuotteesta (kuvio 10) valmistetaan istuimia, hyllyjä ja muita pieniä kodin sisustustuotteita. Yrityksen tuotteissa käytetään myös aaltopahvista tuttua rakennetta, jossa aallotetun levyn ylä- ja alapintaan on liimattu suorat levyt. (Studio Corelam 2018.)



Kuvio 10. Aaltomaista vaneria (Studio Corelam, 2018)

5.2 Sonae Arauco - Innovus® Wave

Innovus® on Sonae Arauco -nimisen yrityksen valmistama tuoteperhe, joka koostuu värjätyistä ja muotoon puristetuista MDF-levyistä (kuvio 11). Tuotevalikoimaan kuuluu sisustuspaneeliksi tehty muotoonpuristettu aaltomainen MDF-levy. Muodolla pyritään luomaan seinäpinnasta elävämpi ja tuotteen tarkoitus on myös erottua kilpailijoiden tasaisista levypinnoista. (Sonae Arauco 2017.)



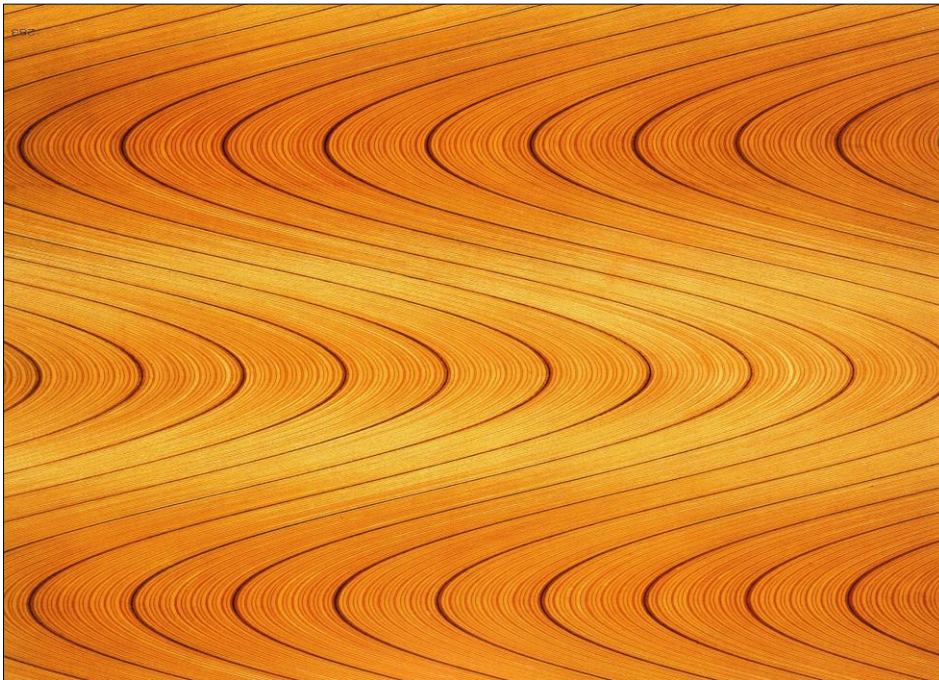
Kuvio 11. MDF-levyn pinta tekstuuria (Sonae Arauco 2017.)

5.3 Wirkkala – rytmivaneri

Tapio Wirkkala vaikutti sodan jälkeisinä vuosikymmeninä suomalaisessa muotoilussa. Parhaiten Wirkkala tunnetaan hänen suunnittelemissa lasiesineistä, mutta myös puu-, keramiikka- ja metalliesineet kuuluvat Wirkkalan muotoilutöiden joukkoon. Esineisiin Wirkkala haki innoitustaan luonnossa esiintyvistä muodoista, mutta hän yhdisteli luovasti myös useiden ympärillään näkemensä asioiden ominaisuuksia uusiksi kokonaisuuksiksi.

Wirkkalan huomattua miten vanerin rakenne näkyy levyn reunassa, hän alkoi tekemään kokeiluja ohutviiluvanerilla mihin hän oli tutustunut tuttunsa omistamalla vaneritehtaalla.

Wirkkalan ajatuksena oli laminoida useita ohutviiluvaneri kerroksia, joista osa oli liimattu fenolihartsilla ja osa vaalealla liimalla, päällekkäin saaden aikaan yhden ison kappaleen ohutviiluvaneria. Tämän kokonaisuuden hän sorvautti epäkeskisesti viilusorvissa, jolloin saadun viilun kuviointi oli symmetrisesti toistuva (kuvio 12). Wirkkala kutsui keksintöään rytmilliseksi vaneriksi. Tästä rytmivanerista valmistettiin huonekaluliike Asko:n alaisuudessa muutamia pöydänkansia ja istuimia. (Aav & Viljanen 2000, 10 - 37.)



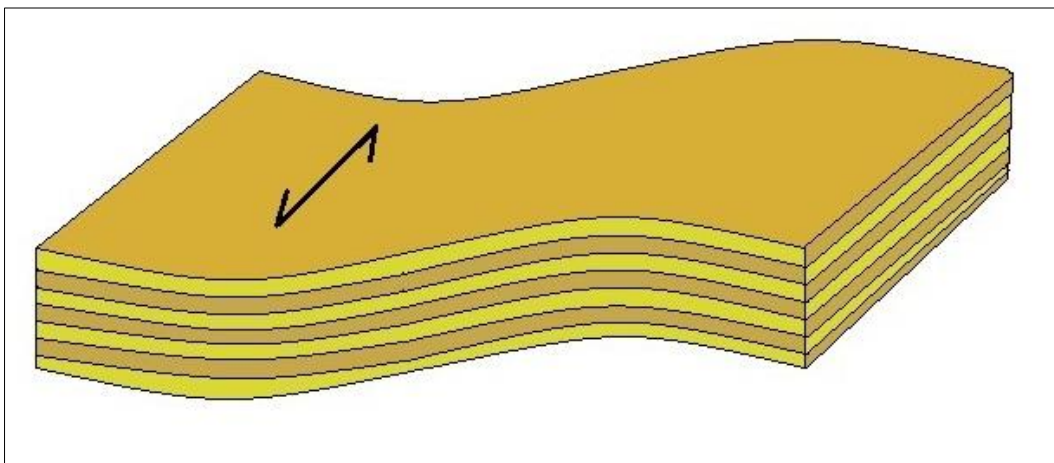
Kuvio 12. Rytmivanerin kuviointia (Aav & Viljanen 2000, 238)

6 KOESUUNNITELMA

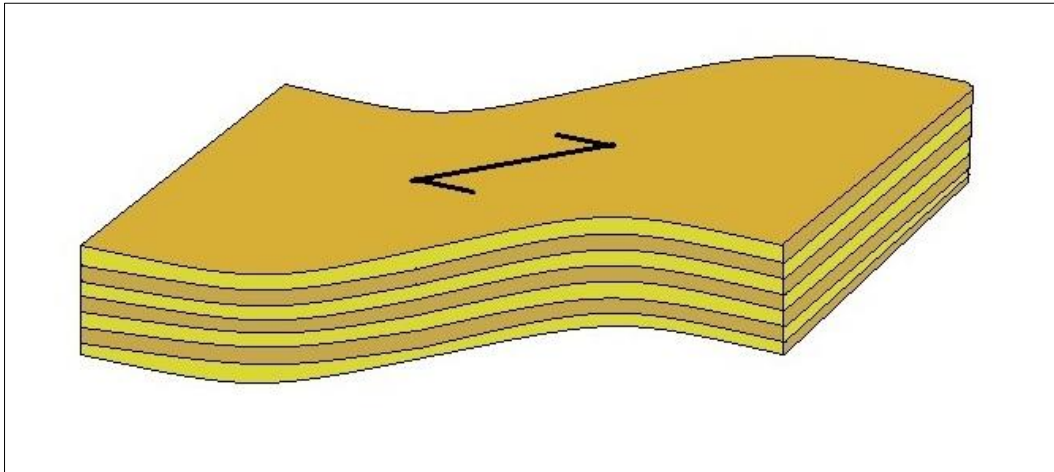
6.1 Koelevyt

Koeasetelman tarkoituksena on toteuttaa profiilivanerin valmistus prosessein, jotka mukailevat teollista vanerin valmistusta. Tarkoituksena oli valmistaa 12 aaltorakenteellista levyä, joiden rakenteet olivat toisistaan poikkeavia. Levyjen profiloiminen tehtiin samalla muotilla, jolloin ainoat poikkeamat ovat viilujen ladonnan ja levyjen jälkikäsitteilytavat.

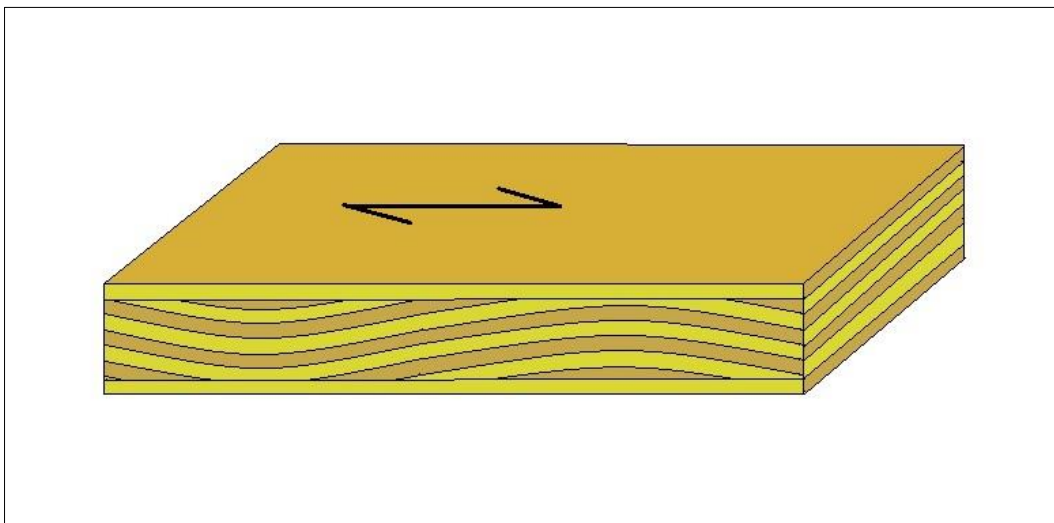
Koelevyjä valmistettiin kolmella eri tavalla, joita yhdistävänä tekijänä oli aaltoprofiili ja viilujen määrä. Neljä levyä koostui fenolihartsilla ristiinliimatuista viiluista, joista puoleessa aalto oli pintaviilun syiden suunnassa (kuvio 13) ja puoleessa syitä vastaan (kuvio 14). Seuraavien neljän levyn rakenne oli sama kuin edellä, mutta levyt hiottiin leveänauhakoneella tasaisiksi ja pintoihin liimattiin FF-hartsilla yhdet 1,4 mm paksut koivuviilut (kuvio 15). Viimeisten neljän levyn rakenne oli suunnattu eli kaikki muut viilut paitsi keskiviilu oli samaan suuntaan. Suunnatuissakin levyissä aaltoprofiilin suunta oli eri puolella levyistä.



Kuvio 13. Pintaviilun syysuunta aallon suuntaan



Kuvio 14. Pintaviilun syysuunta aaltoa vastaan



Kuvio 15. Hiottu ja viilutettu levy, pintaviilun syysuunta aaltoa vastaan

6.2 Mantteli

Jotta viilut voitaisiin puristaa oikeaan muotoon, on puristuksessa käytettävä muottia, jonka perusteella muoto syntyy. Muotin kehitysprosessi lähti käyntiin puisilla protoversioilla, joiden avulla tarkoitus oli löytää yksinkertaisin ja helpoin toteutustapa, jolla oli mahdollista tuottaa halutunlainen lopputulos. Tavoitteena oli löytää muotille jokin muu ratkaisu kuin CNC-työstö, sillä lopullisen kuumapuristusmuotin jyrshintä täysmetallisesta kappaleesta ei olisi ollut materiaalitehokasta ja kustannukset olisivat olleet korkeat.

Ensimmäisissä versioissa käytetty pyöreistä puutangoista halkaisemalla valmistettu muotti toimi pienoismallikokeiden kohdalla hyvin, mutta varsinaisen muotin valmistaminen samalla tekniikalla olisi ollut hyvinkin työlästä ja materiaalihukkakin olisi tullut olemaan suurta. Toinen isompi ongelma pyöreiden tankojen kohdalla oli myös se, että puristettaessa paine jakautuu liian pienelle alalle ja siten olisi saattanut aiheuttaa viilun leikkautumista.

Seuraavissa protoversioissa hyödynsin lankusta sahattuja noin 20 mm leveitä ja noin 3 mm paksuja lattamaisia paloja, mitkä liimasin kiinni vanerilevyn pintaan (kuvio 16). Kyseinen ratkaisu toimi hyvin varsinkin, kun muotoon puristettavien viilujen ja muotin puoliskojen väliin asetettiin yhden millimetrin paksuiset alumiinilevynpalat. Alumiinilevy tasasi juuri sopivasti painetta, jolloin viilut puristuivat haluttuun aaltomuotoon.



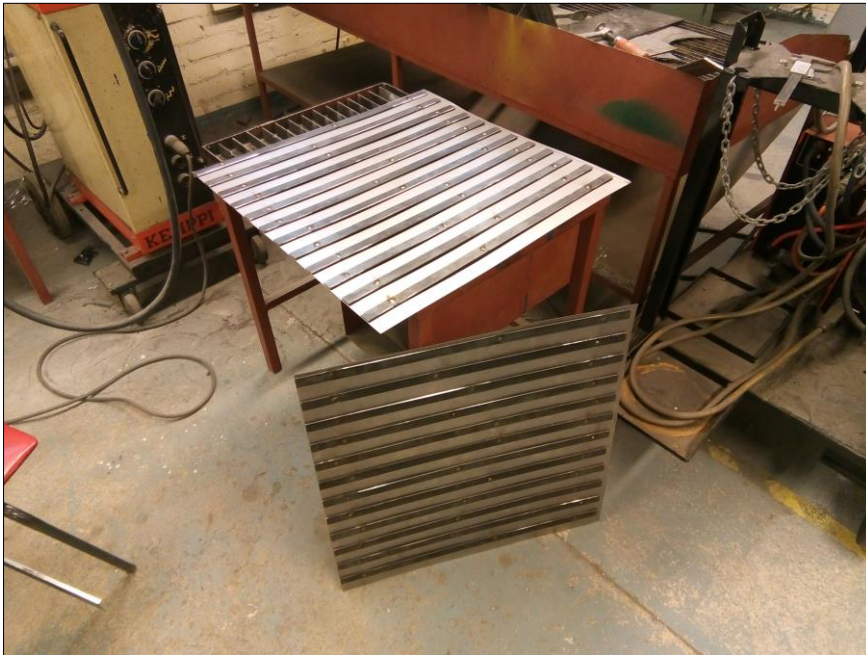
Kuvio 16. Protolevy puristuksessa

Hyvin onnistuneiden pienoismallikokeiden johdosta varsinaisen muotin rakenteeksi valikoitui juuri edellä kuvattu rakenne. Rakenne olisi myös helppo ja edullinen toteuttaa verrattuna CNC-työstettyyn muottiin. Koska valmistettavat vanerilevyjen liimoittamiseen tulnaisiin käyttämään kuumakovettuvaa fenoliformaldehydi hartsia tulisi muotin johtaa hyvin lämpöä. Materiaaliksi valikoitui teräs sen kestävyys ja lämmönjohtavuuden takia.

Muotin valmistusta varten tarvittiin 3 mm x 20 mm lattarautaa yhteensä 14,4 metriä ja 1mm paksua teräslevyä 0,72 m². Materiaalikustannuksiksi tuli tällöin lattarautan kohdalla

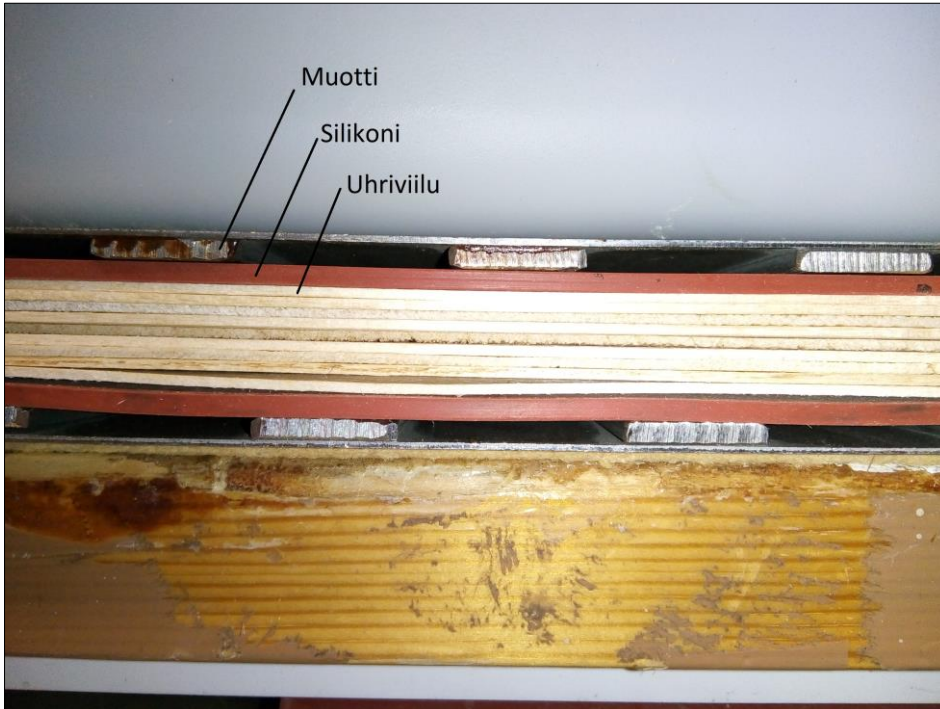
noin 21 euroa (Puulo 2018) ja teräslevyarkin hinnaksi noin 29 euroa. (Motonet 2018)
Tällöin kokonaishinnaksi muodostuu noin 50 euroa.

Muotti rakennettiin Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan laitoksen metallipajassa, jossa sai käyttää tarvittavia koneita vastaavan opettajan pitämän käyttöturvallisuus ohjeistuksen jälkeen. (kuvio 17). Puristusmuotit tehtiin liitteen 1. mukaisen piirustuksen perusteella.



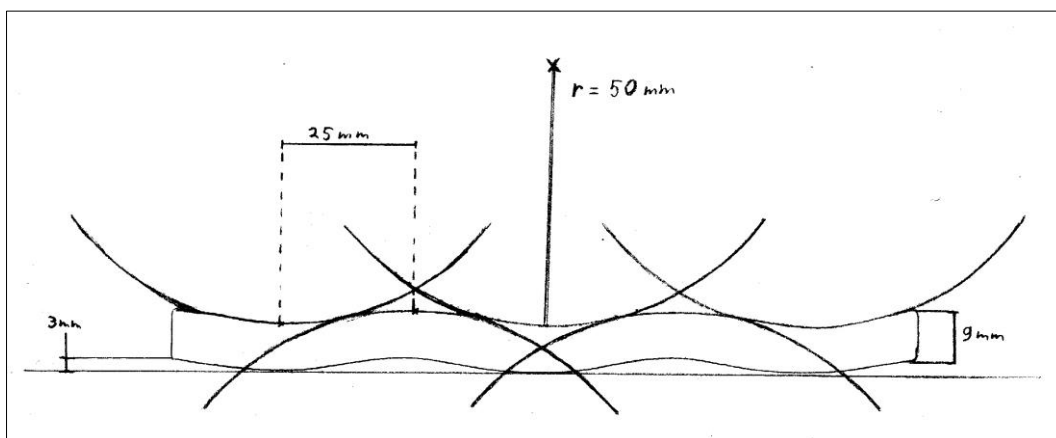
Kuvio 17. Valmiit muotinpuoliskot

Ensimmäisen koepuristuksen jälkeen tuli selväksi se, että vaikka lattarautojen kulmat oli pyöristetty kulmahiomakoneella, ei rakenne tuota suoraan siistiä aallokkoa vaan pintaviilut leikkautuivat halki. Peltilevyn käyttöä paineen tasaamiseen kokeiltiin, mutta ongelmaksi muodostui liian korkea puristusaine, jolla levy olisi taipunut muotin muotoihin. Tämä ongelma ratkaistiin poistamalla peltilevy ja laittamalla kolme millimetriä paksu silikonilevy muotin ja puristettavan levyn väliin. Seuraavan puristetun levyn muoto oli jo hyvin lähellä oikeaa, mutta nyt aalto oli hieman kantikas. Kantikkuuden poisto onnistui asettamalla yksi koivuviilu silikonilevyn ja puristettavan levyn väliin siten, että viulun syysuunta oli poikittain muotin lattarautojen suuntaan nähden. Tämä uhriviilu tulisi rikkoutumaan puristuksessa, mutta samalla se suojaisi valmistettavaa levyä. Lopullinen rakenne oli siten kuvion 18. mukaisesti seuraava: alempi muotinpuolisko, silikonilevy, uhriviilu, puristettava levy, uhriviilu, silikonilevy ja ylempi muotinpuolisko.

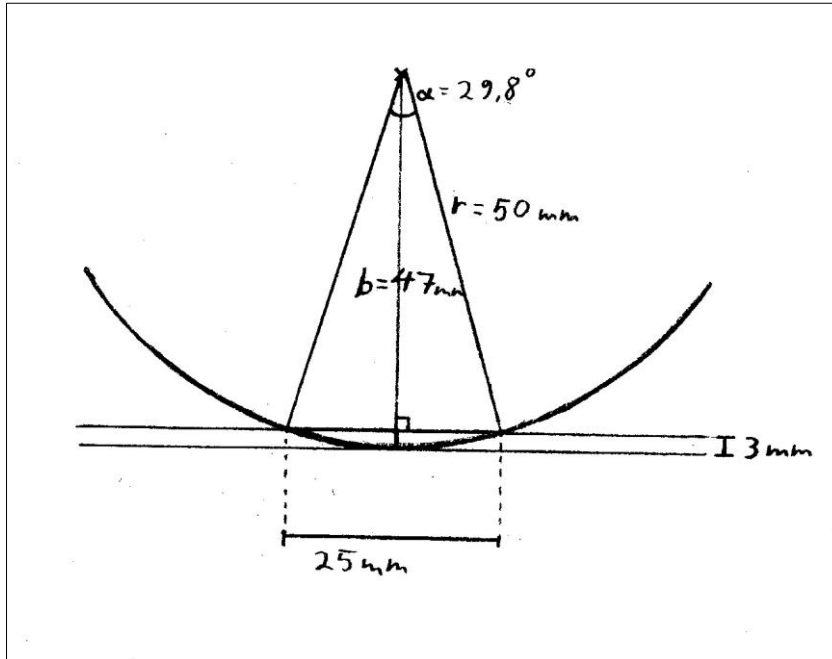


Kuvio 18. Muotin osien järjestys

Muotilla kuumapuristetun levyn profiili asettui hyvin lähelle ympyräkaaren muotoa. Kuvioista 19. ja 20. ilmenee valmiin levyn aaltomaisuuden koostuvan useista halkaisijaltaan 100 mm ympyräkaarista, jotka leikkaavat toisensa noin 25 mm jaksolla. Myös aallonharjan ja pohjan välimatka on 25 mm.



Kuvio 19. Levyn profiili



Kuvio 20. Aaltoprofiilin kaaren osan mitat

6.3 Liima

Liimaksi valikoitui fenoliformaldehydi hartsi (kuvio 21), koska se on tyypillisin vanerin valmistukseen käytettävä liima. Käyttöön saatiin varastossa olleet Prefere 14J021 hartsi sekä siihen yhteensopiva Prefere 24J662 kovete. Liima valmistettiin taulukon 1. mukaisen kaavan mukaan. Liiman sekoittamisen aikana seokseen lisättiin vettä reseptin arvoa enemmän, sillä muutoin kovete ei olisi sekoittunut kunnolla jähmeän hartsin sekaan. Hartsin jähmeys saattoi johtua pitkästä varastointiajasta, myös kovetteen valmistuspäivämäärä oli muutaman vuoden takaa.



Kuvio 21. Valmista FF-liimaa sekoituksen jälkeen

Taulukko 1 FF-hartsin resepti

FF-hartsin resepti	Määrät (paino-osina)	Prosenttiosuudet
Hartsi Prefere 14J021	1000 pa	≈ 69,7%
Kovete Prefere 24J662	200 pa	≈ 13,9%
Vesi	235 pa	≈ 16,4%
yht.	1435 pa	≈ 100 %

6.4 Viilut

Tutkimustyötä varten saatiin käyttöön edeltävänä syksynä päättyneen projektin ylijäämä koivuviilut, joiden paksuus oli 1,4 mm. Viilut olivat varastoituna nippuun kuormalavan päälle ja viilujen laatu vaihteli laatuluokkien B, S, ja BB välillä. Nipusta otettiin kolme koepalaa, joiden kosteusprosentti selvitettiin punnituskuivaus menetelmällä. Koekappaleen alkupaino punnittiin vaa'alla, jonka jälkeen kappaletta pidettiin kuivausuunissa 105 °C lämpötilassa niin kauan kunnes kappaleen paino ei enää vähentynyt. Alku ja kuivapainon perusteella kaavan 2. avulla määritettiin viilujen kosteudet.

Kaava 2. Puun kokonaiskosteuden laskukaava

$$u = \frac{(m_u - m_0) * 100}{m_0}$$

u = kokonaiskosteus

m_u = kappaleen alkupaino

m_0 = kappaleen kuivapaino

Taulukko 2 Viilun kosteusprosentit

pvm. & klo	kpl 1. (g)	kpl 2. (g)	kpl 3. (g)
15.3. klo 13.00	31,4	30,0	29,6
16.3 klo 9.00	30,1	28,8	28,4
16.3. klo 12.00	30,1	28,8	28,4
painon muutos (g)	1,3	1,2	1,2
kosteusprosentti	4,3 %	4,20 %	4,20 %

6.5 Ladonta

Viilujen ladonta tehtiin siten, että levyä varten valikoidut, seitsemän viilua asetettiin nippuun pöydälle (kuvio 22). Pinkan päällimmäisenä oli pintaviilu käännettynä sorvaushalkeamat ylöspäin ja alimpana toinen pintaviilu sorvaushalkeama puoli alaspäin. Liimaa tuli siten kaikkien muiden viilujen yläpinnalle paitsi pinkan alimpaan pintaviiluun. Liima levitettiin viilulle pensselillä, jonka jälkeen maalaustelalla tasoitettiin epätasaisuudet liiman levitysmäärässä. Liiman levittäminen viiluarkin pintaan pensselillä ja maalaustelalla ei mahdollistanut tasaisinta levitystä eikä siksi ole täysin pätevä suositellun 170 g/m² levitysmäärän kanssa.

Kaikkien koelevyjen paksuus oli 7-ply, koska tällöin niiden keskinäinen vertailu olisi mahdollista. Kahdeksan levyn kohdalla rakenne oli tyypillinen ristiinliimaus $|-|-|$, mutta levyyn puristettavan aaltoprofiilin suunta oli puolessa pintaviilun syiden suuntainen ja puolessa pintaviilun syitä kohtisuoraan vastaan. Näiden lisäksi valmistettiin neljä levyä suunnatulla rakenteella $|||-||$, joissa ainoastaan keskiviilu oli erisuuntainen muihin viiluihin nähden. Suunnatun rakenteen levyistä puoleen puristettiin aaltoprofiili pintaviilun syiden suuntaisesti ja puolet syiden suuntaa kohtisuoraan vastaan.



Kuvio 22. Vanerin liimaus ja ladontapiste

6.6 Esi- ja kuumapuristus

Ladonnan jälkeen levyaiho esipuristettiin viilupuristimella (kuvio 23) hydraulisen paineen ollessa 95 bar. Tällöin koko levyn pinta-alalle kohdistui noin 10 bar paine. Levyn annettiin olla esipuristuksessa noin viiden minuutin ajan, minkä jälkeen se siirrettiin kuumapuristukseen.



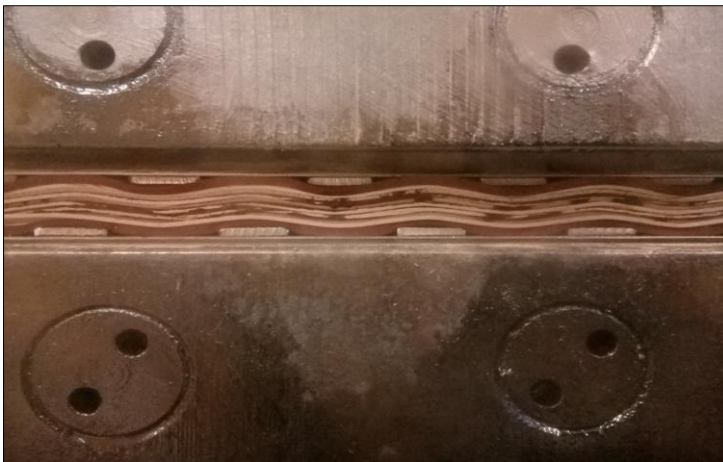
Kuvio 23. Levyn esipuristukseen käytetty puristin

Kuumapuristus tehtiin tarkkuuslevypuristimella (kuvio 24), joka on rakennettu juuri laboratorio mittakaavan levytuotteiden valmistukseen. Puristimen logiikkaan on ohjelmoitu valmiiksi kaavat, joiden mukaan levyn puristus tapahtuu. Puristimen käyttäjän on määritettävä halutut puristuspainheet, lämpötilat sekä eri vaiheiden kestot.

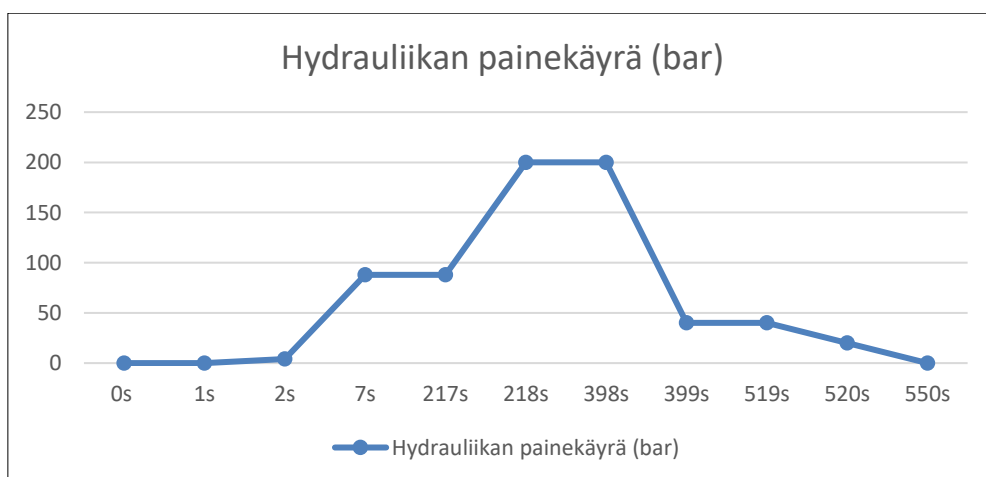


Kuvio 24. Tarkkuuslevypuristin

Koska puristusmuotti koostui muotinpuolikkaiden lisäksi silikonilevyistä ja uhriviiluista, rakenne oli suhteellisen paksu (kuvio25). Tämän takia puristusaikaa pidennettiin tavallisen seitsemän viulun paksuisen levyn puristusajasta yhdeksään minuuttiin. Puristus oli viisivaiheinen (kuvio 26). Ensimmäisessä osassa puristuspaine nousi asetettuun 20 bar tasoon ja pysyi siinä 210 sekuntia toisen vaiheen loppuun asti. Kolmannessa vaiheessa levyn kasaanpuristuvuus oli suurin ja tällöin puristimen paine nousi korkeaksi 180 sekunnin ajaksi. Neljännessä vaiheessa puristuspaine väheni 45 % ja pysyi siinä 120 sekunnin ajan, jonka jälkeen vaiheessa viisi paine aleni nollaan 30 sekunnin aikana. Puristuslämpötilana koko prosessin ajan oli 120 °C.

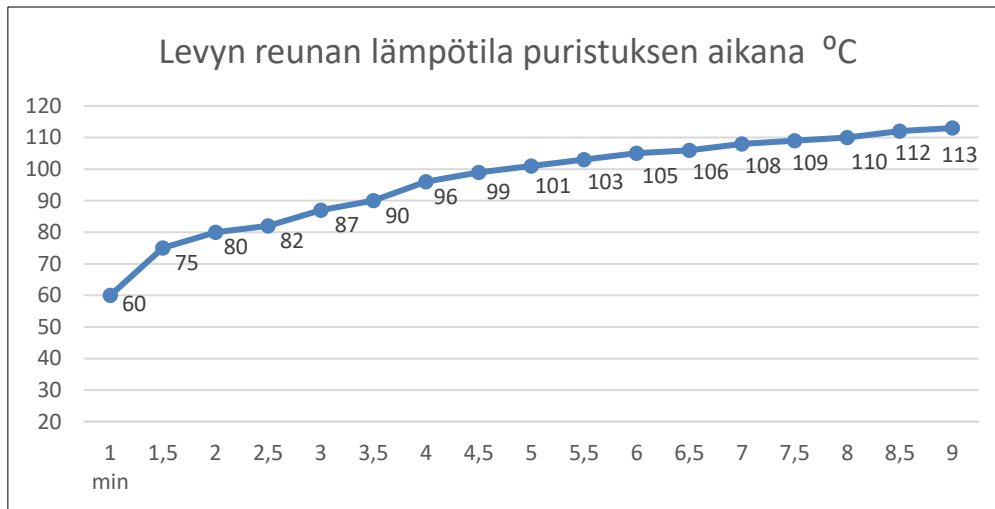


Kuvio 25. Levy kuumapuristuksessa



Kuvio 26. Tarkkuuspuristimen hydrauliikan painekäyrä

Levyn lämpötilan nousun mittaamiseen käytettiin käsikäyttöistä infrapunalämpömittaria, jolla oli mahdollista tarkkailla levyn reunan lämpötilaa. Tarkkaa tietoa levyn sisälämpötilasta ei ollut mahdollista siten saada. Kuvio 27 osoittaa reunan lämpötilan kohoamisen puristuksen alusta loppuun asti. Lämpötila mitattiin levyn reunan keskiosasta.



Kuvio 27. Levyn reunan lämpötila puristuksen aikana

6.7 Valmiit levyt

Levyt puristuivat haluttuun muotoon hyvin, mutta levyt joissa pintaviilun syysuunta oli aallonsuuntainen, ilmeni repeytymiä ja halkeamia pintaviilussa (kuvio 28). Vikojen synty on hyvin ymmärrettävää, koska pintaviilun syysuunnan ollessa aaltojen myötäinen, kohdistuu siihen muotoon puristettaessa syitä vastaan kohtisuoraa vetoa.



Kuvio 25. Halkeamia levyn pintaviilussa

Pintaviilun ollessa aaltoja vastaan vikoja oli huomattavasti vähemmän. Joissain kohdissa oli näkyvissä syiden suuntaisia liimanläpilyönti jälkiä sekä pieniä viilun repeytymiä. Repeämä (kuvio 29) toistui parissa levyssä samassa kohdassa, joten todennäköistä on se, että muotissa on ollut poikkeama lattaraudan korkeudessa. Valmiiden levyjen tiheys oli noin 700 kg/m^3 , joka on 3% korkeampi kuin teollisesti 1,4 mm viiluista valmistetun koivuvanerin keskitiheys.



Kuvio 26. Repeämä levyn pintaviilussa

Hionta ja uudelleen viilutus

Neljä levyä, joista puolella pintaviilun syysuunta ja aallon pitkittäissuunta oli sama, hiottiin leveänauhahiomakoneella tasapaksuksi eli aaltojen huiput hiottiin pois (kuvio 30). Tasaiseen levyyn liimattiin molemmille puolille FF-hartsilla yhden 1,4 mm paksut koivuviilut. Rakenne ilmenee kuviosta 15.

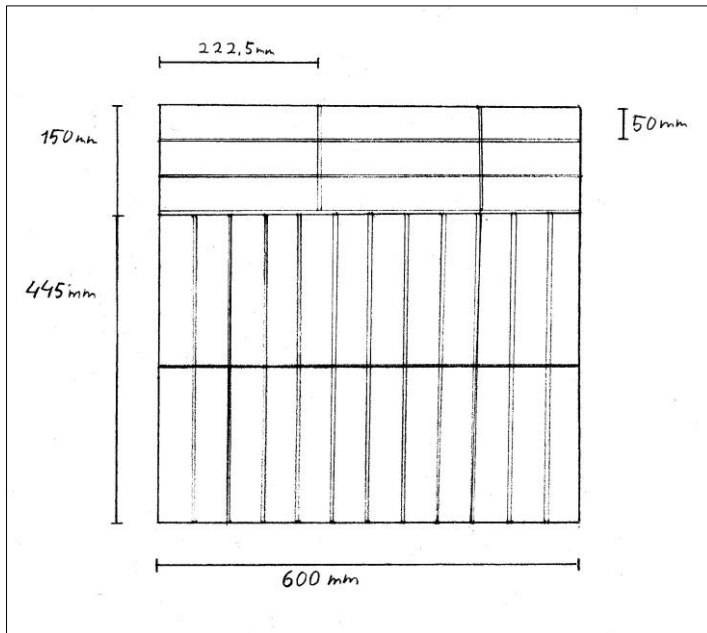


Kuvio 27. Aaltolevy tasaiseksi hionnan jälkeen

6.8 Koekappalaiden sahaus

Levyjen tasaannutuksen jälkeen ne sahattiin koepaloiksi kuvion 31 mukaisesti.

Koepalojen koko määräytyi standardin EN 310 mukaan. Yhden koekappaleen leveys on siten 50 ± 1 mm ja pituus 20 kertaa kappaleen paksuus, johon lisätään vielä 50 mm vara taivutuskoeasetelmaa varten. Valmiiden kappaleiden mitat olivat $9 \times 50 \times 222,5$ mm.



Kuvio 28. Sahauskaavio

7 TULOKSET

7.1 Levyjen kosteuden määrittäminen

Kolmen eri levyn koekappaleiden sahaustesta yli jääneitä paloja käytettiin levyjen kosteuden määrittämiseen. Menetelmänä oli punnituskuivaus menetelmä missä koekappaleen alkupainon ja kuivauksen jälkeisen kuivapainon avulla kaavaa 1. hyödyntäen on mahdollista laskea puun kosteusprosentti.

Taulukko 3 Levyjen kosteusprosentit

pvm.	Kpl 1. (g)	Kpl 2. (g)	Kpl 3. (g)
6.maalis	46,8	48,0	44,6
7.maalis	45,4	46,5	43,1
8.maalis	44,8	46,0	42,6
9.maalis	44,9	46,1	42,7
9.maalis	44,9	46,0	42,6
painon muutos (g)	1,9	2,0	2,0
kosteusprosentti	4,2 %	4,4 %	4,7 %

7.2 Levyjen kierouden määrittäminen

Levyjen kierouden määrittäminen tehtiin ruotsalaiseen standardiin SIS 83 01 10 perustuvan tekniikan avulla. Koeasetelma toteutettiin kuvion 32 mukaisesti siten, että vanerilevy asetettiin kovera puoli ylöspäin tasaiselle pöytälevylle. Levyn kolme kulmaa painettiin kiinni pöytään ja vapaan kulman korkeus pöytäpinnan tasosta mitattiin työntömitalla, jonka tarkkuus oli 0,1 mm. Tämä mittausmenetelmä tunnetaan myös nimellä asiakasmittaus, sillä se on kehitetty vanerintoimittajien asiakkaita varten. (Tarvainen 1993, 4, 41)

Levyjen kierouden mittaus tehtiin hiottuille ja uudelleen viilutetuille levyille sekä suunnatun rakenteen levyille. Taulukossa 4 hiottuja levyjä edustavat numerot 1,1 – 1,3 ja suunnatun rakenteen levyjä 2,1 – 2,4. Otosmäärä oli hyvin pieni eikä siten ole tilastollisesti pätevä, mutta suuntaa antavasti tuloksista voi todeta, että levyn loiva aaltomuoto ei poista kokonaan vanerilevyn kieroutumista. Parhaimmat tulokset eli pienimmän kulmannousun arvot antoivat hiottu ja uudelleen pinnoitetut levyt. Todennäköisesti tämä johtuu siitä, että aaltomuotoon puristettu, hiottu ja pinnoitetun levyn rakenne on osittain rikottu, niin ettei viilujen sisäiset jännitteet enää vaikuta levyn muotoon niin paljoa kuin tavallisen vanerin

suoraksi puristetut viilut. Osittain tätä tukee Tarvaisen (1993, 41.) diplomityön huomio siitä, että mitä käyremmistä tukeista vanerin viilut oli sorvattu, sitä suurempana valmis vanerilevy oli pysynyt.

Taulukko 4. Levyjen kieroudet

Levyn nro.	Suurin kulman nousu
1,1	2,1 mm
1,2	20,3 mm
1,3	9,7 mm
2,1	36,0 mm
2,2	14,1 mm
2,3	27,8 mm
2,4	27,7 mm



Kuvio 29. Levyn käyryyden mittaus

7.3 Taivutuslujuuden määrittäminen

Taivutuslujuuden sekä kimmomoduulin mittaamiseen käytettiin Shimadzu aineenkoestuskonetta (kuvio 33). Laite oli hankittu koululle vasta joitain kuukausia sitten, josta johtuen ohjelmistossa ei ollut valmiina kaavoja joiden perusteella kone laskee kimmokertoimen. Ennen testien aloittamista oli vanhan koneen tietojen perusteella luotava uusi koestusohjelma. Standardin EN 310 mukaisesti koeasetelmassa käytettiin painimessa tankoa, jonka halkaisija oli $30 \pm 0,5$ mm ja tuissa halkaisijaltaan $15 \pm 0,5$ mm olevaa tankoa. Koekappaleiden sarjat 1 & 2, 3 & 4, 5 & 6, 7 & 8 ja 9 & 10 muodostavat

parit, koska kappaleet ovat sahattu samoista levyistä, mutta koestus tehtiin eri syysuuntaan.



Kuvio 30. Aineenkoestuskone Shimadzu

Koekappaleet 1.1 – 1.24

Koekappaleet koostuivat levyistä joiden pintaviilun syysuunta oli sama kuin aallon suunta (kuvio 13). Koekappaleiden koestus tehtiin syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Suurimmassa osassa koekappaleita murtuminen tapahtui vasta, kun taivututettavan kappaleen aalto oli suoristunut. Liitteessä 2. on näkyvissä koekappaleiden saamat arvot murtovoiman, jännityksen sekä kimmokerroimen osalta. Kappaleiden keskiarvollinen jännityksen kesto oli $58,75 \text{ N/mm}^2$ ja kimmokerroin $5080,07$.

Koekappaleet 2.1 – 2.26

Koekappaleet koostuivat samoista levyistä kuten edeltävätkin eli levyistä, joiden pintaviilun syysuunta oli sama kuin aallon suunta (kuvio 13), mutta taivutuslujuuden mittaaminen tehtiin syiden suunnassa. Kappaleiden murtumatavoissa ei ollut mitään poikkeavaa vaan kappaleen hajoaminen tapahtui, kun taivutuksen vetopuolen pintaviilu

antoi periksi. Koekappaleiden keskimääräinen maksimi jännitys oli 113,42 N/mm² ja kimmokerroin 11547,30. Liitteessä 3. on esillä koekappaleiden saamat arvot.

Koekappaleet 3.1 – 3.26

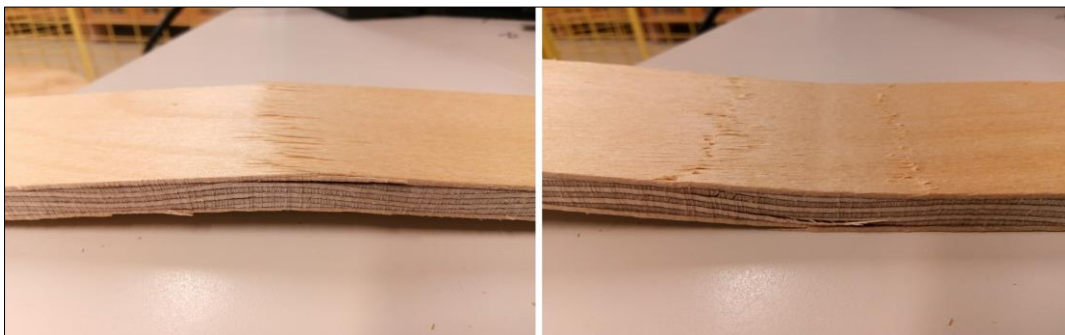
Koekappaleet sahattiin levyistä joissa pintaviilun syysuunta oli aaltoa vastaan (kuvio 14). Koestus tehtiin syiden suunnassa. Murtumat tapahtuivat yleisesti liimasaumoista varsinkin kappaleissa joissa taivutuksen keskipiste oli sijoittunut niin, että momentti oli pyrkinyt oikaisemaan kaarta Kuvion 7 (b) mukaisesti. Liitteestä 4. ilmenee koekappaleiden saamat arvot josta selviää, että keskimääräinen jännityksen kesto oli 82,28 N/mm² ja kimmokerroin 9725,73.

Koekappaleet 4.1 – 4.26

Pintaviilun syysuunta oli sama kuin edellisissä koekappaleissa, mutta koestus tehtiin syiden suuntaa vastaan. Kappaleiden hajoaminen tapahtui, kun pintaviilu murtui. Keskimäärin testipalat saavuttivat 68,62 N/mm² jännityksen ja kimmokertoimen 5736,91. Liitteestä 5. ilmenee sarjan kaikkien kappaleiden arvot.

Koekappaleet 5.1 – 5.26

Viidennen sarjan koekappaleet koostuivat hiotuista ja uudelleen viilutetuista levyistä (kuvio 15). Nämä kappaleet koestettiin pintaviilun syiden suunnassa. Muutamat kappaleet murtuivat mielenkiintoisesti kolmesta pisteestä. Yläpuolen pintaviilu kahdesta kohtaa ja alapinnan viilu yhdestä kohtaa. Aaltomainen keskirakenne on siten jakanut taivutusvoimia (kuvio 34). Maksimijännitysten keskiarvo oli 103,26 N/mm² ja kimmokerroin 11774,90. Arvot on nähtävissä Liitteessä 6.



Kuvio 31. Koekappaleen murtuminen kolmesta kohtaa

Koekappaleet 6.1 – 6.26

Koekappaleet koostuivat samoista levyistä kuin viidennen sarjan kappaleet. Koestus tehtiin pintaviilun syiden suuntaa vastaan. Kappaleen hajoaminen tapahtui pintaviilun murruttua. Keskimääräinen jännityksenkesto oli 40,49 N/mm² ja kimmokerroin 3139,97. Kaikkien kappaleiden arvot on nähtävissä liitteessä 7.

Koekappaleet 7.1 – 7.26

Seitsemännet koekappaleet koostuivat levyistä joiden rakenne oli suunnattu seuraavasti: |||—|||. Levy oli kuvio 14. mukainen eli samanlainen kuin koekappaleet 4.1 – 4.26. Pintaviilun syysuunta oli siten aallon suuntaa vastaan. Koekappaleiden saavuttamat arvot ovat nähtävissä liitteessä 8. Keskimäärin koekappaleet saavuttivat 13,35 N/mm² jännityksen ja kimmokertoimen arvoksi 730,24.

Koekappaleet 8.1 – 8.26

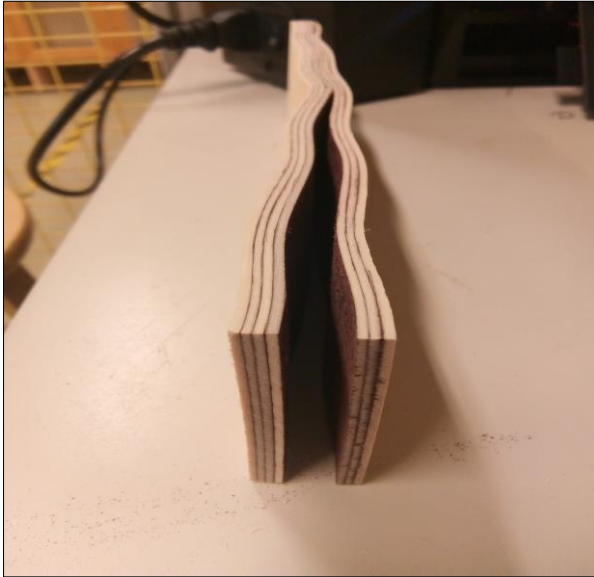
Koekappaleiden rakenne oli sama kuin edeltävissä seitsemänsissä, mutta koestun tehtiin syiden suunnassa. Hyvin useissa kappaleissa murtuminen tapahtui liimasaumasta. Keskimäärin kappaleet kestivät 98,24 N/mm² jännityksen ja keskimääräinen kimmokerroin oli 13057,20. Liitteestä 9. on nähtävissä kaikki arvot.

Koekappaleet 9.1 – 9.26

Koekappaleet oli sahattu myös levyistä, joissa oli vastaavanlainen suunnattu rakenne kuin sarjojen seitsemän ja kahdeksan koekappaleissa. Aallon suunta oli samansuuntainen pintaviilun syysuuntaan nähden. Eli kuvio 13. mukainen. Koestus tehtiin pintaviilun syiden suuntaa vastaan. Johtuen syysuunnasta kappaleet olivat hyvin taipuisia ja murtuivat erittäin pienellä voimalla. Kappaleet saavuttivat keskimäärin ainoastaan 7,71 N/mm² ja myös kimmokerrointen keskiarvo oli alhainen 462,32. Liitteessä 10. on esillä kaikki arvot.

Koekappaleet 10.1 – 10.26

Koekappaleet koostuivat vastaavan rakenteen levyistä kuten sarjan yhdeksän koekappaleet, mutta koestus tehtiin syiden suuntaisesti. Koekappaleissa murtuminen tapahtui lähes kaikissa kappaleissa liimasaumasta (kuvio 35). Keskimäärin kappaleet kestivät 116,60 N/mm² jännityksen ja keskimääräinen kimmokertoimen arvo oli 10933,50. Liitteessä 11. on nähtävillä kaikkien kappaleiden arvot.



Kuvio 32. Liimasauman delaminoituminen

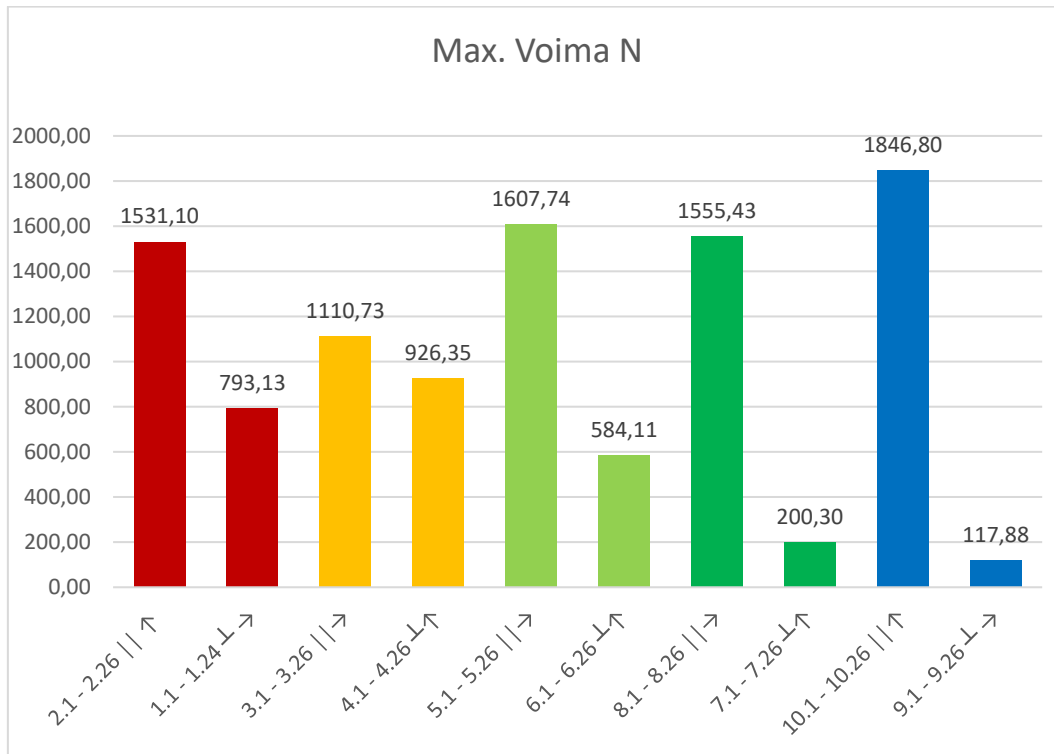
8 TULOSTEN TARKASTELU

8.1 Murtovoima

Standardin EN 310 mukaisen taivutuslujuuskokeen tulokset eivät ole suoraan verrannolliset Vanerikäsikirjan arvoihin mitkä perustuvat standardiin EN 789. Tämän takia taivutuslujuus testien tulokset on muutettava vastaamaan Vanerikäsikirjan arvoja. Koivuvanerin taivutuslujuuden jakokerroin on 1,4 molempiin syysuuntiin ja kimmomoduulin jakokerroin 0,85 molempiin syysuuntiin.

Koekappaleiden murtovoimien välillä oli suuria eroja riippuen siitä, tehtiinkö taivutuskoe kappaleen pintaviilun syysuuntaan vai syitä kohtisuoraan vastaan. Merkittävimmät erot voiman kestossa oli suunnatulla viilurakenteella tehdyissä levyissä, joissa syitä vastaan kohtisuoraan koestetut kappaleet kestivät ainoastaan noin 10% syiden suuntaan taivutettujen kappaleiden kestosta. Pienin ero syysuuntien välillä oli sarjojen kolme ja neljä kohdalla ainoastaan 184 newtonia.

Aallon suunnan vaikutus murtolujuuteen näkyy kaaviossa siten, että esimerkiksi koekappale sarjat 1. ja 4. koostuvat kappaleista joiden pintaviilun suunta on ollut taivutuskokeessa sama, mutta aallon suunta on poikennut 90 astetta. Neljännen sarjan koekappaleissa aalto kulki pintaviilun syiden suuntaa vastaan ja ensimmäisen sarjan kappaleissa myötäisesti. Koekappaleiden 4.1 – 4.26 keskiarvo on 133 Newtonia korkeampi kuin koekappaleiden 1.1 – 1.24. Tämä johtuu juuri aallon suunnasta koska, kun kappaleessa on vain yksi pitkittäinen aalto niin kappaleen korkeus on aallon kohdalla 3 mm korkeampi. Kun taas aallot kulkevat koekappaleessa poikittain niin tällöin kappaleen pituudelle osuu useampi aalto, jotka eivät muodosta yhtenäistä korkeuden muutosta kappaleeseen. Kuviossa 36 aallonsuunta ilmenee selitteessä olevan nuolen suunnan perusteella. Pilarien värit ilmentävät samoista levyistä sahattuja koekappaleita.



Kuvio 33. Kappaleiden murtovoimien keskiarvot

8.2 Jännitys

Vanerikäsikirjassa on annettu teollisuuden vanereiden keskiarvot levyn kestoista syidensuuntaa vastaan ja poikkisyin. Yksikkönä on N/mm^2 , koska se kertoo levynkeston suhteutettuna kappaleen kokoon ja on siten havainnollisempi arvo kuin pelkkä murtovoima. Kuviosta 37 on nähtävissä koekappaleiden keskinäiset huippujännitysten suhteet ja kuviosta 38 kimmomodulin arvot.

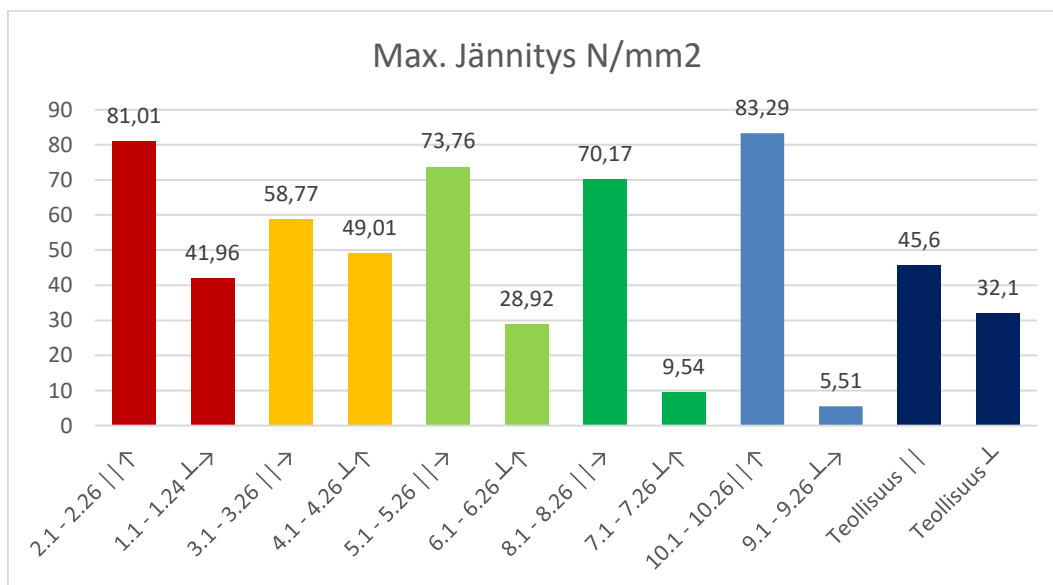
Sarjojen 1. ja 2. kappaleet edustavat samaa levyä eri syy- ja aallonsuuntaan koestettuna. Kappaleiden jännityksen kesto ylittää teollisuuden keskiarvot reilusti molemmissa syysuunnissa tosin sarjan 1. kimmomodulin arvo jäi alle teollisuuden keskiarvon. Sarjojen 3. ja 4. kappaleiden tulokset ylittävät myös ilmoitetut teollisuuden arvot.

Huomionarvoista edellä mainittujen koekappalesarjojen tuloksissa on aallonsuunnan vaikutus kappaleen jännityksenkestoon. Sarjojen 2. ja 3. kappaleet on testattu samassa syysuunnassa, mutta aallonsuunta on ollut eri. Tuloksissa on $22,2 \text{ N}/\text{mm}^2$ ero siten, että koekappaleen pituussuuntainen aalto on kestänyt enemmän. Sama asia on näkyvissä myös sarjojen 1. ja 4. kohdalla, joissa on $7,1 \text{ N}/\text{mm}^2$ ero jälleen pitkittäisen aallon suunnan

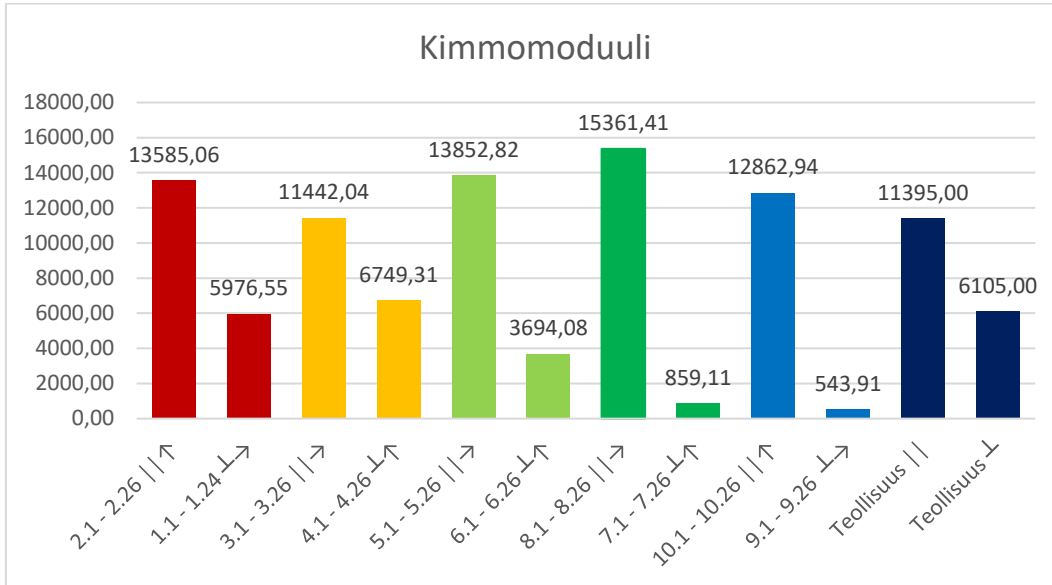
eduksi. Positiivinen kehitys koekappaleiden lujuudessa voi selittyä vain aallon suunnan vaikutuksesta. Arvojen perusteella sarjojen 3. ja 4. edustama levytyyppi on hyvin lähellä tavallista teollisuuden valmistamaa vaneria niin jännitys arvojen kuin kimmomodulinkin perusteella.

Sarjojen 5. ja 6. koekappaleet edustivat kokeellista levyrakennetta, jossa tasaisesti hiottu aaltolevy oli pinnoitettu 1,4 mm paksuilla koivuviiluilla. Levyn rakenteen ideana oli aikaansaada levyn keskelle muoto, joka taivutuksessa siirtäisi syntyneitä voimia pintaviiluun. Tulosten perusteella rakenne toimi hyvin, kun taivutus tehtiin pintaviilun syiden suunnassa. Syitä vastaan kohtisuoran taivutuksen tulos jäi kuitenkin 10% alle teollisuuden keskiarvon. Kimmomoduuli arvo syiden suunnassa oli koesarjojen toiseksi paras ja ylittää vanerikäsikirjan ilmoittaman arvon reilusti.

Koekappale sarjat 7. – 10. edustivat suunnatun rakenteen aaltolevyjä ja niiden tulokset olivat odotetunlaiset. Syiden suunnassa levyn kestävyys oli hyvä, mutta syiden suuntaa vastaan taivutettaessa rakenne antoi helposti periksi. Tuloksissa on silti nähtävissä, miten koekappaleen pituussuunnassa oleva aalto lisää kappaleen kestävyttä. Sarjojen 8. ja 10. välinen erotus on 13,1 N/mm² pitkittäisen aallon eduksi ja sarjojen 7. ja 9. erotus on 4,0 N/mm² pitkittäisen aallon eduksi. Tulosten perusteella aaltorakenteella on mahdollista lisätä levyn taivutuslujuus kestävyttä.



Kuvio 34. Koekappaleiden maksimi jännitykset ja teollisuuden arvot



Kuvio 35. Kimmomoduli arvot

8.3 Tuloksiin mahdollisesti vaikuttaneet poikkeamat

Monivaiheisen valmistusprosessin ja koeasetelman toteuttamisessa on monia muuttujia, joiden vaikutusta on arvioitava lopullisten tulosten valossa. Raaka-aine eli viilut olivat hyvälaatuisia, joka osaltaan parantaa saatuja tuloksia. Liimanvalmistuksessa käytetyt hartsi ja kovete olivat olleet pitkään varastossa, mikä on voinut vaikuttaa lopullisen valmiin liiman ominaisuuksiin negatiivisesti. Myös liiman valmistaminen ilman kunnollista aikaisempaa kokemusta ja se, että ensimmäisen liimaerän loputtua valmistettiin toinen samankokoinen liimaerä, on voinut aiheuttaa poikkeamia levyjen liimasaumojen keston. Siten myöskään levyjen liimauksessa käytettyjen liimojen koostumus ei täydellisesti vastannut toisiaan. Viilujen liimoitukseen ja ladontaan käytetty aika ei myöskään ollut vakio, eikä myöskään levitysmäärä johtuen liiman levittämisestä pensselillä ja telalla. Levyjen puristamisvaiheessa ei ollut merkittäviä poikkeamia eri levyjen välillä. Levyjen kosteusprosentti oli alhainen eikä kappaleiden tasaannuttamista standardin mukaisiin olosuhteisiin ollut mahdollisuutta, mikä vaikuttaa tuloksiin positiivisesti.

8.4 Toteutus teollisessa mittakaavassa

Teollisen mittakaavan toteutus on mahdollista, sillä valmistettaessa aaltomaista levyä tarvitaan nykyisen prosessin laitteiston lisäksi esi- ja kuumapuristuksessa aaltomainen

mantteli sekä levyn hiontaan erillinen harjas- tai räpylämallinen hiomakone. Jos valmistettava levy on koesarjojen 5. ja 6. mukainen hiottu ja uudelleen pinnoitettu levy ei tällöin uutta hiomakonetta tarvita. Tällöin levy liikkuu kuumapuristuksen jälkeen nykyiselle hiomakone yksikölle, jossa aaltolevy hiotaan tasaiseksi. Hionnan jälkeen aihiot kierrätetään takaisin ladontaan, jossa ylä- ja alapinnan viilut lisätään. Tämän jälkeen levyjen esi- ja kuumapuristus on mahdollista toteuttaa samalla tavalla kuin normaalisti. Tasaisen levyn valmistuksessa aallon amplitudin ollessa noin 3 mm hionnasta syntyy hukkaa yhteensä kahden viilun paksuuden verran.

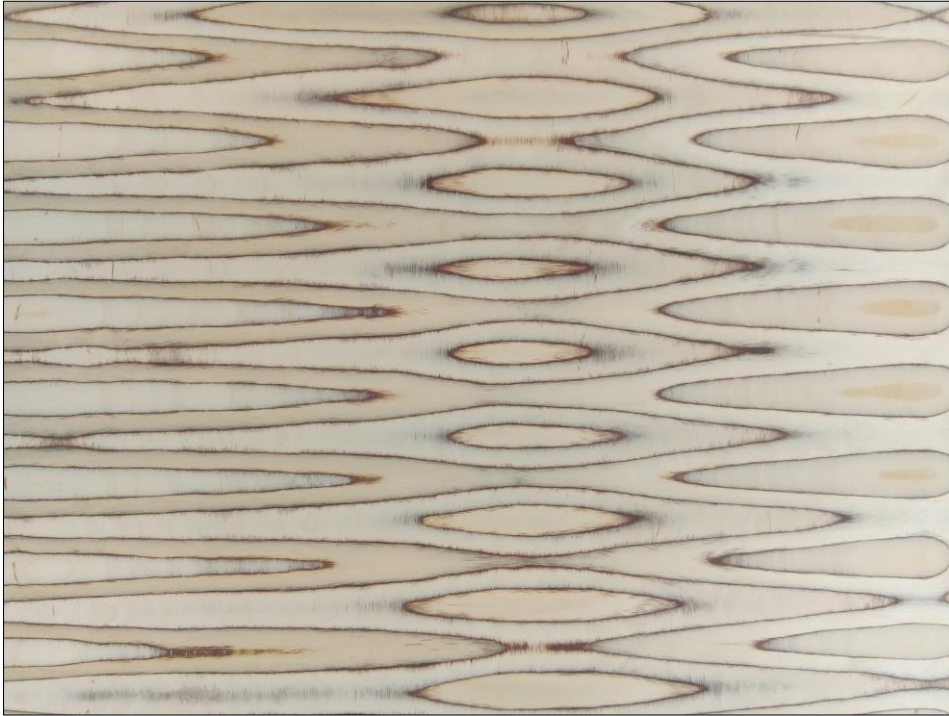
8.5 Dekoratiiviset ja rakenteelliset mahdollisuudet

Aaltomaisen levyn dekoratiivinen käyttö on mahdollista rakennusten sisustamisessa esimerkiksi seinäpaneeleina ja huonekalujen osina. Aaltomaisen levyn etuina verrattuna tasaiseen levyyn on sen pinnan erilainen valonheijastuskyky, joka riippuu katsojan ja valonlähteen sijainnista. Kuviossa 39 on nähtävissä valon heijastumista aaltolevyn pinnasta riippuen valon suunnasta. Valon sijoittamisella on mahdollista luoda aaltomaisesta pinnasta rauhallinen tasaisen oloinen kokonaisuus tai vaihtoehtoisesti voimakaskontrastinen pinta, jossa valon ja varjon rajat vaihtelevat. Levyn pintakäsittelyllä olisi helposti mahdollista luoda useita eri variaatioita samalla pohjaratkaisulla. Aaltomaisen rakenteen etuna on myös äänen heijastumisen ja kaikumisen vähentyminen



Kuvio 36. Aaltolevyn pintaa (Hämäläinen 2018)

Hiotun aaltolevyn pinta on myös hyvin vaihteleva ja eksoottisen näköinen (kuvio 40) varsinkin, jos hiottava levy on useampaan suuntaan käyrä. Hiotun aaltolevyn voisi toteuttaa myös jollakin muulla liimalla kuin tummanpunaisen värisellä fenoliformaldehydi hartsilla (kuvio 41). Tällöin liimasaumat eivät korostuisi liaksi ja huomio keskittyisi enemmän puun omaan väri vaihteluun. Aaltolevystä sahattuilla kappaleilla voi toteuttaa symmetrisesti jatkuvia kuvioiteja, joita voisi hyödyntää seinämateriaaleina.



Kuvio 37. Hiottun aaltolevyn pintakuviointia



Kuvio 38. Vaalealla liimalla (PVAc) liimattu ja tasaiseksi hiottu aaltolevy



Kuvio 39. Aaltomuodon mahdollistamia sommitelmia

Aaltovaneria voisi hyödyntää paikoissa, joissa levyn lujuus suhteessa painoon olisi merkityksellistä. Varsinkin tasaista pinnoitettua aaltovaneria voisi hyödyntää kuljetusväline teollisuudessa. Aaltomuotoista vanerilevyä olisi mahdollista hyödyntää myös kerrosrakenteiden keskilevynä samalla tavalla kuin aaltopahvin valmistuksessa keskimäinen kartonki on aallolla. Toisaalta aallon ansiosta, levystä sahatulla kappaleella on kyljellään ollessa (kuvio 42 oikea puoli) enemmän tukipinta-alaa. Tässä asennossa aaltolevyä voisi hyödyntää kennolevy rakenteissa tai ehkä suuremmissa mittakaavassa ajateltuna myös I-palkkien uuma materiaalina.

9 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli selvittää, onko aaltomuotoon puristetulla vanerilla paremmat taivutuslujuus ominaisuudet kuin tavallisella vanerilla ja tuoko aaltomuoto joitain muita positiivisia ominaisuuksia levyille. Suurin haaste koko projektin onnistumisen kannalta oli toimivan ja yksinkertaisen muotin suunnittelu. Tuotekehitys eteni pienoismallikokeista saatujen tulosten perusteella lopulliseen laboratorio mittakaavan muottiin, jolla varsinaiset levyt kuumapuristettiin. Koelevyjen valmistus noudatti hyvin pitkälti tavallisen vanerin tekemistä kuten myös koekappaleiden sahaaminen ja testaaminen standardin mukaisesti. Poikkeamina olivat suunnatun viilurakenteen levyt sekä tasainen aaltolevy, joiden valmistus oli hyvinkin kokeellista.

Kaikkien levyjen syidensuuntaiset taivutuslujuudet olivat 29% - 83% suuremmat kuin vastaavan paksuisen teollisen vanerin taivutuslujuus. Syiden suuntaa vastaan tehdyissä taivutuslujuus kokeissa sarjan 1. levyt kestivät 31% enemmän ja sarja 4. levyt 53% enemmän kuin vastaavan paksuisen vaneri. Koesarjojen 6., 7. ja 9. levyt kestivät 10% - 83% vähemmän standardilevyyn verrattuna. Taivutuskokeista saatujen tulosten perusteella aaltomuotoinen ja pinnaltaan tasainen aaltomaisen keskirakenteen omaavat vanerit ovat mahdollisia vaihtoehtoja, kun levyiltä vaaditaan korkeampia lujuusominaisuuksia.

Jatkotutkimusehdotukset

Tätä tutkimusta voisi jatkaa selvittämällä kuinka jyrkkää aaltoa olisi mahdollista valmistaa hyödyntämällä kuumapuristinta. Samalla levyn viilujen määrää voisi kasvattaa ja siten selvittää kuinka paksuun levyyn on mahdollista puristaa aaltorakenne. Tutkimista voisi jatkaa myös kasvattamalla koekappaleiden määrää valmistamalla enemmän koelevyjä. Levyjen pintakäsittelyn sekä äänen vaimennuksen ja heijastuksen ominaisuuksien selvittäminenkin olisi eräs mahdollinen tutkimuskohde. Mahdollisesti hyödyllisin jatkotutkimuskohde olisi hiottu aaltovaneri ja sen ominaisuuksien tarkempi tutkiminen varsinkin levyn käyristymisen osalta.

LÄHTEET

Painetut lähteet

Aav, M. & Viljanen, E. (toim.) 2000. Tapio Wirkkala – Ajattelevat kädet. Porvoo: WSOY.

Heikinheimo, O. 1964 Mekaaninen puuteollisuus 1. Joensuu: Pohjois-Karjalan Kirjapaino Oy.

Kontkanen, P., Liira, R., Luosto, K., Nurmi, J., Nurmiainen, R., Ronkainen, A. & Savolainen, S. 2006. Pyramidi 3, Geometria. Vammala: Tammi.

Koponen, H. 1990. Puutuotteiden liimaus. Hämeenlinna: Karisto.

Kurkela, J., Lahtinen, R., Muilu, J. & Mäki-Ketelä, M. 1996. Puurakenteet. Tampere: Rakennustieto Oy.

Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Hämeenlinna: Karisto.

Laakkonen, P. 1996. Puutekniikka, Muoto, rakenne ja tekninen piirustus. Keuruu: Otava.

Metsäteollisuus ry. 2005. Vanerikäsikirja. Lahti: Markprint Oy.

Metsäteollisuus ry, Suomen Metsäyhdistys ry. 1999. Puusta jalosteeksi. Jyväskylä: Kirjapaino Oma Oy.

Palasvirta, O., Hintikka, P. & Valpola, V. 1953. Tekniikan peruskirja. Porvoo: WSOY.

Pennala, E. 1994. Lujuusopin perusteet. Helsinki: Hakapaino.

Tarvainen, I. 1993. Vanerin Käyristyminen. Diplomityö. Helsingin Teknillinen Korkeakoulu.

Varis, R. 2017. Puulevyteollisuus. Porvoo: Kirjakaari Oy.

Elektroniset lähteet

Motonet Oy 2018. Pellin hinta [viitattu 3.4.2018]. Saatavissa:

<http://www.motonet.fi/fi/tuote/9599999/Korjauspelti-08mm-50x100cm>

Puuilo Oy 2018. Lattaraudan hinta [viitattu 3.4.2018]. Saatavissa:

https://www.puuilo.fi/epages/puuilo.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/2014011303/Products/10075280

Raute Oyj 2015. Koulutusmateriaali: Face and core veneer composing & Veneer scarf-jointing and and plywood lay-up [viitattu 6.4.2018]. Saatavissa LAMK Reppu oppimisympäristössä tunnuksella: <http://reppu.lamk.fi/course/view.php?id=12281>

Salmi, M. 2006. Puun rakenne [viitattu 16.3.2018]. Lahden Ammattikorkeakoulu. Saatavissa LAMK Reppu oppimisympäristössä tunnuksella: <http://reppu.lamk.fi/mod/resource/view.php?id=543202>

SFS - EN 310, 1993. Puulevyt, Taivutuslammomoduulin ja taivutuslujuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. Saatavissa lisenssillä <https://online.sfs.fi>

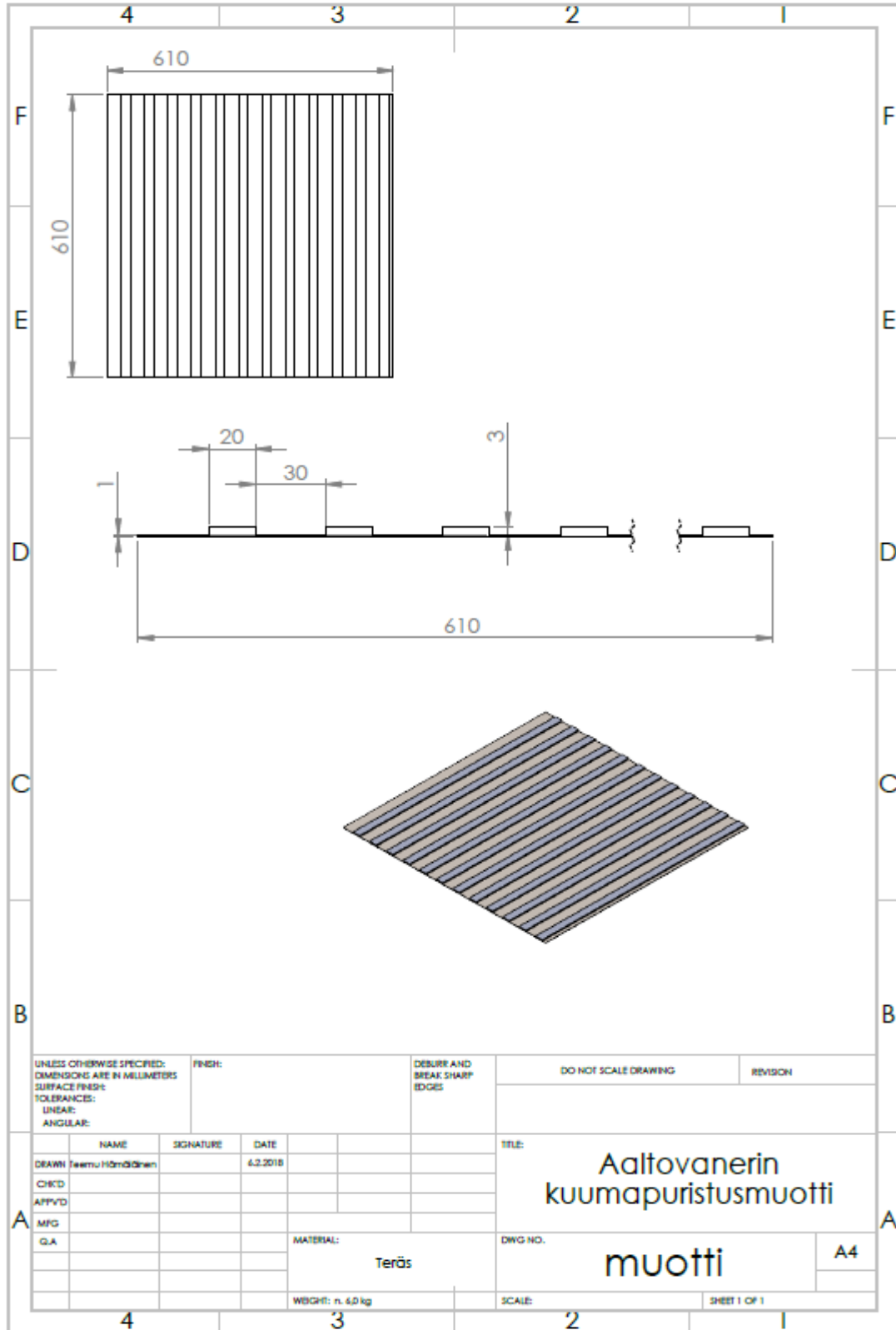
Sonae Arauco. 2017. Innovus® Wave MDF paneeli [viitattu 6.4.2018]. Saatavissa: <https://www.sonaearauco.com/index.php?id=1205>

Suomen Liimapuuyhdistys ry, Puuinfo Oy. 2015. Liimapuukäsikirja Osa 2. [viitattu 28.3.2018]. Saatavissa: https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuukäsikirja%20Osa%202_0.pdf

Studio Corelam. 2018. Studio Corelamin historia. [viitattu 6.4.2018]. Saatavissa: <https://www.studiocorelam.com/pages/about-us>

LIITTEET

Liite 1 Muotin piirustus



Liite 2 Koekappaleet 1.1 - 1.24

Koekappale nro.	max. Voima N	max. Jännitys N/mm ²	Kimmokerroin
1,1	802,10	59,42	5040,15
1,2	727,30	53,88	4861,20
1,3	791,38	58,62	5350,21
1,4	846,67	62,72	5297,93
1,5	808,94	59,92	5253,88
1,6	797,35	59,06	5135,20
1,7	820,59	60,78	5100,73
1,8	815,01	60,37	5259,86
1,9	765,53	56,71	4882,07
1,10	822,08	60,90	5160,79
1,11	901,63	67,45	5539,54
1,12	863,81	63,99	5081,48
1,13	878,13	65,05	5582,44
1,14	785,80	58,21	5071,51
1,15	835,45	61,89	4800,02
1,16	709,41	52,55	5392,32
1,17	796,67	59,01	4881,90
1,18	800,45	59,29	4826,61
1,19	830,89	61,55	4902,17
1,20	647,53	47,97	4832,43
1,21	789,64	58,49	5196,86
1,22	873,42	64,70	5191,23
1,23	616,57	45,67	4683,14
1,24	699,79	51,84	4597,98
Keskiarvo	793,13	58,75	5080,07

Liite 3 Koekappaleet 2.1 - 2.26

Koekappale nro.	max. Voima N	max. Jännitys N/mm ²	Kimmokerroin
2,1	1631,37	120,84	12137,70
2,2	1581,02	117,11	12125,40
2,3	1413,92	104,74	11398,30
2,4	1486,02	110,08	11610,10
2,5	1437,14	106,46	11629,20
2,6	1524,42	112,92	11337,70
2,7	1472,36	109,06	11429,50
2,8	1713,69	126,94	11495,90
2,9	1544,46	114,40	12416,80
2,10	1614,30	119,58	11934,00

2,11	1493,80	110,65	10916,90
2,12	1616,05	119,71	11802,30
2,13	1525,35	112,99	11139,90
2,14	1565,23	115,94	11105,80
2,15	1493,99	111,04	11830,60
2,16	1579,89	117,03	11603,50
2,17	1571,56	116,41	11750,00
2,18	1529,88	113,33	11930,00
2,19	1549,69	114,79	11900,20
2,20	1588,27	117,65	11446,60
2,21	1489,62	110,34	11971,10
2,22	1481,64	109,75	11005,40
2,23	1510,73	111,91	11310,60
2,24	1406,00	104,15	11138,00
2,25	1430,46	105,96	10436,80
2,26	1552,82	115,02	11427,30
Keskiarvo	1531,10	113,42	11547,30

Liite 4 Koekappaleet 3.1 - 3.26

Koekappale nro.	max. Voima N	max. Jännitys N/mm ²	Kimmokerroin
3,1	996,27	73,80	8429,48
3,2	1192,60	88,34	8828,44
3,3	1146,89	84,95	8009,66
3,4	1116,24	82,68	10323,10
3,5	1075,17	79,64	9847,97
3,6	1051,73	77,91	9852,73
3,7	1018,54	75,45	10608,40
3,8	1319,66	97,75	10397,70
3,9	1140,25	84,46	9329,64
3,10	1256,74	93,09	10775,20
3,11	1150,39	85,21	9775,37
3,12	1135,41	84,10	10731,30
3,13	1260,69	93,38	10663,30
3,14	1096,42	81,22	10466,50
3,15	1108,96	82,15	10163,60
3,16	1330,42	98,55	10030,10
3,17	892,81	66,13	8697,73
3,18	741,74	54,94	9123,23
3,19	741,02	54,89	8847,81
3,20	1014,60	75,16	10296,60
3,21	1109,52	82,19	9125,60
3,22	1258,45	93,22	9653,67

3,23	1044,05	77,34	9500,81
3,34	1235,69	91,53	9507,16
3,25	1344,76	99,61	9957,30
3,26	1099,98	81,47	9926,58
Keskiarvo	1110,73	82,28	9725,73

Liite 5 Koekappaleet 4.1 - 4.26

Koekappale nro.	max. Voima N	max. Jännitys N/mm ²	Kimmokerroin
4,1	963,74	71,39	5583,60
4,2	911,67	67,53	5363,05
4,3	891,83	66,06	5592,83
4,4	901,22	66,76	5641,28
4,5	998,08	73,93	6376,23
4,6	872,56	64,63	5303,50
4,7	874,63	64,79	5532,23
4,8	851,50	63,07	5603,53
4,9	927,46	68,70	5779,27
4,10	930,18	68,90	6160,91
4,11	915,18	67,79	6091,11
4,12	914,38	67,73	5753,50
4,13	815,61	60,42	5595,98
4,14	958,41	70,99	5851,85
4,15	977,18	72,38	5437,86
4,16	858,55	63,60	5569,30
4,17	844,62	62,56	5305,15
4,18	940,36	69,66	5357,11
4,19	956,39	70,84	5836,78
4,20	1041,97	77,18	6021,00
4,21	897,07	66,45	5979,16
4,22	1046,53	77,52	5640,96
4,23	901,84	66,80	5816,90
4,24	961,00	71,19	5981,84
4,25	991,76	73,46	6306,85
4,26	941,29	69,73	5678,13
Keskiarvo	926,35	68,62	5736,91

Liite 6 Koekappaleet 5.1 - 5.26

Koekappale nro.	max. Voima N	max. Jännitys N/mm ²	Kimmokerroin
5,1	1718,92	108,56	11980,00
5,2	1745,72	110,26	11408,10

5,3	1524,21	96,27	11387,00
5,4	1750,93	110,59	12340,90
5,6	1709,81	107,99	12192,00
5,7	1689,78	106,72	11650,00
5,8	1664,50	105,13	11736,40
5,9	1646,60	104,00	12028,70
5,10	1796,15	113,44	12005,60
5,11	1356,54	85,68	11721,80
5,12	1822,79	115,12	11836,70
5,13	1353,20	85,47	11447,30
5,14	1793,05	113,25	11509,40
5,14	1483,08	93,67	11592,70
5,15	1470,69	92,89	11520,10
5,16	1670,35	105,50	11924,50
5,17	1675,80	105,84	12566,70
5,18	1631,24	103,03	12057,30
5,19	1554,33	98,17	11782,40
5,20	1547,61	97,74	11869,20
5,21	1539,71	97,24	11769,60
5,22	1630,70	102,99	11859,90
5,23	1403,19	99,05	11451,10
5,24	1591,97	112,37	11418,70
5,25	1470,95	103,83	11810,40
5,26	1559,35	110,07	11280,70
Keskiarvo	1607,74	103,26	11774,90

Liite 7 Koekappaleet 6.1 - 6.26

Koekappale nro.	max. Voima N	max. Jännitys N/mm ²	Kimmokerroin
6,1	520,17	36,72	2886,04
6,2	552,97	39,03	3128,03
6,3	620,03	43,77	3015,06
6,4	541,37	38,21	3123,41
6,5	548,51	38,72	2956,71
6,6	581,14	41,02	3153,76
6,7	594,62	41,97	3050,53
6,8	600,97	42,42	3331,49
6,9	616,52	43,52	3470,00
6,10	571,87	40,37	3088,11
6,11	583,06	41,16	3180,14
6,12	579,53	40,91	3136,18
6,13	570,82	40,29	3131,14
6,14	636,78	44,95	3142,59

6,15	543,17	38,34	2920,39
6,16	566,24	39,97	2982,38
6,17	559,84	39,52	2955,85
6,18	580,01	40,94	3243,79
6,19	553,72	39,09	3154,53
6,20	576,16	40,67	3166,28
6,21	576,97	40,73	3239,52
6,22	531,01	37,48	3137,37
6,23	754,53	47,65	3627,04
6,24	691,99	43,70	3412,57
6,25	585,03	36,95	3230,75
6,26	549,83	34,73	2795,91
Keskiarvo	584,11	40,49	3139,97

Liite 8 Koekappaleet 7.1 - 7.26

Koekappale nro.	max. Voima N	max. Jännitys N/mm ²	Kimmokerroin
7,1	226,48	15,10	855,93
7,2	185,39	12,36	717,97
7,3	205,17	13,68	726,15
7,4	205,84	13,72	779,71
7,5	189,38	12,63	649,74
7,6	207,76	13,85	733,59
7,7	206,66	13,78	715,05
7,8	200,70	13,38	697,65
7,9	163,25	10,88	668,22
7,10	208,44	13,90	806,23
7,11	198,67	13,24	728,47
7,12	250,21	16,68	839,91
7,13	212,26	14,15	959,58
7,14	192,83	12,86	800,93
7,15	239,75	15,98	892,80
7,16	239,47	15,96	861,13
7,17	217,55	14,50	716,12
7,18	210,76	14,05	691,06
7,19	169,64	11,31	593,61
7,20	156,72	10,45	696,93
7,21	179,63	11,98	660,46
7,22	202,51	13,50	682,23
7,23	180,53	12,04	671,71
7,24	174,43	11,63	646,60

7,25	193,69	12,91	591,92
7,26	190,05	12,67	602,51
Keskiarvo	200,30	13,35	730,24

Liite 9 Koekappaleet 8.1 - 8.26

Koekappale nro.	max. Voima N	max. Jännitys N/mm ²	Kimmokerroin
8,1	1174,35	74,17	10284,50
8,2	1351,18	85,34	13030,80
8,3	1753,87	110,77	14412,00
8,4	1321,05	83,43	13214,90
8,5	1215,74	76,78	10248,00
8,6	1336,11	84,39	11170,80
8,7	1282,96	81,03	10809,30
8,8	1663,67	105,07	13739,80
8,9	1402,57	88,58	13172,50
8,10	1766,89	111,59	14755,60
8,11	1459,19	92,16	12258,90
8,12	1700,04	107,32	14291,50
8,13	1701,05	107,44	14951,80
8,14	1561,67	98,63	14113,00
8,15	1516,15	95,76	13833,90
8,16	1649,81	104,20	14899,60
8,17	1654,01	104,46	14064,70
8,18	1747,26	110,35	13927,80
8,19	1684,63	106,40	13915,30
8,20	1975,97	124,80	13644,10
8,21	1722,86	108,81	13296,40
8,22	1711,62	108,10	14144,80
8,23	1485,09	93,80	12130,50
8,24	1417,37	89,52	10602,80
8,25	1425,43	90,03	10370,80
8,26	1760,59	111,20	14201,90
Keskiarvo	1555,43	98,24	13057,20

Liite 10 Koekappaleet 9.1 - 9.26

Koekappale nro.	max. Voima N	max. Jännitys N/mm ²	Kimmokerroin
9,1	129,80	8,20	401,29
9,2	135,87	8,58	322,82
9,3	112,06	7,08	462,39
9,4	125,44	7,92	-

9,5	128,75	8,13	-
9,6	135,12	8,53	454,87
9,7	125,76	7,94	-
9,8	109,50	6,92	516,04
9,9	125,42	7,92	-
9,10	89,25	5,64	-
9,11	123,25	7,78	-
9,12	75,23	4,75	-
9,13	151,84	9,59	322,22
9,14	72,21	4,56	-
9,15	144,67	9,14	462,84
9,16	132,96	8,40	483,69
9,17	117,49	7,42	509,42
9,18	134,93	8,52	451,52
9,19	81,73	5,16	-
9,20	128,97	8,15	395,89
9,21	108,37	6,84	550,10
9,22	137,87	8,71	435,60
9,23	112,72	8,89	729,36
9,24	111,77	8,82	-
9,25	145,82	11,50	436,75
9,26	68,11	5,37	-
Keskiarvo	117,88	7,71	462,32

Liite 11 Koekappaleet 10.1 - 10.26

Koekappale nro.	max. Voima N	max. Jännitys N/mm2	Kimmokerroin
10,1	1632,02	103,08	10712,40
10,2	1856,95	117,28	11007,90
10,3	1775,93	112,16	10140,90
10,4	1827,37	115,41	9983,81
10,5	2133,23	134,73	11066,80
10,6	1804,73	113,98	10710,80
10,7	1814,13	114,58	11751,00
10,8	1886,81	119,17	11913,60
10,9	1715,74	108,36	11684,80
10,10	1847,87	116,71	10795,60
10,11	1931,30	121,98	10692,20
10,12	1849,81	116,83	10680,30
10,13	1893,52	119,59	10473,40
10,14	1591,65	100,53	10336,80
10,15	1864,21	117,74	10525,80
10,16	1935,21	122,22	11676,10

10,17	1912,53	120,79	10834,30
10,18	1863,27	117,68	10461,80
10,19	1811,39	114,40	11233,30
10,20	1780,40	112,45	11052,30
10,21	2210,57	139,62	10779,20
10,22	1618,83	102,24	11325,00
10,23	1982,44	125,21	11025,80
10,24	1660,35	104,86	11517,50
10,25	1946,12	122,91	10836,60
10,26	1870,39	118,13	11051,90
Keskiarvo	1846,80	116,60	10933,50