LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Lahti University of Applied Sciences

KUUMAMUOVAUSTEKNOLOGIALLA VALMISTETTU I-PALKKI

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Puutekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyö
Kevät 2014
Lasse Tapaninen
lasse.tapa@gmail.com

Lahden ammattikorkeakoulu
Puutekniikan koulutusohjelma

TAPANINEN, LASSE: Kuumamuovausteknologialla valmistettu I-palkki

Puutekniikan opinnäytetyö, 48 sivua, 5 liitesivua

Kevät 2014

TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin kuumamuovausteknologialla valmistetun massiivipuisen I-palkkirakenteen valmistusta. Tutkimus jaettiin kahteen osaan. Ensimmäisen osan tavoitteena oli valmistaa massiivipuinen palkkiaihio onnistuneesti kuumamuovaamalla. Päätavoite oli prosessin aikana kuivata aihio tuorekosteasta puusepänkuivaksi muutamassa tunnissa sekä samalla profiloida palkkiaihio haluttuun muotoon. Toisen osan tarkoituksena oli valmistaa pidempiä I-palkkeja ja testata niiden lujuutta kolmipistetaivutuksella. Tuloksia verrattiin kuitulevyuumaisten I-palkkien vastaaviin arvoihin. Lujuustestien tarkoituksena oli selvittää, olisiko palkeilla potentiaalia rakennusteollisuuteen.

Työn teoriaosuudessa kerrotaan I-palkkien käytöstä rakentamisessa, puun kuivauksesta ja kuivausmenetelmistä sekä hieman Solidiwood-3D kuumamuovausteknologiasta ja sen kehittäneestä yrityksestä, Ilvolankoski Oy:stä.

Palkkien raaka-aineena käytettiin koivuviilun sorvauksesta jääneitä tukin sydänosia eli purilaita. Raaka-aine saatiin Koskisen Oy:n koivuvaneritehtaalta Kärkölästä. Tutkimus suoritettiin Lahden ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratoriossa. Kuumamuovaukset suoritettiin käyttämällä laboratorion kolmea hydraulitoimista lämpöpuristinta.

Suurimmaksi haasteeksi tutkimuksessa osoittautui laitteisto, jota ei ollut tarkoitettu vastaavanlaiseen käyttöön. Ensimmäisessä osiossa palkkiaihiot saatiin kuivatuksi tavoitekosteuteen tietynlaisten metallisten muottien sekä lisälämmityslaitteen avulla. Palkkien lujuustestauksissa saatiin lähinnä alustavaa tietoa niiden sopivuudesta rakentamiseen.

Asiasanat: I-palkki, kuumamuovaus, kuivaus, purilas, taivutuslujuus

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Wood Technology

TAPANINEN, LASSE: I-beam joist made by hot-forming technology

Bachelor's Thesis in wood technology, 48 pages, 5 pages of appendices

Spring 2014

ABSTRACT

This thesis deals with I-beam structure made by hot-forming technology. The study was divided into two parts. The purpose of the first part was to successfully manufacture massive wooden I-beam joist by hot forming technology. The main goal was to dry the beam from fresh sawed to carpentry dry just in few hours and profile the blank into specific form at the same time. The purpose of the second part was to manufacture longer beams and test the bending strength of the beams by using three-point bending method. The results were compared to similar results of the I-beams made with fibreboard web. The purpose of the strength tests was to get information if the beams had potential for construction industry.

The theory part of the work describes I-beam joists used in construction, theory of wood drying and different drying processes and slightly about Solidiwood-3D hot forming technology together with the company who developed it, Ilvolankoski Oy.

The core elements of birch logs, which are residue pieces from birch veneer manufacture process, were used as a raw material in the project. Raw materials were obtained from Koskisen Oy`s birch plywood factory in Kärkölä. The study was carried out in the wood technology laboratory in Lahti University of Applied Scienses. The hot forming processes were performed using three hydraulic heat presses in the laboratory.

The major challenge in the project turned out to be the machinery, which was not intended for that kind of use. The beam blanks in the first part of the project were successfully dried in the aimed moisture content by using spesific metal molds and additional heating machine. The bending strength testes gave only preliminary information if they were suitable for construction.

Key words: I-beam, hot-forming, drying, the core element of log, bending strength

SISÄLLYS

1 JOHDANTO 1

2 PUISET I-PALKIT RAKENNUSTEOLLISUUDESSA 3

2.1 Käyttökohteet ja markkinat 4

2.2 Historiaa 5

2.3 Ominaisuudet 6

2.4 Valmistus 7

2.5 Valmistajia 7

2.5.1 Georgia-Pacific 8

2.5.2 PRT-Wood Oy 9

2.5.3 Koskisen Oy 9

2.5.4 Metsä-Wood 10

3 TEORIAA PUUN KUIVAUKSESTA JA KUIVAUSMENETELMIÄ 12

3.1 Puun kuivausteoriat 13

3.1.1 Puun kuivuminen 13

3.1.2 Puun kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä 13

3.2 Kuivausmenetelmät 14

3.2.1 Lautatarhakuivaus 14

3.2.2 Kamarikuivaamo 15

3.2.3 Jatkuvatoiminen- eli kanavakuivaamo 16

3.2.4 Kuumakuivaus 17

3.2.5 Kuumailmakuivaus 19

3.2.6 Alipainekuivaus 19

3.2.7 Suurtaajuusalipainekuivaus 20

3.2.8 Lauhdutinkuivaus 20

3.2.9 Puristuskuivaus 20

3.2.10 Lämpökäsittely 21

3.3 Kuivausviat 22

3.3.1 Pintakovuus ja halkeamat 22

3.3.2 Muodomuutosviat 22

3.3.3 Pihkavuodot ja väriviat 23

4 ILVOLANKOSKI OY JA SOLIDIWOOD-TEKNOLOGIA 24

5 TUTKIMUSOSUUS 25

5.1 Tutkimuksen tavoitteet ja valmistelu 25
5.2 Ensimmäinen osio 26
5.2.1 Laitteisto 26
5.2.2 Koekappaleiden valmistus 28
5.2.3 Muottien ja lämpöelementtien valmistus 30
5.2.4 Testit yksisylinterisellä lämpöpuristimella 31
5.2.5 Testit nelisylinterisellä puristimella 34
5.3 Toinen tutkimusosio 40
5.3.1 Palkkien valmistus 40
5.3.2 Testaus 42
5.3.3 Tulokset 43
6 YHTEENVETO 47
6.1 Työn onnistuminen ja kehitysehdotukset 47
LÄHTEET 49
LIITTEET 52

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan kuumamuovaamalla valmistetun massiivipuisen I-palkin valmistusta. Puun kuumamuovauksella tarkoitetaan puun puristamista korkeassa paineessa ja lämpötilassa niin, että puun ominaisuudet muuttuvat. Kuumamuovauksen keskeisenä tarkoituksena on kasvattaa puun tiheyttä ja lujuutta, kuivata puu prosessin aikana sekä kuolettaa puun sisäiset jännitykset. Lisäksi kuumamuovauksen yhteydessä voidaan suorittaa puukappaleen profilointi, mitallistaminen ja liimasaumojen puristukset, mikä poistaa monta työvaihetta kappaleen työstössä ja säästää puutavaraa. Kuumamuovauksessa yhdistyvät siis puun kuivaus, tuotteen profilointi sekä korkeita lämpötiloja käytettäessä myös lämpökäsittely.

Yhtenä olennaisena tavoitteena oli saada moniosainen liimattu puutuote kuivatuksi prosessin yhteydessä tuorekosteasta puusepän- tai jopa absoluuttisen kuivaksi paljon normaalia kuivausta lyhyemmässä ajassa. Sen lisäksi tutkittiin kuumamuovauksella valmistettujen palkkien taivutuslujuutta. Lujuustestien tarkoituksena oli saada suuntaa antavaa tietoa, voitaisiinko kuumamuovattua I-palkkia käyttää puurakentamisessa erimerkiksi korvaamaan nykyään markkinoilla olevia palkkiratkaisuja.

Tutkimusosuus jaettiin kahteen osioon. Ensimmäisessä osiossa tavoitteena oli kuumapuristaa tuorekosteista vaneripurilaista sahatuista saheista koottu palkkiaihio kuivaksi muutaman tunnin aikana sekä puristuksen yhteydessä profiloida palkin sivut haluttuun muotoon. Raaka-aineeksi hankittiin koivuvanerin tuotannosta yli jääneitä purilaita. Näin saatiin samalla hyödyllinen käyttökohde vaneripurilaille, mikä toi lisäarvoa tutkimukselle. Toisena tavoitteena oli tutkia kuumamuovaamalla valmistettujen palkkien lujuutta. Tätä varten purilaista valmistettiin pidempiä palkkeja, joiden taivutuslujuutta testattiin kolmipistetaivutuksella. Tuloksia verrattiin Suomessa rakentamisessa käytettävien kuitulevyuumaisten I-palkkien vastaaviin arvoihin.

Kirjallisessa osuudessa kerrotaan I-palkkien käytöstä rakentamisessa ja erilaisista markkinoilla olevista I-palkeista, tutustutaan puun kuivaukseen ja kuivausmenetelmiin sekä esitellään puun kuumamuovausta jalostanut

Ilvolankoski Oy ja yrityksen patentoima Solidiwood – teknologia. Aineistoa tutkimustyöhön hankittiin internetistä sekä puurakentamiseen ja puun kuivaukseen keskittyvästä kirjallisuudesta.

Tutkimusosuus suoritettiin Lahden ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratoriossa. Raaka-aineena käytettiin Koskisen Oy:ltä saatuja tuoreita koivuisia vaneripurilaita. Palkkien puristamisessa käytettiin kolmea hydraulitoimista lämpöpuristinta. Palkkiaihioita valmistettaessa työvälineinä käytettiin lisäksi sahaa, tasohöylää ja alajyrsintä. Puristuksen aikana profilointiin ja lämmönjohtamiseen käytetyt metalliset muotit valmistettiin Lahden ammattikorkeakoulun konetekniikan laboratoriossa.

2 PUISET I-PALKIT RAKENNUSTEOLLISUUDESSA

I-palkki eli ohutuumapalkki on nimensä mukaisesti I-kirjaimen muotoinen kevytpalkkikannate, joka koostuu paarteista ja niiden väliin liimattavasta ohuesta levyuumasta (KUVIO 1). Nykyään paarteet valmistetaan enimmäkseen kertopuusta tai sormijatketusta sahatavarasta ja uuma OSB-levystä (Oriented Strand Board). Aiemmin paarteina käytettiin pelkästään sahatavaraa ja uumalevynä vaneria. Uumalevynä käytetään jossain määrin myös kuitulevyä. (American Wood Council 2014, 1.)

KUVIO 1. I-palkin rakenne (American Wood Counsil 2014)

KUVIO 2. I-Palkkeja kertopuu-, ja sahatavarapaarteilla (Georgia-Pacific 2014a)

2.1 Käyttökohteet ja markkinat

I-palkkeja käytetään jäykkyyttä, hyvää lämmöneristyskykyä, mittatarkkuutta ja taloudellisuutta vaativissa rakenteissa. Niiden pääkäyttökohde on rakennusten ala- ja välipohjissa kantavina palkkeina, mutta niitä käytetään pituuden ja hyvän kantavuuden takia myös kattopalkkeina. Puisia I-palkkeja käytetään enimmäkseen asuin- ja toimistorakentamisessa. (Puuinfo 2013; American Wood Council 2014, 1.)

I-palkit ovat yksi nopeiten yleistyvistä insinööripuutuotteista. I-palkkien päämarkkina-aluetta ovat Yhdysvallat ja Kanada, mutta ne ovat jatkuvasti yleistyneet myös Euroopassa. Suurin osa Euroopassa käytetyistä I-palkeista käytetään Isossa-Britanniassa. Vielä 2000-luvun paikkeilla 95 % kaikista maailman I-palkeista tuotettiin ja käytettiin Pohjois-Amerikassa. (Rämö, Järvinen, Toivonen, Enroth 2003, 21–22.)

KUVIO 3. I-palkkeja välipohjassa (American Wood Council 2014)

KUVIO 4. I-palkkeja kattopalkistona (American Wood Council 2014)

2.2 Historiaa

Yhdysvaltalainen Trus Joist Corporation kehitti puisen I-palkin vuonna 1969 korvaamaan sahatavarapalkin rakennusten kantavana ala- ja välipohjapalkkina. I-palkkien kehityksen inspiraationa toimivat talonomistajat, jotka halusivat suuria avoimia ratkaisuja talojensa pohjapiirustuksiin. Tämä taas vaati erityisen pitkiä palkkeja sekä palkiston kantovälejä. I-palkit tulivat halvemmaksi etenkin jos tarvittiin pitkiä, yli 6 metrisiä palkkeja. Niillä oli myös paremmat kantavuusominaisuudet kuin vastaavilla sahatavarapalkeilla ja ne olivat suoria, kevyitä ja helpompia asentaa. Alkuaikoina I-palkit olivat melko kalliita, mutta halpenivat 1990-luvulla, kun insinööripuutuotteiden markkinahinnat tasaantuivat. (Fisette 2000.)

I-palkit valmistettiin pelkästään vaneriuumasta ja massiivipuupaarteista vuoteen 1977 asti. Sen jälkeen paarteiden materiaalina alettiin käyttää kertopuuta ja uumalevyna OSB:tä. Kertopuun käyttö paarteissa mahdollisti erittäin pitkien I-palkkien valmistamisen ja sen lujuusominaisuudet olivat paremmat kuin massiivipuulla. OSB-levy taas oli halvempaa ja helpommin saatavaa kuin vaneri. Sillä on lisäksi vaneria paremmat leikkauslujuusominaisuudet, sillä OSB-levyn

puulastut lukittuivat toisiinsa levyrakenteessa. Nykyään Pohjois-Amerikassa I-palkkien uumat valmistetaan lähes pelkästään OSB:stä ja enää 15–20 % siellä myytävistä palkeista valmistetaan käyttäen massiivipuisia paarteita. (Fisette 2000.)

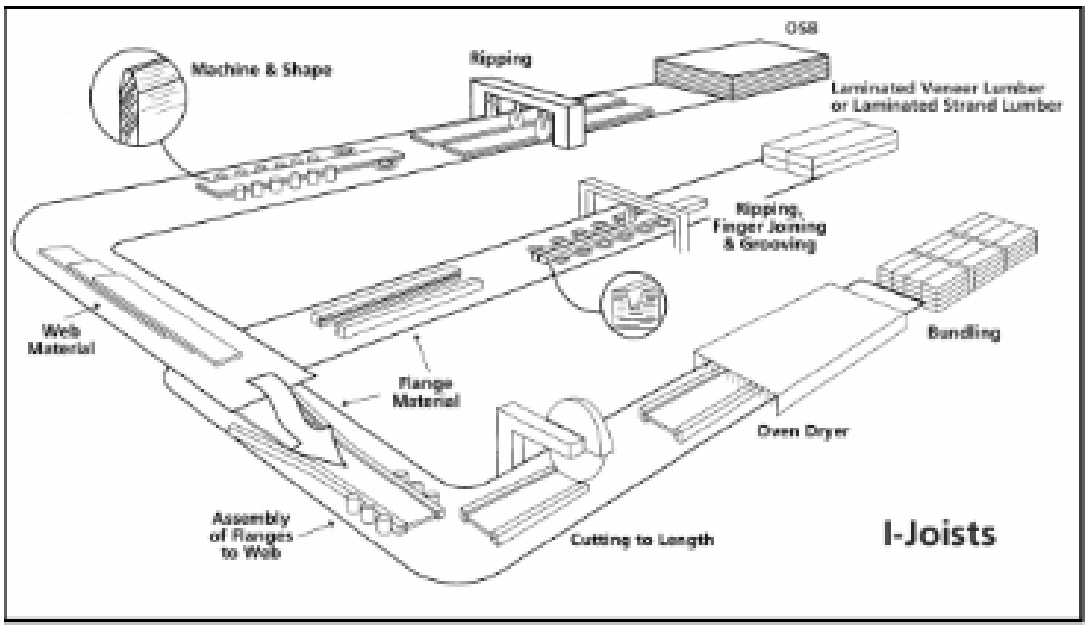
2.3 Ominaisuudet

I-palkeilla on monia etuja perinteisiin sahatavarapalkkeihin verrattuna. Niillä on parempi kantavuus palkin painoon nähden ja ne ovat jäykempiä, kevyempiä käsitellä ja helpompia asentaa. Lisäksi niiden kosteuseläminen on vähäistä ja mittapysyvyys erittäin hyvä. Jäykkyyden takia palkeista voidaan valmistaa hyvin pitkiä, ja pohjapalkistoissa voidaan käyttää pidempiä kantovälejä kuin sahatavaralla. Lisäksi niiden valmistuksessa syntyy vähemmän jätettä. I-palkkien etuja ovat myös helppo työstettävyys. Uumalevyyn voi tehdä tavallisilla puusepän työkaluilla reikiä esimerkiksi sähkö- ja LVI-vetoja varten. Tällöin täytyy muistaa noudattaa suunnittelijan ohjeita reikien määrän ja etäisyyksien kanssa, jotta kantavuusominaisuudet eivät vaarantuisi. Paarteisiin ei saa tehdä mitään työstöjä, sillä se heikentäisi merkittävästi palkin lujuutta. I-palkin hinta on hyvin kilpailukykyinen, koska pienemmällä materiaalimäärällä saavutetaan sama kantavuus sahatavaraan ja liimapuuhun verrattuna. (Fisette 2000; Puuinfo 2013.)

I-palkit hyödyntävät lujuusominaisuudet siellä missä niitä eniten tarvitaan, eli ylä- ja alaosassa. Kun palkin päälle kohistuu paine, silloin yläosaan kohdistuu puristusjännitys ja alaosaan vetojännitys. Palkin keskellä eli uuman kohdalla on niin kutsuttu neutraaliakseli eli jännitteetön kohta. Toisin sanoen I-palkin ylä- ja alapaarteet ottavat jännitteet vastaan, eikä puumateriaalia tarvitse tuhlata palkin keskelle. I-palkin kestävyys ja jäykkyys määräytyvät paarteissa käytettävän puulajin, lujuusluokan ja palkin koon mukaan. Jos esimerkiksi paarteiden leveys tuplataan, palkki kantaa kaksinkertaisen kuorman ja taipuma vähenee puolella. Jos taas palkin korkeus tuplataan, palkki kantaa tällöin nelinkertaisen kuorman ja taipuma vähenee 1/8 osaan alkuperäisestä. (Fisette 2000.)

2.4 Valmistus

I-palkin valmistus on hyvin yksinkertainen prosessi (KUVIO 5). Valmistus alkaa sahaamalla uumalevyt oikean kokoisiksi suorakulmion muotoon ja sormijatkamalla sekä urittamalla paarrepuut. Levyn reunat viistetään, jotta ne sopivat paarteisiin jyrsittyyn uraan. Levyn ja paarteen liitoksen täytyy olla oikein muotoiltu tiettyyn kaltevuuteen, jotta liitoksesta tulee tiukka. Sen jälkeen levyt liimataan paarteisiin ja katkotaan oikeaan mittaan. Lopuksi palkit laitetaan useimmiten uunin, jotta liimasauma kuivuisi nopeammin. Valmistuksen jälkeen suoritetaan tarvittavat testit, jotta palkit vastaisivat lujuusvaatimuksia. (American Wood Council 2014, 2.)



KUVIO 5. Tyypillinen I-palkin valmistuslinja (American Wood Counsil 2014)

2.5 Valmistajia

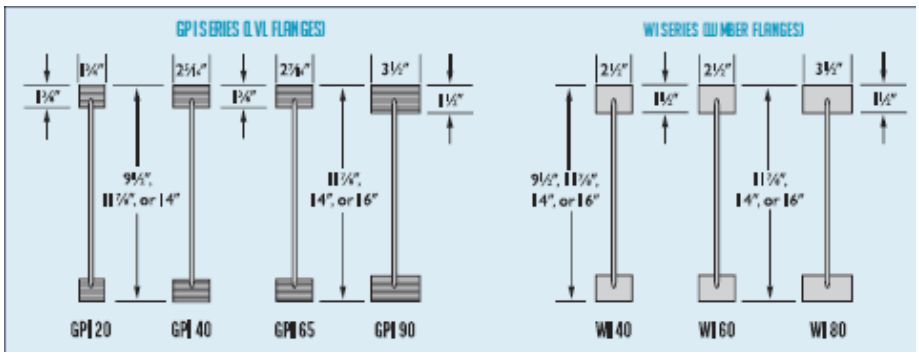
I-palkkien markkinat maailmalla keskittyvät lähinnä Pohjois-Amerikkaan. Suurimmat valmistajat löytyvätkin Yhdysvalloista ja Kanadasta. Euroopassa markkinat keskittyvät Iso-Britanniaan. Suomessa I-palkkiteollisuus on hyvin

pienimuotoista ulkomaihin verrattuna. Muutamia valmistajia kotimaasta kuitenkin löytyy.

2.5.1 Georgia-Pacific

Georgia-Pacific on Yhdysvaltalainen, yksi maailman suurimmista metsäteollisuusyrityksistä. Se on perustettu vuonna 1927 Augustassa Georgian osavaltiossa. Yhtiön liiketoimintaan kuuluvat paperiteollisuus, rakentaminen, selluloosa, kemikaalit, pahvipakkaustuotteet sekä erilaiset hygieniatuotteet. Yhtiö työllistää maailmanlaajuisesti n. 35 000 ihmistä ja sillä on 200 tuotantolaitosta ympäri maailmaa. (Georgia-Pacific 2014b.)

Gerorgia-Pacific valmistaa Wood I Beam™-tuotemerkillä I-palkkeja, jotka rakentuvat OSB-levystä ja sahatavara- tai kertopuupaarteista. Palkkeja valmistetaan tavallisesti 6 metrin pituisesta 14,6 metriin, mutta erikoistilauksesta niitä saa aina 18 metriin asti. Palkkien korkeudet vaihtelevat 24cm:n ja 40cm:n välillä (KUVIO 6). (Georgia-Pacific 2014a.)



KUVIO 6. I-palkkien profiileja, vasemmalla kertopuupaarteilla ja oikealla sahatavarapaarteilla (Georgia Pacific 2014a)

2.5.2 PRT-Wood Oy

PRT-Wood Oy valmistaa PRT-lami - tuotemerkillä I-palkkia (KUVIO 7), joka koostuu liimaamalla yhdistetyistä puupaarteista ja kuitulevyuumasta. Sitä käytetään palkkina tai pilarina alapohja-, yläpohja- tai välipohjapalkistoissa sekä ulkoseinärungoissa. Yksi erikoiskäyttökohde on myös NR-kattoristikoiden alapaarteena. I-palkin paarteet valmistetaan lujuuslajitellusta ja erikoiskuivatusta sormijatketusta kuusesta ja ne ovat poikkileikkaukseltaan joko 45x45mm tai 45x70mm. Uumalevy on kovaa kuitulevyä, jonka nimellispaksuus on 6,0mm. Levy liimataan paarteisiin säänkestävällä liimalla. Levyn reuna jyristään paarteen uran muotoon ja levy jatketaan usein 40mm:n viistejatkoksella. PRT-lami-palkit toimitetaan määrämittaisena asiakkaalle aina 12m:n pituuteen saakka. (PRT-Wood Oy 2013a; PRT-Wood Oy 2013b.)

KUVIO 7. PRT-lami I-palkki (PRT-Wood Oy 2013b)

2.5.3 Koskisen Oy

Koskisen Oy valmisti Atlas-tuotemerkillä I-palkkeja (KUVIO 8) jonkin aikaa, mutta lopetti valmistuksen kannattamattomana. Vanerin käyttö uumassa tuli liian kalliiksi verrattuna esimerkiksi kuitulevyuumaisiin palkkeihin, eikä kestänyt hintakilpailua. Palkkeja ehdittiin myydä arviolta 200:n rakennuskohteeseen Suomessa. Atlas-palkit rakentuvat liimaamalla yhdistetyistä sahatavarapaarteista sekä vaneriuumasta. Paarteet ovat poikkileikkaukseltaan 42x98mm lujuuslajiteltua

kuusta tai mäntyä ja uuma 12mm paksua vaneria. Yli 6 metrin palkeissa paarteet sormijatkettiin ja palkkeja pystyttiin valmistamaan aina 12 metriin asti. Palkkien korkeudet vaihtelevat 198-519mm välillä. Liimana palkeissa käytetään kosteudenkestävää PUR-liimaa. (Koskisen 2013; Mourujärvi 2014.)

KUVIO 8. Koskisen I-palkkeja välipohjarakenteena (Koskisen 2013)

2.5.4 Metsä-Wood

Metsä-Group – metsäteollisuuskonserniin kuuluva Metsä Wood valmistaa Finnjoist – tuotemerkillä I-palkkeja Britannian markkinoille. Palkkeja valmistetaan King`s Lynnin satamakaupungissa sijaitsevassa tehtaassa. Palkin uuma koostuu 10 mm paksusta OSB-levystä ja paarteet kertopuusta. Palkkeja valmistetaan paarteiden koon mukaan 4 eri tyyppiä ja niiden korkeudet ovat 200, 220, 240, 300, 360 tai 400 mm. Palkkien pääkäyttökohteet ovat rakennusten ala- ja välipohjissa kantavina rakenteina (KUVIO 9). (Metsä-Wood 2014.)

KUVIO 9. Metsä-Woodin I-palkkeja läpivienneillä (Metsä Wood 2014)

3 TEORIAA PUUN KUIVAUKSESTA JA KUIVAUSMENETELMIÄ

Puu on aina kuivattava ennen käyttöönottoa käyttötarkoituksen mukaiseen kosteuteen. Kuivauksen tarkoitus on puutavaran säilyvyyden ja puun työstöominaisuuksien parantaminen. Lisäksi tuore puu on paljon painavampaa ja hankalampaa käsitellä kuin kuivattu puu. Kuivattu puu säilyy varastoitaessa, sillä esimerkiksi sinistäjä, lahottaja ja homesienet eivät kasva puussa, joka on kuivattu alle 20 %:n kosteuteen. (Sipi 2002, 113.) Tuoreelle puulle ei myöskään onnistuisi esimerkiksi liimaus ja pintakäsittely, höyläys- ja hiontajälki olisi huonoa, liitokset eivät kestäisi puun kutistumista jne. Siksi puu on kuivattava ennen lopullisia työstöjä ja koneistuksia käyttöolosuhteita vastaavaan tasapainokosteuteen.

Puun kuivuusasteet jaotellaan karkeasti käyttöluokan mukaan seuraavasti:

- ulkokuiva 18–24 %
- höyläyskuiva 16–18 %
- rakennuspuusepänkuiva 10–12%
- huonekalukuiva 6-12 %. (Voutilainen, Jussila, Kuikka, Mononen & Vuorenmaa 1993, 10–11.)

Puun kuivaus voidaan suorittaa perinteisenä lautatarhakuivauksena luonnon lämpötilojen ja tuulen avulla tai keinokuivauksena. Nykyään käytetään lähes yksinomaan keinokuivausta, joista yleisin menetelmä on ns. lämminilmakuivaus. Siinä käytetään alle 100 °C:n lämpötiloja. Kun käytetään yli 100 °C:n lämpötiloja, puhutaan kuumakuivauksesta. Lämminilmakuivaamot jaetaan rakenteensa perusteella kertatäyttöisiin kamarikuivaamoihin ja jatkuvatoimisiin kanavakuivaamoihin. Lisäksi nykyään on käytössä myös muita kuivausmenetelmiä joista kerrotaan tuonnempana. (Sipi 2002, 124.)

3.1 Puun kuivausteoriat

3.1.1 Puun kuivuminen

Puu on hygroskooppinen materiaali, eli sen kosteus asettuu tasapainoon ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden kanssa. Tasaantumiseen tarvittava aika riippuu puun alkukosteudesta, ilman kosteudesta sekä lämpötilasta. Puun kuivuessa tasapainokosteus on aina suurempi kuin puun imiessä kosteutta. Puun kosteus ilmoitetaan sen sisältämän veden määrällä prosenteissa kuiva-aineen painosta. Puun kuivuessa soluista poistuu ensin vapaa vesi, kunnes saavutetaan ns. puun syiden kyllästymispiste (PSKP). Tällöin jäljellä on ainoastaan soluseinämiin sitoutunut vesi, ja puun kosteusprosentti on puulajista ja lämpötilasta riippuen noin 28–32 %. PSKP:n yläpuolella veden poistuminen soluonteloista tapahtuu kapillaarisesti, ja puun kuivuminen on melko nopeaa. PSKP:n alapuolella puolestaan vesi poistuu soluseinämistä diffuusion vaikutuksesta, ja kuivuminen hidastuu merkittävästi. Puun muodonmuutokset, eli kuivattaessa puun kutistuminen ja kostuessa puun turpoaminen, tapahtuvat aina kosteuden ollessa PSKP:n alapuolella. (Sipi 2002, 114–117.)

3.1.2 Puun kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä

Kuivaukseen kestoon ja kuivaustulokseen vaikuttavia asioita ovat ilman lämpötila, ilman nopeus, ilman suhteellinen kosteus, puun tiheys, alkukosteus sekä puutavaran mitat.

Mitä lämpimämpää ilma on, sitä suuremman määrän vettä se pystyy varastoimaan ja kuivaaminen nopeutuu. Ilman nopeus vaikuttaa kosteuden siirtymiseen pois puun pinnalta ja lämmön siirtymiseen puuhun. Sillä on suuri merkitys erityisesti PSKP:n yläpuolella, kun kuivuminen on nopeaa. Lisäksi se vaikuttaa kuivaamon energian kulutukseen. (Sipi 2002, 119–120.)

Raskaampi ja tiheämpi puuaines kuivuu hitaammin kuin kevyempi, sillä soluseinät ovat paksumpia. Puutavaran mitoista eniten vaikutusta kuivumiseen on paksuudella. Esimerkiksi 50 mm paksun sahatavaran kuivausaika on kolminkertainen verrattuna 25 mm paksuun. Puun syiden suunnassa taas kosteus

siirtyy hyvin eli puutavaran pituudella ei ole niin suurta merkitystä. (Sipi 2002, 121-122.)

Suurin ongelma puun kuivaamisessa on se, miten nopeasti vesi saadaan siirtymään puun sisäosista pinnalle. Haihtumisnopeus puun pinnalta ei saisi olla suurempaa kuin veden siirtyminen sisältä pinnalle, sillä silloin vaarana on pinnan kuivuminen ja kuivausvikojen syntyminen. Tätä voidaan ehkäistä pitämällä puun lämpötila korkeana ja ilman suhteellinen kosteus suurena. Puun pinnan liiallista kuivumista ehkäistään myös alkukostutuksella. (Sipi 2002, 118–119.)

3.2 Kuivausmenetelmät

3.2.1 Lautatarhakuivaus

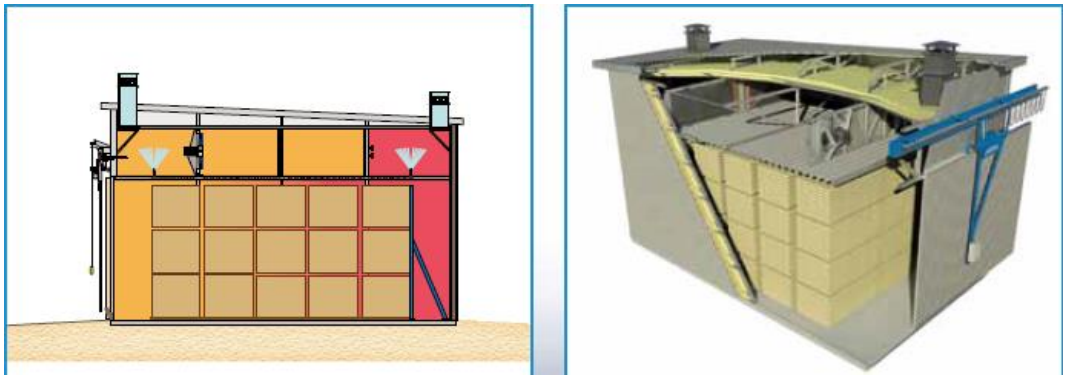
Tapuli- eli lautatarhakuivaus on vanhin tunnettu sahatavaran kuivausmuoto ja oli 1960-luvulle asti yleisin kuivaustapa Suomessa. Siinä tuore sahatavara pinotaan ristikkäin tuuliselle paikalle suorakaiteen muotoiseen katettuun tapuliin. Puutavara kuivuu tuulen ja auringon vaikutuksesta yleensä noin 15 -25 %:n loppukosteuteen. Vaihteluväli johtuu ilman suhteellisesta kosteudesta. Puu kuivuu hyvin vain keväällä tai kesällä, joten puun kuivuminen kestää aloitusajankohdasta ja olosuhteista riippuen 1-9 kk. Nykyään sitä käyttävät lähinnä kenttäsirkkelit, joilla ei ole omaa kuivaamoa. Puusepänteollisuuteen lautatarhakuivaus ei sovellu ja puu on aina keinokuivattava, jos se halutaan alle 15 % loppukosteuksiin. (Siikanen 2008, 50; Sipi 2002, 123.)

KUVIO 10. Lautatarha (Pro Puu ry 2008a)

3.2.2 Kamarikuivaamo

Kamarikuivaamossa kuivataan yksi puutavarakuorma kerrallaan. Ilman lämmitys hoidetaan lämpöpattereilla ja ilmankosteutta säädetään ilmanvaihtokanavilla. Kuivauksen nopeuttamiseksi ja tasaisen kuivaustuloksen saamiseksi käytetään vaihtosuuntaisia kiertoilmapuhaltimia, joiden suuntaa vaihdetaan 2-4 tunnin välein. Ilman kierto on yleensä kohtisuoraan kuorman pituussuuntaa vastaan. Kamareissa käytetään usein höyrytystä puutavaran alkukostutukseen ja ilman kosteuden säätöön. Kuivauksen lopussa poistoilman vesipitoisuus on niin pieni, että lämmön talteenottoa ei pidetä kannattavana. (Sipi 2002, 125.)

Kamarikuivaamo on käytetyin kuivaamotyyppi puusepän- ja huonekaluteollisuudessa, ja se sopii myös pienimuotoiseen tuotantoon sahateollisuudessa. Kamarikuivaus sopii monille eri alkukosteuksille ja erilaisille puulajeille hyvin. Kuivausajat vaihtelevat laatutavoitteista, puulajista, alkukosteudesta ja lämpötilasta riippuen muutamasta päivästä yli kuukauteen. Lämpötila-alue on tavallisesti lämminilmakuivauksessa 40–80 °C. Kuivauskaavat voidaan säätää kullekin puutavaraerälle sopivaksi ja kuivauslaatu on säätömahdollisuuksien vuoksi usein hyvä. (Siikanen 2008, 51; Pro Puu ry 2008b.)



KUVIO 11. Kamarikuivaamo (Jartek 2014)

KUVIO 12. Kuivaamon täyttöä (Jartek 2014)

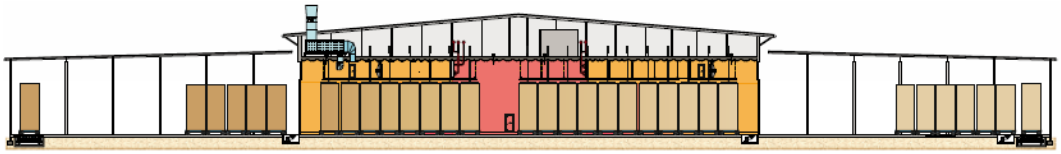
3.2.3 Jatkuvatoiminen- eli kanavakuivaamo

Kanavakuivaamossa kuivattava puutavara syötetään kuivaamon toisesta päästä sisään ja otetaan kuivattuna toisesta päästä ulos. Kuivaamot jaetaan poikittaisella ja pitkittäisellä ilmankierrolla toimiviin. Poikittaisella ilmankierrolla toimivat kuivaamot koostuvat useista eri vyöhykkeistä, joiden ilmanvaihtoa ja kosteusolosuhteita voidaan säätää itsenäisesti. Siinä puukuormat kulkevat pitkittäin kanavan pituussuuntaa vastaan ja ilma kiertää poikittain puutavaran pituussuuntaa vastaan. Näitä kuivaamoja käytetään vielä jossain määrin, mutta niitä ei ole rakennettu enää vuosikymmeniin, sillä ne ovat kalliita ja vaikeasti säädettäviä. Pitkittäisellä ilmankierrolla toimivissa kuivaamoissa taas puutavara kulkee poikittain kanavan pituussuuntaa vastaan ja ilma virtaa kohtisuoraan kuormien pituussuuntaa vastaan. Kuormat siirtyvät hiljalleen märästä päästä kuivaan päähän ja ilmankierto on vastakkaissuuntainen. (Sipi 2002, 125–127.)

Kanavakuivaamoissa käytetään lämmönvaihtimia, jotka esilämmittävät raittiin ilman poistoilmalla. Tämän ansiosta energiankulutus voi olla jopa 30-40 % kamarikuivausta pienempi. (Sipi 2002, 125-127.) Kanavakuivauksen etuja ovat lyhyt (2-6 vrk) kuivausaika, halpa investointi, helppohoitoisuus, pieni energiankulutus sekä suuri volyymi ja sitä käytetäänkin yleensä suurilla sahoilla ja

tuotantolaitoksilla. Haittapuolena on, että puutavaraa ei yleensä pystytä kuivaamaan alle 15 %:n kosteuteen. (Siikanen 2008, 51.)

OTC - kanavakuivaamossa (Optimized Two-stage Continuous) on kaksi kuivausvyöhykettä. Ensimmäisessä vyöhykkeessä puutavara kuivaa hyvin nopeasti, kun siihen puhalletaan kuumaa ilmaa suurella nopeudella. Kun puu on kuivunut puun syiden kyllästymispisteeseen, siirretään kuorma toiseen osaan. Siellä kuumaa ilmaa puhalletaan prosessia vastaan ja puukuorma kuivataan loppukosteuteen. (Sipi 2002, 127.)



KUVIO 13. Kanavakuivaamo (Jartek 2014)

3.2.4 Kuumakuivaus

Kuumakuivaus on kolmivaiheinen kuivausmenetelmä, jossa käytetään yli 100 °C:n lämpötiloja. Siinä kuivausprosessi on erittäin nopea, noin 1/5 – 1/3 lämminilmakuivauksen ajoista. Puusta irtoava vesi poistetaan höyrynä ylipaineen avulla. Kuumakuivaus ei sovellu hyvin havupuille pihkan kiehumisen takia. Menetelmää käytetäänkin lähinnä koivun kuivauksessa. (Voutilainen, Jussila, Kuikka, Mononen & Vuorenmaa 1993, 18; Sipi 2002, 129.)

Prosessin ensimmäinen osa on alkuhöyrytys, jonka tarkoitus on vesihöyryn avulla tasata lämmityksen aiheuttamia kosteuseroja eli estää pinnan liiallista kuivumista puun sisäosaan verrattuna. Oikein suoritettuna se jopa nopeuttaa kuivausta. Höyrytyksen määrä riippuu puutavaran alkukosteudesta ja paksuudesta. Ilmakuiva puu tarvitsee pinnaltaan noin 2-4 %:n kosteudennoston. Eniten höyrytystä tarvitsee pinnaltaan kuivunut n. 35-50 %:n kosteudessa oleva puu. Riittämätön alkuhöyrytys saattaa lämmitysvaiheessa aiheuttaa jopa 20 %:n kosteuseron puun

pinta- ja sisäosan välillä, mikä voi aiheuttaa sisähalkeamia. (Isomäki 1961, 45-46.)

Toisessa osassa eli lämmitysvaiheessa kuivaamon lämpötila nostetaan 100 °C:n, ja pidetään siinä kunnes puun sisäosan lämpötila on noussut lähelle tätä. Vaihe kestää puun paksuudesta riippuen ½ - 2 tuntia. Tänä aikana on pidettävä huoli, ettei puun pinta pääse kuivumaan liikaa. Puun pinnan lämpötila alkaa nousta, kun sen kosteus noin 30–25 %:n ja sisäosan vasta noin 20 %:n paikkeilla. Tässä vaiheessa on tärkeää, ettei kuivaamon lämpötila ole liian korkea. Muuten puun sisä- ja pintaosan kosteusero saattaa nousta liian suureksi ja vaarana ovat myöhemmin ilmaantuvat sisähalkeamat. Kun puun sisäosa on kuivunut riittävästi, nostetaan kuivaamon lämpötilaa vaiheittain 130 °C:n asti ja kuivataan loppukosteuteen tässä lämpötilassa. Kuivaamon lämpötilan ja puun sisäosan lämpötilaero saisi olla korkeintaan 15-18 °C. Erityisen suuri merkitys lämpötilalla on, kun puun kosteus lähenee puun syiden kyllästymispistettä. (Isomäki 1961, 45-46.)

Kolmannen vaiheen eli jäähdytyksen tarkoitus on tasata puussa esiintyvät kosteuserot. Jäähdytys on sitä nopeampaa, mitä korkeammassa lämpötilassa se tapahtuu. Jäähtymisen tulee tapahtua loppukosteutta vastaavassa tai sitä hieman suuremmassa suhteellisessa kosteudessa. Puutavara tulee jäähdyttää 60-70 °C:n näissä olosuhteissa. Jäähdyttämisessä voidaan käyttää höyrytystä apuna, mutta höyry nostaa lämpötilaa, minkä takia jäähdytys voi kestää jopa 6-8 tuntia. Höyrytys sopiikin parhaiten ohuen sahatavaran jäähdytykseen, koska silloin puun jäähtymistä ja suhteellisen kosteuden laskemista voidaan edesauttaa avaamalla tarkistusluukku. Paksummalla puulla tämä aiheuttaisi halkeamia. Paksummalla puutavaralla höyrytys korvataankin usein vesisumutuksella, jolla voidaan jäähdytysaikaa lyhentää jopa kolmeen tuntiin. Sumutuksen huonona puolena on, että puukuorma saattaa kostua liikaa paikallisesti. Tätä voidaan ehkäistä tarpeeksi pienireikäisillä ja oikeinsijoitetuilla sumuttimien suuttimilla. Loppuhöyrytyksen tai – sumutuksen tavoitteena on nostaa pinnan kosteus samalle tasolle kuin sisäosassa. (Isomäki 1961, 46.)

3.2.5 Kuumailmakuivaus

Kuumailmakuivaus on muuten sama prosessi kuin kuumakuivaus, mutta siinä kuivaamoon otetaan myös ilmaa. Ilman suhteellista kosteutta ja tasapainokosteutta saadaan tuloilman avulla laskettua alhaisemmaksi kuin pelkästään höyryllä tapahtuvassa kuivauksessa. Tällöin kuivausaikaa saadaan vielä nopeammaksi. Esimerkiksi sahatuoreen männyn kuivausaika saadaan lyhennettyä n. 6-7 tuntiin. Tämä tosin lisää runsaasti puussa esiintyvien kuivausvirheiden mahdollisuutta. (Isomäki 1961, 48–49.)

3.2.6 Alipainekuivaus

Alipainekuivaus perustuu kuivaamon paineen alentamiseen, jolloin puussa oleva vesi kiehuu alhaisessa lämpötilassa. Vesi poistuu puusta puusta paine-eron takia, kun höyrynpaine puun sisässä on suurempi kuin kuivauskammion ilmanpaine. Puun sisäosien ja pinnan kosteuserot pysyvät pieninä, sillä veden haihtuminen tapahtuu kiehumalla. Tällöin puun kuivuminen on yhtä tehokasta sekä puun sisällä ja pinnalla, joten halkeaminen syntyminen on vähäistä. (Sipi 2002, 128.)

Kuivausprosessissa kammiosta poistetaan ilma tyhjiöpumppujen avulla. Tunnin kestävän tyhjiövaiheen aikana suurin osa kammion ilmasta poistuu ja paine laskee 0,1 bar:n. Puutavara lämmitetään ohjelman mukaiseen lämpötilaan pattereiden tai sähköllä lämmitettävien kontaktilevyjen avulla. Lämmön siirto tapahtuu puusta irtoavan vesihöyryn välityksellä. Lämmitys voidaan suorittaa joko alussa ennen tyhjiövaihetta tai heti sen jälkeen. Kuivauslämpötila voidaan valita 40-90°C:n väliltä, sillä alipaine alentaa veden kiehumispistettä. Puutavaran kosteuseroja tasaannutetaan, kun tavoitteen mukainen loppukosteus on saavutettu. (Sipi 2002, 128.)

Alipainekuivauksen etuja ovat lyhyt kuivausaika, kuivausvirheiden vähyys, pieni energiankulutus sekä sinistymien ja värinmuutosten vähyys. Haittapuolena ovat kalliit investointikustannukset. (Voutilainen, Jussila, Kuikka, Mononen & Vuorenmaa 1993, 20.)

3.2.7 Suurtaajuusalipainekuivaus

Suurtaajuusalipainekuivaus eroaa tavallisesta alipainekuivauksesta sillä, että energia siirretään puuhun suurtaajuuskentän avulla. Tämä aiheuttaa vesimolekyylien kuumenemisen. Kuivausaika vaihtelee 2-7 vrk:n välillä. Menetelmä on käytössä vain Pohjois-Amerikassa ja Japanissa. (Siikanen 2008, 52.)

Lahden ammattikorkeakoulussa on kehitetty korkeampaan tehotiheyteen perustuva suurtaajuusalipainekuivauksen muoto, joka mahdollistaa erittäin lyhyen kuivausajan (jopa 2-5 tuntia). Menetelmä soveltuu myös sydänkeskisten tai massiivisten puuaihioiden kuivaukseen, joita ei voida kuivata virheettömästi muilla tavoilla. Jännitykset poistuvat ja kuivausvirheitä syntyy vähän verrattuna muihin kuivausmuotoihin. (Siikanen 2008, 52.)

3.2.8 Lauhdutinkuivaus

Lauhdutin- eli kondensaatiokuivaamossa puusta irtoava vesihöyry lauhdutetaan takaisin vedeksi. Suuri osa höyrystymiseen kulutetusta lämpöenergiasta voidaan näin ottaa talteen. Kuivaamon lämmitys tapahtuu lämpöpattereilla ja ilma kiertää puhaltimen avulla suljetussa tilassa. Lauhdutinkuivaus on hyvin energiataloudellinen matalien lämpötilojen ja lämmön talteenoton takia. Kuivaustulos on yleensä hyvä ja puun väri pysyy vaaleana. (Sipi 2002, 127-128.) Huonoina puolina voidaan pitää pitkää kuivausaikaa ja alhaisen lämpötilan takia on olemassa homehtumisen ja sinistymisen vaara (Siikanen 2008, 52).

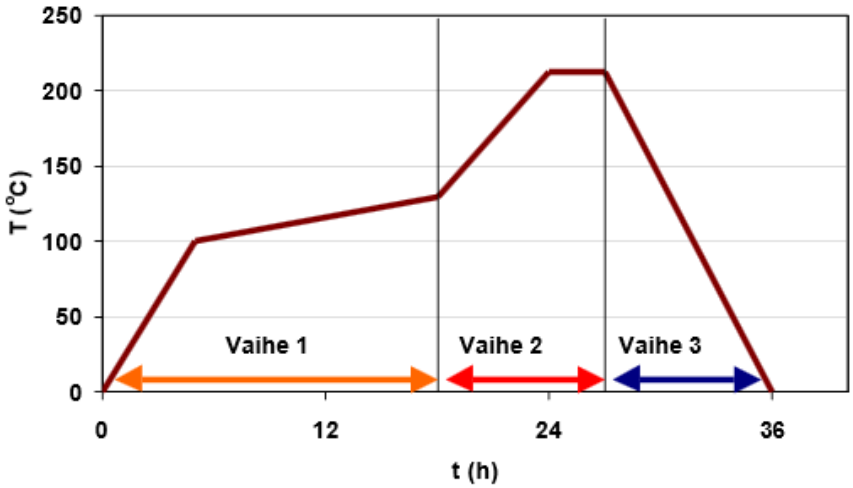
3.2.9 Puristuskuivaus

Puun kuivaus puristamalla on vanha menetelmä, joka on saanut uusia sovelluksia. Vesi saadaan poistumaan puusta pelkällä puristuspaineella, mutta yleensä käytetään lämpöä apuna. Yli 100 °C:n lämpötilat ovat tavallisia, sillä kuivuminen nopeutuu veden poistuessa puusta kiehumalla. Puristuskuivausta on perinteisesti käytetty lattialautojen ja massiivisten pöytälevyjen raaka-aineen kuivaukseen. (Siikanen 2008, 52.)

3.2.10 Lämpökäsittely

Lämpökäsittely on prosessi, jossa puuta käsitellään yli 180 °C:n lämpötilassa. Lämpökäsittely muokkaa puun kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia pysyvästi. Se pienentää merkittävästi puun kosteuselämistä, parantaa lahonkestoa ja lämmöneristävyyttä, keventää puuta ja antaa sille kauniin ruskean värin. Toisaalta puun lujuusominaisuudet saattavat heikentyä. Lämpöpuuta käytetään lähinnä kosteudenkestoa ja hyvää ulkonäköä vaativissa kohteissa, kuten terassilaudoissa, saunoissa, puutarhakalusteissa, ikkuna- ja ovirakenteissa, ulkoverhouksissa ja huonekaluissa. (ThermoWood – käsikirja 2003, 1-1 – 5-1.)

ThermoWood® - lämpökäsittelyprosessi jaetaan kolmeen vaiheeseen. Prosessin alku on sama kuin kuumakuivauksessa. Ensimmäisenä lämpötila nostetaan nopeasti 100 °C:n, jonka jälkeen tasaisemmin 130 °C:n. Tässä lämpötilassa puu kuumakuivataan absoluuttisen kuivaksi. Toinen vaihe on varsinainen lämpökäsittely, joka suoritetaan 185–215 °C:n lämpötilassa 2-3 tunnin ajan. Viimeisessä vaiheessa puuta jäähdytetään ja kostutetaan, kunnes se on saavuttanut käytettävän 4-7 %:n tason. Prosessin aikana puuta kostutetaan vesihöyryllä ja sumutuksella. (ThermoWood – käsikirja 2003, 1-1.)



KUVIO 14. ThermoWood – prosessin kaavio (ThermoWood – Käsikirja 2003, 2-1.)

3.3 Kuivausviat

3.3.1 Pintakovuus ja halkeamat

Kuivauksen alkuvaiheessa voi syntyä pintakovuutta, jos puun pinta pääsee kuivumaan liian nopeasti sisäosaan verrattuna. Tällöin puun pinta pyrkii kutistumaan ja siihen syntyy vetojännitystä. Puun märkään sisäosaan syntyy tällöin puristusjännitystä. Pinnan kimmoisuusraja ylittyy ja syntyy pintahalkeamia. Pintakovuutta aiheuttavat liian suuri ilmannopeus sekä liian alhainen ilmankosteus. Sitä voidaan ehkäistä alkuhöyrytyksellä, jos sahatavara on pinnaltaan päässyt liiaksi kuivumaan. Jos pintakovuus on voimakasta, saattaa myöhemmin kuivauksen aikana syntyä sisähalkeamia, jolloin puun sisälle syntyy vetojännitystä ja pintaan puristusjännitystä. (Sipi 2002, 131–132.)

Sahatavaran halkeilua kuivauksessa voidaan kuvata halkeiluprosentilla, joka on halkeilun pituus jaettuna kappaleen pituudella ja kerrottuna sadalla. Prosentit lasketaan erikseen pinta- ja sydänlappeelta. Halkeilu voi alentaa merkittävästi puutavaran arvoa, varsinkin puhuttaessa korkealaatuisesta puusepäntavarasta. (Sipi 2002, 132.)

3.3.2 Muodomuutosviat

Eniten puuaineksen kutistumaeroja ja sitä kautta kappaleen kieroontumista sekä vääntymistä aiheuttavat puun rakenteelliset ominaisuudet ovat vinosyisyys ja lyly. Varsinkin lylyn syiden suuntainen kutistuminen voi olla jopa 20-kertainen normaalipuuhun verrattuna. Tämä aiheuttaa eniten lape- ja syrjävääryyttä, kun taas vinosyisyys aiheuttaa eniten kappaleen kieroutumista. Muodonmuutosviat lisääntyvät sitä enemmän, mitä alhaisempaan loppukosteuteen kuivataan. Kuusi on mäntyä alttiimpi vioille, ja vikojen esiintymiseen vaikuttavat myös kappaleen poikkileikkaus ja pituus. Parhaiten vikojen syntymistä voidaan ehkäistä tekemällä kuivauskuormat huolellisesti. (Sipi 2002, 132 -133.)

3.3.3 Pihkavuodot ja väriviat

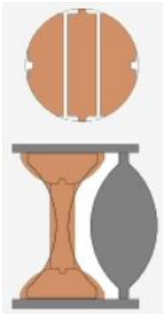
Pihkavuodot ovat erityisesti mäntysahatavaran ongelma. Niitä esiintyy sitä enemmän, mitä korkeampi on ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus. Pihkan vuotaminen alkaa yleensä kuivauksen alkuvaiheessa, kun lämpötila nousee yli 40 °C:n ja puun kosteus on vielä suuri. Pihkan sulamista ei tapahdu, jos kuivaamon märkälämpötila on alle 37 °C:sta ja kuivalämpötila alle 52 °C:sta. Pihkavuotoja esiintyy vähemmän uitetussa tai vesivarastoidussa puussa. (Sipi 2002, 133.)

Värivikoja puutavaraan aiheuttaa useimmiten liian korkea kuivauslämpötila. Myös puun korkea alkukosteus sekä uuteaineiden kerääntyminen puutavaran pintaan lisäävät värivikoja. Uuteaineilla tarkoitetaan lähinnä erilaisia ravinteita ja pihka-aineita. Männyllä ja kuusella korkea lämpötila on kuitenkin merkittävin tekijä. Tasalaatuisimpaan lopputulokseen puun värin kannalta on päästy käyttämällä alhaisia 50 ja 70 °C:n kuivauslämpötiloja. Voimakkaimmin väriviat esiintyvät sahatavaran pintalaudoissa. Myös sinistyminen ja homehtuminen aiheuttavat värivikoja puuhun. Niitä syntyy useimmiten silloin, kun märkä puutavara joutuu seisomaan kuivaamossa alle 40 °C:n lämpötilassa, ilman kosteus on liian korkea ja ilmankierto huono. (Sipi 2002, 133.)

4 ILVOLANKOSKI OY JA SOLIDIWOOD-TEKNOLOGIA

Tässä opinnäytetyössä tutkittava I-palkkirakenne on alun perin Ilvolankoski Oy:n visioima (KUVIO 15). Ilvolankoski Oy on yritys, joka kehittää ja markkinoi uudenlaisia puutuotteita sekä niiden valmistusteknologiaa. Sen perusti Matti Kukkonen vuonna 1993 ja hän on myös yrityksen ainoa työntekijä. Yritys tutkii uusia innovatiivisia menetelmiä, jotka voisivat viedä eteenpäin suomalaista puuteollisuutta ja puutuotteiden valmistusta. Tarvittavat tutkimukset ja testit suoritetaan yhteistyössä muiden yritysten ja oppilaitosten, kuten Lahden ammattikorkeakoulun kanssa. Yritys on kehittänyt ja patentoinut Solidiwood nimellä tunnetun puun kuumamuovausteknologian ja se lisensoi rekisteröimiensä puutuotteiden, Solidiwood® ja Solidum®, käyttöoikeuksia. Solidum® on lattiaan tarkoitettu palkkipäällyste, jonka sisälle saa asennettua lattialämmityksen. (Uotila 2013; Ilvolankoski Oy 2013.)

Solidiwood-teknologian idea on puristaa tuorekostea ja sahattu massiivipuuaihio korkean lämpötilan ja paineen avulla mahdollisimman pitkälle viedyksi lopputuotteeksi ilman välihöyläystä ja hiontaa. Tuote voidaan puristaa tuorekosteasta aina puusepän- tai jopa absoluuttisen kuivaksi. Samassa prosessissa voidaan suorittaa tarvittaessa liimasaumojen yhteenpuristukset ja pintojen profiloinnit. Solidiwood-teknologialla voidaan puristaa 2D – tai 3D-muotoja. Prosessin aikana puun jännitykset kuoleentuvat ja puun pinta muuttuu tihemmäksi ja osittain vettä hylkiväksi. (Uotila 2013.)



KUVIO 15. Ilvolankoski Oy:n visio I-palkkirakenteesta (Ilvolankoski Oy 2013)

5 TUTKIMUSOSUUS

5.1 Tutkimuksen tavoitteet ja valmistelu

Tutkimusosuuden tarkoituksena oli tutkia ja toteuttaa massiivipuinen I-palkki kuumamuovausteknologiaa käyttäen. Tutkimuksen ensimmäisenä tavoitteena oli onnistuneesti valmistaa I-palkkiaihio kuumamuovaamalla eli puristaa palkkiaihiota korkeassa paineessa ja lämpötilassa, kunnes se on kuivunut ja muotoutunut haluttuihin mittoihin. Tavoitteena oli saada tuorekostea palkkiaihio vähintään puusepänkuivaksi kaikista osistaan jopa muutamassa tunnissa. Työhön valittiin raaka-aineeksi tuoreita koivuviilun sorvauksesta syntyneitä purilaita (KUVIO 16). Purilaita oli mahdollista käyttää raaka-aineena, sillä puristus korkeassa lämpötilassa kuolettaa normaalisti hyvin jännitteisen koivun sydänpuun jännitykset. Tämä toi lisäarvoa tutkimukselle, sillä samalla saatiin hyödyllinen käyttökohde vaneripurilaille. Purilaiden dimensiot ja käytettävä laitteisto määräsivät valmistettavien palkkien dimensiot.

Toisena päämääränä oli tutkia kuumamuovaamalla valmistettujen I-palkkien taivutuslujuutta. Tätä varten purilaista valmistettiin pidempiä palkkeja, joiden maksimilujuutta ja -taipumaa testattiin puutekniikan laboratorion aineenkoestuslaitteella kolmipistetaivutuksella. Saatuja tuloksia verrattiin suomalaisen PRT-Wood Oy:n valmistamien kuitulevyuumaisten I-palkkien vastaaviin arvoihin.

Ennen tutkimuksen aloitusta oli hankittava hieman pohjatietoja puun kuumapuristukseen liittyen. Hyvänä pohjana toimi Joonas Uotilan keväällä 2013 tekemä opinnäytetyö, jossa hän tutki Solidiwood-lattialämmityspalkin ja terassilaudan valmistusta sekä pintakäsittelyä. Uotilan työstä saatiin vinkkejä esimerkiksi oikeiden puristuspaineiden ja – lämpötilojen sekä liiman valintaan. Neuvoja saatiin myös Lahden ammattikorkeakoulun projekti-insinööri Leo Lähteiseltä, joka toimi myös näyttötyön ohjaajana.

Tutkimustyön alussa hankittiin tarvittava puuraaka-aine, joista palkkiaihiot valmistettiin sekä perehdyttiin testeissä tarvittavaan laitteistoon. Raaka-aineena käytettävät tuoreet koivuvaneripurilaat haettiin Koskisen Oy:n vaneritehtaalta

Järvelästä. Purilaat olivat läpimitaltaan n. 94-100mm ja pituudeltaan noin 1950-2000mm. Purilaat olivat koivun sydänpuuta ja kosteudeltaan n. 60–70 %. Testeissä käytettiin Lahden ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratorion kolmea hydraulitoimista lämpöpuristinta. Laitteistosta kerrotaan tarkemmin seuraavassa luvussa.

KUVIO 16. Koivuvaneripurilaita

5.2 Ensimmäinen osio

Ensimmäinen osion tavoitteena oli valmistaa onnistuneesti palkkiaihioita kuumapuristamalla ja saada aihiot prosessin aikana kuivattua. Osio aloitettiin tutustumalla puristinlaitteistoon ja suunnittelemalla valmistettavat palkkiaihiot sekä kuumamuovauksessa tarvittavat muotit ja lämpöelementit.

5.2.1 Laitteisto

Testeissä käytettiin kahta hydraulitoimista lämpöpuristinta. Ensimmäisissä puristustesteissä käytettiin yksisylinteristä puristinta (KUVIO 17), jossa puristinlevyt lämpenivät sähköllä. Puristinlevyjen mitta oli 400*400mm. Puristimen käyttö oli hyvin yksinkertaista ja se lämpeni nopeasti. Lämmöt ja paineet säädettiin erillisestä ohjausyksiköstä. Paineelle säädettiin mittarista viisareita kääntämällä ylä- ja alarajat, johon paine saisi alimmillaan laskea tai enimmillään nousta. Lämpötilaa pystyttiin säätämään noin 10 °C:n tarkkuudella.

KUVIO 17. Yksisylinterinen lämpöpuristin

Testien puolessa välissä siirryttiin käyttämään nelisylinteristä tarkkuushydraulipuristinta (KUVIO 18), jonka levyt lämpenivät laitteistossa kiertävällä öljyllä. Se vaati hieman enemmän perehtymistä kuin yksisylinterinen puristin, mutta siinä oli monipuolisemmat säätöominaisuudet. Ohjausvirta ja puristuspaineet säädettiin ohjauspaneelista ja levyjen lämmitys erillisestä lämmitysyksiköstä (KUVIO 19). Puristimen lämpiäminen oli melko hidasta ja lämpöhäviötä tapahtui noin 10 astetta öljyn välittäessä lämmön puristinlevyille. Puristinlevyjen mitat olivat 700*700mm ja puristuskapasiteetti 184 kN.

KUVIO 18. Tarkkuushydraulipuristin

KUVIO 19. Puristimen ohjaus- ja lämmitysyksiköt

5.2.2 Koekappaleiden valmistus

Ensimmäiseksi mietittiin mitat palkkiaihioille, joita alettiin valmistaa. Aihioista tehtiin 400mm pituisia testien alussa käytetyn yksisylinterisen hydraulipuristimen puristinlevyn pituuden mukaan. Aihioita valmistettaessa purilaat katkottiin ensin 400 mm:n mittaisiin pätkiin ja sahattiin sen jälkeen pituussuunnassa kolmeen osaan pyörösahalla. Keskimmäisestä osasta tuli I-palkkiaihion uuma ja kahdesta muusta paarteet (KUVIO 20). Palkin kokoa rajoitti purilaan paksuus ja aihion kokoa voitiin muuttaa vain vaihtelemalla purilaan keskeltä sahattavan uuman paksuutta. Lisäksi purilaiden lievä epäsymmetrisyys vaikutti mittoihin.

Tutkimuksen aikana uumakappaleen paksuus vaihteli 25–34 mm:n välillä, mutta keskimäärin se oli noin 30 mm:ä. Paksuutta lisättiin testien edetessä, sillä se painui puristuksen aikana kasaan useita millejä. Palkin korkeus vaihteli 125–130 mm välillä riippuen purilaan läpimitasta ja osien paksuuksista. Tarkoituksena oli, että aihioiden osia työstettäisiin mahdollisimman vähän ennen kuumamuovausta. Näin saataisiin mahdollisimman vähän hävikkiä puuaineelle. Osia jouduttiin kuitenkin hieman sahaamaan/höyläämään, jotta niistä saatiin mahdollisimman

symmetriset. Osiin jyrsittiin sen jälkeen urat ja loveukset liitosta varten alajyrsinkoneella. Viimeiseksi uuma ja paarteet liimattiin yhteen ennen puristimeen laittoa.

Erilaisiin liitostyyppeihin ei tässä tutkimustyössä perehdytty erityisemmin. Aihioiden valmistuksessa käytettiin pääasiassa alla (KUVIO 20) näkyvää suorakulmaista liitosta. Sen lisäksi kahdessa kappaleessa kokeiltiin sormiliitosta. Liitoslovien leveys oli 10 mm ja syvyys hieman vaihteli riippuen uumakappaleen korkeudesta. Käytännössä uuman korkeus valmiissa palkkiaihiossa oli noin 70 mm:n tai hieman yli, koska se oli optimaalinen korkeus sopivan profiloinnin ja aihion ehjänä säilymisen kannalta.

KUVIO 20. Palkkiaihion osat

Testeissä käytettäväksi liimaksi valittiin yksikomponenttinen polyuretaaniliima, jonka Joonas Uotila oli hyväksi havainnut lopputyössään. Kosteuden vaikutuksesta kovettuva PUR-liima takaa suhteellisen joustavan liimasauman kuivumisen puristusprosessin aikana. Säänkestävää PUR-rakenneliimaa käytään I-palkkien valmistuksessa myös teollisuudessa.

Uotila oli testannut myös kaksikomponenttista polyuretaaniliimaa, joka kuitenkin jähmettyi liian nopeasti ja liimasauma yleensä murtui puristuksen aikana. Hän oli testannut myös Kiillon B3 PVAc-dispersioliimaa. Se ei kuitenkaan soveltunut

kuumamuovaukseen, sillä kostean puun ja korkean lämpötilan takia liimaliitoksesta tuli heikko. (Uotila 2013.)

5.2.3 Muottien ja lämpöelementtien valmistus

Ennen testien aloittamista täytyi valmistaa palkkien sivuprofilointia ja lämmönjohtamista varten tietynlaiset metallimuotit ja lämpöelementit (KUVIO 21). Muotit hitsattiin Lahden ammattikorkeakoulun konelaboratoriossa. Lämpöelementeiksi leikattiin aluksi 6 mm teräslevyistä kappaleet, joiden tehtävä oli johtaa lämpöä ja tukea paarteita puristuksen aikana. Myöhemmässä vaiheessa testejä 6 mm:n paksuiset lämpöelementit korvattiin 20 mm:n elementeillä, joihin asetettiin lämmitysvastukset. Muoteista ja lämpöelementeistä tehtiin samanpituiset kuin koekappaleista eli 400 mm. Kuumamuovauksen aikana aihioiden sivukiristykseen ja lämpöelementtien kiinnitykseen käytettiin metalliputkista valmistettua, käsillä kiristettävää puristinta. Palkkiaihiot kuumapuristettiin ohuiden rosterilevyjen välissä, jotta liitoksista pursuava liima ei sotkisi puristinlevyjä.

KUVIO 21. Puristusmuotit ja lämpöelementit

5.2.4 Testit yksisylinterisellä lämpöpuristimella

Palkkiaihioita valmistettiin tutkimuksen aikana yhteensä 18 kappaletta, joista puolet kuumapuristettiin yksisylinterisellä lämpöpuristimella ja puolet nelisylinterisellä puristimella. Tavoitteena oli saada kuumamuovattua palkkiaihiot puusepänkuivaksi mahdollisimman lyhyessä ajassa, enintään yhden työpäivän sisällä. Tässä tutkimuksessa prosessin pituus vaihteli aikavälillä 3-6 tuntia. Purilaiden lähtökosteus vaihteli 50–70 %:n välillä riippuen siitä, kuinka kauan purilaat olivat seisoneet varastossa. Osa koekappaleista puristettiin sellaisenaan ja osa laitettiin veteen yön ajaksi, jotta puu olisi muovautuvampaa ja halkemaisriski pienempi.

Kolme ensimmäistä palkkia puristettiin kokeilumielessä pystyasennossa (KUVIO 22), vaikka arveltiin, että sillä ei saavutettaisi haluttua lopputulosta. Kappaleita puristettiin 150–160 °C:ssa 3,5-4 tuntia. Painetta nostettiin asteittain 5 bar:sta 12 bar:n asti. Kaksi ensimmäistä aihiota valmistettiin suorakulmaisella liitoksella ja kolmannessa kokeiltiin sormijatkosliitosta. Tällä menetelmällä ei arvatenkaan päästy hyvään lopputulokseen. Paineen vaikutuksesta uuma painui hieman paarteiden sisään jo pienillä puristuspaineilla. Tuloksena palkki saattoi painua lysyyn parikin senttiä. Lisäksi uumaan ei saatu johdettua riittävästi lämpöä, joten aihio ei kuivunut kunnolla. Tämän takia kappaleessa ilmeni myöhemmin kieroutumista (KUVIO 23).

KUVIO 22. Palkkiaihio puristimessa pystyasennossa

KUVIO 23. Kosteaksi jäänyt aihio

Loput koekappaleista puristettiin lappeellaan (KUVIO 24). Puristus aloitettiin matalista paineista ja painetta lisättiin portaittain, kunnes haluttu puristusaste oli saavutettu. Puristus aloitettiin n. 5 bar:sta ja painetta nostettiin tietyin väliajoin enimmillään 20 bar:n saakka. Puristuspaineiden nostossa oli oltava tarkkana, ettei liiallinen paineen nosto murtaisi liitoksen liimasaumoja. Puristusaikaa pidennettiin koekappaleilla keskimäärin viiteen tuntiin. Tavoitteena oli puristaa aihiota uuman kohdalta noin 10 % alkupaksuudesta. Käytännössä puristusasteen tarkkaa hallitseminen oli hyvin vaikeaa puristimen epätarkan paineensäädön takia ja aihio saattoi puristua kasaan liikaa. Tämä aiheutti kahdessa kappaleessa uuman murtumisen ja liitoksen pettämisen.

KUVIO 24. Aihio lappeellaan puristimessa

KUVIO 25. Aihio puristuksen jälkeen

KUVIO 26. Aihio höylättynä ja sahattuna

Lappeellaan puristettaessa paine ja lämpötila saatiin johdettua tehokkaasti uumaan ja uuma kuivui riittävästi prosessin aikana. Uuman kosteus saatiin parhammillaan 5 tunnin puristuksen jälkeen noin 3-5 %:n. Myös profilointi saatiin onnistumaan aihioille kohtalaisen hyvin ja tarpeeksi varovaisella puristuspaineen nostolla liitoskohdat saatiin säilymään ehjinä.

Ongelmaksi muodostuivat kuitenkin paarteet, joita ei saatu sisältä kuivumaan prosessin aikana. Ohuet metallilevyt eivät riittäneet johtamaan tarpeeksi lämpöä. Tämän seurauksena paarteet käyristyivät parin päivän kuluessa puristuksen jälkeen puun jatkaessa kuivumista (KUVIO 28). Ongelmaa yritettiin ratkaista sahaamalla 3-4 mm:n syvyiset urat kosteuden poistoa varten. Tämä ei kuitenkaan merkittävästi nopeuttanut kuivumista, joten paarteisiin porattiin vielä kuuden millin poralla 15 cm:n syvyiset reiät kuivauksen nopeuttamiseksi (KUVIO 27 ja 28). Tämäkään ei auttanut pääsemään haluttuun lopputulokseen ja paarteiden kosteus jäi viiden tunnin käsittelyn jälkeen vielä jopa 30 %:n.

KUVIO 27. Aihio ennen puristusta

KUVIO 28. Aihio pari päivää puristuksen jälkeen

Tuloksista voidaan todeta, että kahdelta sivulta puristava lämpöpuristin ei riittänyt saamaan palkkiaihiota kuivaksi halutussa ajassa. Kuivausaika olisi arviolta jouduttu vähintään tuplaamaan, jotta paarrepuut olisivat kuivuneet riittävästi tällä menetelmällä. Tarvittiin siis vähintään lämmitys aihioiden sivuille prosessin aikana. Lisäksi yksisylinterisen puristimen epätarkka paineen ja lämpötilan säätö eivät taanneet optimaalisinta tulosta. Optimaalisin tilanne olisi, jos käytössä olisi 3-4 sivulta hydraulisesti puristava ja lämmittävä laite. Myös esimerkiksi tehokkaalla ilmankierrolla voitaisiin tehostaa palkkien kuivumista.

5.2.5 Testit nelisylinterisellä puristimella

Kun palkkiaihioiden kuumamuovaus yksisylinterisellä lämpöpuristimella ei onnistunut halutusti, siirryttiin käyttämään suurempaa nelisylinteristä tarkkuushydraulipuristinta. Testikappaleet 10–18 kuumapuristettiin tällä puristimella. Jotta palkkiaihion paarteisiin saatiin johdettua tarpeeksi lämpöä, otettiin käyttöön myös puristimen vieressä oleva lämmityslaite (KUVIO 29). 6 mm:n paksuiset paarteita lämmittävät metallilevyt korvattiin 20 mm:n paksuisilla elementeillä (KUVIO 32), joihin porattiin kumpaankin päähän reiät laitteesta lähteviä lämpövastuksia (KUVIO 30) varten. Myös elementin keskelle porattiin reiät laitteesta lähteviä lämpötila-antureita varten. Ennen testien aloitusta jouduttiin tekemään hieman muutostöitä laitteelle. Muun muassa lämpövastuksien

ja anturien johtoja jouduttiin pidentämään, jotta ne yltäisivät puristimelle. Muutostyöt teetettiin sähkömiehellä.

KUVIO 29. Lämmityslaite sivuelementeille

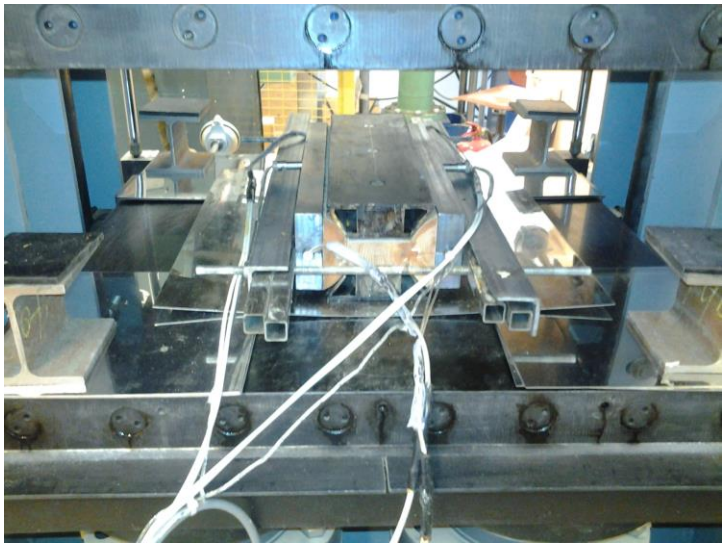
KUVIO 30. Lämmityslaitteen vastukset ja anturit

Puristimen lämpötila oli testien aikana noin 150–160 °C:sta ja sivulämpövastusten lämpötila noin 140–150 °C:sta. Puristusaika aihioilla vaihteli välillä 2 h 20 min - 4 h 20 min. Ensimmäistä aihiota puristettiin kolmen tunnin ajan 150 °C:ssa ja se saatiin kuivumaan hyvin 3-5 %:n loppukosteuteen. Se kuitenkin epäonnistui ja aihio murtui liian suuren puristuspaineen ja puristimen sylintereiden epäsäännöllisen paineenjakautumisen takia.

Vaikka aihioiden kuivumisongelma saatiin ratkaistua, ongelmia aiheutti puristuspaineiden epätasainen jakautuminen sylintereille. Esimerkiksi, jos

puristuspaineeksi asetti 10 bar, saattoi nelossylinterille tulla 12 bar ja ykkössylinterille vain 6 bar painetta. Tämän vuoksi aihion toinen pää painui kasaan enemmän kuin toinen ja aihio saattoi jopa murskaantua, kuten kävin ensimmäiselle aihiolle.

Ongelma saatiin kuitenkin ratkaistua sahaamalla teräspalkista 4 pysäytyskappaletta (KUVIO 31), jotka asetettiin puristinlevyn kulmiin stoppaamaan puristus haluttuun paksuuteen. Pysäyttäjien päälle lisättiin myös 6 mm:n teräslevystä kappaleet korkeutta lisäämään. Lisäksi käytettiin yhden millimetrin paksuisia rosterilevyjä puristuskorkeuden hienosäätöön. Puristuspaineella ei tällöin ollut suurta merkitystä, kunhan vain pysäyttäjät kestivät ehjänä.



KUVIO 31. Aihio valmiina puristukseen

Prosessissa puristusastetta lisättiin vähän kerrallaan. Käytännössä tämä eteni niin, että alussa pysäyttäjien alle laitettiin 2-4 rosterilevyä, joita poistettiin yksi kerrallaan kuumapuristuksen edetessä. Tällä tavoin puristusastetta voitiin lisätä millimetri kerrallaan ilman vaaraa kappaleen ylipuristuksesta. Kääntöpuolena tässä oli, että prosessi vaati hieman enemmän aikaa ja työtä kun puristin jouduttiin välillä aukaisemaan levyjen poistoa varten. Aihioita puristettiin prosessin aikana kasaan uuman kohdalta 3-6 mm.

KUVIO 32. Aihio puristimessa sivulämpövastusten kanssa

KUVIO 33. Aihio ennen kuumamuovausta

KUVIO 34. Aihio kuumamuovauksen jälkeen

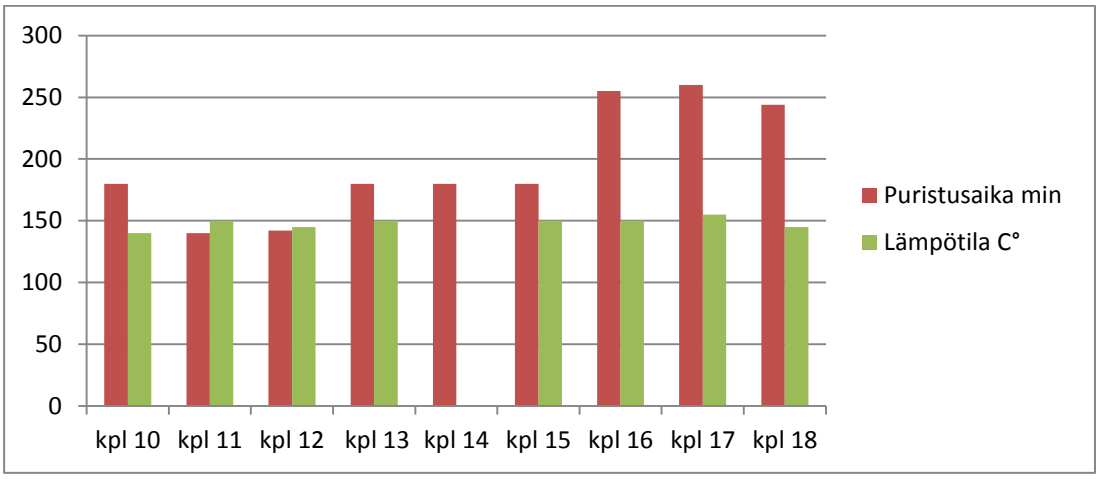
KUVIO 35. Aihio sormijatkosliitoksella ennen kuumamuovausta

KUVIO 36. Aihio kuumamuovauksen jälkeen

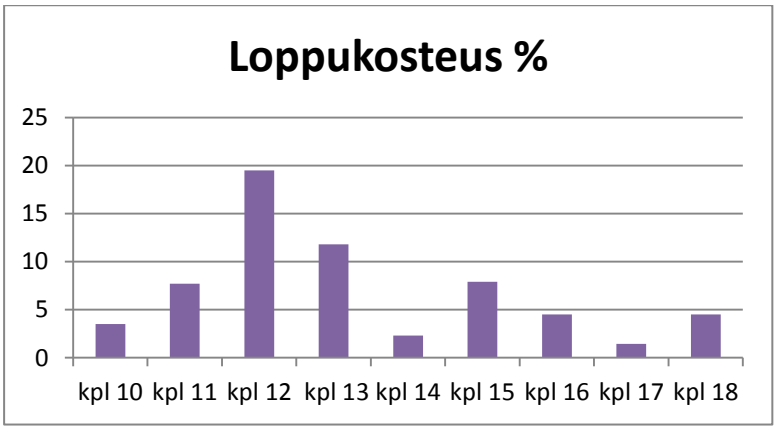
Valmiiden aihioiden loppukosteus mitattiin kuivaus-punnitusmenetelmällä. Aihiosta sahattiin kolme osaa, yksi keskeltä ja kaksi kummastakin päästä, kosteuden mittausta varten. Mittauksen jälkeen osien kosteudesta laskettiin keskiarvo kuvaamaan yhden aihion kosteutta (KUVIO 38).

Kappaleilla 10–15 puristusaika oli maksimissaan 3 tuntia. Kappale 10 epäonnistui aihion puristuessa liikaa. Kappale 14 niin ikään epäonnistui, sillä sivulämpövastukset antoivat liikaa lämpöä ja aihion paarteet hiiltyivät. Tämä

johtui luultavasti siitä, että lämpötila-anturit unohdettiin laittaa elementteihin ja lämmityslaitteeseen tuli häiriö. Kappaleilla 11, 12, 13 ja 15 ei vielä aivan päästy haluttuun loppukosteuteen. Kappaleet 12 ja 13 olivat yön yli vedessä ennen muovausta, joten niiden alkukosteus oli korkeampi kuin muiden. Tämän takia myös niiden loppukosteudet prosessin jälkeen olivat korkeampia. Kappaleilla 16–18 puristusaikaa pidennettiin yli neljään tuntiin. Tällöin loppukosteus saatiin haluttuihin lukemiin.

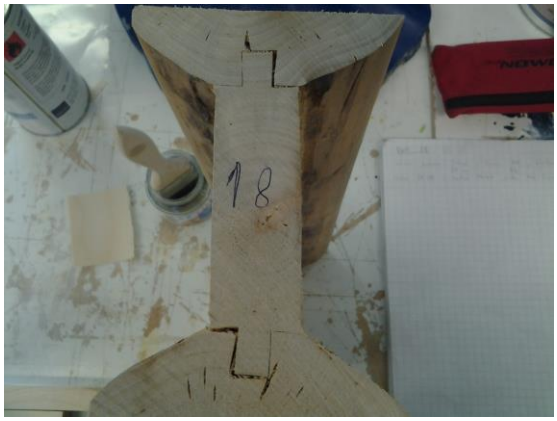


KUVIO 37. Kappaleiden puristusajat ja keskimääräiset puristuslämpötilat



KUVIO 38. Kappaleiden keskimääräiset loppukosteudet

Palkkiaihiot saatiin kuivumaan tavoitekosteuteen sivulämmitystä käyttämällä ja aihioiden puristusaste saatiin halutuksi metallisten stoppareiden avulla. Ongelmia kuitenkin ilmeni liitoskohdissa prosessin aikana. Liitossaumojen uros- ja naarasponttien erilainen kosteuseläminen puun kuivuessa hyvin nopeasti puristuksen aikana johti liitosten rakoiluun ja heikkoon liimasaumaan (KUVIO 39). Ongelmana oli myös, että liimasauma saattoi murtua, jos puristusastetta lisättiin liiman ehdittyä kuivua. Lisäksi aihion kuivuessa ja kutistuessa sivupuristus löystyi, eikä tukenut aihiota enää kunnolla sivuilta. Nämä syyt aiheuttivat parilla kappaleella liitoksen pettämisen.



KUVIO 39. Liitosten elämistä kuivauksen aikana

5.3 Toinen tutkimusosio

Tutkimuksen toisessa osiossa valmistettiin vaneripurilaista pitkiä palkkeja, joiden murtolujuutta ja maksimitaipumaa testattiin kolmipistetaivutuksella. Tuloksia verrattiin markkinoilla olevien PRT-Wood Oy:n valmistamien kuitulevyuumaisten I-palkkien sallittuihin kuormiin kahden metrin jännevälillä.

5.3.1 Palkkien valmistus

Palkkien valmistus erosi ensimmäisen osion koekappaleiden valmistuksesta siten, että palkin uuma ja paarteet kuumapuristettiin kuivaksi erikseen ennen liitosten

jyrsintää ja liimausta. Näin jouduttiin menettelemään, sillä ei ollut saatavilla tarpeeksi pitkiä muotteja tai lämpöelementtejä palkkien kuumamuovaamiseksi kokonaisina. Ajanpuutteen vuoksi niitä ei myöskään lähdetty valmistamaan konelaboratoriossa.

Ensimmäiseksi purilaat sahattiin kolmeen osaan pituussuunnassa pyörösahalla. Tämän jälkeen tehtiin tarvittavat höyläykset, jotta osista saatiin samanpaksuiset ja symmetriset. Työstöjen jälkeen osat laitettiin suureen hydraulitasopuristimeen (KUVIO 40), jossa niitä puristettiin 120 °C:ssa noin 6 tuntia. Puristuspainetta lisättiin asteittain 30 bar:sta 50 bar:iin asti. Tämän jälkeen lämmöt otettiin pois ja kappaleet jätettiin puristimeen vielä yön yli jäähtymään. Kuumapuristuksen ja jäähdytyksen jälkeen osien kosteus oli pintamittarilla mitattuna kappaleesta ja mittauskohdasta riippuen noin 4-10 %:n välillä. Kokoonpuristumaa kappaleissa tapahtui keskimäärin 3,75 mm alkupaksuudesta.

Taulukko 1. Paarteiden ja uuman paksuudet

Palkin osien paksuudet mm	Kpl 1	Kpl 2	Kpl 3	Kpl 4
Ennen puristusta	30	28	28,5	28,5
Puristuksen jälkeen	26	24	25	25

KUVIO 40. Osat valmiina puristukseen

Kuumamuovauksen jälkeen osiin jyrsittiin liitosurat alajyrsinkoneella, jonka jälkeen ne liimattiin yhteen PUR-liimalla. Palkkeja valmistettiin ajanpuutteen ja hitaan valmistuksen takia vain 5 kappaletta, joista yksi epäonnistui liitoksen jyrsimisvaiheessa. Näin testaukseen saatiin vain 4 kappaletta.

5.3.2 Testaus

Palkkien testaukset suoritettiin kolmipistetaivutuksena puutekniikan laboratorion Alwetron-aineenkoestuslaitteella (KUVIO 41). Tukipisteiden jänneväliksi säädettiin noin 15 kertaa palkin korkeus.

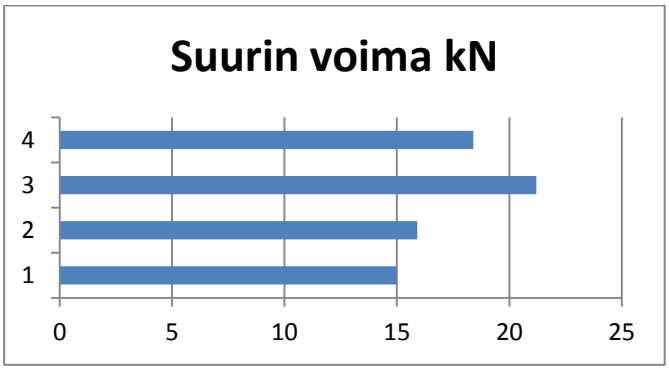
Taulukko 2. Valmiiden palkkien dimensiot ja jännevälit taivutuksessa

Palkkien dimensiot mm	Kpl 1	Kpl 2	Kpl 3	Kpl 4
Korkeus	125	114	123	123
Leveys (paarteet)	83	78	84	83
Pituus	1950	1960	1960	1955
Jänneväli	1875	1710	1875	1875

KUVIO 41. Palkki testauksessa

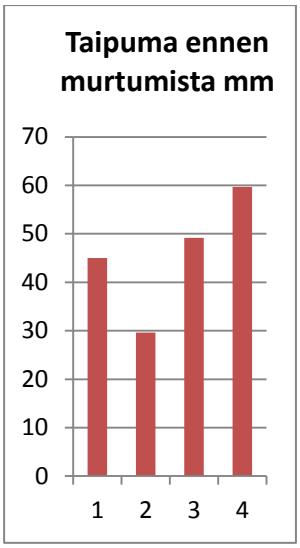
5.3.3 Tulokset

Tuloksista (KUVIO 42) voidaan havaita, että kappale numero 3 kesti huomattavasti paremmin taivutusta kuin muut (LIITE 3). Tämä johtuu luultavimmin siitä, että kappaleessa oli etenkin paarteissa vähemmän oksia tai muita lujuutta heikentäviä kohtia kuin muissa kappaleissa. Tämän takia jännitys jakautui tavutettaessa melko tasaisesti palkin koko pituudelle, kuten myös palkin halkeamisesta (KUVIO 44) voidaan päätellä. Ensimmäisen palkin kohdalla testi epäonnistui, sillä palkki luiskahti pois tukien päältä. Tämän takia tulos jäi alhaisimmaksi (LIITE 1). Toisen palkin kohdalla tulos (LIITE 2) oli huonompi kuin kolmennella ja neljännellä pienempien dimensioiden takia.

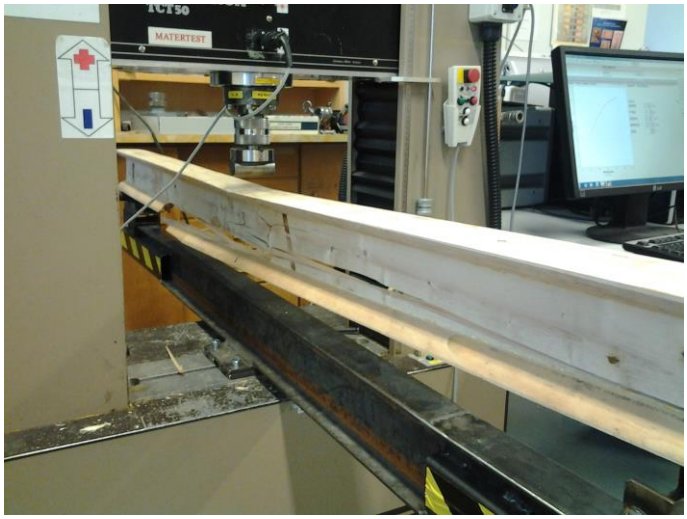


KUVIO 42. Maksimivoima taivutuksessa

Palkkien taipumaa esittävästä kuvaajasta (KUVIO 43) voidaan havaita, että palkki numero 2 taipui vähiten ja palkki numero 4 (LIITE 4) eniten ennen murtumistaan. Toisen palkin tulokseen vaikutti luultavasti pienempi jänneväli kuin muilla, sekä melko heikko kestävyys 3 ja 4 palkkiin verrattuna. Palkki 4 ei puolestaan murtunut kunnolla missään vaiheessa testiä, vaan alkoi luisua tukien päältä paineen lisääntyessä. Tämän johdosta testi keskeytettiin ennen lopullista murtumista. Palkit 1 ja 3 taipuivat melkein saman verran johtuen luultavimmin siitä, että ne olivat tasalaatuisimmat ja niillä oli samat dimensiot.



KUVIO 43. Palkkien taipuma ennen murtumista



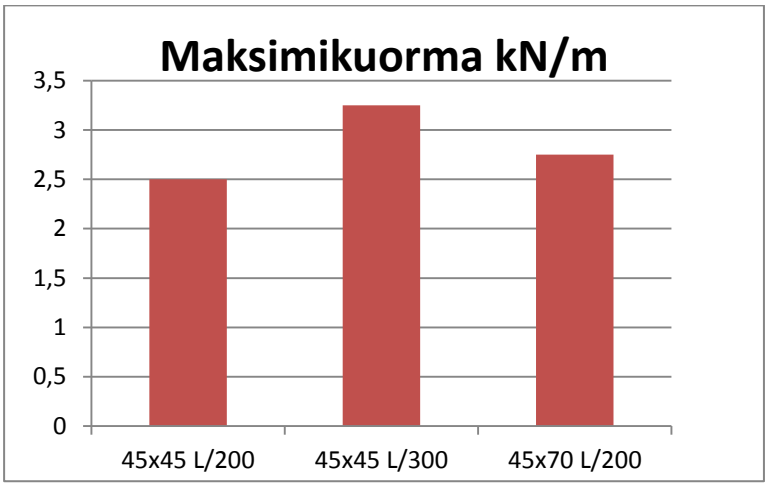
KUVIO 44. Palkki numero 3 taivutuksen jälkeen

KUVIO 45. Palkit testauksen jälkeen

Taivutustestien tuloksista voidaan todeta, että massiivikoivusta valmistetut I-palkit kestivät huomattavan paljon kuormaa. Vahvin palkki kesti hieman yli 21 kN, eli yli 2000 kg. Palkkien suuri kestävyys selittyi luultavasti koivun lujuudesta puulajina sekä liimana käytetystä polyuretaanista. Lujuutta lisäsi vielä se, että tutkimuksessa käytettiin materiaalina pintapuuta tiheämpää koivun sydänpuuta, jota oli vielä puristettu tiheämmäksi. Kuumamuovauksen vaikutusta koivun lujuuteen verrattuna käsittelemättömään puuhun ei tässä yhteydessä tutkittu, mutta oletettavasti puun tiheyden kasvaessa myös sen lujuus ja jäykkyys kasvaa. Eli jos valmistettaisiin normaalisti kuivatusta koivusta dimensioiltaan vastaavia palkkeja kuin kuumamuovatut, olisivat ne mitä todennäköisimmin lujuudeltaan heikompia.

Alla olevassa kuvaajassa (KUVIO 46) on esitetty kolmen eri dimensioisen kuitulevyuumaisen PRT-Wood Oy:n valmistaman I-palkin sallitut kuormat kahden metrin jännevälillä. Esimerkiksi palkilla, jonka paarteet ovat 45x45 mm ja korkeus 300 mm, maksimikuorma on 3,25 kN/m. Kuvaajasta sekä myös muista PRT- lami – palkkien sallituista taipumista (LIITE 5) voidaan havaita, että kuumamuovaamalla valmistetut massiivipuiset palkit pärjäävät vertailussa ainakin taivutuslujuutensa puolesta erittäin hyvin. Toisaalta massiivipuisia I-palkkeja on

hankala suoraan verrata kuitulevyuumaisiin, sillä ne ovat esimerkiksi massaltaan suurempia. Tämän vuoksi niitä on kenties myös hankalampi käsitellä rakentamisessa. Lisäksi tässä tutkimuksessa taivutustestien jänneväli oli purilaiden pituuden vuoksi hieman alle 2 metriä, mikä toi lisää jäykkyyttä palkeille.



KUVIO 46. PRT-lami – palkkien sallittu kuorma 2 metrin jännevälillä

Taivutuslujuutensa puolesta kuumamuovatut I-palkit sopisivat alustavien testien mukaan vaikkapa käytettäväksi välipohjaelementeissä. Toinen mahdollinen käyttökohde voisi olla esimerkiksi pystypilareina seinissä. Toisaalta miinuspuolena on palkkien paino ja myös valmistusmenetelmää tulisi kehittää. Purilaista valmistettaessa palkit ovat melko lyhyitä, joten niitä tulisi sormijatkaa pidemmiksi. Lisäksi palkkien korkeus on hyvin rajoittunut, joten korkeampia palkkeja tehtäessä jouduttaisiin käyttämään raaka-aineena paksumpaa tukkia. Myös kuusesta valmistettuja kuumamuovattuja palkkeja tulisi testata, sillä kuusta käytetään ensisijaisesti puurakentamisessa ja se on koivua halvempaa.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tutkittiin massiivipuisen I-palkin valmistusta kuumamuovausteknologiaa käyttämällä. Tutkimus jaettiin kahteen osioon, palkkiaihion kuivaukseen ja palkkien lujuustestaukseen. Ensimmäisen osion tavoitteena oli kuumapuristaa koivutukin purilaista valmistettu palkkiaihio tuorekosteasta puusepänkuivaksi muutamassa tunnissa sekä puristuksen yhteydessä profiloida aihiota muottien avulla. Toisessa osiossa testattiin I-palkkien lujuutta valmistamalla purilaista pidempiä palkkeja ja testaamalla niiden maksimitaipumaa ja maksimilujuutta kolmipistetaivutuksella.

Teoriaosuudessa käsiteltiin I-palkkien käyttöä puurakentamisessa ja erilaisia markkinoilla olevia I-palkkeja, kerrottiin puun kuivauksesta ja kuivausmenetelmistä sekä Solidiwood-kuumamuovausteknologiasta sekä sen kehittäneestä Ilvolankoski Oy:stä. Nämä aiheet pohjustivat tutkimuksen keskeisiä teemoja, eli I-palkkirakennetta, puun kuivausta sekä puun kuumamuovausta.

Tutkimus oli hyvin kokeiluluontoinen ja haasteellinen, sillä vastaavanlaisella menetelmällä valmistettua palkkirakennetta ei ollut ennen tutkittu, eikä vertailukohtaa näin ollen löytynyt. Toisaalta tämä toi hyvin uutuusarvoa tutkimukselle. Tutkimuksen alku oli melko haparoivaa, kun mietittiin, mistä lähteä liikkeelle ja mitä asettaa tavoitteeksi tutkimukselle. Lopulta päädyttiin siihen, että keskityttäisiin aihion saamiseen kuivaksi puristusprosessissa sekä pienen mittakaavan lujuustestauksiin. Tuloksista voidaan päätellä, että jatkotutkimuksille olisi runsaasti aihetta.

6.1 Työn onnistuminen ja kehitysehdotukset

Palkkiaihioiden kuumamuovaukset onnistuivat vaihtelevasti. Yksisylinterisellä puristimella uuma saatiin kuivaksi, mutta paarteet jäivät kosteaksi sivulämmityksen puuttuessa. Myös profilointi onnistui kohtalaisesti ja liitokset saatiin säilymään ehjänä. Nelisylinterisellä puristimella ja sivulämmitysvastuksia käyttämällä aihiot saatiin kuivattua kokonaan tavoitekosteuteen suhteellisen lyhyessä ajassa. Myös epäsymmetrinen puristus saatiin korjattua metallisten stoppareiden avulla. Ongelmaksi jäi kuitenkin liitosten kutistuminen puun

kuivuessa nopeasti ja siitä johtuva mahdollinen liimasauman pettäminen. Toinen ongelma oli, että puristuspaine saattoi murtaa liimasauman liiman kuivuttua.

Näitä ongelmia voitaisiin lähteä ratkaisemaan kokeilemalla erityyppisiä liitosratkaisuja ja mahdollisesti jotain hitaammin kovettuvaa liimaa. Lisäksi mahdollisissa jatkotutkimuksissa voitaisiin kokeilla muita puulajeja raaka-aineena, kuten mäntyä tai kuusta. Niitä käytetään pääasiallisesti puurakentamisessa, toisin kuin koivua. Ne ovat koivua pehmeämpiä puulajeja, joista voitaisiin kuumamuovaamalla tehdä lujuudeltaan jopa tammen veroisia. Tähän tutkimukseen valittiin koivupurilaita raaka-aineeksi saatavuuden takia. Lisäksi raaka-aineena voitaisiin käyttää purilaiden sijasta tukin parempia osia, mikä tosin lisäisi raaka-aineen hintaa.

Palkkien lujuustestit antoivat lähinnä suuntaa antavaa tietoa niiden sopivuudesta rakentamiseen. Taivutuslujuutensa puolesta ne pärjäsivät vertailussa kuitulevyuumaisille palkeille, mikä oli arvattavissa jo niiden suuremman massan ja liimana käytetyn polyuretaanin lujuuden takia. Jatkotutkimuksissa tulisi testata taivutuslujuuden lisäksi myös esimerkiksi palkkien nyrjähdystä ja liitosten pitävyyttä. Puulajina voitaisiin käyttää kuusta tai mäntyä, sekä purilaista tehtyjä palkkeja voitaisiin tehdä pidemmiksi sormijatkamalla. Pelkästään lujuustestauksista saataisiin aihe lopputyölle.

Suurin haaste tutkimuksen suorituksessa oli käytetty laitteisto. Puulaboratorion puristimet sopivat lähinnä levyjen tai yksiosaisten massiivipuukappaleiden puristukseen. Moniosaiselle tuotteelle optimaalinen tulos saataisiin, jos pystyttäisiin puristamaan vähintään kolmelta sivulta hydraulisesti. Näin saataisiin myös sivuille tukevaa puristusta, jota voitaisiin lisätä tarvittaessa. Tässä tutkimuksessa yhtenä ongelmakohtana ilmenikin käsivoimin kiristettävän sivupuristuksen löystyminen puun kuivuessa ja aihion kutistuessa, minkä johdosta se ei enää tukenut kunnolla aihiota puristuksen loppuvaiheessa.

LÄHTEET

Sähköiset:

American Wood Council. 2014. Wood I-joist Awareness Guide. [Viitattu 6.2.2014]. Saatavissa: http://www.woodaware.info/PDFs/I-joists.pdf

Fisette, P. 2000. The Evolution of Engineered Wood I-Joists. University Of Massachusetts, Amherst. [Viitattu 12.2.2014]. Saatavissa http://bct.eco.umass.edu/publications/by-title/the-evolution-of-engineered-wood-i-joists/

Georgia-Pasific. 2014a. Floor and Roof Systems Product Guide - Wood I Beam™ Joists. [Viitattu 5.3.2014.] Saatavissa: http://www.buildgp.com/wood-i-beam-joists

Georgia-Pacific. 2014b. Georgia-Pacific Products. [Viitattu 7.3.2014]. Saatavissa: http://www.gp.com/Products/Products-Overview

Ilvolankoski Oy. 2013. [Viitattu 3.2.2014]. Saatavissa: http://www.ilvolankoski.fi/

Jartek Oy. 2014. Kuivaamoesite. [Viitattu 6.3.2014]. Saatavissa: http://www.jartek.fi/web/files/jartek_kuivaamoesite_fi.pdf

Koskisen Oy. 2013. I-palkki, rakentajan ykkösvalinta talon kantaviin rakenteisiin [Viitattu 24.11.2013]. Saatavissa: http://www.puuelementtiteollisuus.fi/fi/?__EVIA_WYSIWYG_FILE=24568&name=file

Lämpöpuuyhdistys Ry. 2003. ThermoWood – Käsikirja. [Viitattu 9.3.2014]. Saatavissa: http://files.kotisivukone.com/thermowood.kotisivukone.com/tiedostot/914711200401161255_twkasikirja.pdf

Metsä Wood. 2013. Finnjoist I-beams: Engineered timber I-beam joist delivering supreme performance [Viitattu 31.1.2014]. Saatavissa:

http://www.metsawood.co.uk/buildingconstruction/engineeredtimber/pages/finnjoist.aspx

Pro Puu Ry. 2008a. Puuproffa: Kuivaus. Lautatarha. [Viitattu 5.3.2014.]. Saatavissa: http://www.puuproffa.fi/proffin/index.php?option=com_content&task=view&id=91&Itemid=132

Pro Puu Ry. 2008b. Puuproffa: Kuivaus. Kamarikuivaamo. [Viitattu 15.1.2014]. Saatavissa: http://www.puuproffa.fi/proffin/index.php?option=com_content&task=view&id=92&Itemid=133

PRT-Wood Oy. 2013a. PRT I-Palkki, kevytpalkki monipuoliseen rakentamiseen. [Viitattu 24.11.2013]. Saatavissa: http://www.prt-wood.fi/sf/pdf/Prt_Ipalkki_esite%20wood.pdf

PRT-Wood Oy. 2013b. I-palkkirakenteiden suunnittelu. [Viitattu 24.11.2013]. Saatavissa: http://www.prt-wood.fi/sf/pdf/suunn.opas05%20Wood.pdf

Puuinfo. 2013. puu materiaalina. sahatavaran jatkojalosteet. I-palkit. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: http://www.puuinfo.fi/puu-materiaalina/sahatavaran-jatkojalosteet

Rämö, A., Järvinen, E., Toivonen, R. & Enroth, R. 2003. Rakennepuutuotteiden tulevaisuus Saksan markkinoilla [Viitattu 13.2.2014]. Saatavissa: http://www.ptt.fi/dokumentit/tp64_1909061433.pdf

Uotila, J. 2013. Insinöörityö. Solidiwood-kuumamuovaus, tuoreesta sahatavarasta lopputuotteeksi. Lahden ammattikorkeakoulu. [Viitattu 4.3.2014]. Saatavissa: http://theseus.fi/handle/10024/63433

Kirjalliset:

Isomäki, O. 1961. Puutavaran kuivaus ja puutavarakuivaamot. Helsinki: Suomen Sahat ry, Industria Osakeyhtiö

Marketta, S. 2002. Puutuoteteollisuus 5: Sahatavaratuotanto. 2. täydennetty painos. Helsinki: Edita

Siikanen, U. 2008. Puurakentaminen. 6. painos. Helsinki: Rakennustieto Oy

Voutilainen, M., Jussila, A., Kuikka, K., Mononen, M., Vuorenmaa, M. 1993. Puutekniikka 3: Tuotantotekniikka. 1. painos. Keuruu: Kustannusosakeyhtiö Otava

Suulliset:

Mourujärvi, J. 2014. Koulutuspäällikkö. Koskisen Oy. Haastattelu 6.3.2014

LIITTEET

LIITE 1. Taivutustesti palkille 1

Purilas I-palkkien taivutus

KOETULOKSET
Puristuskoe

Koestaja Lasse Tapaninen

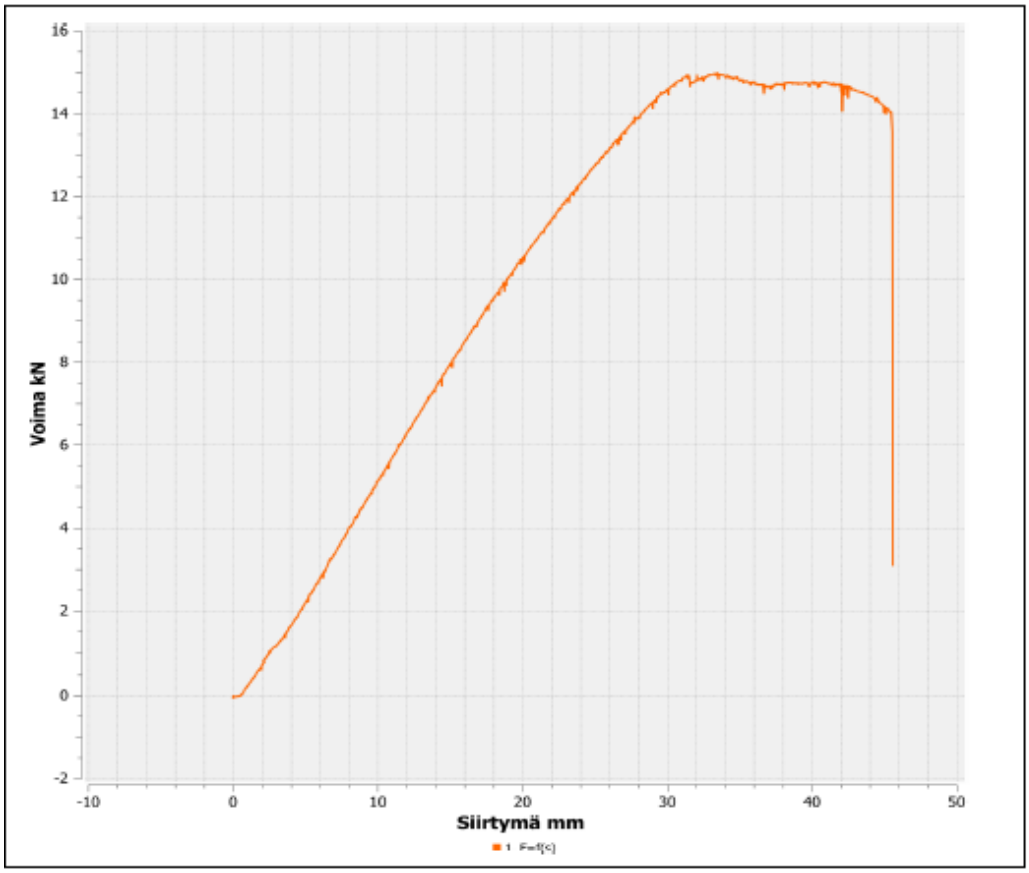
Testi	1		
Alkoi:	2014-03-21 10:06:57	Kesto:	00:05:08

Testitulokset

Kimmomoduli (E1)	kN/mm²	Jousivakio (siirtymäanturi)	kN/mm
Puristuslujuus	N/mm²	Suurin voima	kN/mm²

Syöttötiedot

Sauvan pituus L1	1875	mm	Halkaisija		mm
Suorakulmion sivu a	83	mm	Sisähalkaisija		mm
Suorakulmion sivu b	125	mm	Putkisegm. leveys		mm
Pinta-ala S0	10375.000	mm²	Koestusnopeus	0.17	mm/s



LIITE 2. Taivutustesti palkille 2

Purilas I-palkkien taivutus

KOETULOKSET
Puristuskoe

Koestaja Lasse Tapaninen

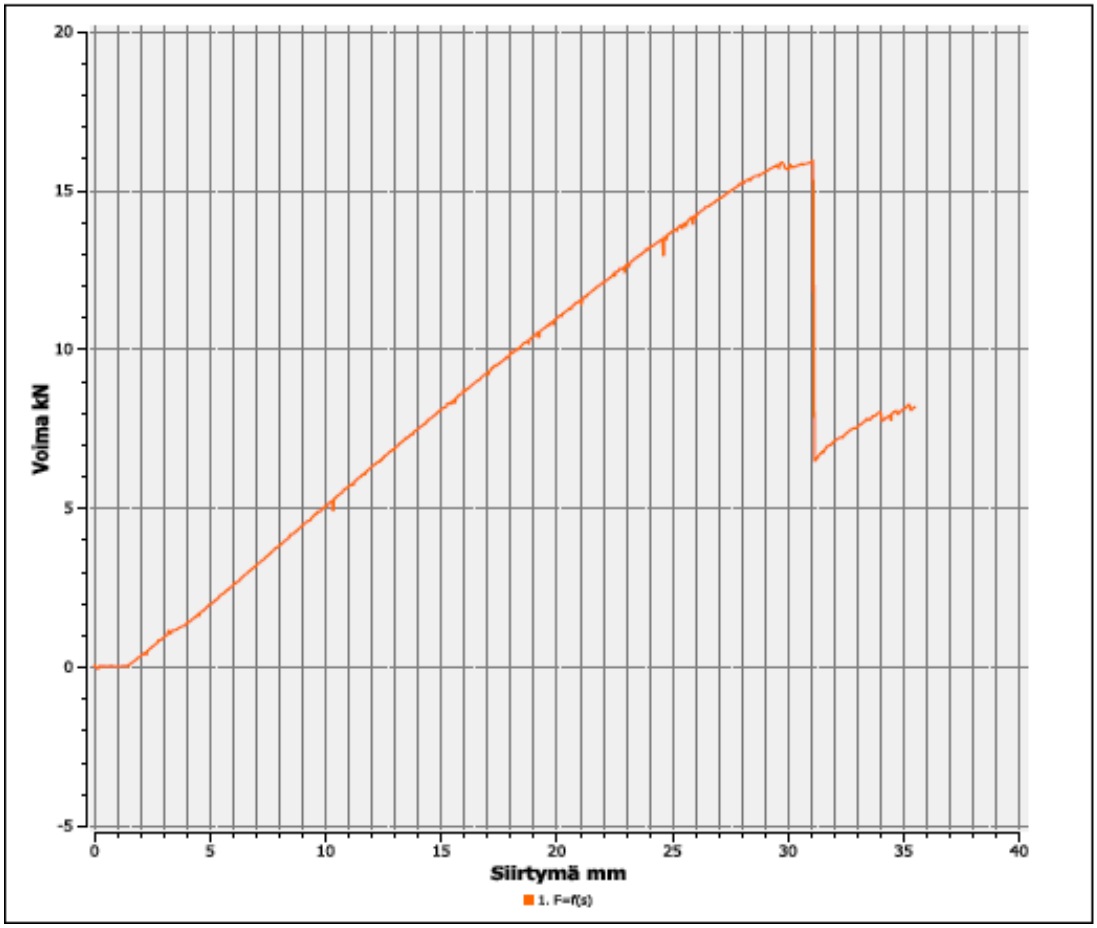
Testi	5				
Alkoi:	2014-03-21 11:37:42		Kesto:	00:04:10	

Testitulokset

Kimmomoduli (E1)		kN/mm²	Jousivakio (siirtymäanturi)	0.837	kN/mm
Puristuslujuus	1.783	N/mm²	Suurin voima	15.858	kN/mm²

Syöttötiedot

Sauvan pituus L1	1710	mm	Halkaisija		mm
Suorakulmion sivu a	78	mm	Sisähalkaisija		mm
Suorakulmion sivu b	114	mm	Putkisegm. leveys		mm
Pinta-ala S0	8892.000	mm²	Koestusnopeus	0.17	mm/s



LIITE 3. Taivutustesti palkille 3

Purilas I-palkkien taivutus

Koestaja Lasse Tapaninen

Testi 6

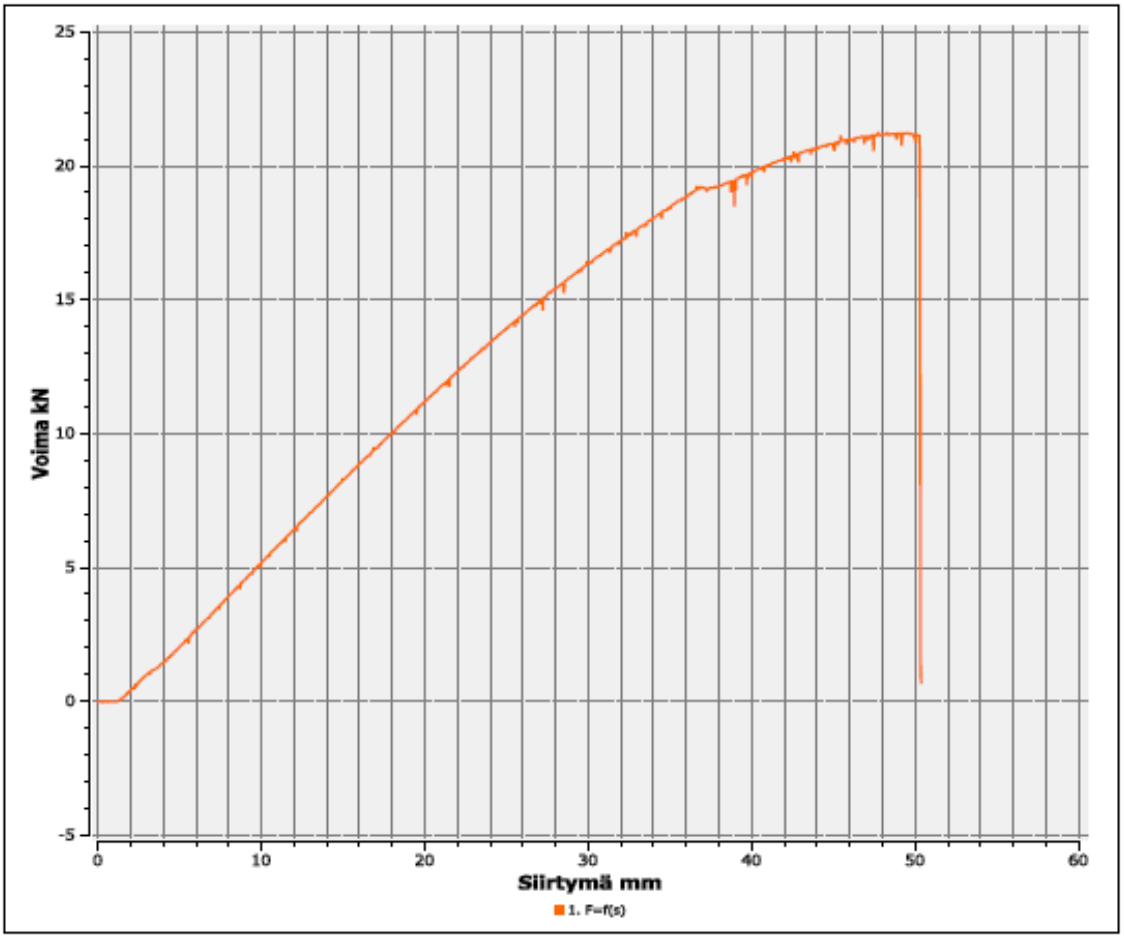
Alkoi: 2014-03-21 12:16:28 Kesto: 00:05:52

Testitulokset

Kimmokerroin (E1)		kN/mm²	Jousivakio (hienov.ant)		kN/mm
Alempi myötöraja (ReL)		N/mm²	Murtoraja	0.727	kN/mm²
Ylempi myötöraja (ReH)	2.061	N/mm²	Maksimijännitys	2.061	N/mm²

Syöttötiedot

Lo	mm	Sisähalkaisija		mm
Le	mm	Putkisegm. leveys		mm
Lc	mm	Suorakulmion sivu a	84	mm
Halkaisija	mm	Suorakulmion sivu b	123	mm
		Pinta-ala S0	10332.000	mm²



LIITE 4. Taivutustesti palkille 4

Purilas I-palkkien taivutus

Koestaja Lasse Tapaninen

Testi 7

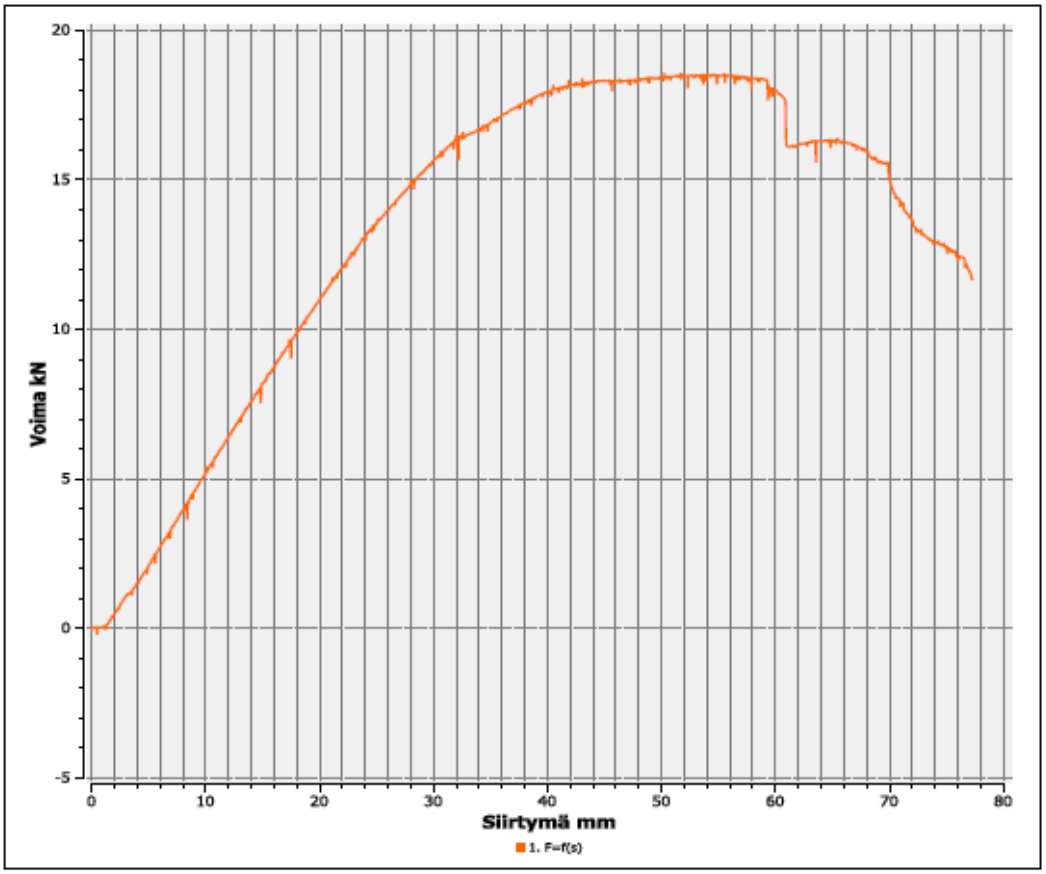
Alkoi: 2014-03-21 12:32:01 Kesto: 00:09:00

Testitulokset

Kimmokerroin (E1)		kN/mm²	Jousivakio (hienov.ant)		kN/mm
Alempi myötöraja (ReL)		N/mm²	Murtoraja	11.701	kN/mm²
Ylempi myötöraja (ReH)	1.825	N/mm²	Maksimijännitys	1.825	N/mm²

Syöttötiedot

Lo	mm	Sisähalkaisija		mm
Le	mm	Putkisegm. leveys		mm
Lc	mm	Suorakulmion sivu a	83	mm
Halkaisija	mm	Suorakulmion sivu b	123	mm
		Pinta-ala S0	10209.000	mm²

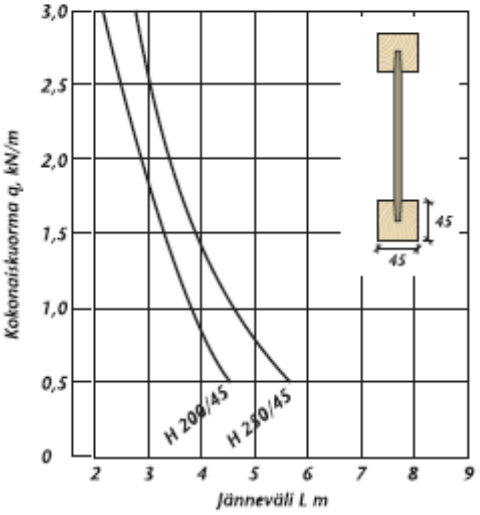


LIITE 5. PRT-lami I-palkkien sallitut taipumat

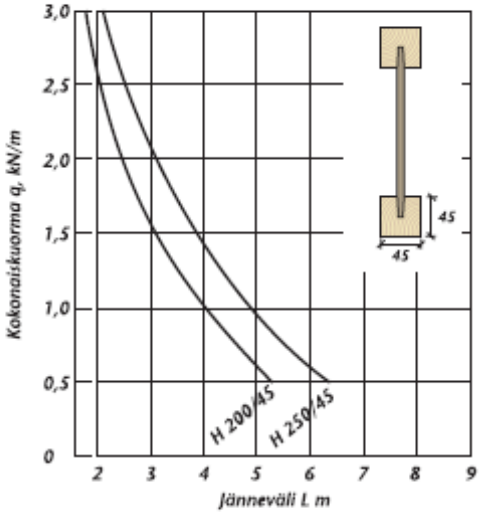
Tasaisesti kuomitetun yksiaukkoisen PRT-Lami I-palkin kuormituskapasiteetti
Aikaluokka B

q_k = ominaiskuorma (kN/m)

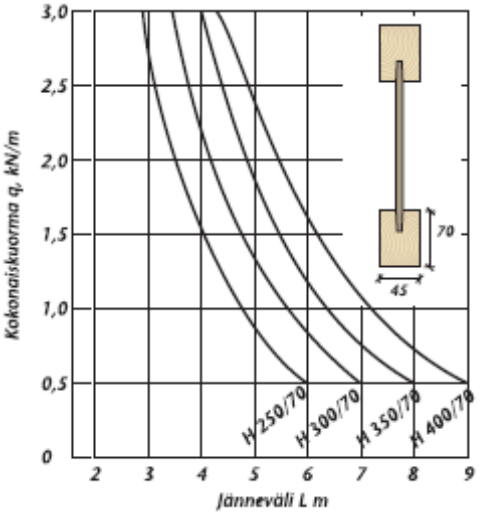
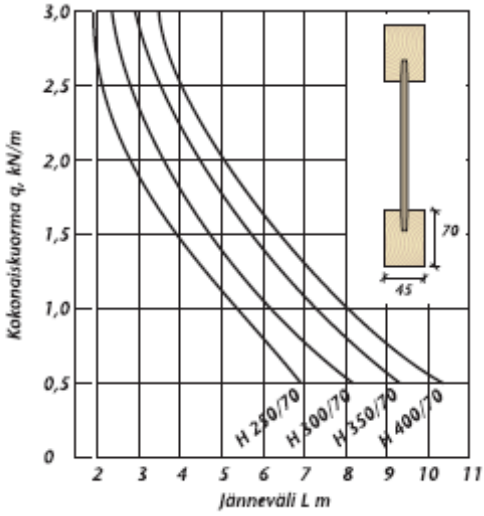
Sallittu taipuma L/300, kosteusluokka 1
Paarrekoko 45 x 45 mm



Sallittu taipuma L/200, kosteusluokka 2
Paarrekoko 45 x 45 mm



Sallittu taipuma L/300, kosteusluokka 1
Paarrekoko 45 x 70 mm



Sallittu taipuma L/200, kosteusluokka 2
Paarrekoko 45 x 70 mm