



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

PAHVISEN TUKILASTAN TUOTANNON TEHOSTAMINEN

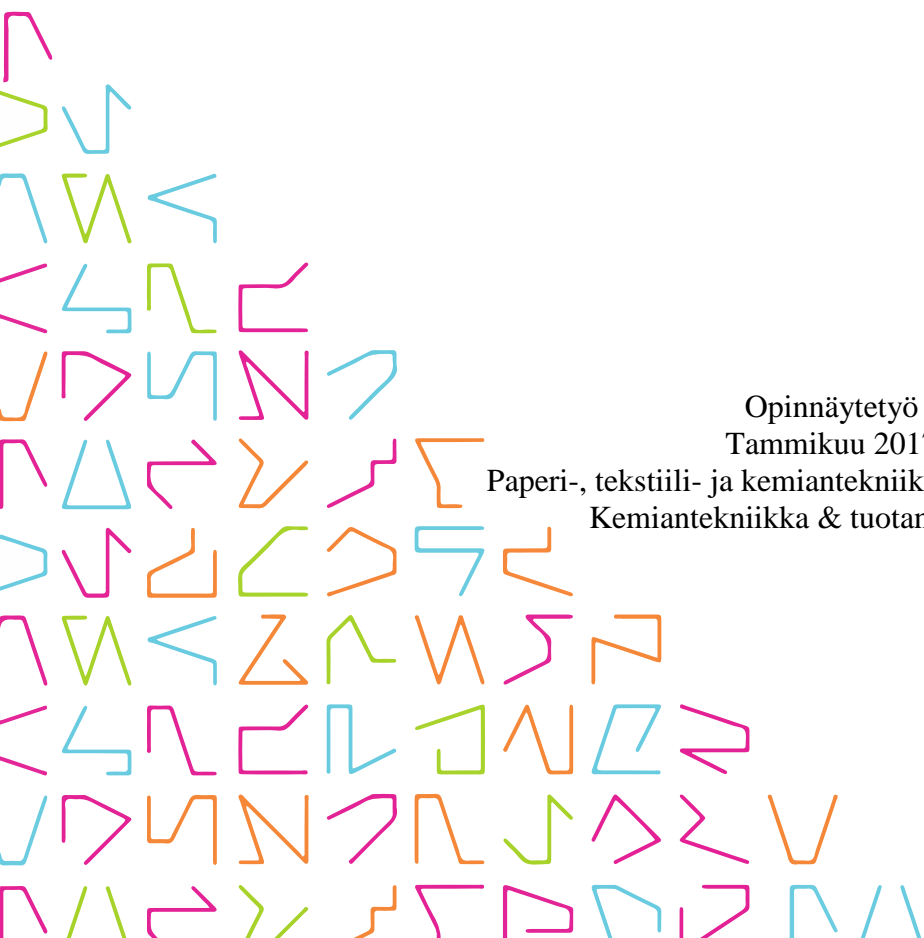
Tuotantotekniset ja materiaalia koskevat ratkaisut

Elias Myllyluoma

Piia Soili

Opinnäytetyö
Tammikuu 2017

Paperi-, tekstiili- ja kemiantekniikka & konetekniikka
Kemiantekniikka & tuotantotekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Paperi-, tekstiili- ja kemiantekniikka & konetekniikka
Kemiantekniikka & tuotantotekniikka

MYLLYLUOMA, ELIAS & SOILI, PIIA:
Pahvisen tukilastan tuotannon tehostaminen
Tuotantotekniset ja materiaalia koskevat ratkaisut

Opinnäytetyö 84 sivua, joista liitteitä 9 sivua
Tammikuu 2017

Tämän opinnäytetyön tilaaja oli Bekvil Oy, joka valmistaa pahvisia tukilastoja terveydenhuollon tarpeisiin. Pahvisten tukilastojen valmistaminen on ollut hidas prosessi, jossa on vaadittu paljon käsityötä. Tukilastojen tuotantomäärä ei ole ollut kysyntään nähden riittävä, ja siksi lastojen valmistusmenetelmää ja raaka-ainetta haluttiin kehittää. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, millainen kuitumateriaali sopii ominaisuuksiltaan parhaiten käytettäväksi tukilastassa ja millaisella menetelmällä se on mahdollista valmistaa tehokkaasti. Opinnäytetyön tavoitteena oli valmistaa protokappale uudesta raaka-aineesta ja uudella valmistusmenetelmällä.

Työssä perehdyttiin aluksi tukilastan mahdollisiin raaka-aineisiin ja valmistusmenetelmiin. Tukilastan alkuperäisen raaka-aineen, pahvin, peruslaatusuureista neliömassa, paksuus, tiheys ja taivutusjäykkyys mitattiin TAMKIn paperi- ja pakkauslaboratoriossa. Tarkoituksena oli kehittää alkuperäistä raaka-ainetta vastaava kuitumateriaali käytettäväksi kuituvalosprosessissa. Proton valmistusta eri kuitumateriaaleilla demottiin valmistamalla kuituarkkeja. Protolastaa varten suunniteltiin ja 3D-tulostettiin muotti, rajain ja muotin vastakappale.

Lopullisessa tukilastan raaka-aineen valinnassa on otettava huomioon erityisesti lastan vaatimat jäykkyys ja viranomaisten vaatimukset. Raaka-aineen ominaisuuksia on mahdollista parantaa lisäaineiden avulla. Kuituvalostekniikka valikoitui vertailun perusteella parhaaksi valmistusmenetelmäksi. Muotin avulla valmistettiin protolasta kuituvalostekniikalla alan yrityksen Ecopulp Finland Oy:n tiloissa. Protolastan raaka-aineena käytettiin yrityksen kierrätyskuitumassaa.

Protolastoilla saatiin vahvistus kuituvalostekniikan hyvästä soveltuvuudesta lastojen valmistusmenetelmäksi. Protolastan malli ei sinällään vielä ollut valmis tuotantoon, mutta sen pohjalta pystytään kehittämään muotin teknistä muotoilua ja säätämään valmistuksen parametreja. Esimerkiksi lastan jäykisteuria tulee syventää ja reunatukia muotoilla paremmin pystyssä pysyviksi. Lastan rakenteen muutos on erityisen tärkeä kuivausprosessin kannalta, jotta lastan muoto pysyisi haluttuna.

Luottamuksellista aineistoa sisältävä liite on poistettu julkisesta raportista.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Paper, Textile and Chemical Engineering & Mechanical Engineering
Chemical Engineering & Production Engineering

MYLLYLUOMA, ELIAS & SOILI, PIIA:
Improving the Production of Cardboard Medical Splint
Solutions Concerning the Manufacturing Method and Material

Bachelor's thesis 84 pages, appendices 9 pages
January 2017

This bachelor's thesis was produced in co-operation with Bekvil Oy, a company that manufactures cardboard medical splints. The manufacturing process has been manual and therefore slow. The production volume of splints has not been large enough compared to demand and that is why the manufacturing method and raw material need to be developed. The purpose of this thesis was to explore what kind of pulp would be best to use in the splints and with what kind of method the manufacturing would be efficient. The target of this thesis was to produce a proto splint with a new raw material and a new manufacturing method.

In the beginning of this thesis the potential raw materials and manufacturing methods to be used in producing a splint were investigated. The raw material of the original splints was tested in TAMK's paper and packaging laboratory. Basis weight, thickness, density and bending stiffness were tested. The goal was to develop material similar to the original raw material to be used in the molded pulp method. Production of the proto splint was tested with a number of different pulps by preparing pulp sheets. The mold, delimiter and mold's counterpart were designed and 3D-printed to produce the actual proto splint.

When selecting the final material for the splint the requirements of the public authority Valvira must be taken into consideration. Also the splint must be stiff enough. It is possible to improve the features of raw material with additives. The molded pulp method was selected as the best method on the basis of comparison. The proto splint was manufactured with the produced mold using molded pulp method. The manufacturing took place at Ecopulp Finland Oy's factory. The raw material used in the proto was company's recycled pulp.

After the proto production the molded pulp method was confirmed to be a suitable method for manufacturing the splint. The proto splint's model was not yet ready for actual production. However, with the proto, the mold's technical design can be developed and production parameters adjusted. For example, the splints reinforcement slots must be deeper and side rests should be redesigned. This redesign is crucial to the drying process, because the splint must hold its shape.

One confidential attachment was deleted from the public report.

Key words: molded pulp, pulp, manufacture, development

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	PAHVINEN TUKILASTA	8
	2.1 Bekvil Oy.....	8
	2.2 Tukilastat	8
	2.3 Pahvisen rannelastan vaatimukset.....	9
3	RAAKA-AINEET	11
	3.1 Tukilastojen nykyinen valmistusmateriaali	11
	3.2 Puu raaka-aineena	11
	3.3 Kuidut	12
	3.4 Massat	13
	3.4.1 Kemialliset massat	14
	3.4.2 Mekaaniset massat	16
	3.4.3 Puolikemialliset massat ja kemikuumahierremassat.....	18
	3.4.4 Uusiomassat	19
	3.4.5 Massojen vertailua	22
	3.5 Massan muokkaus.....	22
	3.6 Täyteaineet.....	24
	3.7 Apuaineet.....	24
4	VALMISTUSMENETELMÄT.....	27
	4.1 Nykyinen valmistusmenetelmä.....	27
	4.2 Valmistuksen kehittäminen.....	28
	4.2.1 Kuituvalostekniikka	29
	4.2.2 Purumuovikomposiitti.....	32
	4.2.3 Nykyisen menetelmän kehitys	35
	4.3 Valmistusmenetelmien vertailua.....	37
5	PROTOKAPPALEEN VALMISTUKSEN VAIHEET	39
	5.1 Kuitumassan valmistus	39
	5.1.1 Työssä käytettävät massalajit ja apuaineet.....	39
	5.1.2 Kuitumassan valmistuksen vaiheet	40
	5.2 Tasomaisen kappaleen valmistus.....	43
	5.3 Lopullisen massan ja lisäaineiden valinta.....	45
	5.4 Muotin valmistus	46
	5.4.1 Muotin suunnittelu	46
	5.4.2 Muotin 3D-tulostus	48
	5.4.3 Muotin kokoaminen	50
	5.5 Protokappaleen valmistus	52

6	TESTAUSMENETELMÄT	55
6.1	Menetelmien valinta	55
6.2	Neliömassa.....	55
6.3	Paksuus ja tiheys	56
6.4	Taivutusjäykkyys	57
6.4.1	Työn kannalta soveltuvia testausmenetelmiä.....	57
6.4.2	Testausmenetelmän valinta	58
6.4.3	Testaamiseen käytetty menetelmä.....	59
7	MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY.....	63
7.1	Neliömassa.....	63
7.2	Paksuus ja tiheys	63
7.3	Taivutusjäykkyys	64
8	KUSTANNUSLASKELMAT.....	68
9	POHDINTA.....	69
9.1	Johtopäätökset.....	69
9.2	Työn onnistuminen	70
	LÄHTEET	72
	LIITTEET	76
	Liite 1. Proton valmistuksen suunnitelma	76
	Liite 2. Taulukko valmistetuista massaeristä	78
	Liite 3. Mittauspöytäkirja: neliömassa, 2,5 mm pahvi	79
	Liite 4. Mittauspöytäkirja: neliömassa, BCTMP-arkki	80
	Liite 5. Mittauspöytäkirja: paksuus ja tiheys, 2,5 mm pahvi.....	81
	Liite 6. Mittauspöytäkirja: paksuus ja tiheys, BCTMP-arkki.....	82
	Liite 7. Mittauspöytäkirja: taivutusjäykkyys, pahvi & BCTMP-arkki.....	83
	Liite 8. Kustannuslaskelmat (Salainen julkisessa versiossa).....	84

LYHENTEET JA TERMIT

ABS	akrylinitriilibutadieenistyreeni
BCTMP	valkaistu kemikumahierre
BCP	valkaistu kemiallinen massa
CMC	karboksimeetyliselluloosa
CMP	kemimekaaninen massa
CTMP	kemikumahierre
CP	kemiallinen massa
GW	kivihioke
NSSC	semikemiallinen massatyyppe
PGW	painehioke
PGW-S	superpainehioke
PLA	polylaktidi
RMP	kylmahierre
SB	styreenibutadieeni
TGW	kuumahioke
TMP	kuumahierre

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tilaaja on Bekvil Oy, joka valmistaa tukilastoja terveydenhuollon tarpeisiin. Ekologisten, pahvisten tukilastojen valmistaminen on hidasta ja vaatii paljon käsityötä. Tukilastojen tuotantomäärä ei ole ollut kysyntään nähden riittävä, ja siksi lastojen valmistusmenetelmää ja raaka-ainetta haluttiin kehittää. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia, millainen kuitumateriaali sopii parhaiten ominaisuuksiltaan käytettäväksi tukilastassa ja millaisella menetelmällä se on mahdollista valmistaa tehokkaasti. Tavoitteena on myös valmistaa protokappale uudesta raaka-aineesta uudella valmistusmenetelmällä.

Bekvil Oy:n tarjoamista tukilastoista rannelasta on kaikista haastavin valmistaa ja siksi opinnäytetyössä on keskitytty erityisesti sen kehittämiseen. Raaka-aineista tarkasteltavaksi valittiin mäntysellu, koivusellu ja BCTMP-massa. Niistä valmistettiin tasaisia arkkeja testausta varten. Parhaaksi todetun kuitumateriaalin lujuusarvoa nostettiin erilaisten lisäaineiden avulla. Valmistusmenetelmistä työssä käsiteltiin kuituvalostekniikkaa ja purumuovikomposiittia. Lisäksi perehdyttiin vanhan valmistusmenetelmän parantamiseen. Tukilastan ominaisuuksien testaukseen valittiin lastan vaatimusten kannalta oleelliset testausmenetelmät: neliömassa, paksuus ja taivutusjäykkyys.

Tämän opinnäytetyön rahoitti TAMKIn TKI-tukisäätiö. Opinnäytetyö toteutettiin parityönä. Elias Myllyluoma opiskelee kemiantekniikkaa ja Piia Soili konetekniikkaa. Teoriaosuudessa käytettiin hyväksi tiimin monialaisuutta. Elias keskittyi raaka-aineisiin ja Piia valmistusmenetelmiin.

2 PAHVINEN TUKILASTA

2.1 Bekvil Oy

Bekvil Oy on nelihenkinen perheyrittäjä, joka valmistaa monipuolisesti erilaisia liikkumisen ja kuntoutuksen apuvälineitä. Bekvil Oy valmistaa tuotteita niin mittatilaustyönä kuin massatuotteina sarjoissa. Päätuotteina ovat erilaiset kävelykepit ja kyynärsauvat. Valikoimaan kuuluu myös erilaisia pahvisia tukilastoja. Bekvil Oy on perustettu vuonna 1973 ja sen arvopohjan perustana ovat kotimaisuus, laadukkuus, turvallisuus sekä ympäristöystävällisyys. (Bekvil Oy 2013.)

2.2 Tukilastat

Yksi Bekvil Oy:n tuoteryhmistä ovat pahviset hoitolastat (jatkossa tukilasta). Tukilastoja on kuutta eri mallia eri tarkoituksiin: saapaslasta, pitkä reisi/lantiolasta, taka- ja säärilasta, olkavarsilasta, rannelasta sekä kulmalasta. Kutakin lastaa on myös useaa eri kokoa ja tarpeen mukaan molemman puoleisia (oikea & vasen). (Bekvil Oy 2016.) Bekvil Oy toimittaa lastoja pääasiassa suuriin kotimaisiin osto-organisaatioihin, esimerkiksi yliopistollisiin keskussairaaloihin.

Pahviset tukilastat ovat kertakäyttöisiä ja ne on tarkoitettu pidettäväksi vain muutamien tuntien ajan, esimerkiksi ennen leikkausta. Tämän takia lastan kierrätettävyys on erittäin tärkeää. Pahviset tukilastat valmistetaan pääosin käsityönä, minkä takia kaikkien tukilastojen valmistusprosessit vaativat kehittämistä. Tässä opinnäytetyössä keskitytään erityisesti rannelastoihin, koska niiden valmistus on haastavinta. Rannelastoja on kuutta eri kokoa, joista pienin on pituudeltaan 13 cm ja suurin 33 cm (Bekvil Oy 2016). Esimerkkilastana tässä opinnäytetyössä on käytetty 21 cm pituista rannelastaa (504D). Kaikki rannelastat näkyvät kuvassa 1.



KUVA 1. Rannelastat (Bekvil Oy 2016)

Rannelastan on tarkoitus pitää potilaan käsi paikallaan kanyylin käytön aikana. Kun lastaa käytetään, sen ympärille pujotetaan harso, joka antaa pehmeyttä ja parantaa näin käyttökokemusta. Lasta sidotaan käteen joustositeellä ja rannelastan muotoilussa on pyritty antamaan kädelle mahdollisimman hyvä tuki. Lastan valmistusmateriaalina käytettävällä pahvilla on hyvä kaasunläpäisevyys, eli se on myös hyvin hengittävä materiaali.

2.3 Pahvisen rannelastan vaatimukset

Pahviset rannelastat ovat kertakäyttöisiä, joten niiden tulee olla helposti kierrätettäviä. Myös tuotteen ekologisuus on tärkeää, eikä lasta saa rasittaa ympäristöä liikaa. Nykyisellä menetelmällä ei pystytä vastaamaan kotimaan kysyntään. Lastojen valmistuksen tulisi olla kustannustehokasta ja nopeaa, jotta ekologisia tukilastoja voitaisiin valmistaa myös vientituotteiksi.

Lastan tulee olla hengittävä, sillä se lisää käyttömukavuutta. Muovisia samankaltaisia tukilastoja on markkinoilla muutamia, mutta hengittämätön materiaali ei ole käyttäjälle mukava. Muovi materiaalina ei ole myöskään ekologinen, mikä pienentää sen haluttavuutta markkinoilla.

Rannelastan tulee olla tarpeeksi tukeva, jotta käsi pysyy paikallaan halutussa asennossa. Tukemisen vahvistamiseksi nykyisen lastan pohjaan on niitattu vanerinen tukipuu, joka näkyy kuvassa 2. Materiaalina käytettävä paksu pahvi pysyy muodossaan ja tukee kättä

hyvin. Vanerisesta tukipuusta olisi hyvä päästä eroon, sillä sen jälkiasennus tuo ylimääräistä työtä ja täten myös lisäkustannuksia. Tällä hetkellä tukipuu on kuitenkin välttämätön, sillä se pitää koko rannelastan koossa. Bekvil Oy:n verkkokaupan hinnaston (2016) mukaan lastoja myydään kymmenen tuotteen paketeissa. Paketin hinta on 43,90 € postikuluineen, jolloin lastan kappalehinta on 4,39 €. (Bekvil Oy 2016.)



KUVA 2. Lastan pohja

Lastan muotoilu mukaillee rannetta niin, että se on käyttäjälleen ergonominen ja että ranne pysyy käyttötarkoituksen mukaisessa asennossa. Tuotteen muotoilua muutetaan tarpeen vaatiessa valmistusmenetelmään sopivaksi. Muotoilua muutetaan lähinnä pohjasta ja sivuilta. Tuotteen kättä vasten tuleva puoli pysyy samanlaisena, eikä ergonomiaan tai sisämuotoihin tehdä muutoksia. Muotoilua tehdään siis vain valmistusmenetelmän niin vaatiessa ja tuotteen tukemisominaisuuksien parantamiseksi.

Valvira eli sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto asettaa myös tuotteelle vaatimuksia. Valvira valvoo terveydenhuollon laitteiden ja tarvikkeiden vaatimustenmukaisuutta ja turvallista käyttöä. Terveydenhuollossa käytettävien tuotteiden tulee olla turvallisia käyttäjilleen. Tuotteet eivät esimerkiksi saa sisältää ihmisen terveydelle haitallisia aineita. (Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto Valvira 2009.)

3 RAAKA-AINEET

3.1 Tukilastojen nykyinen valmistusmateriaali

Nykyisenä valmistusmateriaalina tukilastoissa käytetään Smurfit BB-kartonkia, jota voidaan kutsua myös kirjankansipahviksi. Valmistuksessa on käytetty 100-prosenttista kierätysjätettä. Pahvi koostuu kolmesta kerroksesta, jotka on liimattu toisiinsa polyvinyyli-alkoholi pohjaisella tärkkelysliimalla. (Teräväinen 2016a.)

3.2 Puu raaka-aineena

Puu on raaka-aineena ekologinen vaihtoehto. Paperi- ja kartonkituotteiden osalta puun kolme tärkeintä komponenttia ovat selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini. Muita puun komponentteja ovat uutteen (noin 2–5 prosenttia puun koostumuksesta) ja tuhka (noin 0,5 prosenttia puun koostumuksesta). Puun komponenttien suhde eroaa toisistaan eri puulajien kohdalla; esimerkiksi lehtipuissa on suurempi hemiselluloosapitoisuus kuin havupuissa, ja havupuissa on suuremmat selluloosa- ja ligniinipitoisuudet kuin lehtipuissa. Havupuilla on myös tyypillisesti lehtipuita pehmeämpi rakenne. (Isotalo 2004, 40.)

Selluloosa

Selluloosa on puuaineksen sisältämien hiilihyaattien pääaines, jonka osuus puun koostumuksesta on noin 40 prosenttia, riippuen puulajista. Glukoosianhydrideistä koostuva selluloosa määritellään polysakkaridiksi. Selluloosa voidaan kirjoittaa kaavalla: $C_6H_{10}O_5$. Puukuutujen hyvät lujuusominaisuudet ovat peräisin selluloosan kyvystä muodostaa vetysidoksia viereisten molekyylien kanssa. Selluloosakuitujen turpoaminen johtuu kuiduissa olevien järjestymättömien alueiden vapaiden hydroksidiryhmien ja vesimolekyylien välisistä vetysidoksista. Veden poistuttua selluloosakuidusta sellumolekyylien välille muodostuu vahvoja vetysidoksia, jotka saavat aikaan kuitujen hyvät sidosominaisuudet. Selluloosakuitujen turpoamista saadaan kasvatettua elektrolyyttiliuoksilla. Selluloosalla on ominaisuus sitoa vettä itseensä, mutta myös luovuttaa sitä. (Isotalo 2004, 40–43.)

Hemiselluloosa

Hemiselluloosa on saanut nimensä selluloosasta, koska aikaisemmin sen luultiin syntyvän välituotteena selluloosan biosynteesissä. On kuitenkin todettu, että hemiselluloosabiosynteesi tapahtuu muualla kuin selluloosassa. Heteropolysakkarideihin kuuluva hemiselluloosa koostuu monosakkaridiyksiköistä, jotka omaavat useita eri rakenteita. Hemiselluloosan osuus puun koostumuksesta on noin 24–38 prosenttia. Hemiselluloosalla on taipumus helppoon uuttautumiseen alkalien vesiliuoksilla, happojen kanssa hemiselluloosa hydrolysoituu. Hemiselluloosan osuus vaihtelee suuresti eri puulajeilla. Myös yksittäisen puun hemiselluloosapitoisuus jakautuu epätasaisesti puun eri osiin. (Isotalo 2004, 46–47.)

Ligniini

Ligniinin rakennetta ei ole pystytty määrittelemään kunnolla useista tutkimuksista riippumatta. Ligniinin on kuitenkin tutkittu sisältävän fenyylipropaaniyksiköistä koostuvia monimutkaisia polymeerejä. Rakenteiden tiedetään poikkeavan toisistaan eri kasvien välillä. Ligniinin osuus puun koostumuksesta on noin 20–30 prosenttia. Ligniinin tarkoituksena on antaa puulle suuremmat lujuusarvot sekä olla veden kulkeutumisen esteenä puun soluseinämien välissä. Ligniini on liittynyt hemiselluloosaan kovalenttisin sidoksien soluseinämässä. Puutuotteiden ja papereiden kellastuminen johtuu ligniinistä. Havupuilla on lehtipuita suuremmat ligniinipitoisuudet (Isotalo 2004, 50–51.)

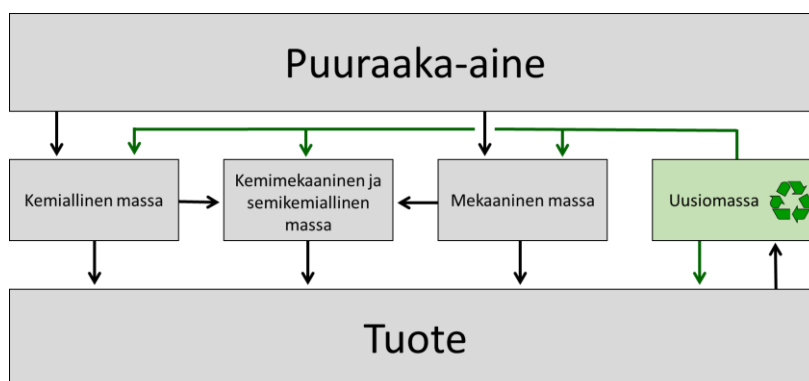
3.3 Kuidut

Puukuidut ovat kasvisoluja, jotka ovat erikoistuneet kasvamaan pituutta rungon suuntaisesti. Kehitysvaiheessa soluseinämään alkaa muodostua selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä. Puukuitujen välillä on suuria eroja sekä yksittäisessä puussa, että eri puulajien välillä. Kuitupitoisuus riippuu puun kasvunopeudesta – hitaammin kasvanut puu omaa suuremman kuitupitoisuuden kuin nopeasti kasvanut. Havupuilla on lehtipuita pidemmät ja paksummat kuidut. Kuidun leveys ja kuituseinämän paksuus vaihtelevat puulajien mukaan. Näihin ominaisuuksiin vaikuttaa myös se, onko kyseessä kevät- vai kesäpuu. On olemassa myös niin sanottuja puuttomia kuituja (non-wood fibres), joihin lukeutuvat esimerkiksi bambu-, puuvilla- ja riisikuidut. (Karlsson 2006, 18; Isotalo 2004, 24, 31, 34–35.)

Kuiduilla on suuri vaikutus paperin ominaisuuksiin. Paperin ominaisuuksia parantavia tekijöitä ovat esimerkiksi kuidun pituus, leveys, pituusmassa ja kuituseinämän paksuus. Paperin lujuusominaisuuksien kannalta kuidun pituus on todella tärkeä asia, sillä pidemmät kuidut parantavat paperin lujuutta. Kuituseinämällä on suuri merkitys puun jatkokäsitelyssä sekä paperin ominaisuuksien kannalta. (Isotalo 2004, 24,31,33–35.)

3.4 Massat

Erilaisia massoja käytetään paperi- ja sellutuotteiden raaka-aineena. Raaka-aineena käytettävät massat voidaan jakaa periaatteessa neljään ryhmään ominaisuuksien, hinnan ja valmistusmenetelmän mukaan: kemiallisiin, mekaanisiin, näiden yhdistelmiin sekä uusiomassoihin. Uusiomassaa on myös mahdollista lisätä muiden massojen sekaan. Massan valmistuksessa puuraaka-aine kuitutetaan. Kuidutuksella tarkoitetaan puun kuitujen erottamista toisistaan mekaanisesti tai kemiallisesti. Massojen valmistuksen puuraaka-aineena käytetään yleisesti ottaen puuhaketta. Hakkeen ominaisuudet, kuten kosteus ja koko vaihtelevat massan valmistusmenetelmän mukaan. Hakkeen tärkeä ominaisuus on homogeeninen laatu eli tasalaatuisuus. Valmistettavalta tuotteelta vaaditut ominaisuudet vaikuttavat pitkälti siihen, minkälaista massaa käytetään tuotteen raaka-aineena. (Seppälä ym. 1999, 31.) Kuviossa 1 havainnollistetaan eri massojen kiertokulkua puuraaka-aineesta tuotteeksi.



KUVIO 1. Massojen kierto puuraaka-aineesta tuotteeksi Seppälän ym. mukaan (Seppälä ym. 1999, 31)

3.4.1 Kemialliset massat

Kemiallisella massalla tarkoitetaan sellua, josta puuraaka-aineen muut komponentit on erotettu pois kemiallisesti. Sulfaattisellu kattaa valtaosan kaikesta maailmassa valmistetusta sellusta (Metsäyhdistys 2016). Sulfaattisellun valmistus tapahtuu keittämällä puuhake keittokemikaalissa eli valkolipeässä. Valkolipeä koostuu natriumhydroksidin ja natriumsulfidin seoksesta. On tärkeää, että keittokemikaali liuottaa tehokkaasti hakkeessa olevaa ligniiniä ja mahdollisimman vähän selluloosaa. Puuraaka-aineena on mahdollista käyttää havu- tai lehtipuista valmistettua haketta, jonka valmistamiseen käytetään kuitupuuta. (Seppälä ym. 1999, 75; Kuitujen erottaminen kemiallisesti 2015.)

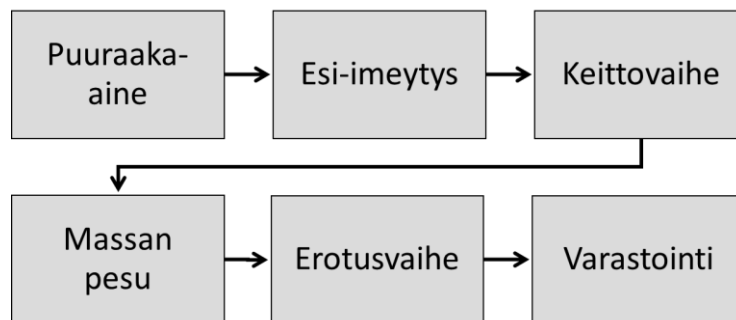
Sulfaattikeitto

Keittotyyppejä on kaksi, eräkeitto ja vuokeitto. Eräkeitolla tarkoitetaan panosprosessia, missä tietty määrä raaka-ainetta keitetään kerrallaan. Vuokeitto on jatkuvatoiminen prosessi, jossa lisätään jatkuvasti raaka-ainetta ja kemikaaleja. Keitossa tarvittava lämpöenergia saadaan höyrystä, joko suoralla tai epäsuoralla tavalla. Epäsuorassa tavassa lämmönsiirtymiseen käytetään lämmönvaihdinta. Keiton sivutuotteena saatavaa mustalipeää voidaan käyttää höyryn ja sähkön valmistamisen polttoaineena soodakattilassa. (Seppälä ym. 1999, 75.)

Eräkeitossa sulfaatin keitto tapahtuu tilavuudeltaan noin 160–400 kuutiometrin kokoisissa teräksestä valmistetuissa paineastioissa. Lämpötila keiton aikana nousee 1–2 tunnissa 165–170 celsiusasteeseen, jossa haketta keitetään noin 1–1,5 tuntia. Hidas lämpötilan nousu keiton aikana on tärkeää, jotta keittokemikaalit pääsevät imeytymään hakkeeseen. Paineastiassa olevan keittokemikaalin paino on noin neljä kertaa suurempi kuin keittävän hake-erän kuiva paino. Eräkeitossa on kuitenkin huonompi hyötysuhde kuin vuokeitossa, joten se on jäänyt pois ison mittakaavan massan tuotannosta. Eräkeittoa käytetään vielä kuitenkin pienemmän mittakaavan massanvalmistuksessa esimerkiksi laboratorioissa. (Seppälä ym. 1999, 84; Isotalo 2004, 62.)

Vuokeitossa sulfaatin keitto tapahtuu korkeassa pystymallisessa keittimessä. Keittimessä on kaksi vyöhykettä, keittovyöhyke ja pesuvyöhyke. Keittoprosessin alussa keittokemikaalina toimivaa valkolipeää ja puuraaka-aineena toimivaa haketta syötetään esi-imeytystorniin, missä valkolipeä pääsee imeytymään puuhakkeeseen. Esi-imeytystornista hakkeen ja lipeän seosta syötetään keittimeen sen yläpäästä. Keittovaiheen aikana puuhake

laskeutuu keittimessä keittovyöhykkeen läpi, jonka aikana tapahtuu puun kuituuntuminen eli selluloosa erottuu puuraaka-aineesta. Muut puun komponentit liukenevat lipeään. Keiton loppuvaiheessa keittokemikaali on muuttunut mustalipeäksi. Mustalipeä poistetaan keittimestä imemällä se pois imusihtien läpi ennen keittimen pesuvyöhykettä. Keittimen alaosassa olevassa pesuvyöhykkeessä selluloosa pestään laihamustalipeällä. Sellun seasta erotetaan roskat ja oksat takaisin kiertoon. Erotusvaiheessa pyritään alentamaan massan ligniinipitoisuutta happivaiheella ja valkaisuilla. Happivaiheen aikana jopa puolet massan senhetkisestä ligniinistä saadaan liuotettua pois. Tämä perustuu hapen pelkistymisessä syntyviin voimakkaisiin hapettimiin, peroksidi- ja hydroksidiradikaaleihin. Parempaan vaaleuden saavuttamiseksi happivaiheen jälkeen massalle on suoritettava valkaisu, josta kerrotaan enemmän kappaleessa 3.5. Molempien vaiheiden jälkeen suoritetaan massan pesu. Lopuksi selluloosa johdetaan puskurisäiliöön. Sellu voidaan myös kuivata nesteestä, mikäli logistiikka sen vaatii. (Isotalo 2004, 62–64, 91–92.) Alla olevassa kuviossa 2 on esitetty sulfaattisellun valmistuksen eri vaiheet.



KUVIO 2. Sulfaattisellun valmistuksen vaiheet Seppälän ym. ja Isotalon mukaan (Seppälä ym. 1999, 84, 91; Isotalo 2004, 62, 64)

Ominaisuudet

Kemiallista massaa (CP) käytetään raaka-aineena silloin, kun vaaditaan lopputuotteelta hyviä lujuusominaisuuksia. Kemiallisen massan valmistuksessa kuidut erotetaan toisistaan kemiallisesti, joten ne eivät vahingoitu mekaanisen liikkeen vaikutuksesta. Kemiallisissa massoissa saanto on huomattavasti alhaisempi kuin mekaanisissa massoissa, joissa se on vain 40–55 prosenttia. Kemiallinen massa sisältää pääasiassa pelkästään selluloosaa, eikä muita puun komponentteja kuten mekaaninen massa. (Seppälä ym. 1999, 74–75.)

Massan ominaisuuksiin vaikuttavat useat tekijät keiton aikana: käytettävä puuraaka-aine, keitossa käytettävän liuoksen pH ja keittokemikaalien pitoisuus, keittämisaika, lämpötila

ja paine. Näistä kaikista tekijöistä tärkeimpänä pidetään puuraaka-aineena käytettävän hakkeen laatua. Hakkeen tulisi olla mahdollisimman tasalaatuista hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi. (Seppälä ym. 1999, 74–75; Haketyypit 2015.)

Selluloosaa on mahdollista jatkojalostaa edelleen, jolloin sellua kutsutaan liukoselluksi. Liukosellun jatkojalostus tapahtuu kemiallisesti ja sen tarkoituksena on pienentää tavallisen selluloosan ligniini- ja hemiselluloosapitoisuutta entisestään. Liukosellun saanto on pienempi kuin tavallisella selluloosalla, vain noin 30–40 prosenttia. (Isotalo 2004, 59,78.)

3.4.2 Mekaaniset massat

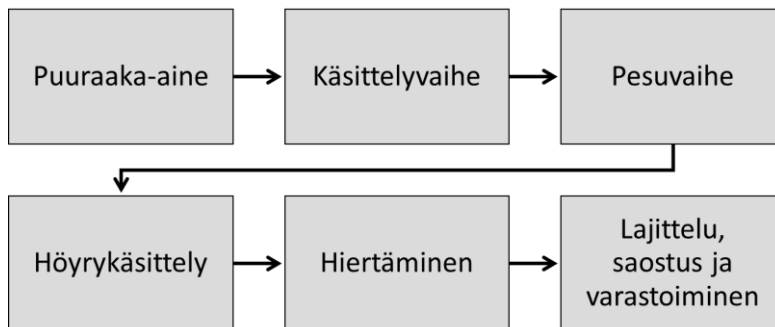
Mekaanisten massojen valmistus tapahtuu kitkan ja lämmön avulla. Menetelmiä mekaanisten massojen valmistamiseen ovat hierteen ja hiokkeen valmistaminen. Raaka-aineeksi mekaanisille massoille kelpaavat pehmeät havupuulajit, kuten kuusi ja mänty. (Isotalo 2004, 59.)

Valmistus

Hierteen valmistuksessa raaka-aineena käytetään yleisesti kuusesta valmistettua puuhaketta. Prosessin alussa hake käsitellään seulonnessa, missä purujae erotellaan pois ja ylisuuri hake ohjataan takaisin kiertoön murskaimen kautta. Hake pestään kuumalla vedellä, minkä tarkoituksena on poistaa hakkeen seasta purut, kivet ja muut hakkeeseen kuulumattomat epäpuhtaudet. Pesuvaiheesta tullut hake höyrykäsitellään ja esilämmitetään. Hiertovaiheessa hake hierretään kartio- tai levyjauhimilla. Puuhake ohjataan jauhimen terien väliin, missä tapahtuu murskaantumisen johtuva kuituuntuminen. (Seppälä ym. 1999, 57, 60; Isotalo 2004, 59–60.)

Erilaisia massatyyppejä ovat kylmähierre (RMP) ja kuumahierre (TMP). Kuumahierteen valmistaminen eroaa kylmähierteen valmistamisesta lämpötilan ja paineen suhteen; kuumahierteen valmistamisessa lämpötila on 115–135 celsiusastetta ja paine 100–300 kilopascalia. Etuna on se, että puussa oleva ligniini pehmenee lämpötilan vaikutuksesta, mikä helpottaa kuituuntumista ja säilyttää kuidut ehjempinä. Lajitteluvaiheessa hierre ohjataan painelajittimilla, joiden avulla pyritään poistamaan mahdollisimman paljon hierteeseen kuulumattomia epäpuhtauksia ja pitämään hierteen jauhatusasteen muuttuminen mahdollisimman pienenä. Prosessin loppuun tapahtuu hierteen saostus ja varastoiminen. Hierteen

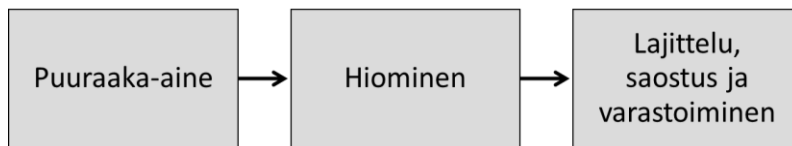
saostus tapahtuu yleisimmin kiekkosaastrimilla. Kuviossa 3 on esitetty lohkokaaavion avulla hierteenvalmistuksen eri vaiheet. (Seppälä ym. 1999, 57, 60, 65; Isotalo 2004, 59–60.)



KUVIO 3. Hierteenvalmistuksen vaiheet Seppälän ym. ja Isotalon mukaan (Seppälä ym. 1999, 57, 60, 65; Isotalo 2004, 59–60)

Hiokkeen valmistuksessa raaka-aineena käytetään kuorittuja kuusipöllejä. Pöllit painetaan männän avulla hiomakoneen suurta sylinterinmallista hiomakiveä vasten siten, että puiden kuidut ovat pyörivän hiomakiven akselin suuntaisia. Samanaikaisesti hionta-
vyöhykkeeseen suihkutetaan lämmintä vettä. Hiomakiven pinnan epätasaisuudet painavat kasaan puun kuituja, mikä heikentää puuta, kunnes se alkaa kuituuntua. Hiokkeen eri massatyyppejä ovat kivihioke (GW), kuumahioke (TGW), painehioke (PGW) ja superpainehioke (PGW-S). (Seppälä ym. 1999, 49, 52–53, 57; Isotalo 2004, 59–60.)

Hiokkeet eroavat toisistaan valmistuksessa käytettävän paineen ja veden lämpötilan suhteen. Myös hiomakoneen kivellä ja sen pyörimisnopeudella on merkitystä hiokkeen koostumukseen. Hionnan jälkeen hioke menee lajitteluvaiheeseen, jossa poistetaan hiokkeeseen kuulumattomia epäpuhtauksia. Niitä ovat kuorenkappaleet, hiomakivestä irronneet rakeet, hiekka, tikut ja kivet. Karkeassa lajittelussa poistetaan suurimmat epäpuhtaudet tärylajittimella. Hienolajittelussa hiokkeen seasta poistetaan kooltaan pienemmät epäpuhtaudet painelajittimien ja sykloneiden eli pyöröpuhdistimien avulla. Lopuksi tapahtuu hiokkeen saostaminen ja varastointi. Kuviossa 4 on esitelty karkeasti hiokkeenvalmistamisen eri vaiheet lohkokaaviossa. (Seppälä ym. 1999, 49, 52–53, 57; Isotalo 2004, 59–60.)



KUVIO 4. Hiokkeenvalmistuksen vaiheet Seppälän ym. ja Isotalon mukaan (Seppälä ym. 1999, 49, 52–53, 57; Isotalo 2004, 59–60)

Ominaisuudet

Mekaanisten massojen valmistaminen vie paljon energiaa, mutta korkean saannon (lähes 100 prosenttia) takia ne ovat edullinen raaka-aine paperi- ja kartonkituotteissa. Mekaaniset massat omaavat myös hyvät painatusominaisuudet. Huonona puolena mekaanisissa massoissa voidaan pitää lujuusominaisuuksia: kuidut vaurioituvat käsittelyn aikana, ja niiden lujuusominaisuudet heikkenevät. (Seppälä ym. 1999, 73–74.)

3.4.3 Puolikemialliset massat ja kemikuumahierremassat

Puolikemiallisella massalla ja kemikuumahierremassalla tarkoitetaan massoja, joiden valmistuksessa käytetään sekä mekaanista että kemiallista massanvalmistusmenetelmää. Näihin yhdistelmiin voidaan lukea semikemialliset (puolisellut) ja kemimekaaniset massat, joista semikemiallisissa massoissa on käytetty enemmän hyödyksi kemiallista valmistustapaa. Eri massatyyppejä ovat kemikuumahierremassa (CTMP), kemimekaaninen massa (CMP) ja NSSC-massa. (Isotalo 2004, 60.)

Valmistus

Puolikemiallisten massojen ja kemikuumahierremassojen valmistuksessa on aluksi kemiallinen käsittelyvaihe, joka pehmentää puussa olevaa ligniiniä ja saa kuidut irtoamaan helpommin toisistaan. Tätä kutsutaan neutraalisulfiittimenetelmäksi. Kemimekaanisen massan raaka-aineena käytetään yleisesti lehtipuuta. Kuidutusvaihe tapahtuu kiekko-kuiduttimella, se on hellävaraisempi menetelmä kuin mekaanisten massojen valmistamisessa käytettävät menetelmät. Viimeisessä vaiheessa massa puhdistetaan keittonesteestä pesemällä suotimien ja pesupuristimien avulla. (Isotalo 2004, 60.)

Semikemialliset massat, kuten NSSC-massa valmistetaan käyttäen mahdollisimman paljon mekaanista ja kemiallista massanvalmistusmenetelmää. Massan valmistus aloitetaan imeytysvaiheesta ja sitä seuraavasta keittovaiheesta, kuten myös kemiallisten massojen

valmistus. Tämän jälkeen kuidut erotetaan toisistaan mekaanisessa jauhatusvaiheessa. Menetelmällä saadaan massalle kemimekaanista massaa suurempi selluloosapitoisuus. Semikemiallisen massan valmistusmenetelmä mukautetaan yleensä lopputuotteen mukaan. Tämän takia valmistusmenetelmät eroavat toisistaan. Puuraaka-aineena käytetään yleensä koivua, koska jäykkyydellä on suurempi merkitys lopputuotteen kannalta kuin lujuusominaisuuksilla ja kuitupituudella. (Isotalo 2004, 60; Semikemiallinen massa 2015.)

Ominaisuudet

Mekaanisten ja kemiallisten valmistusmenetelmien yhdistelmällä saadaan massalle haluttuja ominaisuuksia halvempaan hintaan. Kemimekaanisten massojen saanto on 86–90 prosenttia ja semikemiallisten massojen 65–85 prosenttia. (Semikemiallinen massa 2015; Industrial Efficiency Technology Database 2016.)

3.4.4 Uusiomassat

Uusiomassoilla tarkoitetaan kierrätetystä paperi- ja kartonkijätteestä valmistettuja massoja. Uusiomassan raaka-aineena käytetään kierrätyspaperia ja -kartonkia. Kierrätysraaka-aineen laatu vaikuttaa siihen, mihin käyttökohteisiin uusiomassa soveltuu. Parhaana laatuluokkana voidaan pitää painamattomia puupitoisia papereita, kun taas heikoimpaan luokkaan kuulu epäpuhtauksia sisältävä kotitalouksesta kerättävä paperi. (Sepälä ym. 1999, 68–71.)

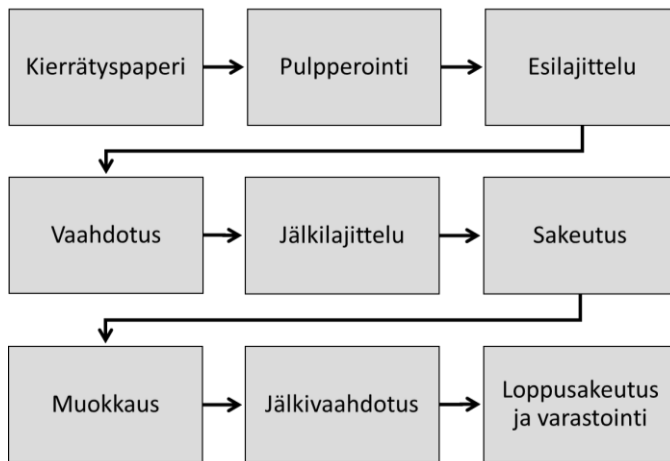
Siistaus

Uusiomassasta on mahdollista poistaa painovärit sekä muut täyte- ja lisäaineet. Tätä prosessia kutsutaan siistaukseksi. Ensimmäinen vaihe siistausprosessissa on pulpperointi, jossa siistattava kierrätysmateriaali johdetaan kuidutusrummun läpi. Siellä sakeudeltaan noin viisiprosenttinen kuituuntunut materiaali pääsee rummun seinämissä olevien reikien kautta eteenpäin, kun taas muut kierrätysmateriaalissa olevat jakeet otetaan talteen kuidutusrummun toisesta päästä. Esilajittelussa kuitumateriaalista poistetaan muita epäpuhtauksia, kuten pieniä niittejä. Vaahdotusvaiheessa kierrätysmateriaalin sakeus on noin yksi prosentti. Vaahdotus tapahtuu altaassa, jossa vaahdotuskemikaalina käytetään saippuaa. Altaan pohjassa olevien suuttimien läpi syötetään ilmaa. Pinnalle noustessaan ilmakuplien ulkoseinämiin kiinnittyy painoväripartikkeleja, joista muodostuu altaan pinnalle

vaahtoa. Altaan pinnalle muodostunut vaahto juoksetetaan toiseen altaaseen, jossa sama prosessi toistetaan. Lopuksi toisen altaan pinnassa oleva vaahto käsitellään kuiva-ainepitoisuudeltaan 40-prosenttiseksi linkouksen avulla ja otetaan talteen. (Seppälä ym. 1999, 70–71.)

Jälkilajittelussa kuituraaka-aine ajetaan ensimmäiseksi pyörrepuristimiin, joiden tarkoituksena on erottaa siitä raskaammat jakeet sekä hiekka. Tämän jälkeen kuitumateriaalista poistetaan painelajittimilla epäpuhtauksia, kuten teippejä, muovia ja liimoja. Jälkilajittelun viimeisessä vaiheessa kuituraaka-aineelle tehdään käänteinen pyörrepuhdistus, jossa kuituraaka-aineen seasta saadaan erotettua epäpuhtauksia sisältäviä kevyempiä jakeita. Sakeutusvaiheessa kuitumateriaalin sakeus laskee 30 prosenttiin. Tämä vaihe alkaa kiekkosäostimestä ja päättyy kuituraaka-aineen puristamiseen, joka tapahtuu ruuvi- ja kaksoisviirapuristimien avulla. (Seppälä ym. 1999, 70–71.)

Muokkausvaiheessa kuituraaka-aineesta saadaan erotettua painoväreistä peräisin olevia jätteitä. Osa jätteistä irtoaa kuiduista ja osasta muodostuu näkymättämiä partikkeleja. Muokkaaminen tapahtuu levyjauhimissa, joihin voidaan tarvittaessa lisätä pihkatalkkaa ehkäisemään painovärijäämien uudelleensaostumista. Saippuattomassa jälkivaahdotusvaiheessa pyritään poistamaan kuituraaka-aineesta kaikki jäljellä olevat epäpuhtaudet ja kemikaalit. Vaahdotus on muuten samanlainen kuin ensimmäinen vaahdotusvaihe, lukuun ottamatta saippuan käyttöä vaahdotuskemikaalina. Loppusakeutuksessa kuituraaka-aineen sakeutetaan 10-prosenttiseksi kiekkosäostimellä, jonka jälkeen se on valmis varastoitavaksi. Siistausprosessissa syntynyt jätevesi selkeytetään flokkauks- ja flotaatioprosesseilla ennen varsinaiseen jäteveden käsittelyyn menemistä. Flokkauksella tarkoitetaan erotusprosessia, missä jätevedessä oleva kiintoaine pyritään laskeuttamaan puhdistusaltaan pohjalle, kun taas flotaatiossa kiintoaine nostetaan altaan pintaan vaahdotuksen avulla. (Seppälä ym. 1999, 70–71.) Kuviossa 5 esitellään yksinkertaisesti siistausprosessin vaiheet.



KUVIO 5. Siistausprosessin vaiheet Seppälän ym. mukaan (Seppälä ym. 1999, 68–71)

Ominaisuudet

Käytettäessä uusiomassaa kuituraaka-aineena on otettava huomioon, että uusiomassan kuidut ovat saattaneet käydä läpi paperinvalmistusprosessin useitakin kertoja. Paperinvalmistusprosessissa kuitujen ominaisuudet ja rakenne ovat voineet muuttua jauhatuksen, kemikaalikäsittelyjen ja kuivatuksen myötä. Erityisesti kuivausvaihe saa aikaan muutoksia kuidun rakenteessa, minkä vuoksi uusiomassaa käytettäessä kuituraaka-aineena on huomioitava, etteivät kaikki kuidut välttämättä enää turpoa. Tämä aiheuttaa kuitujen katkeilemista mekaanisessa jauhatusvaiheessa, mistä johtuen uusiomassanjauhatuksessa saattaa muodostua suuri lyhytkuitujae (muuten samanlainen kuin tuoremassoilla). Hellävaraisella jauhatuksella saadaan kuitenkin ehkäisyä kuitujen katkeilua. (Seppälä ym. 1999, 71.)

Uusiomassoja on mahdollista käsitellä myös kemiallisesti. Kemiallisen käsittelyn etuna on kuitujen sitomiskyvyn ja lujuuden parantuminen, mikä johtuu kuitujen turpoamisesta. Kemiallisessa käsittelyssä kuitujen väri myös vaalenee. Käsittelytavasta riippumatta uusiomassaan jää kuitenkin aina jäämiä kemikaaleista, joilla voi olla vaikutusta jatkojalostusprosesseissa. (Seppälä ym. 1999, 71.)

Uusiomassan valmistamisella on hyvä energiatehokkuus, mikä johtuu papereiden ja kartonkien kierrätysraaka-aineen käytöstä puuraaka-aineen sijaan. Energiaa ei kulu puiden hankintaan eikä muokkaamiseen (hierteen valmistamiseen). Uusiomassalla on korkea käyttöaste, sillä tuhannesta kilosta keräyspaperia on mahdollista valmistaa noin 850 kiloa uusiomassaa. Huonoksi puoleksi voidaan mainita, että uusiomassassa olevien kuitujen ominaisuudet ovat sitä heikommat, mitä useammin niitä on kierrätetty. Tuotteilla, joissa

uusiomassaa on käytetty raaka-aineena, on myös heikompi hygieniataso kuin ensikuiduista valmistetuilla tuotteilla. Tämä johtuu uusiomassaan jääneistä kemikaalijäämistä sekä muista kierrätysjätteen mukana tulleista epäpuhtauksista. (Seppälä ym. 1999, 68–71; Uusiokartonki kartonkilajina 2015.)

3.4.5 Massojen vertailua

Eri massojen ominaisuudet poikkeavat suuresti toisistaan, minkä vuoksi oikean massan valinta on todella tärkeä asia valmistettavan tuotteen kannalta. Pitkiä kuituja omaava massa antaa tuotteelle paremmat lujuusominaisuudet, kun taas lyhyet kuidut parantavat tuotteen painokelpoisuutta. Myös valmistuskustannuksilla on suuri rooli massan valinnassa: erilaisten massojen kustannukset määräytyvät pääosin valmistusprosessin saannon ja energiankulutuksen mukaan. Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty yhteenveto massojen tyypillisistä ominaisuuksista. (Karlsson 2006, 24.)

TAULUKKO 1. Eri massojen tyypillisiä ominaisuuksia Karlssonin 2016 mukaan (Karlsson 2006, 24)

Ominaisuus	Massatyyppi		
	Kemiallinen	Mekaaninen	Yhdistelmät
Saantoaste	40-55 %	90-95 %	55-90 %
Valkaistavuus	Hyvä	Huono	-
Puulejit	Havu- ja lehtipuut	Lehtipuut	Molemmat
Painettavuus	Huono	Hyvä	-

3.5 Massan muokkaus

Eri massalajeja on mahdollista muokata lisää valmistusprosessin jälkeen. Muokkaamisella tavoitellaan massalle tiettyjä ominaisuuksia, kuten parempia lujuusarvoja sekä vaaleampaa väriä. Massan muokkausmenetelmiä ovat muun muassa jauhatus ja valkaisu, joista on kerrottu tarkemmin seuraavissa kappaleissa.

Massan jauhatus

Jauhatuksella haetaan valmistettavalle tuotteelle lisää lujuutta. Jauhatuksessa muokattava paperimassa syötetään jauhimille, joissa tapahtuu kuitujen muokkaantuminen mekaanisesti jauhinterien välissä. Prosessissa tapahtuu useita suoraan kuituun vaikuttavia muutoksia.

Jauhatuksessa kuitujen uloimman kerroksen satunnaisen poistumisen eli ulkoisen fibrillaation ansiosta kuidut pystyvät muodostamaan entistä enemmän sidoksia keskenään, mikä kasvattaa valmistettavan tuotteen lujuusarvoja. Kuiduissa tapahtuu myös sisäistä fibrillaatiota, joka päästää veden kuidussa olevan seinämän lamellien väliin, mikä johtaa kuidun turpoamiseen, mistä seuraa kuidun notkistuminen. Kuitujen suoruus vaihtelee sen mukaan, minkälainen jauhatettavan paperimassan sakeus on. Massan sakeuden kasvaessa tapahtuu entistä enemmän kuitujen käyristymistä. Kuiduista ja niiden seinämistä vapautuu jauhatuksessa pieniä hienoainepartikkeleita, jotka myös parantavat kuiduissa muodostuvia sidoksia. Jauhatuksessa tapahtuu myös tuotteen toivottuja ominaisuuksia heikentäviä asioita, kuten kuitujen katkeilemista, joka jahtaa lujuusarvojen heikkenemiseen. Myös kuidun tarpeettoman suuri liukeneminen on ei-toivottu ominaisuus jauhatuksessa. Jauhatus tekee luonnollisesti paperimassasta entistä tiheämpää, mikä näkyy suoraan valmistettavan tuotteen suurentuneessa painossa sekä neliömassassa. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 112–114.)

Massan valkaisu

Tietyissä tuotteissa käytettävän massan vaaleudella on väliä, mikäli halutaan tuotteelle esimerkiksi puhtaan valkoinen pinta. Valkaisematon massa sisältää enemmän epäpuhtauksia ja massan väriin vaikuttavia aineita kuin valkaisuprosessin läpikäynyt massa. Massan värin kannalta suurin vaikuttava tekijä on ligniini, joka on mahdollista valkaista tai poistaa massan seasta mahdollisimman tarkasti. Kemiallisen massan valmistuksessa ligniinin poisto tapahtuu massanvalmistuksen yhteydessä. Mekaanisissa massoissa on mahdollista käyttää ligniiniä säästävää valkaisua, jossa ligniinin väriä pyritään muuttamaan. Valkaisuprosessi lisää luonnollisesti valmistettavan tuotteen kustannuksia. Prosessi kuluttaa myös paljon puhdasta vettä ja kemikaaleja. (Seppälä ym. 1999, 122.)

3.6 Täyteaineet

Täyteaineita ja erilaisia kemikaaleja käytetään parantamaan tuotteen ominaisuuksia, mutta myös alentamaan raaka-ainesta koostuvia kustannuksia. Täyteaineet ovat hienojakoisia ja kuituja suuremman tiheyden omaavia pigmenttijauheita, joiden tehtävä on täyttää kuitujen välissä olevat tyhjät tilat, mutta myös mahdolliset sidoskohdat. Täyteaineilla haetaan tuotteelle erityisesti painokelpoisuutta parantavia ominaisuuksia ja edullisempia raaka-ainekustannuksia. Huonona ominaisuutena täyteaineen lisääminen pienentää massan kuitupitoisuutta, joka laskee valmistettavan tuotteen lujuusominaisuuksia. Lujuusominaisuuksien heikkeneminen johtuu täyteaineiden aiheuttamasta massan kuitupitoisuuden laskemisesta ja kuitujen muodostamien vetysidosten estymisestä. Yleisesti käytössä olevia täyteaineita ovat kalsiumkarbonaatti, kaoliini ja talkki. Täyteaineina voidaan käyttää myös erikoispigmentejä, jotka ovat perinteisiä täyteaineita tehokkaampia, mutta niiden hinta saattaa olla todella korkea. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 37–39.)

3.7 Apuaineet

Kemikaaleja, joita käytetään parantamaan massan ominaisuuksia sekä helpottamaan valmistusprosessin toimintaa, kutsutaan apuaineiksi ja prosessin apuaineiksi. Apuaineiden avulla saadaan parannettua valmistettavan tuotteen lujuutta, väriä, vedenhylykivyyttä, tulenarkuutta, homeenarkuutta, ruosteenestoa, tuoksua, makua, elintarvikesoveltuvuutta, imukykyä, jälkiliimautumista tai kitkattomuutta. Apuaineita on mahdollista lisätä suoraan massan sekaan tai vasta prosessin myöhemmässä vaiheessa liimapuristimen avulla. Prosessin toimintaa edistämään käytettävillä apuaineilla on mahdollista säätää pH-arvoa, torjua limaa, estää likaantumista ja vaahtoamista, ehkäistä dispergointia ja pihkaa sekä poistaa vettä, kiinnittymistä ja retentiota. Prosessin toimivuutta parantavat aineet saattavat vaikuttaa negatiivisesti valmistettavan tuotteen ominaisuuksiin. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 42–43.)

Kuivalujaliimat

Kuivalujaliimat parantavat nimensä mukaan paperimassan kuivalujuutta. Kuivuessaan paperimassan puukuidut kiinnittyvät toisiinsa muodostaen kuituverkon vetysidoksilla. Kuivaliiman tarkoituksena on tehostaa kuitujen sitoutumista erityisesti muiden paperi-

massassa olevien täyteaineiden kanssa. Tuotteen lujuuden kasvattamisessa kuivaliiman käyttö on selluloosan jauhatusta parempi vaihtoehto, mikäli tuotteen tiheyttä ei haluta kasvattaa huomattavasti. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 43.)

Kuivaliimoja on pääasiassa kahdenlaisia; luonnosta saatavia ja synteettisesti valmistettuja. Tärkeimpänä kuivaliimana pidetään luonnosta saatavaa tärkkelystä $(C_6O_{10}H_5)_n$, jolla on samanlainen kyky muodostaa vetysidoksia kuin selluloosalla (Starch Structure 2016). Tärkkelys kuuluu selluloosan tapaan polysakkaroideihin eli pitkäketjuisten hiilihydraatien ryhmään. Molekyyliarakenteeltaan tärkkelysmolekyyli on hyvin samanlainen kuin puukuiduissa esiintyvä selluloosamolekyyli. Kuivaliimana käytetty tärkkelys on muutettu kemiallisesti voimakkaasti kationikseksi lisäämällä molekyyliin kationisia ryhmiä. Uudelleen käyttöön otetuista kiertokuiduista valmistetuissa kartongeissa on käytetty tavallisesti apuaineena kuivaliimaa. Kuivaliiman lisääminen paperimassaan antaa tuotteelle paremmat lujuusominaisuudet ja suuremman jäykkyysarvon. Huonoina ominaisuuksina voidaan mainita repäisylujuuden pieneminen, mittapysyvyys, pienimittainen neliömassan vaihtelu ja kasvaneet valmistuskustannukset. Lisäksi kosteissa olosuhteissa tärkkelys menettää kuiturakenteen lujuutta parantavat ominaisuutensa (Aaltopahvi kartonkilajina 2015). (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 43; Pitkäketjuiset hiilihydraatit 2015.)

Märkälujaliimat

Paperin imiessä vettä sen kuitujen väliset vetysidokset aukeavat, mikä johtaa paperin lujuuden äkilliseen heikkenemiseen. Vetysidokset eivät palaudu täysin ennalleen edes paperin kuivuttua, mikä johtaa paperin lujuusominaisuuksien pysyvään heikkenemiseen. Märkälujaliimat parantavat paperin lujuutta märkänä. Tätä apuainetta sisältävällä märällä paperilla on paremmat lujuusarvot kuin kuivalla. Märkälujaliimat estävät paperin kuitujen välisiä vetysidoksia aukeamasta muodostamalla kuitujen ja polymeerien välisiä sidoksia. Paperin märkälujuus voi olla vain hetkellinen ominaisuus, joka katoaa tietyn ajan kuluttua paperin kastumisesta, mutta myös pysyvä, jolloin paperin lujuus ei heikkene ajasta riippumatta. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 44.)

Märkälujaliimat koostuvat pienimolekyyllisistä polymeereistä ja ne ovat synteettisesti valmistettuja. Erilaisia keinoja kasvattaa paperin märkälujuutta ovat rikkihappokäsittely, muut kemikaalit ja pitkien kuitujen käyttäminen paperimassan seassa. Rikkihappokäsittely antaa paperille myös paremman rasvankeston. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 44.)

Hydrofobiliimat

Hydrofobinen tarkoittaa vettä hylkivää ja hydrofiilinen tarkoittaa vettä vastaanottavaa. Esimerkiksi hyvin vettä imevä talouspaperi on hydrofiilistä ja hyvin vettä hylkivä leivinpaperi on hydrofobista. Hydrofobisessa pinnassa vesipisara ei imeydy materiaaliin vaan jää pinnalle pallomaiseen muotoon. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 45.)

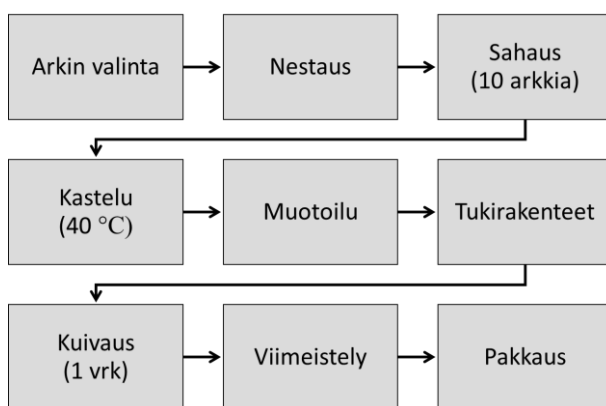
Paperin hydrofiilisuus vaihtelee suuresti eri massalajien välillä. Mekaaniset massat sisältävät kemiallista massaa enemmän ligniiniä ja muita puussa olevia uuteaineita, mikä tekee massasta hydrofobisemman kuin kemiallinen massa. Myös massan valkaisu laskee hydrofobisuutta. Uusiomassan hydrofobisuus riippuu kiertoa tulleista raaka-aineista sekä massan pesusta. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 45.)

Hydrofobiliimat voidaan jakaa kahteen ryhmään; hartsi- ja neutraaliliimoihin. Hartsiliimat valmistetaan luonnon hartseista kun taas neutraaliliimat ovat synteettisesti valmistettuja. Edullisemmat hartsiliimat toimivat paremmin massan pH:n ollessa happamalla alueella, mutta niitä täytyy annostella massan sekaan enemmän kuin neutraaliliimoja. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 46–47.)

4 VALMISTUSMENETELMÄT

4.1 Nykyinen valmistusmenetelmä

Bekvil Oy:ssä pahvisten tukilastojen valmistus on tällä hetkellä suurimmalta osin käsityötä. Tukilastojen valmistuksessa ei pystytä vastaamaan kysyntään ja suuri käsityön osuus tekee valmistuksesta kallista, minkä takia valmistustapaa tulee kehittää. Vaiheet ovat melko yksinkertaisia, mutta esimerkiksi sahaus on pölyämisen takia todella epämiellyttävä vaihe. Kuivausvaihe kestää vuorokauden, mikä tekee prosessista pitkäkestoisen. Valmistuksen vaiheet on esitetty seuraavassa kuviossa 6 olevassa prosessikaaviossa.



KUVIO 6. Nykyinen valmistusmenetelmä Teräväisen mukaan (Teräväinen 2016b)

Valmistus alkaa kartonkiarkin valinnalla, johon vaikuttavat lastan koko ja käyttötarkoitus. Arkkeja on kahta eri paksuutta, 1,5 mm ja 2,5 mm, joista ohuempaa käytetään pieniin ja paksumpaa isoihin lastoihin. Arkille piirretään tarvittava määrä lastoja, huomioiden kartongin taipumissuunta ja arkin mahdollisimman tarkka hyödyntäminen. Arkin taipumissuunta on tärkeä, koska arkki taittuu helpommin toiseen suuntaan, mikä vaikuttaa suoraan lastojen tukiominaisuuksiin. Samankokoisia arkkeja laitetaan kymmenen päällekkäin, joista ylimpänä on piirretty arkki. Tämän jälkeen kappaleet sahataan tarkasti piirrettyjä viivoja pitkin. Arkkipinojen suoraan sahattavissa pinnoissa käytetään pöytäsiirkeliä ja vaikeammassa kaarevissa pinnoissa vannesahaa. Sahaamisessa syntyy todella hienojakoista pölyä, jota ei saa kokonaan imettyä imureilla. Pölystä syntyy sotkua ja hengityssuojaimen käyttö on välttämätöntä, mikä tekee sahaamisesta prosessin epämiellyttävimmän vaiheen. (Teräväinen 2016b.)

Sahaamisen jälkeen kappaleet kastetaan hetkeksi noin 40 celsiusasteiseen veteen, mikä tekee niistä helpommin taivutettavia ja muokattavia. Kastellut kappaleet muotoillaan käsin haluttuun muotoon apuvälineiden ja puisten muottien avulla. Osaan lastoista lisätään tukirakenteita, esimerkiksi rannelastaan kapea vanerilevy. Vanerilevy lisää rannelastaan tarvittavaa tukevuutta vielä käytössäkin. Lastat ovat muotoilun jälkeen vielä kosteita, joten niitä kuivataan tämän jälkeen kuivausmuoteissa ja -telineissä. Kuivuminen tapahtuu huoneilmassa ja se kestää noin vuorokauden. Normaalisti lastat jätetään kuivumaan päivällä ja otetaan pois seuraavana aamuna. (Teräväinen 2016b.)

Kuivaamisen jälkeen lastat viimeistellään ja tarkistetaan. Tuotteen tulee olla siisti ja muodon pitää olla pysynyt. Tämän jälkeen tuote kootaan kymmenen lastan myyntiyksiköihin ja pakataan kiristekalvon avulla. Pakettiin liimataan lopuksi etiketti, joka sisältää tukilastojen tunnistetiedot. (Teräväinen 2016b.)

4.2 Valmistuksen kehittäminen

Nykyisen valmistusmenetelmän suurimpia ongelmia ovat käsityön suuri osuus, sahauksen epämiellyttävyys ja kuivauksen hitaus. Nämä asiat tekevät valmistusprosessista suuritöisen, epämiellyttävän ja pitkäkestoisen. Kuivaus tapahtuu muoteissa ja kuivaustilaa on rajallisesti, joten yhden vuorokauden aikana pystytään tekemään rajallinen määrä tuotteita. Prosessin hitaus ja käsityön suuri osuus nostavat lastojen valmistuskustannuksia. Lisäksi lastoja ei ehditä tekemään kysynnän vaatimaa määrää.

Uutta valmistustekniikkaa etsittäessä ja vanhaa kehittäessä tulee huomioida yrityksen toiveet ja tuotteen vaatimukset. Bekvil Oy:n toiveena on valmistaa kotimaisia ja ekologisia tukilastoja kustannustehokkaasti. Tietysti tuotteen tulee olla myös hengittävä ja täyttää Valviran terveydelliset vaatimukset. Kuituvalostekniikka ja purumuovikomposiitti sopivat molemmat lastojen valmistusmenetelmäksi. Niiden tekniikoista ja soveltuvuuksista tukilastan valmistukseen on kerrottu enemmän seuraavissa kappaleissa. Myös nykyisen valmistuksen osa-alueiden kehittämistä on pohdittu.

4.2.1 Kuituvalostekniikka

Kuituvalostekniikkaa käytetään eniten pakkausten valmistuksessa, mutta sitä voidaan soveltaa myös uusilla ja innovatiivisilla tavoilla. Kuituvalostekniikalla valmistettu pakkaus on hyvä suojaamaan arkoja tuotteita. Kuvassa 3 on esimerkki kuituvalostekniikalla valmistetusta pakkauksesta. Ecopulp Finland Oy (jatkossa Ecopulp Oy) käyttää pääosin kuitumateriaalia, joka on edullista ja luontoa säästävää kierrätyskuitua. (Ecopulp Finland Oy 2016.)



KUVA 3. Kuituvalospakkaus (Ecopulp Finland Oy 2016)

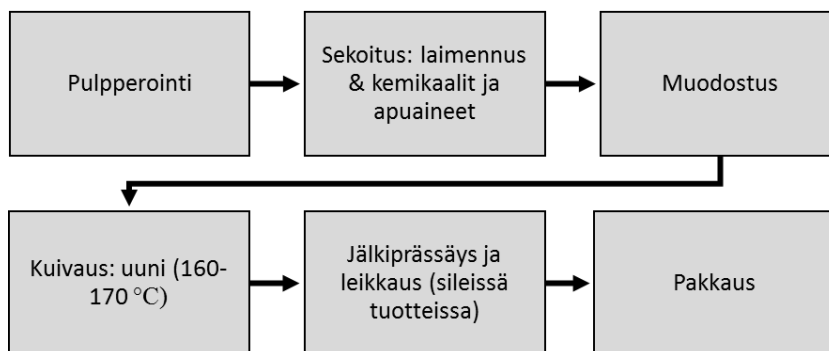
Edut

Kuituvalostekniikalla hyvin todennäköisesti olisi mahdollista valmistaa myös Bekvil Oy:n tukilastoja, koska raaka-aineena käytetty biohajoava kuitumateriaali tekisi niistä kompostoitavia. Lisäksi kuituvalostekniikalla tuotetuissa tuotteissa korostuu ympäristövastuullisuus valmistuksessa käytettävän, täysin kierrätettävän kuitumateriaalin ansiosta. Kyseisellä tekniikalla valmistetut tuotteet ovat myös hengittäviä, mikä lisää tukilastojen käyttömukavuutta. Tekniikka mahdollistaa suuren tuotantomäärän valmistamisen nopeasti, joka optimoisi tukilastojen kustannustehokkaan tuotannon. Lisäksi tuote olisi täysin kotimainen.

3D-muotoiltavuuden ansiosta tukilastasta myös saataisiin halutun muotoinen sekä tarpeeksi tukeva, eli nykyisin käytettävä vanerinen tukielementti olisi tarpeeton. Tukilastat pystyttäisiin myös pinoamaan myyntieriin nykyisen kaltaisesti. (Ecopulp Oy 2016).

Tekniikka

Kuituvalostekniikalla valmistetussa tuotteessa käytetään useimmiten kokonaan kierrätyspaperista koostuvaa raaka-ainetta. Muita mahdollisia materiaaleja ovat esimerkiksi turve, viljan korsi tai puupohjaiset raakamateriaalit kuten puumassa, hamppu ja palmu. Raaka-aineet voivat olla tuoreita tai kierrätettyjä, mutta kierrätetyillä raaka-aineilla ei kuitenkaan aina pääse aivan samoihin ominaisuuksiin kuin tuoreilla raaka-aineilla. (Shealy 2008, 6–7; Ecopulp Finland Oy 2016.) Kuituvalostekniikassa tuotteiden valmistus tapahtuu kokonaan koneellisesti. Seuraavassa kuviossa 7 on esitetty kuituvalosprosessin eteneminen.



KUVIO 7. Kuituvalosprosessi Ecopulp Oy:n mukaan (Ecopulp Finland Oy 2016)

Kuituvalosprosessin alussa valittu raaka-aine liuotetaan vedessä hienoiksi kuiduiksi eli pulpperoidaan, jonka jälkeen kuitumassan sekaan lisätään kemikaaleja ja lisäaineita. Tämän jälkeen seos pumpataan altaaseen, josta se imetään alipaineen avulla muotteihin. Samalla kun kiintoaine jää muottien ympärille, nestemäisessä massassa oleva vesi erottuu pois. Imua pidetään muutama sekunti vielä muotin noston jälkeen, jotta tuote kuivuu ja pysyy sen ansiosta ehjänä muotin vaihdon ajan. Prosessin koneilla on suljettu vesijärjestelmä, joka puhdistaa ja uudelleenkäyttää veden, jolloin prosessissa ei synny lainkaan jätevettä. (Shealy 2008, 6–7; Ecopulp Finland Oy 2016.)

Kuituvalostuotteen paksuutta voidaan säädellä imuajalla ja kuitumassan sakeudella. Imuaikaa tai kuitumassan sakeutta lisäämällä saadaan paksumpia tuotteita. Pääasiallinen muodostuminen tapahtuu kuitenkin ensimmäisten sekuntien aikana. Imuaukkojen paikoituksella ja tiheydellä pystytään vaikuttamaan massan jakautumiseen. Massa keskittyy helpommin niihin kohtiin, joissa imuaukkoja on tiheämmin. (Hovila 2016.)

Kuituvalostuote siirretään muodostusmuotista siirtomuottiin puhaltamalla muodostusmuotin ja imemällä siirtomuotin läpi. Tällöin kuituvalostuote säilyy ehjänä. Siirtomuotin

tarkoitus on siirtää tuote uuniin vievälle hihnalle. Muodostuksen jälkeen kostea tuote kuivataan 160–170 °C lämpötilaisessa uunissa. Uunin lämpötila vaihtelee tuotteen koon mukaan: suurilla tuotteilla lämpötilan tulee olla korkeampi. Uunissa tuote kuivuu, jolloin se saa lopullisen muotonsa ja tarkemmat mittasuhteet. (Hovila 2016.) Kuivaamisen aikana saattaa ilmetä esimerkiksi mikrohalkeamia tai epämuodostumia, jotka voivat johtua liian nopeasta kuivumisesta, ylikuivumisesta tai epätasaisesta kuivumisesta (Shealy 2008, 8). Uunin jälkeen tuote painaa enää vain noin ¼ märkäpainostaan. Kuivuessaan aihio kutistuu noin 2,5 %, mikä saattaa aiheuttaa ongelmia ja on huomioitava jo muotin suunnittelun aikana. (Hovila 2016.)

Kuivauksen jälkeen tuote on valmis pakattavaksi. Jos kuitenkin halutaan karkean kuitutuotteen sijaan sileä tuote, tulee se viimeistellä vielä jälkiprässäyksellä. Tällöin tuote puristetaan sileään ja täsmälliseen muotoon kaksipuoleisessa kuumassa muotissa. Tuloksena saatava tuote on tämän jälkeen ohut, tukeva, mittatarkka, sileäpintainen ja painatuskelppoinen. (Shealy 2008, 6; Ecopulp Finland Oy 2016.) Kuituvalostekniikalla valmistetussa tuotteessa paksuuden ja lisäaineiden lisäksi myös muodot vaikuttavat kappaleen jäykkyyteen.

Soveltuvuus tukilastojen valmistukseen

Ecopulp Oy:n (2016) mukaan kuitumateriaali soveltuu muokattavaksi lähes mihin tahansa kolmiulotteiseen muotoon, joten monimutkaisten rannelastojenkin valmistus todennäköisesti onnistuu (Ecopulp Finland Oy 2016). Ecopulp Oy:n kuituvalospakkaukset ovat myös kevyitä, kestäviä ja ekologisia. Nämä kaikki tukisivat valmistettavien tukilastojen vaatimuksia ja kuituvalostekniikan valintaa yhdeksi valmistusmenetelmäksi. Eri kuitusekoitusten käyttömahdollisuus on myös hyödyllinen lisä, näin lastan ominaisuudet saadaan hiottua halutuksi. Muotoilulla ja erilaisilla jäykisteillä saadaan tukilastaan tarvittaessa lisää jäykkyyttä.

Kuituvalostekniikka poistaisi valmistuksen käsityön osuuden ja tekisi tukilastojen valmistuksesta nopeaa ja sitä kautta kustannustehokasta. Kustannuksissa tulee kuitenkin huomioida investoinnit muotteihin. Kuituvalostekniikalla valmistus vaatii muodostusmuotin ja siirtomuotin valmistuksen ja koska tuotteesta halutaan melko sileäpintainen ja todella tukeva, tarvitaan lisäksi vielä kaksiosainen prässäysmuotti jälkiprässäystä varten. Muottien aiheuttamat kustannukset ovat kuitenkin kertaluontoisia ja muotit ovat käytännössä ikuisia.

4.2.2 Purumuovikomposiitti

Purumuovikomposiittia alettiin käyttää lääketieteellisyydessä kipsausmateriaalina 2011 (Ojalehto 2015). Kuvassa 4 on purumuovikomposiitista valmistettu kipsi. Ennen lääketieteellisuutta vahvempaa puumuovikomposiittia on käytetty paljon esimerkiksi rakennus-, huonekalu- ja autoteollisuudessa (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014, 1). Bekvil Oy:lle mahdollisesti soveltuvaan purumuovikomposiittilastaan käytetään kierrätettyä puuraaka-ainetta sekä biohajoavaa muovia (Onbone 2011).



KUVA 4. Purumuovikomposiittikipsi (Woodcast Oy 2016a)

Edut

Puun ja muovin yhdistelmä hyödyntää molempien materiaalien haluttuja ominaisuuksia. Purumuovikomposiitissa yhdistyvät puun hyvät lujuusominaisuudet ja muoville ominainen keveys. Purumuovikomposiitti on todella helppo muotoilla lämmön avulla. Puun ja biohajoavan muovin yhdistelmä on kokonaisuudessaan biohajoava. Puumateriaalina voidaan käyttää kierrätettyä puuhaketta, mikä tekee tuotteesta vielä ekologisemman. (Onbone 2011; Woodcast Oy 2016b.) Materiaalin soveltuvuus terveydenhuollon tuotteisiin tulee kuitenkin varmistaa.

Purumuovikomposiittilasta on mahdollista valmistaa Suomessa ja se on röntgensäteitä läpäisevä. Tukilastaa ei siis tarvitse poistaa röntgenkuvauksen ajaksi. Tarpeen tullen lastaa on myös mahdollista valmistaa eri väreissä. (Onbone 2011; Woodcast Oy 2016b.) Lastat voitaisiin värikoodata niin, että eri kokoiset lastat olisivat eri värisiä.

Tekniikka

Komposiitilla tarkoitetaan kahden tai useamman aineen seosta, jossa aineet vaikuttavat yhdessä, mutta eivät ole lienneet toisiinsa. Komposiittimateriaalissa pyritään yhdistämään kaikkien seoksen aineiden parhaat ominaisuudet ja hyödyntämään ne parhaalla

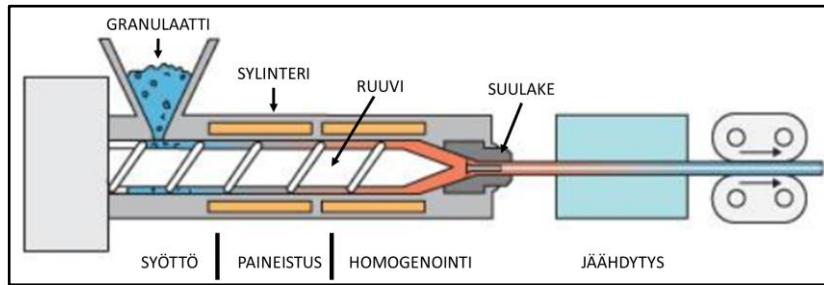
mahdollisella tavalla. Komposiittitekniikalla voidaan parantaa esimerkiksi materiaalin lujuutta, sitkeyttä, jäykkyyttä, termisiä tai sähköisiä ominaisuuksia tai keventää sen rakennetta. Tämä onnistuu lisäämällä raaka-ainetta, jolla on haluttu ominaisuus. Komposiittimateriaali muodostuu usein matriisista ja lujitteesta. Lujite tuo kappaleeseen tarvittavan lujuuden ja matriisi sitoo lujitekuidut toisiinsa. (Niinimäki 2008, 218–221.)

Purumuovikomposiitissa puupuru tai -hake toimii materiaalin lujitteena ja muovi matriisina. Muovi onkin keveytensä ansiosta yleisesti käytetty aine komposiittimateriaaleissa. (Muoviteollisuus ry 2016). Purun ja muovin lisäksi komposiitti voi sisältää tarvittaessa myös esimerkiksi täyteaineita tai lisäaineita, joilla vaikutetaan tuotteen valmistusprosessiin sekä ominaisuuksiin (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014, 3; Muoviteollisuus ry 2016).

Tukilastojen valmistuksessa tullaan käyttämään muovikomponenttina Bekvil Oy:n arvojen mukaan biohajoavaa muovia. Biohajoavien muovien polymeerit hajoavat biologisessa ympäristössä joko osittain tai kokonaan mikrobien, entsyymien tai kosteuden vaikutuksesta vaarattomiksi yhdisteiksi. Biologisella ympäristöllä voidaan tarkoittaa esimerkiksi maaperää, vesistöä tai ihmisen elimistöä. Biohajoavien polymeerien käyttö lisääntyy jatkuvasti lääketieteen alueella. Leikkauksissa käytetään usein elimistöön vähitellen liukevia kiinnittimiä, jolloin vältetään toinen leikkaus. Lisäksi biohajoavan langan käyttö haavojen ompelemiseen on ollut mahdollista jo useita kymmeniä vuosia. Biohajoavat muovit valmistetaan uusiutuvista raaka-ainelähteistä, kuten esimerkiksi maissitärkkelyksestä tai sokerijuurikkaasta. (Järvinen 2008, 110; Seppälä 2008, 228–229.)

Purumuovikomposiittien valmistuksessa muovi- ja puuraaka-aine sekoitetaan keskenään sulassa tilassa. Tätä kutsutaan kompaundointivaiheeksi. Ekstruusiota eli suulakepuristusta käytettäessä kompaundointivaihe ei ole välttämätön, koska itse ekstruuderin homogeenisoi raaka-aineseoksen niin hyvin prosessin edetessä. Seos on kompaundoinnin jälkeen usein granulaatti- tai pellettimuodossa. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014, 4.)

Tämän jälkeen raaka-aine pursotetaan ekstruuderin suulakkeen läpi jatkuvana prosessina haluttuun muotoon. Ekstruuderin valmistaa kitkan, paineen ja sylinterin seinämästä johtuvan lämmön avulla raaka-aineesta helposti muokattavaa ja homogeenista (Järvinen 2008, 175). Seuraavassa kuviossa 8 on nimetty ekstruuderin osat ja ruuvin vyöhykkeet, joista kerrotaan enemmän seuraavassa kappaleessa.



KUVIO 8. Ekstruusiomenetelmä (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014, 4; muokattu)

Ekstruuderiin kuuluu pitkä paikallaan pysyvä sylinteri, jonka sisällä on ruuvi. Yhdessä ne muodostavat plastisointiyksikön. Plastosoinnilla tarkoitetaan massan saattamista muokattavaan tilaan (Kurri, Malén, Sandell & Virtanen 2002, 221). Ekstruuderin ruuvi voidaan jakaa kolmeen vyöhykkeeseen osatehtäviensä mukaan: syöttö, paineistus ja homogenointi. Ekstruuderin lopussa ruuvi työntää sulan homogeenisen massan levysuuttimen läpi. Prosessin jälkeen syntyvä profiili kalibroidaan ja jäähdytetään. (Seppälä 2008, 261–263; Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014, 4–5.)

Ekstruuderi voi olla rakenteeltaan myös kaksiruuvinen, jolloin laitteella voidaan tuottaa korkeampia paineita. Tällöin sylinteri on poikkileikkaukseltaan kahdeksikon muotoinen ja ruuvien kierteet menevät lomittain. Tavallisesti kuitenkin yksiruuvisella laitteella saadaan aikaiseksi riittävä paine. (Seppälä 2008, 265; Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014, 5.)

Ekstruusiomenetelmällä valmistuu halutun paksuista ja levyistä metritavaraa, joka voidaan tilata alihankkijalta. Metritavarasta leikataan oikeanmuotoisia ja -kokoisia palasia tukilastoja varten. Lyhyen lämmityksen jälkeen purumuovikomposiittipalaset pystytään muotoilemaan muotin avulla haluttuun muotoon. Tämän jälkeen muotoiltu tukilasta pysyy tukevasti muodossaan ja on valmis pakattavaksi.

Soveltuvuus tukilastojen valmistukseen

Tukilastojen valmistus helpottuu, kun materiaalin leikkaukseen ei tarvita pöytäsiirkeliä tai vannesahaa. Kappaleet voidaan leikata tavallisilla saksilla. Sahausvaiheen poistumisen myötä prosessin epämiellyttävintä, pölyävää vaihetta ei tarvita. Tukilastan muotoilussa käytetään kastelun sijaan lämmitystä, mikä on prosessina siistimpi ja mahdollisesti mielekkäämpi. Toisaalta lämmitys vie aikaa hieman pidempään kuin kastelu.

Purumuovikomposiitti on helpompi muotoilla kuin vanha kirjankansipahvi. Tällä tekniikalla kuivausvaihe jää kokonaan pois prosessista, mikä nopeuttaa valmistusprosessia jopa vuorokaudella. Myös kuivaukseen ennen vaadittu tila vapautuu.

Purumuovikomposiitin huonona puolena on materiaalin verrattain kallis hinta. Hintaa lisää entisestään muita tarkoitukseen sopivia muoveja kalliimman biohajoavan muovin käyttö. Lisäksi kustannuksia tulee purumuovikomposiitin muotoilussa käytettävien lämmityslevyjen hankinnasta. Kalliin hinnan lisäksi valmistusprosessiin jää vieläkin käsityötä, josta haluttiin päästä eroon.

4.2.3 Nykyisen menetelmän kehitys

Nykyistä menetelmää voidaan kehittää lisäämällä valmistusprosessiin automaatiota ja nopeuttamalla esimerkiksi kuivausprosessia. Tukilastan raaka-aine voidaan tilata osittain valmiina alihankkijalta, jolloin osa prosessin käsityöstä poistuu. Seuraavissa kappaleissa on kerrottu valmistuksen osa-alueiden parantamisesta. Parannusehdotuksia on tehty epämiellyttävään leikkausvaiheeseen ja aikaa vievään kuivaukseen.

Leikkaus

Kappaleiden leikkaus on hankalaa kirjankansipahvin paksuuden ja jäykkyyden takia. Myös esimerkiksi rannelastojen kaarevat muodot aiheuttavat ongelmia. Nykyisen sahausprosessin pölyäminen on myös epämiellyttävää. Pahvin leikkauksen tulee olla turvallista ja helppoa.

Pahvin leikkauksen helpoin ja nopein tapa on laserleikkaus. Laserleikkauksessa pystytään käyttämään suuria leikkausnopeuksia, millä saadaan lisättyä tuottavuutta ja tehokkuutta. Laserleikkauksella saa leikattua nopeasti monimutkaisempiakin muotoja. Laserleikkaus on turvallinen ja koneet ovat helppokäyttöisiä. Leikkauspinnasta tulee viimeistelty ja leikatut kappaleet ovat tasalaatuisia.

Yritys voi investoida omaan laserleikkuriin, jolloin itse leikkaukseen tarvitsee sitouttaa työvoimaa. Toinen vaihtoehto on tilata leikkaus alihankkijalta. Suomessa pahvien laserleikkauksia tekee esimerkiksi Pinenta Oy sekä MOoCB. Tällöin valmistusmateriaali tulisi yritykseen leikattuna ja heti valmiina muotoilua varten.

Kuivaus

Kuivauksessa tärkein tavoite on prosessin nopeuttaminen. Tällä hetkellä kuivaus kestää noin vuorokauden, mikä tekee siitä selkeästi valmistuksen pitkäkestoisimmän vaiheen. Kuivauksessa voitaisiin käyttää kuivaushuonetta tai vaihtoehtoisesti pieneenkin tilaan sopivaa kuivauskaappia. Kuivauskaapissa kuivuminen on nopeaa ja tehokasta. Kuivauksessa tulee kuitenkin huomioida optimaalinen kuivausaika ja -lämpö, etteivät tuotteet kuivu liikaa. Liian nopea kuivuminen voi aiheuttaa halkeamia tai materiaalin paikallista haurastumista. Alle 4000 euron investoinnilla saadaan suuren kokoluokan kuivauskaappi. Kuvassa 5 on esimerkki Talopesulat Oy:n kuivauskaapista, joka soveltuisi hyvin lastojen kuivaukseen.



KUVA 5. Talpet TS 1800 kuivauskaappi (Talopesulat Oy 2013)

Suurin Talpet kuivauskaappi on 1800 mm leveä, 630 mm syvä ja 1985 mm korkea ja sen lämmitysteho on 6 kW (Talopesulat Oy 2013). Tarvittaessa näitä suurimpia kuivauskaappeja voisi laittaa kahdesta kolmeen vierekkäin, riippuen tuotannon määrästä. Valmistusprosessi voidaan pitää jatkuvana, kun kaikki kaksi tai kolme kuivauskaappia ovat kuivauksen eri vaiheissa.

Kokonaisuudessaan näillä kehitysehdotuksilla koko valmistusprosessi nopeutuu ja sitoutuneen työvoiman tarve pienenee, mikäli raaka-aine tulee valmiiksi leikattuna. Epämiellyttävä sahausvaihe jää kokonaan pois valmistusprosessista ja aikaisemmin vuorokauden kestänyt kuivaus lyhenee arviolta tuntiin tai muutamaan. Tämä voidaan selvittää vasta kokeilemalla.

4.3 Valmistusmenetelmien vertailua

Esivalittuina valmistusmenetelminä ovat kuituvalostekniikka, purumuovikomposiitti sekä nykyisen valmistusmenetelmän kehitys. Yksi kolmesta vaihtoehdosta voidaan valita uudeksi tukilastojen valmistusmenetelmäksi. Tätä varten valmistusmenetelmiä ja niiden vahvuuksia ja heikkouksia arvioidaan ja vertaillaan.

Vertailun alussa valitaan tukilastan ja sen valmistuksen tärkeimmät ominaisuudet ja kriteerit. Ensimmäiseksi ominaisuudeksi valitaan tukilastan käyttömukavuutta lisäävä hengittävyys. Tärkeää on myös, että tukilasta pystytään muotoilemaan ergonomiseksi ja hyvin tukevaksi. Lastan tulee istua hyvin raajaan, johon se on tarkoitettu. Toiseksi kriteeriksi valitaan muotoiltavuus, jossa huomioidaan muotoilun helppous ja sen mahdollisuudet. Käsityön osuus valmistuksessa lisää kustannuksia, vähentää työn mielekkyyttä, hidastaa prosessia ja sitoo työntekijöitä, joten automaation käyttöä tulee suosia mahdollisimman paljon. Pieni käsityön osuus on siis yksi valintakriteereitä.

Yrityksen periaatteiden ja tukilastan käyttötarkoituksen mukaisesti myös ekologisuus on tärkeä valintakriteeri. Ekologisuus tekee tuotteesta myös houkuttelevamman ostajaorganisaatioille. Yrityksen tuottavuuden kannalta tärkeä valmistusmenetelmän valintakriteeri on myös valmistuskustannukset. Valmistuskustannuksissa pyritään huomioimaan myös raaka-ainekustannukset.

Päätetyille valintakriteereille asetetaan painoarvot kriteerien tärkeyden perusteella. Kriteerien tärkeyden arvioinnissa konsultoitiin toimeksiantajayritystä Bekvil Oy:tä. Konsultoinnissa tärkeimmiksi kriteereiksi valittiin lastan hengittävyys sekä onnistunut muotoilu, joille annettiin painoarvo viisi. Lähes yhtä tärkeiksi kriteereiksi valittiin pieni käsityön osuus, ekologisuus ja valmistuskustannukset, joille asetettiin painoarvo neljä. Kriteerien painoarvot muutetaan prosenteiksi vastaamaan niiden saamia arvosanoja. Kaikkien kriteerien painoarvot näkyvät taulukossa 2. Kukin valmistusmenetelmä arvioidaan numeroin 1–5 sen mukaan kuinka hyvin valitut kriteerit toteutuvat. Yksi on *ei kovin hyvin* ja viisi *erittäin hyvin*. Valmistusmenetelmien arviointi tehdään aiemmin selvitetyn teorian pohjalta. Vertailtavien valmistusmenetelmien arvioinnit ja lopputulokset ovat seuraavassa taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Valmistusmenetelmien vertailua

	paino- arvo	Kuituvalostek- niikka		Purumuovi- komposiitti		Nyky menetel- män kehitys	
		arvo	painotet- tu arvo	arvo	painotet- tu arvo	arvo	painotet- tu arvo
Hengittävyys	23	5	1,15	4	0,92	5	1,15
Muotoiltavuus	23	4	0,92	3	0,69	4	0,92
Käsityön osuus	18	5	0,9	2	0,36	2	0,36
Ekologisuus	18	5	0,9	4	0,72	5	0,9
Valmistuskustannukset	18	5	0,9	2	0,36	3	0,54
Lopputulos	100	4,8		3,1		3,9	

Valmistusmenetelmien painotetut arvot on laskettu yhteen taulukon alareunassa lopputulos-kohdassa. Painotettujen arvojen lopputulosten perusteella kuituvalostekniikka soveltuu selkeästi parhaiten tukilastojen valmistusmenetelmäksi. Toiseksi parhaat painotetut arvot ovat nyky menetelmän kehityksellä. Purumuovikomposiitin kalliit raaka-ainekustannukset ja jälkikäsittelyn tarve ovat suurimmat tekijät, joiden takia menetelmä ei ole yhtä hyvä ratkaisu kuin muut ehdolla olleet valmistusmenetelmät. Koska kaikkien vertailtavien ominaisuuksien painoarvot ovat niin lähellä toisiaan, kuituvalostekniikka olisi voittanut vertailun suorillakin arvoilla.

5 PROTOKAPPALEEN VALMISTUKSEN VAIHEET

5.1 Kuitumassan valmistus

Kuituvalostekniikka valittiin toimeksiantajayrityksen kanssa proton valmistusmenetelmäksi hyvän soveltuvuutensa takia. Proton valmistuksesta laadittiin työsuunnitelma (liite 1). Kuitumassan valmistusta demottiin TAMKIn paperi- ja pakkauslaboratoriossa valmistamalla tasomaisia arkkeja. Proton valmistusta varten oli päätettävä tarkoitukseen parhaiten soveltuva kuitumassa sekä määriteltävä massan koostumus, sakeus ja lisäaineet. Valmistuksen kannalta tärkeää oli löytää sopiva sakeus massalle, kun taas proton ominaisuuksien kannalta massalajilla ja lisäaineilla oli suurin merkitys.

5.1.1 Työssä käytettävät massalajit ja apuaineet

Kuitumateriaalin valinnassa edettiin valmistamalla suunnitteluvaiheessa valitut neljä massalajia, joiden pohjalta oli tarkoitus valita proton kannalta sopivin vaihtoehto. Massan sakeudella tarkoitetaan sitä, kuinka monta prosenttia massan kokonaispainosta on kuivaa kuitumateriaalia. Seuraavissa kappaleissa selvitetään opinnäytetyössä käytettyjä massalajeja.

Kaksi ensimmäistä massaa olivat molemmat valkaistua kemiallista sellua eli BCP:tä (Bleached Chemical Pulp). Ensimmäisenä massana käytettiin mäntysellua, joka on pehmeästä puuaineksesta valmistettua ja pitkäkuituista. Toisena massana käytettiin lyhytkuituista koivusellua. Kuitumassan valmistusta varten kyseistä materiaalia saatiin pinta-alaltaan noin neliömetrin kokoisia arkkeja. Mänty- ja koivumassan lisäksi valmistettiin niiden sekoitusta, jossa saatiin yhdistettyä molempien massojen ominaisuuksia.

Työssä käytettiin myös pitkäkuituista kuusta ja lyhytkuituista koivua sisältävää valkaistua kemikuumahierrettä, BCTMP:tä (Bleached Chemi-Thermo-Mechanical Pulp). Arto Nikkilän (2016) mukaan kuusen ja koivun osuudet BCTMP-massassa ovat 50/50 (Nikkilä 2016). Valmistuksessa on käytetty myös kemiallista ja mekaanista valmistustapaa, joten massan seassa on myös pienimpiä partikkeleita ja ligniiniä. Kuitumassan valmistusta var-

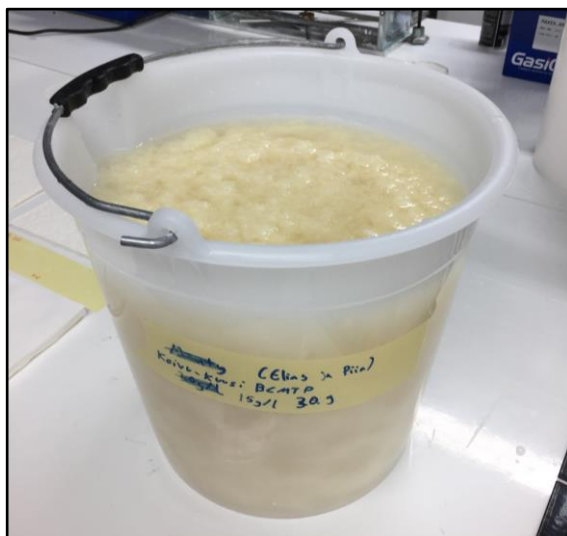
ten paperi- ja pakkauslaboratoriosta saatiin kuivattua BCTMP-massaa. Kaikkien valmistettujen massaerien sakeudet olivat 1–2 % massan kuiva-aineen painosta. Liitteessä 2 on tarkat valmistettujen massaerien tiedot.

Massaeriin sekoitetut apuaineet

Apuaineiden osuudet punnitaan aina massan kuiva-ainepitoisuuden eli kuivan kuitumateriaalin mukaan. Valmistettujen testikappaleiden perusteella apuainepitoisuudeksi valittiin 1,5 % massan kuiva-ainepitoisuudesta. Massaeriin sekoitettiin yhteensä kolmea eri apuainetta: tärkkelystä, CMC:tä ja lateksia. Kaikki opinnäytetyössä käytetyt apuaineet olivat TAMKin paperi- ja pakkauslaboratoriosta. Tärkkelyksenä käytössä oli Raisamyl 302 E, CMC:nä FINNFIX 30 ja lateksina SB lateksi Styronal PR 8736.

5.1.2 Kuitumassan valmistuksen vaiheet

Ensimmäisenä vaiheena oli imeytysvaihe. kuitumassojen valmistaminen aloitettiin repimällä käsin pinta-alaltaan neliömetrin kokoisista arkeista noin neliösenttimetrin kokoisia paloja. Ensimmäiseksi arkeista poistettiin reunat repimällä, jotta revittävässä paloissa olevat kuidut olisivat kokonaisia. Revityt palat punnittiin vaa'alla valittujen sakeuksien mukaan. Esimerkiksi kuiva-ainepitoisuudeltaan 1,5-prosenttista massaa saatiin punnitsemalla 15 grammaa revittyjä paloja yhtä vesilitraa kohden. Seoksen (kuva 6) annettiin seisoa noin vuorokauden ajan, jotta kuidut ehtisivät menettää sidoksiaan, imemään vettä ja turpoamaan kunnolla, mikä helpottaa seuraavaa hajotusvaihetta.



KUVA 6. Imeytysvaiheessa olevaa BCTMP-massaa

Toisena kuitumassan valmistusprosessin vaiheena oli märkähajotus. Paperi- ja pakkauslaboratoriossa oli kaksi lähes identtistä märkähajotinta (kuva 7), joihin molempiin laitettiin noin kaksi litraa massaa kerrallaan. Märkähajottimien kierrosnopeudet olivat $2\,900 \pm 100$ kierrosta minuutissa. Hajottimien ohjeiden mukaan työssä käytetylle massan sakeudelle sopii noin 30 000 kierrosta, joten hajotusajaksi valittiin 11 minuuttia. Aika mitattiin siihen tarkoitettulla sekuntikellolla. Lopuksi hajotettu massa kaadettiin takaisin puhtaiseen kymmenen litran astiaan. Mikäli massaa ei käytetty heti, massa-astian sulkeminen oli tärkeää, ettei massan seassa oleva neste haihtuisi astiasta ajan kuluessa.



KUVA 7. Kuitumassaa märkähajottimessa

Viimeisessä vaiheessa kuitumassan sekaan lisättiin mahdolliset apuaineet antamaan massalle paremmat lujuusominaisuudet sekä kosteuden keston. Lisäaineina käytettiin tärkkelystä, CMC:tä ja lateksia. Lateksi oli valmiiksi liuosmuodossa oleva dispersio, jolla tarkoitetaan veteen sekoitettuja hyvin pieniä polymeerimolekyylejä (Kurri ym. 2002, 219). Lateksi voitiin lisätä massan sekaan suoraan kanisterista, punnituksen jälkeen. Tärkkelys ja CMC olivat jauhemaisessa muodossa, joten niistä täytyi valmistaa liuos ennen massan sekaan lisäämistä. Tärkkelys- ja CMC-liuosten valmistusmenetelmä oli lähes samanlainen poissuljettuna lämpötila ja keittoaika. Tämän takia seuraavaksi käydään läpi tärkkelysliuoksen valmistusmenetelmä.

Tärkkelysliuoksen valmistamista testattiin valmistamalla yksi litra 20-prosenttista tärkkelystä. Tätä ennen laskettiin liuokseen lisättävän tärkkelyksen massa tärkkelysjauheen kuiva-ainepitoisuuden ollessa noin 80 %. Liuosta varten punnittavan tärkkelysjauheen

massa on laskettava. Mikäli tärkkelysjauheen kuiva-ainepitoisuus olisi 100 %, niin punnittava määrä olisi 200 grammaa, josta saadaan seuraava yhtälö:

$$0,80x = 200 \text{ g eli } x = \frac{200 \text{ g}}{0,80} = 250 \text{ g}$$

Tärkkelysliuosta varten punnittiin 250 grammaa tärkkelystä ja 750 grammaa vettä. Tärkkelys ja vesi kaadettiin kattilaan, jonka jälkeen ne sekoitettiin keskenään vispilällä. Tämän jälkeen kattila asetettiin induktioliedelle ja säädettiin lämpötilaksi 95 celsiusastetta. Liuosta sekoitettiin vispilällä, kunnes tapahtui selkeytyminen. Liuoksen viskositeetti kasvoi huomattavasti hetkeä ennen selkeytymistä. Valmis tärkkelysliuos säilöttiin termos-pulloon. Tärkkelysliuoksen käyttölämpötilan oli oltava vähintään 60 celsiusastetta.

Kun tärkkelystä valmistettiin massoja varten, yksi litra 20-prosenttista tärkkelystä oli sopiva määrä, koska hieman tarvittavaa suurempi määrä säilyy halutussa lämpötilassa pidemmän aikaa. Esimerkiksi yhden BCTMP-massaerän sekaan lisättiin 22,5 grammaa tärkkelysliuosta, mikä punnittiin vaa'alla dekanterilasissa. Pienempiä määriä punnittaessa helpommaksi menetelmäksi osoittautui punnita tärkkelys mittaruiskussa, jolla tärkkelyksen sai helpommin lisättyä massan sekaan.

Tärkkelyksen lisäämisen jälkeen sekoitusta jatkettiin vielä noin kymmenen minuutin ajan ennen massan käyttöönottoa. Lisäaineiden lisääminen massaan tapahtui jatkuvan sekoituksen aikana (kuva 8), pienemmissä erissä mittaruiskun ja isommissa erissä dekanterilasin avulla. Sekoittimena käytettiin siihen sopivaa laboratoriosekoitinta, johon kiinnitettiin levymäinen vispilä. Sekoitusnopeus valittiin siten, että kaikki astiassa oleva massa liikkui kunnolla, mutta ei räiskynyt. Sekoitusta jatkettiin jokaisen massaerän aikana niin kauan, kunnes kyseinen massaerä otettiin käyttöön. Tärkkelystä sisältävän massan säilöminen ei ollut suositeltavaa, koska tärkkelys on otollinen kasvualusta mikrobeille.



KUVA 8. Massaa sekoitetaan lisäaineiden lisäämisen aikana

5.2 Tasomaisen kappaleen valmistus

Tasomaiset kappaleet valmistettiin käsiarkkimuotilla. TAMKin paperi- ja pakkauslaboratorion käsiarkkimuottia (kuva 9) oli mahdollista käyttää myös paksumpien arkkien valmistamiseen. Rajoittavana tekijänä oli laitteessa oleva tiheä viira, mutta testauksen yhteydessä kävi ilmi, että vesi pääsee suotumaan hyvin viiran läpi arkin paksuudesta huolimatta.



KUVA 9. Käsiarkkimuotti, jossa viiran päällä juuri valmistunut arkki

Laite koostuu pääasiasta säiliöstä ja sen pohjalla olevasta 160 x 160 mm:n kokoisesta viirasta. Laitteen toimintaperiaate on seuraava: laitteen säiliön tilavuudesta täytetään noin puolet vedellä; tietty määrä hyvin sekoitettua massaa kaadetaan säiliön sisään; annetaan massa-vesi -seokselle 40 sekunnin mittainen ilmasekoitus, jossa säiliöön puhalletaan paineilmaa; tyhjennetään säiliö vedestä. Tämän jälkeen suurin osa säiliössä olleesta vedestä on suotautunut kuitujen läpi ja säiliössä olevat kuidut ovat asettuneet viiran päälle. Viiran päälle muodostuneen kuitukerroksen päälle laitetaan imupapereita ja messinkilevy, minkä jälkeen levyn päältä kaulitaan kolme kertaa messinkikaulimella. Imupapereiden ja kaulimisen avulla saadaan poistettua ylimääräinen vesi kuidusta. Lopuksi valmis arkki irrotetaan varovasti viiran päältä ja molemmille puolille arkkiä lisätään yksi kuiva imupaperi. Tämän jälkeen arkki viedään noin 170 celsiusasteiseen levykuivaimeseen (kuva 10). Kuivausta vahditaan tarkistuksilla noin viiden minuutin välein ja kuivauksen kokonaiskestoksi mitattiin keskimäärin kymmenen minuuttia. Kuituarkin paksuuteen vaikuttavat tekijät olivat massan sakeus, massan määrä ja kuivausvaiheessa tapahtuva puristuminen.



KUVA 10. Valmis arkki levykuivaimessa

Rannelastan valmistusta varten haluttiin demota muodon vaikutusta lastan jäykkyyteen. Levykuivaimessa mahdollisuudet olivat melko rajatut, muodoksi valittiin pienehköt vahvikeurat. Urien tekemistä varten saatiin TAMKIn konetekniikan laboratorioista kolmen millin paksuista alumiinista hitsauspuikkoa. Uritetut kappaleet valmistettiin samalla prosessilla kuin muut tasomaiset kappaleet. Ainoana erona oli se, että kappaleiden ollessa levykuivaimessa, niiden päälle asetettiin neljä 25 senttimetriä pitkää tankoa kuvan 11 mukaisesti. Tangot oli kiinnitetty teipillä molemmista päistä limittäin toisiinsa kiinni siten, että tankojen väliin jäi kolmen millimetrin levyinen väli.



KUVA 11. Alumiinitangot tasomaisen kappaleen päällä

5.3 Lopullisen massan ja lisäaineiden valinta

Eri massalajien ja parametrien mukaan valmistetuille arkeille suoritettiin pikainen taivutustesti, jotta ominaisuuksiltaan riittämättömät yksilöt voitaisiin seuloa pois. Taivutustestissä taivuteltiin arkkeja käsissä ja verrattiin niiden jäykkyyttä muihin arkkeihin. Testillä ei ollut mahdollista tunnistaa pieniä eroja testikappaleiden jäykkyydessä, mutta helposti havaittavat suuret erot havaittiin helposti. Koivusellusta valmistetut arkit vaikuttivat huomattavasti muita heikommilta, joten niiden valmistaminen lopetettiin jo alkuvaiheessa.

Massalajin valintaan vaikutti myös saanto. Saanto korreloi suoraan valmistuksessa raaka-aineista johtuvien kustannusten kanssa. Kemialliset CTP-massat eli mänty- ja koivusellut omaavat huomattavasti heikomman saannon kuin BCTMP-massa, jossa on käytetty sekä kemiallista että mekaanista massanvalmistusmenetelmää. BCTMP-massa on myös sellaisenaan kemiallisia massoja hydrofobisempaa, joka taas pienentää hydrofobisuutta lisäaineiden käytön tarvetta massassa (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 45). Lopulliseksi massalajiksi valittiin BCTMP-massa.

Lopullisia testiarkkeja varten päätettiin myös massan sakeus ja lisäaineiden määrät. Aikaisemmin valmistettujen arkkien kohdalla 1,5 prosentin sakeus vaikutti parhaalta arkin valmistuksessa, joten se valittiin myös lopullisiin arkkeihin. Tärkkelyksen kohdalla sopivaksi määräksi valittiin kaksi prosenttia massan kuivapainosta, koska tätä suuremmat määrät eivät tehneet arkeista jäykempiä käsin tehdyissä taivutustesteissä vaan pikemminkin päinvastoin. Varsinkin 10 prosenttia massan kuivapainosta omaavat arkit tuntuivat

heikommilta kuin vähemmän tärkkelystä sisältävät arkit. Tästä voidaan päätellä, että tietyn lisäaineprosentin jälkeen massan lujuusominaisuudet heikkenevät. Lateksi vaikutti valuvan arkinvalmistuksen yhteydessä veden mukana viemäriin, joka oli havaittavissa veden vaaleasta tai sinertävästä väristä. Tämä johtuu lateksipolymeerien pienestä, noin 100 nanometrin pituudesta, joka johtaa huonoon retentoitumiseen (Nikkilä 2016). Lateksi jätettiin pois lopullisista testiarkeista. Oikeassa kuituvalosprosessissa menetelmä on sen verran erilainen, että lateksi pysyy kappaleessa paremmin massan mukana, joten siellä sitä pystytään hyödyntämään paremmin.

Kaikista valmistetuista massaeristä valittiin tukilastaa varten sopivin. Valitusta massasta valmistettiin noin 15 kappaleen erä samanlaisia arkkeja, joista puoleen lisättiin urat kuivatusvaiheessa. Näistä arkeista testattiin paksuus, tiheys, neliömassa ja taivutusjäykkyys. Testausmenetelmistä ja niiden valinnoista kerrotaan kappaleessa 6. Tärkeintä arkkien valmistuksessa oli, että niistä tulisi keskenään mahdollisimman yhdenmukaisia.

5.4 Muotin valmistus

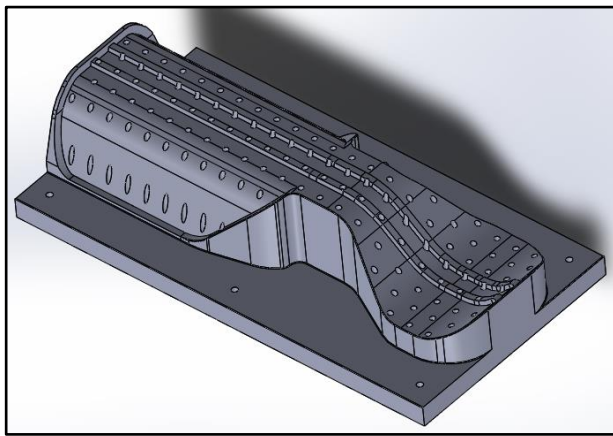
Muotti suunnitellaan SolidWorks-ohjelmalla niin, että ensin mallinnetaan itse tukilasta ja sitä hyödyntämällä mallinnetaan muotti, apumuotti sekä rajain. Muotit 3D-tulostetaan TAMKin Ultimaker2 Extended -tulostimella ja rajain TAMKin Prenta Duo XL -tulostimella.

5.4.1 Muotin suunnittelu

Muotti kiinnitetään vaneriin, jonka pohjassa on imulaitteistoon yhdistettävä liitântä. Vanerin ja muotin välissä on tiivisteenä yhden millimetrin paksuista kumimattoa ja lisäksi yhden millimetrin paksuista liimattavaa ikkunatiivistettä. Muotin muodostusosa verhoillaan viiralla, joka kiinnitetään muottiin rajaimella ja lopuksi vaneriin niiteillä. Vaneri, muotti ja rajain yhdistetään halkaisijaltaan kolmen millimetrin pulteilla.

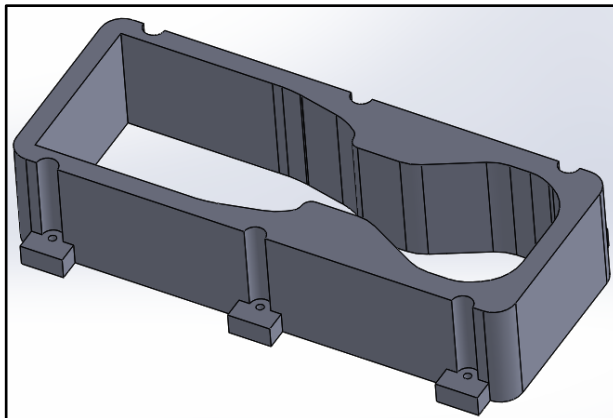
Tätä valmistustapaa varten lastasta mallinnetaan muotti SolidWorks-ohjelmalla. Mallina käytetään Bekvil Oy:ltä saatua rannelasta 504D:n (21 cm) mallikappaletta. Tätä malli-

kappaletta käytetään mallinnuksessa mittojen ja muotojen perustana, mutta täydellistä kopiointia ei koettu tarpeelliseksi vielä ensimmäisessä protokappaleessa. Nykyisen rannelastan pohjassa on tueksi vanerisuikale, joka lisätään lastoihin käsin. Mikäli vanerisuikaletta ei tarvita, lastaa ei tarvitse jälkikäsitellä niin paljon. Tämän vuoksi mallinnusvaiheessa muottiin lisätään vielä pienet noin kahden millimetrin vahvikeurat tuomaan pitkitäisjäykkyyttä. Seuraavassa kuvassa 12 on muotti. Muotin muodostusalueelle mallinetaan halkaisijaltaan 2,5 mm:n reikiä kymmenen millimetrin välein. Näiden kautta imetään vesi muotin läpi muodostusvaiheessa. Muotti valmistetaan Ultimaker2 Extended -3D-tulostimella.



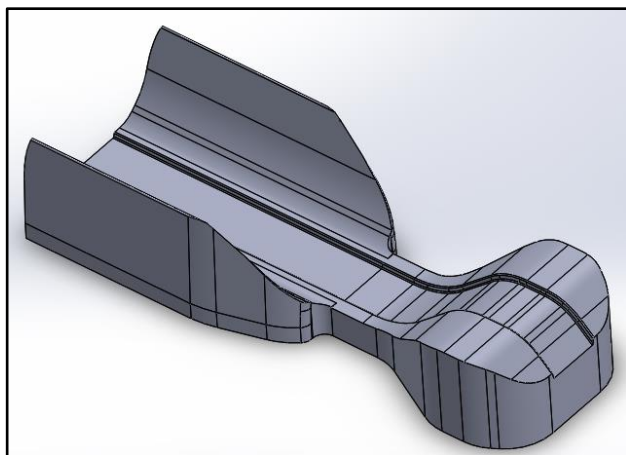
KUVA 12. Mallinnettu muotti

Rajain pitää kuitumassan muodostusalueella muodostuksen aikana. Rajain valmistetaan muotista SolidWorks-ohjelman cavity-toiminnan avulla. Muotin ja rajaimen väliin jätetään seitsemän millimetriä välystä viiraa varten. Välystä jätetään hieman reilusti 3D-tulostuksesta mahdollisesti tulevien mittatarkkuusvirheiden vuoksi. Rajain tulostetaan Prenta Duo XL -3D-tulostimella. Seuraavassa kuvassa 13 on mallinnettu rajain.



KUVA 13. Mallinnettu rajain

Proton valmistusta varten mallinnetaan ensimmäisen muotin vastakappale, jolla varmistetaan lastan irtoaminen ehjänä muotista. Vastakappaleeseen tulee samat muodot kuin muotissa, mutta väliin jätetään neljä millimetriä välystä kuitumassasta valmistettavaa lastaa varten. Mallinnuksessa hyödynnetään aiemmin mallinnettuja osia ja cavity-toimintoa. Muotin keskellä on leveä pituussuuntainen ura, jonka antaa tilaa lastaan tuleville jäykisteureille. Seuraavassa kuvassa 14 on mallinnettu muotin vastakappale. Muotin vastakappale valmistetaan Ultimaker2 Extended -3D-tulostimella.



KUVA 14. Muotin vastakappale

Kuituvalostekniikassa kappaleen kuivumiskutistuminen on 2,5 % (Hovila 2016). Kuivumiskutistuminen pitää huomioida lopullisia muotteja tehtäessä. Protovaiheessa sen huomioiminen ei ole pakollista, koska lastoja tullaan tekemään monessa eri koossa ja ensimmäinen protovaihe pyritään pitämään mahdollisimman yksinkertaisena.

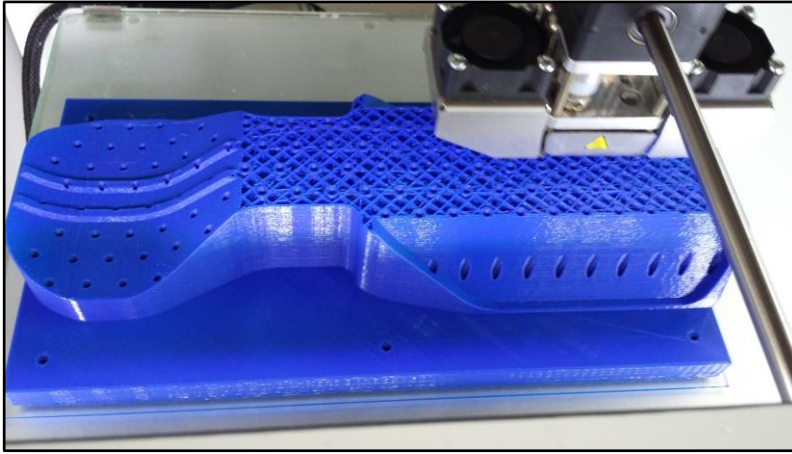
5.4.2 Muotin 3D-tulostus

3D-tulostus perustuu AM-tekniikkaan, jolla tarkoitetaan kaikkia ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä. Muotit tulostetaan TAMKIn Ultimaker2 Extended -3D-tulostimella ja muottiin liittyvä rajain Prenta Duo XL -tulostimella. Molempien tulostimien toiminta perustuu materiaalin pursotukseen. Tämän lisäksi muita AM-tekniikoita ovat esimerkiksi sideaineen suihkutus, materiaalin suihkutus, jauhepetisulatus ja kerroslaminointi (SFS-ISO/ASTM 52900, 6).

Materiaalina tulostuksessa käytetään polylaktidia, joka voidaan lyhentää PLA. Tmi Filamentin (2016) mukaan polylaktidi on biohajoava, hieman kova ja sitkeä muovimateriaali. Lisäksi PLA:lla on hyvä kulutuskestävyys. (Tmi Filamentti 2016.) PLA perustuu luonnon raaka-aineisiin, ja sitä voidaan valmistaa esimerkiksi maissista, selluloosasta, soijasta tai sokerista (Sandell 2002, 43; Tavani Oy 2016). PLA:ta käytetään 3D-tulostuksen lisäksi esimerkiksi elintarvikepakkauksissa, kertakäyttöastioissa, kasvualustoissa ja lääketieteellisten sovelluksissa (Sandell 2002, 43; Järvinen 2008, 111). Biohajoavuutensa ansiosta se on myös ympäristöystävällisempää kuin toinen yleinen tulostusmateriaali ABS (akryliniitriilibutadieenistyreeni).

Filamentiksi kutsutaan tulostusmateriaalia, joka on kuituina nauhamuodossa. Muottien tulostuksessa käytetään filamenttia, jonka halkaisija on 1,75 mm ja tulostimen suutin on halkaisijaltaan 0,4 mm. PLA:n pehmenemislämpötila eli lämpötila, jonka jälkeen muovia ei enää voi käyttää jäykkänä materiaalina, on noin 60 °C (Laitinen 2008, 196; Tmi Filamentti 2016). PLA:n sulamislämpötila on 210°C ± 10°C (Tmi Filamentti 2016). Sulamislämpötilassa materiaali muuttuu juoksevaksi nesteeksi (Laitinen 2008, 196). PLA:ta käytettäessä tulostuslämpötilan tulee olla lähellä sulamislämpötilaa, jotta materiaalin pursoitus on mahdollista. Mikäli tulostuslämpötila on liian alhainen, materiaalia ei pursoitu ulos suuttimesta. Tulostuslämpötilan ollessa liian korkea materiaali saattaa palaa suuttimeen. Tulostuslämpötilana käytettiin 195 °C, joka on koulun 3D-tulostimissa aikaisempien tulostusten perusteella todettu hyväksi.

3D-tulostuksissa käytettiin opinnäytetyön tekijöiden aikaisemmissa samankaltaisissa tulostuksissa hyviksi todettuja arvoja. Tärkeimpinä arvoina kerrospaksuus oli 0,15 mm, ulkokuoren paksuus 0,8 mm ja täyttö 20 %. Näillä arvoilla saatiin aikaiseksi riittävän kestävä ja käyttötarkoitukseen sopiva tuloste kohtuullisessa ajassa. Seuraavassa kuvassa (kuva 15) 3D-tulostetaan muottia Ultimaker2 Extended -tulostimella. Kuvassa oikealla näkyy muotin sisälle tuleva tukeva ristikkorakenne.



KUVA 15. Muotin 3D-tulostus

Muotin tulostus kesti noin vuorokauden. Ilman imuaukkoja tulostus olisi ollut huomattavasti nopeampaa, koska tulostin piirtää yksittäin jokaisen reiän jokaisella kierroksella. Kaikkien imuaukkojen poraus olisi kuitenkin heikentänyt rakennetta liikaa. Vaihtoehtona olisi myös ollut tulostaa muotti sataprosenttisella täytöllä ja porata imuaukot, jolloin rakenne olisi tarpeeksi kestävä. Tällöin materiaalia olisi kuitenkin tarvittu huomattavasti enemmän kuin pienemmällä täytöllä. Seuraavassa kuvassa 16 on valmis tulostettu 3D-muotti. Kaikissa opinnäytetyön aikana tulostetuissa kappaleissa käytettiin melko samoja arvoja.



KUVA 16. 3D-tulostettu muotti

5.4.3 Muotin kokoaminen

Muotti koottiin ja viimeisteltiin Korialla Ecopulp Oy:n tiloissa. Muottiin, tukilastan krittisiin kohtiin, porattiin lisäreikiä paineilmaporalla. Tällaisia kohtia olivat kapeampi ns.

kaulaosa ja ranteen reunaosat. Lisämuaukkojen ansiosta näihin kohtiin saadaan muodostuksessa enemmän kuitumassaa. Kuvassa 17 näkyy lisäreikien porausta. Lisäreikien jälkeen muotin alapuolelle molempiin päihin tehtiin uritus, joka varmistaa kuitumassan muodostumisen koko halutulle alalle. Tämän jälkeen muotin ja vanerilevyn väliin liimattiin ikkunatiivistettä, jonka tarkoitus on suurentaa vanerin ja muotin väliä, jotta imu toimi hyvin koko muodostusalueella.



KUVA 17. Lisäreikien poraus paineilmaporalla

Hyvin muotoutuva ja joustava teräsviiran pala muotoiltiin aluksi käsin muotin päälle. Viiraan tulevat tarkemmat muodot muotoiltiin ruuvimeisselin kaltaisella viiratyökalulla, jonka avulla viira painettiin tiukasti muotin kulmiin ja reunoihin. Muotti ja viira kiinnitettiin vanerilevyyn ruuveilla. Tämän jälkeen rajain asetettiin muotin päälle. Rajain asetettiin tiukasti muotin ympärille varmistamaan samalla viiran pysymisen. Seuraavassa kuvassa 18 on valmis muotti.



KUVA 18. Valmis muotti

5.5 Protokappaleen valmistus

Protokappale valmistettiin Ecopulp Oy:n tiloissa Koriolla. Ensimmäisenä massana proton valmistuksessa käytettiin Ecopulp Oy:n suoraan koneelta otettua kierrätyskuitumassaa. Tämä kuitumassa sisälsi noin yhden massaprosentin kuiva-ainepitoisuudesta seuraavia lisäaineita: kuivalujahartsi, märkälujahartsi, vaha sekä aluna. Toinen proton valmistuksessa käytetty kuitumassa oli puhdasta koivusellua. Pitkän välimatkan sekä tiukan ja muuttuneen aikataulun takia protossa päädyttiin käyttämään vain paikalla valmiiksi olleita kuitumassoja. Lisäksi kuitumassan valinnalla ei koettu olevan tässä vaiheessa kovin suurta merkitystä.

Massat laimennettiin muodostusaltaaseen noin yksiprosenttisiksi. Aikaisemmin valmistellun muotin pohjan liitääntään liitettiin imuletku koneelta. Muotti upotettiin laimennettuun massaan muutamaksi sekunniksi ylösalaisin siten, että imuletku osoitti ylöspäin, kuvan 19 mukaisesti. Uputusajalla ja massan sakeudella pystytään säätelemään muodostuvan lastan paksuutta. Suurin imu ja muodostuminen tapahtuvat kuitenkin ensimmäisten sekuntien aikana. Muutamien testien jälkeen viisi sekuntia todettiin sopivaksi imuajaksi.



KUVA 19. Kuituvaloslastan muodostusvaihe

Muodostumisen jälkeen muotti nostettiin massasta imua vielä jatkaen. Noin kymmenen sekunnin kuivauksen jälkeen muotti voitiin kääntää kyljelleen pöydälle lisäkuivaukseen. Kuivauksen kesto vaihteli 30 sekunnista muutama minuutti. Noin 1,5–2 minuutin kuivusaika todettiin sopivaksi. Tällöin kuituvalos oli tarpeeksi kuiva ja irrotus muotista onnistui. Kuivauksen jälkeen imu irrotettiin, jonka jälkeen voitiin irrottaa myös rajain.

Tämän jälkeen kuitumassasta muodostunut lasta irrotettiin käsin muotista ja asetettiin lepäämään oikeaan muotoon muotin vastakappaleen päälle. Seuraavassa kuvassa (kuva 20) on lasta ennen ja jälkeen muotista irrotuksen.



KUVA 20. Lasta muotissa (vas.) ja irrotettuna muotin vastakappaleen päällä (oik.)

Pelkän kierrätyskuidun jälkeen testattiin kerroksittaista valmistusta. Muodostusvaiheessa muotti kastettiin ensin noin puoleksi sekunniksi laimennettuun sellumassaan ja sen jälkeen yhdeksi sekunniksi kierrätyskuitumassaan. Tämän jälkeen jatkettiin imukuivausta 20–30 sekunnin ajan. Kuivauksen jälkeen irrotettiin rajain ja sen jälkeen lasta. Lasta asetettiin lepäämään muotin vastakappaleen päälle (kuva 21).



KUVA 21. Kerroksittain valmistettu tukilasta

Protokappaleet kuivattiin noin 150 celsiusasteisessa kuivatusuunissa. Lastat aseteltiin kuivatusuuniin siten, että niiden muuten ilmaan jäävä pää oli laudan päällä. Lastat kuivatettiin muun valmistuksen lomassa siten, että uuni pysäytettiin hetkeksi lastojen lastausta varten. Lastojen kuivaus uunissa kesti 10–15 min. Lastojen tullessa uunista niiden paino on noin neljäsosa märkäpainosta. Kuivauksen jälkeen lastat ovat kuivia, lämpimiä ja jäykkiä (kuva 22). Jäykkyys lisääntyy huomattavasti kuivatusuunin lämmön vaikutuksesta.



KUVA 22. Protolastat kuivatusuunin jälkeen, etupäät laudalla tuettuina

6 TESTAUSMENETELMÄT

6.1 Menetelmien valinta

Sekä alkuperäistä materiaalia, 2,5 millimetrin paksuista pahvia, että BCTMP:sta valmistettuja arkkeja testataan. Testausmenetelmiä valittaessa huomioidaan TAMKIn paperi- ja pakkauslaboratoriossa käytettävissä olevat laitteet sekä tukilastojen toimivuuden kannalta tärkeimmät ominaisuudet. Opinnäytetyön kannalta käytettävien raaka-aineiden perusominaisuuksien tunteminen on tärkeää, joten raaka-aineista selvitetään aluksi paksuus, tiheys ja neliömassa. Taivutusjäykkyys on tukilastan toimivuuden vuoksi todella merkittävä ominaisuus. Tukilastan tulee olla jäykkä, jotta se soveltuu hyvin käyttötarkoitukseensa.

Ilmanläpäisevyys on tukilastan käyttömukavuuden kannalta merkittävä ominaisuus, lastan tulee olla hengittävää materiaalia. Paksun ja huokoisen pahvin ilmanläpäisevyysmittauksessa ilma voi päästä pois pahvin pinnalta tai rakenteiden välistä. Lisäksi ilma voi osittain jäädä huokoisen rakenteen sisälle. Näiden epävarmuustekijöiden takia ilmanläpäisevyysmittausta ei voi pitää täysin luotettavana ja se päätetään jättää pois mittauksista.

6.2 Neliömassa

Neliömassa on paperin massa grammoina neliometriä kohti ja sen yksikkö on g/m^2 . Paperikoneilla neliömassa mitataan jatkuvalla β -säteilyn absorptioon perustuvalla mittauksella. Laboratoriossa neliömassan mittausta tapahtuu kuitenkin punnitsemalla tietynkokoisia paperiarkkeja standardin ISO 536 mukaisesti. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 78; Neliömassa 2015.) Neliömassa lasketaan kaavan 1 avulla.

$$g = \frac{m}{A} \cdot 10^6 \quad (1)$$

, jossa g on neliömassa grammaa neliometriä kohden, m on paino grammoina ja A on testipalan pinta-ala neliömillimetreinä (SFS-EN ISO 536, 2). Paperien neliömassat ovat normaalisti 28–150 g/m^2 , kun taas kartonkien neliömassat vaihtelevat 100 g/m^2 ja 600

g/m² välillä. Pahvit ovat vielä painavampia tuotteita, joita saadaan liimaamalla kartonkeja yhteen. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 78.)

Neliömassan vaihtelu vaikuttaa lähes kaikkiin paperin ominaisuuksiin. Neliömassan kasvaessa paperin lujuus, tiiviys ja opasiteetti (läpinäkymättömyys) paranevat. Painavampi paperi vaatii kuitenkin enemmän raaka-ainetta ja energiaa neliötä kohti. Suurempi raaka-ainemäärä tarkoittaa myös suurempaa paperijätteen määrää. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 78.) Raaka-aineen ja energian tarpeen kasvaminen lisää valmistuskustannuksia, joten edullisin paperi on usein kevyin, mutta käyttötarkoitukseen riittävät ominaisuudet omaava. (Neliömassa 2015.)

6.3 Paksuus ja tiheys

Paperin paksuus on arkin pintojen välinen etäisyys. Paksuus voidaan mitata joko yksittäisestä arkista, jolloin saadaan arkin paksuus tai useista päällekkäin asetetuista arkeista, jolloin saadaan pinopaksuus. (Paksuus, tiheys ja bulkki 2015.) Paperin pintojen epätasaisuudet lomittuvat arkipinossa, minkä takia pinopaksuus on pienempi kuin arkin paksuus. Arkin paksuus mitataan standardin ISO 534 mukaan mikrometrillä, joka painaa paperia noin 100 KPa paineella. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 82.)

Tiheyden yksikkö on kg/m³ ja se saadaan jakamalla neliömassa arkin paksuudella. Paperin pieni tiheys on usein toivottu ominaisuus. Tiheys riippuu raaka-aineiden ainestiheydestä sekä huokoisuudesta. Paperin kuitujen ja täyteaineiden välissä on aina ilmatilaa. Paperin tiheys lasketaan standardin ISO 534 mukaan, kaavaa 2 käyttäen. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 83.)

$$d_s = \frac{g}{\delta_s} \quad (2)$$

, jossa d_s on tiheys grammaa kuutiosenttimetriä kohden, g on neliömassa grammaa neliömetriä kohden ja δ_s on arkin paksuus mikrometreinä (SFS-EN ISO 534, 6).

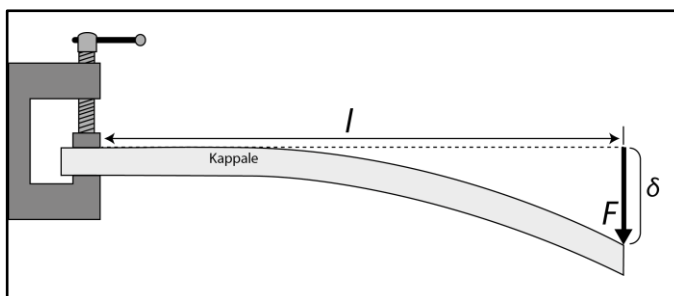
6.4 Taivutusjäykkyys

Taivutusjäykkyys on työn kannalta merkittävä ominaisuus ja siihen on laitteisto TAMKIn paperi- ja pakkauslaboratoriossa. Bekvil Oy:n käyttämä pahvi on kuitenkin laitteelle liian jäykkää, eikä laitteen voima riitä taivuttamaan pahvia. Tämän takia taivutusjäykkyys testataan fysiikan laboratoriossa itse rakennetulla mittauslaitteistolla. Laitteistolla on tarkoitus mitata taivutusjäykkyys Bekvil Oy:ltä saaduista pahveista ja TAMKIn paperi- ja pakkauslaboratoriossa valmistetuista arkeista, joilla testataan myös kappaleen muodon vaikutusta taivutusjäykkyyteen. Taivutusjäykkyydellä tarkoitetaan taivutusmomentin ja sen myötä tapahtuvan siirtymän suhdetta (Markström 2005, 27).

6.4.1 Työn kannalta soveltuvia testausmenetelmiä

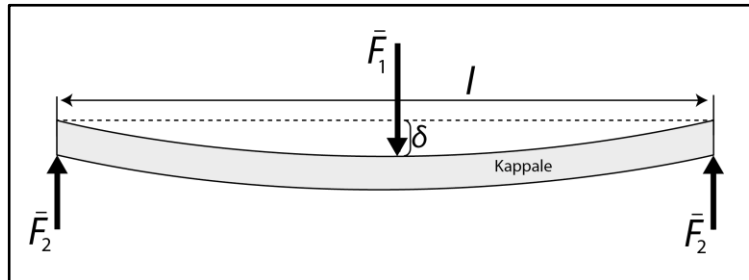
Markströmin (2005, 27–28) esittelee kolme eri aaltopahvin taivutusjäykkyyden testausmenetelmän teoriaa. Aaltopahvin testausmenetelmät ovat taivutusjäykkyyden kannalta soveltuvia myös opinnäytetyössä käytettäväksi. Testausmenetelmiä on kolme: 2-pisteen, 3-pisteen ja 4-pisteen menetelmä. Näiden menetelmien erona on voiman vaikutuspisteiden määrä. Testattavaa kappaletta voi ajatella pintana, jossa pinnan vastakkaisille puolille keskittyy aina sama voima mittausmenetelmästä riippumatta. (Markström 2005, 27–28.)

Kaikista yksinkertaisin näistä menetelmistä on 2-pisteen menetelmä (kuvio 9), jossa taivutettavan kappaleen toinen pää on kiinteä ja toiseen päähän kohdistetaan pystysuora voima F . Testin aikana mitataan voiman lisäksi kappaleen pään kohtisuoraa välimatkaa l ruuvipuristimeen ja pystysuuntaista siirtymää δ aloitusasennosta. (Markström 2005, 27–28.)



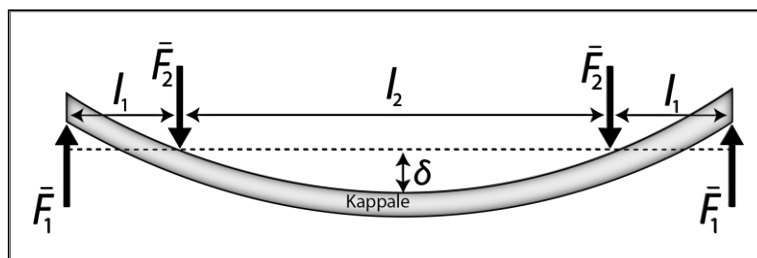
KUVIO 9. Periaatekuva 2-pisteen menetelmästä Markströmin mukaan (Markström 2005, 27–28)

Hieman monimutkaisempi testausmenetelmä on 3-pisteen menetelmä (kuvio 10), jossa kappale lepää kahden tukipisteen välissä. Kappaleen keskelle kohdistetaan pystysuora voima F_1 . Kappaleentukipisteet ovat staattisia ja niihin kohdistuu pintojen tukivoimat F_2 . Testin aikana mitataan voiman F_1 lisäksi kappaleen keskikohdan siirtymä δ aloitusasennosta. Tukipisteiden välinen matka l pysyy vakiona. (Markström 2005, 27–28.)



KUVIO 10. Periaatekuva 3-pisteen menetelmästä Markströmin mukaan (Markström 2005, 27–28)

Monimutkaisin menetelmä on 4-pisteen menetelmä (kuvio 11), jossa kappale lepää kahden staattisen tukipisteen välissä. Kappaleen molemmille reunoille kohdistetaan pystysuora voima F_1 . Kappaleeseen vaikuttavat myös tukivoimat F_2 . Kaikki yksittäiset voimat ovat saman suuruisia. Testin aikana mitataan voimien F_1 lisäksi kappaleen keskikohdan siirtymä δ aloitusasennosta. Voimien vaikutuspisteiden väliset etäisyydet l_1 ja l_2 pysyvät vakioina. (Markström 2005, 27–28.)



KUVIO 11. Periaatekuva 4-pisteen menetelmästä Markströmin mukaan (Markström 2005, 27–28)

6.4.2 Testausmenetelmän valinta

Testausmenetelmän valinnassa täytyi ottaa huomioon erityisesti käytännön toteutus, jonka myötä testin luotettavuus olisi paras mahdollinen. Käytännön toteutuksen rajoittavana tekijänä oli erityisesti testauslaitteistojen toteutus TAMKIn fysiikan laboratoriossa.

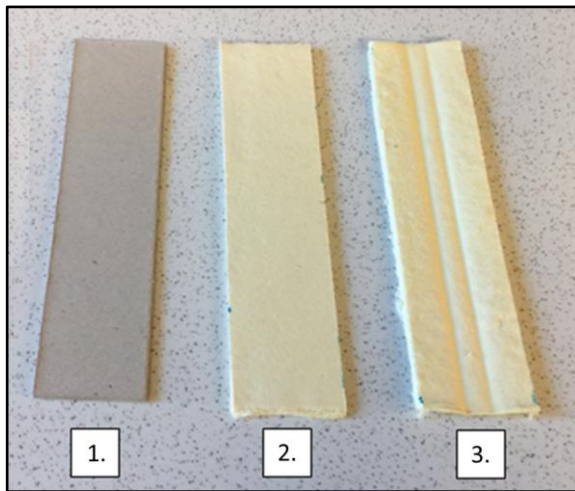
Huonoin vaihtoehto on 2-pisteen menetelmä. Testausmenetelmä olisi ollut hankala toteuttaa tarpeeksi tarkaksi, koska testissä joudutaan mittaamaan samanaikaisesti kahta välimatkaa ja mahdollisesti myös voimaa. Lisäksi voiman kohdistaminen kappaleeseen olisi ollut haasteellista.

Toimivuuden kannalta helpoin menetelmä toteuttaa oli 3-pisteen menetelmä. TAMK:n fysiikan laboratoriossa on käytössä metalliputkien kimmokertoimeen rakennettuja laitteistoja. Laitteisto oli mahdollista muuntaa sopivaksi 3-pisteen menetelmälle. Tarkimman mittaustuloksen kannalta 4-pisteen menetelmä olisi kaikkein paras (Markström 2005, 27–28). Kuvio 11 päätellen 4-pisteen menetelmässä vaikuttavat voimat jakautuvat testattavaan kappaleeseen tasaisemmin kuin 3-pisteen menetelmässä (kuvio 10). Tästä johtuen 3-pisteen menetelmässä kappaleen keskelle muodostuu suurin paine, millä saattaa olla merkitystä testin tarkkuuteen. 4-pisteen menetelmä olisi ollut kuitenkin hankalampi toteuttaa käytännössä, minkä takia mittauksien virhetekijät olisivat saattaneet kasvaa.

Lopulliseksi testausmenetelmäksi valittiin 3-pisteen menetelmä. Menetelmä oli opinnäytetyössä tehtäville jäykkyysmittauksille tarpeeksi tarkka, jotta sillä saataisiin mitattua kahden materiaalin ero. Lisäksi menetelmällä oli helppoa ja nopeaa mitata isompiakin sarjoja.

6.4.3 Testaamiseen käytetty menetelmä

Testin valmistelu aloitetaan leikkaamalla testattavista materiaaleista 40 x 160 millimetrin kokoisia testikappaleita (kuva 23), joissa konesuunta on pitkän reunan suuntainen. Paperi- ja pakkauslaboratoriossa valmistetuissa uritetuissa arkeista leikataan testikappale siten, että ura on pitkän sivun suuntainen. Kuvassa (23) näkyvät kaikki taivutusjäykkyyden mittaamisessa käytetyt testikappaleet; kappale 1. on Bekvil Oy:n käyttämää pahvia, kappaleet 2. ja 3. ovat paperi- ja pakkauslaboratoriossa valmistettujen BCTMP-arkkien palasia.



KUVA 23. Taivutusjäykkyyden mittauksessa käytettäviä testikappaleita

Taivutusjäykkyyden testaamista varten rakennetaan testauslaitteisto (kuva 24) TAMKin fysiikan laboratoriossa. Testauslaitteisto koostuu kahdesta statiivista, kiinnityskourista, kannaketapeista, mittakellosta, punnustelineestä, punnuspakasta ja punnuksista.

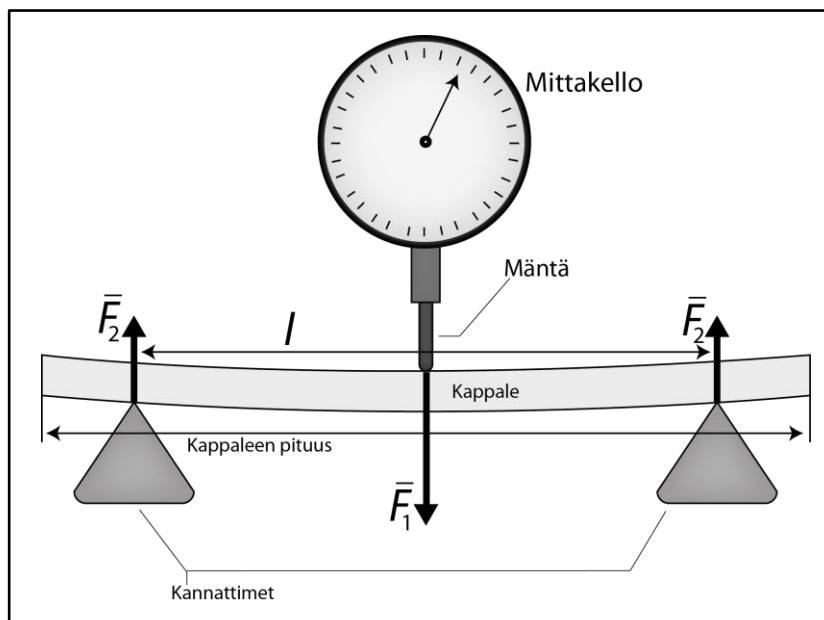


KUVA 24. Taivutusjäykkyyden testauslaitteisto

Testaamisen ensimmäisessä vaiheessa testikappale asetetaan kannattimien päälle, pidemmän reunan suuntaisesti siten, että testikappaleen pitkittäissuuntainen keskikohta on kannattimien puolivälissä. Keskelle testikappaleella asetetaan punnusteline, joka jakaa punnustelineen painon tasaisesti kappaleeseen poikittaissuunnassa. Mittakello asetetaan tes-

tikappaleen päälle siten, että kellossa oleva mäntä liikkuu hieman sisäänpäin ja on keskellä testikappaletta. Tämän jälkeen mittakellon lukema nollataan. Punnustelineeseen asetetaan punnuspakka, jonka painoa nostetaan erillisillä punnuksilla. Mittakellon lukema kirjoitetaan mittauspöytäkirjaan aina punnuksen lisäämisen jälkeen.

Testausmenetelmän periaatekuviossa (kuvio 12), l on kannattimien välimatka, F_1 on kappaleen keskikohdan siirtymään vaikuttava voima eli voima, jolla kappaletta taivutetaan ja F_2 on kappaleeseen vaikuttavat pinnantukivoimat. Kuviossa näkyvät voimavektoreiden pituudet havainnoivat voimien suuruutta. Newtonin kolmannen lain mukaan kappaleen pinnan tukivoima on yhtä suuri kuin pintaan vaikuttava vastakkais-suuntainen voima eli F_1 on F_2 (Inkinen & Tuohi. 2012, 100).



KUVIO 12. Taivutusjäykkyyden mittaamiseen käytetty laitteisto

Taivutusjäykkyyttä varten lasketaan kappaleeseen vaikuttava taivutusvoima kaavan 3 avulla.

$$F = mg \quad (3)$$

, jossa F on kappaletta taivuttava voima Newtonmetreinä, m on punnusten massa kilogrammoina ja g on maan putoamiskiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$ (Mäkelä ym. 2012, 91). Taivutusjäykkyys lasketaan kaavan 4 avulla

$$S_B^b = \frac{Fl^3}{16\delta} \quad (4)$$

, jossa S_B^b on taivutusjäykkyys Newtonmetreinä, F on kappaletta taivuttava voima Newtonneina, l on testikappaleen kannattimien etäisyys ja δ on testikappaleen keskikohdan siirtymä metreinä (Markström, H. 2005, 28). Kaavat 3 ja 4 voidaan yhdistää yhdeksi kaavaksi 5.

$$S_B^b = \frac{mgl^3}{16\delta} \quad (5)$$

7 MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY

7.1 Neliömassa

Neliömassojen mittausten suorituksista kerrotaan liitteiden 3 ja 4 mittauspöytäkirjoissa. Neliömassat on laskettu liitteen mittauspöytäkirjoihin kaavan 1 avulla. 2,5 mm paksuisen pahvin neliömassojen keskiarvoksi tuli 1490 g/m^2 ja BCTMP-arkkien 668 g/m^2 . Pahvin neliömassa on siis yli tuplasti korkeampi kuin BCTMP-arkkien. Valmistajan ilmoittama neliömassa 2,5 mm pahville on 1495 g/m^2 (Smurfit BB). Tästä voi päätellä, että valmistajan ilmoittama neliömassa pitää hyvin paikkaansa ja tuote on tasalaatuinen.

7.2 Paksuus ja tiheys

Liitteissä 5 ja 6 kerrotaan paksuus- ja tiheysmittausten suorituksista ja mittaustuloksista. 2,5 mm pahvin ja BCTMP-arkin paksuuksien keski-, maksimi- ja minimiarvot ovat liitteiden 5 ja 6 taulukoissa. Tulosten perusteella 2,5 mm paksuinen pahvi on hieman luvattua ohuempaa. Minimi- ja maksimiarvojen ero on vain 0,07 mm eli pahvi on tasapaksuista. BCTMP-ärkeissa paksuuksien keskiarvo on 3,22 mm, joka on reilusti paksumpi kuin pahvilla. BCTMP-ärkeissa maksimi- ja minimiarvojen ero on yli puoli millimetriä. Paksuuden vaihtelu on odotettua, koska arkkeihin käytetty massa mitattiin dekanterilasilta.

Tiheydet on laskettu aiempien neliömassojen ja paksuuksien keskiarvoista kaavan 3 avulla. Tulokset on esitetty liitteiden 5 ja 6 mittauspöytäkirjoissa. Pahvin tiheyksistä laskettu keskiarvo on 640 kg/m^3 , kun BCTMP-arkin tiheys on vain noin kolmasosa eli 210 kg/m^3 . Pahvi on siis raaka-aineena paljon tiiviimpää kuin BCTMP. Tämä johtuu pahvin monikerroksisesta rakenteesta, missä useampia ohuempia, jo alkujaan suhteellisen suuren neliömassan omaavia kartonkeja, on liimattu tiiviisti päällekkäin. Pahvin raaka-aineena olevat kartongit on myös valmistettu kartonkikoneella, joten niiden kuidut ovat saman suuntaisia ja muodostavat näin tiheämmän rakenteen. BCTMP-ärkeissa ei ole varsinaista kuitusuuntaa, vaan niissä olevat kuidut ovat asettuneet sekaisemmin. Tämä johtuu muun muassa arkkien valmistustavasta, joka antaa materiaalille huokoisen rakenteen.

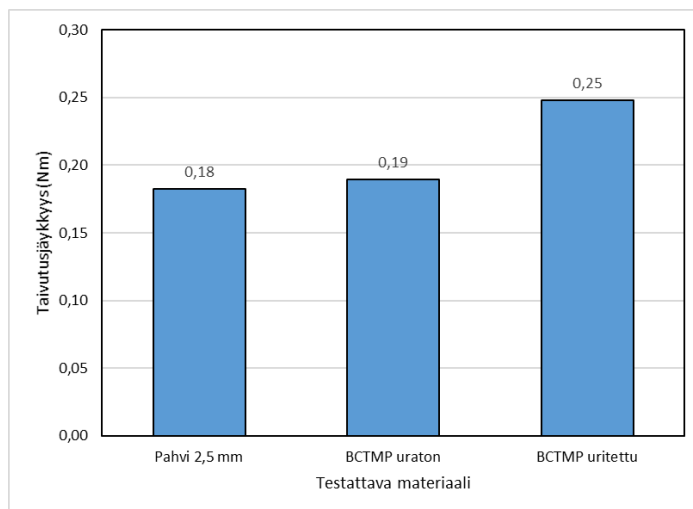
7.3 Taivutusjäykkyys

Mittaustulosten perusteella laskettiin testikappaleille taivutusjäykkyydet (liite 7). Taivutusjäykkyyksien keskiarvojen perusteella piirrettiin pylväsdiagrammi. Testikappaleista piirrettiin myös voima keskikohdan siirtymän funktiona -kuvaaja, jossa on käytetty testattavien materiaalien taivutusjäykkyyksien keskiarvoja. Virhearvioinnissa käsiteltiin mittaustilanteessa syntyneitä virheitä ja niiden vaikutusta lopputulokseen.

Taivutusjäykkyys saadaan laskettua kaavalla 5. Alla olevassa esimerkissä on laskettu taivutusjäykkyys 2,5 millimetrin paksuisen pahvin, testikappaleelle numero kaksi, käyttäen 84 gramman punnusta. Loput lasketut taivutusjäykkyydet on taulukoitu liitteisiin (liite 7), joihin on myös merkattu mittaustuloksen suuren poikkeaman vuoksi hylätyt tulokset.

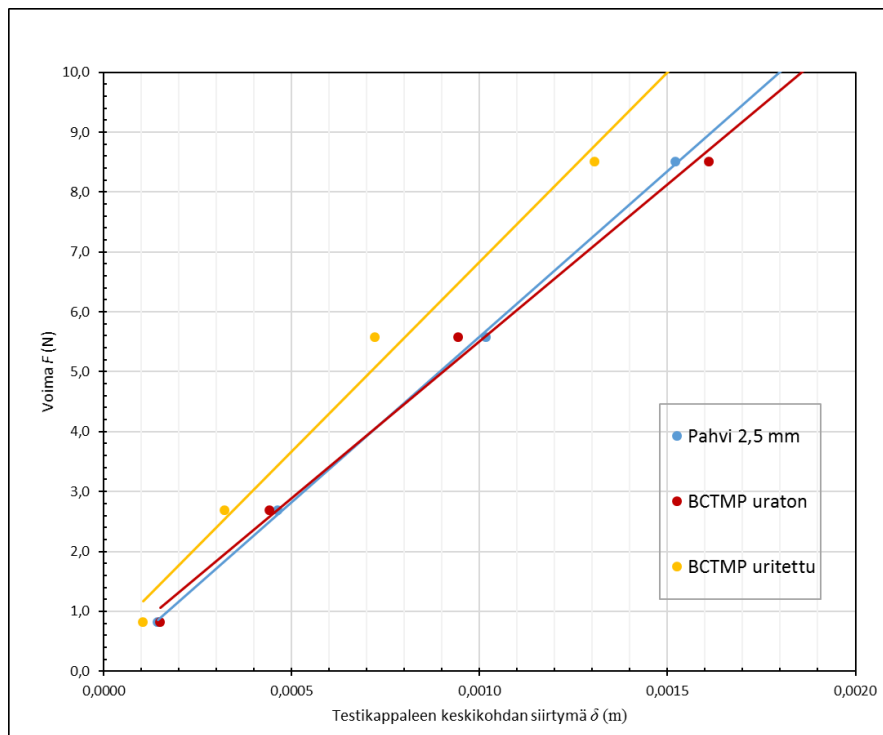
$$S_B^b = \frac{(84 \cdot 10^{-3} \text{ kg}) \cdot 9,81 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot (0,08 \text{ m})^3}{16 \cdot (0,17 \cdot 10^{-3} \text{ m})} = 0,188352 \text{ Nm} \approx 0,19 \text{ Nm}$$

Lasketuista taivutusjäykkyyksistä piirretään vertailun vuoksi pylväsdiagrammi Excelissä (kuvio 13) siten, että kaikkien kolmen testattavan materiaalin taivutusjäykkyyksistä on laskettu keskiarvot kuviota varten. Pylväsdiagrammin x-akselille on nimetty testattavat materiaalit ja y-akseli näyttää testattavien materiaalien taivutusjäykkyyden Newtonmetreinä. Kuviosta voidaan päätellä, että 2,5 millimetrin pahvin ja urattoman BCTMP-testikappaleen taivutusjäykkyys on lähes samansuuruinen, mutta uritetun BCTMP-testikappaleen taivutusjäykkyys on huomattavasti suurempi.



KUVIO 13. Testikappaleiden taivutusjäykkyydet

Testikappaleista on piirretty voimasiirtymä-kuvaaja (kuvio 14). Kuviosta voi lukea kuinka paljon testikappale on taipunut eli sen keskikohta on siirtynyt tietyn voiman alaisena. Testikappaleiden jäykkyyksien mukaan on kuvaajaan sovitettu lineaarinen suora. Vaakatasossa oleva x-akseli kertoo testikappaleen keskikohtan siirtymän metreinä ja pystytasossa oleva y-akseli kertoo testissä kappaleeseen kohdistetun voiman Newtonina. Kuvioon sovitettu lineaarinen suora leikkaa hyvin pisteet, mistä voidaan päätellä testikappaleiden siirtymän olevan myös lineaarista verrattuna käytettävään voimaan. Käytännössä kuitenkin testikappaleen ollessa lähellä murtumispistettä ei kuvio käyttäydy enää lineaarisen suoran tavoin.



KUVIO 14. Voima keskikohdansiirtymän funktiona

Virhearvioinnissa perehdytään mittaustilanteessa syntyviin virheisiin. Jäykkyysmittauksesta saatuihin tuloksiin virheitä aiheuttavat mittauksessa käytetty mittakello, punnukset, rullamitta ja mittaja. Mittaajasta johtuva virhe on kaikkein suurin, erityisesti painavimpien punnusten kohdalla.

Mittalaitteiden aiheuttamana virheenä käytetään laitteen asteikon pienintä mittaväliä.

Mittakello $\pm 0,01$ mm = 0,00001 m

Rullamitta ± 1 mm = 0,001 m

Punnukset ± 1 g = 0,001 kg

Mitattavien kappaleiden ominaisuuksiin kuuluu nopea tai hetkellinen taipuminen tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen taipuminen jatkuu huomattavasti hitaampaan tasaiseen tahtiin. Jäykkyyksmittauksessa on otettu huomioon kappaleiden hetkellinen eli nopea taipuminen. Tästä syystä mittaajan on hankala arvioida tarkalleen, missä kulkee nopean ja hitaan taipumisen raja. Mittaajan virheenä voidaan arviolta käyttää 0,01 millimetriä, missä on otettu huomioon, ettei keveimpiä punnuksia käytettäessä ole ollut hidasta taipumista lainkaan. Virhelaskennassa mittaajan virhe summataan mittakellon virheen kanssa.

Seuraavalla kaavalla 6 lasketaan taivutusjäykkyydelle suhteellinen virhe. Kaavassa 6 olevat deltalla merkityt osoittajien suuret tarkoittavat mittausvälineiden virhearvoja, joista massaan mittakellon antamaan virheeseen on merkitty myös mittaajan tekemä virhe (Arminen ym. 2010, 10).

$$\left| \frac{\Delta S_B^b}{S_B^b} \right| = \left| \frac{\Delta m}{m} \right| + \left| \frac{\Delta \delta}{\delta} \right| + \left| n \frac{\Delta l}{l} \right| \quad (6)$$

Osoittajassa oleva suure m tarkoittaa testissä käytettyjen punnusten massan keskiarvoa, δ tarkoittaa testikappaleen keskikohdan siirtymien keskiarvoa, l tarkoittaa testauslaitteiston kannatintappien välimatkaa, mikä pysyy muuttumattomana, n tarkoittaa taivutusjäykkyyden kaavassa esiintyvää potenssia. Alapuolella on laskettu kaavan 6 avulla esimerkiksi 2,5 millimetrin paksuisen pahvin taivutusjäykkyyden suhteellinen virhe. Kaikki virheet on laskettu taulukkoon 3.

$$\left| \frac{\Delta S_B^b}{S_B^b} \right| = \left| \frac{1 \text{ g}}{448,25 \text{ g}} \right| + \left| \frac{0,01 \text{ mm} + 0,01 \text{ mm}}{0,786 \text{ mm}} \right| + \left| 3 \cdot \frac{1 \text{ mm}}{80 \text{ mm}} \right| = 0,065$$

Taivutusjäykkyyden absoluuttinen virhe saadaan kertomalla mittaustulos suhteellisella virheellä 2,5 millimetrin paksuisen pahvin taivutusjäykkyydellä:

$$\left| \frac{\Delta S_B^b}{S_B^b} \right| \cdot S_B^b = 0,065 \cdot 0,180 \text{ Nm} = 0,0117 \text{ Nm} \approx 0,012 \text{ Nm}$$

TAULUKKO 3. Taivutusjäykkyyden mittauksissa tapahtuneet virheet

Mittausten virheet	Suhteellinen virhe	absoluuttinen virhe (Nm)	Taivutusjäykkyys (Nm)
Pahvi 2,5 mm	0,065	0,012	0,18±0,012
BCTMP uraton	0,065	0,012	0,19±0,012
BCTMP uritettu	0,073	0,018	0,25±0,018

8 KUSTANNUSLASKELMAT

Valmistuksen kustannuslaskelmat ovat luottamuksellista aineistoa ja siksi ne on salattu julkisesta versiosta. Liitteessä 8 on laskettu materiaali- ja valmistuskustannukset alkuperäisellä menetelmällä sekä kuituvalostekniikalla. Alkuperäisen menetelmän kustannuksia varten on konsultoitu Bekvil Oy:n yhteyshenkilöä. Kuituvalostekniikan materiaalin ja valmistusmenetelmän kustannuslaskelmoinnissa on hyödynnetty Ecopulp Oy:n tietoja. Laskelmissa on käytetty rannelastaa 504D, joka on ollut esimerkkilastana koko opinnäytetyön ajan.

Kuituvalostekniikan suurimmat kertakustannukset tulevat muoteista. Valmistusta varten tarvitaan muodostusmuotti, siirtomuotti sekä kaksipuoleinen prässimuotti. Näiden hinta on useita tuhansia euroja, mutta toisaalta ne ovat lähes ikuisia. Eri kokoiset lastat tarvitsevat lisäksi omat muotit, mikä tekee alkukustannukset melko suuriksi. Kustannuslaskelmissa muottien takaisinmaksuajaksi on laskettu 10 000 iskua, joka kuudella lastalla muottia kohden tarkoittaa 60 000 tukilastaa. Laskelmat on toteutettu siten, että yhdellä muotilla saadaan valmistettua kerralla kuusi lastaa. Laskelmiin ei ole huomioitu rahtikustannuksia, mutta oletuksena lastoja tehdään kerrallaan isompi erä ja useampia kokoja. Kustannuslaskelmien perusteella kuituvalostekniikka on alkuperäistä valmistustapaa edullisempi. Valmistus kuituvalostekniikalla on siis kannattavaa.

9 POHDINTA

9.1 Johtopäätökset

Opinnäytetyön tuloksena saatiin valmistettua ensimmäiset protolastat. Tämän ensimmäisen proton pohjalta pystytään vahvistamaan, että kuituvalostekniikka soveltuu tukilastan valmistusmenetelmäksi. Proton muotoilu ei kuitenkaan ole sellaisenaan valmis tuotantoon vaan seuraavaa protoa varten tulee tehdä useita muutoksia.

Lastan muotoiluun tulee tehdä muutamia pieniä muutoksia. Vahvikeuran syvyyttä tulee lisätä, jotta lastaan saadaan lisää pituussuuntaista jäykkyyttä. Myös lastan reunalevikkeisiin tarvitsee lisätä pystyssä pysyvyyttä edistävää muotoilua. Vaihtoehtoisesti märkään lastaan voidaan lisätä jonkinlainen kuivumistuki, joka irtoaa jälkiprässäyksen yhteydessä. Lastan etuosaa pitää jatkaa alaspäin niin, että lasta yltää edestäkin pohjan tasoon, eikä jää ilmaan roikkumaan. Tällöin lasta ei tarvitse lisätukea kuivauksen aikana. Lisäksi lastan muu profiili tulee muotoilla vastaamaan alkuperäistä lastaa. Tarvittaessa lastan muotoilun ja ergonomian suhteen tulee olla yhteydessä terveydenhuollon ammattilaisiin.

Ensimmäiset protot painoivat kuivana noin 10 g, joka on selvästi liian vähän. Sopivampi tavoitepaino olisi noin 25 g, jolloin koko lastan paksuus saataisiin yli kaksinkertaiseksi. Tämä vaikuttaa tietysti myös lastan jäykkyyteen. Lastan jäykkyyteen vaikuttavat myös raaka-aineet ja lisäaineet. Valmistuksessa tullaan mahdollisesti käyttämään valkoista kierrätyskuitua. Kierrätyskuitu on materiaalina huomattavasti valkaistua sellua edullisempaa, mikä johtuu sen suuresta saannosta ja keräyspaperin hinnasta. Valmistusmateriaalin on kuitenkin täytettävä viranomaisten asettamat vaatimukset hoitokäytössä. Materiaalikustannukset ovat vain noin muutaman prosentin valmistuskustannuksista, joten niiden lisääminen parempien ominaisuuksien saamiseksi on suositeltavaa. Lisäaineina märkä- ja kuivaliima noin yhden prosentin pitoisuutena kuiva-aineesta sopii hyvin lastoille. Protolastojen pohjalta lastojen jälkiprässäys olisi suotavaa. Jälkiprässäyksestä tulee hieman lisäkustannuksia, mutta se parantaa lastan ominaisuuksia huomattavasti. Tällöin lastasta saadaan sileämpi ja näin mukavampi käyttää. Jälkiprässäys tuo lastaan myös lisää jäykkyyttä.

Lastoja on tällä hetkellä saatavilla kuudessa eri koossa, mutta muottikustannusten kannalta voisi olla järkevää lanseerata tuote aluksi esimerkiksi vain neljässä eri koossa. Esimerkiksi suurimman ja pienimmän lastan voisi karsia tuotannosta ainakin aluksi. Tällöin tuotannon aloituskustannuksiin kuuluvat muottikustannukset eivät olisi niin suuret. Alustavien liitteessä 8 (salattu) olevien kustannuslaskelmien perusteella muottien takaisinmaksu on kuitenkin kohtuullinen, kun laskelmat tehdään 10 000 iskun mukaan, mikä tarkoittaa 60 000 lastaa. Tällöin muottikustannukset lastaa kohden ovat vain noin 20 % materiaali- ja valmistuskustannuksista.

Pahviset tukilastat eivät kuulosta kovinkaan laadukkailta. Kun valmistusmateriaalina ei ole enää pahvi, voisi koko lastojen nimen muuttaa. Trendikäs ja ympäristöystävällisyydestä kertova uusi nimi voisi olla esimerkiksi ekologiset tukilastat. Uuden valmistustavan ja nimen myötä rannelasta päivittyisi nykyisille markkinoille sopivammaksi ja vetovoimaisemmaksi.

9.2 Työn onnistuminen

Työn tavoitteena oli tutkia eri kuitumateriaalien soveltuvuutta käytettäväksi tukilastassa. Opinnäytetyön tavoitteena oli myös selvittää, millaisella menetelmällä tukilasta voidaan valmistaa tehokkaasti. Lisäksi oli tarkoitus valmistaa ensimmäinen protokappale uudesta raaka-aineesta uudella menetelmällä.

Opinnäytetyön aikana pystyttiin selvittämään eri kuitumateriaalien soveltuvuutta lastan valmistukseen. Kuituvalostekniikkaan sopii erityisen hyvin kuituseos, jossa on sekaisin pitkää ja lyhyttä kuitua. Pitkät kuidut antavat tuotteelle tarvittavaa jäykkyyttä, kun taas lyhyet kuidut tehostavat massan suotautumista muotissa ja tekevät tuotteen pinnasta tasisemman. Koulun kuitumassoista parhaiten tukilastoihin sopiva oli kuusta ja koivua sisältävä BCTMP, josta onnistuttiin lisäaineiden avulla valmistamaan alkuperäistä pahvia jäykempiä kappaleita. Kappaleilla oli myös huomattavasti matalampi neliömassa kuin Bekvil Oy:n käyttämällä pahveilla. Huomioitavana ominaisuutena BCTMP-massasta valmistettujen arkkien lujuus laski huomattavasti arkin kuivuttua kunnolla. Tosin pahvien tyypillinen tasapainokosteus on 10 %, jonka jälkeinen kuivuminen aiheuttaa kuitujen vetysidosten katkeamista. Tämä johtaa kartongin esimerkiksi vetolujuuden pienenemiseen.

Alkuperäisessä lastassa oli vaneritukielementti lisäjäykisteenä. Syventämällä vahvikeuria on näistä uusista tukilastoista mahdollista saada yhtä jäykkiä kuin alkuperäisistä.

Arkkien valmistus eri raaka-aine- ja lisäainekombinaatioilla oli työläs ja melko pitkäkestoinen yksittäinen opinnäytetyön vaihe, erityisesti kuivausvaiheen osalta. Prosessina kuituarkin valmistusta ei voi nopeuttaa, mutta testaamista olisi voinut tehdä hieman kapeammalla ja ei niin yksityiskohtaisella tasolla. Tällöin laboratorioissa käytetty aika olisi vastannut paremmin opinnäytetyötä.

Erilaisia valmistusmenetelmiä ja niiden soveltuvuutta selvitettiin. Teorian pohjalta tehdyn vertailun perusteella selkeästi paras menetelmä oli protolastassakin käytetty kuituvalosmenetelmä. Siinä yhdistyy kaikki lastan tärkeimmät ominaisuudet ja lisäksi menetelmä on automatisoitu, mikä tekee valmistuksesta tehokasta ja alkuperäistä menetelmää mielekkäämpää.

Proton valmistus onnistui paremmin kuin odotettiin, sillä proto saatiin valmistaa Ecopulp Oy:n tiloissa. Protolastasta tuli muuten sellainen kuin haluttiin, mutta jäykkyyttä olisi saanut olla enemmän. Proton valmistukseen käytettyjen muottien suunnittelu, tulostus ja viimeistely olivat työläitä ja aikaa vieviä vaiheita. Muotit ylittivät sekä Ecopulp Oy:n että Bekvil Oy:n yhteyshenkilöiden odotukset, joten kova työ kannatti. Työ onnistui siis kaiken kaikkiaan hyvin ja työstä oli hyötyä toimeksiantajayritykselle. Opinnäytetyön jälkeen Bekvil Oy ja Ecopulp Oy jatkavat tukilastan kehittämistä yhteistyössä.

LÄHTEET

Aaltopahvi kartonkilajina. 2015. KnowPulp versio 2014. [Saatavilla rajoitetusti]. Luettu 16.8.2016. http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/paper_board_grades/2_boards/3_special_boards/4_corrugated_board/0_grade_specif/frame.htm?zoom_highlightsub=t%E4rkkelys

Arminen, E., Mäkelä, R., Mäkinen, E., Puhakka, P. & Vierinen, K. 2010. Fysiikan laboriotyöt. 1. painos. Tampere: Tammertekniikka.

Bekvil Oy. 2013. Info. Luettu 21.6.2016. <http://www.bekvil.fi/>

Bekvil Oy. 2016. Bekvil pahviset hoitolastat. Luettu 21.6.2016. http://www.bekvil.fi/kauppa/product_catalog.php?c=36

Ecopulp Finland Oy. 2016. Etusivu. Luettu 7.6.2016. <http://www.ecopulp.fi/fi/ecopulp/etusivu/>

Haketyypit. 2015. KnowPulp versio 2014. [Saatavilla rajoitetusti]. Luettu 13.6.2016. http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/raw_materials/1_fibers/7_chip_tupes/frame.htm

Hovila, J. tuotantopäällikkö, Ecopulp Finland Oy. 2016. Haastattelu 15.11.2016. Haastattelija Soili, P. Korja.

Häggbloom-Ahnger, U. & Komulainen P. 2006. Kemiallinen metsäteollisuus 2: Paperin ja kartongin valmistus. 5. painos. Helsinki: Opetushallitus.

Industrial Efficiency Technology Database. 2016. Improvements in Chemi-Thermomechanical Pulping (CTMP). Luettu 21.6.2016. <http://ietd.iipnetwork.org/content/improvements-chemi-thermomechanical-pulping-ctmp>

Inkinen, P. & Tuohi, J. 2012. Momentti 1, Insinöörifysiikka. 4.–8. painos. Keuruu: Otava.

Isotalo, K. 2004. Puu- ja sellukemia. 3.painos. Helsinki: Opetushallitus.

Järvinen, P. 2008. Uusi muovitieto. 1. painos. Söderkulla: Muovifakta Oy.

Kuitujen erottaminen kemiallisesti. 2015. KnowPulp versio 2014. [Saatavilla rajoitetusti]. Luettu 8.6.2016. http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/pulping/cooking/1_process/1_principle/frame.htm?zoom_highlightsub=kemimekaaninen

Kurri, V., Malén, T., Sandell, R. & Virtanen, M. 2002. Muovitekniikan perusteet. 3. painos. Helsinki: Opetushallitus.

Laitinen, E. 2008. Muovit, kumit ja puu. Teoksessa Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P. & Tuomikoski, J. 2008. Konetekniikan materiaalioppi. 12. painos. Helsinki: Edita Publishing Oy, 192–212.

Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2014. Puu-muovikomposiitit. [pdf]. Päivitetty 25.12.2014. Luettu 20.6.2016. <http://telwood.eu/Puumuovikomposiitit.pdf>

Markström, H. 2005. Testing Methods and instruments for Corrugated Board. 6. painos. Sweden Kista: AB Lorentzen & Wette.

Metsäyhdistys. 2016. Sulfaattisellu (kraft pulp). Luettu 8.6.2016. <http://www.smy.fi/sanasto/sulfaattisellu-kraft-pulp/>

Muoviteollisuus ry. 2016. Komposiitit. Luettu 20.6.2016. <http://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/komposiitit/>

Mäkelä, M., Soininen, N., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2012 Tekniikan kaavasto. 10. painos. Tampere: Tammertekniikka.

Neliömassa. 2015. KnowPulp versio 2014. [Saatavilla rajoitetusti]. Luettu 9.8.2016. http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/paper_board_properties/2_general_properties/1_basis_weight/frame.htm?zoom_highlightsub=neli%F6massa

Niinimäki, M. 2008. Komposiitit. Teoksessa Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P. & Tuomikoski, J. 2008. Konetekniikan materiaalioppi. 12. painos. Helsinki: Edita Publishing Oy, 218–230.

Nikkilä, A. lehtori, biotuote- ja prosessitekniikan koulutus, TAMK. 2016. Haastattelu 23.9.2016. Haastattelija Myllyluoma, E. Tampere.

Ojalehto, J. 2015. Murtuma paranee haavalla – Suomalainen puukipsi valloittaa maailmaa. Luettu 20.6.2016. http://www.suomenmaa.fi/?app=NeoDirect&com=6/3/63278/95ceefd3c6&t=Murtuma_paranee_haavalla__Suomalainen_puukipsi_valloittaa_maailmaa

Onbone. 2011. Suomalainen kipsauskeksintö myyntiin Euroopassa. Luettu 20.6.2016. <http://www.mynewsdesk.com/fi/pressreleases/suomalainen-kipsauskeksintoe-myyntiin-euroopassa-665516>

Paksuus, tiheys ja bulkki. 2015. KnowPulp versio 2014. [Saatavilla rajoitetusti]. Luettu 9.8.2016. http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/paper_board_properties/2_general_properties/3_thickness_and_bulk/frame.htm?zoom_highlightsub=bulkki

Pitkäketjuiset hiilihydraatit. 2016. Peda Kemia. Luettu 16.8.2016. <https://peda.net/kannus/jvk/oppiaineet2/kemia/kemia32/oppikirja/III/15>

Sandell, R. 2002. Molekyylirakenteen vaikutus muovituotteiden valmistukseen ja ominaisuuksiin. Teoksessa Kurri, V., Malén, T., Sandell, R. & Virtanen, M. 2002. Muovitekniikan perusteet. 3. painos. Helsinki: Opetushallitus, 35–62.

Semikemiallinen massa. 2015. KnowPulp versio 2014. [Saatavilla rajoitetusti]. Luettu 21.6.2016. http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/pulp_grades/1_pulps/2_unbleached_pulps/2_hardwood_pulp/frame.htm?zoom_highlightsub=nssc

Seppälä, J. 2008. Polymeeritekniikan perusteet. 6. Painos. Helsinki: Otatieto.

Seppälä, M., Klemetti, U., Kortelainen, V., Lyytikäinen, J., Siitonen, H. & Sironen, R. 1999. Kemiallinen metsäteollisuus 1: Paperimassan valmistus. 2. painos. Helsinki: Opetushallitus.

SFS-EN ISO 534. Paper and board. Determination of thickness, density and specific volume. 13.8.2012. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS Verkkokauppa. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/5/193355.html.stx>

SFS-EN ISO 536. Paper and board. Determination of grammage. 21.1.2013. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS Verkkokauppa. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/5/204189.html.stx>

SFS-ISO/ASTM 52900. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. 20.5.2016. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS Verkkokauppa. <https://online.sfs.fi.elib.tamk.fi/fi/index/tuotteet/SFS/ISO/ID2/5/418199.html.stx>

Shealy, A. 2008. Molded Pulp Packing and Machinery Innovations. [pdf]. Luettu 8.6.2016. <http://www.iopp.org/files/public/ShealyClemsonPulpMachinery.pdf>

Smurfit BB. 2016. Pyrol. Luettu 6.12.2016. <http://www.pyroll.com/toimialat/paperitukku/tuotteet/pahvit/smurfit-bb>

Starch Structure. 2016. Reference. Luettu 16.8.2016. <https://www.reference.com/science/structure-starch-c66997e05e5e3d65>

Talopesulat Oy. 2013. Kuivauskaapit. [pdf]. Luettu 18.8.2016. <http://talpet.fi/wordpress/wp-content/uploads/TS-1000-1800.pdf>

Tavani Oy. 2016. Biohajoavat. Luettu 2.11.2016. <http://www.tavani.fi/index.php/erikoismuovit/biohajoavat-pla>

Teräväinen K. Bekvil Oy. 2016a. Kirjankansipahvi. Sähköpostiviesti. keijo.teravainen@bekvil.fi.

Teräväinen. K. Bekvil Oy. 2016b. Nykyinen tukilastan valmistusprosessi. Sähköpostiviesti. keijo.teravainen@bekvil.fi.

Tmi Filamentti. 2016. Tekniset tiedot PLA. Luettu 5.11.2016. <http://www.filamentti.com/tekniset-tiedotPLA/>

Uusiokartonki kartonkilajina. 2015. KnowPulp versio 2014. [Saatavilla rajoitetusti]. Luettu 6.6.2016. http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/paper_board_grades/2_boards/1_int_pack_boards/3_wlc/0_grade_specif/frame.htm?zoom_highlightsub=uusiomassa

Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto Valvira. 2009. Terveysteknologia. Luettu 19.1.2017. <http://www.valvira.fi/terveydenhuolto/terveysteknologia>

Woodcast Oy. 2016a. Medialle. Tulostettu 21.6.2016. <http://www.woodcast.fi/fi/yri-tys/medialle>

Woodcast Oy. 2016b. Ympäristö. Luettu 20.6.2016. <http://www.woodcast.fi/fi/kip-saus/infomateriaalit/ymparisto>

LIITTEET

Liite 1. Proton valmistuksen suunnitelma

1 (2)

Proton valmistuksen suunnitelma

Vaihe 1.

Massat

- Havupuumassa (mänty, sulfaattisellu)
- Lehtipuumassa (koivu)
- Mahdollisesti BCMTP-massa

Märkähajotus

- Sakeus
 - Valitaan ensin suositusten mukainen sakeus, jonka jälkeen edetään tulosten osoittamaan suuntaan. Maksimissaan 3–4 eri sakeutta.
- Sekoitusparametrit
 - Sekoitusaika 11 min, muutetaan tarvittaessa.
 - Kierrosnopeus 2 900±100 rpm.

Lisäaineet

- Liima-aineen lisääminen (täykkelys)
 - Liima-aineen osuus massan painosta
 - 0 m-% -> 2 m-% -> 5 m-% -> 10 m-% -> 15 m-%
 - Mahdollisesti käytettävä täykkelys
 - Maissitärkkelys/perunatarkkelys
- Muut mahdolliset lisäaineet
 - Toisen lisäaineen käyttö lisätään vasta kun massa on valittu ja sekoitusparametrit säädetty
 - CMC Finnfix (kosteuden kestoon)
 - Lateksi (kosteuden kestoon)

(Jauhatus

- Lisäämään tuotteen lujuutta
- Jos massa ei muuten sitoudu tarpeeksi hyvin)

Tasomaisen kappaleen valmistaminen

- TAMKin paperi- ja pakkauslaboratorion arkinvalmistuslaite
- Ilmasekoitus 40 s
- Alipaine
- Puristus messinkikaulimella kolme kertaa

Arkin kuivatus

- Levykuivain: 170 °C, noin 10 min

Vaihe 2.

2 (2)

Testaaminen

- Samat testausmenetelmät kuin alkuperäisellä materiaalilla
 - Neliömassa
 - Paksuus
 - Tiheys
 - Jäykkyys

Vaihe 3.

Proton valmistaminen

- Muotin valmistus
 - Muotin tulostus, rajaimen ja muotin vastakappaleen 3D-tulostus
 - Pohjavaneri, jossa letkuliitäntä
 - Kaikki yhteen liittävät pultit
- Muotin viimeistely Ecopulp Finland Oy:n tiloissa
- Valmistus
 - Massan laimennus noin 1 m-%
 - Muodostus
 - Irrotus muotista
 - Kuivaus uunissa: 150–160 °C, noin 10 min

Liite 2. Taulukko valmistetuista massaeristä

Massa- laji	Puulaji	Massan sakeus (%)	Arkkien määrä	Lisäaineiden osuus massan kuivapainosta (%)		
				Tärkkelys	CMC	Lateksi
CTP	Koivu	1,5	18	-	-	-
	Mänty	1	5	-	-	-
			11	-	-	-
		1,5	3	2	-	-
			3	5	-	-
			3	10	-	-
			6	-	-	-
		2	3	2	-	-
			3	5	-	-
	3		10	-	-	
	Mänty-koivu 50/50 suhteella	1,5	2	-	-	-
Mänty-koivu 50/50 suhteella	1,5	2	2	-	-	
BCTMP	Kuusi-koivu 50/50 suhteessa	1,5	2	2	-	-
			2	2	-	-
			5	-	-	-
			14	2	-	-
			2	5	-	-
			2	10	-	-
			3	2	1	-
			3	2	2	-
3	2	-	1			
3	2	-	2			
yhteensä			101			

Liite 3. Mittauspöytäkirja: neliömassa, 2,5 mm pahvi

Elias Myllyluoma
Piia Soili
Opinnäytetyö
Tampereen ammattikorkeakoulu

Mittauspöytäkirja 9.6.2016
Neliömassa: pahvi 2,5 mm

1 (1)

MITTAUSOLOSUHTEET

Mittaukset suoritetaan TAMKin paperilaboratoriossa. Näytteet on ilmastoitu ISO 187 standardin mukaisesti. Mittaushetkellä myös olosuhteet ovat standardin ISO 187 mukaiset.

MITTAVÄLINEET

Mittavälineinä työssä käytetään 100 mm X 100 mm levymuottia ja mattopuukkoa. Näytepalat punnitaan KERN PLJ -vaa'alla, jonka tarkkuus on 0,001 g ja punnittava maksimi paino 420 g.

TYÖN SUORITUS

Työ suoritetaan standardin ISO 538 mukaisesti. Neliömassan mittausta varten leikataan näytepahvista 20 kappaletta 100 mm X 100 mm näytepaloja levymuotin avulla. Tämän jälkeen näytepalat punnitaan 0,01 g tarkkuudella. Mittaustulokset kirjataan taulukkoon kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella. Myös neliömassat lasketaan kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella.

MITTAUSTULOKSET

Mittaustulokset on kerrottu seuraavassa taulukoissa.

Neliömassa 100 mm * 100 mm			
Pahvi 2,5 mm			
	Pinta-ala, m ²	Paino, g	Neliömassa, g/m ²
1	0,01	15,8	1580
2	0,01	15,7	1570
3	0,01	15,6	1560
4	0,01	15,8	1590
5	0,01	15,7	1570
6	0,01	15,7	1570
7	0,01	15,7	1570
8	0,01	15,4	1540
9	0,01	15,8	1580
10	0,01	15,7	1570
11	0,01	15,7	1570
12	0,01	15,5	1550
13	0,01	15,7	1570
14	0,01	15,6	1560
15	0,01	15,7	1570
16	0,01	15,6	1560
17	0,01	15,2	1520
18	0,01	15,6	1570
19	0,01	15,3	1530
20	0,01	15,6	1560
ka	0,01	15,6	1490

Liite 4. Mittauspöytäkirja: neliömassa, BCTMP-arkki

Elias Myllyluoma
Piia Soili
Opinnäytetyö
Tampereen ammattikorkeakoulu

Mittauspöytäkirja 7.12.2016
Neliömassa: BCTMP

1 (1)

MITTAUSOLOSUHTEET

Mittaukset suoritetaan TAMKin paperilaboratoriossa. Näytteet on ilmastoitu ISO 187 standardin mukaisesti. Mittaushetkellä myös olosuhteet ovat standardin ISO 187 mukaiset.

MITTAVÄLINEET

Mittavälineinä työssä käytetään 100 mm X 100 mm levymuottia ja mattopuukkoa. Näytepalat punnitaan KERN PLJ -vaa'alla, jonka tarkkuus on 0,001 g ja punnittava maksimi paino 420 g.

TYÖN SUORITUS

Työ suoritetaan standardin ISO 538 mukaisesti. Neliömassan mittausta varten leikataan näytearkeista 20 kappaletta 100 mm X 100 mm näytepaloja levymuotin avulla. Tämän jälkeen näytepalat punnitaan 0,01 g tarkkuudella. Mittaustulokset kirjataan taulukkoon kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella. Myös neliömassat lasketaan kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella.

MITTAUSTULOKSET

Mittaustulokset on kerrottu seuraavassa taulukoissa.

Neliömassa 100 mm * 100 mm			
BCTMP			
	Pinta-ala, m ²	Paino, g	Neliömassa, g/m ²
1	0,01	6,66	666
2	0,01	6,80	680
3	0,01	6,68	668
4	0,01	6,55	655
5	0,01	6,65	665
6	0,01	6,78	678
7	0,01	6,93	693
8	0,01	6,94	694
9	0,01	6,42	642
10	0,01	6,55	655
11	0,01	6,71	671
12	0,01	6,71	671
13	0,01	6,79	679
14	0,01	6,69	669
15	0,01	6,63	663
16	0,01	6,59	659
17	0,01	6,55	655
18	0,01	6,69	669
19	0,01	6,70	670
20	0,01	6,60	660
ka	0,01	6,68	668

Liite 5. Mittauspöytäkirja: paksuus ja tiheys, 2,5 mm pahvi

Elias Myllyluoma
Piia Soili
Opinnäytetyö
Tampereen ammattikorkeakoulu

Mittauspöytäkirja 10.6.2016
Paksuus ja tiheys: pahvi 2,5 mm

1 (1)

MITTAUSOLOSUHTEET

Mittaukset suoritetaan TAMKin paperilaboratoriossa. Näytteet on ilmastoitu ISO 187 standardin mukaisesti. Mittaushetkellä myös olosuhteet ovat standardin ISO 187 mukaiset.

MITTAVÄLINEET

Näytepalat leikataan mattopuukolla. Mittavälineenä työssä käytetään WEAP Wennberg Apparater AB -paperinpaksuusmittaria (tyyppi 523G), jonka mittatarkkuus on 0,01 mm.

TYÖN SUORITUS

Työ suoritetaan standardin ISO 534 mukaisesti. Paksuuden ja tiheyden mittausta varten leikataan näytepahvista 20 kappaletta 100 mm X 100 mm kokoisia näytepaloja. Tämän jälkeen näytepaloista mitataan paksuudet ISO 534 standardin mukaan. Mittauksia suoritetaan yksi kustakin kappaleesta ja mittakohdan tulee olla vähintään 20 mm reunasta. Näytepala asetetaan mittarin leukojen väliin ja vipu vapautetaan. Paksuudet luetaan mittakellosta. Mittaustulokset kirjataan taulukkoon. Paksuuksista ilmoitetaan maksimi- ja minimiarvot sekä keskiarvo. Tiheydet lasketaan neliömassojen ja paksuuksien avulla kahden desimaalin tarkkuudella.

MITTAUSTULOKSET

Mittaustulokset on kerrottu seuraavissa taulukoissa.

Paksuus mm		Tiheys			
Pahvi 2,5 mm		Pahvi 2,5 mm			
	Paksuus mm		Neliömassa g/m ²	Paksuus mm	Tiheys g/m ³
1	2,45	1	1 580	2,45	0,64
2	2,45	2	1 570	2,45	0,64
3	2,44	3	1 560	2,45	0,64
4	2,45	4	1 590	2,45	0,65
5	2,42	5	1 570	2,45	0,64
6	2,45	6	1 570	2,45	0,64
7	2,46	7	1 570	2,45	0,64
8	2,46	8	1 540	2,45	0,63
9	2,49	9	1 580	2,45	0,64
10	2,46	10	1 570	2,45	0,64
11	2,46	11	1 570	2,45	0,64
12	2,45	12	1 550	2,45	0,63
13	2,45	13	1 570	2,45	0,64
14	2,46	14	1 560	2,45	0,64
15	2,46	15	1 570	2,45	0,64
16	2,48	16	1 560	2,45	0,64
17	2,46	17	1 520	2,45	0,62
18	2,45	18	1 570	2,45	0,64
19	2,45	19	1 530	2,45	0,62
20	2,45	20	1 560	2,45	0,64
ka	2,45	ka	1 490	2,45	0,64
Max	2,49				
Min	2,42				

Liite 6. Mittauspöytäkirja: paksuus ja tiheys, BCTMP-arkki

Elias Myllyluoma
Piia Soili
Opinnäytetyö
Tampereen ammattikorkeakoulu

Mittauspöytäkirja 7.12.2016
Paksuus ja tiheys: BCTMP

1 (1)

MITTAUSOLOSUHTEET

Mittaukset suoritetaan TAMKin paperilaboratoriossa. Näytteet on ilmastoitu ISO 187 standardin mukaisesti. Mittaushetkellä myös olosuhteet ovat standardin ISO 187 mukaiset.

MITTAVÄLINEET

Näytepalat leikataan mattopuukolla. Mittavälineenä työssä käytetään WEAP Wennberg Apparater AB -paperinpaksuusmittaria (tyyppi 523G), jonka mittatarkkuus on 0,01 mm.

TYÖN SUORITUS

Työ suoritetaan standardin ISO 534 mukaisesti. Paksuuden ja tiheyden mittausta varten leikataan näytearkeista 20 kappaletta 100 mm X 100 mm kokoisia näytepaloja. Tämän jälkeen näytepaloista mitataan paksuudet ISO 534 standardin mukaan. Mittauksia suoritetaan yksi kustakin kappaleesta ja mittakohdan tulee olla vähintään 20 mm reunasta. Näytepala asetetaan mittarin leukojen väliin ja vipu vapautetaan. Paksuudet luetaan mittakellosta. Mittaustulokset kirjataan taulukkoon. Paksuuksista ilmoitetaan maksimi- ja minimiarvot sekä keskiarvo. Tiheydet lasketaan neliömassojen ja paksuuksien avulla kahden desimaalin tarkkuudella.

MITTAUSTULOKSET

Mittaustulokset on kerrottu seuraavissa taulukoissa.

Paksuus mm		Tiheys			
BCTMP		BCTMP			
	Paksuus mm		Neliömassa g/m ²	Paksuus mm	Tiheys g/m ³
1	2,99	1	666	3,22	0,21
2	3,22	2	680	3,22	0,21
3	3,16	3	668	3,22	0,21
4	3,29	4	655	3,22	0,20
5	3,18	5	665	3,22	0,21
6	3,43	6	678	3,22	0,21
7	3	7	693	3,22	0,22
8	3,35	8	694	3,22	0,22
9	3,29	9	642	3,22	0,20
10	3,31	10	655	3,22	0,20
11	3,22	11	671	3,22	0,21
12	3,28	12	671	3,22	0,21
13	3,27	13	679	3,22	0,21
14	3,12	14	669	3,22	0,21
15	3,21	15	663	3,22	0,21
16	3,27	16	659	3,22	0,20
17	2,92	17	655	3,22	0,20
18	3,37	18	669	3,22	0,21
19	3,16	19	670	3,22	0,21
20	3,26	20	660	3,22	0,21
ka	3,22	ka	668	3,22	0,21
Max	3,43				
Min	2,92				

Liite 7. Mittauspöytäkirja: taivutusjäykkyys, pahvi & BCTMP-arkki

Elias Myllyluoma
Piia Soili
Opinnäytetyö
Tampereen ammattikorkeakoulu

Mittauspöytäkirja 11.11.2016

1 (1)

Taivutusjäykkyys: pahvi 2,5 mm ja BCTMP

MITTAUSOLOSUHTEET

Mittaukset suoritetaan TAMKin fysiikan laboratoriossa.

MITTAVÄLINEET

Näytepalat leikataan mattopuukolla. Itse rakennettu mittauslaitteisto koostuu kahdesta statiivista, kiinnityskourista, kannaketapeista, mittakellosta, punnuspakasta ja punnuksista. Mittakellon tarkkuus on 0,01 mm.

TYÖN SUORITUS

Taivutusjäykkyyden mittausta varten leikataan näytepahvista ja BCTMP- arkeista 40 mm levyisiä ja 160 mm pituisia näytepaloja. Pahvisten näytepalojen konesuunnat ovat pidemmän sivun suuntaisia. BCTMP-arkeissa konesuuta on ylhäältä alaspäin, joten tätä ei tarvitse huomioida. Uritetuissa arkeissa urat ovat pidemmän sivun suuntaisia. Näytteen keskelle asetetaan rautalangasta väännelty koukku punnuspakkaa varten. Näyte asetetaan kannaketappien päälle. Mittakello siirretään kappaleen päälle keskelle niin, että mittakellon mäntä liikkuu hieman sisäänpäin. Tämän jälkeen mittakello nollataan. Punnustelineeseen asetetaan punnuspakka, jonka jälkeen mittakellon lukema otetaan ylös. Pakkaan lisätään punnuksia ja lukemat otetaan ylös jokaisen lisäyksen jälkeen. Mittaustulokset kirjataan taulukkoon.

MITTAUSTULOKSET

Mittaustulokset sekä lasketut lopputulokset on kerrottu seuraavissa taulukoissa.

Pahvi 2,5 mm	Mittaukerta	Punnuksen massa (g)				Pahvi 2,5 mm	Kappaletta taivuttava voima (N)			
		94	274	568	867		0,82	2,69	5,57	8,51
Testikappaleen keskikohdan siirtymä (mm)	1	0,34	0,50	1,05	2,70	0,19	0,17	0,17	0,19	
	2	0,17	0,50	1,10	1,80	0,16	0,17	0,16	0,15	
	3	0,15	0,45	1,00	1,60	0,18	0,19	0,18	0,17	
	4	0,15	0,45	0,98	1,40	0,18	0,19	0,18	0,19	
	5	0,14	0,45	1,00	1,40	0,19	0,19	0,18	0,19	
	6	0,12	0,46	1,00	1,40	0,23	0,19	0,18	0,19	
Keskiarvo		0,144	0,462	1,016	1,52	0,18				

BCTMP uraton	Mittaukerta	Punnuksen massa (g)				BCTMP uraton	Kappaletta taivuttava voima (N)			
		94	274	568	867		0,82	2,69	5,57	8,51
Testikappaleen keskikohdan siirtymä (mm)	1	0,19	0,51	1,15	1,9	0,14	0,17	0,16	0,14	
	2	0,09	0,43	1,08	1,85	0,29	0,26	0,17	0,15	
	3	0,08	0,35	0,95	1,7	0,33	0,25	0,19	0,16	
	4	0,23	0,5	1	1,7	0,11	0,17	0,18	0,16	
	5	0,11	0,38	0,85	1,5	0,24	0,23	0,21	0,18	
	6	0,15	0,43	0,9	1,5	0,18	0,20	0,20	0,18	
	7	0,13	0,37	0,8	1,3	0,20	0,23	0,22	0,21	
	8	0,2	0,47	0,9	1,5	0,13	0,18	0,20	0,18	
	9	0,19	0,52	0,9	1,7	0,14	0,17	0,20	0,16	
	10	0,13	0,44	0,9	1,45	0,20	0,25	0,20	0,19	
Keskiarvo		0,15	0,44	0,943	1,61	0,19				

BCTMP uritettu	Mittaukerta	Punnuksen massa (g)				BCTMP uritettu	Kappaletta taivuttava voima (N)			
		94	274	568	867		0,82	2,69	5,57	8,51
Testikappaleen keskikohdan siirtymä (mm)	1	0,1	0,32	0,7	1,3	0,26	0,27	0,25	0,21	
	2	0,11	0,34	0,75	1,3	0,24	0,25	0,24	0,21	
	3	0,12	0,35	0,75	1,3	0,22	0,25	0,24	0,21	
	4	0,13	0,34	0,7	1,3	0,20	0,25	0,25	0,21	
	5	0,12	0,32	0,75	1,35	0,22	0,27	0,24	0,20	
	6	0,06	0,26	0,65	1,2	0,44	0,35	0,27	0,23	
	7	0,09	0,3	0,7	1,2	0,29	0,26	0,25	0,23	
	8	0,1	0,32	0,7	1,3	0,26	0,27	0,25	0,21	
	9	0,11	0,34	0,8	1,5	0,24	0,25	0,22	0,18	
	10	0,05	0,25	0,6	1	0,53	0,34	0,30	0,27	
Keskiarvo		0,10	0,32	0,72	1,31	0,25				

*Punaisella yllä olevat mittaukset on hylätty, niiden suuren poikkeavuuden takia.

Liite 8. Kustannuslaskelmat (Salainen julkisessa versiossa)