

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
LUT Teknis-luonnontieteellinen  
Kemiantekniikan koulutusohjelma

**KUITUHAMPUN VAIKUTUS TAIVEKARTONGIN FYSIKAALISIIN  
OMINAISUUKSIIN**

Diplomityö

Tarkastajat: Professori Tuomas Koiranen  
TkT Sami-Seppo Ovaska

Ohjaajat: TkT Sami-Seppo Ovaska  
DI Anneli Manninen

Lappeenranta, syyskuu 2018

Ninja Kerttula

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT Teknis-luonnontieteellinen  
Kemiantekniikan koulutusohjelma

Ninja Kerttula

### **Kuituhampun vaikutus taivekartongin fysikaalisiin ominaisuuksiin**

Diplomityö  
2018

97 sivua, 30 kuvaa, 16 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Professori Tuomas Koironen  
TkT Sami-Seppo Ovaska

Hakusanat: Kuituhamppu, Lujuusominaisuudet, Non-wood-kuidut, Taivekartonki

Non-wood-kuituja on käytetty paperin valmistuksessa jo tuhansia vuosia. Ensimmäiset paperit valmistettiin muun muassa pellavasta, hampusta ja oljesta. Puun kuidutusmenetelmien kehittymisen myötä on non-wood-kuitujen käyttöaste laskenut tasaisesti. Nykyään puun alueellinen saatavuus ja tarve eivät kohtaa, joten perinteisesti puuta käytävillä alueilla on herännyt mielenkiinto non-wood-kuitujen käyttömahdollisuuksia kohtaan. Yhtenä potentiaalisena vaihtoehtoina pidetään kuituhampua. Työn tavoitteena oli selvittää kuituhampun käyttömahdollisuuksia paperiteollisuudessa sekä kuituhampun vaikutusta paperitekniisiin ominaisuuksiin erityisesti kolmekerroksisen taivekartongin keskikerroksen osalta.

Kirjallisuusosa käsitteli eri non-wood-kuitujen ominaisuuksia ja käyttöä paperiteollisuudessa. Kuituhampun ominaisuuksia, historiaa, käyttökohteita ja jatkojalostusprosesseja käytiin syvällisemmin läpi. Lisäksi kirjallisuusosassa tarkasteltiin taivekartongin tärkeimpiä materiaalitekniisiä ominaisuuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä.

Kokeellinen osuus koostui massojen valmistuksesta ja testauksista sekä laboratorioarkkien valmistuksesta ja paperitekniisten ominaisuuksien mittaamisesta. Arkeista testattiin yleiset ominaisuudet, rakenneominaisuudet, optiset ominaisuudet sekä lujuusominaisuudet sekä tarkasteltiin materiaalin kolmeulotteista muovautuvuutta. Kirjallisuuden pohjalta päähuomio pidettiin lujuusominaisuuksissa. Mittaustulokset vahvistivat sen, että hampun vahvoilla niinikuiduilla oli positiivinen vaikutus lujuusominaisuuksiin, kuten repäisy- ja vetolujuus sekä 3D-venymä.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
School of Engineering Science  
Department of Chemical Engineering

Ninja Kerttula

### **The Effect of Hemp Fibre addition on the properties of Folding Box Board**

Master's Thesis  
2018

97 pages, 30 figures, 16 tables and 3 appendixes

Examiners: Professor Tuomas Koiranen  
D.Sc. (Tech.) Sami-Seppo Ovaska

Keywords: Folding box board, Hemp fibre, Non-wood fibres, Strength properties

Non-wood fibres have been used in papermaking for thousands of years. Fibers such as flax, hemp and straw were the first fibres used in papermaking. As the fiberizing of wood has developed the use of non-wood fibres in papermaking has decreased steadily. Global paper consumption is still increasing, and this has led to the situation where the wood supply is not able to cover the demand. Developed countries are thus seeking for alternative fibres for paper industry such as non-wood fibres. One of the most potential non-wood fibres is industrial hemp. The aim of this thesis was to study the properties of industrial hemp and its suitability as a raw material for papermaking, especially for the middle layer of the folding box board.

The literary part of this thesis included properties of non-wood fibres and their use and potential as a raw material in papermaking. The main focus was on industrial hemp, its properties, history of use in paper industry as well as the fibre decortication. In addition, the properties of folding box board were discussed.

The experimental part included pulp preparation and testing of different pulp properties. Paper properties were measured from laboratory-made sheets. The properties measured were general properties, structural properties, optical properties, strength properties and three-dimensional elongation. Main focus was on the strength properties. The measurements indicate that hemp fiber had clear positive effects especially on the strength properties, such as tear strength, tensile strength and 3D-elongation.

## SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ .....	2
ABSTRACT .....	3
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO .....	6
ALKUSANAT .....	7
1 JOHDANTO .....	8
1.1 Työn tausta .....	8
1.2 Työn tavoitteet .....	9
KIRJALLISUUSOSA .....	10
2 NON-WOOD-KUIDUT .....	10
2.1 Non-wood-kuitujen käyttöaste ja mahdollisuudet .....	10
2.2 Jaottelu .....	13
2.3 Tärkeimmät ominaisuudet .....	14
2.4 Kemiallinen valmistusmenetelmä .....	16
2.5 Käyttö paperiteollisuudessa .....	17
2.6 Edut ja haitat .....	20
2.7 Kustannukset .....	23
3 KUITUHAMPPU .....	24
3.1 Historia .....	24
3.2 Ominaisuudet .....	26
3.3 Käyttökohteet .....	27
3.4 Hampun soveltuvuus paperiteollisuuteen .....	30
3.5 Tulevaisuuden käyttö Suomessa .....	32
3.6 Edut ja haasteet .....	32
4 KUITUHAMPUN JALOSTAMINEN .....	34
4.1 Liotus .....	34
4.2 Korjuu .....	36
4.3 Murskaus ja lajittelu .....	38
5 TAIVEKARTONKI .....	39
5.1 Vaadittavat ominaisuudet .....	40
5.2 Lujuusominaisuudet .....	40
5.3 Nuutattavuus .....	43
5.4 Taivutusjäykkyys .....	44
5.5 Formaatio .....	45
5.6 Elintarvikekelpoisuus ja painatusominaisuudet .....	46
KOKEELLINEN OSA .....	48
6 TYÖN TARKOITUS .....	48
7 MATERIAALIT JA MENETELMÄT .....	48
7.1 Hamppu .....	49
7.2 Kartonkihylky .....	50
7.3 CTMP .....	51
7.4 Koivusellu .....	52
8 MASSOJEN VALMISTUS .....	52
9 ARKKIEN VALMISTUS .....	53
10 KOEPISTEET .....	54
11 TESTATTAVAT OMINAISUUDET .....	55
11.1 Massatestaukset .....	55
11.1.1 Freeness (Canadian-Standard-Freeness) .....	55
11.1.2 L&W Fiber Test .....	56

11.2	Arkkitestaukset .....	56
11.2.1	Yleiset ominaisuudet .....	56
11.2.2	Ilmanläpäisevyys ja karheus .....	57
11.2.3	Lujuusominaisuudet.....	57
11.2.4	Formaatio .....	58
11.2.5	Optiset ominaisuudet ja värianalyysi.....	58
11.2.6	Veden absorptiokyky (Cobb).....	59
11.3	3D-venymä (MiniMould).....	60
12	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU .....	61
12.1	L&W-kuituanalyysi.....	61
12.2	Massatestaukset .....	64
12.3	Yleiset ominaisuudet .....	65
12.4	Karheus, ilmanläpäisevyys ja absorptio-ominaisuudet .....	67
12.5	Formaatio.....	69
12.6	Lujuusominaisuudet .....	72
12.6.1	Repäisylujuus.....	72
12.6.2	Vetolujuus, murtovenymä ja kimmokerroin.....	73
12.6.3	Taivutusjäykkyys .....	76
12.6.4	Märkäljuudet.....	77
12.7	Optiset ominaisuudet ja värianalyysi .....	80
12.8	Muovauskoe (3D-venymä).....	84
13	YHTEENVETO.....	87
	LÄHDELUETTELO .....	91

## LIITTEET

**SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO**

CSF	Canadian Standard Freeness
CTMP	Chemi-thermomechanical pulp, kemihierre
ELY-keskus	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
FBB	Folding Box Board, taivekartonki
RGB	Red, Green, Blue; punainen, vihreä, sininen
SCAN	Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee, Pohjoismaiden laboratoriotestaus-standardit
THC	Delta-9-tetrahydrokannabinoli
TMP	Thermo-mechanical pulp, hierre
NaHSO <sub>3</sub>	Natriumvetysulfiitti
NaOH	Natriumhydroksidi
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Natriumfosfaatti
Na <sub>2</sub> S	Natriumsulfidi
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Natriumsulfiitti
Cobb <sub>30</sub>	veden absorptio 30 s Cobb-testin mukaan, g/m <sup>2</sup>
A	sylinterin sisään jäävä pinta-ala, m <sup>2</sup>
a	arkin paino kastumisen jälkeen, g
b	arkin paino ennen testausta, g.
X	massan sakeus, g/l

## ALKUSANAT

*”Hän oli ehtinyt oppia, miten tärkeää oli lykätä hartaasti odotettuja asioita tuonemmaksi, ja hän tiesi, että retkeä tuntemattomaan oli valmistettava harkiten”.*

Tove Jansson, Muumilaakson marraskuu.

Tämä diplomityö liittyy Kuopion kaupungin kehityshankkeeseen koskien hyötyhampun käyttömahdollisuuksia. Haluankin kiittää työn toista ohjaajaa, Anneli Mannista, mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta. Nyt näyttääkin siltä, että vuosien jälkeen vihdoinkin valmistun.

Erityiset kiitokset myös työn toiselle ohjaajalle ja tarkastajalle Sami-Seppo Ovaskalle erinomaisesta ohjauksesta ja neuvoista. Lisäksi kiitokset työn toiselle tarkastajalle professori Tuomas Koiraselle.

Haluan myös kiittää perhettäni ja ystäviäni tuesta ja kannustuksesta diplomityötä tehdessä. Erityisesti ja suurimmat kiitokset menevät vanhemmilleni, Outilla ja Ossille, jotka ovat antaneet mahdollisuuden minulle toteuttaa itseäni näiden vuosien aikana.

Mumskan muistolle.

Kotkassa 6.9.2018

Ninja Kerttula

## 1 JOHDANTO

Non-wood-kuituja paperin valmistukseen on käytetty jo tuhansia vuosia. Puuta alettiin käyttämään paperin valmistuksessa 1800-luvun puolella välissä. Ennen puuta käytettiin paperin valmistuksessa muun muassa pellavaa, hamppua, bambua, puuvillaa ja olkea.

Nykyään paperiteollisuudessa käytetään pääasiassa raaka-aineena puuta ja vain 7 % paperiteollisuudesta käyttää raaka-aineena non-wood-kuituja. Johtavia non-wood-kuitujen käyttömaita ovat Aasian maat, kuten Kiina ja Intia. Nyt ollaan kuitenkin siinä tilanteessa, että puun tarve verrattuna saatavuuteen on nostanut puun raaka-aineen hintoja. Lisäksi puunhakkuu on tapetilla, johtuen metsävarojen vähenemisestä. Edellä mainittujen syiden vuoksi on mielenkiinto non-wood-kuitujen käyttömahdollisuuksiin herännyt uudestaan muun muassa EU:ssa ja Kanadassa. Yhtenä potentiaalisimpana non-wood-kuituna paperiteollisuudessa pidetään kuituhamppua. Kuituhampun niinikuidut ovat yksi vahvimista luonnonkuiduista, joten niillä saavutetaan hyvät lujuusominaisuudet. Hamppua käytetään edelleen EU:ssa lähinnä erikoispapereissa, kuten savuke- ja setelipaperit, joilla on korkea markkina-arvo.

Hamppua on yksi vanhimmista paperinvalmistuksen raaka-aineista. Hamppua käytettiin muun muassa kirjoissa, raamatuissa ja sanomalehdissä. Hampun käyttö paperiteollisuudessa loppui käytännössä kokonaan 1900-luvulla. Suomessa on hamppua käytetty eri tarkoituksiin muun muassa vaatteissa, kalaverkoissa, köysissä ja saippuoissa. Hyötyhampun etuihin kuuluukin sen monipuoliset käyttömahdollisuudet: päistärettä käytetään eläinten rehuissa, öljyä ruokateollisuudessa, kukkaa lääketeollisuudessa, lehtiä teessä ja niinikuituja komposiiteissa.

### 1.1 Työn tausta

Työ liittyy Kuopion kaupungin kehityshankkeeseen koskien kuituhampun hyötykäyttöä. Kuopion kaupungin aiemmissa kehityshankkeissa koekasvatettiin kuituhamppua Juankoskella. Kokeellisessa osassa käytetty kuituhamppu on peräisin



Kuopio kaupungin aiemmasta kehityshankkeesta. Premium Board osoitti myös kiinnostuksena diplomityötä kohtaan, joten tässä työssä tarkasteltiin myös taivekartongilta vaadittavia ominaisuuksia. Lisäksi kokeellisessa osiossa on käytetty heidän hylkykartonkia.

Premium Board sijaitsee Juankoskella ja tehdas valmistaa pääasiassa pakkauskartonkeja elintarviketeollisuuteen. Tehdas käyttää ja valmistaa kuusipainehioketta kartongin keskikerrokseen. Hioke valkaistaan vetyperoksidilla. Taustoissa käytetään ostosellua parantamaan pakkauskartongin vaaleutta ja painettavuutta. Sellu on valkaistu ECF-valkaisulla. Premium Boardilla on käytössä yksi kartonkikone ja yksi off-line-päällystyskone. Kolmikerroskartonkikoneen leveys on 2450 mm ja nopeus 200–350 m/min. Tuotteiden neliömassat vaihtelevat 215–360 g/m<sup>2</sup> välillä ja tuotantokapasiteetti on 80 000 Mt/vuosi. Premium Board aloitti tuotantonsa vuonna 2011, mutta tällä hetkellä tehtaassa ei ole omaa tuotantoa. (Premium Board 2018)

## **1.2 Työn tavoitteet**

Työn tavoitteena oli tarkastella non-wood-kuitujen ja erityisesti kuituhampun vaikutusta paperin ja kartongin fysikaalisiin ominaisuuksiin. Suurin mielenkiinto kohdistui lujuusominaisuuksiin. Kirjallisuusosassa käsiteltiin non-wood-kuitujen ja kuituhampun ominaisuuksia, käyttöä paperiteollisuudessa sekä etuja ja haittoja. Kuituhampun ominaisuuksiin, mahdollisuuksiin ja käytettävyyteen paperiteollisuudessa perehdyttiin syvemmin. Lisäksi kirjallisuusosassa käytiin läpi tärkeimpiä taivekartongin ominaisuuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä.

Kokeellinen osuus käsitteli massojen valmistuksen ja testauksen, arkkien valmistuksen ja niiden testauksen. Teorian pohjalta oli odotettavissa, että kuituhampulla olisi myönteinen vaikutus arkkien lujuusominaisuuksiin. Kokeellinen osio suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston pakkaustekniikan laboratorioissa toukokuussa 2018. Kokeellinen osio sisältää kuvauksen käytetyistä menetelmistä sekä tulosten tarkastelun.

## KIRJALLISUUSOSA

### 2 NON-WOOD-KUIDUT

Non-wood-kuiduilla tarkoitetaan kasviperäisiä kuituja, jotka eivät ole peräisin puuraaka-aineesta. Paperiteollisuudessa käytetään myös nimitystä ”vaihtoehtoiset kuidut”. Non-wood-kuidut sisältävät selluloosaa, joten niiden kuidut soveltuvat paperiteollisuuteen raaka-aineeksi. (Ashori 2006) Lisäksi non-wood-kuidut sisältävä ligniiniä, kuitenkin keskimäärin vähemmän kuin perinteiset puukuidut. Ligniinin tehtävänä on sitoa kuidut toisiinsa ja antavat näin jäykkyyttä materiaalille. Ligniini monimutkainen koostumus vaihtelee lajin mukaan. Ligniini on hydrofobinen, eikä tämän takia muodosta sidoksia yhtä helposti kuin selluloosat. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 26) Ligniinillä on merkittävä rooli paperin jälkikellastumisessa, erityisesti mekaanisilla ja kemimekaanisilla massoilla. Non-wood-kuitujen pienempi ligniinipitoisuus vähentää paperin jälkikellastumista. (Heitner 1993)

Yleisimmät paperiteollisuudessa käytetyt non-wood-kuidut ovat: oljet, sokeriruoko (bagassi), bambu, kenaf, hamppu, juutti, sisal, manilla, pellava, puuvilla ja ruokokasvit. Suurin osa kasveista ovat yksivuotiskasveja saavuttaen täyden kasvun yhdessä kasvukaudessa. (Ashori 2006)

Non-wood-kuidut eroavat laajasti ominaisuuksiltaan ja käyttökohteiltaan toisistaan sekä havu- ja lehtipuukuiduista. Tässä kappaleessa on käsitelty non-wood-kuitujen ominaisuuksia, käyttökohteita, soveltuvuutta paperiteollisuuteen sekä niiden etuja ja haittoja. Tarkasteluun on otettu non-wood-kuidut, joilla on jo ollut käyttöä paperin ja kartongin valmistuksessa.

#### 2.1 Non-wood-kuitujen käyttöaste ja mahdollisuudet

Kehittyneissä maissa yli 95 % paperista ja kartongista valmistetaan perinteisestä raaka-aineesta eli puukuiduista. Maailmanlaajuisesti paperin ja kartongin tuotanto kasvaa edelleen (vuosina 2014–2016 noin 0,5 % vuodessa). (FAO 2018). Suurinta

kasvu on ollut kehitysmaissa johtuen muun muassa väestömäärän kasvusta, kehityneistä kirjotus- ja lukutaidoista sekä teollistumisesta. Tuotannon kasvu on tuonut haasteeksi raaka-aineena käytettävän puun riittävyyden. Erityisesti Aasiassa ja Itä-Euroopassa ei pystytä kasvattamaan puuta vastaaman paperiteollisuudessa vaadittavia määriä. (Madakadze ym. 1999; Ashori 2006)

Puun saatavuus ja puunhakkuun rajoittaminen onkin nostanut puun raaka-aineen hintoja paperi- ja selluteollisuudessa. Puunhakkuun ympäristövaikutukset ovat ot-sikoissa johtuen metsävarantojen vähenemisestä. Lisäksi on pyritty vähentämään maanviljelyjätteiden poltosta syntyviä hiilimonoksidi- sekä hiilidioksidipäästöjä. Näistä syistä johtuen on perinteisissä puuta käyttävillä alueilla, kuten EU:ssa, USA:ssa ja Kanadassa herännyt mielenkiinto non-wood-kuitujen käyttömahdollisuuksista paperiteollisuudessa. (Madakadze ym. 1999; Ashori 2006) Edellä mainituilla alueilla käytetään non-wood-kuituja pääasiassa erikoispaperin, kuten savukepaperin, suodatinpaperin ja setelipaperin, valmistuksessa. Toisaalta on Euroopassa myös tarve pohtia vaihtoehtoisia maanviljelyn käyttökohteita. Tällä hetkellä maanviljely Euroopassa keskittyy lähes ainoastaan ruokateollisuuteen, vaikka mahdollisuuksia olisi käyttää hyödyksi kasveja muilla teollisuuden aloilla, kuten paperi- ja tekstiiliteollisuudessa. (Marques 2010)

Paperin raaka-aineena käytetään pääasiassa puuta ja vain 7 % paperituotannosta käyttää raaka-aineena non-wood-kuituja (Taulukko 1). Kehitysmaissa paperiteollisuudessa on jo pitkään käytetty puun sijasta raaka-aineena non-wood-kuituja. Näistä merkittävimpinä olki 46 %, sokeriruoko 14 % ja bambu 6 %. Non-wood-kuituja käytetään erityisesti Aasiassa, missä suurin käyttäjämaa on Kiina, muita suuria käyttäjiä ovat Intia, Iran ja Pakistan. (Willför ym. 2011, 16; Marques 2010)

Taulukossa 1 on esitetty vuosien 2014–2016 paperiteollisuuden tilastoja. Taulukossa tarkastellaan paperin ja kartongin kokonaistuotantoa, paperimassatuotantoa ja non-wood-kuitujen osuutta kokonaistuotannosta Euroopassa, Aasiassa ja Kiinassa. Paperimassatuotannossa on mukana mekaaninen sekä kemiallinen massatuotanto. Mikäli tarkasteltaisiin Kiinassa non-wood-sellun osuutta kokonaissellun tuotannosta, olisivat osuudet 78,9 % (2014), 72,3 % (2015) ja 60,8 % (2016). Vuoden 2017 lukemia ei ollut vielä saatavilla, mutta Taulukosta 1 näkee viime vuosien

trendin paperiteollisuudessa. Non-wood-kuitujen osuus on laskussa erityisesti suur-  
tuottajana pidettynä Kiinassa, jonka vaikutus on merkittävä kokonaistuotannossa.  
Vuonna 2016 käytettiin Kiinassa enää vain 1/3 kokonaispaperimassatuotannosta  
non-wood-kuituja.

Taulukko 1. Paperiteollisuuden tunnuslukuja vuosilta 2014–2016 (FAO 2018).

Alue	Paperin ja kartongin tuotanto		Paperimassatuotanto		Non-wood-sellun tuotanto	
	milj. tonnia	%	milj. tonnia	%	milj. tonnia	%
Eurooppa						
2014	104	25,8	45,1	24,5	1,4	3,1
2015	104	25,5	45,4	24,7	1,3	2,9
2016	104	25,5	46,3	25,0	1,3	2,7
Aasia						
2014	188	46,5	42,9	23,3	11,5	26,8
2015	191	46,9	41,9	22,8	10,8	25,8
2016	192	46,9	41,3	22,3	9,9	24,0
Kiina						
2014	109	27,0	17,5	9,5	7,5	42,9
2015	111	27,3	16,8	9,1	6,8	40,5
2016	113	27,6	16,3	8,8	5,9	36,2
Total						
2014	404	-	184	-	14	7,6
2015	407	+0,7 %	184	+0,0 %	13,3	7,2
2016	409	+0,5 %	185	+0,5 %	12,3	6,6

Kiinassa on viime vuosikymmenien ajan suljettu paljon pieniä non-wood-tehtaita,  
johtuen siitä, että tehtaat eivät ole pystyneet vastaamaan ympäristövaatimuksiin,  
joihin Kiina on alkanut viime vuosikymmenien aikana kiinnittämään huomiota. Uu-  
den sukupolven non-wood-integraatit Kiinassa tulisikin rakentaa parhaalla mahdol-  
lisella tekniikalla, jolloin myös ympäristötehokkuus voidaan taata. (Adriaanse &  
Morsink 2007, 20)

## 2.2 Jaottelu

Non-wood-kuitujen päälähde on maanviljelyjätteet, kuten viljat ja sokeriruoko (toisin sanoen bagassi). Lisäksi non-wood-kuituja saadaan teollisuusjätteestä, kuten bagassi, puuvilla ja hamppu. Non-wood-kuituja viljellään myös pelkästään teollisuutta varten. Näihin lukeutuvat bambu, ruokokasvit, pellava, hamppu, kenaf, juutti, sisal ja manilla. (Saijonkari-Pahkala 2001, 13; Adriaanse & Morsink 2007, 13)

Paperiteollisuuden kannalta tärkeimmät kuidut jaotellaan kuitutyypin mukaan seuraavasti:

- varsikuidut (heinäkuidut): viljakasvit ja ruokokasvit (erityisesti bambu ja sokeriruokojäte/bagassi)
- niinikuidut: pellava, juutti, hamppu ja kenaf
- lehtikuidut: sisal ja manilla
- siemenkuidut: puuvilla
- puukuidut: havupuut ja lehtipuut. (Leminen ym. 1996, 9; Saijonkari-Pahkala 2001, 16–17)

Paperiteollisuudessa käytössä olevat varsikuidut ovat pääasiassa viljakasveja ja ruokokasveja. Vehnä on paperiteollisuudessa yleisin käytetty viljakasvi. Tärkein maatalousjäte on sokeriruokojäte eli bagassi. Bagassia käytetään laajasti eri paperilaatujen valmistuksessa. (Saijonkari-Pahkala 2001, 16)

Niinikuidut sijaitsevat kasvin varressa, jotka tulee erottaa korresta ennen käyttöönottoa. Niinikuituja käytetään paperinvalmistuksessa erityisesti silloin, kun halutaan parantaa lujuusominaisuuksia tai muita erityisiä ominaisuuksia. (Saijonkari-Pahkala 2001, 17; Willför 2011, 24)

Lehtikuiduissa sijaitsevat kuidut kasvin lehtiosaa. Lehtikuiduista paperiteollisuudessa käytetään manillahamppua ja sisalia. Teollisuuden kannalta tärkein siemenkuitu on puuvilla. Puuvillan pidempiä kuituja käytetään tekstiiliteollisuudessa, kun

taas lyhyempiä (2–7mm) kuituja käytetään muun muassa kirjapaperin valmistuksessa. (Saijonkari-Pahkala 2001, 27)

### **2.3 Tärkeimmät ominaisuudet**

Non-wood-kuitujen pituuksissa ja -halkaisijoissa on suuria eroja. Taulukossa 2 on esitetty puu- sekä non-wood-kuitujen pituudet, halkaisijat sekä pituuden suhde halkaisijaan. Kuitupituus on kaikista tärkein fysikaalinen ominaisuus paperinvalmistuksessa, koska sillä on suuri vaikutus paperin ja kartongin ominaisuuksiin, erityisesti lujuusominaisuuksiin. Pidemmällä kuidulla on esimerkiksi korkeampi repäisy-  
lujuus, mutta huonompi formaatio. Erityisesti niinikuitujen (pellava ja hamppu) kuitupituudet ovat suuria, jopa 55 mm. Lisäksi niini- ja lehtikuidut ovat pitkiä ja ohuita sekä omaavat erittäin suuren pituus-halkaisijasuhteen. Varsikuidut ovat puolestaan lyhyitä vastaten noin lehtipuukuitujen pituutta. Kuidut ovat kuitenkin heterogeenisempiä eli niiden jakautuneisuus on suurempaa kuin lehtipuukuitujen. (Leminen ym. 1996, 11; Marques 2010) Paperin tuotannon kannalta tulisi kuidun pituus-halkaisijasuhteen olla noin 100:1, kun taas tekstiilikuiduissa lähempänä 1000:1 (Saijonkari-Pahkala 2001, 15).

Taulukko 2. Eri kuitujen ominaisuuksia (Saijonkari-Pahkala 2001, 18; Marques 2010).

Kuitu	Kuitupituus (L) $\mu\text{m}$			Kuituhalkaisija (D) $\mu\text{m}$			L:D-suhde
	Suurin	Pienin	Kes-kiarvo	Suurin	Pienin	Kes-kiarvo	
Viljat	3120	680	1480	24	7	13	110:1
Bambu	3500–9000	375–2500	1360–4030	25–50	3–18	8–30	135-175:1
Bagassi	2800	800	1700	34	10	20	85:1
Pellava	55000	16000	28000	28	14	21	1350:1
Kenaf	7600	980	2740		20		135:1
Juutti	4520	470	2000	72	8	20	100:1
Hamppu	55000	5000	20000	50	16	22	1000:1
Manilla	12000	2000	6000	36	12	20	300:1
Sisal	6000	1500	3030		17		180:1
Puuvilla	50000	20000	30000	30	12	20	1500:1
Lehtipuu	1800	1000	1250	50	20	25	50:1
Havupuu	3600	2700	3000	43	32	30	100:1

Taulukossa 3 on esitetty puu- ja non-wood-kuitujen kemialliset koostumukset. Non-wood-kuitujen kemialliset koostumukset eroavat merkittävästi puukuiduista ja toisistaan. Havupuihin verrattuna non-wood-kuduilla on korkeampi pentosaanipitoisuus. Selluloosapitoisuus on yleisesti, hamppua ja pellavaa lukuun ottamatta, sama kuin puilla, mutta ligniinipitoisuus on non-wood-kuiduilla alhaisempi. Alhaisempi ligniinipitoisuus mahdollistaa keittokemikaalien helpomman tunkeutuminen kuituihin, jolloin valkaisu- ja keittokemikaaleja tarvitaan vähemmän kemiallisessa kuidutusprosessissa. (Saijonkari-Pahkala 2001, 18; Ashori 2006) Huomioitava asia on myös eri kuitujen silikaattipitoisuudet, erityisesti ruokokasvien. Piin haittavai- kutuksia käydään tarkemmin läpi luvussa 2.6.

Taulukko 3. Eri materiaalien kemialliset koostumukset (Saijonkari-Pahkala 2001, 24; Carus ym. 2017, 12).

	$\alpha$ -selluloosa	Ligniini	Pentosaanit	Tuhka	SiO <sub>2</sub>
<b>Kuitu</b>	%	%	%	%	%
Viljat	29–37	14–21	24–32	2–9	0,5–7
Bambu	26–43	21–31	15–26	1,7–5	1,5–3
Bagassi	32–44	19–24	27–32	1,5–5	0,7–3
Pellava	45–68	10–15	6–17	2–5	-
Kenaf	31–39	15–18	21–23	2–5	-
Juutti	-	21–26	18–21	0,5–1	<1
Hamppu	65–67	3	.	2	1–2
Manilla	61	9	17	1	<1
Sisal	43–56	8–9	21–24	0,6–1	<1
Puuvilla	85–90	3–3.3	-	1–1,5	<1
Lehtipuu	38–49	23–30	19–26	<1	<1
Havupuu	40–45	26–34	7–14	<1	<1

Taulukossa 3 esitettyjen kemiallisten koostumusten mukaan soveltuvat kuidut hyvin paperiteollisuuden raaka-aineeksi (Marques 2010).

## 2.4 Kemiallinen valmistusmenetelmä

Olkisellua valmistettiin ensimmäisen kerran vuonna 1827. Sokeriruokojätettä eli bagassia on käytetty paperiteollisuudessa pitkään muun muassa Kiinassa, Intiassa, Pakistanissa, Meksikossa ja Brasiliassa. (Bowyer 2004, 8)

Non-wood-kuitujen kemiallinen prosessi muistuttaa perinteistä puukuidun sellun valmistusprosessia. Non-wood-kuitujen käyttö saattaa kuitenkin vaatia erityisjärjestelyjä riippuen kuidun esikäsittelyasteesta. Nämä saattavat sisältää puhdistuksen, hienoaineenpoiston ja lajittelun. Lähes kaikki non-wood-kuidut tarvitsevat erityisjärjestelyjä niiden käsittelyyn ja kuidutukseen. Ruskean massan pesujärjestelmä poikkeaa normaalista, johtuen non-wood-kuitujen suotautuvuudesta, esimerkiksi olkikuidut tarvitsevat suuremman pinta-alan hitaamman suotautuvuuden takia. (Mohieldin 2014)



Taulukossa 4 on esitetty non-wood-kuitujen kemiallisen kuidutusprosessin käytössä olevat menetelmät sekä mahdolliset tulevaisuuden keittomenetelmät. Näiden lisäksi on yleisessä käytössä alkalikeittomenetelmä, johon lisätään 0,025–0,10 % antrakinia, jolloin natriumhydroksidia tarvitaan vähemmän keittoprosessissa (Leminen 1996, 18). Puukuituihin verrattuna on non-wood-kuiduilla monesti alhaisempi ligniinipitoisuus, mikä mahdollistaa alhaisemman keittolämpötilan (105–130 °C), lyhyemmän keittoajan sekä pienemmän keittokemikaalien tarpeen. Esimerkiksi alkalikeitossa viipymäaika on 15–20 minuuttia. (Leminen ym. 1996, 17; Germgård 2011, 709)

Taulukko 4. Non-wood-kuitujen keittomenetelmät (Saijonkari-Pahkala 2001, 29; Gustafsson 2011, 203–245; Leminen 1996, 18).

Prosessi	Keittokemikaalit	Yleisyys	Keittolämpötila, °C
Alkali	NaOH	Yleisesti käytetty	140–170
Sulfaatti	NaOH + Na <sub>2</sub> S	Yleisesti käytetty puulla	150–170
Sulfiitti	NaHSO <sub>3</sub> ja/tai Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Yleisesti käytetty	125–140
Fosfaatti	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Potentiaalinen	145–165
Milox	Muurahaishappo	Potentiaalinen	80–100
IDE	NaOH, Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Potentiaalinen	140–190
	Etanolivesiseos		
Alcell	Etanolivesiseos	Potentiaalinen	140–200

Non-wood-kuitujen tuotannolle on tyypillistä, että ne valmistetaan pienissä yksiköissä, jotka on integroitu paperi- ja kartonkitehtaisiin (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 31).

## 2.5 Käyttö paperiteollisuudessa

Non-wood-kuitujen käytöllä paperiteollisuudessa on pitkä historia. Paperi keksittiin Kiinassa vuonna 105 ja vasta 1800-luvun puolella välissä aloitettiin käyttämään

puuta mekaanisesti paperiteollisuudessa raaka-aineena. Ennen puuta käytettiin raaka-aineena muun muassa mulperipensaan kuituja, pellavaa, hamppua, bambua, ruohoja, olkea ja puuvillaa. Käytetyimmät paperikuidut olivat tuolloin peräisin hampusta ja pellavasta. (Bowyer 2004, 8; Malachowska ym. 2015)

Alkuaan paperi valmistettiin non-wood-materiaaleista kuten hampusta ja tekstiilijätteistä, eli niin sanotusta lumpusta. Koneellisesti valmistetun paperin tuotannon kasvaessa tuli vuorostaan ongelmaksi huutava pula raaka-aineista, joka siihen asti oli ollut pääasiassa keräyslumpua ja muuta tekstiilikuitua. Kuitupulaa korvaamaan paperiteollisuudessa ryhdyttiin käyttämään kasvikuituja muun muassa olkea. Olkisellu oli tärkeä raaka-aine etenkin Ranskassa ja Englannissa 1800-luvun lopulla, ja sitä käytetään yhä edelleen paperinvalmistukseen, erityisesti Kiinassa. Teollisuuden edelleen kehittyessä alettiin hyödyntää puukuituja. Puukuitujen käyttö syrjäytti non-wood-kuidut 1800-luvun loppupuolella paperiteollisuudessa, johtuen pääasiassa pienemmistä valmistuskustannuksista. Puun käyttö alkoi mekaanisella prosessilla vuonna 1840 Saksassa. (Kamoga ym. 2013; Häggblom-Ahnger & Komulainen 2005, 12) Viimeiset olkisellutehtaat Euroopassa suljettiin vuosina 1980 (Unkari), 1991 (Tanska) ja 1999 (Espanja). Syy tähän oli kaikilla sama, tehtaat eivät pystyneet vastamaan kiristyneisiin ympäristövaatimuksiin. (Adriaanse & Morsink 2007, 18)

Paperiteollisuudessa ollaan siinä tilanteessa, että suuntaus ja mielenkiinto non-wood-kuituja kohtaan on kasvussa. Suurin syy tähän on puuvarannon riittämättömyys ja ympäristötehokkuus. (Kamoga ym. 2013; Häggblom-Ahnger & Komulainen 2005, 12) Puukuidun tarpeen ja saatavuuden välillä on kuitenkin alueellisia eroja esimerkiksi Kiinan omat puuvarannot eivät riitä paperiteollisuuden tarpeisiin. Kierrätyskuidun käyttö on lisääntynyt, mutta täydelläkään käyttöasteella ei välttämättä pystytä kattamaan paperiteollisuuden raaka-ainetarvetta. (Bowyer 2004, 7; Suhonen 2013). Taulukon 1 mukaan kuitenkin non-wood-kuitujen tuotantomäärä on edelleen laskussa.

Paperia voidaan periaatteessa tehdä mistä vain selluloosaa sisältävästä kuitumaisesta materiaalista. Non-wood-kuituja käytetään erityisesti Aasiassa (Kiina, Intia, Iran ja Pakistan), jossa puuraaka-aineen tarjonta ei vastaa paperin ja kartongin

kysyntää. Kehittyneissä maissa käytetään non-wood-kuituja pääasiassa lujutta vaativissa erikoispapereissa, joilla on myös korkea markkina-arvo. Erikoispapereihin lukeutuvat muun muassa turvapaperit, setelipaperit sekä savukepaperit. (Willför ym. 2011, 22) Kuituhamppua pidetään yhtenä potentiaalisimpina vaihtoehtona puukuitujen korvaajaksi (Malachowska ym. 2015). Suomessa käytetään pellavaa ja puuvillaa ainoastaan Tervakoskella (Delfort), jossa valmistetaan varmuus- ja shekipapereita.

Non-wood-kuituja kuten olkea, bagassia, bambua, ruokoa ja kenafia on käytetty korvaamaan lyhyempää lehtipuun kuituja. Sen sijaan pellavaa, hamppua, sisalia ja manillaa on käytetty korvaamaan pidempää havupuun kuituja. (Kamoga ym. 2013)

Sokeriruokoa kasvatetaan paljon muun muassa Brasiliassa, Kuubassa, Kiinassa, Intiassa, Kaakkois-Aasiassa ja Etelä-Afrikassa. Sokeriruokotuotannosta saatavaa jätettä (bagassi) voidaan käyttää paperiteollisuudessa raaka-aineena. Bagassikuitu kelpaa moneen paperilaatuun, kuten sanomalehtipapereihin, kartonkeihin ja silkkipapereihin. Bagassimassa muistuttaa ominaisuuksiltaan lehtipuumassaa. Ongelmaksi on muodostunut mustalipeän korkea silikaattipitoisuus, joka vaikuttaa kemikaalikierron kustannuksiin ja täten pienten tehtaiden kannattavuuteen. Pii kemikaalikierrossa aiheuttaa kattilakiveä, mikä puolestaan kuluttaa kattilaa. (Willför ym. 2011, 25; Hammett ym. 2001)

Bambulla on suuri taloudellinen ja kulttuurillinen merkitys Itä- ja Kaakkois-Aasiassa, joissa sitä käytetään rakennus- ja ruokateollisuudessa. Aasiassa bambua on käytetty perinteisenä rakennusmateriaalina (talot, huonekalut) johtuen sen korkeasta lujuudesta ja pinnan kovuudesta, helposta työstettävyydestä sekä saatavuudesta. Bambua käytetään pääasiassa puuvapaissa painopapereissa, sanomalehtipapereissa ja aaltokartongeissa. (Willför ym. 2011, 25; Hammett ym. 2001)

Pellava- ja hamppukuituja on käytetty pääasiassa savukepapereissa, joissa lujuusominaisuudet, opasiteetti ja ilmanläpäisevyys ovat suuressa merkityksessä. Juuttia on käytetty korkeasti huokoisissa papereissa. Juutti on hyvä vaihtoehto, koska sen kuidun pituus-halkaisija-suhde soveltuu hyvin huokosiin papereihin. (Marques 2010) Juuttia käytetään esimerkiksi kirja- ja painopapereissa sekä käärepapereissa

(Hammett ym. 2001). Sisalilla ja manillalla on hyvä repäisylujuus ja korkea huokoisuus, joten ne soveltuvat hyvin paperilaatuihin, joilta vaaditaan korkeaa lujuutta ja huokoisuutta (Marques 2010).

Nykytekniikka ja non-wood-kuitujen ominaisuudet mahdollistivat sen, että non-wood-kuituja voidaan käyttää käytännössä kaikissa paperilaaduissa. Non-wood-kuituja käytetään tyypillisesti korvaamaan 20–90 % puukuidusta. Paperia voidaan valmistaa myös puhtaasti non-wood-kuiduista, esimerkiksi erikoispaperit. Non-wood-kuitujen osuus riippuu lopputuotteesta ja siltä vaadittavista ominaisuuksista. Vaihtoehtoja on kuitenkin loputtomasti ja non-wood-kuitujen ja puukuitujen seossuhteet voidaan säädellä lopputuotteen mukaisesti. 20–30 % non-wood-kuitujen lisäys puumassan sekaan ei vielä vaikuta paperikoneen ajettavuuteen eikä paperin ominaisuuksiin. Puukuitujen korvaaminen non-wood-kuiduilla on kannattavaa erityisesti alueilla, joilla puun saatavuus on heikompaa ja toisaalta non-wood-kuituja helposti saatavilla. Non-wood-kuitujen, kierrätyskuitujen ja puukuitujen käyttö mahdollistaa lopputuotteiden paremman räätälöinnin ominaisuuksien ja asiakkaiden tarpeiden mukaisiksi. (Adriaanse & Morsink 2007, 9; Hurter 2001)

Non-wood-tehtaiden suurin heikkous on kemikaalien talteenotto. Suurin osa non-wood-tehtaista, erityisesti Kiinassa, ovat olleet pieniä tehtaita, joilla ei ole mahdollisuuksia panostaa kunnolliseen kemikaalien talteenottojärjestelmään. Kiinan hallitus on viimeisten vuosikymmenien aikana alkanut sulkemaan kyseisiä tehtaita. (Hammett ym. 2001)

## **2.6 Edut ja haitat**

Tässä kappaleessa on esitetty non-wood-kuitujen keskeisimmät edut, haitat ja haasteet erityisesti paperiteollisuuden näkökulmasta. Non-wood-kuitujen etuja ovat:

- a) Non-wood-kuituja saadaan maatalousteollisuudesta sivutuotteena/jätteenä. Näin voidaan hyötykäyttää ympäristöystävällisemmin jätettä. (Leminen ym. 1996, 17) Maatalousjäte on käytännössä ilmaista tai erittäin edullista, tähän vaikuttavat tosin korjuu- ja kuljetuskustannukset (Hammett ym. 2001).

- Lisäksi on pyritty vähentämään maanviljelyjätteiden poltosta syntyviä hiilimonoksidi- sekä hiilidioksidipäästöjä (Adriaanse & Morsink 2007, 14).
- b) Kuitujen nopea kasvu ja uusiutuminen. Suurin osa kasveista ovat yksivuotisia, joten raaka-ainetta on nopeammin saatavilla verrattuna puuhun. (Madakadze ym. 1999)
  - c) Usein puuta edullisempia (Leminen ym. 1996, 17).
  - d) Puukuituihin verrattuna monesti alhaisempi ligniinipitoisuus, mikä mahdollistaa alhaisemman keittolämpötilan (105–130 °C), lyhyemmän keittoajan sekä pienemmän keittokemikaalien tarpeen (Leminen ym. 1996, 17). Alhaisemmalla ligniinipitoisuudella on prosessisaanto myös parempi kuin puulla.
  - e) Mahdollistavat pienempien tehtaiden rakentamisen lähelle raaka-ainetta (Leminen ym. 1996, 17).
  - f) Kasvit ovat monikäyttöisiä ja niiden kuituja voidaan käyttää muun muassa paperi – ja kartonkilaaduissa, kuitulevyissä ja komposiittimateriaaleissa (Madakadze ym. 1999).
  - g) Vuotuinen kasvu hehtaaria kohden on moninkertaista verrattuna puuhun (Norokytö 2010, 24).
  - h) Non-wood-kuidut voidaan valkaista korkeaan vaaleuteen lyhyemmällä valkaisu-sekvenssillä ja näin ollen valkaisu- kemikaalien tarve on myös pienempi (Adriaanse & Morsink 2007, 15).
  - i) Pitkät niinikuidut soveltuvat erinomaisesti lujuutta vaativiin paperi- ja kartonkilaatuihin (erikoispaperit) (Saijonkari-Pahkala 2001, 17).

Paperiteollisuudessa non-wood-kuitujen käytössä tulisi huomioida seuraavat asiat:

- a) Kasvien käyttö on niin sanotusti uusi kulttuuri nykyaikaiselle paperiteollisuudelle, johon siirtymiseen liittyvät vahvasti pääomakustannukset, käyttökustannukset, paperin ominaisuudet ja laatu sekä luotettavuus. (Ashori 2006) Non-wood kuituja käytettäessä tulisi koko toimitusketjuun tehdä muutoksia (korjuu, kuljetus sekä varastointi). Lisäksi kuidun puhdistaminen vaatii omat laitteistot, kuten pesulaitteiston ja pölynpoiston. (Willför ym. 2011, 26)

- b) Raaka-aineen ympärivuotinen saanti tulisi taata, sillä suurin osa non-wood-kuiduista ovat peräisin yksivuotisista kasveista. Tästä johtuen tarvitaan suuret varastot jatkuvan raaka-ainevarannon turvaamiseksi. Varastointia vaikeuttaa lisäksi se, että kasvit ovat bulkkisia, eli toisin sanoen suuria tilavuudeltaan ja pieniä tiheydeltään. Tästä johtuen tarvitaan varastotilaa paljon. (Ashori 2006)
- c) Bulkkisuudesta johtuen voi myös raaka-aineen kuljettaminen olla haastavaa, sillä esimerkiksi konttiin ei painollisesti mahdu paljoa raaka-ainetta. Lisäksi tulisi pohtia, kuinka kaukaa on taloudellisesta kannattavaa kuljettaa raaka-ainetta. (Ashori 2006) Raaka-aineen saatavuuden merkitys tehtaan lähistöltä verrattuna tehtaan tuotantokapasiteettiin on otettava huomioon. Pienemmällä tehtailla kustannukset ovat verrattain korkeammat kuin suuremmilla. (Willför ym. 2011, 26)
- d) Heinäkasvien yksi merkittävimmistä haasteita on korkea silikaattipitoisuus. Suurin osa non-wood-kuitutehtaista ovat kooltaan pieniä ja niiden kemikaalientalteenottoprosessi ei ole riittävä käsittelemään korkeaa silikaattipitoisuutta. (Ashori 2006) Pii yhdessä alkalikeittomenetelmän kanssa aiheuttaa korkean silikaattipitoisuuden mustalipeässä, jota on vaikeaa haihduttaa ja saada näin ollen kemikaalien talteenottoprosessi kannattavaksi. Suurin osa keittokemikaaleista joudutaan hävittämään. Heikentyneen talteenottoprosessin johdosta joudutaan mustalipeä hävittämään, joka puolestaan aiheuttaa suurimman ympäristöongelman sellutehtailla. Lisäksi pii aiheuttaa kalkkikerrostumia kattilaan, joka puolestaan heikentää kattilan toimintaa. (Germgård ym. 2011, 707)
- e) Non-wood-kuitujen viljely vaatii investoinnin (Ashori 2006).
- f) Non-wood-kutujen suotautuvuus (engl. freeness) poikkeaa puukuidusta. Esimerkiksi bagassilla on alhainen suotautuvuus. Suotautuvuus vaikuttaa pesutehokkuuteen ja huonontaa vedenpoistoa, jolloin paperikoneen kuivausprosessi heikkenee ja kuivatusenergian tarve kasvaa. Kuivuminen vaikuttaa puolestaan paperin lujuus- sekä optisiin ominaisuuksiin. (Willför ym. 2011, 25)
- g) Kemiallisessa paperiteollisuudessa käytetään yleisesti koko kasvi massanvalmistuksessa. Kasveista tehty massa sisältää hienoaineista ja lyhyempää kuitua, jotka vaikuttavat paperikoneella vedenpoistoon pitkittäen sitä.

Lisäksi pesumäärät ovat suurempia. Hienoaineen osuutta voidaan pienentää poistamalla lehdet ja käyttää prosessissa vain varsiosaa. Lisäksi entsyymikäsittelyllä voidaan parantaa vedenpoistoa. (Saijonkari-Pahkala 2001, 17; Germgård ym. 2011, 707) Hitaampi suotautuvuus alentaa myös paperikoneen nopeutta, jolla on suora vaikutus tuottavuuteen. Toinen vaihtoehto on kuivatusosan pitkittäminen, joka taas puolestaan nostaa prosessin käyttö- ja energiakustannuksia. (Adriaanse & Morsink 2007, 16)

- h) Non-wood-kuidulla on väärin varastoituna pilaantumisriskinsä, jolloin hävikki saattaa olla merkittävä (Leminen ym. 1996, 17).

## 2.7 Kustannukset

Non-wood-kuitujen valmistuskustannuksista löytyi vähän tietoa ja se tieto mitä löytyi, oli ristiriitaista, joten kustannusarvioihin tulee suhtautua varauksella. Non-wood-kuitujen keitto ja valkaisu on yleisesti edullisempaa kuin puukuitujen, johdun alhaisemmista ligniinipitoisuuksista. Toisaalta non-wood-kuitujen puhdistaminen, paperin valmistaminen ja kemikaalien talteenotto on kalliimpaa kuin puukuitujen. Non-wood-kuitujen mustalipeä on viskoottisempaa, joten tarvitaan tehokkaampi pesujärjestelmä ja tämän myötä myös vedentarve on suurempi kuin puukuiduilla. Varastoinnin aikana non-wood-kuiduilla on taipumus heikentyä ja värjääntyä, jolloin vaaleus myös laskee. Tästä johtuen tulisi kuitu esikäsitellä entsymaattisesti tai vaihtoehtoisesti valkaista korkeampaan vaaleuteen. Molemmat tapaukset nostavat non-wood-massan valmistuskustannuksia. (Hammett ym. 2001)

Hamppusellun kustannukset ovat viisinkertaiset puuselluun verrattuna. Korkean hinnan takia hamppusellua käytetään edelleen pääasiassa erikoispapereissa, kuten seteli- ja savukepaperit. (Carus ym. 2013, 3) Bowyerin (2004) laskelmien mukaan kuitenkin hamppu-TMP ja -CTMP olisi jopa 67–78 % edullisempaa kuin lehtipuusta valmistettu TMP. Lisäksi kemiallisessa menetelmässä niinikuiduista valmistettu sellu olisi vain 1,5 kertaa kalliimpaa kuin puusellu. Puusellun ja koko hamppusta valmistetun sellun kustannukset olisivat suunnilleen samat. Näissä laskelmissa ei otettu huomioon kuljetus- ja varastointikustannuksia ja lisäksi oletettiin, että hampun hävikki on sama kuin puulla. (Bowyer 2004, 25–29)

Vuonna 2013 kuituhampun hinta oli noin 50 senttiä/kg savukepaperiteollisuudessa (päistärepitoisuus 25 %) ja 75 senttiä/kg auto- ja eristeteollisuudessa (päistärepitoisuus 2–3 %) (Carus ym. 2013, 2–3).

### **3 KUITUHAMPPU**

Paperin ja kartongin kulutuksen kasvu on tuonut uuden mahdollisuuden yksivuotisille non-wood-kuiduille. Eräs potentiaalinen vaihtoehto on hamppu (*Cannabis sativa* L.). Hampulla on monia ominaisuuksia, jotka puoltavat käyttömahdollisuuksia paperiteollisuudessa. Noin yksi kolmasosa hampun korresta sisältää arvokkaita niinikuituja. Niinikuidut ovat pitkiä, jotka parantavat erityisesti paperin ja kartongin lujuusominaisuuksiin. Toinen etu, verrattuna puukuituihin, on matalampi ligniinipitoisuus, mikä puolestaan mahdollistaa paremman saannon. (Bowyer 2004, 33)

Hamppukuitututkimukset ovat osoittaneet, että nykyteknologialla hampulla saavutetaan vaadittavat paperitekniset ominaisuudet puukuituun verrattuna. Oikeilla menetelmillä, olosuhteilla sekä nykyteknologiaa hyödyntämällä voidaan valmistaa erittäin laadukasta hamppusellua. (Malachowska ym. 2015)

#### **3.1 Historia**

Hamppua on yksi vanhimmista paperinvalmistuksen raaka-aineista (Kamoga ym. 2013). Muinaisessa Kiinassa valmistettiin paperi pääasiassa hampputuotteiden jätteistä (köydet, purjeet, vaatteet ja rievut) ja kalaverkoista. Hamppu soveltui kirjoihin, raamattuihin, karttoihin, turva- ja setelipapereihin sekä sanomalehtiin. (Malachowska ym. 2015)

Myös Suomessa käytettiin hamppua paperinvalmistuksessa. Kyseistä paperi kutsuttiinkin lumppupaperiksi. Hampun muokkaus käsityönä kuiduksi oli työlästä, joten paperinvalmistuksessa käytettiin lumppuja neitseellisten kuitujen sijaan. Lisäksi lumppuvaatteet olivat edullisia. Suomessa lumppupaperin valmistus aloitettiin 1600-luvun puolivälissä. Valmistusprosessissa käytetyt vaatteet revittiin palasiksi



ja hienonnettiin veden kanssa massaksi. Lumpupaperin valmistus alkoi käsityönä kehittyen myöhemmin teollisuudeksi. Euroopassa 1800-luvun alkupuolella yleistyivät paperikoneet. (Laurila 2013, 24–25)

1900-luvulla loppui hampun käyttö paperiteollisuudessa lähes kokonaan. Tuolloin kehittyi puukuitujen kemiallinen prosessi vastaamaan paperin ja kartongin kysyntää. Markkinoilla saapuneet uudet kuidut korvasivat hamppu- ja pellavatekstiilit. Lisäksi kuituhampun käyttöön vaikutti Yhdysvalloista levinnyt marihuanan kielto-laki. (Laurila 2013, 9) Huumeidenvastainen politiikka onnistui niputtamaan hyöty- ja päihdehampun samaksi kasviksi, pilaten kuituhampun maineen vuosikymmenien ajaksi. Yhdysvalloissa hyötyhampun kasvattamiseen tarvitaan DEA:lta (Drug Enforcement Administration) lupa, jota on erittäin vaikea saada. (Norokytö 2010, 10–11) Suomessa ELY-keskus (elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus) valvoo hyötyhampun kasvattamista, ottamalla satunnaisesti testejä viljelmistä, ennen sadonkorjuuta. Kuituhampun THC-pitoisuus ei saa ylittää 0,20 prosenttia. (Ikonen 2015, 9) EU:n asettamat tiukat rajat ovat hidastaneet hyötyhampun viljelyä ja osittain lopettaneet viljelyjä. Esimerkiksi johtavassa hyötyhampun viljelymaassa, Kiinassa, ei ainakaan tietojen mukaan ole asetettu hyötyhampulle THC-pitoisuusrajaa. (Norokytö 2010, 38)

Suomessa hamppu on kuulunut ensimmäisiin viljakasveihin ja se on todennäköisesti levinnyt Suomeen Venäjältä. Suomessa hamppu ei kasva vapaana luonnossa. Ahvenanmaalta on löydetty hampun siemeniä, joiden on todettu olevan viikinkiajoilta 800–1050. Viitteitä viljelystä on löydetty Turun alueelta ja näiden arvioidaan olevan vuosilta 1100–1500. 1700–1800-luvuilla suurin viljelyalue oli Itä-Suomi, pääasiassa Karjala ja Savo. Suomessa hamppuviljely alkoi laskea 1800-luvun lopussa. Syynä tähän oli pellavan suosion kasvu ja myöhemmin teollisuuden myötä muut kuidut, kuten puuvilla. Hamppua alettiin pitää 1950-luvulla köyhälis-tön tuotteena ja 1960-luvulla viljeltiin Suomessa hamppua enää omiin tarpeisiin. (Laurila 2013, 21–22)

### 3.2 Ominaisuudet

Hamppulehdet ovat sormijakoiset ja yhteensä niitä on 3–9 kappaletta. Hamppusiemenet ovat noin 0,5 cm pitkiä, litteän pyöreitä ja väriltään ruskeita. Hampun juuristo on vahva ja juurilla on myönteinen vaikutus viljeltyyn maaperään, jättäen maan muun muassa rikkaruohovapaaksi. (Laurila 2013, 14)

Hamppu on ruohomainen yksivuotinen kasvi. Varsi on suora ja putkimainen, joka kasvaa 1–5 metriä korkeaksi 4–5 kuukaudessa. Yhdessä varressa on 20–40 niinikuitukimppua. Kuitukimput ovat pituudeltaan 10–30 cm ja paksuudeltaan 0,5–5 mm. Niinikuidut ovat jakautuneet hienorakenteisiin, pitkiin ja vahvoihin primäärikuituihin (89 %) ja karkeimpiin, lyhyempiin ja ligniinipitoisempiin sekundäärikuituihin (11 %). (Bowyer 2004, 12; Laurila 2013, 33–35) Primäärikuidut sijaitsevat uloimmassa kerroksessa ja sekundäärikuidut sisemmissä kerroksissa (Häggbloom-Ahnger & Komulainen 2003, 25).

Kuituhampun kasvatuksessa pyritään maksimoimaan niinikuitujen osuus. Varressa on suhteellisen ohut ulomainen kerros ja puukuitumainen sisus, jota ympäröi ontto keskiö. Niinikuidun osuus on noin 30–35 prosenttia varren kuivapainosta. Hampun ytimessä sijaitsevat hyvin lyhyet puumaiset kuidut, jotka sisältävät suhteellisen paljon ligniiniä ja eivät näin ollen ole ideaalisia paperinvalmistukseen. Näitä voidaan kuitenkin käyttää alempilatuotteisissa paperituotteissa, massamiksauksessa tai niinikuitujen seassa. (Bowyer 2004, 12; Laurila 2013, 33–35)

Niinikuidut ovat paperiteollisuuden kannalta tärkeimmät non-wood-kuidut. Ne ovat paksuseinäisiä ja kovia. Sekundääriniinikuidut ovat erittäin lyhyitä noin 2 mm tai lyhyempiä. Hyvän formaation takaamiseksi paperissa ja kartongissa tarvitaan pitkien kuitujen lisäksi lyhyempää sekundäärikuitua. Korresta 65–70 % on lyhyempää päistärettä. Taulukossa 5 on esitetty hampun eri kuitujen ominaisuuksia. Niinikuidut sisältävät enemmän selluloosaa kuin puukuidut, mutta vähemmän ligniiniä. Päistäreet toisaalta sisältävät vähemmän selluloosaa ja yhtä paljon holoselluloosaa sekä ligniiniä, kuin lehtipuut. (Bowyer 2004, 12; Laurila 2013, 33–35).

Taulukko 5. Hamppukuitujen ominaisuuksia. (Bowyer 2004, 13; Carus ym. 2017, 12)

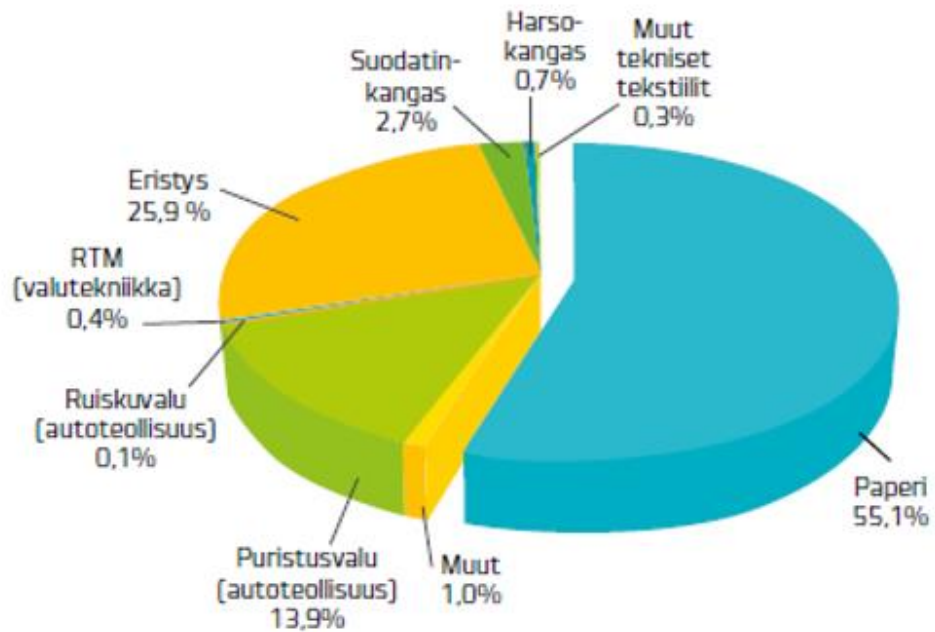
Ominaisuus	Hamppukorsi	Niinikuidut	Päistäreet
Holoselluloosa	80–83	81–86	66–72
$\alpha$ -selluloosa, %	50–55	65–67	36–40
Hemiselluloosa, %		10–15	18–25
Ligniini, %	17–20	3–4	20–25
Tuhka, %	2–4	3–5	
Uuteaineet, %	2–3	1–2	

Danielewicz & Surma-Ślusarska (2017) määrittivät omassa tutkimuksessaan eri hamppukuitujen kemiallisia koostumuksia. Heidän tutkimuksena mukaan niinikuidut sisälsivät kaksinkertaisen määrään selluloosa verrattuna päistäreeseen. Lisäksi niinikuitujen ligniinipitoisuus oli vain 4 % verrattuna päistäreen 27,1 %. (Danielewicz & Surma-Ślusarska, 2017)

Kuituhampun THC-pitoisuus (delta-9-tetrahydrokannabinoli) on alle 1 %. THC aiheuttaa marihuanassa huumaavan vaikutuksen. Huumausaineeksi tai lääketieteelliseen viljelyssä hampussa on THC-pitoisuus 1–15 %. Kuituhamppu ja marihuana eivät ulkoisesti eroa toisistaan, vaan ne voidaan erottaa vain kemiallisilla keinoilla. Teoriassa on mahdollista kuituhampusta jalostaa marihuanaa, mutta se ei ole taloudellisesti kannattavaa. (Bowyer 2004, 13)

### 3.3 Käyttökohteet

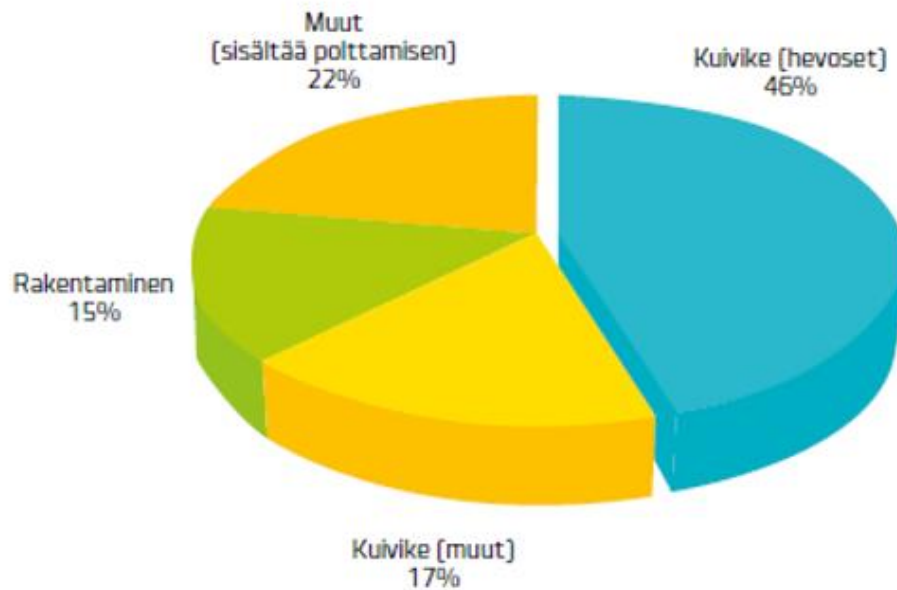
Hamppua voidaan käyttää monipuolisesti eri käyttötarkoituksiin. Hampun etuihin lukeutuu koko kasvin käyttömahdollisuudet. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty hamppukuidun ja päistäreen käyttökohteita Euroopassa.



Kuva 1. Hamppukuidun käyttö Euroopassa (Ikonen ym. 2015, 7).

Vuonna 2013 tuotettiin EU:ssa hamppukuitua 25 000 tonnia, joista yli puolet käytettiin paperiteollisuudessa. Suurin osa kuituhampusta EU:ssa käytetään erikoispaperien valmistuksessa, joista merkittävimpänä savukepaperi. Teknisiin tekstiileihin lukeutuvat muun muassa punokset, kuidut, verkot ja matot. Päistärepitoisuuden ollessa alle 2 % voidaan kuituhampua käyttää biokomposiittina autoteollisuudessa. (MultiHemp 2016; Sankari 2000, 22)

Ranska on Euroopan johtava hampunviljelijä ja sillä onkin pitkät perinteet hampun tuottajana. Suurin osa tuotantolaitoksista on perustettu viimeisen kymmenen vuoden aikana. Taustalla on mielenkiinto uusiutuviin raaka-aineisiin sekä hiilidioksidipäästöjen vähentäminen. Ranskassa käytetään hamppua talojen eristemateriaalina ja käyttö talojen eristemateriaalina käynnistyi 1900-luvun puolessa välissä. (Luukkakallio 2013, 9)



Kuva 2. Päistäreen käyttö Euroopassa (Ikonen ym. 2015, 7).

Päistäreestä suurin osa käytetään eläinten kuivikkeena. EU:ssa tuotettiin vuonna 2013 43 000 tonnia päistärettä (MultiHemp 2016). Toinen merkittävä käyttökohde on rakennusteollisuus, jossa päistärettä käytetään muun muassa ”hamppubetonina”. Huokoisella päistäreellä seinärakenteesta saadaan hengittävä ja hyvin lämpöä eristävä. (Luokkakallio 2013, 5)

Hampun kukkaa käytetään lähinnä lääketeollisuudessa. Lehtiä rehuna, teenä ja lääketeollisuudessa. Siemenillä on myös useita käyttökohteita, jotka ovat rehu (44 %), ruokateollisuus (42 %), ruokaöljy (12 %) sekä kosmetiikka (0,3 %). Lisäksi juuret kuohkeuttavat ja ravitsevat maapohjaa. (MultiHemp 2016)

Suomessa on hamppua käytetty eri tarkoituksiin. Kuidut erotettiin korresta, muokattiin ja kehrättiin lankaa, josta valmistettiin vaatteita ja muita tekstiilejä. Karkeammasta langasta kudottiin muun muassa säkkejä ja kalaverkkoja. Hampun pitkä ja luja kuitu soveltui erinomaisesti köyden valmistukseen. Tervattua hamppuköyttä käytettiin erityisesti laivateollisuudessa. Hamppuöljyä on Suomessa käytetty muun muassa lamppuöljynä, saippuan ja suopien valmistuksessa. (Laurila 2013, 23)

Hamppua kasvatettiin EU:ssa vuonna 2016 33 000 hehtaaria. Suomessa oli vuonna 2015 toiminnassa vain kaksi yhtiötä: Hamppu Farmi ja Hemprefine Oy. Lisäksi on

kuituhamppua koekasvatettu Suomessa eri hankkeisiin muun muassa Raisiossa, Viikissä ja Forssassa. Kokonaisviljelyala Suomessa oli vuonna 2016 noin 1 000 hehtaaria, joista hieman alle puolet oli kuituhamppua ja loput öljyhamppua. (Carus ym. 2017, 5) Tällä hetkellä Suomessa öljyhamppua viljelee noin 70 tilaa. Yhteensä öljyhamppua viljellään noin 540 hehtaaria, sadon ollessa 1000–1500 kg/hehtaari. (Farmit 2017) Vuonna 2010 keskimääräinen hamppusato Euroopassa oli 7.3 tonnia/hehtaari (Carus ym. 2017, 5).

### 3.4 Hampun soveltuvuus paperiteollisuuteen

Hamppukuituja on tähän asti käytetty pääasiassa seuraavissa papereissa: korkealaatuiset erikoispaperi (kirjoitus ja paino), arkistopaperit, setelipaperit, teollisuuden suodatinpaperit, eristyspaperit, voipaperit, kahvin suodatinpaperit, teepussit, käsin tehdyt paperit, raamattupaperit ja erikoistaidepaperit. (Malachowska ym. 2015)

Hampulla on useita ominaisuuksia, jotka puoltavat käytettävyyttä paperiteollisuudessa. Noin yksi kolmasosa korren kuiduista ovat pitkiä niinikuituja, jotka soveltuvat erityisesti lujutta vaativiin paperi- ja kartonkilaatuihin. Lisäksi ligniinipitoisuus on matalampi kuin puukuiduilla, joka mahdollistaa paremman saannon. (Bowyer 2004, 1) Taulukossa 6 on esitetty hampun niinikuitujen käyttökohteita paperiteollisuudessa. Lisämässana voidaan käyttää yleisesti puu-, pellava- tai puuvillamassaa (Hurter 2001).

Taulukko 6. Niinikuitujen käyttömahdollisuudet paperiteollisuudessa (Hurter 2001).

Paperi	Hampun osuus, (%)
Savukepaperi	50–100
Kondensaattoripaperi	20–60
Setelipaperit	50–80
Ohuet painopaperit	20–80
Turvapaperit	50–80

Eri tutkijat ovat tutkineet erityisesti niinikuitujen käyttömahdollisuuksia eri keittomenetelmillä. Tutkimusten mukaan niinikuiduilla on potentiaalia

paperiteollisuudessa. Tulokset osoittivat niinikuiduilla olevan korkea saanto, pitkä kuitupituus ja korkea repäisylujuus. Todettiin, että kyseisten ominaisuuksien johdosta, kuituhamppu soveltuu erityisesti tuotteisiin, joilta vaaditaan hyvää repäisylujuutta, jäykkyyttä ja bulkkia. (Bowyer 2004, 23)

Myös päistäreen keittomahdollisuuksia on tutkittu ja lyhyempiä kuituja on käytetty alkalikeittomenetelmässä. Lyhyempiä kuituja voidaan verrata lehtipuusellun ja sillä on todettu olevan parempi puhkaisulujuus ja vetolujuus, mutta alhaisempi repäisylujuus. Jauhatusominaisuudet olivat puulla ja päistäresellulla samanlaiset. 10–30 % hamppusellun lisäys lehtipuusellun paransi sellun tasaisuutta, formaatiota ja paperin painettavuutta hieno- ja painopapereilla. Päistäresellu soveltuisinkin parhaiten massamiksaukseen puukuidun korvaamiseen. (Bowyer 2004, 24; Kane 2000, 33)

On kuitenkin asioita, joita tulisi ottaa huomioon mietittäessä hampun soveltuvuutta paperiteollisuuden raaka-aineena. Päälimmäisenä näistä kuidun ja päistäreen erottamisen kustannukset, pitkät varastointiajat sekä suuret viljelmät. Huomioitavaa on myös se, että päistäreen osuus on 65–70 % kuiduista. Päistäreen ominaisuudet poikkeavat merkittävästi niinikuidusta ja paperiteollisuuden kannalta ne ovat verrattavissa lehtipuukuituihin (tai jopa huonommat). (Bowyer 2004, 1) Tutkimusten mukaan voidaan niinikuituihin sekoittaa aina 30 %:iin asti hampun muita kuituja. Lisäksi päistäreen on todettu olevan myönteinen vaikutus joihinkin paperilaatuihin. Pienempi jae toimii paperissa täyteaineena parantaen sileyttä ja painettavuutta, jolloin huokoisuus ja ilmanläpäisevyys laskevat. (Kane 2000, 33)

Oleellinen kysymys on, että pystytäänkö koko hampun korsi käyttämään sellaiseenaan kemiallisessa massanvalmistuksessa. Tutkimustulokset ja kirjallisuus antavat hieman ristiriitaista tietoa asiasta. Kuitenkin pienellä varauksella on todettu, että koko hamppua voidaan käyttää paperiteollisuudessa raaka-aineena. (Bowyer 2004, 24) Tietoa hampun tai ylipäätään non-wood-kuitujen paperikemiasta ei ollut saatavilla. Kirjallisuuden perusteella suurimpiin non-wood-kuitujen haittoihin lukeutui huono suotautuvuus paperikoneella. Retentiota voidaan parantaa alentamalla hienoainepitoisuutta tai käyttämällä sopivia retentioaineita. Vishtal ym. (2011) tutkivat eri retentioaineiden vaikutusta non-wood-kuituja sisältävien massojen retentioon.

Tutkimukset antoivat lupaavia tuloksia non-wood-kuitujen käytöstä paperinvalmistukseen. Retentioaineilla pystyttiin parantamaan non-wood-kuitujen suotautuvuutta. (Vishtal ym. 2011)

### **3.5 Tulevaisuuden käyttö Suomessa**

Kuituhampun käytössä tulisi tulevaisuudessa huomioida koko hamppukorren käyttömahdollisuudet. Kemiallisella kuidutuksella voidaan koko hamppukorsi käyttää, jolloin se tulisi ensiksi katkoa 20–25 mm pituisiksi pätkiksi. Pelkkien niinikuitujen käytössä saanto olisi noin 25–35 %, kun taas koko hampun käytössä se olisi noin 90 %. Hävikkiä syntyisi noin 10 % pölynä. Kartongin valmistuksessa suositellaan koko hamppukorren käyttöä. Tällöin ei myöskään tarvittaisi päistäreen ja niinikuitujen erotusta. Lisäksi olisi koko hampun käytössä hyvät lujuusominaisuudet ja saanto. Paperiteollisuudessa etsitään nimenomaan vaihtoehtoisia kuituja puulle, joilla olisi hyvät lujuusominaisuudet ja saanto. (Carus ym. 2017, 10–14)

### **3.6 Edut ja haasteet**

Non-wood-kuitujen haasteita, haittoja ja etuja käytiin tarkemmin läpi kappaleessa 2.6. Tässä kappaleessa keskitytään hampun merkittäviin etuihin ja haittoihin.

Edut:

- a) Hamppu sisältää pitkiä niinikuituja, joilla on erinomaiset lujuusominaisuudet (Kane 2000, 33).
- b) Paremmat ympäristövaikutukset kuin puunhakkuulla (Kane 2000, 33; Norokytö 2010, 14).
- c) Korkea kuiva-ainesaanto (Kane 2000, 33; Norokytö 2010, 14).
- d) Soveltuu hyvin TCF-valkaisuun (klooriton), voidaan valkaista vetyperoksidilla (ympäristöystävällisempi) (Kane 2000, 33).
- e) Paperin kestävyys: paperi ei kellastu yhtä nopeasti kuin puupohjaiset paperit (Malachowska ym. 2015).
- f) Hamppuselluprosessin kemikaalit ympäristöystävällisempiä kuin perinteisen selluprosessin (Malachowska ym. 2015).



- g) Hamppu antaa hyvän kasvualustan muille kasveille (vuoroviljely) (Malachowska ym. 2015). Kuituhampun viljely parantaa maan rakennetta kuohkeuttaen sitä. Lehdet peltoon jäädessä lisäävät orgaanista aineista peltoon, humuspitoisuus nousee ja pieneliötoiminta paranee. Kuituhampun viljelyyn ei tarvitse rikkakasvientorjuntaa eikä torjunta-aineita. Hampulla on tutkimuksien mukaan ollut myönteisiä vaikutuksia esimerkiksi perunan ja maisin vuoroviljelyssä. (Tomppo ym. 2018, 10) Hamppu estää eroosiota, joten se sopisi hyvin myös pientareille ja reunavyöhykkeille suojakasviksi (Norokytö 2010, 16).
- h) Hamppupaperia voidaan kierrättää jopa 8 kertaa verrattaessa puupaperin 3-5 kertaan (Malachowska ym. 2015).
- i) Hamppupelto hehtaaria kohden tuottaa 3–4 kertaisen määrän kuituja verrattuna metsään (Bowyer 2004, 34; Norokytö 2010, 15).
- j) Hamppukasvin kokonaisvaltaiset käyttömahdollisuudet, kuten öljyt, eläinten rehut, lääketeollisuus, talon rakenteet ja paperiteollisuus.
- k) Massasaanto jopa 5 % korkeampi verrattuna koivuselluun ja 14 % verrattuna mäntyselluun (Miao ym. 2014).
- l) Kuituhamppu sitoo hyvin hiilidioksidia, jopa 2–3 kertaa enemmän muihin kasveihin verrattuna (Hemprefine 2018).

#### Kuituhampun käytössä huomioitavia asioita:

- a) Hamppu on arka hallalle, joka vaikuttaa viljelijöiden halukkuuteen kasvat-  
taa hamppua (kustannustehokkuus) (Bowyer 2004, 20–34).
- b) Asenteiden muuttaminen ja valheellisen tiedon korjaaminen. Kuituhamppu  
sekoitetaan huumausaine- ja lääkehamppuun eli marihuanaan. Näiden erot-  
taminen on mahdollista vain kemiallisin menetelmin. (Norokytö 2010, 10)
- c) Niinikuitujen erottaminen korresta. Vaati erilliset prosessit, jotka puoles-  
taan vaativat laitteiston ja mahdollisen investoinnin. Lisäksi liotusvaihe on  
herkkä, joka vaatii optimoinnin. (Bowyer 2004, 20–34)
- d) Niinikuitujen osuus noin 30 % hampusta.
- e) Tiheämpi korjuusykli (Bowyer 2004, 20–34).

- f) Hamppukuitu vaatii mekaanista käsittelyä, kuljetuskysymykset, bulkkisen materiaalin varastointi. Pienempien tehtaiden kannalta tämä ei ole kustannustehokas vaihtoehto. (Kane 2000, 33)
- g) THC-pitoisuuden alhainen raja (0.2 %).

## 4 KUITUHAMPUN JALOSTAMINEN

Kuituhampun mekaaninen jalostus toteutetaan kolmivaiheisena. Ensimmäinen vaihe sisältää korren liuotuksen. Liuotuksen tarkoituksena on helpottaa kuitukimppujen myöhempää mekaanista irrottamista korren puumaisesta osasta eli päistäreestä. Liuotuksen jälkeen korsi murskataan ja viimeisessä vaiheessa kuitukimput ja päistäreet lajitellaan toisistaan. Tässä vaiheessa kuitu on vielä kuitukimppuina, jonka päistärepitoisuus on 5–15 %. Kuitu kelpaa jo sellaisenaan selluloosateollisuuteen tai rakennusteollisuuteen lämmöneristeeksi. Hienoavaajalla voidaan mekaanisesti jatkojalostaa kuitukimput yksittäiskuiduksi. Tällä keinolla kuitu voidaan vakioida haluttuun mittaun ja paksuuteen. Hienoavauksen jälkeen kuidun päistärepitoisuus on menetelmästä riippuen alle 2 %. (Luokkakallio 2013, 3; Ikonen ym. 2015, 7)

### 4.1 Liotus

Liuotuksen tarkoituksena on irrottaa pektiini hampun ja kuitukimppujen väliltä. Pektiniin irrottaminen mahdollistaa kuidun helpomman irrottamisen hampun korresta. (Ikonen ym. 2015, 7) Liuotuksella on suurin merkitys hamppukuidun laatuun. Käytössä on eri liotusprosesseja ja ne ovat peltoliotus, vesiliotus, kemialliset ja biokemialliset sekä fysikaaliset prosessit. Osa prosesseista soveltuu pitkän kuidun tuotantoon ja osa peruskuidun sekä lyhyen kuidun tuotantoon. (Arctic Fiber Company Oy 2013, 2)

Perinteisiin liotusmenetelmiin lukeutuvat peltoliotus, hankiliotus ja vesiliotus. Peltoliotuksessa hampun korret levitetään nurmelle tai pellolle liottumaan. Hankiliotuksessa korret kaadetaan maahan ennen lumentuloa tai hankeen tehtyyn

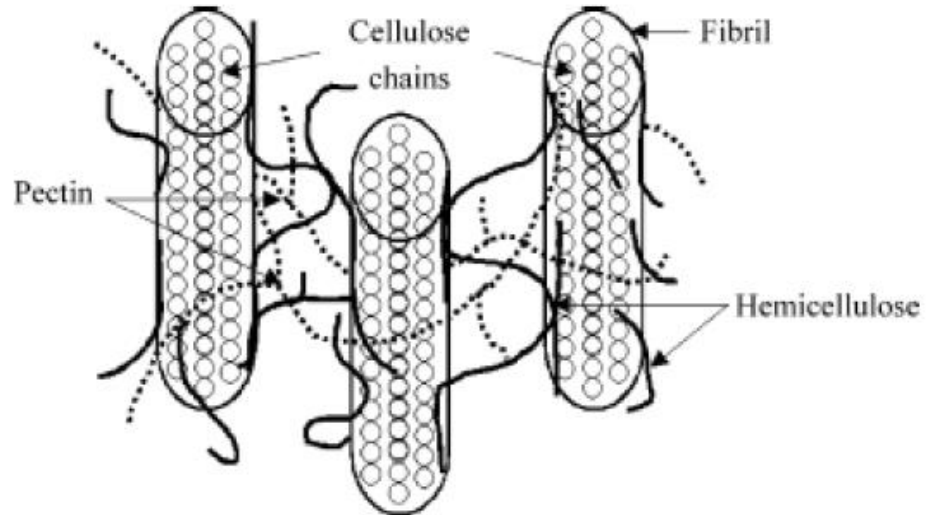
kuoppaan. Korret voidaan liottaa myös järvessä, joessa, lammessa tai savikuopassa. Peltoliotuksessa sienet irrottavat pektiiniin ja vesiliotuksessa bakteerit. Käytetyin menetelmä EU:ssa on peltoliotus, johtuen alhaisista kustannuksista ja ympäristöystävällisyydestä. Tasalaatuisemman tuloksen takaamiseksi, on korsiä käännettävä muutamia kertoja liotusprosessin aikana. Olosuhteista riippuen kestää liotus neljästä kymmeneen viikkoon. Liotusta voidaan tehostaa nostamalla veden lämpötilaa, mikä onkin johtanut lämminvesiliotuksen kehittymiseen (Arctic Fiber Company Oy 2013, 3–7)

Biologisessa prosessissa hajotetaan kuitukimput entsyymeiden avulla. Prosessin avulla erotetaan kuitukimppuja sitovat pektiini ja/tai ligniini ja irrotetaan kuitukimput päistäreestä ja toisistaan sekä pehmitetään samalla varren vahamainen pintakerros. (Arctic Fiber Company Oy 2013, 2)

Entsyyntisessä liotuksessa nopeutetaan liotusprosessia lisäämällä entsyymejä liotusveteen. Yleisimmin käytössä olevia entsyymejä ovat muun muassa pektinaasi, hemisellulaasi ja sellulaasi. Entsyyntisessä liotuksessa on liotusaltaiden koko pienempi, jolloin pienenevät myös energian kulutus ja pääomakustannukset. (Arctic Fiber Company Oy 2013, 11–12) Kuopion kaupungin kehityshankkeessa testattiin entsyyntistä liotusprosessia 25 kg erissä kuution muoviasioissa. Liotusnesteen lämpötila oli noin 40 °C ja pH noin 4. Liuotusneste lämmitettiin sähkövastuksilla ja kierrätettiin pumpuilla, lisäksi pH:ta säädeltiin väkiviinietikalla. Entsyymliotusaika oli 1–2 vuorokautta, jonka jälkeen hamppu huuhdeltiin vedellä ja entsyymien toiminta pysähtyi. Kokeilu osoitti sen, että entsyyntisen liotuksen voi suorittaa suhteellisen vaatimattomissakin olosuhteissa, kuitenkin prosessin optimointi on oleellista. Liotusprosessi vaatii kuivatuksen ennen ja jälkeen liotuksen, joten kuivatuksen järjestäminen ja kapasiteetin varmistaminen lähellä tulee ottaa huomioon. (Tomppo ym. 2018, 13–17)

Kemiallisessa liotuksessa poistetaan hemiselluloosa ja pektiini selluloosakimppujen ympäriltä. Kuvassa 3 on esitetty hampun kemiallinen rakenne. Hemiselluloosan ja pektiiniin välillä on metalli-ioni-sidoksia. Metallisidosta voidaan heikentää kela-toivalla aineella (kuten etyleenidiamiinitetraetikkahapolla), jolloin pektiini ja

hemiselluloosa alkalisessa liuoksessa liukenevat ja kuitukimput irtoavat. (Arctic Fiber Company Oy 2013, 20)



Kuva 3. Hamppukuidun rakenne (Številová ym. 2012).

Hampun kuidut ovat kuitukimppuina, joissa kuitujen välissä on pääasiassa hemiselluloosaa ja pektiiniä. Hemiselluloosa ja pektiini ovat pienimolekyylipainoisia polysakkarideja. Non-wood-kuitujen käyttöä vaikeuttaa niiden monimutkaiset kemialliset ja rakenteelliset ominaisuudet. Kuitujen sisäiset rakenteet on esitetty Kuvassa 3. Perusrakenne koostuu selluloosan polymeeriketjuista. Kuidut kiinnittyvät toisiinsa ligniinin, pektiinin ja hemiselluloosan avulla. Kuitujen lujuus ja jäykkyys johtuvat pääasiassa eri komponenttien välisistä vetysidoksista. Komposiittien valmistuksessa, on kalsiumhydroksidikäsittelyllä saatu lupaavia tutkimustuloksia, liittyen lujuusominaisuuksien parantamiseen. (Številová ym. 2012)

## 4.2 Korjuu

Sääoloista riippuen on hampun korjuu Suomessa mahdollista yli puolen vuoden ajan. Eri korjuuaikoina täytyy hamppu kuitenkin varastoida ja prosessoida eri lailla. Syyskorjuu voidaan suorittaa hampun kukinnan jälkeen pitkälle syksyyn. Paras priimäärikutusaanto saadaan korjuulla lähellä kukintaa. Ligniinipitoisuus kasvaa kukinnan jälkeen, joka tekee jatkoprosessoinnista työläämpää. Myöhäisellä korjuuajankohdalla ei todennäköisesti saavuteta riittävää kuivumista. Näin ollen sato

vaatineekin kuivauksen. Suomessa hamppu tyypillisesti korjataan keväällä, jolloin hamppu on tarpeeksi kuivaa ja kuitu irtoaa helposti. Pakkaset edesauttavat kuitujen irtoamista, joka mahdollistaa hampun korjaamisen talvisaikaan. Kevätkorjuulla on pienemmät käyttökustannukset, mutta myös heikommat lujuusominaisuudet. Kuopion kaupungin hankkeessa koekasvatettu ja eri aikoihin korjatun hampun lujuuksissa havaittiin jopa 50 % eroavaisuuksia. (Tomppo ym. 2018, 19–22) Kevätkorjuu onnistuu pienessä mittakaavassa niittokoneen ja pyöröpaalaimen avulla (Ikonen ym. 2015, 8).

Hampun kuiva-ainesaanto hehtaaria kohden on ollut Etelä-Suomessa noin 8 tonnia ja Pohjois-Suomessa jopa 12 tonnia. Kuiva-ainesaannosta noin puolet on kuitua. Taulukossa 7 on verrattu hampun, koivun ja havupuun kuiva-ainesatoja Suomessa. (Laurila 2013, 17) Hamppu kasvaa Suomen olosuhteissa hyvin johtuen kesän pitkistä valoisista päivistä ja keskimääräinen hamppusato on lähellä esimerkiksi Keski-Euroopan satoja. Suomen olosuhteet ovatkin hyödyksi hampun viljelylle, johtuen syksyn kosteudesta ja kylmästä talvesta ja kevästä, jotka edesauttavat niinikuidun irtoamista. Viikin koepelloilla vuosina 2007–2009 saatiin jopa 14 tonnia/hehtaari. (Norokytö 2010, 18–25) Koekasvatukseen kasvumääriin tulee kuitenkin suhtautua varauksella, johtuen siitä, että kasvatuksia valvotaan ja hoidetaan tarkemmin kuin normaalissa viljelyssä.

Taulukko 7. Eri kuiva-ainesatojen ja kuitusaantojen vertailu (Laurila 2013, 17).

<b>Kasvi</b>	<b>Kuiva-ainesato t/ha/v</b>	<b>Kuitusaanto t/ha/v</b>
Hamppu	12,0	6,7
Koivu	3,4	1,7
Havupuut	1,5	0,7

Suomessa on todettu hampun kasvukaudeksi 112–141 vuorokautta. Hamppu voidaan kylvää keväällä, kuitenkin maan lämpötilan olisi hyvä olla 1–2 °C, mieluiten kuitenkin 8–10 °C. Suomessa ei hampun viljelyssä tarvita torjunta-aineita. (Laurila 2013, 18)

Suomessa on käytössä Dry-line-menetelmä, jossa siemenet kylvetään keväällä ja sato korjataan seuraavana keväänä. Dry-line-teknologia alentaa kuitenkin kuidun

lujuusominaisuuksia. Kuitujen huokoisuus ja alhaisempi jäykkyys mahdollistavat käytön eriste- ja komposiittiteollisuudessa. (Arctic Fiber Company Oy 2013, 10–11) Syyskorjuun toteuttaminen on haastavaa, johtuen Suomen lyhyestä kasvukaudesta ja syksyn kosteudesta. Dry-line-menetelmä ei vaadi erillistä kuivausta, koska hampun kosteus on noin 10 %. (Ikonen ym. 2015, 7–8)

### **4.3 Murskaus ja lajittelu**

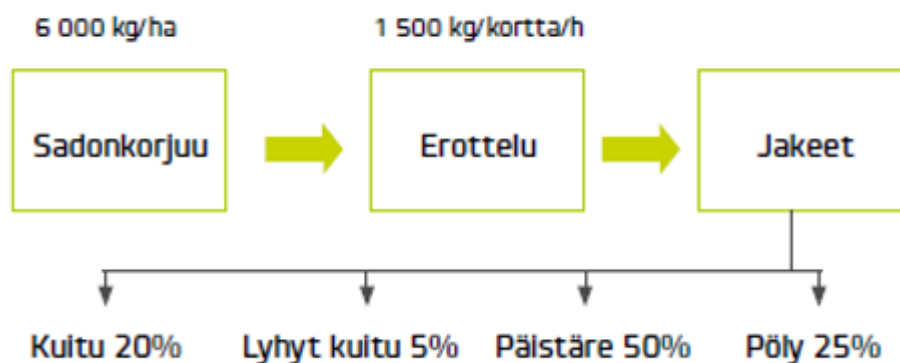
Suuritehoisissa laitoksissa korsimurskaukseen käytetään vasaramyllyä ja pienemmissä loukutusteloja. Kuitusaanto vaihtelee 20–35 % välillä tuotantomenetelmästä ja kuidun laadusta riippuen. Päistäreen osuus on 45–55 % ja loppu koostuu kuidun ja päistäreen lyhyistä jakeista. (Luokkakallio 2013, 4)

Mekaanisilla erottamisella saadaan kuituhampusta kaksi pääjaetta, mitkä ovat itse kuitu ja päistäreet. Kuidun lisäksi on päistäreitä mahdollista hyötykäyttää teollisuudessa. Päistäreitä saadaan melkein kaksinkertainen määrä kuituihin verrattuna, mutta kuitu on noin kaksi kertaa arvokkaampaa kuin päistäreet. (Ikonen ym. 2015, 5)

Murskauksen tavoitteena on erotella hampun korresta kuitu ja päistäreet eri jakeiksi. Hampu murskataan yleisimmin joko vasaramyllyllä tai loukutusteloilla. (Ikonen ym. 2015, 8)

Murskauksen ja lajittelun jälkeen kuidut ovat vielä kuitukimppuina päistärepitoisuuden ollessa 5–15 %. Kuitu kelpaa kuitenkin jo selluloosateollisuuden raaka-aineeksi, eristeeksi tai jatkojalostukseen. Hienoavaajalla saadaan kuitua jatkojalostettua 2 % päistärepitoisuuteen. Tällöin kuitu kelpaa muun muassa autoteollisuuteen. (Ikonen ym. 2015, 9) Kuvassa 4 on esitetty keskihintaisen jalostuslaitoksen kapasiteetit ja kuitusaannot.

### Vaihtoehto A: Keskihintainen jalostuslaitos



Kuva 4. Esimerkki keskihintaisen jalostuslaitoksen kuitusaannosta (Ikonen ym. 2015, 10).

## 5 TAIVEKARTONKI

Taivekartonki (engl. folding box board, FBB) lukeutuu kotelokartonkeihin ja on yleisin Suomessa tuotettu kartonkilaji. Se muodostuu kolmesta kerroksesta niin, että pinnassa on valkaistua sellua, runkokerroksessa mekaanista massaa (hieke, painehioke, hierre tai kemihierre) ja konehylkyä sekä taustassa puolivalkaistua tai valkaistua sellua. Valkoinen pintakerros päällystetään pigmenttipastalla, jolla saadaan aikaan hyvä painatuspinta. Runkokerroksessa käytetään yleensä hyvin bulkkista hioketta, jolla saavutetaan kartongilla hyvät jäykkyysominaisuudet. Taivekartongin neliömassat vaihtelevat 160–450 g/m<sup>2</sup> välillä. Sellukerrokset optimoidaan mahdollisimman ohuiksi korkeampien raaka-ainekustannusten takia. Pintakerroksen neliömassa on yleensä 35–60 g/m<sup>2</sup> ja taustakerroksen 20–30 g/m<sup>2</sup>. Suurin neliömassa on runkokerroksella ja tuotteen neliömassa säädetään runkokerroksen neliömassalla. Lopputuotteesta riippuen voi kartonki olla päällystämätöntä, päällystettyä vain toiselta puolelta tai molemmilta puolin päällystettyä. Taivekartongin pääasiallinen käyttöalue on elintarvikepakkaukset. (Karhuketo ym. 2004, 169; Kiviranta 2000, 59)

## 5.1 Vaadittavat ominaisuudet

Taivekartongin kerroksilla ja kerroksien massoilla on merkitystä kartongin laadulle. Tärkeimmät taivekartongin ominaisuudet ovat lujuus (paksuussuuntainen), paksuus, painettavuus, elintarvikekelpoisuus ja taivutusjäykkyys. (Karhuketo ym. 2004, 170; Antila 2008, 3)

Tärkeimpänä taivekartongin ominaisuutena pidetään taivutusjäykkyyttä. Jotta saataisiin aikaan jäykkä tuote, pitää kartonki rakentaa siten, että pinnassa ja taustassa on lujia kuituja ja pintakerrokset pitää olla mahdollisimman etäällä toisistaan. (Karhuketo ym. 2004, 170) Taivutusjäykkyyteen vaikuttaa kartongin paksuus (bulkkisuus) ja kimmokerroin. Taivutusjäykkyys on verrannollinen paksuuden kolmanteen potenssiin, joten keskikerroksessa käytetään mahdollisimman bulkkista massaa. Bulkkisuutta voidaan nostaa myös minimoimalla pinta- ja selkäkerroksien neliömassaa. Kemiallisten massojen käyttö pinta- ja selkäkerroksissa parantaa myös taivutusjäykkyyttä, johtuen kemiallisten massojen korkeammasta kimmokertoimesta. (Antila 2008, 3) Optimaalisessa kartongin rakenteessa keskikerros on bulkinen ja taustat kimmoisia (Kiviranta 2000, 57).

Runkokerrokselta vaaditaan myös hyvää formaatiota, koska ohuilla taustakerroksilla ei pystytä peittämään suuria epätasaisuuksia. Lisäksi runkokerroksella vaaditaan myös hyvää vaaleutta, jotta se ei näkyisi pintakerroksien läpi. Taustakerroksien massat jauhetaan suhteellisen pitkälle, jotta saavutettaisiin hyvä painettavuus, sileyys ja jäykkyys. Taivekartongin tärkeimpiin ominaisuuksiin lukeutuu myös paksuussuuntainen lujuus toisin sanoen z-suuntainen lujuus. Mikäli z-suuntainen lujuus on alhainen, saattaa kartonki palstautua painattaessa. Liian suuri z-suuntainen lujuus puolestaan saattaa aiheuttaa nuuttauksessa halkeilua, koska venymä on tuolloin liian suuri pintakerrokselle. (Antila 2008, 3–5)

## 5.2 Lujuusominaisuudet

Lujuusominaisuuksiin lukeutuvat vetolujuus, puhkaisulujuus (murtolujuus), repäisyllujuus, taittolujuus, pintalujuus ja z-suuntainen lujuus. Vetolujuus kuva



maksimivoimaa, jonka paperiliuska pystyy vastustamaan ennen katkeamista. Paperin vetolujuus on riippuvainen kuitujen lujuuksista, mutta ensisijaisesti kuitujen välisistä sidoksista. (Levlin 1999, 141–143)

Puhkaisulujuus on maksimikuormitus kohtisuorasti, jonka paperi pystyy vastustamaan murtumatta. Puhkaisulujuuteen vaikuttavat materiaalin vetolujuus ja murtovenymä. Täyteaineet alentavat puhkaisulujuutta, kun taas pidemmät kuidut parantavat sitä. Repäisylujuus on keskimääräinen vaadittava voima, joka jatkaa repeämää tai reikää paperissa. Vaadittava voima on tuolloin pienempi kuin ehjässä paperissa. Repäisyjuutta käytetäänkin yleensä paperin tai kartongin viansietokyvyn arvioimiseen. Paperirainassa liat, reiät tai reunaviat aiheuttavat poikkisuuntaisia repeämiä. Repäisyjuuus määrittää kyvyn, jolla paperi tai kartonki pystyy vastustamaan repeämän syntymistä. Repäisyjuuuteen vaikuttavat kuidun pituus ja lujuus, sidoksien vahvuudet ja kuituorientaatio. Pidemmät ja vahvemmat kuidut parantavat repäisyjuutta, kuten myös alkuperäismärkäljuutta. (Levlin 1999, 144–146; Häggblom-Ahnger & Komulainen 2005, 98–99; Hafez 2011, 16)

Taulukossa 8 on esitetty eri kuitujen lujuusominaisuuksia. Kuidun pituus vaikuttaa massan ja paperin lujuusominaisuuksiin. Kuidun leveys ja kuituseinämän paksuus vaikuttavat kuidun luhistumistaipumukseen ja taipuisuuteen. Nämä puolestaan vaikuttavat lujuusominaisuuksiin. Tietyn kuitupituuden jälkeen (2–3 mm) ei yleensä lujuusominaisuudet enää parane, vaan enemmänkin tähän vaikuttaa yksittäisten kuitujen lujuus. (Häggblom-Ahnger & Komulainen 2005, 27)

Taulukko 8. Eri kuitujen lujuusominaisuuksia (Müsig &amp; Hughes 2012, 51).

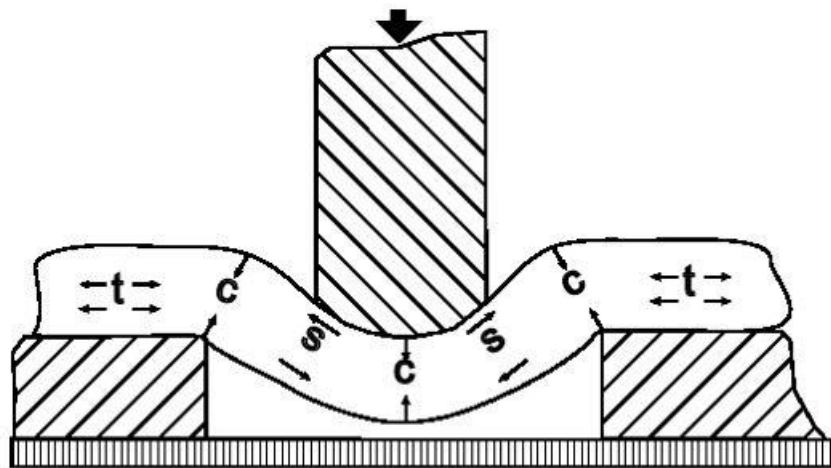
Ominaisuus	Pellava	Hamppu	Juutti	Sisal	Manilla	Puuvilla	Havupuu
Vetolujuus, MPa	500–900	300–800	200–500	100–800	600	450	100–170
Kimmokerroin, GPa	70	65	30	12	50	8	-
Murtovenymä, %	3	3	1.8	3	4	8	-
Tiheys, g/cm <sup>3</sup>	1,4–1,52	1,4–1,6	1,3–1,5	1,0–1,5	1,4–1,5	1,5–1,6	1,2–1,4
Jäykkyys, GPa	50–70	30–60	20–55	9–22	-	6–10	10–50

Kartongilta vaaditaan korkeaa z-suuntaista lujuutta (paksuussuuntainen lujuus) erityisesti lopputuotteissa, joissa käytetään offsetpainatusta. Z-suuntaisella lujuudella tarkoitetaan kartongin kykyä kestää paksuussuuntaista vetorasitusta. (Antila 2008, 6–8) Z-suuntaiseen lujuuteen vaikuttavat muun muassa kuitupituus, sisäiset sidokset, kuituorientaatio, kuivatus, kalanterointi, pintaliimaus sekä hieno- ja täyteainemäärät (Hafez 2011, 20). Korkea z-suuntainen lujuus voi kuitenkin olla myös haitaksi nuuttauksessa. Kartonkia nuuttauksessa pitäisi kerrosten irrota toisistaan, jota alhaisempi z-suuntainen lujuus helpottaa. Painettavuus on tässä rajoittava tekijä, johtuen siitä, että nuuttavuuden ja z-suuntaisen lujuuden välillä on heikko korrelaatio. Z-suuntainen lujuus on myös herkkä paksuussuunnan epätasaisuudelle ja kerrostumiselle, sillä palstautuminen tapahtuu heikoimmassa tasossa. Murtuma-kohtaan vaikuttavat hienoaineen ja lisäaineiden (täyteaineet ja liimat) z-suuntainen jakauma sekä sidostiheys. (Antila 2008, 6–8)

Z-suuntaisen lujuuden erikoistapaus on monikerroskartongin kerrosten välinen lujuus, niin sanottu liitoslujuus. Venytyksessä yleensä monikerroskartongin heikoin piste on kerrosten välinen rajapinta. Rajapinnassa on kuituverkon rakenne jatkumaton ja kerrosten välinen sitoutuminen tapahtuu samalla tavoin kuin kuituverkossa. Liitoslujuus paranee jo kuitenkin märkäpuristuksessa, jossa kerrosten kontaktiala lisääntyy. Kerrospintojen korkea hienoainepitoisuus lisää myös kerrosten välistä sitoutumista. (Antila 2008, 10)

### 5.3 Nuutattavuus

Nuuttauksessa kartonkiin tehdään ura, jolloin kartonkia voidaan taivuttaa. Taivekartonkia nuuttaessa vaikuttavat siihen veto-, puristus- ja leikkausvoimat (Kuva 5). Voimista johtuen tulee kartongin rakenteen antaa periksi, eli olla joustava sekä kestää murtumatta/halkeamatta. Halkeamisherkkyteen vaikuttaa myös taivekartongin rakenne. Pintakerroksella tulisi olla mahdollisimman suuri murtovenymä. Lisäksi z-suuntaisen lujuuden tulee olla tarpeeksi hyvä, jotta kartonki ei palstautuisi painettaessa. Toisaalta z-suuntainen lujuus ei saa myöskään olla liian suuri, koska se voi aiheuttaa halkeilua nuuttauksessa. Mikäli keskikerros ei palstaudu kartongin taivutuksessa, on tällöin venymä pintakerrokselle liian suuri. Optimaalisessa tilanteessa monikerroskartongissa palstautuminen tapahtuu vain keskikerroksessa. Selun käyttö taustoissa antaa hyvät veto- ja repäisylujuudet, mikä mahdollistaa pintakerroksen venymän murtumatta. (Antila 2008, 4; Taskinen 2009, 9–21) Tyypillinen vika nuuttauksessa on päällysteen murtuminen (Lyytikäinen 2015, 17). Sideaineet kuitenkin päällysteessä parantavat nuuttausta (Taskinen 2009, 23).

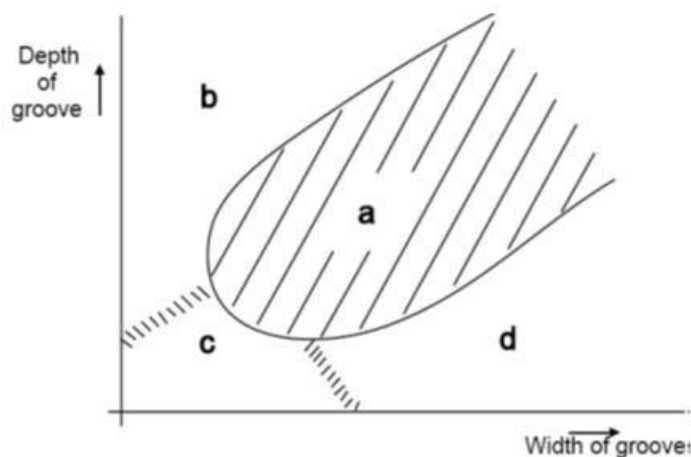


t = tensile; c = compression; s = shear.

Kuva 5. Nuuttaukseen vaikuttavat voimat: t=vetovoima, c=puristusvoima ja s=leikkausvoima (Lyytikäinen 2015, 17).

Kuvassa 6 on esitetty nuutin leveyden ja syvyyden vaikutus nuuttaukseen. A-alue kuvastaa nuutin optimaalista syvyyttä ja leveyttä. Paksuilla kartongeilla nuuttia

rajoittaa se, että siihen kohdistuu liian suuria voimia, jolloin kartonki murtuu (b-alue). Liian leveä nuutti puolestaan aikaansaa epätarkan nuutin (d-alue). (Taskinen 2009, 22) C-alue taas kuvastaan riittämätöntä nuuttausta, johtuen liian kapeasta ja matalasta nuutista.



Kuva 6. Nuutin syvyyden ja leveyden vaikutus nuuttaukseen (Tanninen).

#### 5.4 Taivutusjäykkyys

Taivutusjäykkyydellä tarkoitetaan kappaleen kykyä vastustaa pitkittäisvoimien vaikutusta. Paperissa ja kartongissa taivutusjäykkyyttä tarvitaan hyvään ajettavuuteen koneella, painokoneilla ja päällystyskoneella. Kartonkipakkauksissa korkea taivutusjäykkyys antaa kartongille jäykkyyttä ja lujuutta. Jäykkyyteen vaikuttavat paperin tai kartongin paksuus ja neliömassa. Lisäksi kuituorientaatio ja sidokset vaikuttavat jäykkyyteen. Taivekartongeissa korkeaa taivutusjäykkyyttä tarvitaan hyvän ajettavuuden lisäksi takaamaan hyvää nuutattavuutta. (Kajanto 2008, 230; Hafez 2011, 22)

Taivekartonkien tyypillinen taivutusjäykkyyksindeksi on  $1,35 (10^6 \text{Nm}^7/\text{kg}^3)$ . Taivekartongin taivutusjäykkyys on korkea johtuen pintakerroksien kemiallisesta massasta. Kemiallisella massalla on positiivinen vaikutus kimmokertoimeen, vaikuttamatta runkokerroksen mekaanisen massan bulkkiin. (Kajanto 2008, 233)

Taivutusjäykkyys on useampien kartonkilajien olennainen ominaisuus. Taivutusjäykkyyttä voidaan pakkauskartongeissa parantaa kasvattamalla keskikerroksen bulkkia, mutta tällä saattaa kuitenkin olla alentava vaikutus kohtisuoraan lujuuteen. Lisäksi taivutusjäykkyys ja puristuslujuus ovat sidoksissa toisiinsa: korkea taivutusjäykkyys estää puristuslujuuksien synnyn kartongeissa. Taivutusjäykkyys on suoraan verrannollinen paksuuden kolmanteen potenssiin ja kimmokertoimeen. (Kajanto 2008, 230)

Taivutusjäykkyyttä voidaan parantaa seuraavasti:

- Lisäämällä paksuutta tai bulkkia keskikerrokseen, tämä vaikuttaa kuitenkin pakkauksen painettavuusominaisuuksiin
- Korkeampi kimmokerroin runkokerrokseen, ei voida parantaa alentamatta paksuutta
- Korkeampi kimmokerroin pintakerrokseen. Mikäli pintakerrokset vastaavat 5 % paperin paksuudesta, kaksinkertaistamalla pintakerroksien kimmomoduulia parantaa se taivutusjäykkyyttä 27 %. (Kajanto 2008, 237)

Viimeinen menetelmä on kaikista tehokkain. Tällä saavutetaan sekä korkea taivutusjäykkyys, että hyvät pintaominaisuudet. (Kajanto 2008, 237)

## 5.5 Formaatio

Kuitujen lisäksi paperi koostuu täyteaineista ja kemiallisista apuaineista. Rainanmuodostusvaiheessa nämä asettuvat satunnaiset rainaan. Paperin formaatio määrittää partikkeleiden heterogeenisen jakautumisen. Toinen määritelmä on pienmittakaavainen neliömassavaihtelu. Neliömassavaihtelu on riippuvainen yksittäisten kuitujen järjestäytymisestä, lähinnä kuitusidoksien sekä flokkaantumisesta ja hydrodynaamisista voimista. Flokkaantuminen lisääntyy neliömassan kasvaessa, joten ongelma korostuu kartonkien tapauksessa. Turbulenttinen virtaus yleensä hajottaa flokkeja. Huono formaatio voi suuressa mittakaavassa aiheuttaa ”pilvisyyttä” painavilla paperi- ja kartonkilajeilla. (Niskanen & Pakarinen 2008, 27–28) Non-woodkuiduilla on havaittu suuriakin hienoainepitoisuuksia, jotka mahdollistavat hyvän formaation, johtuen hienoaineen suuresta ominaispinta-alasta (Vishtal ym. 2011).

Huono formaatio alentaa paperin ja kartongin vetolujuutta, jolloin keksimääräinen lujuus laskee. Lisäksi huono formaatio aiheuttaa vaihtelevuutta paperin ja kartongin ominaisuuksiin. (Niskanen & Pakarinen 2008, 29) Formaatioon vaikuttaa vahvasti rainanmuodostuksen hydrodynaamiset voimat sekä kuidun ominaisuudet. Paperi katkeaa ”heikosta” kohdasta eli flokkien välistä, missä neliömassa on myös pienempi. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 97; Nazhad ym. 2000) Paperin paikalliset ”heikot” kohdat vääristävät paperin kokonaisominaisuuksia, esimerkiksi vetolujuus kuvaa paikallista heikkoutta, eikä koko materiaalin vetolujuusominaisuuksia. Lisäksi monikerroskartongeilla ovat ominaisuudet riippuvaisia eri kerroksien ominaisuuksista. (Hagman & Nygårds, 2012)

Formaation vaikutus paperin ja kartongin lujuusominaisuuksiin olettavasti korostuu, kun neliömassaa pienennetään. Pitkät kuidut, joilla saadaan hyvä lujuus, flokkaantuvat helpommin. Lisäksi kuidun pituuden kasvu ja karheus alentavat formaatiota. Kuidun pituus ja karheus vaikuttavat myös paperin ja kartongin vetolujuuteen. Pidempi kuitu yleensä parantaa lujuusominaisuuksia, mutta huono formaatio voi jopa laskea lujuusominaisuuksia. Lyhyet kuidut antavat yleensä hyvän formaation, mutta alentuneet lujuusominaisuudet heikentävät paperikoneen ajettavuutta. Hyvä formaatio tulisi saavuttaa prosessiteknisillä toimenpiteillä kuitupituuden lyhentämisen sijaan. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 97; Nazhad ym. 2000)

Formaatiota voidaan parantaa huonontamatta muita tärkeitä paperitekniisiä ominaisuuksia. Yleisesti parempi formaatio parantaa myös muita ominaisuuksia. Formaatiota mitataan optisesti transmissioon perustuen tai  $\beta$ -säteilymittarilla, mikä perustuu neliömassamittaukseen. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 105)

## **5.6 Elintarvikekelpoisuus ja painatusominaisuudet**

Hyvältä painojäljeltä vaaditaan painopinnan valkoisuutta ja sileyttä. Tärkein ominaisuus painatuksen kannalta on pinnan valkoisuus eli vaaleus. Taivekartongin ISO-vaaleus on tyypillisesti 82–84 %. (Karhuketo ym. 2004, 170–171) Taivekartongin pintakerroksien valkaistu sellu on jauhettu suhteellisen pitkällä. Jauhatusella voidaan vaikuttaa taivekartongin painettavuuteen, sileyteen ja jäykkyyteen.

Jenkkikiillotuksella parannetaan sileyttä kuivatusosalla. Jenkkikiillotuksella ei kohdistu kartonkiin puristusta, joten hyvä bulkki ja sitä kautta jäykkyys voidaan säilyttää sileyden paranemisesta huolimatta. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 74)

Elintarvikekelpoisuus on riippuvainen kartongin raaka-aineiden puhtaudesta. Valkaistussa sellussa ei ole raskasmetalleja, epäpuhtauksia eikä mikrobeja. Runkokerros sisältää kuitujen lisäksi ligniiniä, hartseja ja muita epäpuhtauksia. Kierrätysmasaa käytettäessä ei voida sisältämiä epäpuhtauksia ja mikrobimääriä etukäteen arvioida. Taivekartonkia käytetään lähinnä elintarvikepakkauksissa, mutta myös esimerkiksi savuke-, kosmetiikka- ja lääkepakkauksissa. (Karhuketo ym. 2004, 171)

## KOKEELLINEN OSA

### 6 TYÖN TARKOITUS

Työn kokeellisen osuuden tarkoituksena oli selvittää kuituhampun vaikutusta paperitekniisiin ominaisuuksiin. Varsinaisia koepisteitä oli työssä kahdeksan ja näiden lisäksi referenssipisteitä kolme. Lisäksi valmistettiin kolmikerrosdemoarkit, joissa keskikerroksessa oli hamppua ja CTMP:tä sekä taustoissa koivusellua. Hamppua sisältävissä arkeissa käytettiin kahta eri massakoostumusta: pelkkää CTMP:tä sekä CTMP:tä ja kartonkihylkyä. Laboratorioarkkien valmistus sekä testaus suoritettiin SCAN-standardien mukaisesti. Kirjallisuuden pohjalta erityinen mielenkiinto kohdistui arkkien lujuusominaisuuksiin.

Arkkeja valmistettiin vähintään 25 kappaletta per koepiste, pois lukien kerrosdemoarkit, joita valmistettiin 20 kappaletta. Suurin osa määrytyksistä (karheus, ilmanläpäisevyys, optiset ominaisuudet, lujuusominaisuudet ja formaatio) tehtiin käyttäen kuutta arkkia. Lujuusominaisuuksista repäisyjuuismääritykset tehtiin eri arkeille. Arkeiksi valittiin arkit, joiden paino oli mahdollisimman lähellä tavoitteen eliöpainoa  $200 \text{ g/m}^2$  (eli  $5,4 \text{ g/laboratorioarkki}$ ).

### 7 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

Tässä luvussa käydään läpi eri massojen tärkeimpiä ominaisuuksia. Arkkien valmistuksessa käytettiin neljää eri massaa, jotka olivat hamppu, kartonkihylky, CTMP ja koivusellu. CTMP ja koivusellu olivat kaupallisia tuotteita, jotka olivat selluarkkeina. Kuituhamppu ja kartonkihylky saatiin Kuopion kaupungilta ja Premium Boardilta. Kuituhampun ominaisuudet on käyty aiemmin läpi jo kirjallisuusosiossa.



Mittaukset suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston pakkaustekniikan laboratorion mittauslaitteilla. Arkkien valmistus ja mittaukset suoritettiin standardien (SCAN) mukaisesti.

Käytetyt standardit olivat:

- SCAN-C 18:65, Kemiallisen massan hajottaminen koetusta varten
- SCAN-C 25:76, Laboratoriojauhatus, Valley-hollanteri
- SCAN-C 26:76, SCAN-M 5:76, Massa, Laboratorioarkkien valmistaminen fysikaalisten ominaisuuksien määrittämiseksi
- SCAN-M 4:65, Massan suotautumiskyky Canadian-Freeness-menetelmän mukaan
- SCAN-P 6:75, Paperi ja kartonki – Neliömassa
- SCAN-P 7:75, Paperi ja kartonki – Paksuus ja kiintotiheys
- SCAN-P 21:67, Paperin ja kartongin karheus määritettynä Bendtsenin laitteella
- SCAN-P 60:87 Paperin ja kartonki, ilmanläpäisevyys Bendtsenin menetelmällä
- SCAN-P 11:96, Paperi ja kartonki - Repäisylujuus
- SCAN-P 3:93, Massa, paperi ja kartonki - ISO-vaaleus
- SCAN-P 8:93, Paperi ja kartonki - Opasiteetti ja Y-arvo ( $C/2^\circ$ ) valonsironta- ja valonabsorptiokertoimet
- SCAN-P 12:64, Liimatun paperin ja kartongin vesiabsorptiokyky Cobbin menetelmän mukaan

Fysikaaliset testit laboratorioarkeille suoritettiin standardoiduissa olosuhteissa (23°C, RH 50%).

## **7.1 Hamppu**

Hamppu oli Kuopion kaupungin aiemmassa hankkeessa koekasvatettua kuituhamp-pua, joka oli korjattu keväällä 2017 Juankoskella. Kuvassa 7 on koearkeissa käytetty leikkaamaton kuituhamppu. Kuituhamppu sisälsi itse kuidun lisäksi myös muita jakeita, eivätkä kaikki kuidut olleet avautuneita. Lisäksi päistärepitoisuudesta

ei ollut tietoa. Hampun epäpuhtauksilla ja eri jakeilla on ollut vaikutusta ominaisuuksiin.



Kuva 7. Kuituhamppu.

## 7.2 Kartonkihylky

Kartonkihylky oli Premium Boardin hylkyä. Tehdas valmistaa kuusipainehioketta taivekartongin keskikerrokseen. Taivekartongin taustoissa käytetään kaupallista sellua. Painehioke valmistuksessa puu hiotaan korotetussa paineessa. Kokeelliseen osioon saatu hylky toimitettiin A4-arkkeina. Hylkyarkeissa oli mukana myös päällystettä ja muita apuaineita, kuten liimoja, joilla oli vaikutus kartongin ominaisuuksiin sekä kartongin hajottamiseen massaksi.

Kartonkihylky koostuu yleensä kartonkikoneen reunanauhoista, pohjista, lajinvaihtojen kelvottomista tuotteista sekä asiakkaiden hylkäämistä rullista ja arkeista. Hylky sisältää näin ollen myös täyteaineita, sideaineita ja muita liuennneita aineita. Hylky prosessoidaan tehtaalla uudestaan ja syötetään konesäiliön kautta takaisin prosessiin. Hyllyn käyttöasteeseen vaikuttavat muun muassa kartonkilaadulta

vaadittavat ominaisuudet, koneen ajettavuus ja hylkylinjan kapasiteetti. Taivekartonkien valmistuksessa hylkyä syötetään noin 30–35 % keskikerroksen mekaanisen massan joukkoon. (Antila 2008, 22–23) Premium Boardin hioketta ei ollut saatavilla, joten päädyttiin käyttämään reseptiä: CTMP:tä 65 % ja kartonkihylkyä 35 %.

Hioke koostuu erikokoisista partikkeleista, pitkäkuitujakeesta, välijakeesta ja hienoaineksesta. Hiokkeen lujuusominaisuudet, etenkin repäisyjuuus, ovat alhaisemmat kuin sellun. Mekaanisen kuusimassan hienoaines antaa tuotteelle hyvän sileyden sekä suuren valonsirontakertoimen. Mekaanisilla massoilla saavutetaan myös hyvä formaatio ja bulkki. Valkaisemattoman mekaanisen massan ISO-vaaleus on noin 57–65 % ja massat joudutaankin usein valkaisuun. Korkeahko ligniinipitoisuus aiheuttaa sen, että tuotteet kellastuvat helposti. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 15–34; Antila 2008, 19)

Mekaanista massaa käytetään pääasiassa puupitoisissa painopapereissa ja kartonkien keskikerroksissa. Taivekartongin keskikerroksen painehiokkeen suotautumista kuvaava freeness-arvo on yleensä noin 310–350 ml. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 15–34; Antila 2008, 19)

### **7.3 CTMP**

CTMP-massa tai kemihierre valmistetaan lisäämällä kevyt kemikaalikäsittely kuumahierreprosessiin. Kemikaalikäsittely pehmentää ligniiniä ja kuidut säilyvät ehjempinä verrattuna tyypillisiin mekaanisiin massoihin, jolloin lujuusominaisuudet ovat myös paremmat. ISO-vaaleus on myös hieman, 60–68 %, korkeampi verrattaessa mekaanisiin massoihin. Kemimekaanisia massoja käytetään erityisesti kartonkien keskikerroksissa, joissa sillä mekaaniseen massaan verrattuna saavutetaan paremmat lujuusominaisuudet sekä vaaleus. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 34–35) Hiokkeeseen verrattuna kemihierre antaa paremman repäisyjuuden, mutta huonomman bulkin ja paksuussuuntaisen lujuuden (Antila 2008, 22).

## 7.4 Koivusellu

Lehtipuusellulla on hyvät painettavuusominaisuudet ja se säilyttää hyvin vaaleutensa (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 15). Lehtipuuselluja käytetään yleensä monikerroskartonkien taustoissa, johtuen sen hyvistä painettavuusominaisuuksista. Lehtipuusellulla saavutetaan havupuusellua parempi opasiteetti ja pienempi käyristyminen lyhyiden kuitujen suuremman jäykkyyden vuoksi. (Antila 2008, 18) Koivusellua käytettiin kerrosdemoarkkien taustakerroksissa.

## 8 MASSOJEN VALMISTUS

Ennen varsinaisten koearkkien valmistamista ja massatestauksia, tuli eri materiaalit hajottaa. Hajottaminen suoritettiin standardien SCAN-C 18:65, Kemiallisen massan hajottaminen koetusta varten ja SCAN-C 25:76, Laboratoriojauhatus, Valleyhollanteri. CTMP- ja koivuselluarkeista määritettiin kuiva-ainepitoisuus ja revittiin  $360\pm 5$  g uunikuivaa massaa vastaava määrä. Revityt palaset liotettiin vähintään neljä tuntia vedessä, yhteistilavuuden ollessa viisi litraa. Hollanteriin lisättiin 18 litraa vettä ja revityt palaset liotusvesineen lisättiin, jolloin laskennallinen sakeus oli 15,7 g/l. Massoja hajotettiin 5–10 minuuttia. (Ryösö 2005, 10–11) CTMP-eriä tehtiin viisi kappaletta ja koivusellua yksi.

Kuituhamppu leikattiin käsin ensin mahdollisimman lyhyeksi, jonka jälkeen punnittiin edellä mainittu uunikuivamäärä ja annettiin kuidun liota vedessä muutama vuorokausi. Hampun kuiva-ainepitoisuus oli 86,7 %, joten leikattua hamppua tarvittiin 415 g. Hamppu jauhettiin myös hollanterissa, poikkeuksena edellisiin massoihin oli jauhatusaika kaksi tuntia. Lisäksi käytettiin  $5500\pm 50$  suuruista painoa. Hamppueriä valmistettiin kaksi kappaletta ja varsinkin jälkimmäinen vaahtosi jauhatuksessa jonkin verran, jonka voi katsoa aiheutuneen epäpuhtauksista ja esimerkiksi luontaisista kasviliimoista.

Hylky käsiteltiin mekaanisen massan mukaisesti, jonka kuiva-ainepitoisuus oli > 60 %. Hajotusta varten kartonkihylkyä punnittiin  $60\pm 1$ g uunikuivaa vastaavaa

määrä. Arkkit revittiin ja liotettiin 2,7 litran yhteistilavuudessa veden kanssa, jolloin laskennallinen sakeus oli 22,2 g/l. Liotusajan tuli olla vähintään 18 tuntia. Kyseisiä eriä tehtiin 16, kahdella eri kerralla. Massat hajotettiin kylmähajotuksella käyttäen 10 000 kierrosta. (Ryösö 2005, 9–10) Osa eristä eivät hajonneet kunnolla kyseisellä kierrosmäärällä, vaan jättivät arkkeihin selvät ”täplät”, joten näitä hajotettiin vielä 3 000 kierrosta lisää. Koepisteeseen yksi jouduttiin tästä syystä valmistamaan lisäarkkeja.

## 9 ARKKIEN VALMISTUS

Laboratorioarkit valmistettiin standardin SCAN-C 26:76, SCAN-M 5:76, Massa, Laboratorioarkkien valmistaminen fysikaalisten ominaisuuksien määrittämiseksi. Laboratorioarkit valmistettiin ilman kiertovettä suotauttamalla massasulppu viirakankaalle, huopauttamalla arkki imukartonkien kanssa viirasta, pinoamalla arkit rumpukuivausta varten, märkäpuristamalla sekä kuivamalla rumpukuivatuksella. Lopuksi arkit säilytettiin vakioilmastoidussa huoneessa arkkitestauksia varten. (Ryösö 2005, 21) Arkkien kuvat on esitetty Liitteessä III.

Ennen arkkien valmistusta ja valmistuksen aikana massoja sekoitettiin sekoittimilla. Massasulppuseokset laimennettiin sakeuteen 2–5 g/l. Lasketun sakeuden mukaan valmistettiin ensimmäinen koearkki, joka kuivattiin imukartonkien välissä pikakuivaimessa ja punnittiin. Tavoitepaino arkeille oli 5,4 g/arkki. Arkkeja tehtiin vähintään 25, jonka mukaan laskettiin tarvittava kokonaissulppumäärä. Punnitun arkin mukaan laskettiin vaadittava uusi sulppumäärä ja valmistettiin uusi koearkki. Jokaisessa koepisteessä valmistettiin vähintään kaksi koearkkia, ennen varsinaisten arkkien valmistamista. Lisäksi massojen vaihtuessa valmistettiin myös koearkit, johtuen massojen pienistä sakeusvaihteluista. Tarvittava sulppumäärä voitiin laskea esimerkiksi seuraavasti: otettiin sulppua litra ja punnittiin koearkin painoksi 4,32 g, jolloin yhtälöllä 1 voitiin laskea uusi massan tarve seuraavasti:

$$X = \frac{5,4g}{4,32g} \times 1l = 1,25l \quad (1)$$

Referenssiarkit (CTMP ja Hylky) valmistettiin suoraan laimentamalla ne sakeuteen 2–5 g/l ja valmistamalla koearkit. CTMP/Hylky-koearkit valmistettiin laskemalla määritettyjen sakeuksien mukaan sulppuseos, jonka seossuhde oli 65/35.

Koepisteet 1–8 valmistettiin laskemalla hampun osuuden paino kokonaispainosta. Ensimmäiseksi valmistettiin koearkit ilman hamppua tavoitepainoon. Tämän jälkeen valmistettiin uudet koearkit hampun kanssa lopulliseen tavoitepainoon.

Demokerrosarkit valmistettiin reseptillä: taustat koivusellua (tavoitepaino 1,63g) ja keskikerros CTMP/Hamppu osuuksilla 80/20, tavoitepainon ollessa 2,18g. Keski-kerroksen arkit valmistettiin ensimmäisiksi ja tämän jälkeen koivuselluarkit. Keski-kerroksen arkit lisättiin koivuselluarkkien väliin ja arkit märkäpuristettiin yhdessä ja lopuksi rumpukuivattiin, jolloin eri kerrokset liimautuivat yhteen yhdeksi arkiksi.

## 10 KOEPISTEET

Työssä oli koepisteitä yhteensä 12 kappaletta (Taulukko 9). Hamppua lisättiin CTMP/hylkyyn (suhde 65/35) sekä pelkkään CTMP-massaan. Hamppuosuudet olivat 10, 20, 30 ja 40. Hamppuosuuden ollessa 40, havaittiin hidastunut suotautuminen arkkien valmistuksessa, joten päädyttiin siihen tulokseen, ettei ole kannattavaa lisätä enempää hamppua arkkeihin. Lisäksi kokeellisessa osuudessa tehtiin niin sanotut demokerrosarkit, joiden taustoissa käytettiin koivusellua. Keskikerros koostui CTMP:stä ja hampusta suhteella 80/20. Arkkien tavoiteneliömassa oli 200 g/m<sup>2</sup> eli 5,4 g/arkki.

Taulukko 9. Koepisteissä käytetyt massat ja niiden osuudet.

<b>Lyhenne</b>	<b>Massa</b>	<b>Hampun osuus</b>
CTMP	CTMP	0
Hylky	Kartonkihylky	0
CTMP/Hylky	CTMP/Hylky (65/35)	0
1 C/H+10	CTMP/Hylky (65/35)	10
2 C/H+20	CTMP/Hylky (65/35)	20
3 C/H+30	CTMP/Hylky (65/35)	30
4 C/H+40	CTMP/Hylky (65/35)	40
5 CTMP+10	CTMP	10
6 CTMP+20	CTMP	20
7 CTMP+30	CTMP	30
8 CTMP+40	CTMP	40
	Koivusellu-	0
Kerros	CTMP/Hamppu (80/20)-	20 (keskikerros)
	Koivusellu	0

## 11 TESTATTAVAT OMINAISUUDET

### 11.1 Massatestaukset

Ennen varsinaisten arkkien valmistusta määritettiin massoista sakeus, freeness ja tehtiin kuituanalyysit. Kuituanalyysi suoritettiin vain ensimmäisistä massaeristä, eikä sitä tehty koivusellulle.

#### 11.1.1 *Freeness (Canadian-Standard-Freeness)*

Massojen freenekset määritettiin CSF-laitteella. Määrittäminen perustui SCAN-M 4:65, Massan suotautumiskyky Canadian-Freeness-menetelmän mukaan. CSF-luku kuvaa massasulpun suotautumisnopeutta tai hienousastetta. Mitä alhaisempi on CSF-

luku, sitä hitaampaa on suotautuminen, ja sitä suurempana voi hienoaineen määrää pitää. (Ryösö 2005)

Määrittystä varten laimennettiin massasulppu sakeuteen 3g/l, kokonaissulpputilavuuden ollessa yksi litra. Sulppu kaadettiin vedenpoistokammioon ja lukema luettiin sivuputken alla olevasta mittalasista. CSF-lukeman sakeuskorjaus suoritettiin suodattamalla viiralle jäänyt kuitukakku, kuivaamalla ja punnitsemalla se vakiopainoon. Todellisen sakeuden perusteella luettiin taulukosta sakeuskorjaus freeness-lukemalle. Sakeuskorjaus oli mahdollinen sakeusvälille 2–4 g/l.

### *11.1.2 L&W Fiber Test*

Massoista, pois lukien koivusellu, tehtiin kaksi rinnakkaista määrittystä. Määrittystä varten massaa otettiin sen verran, että kuitumäärä olisi vähintään 20 000 ja kokonaismäärä 200 ml. L&W Fiber Test-laitteen tulosteista voitiin lukea muun muassa kuidun pituus, halkaisija, muoto ja hienoainepitoisuus.

## **11.2 Arkkitestaukset**

Arkkitestaukset suoritettiin laboratorion vakiohuoneessa, jonka lämpötila oli 23 °C ja suhteellinen ilmankosteus RH 50 %. Arkkien tuli olla ennen testausta vakio-olosuhteissa vähintään neljä tuntia. Yleiset ominaisuudet, ilmanläpäisevyys, karheus, formaatio, ja optiset ominaisuudet määritettiin stanssaamattomista arkeista. Lisäksi muovauskoe suoritettiin stanssaamattomista arkeista. Lujuusominaisuudet ja absorptio-ominaisuudet suoritettiin stanssatuista arkeista. Lujuusominaisuuksia varten leikattiin testikappaleet Ryösön (2005) ohjeiden mukaisesti.

### *11.2.1 Yleiset ominaisuudet*

Yleisiin ominaisuuksiin lukeutuu neliömassa, paksuus, tiheys ja bulkki. Neliömassa määritettiin stanssaamattomista arkeista punnitsemalla ne yksitellen. Yhden



stanssaamattoman arkin pinta-ala oli 0,02722 m<sup>2</sup>. Punnitun arkkikohtaisen painon ja pinta-alan mukaan laskettiin jokaisen arkin neliömassa.

Paksuus määritettiin laboratorion mikrometrillä (Lorentzen & Wettre). Arkkien ollessa suhteellisen paksuja, määritettiin paksuudet yksittäisistä arkeista. Paksuusmittaukset tehtiin viidestä eri kohdasta ja laskettiin näiden keskiarvo. Tiheys laskettiin neliömassan ja paksuuden avulla, kun taas bulkki on tiheyden käänteisarvo.

### *11.2.2 Ilmanläpäisevyys ja karheus*

Suoritetut mittaukset perustuivat standardeihin SCAN-P 21:67, Paperin ja kartongin karheus määritettynä Bendtsenin laitteella ja SCAN-P 60:87 Paperin ja kartonki, ilmanläpäisevyys Bendtsenin menetelmällä (Ryösö 2005, 36).

Karheus ja ilmanläpäisevyys mitattiin laboratorion Bendtsen-laitteella (Lorentzen & Wettre). Ilmanläpäisevyys mitattiin kuudesta arkista ja karheus kolmesta arkista molemmilta puolilta.

### *11.2.3 Lujuusominaisuudet*

Lujuusominaisuuksien mittauksissa käytettiin stanssattuja arkkeja ja testikappaleet leikattiin Ryösön (2005) ohjeiden mukaisesti. Lujuusominaisuuksista mitattiin repäisyjuuus, vetolujuus, murtovenymä, kimmokerroin ja taivutusjäykkyys. Lisäksi mitattiin märkäljuudet olosuhdekaapissa olleista kosteista testikappaleista, jotta kuituhampun vaikutukset kostean tuotteen lujuuteen tulisivat esille. Olosuhdekaapin olosuhteet olivat: kosteus 91 % ja lämpötila 23,8 °C. Testikappaleet olivat olosuhdekaapissa vuorokauden, jonka jälkeen niistä mitattiin vetolujuus, murtovenymä ja kimmokerroin. Lisäksi määritettiin kyseisten testikappaleiden kosteuspi-toisuus.

Repäisyjuuuden määrittäminen perustui standardiin SCAN-P 11:96, Paperi ja kartonki-Repäisyjuuus (Ryösö 2005, 49). Mittaukset suoritettiin Elmendorf-tyyppisellä heilurilaitteella. Ohjeista poiketen suoritettiin mittaukset kolmella testikappaleella

kerrallaan neljän sijasta. Syy tähän oli se, että neljä testiliuskaa ei repeytynyt. Rinnakkaismäärittelyksiä tehtiin kolme kappaletta. Repäisyalueindeksit laskettiin neliömassojen avulla ja tulosten tarkastelussa on käytetty repäisyalueindeksiä.

Vetolujuus, murtovenymä ja kimmokerroin mitattiin Lorentzen & Wettre-vetolujuuslaitteella, vetonopeuden ollessa 100 mm/min. Arkeista leikattiin Ryösön (2005) ohjeiden mukaisesti kymmenen testiliuskaa. Laitteen ohjelmaan kirjattiin kunkin sarjan paksuus ja neliömassa. Tulosten tarkastelussa käytettiin vetolujuuden sijasta laitteen laskemaan vetolujuusindeksiä, jolloin vetolujuudet olivat suoraan verrannollisia toisiinsa neliömassapoikkeamista huolimatta. Märkälujuudet määritettiin samalla periaatteella kostutetuista testiliuskoista.

Taivutusjäykkyys mitattiin Lorentzen & Wettre-taivutuslaitteella, kulman ollessa 5 ° ja taivutuspuitepituuden 10 mm. Jokaisesta koepisteestä leikattiin Ryösön (2005) ohjeiden mukaisesti kuusi koeliuskaa. Koepisteille 7 ja 8 suoritettiin mittaukset kahden kertaan, johtuen mittaustuloksien suuresta varianssista.

#### 11.2.4 *Formaatio*

Formaatio mitattiin Ambertec  $\beta$ -formaatiomittarilla. Formaatiomittaus perustuu  $\beta$ -säteilyn absorptioon. Formaation käsitetään kuvaavan pienimittakaavaista neliömassahajontaa. Tällä tarkoitetaan hajontaa, jonka aallonpituus on 0–100 mm. Formaatiomittari mittaa pienen pisteiden neliömassaa arkin läpi tulevan säteilyn voimakkuuden perusteella. Formaation tunnuslukuna on neliömassahajonta ( $\text{g/m}^2$ ). (Ryösö 2005, 31–32) Formaatio mitattiin kolmesta stanssaamattomasta arkista.

#### 11.2.5 *Optiset ominaisuudet ja värianalyysi*

Paperin optiset ominaisuudet määrittävät paperin ja kartongin ulkonäön (Häggblom-Ahnger & Komulainen 2005, 99). Optiset ominaisuudet määritettiin standardien SCAN-P 3:93, Massa, paperi ja kartonki -ISO-vaaleus ja SCAN-P 8:93, Paperi ja kartonki -Opasiteetti ja Y-arvo ( $C/2^\circ$ ) valonsironta- ja valonabsorptiokertoimet (Ryösö 2005, 42).

Mittaukset suoritettiin L&W-laitteella kuudesta arkista. Ensimmäiseksi mitattiin arkit kuuden nipussa kuudesti siirtämällä päällimmäinen arkki alimmaiseksi mittauksien välissä. Seuraavaksi mitattiin arkit yksitellen mustan ontelon läpi. Mittaustulosteesta otettiin tarkasteluun ISO-vaaleus, keltaisuus, opasiteetti, valonsironta- ja valonabsorptiokerroin. Näiden lisäksi tehtiin värianalyysi värikoordinaattien perusteella. Värikoordinaatit muutettiin RGB-koordinaateiksi (Red, Green, Blue), joiden perusteella voitiin Paint-ohjelmalla määrittää ja piirtää koepisteiden värit.

#### 11.2.6 Veden absorptiokyky (Cobb)

Veden absorptiokyky määritettiin standardin SCAN-P 12:64, Liimatun paperin ja kartongin vesiabsorptiokyky Cobbin menetelmän mukaan. Absorptiokyky määritetään vesimääränä, jonka paperin pinta absorboi valitussa ajassa tasaisesti peittävästä vesikerroksesta. (Ryösö 2005, 39)

Mittaukset suoritettiin stanssatuista arkeista ja rinnakkaismääryksiä tehtiin kolme kappaletta. Arkit punnittiin ennen määrittämistä. Ensimmäisten testauksien jälkeen, todettiin, että tavallisesti käytössä oleva absorptioaika, 60 sekuntia, on liikaa. Täten päädyttiin Cobb<sub>30</sub>-menetelmään. Laitteen säiliöön mitattiin 100 cm<sup>3</sup> ionivaihdettua vettä. Cobb<sub>30</sub>-menetelmässä vesipatja vaikutti arkin päällä 20 sekuntia, jonka jälkeen vesi kadettiin pois. Arkki asetettiin kahden imukartongin väliin ja 10 sekunnin kuluttua liikutettiin 10 kg tela kertaalleen arkin ja imukartonkien yli. Arkki punnittiin uudelleen välittömästi tämän jälkeen. Cobb<sub>30</sub>-arvo laskettiin yhtälöllä (Ryösö 2005, 40):

$$Cobb_{30} = \frac{a-b}{A} \quad (2)$$

jossa

Cobb <sub>30</sub>	veden absorptio, g/m <sup>2</sup>
A	synterinin sisään jäävä pinta-ala, m <sup>2</sup>
a	arkin paino kastumisen jälkeen, g
b	arkin paino ennen testausta, g.

### 11.3 3D-venymä (MiniMould)

3D-venymä mitattiin laboratoriossa erillisenä koeajona käyttämällä MiniMould-muovaustyökalua. Koeajon tarkoituksena oli määrittää se syvyys, missä arkki ei enää hajoa. Koeajossa testattiin arkkien kestävyyttä seuraavilla syvyyksillä (mm) ja järjestyksellä: 6, 5, 5, 5, 4, 4.5, 3.5, 3 ja 2.5. Arkkien testaus aloitettiin suuremmasta syvyydestä kohti pienempää. Koepisteet jätettiin sitä mukaan pois koeajosta, kun arkit pysyivät ehjinä.

Syvyyksien mukaan luettiin taulukosta (Liite I) arkin 3D-venymä. Koeajon parametrit on esitetty Taulukossa 10. (Tanninen & Ovaska, 2017)

Taulukko10. Koeajossa käytetyt parametrit (Tanninen & Ovaska, 2017).

<b>Prosessiparametri</b>	<b>Koeajossa käytetyt parametrit</b>
Puristusnopeus	60 mm/s
Puristusvoima	30 kN
Viipymäaika	600 ms
Urosmuotin lämpötila	22 °C
Naarasmuotin lämpötila	160 °C
Aihionpidätysvoima	4800 kN

Koeajossa käytettiin stanssaamattomia arkkeja, jotka olivat olleet olosuhdekaapissa kaksi vuorokautta, jotta 9–11 % suositeltu kosteuspitoisuus (Tanninen 2015) saavutettiin. Kuvassa 8 on esitetty MiniMould-puristinmuotti.



Kuva 8. MiniMould-laitteiston rakenne, jossa 1. urosmuotti, 2. naarasmuotti, 3. kehätyökalu ja 4. lämmitysyksikkö (Tanninen ym. 2017).

## 12 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

### 12.1 L&W-kuituanalyysi

Taulukossa 11 on esitetty L&W-kuituanalyysin tulokset. Taulukkoon 11 on koottu kuidun keskimääräiset pituudet, halkaisija, muotokertoimet sekä hienoainepitoisuus sekä näiden hajonta.

Taulukko 11. Eri massojen kuituominaisuuksia.

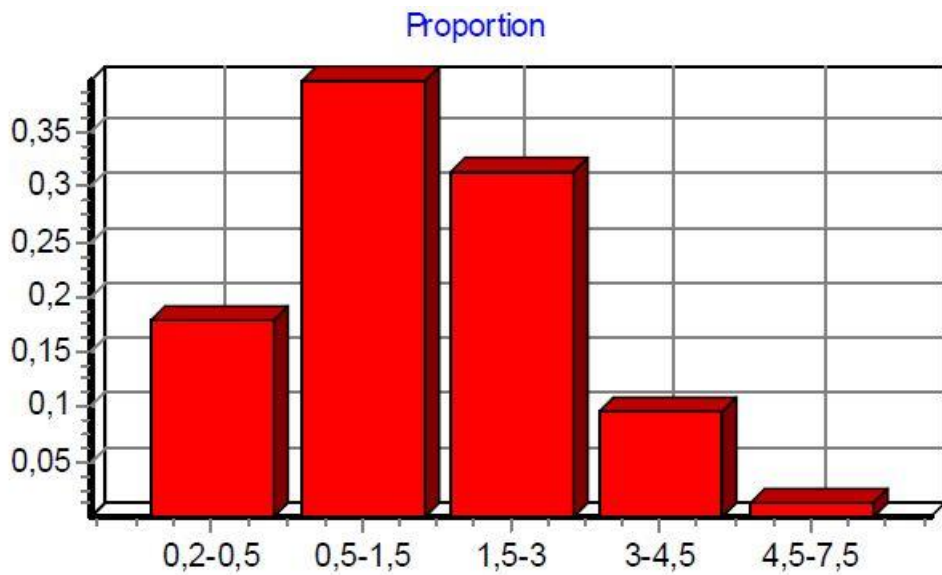
<b>Massa</b>	<b>Pituus</b>		<b>Halkaisija</b>		<b>Muoto</b>		<b>Hienoaines</b>
	<b>(mm)</b>		<b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>		<b>(%)</b>		<b>(%)</b>
CTMP 1	1,499	-0,042	41,2	-1,0	89,1	0,1	12,8
CTMP 2	1,530	0,024	40,3	-0,1	88,6	-0,2	12,7
Hylky 1	1,034	0,035	26,3	0,0	87,3	-0,2	9,2
Hylky 2	1,051	0,018	26,0	0,4	86,3	-0,1	9,4
Hamppu 1	1,130	-0,021	23,2	0,4	84,8	-0,1	32,6
Hamppu 2	1,191	-0,035	23,5	-0,7	83,8	0,0	30,0

Hienoainemäärä ja laatu riippuvat massan valmistusprosessista ja lopullisesta freneksistä. Hiokkeen hienoainepitoisuus voi olla jopa 50 %, kuitenkin kuituanalyysin perusteella hylyn hienoainepitoisuus oli alhaisin, vain 9,3 %. Hienoainemäärällä on vaikutusta kuitujen välisiin sidoksiin, kuitenkin paperin ja kartongin valmistuksessa suurin osa hienoaineesta sitoutuu kuituihin paperin kuivussa. (Sirviö 2008, 70–71) Kuituanalyysin perusteella hamppu sisälsi hienoaineista eniten, mikä oli toisaalta odotettavaa pitkän jauhatusajan vuoksi. Lisäksi päästäre on erittäin lyhyttä kuitua, joka näkyi hienoainepitoisuudessa sekä kuitupituusjakaumassa (Kuva 11). Danielewicz & Surma-Ślusarska (2017) tutkimuksissa päästäresellun hienoainepitoisuus oli jopa kolminkertainen verrattuna koivuselluun, kun taas niinikuituselluilla pitoisuus oli alhaisempi. Lisäksi hienoainepitoisuuden eroavaisuudet olivat selitettävissä hamppukuitujen pituuksien ja karheuden erolla. (Danielewicz & Surma-Ślusarska, 2017)

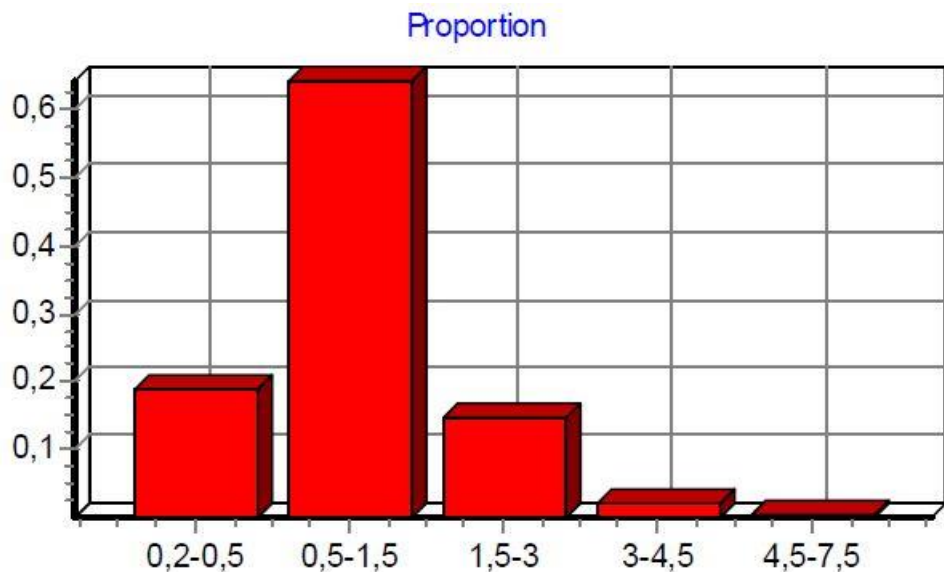
Muotokerroin kuvaa kuidun suorutta välillä 50–100 %, jossa 100 % merkitsee suoraa kuitua. Jo yhden prosentin muotokerroinmuutoksella on vaikutusta lujuusominaisuuksiin, erityisesti vetolujuusindeksiin. Korkeampi muotokerroin parantaa lujuusominaisuuksia. (Karlsson 2011) Kuituanalyysin perusteella suurin kuitu oli CTMP:llä ja käyrin hampulla. CTMP:n ja hampun muotokertoimien ero oli suhteellisen suuri (jopa 5,3 %), joten voidaan olettaa, että tällä oli vaikutusta lujuusominaisuuksiin.

Kuvissa 9–11 on esitetty eri massojen kuitupituusjakaumat. Kuvista on havaittavissa se, että kaikkien massojen suurin kuituosuus oli pituusvälillä 0,5–1,5 mm,

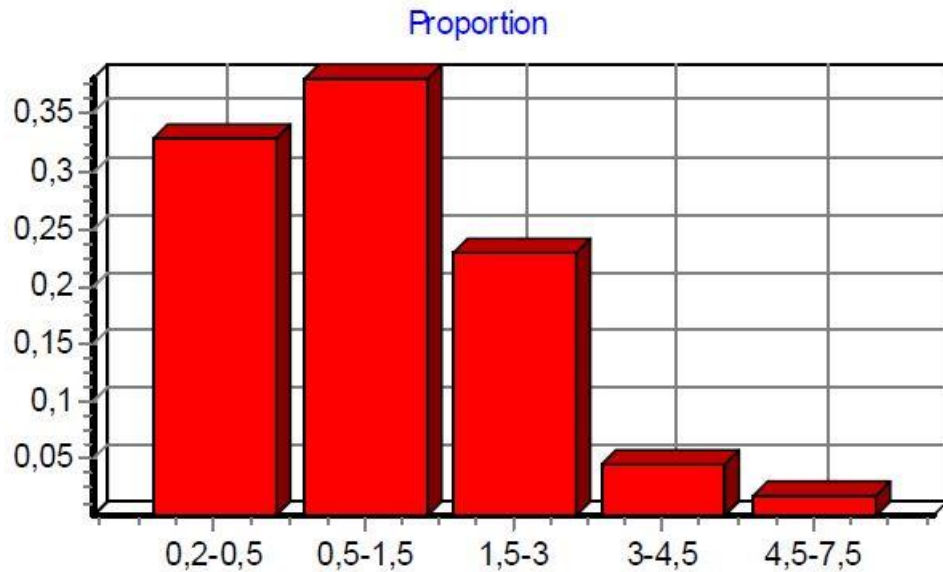
mikä on tärkeää vertailtaessa eri kuitulajeja toisiinsa. Hylkykartongilla kyseinen kuituosuus oli jopa yli 60 %, kun taas CTMP:llä ja hampulla se oli 35–40 %. Hampussa oli selvästi eniten, noin kolmasosa, lyhyttä jaetta (0,2–0,5), joka näkyi myös hienoainepitoisuudessa. Hampua jauhettiin massoista selvästi kauiten (vähintään kaksi tuntia). Yli 1,5 mm kuituja oli eniten CTMP:llä ja vähiten kartonkihylyllä. Kartonkihylyn keskimääräinen kuitupituus (Taulukko 11) oli mekaanisena massana ennakko-oletusten mukaisesti lyhyintä.



Kuva 9. CTMP:n kuitujakauma.



Kuva 10. Hylkykartongin kuitujakauma.



Kuva 11. Hampun kuitujakauma.

## 12.2 Massatestaukset

Jokaisesta massaerästä määritettiin sulpun sakeudet. Sakeudet määritettiin suodattamalla tunnettu massasulpputilavuus ennakkoon punnitulle suodatinpaperille Büchner-suppilon läpi. Suodatinpaperi ja suodatettu kakku kuivattiin pika-kuivaimessa vakiopainoon. Kuitukakun ja tiedossa olleen suodatetun sulpputilavuuden perusteella voitiin sakeus laskea. Taulukossa 12 on esitetty massaerien sakeuksien keskiarvot. Massaerien välillä ei ollut suuria poikkeamia sakeuksia. Jokaisen massaerien sakeudet määritettiin, jotta voitiin laskea arkkien valmistuksessa tarvittava massasulppujen määrä tilavuutena. Hampun ja hyllyn sakeuden määrittämisessä oli hankaluuksia, johtuen siitä, että molemmat massat suotautuivat hitaasti tai ei ollenkaan suodatinpaperin läpi. Lisäksi pienellä massatilavuudella sakeuden määrittäminen luotettavasti oli haastavaa.



Taulukko 12. Massojen sakeudet ja CSF-luvut.

Massa	Sakeus, (g/l)	Freeness, (ml)
CTMP	15,6	704
Kartonkihylky	17,1	567
Hamppu	13,0	318
Koivusellu	14,5	693

Freeness laskee hienoainepitoisuuden noustessa. Kuituanalyysin mukaan hampun hienoainepitoisuus oli jopa 32,6 %. Hampulla olikin mittauksien mukaan selvästi alhaisin CSF-luku. Suotautuvuuden avulla mitataan myös kuitujen jauhautuneisuutta. Freeness pienenee jauhautuneisuuden kasvaessa ja luku on kääntäen verrannollinen suotautumisvastukseen. (Joensuu 2017, 30–31) CSF-luku kuvaa vain keksimääräisen massan hienousasteen, eikä ota huomioon eri fraktioiden osuutta suotautumisnopeuteen (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 32). Kuten aikaisemmin mainittiin, jauhettiin hamppua selvästi kauemmin kuin muita massoja, jolla on myös ollut vaikutusta CSF-lukemaan. Lisäksi hamppu sisälsi kuituanalyysin perusteella eniten lyhyttä jaetta. Laboratoriossa tehtyjen mittauksien tulokset ovat riippuvaisia laimennusveden laatuominaisuuksista ja mittausolosuhteista. Kyseiset tulokset eivät tällöin välttämättä vastaa suotautuvuutta paperikoneella eivätkä ennusta formaatio- tai lujuuspotentiaalia. (Joensuu 2017, 30–31) Taivekartongin keskikerroksen painehiokkeen freeness-arvo on yleensä noin 310–350 ml (Antila 2008, 19). Kartonkihyllyssä oli mukana taustakerrokset, mineraalipäällystys sekä lisä- ja apuaineita, joten sen CSF-lukua ei voi verrata kirjallisuuden arvoihin.

### 12.3 Yleiset ominaisuudet

Taulukossa 13 on esitetty arkkitestauksissa käytettyjen kuuden arkin yleisten ominaisuuksien keskiarvot. Liitteessä II on esitetty yleisten ominaisuuksien kaikkien arkkien keskiarvot. Lisäksi Taulukossa 13 on arkkien laskennallinen hamppuosuus. Laskennallinen hamppuosuus on laskettu olettaen, että referenssimassan paino on ollut arkkien teossa tavoitepainossa, joten kyseiset osuudet ovat vain suuntaa antavia. Suuremmilla hamppuosuuksilla (30 ja 40) oli arkeissa suuria vaihteluja neliömassassa, joka johtui hamppukuituflokkien riittämättömästä hajoamisesta

puukuitusulpuille soveltuvan sekoittamisen aikana. Yleisesti suurin osa arkeista olivat ylipainoisia suurilla hamppuosuuksilla, jolloin laskennallisesti hamppuosuus myös kasvoi.

Taulukko 13. Koesarjojen yleiset ominaisuudet.

Koepiste	Neliömassa (g/m <sup>2</sup> )	Paksuus (µm)	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Bulkki (cm <sup>3</sup> /g)	Hamppu (%)
CTMP	201	636	317	3,16	0
Hylky	194	476	406	2,45	0
CTMP/Hylky	202	581	348	2,87	0
1 C/H+10	205	596	345	2,90	13
2 C/H+20	226	581	389	2,57	30
3 C/H+30	211	592	356	2,81	34
4 C/H+40	207	505	410	2,44	42
5 CTMP+10	206	681	303	3,30	13
6 CTMP+20	202	622	325	3,08	21
7 CTMP+30	211	587	361	2,78	34
8 CTMP+40	203	600	339	2,96	41
Kerros	215	502	429	2,33	-

Koepiste 3 tehtiin uudestaan johtuen ylipainoista ja suuresta hamppuosuudesta. Ensimmäisessä koepisteen 3 sarjassa oli hamppuosuus suunnilleen sama kuin koepisteessä 4. Myös koepisteeseen 2 olisi ollut hyvä tehdä lisäarkkeja, jotka olisivat olleet lähempänä tavoitepainoa. Suuresta hienoaineen määrästä huolimatta hamppumassassa oli hyvin myös hyvin pitkiä kuituja, jotka tekivät siitä vaikeasti sekoitettavaa. Näistä syistä johtuen aiheutti hamppu kimppuja/flokkeja arkkeihin, jolloin arkien paino vaihteli, varsinkin suuremmilla hamppuosuuksilla. Suuremmilla hamppuosuuksilla (30 ja 40) tehtiin koearkit myös aina 5-6 arkin välein. Koearkeissa tavoitepaino oli ylittynyt ja näin pystyttiin tekemään korjaukset tarvittavaan hamppun sulppumäärään.

Kartongilta toivotaan yleensä pientä tiheyttä, eli korkeaa bulkkia. Korkea bulkki parantaa muun muassa opasiteettia, jäykkyyttä, kokoonpuristuvuutta ja repäisyjuuutta. Tiheyteen vaikuttavat raaka-aineen ainestiheys ja kartongin huokososuus.

(Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 83) Taivekartongin keksikerroksessa käytetäänkin mahdollisimman bulkkista massaa. Neliömassan pysyessä vakiona ja paksuuden kasvaessa, laskee tiheys, jolloin bulkki kasvaa. CTMP:llä oli selvästi korkeampi bulkki verrattaessa kartonkihylkyyn. Pelkällä hiokkeella on teorian mukaan korkeampi bulkki kuin CTMP:llä. Kartonkihilyssä on myös täyte- ja sideaineita, jotka nostavat tiheyttä ja laskevat näin bulkkia. Lisäksi molemmissa sarjoissa hamppuosuudella 10 kasvoi bulkki. CTMP+10 osuutta hamppua oli koesarjan korkein bulkki (3,30 cm<sup>3</sup>/g). Suuremmilla hamppumäärillä bulkki laskee, mikä johtui selvästi hienoaineen suuresta määrästä. Paksuudella on suuri merkitys tiheyteen ja näin ollen bulkkiin. Paksuusmittaukset suoritettiin arkeista viidestä eri kohtaan ja joidenkin arkkien kohdalla oli havaittavissa suuriakin paksuuseroja.

Hamppujakeiden (koko korsi, niinikuitu ja päistäre) bulkkisuudessa on tutkimusten mukaan suuriakin eroja. Päistäreellä on havaittu olevan suhteellisen alhainen bulkki (1,25–1,35 cm<sup>3</sup>/g), kun taas niinikuiduilla korkeahko bulkki (3,2 cm<sup>3</sup>/g). (Danielewicz & Surma-Ślusarska, 2017) Voidaan olettaa, että koko korren bulkki on edellä mainittujen välistä.

#### **12.4 Karheus, ilmanläpäisevyys ja absorptio-ominaisuudet**

Karheudella kuvataan paperin ja kartongin pintarakennetta. Karheus määrittää kuinka paljon pinnassa on paksuussuunnassa poikkeamia, jotka vaikuttavat oleellisesti esimerkiksi painettavuuteen. Karheusmittaus perustuu yleensä metallipinnan ja paperipinnan välissä virtaavan ilmamäärän mittaamiseen. Bendtsen-mittausmenetelmä mittaa makrokarheuden tietyn ilmamäärän virtaamiseen kuluvan ajan mukaan. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 84) Karheuteen voidaan vaikuttaa kalanteroinnilla ja päällystyksellä, jolloin pinnan epätasaisuutta tai sileyttä voidaan parantaa. Taulukossa 14 esitetty karheus- ja ilmanläpäisevyysmittaustulokset sekä veden absorptiokyvyt. Karheusmittauksien perusteella hamppu lisää karheutta tai pinnan epätasaisuutta. Toisaalta hamppumäärällä ei näyttänyt olevan suurta vaikutusta arkkien karheuteen. CTMP:llä oli korkea karheus verrattaessa kartonkihylkyyn. Lisäksi taustoissa käytetty koivusellu alensi karheutta tai paransi sileyttä.

Sellua käytetäänkin taivekartongin taustoissa parantamaan painettavuusominaisuuksia.

Taulukko 14. Koesarjoista mitatut ilmanläpäisevyydet, karheudet ja veden absorptiokyvyt.

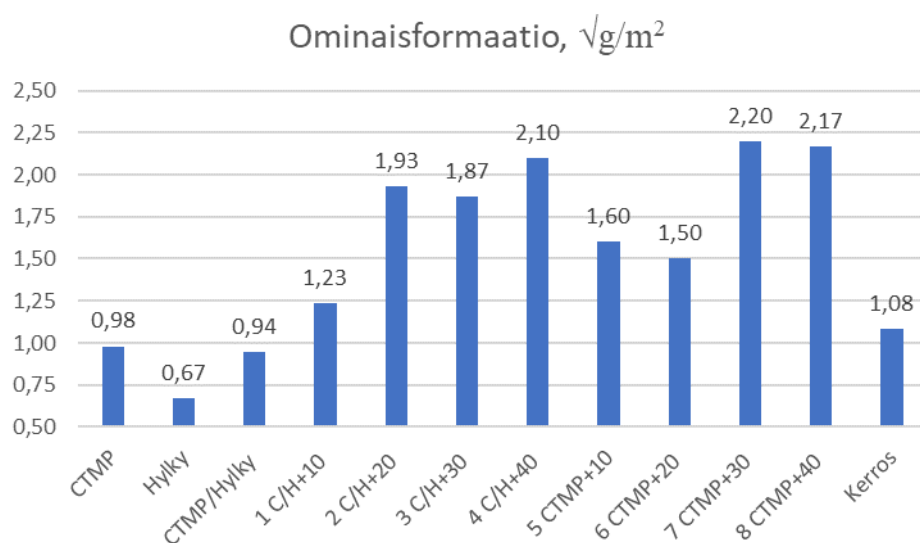
<b>Koesarja</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (<math>\mu\text{m}/\text{Pas}</math>)</b>	<b>Karheus (<math>\text{ml}/\text{min}</math>)</b>	<b>Cobb<sub>30</sub> (<math>\text{g}/\text{m}^2</math>)</b>
CTMP	61,4	2541	700
Hylky	17,8	1969	408
CTMP+Hylky	39,6	2427	569
C/H+10	32,4	2503	551
C/H+20	14,4	2751	613
C/H+30	15,4	2729	506
C/H+40	5,9	2717	581
CTMP+10	60,4	2645	817
CTMP+20	37,4	2568	739
CTMP+30	10,8	2790	622
CTMP+40	12,8	2717	621
Kerros	35,1	1845	614

Ilmanläpäisevyys mitataan yleensä asetetun paine-eron läpimenevän ilmamäärän avulla, jolloin keskimääräinen ilmavirtaus on paperin ilmanläpäisevyys. Ilmanläpäisevyyteen vaikuttavat muun muassa massa ja sen valmistusmenetelmä, kuitupi-tuusjakauma ja formaatio. Huono formaatio nostaa ilmanläpäisevyyttä. Mittaukset suoritettiin Bendtsen-laitteella, paine-eron ollessa 1,47 kPa ja pinta-alan 10 cm<sup>2</sup>. Korkea ilmanläpäisevyys tyypillistä erikoispapereille, kuten savuke- ja suodatinpa-pereille. (Zhao 2017, 42–43) Käytännössä ilmanläpäisevyyden sijasta puhutaan huokoisuudesta. Paperi ja kartonki muodostuu pääasiassa kuiduista ja näin ollen huokoisuudella ja ilmanläpäisevyydellä on selvä yhteys. Alhainen ilmanläpäisevyys parantaa painettavuusominaisuuksia. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 89) Hampun lisääminen alensi ilmanläpäisevyyttä ja alhaisin se oli koepisteellä 4. 10 osaa hamppua ei juurikaan vaikuttanut vielä ilmanläpäisevyyteen, vaan aleneminen tapahtui selvästi 20 % hamppuosuuden kohdalla.

Ilmanläpäisevyyden avulla voidaan arvioida myös nesteen tunkeutumista paperin sisään ja nesteen tunkeutuminen onkin yleisimmin käytetty läpäisevyyden mittari (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 89). Veden absorptiokyky määritettiin Cobb-menetelmän mukaan. Cobb-menetelmällä määritetään vesimäärä, mikä absorboituu koearkkiin tietyn ajan aikana (Levlin 1999, 158). Absorptiokykyyn voidaan käytännössä vaikuttaa samalla keinoilla, kun ilmanläpäisevyyden pienentämiseen. Huokoiseen paperiin imeytyvät nesteet lähtökohtaisesti paremmin. Parhaimmat tulokset saadaan tiivistämällä paperia, esimerkiksi täyttämällä huokoiset päällysteellä tai pintaliimauksella. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 90) CTMP:llä oli selvästi suurempi absorptio kuin kartonkihyllyllä. Kartonkihylky sisälsi päällystettä ja muita apuaineita, jotka vaikuttavat absorptio-ominaisuuksiin. Tämä näkyi myös verrattaessa CTMP-sarjaa CTMP/Hylky-sarjaan. Lisäksi hampun lisäyksellä CTMP/Hylky-sarjaan ei ollut juurikaan vaikutusta absorptioon. Hampun lisäys CTMP:hen pienensi absorptiota, kuitenkin koesarjan pienin absorptio (koepiste 8, 621 g/m<sup>2</sup>) oli korkeampi kuin yhdelläkään hylkyä sisältävässä koepisteessä, jonka katsottiin johtuvan mekaanisesti käsitellyn hampukkuidun hienoainemäärästä sekä mahdollisesti hampukkuidun hydrofobisista komponenteista, kuten ligniinistä ja kasviliimoista. Absorptiotestaus tehtiin kolmelle arkille/koepiste ja varsinkin suuremmilla hamppuosuuksilla oli mittauksien varianssi suuri.

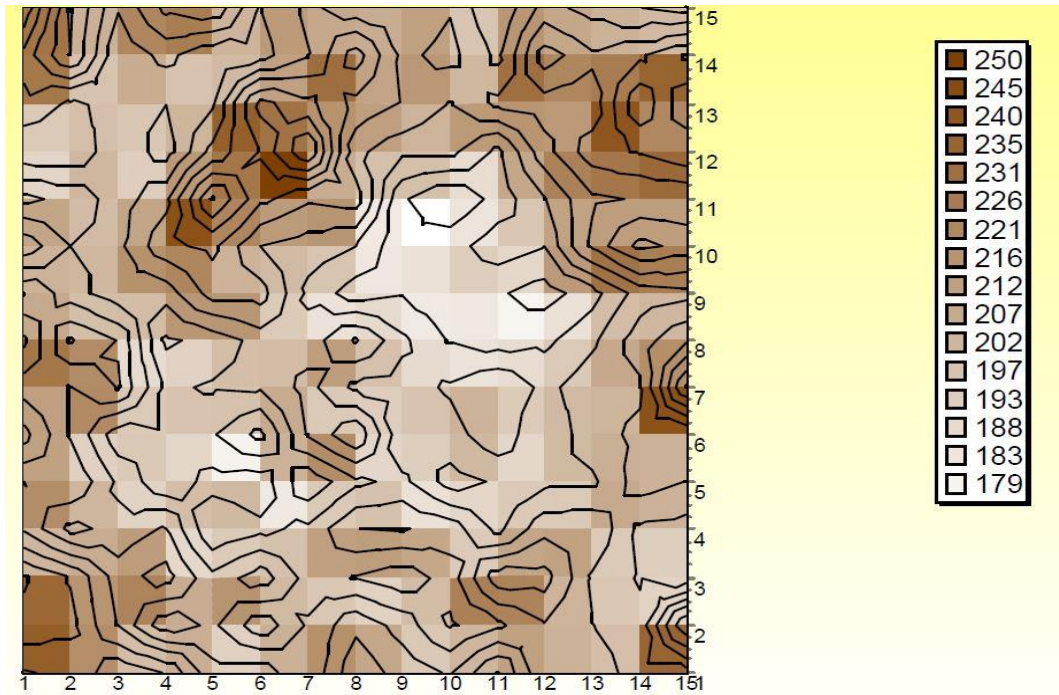
## 12.5 Formaatio

Formaatio määritettiin  $\beta$ -säteilymittarilla. Kuvassa 12 on esitetty koepisteiden ominaisformaatiot. Formaatio on sitä huonompi, mitä suurempi lukema on. Hampun lisääminen heikensi formaatiota selvästi. Isoilla hamppuosuuksilla pystyi jo silmällä näkemään arkeista selvästi hampun epätasaisen jakautuman. Hylkykartongilla, joka sisälsi hioketta, oli oletettavasti paras formaatio. Kartongille hyvän ominaisformaation rajana voisi pitää yhtä, joten monissa runsaasti hampua sisältävissä koepisteissä oli formaatio-ongelmia.

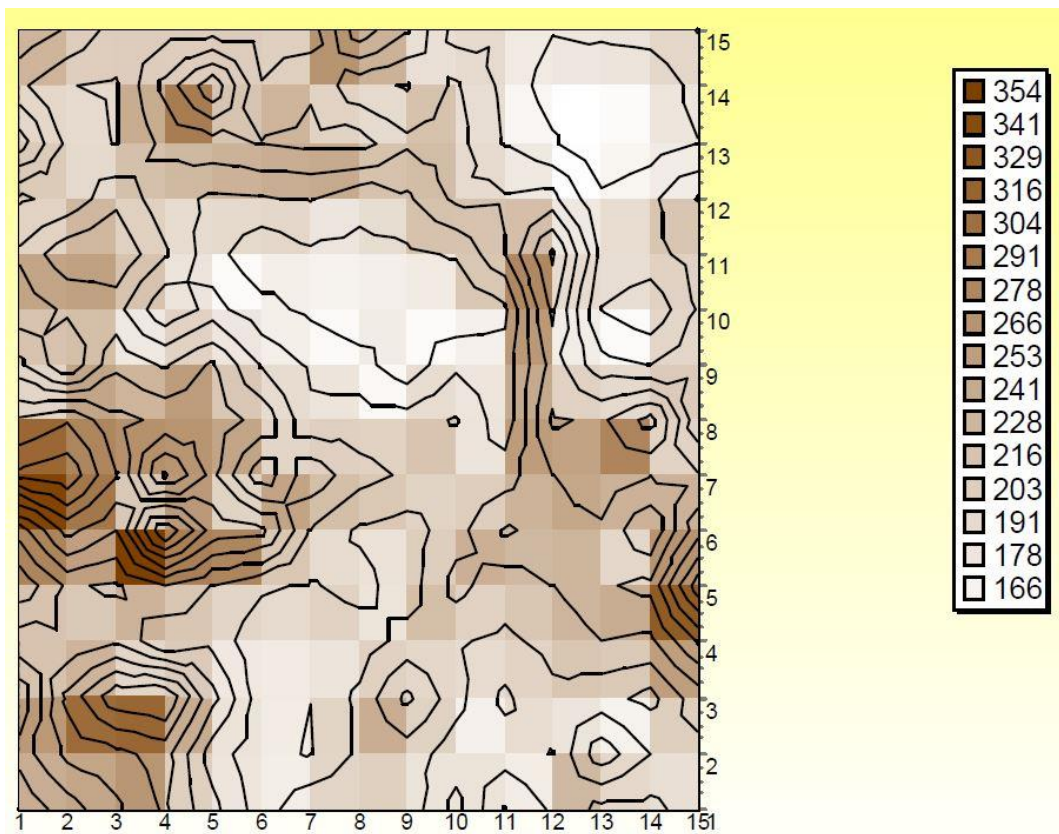


Kuva 12. Koepisteiden ominaisformaatioiden keskiarvot.

Formaatiomittaukset suoritettiin kolmelle arkille/koepiste. Selvästi huonoin yksittäisen arkin formaatio oli koepisteellä 8. Kuvassa 12 on esitetty mittauksien keskiarvot, jotka vääristävät hieman tuloksia. Johtuen siitä, että koesarjojen arkkien välillä oli vaihtelevuutta ominaisformaatioissa. Esimerkiksi 8 koepisteen ominaisformaatiot vaihtelivat välillä 1,7–2,5  $\sqrt{\text{g/m}^2}$ . Kuvissa 13 ja 14 on esitetty hamppuarkkien paras sekä huonoin formaatio. Kerrosdemoarkeilla oli hyvä formaatio verrattuna hamppuarkkeihin, tosin ominaisformaation vaihteluväli oli 0,76–1,5  $\sqrt{\text{g/m}^2}$ . Kerrosdemoarkkien keskikerroksessa on käytetty koepisteen 6 reseptiä (CTMP/Hamppu 80/20), joten sellutaustat paransivat formaatiota selvästi. Koepisteen 2 neliömassa oli selvästi muita korkeampi (226  $\text{g/m}^2$ ) ja neliömassan kasvaessa formaatio tyypillisesti huononee, joskin ominaisformaation ilmoittaminen korjaa tämän ilmiön. Hamppuarkkien huono formaatio ja vaihtelevuus selittäneen lujuusominaisuuksien hajontaa. Kuvista 13 ja 14 on nähtävissä kartan avulla neliömassavaihtelut.



Kuva 13. Koepisteen 1 neliömassakartta, ominaisformaation ollessa  $1,1 \sqrt{g/m^2}$ .

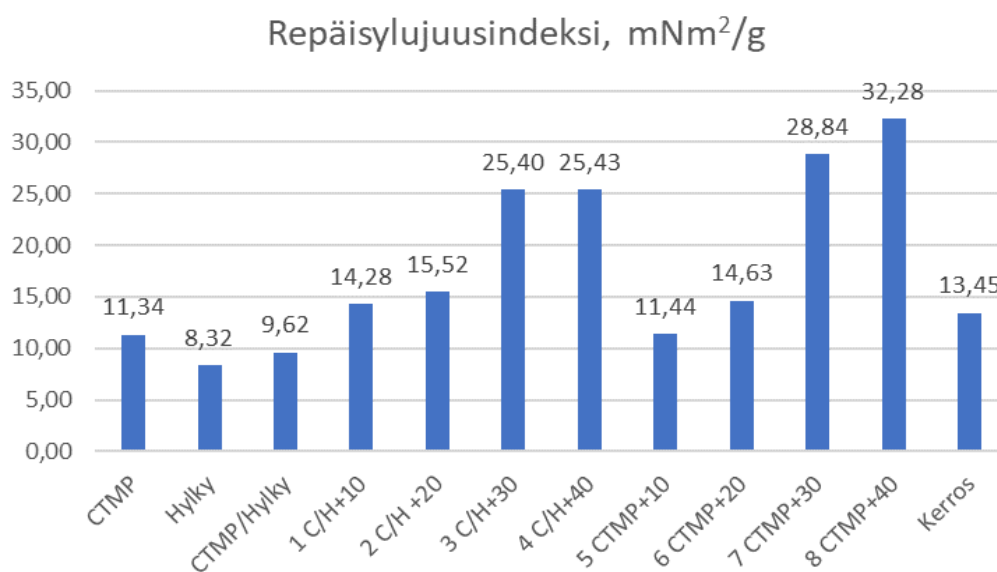


Kuva 14. 8 koepisteen neliömassakartta, ominaisformaation ollessa  $2,5 \sqrt{g/m^2}$ .

## 12.6 Lujuusominaisuudet

### 12.6.1 Repäisylujuus

Repäisylujuuteen vaikuttavat lähinnä kuitupituus- ja paksuus, sitoutumiskyky sekä kuituorientaatio (Zhao 2017, 64). Paperia tai kartonkia revittäessä katkenneet kuidut ovat sitoutuneet vahvasti toisiinsa, joten kuidut katkeavat helpommin kuin vetäytyvät ulos (Hafez 2011, 20). Jotta kuidut säilyvät ehjinä, tulee niiden olla lujuuteensa ja pituutensa nähden oikein sitoutuneita. Heikot kuidut ja liiallinen sitoutuneisuus laskee repäisylujuutta. Toisaalta, jos kuidut eivät ole lainkaan sitoutuneita, on myös repäisylujuus huono. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 98) Kuvassa 15 on esitetty eri koepisteiden repäisylujuusindeksien keskiarvot.



Kuva 15. Koepisteiden repäisylujuusindeksit.

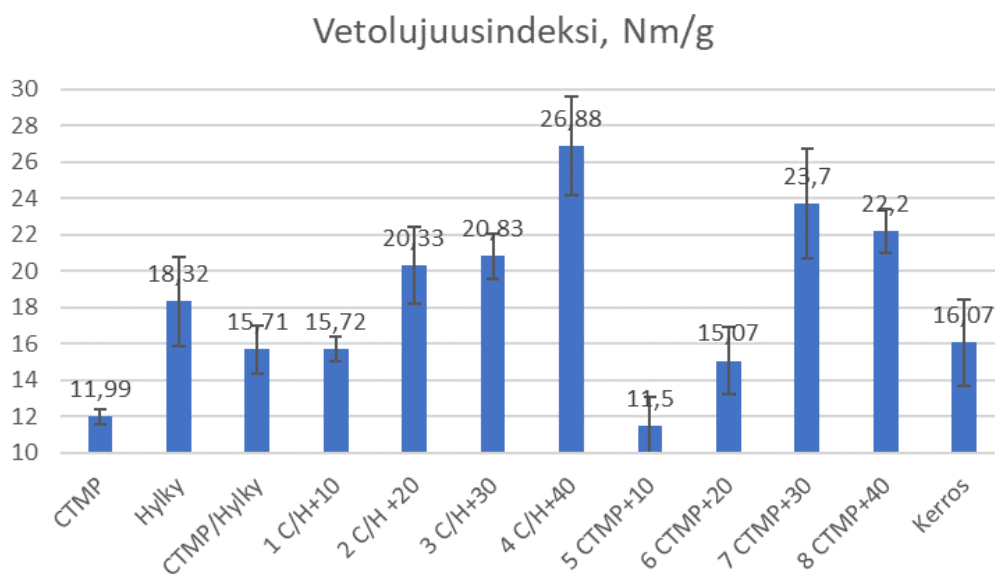
Varianssi oli suhteellisen suuri koepisteillä 7 ja 8. Koepisteen 7 repäisylujuudet olivat välillä 5589–6485 mN ja koepisteen 8 välillä 5365–7412 mN. Syy tähän oli se että, suuremmilla hamppuosuuksilla oli arkeissa flokkaantuneita hamppukuituja, jotka vaikuttivat lujuusominaisuuksien hajontaan. Kyseisillä sarjoilla oli myös koepisteiden huonoimmat formaatit. Formaation huonontuminen ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi repäisylujuuteen. Koepisteiden 7 ja 8 alhaisimmatkin lukemat



olivat selvästi korkeammat kuin CTMP-sarjan muilla koepisteillä. Käytännössä repäisylujuusindeksit olivat kaksinkertaiset verrattuna koepisteisiin 5 ja 6. Referenssiarkeista CTMP:llä oli ennakko-oletusten mukaisesti korkein repäisylujuus. Hyllyn keskikerroksessa on käytetty hioketta, jolla mekaanisena massana on alhaisempi repäisylujuus. Tämä näkyi myös verrattaessa CTMP/Hylky-arkkeja pelkkiin CTMP-arkkeihin. Molemmissa koesarjoissa hampun lisääminen paransi repäisylujuutta. Repäisylujuus kasvoi merkittävästi välillä 20–30 % hampua. Teorian perusteella repäisylujuuden kasvaminen hampuuosuuden noustessa johtuu hampukuitujen suuremmasta lujuudesta. Danielewicz ja Surma-Ślusarska (2017) totesivat omassa tutkimuksessaan, että korkea repäisylujuus korsisellulla johtui niinikuiduista. Lisäksi niinikuitusellun kuiduilla oli korkea kuidunpituus ja karheus. (Danielewicz & Surma-Ślusarska, 2017)

#### 12.6.2 Vetolujuus, murtovenymä ja kimmokerroin

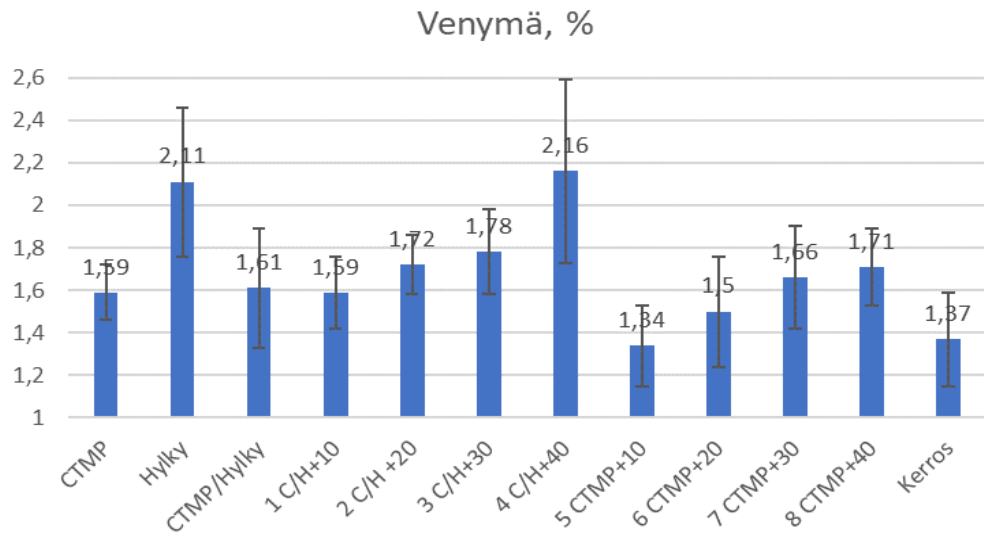
Vetolujuudella tarkoitetaan paperin tai kartongin kykyä vastustaa vetoa hajoamatta (Zhao 2017, 44). Kuidun pituus ja karheus vaikuttavat paperin ja kartongin vetolujuuteen. Pidempi kuitu parantaa vetolujuutta, kun taas huono formaatio alentaa sitä. (Nazhad ym. 2000). Kuvassa 16 on esitetty L&W-laitteen laskemat vetolujuusindeksit.



Kuva 16. Koepisteiden vetolujuusindeksit.

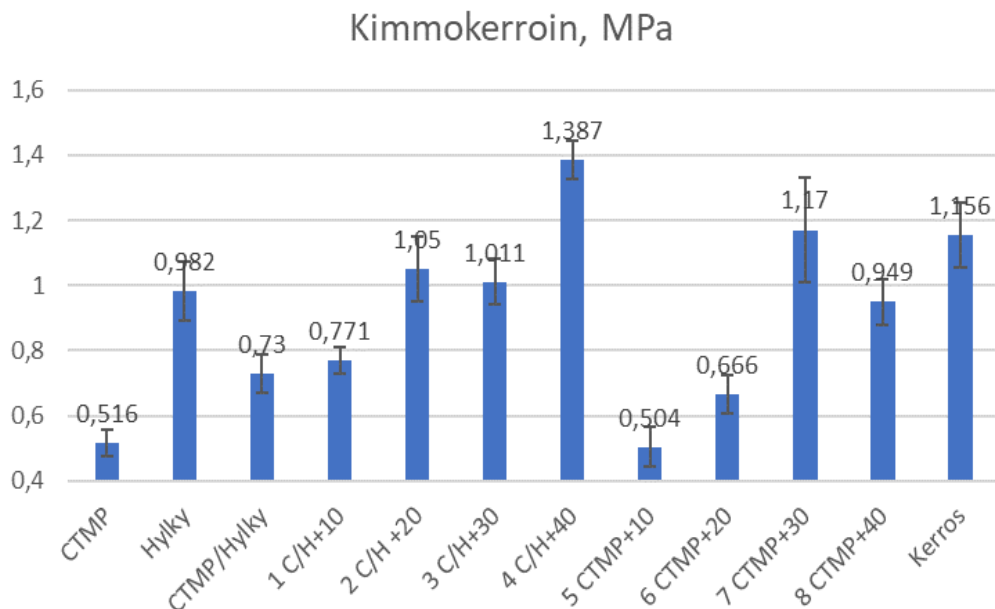
Vetolujuus kasvoi hamppuosuuden kasvaessa molemmissa sarjoissa, poikkeuksena koepiste 8, jolla oli alhaisempi vetolujuus kuin koepisteellä 7. Koepisteellä 8 olikin koepisteiden huonoin formaatio ja huono formaatio vaikuttaa erityisesti vetolujuuteen (Nazhad ym. 2000). Myös koepisteellä 5 oli keskimääräistä huonompi formaatio, mikä näkyy vetolujuudessa. Kyseisen koepisteen vetolujuusindeksi oli jopa heikompi kuin pelkän CTMP:n. Kartonkihylky sisälsi sellua sekä täyte- ja apuaineita muun muassa liimoja, joten hyllyllä oli selvästi parempi vetolujuus kuin CTMP:llä. Tämä vaikuttaa myös suoraan sarjojen välisiin vetolujuuksiin. Paras vetolujuusindeksi oli koepisteellä 4, jossa oli käytetty eniten hamppua (40 osaa) sekä CTMP/hylkyä. Lisäksi koivusellu lisäsi hieman vetolujuutta verrattaessa koepisteeseen 6. Teorian mukaan niinikuitujen paksuudesta johtuen saavutetaan hampulla hyvä vetolujuus. Lisäksi vetolujuuteen vaikuttaa pienempi hemiselluloosapitoisuus. (Danielewicz & Surma-Śluraska, 2017)

Venymä tai murtovenymä vaikuttaa paperin ja kartongin käyttäytymiseen jälkikäsitteilyssä, painokoneella ja loppukäytössä. Murtovenymällä tarkoitetaan materiaalin kokonaisvenymää, jonka se kestää ennen murtumista. Neliömassalla ja tiheydellä on vaikutusta murtovenymään. Erityisesti pakkauskartonkien kannalta materiaalin hyvä venymä ja venymän palautuvuus (kimmokerroin) ovat olennaisia. (Mutikainen 2008, 2; Lyytikäinen 2015, 18) Kuvassa 17 on esitetty koepisteiden venymät. Kuvasta on nähtävissä, että venymä parani hamppuosuuden noustessa. Kartonkihyllyllä oli myös parempi venymä kuin CTMP:llä. Korkein venymä olikin koepisteellä 8.



Kuva 17. Koepisteiden venymät.

Kimmokerroin kuvaa materiaalin kykyä vastustaa muodonmuutoksia ja sillä on suuri vaikutus esimerkiksi jäykkyyteen. Kimmokertoimeen vaikuttavat tiheys, jauhatusaste, kuivatuskutistuma ja kuituorientaatio. (Mutikainen 2008, 16) Kuvassa 18 on esitetty koepisteiden kimmokertoimet.



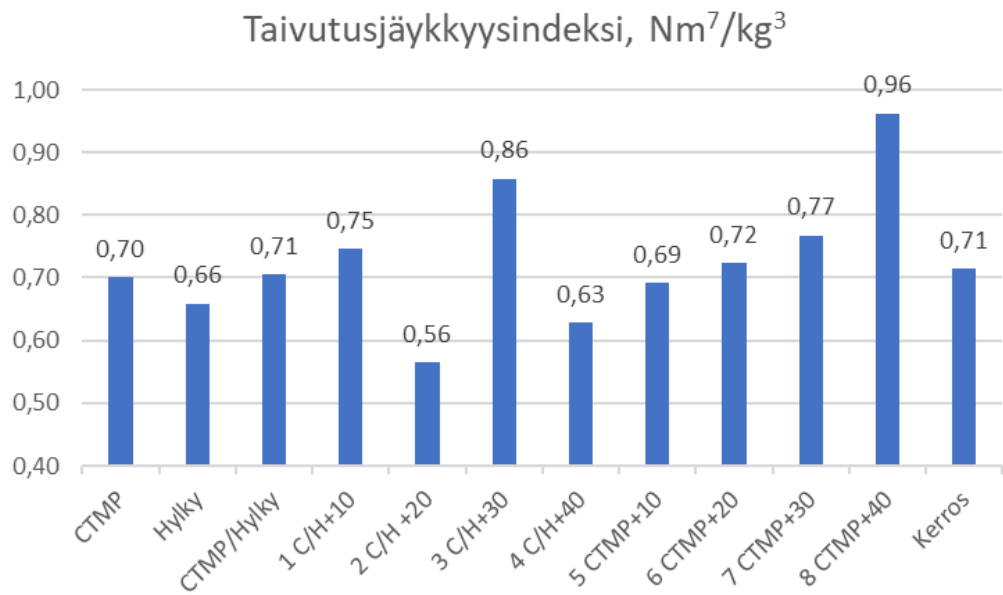
Kuva 18. Koepisteiden kimmokertoimet.

Korkein kimmokerroin oli koepisteellä 4, jossa oli korkein hamppuosuus ja massana CTMP/Hylky. Pelkällä hyllyllä oli referenssimassoista korkein kimmokerroin, kuten myös korkein tiheys. CTMP:n kimmokerroin oli selvästi alhaisin, joka näkyi

myös CTMP-sarjan hamppuarkeilla. Sellu paransi selvästi kimmokerrointa ja kerrosdemoarkeilla olikin koesarjan suurin tiheys. Koepisteistä koepisteellä 5 oli alhaisin tiheys, mikä näkyi huonoimpana kimmokertoimena, kun taas koepisteen 4 tiheys oli suurin ja näin ollen sillä oli myös suurin kimmokerroin. Koepisteellä 7 oli puolestaan CTMP-sarjan korkein tiheys ja kimmokerroin.

### 12.6.3 Taivutusjäykkyys

Taivutusjäykkyyksistä laskettiin taivutusjäykkyysindeksit. Taivutusjäykkyysindeksi voidaan laskea jakamalla taivutusjäykkyys neliömassan kolmannella potenssilla. Kuvassa 19 on esitetty laskennalliset taivutusjäykkyysindeksit.



Kuva 19. Eri koepisteiden taivutusjäykkyysindeksit.

Koepisteellä 1 ja 2 oli mittauksien mukaan sama taivutusjäykkyys (6,43 mNm), mikä oli kaikkia referenssimassoja korkeampi. Koepisteellä 2 oli korkea neliömassa, mikä kolmannessa potenssissa alentaa taivutusjäykkyysindeksiä. Taivutusjäykkyys on suoraan verrannollinen kimmokertoimeen ja paksuuden kolmanteen potenssiin. Laskennallisesti taivutusjäykkyyttä tarkasteltaessa, oli 2 koepisteen kimmokerroin 1,05 MPa, joka on suurempi kuin koepisteen 1 0,77 MPa. Lisäksi koepisteen 2 arkit olivat paksumpia. Voidaan siis olettaa, että kyseisen koepisteen

mittaustulokset eivät välttämättä vastaa todellista taivutusjäykkyyttä. Sama on havaittavissa koepisteessä 4. Kyseisen koepisteen kimmokerroin oli koko koesarjan suurin (1,39 MPa). Toisaalta molemmilla koepisteillä oli hampukoesarjojen alhaisimmat bulkit. Mittauksista voitiin kuitenkin havaita se, että taivutusjäykkyys kasvoi hampun lisäyksen myötä. Hylyllä oli alhaisin taivutusjäykkyys (4,81 mNm) ja koepisteellä 8 korkein (8,05 mNm).

Hajonta kasvoi suuremmilla hamppuosuuksilla, erityisesti hajonta oli suuri koepisteillä 7 ja 8, joiden taivutusjäykkyydet mitattiinkin uudestaan. Hajontaan vaikutti hampun muodostaman flokit arkeissa ja siitä johtuva aiemmin esitetty huono formaatio.

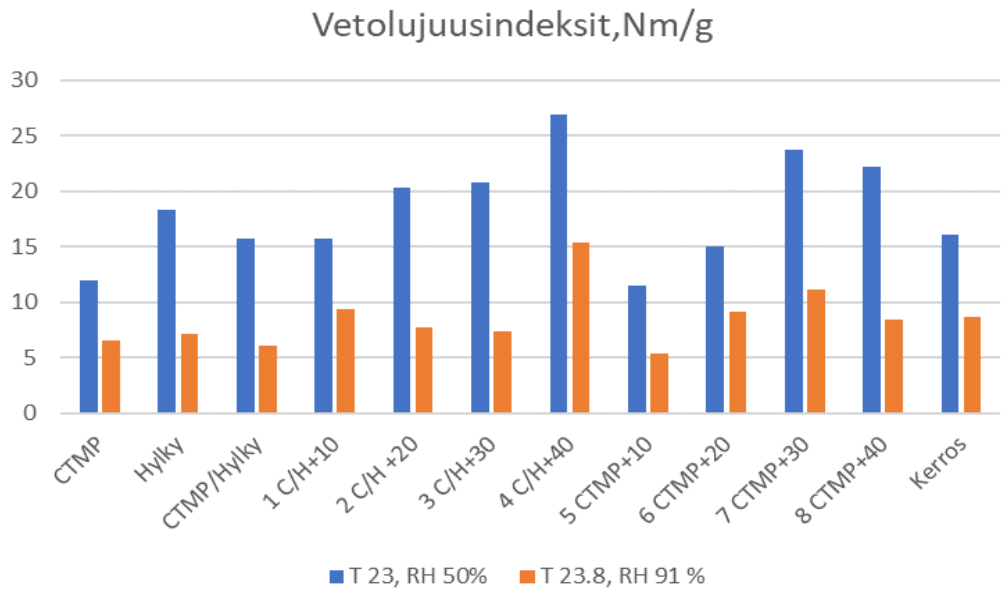
#### *12.6.4 Märkälujuudet*

Kosteus vähentää kuitujen välisiä vetysidoksia, joilla on suora vaikutus lujuusominaisuuksiin. Erityisesti vetolujuus ja jäykkyys heikkenevät. Repäisylujuus kasvaa 90 % suhteellisen ilmankosteuteen asti, jonka jälkeen se alkaa heikkenemään. Kosteuden kasvaessa paperin ja kartongin vesipitoisuus kasvaa ja tällöin plastinen muodonmuutos tulee vallitsevaksi, jolloin vetolujuus heikkenee ja venymä kasvaa. (Hafez 2011, 14–18) Taulukossa 15 on esitetty mittauksissa käytettyjen koepisteiden kosteuspitoisuudet. Vetolujuus ainoastaan kasvaa paperin ollessa ylikuivaa ja mikäli muut tekijät sallivat, tulisi paperi valmistaa mahdollisimman kosteaksi (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 98–99). Kuvissa 19–21 on vertailtu vakioolosuhteissa olleiden arkkien lujuusominaisuuksia olosuhdekaapissa kostutettuihin arkkeihin.

Taulukko 15. Kostutettujen testikappaleiden mitatut kosteudet.

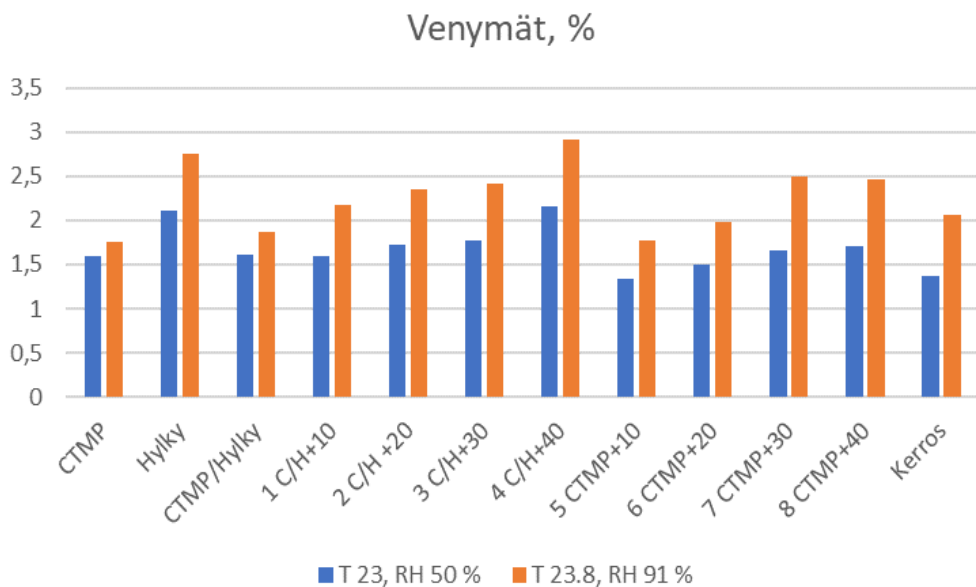
<b>Koepiste</b>	<b>Kosteus, (%)</b>
CTMP	20,27
Hylky	18,86
CTMP+Hylky	20,78
1 C/H+10	18,89
2 C/H+20	21,96
3 C/H+30	23,52
4 C/H+40	17,63
5 CTMP+10	22,07
6 CTMP+20	20,19
7 CTMP+30	19,46
8 CTMP+40	24,54
Kerros	18,02

Kuvien 20 ja 21 mukaan vetoindeksit laskivat ja venymät kasvoivat kostutetuilla arkeilla teorian mukaisesti. Märkävetolujuusindeksit vähintään puolittuivat verrattuna vakioilmastoituihin arkkeihin, mikä merkitsee, ettei hamppu riitä ylläpitämään materiaalin fysikaalisia ominaisuuksia kosteissa olosuhteissa. Poikkeuksena olivat koepisteet 1, 4, 6 ja kerros. Taulukon 15 mukaan näiden kosteudet olivatkin alhaisimpia.



Kuva 20. Vetolujuusindeksien vertailu eri kosteuksissa.

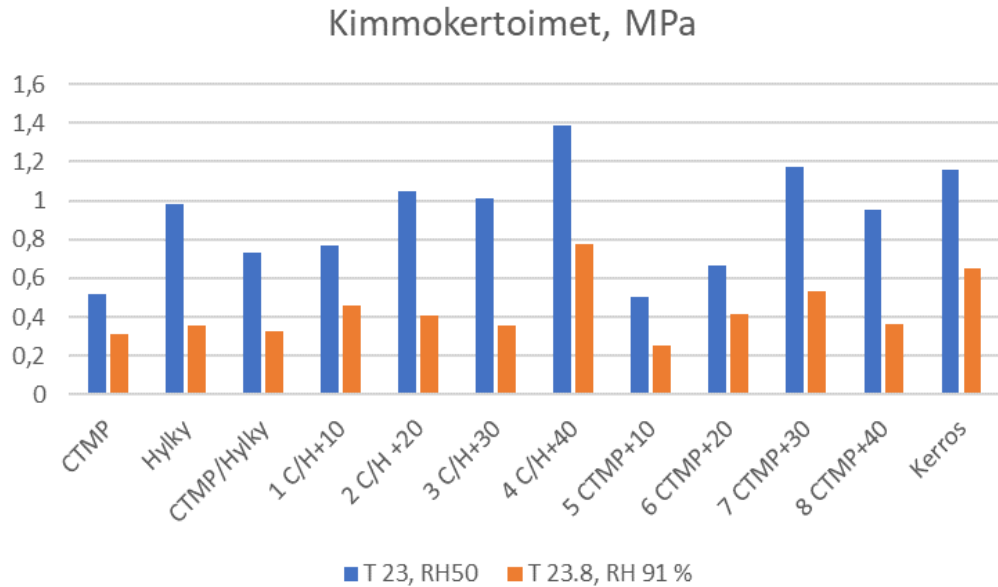
Kosteuden myötä kaikkien koepisteiden venymät kasvoivat. Koepisteen 7 venymä kasvoi prosentuaalisesti eniten, myös koepisteellä 8 oli muita parempi venymän kasvu. Keskimäärin hamppuarkkien venymä kasvoi noin 30 % verrattuna RH 50 %.



Kuva 21. Venymien vertailu eri kosteuksissa.

Kimmo kertoimet laskivat myös kosteuden myötä (Kuva 22). Kimmo kertoimien aleneminen oli verrannollinen vetolujuusindeksien alenemiseen. Myös parhaiten

kimmokertoimen säilyttivät koepisteet 1, 4, 6 ja kerros. Lisäksi CTMP:llä vetolujuusindeksin ja kimmokertoimen aleneminen oli vähäistä verrattuna muihin, mutta myös venymä kasvoi vähiten.

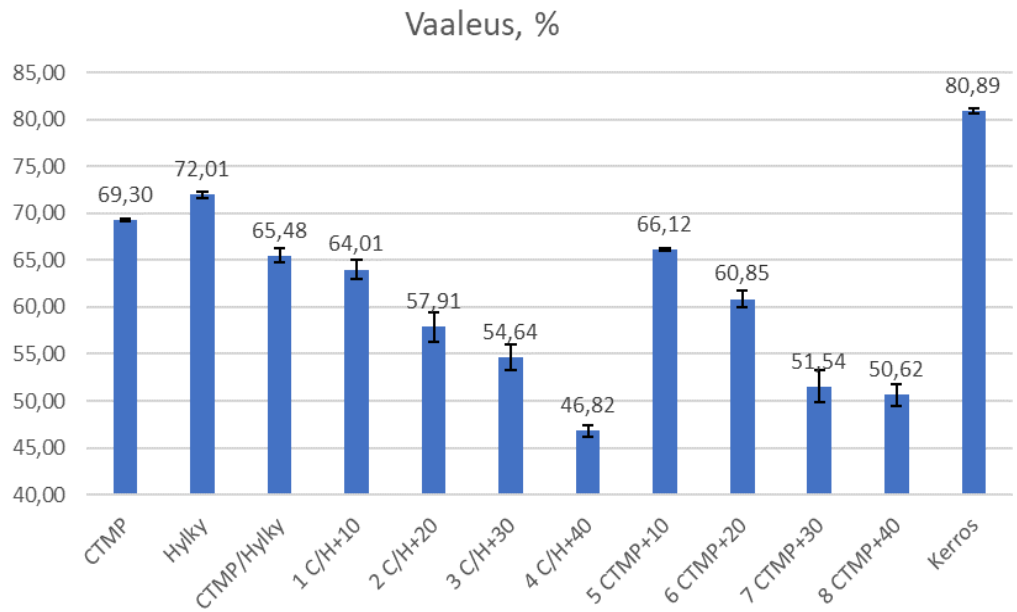


Kuva 22. Kosteuden vaikutus kimmokertoimiin.

## 12.7 Optiset ominaisuudet ja värianalyysi

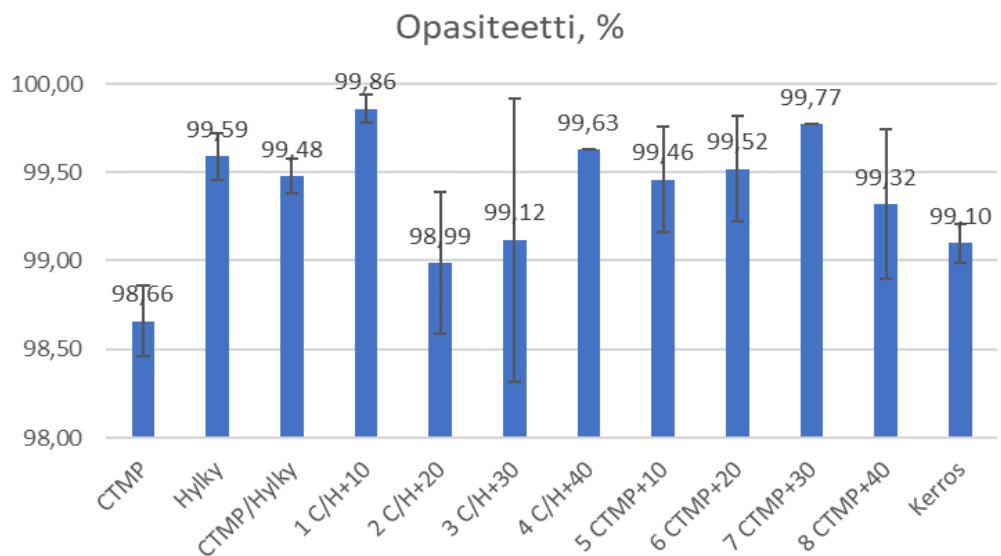
Paperin sanotaan olevan vaaleaa, silloin kun mahdollisimman suuri osa sille langenneesta valosta heijastuu takaisin (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 101). Silmälle paperi näyttää vaalealta, silloin kun siitä heijastuu vähintään 50–60 % takaisin. ISO-vaaleus on standardin mukaan vaaleuden mitta, joka mitataan aallonpituudella 457nm. (Lehtola 2013, 10) Kuvassa 23 on esitetty eri koepisteiden ISO-vaaleudet. Hampu valkaisuomattomana oli erittäin tummaa ja Kuvasta 23 on nähtävissä se, että hampun lisääminen alensi vaaleutta selvästi. Lisäksi valkaistun koi-vusellun käyttö taustoissa antoi korkeimman vaaleuden.





Kuva 23. Koepisteiden ISO-vaaleudet.

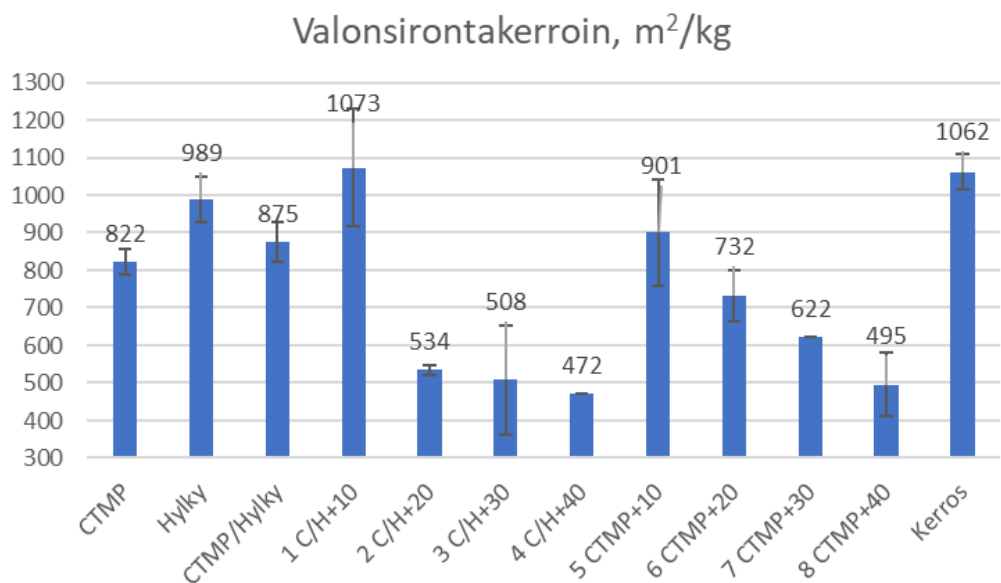
Paperin opasiteetti mitataan välille 0–100, josta 0 on täysin läpinäkyvää paperia ja 100 läpinäkymätöntä. Opasiteetin voidaan katsoa kuvaavan mustan painatuksen näkymistä yhden valkoisen arkin läpi. Paperin neliömassalla on vaikutusta paperin opasiteettiin, korkeampi neliömassa takaa paremman opasiteetin. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 102; Lehtola 2013, 8) Kuvassa 24 on esitetty koesarjojen opasiteetit.



Kuva 24. Koepisteiden opasiteetit.

Huono formaatio ja korkea ilmanläpäisevyys laskevat opasiteettia, kun taas bulkki parantaa opasiteettia. Koepisteellä 1 oli korkein opasiteetti. Kyseisellä koepisteellä oli myös hamppusarjan paras formaatio ja CTMP/Hylky-sarjan korkein bulkki. Koepisteellä 2 puolestaan oli hamppusarjan alhaisin opasiteetti. Lisäksi kyseisin koepisteen formaatio oli huono sekä bulkki oli hamppusarjan alhaisin. Koepisteellä 3 oli hajonta suuri. Koepisteellä 8 oli koepisteistä huonoin formaatio, joten sillä oli myös alhaisempi opasiteetti.

Valonsirontakerroin kuvaa aineen kykyä heijastaa hyvin pienellä neliömassalla valoa takaisin. Dimensionsa mukaisesti se kuvaa paperin sisäistä valoa sirottavaa pinta-alaa painoa kohden. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 102) Hiokkeella on korkea valonsirontakerroin suuren hienoainepitoisuuden vuoksi. Kuvassa 25 on esitetty koepisteiden valonsirontakertoimet. 10 % hampun lisäys nosti valonsirontakerrointa, jonka jälkeen suurimmilla lisäyksillä valonsirontakerroin laski selvästi. Syytä tähän oli hankala selvittää, mutta on mahdollista, että hampun hienoaines on sitoutumiskykyisempää kuin mekaaninen puun hienoaines, ja siten valonsironta heikkeni. Koepisteen 4 ja 7 hajontaa ei pystytty määrittämään, mikä saattoi johtua hampukuitujen flokkaantumisesta.



Kuva 25. Koepisteiden valonsirontakertoimet.

Värianalyysi perustui CIELAB-menetelmään, jossa värikoordinaatit ovat seuraavat:

L = havaittu vaaleus välillä 0–100.

a = punainen/vihreä-akselin värisävy, jossa positiivinen luku viittaa punaiseen ja negatiivinen vihreään väriin.

b = keltainen/sininen-akselin värisävy, jossa positiivinen luku viittaa keltaiseen ja negatiivinen siniseen väriin. (Vaarasalo 1999, 172)

Kyseiset koordinaatit muutettiin RGB-koordinaateiksi, joiden mukaan voitiin väri määrittää Paint-ohjelmalla. Kuvissa 26 ja 27 on esitetty eri massasävyjen värimuutokset.



Kuva 26. CTMP/Hylky-sarjan värivertailu.

Kuvasta 26 voidaan nähdä, että suurimmalla hamppuosuudella väri oli tummin. Kyseisellä koepisteellä oli myös koesarjan huonoin ISO-vaaleus.



Kuva 27. CTMP-sarjan värivertailu.

Kuvasta 27 on vaikeata erottaa kahden viimeisen hamppusarjan värieroa, kuitenkin värikoordinaateissa oli pienet erot ja toisaalta kyseisten koepisteiden ISO-vaaleudet olivat hyvin lähellä toisiaan.

## 12.8 Muovauskoe (3D-venymä)

3D-venymät määritettiin erillisessä pilot-mittakaavan koeajossa. Koeajossa määritettiin syvyys, jonka arkki kestää hajoamatta. Taulukon (Liite I) mukaan pystyttiin syvyys muuttamaan 3D-venymäksi. Taulukossa 16 on esitetty koeajon tulokset ja 3D-venymät.

Taulukko 16. Koesarjojen 3D-venymät.

Koesarja	Syvyys (mm)	Venymä (%)
CTMP	2,5	0,85
Hylky	4,0	2,00
CTMP+Hylky	3,0	1,20
1 C/H+10	3,5	1,60
2 C/H+20	3,5	1,60
3 C/H+30	4,0	2,00
4 C/H+40	5,0	3,00
5 CTMP+10	2,5	0,85
6 CTMP+20	3,0	1,20
7 CTMP+30	4,0	2,00
8 CTMP+40	4,5	2,50
Kerros	3,0	1,20

Mittaukset aloitettiin syvyydestä 6 mm, jossa kaikki arkit rikkoutuivat. Syvyydessä 5 mm säilyä koepiste 4 ehjänä, joten tämä testattiin myös syvyydellä 5,5 mm. Tällä tavalla edettiin koeajossa, kunnes kaikille koepisteille löytyi syvyys, jossa arkki säilyi ehjänä. Kuvissa 28 ja 29 on esitetty 4 koepisteen rikkoutunut ja ehjänä pysynyt arkki. Arkeissa oli myös muutama rajatapaus, jotka testattiin uudemman kerran.

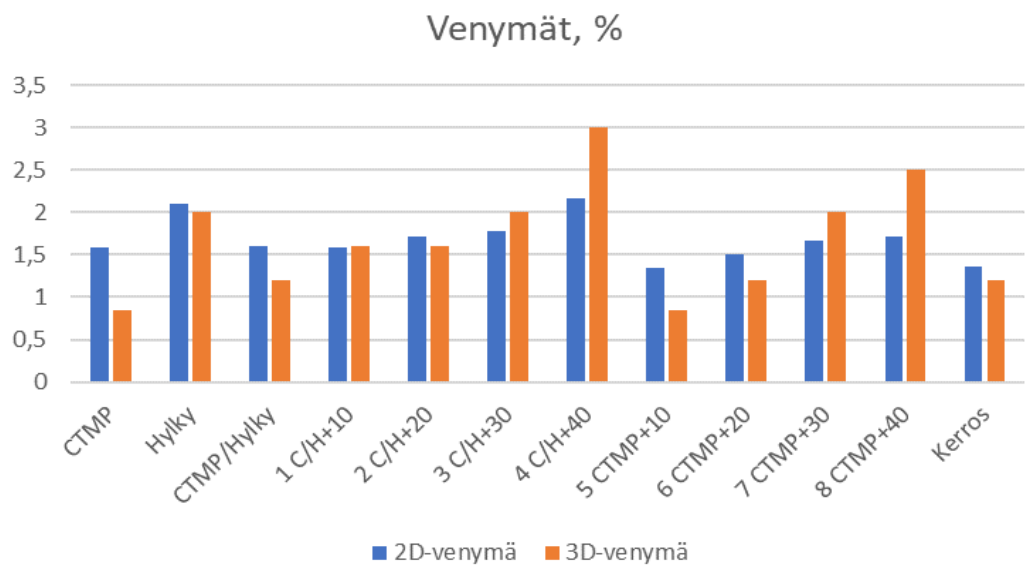


Kuva 28. Rikkoutunut arkki (koepiste 4) syvyyden ollessa 6 mm.



Kuva 29. Ehjä arkki (koepiste 4) syvyyden ollessa 5 mm.

Kuvassa 30 on esitetty koepisteiden 2D- ja 3D-venymät. 2D-venymä oli pienemmillä hammppupitoisuuksilla välillä 1,3–1,7 %, joka olisi 3D-venymänä vastannut 3–3,5 mm syvyyttä. Koska väli ei ollut säädettävissä, kuin 0,5 mm välillä, ei venymiä voi verrata suoraan toisiinsa, mutta vertailu osoittaa selvästi eroavuudet kahden eri venyvyysmittaustuloksen välillä. Lisäksi havaitaan, ettei materiaalin kolmeulotteinen venymä mekaanisessa muovausprosessissa ole ennustettavissa laboratoriossa tehdyllä murtovenymämittauksella.



Kuva 30. Koepisteiden 2D- ja 3D-venymät.

Paras 3D-venymä, 3 %, saavutettiin 4 koepisteen arkilla. Kyseinen koepiste sisälsi CTMP:tä ja hylkyä sekä korkeimman hammppuosuuden (40 %). Alhaisin 3D-venymä oli CTMP:llä, jolla oli vaikutusta koko sarjan 3D-venymiin. Kuitenkin molemmissa koesarjoissa hampun lisääminen paransi merkittävästi 3D-venymää, mikä merkitsee materiaalin konvertoitavuuden paranevan hammppua käytettäessä. CTMP:n venymä oli vain 0,85 %, kun se hammppuosuuksilla 30–40% oli 2–3 %. Voidaan siis sanoa, että korkeimmilla hammppuosuuksilla 3D-venymä oli kolminkertainen verrattuna referenssiarkkeihin.

### 13 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tutkia kuituhampun soveltuvuutta paperiteollisuuden raaka-aineena. Kirjallisuusosassa käytiin läpi yleisesti non-wood-kuitujen ominaisuuksia, käyttöä paperiteollisuudessa sekä käyttömahdollisuuksia. Kirjallisuusosan pääpaino oli kuitenkin kuituhampun käytössä, lisäksi sivutettiin yleisesti hyötyhampun käyttömahdollisuuksia. Non-wood-kuituja ja kuituhamppua käytetään paperiteollisuudessa raaka-aineena, mutta pääasiassa edelleen Aasiassa, jossa puunsaatavuus ei vastaa kasvavan paperiteollisuuden tarvetta. Lisäksi Aasiassa ja Kiinassa ovat non-wood-kuidut suhteellisen helposti ja läheltä saatavissa. Suurin ongelma, erityisesti Kiinassa, on ollut pienten non-wood-tehtaiden kyky vastata kiristyneisiin ympäristövaatimuksiin. Non-wood-sellutehtaiden kemikaalientalteenotto-prosessin puutteellisuuksilla on suora yhteys ympäristöpäästöihin. Kiinan hallitus onkin viimeisten vuosikymmenien aikana sulkenut useita, erityisesti pieniä, non-wood-tehtaita. Non-wood-kuitujen käyttöä paperiteollisuudessa kuitenkin puoltaa niiden keskimääräisesti alhaisemmat ligniinipitoisuudet sekä se, että osaa on saatavilla maatalousjätteistä, jolloin ympäristötehokkuus korostuu. Lisäksi niinikuiduilla, erityisesti hampulla ja pellavalla, on hyvät lujuusominaisuudet, johtuen pitkistä ja vahvoista kuiduista.

Kuituhampun käyttömahdollisuuksia on jonkin verran tutkittu. Erityisesti Kanada on viime aikoina kiinnostunut kuituhampun käyttömahdollisuuksista paperiteollisuudessa. Lisäksi Kiinassa on tehty tutkimuksia non-wood-kuitujen käytöstä paperiteollisuudessa, kyseinen materiaali oli tosin saatavilla vain Kiinaksi. Vaikkakin tutkimuksia oli jonkin verran tehty, ei löydettävissä ollut selkeitä tutkimustuloksia hampukuidun käytöstä ja mahdollisuuksista paperin ja kartongin raaka-aineena. Erityisesti kuituhampun mekaaninen kuiduttaminen ja kyseisen massan ominaisuudet olisivat olleet oleellista tietoa diplomityötä ajatellen. Suomessa tehdyt tutkimukset ja opinnäytetyöt liittyivät lähinnä hyötyhampun viljelymahdollisuuksiin ja käyttökohteisiin. Pienimuotoisia hyötyhampun koekasvatuksia Suomessa on viime vuosikymmenten aikana ollut useampi. Kirjallisuusosion perusteella voitiin kuitenkin olettaa, että erityisesti niinikuiduilla olisi positiiviset vaikutukset arkkien lujuusominaisuuksiin.

Kirjallisuusosan tarkoituksen oli selvittää non-wood-kuitujen ominaisuudet sekä käyttöä ja mahdollisuudet paperiteollisuudessa. Kuituhamppuun kirjallisuusosassa syvennyttiin tarkemmin. Kirjallisuusosassa selvitettiin hyötyhampun ominaisuuksia, historiaa, käyttökohteita, käyttöä paperiteollisuudessa sekä kuituhampun käsittelyprosessia viljelystä korjuuseen. Lisäksi käsiteltiin lyhyesti non-wood-massan valmistuskustannuksia verrattaessa perinteiseen puun selluprosessiin. Kustannuskysymys jäi kuitenkin avoimeksi, johtuen siitä, että tietoa oli vähän saatavilla ja lisäksi tiedot olivat ristiriitaisia. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että non-wood-kuitujen itse kemiallinen kuiduttaminen on edullisempaa, johtuen alhaisemmasta ligniinipitoisuudesta. Ligniinipitoisuus vaikuttaa keittokemikaalien ja valkaisukemikaalien pienempään tarpeeseen. Toisaalta non-wood-kuitujen selluprosessin valmistuskustannukset kasvavat suuremman pesutarpeen sekä kemikaalien talteenottoprosessien haasteiden takia. Lisäksi korkeahko hienoainepitoisuus vaikuttaa paperikoneella suotautuvuuteen, joka puolestaan vaatii esikäsitteilyn tai pidemmän suotautuvuusajan.

Kokeellisessa osiossa valmistettiin massat ja niistä tehtiin koearkit. Koepisteitä työssä oli 12. Arkeista määritettiin yleiset ominaisuudet, formaatio, pintaominaisuudet, lujuusominaisuudet, optiset ominaisuudet sekä tehtiin pilot-koeajo 3D-venymän määrittämiseksi. Kirjallisuusosan pohjalta mielenkiinto kohdistui lujuusominaisuuksiin. Lujuusominaisuudet paranivat hamppuosuuden kasvaessa. Kuitenkin formaatio oli heikko suurilla hamppuosuuksilla, mikä näkyi myös flokkeina arkeissa. Teorian mukaan kuitenkin non-wood-kuidut yleisesti sisältävät paljon hienoainesta, jolla on positiivinen vaikutus formaatioon. Hamppu ei ollut ”puhdasta” ja sen leikkaaminen tarpeeksi lyhyeksi ja tasalaatuiseksi hampuksi saksilla oli käytännössä mahdotonta. Lisäksi jauhatuksen jälkeen hamppu oli likaisen näköistä eli jonkinlainen puhdistaminen olisi ollut paikallaan. Tämä tulee myös ottaa huomioon, mikäli hamppua käytetään pakkauskartongin keskikerroksessa elintarviketeollisuudessa. Elintarvikepakkauksissa hamppu tarvitsee mahdollisesti kemikaalikäsitteilyn, jotta mahdolliset aromi- ja hajuhaitat saadaan poistettua. Hamppumassa teki myös selkeitä suuria kuitukimppuja sekoitettaessa ja kietoutui myös herkästi sekoittimen sekoittajan ympärille. Lisäksi tuloksia tarkasteltaessa olisi päistärepitoisuuden tietäminen ollut oleellista. Kuituanalyysi kuitenkin antoi pientä osviittaa, että päistärettä oli seassa. Selluteollisuudessa kuituhampun päistärepitoisuus on



noin 5–15 %. Lujuusominaisuudet kuitenkin saavutetaan pääasiassa niinikuidun ominaisuuksilla.

Tässä työssä käytetty kuituhamppu oli kevätkorjattua hampppua, jolla on todettu olevan selvästi tai jopa 50 % huonommat lujuusominaisuudet kuin syyskorjatulla kuituhampulla. Mielenkiintoista olisi ollut verrata tämän työn tuloksia syyskorjattuun hampppuun. Koearkeissa korkein hampuppitoisuus oli 40 %, jolloin lujuusominaisuudet olivat keskimäärin parhaimmat. Arkkien tekovaiheessa todettiin, että maksimihamppumäärä, jolla arkit pystyttiin valmistamaan, oli 40 %. Kyseisellä hamppuosuudella hidastui suotautuvuus jo selvästi. Suurempia hamppuosuuksia olisikin oleellista tutkia jatkossa. Lisäksi työssä ei arkkien valmistuksessa käytetty lisäaineita, kuten esimerkiksi massatärkkelystä. Kuituhampun paperikemiallisista ominaisuuksista ei löytynyt kirjallisuudesta tietoa. Paperikemia on yksi merkittävimmistä asioista, paperin ja kartongin valmistuksessa, joka vaatisi lisäselvitystä. Lisäksi olisi hyvä tutkia kuituhampun mekaanista prosessointia paperiteollisuuteen. Kemiallisista keittomenetelmistä löytyikin hyvin tietoa, johtuen siitä, että non-wood-kuituja valmistetaan nimenomaan kemiallisin menetelmin. Pulpperointikoheet oli tarkoitus tehdä tässä diplomityössä, mutta olosuhteiden pakosta ne jäivät tekemättä. Pulperoitavuutta olisi kuitenkin hyvä tutkia jatkossa. Lähes kaikki non-wood-kuidut tarvitsevat esikäsitteilyprosesseja ennen kuin niitä voidaan käyttää raaka-aineena paperiteollisuudessa. Kuituhampulla tämä käytännössä tarkoittaa niinikuitujen erottamista korresta ja päistäreestä. Niinikuitujen osuus hampbukorresta on noin 30 %. Non-wood-kuitujen varastointi ja kuljetus täytyy myös ottaa huomioon. Varastokapasiteetin täytyy olla tarpeeksi suuri, jotta voidaan taata ympärivuotinen raaka-aineen saanti. Lisäksi hamppukuitua ei ole taloudellisesti järkevää kuljettaa pitkiä matkoja, joten viljelmien olisi hyvä olla mahdollisimman lähellä tehdasta.

Taivekartongin tärkeimpiin ominaisuuksiin lukeutuvat lujuus, paksuus, painettavuus, elintarvikekelpoisuus ja taivutusjäykkyys. Hampun lisäys keskimäärin laski bulkkisuutta hieman, vaikkakin korkein bulkki saatiin pienellä hamppulisäyksellä. Suuremmilla hampuppitoisuuksilla formaatio heikkeni selvästi, joka näkyi myös lujuusominaisuuksien hajonnoissa sekä erityisesti vetolujuudessa. Repäisylujuusindeksi kasvoi merkittävästi suuremmilla hamppuosuuksilla ja oli jopa kolme kertaa

korkeampi kuin hamputtomilla referenssiarkeilla. Vetolujuusindeksi kaksinkertais-  
tui suuremmalla hamppuosuudella CTMP-sarjassa, mitä voi pitää merkittävänä pa-  
rannuksena. CTMP/Hylky-sarjassa kartonkihylyllä itsessään on korkeahko vetolu-  
juus, mutta tässäkin sarjassa vetolujuusindeksi kasvoi huomattavasti. Vaaleus laski  
hampun lisäyksen myötä. Hamppu oli valkaisematonta ja väriltään todella tummaa.  
Jatkossa olisikin syytä perehtyä tarkemmin hamppukuidun valkaisuun, sillä havai-  
tut värimuutokset olivat kiistämättä todella merkittäviä. Taivutusjäykkyyttä tässä  
työssä tarkasteltiin taivutusjäykkyyksien perusteella. Hampun lisäys paransi  
taivutusjäykkyyttä ja paras taivutusjäykkyys oli suurimmalla hamppuosuudella.  
Muovautuvuuskoeajon perusteella hamppukuiduilla oli myös positiivinen vaikutus  
3D-venymään. 3D-venymä suurimmilla hamppuosuudella oli yli kolminkertainen  
verrattuna pelkkään CTMP:hen.

Työn tarkoituksena oli tutkia kuituhampun lisäyksen vaikutusta taivekartongin kes-  
kikerroksen paperitekniisiin ominaisuuksiin. Kirjallisuuden pohjalta voitiin olettaa,  
että hampun niinikuiduilla olisi positiivinen vaikutus arkkien lujuusominaisuuksiin.  
Kokeellinen osuus vahvisti hyvin kyseisen ennako-oletuksen. Työn tulosten pe-  
rusteella voidaankin sanoa, että kuituhampulla on merkittävät vaikutukset nimen-  
omaan lujuusominaisuuksiin. Käytännössä parhaimmat tulokset saavutettiin kor-  
keimmilla hamppuosuuksilla. Joissakin mittauksessa 30 ja 40 osuuksien ero oli  
vielä suuri, joten optimaalista hamppuosuutta ei tässä työssä pystytty määrittämään.  
Voidaan kuitenkin sanoa, että hamppukuitu soveltuu erityisesti sellaisiin tuotteisiin,  
joilta vaaditaan korkeita lujuusominaisuuksia. Kyseinen diplomityö oli vain pinta-  
raapaisu kuituhampun käyttömahdollisuuksista paperiteollisuudessa, jonka tulokset  
olivat lupaavia, mutta jatkotutkimuksia aiheista olisi syytä tehdä.

## LÄHDELUETTELO

- Adriaanse, M. & Morsink, H. 2007. Non-Wood Fiber for Papermaking. 36 sivua.
- Alava, M. & Niskanen, K. 2008. *In-plane tensile Properties*. Paper Physics. Papermaking Science and Technology. Book 16. 2 painos. Niskanen, K. (toim.). Jyväskylä: Paperi ja Puu. s. 182–223.
- Antila, H. 2008. Hylynkäsittelyn ja annostelun vaikutus kartongin laatuun. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kemiantekniikan osasto.
- Arctic Fiber Company Oy. 2013 Liotusmenetelmät sekä cottonisoinnin ja peruskuitujen valmistamisen menetelmät. Design-ajattelu ja kuituhampun jatkojalostushanke. Juankosken kaupunki.
- Ashori, A. 2006. Nonwood Fibers – A Potential Source of Raw Material in Papermaking, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, nro 45, s. 1133–1136.
- Bowyer, J. 2004. Industrial Hemp (*Cannabis sativa L.*) as a Papermaking Raw Material in Minnesota: Technical, Economic, and Environmental Considerations. University of Minnesota. Department of Wood & Paper Science.
- Carus, M., Karst, S., Kauffman, A., Hobson, J. & Bertucelli, S. 2013. The European Hemp Industry: Cultivation, Processing and Applications for Fibres, Shivs and Seeds. European Industrial Hemp Association. s. 1–9.
- Carus, M., Piotrowski, S. & Partanen, A. 2017. Survey on Prerequisites for Utilizing Hemp in a Cardboard or Paper Mill in Finland. Hanke 16664. Kuopion kaupunki.
- Danielewicz, D. & Surma-Ślusarska, B. 2017. Properties and Fibre Characterisation of Bleached Hemp, Birch and Pine Pulps: a Comparisation. *Cellulose*. nro 24. s. 5173–5186.

Farmit. 2017. Öljyhampun tuotantoa mahdollisuus lisätä. Saatavissa: <https://www.farmit.net/erikoiskasvit/2017/11/07/oljyhampun-tuotantoa-mahdollisuus-lisata>. [viitattu: 31.07.2018]

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2018. Forestry Production and Trade. Saatavissa: [www.fao.org/faostat/en/#data/FO](http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO). [viitattu: 20.04.2018].

Germgård, U. 2011 *Fibrelines*. Chemical Pulping: Fibre Chemistry and Technology. Papermaking Science and Technology. Book 6 part 1. 2 painos. Fardim, P. (toim.). Porvoo: Paperi ja Puu. s. 676–724.

Gustafsson, J. 2011 *Pulping*. Chemical Pulping: Fibre Chemistry and Technology. Papermaking Science and Technology. Book 6 part 1. 2 painos. Fardim, P. (toim.). Porvoo: Paperi ja Puu. s. 187–381.

Hafez, K. 2011. Kosteuden ja lämpötilan vaikutus paperin kriittisiin ominaisuuksiin. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Paperitekniikan koulutusohjelma.

Hagman, A. & Nygård, M. 2012. Investigation of Sample-size Effects on In-plane Tensile Testing of Paperboards. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. nro 2. s. 295–304.

Hammett, A, Youngs, R, Sun, X & Chandra, M. 2001. Non-Wood Fiber as a Alternative to Wood Fiber in China's Pulp and Paper Industry. *Holzforschung*. nro 55. s. 219–224.

Heitner, C. 1993. Light-Induced Yellowing of Wood-Containing Papers. Pulp and Paper Research Institute of Canada. 24 sivua.

Hemprefine. 2018. Kuituhampun viljelyn edut. Saatavissa: <https://www.hemprefine.fi/projects/kuituhampun-viljelyn-edut>. [viitattu: 31.07.2018]

Hurter, R. 2001. Nonwood Plant Fiber Uses in Papermaking. Nonwood Fibers Short Course Notes. 7 sivua.

Hägglom-Ahnger, U. & Komulainen, P. 2005. Paperin ja kartongin valmistus. Kemiallinen metsäteollisuus II. Jyväskylä: Opetushallitus.

Ikonen, J., Kilpeläinen, J. & Puhakka-Tarvainen, H. 2015. Kuituhampun jalostuksen mahdollisuudet Suomessa. Joensuu: Karelia-ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97606/B42.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Ikonen, J. 2015. Kuituhampun kasvatuksen ja jalostuksen liiketoimintamallit. Opin näytetyö. Karelia-ammattikorkeakoulu. Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma.

Joensuu, J. 2017. Kaksoiskartiojauhimen toiminnan parantaminen havupuumassan jauhatuksessa hienopaperikoneella. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikan osasto.

Kainulainen, M. & Söderhjelm, M. 1999. *End-use Properties of Packaging papers and boards*. Pulp and Paper Testing. Papermaking Science and Technology. Book 17. Levlin, J-E. & Söderhelm, L. (toim.). Jyväskylä: Fapet. s. 217–228.

Kajanto, I. 2008. *Structural Mechanics of paper and board*. Paper Physics. Papermaking Science and Technology. Book 16. 2 painos. Niskanen, K. (toim.). Jyväskylä: Paperi ja Puu. s. 230–260.

Kamoga, O. L.M., Byaruhanga, J. K., & Kirabira J.B. 2013. A Review on Pulp Manufacture from Non Wood Plant Materials. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, Vol. 4 nro 3, s. 144–148.

Kane, M. 2000. Problems Getting fiber? Hemp is at Hand. *Materials Science & Engineering Database*, nr. 42. s. 33–35.

Karhuketo, H., Seppälä, M.J., Törn, T. & Viluksela, P. 2004. Paperin ja kartongin jalostus. Kemiallinen metsäteollisuus III. 2 painos. Helsinki: Opetushallitus.

Karlsson, H. 2011. Online Standardized Measurements of Pulp and Stok. *Appita Annual Conference & Exhibition*. 9 sivua.

Kiviranta, A. 2000. *Paperboard grades*. Paper and Board Grades. Papermaking Science and Technology. Book 18. Paulapuro, H. (toim.). Fapet: Jyväskylä. s. 54–72.

Laurila, A. 2013. Hamppukuitu puupohjaisten paperimassojen armeerauksessa. Insinööriyö. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Metsätalouden koulutusohjelma.

Lehtola, J. 2013. Täyteaineiden optiset ominaisuudet. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Paperi-, tekstiili- ja kemiantekniikan koulutusohjelma.

Leminen, A., Johansson, A, Lindholm, J., Gullichsen, J. & Yilmaz, Y. 1996. Non-Wood Fibres in Papermaking: Literature Review. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Tiedotteita 1779.

Levlin, J-E. 1999. *General Physical Properties of Paper and Board*. Pulp and Paper Testing. Papermaking Science and Technology. Book 17. Levlin, J-E. & Söderhelm, L. (toim.). Jyväskylä: Fapet. s. 137–159.

Luokkakallio, J. 2013. Hamppukuidun jalostusprosessit: Mekaanisen kuidutuksen menetelmät -selvitystyö. Design-ajattelu ja kuituhampun jatkojalostushanke. Juankosken kaupunki.

Lyytikäinen, J. 2015. Kartongin fysikaalisten ominaisuuksien vaikutus muovautuvuuteen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kemiantekniikan koulutusohjelma.

Madakadze, I.C., Radiotis, T., Li, J., Goel, K. & Smith, D.L. 1999. Kraft Pulping Characteristics and Pulp Properties of Warm Season Grasses. *Bioresource Technology*, nro 69, s. 75–85.

Malachowska, E., Prsybysz, P., Dubowik, M., Kucner, M. & Buzala K. 2015. Comparison of Papermaking Potential of Wood and Hemp Cellulose Pulps. *Forestry and Wood Technology*, nro 91, s. 134–137.

Marques, G., Rencoret, J., Gutiérrez, A. & del Rio, J.C. 2010. Evaluation of the Chemical Composition of Different Non-woody Plant Fibers Used for Pulp and Paper Manufacturing. *The Open Agriculture Journal*, nro 4, s. 93–101.

Miao, C., Hui, L-F., Liu, Z. & Tang, X. 2014. Evaluation of Hemp Root Bast as a New Material for Papermaking. *BioResources*. nro 9. s. 132–142.

Mohieldin. S.D. 2014. Pretreatment Approaches in Non-Wood Plants for Pulp and Paper Production: A Review. *Journal of Forest Products & Industries*, nro 3, s. 84–88.

MultiHemp: Hemp: A Natural Biorefiner. 2016. Saatavissa: [www.multihemp.eu](http://www.multihemp.eu) [viitattu: 16.04.2018].

Müssig, J. & Hughes, M. 2012. *Reinforcements: fibres*. Flax and Hemp Fibres: a Natural Solution for the Composite Industry. Pariisi: European Confederation of Flax and Hemp.

Mutikainen, H. 2008. Paperin ja kartongin venymä ja venymään vaikuttavat tekijät. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kemianteeniikan osasto.

Nazhad, M.M., Harris, E., Dodson, C.T.J & Kerekes, R.J. 2000. The Influence of Formation on Tensile Strength of Paper Made from Mechanical Pulps. *Tappi Journal*. 9 sivua.

Niskanen, K. & Pakarinen, P. 2008. *Paper Structure*. Paper Physics. Papermaking Science and Technology. Book 16. 2 painos. Niskanen, K. (toim.). Jyväskylä: Paperi ja Puu. s 12–53.

Norokytö, N. 2010. Hyötyhampun käytön haasteet ja mahdollisuudet Suomessa. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu. Kestävän kehityksen osasto.

Premium Board. 2018. Premium Board Finland Oy. saatavissa: <http://www.premiumboard.fi> [viitattu: 23.07.2018].

Ryösö, K. 2005. LTY:n paperitekniikan laboratorion massa- ja arkkitestaushjeet. Kemianteekniikan osasto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Saijonkari-Pahkala, K. 2001. Non-wood Plants as Raw Material for Pulp and Paper. Väitöskirja. Helsingin Yliopisto. Faculty of Agriculture and Forestry.

Sankari, H. 2000. Towards Bast Fibre Production in Finland: Stem and fibre yields and mechanical fibre properties of selected fibre hemp and linseed genotypes. Väitöskirja. Helsingin Yliopisto. Faculty of Agriculture and Forestry.

Sirviö, J. 2008. *Fibers and bonds*. Paper Physics. Papermaking Science and Technology. Book 16. 2 painos. Niskanen, K. (toim.). Jyväskylä: Paperi ja Puu. s 60–88.

Številová, N., Terpáková, E., Čigášová, J., Junák, J. & Kidalová L. 2012. Chemically Treated Hemp Shives as a Suitable Organic Filler for Lightweight Composites Preparing. *Procedia Engineering*. nro 42. s. 948–954.

Suhonen, T. 2013. Fibre Market in Transition. Paper Industry World. Saatavissa: [www.paperindustryworld.com/fibre-market-in-transition/](http://www.paperindustryworld.com/fibre-market-in-transition/) [viitattu: 31.07.2018].

Tanninen, P. Kuva 6. Nuutin syvyyden ja leveyden vaikutus nuuttaukseen. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.



Tanninen, P., Ovaska, S-S., Matthews, S., Mielonen, K. & Backfolk, K. 2017. Utilization of Production-scale Machine in Experimental Fibe Material Converibility Testing Using a Novel Press-forming Tool Set. *BioResources*. nro 12. s. 3030–3042.

Taskinen, J. 2009. Kartongin nuutattavuus. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Paperitekniikan koulutusohjelma.

Tomppo, L., Lappalainen, R., Turpeinen, T. & Jokela, L. 2018. Kuituhampun kokonaisvaltainen käyttö. Hankenumero 16664. Loppuraportti. Itä-Suomen Yliopisto & Juankosken Kaupunki.

Vaarasalo, J. 1999. *Optical properties*. Pulp and Paper Testing. Papermaking Science and Technology. Book 17. Levlin, J-E. & Söderhelm, L. (toim.). Jyväskylä: Fapet. s. 163–180.

Vishtal, A., Rousu, P., Hultholm, T., Turku, K., Paananen, P. & Käyhkö, J. 2011. Drainage and Retention Enhancement of a Wheat Straw-containing Pulp Furnish Using Microparticle Retention Aids. *BioResources*. nro 6. s. 791–806.

Willför, S. 2011. *Raw Materials*. Chemical Pulping: Fibre Chemistry and Technology. Papermaking Science and Technology. Book 6 part 1. 2 painos. Fardim, P. (toim.). Porvoo: Paperi ja Puu. s. 16–173.

Zhao, F. 2017. Comparison between non-wood fiber paper and Finnish traditional wood-fiber paper by mechanical properties. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikan osasto.

## **LIITELUETTELO**

Liite I	Muuntotaulukko
Liite II	Mittauspöytäkirjat
Liite III	Arkkikuvat

**LIITE I, 1 (1)****Muovauskokeen muuntotaulukko**

Elongation values are estimated on basis of tensile strength tests performed to commercial materials. Possible material sliding is not included in presented values.	
<b>Forming depth [mm]</b>	<b>Elongation [%]</b>
1	0,1
2	0,5
3	1,2
4	2,0
5	3,0
6	4,2
7	5,5
8	6,9
9	8,3
10	9,9
11	11,5
12	13,1
13	14,8
14	16,4
15	18,2
16	19,9
17	21,7
18	23,5
19	25,3
20	27,1
21	28,9
22	30,7
23	32,5
24	34,4
25	36,2

**LIITE II, 1 (12)****Mittauspöytäkirjat****CTMP**

<b>Paino (g)</b>	<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
5,64	207	660	314
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Repäisyindeksi (mNm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>
3,18	11,34	11,99	0,516
<b>Taivutusjäykkyys (mNm)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>3D-venymä (%)</b>	<b>Ominaisformaatio (√g/m<sup>2</sup>)</b>
5,6	1,59	0,85	0,98
<b>Märkäljuudet T 23,8 °C, kosteus 91,0 %</b>			
<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>	<b>Kuiva-ainepitoisuus (%)</b>
6,52	1,76	0,308	79,73
<b>Vaaleus (%)</b>	<b>Keltaisuus (%)</b>	<b>Opasiteetti (%)</b>	<b>sw (m<sup>2</sup>/kg)</b>
69,30	19,97	98,66	822,15
<b>kw (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (µm/Pas)</b>	<b>Karheus (ml/min)</b>	<b>Cobb30 (g/m<sup>2</sup>)</b>
15,57	61,44	2541	699,78

**LIITE II, 2 (12)****Mittauspöytäkirja****Hylky**

<b>Paino (g)</b>	<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
5,14	189	466	405
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Repäisyindeksi (mNm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>
2,47	8,32	18,32	0,982
<b>äivutusjäykkyys (mNm)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>3D-venymä (%)</b>	<b>Ominaisformaatio (vg/m<sup>2</sup>)</b>
4,81	2,11	2	0,67
<b>Märkälujuudet T 23,8 °C, kosteus 91,0 %</b>			
<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>	<b>Kuiva-ainepitoisuus (%)</b>
7,1	2,75	0,353	81,14
<b>Vaaleus (%)</b>	<b>Keltaisuus (%)</b>	<b>Opasiteetti (%)</b>	<b>sw (m<sup>2</sup>/kg)</b>
72,01	12,18	99,59	989,36
<b>kw (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (µm/Pas)</b>	<b>Karheus (ml/min)</b>	<b>Cobb30 (g/m<sup>2</sup>)</b>
25,82	17,83	1969	407,54

**LIITE II, 3 (12)****Mittauspöytäkirjat****CTMP/Hylky:65/35**

<b>Paino (g)</b>	<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
5,62	206	597	346
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Repäisyindeksi (mNm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>
2,89	9,62	15,71	0,73
<b>faivutusjäykkyys (mNm)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>3D-venymä (%)</b>	<b>Ominaisformaatio (√g/m<sup>2</sup>)</b>
7,73	1,61	1,2	0,94
<b>Märkäljuudet T 23,8 °C, kosteus 91,0 %</b>			
<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>	<b>Kuiva-ainepitoisuus (%)</b>
6,1	1,87	0,326	79,22
<b>Vaaleus (%)</b>	<b>Keltaisuus (%)</b>	<b>Opasiteetti (%)</b>	<b>sw (m<sup>2</sup>/kg)</b>
65,48	20,43	99,48	874,93
<b>kw (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (µm/Pas)</b>	<b>Karheus (ml/min)</b>	<b>Cobb30 (g/m<sup>2</sup>)</b>
26,41	39,55	2427	568,80

**LIITE II, 4 (12)****Mittauspöytäkirjat****1. CTMP/Hylky + 10 osaa hamppua**

<b>Paino (g)</b>	<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Paksuus (μm)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
5,61	206	593	348
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Repäisyindeksi (mNm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>
2,88	14,28	15,72	0,771
<b>Taivutusjäykkyys (mNm)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>3D-venymä (%)</b>	<b>Ominaisformaatio (√g/m<sup>2</sup>)</b>
6,43	1,59	1,6	1,23
<b>Märkälujuudet T 23,8 °C, kosteus 91,0 %</b>			
<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>	<b>Kuiva-ainepitoisuus (%)</b>
9,36	2,17	0,457	81,11
<b>Vaaleus (%)</b>	<b>Keltaisuus (%)</b>	<b>Opasiteetti (%)</b>	<b>sw (m<sup>2</sup>/kg)</b>
64,01	18,82	99,86	1072,86
<b>kw (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (μm/Pas)</b>	<b>Karheus (ml/min)</b>	<b>Cobb30 (g/m<sup>2</sup>)</b>
42,35	32,43	2503	551,17

**LIITE II, 5 (12)****Mittauspöytäkirjat****2. CTMP/Hylky + 20 osaa hamppua**

<b>Paino (g)</b>	<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
6,37	234	619	379
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Repäisyindeksi (mNm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>
2,64	15,52	20,33	1,05
<b>Taivutusjäykkyys (mNm)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>3D-venymä (%)</b>	<b>Ominaisformaatio (√g/m<sup>2</sup>)</b>
6,43	1,72	1,6	1,93
<b>Märkäljuudet T 23,8 °C, kosteus 91,0 %</b>			
<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>	<b>Kuiva-ainepitoisuus (%)</b>
7,74	2,35	0,406	78,04
<b>Vaaleus (%)</b>	<b>Keltaisuus (%)</b>	<b>Opasiteetti (%)</b>	<b>sw (m<sup>2</sup>/kg)</b>
57,91	20,87	98,99	533,86
<b>kw (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (µm/Pas)</b>	<b>Karheus (ml/min)</b>	<b>Cobb30 (g/m<sup>2</sup>)</b>
36,14	14,37	2751	612,60



**LIITE II, 6 (12)****Mittauspöytäkirjat****3. CTMP/Hylky + 30 osaa hamppua**

<b>Paino (g)</b>	<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
5,96	219	612	358
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Repäisyindeksi (mNm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>
2,80	25,40	20,83	1,011
<b>Taivutusjäykkyys (mNm)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>3D-venymä (%)</b>	<b>Ominaisformaatio (√g/m<sup>2</sup>)</b>
7,95	1,78	2	1,87
<b>Märkälajuudet T 23,8 °C, kosteus 91,0 %</b>			
<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>	<b>Kuiva-ainepitoisuus (%)</b>
7,32	2,41	0,357	76,48
<b>Vaaleus (%)</b>	<b>Keltaisuus (%)</b>	<b>Opasiteetti (%)</b>	<b>sw (m<sup>2</sup>/kg)</b>
54,64	21,55	99,12	507,80
<b>kw (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (µm/Pas)</b>	<b>Karheus (ml/min)</b>	<b>Cobb30 (g/m<sup>2</sup>)</b>
46,83	15,45	2729	505,57

**LIITE II, 7 (12)****Mittauspöytäkirjat****4. CTMP/Hylky + 40 osaa hamppua**

<b>Paino (g)</b>	<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
6,15	226	548	414
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Repäisyindeksi (mNm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>
2,43	25,43	26,88	1,387
<b>Taivutusjäykkyys (mNm)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>3D-venymä (%)</b>	<b>Ominaisformaatio (√g/m<sup>2</sup>)</b>
5,41	2,16	3	2,10
<b>Märkälujuudet T 23,8 °C, kosteus 91,0 %</b>			
<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>	<b>Kuiva-ainepitoisuus (%)</b>
15,34	2,92	0,772	82,37
<b>Vaaleus (%)</b>	<b>Keltaisuus (%)</b>	<b>Opasiteetti (%)</b>	<b>sw (m<sup>2</sup>/kg)</b>
46,82	25,62	99,63	472,33
<b>kw (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (µm/Pas)</b>	<b>Karheus (ml/min)</b>	<b>Cobb30 (g/m<sup>2</sup>)</b>
66,25	5,90	2717	581,19

**LIITE II, 8 (12)****Mittauspöytäkirjat****5. CTMP + 10 osaa hamppua**

<b>Paino (g)</b>	<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
5,78	212	690	308
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Repäisyindeksi (mNm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>
3,25	11,44	11,5	0,504
<b>Taivutusjäykkyys (mNm)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>3D-venymä (%)</b>	<b>Ominaisformaatio (√g/m<sup>2</sup>)</b>
6,13	1,34	0,85	1,60
<b>Märkäljuudet T 23,8 °C, kosteus 91,0 %</b>			
<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>	<b>Kuiva-ainepitoisuus (%)</b>
5,32	1,77	0,252	77,93
<b>Vaaleus (%)</b>	<b>Keltaisuus (%)</b>	<b>Opasiteetti (%)</b>	<b>sw (m<sup>2</sup>/kg)</b>
66,12	19,49	99,46	901,12
<b>kw (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (µm/Pas)</b>	<b>Karheus (ml/min)</b>	<b>Cobb30 (g/m<sup>2</sup>)</b>
26,49	60,44	2645	759,73

**LIITE II, 9 (12)****Mittauspöytäkirjat****6. CTMP + 20 osaa hamppua**

<b>Paino (g)</b>	<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
5,89	217	650	333
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Repäisyindeksi (mNm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>
3,01	14,63	15,07	0,666
<b>Taivutusjäykkyys (mNm)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>3D-venymä (%)</b>	<b>Ominaisformaatio (√g/m<sup>2</sup>)</b>
5,79	1,5	1,2	1,50
<b>Märkäljuudet T 23,8 °C, kosteus 91,0 %</b>			
<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>	<b>Kuiva-ainepitoisuus (%)</b>
9,11	1,98	0,418	79,81
<b>Vaaleus (%)</b>	<b>Keltaisuus (%)</b>	<b>Opasiteetti (%)</b>	<b>sw (m<sup>2</sup>/kg)</b>
60,85	20,69	99,52	731,78
<b>kw (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (µm/Pas)</b>	<b>Karheus (ml/min)</b>	<b>Cobb30 (g/m<sup>2</sup>)</b>
37,32	37,42	2568	696,19

**LIITE II, 10 (12)****Mittauspöytäkirjat****7. CTMP + 30 osaa hamppua**

<b>Paino (g)</b>	<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
6,23	229	613	375
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Repäisyindeksi (mNm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>
2,68	28,84	23,7	1,17
<b>Taivutusjäykkyys (mNm)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>3D-venymä (%)</b>	<b>Ominaisformaatio (vg/m<sup>2</sup>)</b>
7,11	1,66	2	2,20
<b>Märkäljuudet T 23,8 °C, kosteus 91,0 %</b>			
<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>	<b>Kuiva-ainepitoisuus (%)</b>
11,14	2,5	0,529	80,54
<b>Vaaleus (%)</b>	<b>Keltaisuus (%)</b>	<b>Opasiteetti (%)</b>	<b>sw (m<sup>2</sup>/kg)</b>
51,54	24,12	99,77	622,27
<b>kw (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (µm/Pas)</b>	<b>Karheus (ml/min)</b>	<b>Cobb30 (g/m<sup>2</sup>)</b>
58,24	10,75	2790	622,24

**LIITE II, 11 (12)****Mittauspöytäkirjat****CTMP + 40 osaa hamppua**

<b>Paino (g)</b>	<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
5,66	208	609	342
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Repäisyindeksi (mNm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>
2,93	32,28	22,2	0,949
<b>Taivutusjäykkyys (mNm)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>3D-venymä (%)</b>	<b>Ominaisformaatio (√g/m<sup>2</sup>)</b>
8,05	1,71	2,5	2,17
<b>Märkäljuudet T 23,8 °C, kosteus 91,0 %</b>			
<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>	<b>Kuiva-ainepitoisuus (%)</b>
8,46	2,46	0,362	75,46
<b>Vaaleus (%)</b>	<b>Keltaisuus (%)</b>	<b>Opasiteetti (%)</b>	<b>sw (m<sup>2</sup>/kg)</b>
50,62	24,6	99,32	494,66
<b>kw (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (µm/Pas)</b>	<b>Karheus (ml/min)</b>	<b>Cobb30 (g/m<sup>2</sup>)</b>
52,28	12,79	2717	606,89

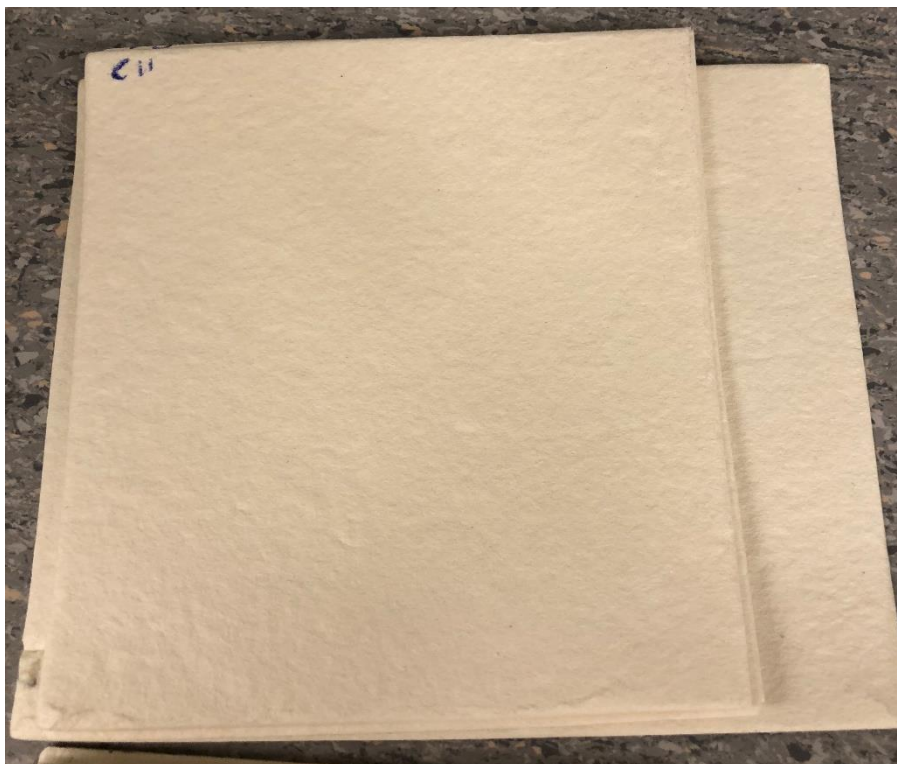
Mittauspöytäkirjat

9. Kerrosdemoarkit

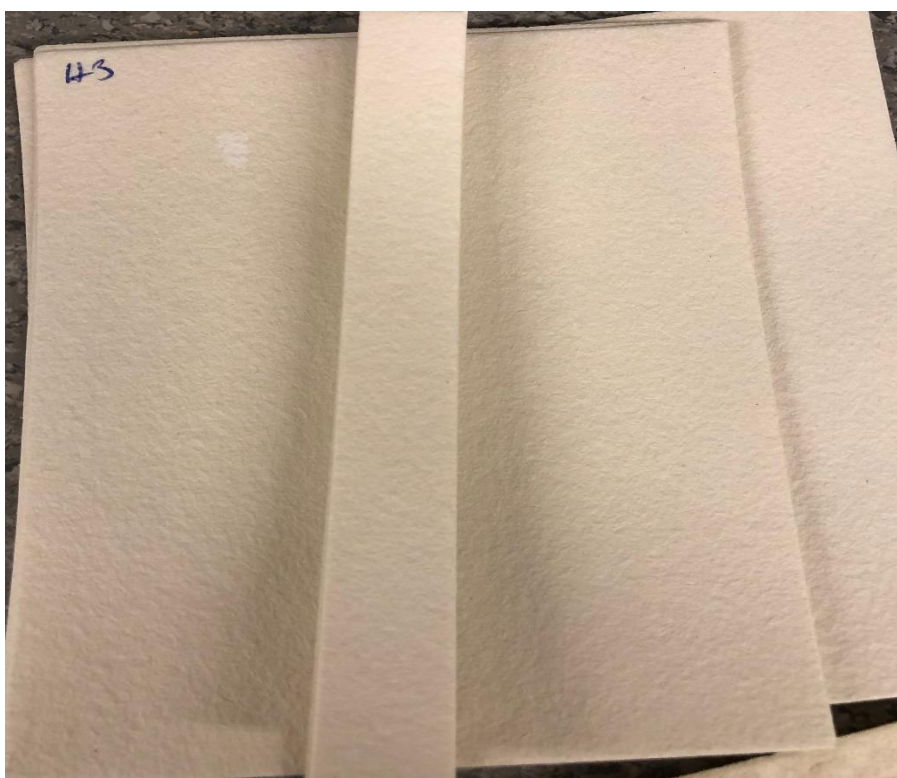
<b>Paino (g)</b>	<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
6,01	221	506	437
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Repäisyindeksi (mNm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>
2,29	13,45	16,07	1,156
<b>Taivutusjäykkyys (mNm)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>3D-venymä (%)</b>	<b>Ominaisformaatio (√g/m<sup>2</sup>)</b>
7,1	1,37	1,2	1,08
<b>Märkäljuudet T 23,8 °C, kosteus 91,0 %</b>			
<b>Vetoindeksi (Nm/g)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>	<b>Kimmokerroin (MPa)</b>	<b>Kuiva-ainepitoisuus (%)</b>
8,66	2,06	0,647	81,98
<b>Vaaleus (%)</b>	<b>Keltaisuus (%)</b>	<b>Opasiteetti (%)</b>	<b>sw (m<sup>2</sup>/kg)</b>
80,89	6,16	99,10	1061,86
<b>kw (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Ilmanläpäisevyys (µm/Pas)</b>	<b>Karheus (ml/min)</b>	<b>Cobb30 (g/m<sup>2</sup>)</b>
13,99	35,10	1845	614,47

**Arkkikuvat**

**CTMP:**



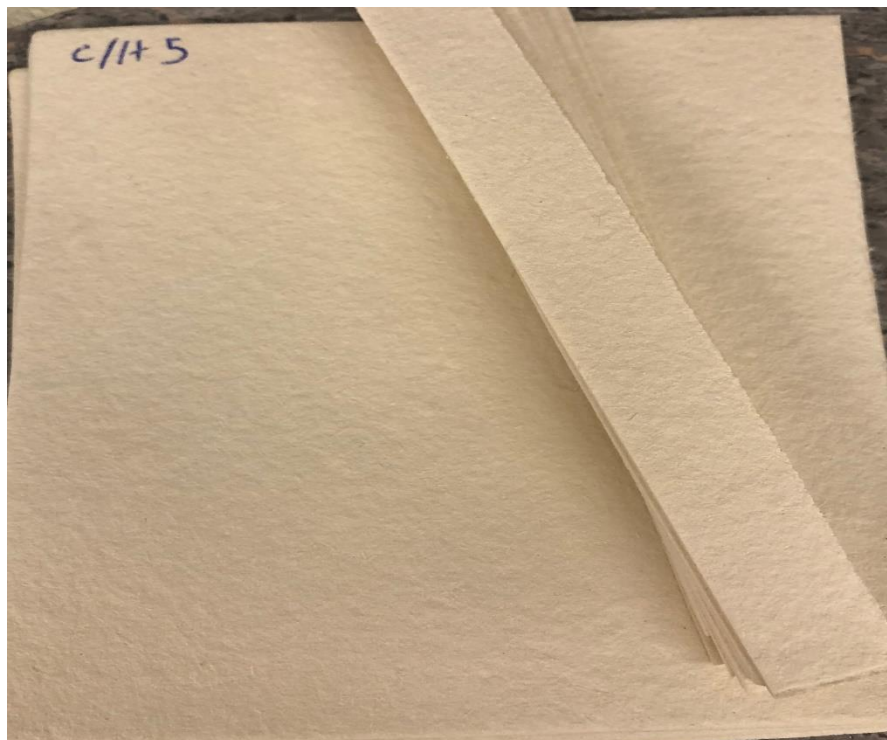
**Hylky:**



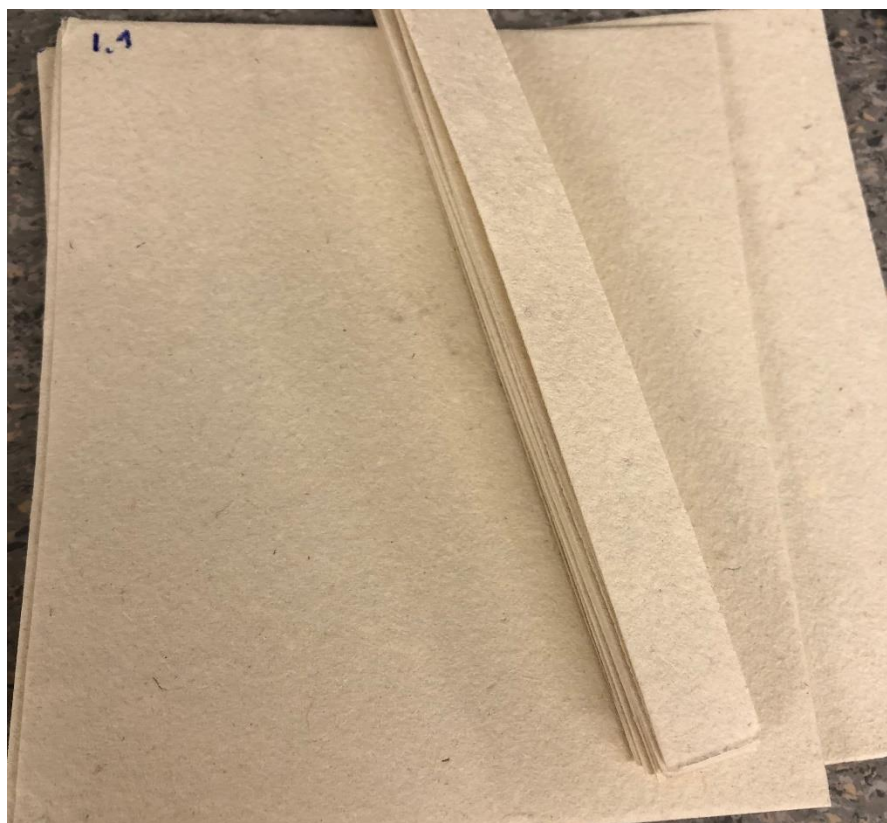


**Arkkikuvat**

**CTMP/Hylky:**

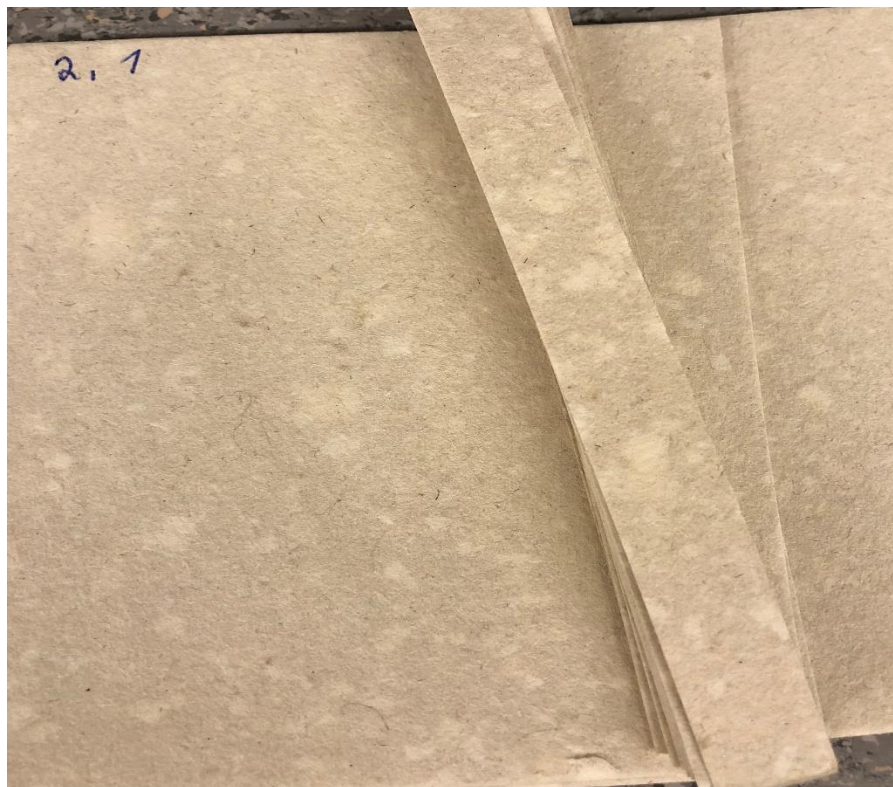


**1 CTMP/Hylky +10 Hamppua:**

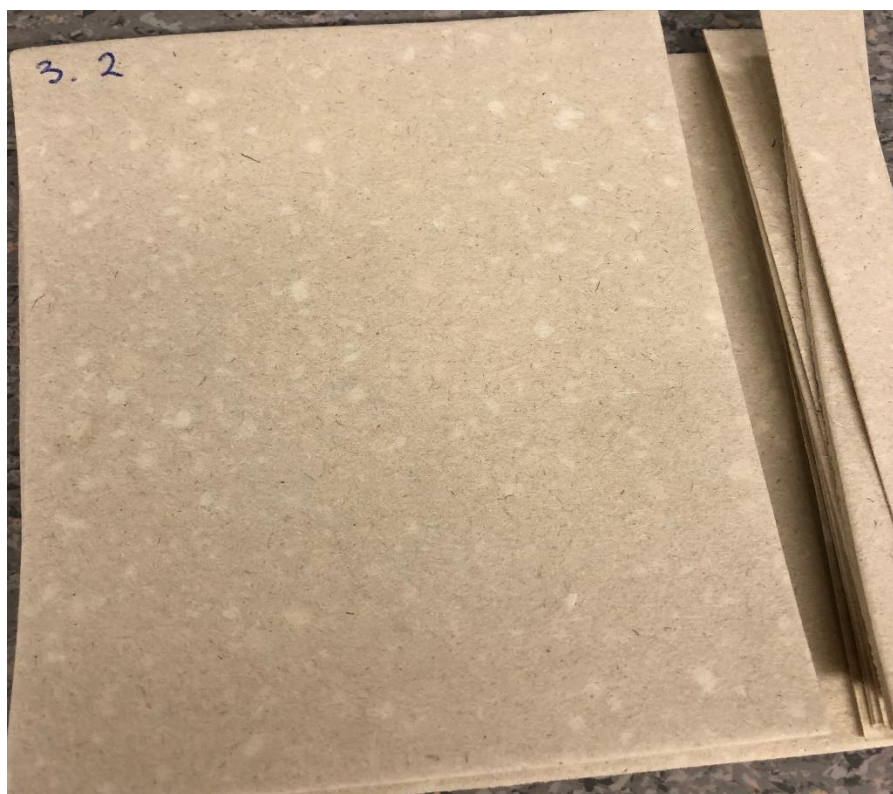


**Arkkikuvat**

**2 CTMP/Hylky + 20 Hamppua:**

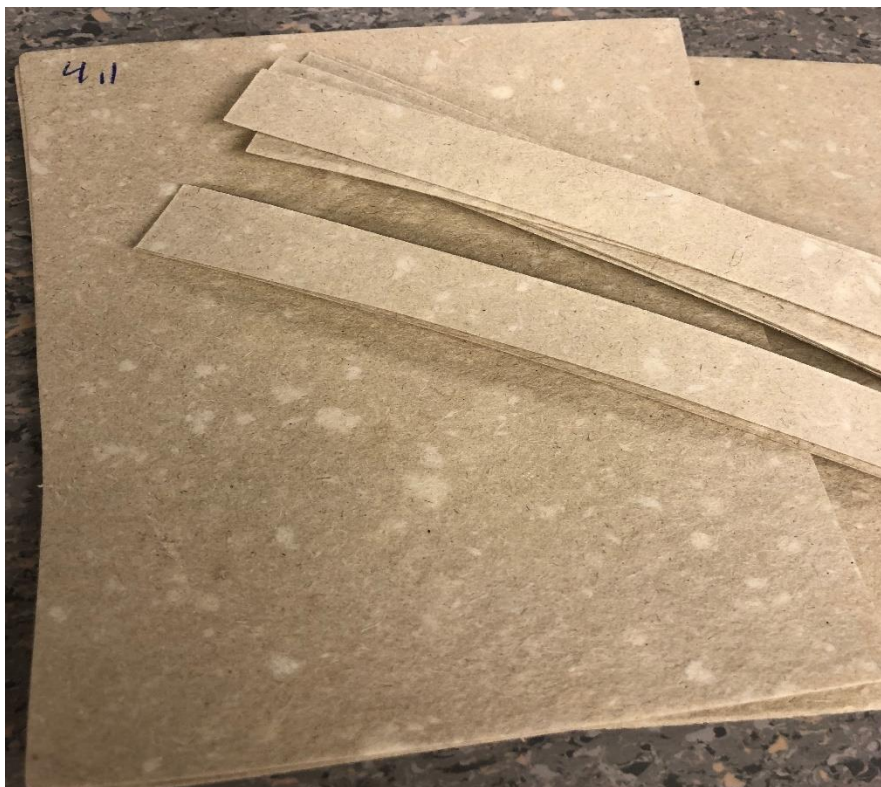


**3 CTMP/Hylky + 30 Hamppua:**

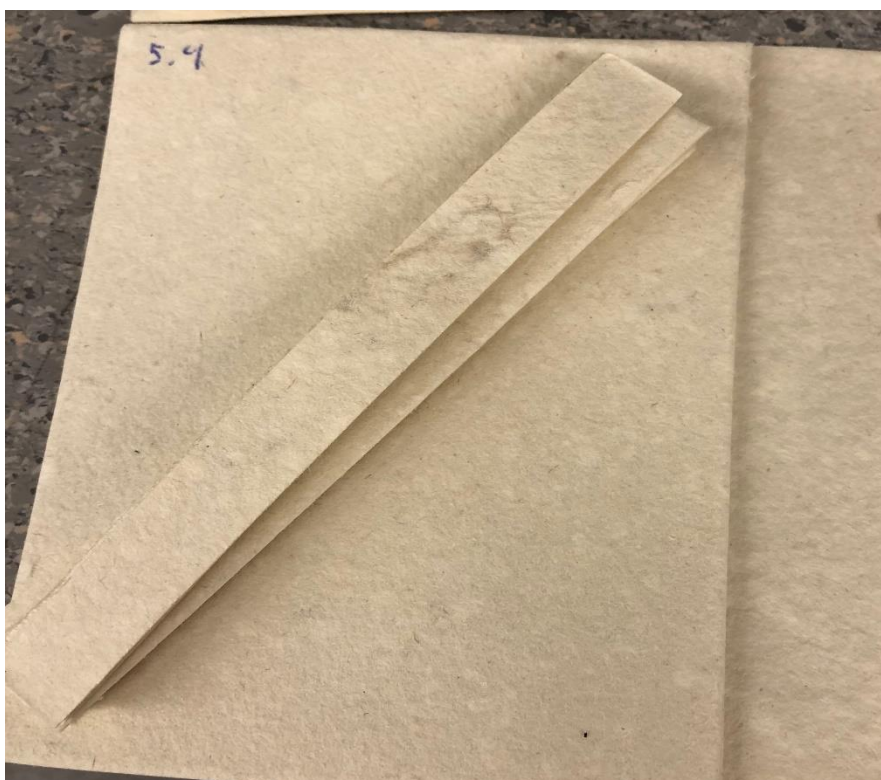


**Arkkikuvat**

**CTMP/Hylky + 40 Hamppua:**

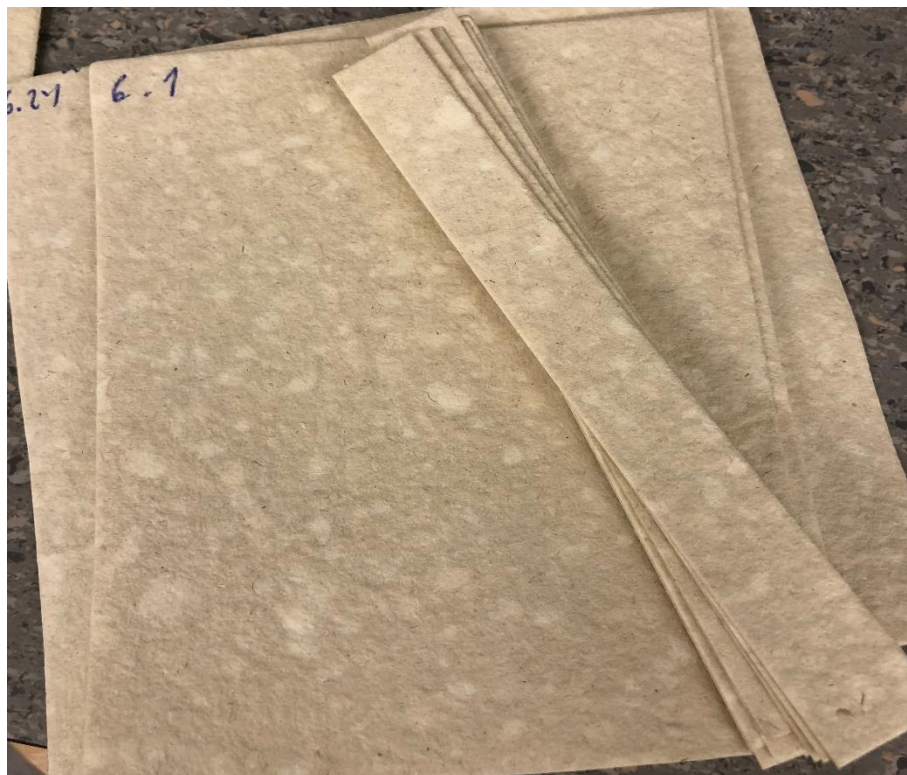


**CTMP + 10 Hamppua:**

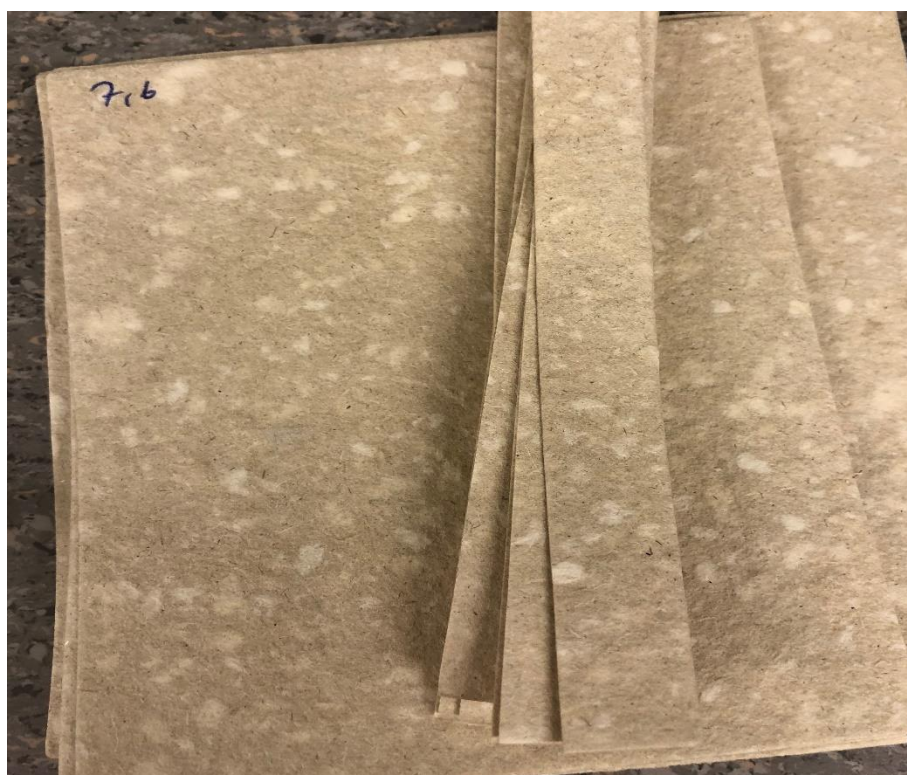


**Arkkikuvat**

**CTMP + 20 Hamppua:**



**CTMP + 30 Hamppua:**



**Arkkikuvat**

**CTMP + 30 Hamppua:**



**Demokerrosarkit:**

