



PÄÄLLYSTEESSÄ KÄYTETYN MFC:N VAIKUTUS KARTONGIN OMINAISUUKSIIN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Kemiantekniikan kandidaatintyö

2025

Nea Laitinen

Tarkastajat: Tutkijatohtori Krista Koljonen

Tutkijatohtori Johanna Lyytikäinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Engineering Science

Kemiantekniikan koulutusohjelma

Nea Laitinen

Päällysteessä käytetyn MFC:n vaikutus kartongin ominaisuuksiin

Kemiantekniikan kandidaatintyö

2025

48 sivua, 14 kuvaa, 5 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Tutkijatohtorit Krista Koljonen ja Johanna Lyytikäinen

Avainsanat: MFC, mikrofibrilloitu selluloosa, kartongin päällystys, mekaaniset ominaisuudet, ilmanläpäisevyys, pinnankarheus

Ympäristötietoisuuden myötä on alettu etsiä vaihtoehtoisia materiaaleja pakkausteollisuuden korvaamaan öljypohjaisia muoveja. Vaihtoehdoksi on noussut kartonki, jonka ominaisuuksia voidaan parantaa erilaisilla päällysteillä. Yksi lupaava materiaali tähän tarkoitukseen on mikrofibrilloitu selluloosa (MFC). MFC:llä päällystetyllä kartongilla on kuitenkin vielä haasteita erityisesti kosteudenkestävyyden osalta.

Tämän työn kirjallisuusosassa tarkastellaan, mitä MFC on materiaalina, miten sitä voidaan valmistaa ja millaisiin ominaisuuksiin se vaikuttaa, kun sitä käytetään paperin ja kartongin päällysteenä. Työn kokeellisessa osassa tutkitaan, miten eri fibrillaatioasteen MFC (X3/X5) vaikuttaa kartongin mekaanisiin ominaisuuksiin. Työssä verrataan MFC-päällystettyjä ja päällystämättömiä kartonkeja sekä tarkastellaan eri olosuhteiden (23°C ja 50 % RH sekä 23°C ja 80 % RH) vaikutuksia niiden ominaisuuksiin.

Tulokset osoittivat, että korkeampi ilmankosteus lisäsi kartongin neliömassaa ja paksuutta, mutta heikensi vetolujuutta ja taivutusvastusta. MFC-päällystys lisäsi kartongin paksuutta ja taivutusvastusta, mutta heikensi vetolujuutta ja repäisylujuutta erityisesti korkeassa ilmankosteudessa. Fibrillaatioaste vaikutti kartongin ominaisuuksiin jossain määrin: MFC X3 tuotti suuremmat arvot repäisylujuudessa, taivutusvastuksessa, ilmanläpäisevyydessä ja pinnankarheudessa, kun taas MFC X5 paransi hieman vetolujuutta. Venymässä ja neliömassassa ei havaittu merkittäviä eroja eri fibrillaatioasteiden välillä. Tulokset olivat osittain yhteneviä aiempien tutkimusten kanssa ja osoittivat, että MFC:llä päällystäminen vaikuttaa kartongin suorituskykyyn sekä positiivisesti että negatiivisesti. Tutkittavaa ja kehitettävää kuitenkin vielä löytyy.

LYHENNELUETTELO

BNC	bacterial nanocellulose, bakteerinanoselluloosa
CNC	cellulose nanocrystal, selluloosananokide
CNF	cellulose nanofibrils, selluloosananofibrillit tai cellulose nanofibers, selluloosananokuidut tai NFC tai MFC
HM-EHEC	hydrophobically modified ethyl(hydroxyethyl) cellulose, hydrofobisesti modifioitu etyyli(hydroksietyyli)selluloosa
KS	machine direction (MD), kartongin konesuunta eli kartonkirainan kulkusuunta kartonkikoneessa
MFC	microfibrillated cellulose, mikrofibrilloitu selluloosa
NFC	nanofibrillated cellulose, nanofibrilloitu selluloosa
PE	polyethylene, polyetyleni
PET	polyethylene terephthalate, polyeteenitereftalaatti
PLA	polylactic acid, polylaktidi eli polymaitohappo
PPWD	packaging and packaging waste directive, pakkausten ja pakkausjätteiden direktiivi
PPWR	packaging and packaging waste regulation, pakkausten ja pakkausjätteiden asetus
PS	cross direction/cross machine direction (CD/CMD), kartongin poikkisuunta eli kartonkirainan kulkusuunnalle 90 asteen kulmassa oleva poikittainen suunta
RH	relative humidity, suhteellinen kosteus
SEM	scanning electron microscope, pyyhkäisyelektronimikroskooppi
TEMPO	2,2,6,6-tetramethyl-1-piperidinyloxy, 2,2,6,6-tetrametyyli-piperidin-1-oksyyli

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	5
2	Kirjallisuuskatsaus.....	7
2.1	Mitä MFC on	7
2.2	MFC:n valmistus.....	10
2.3	MFC:n käyttö papereiden ja kartonkien päällysteenä.....	13
2.4	Aiemmat tutkimukset.....	13
3	Materiaalit ja menetelmät	17
3.1	Näytteiden valmistaminen	17
3.2	Testausmenetelmät.....	19
4	Tulokset	20
4.1	Neliömassa ja paksuus	21
4.2	Vetolujuus ja venymä	24
4.3	Repäisylujuus.....	27
4.4	Taivutusvastus	28
4.5	Muut mittaukset	30
5	Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	33
6	Yhteenveto.....	37
	Lähteet	40

Liitteet

Liite 1. Tehtyjen mittausten lukuarvot.

1 Johdanto

Pakkausteollisuus on tällä hetkellä suuressa murroksessa. Nykyään tuotetuista muoveista lähes 99 % on öljypohjaisia, joista pakkausteollisuus käyttää jopa yli 38 % (Rabnawaz et al., 2017). On siis tärkeää löytää uusia ratkaisuja korvaamaan etenkin elintarvikepakkausten öljypohjaisia muoveja, kuten polyeteenitereftalaattituotteita (PET, eng. polyethylene terephthalate) (Abdenour et al., 2023). Euroopan unioni on muuttanut pakkausjätedirektiivin (PPWD, eng. packaging and packaging waste directive) sitovaksi asetukseksi (PPWR, eng. packaging and packaging waste regulation), joka astui voimaan helmikuussa 2025. Yleisesti asetuksen tavoitteena on vähentää jätteen määrää ja lisätä pakkausten kierrätettävyyttä ja uudelleenkäyttöä. (Nova Institute, 2025.)

Asetukset asettavat paineita pakkausteollisuudelle löytää kestävämpiä ja uudelleenkäytettäviä vaihtoehtoja perinteisille öljypohjaisille muoveille. (Nova Institute, 2025.) Yksi mahdollinen vaihtoehto on selluloosapohjaiset materiaalit, kuten paperi ja kartonki. Niillä on kuitenkin huonommat mekaaniset ja barrierominaisuudet kuin öljypohjaisilla muoveilla. Barrierominaisuuksilla tarkoitetaan materiaalin kykyä estää erilaisten aineiden, kuten rasvan pääsyä materiaalin läpi. Nämä mekaaniset ja barrierominaisuudet ovat välttämättömiä pakkaussovelluksissa riippuen tuotteesta. (Bru et al., 2024.) Yhtenä ratkaisuna tähän on kehitetty kartonkien ja papereiden päällystämistä ympäristöystävällisellä materiaalilla, jolla saadaan luotua ohut kerros, esimerkiksi kartonkien päälle vahvistamaan, mekaanisia ja barrierominaisuuksia.

Mahdollisia päällystysmateriaaleja on öljypohjaiset polymeerit, biopolymeerit, kuten polylaktidi (PLA, eng. polylactic acid), tärkkelyspohjaiset päällysteet sekä selluloosapohjaiset päällysteet, kuten mikrofibrilloitu selluloosa (MFC, eng. microfibrillated cellulose). Näiden käytössä kartonkien päällysteenä on kuitenkin haasteita. Öljypohjaisten polymeeripinnoitteiden ongelmana on se, että ne koostuvat muun muassa vaarallisista haihtuvista orgaanisista yhdisteistä ja petrokemian tuotteista johdetuista polymeereistä, mikä herättää huolta sekä kuluttajien että ympäristön turvallisuudesta ja terveydestä, sillä käytetyt

polymeerit ovat harvoin biohajoavia. (Abdenour et al., 2023.) Biopohjaisten polymeeripinnoitteiden, kuten PLA:n, ongelmana on usein huono lämmönkestävyys, alhaiset barrierominaisuudet, huono iskunkestävyys ja korkeat tuotantokustannukset. Niitä kuitenkin käytetään päällystykseen, sillä ne ovat biohajoavia ja elintarvikekelpoisia eli täyttävät elintarviketurvallisuusstandardit. (Raquez et al., 2013.) Tärkkelyspohjaisilla päällysteillä on alhaiset tuotantokustannukset, erinomaiset mekaaniset ominaisuudet ja monipuoliset ominaisuudet kalvojen ja päällysteiden käyttöön. Niiden ongelmana on kuitenkin huono kosteudenkestävyys sekä se, että ne valmistetaan yleisesti maissista tai perunasta, joita käytetään myös ruoka-aineina. (Luciano et al., 2022.)

Selluloosaa ja erityisesti MFC:tä saadaan pääasiallisesti puusta, mutta myös muista raaka-ainelähteistä, kuten yksivuotisista kasveista ja puuvillasta (Kangas, 2014). Puu ja siitä valmistetut tuotteet toimivat hiilinieluinä. Kun tuotteen käyttöikä tulee päätökseen, voidaan tuote yleensä kierrättää. Puu ei suoraan kilpaile ruoantuotannon kanssa toisin kuin jotkut biotuotteet, kuten esimerkiksi maissipohjainen bioetanol ja tärkkelys. Ennen kaikkea MFC:ltä löytyy myös kartonkien päällystämiseen vaadittavia ominaisuuksia, kuten kalvonmuodostuskykyä (Sajaniemi, 2018), joten sen valitseminen kalvomateriaaliksi on järkevää. MFC:n käyttäminen kartonkien päällysteenä ei kuitenkaan yksinään ratkaise pakkausteollisuuden suurinta fossiilisuusongelmaa, vaan erilaiset kosteudet ja lämpötilat tuovat omat haasteensa hydrofiiliselle selluloosalle. Tästä syystä on ensisijaista tutkia sitä, miten MFC-päällyste vaikuttaa kartongin ominaisuuksiin ja mitä vaikutuksia päällysteellä on, kun esimerkiksi kosteus tai lämpötila poikkeavat vakio-olosuhteista (23°C, 50 % suhteellinen kosteus ((RH, eng. relative humidity))). MFC:tä sisältävillä kierrätettävillä pakkausratkaisuilla voitaisiin myös vastata nykypäivän suuriin kysymyksiin, kuten ilmastonmuutokseen, öljypulaan sekä geopoliittisiin konflikteihin liittyen mineraaleihin tai metalleihin.

Tässä kandidaatintyössä perehdytään siihen, miten MFC vaikuttaa kartongin ominaisuuksiin, erityisesti mekaanisiin ominaisuuksiin. Työssä kuvataan tarkemmin, mitä on MFC ja miten sitä voidaan valmistaa. Työssä tarkastellaan myös, miten MFC:tä voidaan käyttää kartonkien ja papereiden päällysteenä ja mihin ominaisuuksiin sillä voidaan vaikuttaa. Työn kokeellisessa osassa tutkitaan, miten mekaaniset ominaisuudet muuttuvat, kun kartongit

päällystetään eri fibrillaatioasteen MFC:llä. Mekaanisia ominaisuuksia verrataan päällystettyjen ja päällystämättömien kartonkien välillä. Lisäksi otetaan selvää, mitä vaikutuksia eri ilmastoitusolosuhteilla on tutkittaviin ominaisuuksiin. Työssä käytetyt ilmastoitusolosuhteet ovat 23°C ja 50 % RH sekä 23°C ja 80 % RH. Työssä saatuja tuloksia verrataan aikaisempiin tutkimustuloksiin ja ehdotetaan muutoksia sekä parannuksia, joiden avulla saadaan valmistettua entistä parempia ja kestävämpiä kalvoja kartonkien pinnalle. Kandidaattityö on toteutettu kirjallisuuden, aikaisempien tutkimusten ja kokeellisen osan perusteella.

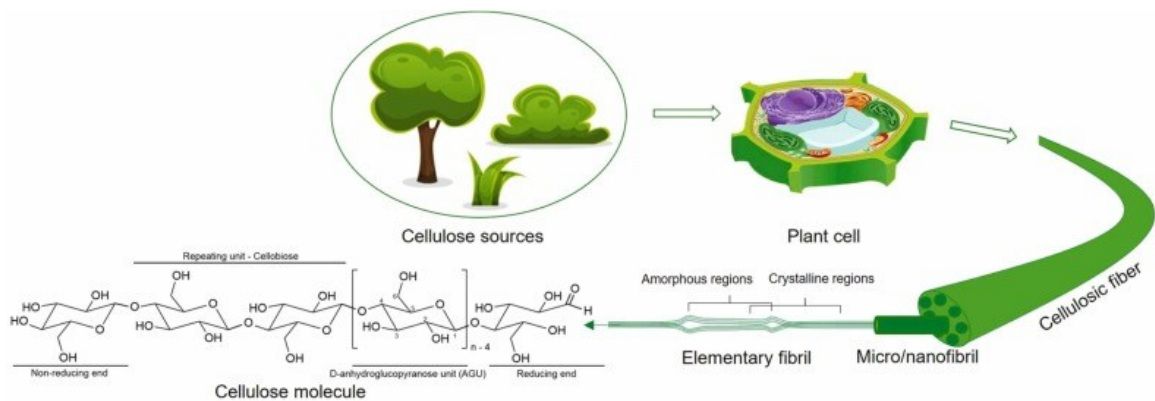
2 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään siihen, mitä MFC on materiaalina (2.1) sekä miten sitä voidaan valmistaa eri menetelmillä, kuten mekaanisella, kemiallisella tai entsyymaattisella käsittelyllä (2.2). Lisäksi tarkastellaan millaisia ominaisuuksia MFC:llä on ja miten ne vaikuttavat sen soveltuvuuteen päällysteenä kartongeissa ja papereissa (2.3). Katsauksessa käydään myös läpi, mitä hyötyjä ja haasteita sen käyttöön liittyy. Lisäksi tarkastellaan aiempia tutkimuksia MFC:n käytöstä pakkausratkaisuissa ja niiden keskeisiä tuloksia (2.4). Erityisesti selvitetään, kuinka eri ilmasto-olosuhteet ja erityisesti kosteus vaikuttavat kartongin mekaanisiin ominaisuuksiin.

2.1 Mitä MFC on

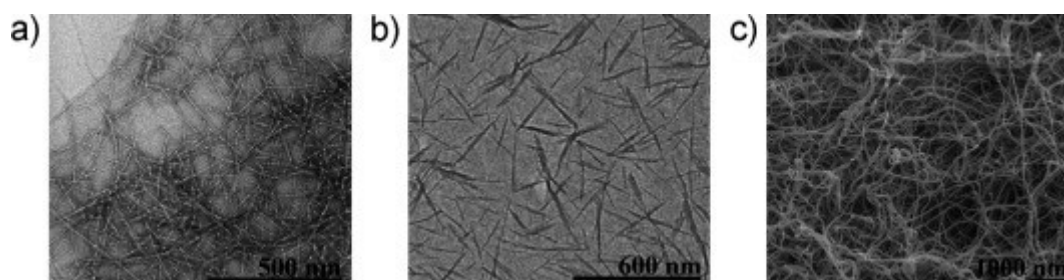
Selluloosaa voidaan pitää yhtenä runsaimpana biomassasta johdettuna orgaanisena yhdisteenä (Lavoine et al., 2012). Se on yksi maailman tärkeimmistä luonnonpolymeereistä ja todella keskeinen uusiutuvien materiaalien teollisessa mittakaavassa, koska se on biohajoava sekä myrkytön. Näin ollen selluloosalla on mahdollisuus vastata nykypäivän ympäristöongelmiin. Kuvassa 1 esitetty kolme selluloosan raaka-ainetta, puu, pensasmainen sekä ruohovartinen kasvi ja niiden sisältämän selluloosan hierarkkinen rakenne. Raaka-aineet

rakentuvat kasvisoluista, jotka puolestaan koostuvat selluloosakuiduista. Selluloosakuitu koostuu mikro- ja nanofibrilleistä. Mikro- ja nanofibrillit jakautuvat vielä alkeisfibrilleiksi ja lopulta rakenne päättyy selluloosan molekyyliirakenteeseen. (Almeida et al., 2023.)



Kuva 1. Selluloosan hierarkkinen rakenne. Kuvassa esitetään selluloosan lähteet, kasvisolu sekä selluloosakuidun rakenne. Selluloosakuitu muodostuu mikro- ja nanofibrilleistä, jotka edelleen koostuvat pienemmistä alkeisfibrilleistä sisältäen amorfisia ja kiteisiä alueita ja lopulta pitkäketjuisista β -D-glukoosimolekyyleistä eli selluloosamolekyyleistä. (Lavoine et al., 2012; Almeida et al., 2023).

Nanoselluloosalla tarkoitetaan selluloosasta johdettua materiaalia, jolla on vähintään yksi ulottuvuus nanomittakaavassa. Nanoselluloosaa voidaan käyttää useissa sovelluksissa, kuten pakkauksissa, nanokomposiittimateriaaleissa sekä biolääketieteessä. (Almeida et al., 2023.) Nanoselluloosa voidaan yleisesti jakaa kolmeen kategoriaan; selluloosamikrofibrilleihin (MFC/NFC, eng. micro/nanofibrillated cellulose), selluloosananokiteisiin (CNC, eng. cellulose nanocrystals) sekä bakteerinanoselluloosaan (BNC, eng. bacterial nanocellulose). Kuvassa 2 on esitetty mikrofibrilloidun selluloosan, selluloosananokiteiden ja bakteerinanoselluloosan pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvat. (Klemm et al., 2011.)



Kuva 2. a. MFC, b. CNC ja c. BNC kuvattuna pyyhkäisyelektronimikroskooppilla (Klemm et al., 2011).

Kolme nanoselluloosan kategoriaa valmistetaan eri tavalla. Selluloosananofibrilleillä tarkoitetaan mekaanisesti eroteltuja kuituja, selluloosananokiteillä kemiallisella hydrolyysillä aikaansaatuja kiteitä ja bakteerinanoselluloosalla bakteerien tuottamaa nanokuitua. (Klemm et al., 2018.)

MFC on puolikiteinen materiaali, joka voidaan valmistaa mekaanisella käsittelyllä. Sen voidaan sanoa koostuvan pääsääntöisesti mikrometrin kokoluokan selluloosarakenteista, joilla on laajempi kokojakauma kuin nanofibrilloidulla selluloosalla (NFC). MFC on erittäin haaroittunutta ja sillä on joustava rakenne. Se muodostaa tiheän toisiinsa liittyvän verkoston ja sillä on yleensä erityisesti kuivatessa taipumus aggregoitua, jolloin selluloosafibrillit liimautuvat yhteen tai kasautuvat, mikä vaikuttaa yleensä merkittävästi materiaalin ominaisuuksiin. (Lavoine et al., 2012; Nazari ja Bousfield 2016; Sajaniemi, 2018.) Bakteerinanoselluloosan ja MFC:n merkittävin ero on niiden valmistusprosessissa, vaikka muuten ne ovat ulkonäöltään ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan samanlaisia (Kuva 2A ja 2C). Selluloosananokiteiden ja MFC:n merkittävin ero on se, että selluloosananokiteet ovat nimensä mukaisesti kiteisiä sekä sauvamaisia partikkeleja (Kuva 2A ja 2B). Selluloosananokiteet ovat lyhyempiä kuin mikrofibrilloidun selluloosan kuidut. (Aulin, 2009; Kangas 2014.) Taulukossa 1 on esitetty havupuukuidun dimensiot sekä kirjallisuudesta löytyvät arviot selluloosananofibrillien (CNF), selluloosamikrofibrillin (MFC), selluloosakiteen (CNC) ja bakteerinanoselluloosan (BNC) kokoluokaksi.

Taulukko 1. Havupuukuidun, selluloosananofibrillien, -nanokiteiden ja bakteeriselluloosan kokoluokka.

Materiaali	Koko	Lähde
Havupuukuitu (ruotsalainen kuusi ja mänty)	Leveys 14–46 µm Pituus 3,1–3,4 mm	(Ek et al., 2009)
Selluloosananofibrilli (CNF)	Halkaisija 20–50 nm Pituus 500–2000 nm	(Kangas, 2014) (Kargarzadeh et al., 2017, s.11)
Selluloosamikrofibrilli (MFC tai CMF)	Halkaisija 20–100 nm Pituus 500–2000 nm	(Kargarzadeh et al., 2017, s.11)
Selluloosananokide (CNC)	Leveys 2–20 nm Pituus 100–600 nm, joskus jopa 1 µm	(Kangas, 2014)
Bakteerinanoselluloosa (BCN)	Leveys 20–100 nm Pituus ei mainittu	(Kangas, 2014)

MFC:n yleisimpiä käyttökohteita on paperin ja kartongin valmistaminen, komposiitit, päällysteet sekä huokoiset ja kevyet materiaalit, kuten rakennusmateriaalit. MFC:tä voidaan myös käyttää materiaalien apuaineena esimerkiksi paperi-, maali-, elintarvike-, lääke- sekä kosmetiikkateollisuudessa. (Kangas, 2014.) Sitä voidaan käyttää myös pakkausmateriaalina, elintarvikkeissa ja stabilointiaineina sekä läpinäkyvinä kalvoina. MFC:n etuina eri käyttökohteissa ja sovelluksissa on sen jäykkyys, biohajoavuus, muokkautuvuus sekä uusiutuvuus eli saatavuus uusiutuvista raaka-aineista. Uusiutuvuus ja biohajoavuus tukevat kiertotaloutta ja tämän avulla voidaan vähentää esimerkiksi öljypohjaisten muovien käyttöä pakkausratkaisuissa. MFC:n käyttöön eri sovelluksissa liittyy kuitenkin haasteita, kuten se, että MFC on hydrofiilinen (Sajaniemi, 2018).

2.2 MFC:n valmistus

MFC:tä on alettu valmistaa jo 1980-luvulla (Turbak et al, 1983; Ålander et al., 2017). MFC:n valmistukseen löytyy useita erilaisia raaka-aineita, mutta puu on tärkein. Esimerkiksi valkaistua sulfaattisellua käytetään useimmiten MFC:n valmistukseen. (Lavoine et al., 2012.) Viime vuosina sellun käyttö on kuitenkin vähentynyt, sillä digitalisoitumisen myötä paperin kysyntä on laskenut. Tämän seurauksena sellulle on etsitty uusia käyttökohteita, joista MFC:n hyödyntäminen on yksi merkittävä kehityssuunta. Samalla on tutkittu vaihtoehtoisia raaka-aineita MFC:n valmistukseen. Esimerkiksi viljelykasvien sivutuotteet, kuten sokeri-juurikasmassa, vehnän olki ja soijankuoret, ovat osoittautuneet potentiaalisiksi vaihtoehdoiksi. (Lavoine et al., 2012.) Lisäksi MFC:tä on onnistuttu uuttamaan esimerkiksi porkkanoista (Guimarães et al., 2016; Oksman et al., 2014, s. 26–27).

MFC:n suurimpana haittana on se, että sen valmistukseen kuluu paljon energiaa. Ongelman ratkaisemiseksi on kehitetty erilaisia menetelmiä ja usein MFC esikäsitellään ennen sen varsinaista valmistamista. Esikäsitelyllä saadaan löyhennettyä MFC:n kuiturakennetta ja rikotua mikrofilamenttien välisiä vetysidoksia. Esikäsitelyitä voidaan tehdä kemiallisesti, mekaanisesti sekä entsyymaattisesti. Mekaaninen esikäsitely voidaan jakaa kryomurskaukseen,

höyryräjähdykseen sekä korkean intensiteetin ultraäänikäsittelyyn (HIUS, eng. high-intensity ultra-sonication). Kemiallisessa esikäsittelyssä voidaan käyttää TEMPO (2,2,6,6-tetrametyyli-piperidin-1-oksyli) hapetusta, karboksimeetylointia, happokäsittelyä, sulfonointia tai eutektisia liuottimia (DES, eng. deep eutectic solvent). Entsymaattisessa käsittelyssä entsyymejä käytetään hajottamaan mikrofibrilloidun selluloosan kuitujen välisiä vetysidoksia. (Osong et al., 2016; Sajaniemi, 2018.) Yleensä MFC:n valmistukseen käytetään jotakin mekaanista käsittelyä yhdistettynä esikäsittelymenetelmään (Osong et al., 2016). Taulukossa 2 on esitetty eri esikäsittelymenetelmiä ja kuvattu, miten ne vaikuttavat MFC:n rakenteeseen.

Taulukko 2. Esikäsittelymenetelmien toimintaperiaatteet ja niiden vaikutus kuituihin.

Menetelmä	Toimintaperiaate	Vaikutus	Lähde
Kryomurskaus	Kuidut laitetaan nestemäiseen tyypeen ja jäädytetään. Jäädytetyn kuidun ja tyyden seos altistetaan voimakkaalle jauhamiselle.	Kuidut hajoavat pienemmiksi fibrilleiksi. Saadaan nanokokoisia selluloosafibrillejä.	(Osong et al., 2016)
Höyryräjähdys	Kuitu-vesisuspensio kuumennetaan paineen alaisena ja vapautetaan tämän jälkeen äkillisesti matalamman paineen tilaan.	Hajottaa kuiturakenteen ja helpottaa nanokokkoisten selluloosahiukkasten muodostumista.	(Osong et al., 2016)
Korkean intensiteetin ultraäänikäsittely	Käytetään äänienergiaa kuitujen hajottamiseen fibrilleiksi.	Kuiduista saadaan fibrillejä.	(Osong et al., 2016)
TEMPO -hapetus	Selluloosassa olevat primaariset hydroksyyli-ryhmät muutetaan karboksylaattiryhmiksi.	Selluloosarakenteen pinnan karboksylaattiryhmien negatiivisesti varautuneet kuidut hylkivät toisiaan, mikä edistää niiden hajoamista nano- ja mikrofibrilleiksi.	(Osong et al., 2016) (Pääkkönen, 2017) (Sanchez-Salvador et al., 2021)
Karboksimeetylointi	Kuitujen OH-ryhmät muutetaan karboksimeetyli-ryhmiksi. Tämä lisää anionisia varauksia ja vähentää kuitujen välisiä kitkavoimia sekä helpottaa käsittelyä.	Aiheuttaa sähköstaattista hylkimistä kuitujen välille, mikä mahdollistaa kuitujen hajoamisen fibrilleiksi.	(Osong et al., 2016) (Wågberg et al., 2008)
Happokäsittely (perjodaattikloriittihapetus)	Peräkkäinen hapetus perjodaatilla ja kloriitilla. Perjodaatti hapettaa selluloosan hydroksyyli-ryhmät aldehydi-ryhmiksi. Sitten kloriitti hapettaa aldehydit karboksyylihapoiksi. Lopputuotteena	Muokkaa kuitujen rakennetta ja helpottaa niiden fibrilloitumista.	(Liimatainen et al., 2012) (Osong et al., 2016)

	dikarboksyylihapposelluloosaa.		
Entsymaattinen käsittely	Sellulaasientsyymit hajottavat selluloosaa ja erityisesti kuiturakennetta. Sellohydrolaasit vaikuttavat kiteiseen osaan ja endoglukanaasi hajottaa amorfista aluetta.	Kuiturakenne hajoaa ja fibrillien irtoaminen helpottuu.	(Henriksson et al., 2007) (Osong et al., 2016) (Pääkkö et al., 2007)
Sulfonointi	Perjodaattihapotettu kuitu voidaan edelleen sulfonoida natriummatabisulfiitilla	Oksidatiivinen sulfonointi on potentiaalinen vihreä menetelmä, joka edistää selluloosakuidun fibrilloitumista.	(Liimatainen et al., 2013)
Syväeutekitiset liuottimet (DES)	Selluloosakuitu käsitellään 100 °C:ssa koliinikloridi-urea (moolisuhteessa 1:2) DES-liuoksessa. Tämän jälkeen DES erotetaan, jonka jälkeen esikäsitelty kuitu hajotetaan mekaanisesti selluloosananofibrilleiksi	DES-käsittely parantaa selluloosafibrillien erottumista.	(Almeida et al., 2023) (Sirvio et al., 2015) (Ukkola, 2017)

Esikäsitteilyn jälkeen MFC valmistuksessa tulee mekaaninen fibrillointi. Tällöin esikäsitellyt selluloosakuidut altistetaan voimakkaalle mekaaniselle käsittelylle, jota on esimerkiksi mikrofluidisointi, homogenointi tai superhionta. Näillä menetelmillä saadaan kuitujen kokoa pienennettyä nano- tai tässä tapauksessa mikromittakaavaan. Mekaaninen käsittely on ollut ensisijainen hajoamistekniikka MFC:n tuottamiseen. (Osong et al., 2016.) Mikrofluidisoinnilla saadaan hajotettua kuitua fibrilleiksi. Sen toimintaperiaate perustuu korkeapainekäsittelyyn sekä voimakkaaseen hiukkasten törmäämiseen, jonka seurauksena kuidut jakautuvat fibrilleiksi. Superhionnalla saadaan kuidut hajotettua lähes ongelmitta hienoiksi nanohiukkasiksi. Sen toimintaperiaate perustuu roottori-staattori-pyörimis-vaiheisiin. (Osong et al., 2016.) Homogenointiprosessin avulla saadaan puumassa hajotettua sellaiseksi materiaaliksi, jossa kuidut hajoavat ja avautuvat alkeisfibrilleiksi ja mikro fibrilleiksi (Aulin et al., 2010).

2.3 MFC:n käyttö papereiden ja kartonkien päällysteenä

MFC:tä voidaan käyttää paperissa ja kartongissa päällysteenä. MFC:n käyttöön päällysteenä on useita syitä, kuten lujuuden, kestävyys- ja barrierominaisuuksien parantaminen sekä siileämmän pinnan tavoittelu. Selluloosananomateriaalien joustavuutta sekä lujuuspotentiaalia on arvioitu suureksi. (Kangas, 2014.) MFC-kalvon avulla voidaan saada lisättyä kartonkien ja paperien vetolujuutta, repäisylujuutta sekä taivutuslujuutta. Näin ollen on mahdollista vähentää raaka-aineiden tarvetta ja saada kartongeista kestävämpiä ohuen kalvon avulla.

Yleensä selluloosananofibrilleistä valmistetut kalvot ovat lujia, ohuita, tiheitä sekä sileitä (Kangas, 2014). MFC:n on mahdollista toimia tehokkaana barrierina esimerkiksi rasvalle ja hapelle muodostamalla kartonkien ja papereiden pinnalle tiiviin filmin. MFC:n hydrofiilisen ominaisuuden perusteella se kuitenkin imee itseensä paljon kosteutta ja näin ollen ei pysty yksinään toimimaan kosteuden barrierina kartonkien ja papereiden pinnalla. Rasvan- ja hapenkestävyys ovat kuitenkin tärkeitä ominaisuuksia, kun kyseessä on elintarvikepakkaukset. Esimerkiksi jos kartonki voitaisiin saada barrierominaisuksiltaan hyväksi pakkausmateriaaliksi käyttäen ainoastaan MFC:tä päällysteenä, se poistaisi öljypohjaisen muovin erottelu- ja jälkikäsittelyvaiheen kartongin kierrätyksessä ja kartonki yhdessä MFC-päällysteen kanssa voitaisiin pulpperoida ja käyttää uusioraaka-aineena.

2.4 Aiemmat tutkimukset

Yleisesti aikaisemmissa tutkimuksissa on tarkasteltu mikro- ja nanofibrilliselluloosan käyttöä erilaisten paperi- ja kartonkimateriaalien päällysteenä. Useimmissa tutkimuksissa MFC on esikäsitelty ennen sen mekaanista hajottamista. Tutkimuksissa käytetty MFC-suspension vesipitoisuus on yleensä korkea, noin 2–10 painoprosenttia (paino-%). On olemassa paljon aikaisempia julkaisuja, joissa keskitytään barrierominaisuuksiin, mutta mekaanisia ominaisuuksia on tutkittu huomattavasti vähemmän. Tässä kirjallisuusosassa tarkastelluissa

tutkimuksissa päällystysmenetelmänä on käytetty sauvapäälllystystä ja pintaliimausta. Päällystettä on levitetty sekä kartongille että paperille. Päällystettyjä materiaaleja on analysoitu keskittyen erityisesti barrierominaisuuksiin, kuten ilmanläpäisevyyteen ja rasvankestävyyteen, mutta myös mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten lujuteen, jäykkyyteen ja venyvyyteen. Apuaineiden lisäämisen vaikutusta on myös tutkittu erityisesti barrierominaisuuksien parantamiseksi. Yleisestikin vastaavanlaisissa tutkimuksissa on tarkasteltu juuri mekaanisia ominaisuuksia ja miten päällyste vaikuttaa niihin, jolloin päällyste on usein MFC ja siihen lisätty apuaine.

MFC:tä on tutkittu pohjapaperin päällysteenä, jossa MFC valmistettiin hajottamalla valkaistu kuusisulfiittimassa (Syverud ja Stenius, 2009). Näytteistä analysoitiin vetolujuus ja venymä, neliömassa sekä paksuus ja tiheys. Mekaaniset ominaisuudet mitattiin 50 % RH ja 23°C lämpötilassa. Tulokseksi saatiin, että MFC kalvojen paksuus vaihteli 21–33 µm ja venymä 5,3–8,6 % välillä. Tuloksien perusteella voitiin todeta, että MFC-päällystettyjen pohjapapereiden vetolujuudet olivat paljon korkeampia kuin päällystämättömän pohjapaperin.

Lisäksi on tutkittu MFC:n mahdollista käyttöä pakkausmateriaaleissa ja biomuoveissa (Aulin et al., 2010). Tutkimuksessa päällysteiden pohjapaperina oli voimapaperi eli käärepaperi/lahjapaperi ja rasvankestävä voipaperi. Päällysteenä käytettiin anionista 0,85 paino-% MFC-dispersiota. Ennen papereiden päällystystä näytteitä säilytettiin kolmen päivän ajan 50 % RH sekä 23°C lämpötilassa. Päällystetyistä papereista tutkittiin ilmanläpäisevyys sekä rasvankestävyys. Tutkimuksen tuloksena saatiin, että päällystetyn paperin ilmanläpäisevyys pieneni huomattavasti ja rasvankestävyys parani.

On myös tutkittu, miten päällystysprosessi vaikuttaa papereiden mekaanisiin ja barrierominaisuuksiin käyttäen päällystysprosessina sauvapäälllystystä ja pintaliimausta (Lavoine et al., 2014c). Tutkimuksessa käytettiin eukalyptusmassasta valmistettua 2 paino-% MFC-suspensiota, joka oli esikäsitelty entsyymaattisesti ja johdettu tämän jälkeen mikrofluidisaattorin läpi. Tuloksena saatiin, että sauvapäälllystyksellä paperin neliömassa kasvoi sitä nopeammin mitä enemmän oli päällystyskerroksia, kun taas pintaliimausmenetelmässä neliömassa kasvoi hyvin hitaasti. Tämän voidaan olettaa johtuvan siitä, kun kaksi telaa kohdistaa painetta

päällystettävään paperiin, MFC-suspensio tunkeutuu paperin rakenteeseen. Tuloksena saatiin, että molemmat päällystysprosessit laskivat paperinäytteiden jäykkyyttä, ja lasku oli suurempi sauvapäällystyksellä. Kun tarkasteltiin murtopituutta, päällystysprosessilla ei voitu nähdä eroa. Tuloksista huomattiin, että MFC ei paranna merkittävästi paperinäytteiden mekaanisia ominaisuuksia päällystysprosessista riippumatta. Ainoastaan taivutusjäykkyys parani lähes puolella päällystetyssä paperissa. Barrierominaisuuksista saatiin tietoa, että päällystettyjen kartonkien ilmanvastus parani huomattavasti.

MFC:llä päällystettyjen kartonkien ja 3D-pakkausten mekaanisia ja barrierominaisuuksia on myös tutkittu (Lavoine et al., 2014a). Tutkimuksessa kartongit päällystettiin sauvapäällystysmenetelmällä ja vertailukohteena käytettiin polyeteenillä (PE) päällystettyjä näytteitä. MFC-suspension paino-% oli 2. Käytetty MFC oli esikäsitelty entsyymaattisesti endoglukaanaasilla ja tämän jälkeen vielä käsitelty mekaanisesti homogenisoimalla. Päällystettä levitettiin kartongin päälle 5 ja 10 kerrosta. Vertailunäytteet käsiteltiin ionivaihdetulla vedellä käyttäen samoja määriä, jotta voitiin korostaa MFC-suspension aiheuttamien peräkkäisten kostutus-/kuivaussykliä vaikutusta. Kartongeista testattiin ilmanläpäisevyys, hapenläpäisevyys, veden imeytyminen, rasvankestävyys, taivutusjäykkyys, puristuslujuus ja tehtiin laatikon puristustesti. Ennen jokaista koetta näytteet ilmastoitiin vakio-olosuhteissa (23°C ja 50 % RH) 24 h ajan. Tuloksena saatiin, että MFC-päällyste ei merkittävästi vaikuttanut ilmanläpäisevyyteen, mutta lisäsi kuitenkin veden imeytymistä ja paransi hieman rasvankestävyyttä. Päällystetyllä kartongilla ei kuitenkaan ollut yhtä hyvää rasvankestävyyttä kuin PE-päällystetyllä kartongilla. Mekaanisista ominaisuuksista MFC lisäsi taivutusjäykkyyttä sekä paransi taittokestävyyttä. Vesikäsitely heikensi kartongin puristuslujuutta, mutta MFC hieman paransi sitä. MFC-päällyste myös paransi laatikon kestävyyttä puristusta vastaan lähes yhtä hyvin kuin PE-päällyste.

MFC:n sekaan lisätään yleensä jotakin apuainetta, jotta päällysteen ominaisuuksia voidaan parantaa. Yhdessä kartonkipäällystystutkimuksessa on esimerkiksi tarkasteltu mikro- ja nanofibrilliselluloosan ja silikaattien yhdistämistä (Mascarenhas et al., 2022). Tutkimuksessa 2 paino-% massasuspensiot oli esikäsitelty kalium- sekä magnesiumsilikaatilla. Päällyste-pohjana käytettiin kartonkia. Päällystettä levitettiin 4 kerrosta. Ominaisuuksia mitattiin

ilman apuaineita ja apuaineiden kanssa päällystetyistä sekä päällystämättömistä kartongeista. Apuaineet päällysteessä paransivat kartonkien barrierominaisuuksia verrattuna pelkästään mikro- ja nanofibrilliselluloosalla päällystettyihin kartonkeihin. Kuitenkin päällysteiden levitys ja kuivatus heikensivät edelleen mekaanisia ominaisuuksia eli paperin lujutta ja jäykkyyttä. Eli vaikka apuaineista oli apua barrierominaisuuksien parantamiseen, päällystetyissä kartongeissa se ei kuitenkaan parantanut mekaanisia ominaisuuksia.

On myös tutkittu sitä, miten MFC päällystäminen vaikuttaa erilaisiin paperimateriaaleihin. Eräässä tutkimuksessa tavoitteena oli kehittää polyvinyliiasetaatti (PVA)- ja MFC- pohjaisia barrieropäällystyskerroksia hiomapapereille (Kumar et al., 2020). MFC-suspension paino-% oli 10. Tutkimuksessa ei ollut suoranaisesti mainittu sitä, onko tutkimuksessa käytetty MFC:tä esikäsitelty vai ei. Päällyste levitettiin laboratoriossa sauvapäällystyskoneella ennen siirtymistä pilottipäällystykseen. Näytteestä mitattiin ilmanläpäisevyys, pinnankarheus, veden kosketuskulma ja rasvankestävyys. Kaikki tutkitut päällysteet paransivat barrierominaisuuksia, sillä ne sulkiivat täysin paperin pinnan.

Yhteenvedona voidaan todeta, että kaikki tässä käsitellyt tutkimukset osoittavat, että MFC:llä voidaan parantaa päällystettyjen paperien ja kartonkien barrierominaisuuksia, kuten ilmanläpäisevyyttä sekä rasvankestävyyttä. Apuaineiden lisäämisellä voidaan vaikuttaa myös barrierominaisuuksiin, mutta ne voivat myös heikentää mekaanisia ominaisuuksia. Päällysteiden levittäminen kartonkien ja papereiden pinnalle sekä kuivatus voivat myös heikentää paperin mekaanisia ominaisuuksia (Lavoine et al., 2014c). Aikaisemmista tutkimuksista huomataan, että pelkkä MFC:llä päällystäminen ei paranna merkittävästi paperin mekaanisia ominaisuuksia, kuten lujutta tai jäykkyyttä. Tietyissä tapauksissa on kuitenkin mahdollista, että MFC-päällysteellä saadaan parannettua esimerkiksi taivutusjäykkyyttä. Voidaan myös todeta, että päällystysmenetelmällä on merkitystä lopputulokseen. Sauvapäällystyksellä saadaan aikaisiksi paksumpi päällystekerros kuin esimerkiksi pintaliimausmenetelmällä.

3 Materiaalit ja menetelmät

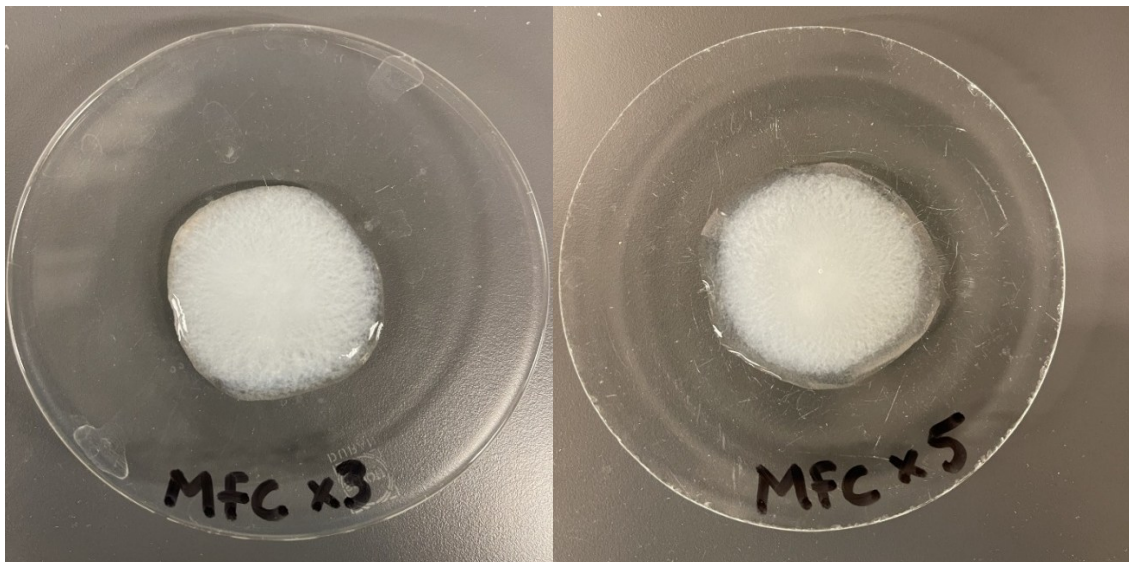
Työn kokeellisessa osassa tutkittiin, mitä vaikutuksia on mekaanisiin ominaisuuksiin, kun kartongit on päällystetty MFC:llä ja, miten eri kosteusolosuhteet vaikuttavat MFC:llä päällystettyjen kartonkien vetolujuuteen, taivutusjäykkyyteen sekä repäisylujuuteen. Kokeet suoritettiin sekä päällystämättömälle että MFC-päällystetylle kartongille. Näytteet ilmastoitiin 80 % RH ja 23°C lämpötilassa, koska suurempi kosteus kartongissa parantaa kartongin muovautumista ja muotojen syvyyden lisääntymistä (Lev et al., 2023). Näin ollen myös kartongin pinnalla olevan päällysteen tulee kestää lähes muuttumattomana mekaanisilta ominaisuuksiltaan kyseisessä kosteudessa.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten eri fibrillaatioasteen MFC vaikuttaa kartongin mekaanisiin ominaisuuksiin korkeammassa kosteudessa (80 % RH ja 23°C) verrattuna vakio-olosuhteissa (50 % RH ja 23°C) testattuihin näytteisiin. Vakio-olosuhteet on määrätty jo vuonna 1944, koska lämpötila ja kosteus vaikuttavat olennaisesti paperin kosteuspitoisuuteen ja ominaisuuksiin. Näin ollen on haluttu yhtenäiset testausolosuhteet papereille ja kartongeille. (Carson, 1944.) Kokeellisessa osassa pyrittiin siis arvioimaan, parantaako MFC-päällyste kartongin kosteudenkestoa ja mekaanista suorituskykyä käytännön pakkaussovelluksissa. Erityisesti tarkasteltiin, miten MFC-päällystys vaikuttaa kartongin lujuusominaisuuksiin sekä miten nämä ominaisuudet muuttuvat korkeammassa kosteudessa konvertoitavuuden ja valmiin pakkauksen kannalta.

3.1 Näytteiden valmistaminen

Kartonkien päällysteenä käytettiin MFC:tä eri fibrillaatioasteilla 3X ja 5X (X on mikrofluidisaattorikiertojen lukumäärä). MFC:tä ei ollut esikäsitelty eikä siihen ollut lisätty mitään lisäaineita. Haluttiin siis tutkia, miten MFC soveltuu yksinään päällystämiseen ja millaisia vaikutuksia sillä on kartongin lujuusominaisuuksiin. Tässä työssä haluttiin nimenomaan

tutkia, miten MFC toimii sellaisenaan, sillä usein esikäsittelet muuttavat MFC:n ominaisuuksia ja dimensioita. Päälysteenä käytetty MFC valmistettiin havusellusta mekaanisella käsittelyllä. Kuitususpensiota ajettiin mikrofluidisaattorin (Microfluidics M-110EH-30) läpi kolme (MFC X3) ja viisi (MFC X5) kertaa, jolloin saatiin kaksi eri fibrillaatioastetta. Molempien päälysteiden sakeus oli 0,4 %. Molemmat päälysteet olivat valkoisia ja nestemäisiä (Kuva 3). Päälyste, joka oli ajettu mikrofluidisaattorin läpi viisi kertaa, oli hieman jämsämpi kuin toinen päälyste. Näin voidaan olettaa, että viisi kertaa mikrofluidisaattorin läpi ajettulla päälysteellä on suurempi viskositeetti kuin kolmesti läpi ajettulla. Kuvasta 3 huomataan, miten vesi lähtee erottumaan MFC-näytteen reunoilta.



Kuva 3. Vasemmalla kolme kertaa (MFC X3) ja oikealla viisi kertaa (MFC X5) mikrofluidisaattorin läpi ajettu MFC.

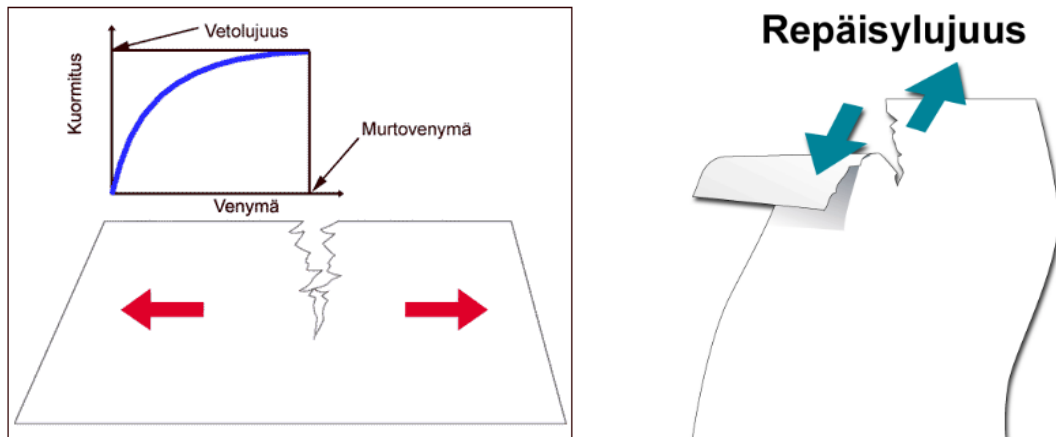
Kartonkeja päälystettiin jokaista näytettä 20 kappaletta jokaiseen olosuhteeseen. Heti päälystämisen jälkeen ne kuivattiin 105°C:ssa uunissa ja kuivatusaika oli 3,5 min. Kun kaikki näytteet oli päälystetty ja kuivattu, ne ilmastoitiin 50 % RH ja 23°C sekä 80 % RH ja 23°C. Näytteet on tärkeää ilmastoida kunnolla ennen mittauksia, jotta varmistutaan siitä, että kosteus on tasapainottunut näytteissä, sillä kartongin ja päälysteen ominaisuudet voivat muuttua lämpötilan ja kosteuden vaihdellessa. Päälystykset suoritettiin pöytämallisella Erichsenin päälystyslaitteella (Coatmaster 510, ERICHSEN GmbH & Co. KG, Saksa). Päälystysmenetelmänä käytettiin sauvapäälystystä, jossa sauvalla saatiin levitettyä noin 100 µm paksuinen päälystekerros. Päälyste levitettiin kartongin pinnalle nopeudella 50 mm/s

konesuunnassa. Kartongin konesuunnalla (KS) tarkoitetaan kartonkirainan kulkusuuntaa kartonkikoneessa. Kartongin poikkisuunnalla (PS) tarkoitetaan puolestaan kartonkirainan kulkusuunnalle 90 asteen kulmassa olevaa poikittaista suuntaa.

3.2 Testausmenetelmät

Kun kartonkipakkausta valmistetaan, tärkeitä ominaisuuksia ovat veto- ja puristuslujuus, venymä sekä taipuisuus. Valmiiden kuluttajille menevien pakkausten tulee kestää lisäksi kuljettamista, pinoamista sekä kuluttajan käyttöä. Elintarvikepakkausten tulee myös olla tiiviitä, sillä hapen tai kosteuden läpäisy nopeuttaa elintarvikkeiden pilaantumista. Lisäksi pinnan ominaisuudet, kuten karheus, vaikuttavat puolestaan painatuksen laatuun sekä pakkauksen liukuvuuteen ja käsiteltävyyteen. Näitä ominaisuuksia tutkittiin myös tämän työn kokeellisessa osassa. Päälylystämisen jälkeen mitattiin neliömassa, paksuus, vetolujuus, repäisylujuus, taivutusjäykkyys, ilmanläpäisevyys sekä karheus. Neliömassa ja paksuus ovat kartongin yleisiä ominaisuuksia. Neliömassalla tarkoitetaan yhden kartonkineliömetrin painoa grammoina eli grammapainoa, joka ilmoitetaan yleensä yksikössä g/m^2 . Näiden mittaamista ja laskemista tarvitaan esimerkiksi vetolujuuden mittaamiseen. (KnowPap 26.0., 2024; Vishtal ja Retulainen, 2012; Vishtal et al., 2014.)

Vetolujuudella (Kuva 4) tarkoitetaan suurinta kuormitusta, jonka kartonki tai paperi kestää murtumatta pinnan suuntaisesti vedettäessä. Vetolujuus on usein suurempi kartongin konesuunnassa kuin poikkisuunnassa, koska kuidut ovat valmistuksen aikana asettuneet enemmän konesuuntaan. (KnowPap 26.0., 2024.) Repäisylujuudella (Kuva 4) tarkoitetaan työtä, jota tarvitaan repeämisen aikaansaamiseksi eli sillä tarkoitetaan repimiseen tarvittavaa voimaa. Poikkisuuntaisen repäisylujuuden avulla voidaan arvioida näytteiden viansietokykyä. Kartongin repäisylujuutta saadaan lisättyä neliömassalla, kuituorientaatiolla sekä kuidun pituudella ja lujuuudella. (KnowPap 26.0., 2024.) Kuvassa 4 esitetty vetolujuuden ja repäisylujuuden mittauseriaatteet.



Kuva 4. Vasemmalla puolella kuvattuna vetolujuus mittauksen ja oikealla puolella repäisylujuus mittauseri-
aatteet (KnowPap 26.0., 2024).

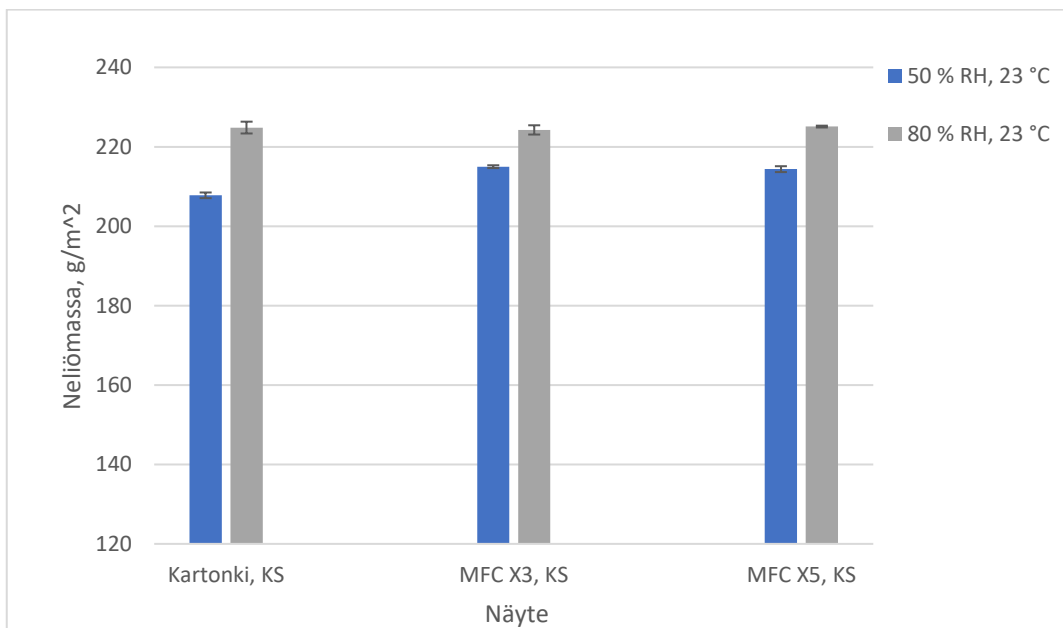
Taivutusjäykkyys on ominaisuus, jolla voidaan vaikuttaa suoranaisesti pakkausten lujuu-
teen. Sillä tarkoitetaan voimaa, jolla testikappale eli kartonki vastustaa tietyissä olosuhteissa
suoritettua taivutusta. Taivutusjäykkyyteen vaikuttavat kartongin tai paperin neliömassa
sekä paksuus. (KnowPap 26.0., 2024.) Ilmanläpäisevyys määritetään mittaamalla, kuinka
ilma kulkee paperin tai kartongin läpi. Karheudella tarkoitetaan kartongin pinnan epätasai-
suutta ja se voidaan jakaa mikro-, makro- ja optiseen karheuteen. Makrokarheutta voidaan
mitata ilmavuotomittareilla. (KnowPap 26.0., 2024.) Makrokarheutta mitataan myös tässä
työssä, jolloin määritetään kuinka paljon ilmaa virtaa kartongin ja kartongin päällä olevan
mittapään välisestä raosta (KnowPap 26.0., 2024.)

4 Tulokset

Kokeellisessa osassa kartongit päällystettiin ensin kahdella eri fibrillaatioasteen MFC:llä
(MFC X3 ja MFC X5). Niiden annettiin ilmastoitua haluttuihin olosuhteisiin, jonka jälkeen
ne stansattiin ja leikattiin oikeankokoisiksi paloiksi, jotta mekaanisten ominaisuuksien mit-
taaminen olisi mahdollista. Näytepaloista mitattiin mekaaniset ominaisuudet standardien
mukaisesti päällystetyille sekä päällystämättömille kartongeille, jotka on kuvattu seuraavissa
kappaleissa 4.1–4.5.

4.1 Neliömassa ja paksuus

Ensimmäisenä päällystetyistä kartongeista mitattiin neliömassa sekä paksuus. Neliömassa mitattiin standardin ISO 536:1995 ja paksuus standardin ISO 534:1988 mukaan. Neliömassa mitattiin analyysivaa'alla. Paksuus mitattiin Digital Micrometer 49–56 paksuusmittarilla (Messmer Büchel). Neliömassan tulokset on esitetty Kuvassa 5.



Kuva 5. Kartonkinäytteiden neliömassat. Siniset palkit (vasen palkki) kuvastavat matalampaa 50 % kosteutta ja harmaat palkit (oikea palkki) korkeampaa 80 % kosteutta. Hajonnat on laskettu 20 näytteen tuloksista.

Kuvasta 5 nähdään, että suuremmissa 80 % kosteudessa tutkittujen näytteiden neliömassa on lähes sama eikä suurta poikkeamaa ole havaittavissa. MFC:llä on suuri ominaispinta-ala ja se sitoo itseensä paljon kosteutta. Samoin pelkkä kartonki on hygroskooppinen eli imee itseensä kosteutta helposti, sillä se koostuu pääasiassa selluloosakuiduista, jotka ovat hydrofiilisiä. Näin ollen kosteutta imeytyy päällystämättömien sekä päällystettyjen kartonkien rakenteeseen. (Lavoine et al., 2012; Lev et al., 2023.) Päällystettyjen kartonkien ja päällystämättömän kartongin neliömassoissa on havaittavissa eroja pienemmässä 50 % kosteudessa,

mutta ei suuremmassa 80 % kosteudessa. Tämä voi johtua siitä, että kosteuden imeytymisdynamiikka muuttuu suuremmassa kosteudessa. Suuremmassa kosteudessa päällystetty kartonki ei enää sido suhteessa yhtä paljon kosteutta. Toisaalta pienemmässä kosteudessa ei käynnä, vaan MFC pystyy imemään itseensä kosteutta enemmän kuin tavallinen kartonki. (Lavoine et al., 2012; Lev et al., 2023.)

Kun verrataan pienemmässä 50 % kosteudessa mitattuja neliömassoja, havaitaan, että tulosten perusteella päällystemäärä olisi lähes 7 g/m^2 kartongin päällä. Näytteissä on siis ollut kosteutta mittaushetkellä, mutta kyse on ennemminkin siitä, kuinka paljon niissä on kosteutta ja ovatko näytteet ilmastoituneet kunnolla. Päällystetyistä ja päällystämättömistä kartongeista mitattiin kosteudet molempien olosuhteiden jälkeen ja saatiin Taulukossa 3 esitetyt tulokset. Kosteudet mitattiin infrapunalämmityslaitteen (Precisa 310 M lämpövaaka ja Precisa HA 300 kosteusanalysointilaitte) avulla. Näytteestä leikattiin ensin pieniä paloja alumiinastiaan n. 1 g verran, jonka jälkeen käynnistettiin lämmitys. Laite seurasi näytteen painoa koko mittauksen ajan. Tulokseksi saatiin kosteuspitoisuus, jonka laite laskee vertaamalla näytteen alkuperäistä painoa ja lopullista kuivapainoa.

Taulukko 3. Näytteiden kosteuspitoisuus, %.

Näyte	Kosteus [%]
Kartonki (50 % RH, 23 °C)	6,3
MFC x3 (50 % RH, 23 °C)	7,1
MFC x5 (50 % RH, 23 °C)	7,0
Kartonki (80 % RH, 23 °C)	9,5
MFC x3 (80 % RH, 23 °C)	10,8
MFC x5 (80 % RH, 23 °C)	10,3

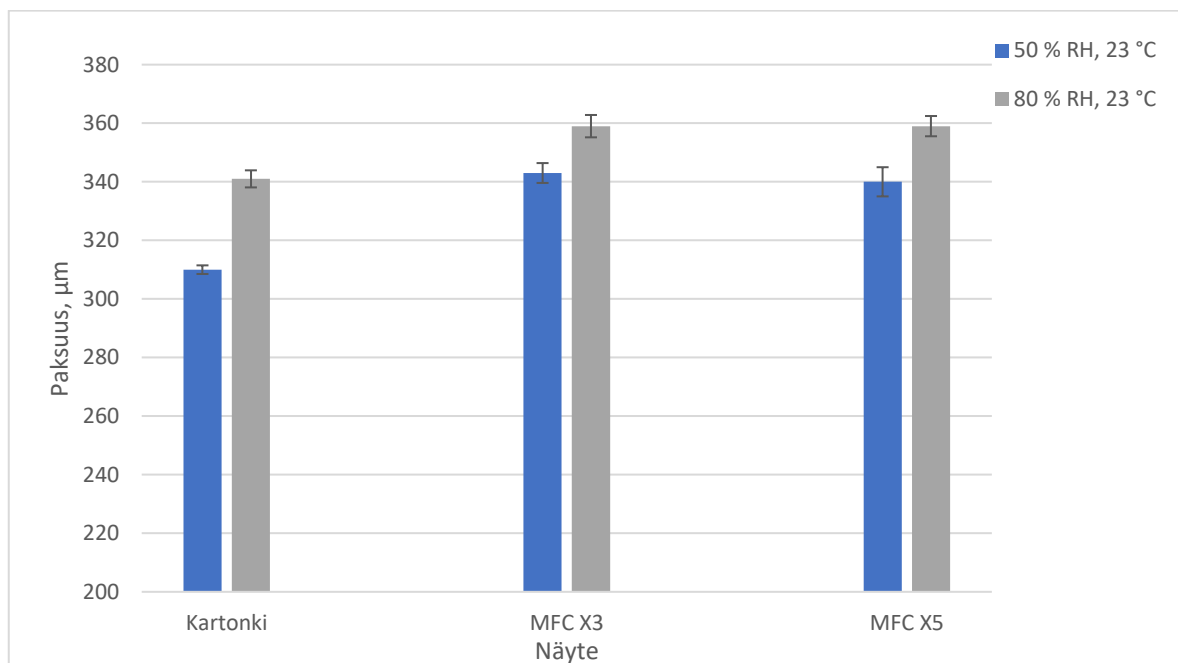
Suuremassa 80 % kosteudessa olleiden näytteiden tuloksista huomataan, että päällystämättömän kartongin kosteus on ollut pienempi kuin päällystettyjen kartonkien. Tämä voi johtua siitä, että MFC sitoo itseensä enemmän kosteutta, kuin selluloosakuidut. Pienemmässä 50 % kosteudessa mitatuissa neliömassoissa oli havaittavissa suurempaa vaihtelua arvoissa kuin 80 % kosteudessa mitatuissa. Tästä syystä päädyttiin vielä tarkastelemaan uudestaan neliömassat pienemmän 50 % kosteuden näytteistä, ja tulokset on esitetty Taulukossa 4. Kun neliömassat mitattiin uudestaan, leikattiin jokaisesta näytteestä 7 cm x 7 cm paloja 10 kappaletta, ja punnittiin ne 5 kappaleen nipuissa ja näistä tuloksista laskettiin neliömassat.

Taulukko 4. Näytteiden neliömassat eri määrittelyistä.

Näyte	Keskiarvo* [g/m ²]	Keskiarvo [g/m ²]
Kartonki (50 % RH, 23 °C)	208	211
MFC x3 (50 % RH, 23 °C)	215	215
MFC x5 (50 % RH, 23 °C)	214	214

*Ensin mitatut neliömassat

Taulukon 4 tuloksista huomataan, että päällystettyjen kartonkien neliömassat ovat samat kuin ensimmäiselläkin mittauskerralla. Päällystämättömän kartongin neliömassa on kuitenkin suurempi kuin ensimmäisellä mittauskerralla. Tämä voi johtua siitä, että ensimmäisellä mittauskerralla kartonki ei ollut vielä kunnolla ilmastoitunut ennen mittauksien suorittamista. Kuvassa 6 on esitetty eri näytteiden paksuuksien keskiarvot ja hajonnat.



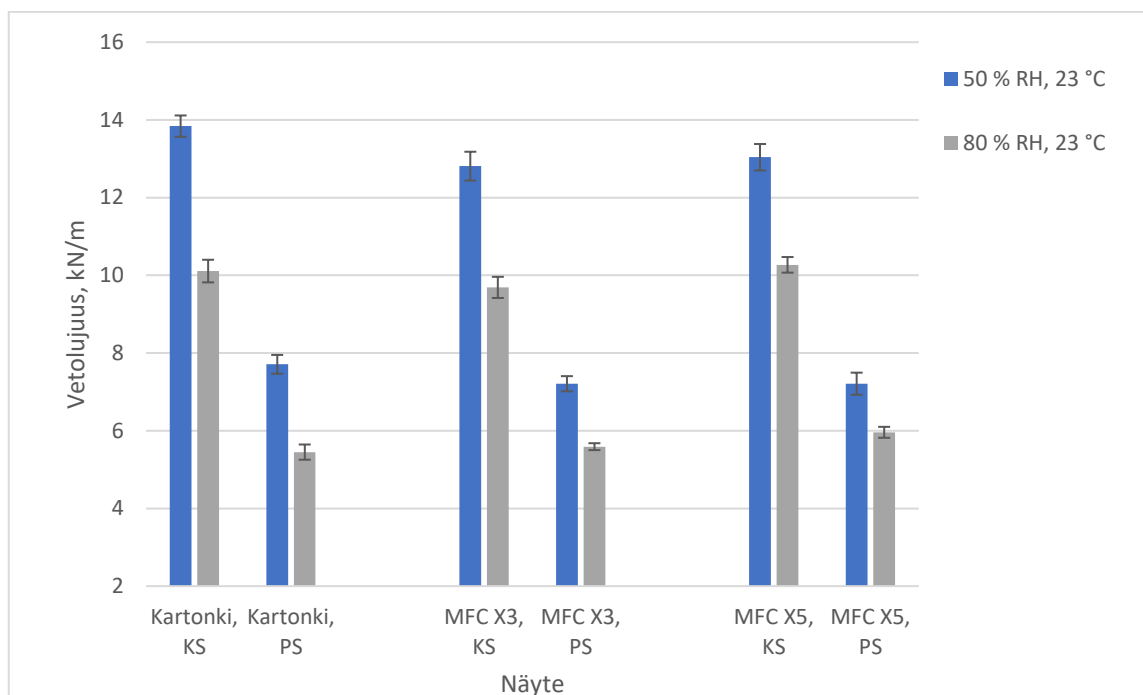
Kuva 6. Näytteiden paksuudet. Kuvassa sinisellä (vasen palkki) pienemmässä 50 % kosteudessa saadut tulokset ja harmaalla (oikea palkki) suuremmassa 80 % kosteudessa. Hajonnat on laskettu 20 näytteen tuloksista.

Kuvan 6 tuloksista huomataan, että päällystämättömän kartongin paksuus on molemmissa kosteuksissa pienempi kuin päällystettyjen kartonkien, mikä on oletettavaa, sillä päällyste lisää materiaalikerroksen ja näin lisää myös paksuutta. Tuloksista huomataan myös se, että suuremmassa 80 % kosteudessa päällystettyjen kartonkien paksuus on sama ja hajonta on

myös suunnilleen sama. Pienemmässä 50 % kosteudessa huomataan pieni ero paksuuden keskiarvoissa päällystetyillä kartongeilla. Korkeammassa 80 % kosteudessa paksuudet ovat suurempia kuin pienemmässä 50 % kosteudessa. Tämä johtuu siitä, että selluloosakuidut imevät itseensä kosteutta ympäröivästä ilmasta ja turpoavat, ja näin ollen kartongin ja päällysteiden paksuus kasvaa (Lavoine et al., 2014c).

4.2 Vetolujuus ja venymä

Näytteistä mitattiin vetolujuus standardin ISO 1924-2:1994 mukaan. Vetolujuus mitattiin Lorentzen & Wettre vaakavetolaitteella (Lorentzen & Wettre, Ruotsi). Vetonopeutena oli kone- sekä poikkisuunnassa 100 mm/min ja testikappaleiden kiinnitysväli 100 mm. Tuloksista huomioitiin erityisesti vetolujuus ja venymä, koska ne ovat oleellisia tuloksia, kun mietitään kartongin konvertointia tai valmiita pakkausmateriaaleja. Vetolujuus kertoo materiaalin kyvyn kestää venytystä ennen kuin se menee rikki, ja venymä kertoo puolestaan kuinka paljon materiaali voi venyä ennen kuin se menee rikki (KnowPap 26.0., 2024). Kuvassa 7 on esitettyä vetolujuuden tulokset.

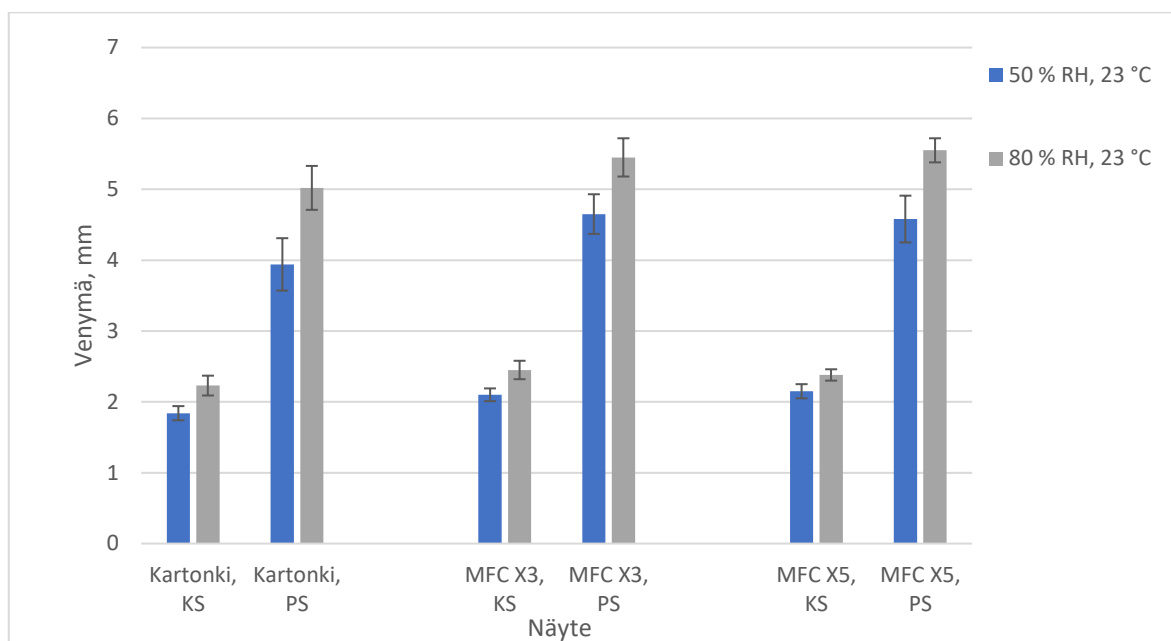


Kuva 7. Kartonkinäytteiden vetolujuus. Kuvassa sinisellä (vasen palkki) matalamman 50 % kosteuden tulokset ja harmaalla (oikea palkki) korkeamman 80 % kosteuden tulokset. Hajonta on laskettu 10 näytteen tuloksista.

Kuvan 7 tuloksista nähdään, että yleisesti vetolujuus on suurempi näytteen konesuunnassa kuin poikkisuunnassa. Tämä johtuu siitä, että konesuunnassa kuidut ovat pääosin suuntautuneet pitkien kartongin pituutta ja tämän seurauksena vetolujuus on suurempi, sillä kuiduilla on vahvempi vetokestävyys. Poikkisuunnassa kuidut ovat vähemmän suuntautuneet, mikä tyypillisesti johtaa matalampaan vetolujuuteen. (Lavoine et al., 2012.) Tuloksista huomataan myös, että suuremmassa 80 % kosteudessa vetolujuus pienenee. Tämä johtuu puolestaan siitä, että suurempi kosteus heikentää kartongin kuitujen välisiä sidoksia (Lev et al., 2023). Lisäksi MFC sitoo itseensä kosteutta, koska sillä on suuri ominaispinta-ala ja hydrofiilinen luonne (Lavoine et al., 2012; Turbak et al., 1983).

Vetolujuuden tuloksista (Kuva 7) havaitaan myös, että pienemmässä 50 % kosteudessa MFC X3:n vetolujuus on kaikista pienin konesuunnassa. Suurin vetolujuus pienemmässä 50 % kosteudessa on päällystämättömällä kartongilla sekä kone – ja poikkisuunnassa. Tämä voi johtua siitä, että päällystämättömässä kartongissa kuitujen välinen sidos on vahvempi ja rakenne on yhtenäisempi (Lavoine et al., 2012; Lavoine et al., 2014a). Voidaan siis sanoa, että pienemmässä 50 % kosteudessa ei ole päällystyksellä juurikaan merkitystä vetolujuuteen. Suuremmassa 80 % kosteudessa havaitaan se, että MFC X5:n vetolujuus on suurin kone –

ja poikkisuunnassa. Pienin vetolujuus suuremmissa 80 % kosteudessa on edelleen MFC X3:lla konesuunnassa. Poikkisuunnassa pienin vetolujuus on päällystämättömällä kartongilla, mutta ero on todella pieni. Kuvassa 8 on esitetty puolestaan venymän tulokset.



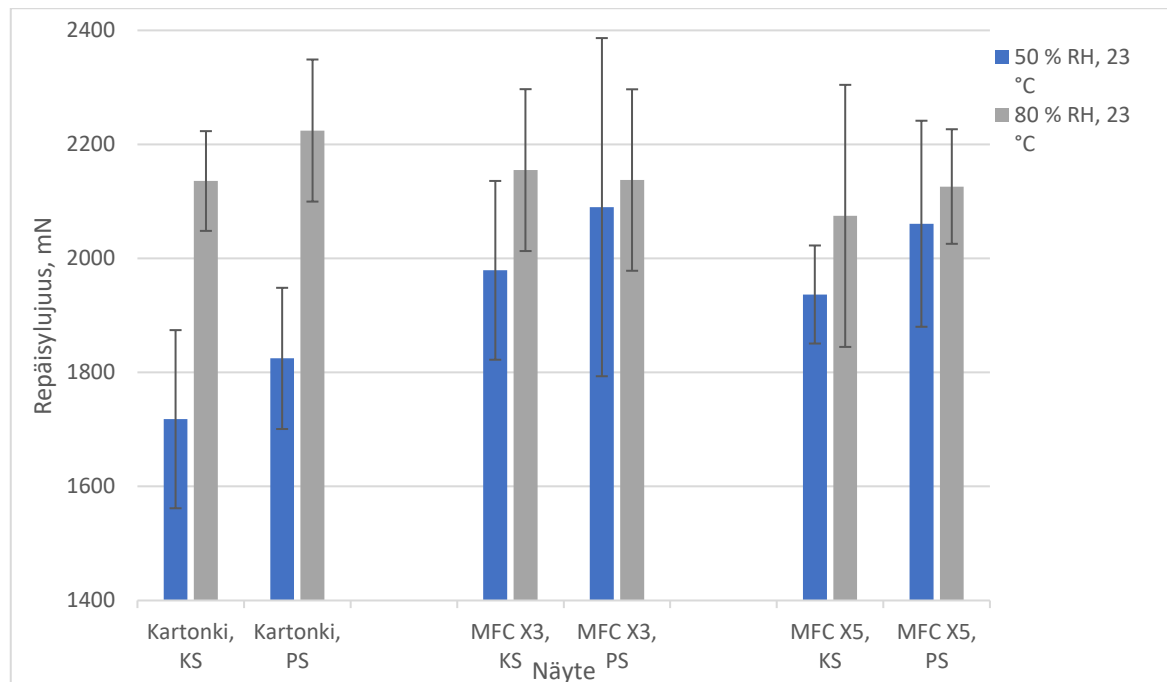
Kuva 8. Näytteiden venymät. Kuvassa sinisellä (vasen palkki) matalamman 50 % kosteuden tulokset ja harmaalla (oikea palkki) korkeamman 80 % kosteuden tulokset. Hajonta on laskettu 10 näytteen tuloksista.

Kuvasta 8 nähdään, että venymä on suurempi kartongin poikkisuunnassa kuin konesuunnassa. Tämä johtuu siitä, että poikkisuunnassa kuidut eivät ole yhtä hyvin suuntautuneet, mikä mahdollistaa suuremman venymän. Toisaalta venymä kasvaa suuremmissa 80 % kosteudessa, sillä materiaalin joustavuus paranee, vaikkakin lujuus heikkenee. Materiaalin joustavuus paranee, koska kosteuden lisäys heikentää kuitujen välisiä vetysidoksia. (Lavoine et al., 2012; Lavoine et al., 2014c; Lev et al., 2023.) Hajonnat eivät poikkea juurikaan toisistaan näytteiden välillä venymässä tai vetolujuudessa. Venymän tuloksista (Kuva 8) havaitaan, että pienemmässä 50 % kosteudessa suurimmat arvot saa MFC X5 konesuunnassa ja poikkisuunnassa MFC X3. Pienimmät arvot pienemmässä 50 % kosteudessa saa päällystämätön kartonki kone – ja poikkisuunnassa eli voidaan todeta, että venymään päällystyksellä on kuitenkin vaikutusta pienemmässä kosteudessa. Pienemmässä 50 % kosteudessa venymä on yleisesti pienempi, sillä kuiva kartonki on jäykempi ja vähemmän taipuisampi. Suuremmissa 80 % kosteudessa kartonki on pehmeämpää ja joustavampaa, joten venymä kasvaa. Suuremmissa 80 % kosteudessa suurimmat arvot saa MFC X3 konesuunnassa ja MFC X5

poikkisuunnassa. Pienimmät arvot suuremmissa 80 % kosteudessa saa päällystämätön kartonki kone – ja poikkisuunnassa. Huomionarvoista on kuitenkin se, että erot konesuunnassa suuremmissa 80 % kosteudessa venymän suhteen ei ole suuret päällystettyjen ja päällystämättömän kartongin välillä.

4.3 Repäisylujuus

Näytteistä mitattiin myös repäisylujuus, joka mitattiin standardin ISO 1974:1990 mukaan. Repäisylujuudessa käytetty laite oli Lorentzen & Wettre repäisylujuusmittari (Lorentzen & Wettre, Ruotsi). Kuvassa 9 on esitetty saadut tulokset repäisylujuuksista. Tuloksista huomataan, että repäisylujuus on jokaisella näytteellä suurempi näytteen poikkisuunnassa kuin konesuunnassa. Yleisesti voidaan todeta, että repäisylujuuteen vaikuttaa käytettyjen kuitujen pituus, niiden orientaatio eli suuntautuminen rakenteessa, sekä kartongin neliömassa.

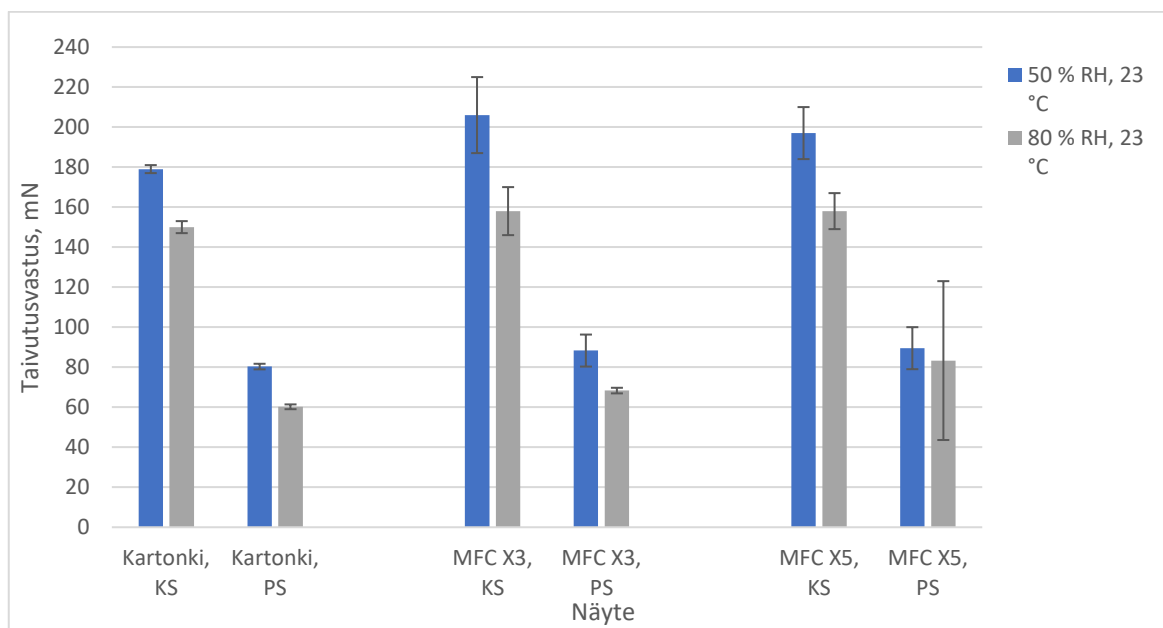


Kuva 9. Näytteiden repäisylujuus. Sinisellä (vasen palkki) on matalamman 50 % kosteuden tulokset ja harmaalla (oikea palkki) korkeamman 80 % kosteuden tulokset. Hajonta on laskettu 10 näytteen tuloksista.

Kuvan 9 tuloksista voidaan myös havaita, että suuremmassa 80 % kosteudessa repäisylujuus kasvaa kone- sekä poikkisuunnassa verrattuna pienempään 50 % kosteuteen. Tämä voi johtua siitä, että lisääntynyt kosteus pehmentää kuituja ja parantaa niiden joustavuutta (Lev et al., 2023), mikä mahdollistaa kuitujen venymisen repäisyn aikana. Tämän seurauksena repäisyyn tarvittava työmäärä kasvaa, mikä ilmenee suurempana repäisylujuutena. Kosteuden vaikutus on johdonmukainen sekä kone- että poikkisuunnassa, mikä osoittaa, että kosteuden lisäys 50 %:stä 80 %:iin vaikuttaa kuitujen joustavuuteen molemmissa suunnissa. Yleisesti MFC:llä päällystäminen näyttäisi parantavan repäisylujuutta, mutta eri fibrillaatioasteiden välillä ei näytä olevan suurta vaikutusta. Tämän voidaan olettaa johtuvan siitä, että MFC:llä päällystäminen parantaa kartongin pintalujuutta ja jäykkyyttä, mutta sillä on myös vaikutusta repäisylujuuteen (Lavoine et al., 2012; Lavoine et al., 2014c). Jokaisessa mittauksessa hajonnat ovat pysyneet kohtuullisina, mikä osoittaa, että päällyste ei merkittävästi lisää hajontaa, vaikka päällystyskerros ei ole tasainen.

4.4 Taivutusvastus

Taivutusvastus mitattiin standardin ISO 2493-1:2010 mukaan Lorentzen & Wettre taivutusmittarilla (Lorentzen & Wettre, Ruotsi). Kuvassa 10 on esitetty taivutusvastuksen mittauksista saadut tulokset.



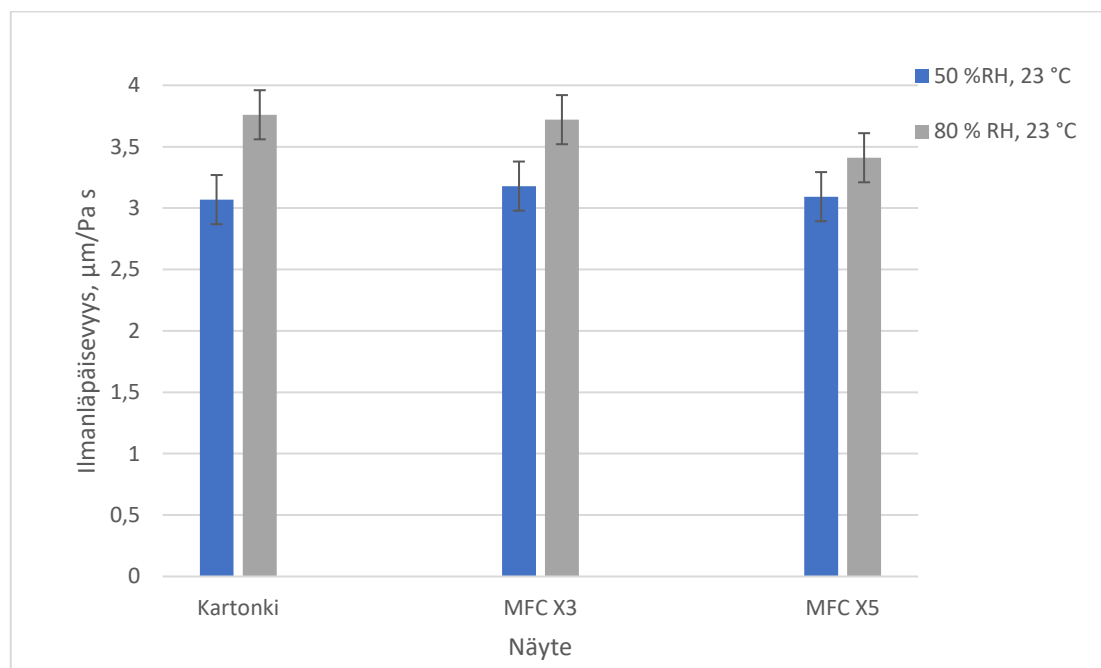
Kuva 10. Näytteiden taivutusvastus. Sinisellä (vasen palkki) pienemmän 50 % kosteuden tulokset ja harmaalla (oikea palkki) suuremman 80 % kosteuden tulokset. Hajonta on laskettu 10 näytteen tuloksista.

Kuvan 10 tuloksista voidaan huomata, että taivutusvastus pienenee suuremmissa kosteudessa sekä kone-, että poikkisuunnassa. Tämä johtuu siitä, että korkea 80 % kosteus heikentää kuitujen välisiä vetysidoksia, jotka ovat merkittävässä roolissa kartongin jäykkyyden ja lujuuden ylläpitämisessä. Kosteuden lisääntyessä kuitu-kuitu-sidoksen lujuus heikkenee, mikä johtaa rakenteen pehmenemiseen ja taipuisuuden lisääntymiseen. (Lavoine et al., 2014c; Lev et al., 2023.) Tuloksista käy myös ilmi se, että hajonnat ovat huomattavasti suurempia päällystetyillä kartongeilla kuin päällystämättömillä kartongeilla. Tämä voi yksinkertaisesti johtua päällystekerroksen epätasaisesta peittävyyydestä ja siitä, että päällystyskerros ei ole tasainen, mikä vaikuttaa taivutuslujuuden vaihteluun. Päällystettyjen kartonkien välillä on havaittavissa hyvin pieniä eroja tuloksissa, mutta selvä ero havaitaan kuitenkin päällystettyjen ja päällystämättömän kartongin välillä. Taivutusvastus siis kasvaa, kun näyte on päällystetty MFC X3:lla tai MFC X5:llä verrattuna päällystämättömään kartonkiin. Yleisesti voidaan sanoa, että taivutusvastus paranee paksuuden ja neliömassan kasvaessa, sekä MFC:n määrän lisääntyessä. Kuitenkin eniten taivutusvastuksen parantumiseen vaikuttaa neliömassan ja paksuuden kasvu. (Lavoine et al., 2012; Lavoine et al., 2014b; Niini et al., 2021).

On siis loogista, että taivutusvastus kasvaa MFC:llä päällystetyillä kartongeilla verrattuna päällystämättömiin. Korkeampi ilmankosteus kuitenkin heikentää taivutusvastusta, koska vesi tunkeutuu kuiturakenteeseen ja vähentää kuitu-kuitu-sidosten lujuutta. Tämä selittää sen, miksi kosteissa olosuhteissa taivutusvastus laskee kaikilla näytteillä.

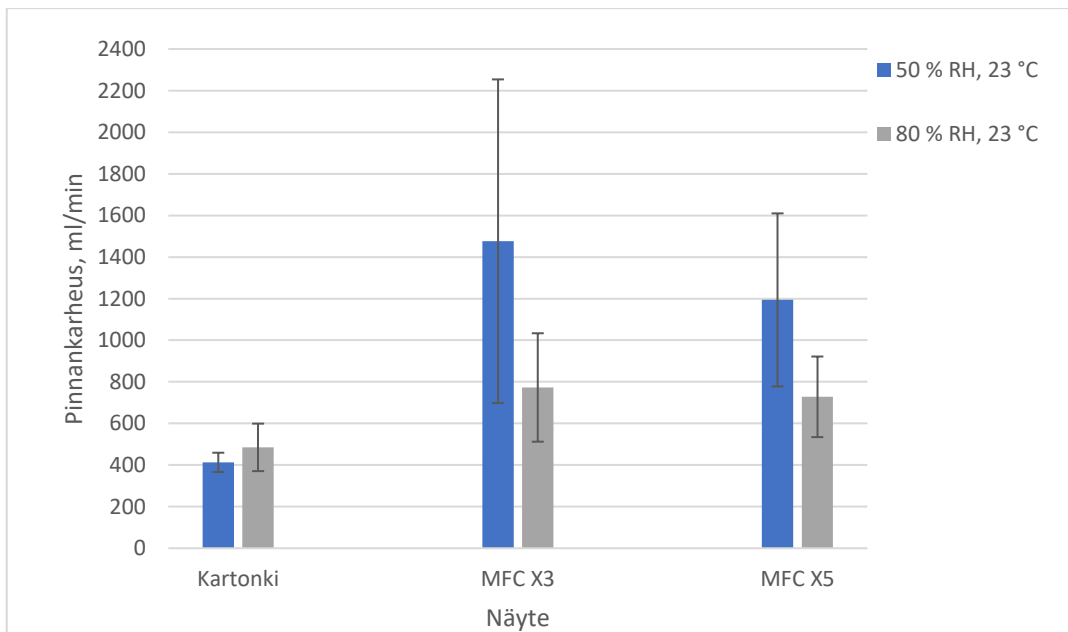
4.5 Muut mittaukset

Näytteistä mitattiin lisäksi karheus, ilmanläpäisevyys sekä ne kuvattiin pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (Scanning Electron Microscope, SEM). Ilmanläpäisevyys haluttiin varmistaa, vaikka päällystämisen jälkeen näytti siltä, että tiivistä kalvoa ei ollut syntynyt kartongin pinnalle. Ilmanläpäisevyys mitattiin standardin ISO 5626-5:2003 mukaan ja pinnankarheus standardin ISO 8791-2:1990 mukaan. Ilmanläpäisevyys ja karheus mitattiin Lorentzen & Wettre Bendtsen-mittalaitteella (Lorentzen & Wettre, Ruotsi). Kuvassa 11 on esitetty näytteiden ilmanläpäisevyydet.



Kuva 11. Näytteiden ilmanläpäisevyys. Sinisellä (vasen palkki) pienemmässä 50 % kosteudessa saadut tulokset ja harmaalla (oikea palkki) suuremmassa 80 % kosteudessa saadut tulokset. Hajonta laskettu 10 näytteen tuloksista.

Kuvan 11 tuloksista voidaan havaita, että ilmanläpäisevyys kasvaa suuremmissa 80 % kosteudessa. Tämä havainto on linjassa aikaisempien tutkimuksien kanssa. Korkeammassa kosteudessa kuitujen väliset sidokset heikkenevät, mikä avaa mikroskooppisia kanavia, jotka helpottavat ilman kulkua kartongin läpi. (Lavoine et al., 2012; Lev et al., 2023). Päällystyksellä ei ollut merkittävää vaikutusta ilmanläpäisevyyteen verrattuna päällystämättömään kartonkiin, mikä tukee havaintoa siitä, että tiivistä kalvoa ei muodostunut, vaan päällyste mahdollisesti tunkeutui kartongin huokosiin tai levittäytyi epätasaisesti kartongin pinnalle. Myös pieni päällystemäärä voi vaikuttaa siihen, että tiivistä kalvoa ei muodostunut kartongin pinnalle. Hajonnat ovat myös suurin pirtein samaa luokkaa, mikä kertoo sen, että näytteiden valmistusprosessi on ollut tasalaatuinen. Kuvassa 12 on esitetty näytteiden pinnankarheuden tulokset.

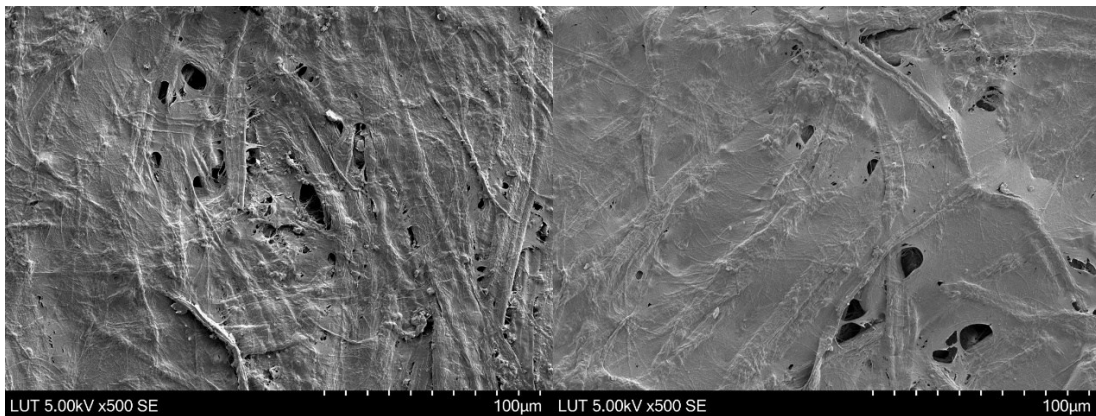


Kuva 12. Näytteiden pinnankarheus. Sinisellä (vasen palkki) kuvattuna pienemmän 50 % kosteuden tulokset ja harmaalla (oikea palkki) suuremman 80 % kosteuden tulokset. Hajonta on laskettu 10 näytteen tuloksista.

Kuvan 12 pinnankarheuden tuloksista havaitaan se, että suuremmissa 80 % kosteudessa päällystettyjen kartonkien pinta on sileämpi kuin pienemmässä 50 % kosteudessa päällystettyjen kartonkien pinta. Tämä ilmiö voi johtua esimerkiksi siitä, että päällystettyjen näytteiden ilmastoituminen korkeammassa 80 % kosteudessa saa kuidut turpoamaan ja

tasaantumaan (Lev et al., 2023), mikä tekee pinnasta sileämmän. Kun taas pienemmässä 50 % kosteudessa päällystettyjen kartonkien pinta on karheampi. Pelkällä päällystämättömällä kartongilla huomataan kuitenkin tapahtuvan toisella tavalla, eli suuremmissa 80 % kosteudessa päällystämättömän kartongin pinta on karheampi kuin pienemmässä 50 % kosteudessa, jossa pinta on sileämpi. Pienemmässä 50 % kosteudessa päällystettyjen kartonkien hajonnat mittauksissa ovat kuitenkin todella suuria. Suuret hajonnat pienemmässä 50 % kosteudessa päällystetyillä näytteillä voivat johtua päällysteen epätasaisesta peittävyyydestä.

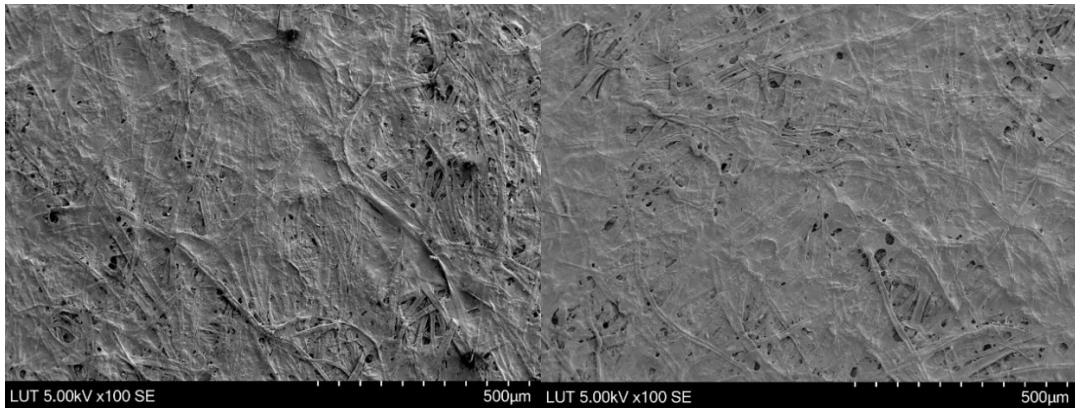
Molemmista päällystetyistä kartongeista otettiin pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvat (SEM, eng. scanning electron microscope) kahdella eri mittakaavalla: 100 μm ja 500 μm . Laitteena käytettiin Hitachi SU3500 laitetta ja detektorina SE (secondary electron) -detektoria. Näytteet päällystettiin kullalla ennen niiden kuvaamista, jotta ne saatiin johtaviksi. Kuvassa 13 on vasemmalla puolella MFC X3- ja oikealla MFC X5- päällystettyjen kartonkinäytteiden SEM-kuvat 100 μm mittakaavalla.



Kuva 13. Vasemmalla puolella MFC X3-päällystetyn ja oikealla puolella MFC X5-päällystetyn kartongin pinta kuvattuna pyyhkäisyelektronimikroskoopilla 100 μm mittakaavalla.

Kuvan 13 molemmista kuvista nähdään selkeästi MFC:n muodostama verkostomainen rakenne. Kuvista on havaittavissa, että kalvo ei ole yhtenäinen. Selkeänä erona huomataan se, että MFC X5- päällystetty kartonki on paljon sileämpi ja tasaisempi pinnasta, mikä voi johtua paremmasta päällysteen leviämisestä ja yhtenäisestä kerroksesta sekä siitä, että useampi ajo mikrofluidisaattorin läpi on hajottanut kuidut pienemiksi ja tasaisemmin jakautuneiksi, jolloin pinnalla näkyy vähemmän yksittäisiä kuituja. Puolestaan MFC X3- päällystetty

kartongin pinnan tekstuuri on karkeampi, ja yksittäiset mikrofibrillit erottuvat selvemmin. MFC X3:n verkostorakenne on myös monimutkaisempi ja tiheämpi, mikä viittaa siihen, että siellä on enemmän kuitumaisia rakenteita. Kuvassa 14 on puolestaan vasemmalla puolella MFC X3- päällystetyn ja oikealla MFC X5- päällystetyn kartongin SEM-kuvat 500 µm mittakaavalla.



Kuva 14. Vasemmalla puolella MFC X3-päällystetyn ja oikealla puolella MFC X5-päällystetyn kartongin pinta kuvattuna pyyhkäisyelektronimikroskoopilla 500 µm mittakaavalla.

Kuvan 14 näytteiden pinnalta havaitaan sama verkostomainen kuiturakenne kuin 100 µm mittakaavan kuvista (Kuva 13). Päällystetyissä pinnoissa on havaittavissa samat huomiot, eli MFC X3:lla on karkeampi pinta, kun taas MFC X5:lla on sileämpi ja yhtenäisempi pinta, jossa kuiturakenteet ovat enemmän limittyneitä ja tasaisemmin jakautuneita.

5 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Kokeellisen osan tuloksista saatiin, että neliömassa ja paksuus kasvoivat suuremmissa 80 % kosteudessa. Vetolujuus puolestaan pieneni suuremmissa 80 % kosteudessa kone- ja poikkisuunnassa samalla, kun venymä kasvoi suuremmissa 80 % kosteudessa kone- ja poikkisuunnassa. Samoin repäisyjujuus kasvoi suuremmissa 80 % kosteudessa, mutta taivutusvastus pieneni. Ilmanläpäisevyys oli suurin pirtein sama molemmissa kosteuksissa, mutta pinnan karheus pieneni eli pinta oli sileämpi suuremmissa 80 % kosteudessa päällystetyillä

kartongeilla. Suurempi 80 % kosteus vaikuttaa siis merkittävästi materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Erityisesti neliömassan ja paksuuden kasvu viittaa siihen, että materiaali imee kosteutta ja turpoaa. Samalla vetolujuuden heikkeneminen ja venymän kasvu osoittavat, että materiaali menettää lujuuttaan kosteuden lisääntyessä. Repäisylujuuden kasvu viittaa siihen, että kosteus tekee materiaalista sitkeämmän, kun taas taivutusvastuksen pieneneminen kertoo sen taipuisuudesta kosteissa olosuhteissa. Ilmanläpäisevyyden pysyminen lähes ennallaan viittaa siihen, että materiaalin huokoisuus ei muutu merkittävästi kosteuden vaikutuksesta, vaikka pinnanominaisuudet kuten sileyks voi muuttua.

Yleisesti voidaan sanoa siis, että kartongin ja MFC-päällysteen kuidut mukautuvat ympäristöönsä, sillä niiden sisältämä selluloosa ja hemiselluloosa vetävät puoleensa vesimolekyylejä hydroksyyliyhmiensä avulla. Kun kuitu joutuu kosketuksiin veden kanssa, kiinnittyvät vesimolekyylit kiteisen selluloosan pinnalle ja tunkeutuvat sen amorfisiin osiin. Tämä saa selluloosakuidut laajenemaan ja pehmenemään, jonka takia kuitu turpoaa huomattavasti enemmän paksuussuunnassa kuin pituussuunnassa. Kosteuden vaikutuksesta kuitujen jäykkyys vähenee, jolloin ne muuttuvat joustavammiksi, mikä puolestaan vaikuttaa niiden lujuusominaisuuksiin. (Rhim, 2010; Vishtal ja Retulainen, 2014.)

Päällystyksellä oli vaikutusta myös mekaanisiin ominaisuuksiin. Päällystys paransi taivutusvastusta, venymää, repäisylujuutta pienemmässä kosteudessa sekä lisäsi pinnankarheutta. Päällystyksellä ei ollut vaikutusta ilmanläpäisevyyteen, mutta se kasvatti neliömassaa ja paksuutta. Päällystys pienensi puolestaan vetolujuutta ja repäisylujuutta verrattuna päällystämättömään kartonkiin. Kahdella eri fibrillaatioasteen päällysteellä ei juurikaan ollut eroavaisuutta venymässä ja neliömassassa. Eroa kuitenkin hieman löytyi repäisylujuudessa, taivutusvastuksessa, ilmanläpäisevyydessä, pinnankarheudessa sekä paksuudessa, ja näissä MFC X3:n tulokset olivat suurempia. Vetolujuudessa MFC X5:llä oli kuitenkin hieman suurempia tuloksia kuin MFC X3.

Tulokset vaikuttavat osittain järkeviltä, kun niitä verrataan aikaisempiin tutkimuksiin. Aikaisemmissa tutkimuksissa tulokseksi saatiin, että MFC:llä päällystetyn paperin vetolujuus kasvoi (Syverud ja Stenius, 2009). Tämä on kuitenkin ristiriidassa kokeellisen osan tuloksien

kanssa, sillä vetolujuudet pienenevät päällystetyillä kartongeilla. Tämä voi johtua siitä, että Syverudin ja Steniuksen (2009) tutkimuksessa on käytetty esikäsiteltyä MFC suspensiota toisin kuin tässä kandidaatintyössä. Päällystyspohjana on käytetty myös paperia toisin kuin tässä työssä, jolla voi olla myös vaikutusta. Aikaisemmissa tutkimuksissa on saatu, että ilmanläpäisevyys on heikentynyt huomattavasti tai, että se ei ole juurikaan muuttunut MFC-päällysteen vaikutuksesta (Lavoine et al., 2014a). Tämä on lähes samanlainen tulos kuin tämän kandidaatintyön kokeellisen osan tuloksissa saatiin, sillä siellä saadut ilmanläpäisevyudet eivät eronneet juurikaan päällystettyjen ja päällystämättömien kartonkien välillä. Aikaisemmista tutkimuksista saatiin myös, että neliömassa kasvoi sekä taivutusjäykkyys parani (Lavoine et al., 2014a; Lavoine et al., 2014c). Nämä tulokset puolestaan vastaavat täysin tämän kandidaatintyön kokeellisessa osassa saatuja tuloksia.

Aikaisemmasta tutkimuksesta on saatu tulokseksi, että vetolujuus on ollut suurempi päällystetyillä kartongeilla kuin päällystämättömillä (Retulainen et al., 2001). Tämä on puolestaan päinvastainen kuin tämän työn kokeellisen osan tulos, sillä MFC X3 ja MFC X5 laskivat kartongin vetolujuutta. Tähän syynä voi olla se, että MFC:n sekaan on lisätty lisäainetta, joka parantaa vetolujuutta (Retulainen et al., 2001). Myös eri valmistusmenetelmillä ja esikäsitteilyillä voi olla vaikutusta tähän (Lehmonen et al., 2017). Aikaisemmasta tutkimuksesta on saatu tulokseksi, että repäisyjuuus ja venymä kasvoivat MFC-lisäyksen jälkeen. Nämä tulokset on kuitenkin saatu, kun MFC:tä on lisätty eri suhteissa suoraan kartonkiarkkien massasuspensioon eikä arkkeja ole sen jälkeen enää päällystetty (Hassan et al., 2015). Kuitenkin, jos näitä tuloksia verrataan tämän kandidaatin kokeellisessa osassa saatuihin tuloksiin, huomataan, että repäisyjuuus sekä venymä kasvoivat päällystetyksen myötä, jolloin tuloksissa on havaittavissa jotakin yhtenäistä. Taulukossa 5 on esitetty, miten päällystys vaikutti mekaanisiin ominaisuuksiin verrattuna päällystämättömiin kartonkeihin ja mitä eroa ominaisuuksilla oli eri fibrillaatioasteen päällysteiden välillä.

Taulukko 5. Kokeellisen osan päätulokset.

Ominaisuus	Vaikutus suuremmassa (80 % RH) kosteudessa	Vaikutus MFC-päällystyksellä	MFC X3 vs. MFC X5
Neliömassa	Kasvoi	Kasvoi	Ei merkittävää eroa
Paksuus	Kasvoi	Kasvoi	50 % RH kosteudessa MFC X3 suurempi, 80 % RH ei merkittävää eroa
Vetolujuus	Pieneni (KS ja PS suunnassa)	Pieneni	MFC X5 hieman suurempi
Venymä	Kasvoi (KS ja PS suunnassa)	Kasvoi	Ei merkittävää eroa
Repäisyjujuus	Kasvoi (KS ja PS)	50 % RH kasvoi, mutta ei 80 % RH	MFC X3 suurempi
Taivutusvastus	Pieneni (KS ja PS)	Kasvoi	MFC X3 suurempi
Ilmanläpäisevyys	Ei merkittävää muutosta	Ei merkittävää muutosta	MFC X3 suurempi
Pinnankarheus	Pieneni (sileämpi pinta)	Kasvoi (karheampi)	MFC X3 kasvatti (karheampi)

Lähes kaikki tässä kandidaatintyössä mitatut mekaaniset ominaisuudet heikkenivät suuremmassa 80 % kosteudessa sekä pelkällä kartongilla että päällystetyillä kartongeilla verrattuna pienempään 50 % kosteuteen. Ainoastaan repäisyjujuus ja venymä olivat parempi korkeammassa 80 % kosteudessa. Lähes samanlaisia tuloksia on saatu, kun on tutkittu pelkkiä kartonkipakkauksia ja niiden kestävyyttä ilmasto-olosuhteissa (Lamb ja Rouillard, 2017). Kyseisessä tutkimuksessa saatiin selville, että kartongin lujuus heikkenee, kun ilman suhteellinen kosteus (RH) kasvaa ja trooppisessa (85 % RH ja 38 °C) kosteudessa esikäsitellyt näytteet menettivät 22 % lujuudestaan.

Voidaan myös pohtia sitä, miten kartonkien päällystystä voitaisiin parantaa, jotta pystyttäisiin siirtymään pakkausteollisuudessa öljypohjaisista muoveista kokonaan biopohjaisten päällysteiden käyttöön. Aikaisemmin on tutkittu sitä, miten useamman eri sellupohjaisen päällysteen yhdistelmä vaikuttaa kartongin ominaisuuksiin (Lyytikäinen et al., 2025). Päällystykset oli suoritettu niin, että ensin oli päällystetty metyyliinoselluloosapäällyste (eng. methyl nanocellulose), tämän jälkeen MFC-päällyste ja viimeisenä hydrofobisesti modifioitu etyyli(hydroksietyyli)selluloosa (HM-EHEC, eng. hydrophobically modified ethyl(hydroxyethyl) cellulose). Tuloksena saatiin, että useampi päällystyskerros sulkee kartongin pinnan täysin tai lähes täysin. Voidaan siis olettaa, että jos kartongit olisi päällystetty useammalla MFC-kerroksella, olisi mitä todennäköisimmin voitu parantaa kartongin mekaanisia ominaisuuksia, sillä useammalla MFC-kerroksella on mahdollista saada aikaiseksi tiheämpi

ja yhtenäisempi verkosto. Tulee kuitenkin huomioida se, että MFC on hydrofiilinen materiaali ja sen kosteusherkyys saattaa vaikuttaa myös negatiivisesti mekaanisiin ominaisuuksiin, joten jos kartongit olisi päällystännyt useamman kerran olisi niiden ominaisuudet voineet myös huonontua verrattuna päällystämättömään kartonkiin. Pelkällä MFC:llä päällystämisestä useaan kertaan kartongeille on olemassa kuitenkin vähän tutkimuksia.

Kartonkien päälle levitettävää päällystekerrosta voidaan parantaa myös jollakin apu-/lisäaineella. Yksi tällainen esimerkki olisi päällystää kartonki MFC:llä ja lisätä MFC:n sekaan sellakkaa, joka on luonnonmateriaalista valmistettua hartsimaista ainetta (Hult et al., 2010). Apuaineen avulla on mahdollista saada paperin/kartongin pinta kokonaan peittymään. Kuten kokeellisessa osassa huomattiin, MFC ei peittänyt kokonaan kartongin pintaa, vaan esimerkiksi ilmanläpäisevyys oli lähes sama päällystetyn ja päällystämättömän kartongin välillä. Näin, jos MFC:n sekaan olisi lisätty apuainetta, olisi saatu mahdollisesti paremmat sulkuominaisuudet kartongin pinnalle. MFC:n ja sellakan yhteispäällystys ei tuonut vetoindeksiin parannusta, vaan oli lähes samansuuruinen kuin päällystämättömän kartongin. (Hult et al., 2010.) Voidaan siis todeta, että apu-/lisäaineella voidaan saada vieläkin kestävämpiä ratkaisuja pakkausteollisuuteen kartonkien ja papereiden päällystykseseen.

6 Yhteenveto

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin, miten MFC vaikuttaa kartongin mekaanisiin ominaisuuksiin ja selvitettiin, voidaanko MFC-päällysteillä parantaa kartongin suorituskykyä eri ilmastoitumisolosuhteissa (23°C ja 50 % RH sekä 23°C ja 80 % RH). Kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin siihen, mitä MFC on materiaalina sekä miten sitä voidaan valmistaa eri menetelmillä ja mitä vaikutuksia esikäsitteilyillä on kuiduille. Lisäksi tarkasteltiin millaisia ominaisuuksia MFC:llä on ja miten ne vaikuttavat sen soveltuvuuteen päällysteenä kartongeissa ja papereissa. Katsauksessa käytiin myös läpi, mitä hyötyjä ja haasteita sen käyttöön liittyy. Lisäksi tarkasteltiin aiempia tutkimuksia MFC:n käytöstä pakkausratkaisuisissa ja niiden keskeisiä tuloksia. Erityisesti selvitettiin, kuinka eri tavalla mikrofibrilloitu MFC, eri ilmasto-

olosuhteet ja erityisesti kosteus vaikuttavat mekaanisiin ominaisuuksiin. Kirjallisuuskatsauksen perusteella MFC on monikäyttöinen materiaali ja sen käyttö päällysteenä voi parantaa kartongin mekaanisia ominaisuuksia, kuten lujuutta ja jäykkyyttä, mutta sen suorituskyky riippuu ympäristön kosteudesta, sillä MFC on hydrofiilinen. MFC:n valmistusmenetelmällä voidaan vaikuttaa myös sen rakenteeseen ja ominaisuuksiin. Työn kokeellisen osan tavoitteena oli tutkia, miten mekaaniset ominaisuudet muuttuvat, kun kartongit päällystetään eri fibrillaatioasteen MFC:llä (MFC X3 ja MFC X5) ja miten ne muuttuvat päällystettyjen ja päällystämättömien kartonkien välillä.

Tutkimustulokset osoittivat, että suurempi kosteus lisäsi kartongin neliömassaa ja paksuutta, mutta heikensi sen vetolujuutta. Samalla venymä ja repäisylujuus kasvoivat, kun taas taivutusvastus pieneni. Pinnankarheus väheni eli kartongin pinta muuttui sileämmäksi, mutta ilmanläpäisevyys pysyi lähes ennallaan. MFC-päällystys vaikutti myös kartongin ominaisuuksiin. Se lisäsi neliömassaa, paksuutta ja paransi taivutusvastusta. Toisaalta se heikensi vetolujuutta ja repäisylujuutta suuremmassa kosteudessa verrattuna päällystämättömään kartonkiin. Ilmanläpäisevyyteen päällyste ei juurikaan vaikuttanut. Fibrillaatioasteella oli jonkin verran vaikutusta tuloksiin. MFC X3:lla oli suuremmat arvot repäisylujuudessa, taivutusvastuksessa, ilmanläpäisevyydessä, pinnankarheudessa ja paksuudessa 50 % RH, kun taas MFC X5 antoi hieman suuremmat vetolujuusarvot. Venymässä ja neliömassassa ei ollut merkittäviä eroja eri fibrillaatioasteiden välillä. Tulokset olivat osittain samoja kuin aikaisemmissa tutkimuksissa on saatu. Voidaan kuitenkin todeta, että kaiken kaikkiaan tulokset olivat hyviä konvertoinnin osalta. Ainoastaan, jos halutaan parantaa barrierominaisuuksia, on parannettava päällystettä, päällystyskertoja tai vaihtoehtoisesti päällystysmenetelmää.

Voidaan siis todeta, että MFC:llä päällystäminen vaikuttaa kartongin mekaanisiin ominaisuuksiin monin tavoin. Päällystyksellä saadaan lisättyä tiettyjä ominaisuuksia, kuten taivutusvastusta, mutta päällystys heikentää myös joitakin ominaisuuksia, kuten vetolujuutta ja repäisylujuutta. Jos päällystettyä kartonkia käytetään pakkausteollisuudessa, tulee sen pakkausten valmistuksessa kestää muun muassa venymää, taipuisuutta sekä vetorasitusta. Puolestaan valmiiden pakkauksen tulee lisäksi kestää kuljettamista, pinoamista ja kuluttajan käyttöä. Jos näitä ominaisuuksia mietitään kokeellisen osan perusteella, voidaan sanoa, että

MFC:llä päällystetty kartonki soveltuu pakkausteollisuuteen riippuen käyttötarkoituksesta, sillä vetolujuus ja repäisyjujuus tekivät siitä heikomman materiaalin kestävämpään pakkausten vaatimaa venytystä ja esimerkiksi mekaanista rasitusta käytössä tai kuljetuksessa. MFC:n hydrofiilisyys rajoittaa myös sen sovelluksia käyttökohteissa.

Lopuksi voidaan todeta, että pelkän MFC-päällysteen käyttäminen vaatii lisää tutkimuksia, koska sen hydrofiilisyys voi olla haaste erityisesti elintarvikepakkauksissa. On siis tärkeää tulevaisuudessa tutkia vielä sitä, miten MFC-päällystettä voitaisiin parantaa ja onko päällysteen sekaan mahdollista lisätä jotakin biohajoavaa apuainetta tai onko vaikutusta sillä, miten päällystys applikoidaan ja millaisella tavalla päällystyksen kuivatus suoritetaan. Voidaan myös sanoa, että yhden ominaisuuden parantaminen heikentää toista, joten tutkimusta ja kompromisseja on tehtävä. Näiden asioiden tutkiminen on kuitenkin jo selvä askel kohti kestävämpää pakkausteollisuutta sekä pakkausten parempaa ja energiatehokkaampaa kierrätystä.

Lähteet

- Abdenour, C., Eesaee, M., Stuppa, C., Chabot, B., Barnabé, S., Bley, J., Tolnai, B., Guy, N. ja Nguyen-Tri P. 2023. Water vapor and air barrier performance of sustainable paper coatings based on PLA and xanthan gum. *Materials Today Communications*. Vol. 36, 106626. ISSN: 2352–4928.
- Almeida, R.O., Maloney, T.C. ja Gamelas, J.A. 2023. Production of functionalized nanocelluloses from different sources using deep eutectic solvents and their applications. *Industrial Crops and Products*, Vol. 199, 116583. ISSN: 0926–6690.
- Aulin, C. 2009. Novel oil resistant cellulosic materials. Väitöskirja. Kungliga Tekniska högskolan, School of Chemical Science and Engineering, Fiber and Polymer Technology, Fiber Technology. Stockholm, KTH. 55 s.
- Aulin, C., Gällstedt, M. ja Lindström, T. 2010. Oxygen and oil barrier properties of microfibrillated cellulose films and coatings. *Cellulose (London)*. Vol. 17, s. 559-574. ISSN: 0969–0239.
- Bru, F., Rol, F., Martinez, P., Monot, C., Leroy, L., Meyer, V., Cochaux, A. ja Schelcher, M. 2024. Combination of MFC wet lamination and chromatogeny grafting processes to produce all cellulose packaging materials. *Cellulose (London)*. Vol. 31(11), s. 6827–6842. ISSN: 0969–0239.
- Carson, F.T. 1944. Effect of humidity on physical properties of paper. Circular of the National Bureau of Standards C445. Washington, DC: Yhdysvaltain hallituksen painotoimisto. s.1-12.
- Ek, M., Gellerstedt, G. ja Henriksson, G. 2009. *Pulp and Paper Chemistry and Technology. Volume 1, Wood Chemistry and Wood Biotechnology*. Saksa: De Gruyter. ISBN: 3110213397.
- Guimarães, I.C., dos Reis, K.C., Menezes, E.G.T., Rodrigues, A.C., da Silva, T.F., de Oliveira, I.R.N. ja de Barros Vilas Boas, E.V. 2016. Cellulose microfibrillated suspension of carrots obtained by mechanical defibrillation and their application in edible starch films. *Industrial Crops and Products*. Vol. 89, s. 285–294. ISSN: 0926–6690.

Hassan, M.L., Bras, J., Mauret, E., Fadel, S.M., Hassan, E.A. ja El-Wakil, N. 2015. Palm rachis microfibrillated cellulose and oxidized-microfibrillated cellulose for improving paper sheets properties of unbeaten softwood and bagasse pulps. *Industrial Crops and Products*. Vol. 64, s. 9–15. ISSN: 0926–6690.

Henriksson, M., Henriksson, G., Berglund, L.A. ja Lindström, T. 2007. An environmentally friendly method for enzyme-assisted preparation of microfibrillated cellulose (MFC) nanofibers. *European Polymer Journal*. Vol. 43(8), s. 3434–3441. ISSN: 0014–3057.

Hult, E., Iotti, M. ja Lenes, M. 2010. Efficient approach to high barrier packaging using microfibrillar cellulose and shellac. *Cellulose (London)*. Vol. 17(3), s. 575–586. ISSN: 0969–0239.

Kangas, H. 2014. Opas selluloosananomateriaaleihin. VTT Technology. Vol. 199 s. 1–90. ISSN: 2242-122X.

Kargarzadeh, H., Ioelovich, M., Ahmad, I., Thomas, S. ja Dufresne, A. 2017. Methods for Extraction of Nanocellulose from Various Sources. *Handbook of nanocellulose and cellulose nanocomposites*. John Wiley & Sons. Luku 1, s. 2-35. ISBN: 3527338667.

Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D. ja Dorris, A. 2011. Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials. *Angewandte Chemie International Edition*. Vol. 50(24), s. 5438–5466. ISSN: 1433–7851.

Klemm, D., Cranston, E.D., Fischer, D., Gama, M., Kedzior, S.A., Kralisch, D., Kramer, F., Kondo, T., Lindström, T. ja Nietzsche, S. 2018. Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science: Today's state. *Materials Today (Kidlington England)*. Vol. 21(7), s. 720–748. ISSN: 1369–7021.

KnowPap 26.0. 2024. KnowPap : Paperinvalmistuksen Oppimisympäristö = Learning Environment for Papermaking and Automation (LUT). ProWledge Oy.

Kumar, V., Kenttä, E., Andersson, P. ja Forsström, U. 2020. Microfibrillated Cellulose Based Barrier Coatings for Abrasive Paper Products. *Coatings (Basel)*. Vol. 10(11), 1108. ISSN: 2079–6412.

Lamb, M.J. ja Rouillard, V. 2017. Static and Dynamic Strength of Paperboard Containers Subjected to Variations in Climatic Conditions. *Packaging Technology & Science*. Vol. 30(3), s. 103–114. ISSN: 0894–3214.

Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A. ja Bras, J. 2012. Microfibrillated cellulose – Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. *Carbohydrate Polymers*. Vol. 90(2), s. 735–764. ISSN: 0144–8617.

Lavoine, N., Bras, J. ja Desloges, I. 2014a. Mechanical and barrier properties of cardboard and 3D packaging coated with microfibrillated cellulose. *Journal of Applied Polymer Science*. Vol. 131(8). ISSN: 0021–8995.

Lavoine, N., Desloges, I. ja Bras, J. 2014b. Microfibrillated cellulose coatings as new release systems for active packaging. *Carbohydrate Polymers*. Vol. 103, s. 528–537. ISSN: 0144–8617.

Lavoine, N., Desloges, I., Khelifi, B. ja Bras, J. 2014c. Impact of different coating processes of microfibrillated cellulose on the mechanical and barrier properties of paper. *Journal of Materials Science*. Vol. 49(7), s. 2879–2893. ISSN: 0022–2461.

Lehmonen, J., Pere, J., Hytönen, E. ja Kangas, H. 2017. Effect of cellulose microfibril (CMF) addition on strength properties of middle ply of board. *Cellulose (London)*. Vol. 24(2), s. 1041–1055. ISSN: 0969–0239.

Lev, R., Tanninen, P., Lyytikäinen, J. ja Leminen, V. 2023. Converting and its effects on barrier properties of coated packaging materials: A Review. *BioResources*. Vol. 18(4), s. 8707–8738.

Liimatainen, H., Visanko, M., Sirviö, J., Hormi, O. ja Niinimäki, J. 2013. Sulfonated cellulose nanofibrils obtained from wood pulp through regioselective oxidative bisulfite pre-treatment. *Cellulose (London)*. Vol. 20(2), s. 741–749. ISSN: 0969–0239.

Liimatainen, H., Visanko, M., Sirviö, J.A., Hormi, O.E.O. ja Niinimäki, J. 2012. Enhancement of the Nanofibrillation of Wood Cellulose through Sequential Periodate–Chlorite Oxidation. *Biomacromolecules*. Vol. 13(5), s. 1592–1597. ISSN: 1525–7797.

Luciano, C.G., Caicedo Chacon, W.D. ja Valencia, G.A. 2022. Starch-Based Coatings for Food Preservation: A Review. *Starch – Stärke*. Vol. 74(5–6), 2100279. ISSN: 0038–9056.

Lyytikäinen, J., Koljonen, K. ja Leminen, V. 2025. Effects of multilayered cellulose-based coatings on the barrier properties of paperboard. *Cellulose (London)*. Vol. 32, s. 2617–2628. ISSN: 0969–0239.

Mascarenhas, A.R.P., Scatolino, M.V., Dias, M.C., Martins, M.A., de Melo, R.R., Mendonça, M.C. ja Tonoli, G.H.D. 2022. Association of cellulose micro/nanofibrils and silicates for cardboard coating: Technological aspects for packaging. *Industrial Crops and Products*. Vol. 188, 115667. ISSN: 0926–6690.

Nazari, B. ja Bousfield, D.W. 2016. Cellulose nanofibers influence on properties and processing of paperboard coatings. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. Vol. 31(3), s. 511–520. ISSN: 0283–2631.

Niini, A., Leminen, V., Tanninen, P. ja Varis, J. 2021. Humidity effect in heating and cooling of press-formed paperboard food packages: Comparison of storing and heating conditions. *Packaging Technology & Science*. Vol. 34(8), s. 517–522. ISSN: 0894–3214.

Nova Institute. 2025. EU Enforces Ambitious Packaging and Recycling Rules as New Packaging and Packaging Waste Regulation Takes Effect Today. *Environmental Science & Technology*. 59A.

Oksman, K., Mathew, A.P., Bismarck, A., Rojas, O. ja Sain, M. 2014. Handbook of green materials: processing technologies, properties and applications. Vol. 5. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 100 s. ISSN: 2335–4596.

Osong, S.H., Norgren, S. ja Engstrand, P. 2016. Processing of wood-based microfibrillated cellulose and nanofibrillated cellulose, and applications relating to papermaking: a review. *Cellulose (London)*. Vol. 23(1), s. 93–123. ISSN: 0969–0239.

Pääkkö, M., Ankerfors, M., Kosonen, H., Nykänen, A., Ahola, S., Österberg, M., Ruokolainen, J., Laine, J., Larsson, P.T., Ikkala, O. ja Lindström, T. 2007. Enzymatic Hydrolysis Combined with Mechanical Shearing and High-Pressure Homogenization for Nanoscale Cellulose Fibrils and Strong Gels. *Biomacromolecules*. Vol. 8(6), s. 1934–1941. ISSN: 1525–7797.

Pääkkönen, T. 2017. Bromide-free TEMPO-mediated oxidation of cellulose by hypochlorite-fundamental and practical aspects. Väitöskirja. Aalto Yliopisto, Kemian tekniikan korkeakoulu. Department of Bioproducts and Biosystems. 74 s.

Rabnawaz, M., Wyman, I., Auras, R. ja Cheng, S. 2017. A roadmap towards green packaging: the current status and future outlook for polyesters in the packaging industry. *Green Chemistry: An International Journal and Green Chemistry Resource: GC*. Vol. 19(2), s. 4737–4753. ISSN: 1463–9262.

Raquez, J., Habibi, Y., Murariu, M. ja Dubois, P. 2013. Polylactide (PLA)-based nanocomposites. *Progress in Polymer Science*. Vol. 38(10-11), s. 1504–1542.

Retulainen, E., Luukko, K., Nieminen, K., Pere, J., Laine, J. ja Paulapuro, H. 2001. Papermaking Quality of Fines from Different Pulps-the Effect of Size, Shape and Chemical Composition. 55th Appita Annual Conference, Hobart, Australia 30 April-2 May 2001: Proceedings.: Appita Inc. Carlton, Vic. 291–296.

Rhim, J. 2010. Effect of moisture content on tensile properties of paper-based food packaging materials. *Food Science and Biotechnology*. Vol. 19, s. 243–247. ISSN: 1226–7708.

Sajaniemi, V. 2018. Proof of Concept for Manufacturing Microfibrillated Cellulose. Aalto University. Diplomityö. Aalto yliopisto, Master's Programme in Chemical, Biochemical and Materials Engineering. 108 s.

Sanchez-Salvador, J.L., Campano, C., Lopez-Exposito, P., Tarres, Q., Mutje, P., Delgado-Aguilar, M., Monte, M.C. ja Blanco, A. 2021. Enhanced morphological characterization of cellulose nano/microfibers through image skeleton analysis. *Nanomaterials*. Vol. 11(8), 2077. ISSN: 2079–4991.

Sirvio, J.A., Visanko, M. ja Liimatainen, H. 2015. Deep eutectic solvent system based on choline chloride-urea as a pre-treatment for nanofibrillation of wood cellulose. *Green Chemistry: An International Journal and Green Chemistry Resource: GC*. Vol. 17(6), s. 3401–3406. ISSN: 1463–9262.

Syverud, K. ja Stenius, P. 2009. Strength and barrier properties of MFC films. *Cellulose (London)*. Vol. 16(1), s. 75–85. ISSN: 0969–0239.

Turbak, A.F., Snyder, F.W. ja Sandberg, K.R. 1983. Microfibrillated cellulose, as new cellulose product: properties, uses, and commercial potential. *Journal of Applied Polymer Science, Applied Polymer Symposium*. Vol. 37(9), s. 815-827.

Ukkola, J. 2017. Syväeutektisen liuottimen kierrätys nanofibrilloidun selluloosan valmistuksessa. Diplomityö, Prosessiteknikan koulutusohjelma. Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta. 76 s.

Vishtal, A. ja Retulainen, E. 2012. Deep-drawing of paper and paperboard: The role of material properties. *BioResources*. Vol. 7(3), s. 4424–4450.

Vishtal, A. ja Retulainen, E. 2014. Boosting the Extensibility Potential of Fibre Networks: A Review. *BioResources*. Vol. 9(4), s. 7951-8001.

Vishtal, A., Hauptmann, M., Zelm, R., Majschak, J. ja Retulainen, E. 2014. 3D Forming of Paperboard: The Influence of Paperboard Properties on Formability. *Packaging Technology & Science*. Vol. 27(9), s. 677–691. ISSN: 0894–3214.

Wågberg, L., Decher, G., Norgren, M., Lindström, T., Ankerfors, M. ja Axnäs, K. 2008. The Build-Up of Polyelectrolyte Multilayers of Microfibrillated Cellulose and Cationic Polyelectrolytes. *Langmuir*. Vol. 24(3), s. 784–795. ISSN: 0743–7463.

Ålander, E., Lindgren, K., Johansson, M. ja Gimåker, M. 2017. Towards a More Cost-Efficient Paper and Board Making using Microfibrillated Cellulose. 7th Nordic Wood Biorefinery Conference held in Stockholm, Sweden, 28-30 Mar. 2017. RISE Bioekonomi s. 49–54.

Liite 1. Tehtyjen mittausten lukuarvot.

Taulukko 1. Näytteiden neliömassat.

Näyte	Keskiarvo [g]
Kartonki (50 % RH, 23 °C)	208,0
MFC x3 (50 % RH, 23 °C)	215,0
MFC x5 (50 % RH, 23 °C)	214,5
Kartonki (80 % RH, 23 °C)	225,0
MFC x3 (80 % RH, 23 °C)	224,5
MFC x5 (80 % RH, 23 °C)	225,0

Taulukko 2. Paksuuden tulokset.

Näyte	Keskiarvo [μm]	Hajonta [μm]
Kartonki (50 % RH, 23 °C)	310	1
MFC x3 (50 % RH, 23 °C)	343	3
MFC x5 (50 % RH, 23 °C)	340	5
Kartonki (80 % RH, 23 °C)	341	3
MFC x3 (80 % RH, 23 °C)	359	4
MFC x5 (80 % RH, 23 °C)	359	3

Taulukko 3. Vetolujuuden ja venymän tulokset.

Näyte	Vetolujuus		Venymä	
	Keskiarvo [kN/m]	Hajonta [kN/m]	Keskiarvo [mm]	Hajonta [mm]
Kartonki (50 % RH, 23 °C)				
KS	13,8	0,3	1,8	0,1
PS	7,7	0,2	3,9	0,4
MFC x3 (50 % RH, 23 °C)				
KS	12,8	0,4	2,1	0,1
PS	7,2	0,2	4,7	0,3
MFC x5 (50 % RH, 23 °C)				
KS	13,0	0,3	2,2	0,1
PS	7,2	0,3	4,6	0,3
Kartonki (80 % RH, 23 °C)				
KS	10,1	0,3	2,2	0,1
PS	5,5	0,2	5,0	0,3
MFC x3 (80 % RH, 23 °C)				
KS	9,7	0,3	2,5	0,1
PS	5,6	0,9	5,5	0,3
MFC x5 (80 % RH, 23 °C)				
KS	10,3	0,2	2,4	0,1
PS	6,0	0,1	5,6	0,2

Taulukko 4. Repäisylujuuden tulokset.

Näyte	Keskiarvo [mN]	Hajonta [mN]
Kartonki (50 % RH, 23 °C)		
KS	1720	160
PS	1830	120
MFC x3 (50 % RH, 23 °C)		
KS	1980	160
PS	2090	300
MFC x5 (50 % RH, 23 °C)		
KS	1940	90
PS	2060	180
Kartonki (80 % RH, 23 °C)		
KS	2140	90
PS	2220	130
MFC x3 (80 % RH, 23 °C)		
KS	2160	140
PS	2140	160
MFC x5 (80 % RH, 23 °C)		
KS	2080	230
PS	2130	100

Taulukko 5. Taivutusvastuksen tulokset.

Näyte	Keskiarvo [mN]	Hajonta [mN]
Kartonki (50 % RH, 23 °C)		
KS	179	2
PS	80	1
MFC x3 (50 % RH, 23 °C)		
KS	206	19
PS	88	8
MFC x5 (50 % RH, 23 °C)		
KS	197	13
PS	90	11
Kartonki (80 % RH, 23 °C)		
KS	150	3
PS	60	1
MFC x3 (80 % RH, 23 °C)		
KS	158	12
PS	68	1
MFC x5 (80 % RH, 23 °C)		
KS	158	9
PS	83	40

Taulukko 6. Ilmanläpäisevyyden tulokset.

Näyte	Keskiarvo [$\mu\text{m}/\text{Pa s}$]	Hajonta [$\mu\text{m}/\text{Pa s}$]
Kartonki (50 % RH, 23 °C)	3,1	0,2
MFC x3 (50 % RH, 23 °C)	3,2	0,2
MFC x5 (50 % RH, 23 °C)	3,1	0,2
Kartonki (80 % RH, 23 °C)	3,8	0,2
MFC x3 (80 % RH, 23 °C)	3,7	0,2
MFC x5 (80 % RH, 23 °C)	3,4	0,2

Taulukko 7. Pinnankarheuden tulokset.

Näyte	Keskiarvo [ml/min]	Hajonta [ml/min]
Kartonki (50 % RH, 23 °C)	415	45
MFC x3 (50 % RH, 23 °C)	1475	780
MFC x5 (50 % RH, 23 °C)	1195	415
Kartonki (80 % RH, 23 °C)	485	115
MFC x3 (80 % RH, 23 °C)	775	260
MFC x5 (80 % RH, 23 °C)	730	195