



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TUOMAS SAARI
LUONNONMATERIAALISEOSTETUT MUOVIT JA BIOMUOVIT
Diplomityö

Tarkastajat: professori Pentti Järvelä
ja tutkija Päivi Lehtiniemi

Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
9. lokakuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

SAARI, TUOMAS: Luonnonmateriaaliseostetut muovit ja biomuovit

Diplomityö, 71 sivua, 12 liitesivua

Maaliskuu, 2014

Pääaine: Muovit ja elastomeerit

Tarkastajat: professori Pentti Järvelä, tutkija Päivi Lehtiniemi

Avainsanat: luonnonkuitukomposiitit, kuituorientaatio, sellu, pellava, wollastoniitti

Luonnonkuitujen potentiaali toimia perinteisempien lasi- ja hiilikuitujen asemesta komposiittien lujitteina sopivissa sovelluksissa on tunnistettu niin tutkijoiden, kuin osin jo teollisuudenkin taholta. Luonnonkuitujen runsaus, uusiutuvuus ja kierrätettävyys palvelevat niin taloudellisia kuin ekologisikiakin intressejä. Haasteita muodostavat kuitenkin muun muassa laatuvaihtelut, huono prosessoinnin kesto, adheesion ongelmat ja kuitukasaantumien syntyminen.

Tässä työssä valmistettiin sekä standardikoesauvoja että ruiskuvaletusta levystä leikattuja pienempiä koesauvoja, joita käytettiin kuitujen orientaatiovaikutuksen tutkimiseen. Matriiseina käytettiin polyeteeniä, polypropeenii sekä biomuovi Mater-Bi:tä. Lujitteina toimivat pellava, sellu, wollastoniitti ja lasikuitu. Testattiin myös kytkentäaineen vaikutusta mekaanisiin ominaisuuksiin. Orientaatiokoesauvoja valmistettiin käyttäen matriisina polyeteeniä ja kuituvaihtoehtoina pellavaa, sellua ja lasikuitua.

Komposiitteja valmistettiin onnistuneesti, ja standardikoesauvojen tapauksessa kuitujen lisäys kasvatti aina sekä kimmokerrointa että vetolujuutta, paitsi luonnonkuitulujitetun polypropeenin tapauksessa. Iskulujuus sen sijaan heikkeni kuituja lisättäessä muissa paitsi polypropeenikomposiittien tapauksessa. Sellu oli lujitteena esteettisistä ongelmistaan huolimatta lähes pellavan veroista. Kytkeäaine hyödytti sekä pellava- että sellukomposiitin veto-ominaisuuksia. Iskulujuuteen kytkentäaineella oli negatiivinen vaikutus. Standardikoesauvoille tehtyjen kokeiden mukaan lasikuitukomposiitit olivat ylivoimaisia veto-ominaisuuksien puolesta, mutta iskulujuudessa erot jäivät pieniksi. Mater-Bi-komposiittien veto-ominaisuuksissa havaittiin suurin prosentuaalinen kasvu neitseellisen materiaalin ominaisuuksiin nähden.

Orientaatiokoesauvoille tehdyt vetokokeet osoittivat, että lasikuitukomposiittien lujuus sekä jäykkyys ovat huomattavasti luonnonkuitukomposiittien lujuutta ja jäykkyyttä riippuvaisempia kuormituksen suunnasta. Optisella mikroskoopilla voitiin havaita, että lasikuidut orientoituivat ruiskuvalukappaleen pintakerroksessa selvästi pitkin ruiskuvalun päävirtaussuuntaa, kun taas kappaleen keskiosassa orientaatio oli kohtisuoraan ruiskuvalun päävirtaussuuntaa. Luonnonkuiduilla vastaava ilmiö voitiin havaita myöskin, mutta selvästi heikompana. Luonnonkuitujen suuntautuminen oli lasikuituja sattumanvaraisempaa. Luonnonkuitukomposiittien eduksi voidaankin laskea lasikuitukomposiitteja tasalaatuisemmat ominaisuudet eri suunnista kuormitettaessa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Materials Engineering

SAARI, TUOMAS: Natural fiber reinforced plastics and bioplastics

Master of Science Thesis, 71 pages, 12 appendix pages

March, 2014

Major: Plastic and Elastomer Technology

Examiners: professor Pentti Järvelä, researcher Päivi Lehtiniemi

Keywords: natural fiber composites, fiber orientation, pulp, flax, wollastonite

The potential of natural fibers as replacement for more traditional glass- and carbon fibers has been recognized by researchers and partly also by the industry. The abundance, renewability and recyclability of natural fibers serve both the ecological and economic interests. Some challenges of natural fibers include varying quality, difficulties in processing, poor adhesion and formation of fiber agglomerates.

In this work, standard test specimens and smaller test specimens cut from injection moulded plate were manufactured. Smaller specimens were used to study the effect of fiber orientation. Polyethylene, polypropylene and bioplastic Mater-Bi were used as matrices. Flax, pulp fiber, wollastonite and glass fibers were used as reinforcements. Also the effect of a coupling agent was studied. Orientation test specimens were manufactured using polyethylene as matrix and flax, pulp fiber and glass fiber as reinforcement choices.

Composites were manufactured successfully, and in the case of standard test specimens, more fiber lead to better modulus and tensile strength, except in natural fiber reinforced polypropylene composites. On the contrast, impact strength weakened by addition of fibers in every other matrix than polypropylene. Despite its poor aesthetics, pulp fiber composites were almost as good mechanically as flax fiber composites. Coupling agent enhanced the tensile properties of both flax and pulp composites. As for composites' impact strength, addition of coupling agent made the property poorer. In the light of test results, glass fiber composites were superior in tensile properties, while in impact tests differences between reinforcements were quite small. Tensile-wise, Mater-Bi composites benefited most from the addition of fibers.

Tensile testing performed to orientation test specimens revealed that glass fiber composites' tensile properties are much more dependent on the direction of the loading. With optical microscope it was observed that glass fibers oriented along melt flow direction in the surface of the specimen, while in the centre fiber orientation was perpendicular to the melt flow direction. Same principle applied also to the orientation of natural fibers, but the effect was much weaker. The orientation of natural fibers was more random than the orientation of glass fibers. It can be perceived that the strength of natural fiber composites is quite independent on the loading direction compared to glass fiber composites.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty LUOMA-projektille (luonnonmateriaalien mahdollisuudet polymeerimatriiseissa) Tampereen teknillisen yliopiston materiaaliopin laitoksella 2013-2014.

Työn ohjaajina toimivat professori Pentti Järvelä ja tutkija Päivi Lehtiniemi. Haluaisinkin esittää heille kiitokset opastuksesta ja kullnarvoisista neuvoista matkan varrella.

Kiitos kuuluu myös käyttöinsinööri Sinikka Pohjoselle pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvien ottamisesta ja käyttöinsinööri Tommi Lehtiselle, joka auttoi materiaalien kompaundoinnissa. Kiitokset tutkimusapulainen Juuso Hautalalle ja erikoislaboratoriomestari Jyri Öhrlingille koekappaleiden valmistuksesta. Tutkimusapulainen Iina Neuvoselle haluan esittää kiitoksen avusta kokeiden suorittamisessa. Kiitos myös kaikille muille, jotka kokevat auttaneensa ja tukeneensa minua tavalla tai toisella.

Tampereella 13. helmikuuta 2014

Tuomas Saari

SISÄLLYS

Tiivistelmä	ii
Abstract	iii
Alkusanat	iv
Termit ja niiden määritelmät	vii
1 Johdanto	1
2 Materiaalit	2
2.1 Luonnonkuitukomposiitit	2
2.1.1 Matriisi	2
2.1.2 Luonnonkuidut	5
2.2 Muut tutkimuksessa hyödynnetyt materiaalit	9
2.2.1 Kytöntäaine	9
2.2.2 Lasikuitu	10
3 Kompaundointi	12
3.1 Valmistettavat komposiitit	12
3.2 Kompaundointiprosessi	13
4 Koesauvojen ruiskuvalu	15
4.1 Orientaatiokoesauvat	18
5 Komposiittien ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät	20
5.1 Kuitukonsentraatio	20
5.2 Kuituorientaatio	20
5.3 Kuitujen koko ja rakenne	25
5.4 UV-säteily	27
5.5 Kosteus	28
6 Ominaisuuksien testaaminen	29
6.1 Vetokoe	29
6.2 Iskukoe	31
6.3 Kovuuskoe	32
6.4 Mikroskooppinen tarkastelu	32
6.5 Tiheys	34
7 Tulosten tarkastelu	35
7.1 Vetokoe	35
7.1.1 Standardikoesauvat	35
7.1.2 Orientaatiokoesauvat	43
7.2 Iskukoe	45
7.2.1 Standardikoesauvat	45
7.2.2 Orientaatiokoesauvat	47
7.3 Kovuuskoe	48
7.4 Optinen mikroskopia	49
7.5 SEM-kuvat	58
7.6 Tiheys	64

8	Yhteenveto	66
	Lähteet.....	68
	Liite 1: Valmistetut komposiitit	i
	Liite 2: Ruiskuvaluparametrit	iii
	Liite 3: Vetokokeiden tuloksia	vii
	Liite 4: Iskukokeiden tuloksia.....	x
	Liite 5: Kovuus- ja tiheyskokeiden tuloksia.....	xiii

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

σ	Jännitys vetokokeessa
a_{cN}	Iskulujuus (Charpy, lovettu)
A	Vetokoekappaleen alkuperäinen poikkipinta-ala
b	Iskukoekappaleen koko leveys
b_N	Iskukoekappaleen leveys loven kärjen kohdalta mitattuna
ε	Venymä vetokokeessa
E_c	Näytteeseen absorboitunut energia iskukokeessa
F	Kuormitus vetokokeessa
h	Iskukoekappaleen paksuus
l	Iskukoekappaleen pituus
L_0	Vetovälin pituus vetokokeessa
ΔL_0	Siirtymä vetokokeessa
m-%	Massaprosenttia
til-%	Tilavuusprosenttia
$CaSiO_3$	Wollastoniitti
MAPE	Maleiinihappoanhydridimodifioitu polyeteeni
MAPP	Maleiinihappoanhydridimodifioitu polypropeeni
-OH	Hydroksidiryhmä
PA	Polyamidi
PE-HD	Korkeatiheyksinen polyeteeni (High density polyethylene)
PHB	Polyhydroksibutyaatti
PLA	Polylaktidi
PP	Polypropeeni
PVA	Polyvinyylialkoholi
SEM	Pyyhkäiselektronimikroskopia (Scanning electron microscopy)
TPS	Termoplastinen tärkkelys

1 JOHDANTO

Luonnonkuiduilla on monia etuja rakennemateriaaleina. Luonnonkuitujen saatavuus on runsasta, ne ovat uusiutuvia, kierrätettäviä, sekä suhteellisen edullisia. Usein kuitenkin komposiittimateriaalien lujitteiksi valitaan lasi- tai hiilikuitua niiden parempien mekaanisten ominaisuuksien ja kosteudenkestävyyden vuoksi. Luonnonkuitujen tiheys on kuitenkin perinteisiä kuituja pienempi, joten niistä voidaan valmistaa suhteellisen keveitä komposiitteja, ja luonnonkuitujen heikompi kosteudenkestävyys voidaan kääntää eduksi biohajoavissa sovelluksissa. Tarvitaan lisää tutkimustyötä, jotta konventionaalisten kuituvaihtoehtojen lisäksi teollisuudessa otettaisiin huomioon myös luonnonkuidut kuten hamppu, pellava tai sellu. Esimerkiksi autoteollisuudessa näin on jo osin käynytkin.

Tässä tutkimuksessa tarkoituksena on tutkia luonnonkuitukomposiittien prosessointia ja vertailla luonnonkuitukomposiittien mekaanisia ominaisuuksia eri kuitulaaduilla, kuitupitoisuuksilla ja matriisivalinnoilla. Luonnonkuitukomposiittigranulaatit valmistetaan kaksiruuviekstruderin avulla ja koekappaleiden valmistus granulaateista tapahtuu ruiskuvalamalla. Komposiitteja valmistetaan kolmesta eri matriisista (polyeteeni, polypropeeni, biomuovi Mater-Bi) ja kolmesta eri luonnonkuidusta (pellava, sellu, mineraalikuitu wollastoniitti). Lisäksi valmistetaan lasikuitulujitettuja PE ja PP-komposiitteja, jotta saataisiin vertailupohjaa tuloksiin. Komposiiteille tehdään veto-, isku- ja kovuuskokeet sekä tiheyden mittausta. Mikroskooppista tarkastelua varten hyödynnetään sekä pyyhkäisyelektronimikroskooppia että optista stereomikroskooppia.

Lisäksi työssä on tarkoitus tutkia, miten kuituorientaatio vaikuttaa ruiskuvallettujen katkokuitulujitettujen komposiittien ominaisuuksiin. Aiheesta tehtyjen tutkimusten lukumäärä ei ole kovin suuri, mutta varsinkin lasikuitujen orientaation tiedetään vaikuttavan merkittävästi komposiittien mekaanisiin ominaisuuksiin. Orientaatiotutkimusta varten komposiitteja ruiskuvaletaan suurempaan levymäiseen muottiin. Levymäisestä muotista työstetään koesauvoja vaaka- ja pystysuunnissa ja näille sauvoille suoritetaan veto- ja iskukokeet.

2 MATERIAALIT

2.1 Luonnonkuitukomposiitit

Luonnonkuiduilla on lukuisia ominaisuuksia, jotka tekevät niistä houkuttelevia erilaisiin sovelluksiin. Luonnonkuitujen tyypilliset piirteet, kuten biohajoavuus, uusiutuvuus, edullinen hinta, hyvä eristävyys, pieni muottikutistuma, luonnollinen ulkonäkö, runsas saatavuus, alhainen tiheys ja hyvä lujuus suhteessa tiheyteen saattavat olla ratkaisevia, kun punnitaan vaihtoehtoja eri lujitteiden välillä. Luonnonkuidut saattavat siis ekologisuutensa lisäksi olla myös teknisesti sopivampi ratkaisu tiettyihin tilanteisiin, kuin perinteiset lasi- ja hiilikuidut. [1; 2; 3]

Luonnonkuitujen hyödyntämisessä on kuitenkin omat haasteensa. Luonnonkuitujen ominaisuuksien vaihtelevuus on epätoivottua materiaalitekniseltä kantilta katsottuna. Esimerkiksi sadonkorjuun ajankohta voi vaikuttaa pellavakuidun mekaanisiin ominaisuuksiin, mikä vaikeuttaa laadunhallintaa. Prosessointilämpötilan optimointi ei ole aina helppoa, koska luonnonkuitujen lämpötilankesto on 200 celsiusasteen paikkeilla, mutta prosessointi olisi tätä suuressa lämpötilassa usein helpompaa. Myös kosteuden absorptio ja kuitukasaantumien muodostuminen tuovat lisähaasteita luonnonkuitujen käyttöön komposiiteissa. [3]

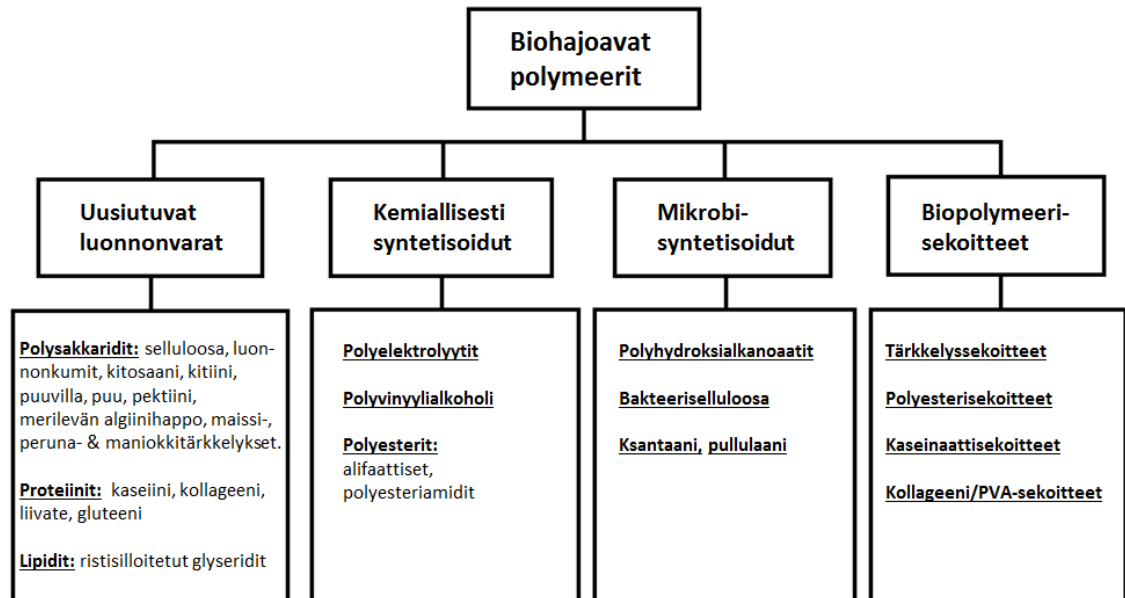
2.1.1 Matriisi

Matriisiin tehtävä on suojata kuituja fyysisiltä ja kemiallisilta uhkilta sekä jakaa ulkoiset rasitukset kuitujen välillä. Rasitukset siirtyvät kuitu/matriisi-rajapinnan välillä, joten kuitujen hyvä kiinnittyminen matriisiin on oleellisen tärkeää. Kiinnittymistä voidaan edesauttaa erilaisilla kytkentäaineilla. Polymeerin valintaan vaikuttavat muun muassa yhteensopivuus kuitujen kanssa (prosessointilämpötilan rajoitukset, kostutus...) ja valmiilta tuotteelta vaadittavat ominaisuudet. [1; 2; 3; 4; 5]

Kestomuovit, kuten polyeteeni (PE), polypropeeni (PP) ja polyamidi (PA) houkuttelevat kierrätettävyydeltään, mutta kuitujen impregnoiminen matriisimuovilla on tällöin haastavampaa, kuin juoksevampien kertamuovien tapauksessa. Kestomuoveihin perustuvia kompondeja valmistettaessa on käytettävä riittävän korkeaa lämpötilaa ja painetta, mikä voi taas olla ristiriidassa prosessoinnille herkkien luonnonkuitujen rakenteen säilymisen kanssa. [1; 2; 3; 4; 5]

Biopolymeerit tuovat vaihtoehdon synteettisille öljypohjaisille muoveille. Yhdistettynä luonnonkuitujen kanssa biopolymeereistä on mahdollista kehittää erittäin käytännöllisiä ja ekologisia ratkaisuja, kun tarvitaan esimerkiksi nopeasti hajoavia kertakäyttötuotteita. Biomuoveja on sekä biohajoavia että hajoamattomia. Esimerkkeinä

biohajoavista mainittakoon polylaktidi (PLA) ja polyhydroksibutyaatti (PHB), sekä hajoamattomista etanolipohjainen polyeteeni. Kuvassa 2.1 on havainnollistettu biohajoavien polymeerien erästä mahdollista luokittelua alkuperän mukaan. [1; 2; 3; 4; 5]



Kuva 2.1. Biopolymeerien luokittelu alkuperän mukaan. Muokattu lähteestä [3]

Synteettisistä ja uusiutuvista raaka-aineista peräisin olevista polymeereistä voidaan valmistaa myös blendi. Esimerkiksi polyuretaani ja termoplastinen tärkkelys (TPS) sekoittuvat hyvin, kunhan polyuretaanin määrä on alle 15 painoprosenttia. Kyseisellä sekoituksella saatiin muovin mekaanisia ominaisuuksia ja kosteudenkestoa selkeästi parannettua verrattuna puhtaaseen TPS:een. [3; 6; 7] Seuraavaksi tutustutaan tässä tutkimuksessa käytettyihin matriisimateriaaleihin.

2.1.1.1 Polyeteeni

Polyolefiineihin kuuluvan polyeteenin eri muodot ovat erittäin suosittuja teollisessa käytössä. Tässä tutkimuksessa on käytetty suuritiheysistä polyeteeniä (PE-HD, high density polyethylene), joka on matalatiheysistä (PE-LD, low density polyethylene) polyeteeniä kiteisempää, lujempaa ja korkeammassa lämpötilassa sulavaa. ExxonMobil HDPE HYA 600 -materiaalin toimitti ExxonMobil chemical. Taulukossa 2.1 on esitelty valmistajan materiaalille ilmoittamia ominaisuuksia. [8; 9]

Taulukko 2.1. HDPE HYA 600 polyeteenin ominaisuuksia [9]

Ominaisuus	Arvo	Metodi
Tiheys	0,954 g/cm ³	ExxonMobilin oma
Sulaindeksi (190 °C/2,16 kg)	0,35 g/10min	ASTM D1238
Kimmokerroin	0,96 GPa	ASTM D638
Vetolujuus	26 MPa	ASTM D638
Murtovenymä	> 100 %	ASTM D638
Kovuus (Shore D, 15 sek)	62	ASTM D2240
Iskulujuus (Izod, lovettu)	14 kJ/m ³	ASTM D256
Vicat-pehmenemislämpötila	128 °C	ASTM D1525

2.1.1.2 Polypropeeni

Niin ikään polyolefiineihin kuuluva polypropeeni ylittää teollisuuden käyttömäärissä jopa polyeteenin. Polypropeeni on PE-HD:ta korkeammassa lämpötilassa sulava, suuremman kimmokertoimen ja vetolujuuden materiaali. Polypropeenin etuihin kuuluvat myös alhainen tiheys ja hyvä prosessoitavuus. Tässä tutkimuksessa käytettiin Ineosin toimittamaa 100-CA50 polypropeenia, joka on ruiskuvaluun suunniteltu korkean sulaindeksin materiaali. Taulukossa 2.2 on esitelty valmistajan materiaalille ilmoittamia ominaisuuksia. [5; 8; 10]

Taulukko 2.2. Tutkimuksessa käytetyn 100-CA50 polypropeenin ominaisuuksia [10]

Ominaisuus	Arvo	Metodi
Sulaindeksi (230 °C/2,16kg)	50 g/10min	ISO 1133
Kimmokerroin	1,55 GPa	ISO 178
Vetolujuus	36 MPa	ISO 527-1,-2
Iskulujuus (Izod, lovettu)	3 kJ/m ²	ISO 180/1A
Iskulujuus (Charpy, lovettu)	2,2 kJ/m ²	ISO 179/1eA
HDT (taipumislämpötila)	115 °C	ISO 75/B

2.1.1.3 Mater-Bi

Mater-Bi on Novamontin kehittämä biomuoviperhe, joka koostuu täysin biohajoavista materiaaleista. Kasvitärkkelykseen on sekoitettu synteettisiä ainesosia, kuten polyvinyylialkoholeja tai polyestereitä, jotka parantavat joustavuutta ja kosteudenkestoa. Mater-Bi-muovit on jaoteltu neljään eri luokkaan, joiden kaikkien perusainesosana termoplastinen tärkkelys toimii. [11; 12; 13]

Luokan Z muovit koostuvat lisäksi poly-ε-kaprolaktonista. Kompostiolosuhteissa nämä muovit hajoavat 20–45 päivässä. Käyttökohteisiin kuuluvat kalvot ja levyt. Luokan Y muoveissa on lisättyä selluloosajohdannaisia. Hajoamis aika kompostissa on 4 kuukautta ja käyttökohteina toimivat mittapysyvyyttä vaativat jäykät ruiskuvalukappaleet. V-luokan muovit koostuvat yli 85 prosenttisesti termoplastisesta tärkkelyksestä, joten ne ovat liukenevia ja nopeasti biohajoavia. Niitä käytetäänkin erilaisiin väliaikaisiin pakkauksiin. A-luokan muoveihin on lisätty eteenivinyylialkoholin kopolymeeria ja ne ovat Mater-Bi – materiaaleista stabiileimpia. Biohajoamis aika A-luokan muoveilla on 2 kuukautta jätevedenpuhdistuslaitosta simuloivassa ympäristössä. Käyttökohteita ovat sovellukset, joissa kompostoitavuutta ei tarvita. [11]

Tässä tutkimuksessa käytetty Mater-Bi CF04A oli erityisesti puhalluskalvoekstruusioon soveltuvaa laatua. Novamontin ilmoittamat materiaaliominaisuudet ovat listattuna taulukossa 2.3. [14]

Taulukko 2.3. Mater-Bi CF04A biopolymeerin ominaisuuksia [14]

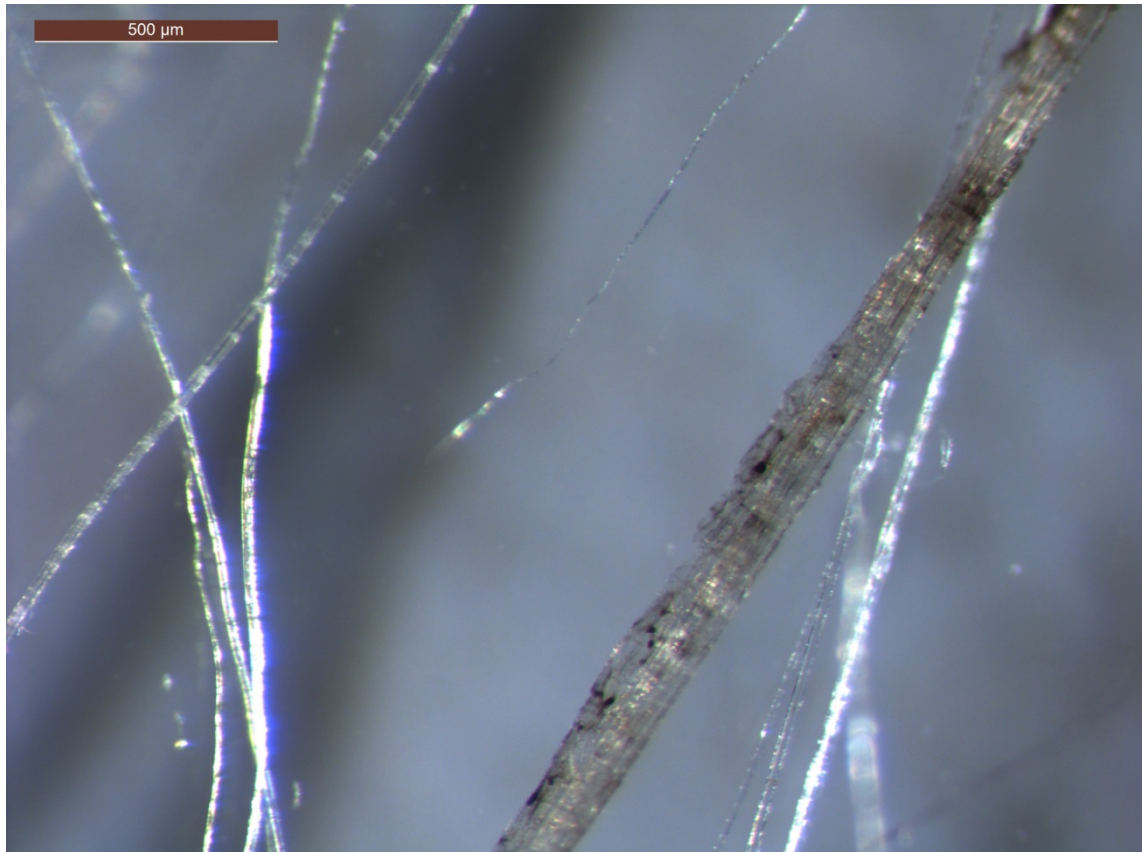
Ominaisuus	Arvo	Metodi	Huomioitavaa
Tiheys	1,23 g/cm ³	Pyknometri	
Sulaindeksi (160 °C/5 kg)	7 g/10min	ASTM D1238	
Kimmokerroin	0,2 GPa	ASTM D882	20 µm paksu puhalluskalvo
Vetolujuus	26 MPa	ASTM D882	20 µm paksu puhalluskalvo
Murtovenymä	n. 550 %	ASTM D882	20 µm paksu puhalluskalvo
Sulamislämpötila	130 °C	DSC	

2.1.2 Luonnonkuidut

Kirjallisuudessa on käsitelty kattavasti lukuisia eri luonnonkuituja, joista kasvipärisinä esimerkkeinä voidaan mainita pellava, hamppu, puukuidut, juutti, sisal ja rami. Mineraaliperäisiä komposiiteissa käytettäviä luonnonkuituja ovat muun muassa asbesti, wollastoniitti ja brusiitti. [15] Kaikkia mahdollisia eri kuituvaihtoehtoja ei käydä läpi sen tarkemmin tässä tekstissä, vaan sen sijaan keskitytään tutkimuksessa esiintyviin pellavasta, sellusta ja wollastoniitista valmistettuihin komposiitteihin.

2.1.2.1 Pellava

Kuitukäytössä pellavasta hyödynnetään varren suora keskiosa. Kuitukimput ovat paksuudeltaan 40 – 80 µm ja niiden pituus vaihtelee välillä 60 ja 140 cm. Pellavakuidut ovat lujia, mutta taipuisia. Pellavan soluseinä koostuu suurimmaksi osaksi selluloosasta, joka vastaa kuidun mekaanisista ominaisuuksista. Muita ainesosia ovat hemiselluloosa, pektiini, ligniini ja vahat. Tässä tutkimuksessa käytetyn pellavan toimitti Safilin. Kuvassa 2.2 on esitettyä 50-kertainen stereomikroskooppisuurennoa tässä työssä käytetystä pellavasta. Kuvassa voidaan nähdä sekä kuituja että kuitukimppuja. [2; 16]



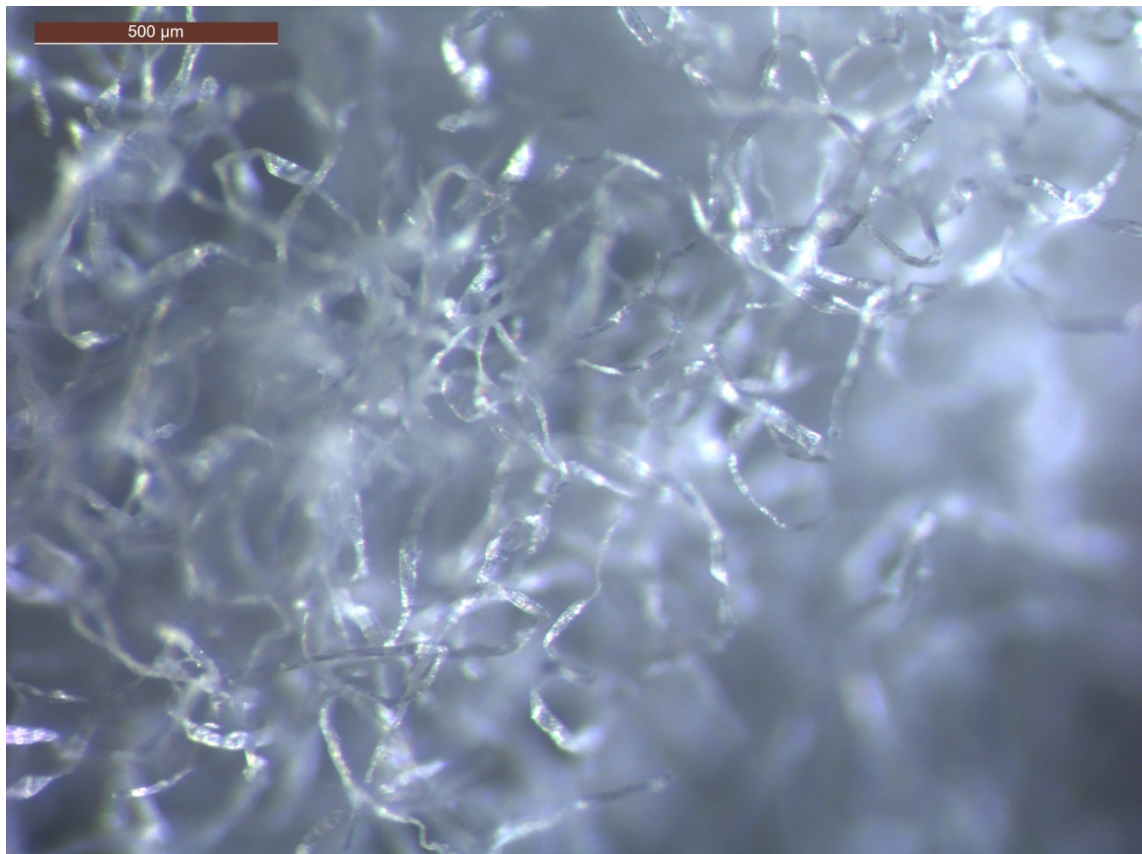
Kuva 2.2. *Stereomikroskooppikuva pellavasta*

Pellavan ja polyeteenin komposiiteista on tehty useita tutkimuksia, joskin tulokset ovat olleet hieman ristiriitaisia. Selvää on, että pellava jäykistää polyeteeniä, mutta vetolujuus on saattanut heiketä tai parantua riippuen tutkimuksesta. Li et al. [17] tekemässä tutkimuksessa 10 m-% kemiallisesti käsittelemätöntä pellavakuitua lisättiin PE-HD:seen ja saavutettiin 2,5 % parannus vetolujuuteen. Erilaiset kuitujen käsittelyt (alkali, silaani...) vaikuttivat positiivisesti komposiitin vetolujuuteen. Saman tutkimusryhmän toisessa raportissa [18] polymeeriä kompaundoitiin myös suuremmalla pellavapitoisuudella, jolloin 30 m-% lisäys pellavaa kasvatti PE-HD:n vetolujuutta 17 %. S. Parkin [19] diplomityössä sitä vastoin 10 m-% pellavakuitulisäys heikensi PE-HD:n vetolujuutta 10 %.

2.1.2.2 Sellu

Myös puuaine koostuu selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Lisäksi esiintyy erilaisia uuteaineita, kuten pihkaa. Ainesosien suhteet riippuvat puun iästä ja puulajista. Tämän eron voi huomata erityisesti havupuiden ja lehtipuiden välillä. Havupuut ovat komposiittimateriaaleissa suositumpia kuitujen suuremman pituus/leveys-suhteensa ansiosta. Tässä tutkimuksessa käytetty puuaines oli valkaistua havupuun (n. 1:1-suhde kuusta ja mäntyä) kraftmassaa, eli kemiallisesti käsiteltyä sellua. Kemiallisen käsittelyn lisäksi sellulle oli tehty myös mekaaninen käsittely. Valkaisu vähentää ligniinin määrää

sellussa. Mekaaninen käsittely taas lyhentää kuituja ja muodostaa niiden pintaan fibrillejä, jotka lisäävät kuidun pinta-alaa. Fibrillit ovat pääkuidusta ulkonevia lyhyehköjä ja epäsäännöllisiä säikeitä. Lisäksi kuiduissa tapahtuu sisäistä fibrillaatiota, joka tekee kuiduista keskenään samankaltaisempia. Suuremmasta kuitupinta-alasta johtuen käsittely parantaa kuitujen adheesiota polymeerimatriisiin. Kuvassa 2.3 on esitettyä 50-kertainen stereomikroskooppisuurennoa tässä tutkimuksessa käytetyistä sellukuiduista. [16; 20; 21]



Kuva 2.3. *Stereomikroskooppikuva sellukuiduista*

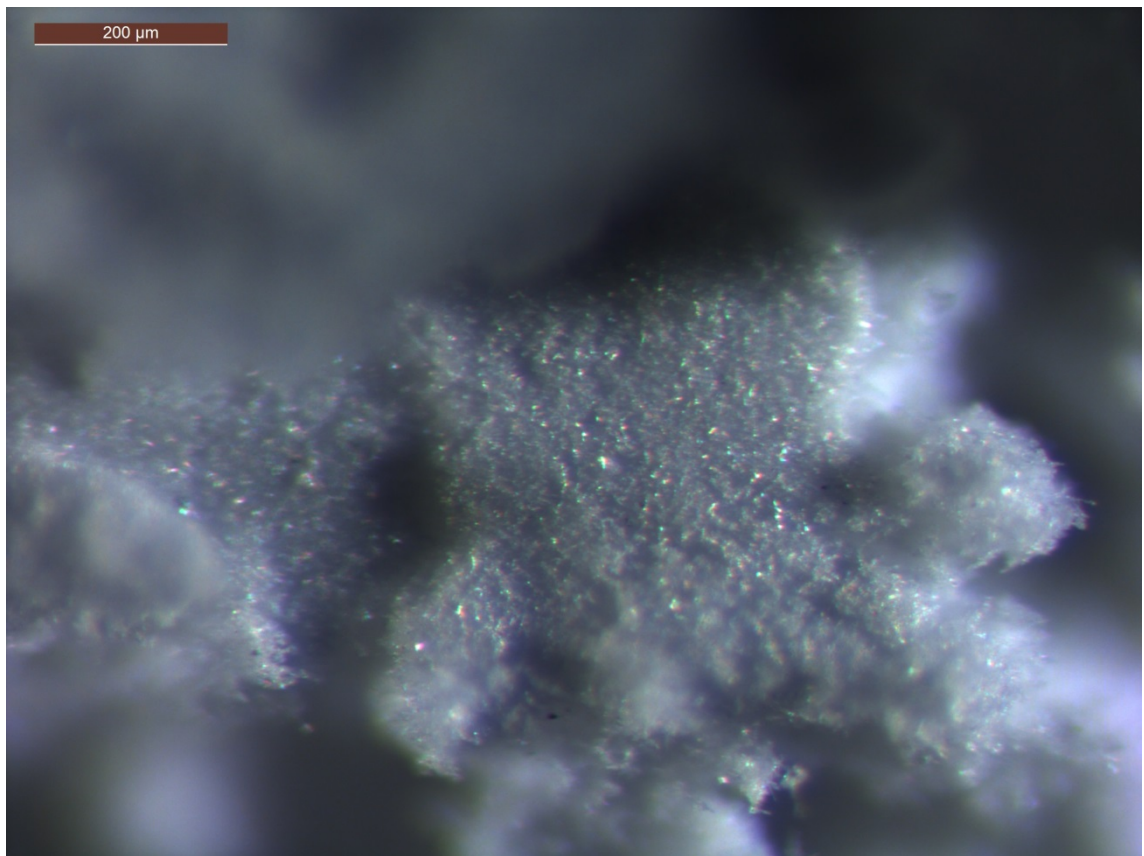
Eräässä tutkimuksessa selvitettiin mekaanisen käsittelyn keston vaikutusta sellukuiduista valmistettuihin polypropeenikomposiitteihin. Havaittiin, että kimmomoduuli laski tasaisesti, mitä pidempään käsittelyä oli jatkettu, kun taas vetolujuus kasvoi tiettyyn pisteeseen asti. [22]

J. Chenin tohtorintutkintoon liittyvässä tutkimuksessa selvitettiin mm. kraftsellun PE-HD:ta lujittavaa vaikutusta kuumapuristetuissa komposiiteissa. 10 massaprosenttia sellua kasvatti PE-HD:n vetolujuutta 30 % ja kimmomoduulia 50 %. Kun sellun määrää vielä tästä lisättiin, kimmomoduuli kyllä kasvoi, mutta vetolujuuteen lisäyksellä ei ollut enää juurikaan vaikutusta. Myös maleiinihappoanhydridi-kytkentäaineen (MAPE) vaikutusta testattiin. Viisitoista massaprosenttia sellua sisältäneeseen komposiittiin lisättiin 5 m-% kytkentäainetta, mutta tällä ei saatu havaittavaa parannusta kimmomoduuliin eikä vetolujuuteen. Nanosavella käsitellyistä

sellukuiduista ja PE-HD:sta valmistetun komposiitin vetolujuuteen MAPE:n lisäämisellä oli sitä vastoin suotuisa vaikutus. [23]

2.1.2.3 Wollastoniitti

Wollastoniitti (CaSiO_3) on kalkkikiven yhteydessä esiintyvä valkoinen neulasmainen mineraali, jota voidaan käyttää polymeerien lujitteena. Suomi on yksi harvoista wollastoniitin merkittävistä tuottajamaista ja sitä louhii Nordkalk Lappeenrannassa. Kuvassa 2.4 on esitettyä 100-kertainen stereomikroskooppisuurennoa tässä tutkimuksessa käytetystä Nordkalkin toimittamasta wollastoniitista. Pellavaan ja selluun nähden kyse on vielä paljon hienojakoisemmasta materiaalista. Kuvassa nähdään lukuisista partikkeleista koostuva kasauma. [24]



Kuva 2.4. *Stereomikroskooppikuva wollastoniitista*

Wollastoniitin tiheys on kasviperäisiin luonnonkuituihin verrattuna varsin korkea, eli $2,9 \text{ g/cm}^3$. Wollastoniittineulasen pituus on leveyteen verrattuna 5-20 –kertainen ja voidaan puhua jo lujittavasta vaikutuksesta pelkän täyteainefunktion asemesta, toisin kuin muiden mineraalitäyteaineiden tapauksessa. Mitä suurempi tämä suhdeluku on, sitä paremmin vahvistavasta ja kalliimmasta wollastoniitista on kyse. Neulaset ovat kuitenkin melko hauraita, joten prosessoinnissa on oltava huolellinen, jotta kuidut eivät katkeilisi liian pieniksi pätkiksi. Neulasten pituudet vaihtelevat välillä

2-40 µm. Tässä tutkimuksessa käytetyn wollastoniitin koko oli n. 5 µm. Wollastoniitilla on komposiitin ominaisuuksiin samankaltainen vaikutus kuin lasikuidulla. Se parantaa lujuutta, mittapysyvyyttä ja vähentää muottikutistuman määrää. Wollastoniitin kovuus on yksinkertaisen mineraaleille kehitetyn Mohsin kovuusasteikon mukaan 4-5, eli samaa luokkaa raudan kanssa. Wollastoniitin lämmönkestävyys (sulamislämpötila 1540 °C) on ylivoimainen kasviperäisiin luonnonkuituihin verrattuna. Yleisesti täyteaineena käytetystä talkista valmistettuihin komposiitteihin verrattuna wollastoniittikomposiittien etuna ovat paremmat mekaaniset ominaisuudet, kuten vetolujuus, iskunkestävyys ja pienempi naarmuuntumisalttius. Wollastoniitti ei ole myöskään vaarallinen terveydelle, kuten toinen mineraalikuitu, asbesti. [24; 25; 26]

Wollastoniittipartikkelien pinta houkuttelee veden hydroksyyliiryhmiä, mikä vaikeuttaa kiinnittymistä polaarittomaan polymeeriin. Yhteensopivuutta polymeerin kanssa voidaan parantaa käsittelemällä wollastoniittipartikkelit silaanipohjaisella kytkentäaineella. [25]

Eräässä tutkimuksessa testattiin polypyrrolilla käsitellyn wollastoniitin lujittavuutta polyeteenissä. Näytekappaleet valmistettiin lämpömuovaamalla. Komposiitin sekoitussuhde oli 5 osaa wollastoniittia 100 osaa polyeteeniä kohden. Kimmokertoimessa havaittiin pieni, n. 10 prosentin parannus puhtaaseen polyeteeniin verrattuna, mutta vetolujuus jopa heikkeni hivenen. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) havainnoidusta adheesio- parantumisesta huolimatta kytkentäaineen lisääminen pienensi sekä kimmokerrointa että vetolujuutta. [27]

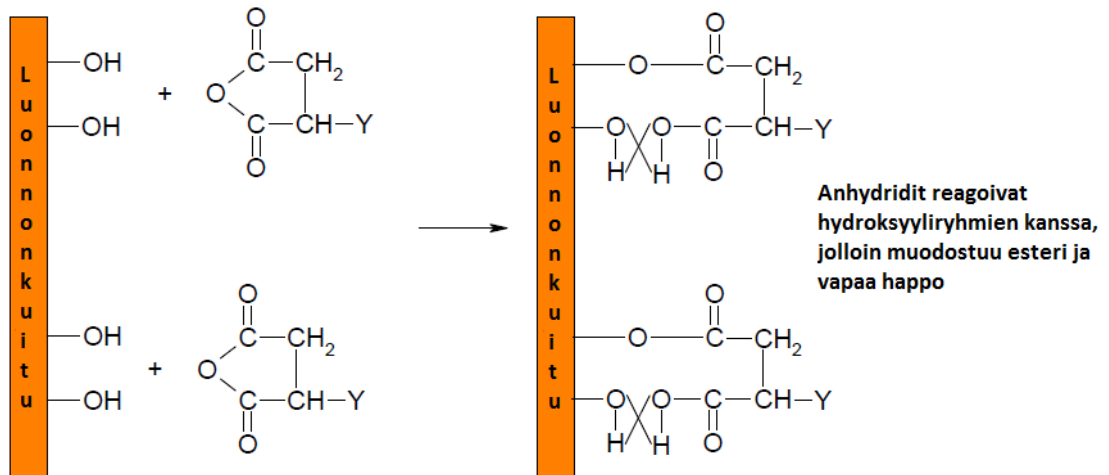
Toisessa tutkimuksessa ruiskuvaletuissa polyeteeni-wollastoniitti – koesauvoissa havaittiin sitä vastoin kimmomoduulin ja vetolujuuden paranemista, kun wollastoniittipitoisuutta lisättiin. Esimerkiksi 15 tilavuusprosenttia wollastoniittia sisältänyt komposiitti oli n. 13 prosenttia lujempaa ja jopa kolme kertaa jäykempää, kuin puhdas PE. Sauvojen iskulujuuteen wollastoniitilla oli heikentävä vaikutus ja myös prosessoinnin todettiin vaikeutuneen suuremmilla wollastoniittipitoisuuksilla. Viidentoista tilavuusprosentin wollastoniittipitoisuudella iskunkestävyys pieneni neljäsosaan verrattuna puhtaaseen polyeteeniin. Kytkentäaineen lisääminen paransi komposiitin (12 tilavuusprosenttia wollastoniittia) iskunkestävyyttä varsin dramaattisesti suurilla pitoisuuksilla ja vetolujuuskin parani selkeästi aina siihen asti, kunnes kytkentäaineen määrä ylitti 5 massaprosenttia. [28]

2.2 Muut tutkimuksessa hyödynnetyt materiaalit

2.2.1 Kytkentäaine

Viisitoista tilavuusprosenttia sellua sisältävästä kompaundista tehtiin myös toinen versio, jossa oli lisäksi 3 til-% Licocene PE MA 4351 kytkentäainetta, joka on maleiini-anhydridimodifioitu polyeteeni. Tähän Clariantin valmistamaan

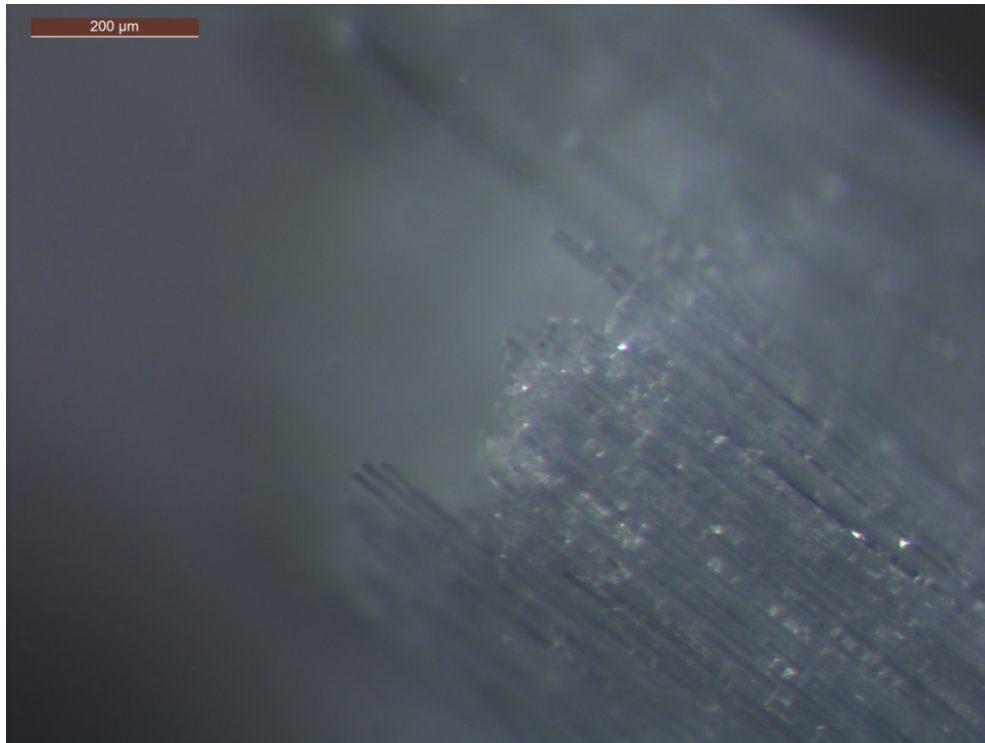
kytkentäaineeseen viitataan tästä lähin lyhenteellä MAPE. MAPE lisää selvästi kuitujen adheesiota matriisiin ja sitä käytetään parantamaan luonnonkuituvahvistetun polyeteenin mekaanisia ominaisuuksia sekä vähentämään komposiitin vesiabsorptiota. MAPE- ja MAPP-kytkentäaineiden esteröitymisreaktioon perustuva toimintaperiaate on esitettyä kuvassa 2.5. [29; 30; 31]



Kuva 2.5. MAPE- ja MAPP-kytkentäaineiden toimintaperiaate. Y esittää PE- tai PP-ketjua. Muokattu lähteestä. [29]

2.2.2 Lasikuitu

Vertailun vuoksi käytettiin tässä tutkimuksessa luonnonkuitujen lisäksi myös lasikuitua, joka on erittäin yleinen lujite komposiittirakenteissa. 3B:n toimittaman PP- ja PE-matriiseja varten räätälöidyn katkokuidun (DS 2200-13P) keskimääräinen pituus oli 4 mm ja halkaisija 13 μm . Satakertainen stereomikroskooppisuurennos tästä lasikuidusta on nähtävissä kuvassa 2.6. Kuvassa näkyy lasikuitukimppu, joka koostuu lukuisista yksittäisistä kuiduista. [32]



Kuva 2.6. *Stereomikroskooppikuva lasikuiduista*

3 KOMPAUNDOINTI

Jotta materiaaleista voitaisiin valmistaa ruiskuvalamalla koekappaleita, sekoitetaan ne ensin ekstruuderissa. Suuttimelta vedetystä ekstrudaatista valmistetaan sitten granulaatteja, joita voidaan käyttää ruiskuvalussa. Kompaundoinnin tavoitteena on saada materiaali riittävän homogeeniseen muotoon, jolloin ihanteellisessa tapauksessa matriisi ympäröi yksittäisiä kuituja joka puolelta. Kuten myöhemmin tulemme huomaamaan, tehokkaasta sekoituksesta huolimatta komposiittiin jää erimuotoisia ja -kokoisia agglomeraatteja. Prosessiparametrit tulee asettaa siten, ettei matriisi- tai kuitumateriaali vaurioidu käsittelyssä esimerkiksi lämpöhajoamisen tai liiallisen mekaanisen pilkkoutumisen vuoksi. Liian suuri prosessointilämpötila ilmenee palaneen hajuna ja mustina kuitupartikkeleina. [33]

3.1 Valmistettavat komposiitit

Kolmesta eri muovista (korkeatiheksinen polyeteeni, Mater-Bi ja polypropeeni), sekä neljästä eri kuidusta (pellava, sellu, wollastoniitti ja lasi) valmistettiin yhteensä 19 eri kompaundia, jotka ovat listattuna taulukossa 3.1. Lisäksi yhteen sellun ja polyeteenin seokseen lisättiin kytkentäainetta (MAPE) kolme tilavuusprosenttia. Käytettyjen materiaalien määrät massoineen ovat nähtävissä liitteessä 1.

*Taulukko 3.1. Valmistettavat komposiitit. * =lisäksi 3 til-% MAPE:a.*

Matriisi	Kuitu	Kuidun tilavuusosuus (%)
PE-HD	Pellava	5
PE-HD	Pellava	15
PE-HD	Pellava	25
PE-HD	Sellu	5
PE-HD	Sellu	15
PE-HD	Sellu	15*
PE-HD	Sellu	25
PE-HD	Lasi	5
PE-HD	Lasi	15
PE-HD	Lasi	25
PE-HD	Wollastoniitti	5
PE-HD	Wollastoniitti	15
PE-HD	Wollastoniitti	25
Mater-Bi	Pellava	15
Mater-Bi	Sellu	15

Mater-Bi	Wollastoniitti	15
PP	Pellava	15
PP	Sellu	15
PP	Lasi	15

3.2 Kompaundointiprosessi

Muovien ja kuitujen sekoittaminen toteutettiin Brabender DSE 25 kaksiruuviekstruuderilla. Ekstruuderin kontrollipaneelista asetettiin laskelmia vastaava automaattinen muovinsyöttönopeus (kg/h). Ruuvin kierrosnopeudeksi asetettiin 50 rpm. Prosessointilämpötilat PE-HD:lle ja PP:lle olivat 190 °C, kun taas matalammassa lämpötilassa hajoavalle Mater-Bi:lle lämpötilaksi asetettiin 150 °C.



Kuva 3.1. Materiaalien kompaundoinnissa käytetty kaksiruuviekstruuder

Kuituja punnittiin mukeihin sopivat erät, jotka vastasivat minuutin aikana käsin syötettävää kuitumäärää. Automaattinen muovigranulaatin syöttö tapahtui kauimmaisesta syöttösuppilosta ja manuaalinen kuidun syöttö ekstruuderin suutinta lähempänä olevasta suppilosta. Ajastinta käytettiin, jotta kuidut saatiin syötettyä tasaisin väliajoin; alhaisemman kuitupitoisuuden kompaundeissa syöttäminen tapahtui 2 kertaa minuutissa ja korkeamman kuitupitoisuuden kompaundeissa 3 kertaa minuutissa. Manuaalisesti annostellun kuidun määrä arvioitiin silmämääräisesti.

Ekstrudoitu materiaali vedettiin jäähdytysaltaan läpi käsin ja pätkittiin sopiviin muutaman metrin mittoihin. Nämä pätkät syötettiin sitten granulaattoriin ja syntyneet granulaatit pakattiin pusseihin. Kompaundoinnin tuotto oli 1400 g tunnissa.

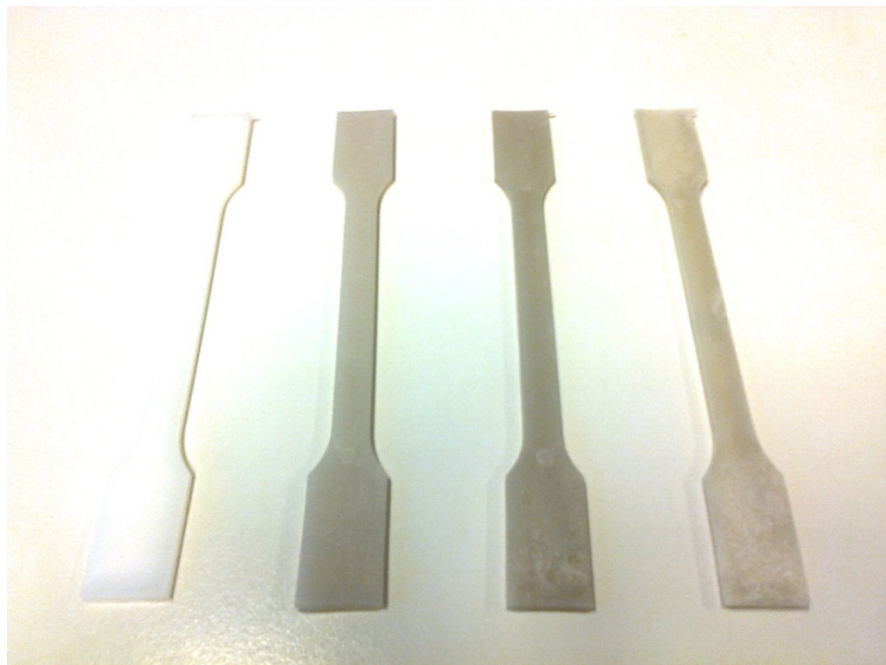


Kuva 3.2. Granulaattori

Wollastoniitin syöttäminen onnistui helposti kaatamalla mukista suppiloon, mutta pellavan ja sellun tapauksessa apuna käytettiin muovista sauvaa, jolla kuidut työnnettiin suppilon aukosta. Erityisesti eniten sellua sisältävän kompaundin valmistaminen oli haastavaa, koska pumpulimaiseksi käsitelty sellu vei paljon tilaa, eikä siirtynyt sylinteriin aivan helposti.

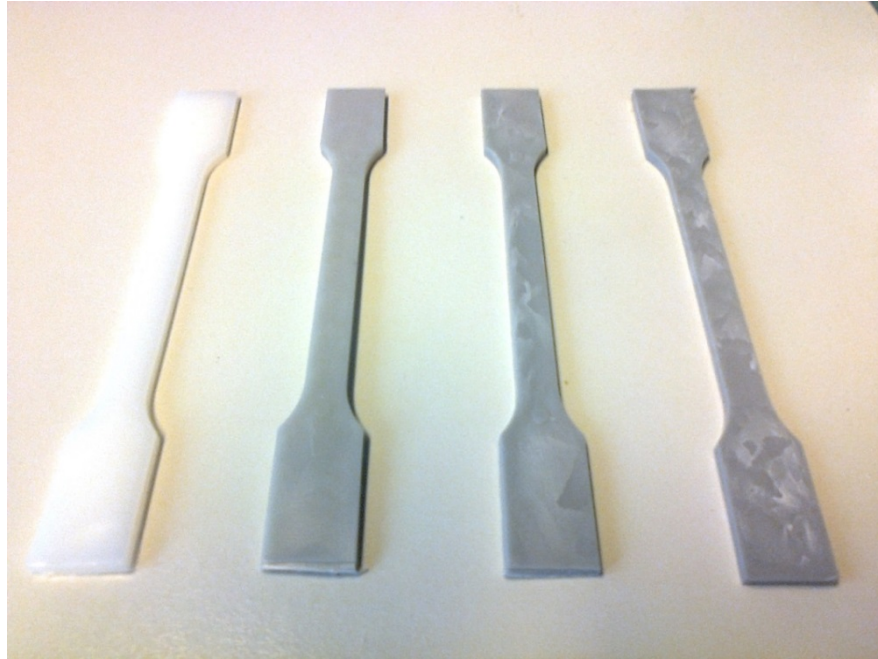
4 KOESAUVOJEN RUISKUVALU

Ruiskuvalu suoritettiin Kraus-Maffei KM50C2 –ruiskuvalukoneella. Käytetyt parametrit ovat nähtävillä liitteen 2 ruiskuvalupöytäkirjassa. Ennen ruiskuvalua granulaatteja kuivattiin 60 celsiusasteessa vähintään 24 tuntia. Kuvassa 4.1 on nähtävissä verrokkimateriaalina toimineesta polyeteeni-lasikuidusta ruiskuvaletut koesauvat. Kuviin on lisätty vertailun vuoksi myös puhtaasta polyeteenistä valmistettu koesauva. [34]



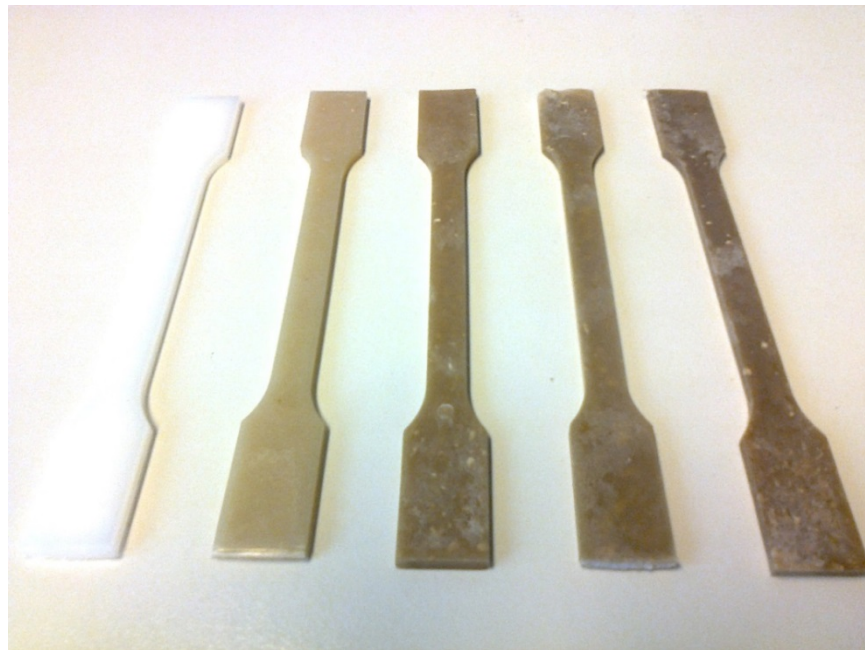
Kuva 4.1. PE-lasikuitu – koesauvat. Lasikuitupitoisuudet vasemmalta oikealle tilavuusprosentteina: 0 %, 5 %, 15 %, 25 %.

Wollastoniitti sekoittui visuaalisesti tarkasteltuna hyvin jo kompaundoinnin aikana. Kuvassa 4.2 on nähtävissä polyeteeni-wollastoniitista ruiskuvaletut koesauvat.



Kuva 4.2. PE-wollastoniitti – koesauvat. Wollastoniittipitoisuudet vasemmalta oikealle tilavuusprosentteina: 0 %, 5 %, 15 %, 25 %.

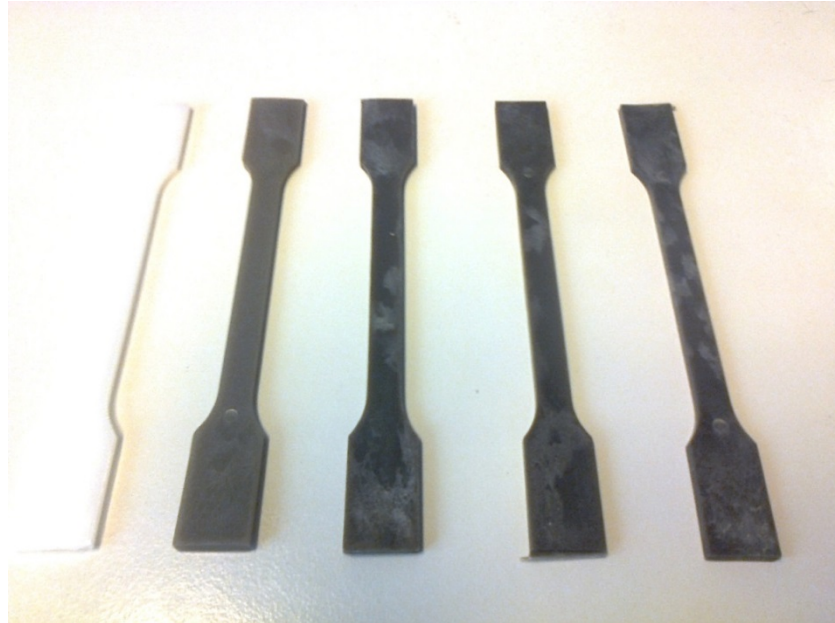
Kuvasta 4.3 voidaan havaita, että sellu ei sekoittunut muoviin parhaalla mahdollisella tavalla, joten etenkin sauvojen päissä on nähtävissä sellupaakkuja. Tästäkin huolimatta sellulla oli kuitenkin selkeä lujittava vaikutus, kuten myöhemmin raportista käy ilmi.



Kuva 4.3. PE-sellu – koesauvat. Sellupitoisuudet vasemmalta oikealle tilavuusprosentteina: 0 %, 5 %, 15 %, 15 % (ja 3% MAPE-kytkentäainetta), 25 %.

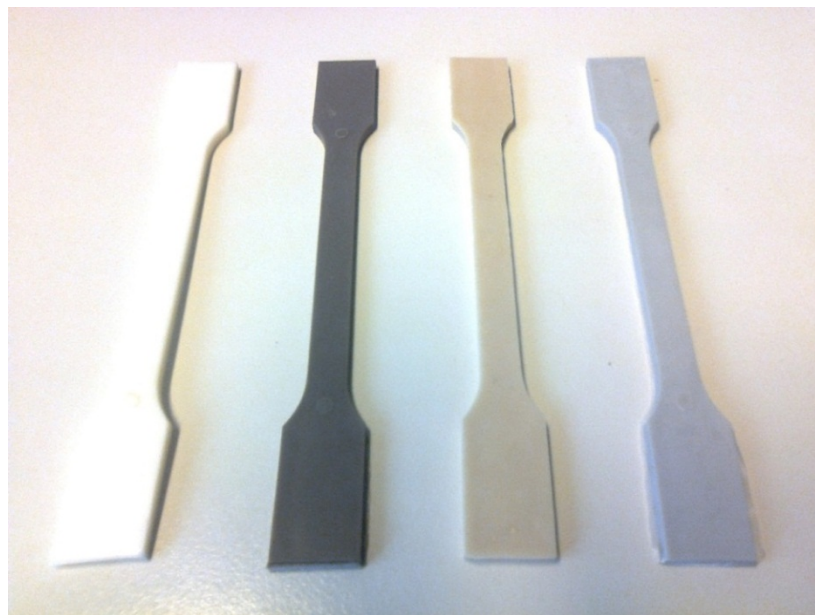
PE-pellava – koesauvat oli valmistettu jo aiemmin LUOMA-projektin aikana, ja niiden kuitupitoisuudet poikkeavat hieman wollastoniitti- ja sellusauvoista. Kuvasta 4.4

voidaan havaita että PE-pellava - komposiitti on huomattavasti tummemman väristä, kuin PE-sellu – komposiitti. Lisäksi ainakaan paljaalla silmällä ei ole havaittavissa vastaavia kuitukeräntymiä, joita oli PE-sellu – sauvoissa.



Kuva 4.4. PE-pellava – koesauvat. Pellavapitoisuudet vasemmalta oikealle tilavuusprosentteina: 0 %, 6,8 %, 14,1 %, 14,1 % (ja 3% MAPE-kytkentäainetta), 22 %.

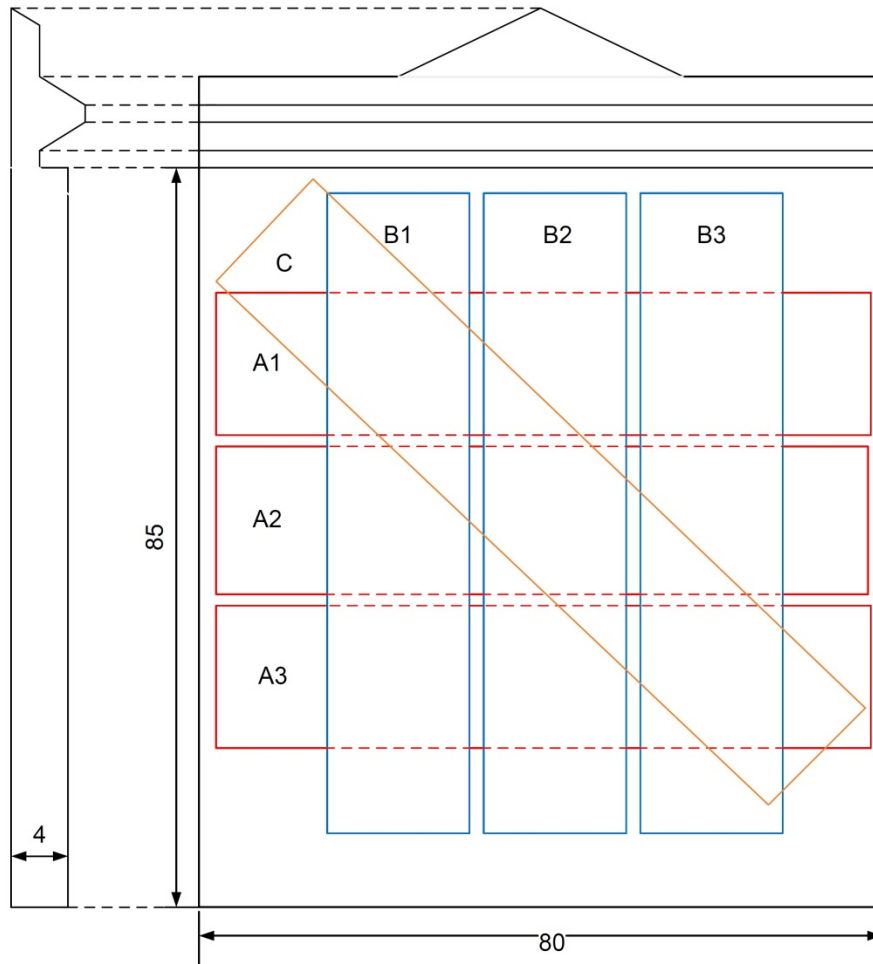
Mater-Bi – pohjaisista komposiittisauvoista (kuva 4.5) ei voida havaita paljaalla silmällä kuitujen mahdollisia epätasaisuuksia, koska Mater-Bi on tiheämpää ja läpinäkymättömämpää PE:iin verrattuna.



Kuva 4.5. Mater-Bi – pohjaiset koesauvat. Vasemmalta oikealle lueteltuna: puhdas Mater-Bi, Mater-Bi + pellava 15 til-%, Mater-Bi + sellu 15 til-%, Mater-Bi + wollastonitti 15 til-%.

4.1 Orientaatioauvat

Granulaateista valmistettiin tavallisten koesauvojen lisäksi myös ns. orientaatioauvoja, jotta voitaisiin tutkia kuituorientaation vaikutusta kappaleiden mekaanisiin ominaisuuksiin. Ensin ruiskuvallettiin suurehko levymäinen kappale, josta sitten leikattiin pienempiä koekappaleita kuvan 4.6 mukaisesti.



Kuva 4.6. Kaaviokuva orientaatiomuotista ja siitä leikatuista kappaleista.
Kuvan mitat ovat millimetrejä.

Oletuksena oli, että virtauksen suuntaiset kappaleet, eli B1-B3 olisivat lujempia, kuin virtausta kohtisuoraan olevat kappaleet A1-A3, ja kappale C:n lujuus taas sijoittuisi näiden välille (C-kappaleiden ominaisuuksia tarkastellaan myöhemmissä tutkimuksissa). Kuituorientaation vaikutusta komposiittien ominaisuuksiin käsitellään kappaleessa 5.1.1. Kuvassa 4.7 voidaan nähdä yllä olevan kaavion mukainen ruiskuvallettu PE-pellava-kappale.



Kuva 4.7. Viisi tilavuusprosenttia pellavaa sisältävä orientaatiotutkimuksia varten ruiskuvalettu polyeteenikappale

Kuvassa 4.8 on esimerkki isommasta kappaleesta työstetystä vetokokeissa käytetystä orientaationsauvasta. Orientaationsauvojen paksuus oli 4 mm, vetovälin pituus n. 27 mm ja leveys kapeimmasta kohdasta mitattuna 10 mm. Kuvassa näkyvä sauva on materiaaliltaan 5 tilavuusprosenttia sellua sisältävää polyeteeniä.



Kuva 4.8. Viisi tilavuusprosenttia sellua sisältävä orientaatiotutkimuksen vetokokeita varten työstetty polyeteenikappale

5 KOMPOSIITTIIEN OMINAISUUksiIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

5.1 Kuitukonsentraatio

Teoreettisten mallien mukaan saataisiin sitä lujempi komposiitti, mitä suurempi olisi kuidun tilavuusosuus. Käytännössä näin ei kuitenkaan ole, vaan eri luonnonkuiduille on olemassa tietty optimitilavuusosuus. Täytyy kuitenkin pitää mielessä, että luonnonkuitujen ominaisuuksiin vaikuttavat lukuisat tekijät, kuten kasvuolosuhteet, joten mitään ehdottomia arvoja ei voida antaa. Taulukkoon 5.1 on listattu joitakin kokeellisesti havaittuja optimikuituosuuksia eri luonnonkuitukomposiiteille. [35]

Taulukko 5.1. Vertailua eri luonnonkuitukomposiittien optimikuituosuuksien välillä. Kuituosuudet ilmoitettu sekä massa- että tilavuusprosentteina. [35]

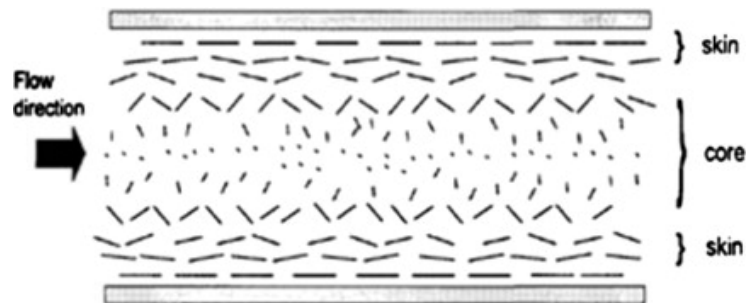
Komposiitti	Kuidun m-%	Kuidun til%
Pellava/PE-HD	~20	~14
Riisi/PE-HD	~5-10	~3-7
Juutti/PP	~40	~29
Hamppu/PP	~40-50	~29-38
Kookoskuitu/PP	~15	~10
Kenaf/PP	~40	~29
Palmukuitu/PP	~15	~10

Tutkimuksissa on lisäksi todettu, että yli 50 tilavuusprosenttia luonnonkuitua sisältävissä komposiiteissa kuiduista muodostuu agglomeraatteja, jotka aiheuttavat kuitujen ja matriisin välisen adheesion heikkenemistä. [35]

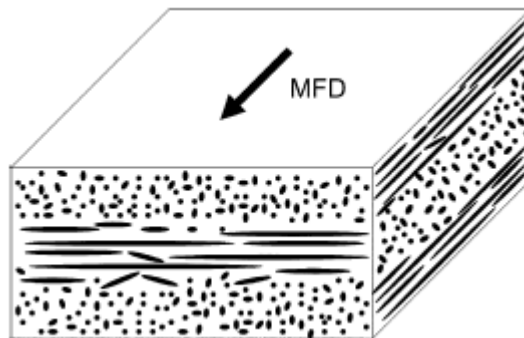
5.2 Kuituorientaatio

Kappaletta ruiskuvaltaessa sulaan polymeeriin syntyy virtauskenttä, jonka mukaan kuidut orientoituvat, ja tämä orientaatio säilyy matriisin jähmettymisenkin jälkeen. Kuva 5.1 havainnollistaa kuitujen käyttäytymistä. Orientaatio tapahtuu leikkausvirtauksen suuntaisesti, joten kappaleen pintakerroksessa kuidut ovat yhdensuuntaisia muotin seinämän kanssa. Hyvin lähellä muotin seinämää tosin kuidut ovat sattumanvaraisesti orientoituneita. Kappaleen keskellä kuidut ovat sitä vastoin keskimäärin orientoituneet päävirtaussuuntaan nähden kohtisuoraan. Kuvassa 5.2

nähdään orientaatiovaikutus vielä näkökulmasta, jossa suuremman kappaleen keskeltä on leikattu pieni suorakaiteen muotoinen pala. [13; 36; 37; 38]



Kuva 5.1. Kuitujen orientaatio ruiskuvaltaessa. Lähellä pintaa olevat kuidut orientoituvat ruiskuvalun päävirtaussuunnan mukaisesti, kun taas keskiosan kuidut orientoituvat ruiskuvalun päävirtaussuuntaa vasten. [36]



Kuva 5.2. Kolmiulotteinen kaavakuva suuremman ruiskuvalutun levyn keskeltä leikatusta kappaleesta (MFD = melt flow direction, eli sulan virtaussuunta) [38]

Ohuissa ruiskuvalukappaleissa leikkausvirtaus on usein dominoivassa roolissa, mikä näkyy kappaleen pinnan kanssa yhdensuuntaisten (tai lähes yhdensuuntaisten) kuitujen suuressa määrässä. Standardikoe-kappaleiden kuituorientaatio on varsin helposti havainnollistettavaa verrattuna monimutkaisiin teollisuuden ruiskuvalukappaleisiin. Standardikoe-kappaleiden säännöllinen geometria ja pieni koko aiheuttaa voimakasta kuituorientaatiota pitkin kappaleen akselia, joten näissä kappaleissa pintakerros on varsin paksu keskiosaan verrattuna. Jo esimerkiksi tämän raportin orientaatiotutkimusosuudessa hyödynnetty yksinkertainen suorakaiteen muotoinen levy (kuva 4.6) poikkeaa kuituorientaatioltaan standardikappaleista (kuva 6.1). Lisäksi kyseisessä levyssä on käytetty viuhka/kalvosyöttöporttia, kun taas standardikoe-kappaleissa käytetty portti on malliltaan sivusyöttöportti. [13; 36; 37; 38]

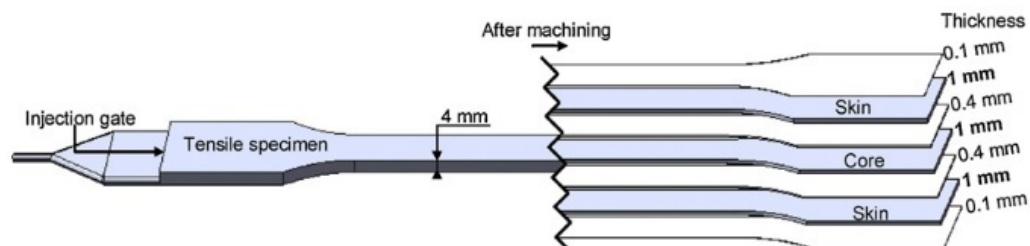
Kappaleen lujuus on havaittu olevan suurin kuitujen suunnassa, jolloin kuidut kantavat rasituksen. Kohdistettaessa voima kuituja vasten kohtisuoraan kappaleen mekaanisista ominaisuuksista vastaa puolestaan matriisi, jolloin lujuus on heikompi. Verrattuna kuvan 4.6. tapaisesta levystä leikattuihin koe-kappaleisiin standardikoe-kappaleissa on paljon muotin kanssa kosketuksissa ollutta pintaa. Tämä voimistaa standardikoe-kappaleiden pintakerroksen kuituorientaation vaikutusta

keskiosan orientaatioon nähden. Levystä työstetyillä koekappaleilla on sitä vastoin vain ylä- ja alapinta, joissa orientaatiovaikutus esiintyy. Bernasconin et al. katkolasikuitulujitettua polyamidia käsittelevässä tutkimuksessa hyödynnettiin standardikoekappaleiden lisäksi juuri tässäkin tutkimuksessa esiintyvän levyn kaltaista muottia. Levystä työstettyjen sulavirtauksen suuntaisten sauvojen vetolujuus oli 15 % pienempi ja kimmomoduuli 21 % pienempi, kuin standardikoesauvoilla. [13; 36; 37; 38]

Samassa tutkimuksessa levystä työstettiin sauvoja myös virtauksen suuntaa vastaan. Kuituorientaation vaikutus oli selkeää, sillä sekä kimmomoduuli että vetolujuus olivat näissä sauvoissa lähes puolet pienempiä verrattuna virtaussuunnassa työstettyihin sauvoihin. [38]

Eräissä tutkimuksissa on verrattu pellavan ja lasikuidun orientoitumisen eroja PP-matriisissa. Kummassakin tapauksessa orientoituminen tapahtuu pääasiassa kuvassa 5.1 osoitetulla tavalla, mutta pellavakuitujen orientoituminen on havaittu olevan sattumanvaraisempaa lasikuituihin verrattuna. Tämä oletetaan johtuvan osittain pellavakuitujen pienemmästä kimmomoduulista suhteessa kuidun tilavuuteen. Lasikuidut ovat siis pellavakuituja jäykempiä. Muiksi syiksi esitetään kuitukimppujen esiintyminen pellavassa ja kuitujen korkea pituus/paksuus-suhde, joka edesauttaa kuitujen taipumista. Pintakerros, jossa kuidut ovat suuntautuneet suunnilleen virtauksen mukaisesti, on pellava-PP komposiitissa paksumpi kuin lasikuitu-PP komposiitissa. On ehdotettu, että tämä johtuisi pellava-PP:n suuremmasta viskositeetista, mikä puolestaan hidastaa muotin täyttymistä. Pellavakuitujen lasikuituja heikompi orientoituminen johtaa suurempaan muottikutistumaan. Kiinnostavaa on myös, että puhtaan PP:n tapauksessa saadaan vetokokeissa paremmat tulokset keskiosasta kuin pintakerroksesta. Tämä johtuu keskustan suuremmasta kiteisyysasteesta, joka on puhtaan polymeerin lujuuden kannalta oleellista. [39; 40]

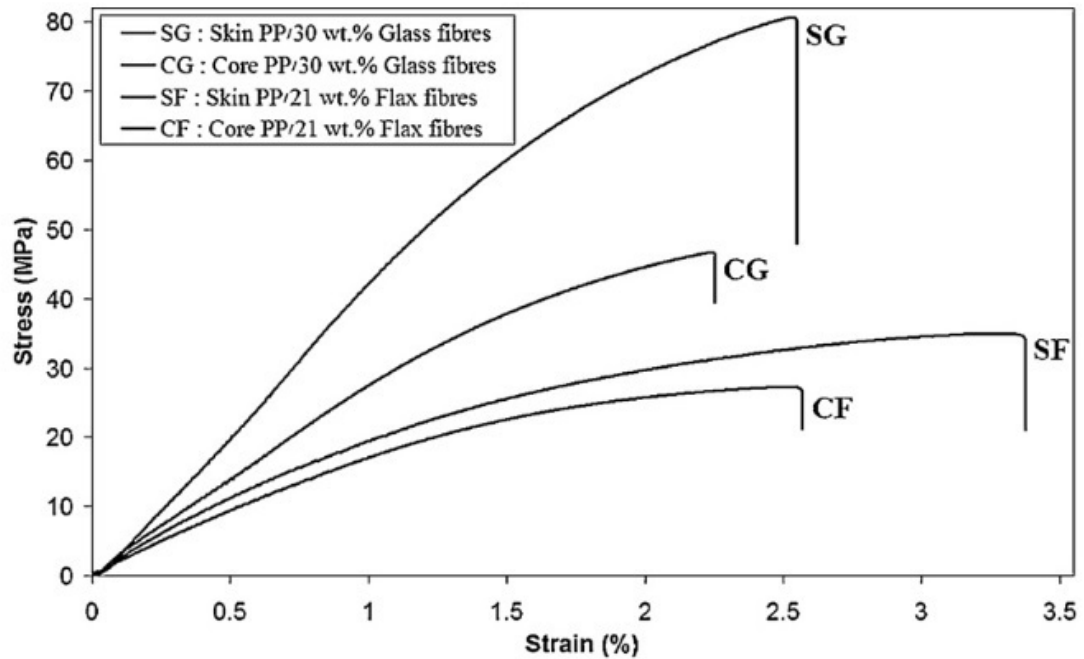
Hyvänä esimerkkinä yllä kuvatusta käyttäytymisestä toimii Bourmandin et al. tutkimus, jossa vertailtiin PP/pellava-komposiittikappaleen pinnan ja keskiosan ominaisuuksia. Koekappaleet työstettiin kuvan 5.3 mukaisesti.



Kuva 5.3. Bourmandin et al. kaavakuva näytteen työstöstä kappaleen pintakerroksen ja keskustan mekaanisten ominaisuuksien tutkimista varten. [40]

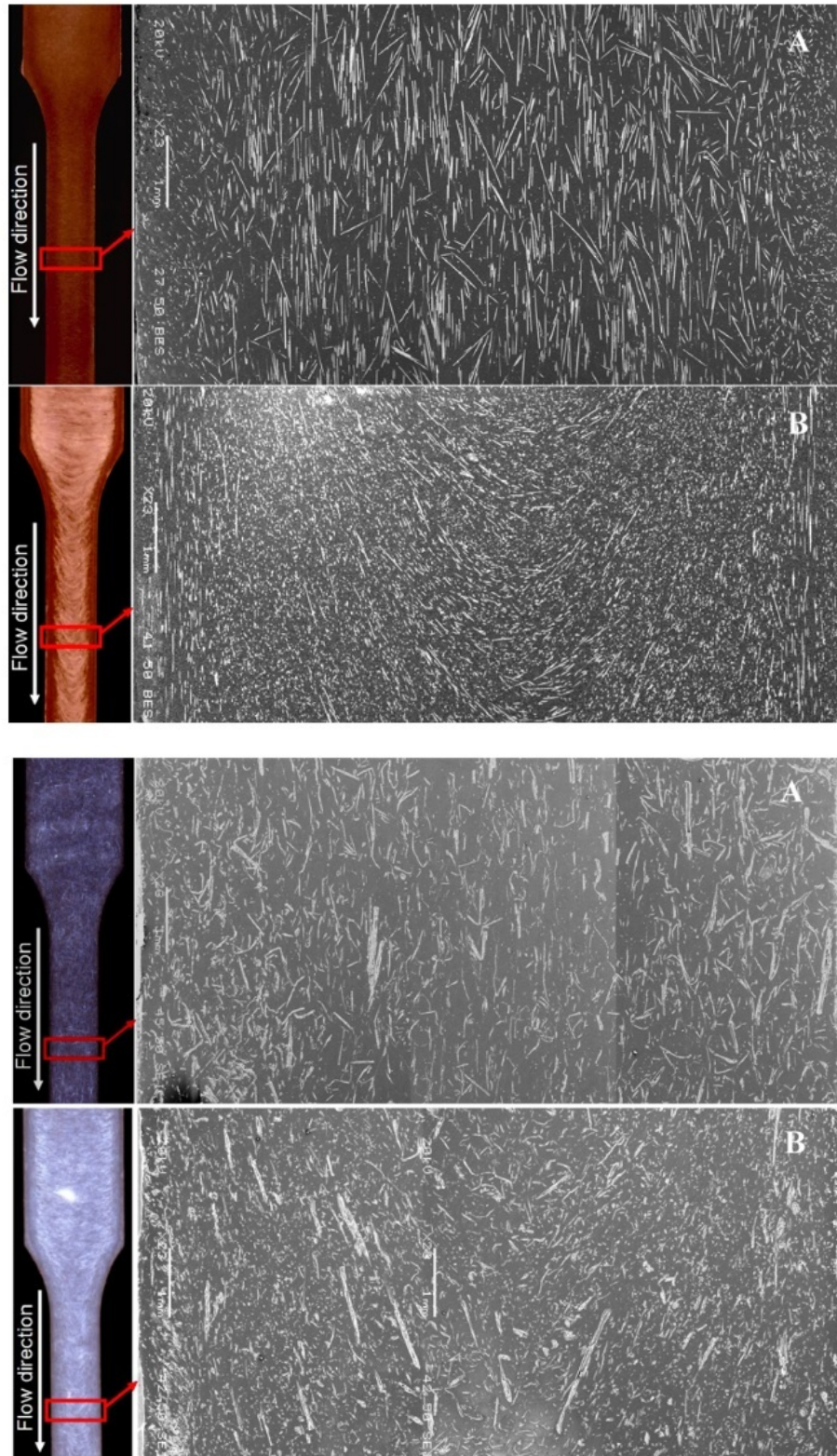
Aiemmin havainnollistettu kuitujen orientaatiokäyttäytyminen heijastuu myös vetokokeista saatuihin tuloksiin. Kuvasta 5.4 nähdään, että pintakerros on keskustaa

lujempi ja jäykempi sekä pellavan että lasikuidun tapauksessa. Lasikuitujen orientaatioefekti on selkeämpi, joten myös pinnan ja keskiosan mekaanisten ominaisuuksien välinen ero on suurempi. [40]



Kuva 5.4. Bourmandin et al. tutkimuksen jännitys-venymä –kuvaajat PP/lasi- ja PP/pellava-komposiittien pintakerroksille ja keskustoille. Kussakin kuvaajassa on vähintään 5 koetta yhdistettynä. [40]

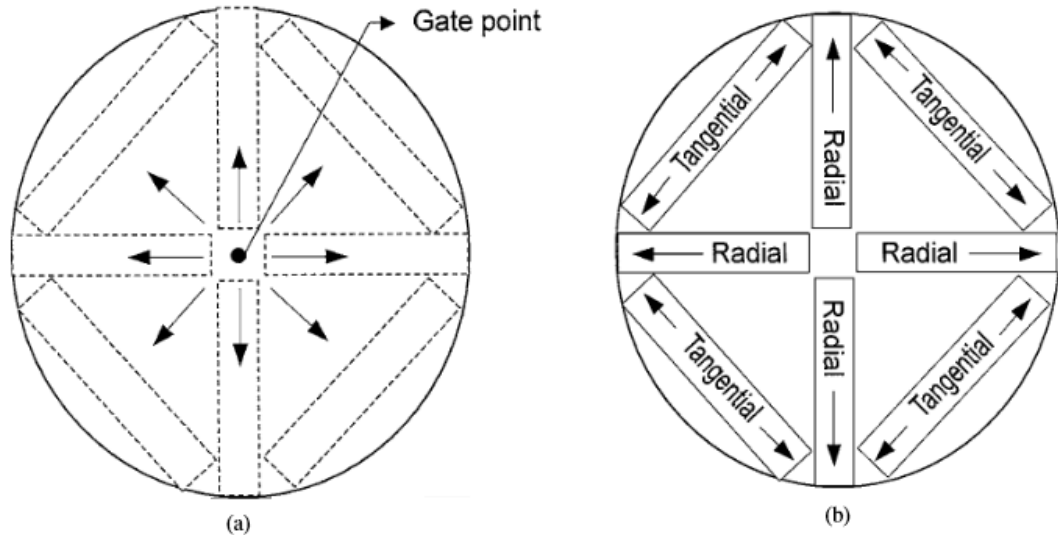
Kuvassa 5.5 on esitettyä mikroskooppikuvat PP/lasin (ylempi kuva) ja PP/pellavan (alempi kuva) työstetyistä näytekappaleista. A:lla merkityt kuvat ovat koekappaleiden pintakerroksista ja B:llä merkityt keskiosasta. Kuvista voidaan havaita, että lasikuidut jakautuvat hyvin sekä pintakerroksessa että keskiosassa. Lasikuidut ovat myös hyvin virtauksen mukaan orientoituneita pintakerroksessa. Kappaleen keskiosassa orientoituminen tapahtuu sitä vastoin paremminkin kohtisuoraan virtauksen suhteen. Pellavakuiduilla näyttää esiintyvän sama ilmiö, joskaan ei yhtä selkeänä. Myös kuitukimppuja on jonkin verran varsinkin kappaleen keskustassa. [40]



Kuva 5.5. *Kuvassa 5.3 esitetyllä tavalla työstettyjen PP/lasi- (ylempi) ja PP/pellava-sauvojen (alempi) leikkauspintojen mikroskooppikuvat. (A = pintakerros, B = keskiosa).*

[40]

Kuvan 5.6 mukainen kiekkomainen muotti oli käytössä eräässä tutkimuksessa, jossa selvitettiin puujauhoa sisältävän tärkkelys/selluloosa-asetaatti – komposiitin orientaatio-ominaisuuksia. [7]



Kuva 5.6. Cunhan et al. orientaatiotutkimuksessa käytetyn (a) ruiskuvalumuotin virtaussuunnat ja (b) näytekappaleiden leikkauskohdat [7]

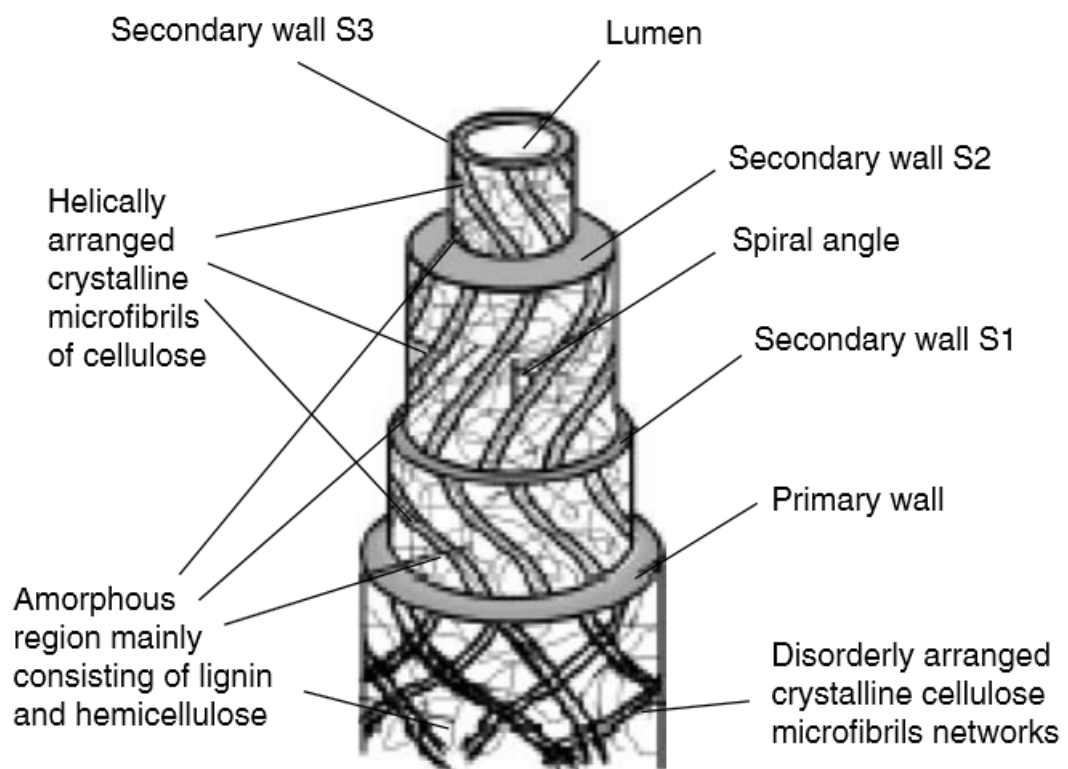
Kuvan a-kohta havainnollistaa sulan virtaussuunnat muotissa ja b-kohdasta näkyy, mistä kohdin kappaletta koesauvat on leikattu. Puujauhokuitujen (tai partikkelien) pituus/leveys-suhde on pieni (mediaani on 3), joten voitaisiin olettaa että orientaation vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin on pienempi, kuin mitä olisi esimerkiksi pellavakuitujen tapauksessa. Yllättävää kyllä, vetokokeiden tulokseksi saatiin, että tangentialikappaleet olivat lujempia ja jäykempiä kuin radiaaliskappaleet. Ilmiön arveltiin johtuvan siitä, että kappaleen reunoilla materiaali oli pakkautunut tiiviimmin ja sisälsi vähemmän huokosia. [7]

5.3 Kuitujen koko ja rakenne

Kuitujen morfologian ja vahvuuden välistä yhteyttä on tutkittu yksittäisillä kuiduilla. Kasvikuiduilla on yleisesti ottaen samantyyppinen morfologia. Ne koostuvat kuitusoluista, jotka taas muodostuvat primäärisistä, sekundaarisista ja tertiäärisistä soluseinämistä sekä keskusontelosta. Sekundaarinen soluseinä on soluseinämistä selkeästi paksuin. Kuitusolun kaavakuva on nähtävissä kuvassa 5.7. Soluseinämät muodostuvat hemiselluloosa/ligniini-matriisista ja spiraalimaisesti orientoituneista osittaiskiteisistä selluloosa-mikrofibrilleistä. Kuitukin on siis itsessään jo komposiittirakenne. Hemiselluloosamolekyylit muodostavat vetysidoksia selluloosaan, ja tämän on todettu olevan kuitujen tärkein koossapitävä voima. Ligniinin rooli on

toimia eräänlaisena kytkentäaineena selluloosan ja hemiselluloosan välillä, lisäten kuidun jäykkyyttä. [16]

Paksuuden lisäksi soluseinämät eroavat myös selluloosa/ligniini-hemiselluloosa-suhteeltaan, koostumukseltaan sekä mikrofibrillien orientaatioltaan. Eroavaisuudet erityyppisten kasvukuitujen välille taas syntyvät kuitusolujen määrästä, sekundäärisen soluseinämän paksuudesta, onteloiden koosta sekä kuidun poikkileikkauspinta-alasta vähennettynä onteloiden pinta-alalla. Tutkimuksissa on saatu yhteys hyvien mekaanisten ominaisuuksien ja paksun soluseinämän sekä pienten onteloiden välillä, mikä onkin järkeen käypää. Myös mikrofibrillien orientaatiolla on selvä vaikutus kuidun mekaanisiin ominaisuuksiin. Mitä kierteisemmin mikrofibrillit ovat kuidun akseliin nähden, sitä taipuisampaa on kuitu. Kuidun akselin suuntaiset mikrofibrillit sitä vastoin tuottavat jäykän ja lujan kuidun. Myös suurella selluloosapitoisuudella on kuituja vahvistava vaikutus. [16; 41; 42]



Kuva 5.7 Kasvikuitusolun rakenne [16]

Yleisesti on todettu, että mitä suurempi on kuidun pituuden suhde paksuuteen, sitä lujittavampi vaikutus kuidulla on. Tämä voidaan havaita esimerkiksi tammipuukuitulujitetussa polypropeenissa verrattuna mäntypuukuitulujitetuun. Männystä saatavilla kuituilla on suurempi pituus/leveys-suhde, joka mahdollistaa paremman jännityksen siirron kuitujen ja matriisiin välillä. Myös kuitujen pieni halkaisija itsessään johtaa parempiin komposiitin mekaanisiin ominaisuuksiin. Kuidun

suuri halkaisija tarkoittaa suurta määrää mikrofibrillejä, jolloin on myös suurempi todennäköisyys kuidun sisäisille virheille ja vaurioille. [35; 37; 40]

Kuitukimppujen on havaittu usein olevan kohta, josta murtuma alkaa tai jatkaa etenemistään. Tätä selitetään sillä, että kuitujen keskinäiset sidokset ovat heikompia, kuin esimerkiksi kuidun ja matriisin välinen sidos. PP:n ja pellavan komposiittia käsittelevässä tutkimuksessa havaittiin, että kuitukimppuja esiintyi enemmän kappaleen keskellä, kuin pintakerroksessa. Ilmiön oletetaan johtuvan muotin seinämän lähellä esiintyneestä leikkausvirtauksesta. Kuitukimppujen alkuperä voi olla kasvin rakenteessa, tai sitten prosessoinnin aikana tapahtuneessa yhteen kietoutumisessa. Samaisesta raportista kävi ilmi, että koekappaleen pintakerroksen ja keskustan kimmomoduulissa ei ollut juuri eroa, mutta vetolujuus ja murtovenymä sitä vastoin olivat selvästi suurempia näytteillä, jotka oli leikattu kappaleen pintakerroksesta. Kuitukimppujen murtumaherkkyuden ohella tätä eroa voidaan selittää myös kuitujen orientaatiolla, jota käsiteltiin jo aiemmin. [40]

5.4 UV-säteily

Sekä polymeeri että luonnonkuitujen ligniini absorboivat UV-säteilyä, mikä johtaa valohajoamiseen. Valohajoaminen vaatii myös happea, joten se rajoittuu lähelle kappaleen pintaa. Polymeerissä hajoamista tapahtuu niin molekyylyltasolla (monomeerin hapettuminen), kuin makroskooppisessakin mittakaavassa. UV-säteily muokkaa polymeerin kemiallista rakennetta johtaen ristisilloittumiseen ja molekyyliketjujen katkeamiseen. Amorfiset alueet ovat valohajoamiselle herkempiä, koska ne läpäisevät helpommin happimolekyylejä. Polymeerin kiteisyysaste lisääntyy UV-säteilyn vaikutuksesta, kun säteilyn katkomat molekyyliketjut siirtyvät amorfiselle alueelle ja muodostavat kiteisen faasin. Kiteisyyden lisääntyminen puolestaan aiheuttaa materiaalin kutistumista, jolloin kappaleeseen syntyy jännityksiä. Nämä jännitykset yhdistettynä molekyyliketjujen katkeamiseen johtavat pinnan säröytymiseen, mikä voidaan paljain silmin havaita pinnan vaalenemisena. Myös mekaaniset ominaisuudet heikkenevät. [43; 44; 45]

UV-säteilylle altistuminen johtaa kasvikuuduissa kromoforisten yhdisteiden syntyyn, mikä aiheuttaa väri vaihteluita. Sama ilmiö selittää esimerkiksi sanomalehtien kellastumisen ajan myötä. Tutkimuksissa on todettu, että komposiitteihin lisättävät kytKentäaineet korostavat UV-säteilyn mekaanisia ominaisuuksia heikentävää vaikutusta. Toisaalta on muistettava, että kytKentäainetta sisältävät komposiitit ovat yleensä alun perin mekaanisilta ominaisuuksiltaan lujempia, joten vaikka suhteellinen ominaisuuksien heikkeneminen olisikin näillä suurempaa, kytKentäaineiden käyttö voi silti olla hyödyllistä sovelluskohteesta riippuen. Eräässä polypropeenin ja sisal-kuidun komposiitin hajoamisominaisuuksia käsittelevässä tutkimuksessa havaittiin, että kuitukonsentraation lisääminen auttoi huomattavasti kappaleen lujuusominaisuuksien säilyttämisessä, kun verrattiin puhtaaseen PP:iin. Samankaltaiseen johtopäätökseen on

päästy myös esimerkiksi palmunlehtikuituja hyödyntäneessä tutkimuksessa. [43; 44; 45; 46]

5.5 Kosteus

Luonnonkuiduilla vahvistettujen muovien kosteudenkeston tutkiminen on oleellista, jotta niitä voitaisiin soveltaa ulkoilmalle altistuviin rakenteisiin. Myös biohajoaviksi tarkoitettujen sovellusten tapauksessa on hyödyllistä tietää missä olosuhteissa ja missä vaiheessa elinkaartaan rakenteet alkavat hajota. Synteettisiin lasikuidulla lujitettuihin komposiitteihin verrattuna luonnonkuiduilla lujitetut komposiitit ovat varsin alttiita kosteuden vaikutuksille. Tämä johtuu hydroksyyli-ryhmien ja muiden vesimolekyylejä houkuttelevien polaaristen ryhmien läsnäolosta kuitujen selluloosassa. Runsas veden absorbointi johtaa heikkoihin sidoksiin kuitujen ja matriisin välillä, jolloin tuloksena on mekaanisten ominaisuuksien heikkeneminen. Ongelma korostuu suurilla kuitupitoisuuksilla hydrofiilisten luonnonkuitujen kanssa, kun taas hydrofobisten kuitujen tapauksessa suuri kuitupitoisuus vähentää veden imeytymistä. [5; 43; 45]

Lämpötilan noston on todettu lisäävän veden imeytymistä komposiittiin. Eräässä tutkimuksessa imeytymiskokeita tehtiin sisälilla vahvistetulle PP:lle kolmessa eri lämpötilassa; 28, 50 ja 70 celsiusastetta. Saturaatiopisteessään suurin kosteuden imeytyminen tapahtui juuri 70 asteessa. Myös veden imeytymisnopeus oli suurempi korkeissa lämpötiloissa. [45]

Veden imeytymisen vähentämiseksi voidaan hyödyntää kuitujen hydrofobisuutta lisääviä ja kuitujen matriisiin kiinnittymistä parantavia kytkentäaineita. Samassa tutkimuksessa tultiin siihen tulokseen, että MAPP-kytkentäaine vähensi selvästi veden imeytymistä komposiittiin. Kuten jo aiemmin mainittiin, MAPP:n ja MAPE:n hydrofobisuutta edistävä vaikutus perustuu selluloosassa esiintyvien OH-ryhmien sitomiseen esteröitymisreaktion avulla. Kytkentäaineiden hyöty ei ole kuitenkaan aivan yksiselitteinen asia, sillä kuten sisäl-kuitukomposiittia tutkineesta työstä selvisi, UV-säteilyn komposiittirakennetta heikentävä vaikutus oli suurempi kemiallisesti käsitellyissä komposiiteissa kuin käsittelemättömissä. [5; 43; 45]

6 OMINAISUUKSIEN TESTAAMINEN

6.1 Vetokoe

Vetokoetta käytetään koekappaleiden veto-ominaisuuksien tutkimiseen. Tuloksista voidaan määrittää vetolujuus, kimmokerroin ja murtovenymä. Vetokokeessa standarditestikappaletta venytetään pituusakselinsa suuntaisesti tasaisella nopeudella, kunnes kappale murtuu. Samaan aikaan laitteisto mittaa näytteeseen kohdistuvaa kuormitusta sekä venymää. Testi voidaan myös tarvittaessa keskeyttää, mikäli kappaleen murtumiseen kuluisi kohtuuttoman suuri aika ja murtovenymää ei olisi tarpeellista saada tietoon.

Jännitys saadaan laskettua yhtälöstä

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

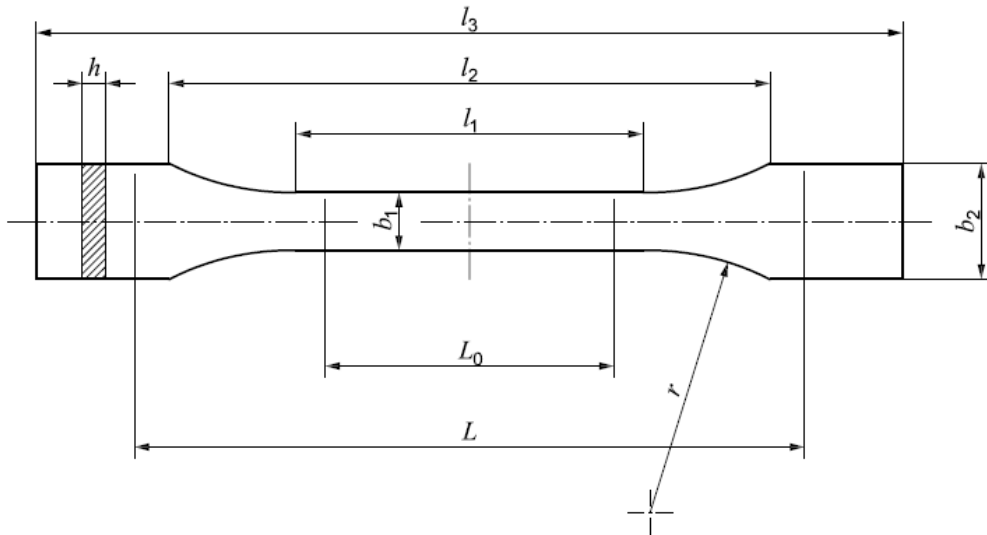
jossa σ symboloi jännitystä (MPa), F mitattua kuormitusta (N) ja A näytteen alkuperäistä poikkipinta-alaa neliömillimetreinä.

Venymä puolestaan saadaan yhtälöstä

$$\varepsilon = \frac{L_0}{\Delta L_0}, \quad (2)$$

jossa ε symboloi venymää (mm/mm), L_0 vetovälin pituutta ja ΔL_0 siirtymää. [47]

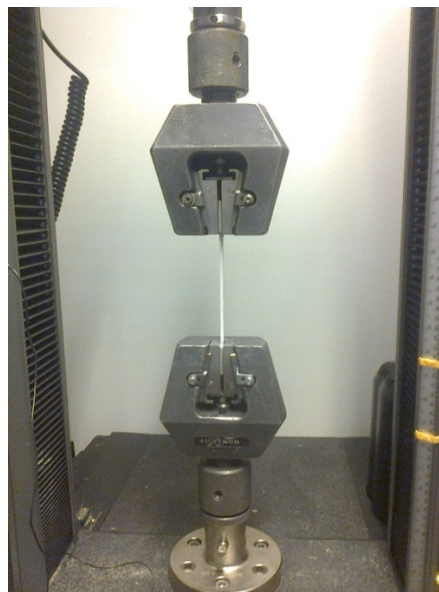
Vetokokeissa käytetyt kappaleet olivat standardin SFS EN ISO 527-2 mukaisia 1A-mallin sauvoja. Kappaleet olivat pituudeltaan ~170 mm ja paksuudeltaan ~4 mm. Sauvan ohuen kohdan leveys oli n. 10 mm. [48]



Kuva 6.1. 1A-mallin standardivetokoekappale [48]

Vetokokeet suoritettiin Instron-laitteistolla (kuva 6.2). Käytetyssä ohjelmassa vetonopeus oli aluksi 0,5 mm/min aina 0,3 % venymään asti. Tässä alkuvaiheessa käytettiin ekstensiometriä venymän mittaamisessa. Näin saatiin tarkka jännitys/venymäkäyrän alkuosa, josta määritettiin kimmomoduuli. Kun 0,3 % venymä oli saavutettu, ekstensiometri voitiin poistaa ja koetta jatkettiin 20 mm/min vetonopeudella aina koesauvan murtumiseen asti. Rinnakkaiskokeiden määrä oli 5.

Orientaatio-sauvojen testaaminen tapahtui myös Instron-laitteistolla, mutta sauvojen pienuudesta johtuen ekstensiometri jouduttiin jättämään pois. Kimmomoduli laskettiin vetoleukojen liikkumasta matkasta. Ohjelmaa muokattiin myös siten, että vetonopeudeksi tuli 0,5 mm/min 0,5 % venymään asti ja 10 mm/min loppukokeen ajaksi. Rinnakkaiskokeita tehtiin 9.



Kuva 6.2. Vetokokeiden suorittamista Instron-laitteistolla. Kuva otettu vedon loppuvaiheesta, jolloin ekstensiometri on jo siirretty sivuun.

6.2 Iskukoe

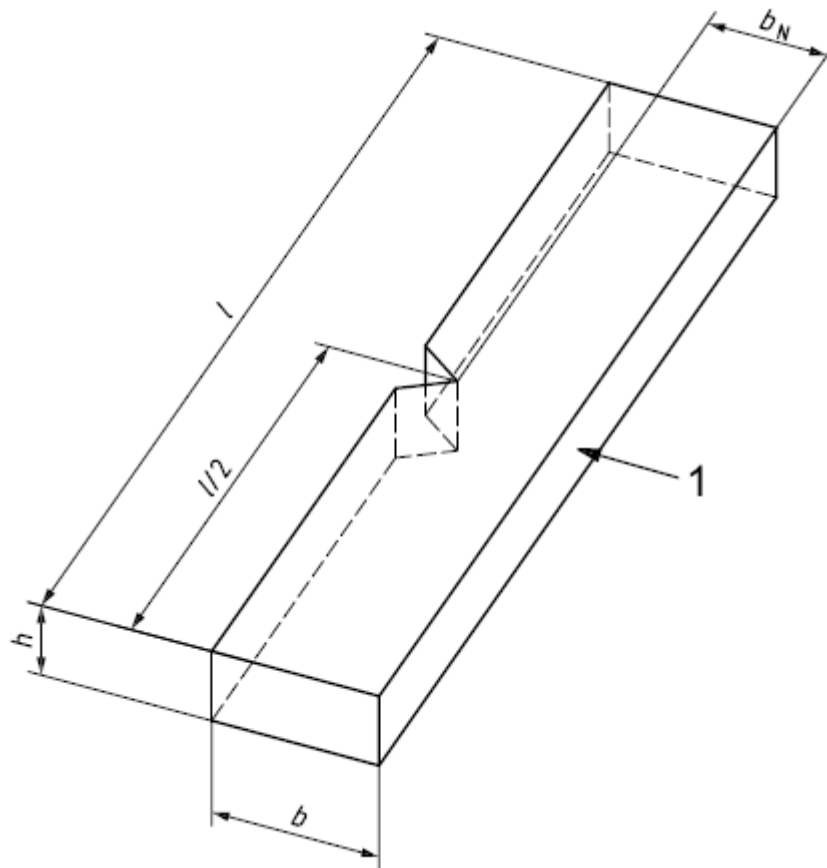
Charpy-iskukokeella voidaan arvioida kappaleiden iskulujuutta määrittelyissä testiolosuhteissa. Kokeessa näytekappale asetetaan tukien varaan siten, että kappaleeseen työstetty lovi on vastakkaisella puolella iskupintaan nähden sekä mahdollisimman keskellä tukiin nähden. Vasara vapautetaan määrättyä korkeudelta, jolloin laitteisto ilmoittaa näytteen absorboiman iskuenergian.

Lovettujen iskukoe-kappaleiden Charpy-iskulujuudet saadaan laskettua yhtälöstä

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} * 10^3, \quad (3)$$

jossa a_{cN} symboloi iskulujuutta (kJ/m^2), E_c näytteeseen absorboitunutta energiaa (J), h kappaleen paksuutta (mm) ja b_N kappaleen leveyttä loven kärjen kohdalta mitattuna.

Kuvassa 6.3 on standardin mukainen lovettu iskukoe-kappale ($l = 80 \text{ mm}$, $b = 10 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$, $b_n = 8 \text{ mm}$). [49]



Kuva 6.3. Lovetun iskukoe-kappaleen kaavakuva. 1 viittaa iskusuuntaan. [49]

Charpy-iskukokeet suoritettiin Ceast Resil 5.5 iskukoelaitteistolla. Iskukokeet tehtiin instrumentoimattomina 5 J vasaralla ja standardin ISO 179 mukaisesti.

6.3 Kovuuskoe

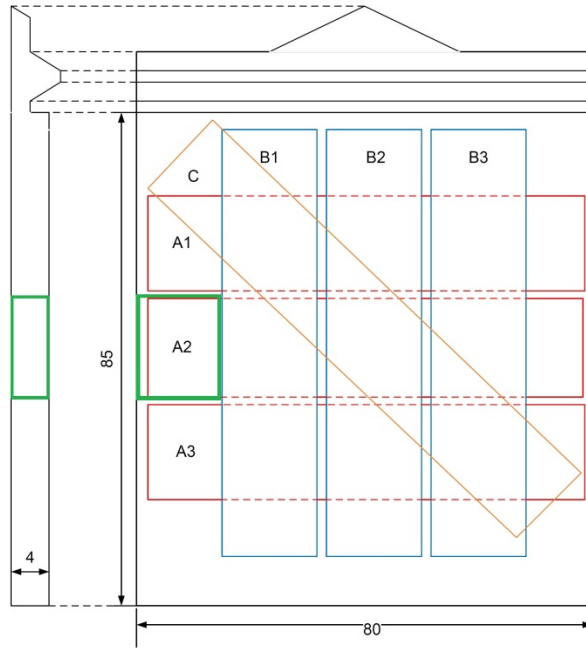
Kovuuskokeet suoritettiin Brevetti Affrin durometrillä (kuva 6.4). Koesauvasta leikattiin kaksi palaa, jotka aseteltiin päällekkäin, jonka jälkeen mittapää voitiin painaa komposiittiin. Kokeessa käytettiin D-duometriä, joten saadut arvot ovat Shore D –kovuuksia. Mittauksessa käytetty paino oli 5 kg. Jokaisesta mittauksesta saatiin kaksi eri arvoa; kovuus heti painamisen jälkeen ja 15 sekunnin kuluttua painamisesta.



Kuva 6.4. Kovuuskokeessa käytetty laite

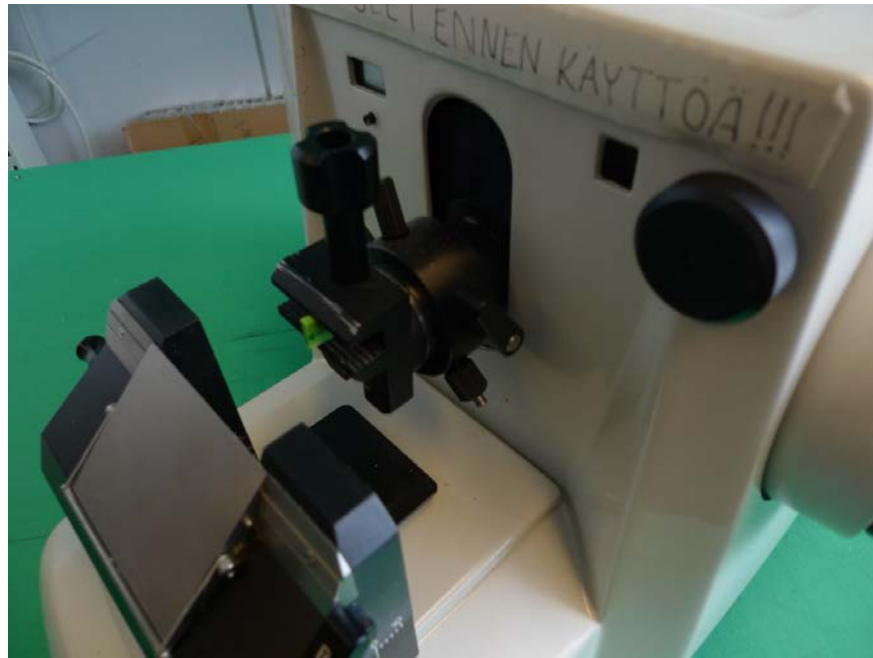
6.4 Mikroskooppinen tarkastelu

Optisen mikroskoopin avulla haluttiin tutkia, miten kuidut orientoituivat PE-matriisissa. Vertailua tehtiin pellava-, sellu- ja lasikuitujen orientoitumisen välillä. Näytekappaleen muokkaaminen kuitujen orientaation mikroskooppista tarkastelua varten alkoi leikkaamalla sivuleikkurien avulla pala B-orientaatioauvojen valmistamisessa ylijääneestä kappaleesta. Palan leikkauskohta on merkitty kuvaan 6.5 vihreällä suorakaiteella.



Kuva 6.5. *Orientaatiomuotti. Mikrokooppista tarkastelua varten ylijäämäkappaleista leikattiin näytepala vihreän suorakaiteen osoittamasta kohdasta.*

Palasta leikattiin hieman ulointa pintakerrosta pois Microtome series 1000 –mikrotomin (ks. kuva 6.6) avulla. Tämän jälkeen oli mahdollista leikata siivuja pintakerroksen siitä osasta, jossa oletuksen mukaan (ks. kappale 5.1.2.) kuidut olisivat järjestäytyneet virtauksen suuntaiseksi. Seuraavaksi palasta ohennettiin sen verran että päästiin käsiksi keskiosaan. Myös tästä kohdasta otettiin siivuja mikrokooppitarkastelua varten. Mikäli aiemmin kuitujen orientaatiosta esitetty teoria toteutuisi, kuidut olisivat keskiosassa järjestäytyneet enimmäkseen kohtisuoraan päävirtaussuuntaa vasten. Siivuista otettiin kuvia sekä Leica MZ-7,5 stereomikrokoopilla että Leica DM 2500 M mikrokoopilla pintavaloa hyödyntäen.



Kuva 6.5. Microtome series 1000

SEM-kuvat otettiin Philips XL-30 pyyhkäiselektronimikroskoopilla iskukoe-kappaleiden murtopinnoista. Tarkastelulla pyrittiin selvittämään kuitujen ja matriisin välistä adheesiota. Ennen kuvien ottoa näytteet sputteroitin kullalla, jotta näytteet eivät varautuisi elektronisuihkussa.

6.5 Tiheys

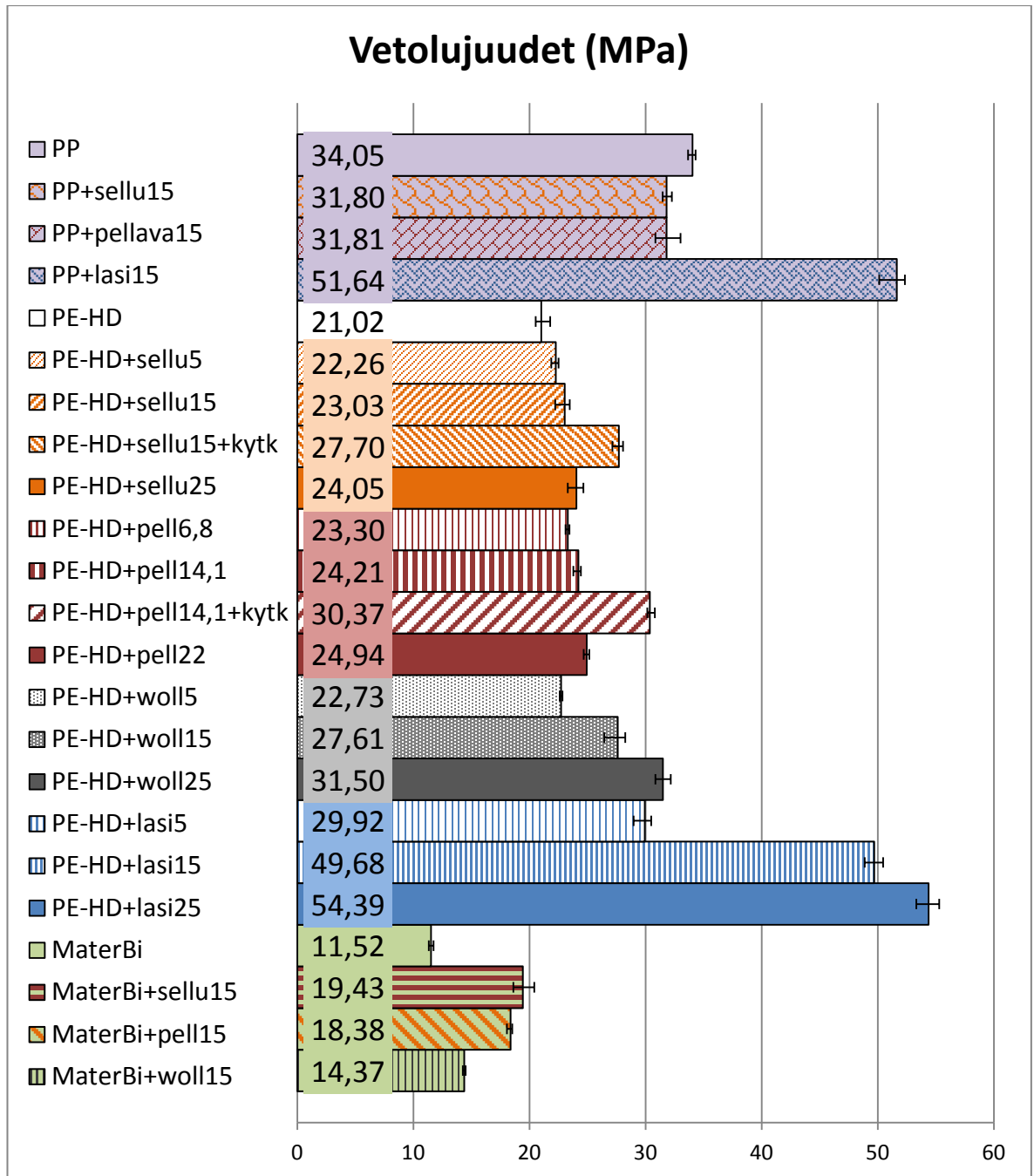
Komposiittien tiheyden määrittäminen suoritettiin Wallace-tiheysmittarilla. Ennen mittausta sauvoista oli leikattava sopivia kappaleita, jotka mahtuisivat mittarin säiliöön. Laite punnitsee kappaleet sekä ilmassa että vedessä ja laskee sitten tiheyden. Osa näytteistä oli tiheydeltään vettä kevyempiä, joten näissä tapauksissa käytettiin säiliöön asetettavaa telinettä, joka esti kappaleiden nousemisen pintaan.

7 TULOSTEN TARKASTELO

7.1 Vetokoe

7.1.1 Standardikoesauvat

Vetokokeen tuloksista (kuva 7.1) voidaan havaita, että jokaisella kuidulla oli lujittava vaikutus sekä PE-HD:iin että Mater-Bi:hin, mutta luonnonkuidut heikensivät PP:n vetolujuutta. PE-HD:n tapauksessa luonnonkuiduista parhaiten lujittivat wollastoniitti- ja pellavakuidut, kun taas Mater-Bi lujittui parhaiten pellavan ja sellun vaikutuksesta. MAPE-kytkentäaineen lisäämisellä oli selvä parantava vaikutus pellava- ja sellukomposiittien vetolujuuteen sekä kimmomoduuliin. Jäykimmät komposiitit saatiin aikaiseksi suurimmilla painoprosenteilla lisättyä kuitua. Kuvassa 7.1 on palkkidiagrammi kaikkien koesarjojen vetolujuuksien keskiarvoista ja kuvassa 7.2 puolestaan palkkidiagrammi kimmomoduulien keskiarvoista.

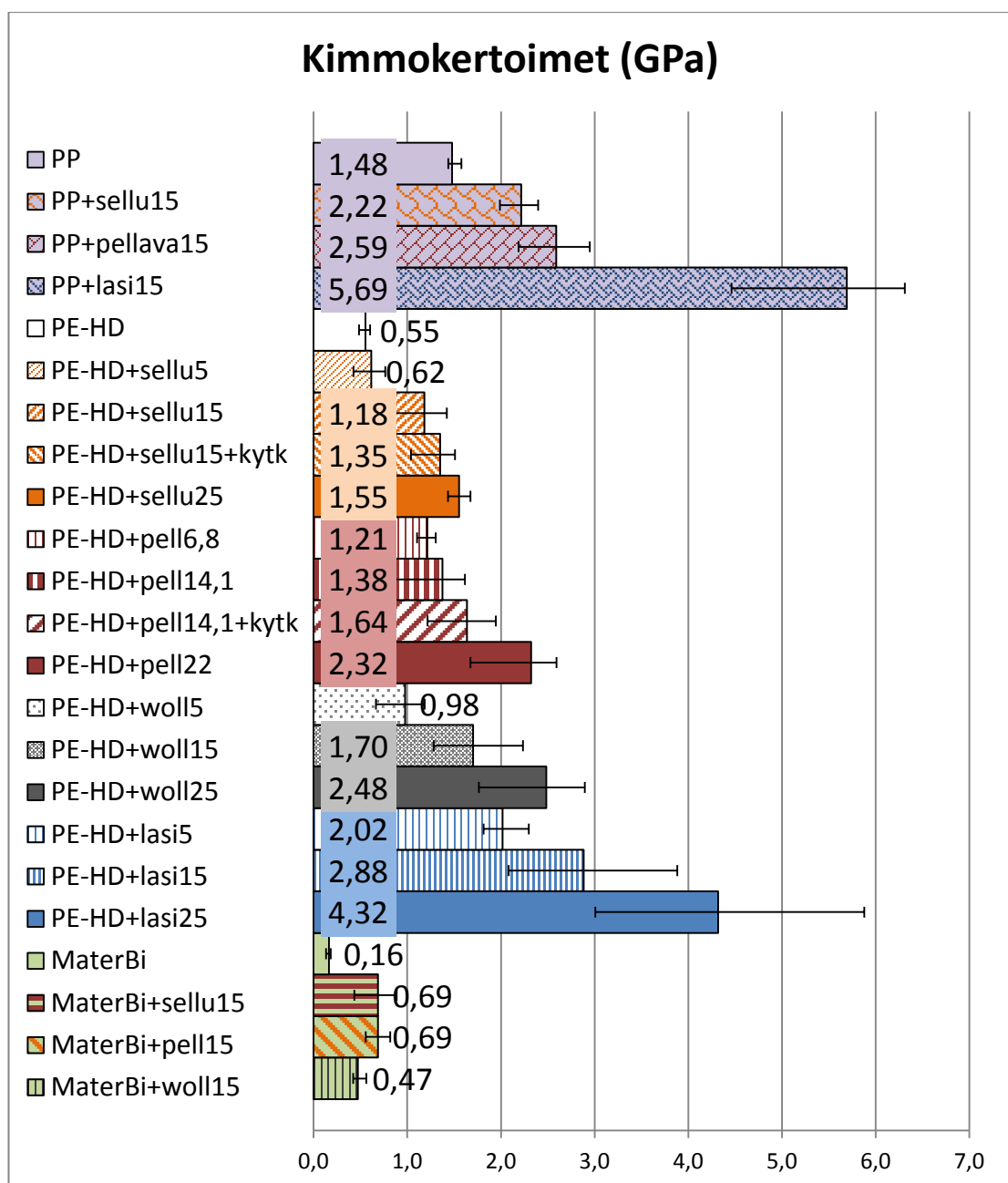


Kuva 7.1. Koestettujen standardisauvojen vetolujuuksien keskiarvot

PE-HD:n jäykkyyttä saatiin kasvatettua jopa melkein viisinkertaiseksi ja vetolujuutta 1,5 kertaiseksi lisäämällä 25 tilavuusprosenttia wollastoniittia. Wollastoniittikomposiiteista saadut vetokokeiden tulokset ovat hyvin linjassa Yuan et al. [28] wollastoniitti-PE – komposiiteille tehdyn tutkimuksen kanssa, joskaan kyseisessä tutkimuksessa vetolujuus ei kohentunut aivan yhtä paljon.

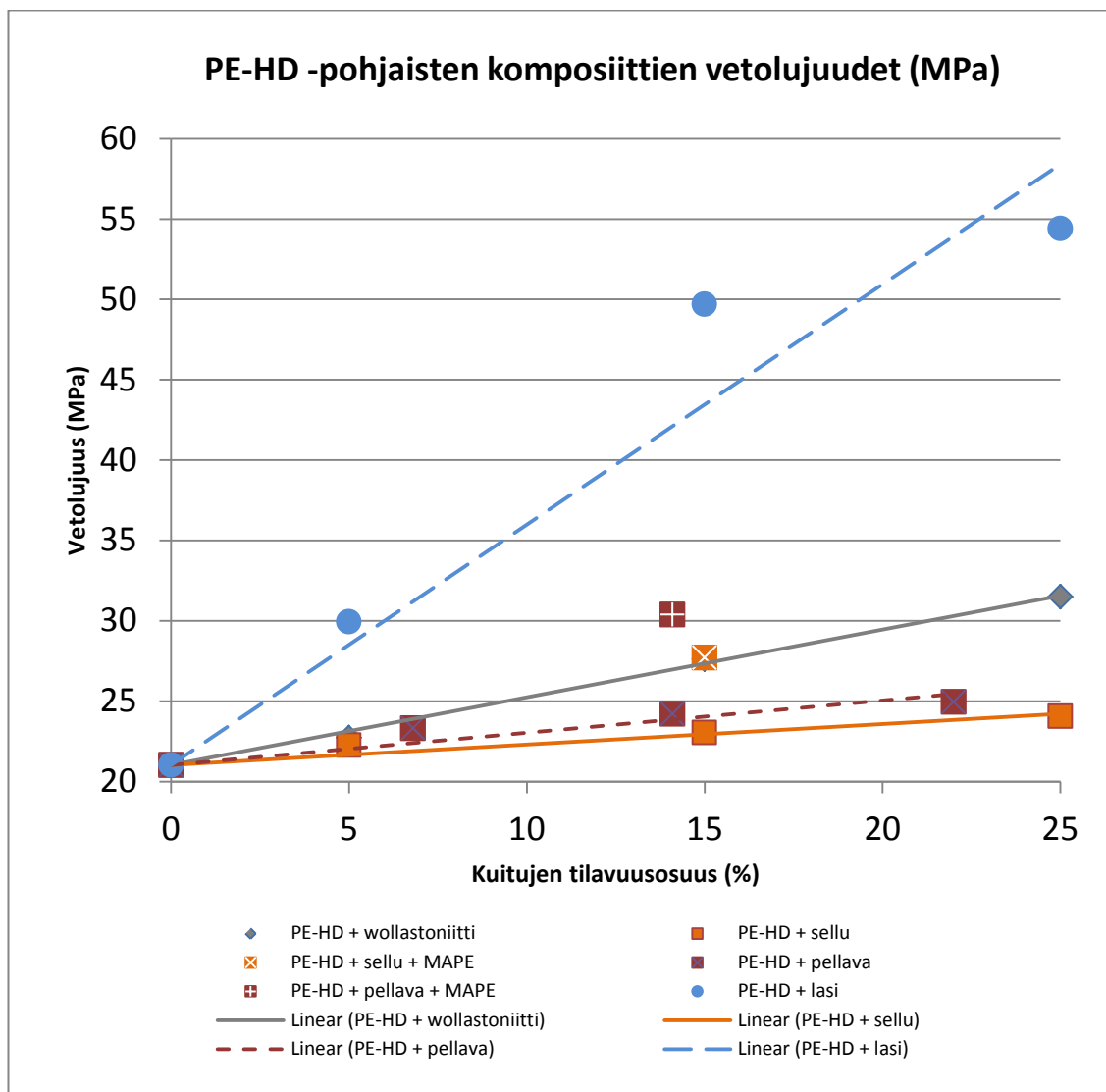
Li et al. [18] olivat tutkimuksessaan onnistuneet lisäämään ruiskuvaletun PE-HD:n vetolujuutta 17 % lisäämällä siihen 30 m-% pellavaa. Tässä raportissa saatiin myös samansuuntaisia tuloksia. 22 til-%, eli 30 m-% pellavaa sisältänyt PE-HD-komposiitti kasvatti vetolujuuttaan 18,6 %.

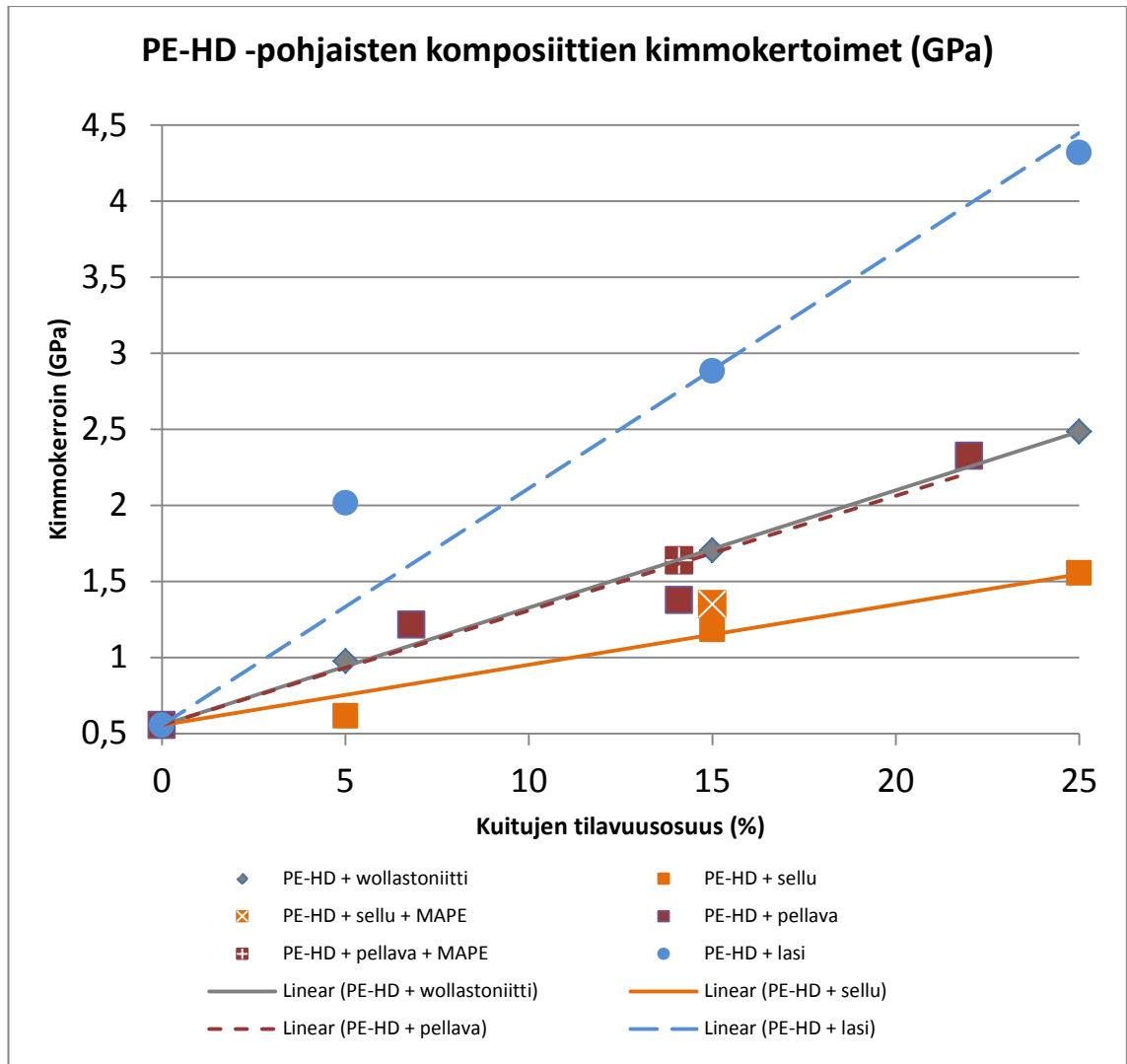
Chen [23] oli tutkinut sellukuituvahvistettua PE-HD:tä. Tutkimuksen mukaan 15 m-% sellupitoisuudella saatiin ~40 % parannus vetolujuuteen ja ~60 % parannus kimmokertoimeen verrattuna neitseelliseen polyeteeniin. Kyseessä oli kylläkin kuumapuristustekniikalla valmistettu komposiitti, joten tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia tämän tutkimuksen kanssa. Tässä LUOMA:n tutkimuksessa 15 til-% (~21 m-%) sellua paransi vetolujuutta ~10 % ja kimmokerrointa jopa 115 %. MAPE:n kanssa vastaavat tulokset parantuivat entisestään: vetolujuudelle saavutettiin 32 prosentin ja kimmokertoimelle 145 prosentin parannus neitseelliseen polyeteeniin verrattuna. Myös Chenin tutkimuksessa testattiin MAPE:n vaikutusta sellukomposiittien mekaanisiin ominaisuuksiin. 5 m-% MAPE-lisäys 15 m-% sellua sisältävään PE-HD-komposiittiin ei juurikaan vaikuttanut komposiitin veto-ominaisuuksiin.



Kuva 7.2. Koestettujen standardisauvojen kimmomoduulien keskiarvot

Kuvaan 7.3a on kerätty PE-HD –pohjaisten komposiittien vetolujuuksia kuituosuuden funktiona ja kuvaan 7.3b kimmomoduleita kuituosuuden funktiona. Muutosta kuvataan lineaarisen regression, eli trendiviivojen avulla. Kuten voidaan havaita, kaikilla komposiiteilla kummatkin arvot kasvavat aina 25 tilavuusprosenttiin asti. Luonnonkuitukomposiiteilla varsinkaan vetolujuuden kasvu ei kuitenkaan ole läheskään yhtä suurta kuin lasikuitukomposiiteilla. Viisitoista tilavuusprosenttia lasikuitua on kasvattanut PE-HD:n vetolujuutta 2,5-kertaiseksi, kun samalla määrällä luonnonkuituja ylletään parhaimmillaan 50 % parannukseen (PE-HD + pellava + MAPE). Huomioon on myös otettava kuitujen iskulujuutta heikentävä vaikutus ja luonnonkuitujen taipumus absorboida kosteutta. Oikean kuidun/kuitujen valinta ja kuitujen määrä onkin mietittävä aina tapauskohtaisesti. Lisäksi on muistettava, että kompaundoinnissa ja ruiskuvalussa voidaan törmätä haasteisiin kovin suurilla kuituosuuksilla.





Kuva 7.3a-b. PE-HD -pohjaisten komposiittien vetolujuudet ja kimmokertoimet kuitujen tilavuusosuuden funktiona. Kasvua havainnollistamaan on piirretty trendiviivat.

Kuvissa 7.4-7.8 on esitetty vetokokeista saatuja tyypillisiä jännitys-venymä-kuvaajia tutkituille komposiiteille. Kuvaajien alkuvaiheissa esiintyvät pienet nykämät johtuvat vetonopeuden muutoksesta 0,3 prosentin venymän kohdalla.

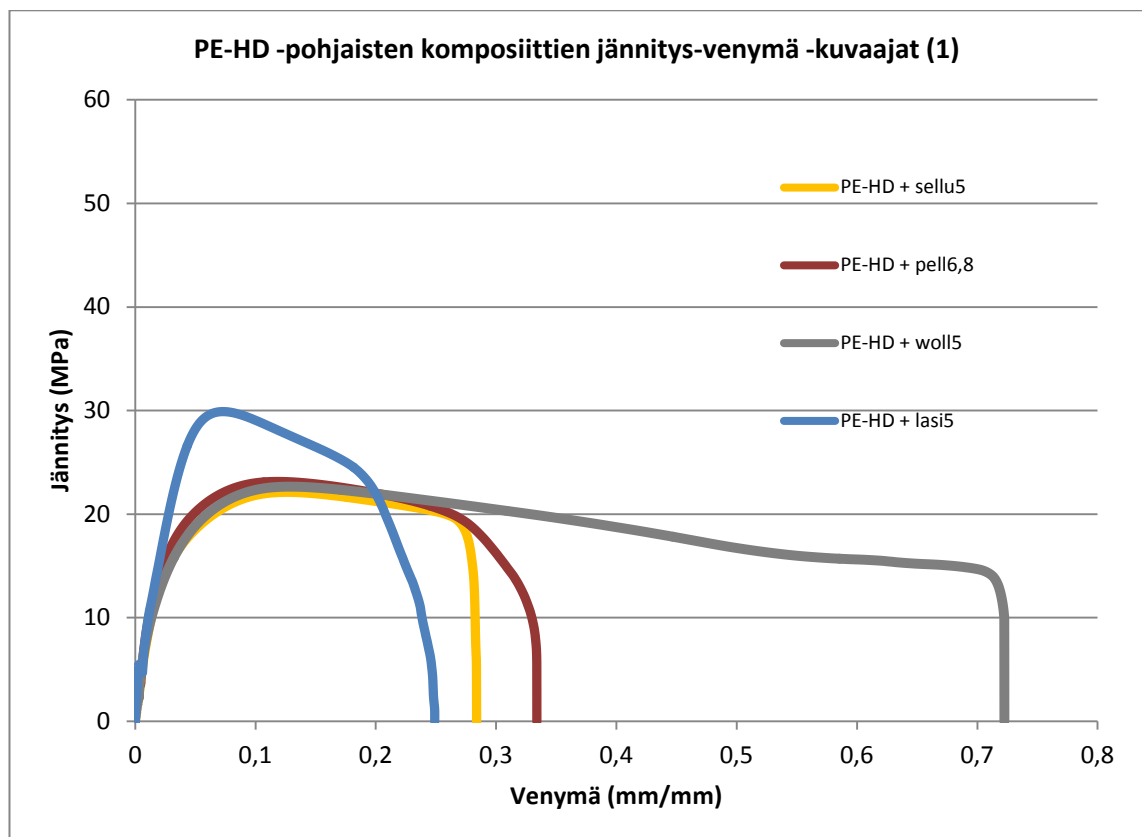
Yleisesti voidaan todeta, että luonnonkuitukomposiittien murtovenymät olivat suurempia, kuin lasikuitukomposiittien. Wollastoniittikomposiittien keskimääräinen murtovenymä oli suurin jokaisessa tapauksessa. Polypropeenikomposiiteissa tosin wollastoniittia ei käytetty lujitteena. Sellulla lujitetun polymeerin murtovenymä oli aina pienempi kuin pellavalla lujitetun, paitsi PP-sellun ja PP-pellavan tapauksessa, jossa murtovenymät olivat suunnilleen yhtä suuria. Yksi merkittävä seikka, joka johtaa sellukomposiittien pienempään murtovenymään saattaa olla sellukuidun heikompi dispersio matriisissa. Paljaalla silmällä sellukomposiiteissa oli havaittavissa selvää kuitujen paakkuuntumista, toisin kuin pellavakomposiiteissa. Kun komposiitteja tarkasteltiin elektronimikroskoopilla, varmistui että kuitukerääntymien syntyminen on

ollut ongelmana nimenomaan sellukomposiiteissa. Pellavakomposiiteissa vastaavaa ilmiötä ei havaittu ainakaan yhtä merkittävässä määrin. MAPE:n lisääminen näyttäisi pienentävän murtovenymää varsinkin pellavan tapauksessa, kuten kuvasta 7.5 voidaan havaita.

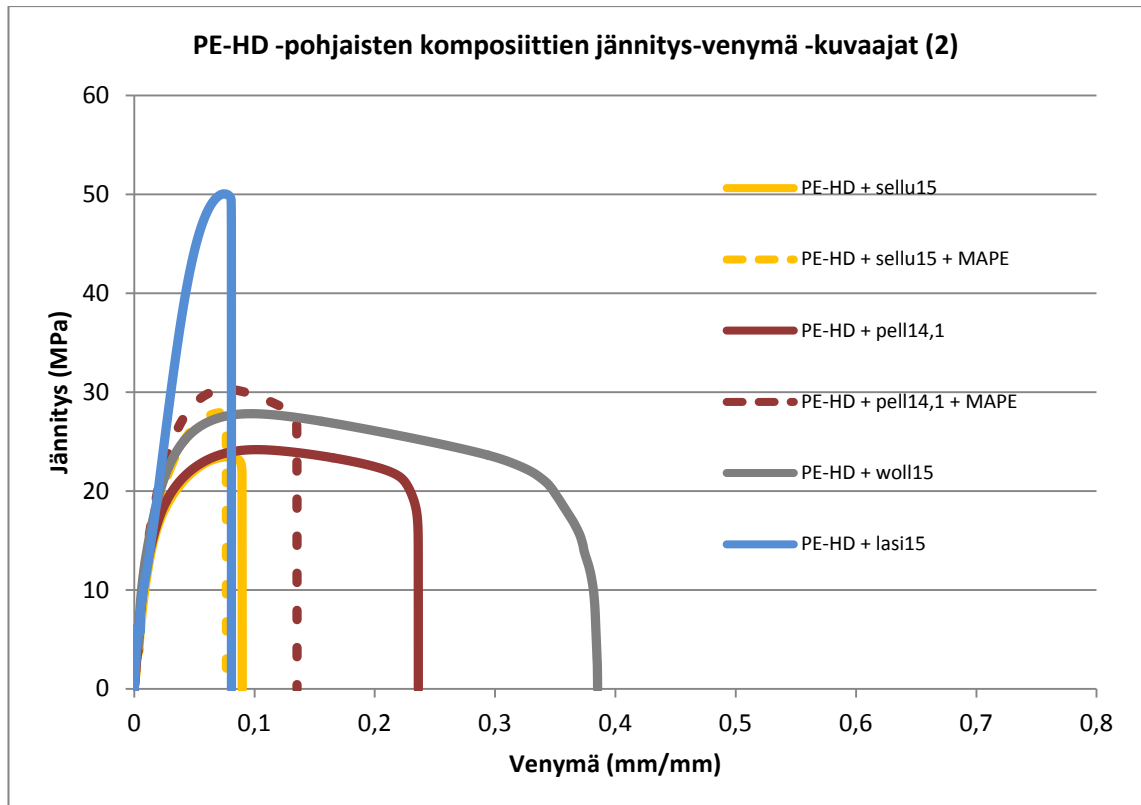
Kuiduilla on huomattava vaikutus materiaalin murtovenymään jo pienimmän tutkitun kuitulisäyksen tapauksessa. Viisi tilavuusprosenttia wollastoniittia sisältävän polyeteenikomposiitin murtovenymä oli keskimäärin n. 70 %, kun taas muiden testattujen komposiittien murtovenymät samalla tilavuusosuudella olivat n. 30 prosentin luokkaa. Puhtaan polyeteenin murtovenymäksi taasen saatiin n. 160 %, joten ero on varsin merkittävä.

Pehmeä Mater-Bi on varsin venyvä materiaali. Puhtaat Mater-Bi -koesauvat venyivät pituudeltaan keskimäärin nelinkertaiseksi ennen murtumista. Tämä ominaisuus poistui kuitenkin komposiiteissa. Viisitoista tilavuusprosenttia wollastoniittia vähensi Mater-Bi:n murtovenymän n. 35 prosenttiin ja sellu sekä pellava kumpikin vain n. 10 prosentin tuntumaan.

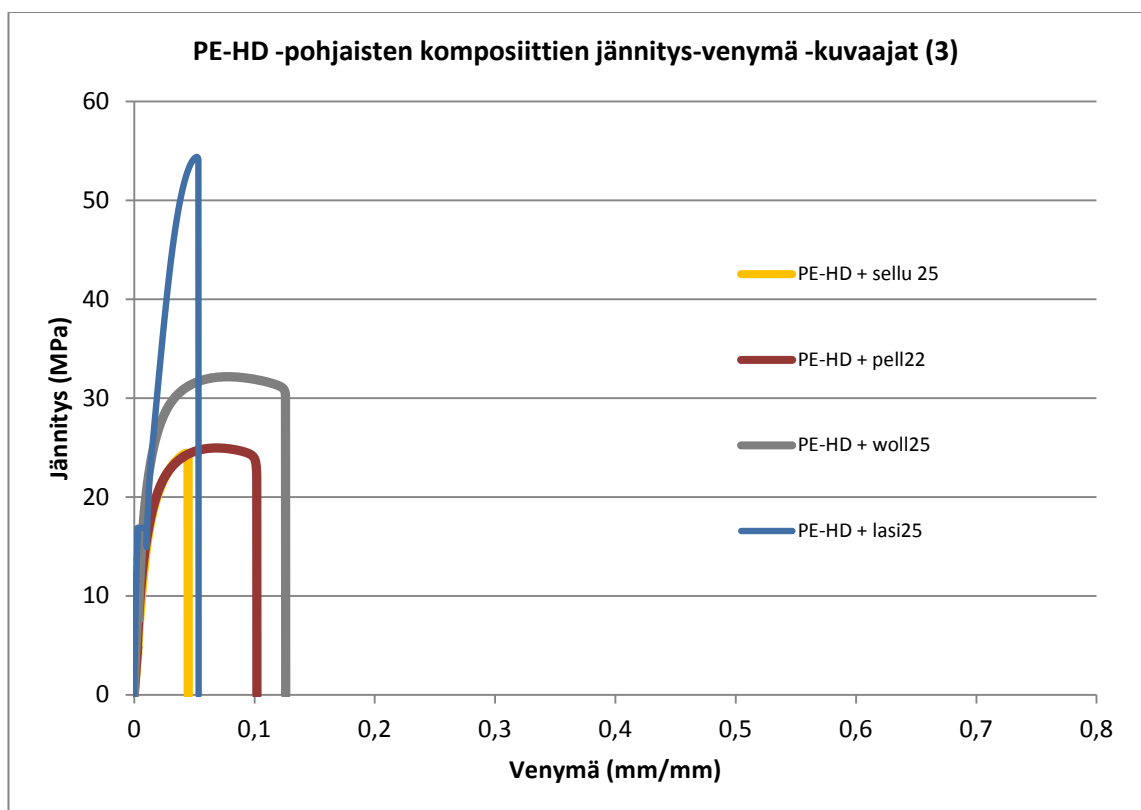
PP:n murtovenymä ei sen sijaan ole neitseellisenäkään kovin korkea; vain n. 20 prosentin luokkaa. Viisitoista tilavuusprosenttia lasia sisältävä komposiitti pudotti PP:n murtovenymän n. 3 prosenttiin, ja sellu sekä pellava 8 prosentin tuntumaan.



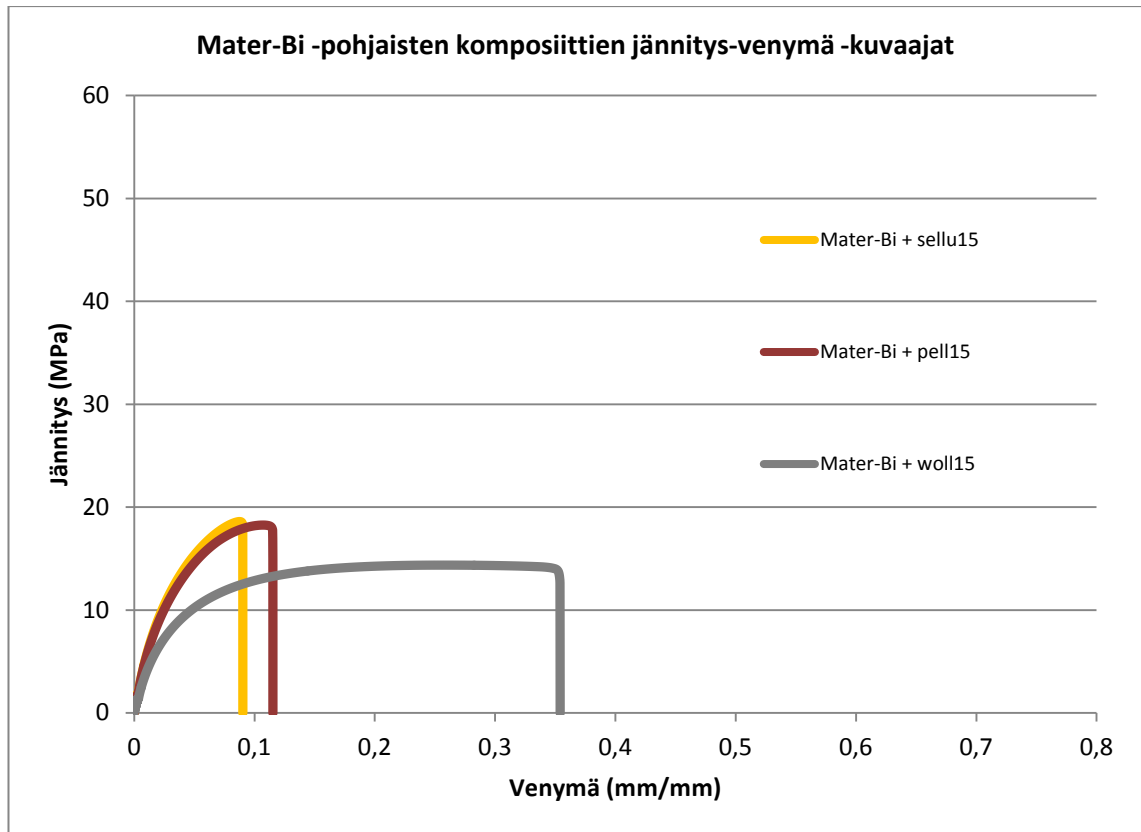
Kuva 7.4. PE-HD -pohjaisten komposiittien jännitys-venymä -kuvaajat (1)



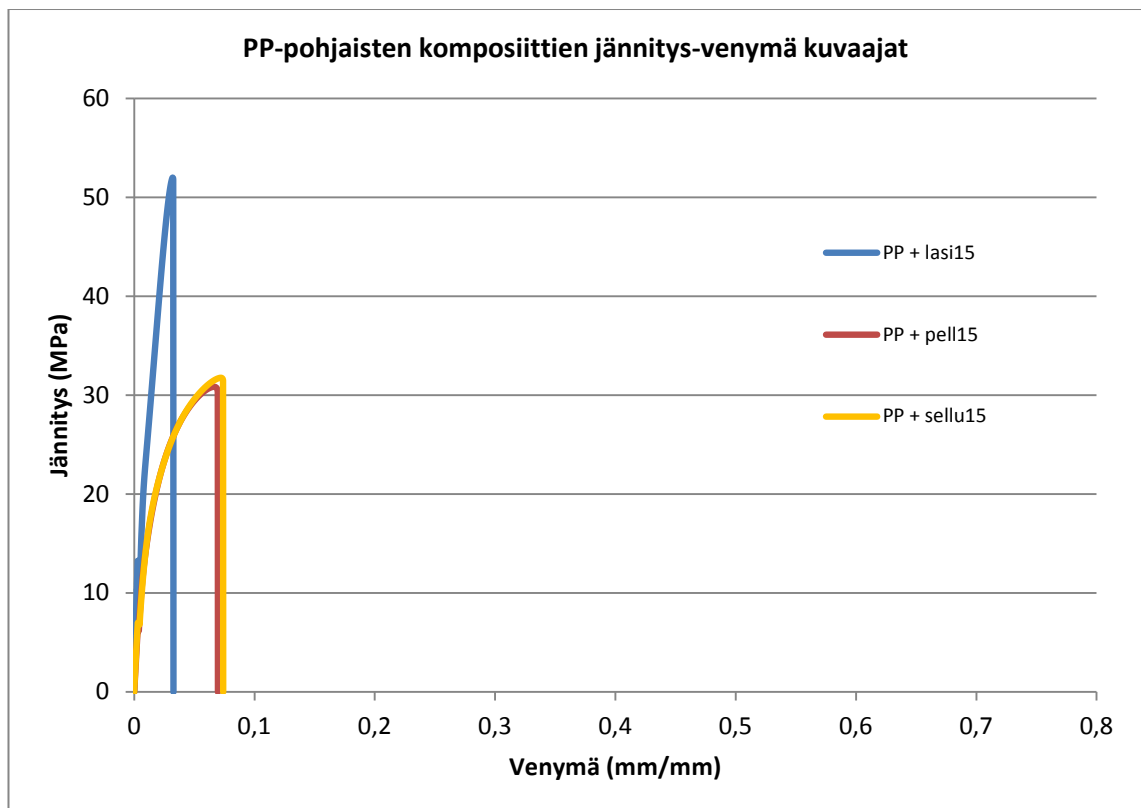
Kuva 7.5. PE-HD -pohjaisten komposiittien jännitys-venymä-kuvaajat (2)



Kuva 7.6. PE-HD -pohjaisten komposiittien jännitys-venymä-kuvaajat (3)



Kuva 7.7. Mater-Bi -pohjaisten komposiittien jännitys-venymä-kuvaajat



Kuva 7.8. PP -pohjaisten komposiittien jännitys-venymä-kuvaajat

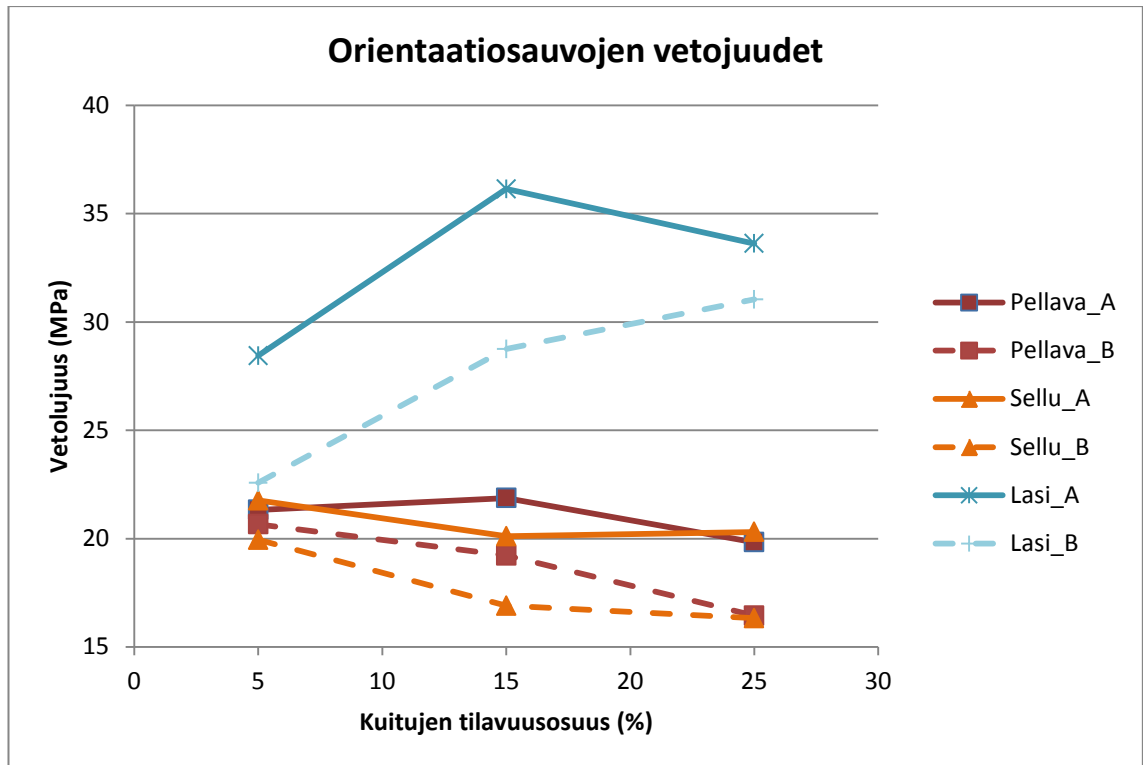
7.1.2 Orientaatiokoesauvat

Kuvassa 7.9 on esitettyä orientaationsauvoille tehdyistä vetokokeista saadut vetolujuuksien arvot kuitujen tilavuusosuuksien suhteen. Yleisesti voidaan tehdä havainto, että orientaationsauvat kestivät vetoa standardikappaleita huomattavasti paremmin ja A-sauvat, eli päävirtaussuuntaa vastaan kohtisuoraan leikatut kappaleet kestivät vetoa B-sauvoja paremmin, mikä oli jossain määrin yllättävä tulos.

Standardisauvojen ruiskuvalussa kappaleen joka sivulle syntyy pintakerros, jossa kuidut ovat orientoituneet virtauksen suuntaisesti. Orientaationsauvat leikattiin suuremmasta ruiskuvalusta levystä, jolloin näitä virtauksen suuntaan orientoituneita pintakerroksia on vain kappaleen ylä- ja alapinnalla. Tämä selittää osaltaan orientaationsauvojen heikompia tuloksia. Suuren levymuotin täyttyminen on lisäksi hitaampaa kuin standardisauvamuotilla, eikä ruiskutettaessa saavuteta yhtä kovia paineita, mikä voi johtaa heikompiin mekaanisiin ominaisuuksiin.

A-kappaleiden parempaa vetolujuutta voi osaltaan selittää kappaleiden keskiosan kuituorientaation vaikutus. Keskiosan kuidut pyrkivät nimittäin orientoitumaan kohtisuoraan päävirtaussuuntaa vasten, kuten aiemmin kuituorientaatiota käsittelevässä kappaleessa selvitettiin. Neljä millimetriä on ruiskuvalukappaleelle suhteellisen suuri paksuus, ja paksuissa kappaleissa keskiosan vaikutus korostuu.

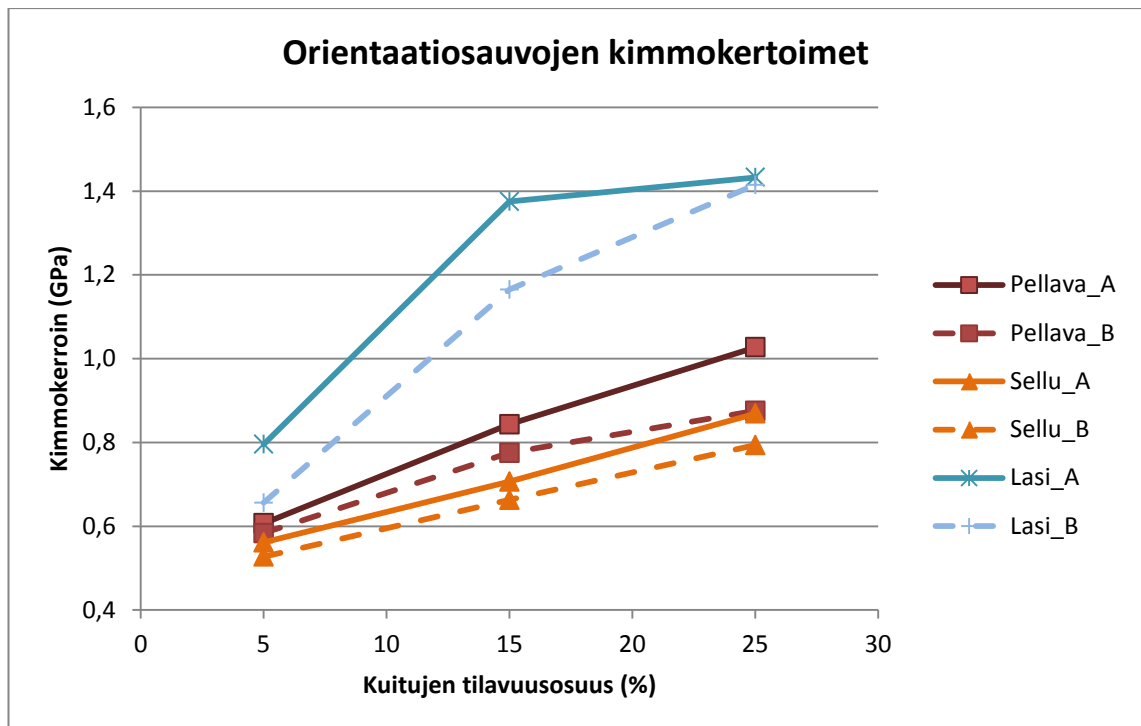
Kuitujen tilavuusosuuden kasvaessa yleinen trendi luonnonkuituorientaationsauvoilla näyttäisi olevan lujuuksien heikkeneminen. Lasikuituorientaationsauvojen tapauksessa kuituosuuden kasvattaminen 15 tilavuusprosenttiin kasvattaa komposiitin lujuuksia sekä A- että B -sauvojen kohdalla. Kuten edellä jo mainittiin, kuitujen pintakerroksen vaikutus jää orientaationsauvoilla standardisauvoja pienemmäksi ja voikin olla että luonnonkuitujen lisäyksestä on vetolujuuden suhteen haittaa komposiitille, koska kuitujen lujitusvaikutus ei riitä kompensoimaan esimerkiksi kuitukerääntymistä aiheuttavaa murtuma-alttiutta. Kuitukerääntymillä on taipumus muodostua lähinnä kappaleen keskiosaan. Myös orientaationsauvojen leikkaaminen isommasta levystä on saattanut aiheuttaa sauvojen leikkausreunoille kohtia, joista murtuma helposti alkaa, ja kun tämä yhdistetään suuremman kuitupitoisuuden aiheuttamaan kuitukerääntymien esiintymiseen, murtuma-alttiutus vahvistuu. Lasikuitukomposiitin ruiskuvalussa taas ei tällaisia kuitukerääntymiä juuri muodostu.



Kuva 7.9. Orientaationsauvojen vetojuudet kuitupitoisuuden funktiona. Matriisina PE-HD. A = ruiskuvalun päävirtaussuuntaa vasten kohtisuoraan leikatut sauvat. B = ruiskuvalun päävirtaussuunnan mukaisesti leikatut sauvat.

Orientaationsauvojen kimmokerrointen arvot jäävät selkeästi pienemmiksi kuin standardisauvoilla. Kuvasta 7.10 nähdään, että kimmokerrointen tapauksessa kuitenkin suurempi kuituosuus johtaa aina suurempaan kimmokertoimeen kuitujen orientaatiosta riippumatta. Kuten vetojuudet, myös kimmokertoimet ovat suurempia päävirtaussuuntaa vastaan leikatuilla A-sauvoilla.

Sellun ja pellavan orientaationsauvojen ero sekä lujuudessa että jäykkyydessä näyttäisi olevan suurimmillaan 15 til-% sauvissa. Kun kuituosuus nostetaan 25 prosenttiin, ero tasoittuu. Vetojuuksien suhteen sellu pääsee tällöin jopa samalle tasolle pellavan kanssa kummassakin sauvatyypissä. Tämä kuitulisäys ei ole nimittäin vaikuttanut sellukomposiitin vetojuuteen juurikaan, mutta on laskenut pellavakomposiitin vetojuutta. Mahdollisesti pellavakomposiitissa kuitukerääntymiä alkaa syntyä merkittävässä määrin vasta yli 15 til-% kuitua sisältävissä komposiiteissa.



Kuva 7.10. Orientaatio-sauvojen kimmokertoimet kuitupitoisuuden funktiona. Matriisina PE-HD. A = ruiskuvalun päävirtaussuuntaa vasten kohtisuoraan leikatut sauvat. B = ruiskuvalun päävirtaussuunnan mukaisesti leikatut sauvat.

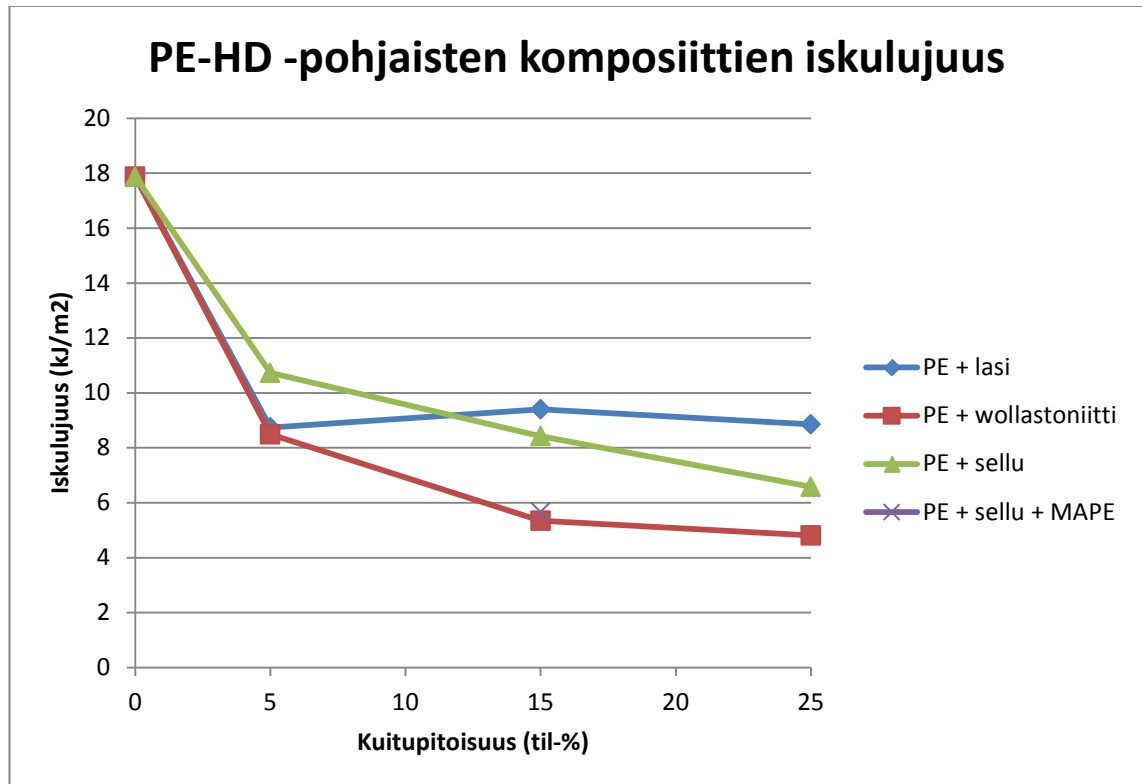
Tärkeä havainto on, että luonnonkuitukomposiittien mekaaniset ominaisuudet ovat lasikuitukomposiitteja riippumattomampia kuormituksen suunnasta varsinkin 5 ja 15 til-% kuitua sisältävissä komposiiteissa. Tämä heijastuu sekä vetolujuuksiin että kimmokertoimiin. Erityisen mielenkiintoista on, että luonnonkuitukomposiittisauvat pääsevät veto-ominaisuuksiltaan lähelle B-lasikuitukomposiittisauvojen ominaisuuksia 5 til-% kuitua sisältävissä komposiiteissa.

7.2 Iskukoe

7.2.1 Standardikoesauvat

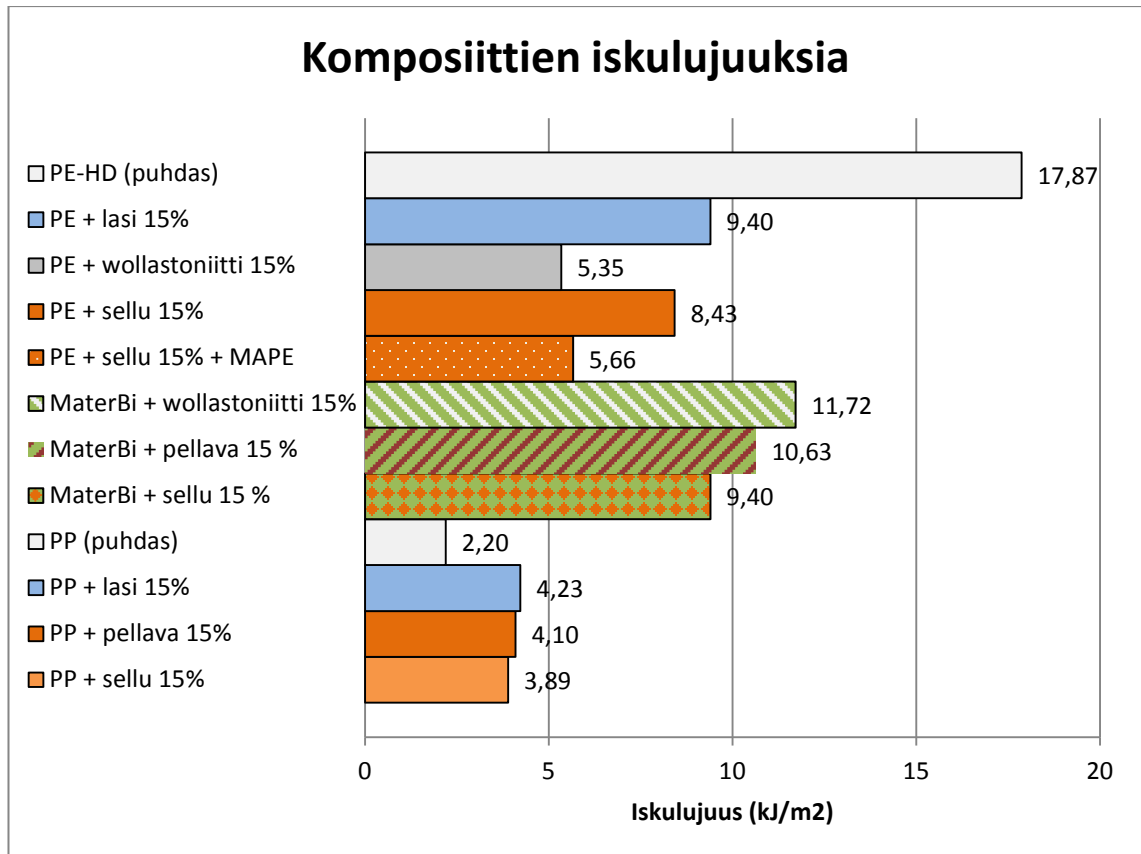
Lisääntyvä kuitupitoisuus vaikuttaa heikentävästi sellulla ja wollastoniitilla lujitetun polyeteenin iskulujuuteen, kuten kuvasta 7.11 voidaan havaita. Lasikuidun lisääminen viidestä tilavuusprosentista viiteentoista näyttäisi hivener parantavan iskulujuutta. Pienikin määrä kuitua heikentää melko dramaattisesti polyeteenin iskulujuutta jokaisen tutkitun kuitumateriaalin tapauksessa. Viisi tilavuusprosenttia lasikuitua tai wollastoniittia heikentää polyeteenin iskulujuutta n. 50 %. Vastaava määrä sellua heikentää iskulujuutta n. 40 %. Sellu näyttäisi pärjäävän vertailussa hyvin lasikuidulle. Aiemmin LUOMA-projektin tutkimuksessa tutkittiin myös PE-HD-pellavan iskulujuuksia. Tulokset ovat samankaltaisia sellukomposiittien kanssa, joskin pellavan lisäys säilyttää iskulujuuden hieman paremmin. Pellavaa 6,2 til-% sisältävässä komposiitissa iskulujuus on vähentynyt n. 35 % puhtaaseen polyeteeniin verrattuna.

Myös suuremman tilavuusosuuden pellavakomposiiteissa tulokset ovat hienoisesti sellukomposiitteja parempia. Tämänkaltaisen eron tosin saattaa selittää myös kokeen suorittajan vaihtuminen. MAPE:n iskulujuutta alentava vaikutus oli 14,1 til-% kuitua sisältäneessä pellavakomposiitissa hyvin samantapainen, kuin sellukomposiitillakin.



Kuva 7.11. PE-HD –pohjaisten komposiittien iskulujuus (Charpy, lovettuilla kappaleilla) kuitupitoisuuden funktiona

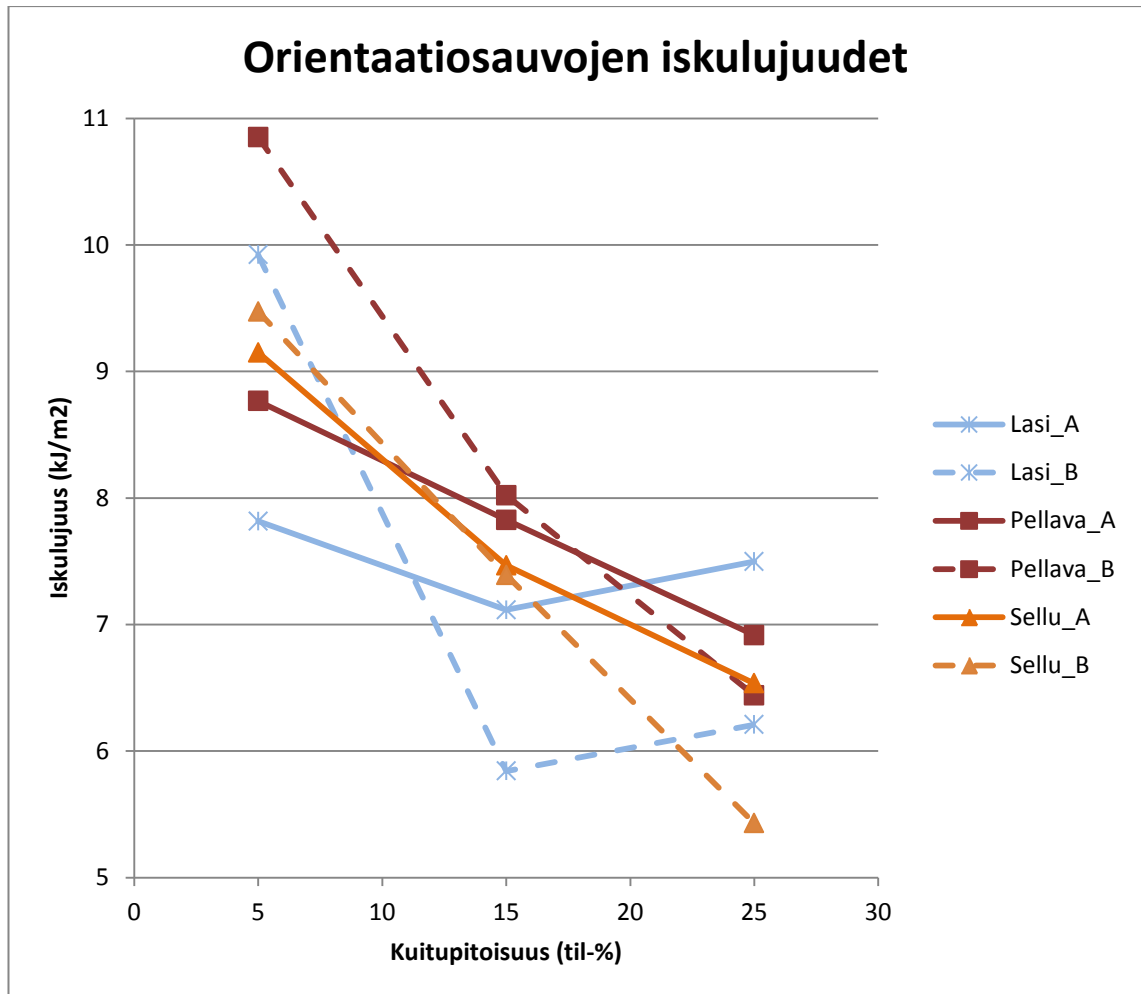
Kuvassa 7.12 nähdään myös PP- ja MaterBi-pohjaisten komposiittien tulokset. Aiemmin LUOMA-projektin tutkimuksissa testattiin puhtaan MaterBi:n iskulujuutta ja murtumaa ei saatu syntymään. Puhtaan polyeteenin iskulujuuden arvo (17,87 kJ/m²) on otettu diagrammeihin samasta tutkimuksesta. MaterBi-komposiittien iskulujuudet ovat varsin korkeita ja PP-komposiittien huomattavasti matalampia. PP:n tapauksessa kuitenkin kuitujen lisääminen vaikuttaa suotuisasti muovin iskulujuuteen, toisin kuin polyeteenillä tai MaterBi:lla. Kytkeäaineen lisääminen sellukomposiittiin heikentää selvästi iskulujuutta. Iskulujuuden suhteen wollastoniitti toimii paremmin MaterBi:hin kuin polyeteeniin sekoitettuna. Lasikuiduilla vahvistetut komposiitit eivät eroa merkittävästi sellulla tai pellavalla vahvistetuista komposiiteista iskulujuudeltaan.



Kuva 7.12. Vertailua 15 til-% kuitua sisältävien komposiittien iskulujuuksien (Charpy, lovetut koekappaleet) kesken

7.2.2 Orientaatiokoesauvat

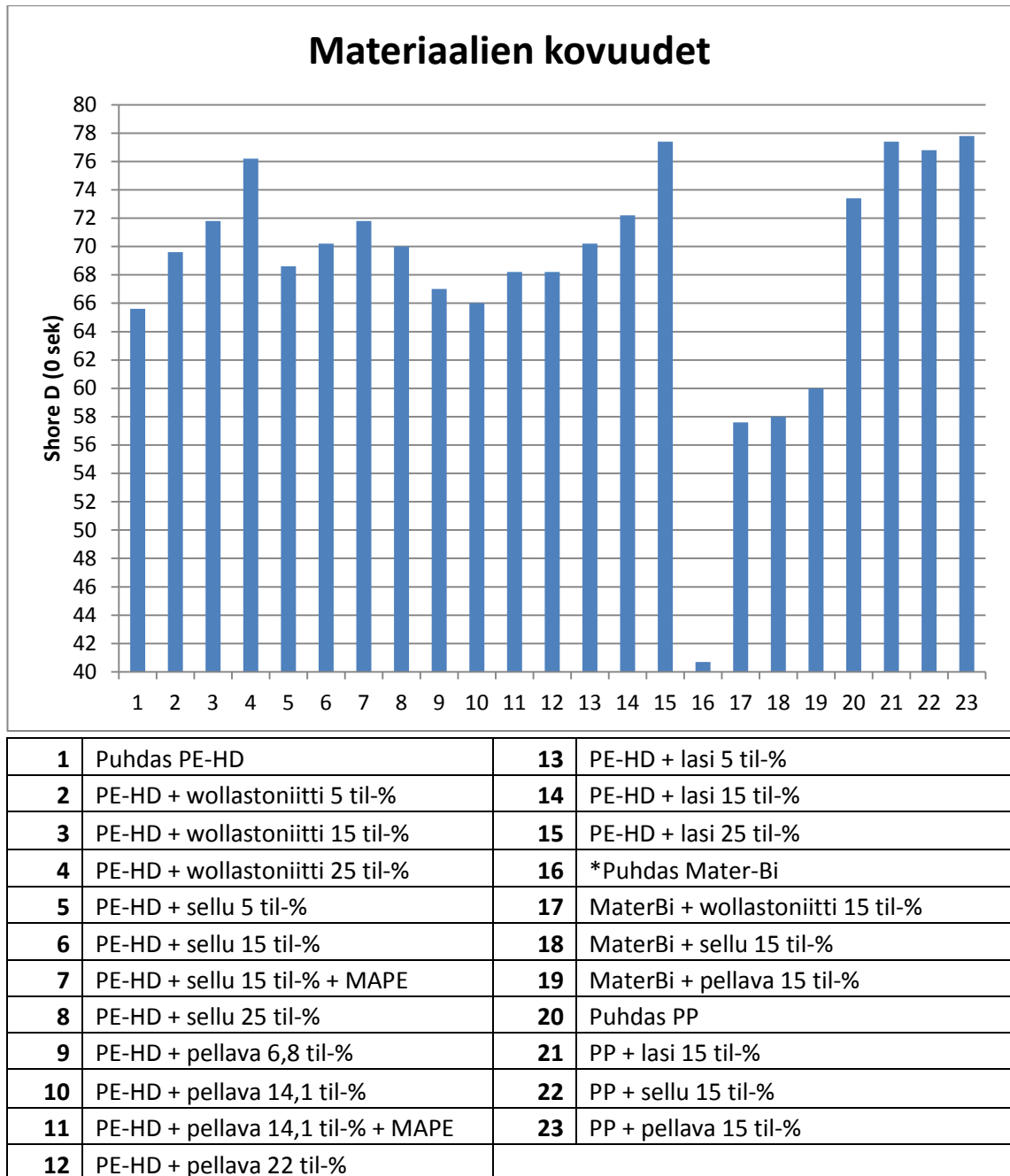
Käsitys luonnonkuitukomposiittien mekaanisten ominaisuuksien kilpailukyvästä lasikuitukomposiitteihin nähden vahvistuu orientaationsauvoille tehtyjen iskukokeiden myötä. Sekä sellu että pellava päihittävät lasikuidun iskulujuudessa 15 tilavuusprosenttia kuitua sisältävissä komposiiteissa, kuten kuvasta 7.13 voidaan havaita. Kuituorientaation vaikutus iskulujuuksiin ei ole yhtä selvää kuin vetolujuuksien tapauksessa. Pienimmän kuituosuuden komposiiteissa B-sauvat, eli päävirtaussuunnan suuntaiset sauvat saavat korkeimmat iskulujuudet. Suurimman kuituosuuden komposiiteissa tilanne on taas juuri päinvastainen. Ainoastaan lasikuitukomposiitit hyötyvät, kun kuituosuutta kasvatetaan 15 tilavuusprosentista 25 tilavuusprosenttiin.



Kuva 7.13. Orientaationsauvojen iskulujuus kuitupitoisuuden funktiona. Matriisina PE-HD. A = ruiskuvalun päävirtaussuuntaa vasten kohtisuoraan leikatut sauvat. B = ruiskuvalun päävirtaussuunnan mukaisesti leikatut sauvat.

7.3 Kovuuskoe

Kuvasta 7.14 voidaan havaita, että lasikuidulla oli kovettavin vaikutus polyeteeniin, mutta wollastoniitin arvot pääsivät hyvin lähelle lasikuidun vastaavia. Pellava kovetti parhaiten Mater-Bi:tä. Pellava lisäsi polyeteenin kovuutta hieman vähemmän kuin sellu. Polypropeenikomposiittien kovuuksissa ei ollut juurikaan eroja. Kovuuskokeiden kaikki tulokset ovat liitteessä 5, jossa on nähtävillä myös Shore D 15 sekunnin arvot.

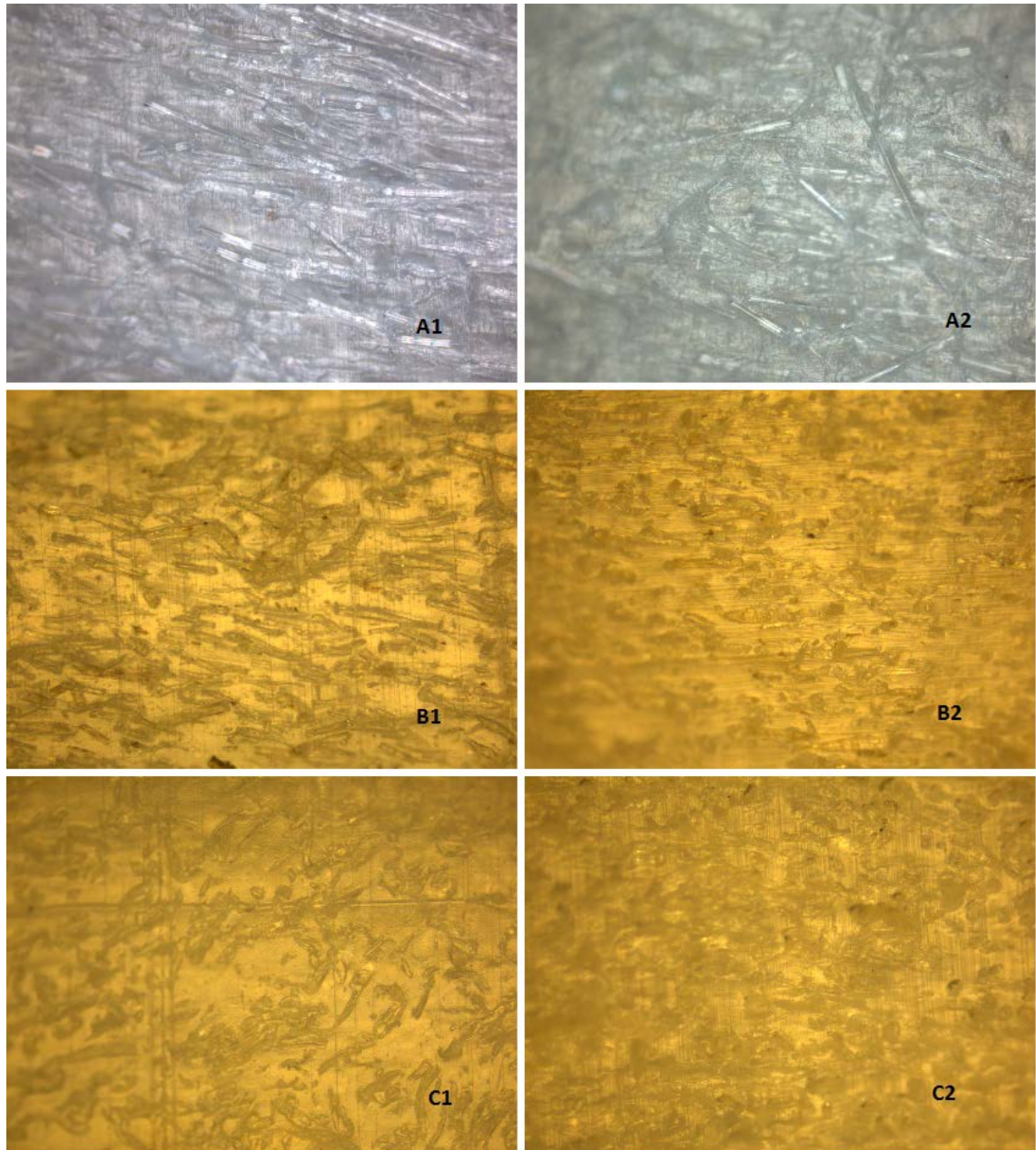


Kuva 7.14. Materiaalien kovuudet (Shore D, 0 sek). Tähdellä merkitty materiaali on LUOMA-projektissa aikaisemmin testattu.

7.4 Optinen mikroskopia

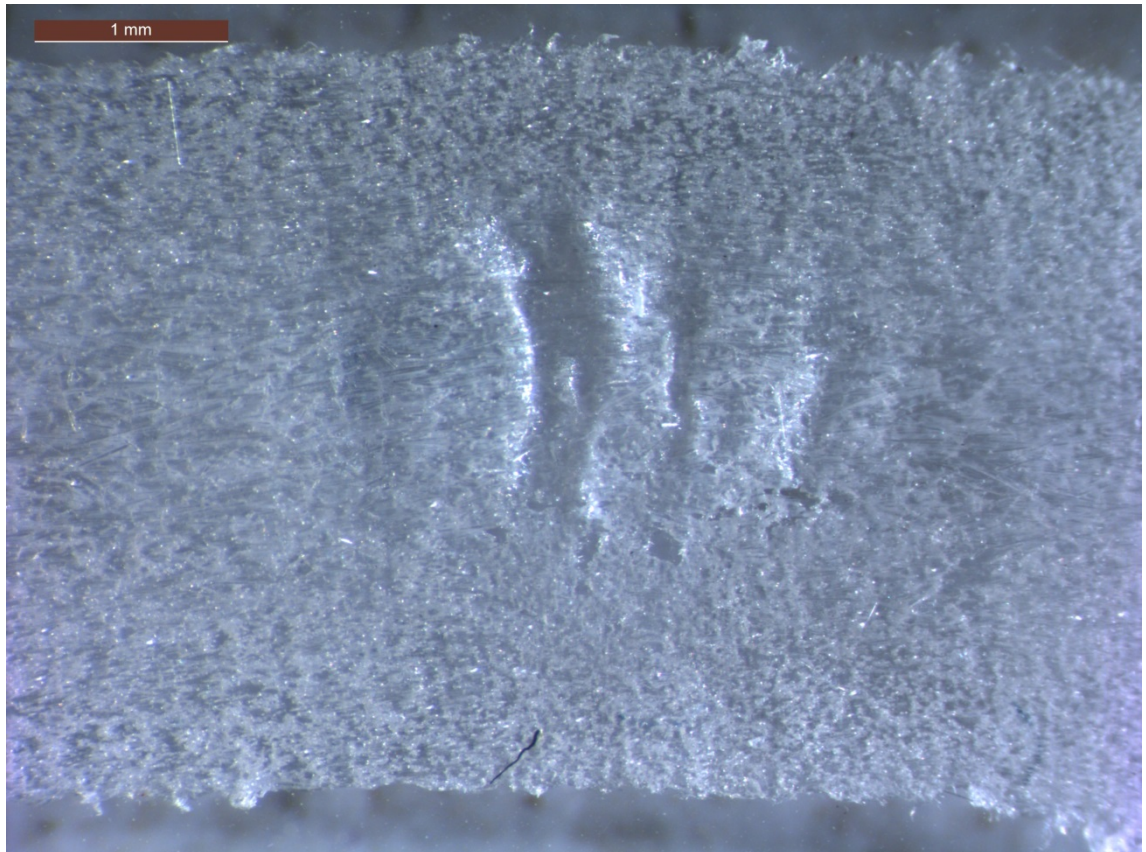
Optisella mikroskoopilla tarkasteltiin mikrotomilla leikattuja ohuita siivuja. Nämä siivut saatiin 15 til-% kuitua sisältäneiden orientaationsauvojen leikkaamisesta jääneistä ylijäämäkappaleista. Oteuissa mikroskooppikuviissa ruiskuvalun päävirtaussuunta on aina horisontaalinen. Kuvan 7.15 kohdasta A1 nähdään, kuinka lasikuitu orientoituu selkeästi virtauksen suuntaisesti kappaleen pinnassa. Orientaatio on jonkin verran sattumanvaraisempaa lasikuitukappaleen keskiosassa (A2). Pellavakuidun

orientoituminen pintakerroksissa ei ole aivan yhtä voimakasta kuin lasikuidulla, mutta varsin selkeästi havaittavaa kuitenkin (B1). Keskiosan (B2) leikkauksessa näyttäisi olevan paljon kuitujen poikkileikkauksia, mikä taas viittaa sattumanvaraisempaan orientoitumiseen. Sellun orientoituminen taas on koko kappaleessa sattumanvaraisempaa kuin pellavalla. Ainakin tätä tutkimusta varten otetuissa mikroskooppikuvissa vaikuttaisi keskiosan (C2) sellupitoisuus olevan suurempi, kuin pintakerroksen (C3). Toisaalta näytekappaleissa sellu oli varsin epätasaisesti jakaantunutta muutenkin.



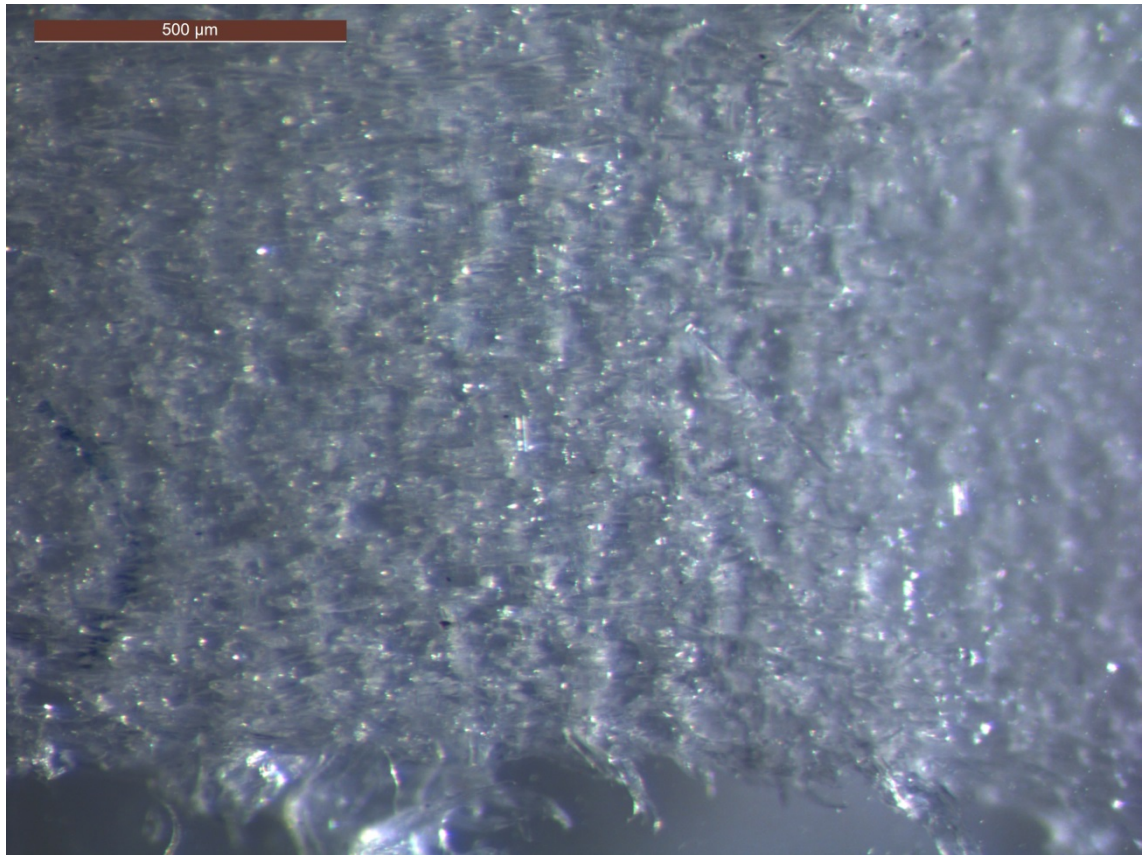
Kuva 7.15. Näytteiden mikroskooppikuvat. Ruiskuvalun päävirtaussuunta on kuvissa vasemmalta oikealle. A = PE-HD & lasikuitu, B = PE-HD & pellava, C = PE-HD & sellu. 1 = pintakerros, 2 = keskiosa.

Tarkastellaan vielä orientaationsauvojen poikkileikkauksia, jotta saataisiin parempi kuva kuitujen orientaatiosta. Tutkitaan ensin yleiskuvaa lasikuitulujitetun b-sauvan poikkileikkauksesta (kuva 7.16). Jo suhteellisen pienellä suurennoksella nähdään, kuinka reunoilla lasikuitu on järjestäytynyt virtauksen suuntaisesti, kun taas keskellä kuidut suuntautuvat virtausta vastaan. Näyte on hieman kuprulla keskellä, koska kyseessä on mikrotomilla työstyetty vain muutaman kymmenen mikrometrin paksuinen siivu.



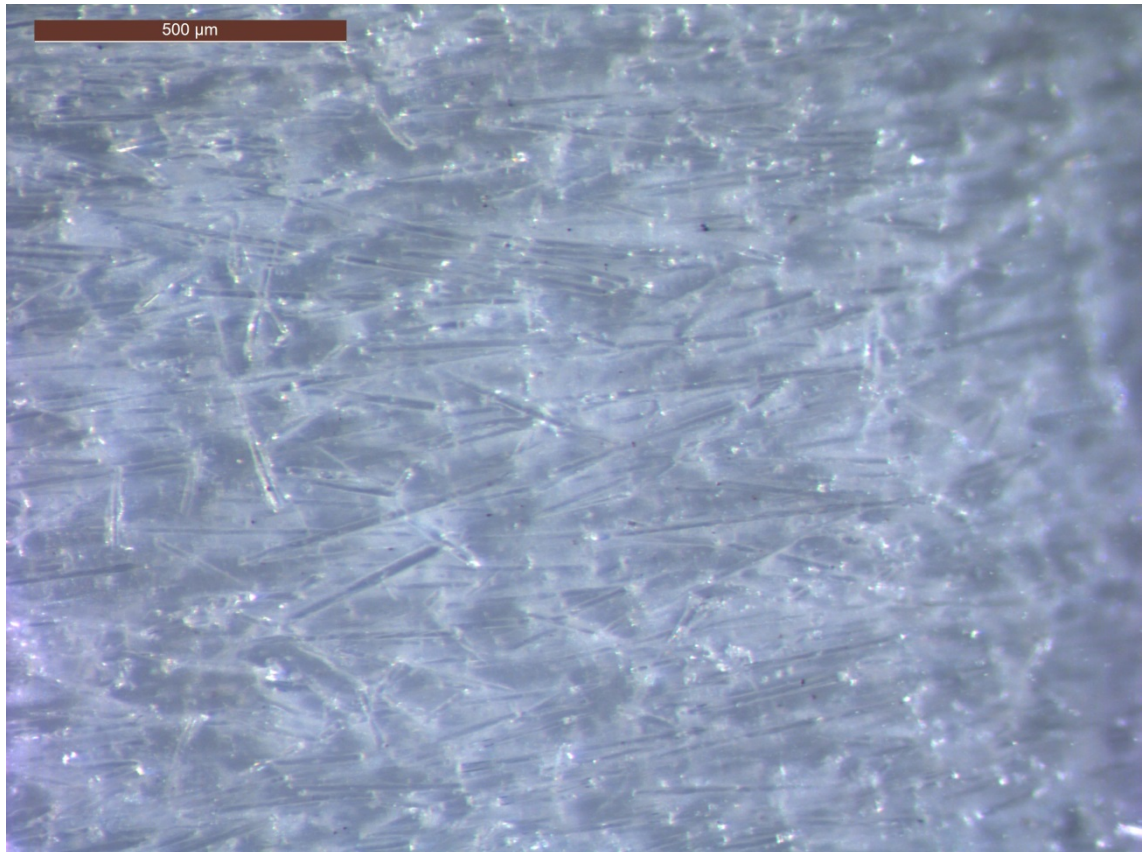
***Kuva 7.16.** Mikroskooppikuva lasikuitulujitetun B-orientaationsauvan poikkileikkauksesta. Ruiskuvalun päävirtaussuunta kuvasta ulospäin.*

Sauvan poikkileikkauksen ulkoreunassa (kuva 7.17) ei näy lähemmin tarkasteltunakaan juuri virtausta vastaan suuntautuneita kuituja, vaan lähinnä pyöreitä tai elliptisiä kuitujen poikkileikkauksia. Tästä voidaan päätellä kuitujen olevan enimmäkseen virtauksen suunnassa.



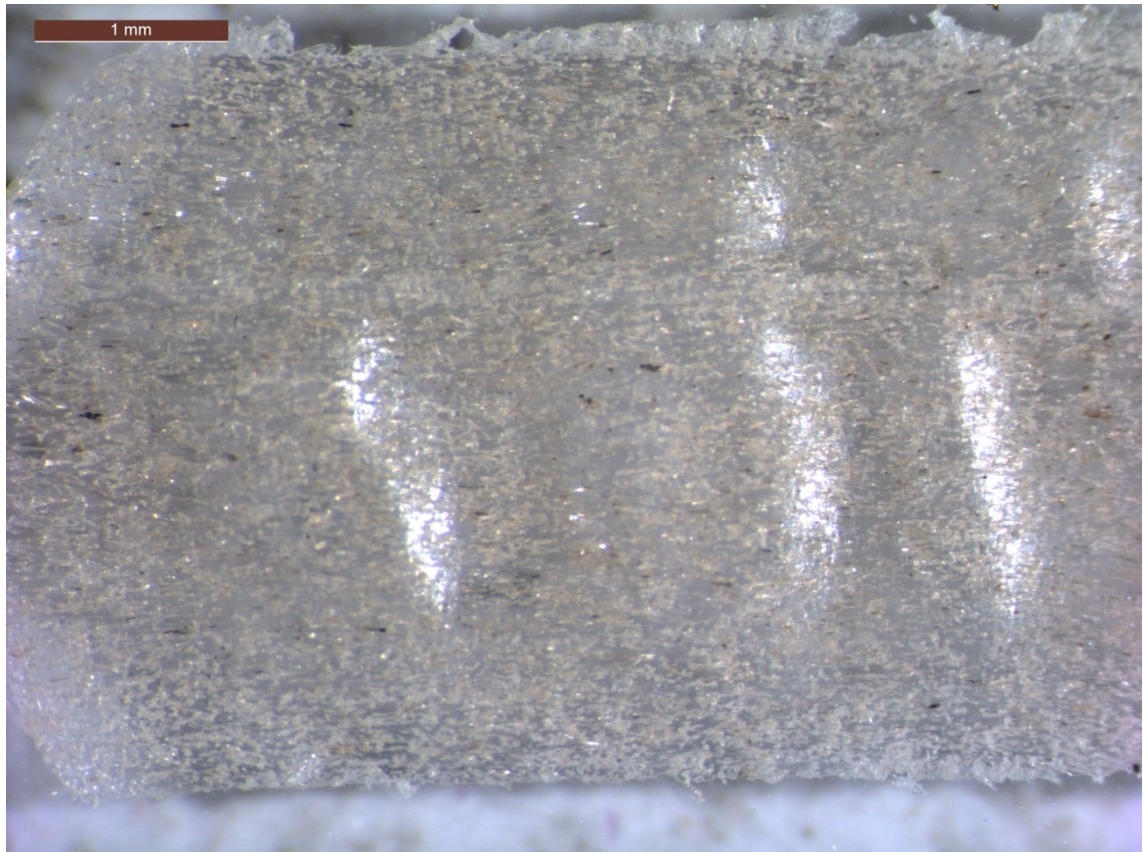
Kuva 7.17. Mikroskooppikuva lasikuitulujitetun B-orientaationsauvan poikkileikkauksen alareunasta. Ruiskuvalun päävirtaussuunta kuvasta ulospäin.

Sauvan poikkileikkauksen keskiosassa tilanne on aivan toinen. Kuvasta 7.18 näkyy hyvin selvästi, kuinka kuidut kulkevat kuvan suunnassa horisontaalisesti, eli päävirtaussuuntaa vastaan.



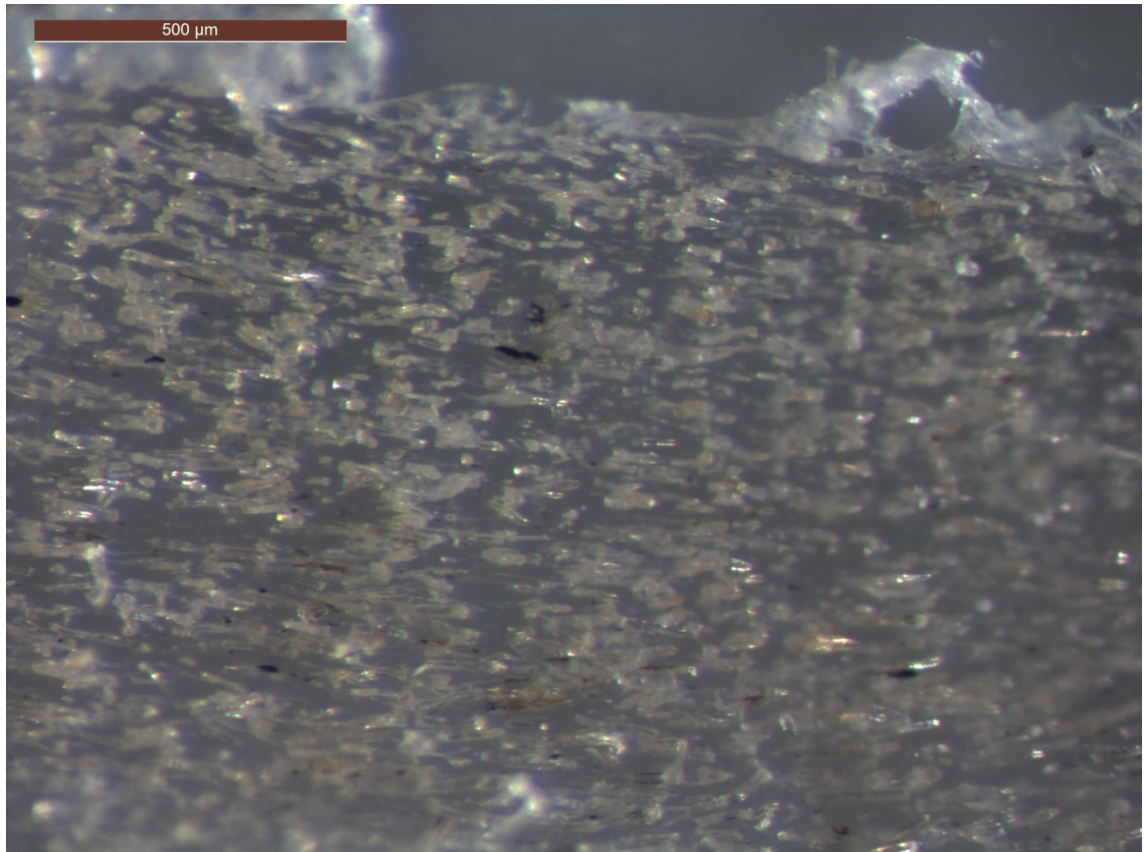
Kuva 7.18. Mikroskooppikuva lasikuitulujitetun B-orientaationsauvan poikkileikkauksen keskiosasta. Ruiskuvalun päävirtaussuunta kuvasta ulospäin.

Pellavasauvan poikkileikkauksen yleiskuvasta (kuva 7.19) ei voida vetää yhtä selkeitä johtopäätöksiä kuin lasikuitusauvan tapauksessa. Tarkasti katsoessa kuitenkin voidaan havaita eroavaisuuksia kuitujen käyttäytymisessä eri osissa poikkileikkausta.



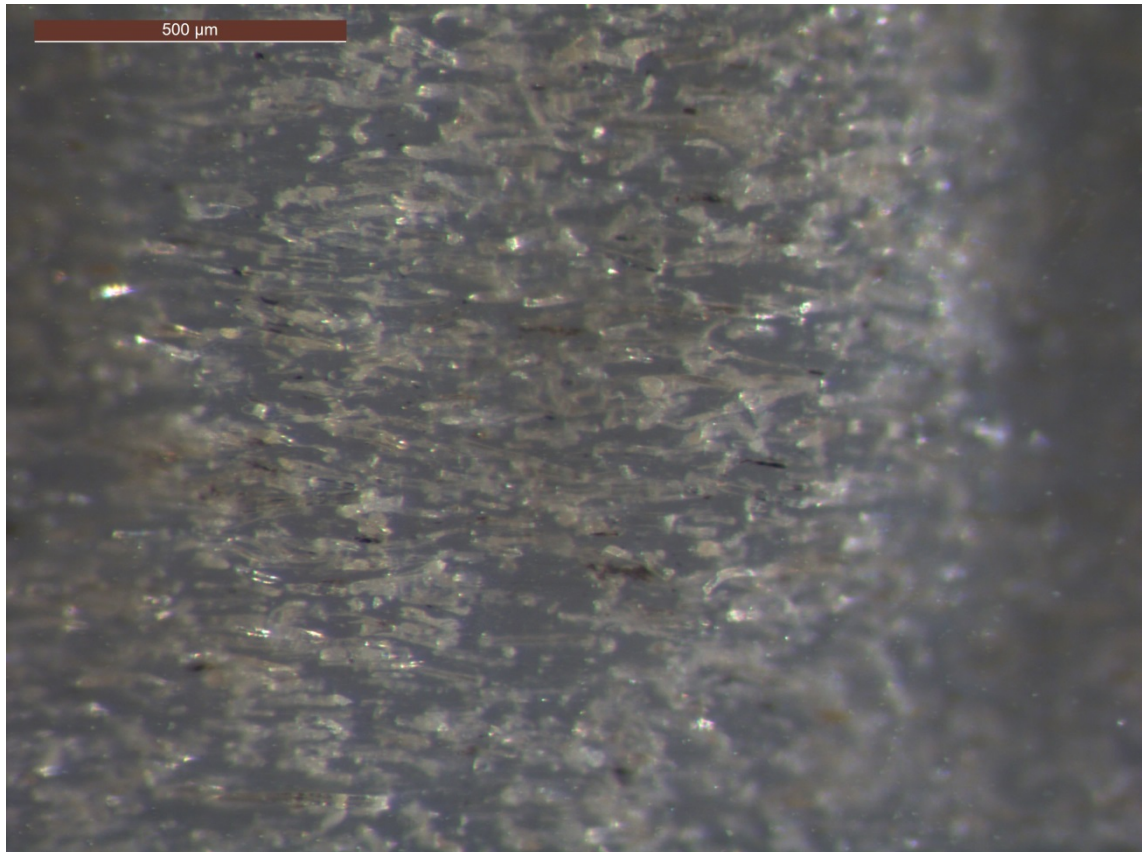
***Kuva 7.19.** Mikroskooppikuva pellavakuitulujitetun B-orientaationsauvan poikkileikkauksesta. Ruiskuvalun päävirtaussuunta kuvasta ulospäin.*

Pellavasauvan poikkileikkauksen reunassa (kuva 7.20) näyttäisi olevan runsaasti elliptisiä kuitujen poikkileikkauksia, mutta myös jonkin verran horisontaalisesti suuntautuneita kuituja.



Kuva 7.20. Mikroskooppikuva pellavakuitulujitetun B-orientaatio-sauvan poikkileikkauksen reunasta. Ruiskuvalun päävirtaussuunta kuvasta ulospäin.

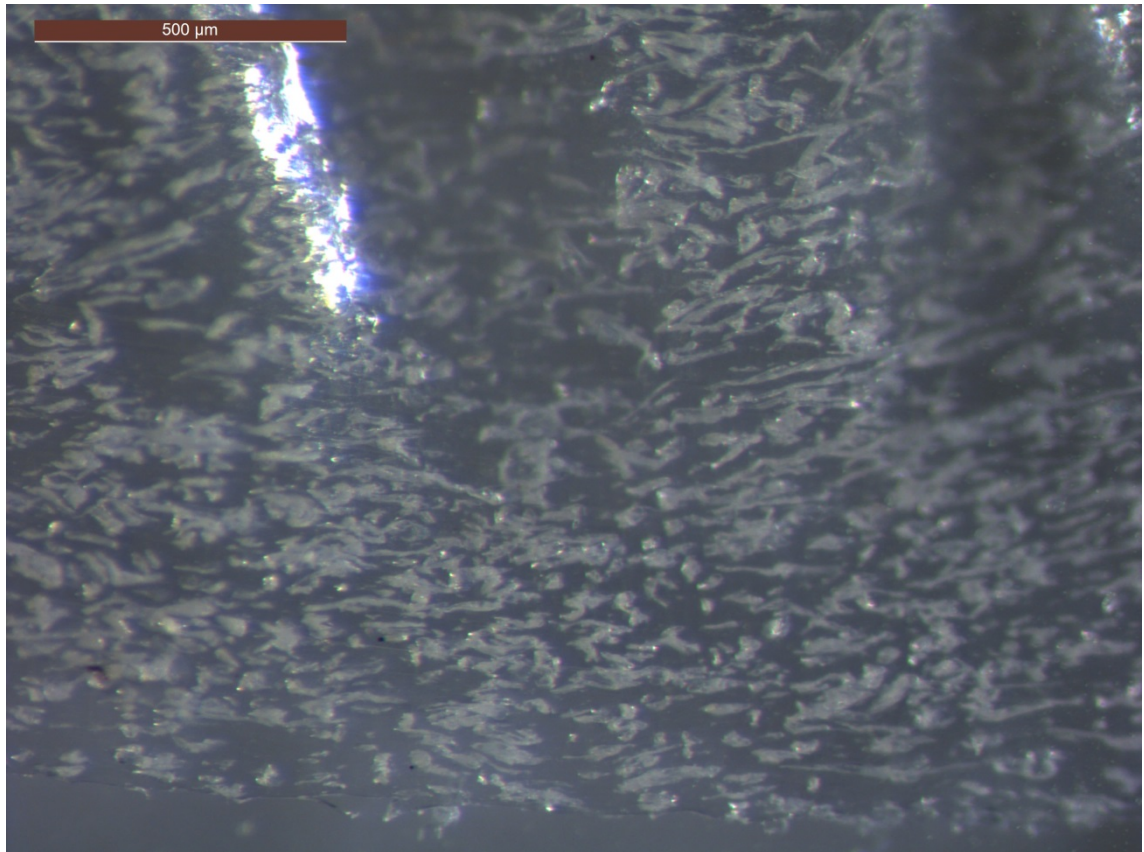
Pellavasauvan poikkileikkauksen keskiosassa (kuva 7.21) näyttäisi olevan myös kuitujen poikkileikkauksia, mutta enemmän horisontaalisesti suuntautuneita kuituja. Lasikuitusauvaan verrattuna erot eivät ole läheskään yhtä suuret reunan ja keskiosan orientaatioissa. Matriisissa pellavakuidut näyttäisivät olevan myös huomattavasti lasikuituja lyhyempiä. Kyse voi olla kuitenkin myös lasikuitua pienemmän kimmokertoimen omaavien luonnonkuitujen taipumisalttiudesta.



***Kuva 7.21.** Mikroskooppikuva pellavakuitulujitetun B-orientaatioauvan poikkileikkauksen keskiosasta. Ruiskuvalun päävirtaussuunta kuvasta ulospäin.*

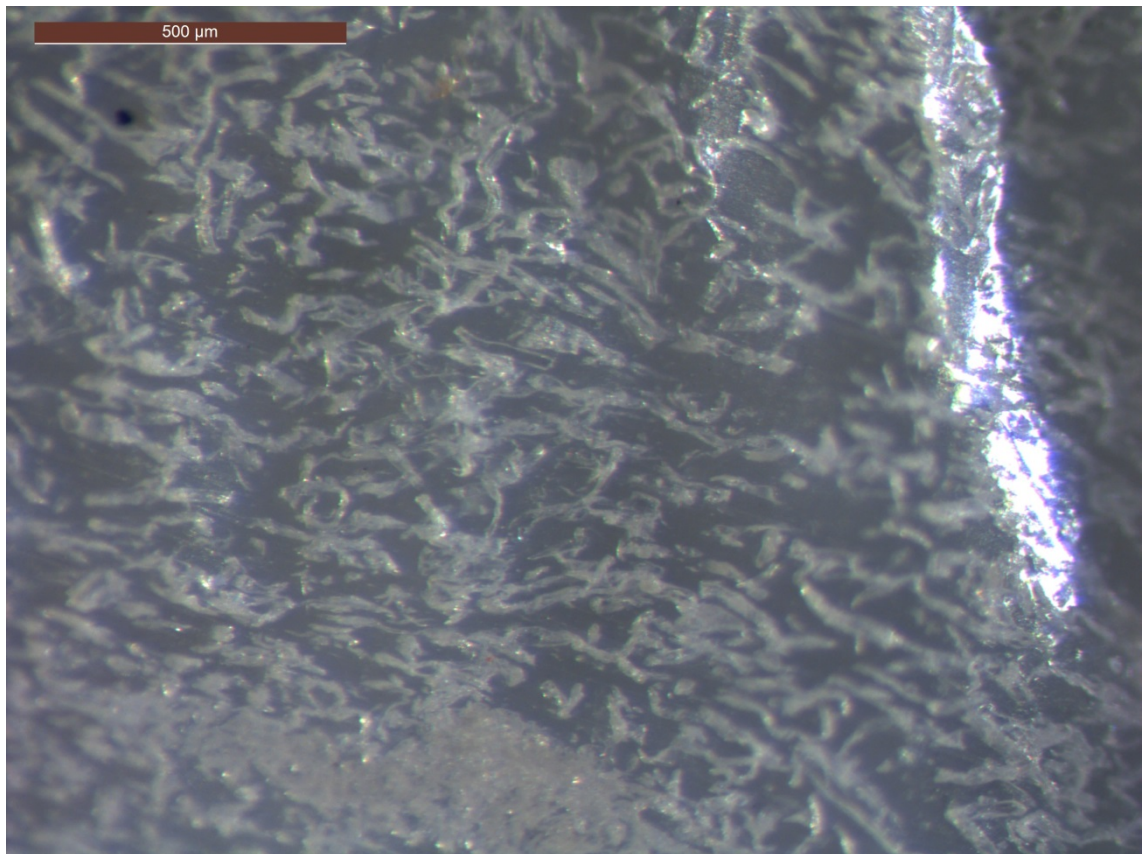
Sellulla vahvistetusta PE-orientaatioauvasta ei saanut näytesivun epätasaisuuden vuoksi hyödyllistä yleiskuvaa, mutta isommalla suurennoksella otetuista kuvista voidaan tehdä joitain huomioita.

Sellusauvan poikkileikkauksen reunassa on nähtävissä kuitujen poikkileikkausten lisäksi ehkä jopa hieman enemmän horisontaalisia kuituja kuin mitä pellavan tapauksessa.



Kuva 7.22. Mikroskooppikuva sellukuitulujitetun B-orientaationsauvan poikkileikkauksen reunasta. Ruiskuvalun päävirtaussuunta kuvasta ulospäin.

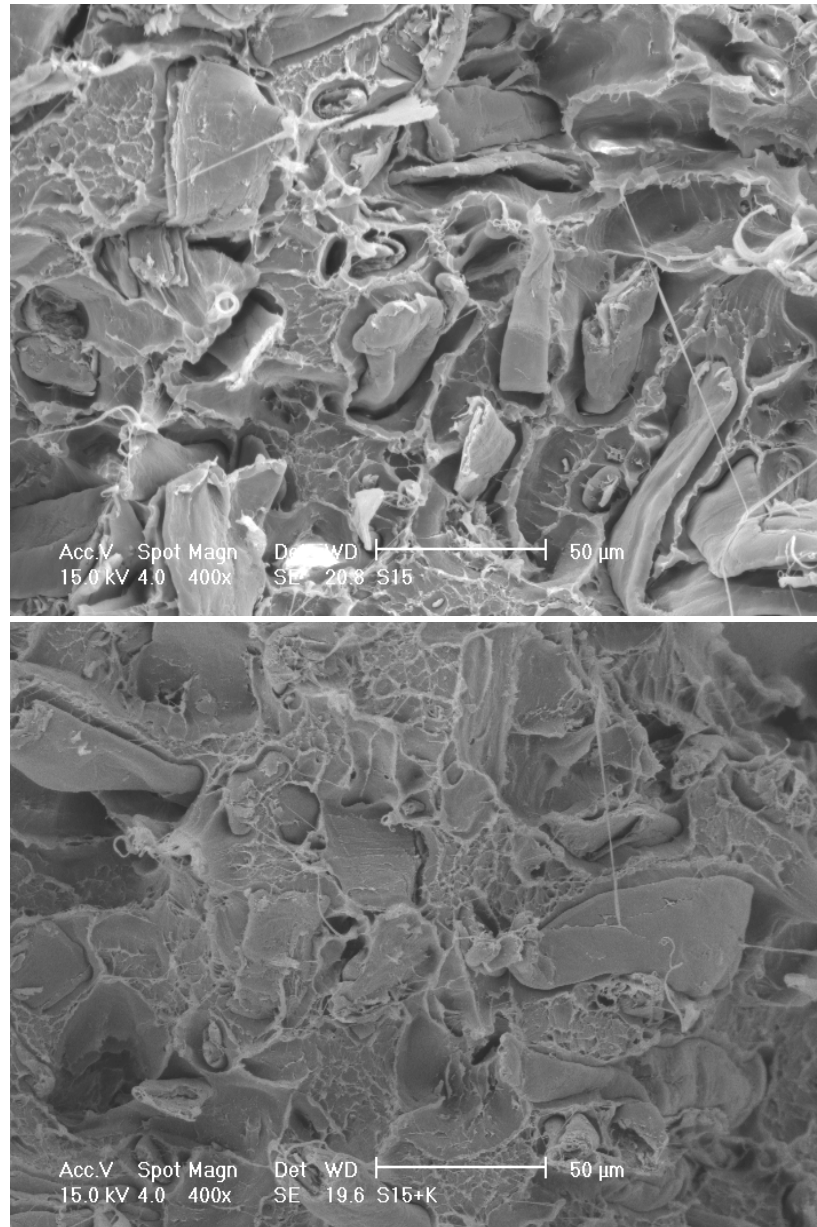
Sellusauvan poikkileikkauksen keskiosassa ei ole enää kovin paljoa kuitujen poikkileikkauksia. Suurin rooli on horisontaaliseen suuntaan asettuneilla kuiduilla, mutta sattumanvaraisesti asettuneita kuituja on myös runsaasti. Kuvan 7.23 alaosassa on nähtävissä myös kuiduista muodostunut agglomeraatti.



Kuva 7.23. Mikroskooppikuva sellukuitulujitetun B-orientaatio-sauvan poikkileikkauksen keskiosasta. Ruiskuvalun päävirtaussuunta kuvasta ulospäin.

7.5 SEM-kuvat

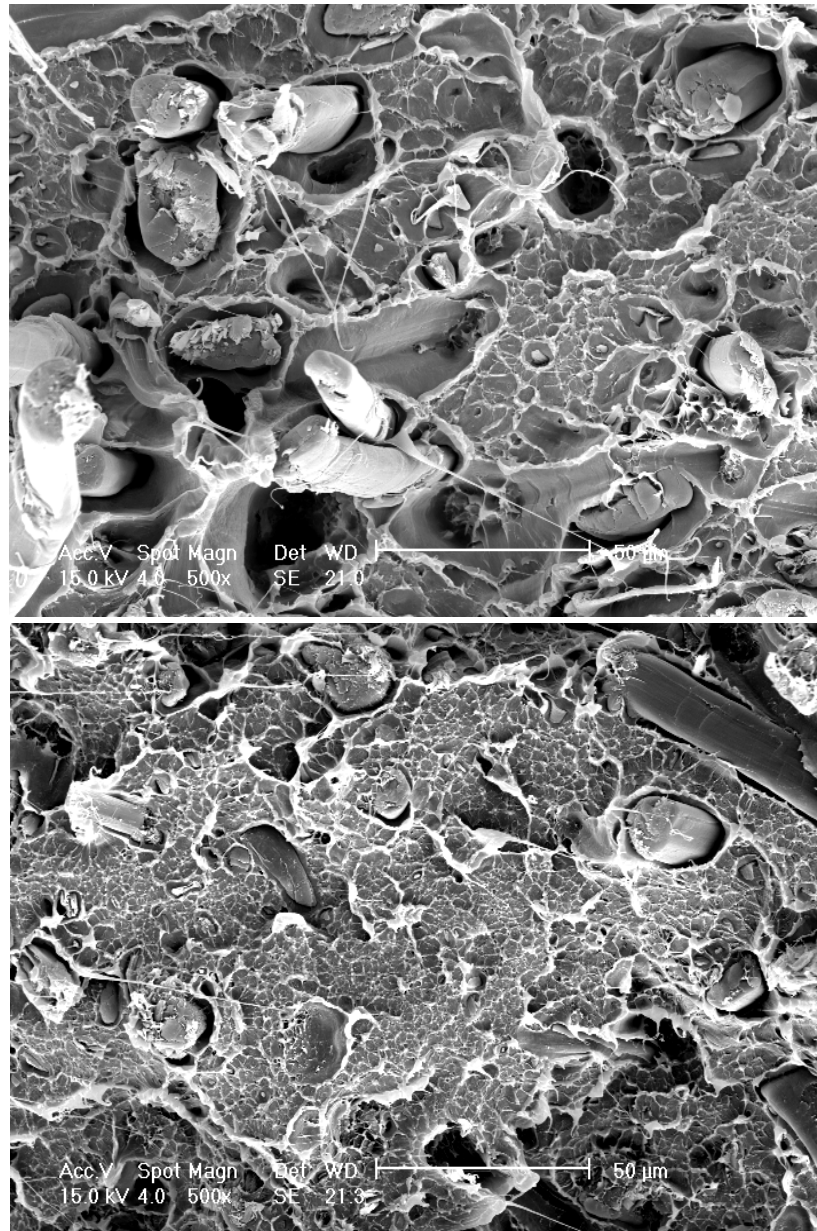
Kuvassa 7.24 on esitettyä 400-kertaisella suurennoksella otetut SEM-kuvat kytkeäaineettoman (ylempi) sekä kytkeäaineellisen (alempi) PE-HD-sellusta valmistetun lovetun iskukoesauvan murtopinnalta. Voidaan havaita, että alemmassa kuvassa kuidut ovat selvästi tiiviimmin kiinni matriisissa, joten kytkeäaineen käyttö on parantanut kuitujen adheesiota. Vetokokeiden tulokset tukevat tätä havaintoa.



Kuva 7.24. Ylemmässä SEM-kuvassa 15 til-% sellua sisältävä PE-HD-matriisi. Alemmassa SEM-kuvassa 15 til-% sellua sisältävä PE-HD-matriisi, jossa lisäksi 3 m-% MAPE-kytkentäainetta. Voidaan havaita, että MAPE on parantanut kuitujen adheesiota.

Kuvassa 7.25 on esitetty aiemmin LUOMA-projektissa 500-kertaisella suurennoksella otetut SEM-kuvat kytkeäaineettomasta (ylempi) sekä kytkeäaineellisesta (alempi) PE-HD-pellavasta valmistetun iskukoesauvan murtopinnoilta. Näistä voidaan tehdä samantyyppisiä havaintoja, kuin edellisistäkin kuvista. Alla olevissa kuvissa tulee vielä hieman selkeämmin esiin, kuinka kytkeäaineettoman komposiitin tapauksessa sekä kuitujen päitä että toisaalta kuitujen jättämiä kuoppia on murtokohdassa enemmän, kuin kytkeäaineellisen komposiitin tapauksessa. MAPE:n käyttö saa kuidut kiinnittymään matriisiin paremmin, jolloin murtokohdissa kuidut katkeavat ennemmin kuin irtoavat matriisista.

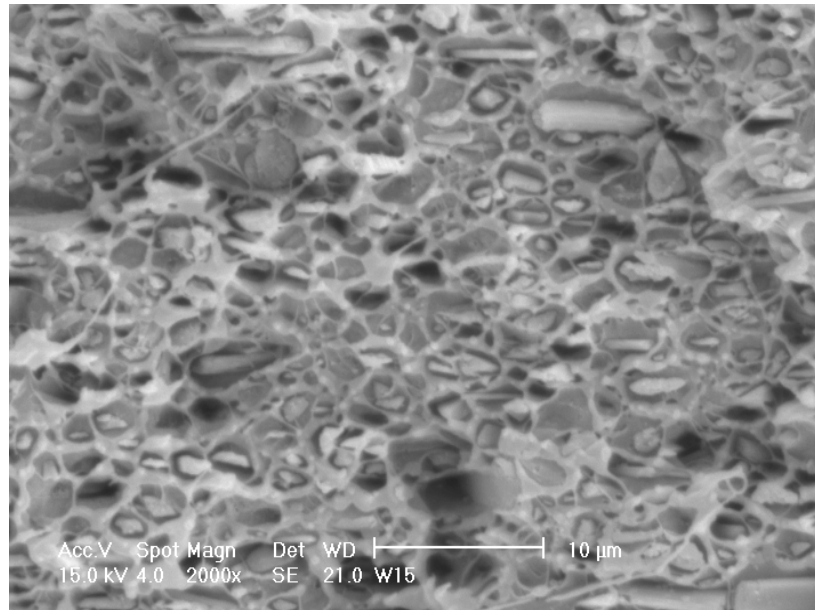
Kun verrataan kuvaa 7.25 kuvaan 7.24, voidaan nähdä, että pellavakuidut (tai kuitukimput) ovat halkaisijoiltaan sellukuitujen kanssa samaa kokoluokkaa, joskin pellavakuitujen poikkileikkaukset ovat muodoltaan hieman säännöllisempiä.



Kuva 7.25. Ylemmässä SEM-kuvassa 14,1 til-% pellavaa sisältävä PE-HD-matriisi. Alemmassa SEM-kuvassa 14,1 til-% pellavaa sisältävä PE-HD-matriisi, jossa lisäksi 3 m-% MAPE-kytkentäainetta. Voidaan havaita, että MAPE on parantanut kuitujen adheesiota.

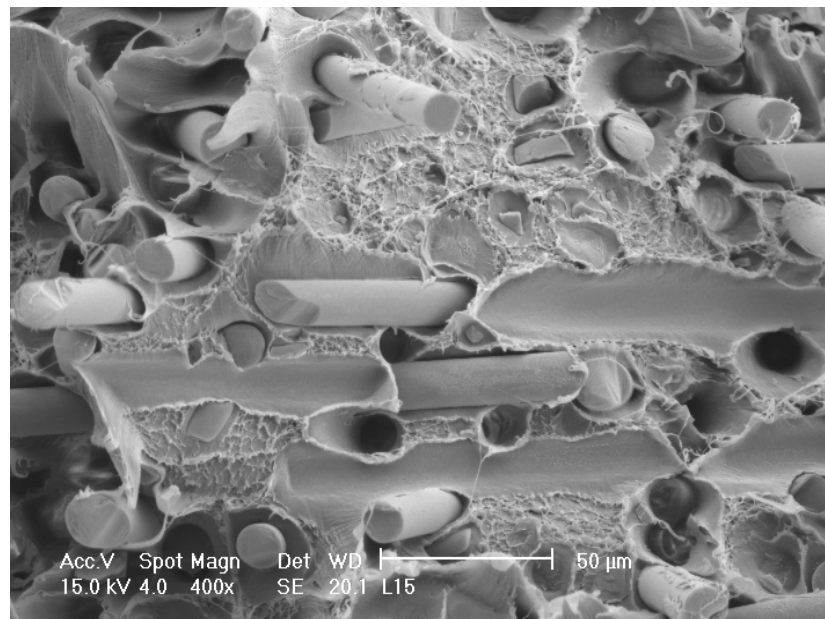
Kuvassa 7.26 on esitettyä 2000-kertaisella suurennoksella otettu SEM-kuva 15 tilavuusprosenttia wollastoniittia sisältävästä PE-HD-komposiitista. Wollastoniitti on partikkelimaisempaa ja kooltaan hienompaa, kuin pellava tai sellu. Wollastoniitin tapauksessa puhutaan kymmenien mikrometrien kokoluokan sijaan mikrometrien kokoluokasta. Pitää ottaa huomioon, että suurennos on aiempiin kuviin verrattuna

viisinkertainen, joten kuidut/partikkelit ovat jokseenkin hyvin kiinnittyneitä matriisiin, eikä suuria aukkoja esiinny. Vaikka murtopinnassa on nähtävissä reikiä, niitä ei kuitenkaan ole niin paljon, kuin kuitujen päitä tai näkyvissä olevia partikkeleita.



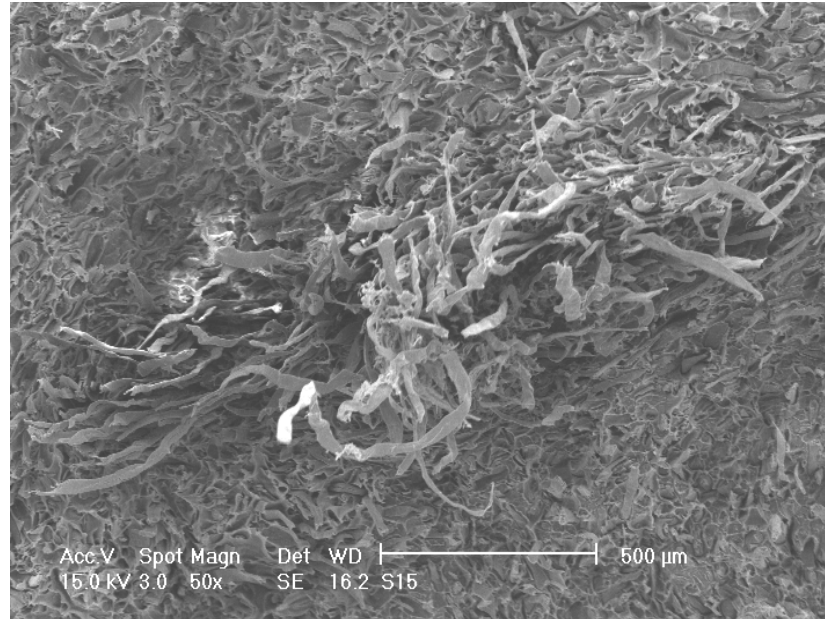
Kuva 7.26. SEM-kuva 15 til-% wollastoniittia sisältävästä PE-HD-komposiitista.

Alla vielä vertailun vuoksi 400-kertainen SEM-suurennos 15 til-% lasikuitua sisältävän PE-HD-komposiitin murtopinnasta. Luonnonkuituihin verrattuna lasikuitujen poikkileikkaus muistuttaa huomattavasti enemmän säännöllistä ympyrää. Lasikuidun adheesio ei ole ollut merkittävän hyvä, sillä näkyvissä on aukkoja ja esiin työntyviä kuitujen päitä.



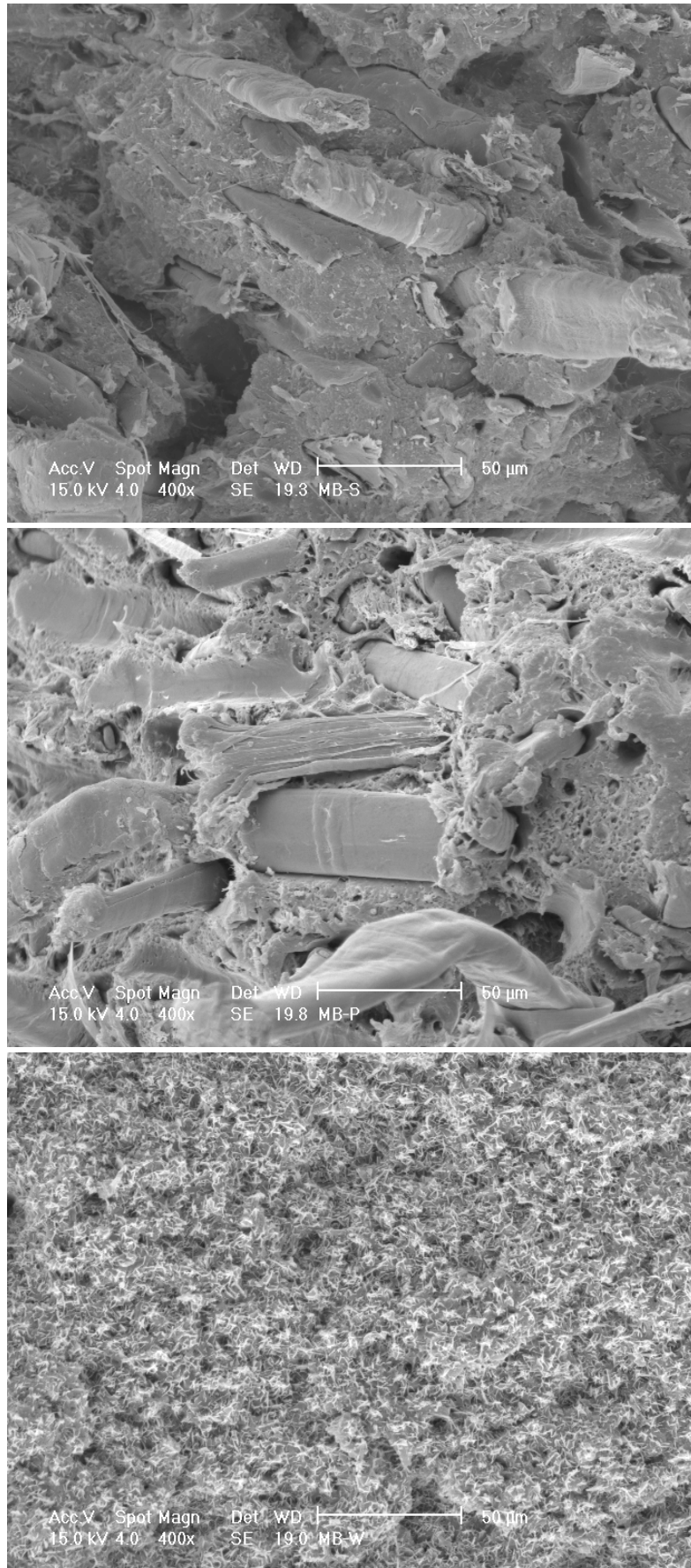
Kuva 7.27. SEM-kuva 15 til-% lasikuitua sisältävästä PE-HD-komposiitista.

Kuvassa 7.28 voidaan nähdä yksi lukuisista sellukomposiitteihin muodostuneista kuitukerääntymistä. Suurennos on 50-kertainen.



Kuva 7.28. SEM-kuva kuitukerääntymästä 15 til-% sellua sisältävässä PE-HD-komposiitissa.

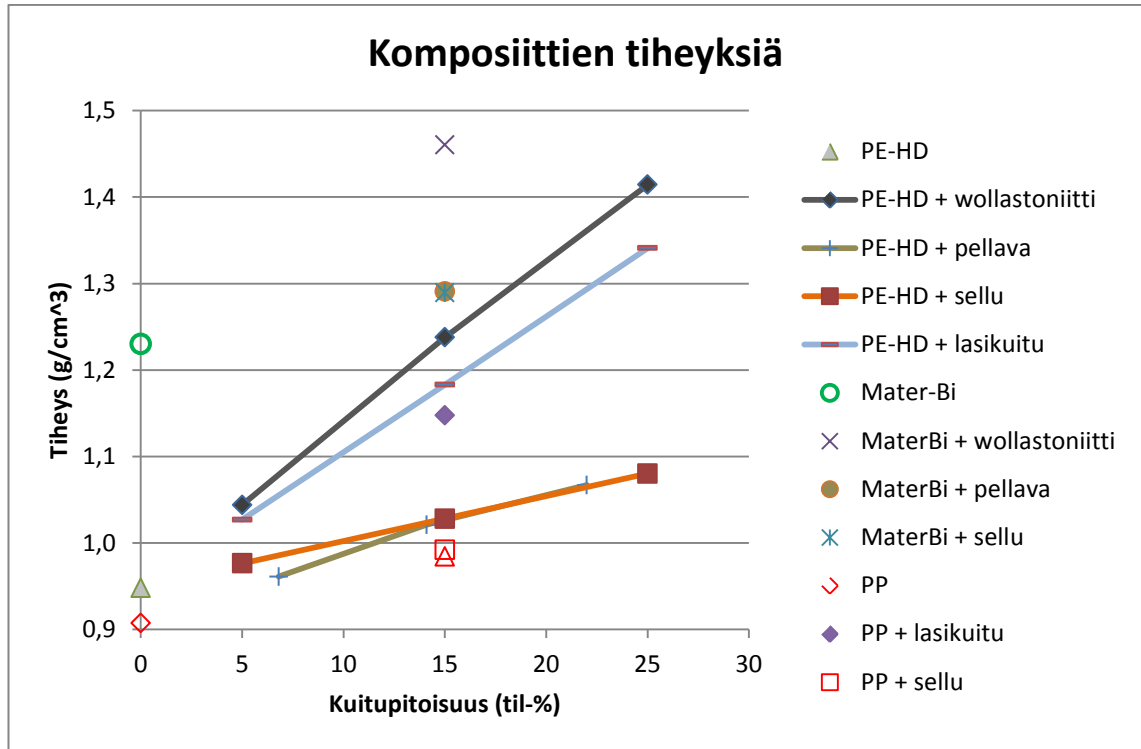
Kuvassa 7.29 on esitettyä sellu-, pellava- ja wollastoniittilujitteisten MaterBi-komposiittien murtopinnat. Luonnonkuiduilla näyttäisi olevan hyvä adheesio MaterBi:hin. Murtopinnoiltaan näytteet vaikuttaisivat olevan hieman epätasaisempia, kuin PE-HD-komposiittien murtopinnat.



Kuva 7.29. MaterBi-komposiitit. Ylimmässä kuvassa lujitteena 15 til-% sellua, keskimmaisessä 15 til-% pellavaa ja alimmassa 15 til-% wollastoniiattia.

7.6 Tiheys

Kuvassa 7.30 on esitettyä komposiiteille Wallace-tiheysmittarilla saadut tiheydet. Voidaan havaita, että polyeteenikomposiittien tiheys kasvaa lähes lineaarisesti, mistä voidaan päätellä kuitujen sekoittuneen matriisiin tasaisesti.



Kuva 7.31. Komposiittien tiheyksiä kuitupitoisuuden funktiona

Komposiittien tiheyksien mitatut arvot olivat hyvin lähellä kirjallisuudesta laskettuja arvoja, kuten voidaan havaita taulukosta 7.1.

Taulukko 7.1. Tutkittujen komposiittien lasketut teoreettiset tiheydet, sekä kokeellisesti määritetyt arvot. Kuitukonsentraatiot tilavuusprosentteja ja tiheydet g/cm³.

	Teoreettinen tiheys	Kokeellinen tiheys
Puhdas PE-HD	0,954	0,948
PE-HD + wollastoniitti 5%	1,048	1,044
PE-HD + wollastoniitti 15%	1,247	1,238
PE-HD + wollastoniitti 25%	1,446	1,414
PE-HD + sellu 5%	0,973	0,976
PE-HD + sellu 15%	1,023	1,028
PE-HD + sellu 15% + MAPE	1,025	1,020
PE-HD + sellu 25%	1,074	1,080
PE-HD + pellava 6,8%	0,982	0,961
PE-HD + pellava 14,1%	1,019	1,021
PE-HD + pellava 14,1% + MAPE	1,020	1,027
PE-HD + pellava 22%	1,058	1,067
PE-HD + lasi 5%	1,030	1,027
PE-HD + lasi 15%	1,193	1,183
PE-HD + lasi 25%	1,356	1,341
Puhdas Mater-Bi	1,23	
Mater-Bi + wollastoniitti 15%	1,487	1,460
Mater-Bi + sellu 15%	1,263	1,289
Mater-Bi + pellava 15%	1,263	1,291
Puhdas PP	0,9	0,907
PP + lasi 15%	1,152	1,148
PP + sellu 15%	0,983	0,992
PP + pellava 15%	0,983	0,984

8 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin luonnonkuitujen (pellava, sellu ja mineraalikuitu wollastoniitti) mekaanisia ominaisuuksia sekä kestopuovimatriisissa (PE-HD ja PP) että tärkkelyspohjaisessa biomuovimatriisissa (Mater-Bi). Vertailua varten valmistettiin myös lasikuidulla lujitettuja komposiitteja. Komposiitit valmistettiin ruiskuvalamalla. Erityistä huomiota kiinnitettiin kuitujen orientaatiokäyttäytymiseen ja siihen, miten kuitujen orientaatio vaikuttaa kappaleiden mekaanisiin ominaisuuksiin. Orientaatiotutkimusta varten ruiskuvalettiin levymäisiä kappaleita, joista sitten työstettiin koesauvoja sekä leveys- että pituus suunnassa.

Lasikuidulla lujitettujen PP ja PE-HD standardikoesauvojen veto-ominaisuudet päihittivät selvästi luonnonkuitujen vastaavat. PE-HD-standardisauvojen vetolujuudet ja kimmokertoimet kasvoivat lisääntyvän kuitupitoisuuden mukana. Kuidun tyypillä ei ollut tässä suhteessa väliä. Esimerkiksi 15 tilavuusprosentin lasikuitulisäyksellä saatiin PE-HD:n vetolujuus kasvamaan 2,5-kertaiseksi ja kimmomoduli viisinkertaiseksi. 14,1 tilavuusprosenttia pellavaa ja 3 tilavuusprosenttia MAPE-kytkentäainetta lisäsi PE-HD:n vetolujuutta 50 % ja kohotti kimmokertoimen kolminkertaiseksi. Vastaavalla kytkentäaineettomalla komposiitilla ei saatu läheskään yhtä suurta parannusta vetolujuuteen, mutta kimmomoduliin kytkentäaineettomuus ei juurikaan vaikuttanut. Kytkentäaineen kuitujen adheesiota voimistanut vaikutus näkyi myös SEM-kuvissa. Kytkentäaineellisen pellavakomposiitin päihitti vetolujuudessa valmistetuista luonnonkuitu-PE-komposiiteista niukasti ainoastaan 25 til-% wollastoniittia sisältänyt komposiitti. Sellukomposiitit jäivät hieman jälkeen veto-ominaisuuksissa pellavakomposiitteihin verrattuna. Mater-Bi -matriisissa erityisesti sellu ja pellava kohensivat veto-ominaisuuksia, mutta myös wollastoniitti lujitti Mater-Bi:tä. PP-matriisissa luonnonkuidut lisäsivät kyllä jäykkyyttä, mutta heikensivät vetolujuutta neutraaliin polypropeeniin verrattuna.

Iskulujuuden suhteen polypropeeni oli sitä vastoin ainut matriisimateriaali, joka hyötyi kuitujen lisäämisestä. Polyeteenikomposiiteilla huomattavaa oli myös, että kytkentäaineen lisääminen heikensi iskulujuutta. Yleisesti ottaen lasikuitu säilytti komposiittien iskulujuuden hieman luonnonkuituja paremmin, mutta erot eivät olleet kovin merkittäviä tässä suhteessa. Mater-Bi ei veto-ominaisuuksiltaan yltänyt PE-HD:n tai PP:n tasolle, mutta iskunkestävyydeltään Mater-Bi-komposiitit päihittivät edellä mainitut.

Lasikuitu saattaa standardikoesauvojen perusteella vaikuttaa ylivoimaiselta luonnonkuituihin verrattuna, mutta orientaatiokoesauvoilla tehty tutkimus asetti luonnonkuituja suotuisampaan valoon. Asiaa selvitettiin työstämällä ruiskuvaletusta

levymäisestä kappaleesta koesauvoja ruiskuvalun päävirtaussuunnan suuntaisesti, sekä kohtisuoraan vasten päävirtaussuuntaa. Näille kappaleille suoritettiin vetokokeet sekä iskukokeet. Luonnonkuituvahvistettujen komposiittien etuna lasikuituvahvistettuihin verrattuna näyttää olevan mekaanisten ominaisuuksien tasalaatuisuus kuormituksen suunnasta riippumatta. Lasikuitukomposiitit olivat selkeästi luonnonkuitukomposiitteja vahvempia ruiskuvalun päävirtaussuunnan vastaisessa suunnassa, mutta ero pieni kuormitettaessa pitkin päävirtaussuuntaa. Viisi tilavuusprosenttia lasikuitua sisältänyt ruiskuvalun päävirtaussuuntaa vasten kohtisuoraan leikattu komposiitti oli vetolujuudeltaan 28,44 MPa, jolloin ero muodostui suureksi esimerkiksi vastaavaan pellavakomposiittiin (21,33 MPa) verrattuna. Päävirtaussuunnan suuntaisissa koesauvoissa sitä vastoin ero oli huomattavasti pienempi; vetolujuudeksi lasikuitukomposiitille saatiin 22,58 MPa ja pellavakomposiitille 20,66 MPa. Sama ilmiö toistui kimmokertoimissa. Tämä voidaan selittää johtuvan luonnonkuitujen lasikuituja pienemmästä jäykkyydestä, mikä puolestaan johtaa heikompaan orientaatioon. Luonnonkuitujen lasikuituja heikompi orientaatio oli myös havaittavissa otetuissa stereomikroskooppikuvissa.

Eräs merkille pantava seikka orientaationsauvoissa oli virtausta vasten kohtisuoraan leikattujen sauvojen paremmat veto-ominaisuudet. Tämä voidaan selittää johtuvan kappaleiden paksun keskikerroksen vaikutuksesta lujuuteen, sillä keskikerroksessa kuidut orientoituvat päävirtaussuuntaa vastaan kohtisuoraan. Orientaatiokoesauvojen vetolujuus heikentyi, mitä enemmän luonnonkuitua lisättiin. Tämä käyttäytyminen oli päinvastaista, kuin standardikoesauvoilla. Tätä voidaan osaltaan selittää kuitukerääntymien taipumuksella esiintyä kappaleiden keskiosassa, sillä orientaatiokoesauvoilla tätä ”keskiosaa” oli leikkauksesta johtuen suhteessa enemmän kuin standardimuottiin valetuilla sauvoilla. Lasikuitukomposiitteja ruiskuvaltaessa vastaavia kuitukerääntymiä ei juuri muodostu, joten lasikuituorientaationsauvojen vetolujuus parani kuitumäärää lisättäessä.

Luonnonkuituja voitaisiin siis mahdollisesti hyödyntää kappaleissa, joissa tärkeää on ominaisuuksien tasalaatuisuus eri kuormitussuunnissa. Hieman paradoksaalisesti tasalaatuisuus on yksi luonnonkuitujen ongelmista siinä mielessä, että esimerkiksi sadonkorjuun aika saattaa vaikuttaa itse kuitujen mekaanisiin ominaisuuksiin. Laadunvalvonnan kehittäminen onkin oleellista kuitujen tuotannossa. Sellu ei ole lujitteena esteettisesti pellavan veroista, mutta mekaanisissa ominaisuuksissa päästään kuitenkin lähes samalle tasolle pellavan kanssa. Sellun sekoittumista voitaisiin mahdollisesti kompaundointivaiheessa parantaa syöttämällä kaksiruuviekstruuderiin mekaanisesti käsitellyn pumpulimaisen sellun asemesta karkeampia käsittelemättömiä selluarkkipaloja. Wollastoniittikomposiittien mekaaniset ominaisuudet vakuuttivat varsinkin vetokokeissa. Tätä tutkimusta voitaisiin jatkaa käyttämällä samaa muottia, mutta tutkimalla myös esimerkiksi wollastoniitin orientaatiokäyttäytymistä ja vertailemalla tuloksia puhtaasta polyeteenistä valmistettuihin orientaatiokoesauvoihin.

LÄHTEET

- [1] Li, H., Sain, M.M. High Stiffness Natural Fiber-Reinforced Hybrid Polypropylene Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* Vol. 42, no. 5. (2003), Taylor & Francis. pp. 853-862.
- [2] CELC, E.s.c. Flax and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry. 1.th ed. 2012, JEC Composites.
- [3] Satyanarayana, K.G., Arizaga, G.G.C. & Wypych, F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—An overview. *Progress in Polymer Science* 34(2009)9, pp. 982-1021.
- [4] Pickering, K.L. Properties and performance of natural-fibre composites. 2008 Woodhead publishing.
- [5] Yan, L., Chouw, N. & Jayaraman, K. Flax fibre and its composites – A review. *Composites Part B: Engineering* 56(2014)0, pp. 296-317.
- [6] Lu, Y., Tighzert, L., Dole, P. & Erre, D. Preparation and properties of starch thermoplastics modified with waterborne polyurethane from renewable resources. *Polymer* 46(2005)23, pp. 9863-9870.
- [7] Cunha, A.M., Liu, Z.Q., Feng, Y., Yi, X.-S. & Bernardo, C.A. Preparation, processing and characterization of biodegradable wood flour/starch-cellulose acetate compounds. *Journal of Materials Science* 36(2001)20, pp. 4903-4909.
- [8] Fried, J.R. *Polymer science & technology*. 2.th ed. 2003, Pearson education.
- [9] HDPE HYA 600 Datasheet, 2012, ExxonMobil.
- [10] 100-CA50 Datasheet, 2008, Ineos.
- [11] Bastioli, C. Properties and applications of Mater-Bi starch-based materials. *Polymer Degradation and Stability* 59(1998)1–3, pp. 263-272.
- [12] What is MATER-BI®. [WWW] [viitattu 16.7.2013]. Saatavissa: <http://www.novamont.com/default.asp?id=507>.
- [13] Lopez, J.P., Vilaseca, F., Barberà, L., Bayer, R.J., Pèlach, M.A. & Mutjé, P. Processing and properties of biodegradable composites based on Mater-Bi® and hemp core fibres. *Resources, Conservation and Recycling* 59(2012)0, pp. 38-42.

- [14] Mater-Bi CF04A Technical Datasheet, 2008, Novamont.
- [15] Yli-Rantala L. Luonnonkuiduilla lujitettujen kestomuovien ominaisuudet. TTY. Elokuu 2012.
- [16] Mohanty, A.K., Misra, M. & Drzal, L.T. (ed.). 2005. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. Taylor & Francis Group. pp. 43-49.
- [17] Li, X., Panigrahi, S., Tabil, L.G. A study on flax fiber reinforced polyethylene biocomposites. (2009).
- [18] Li, X., Tabil, L.G., Panigrahi, S. & Crerar, W.J. The Influence of Fiber Content on Properties of Injection Molded Flax Fiber-HDPE Biocomposites. (2006) pp. 1-10.
- [19] Park, S. Renewable Thermoplastic Composites for Environmentally Friendly and Sustainable Applications. 2013.
- [20] Forest.fi - Sanasto. [WWW] [viitattu 16.7.2013]. Saatavissa: <http://www.forest.fi/smyforest/forest.nsf/allbyid/C450E6F2FEE4D618C2256F3400418576?Opendocument>.
- [21] Hubbe, M. Mini-Encyclopedia of Papermaking Wet-End Chemistry. [WWW] [viitattu 16.7.2013]. Saatavissa: <http://www4.ncsu.edu/~hubbe/KRFT.htm>.
- [22] Beg, M.D.H. & Pickering, K.L. Mechanical performance of Kraft fibre reinforced polypropylene composites: Influence of fibre length, fibre beating and hygrothermal ageing. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 39(2008)11, pp. 1748-1755.
- [23] Chen, J. Investigating mechanical performance and water absorption behavior of organo-nanoclay modified biofiber plastic composites. PhD thesis, 2013. 1-126 p.
- [24] Welcome to the world of Nordkalk Wollastonite. [WWW] [viitattu 16.7.2013]. Saatavissa: <http://www.wollastonite.fi/default.asp?viewID=896>.
- [25] Tolinski, M. Chapter 7 - Overview of Fillers and Fibers. Additives for Polyolefins. Oxford 2009, William Andrew Publishing. pp. 93-119.
- [26] American Federation of Mineralogical Societies . Mohs Scale of Mineral Hardness. [WWW] [viitattu 23.7.2013]. Saatavissa: http://www.amfed.org/t_mohs.htm.

- [27] Ong, C.K., Ray, S., Cooney, R.P., Edmonds, N.R. & Easteal, A.J. Preparation and characterization of composites of polyethylene with polypyrrole-coated wollastonite. *Journal of Applied Polymer Science* 110(2008)1, pp. 632-640.
- [28] Yuan, X., Easteal, A. & Bhattacharyya, D. Influence of surface treatment on hybrid wollastonite-polyethylene composite resins for rotational moulding. *Journal of Materials Science* 43(2008)18, pp. 6057-6063.
- [29] Lechner, C. Additives for natural fibre reinforced plastics - especially for WPC. 2008, Clariant Produkte GmbH. 1-51 p.
- [30] Mohanty, S., Verma, S.K. & Nayak, S.K. Dynamic mechanical and thermal properties of MAPE treated jute/HDPE composites. *Composites Science and Technology* 66(2006)3-4, pp. 538-547.
- [31] Licocene PE MA 4351 Datasheet. 2010, Clariant.
- [32] DS 2200-13P datasheet, 3B.
- [33] Polymeerimateriaalien prosessointi -kurssin pruju.
- [34] Lauttia, I. Käyttöohje Krauss-Maffei KM50. (2004).
- [35] Shalwan, A. & Yousif, B.F. In State of Art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design* 48(2013)0, pp. 14-24.
- [36] Ho, M., Wang, H., Lee, J., Ho, C., Lau, K., Leng, J. & Hui, D. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Composites Part B: Engineering* 43(2012)8, pp. 3549-3562.
- [37] Ashori, A. & Nourbakhsh, A. Reinforced polypropylene composites: Effects of chemical compositions and particle size. *Bioresource technology* 101(2010)7, pp. 2515-2519.
- [38] Bernasconi, A., Davoli, P., Basile, A. & Filippi, A. Effect of fibre orientation on the fatigue behaviour of a short glass fibre reinforced polyamide-6. *International Journal of Fatigue* 29(2007)2, pp. 199-208.
- [39] Ausias, G., Bourmaud, A., Coroller, G. & Baley, C. Study of the fibre morphology stability in polypropylene-flax composites. *Polymer Degradation and Stability* 98(2013)6, pp. 1216-1224.

- [40] Bourmaud, A., Ausias, G., Lebrun, G., Tachon, M.-. & Baley, C. Observation of the structure of a composite polypropylene/flax and damage mechanisms under stress. *Industrial Crops and Products* 43(2013)0, pp. 225-236.
- [41] Alves Fidelis, M.E., Pereira, T.V.C., Gomes, O.d.F.M., de Andrade Silva, F. & Toledo Filho, R.D. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology* 2(2013)2, pp. 149-157.
- [42] Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H. & Sain, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science* 37(2012)11, pp. 1552-1596.
- [43] Azwa, Z.N., Yousif, B.F., Manalo, A.C. & Karunasena, W. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design* 47(2013)0, pp. 424-442.
- [44] Seldén, R., Nyström, B. & Långström, R. UV aging of poly(propylene)/wood-fiber composites. *Polymer Composites* 25(2004)5, pp. 543-553.
- [45] Joseph, P.V., Rabello, M.S., Mattoso, L.H.C., Joseph, K. & Thomas, S. Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Science and Technology* 62(2002)10–11, pp. 1357-1372.
- [46] Abu-Sharkh, B.F. & Hamid, H. Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis. *Polymer Degradation and Stability* 85(2004)3, pp. 967-973.
- [47] Plastics. Determination of tensile properties. Part 1: General principles (ISO 527-1:2012). 2012, pp. 1-23.
- [48] Plastics. Determination of tensile properties. Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics (ISO 527-2:2012). 2012, pp. 1-11.
- [49] Plastics. Determination of charpy impact properties. Part 1: Non-instrumented impact test (ISO 179-1:2010). (2010).

LIITE 1: VALMISTETUT KOMPOSIITIT

Valmistettavien erien määrät grammoina

Muovi + kuitu (til-%)	Orientaatio (g)	Koesauvat (g)	UV-sauvat (g)
PE + pellava 5	700.0		
PE + pellava 15	700.0		
PE + pellava 25	700.0		
PE + sellu 5	700.0	700.0	
PE + sellu 15	700.0	700.0	
PE + sellu 15 + kytkentäaine		700.0	
PE + sellu 25	700.0	700.0	
PE + lasi 5	700.0	700.0	
PE + lasi 15	700.0	700.0	
PE + lasi 25	700.0	700.0	
PE + wollastoniitti 5		700.0	
PE + wollastoniitti 15		700.0	
PE + wollastoniitti 25		700.0	
Mater-Bi + pellava 15		700.0	
Mater-Bi + sellu 15		700.0	
Mater-Bi + wollastoniitti 15		700.0	
PP + pellava 15			1500.0
PP + sellu 15			1500.0
PP + lasi 15			1500.0

Alla olevissa taulukoissa tilavuusosuudet on muutettu massaprosenteiksi ja näiden perusteella laskettu kuhunkin kompaundiin tarvittava kuidun ja muovin määrä.

Orientaatiotutkimusta varten tehtäviin kompaundeihin vaadittavien materiaalien määrät ja tilavuusosuuksista lasketut kuitujen massaosuudet

Muovi + kuitu (til-%)	Kuidun m.os.	Kuidun massa (g)	Muovin massa (g)
PE + pellava 5	0.0741	51.9	648.1
PE + pellava 15	0.2115	148.1	552.0
PE + pellava 25	0.3363	235.4	464.6
PE + sellu 5	0.0741	51.9	648.1
PE + sellu 15	0.2115	148.1	552.0
PE + sellu 25	0.3363	235.4	464.6
PE + lasi 5	0.1212	84.8	615.2
PE + lasi 15	0.3162	221.3	478.7
PE + lasi 25	0.4662	326.3	373.7

Standardikoesauvoja varten tehtäviin kompaundeihin vaadittavien materiaalien määrät ja tilavuusosuuksista lasketut kuitujen massaosuudet.

Muovi + kuitu (til-%)	Kuidun m.os.	Kuidun massa (g)	Kytkentäaineen m-%	Kytkentäaineen massa (g)	Muovin massa (g)
PE + sellu 5	0.0741	51.9			648.1
PE + sellu 15	0.2115	148.1			552.0
PE + sellu 15+kytk.	0.2115	148.1	0.0300	21.0	531.0
PE + sellu 25	0.3363	235.4			464.6
PE + lasi 5	0.1212	84.8			615.2
PE + lasi 15	0.3162	221.3			478.7
PE + lasi 25	0.4662	326.3			373.7
PE + wollastoniitti 5	0.1396	97.7			602.3
PE + wollastoniitti 15	0.3523	246.6			453.4
PE + wollastoniitti 25	0.5067	354.7			345.3
Mater-Bi + pell. 15	0.2276	159.3			540.7
Mater-Bi + sellu 15	0.2276	159.3			540.7
Mater-Bi + woll. 15	0.2967	207.7			492.3

UV-koesauvoja varten tehtäviin kompaundeihin vaadittavien materiaalien määrät ja tilavuusosuuksista lasketut kuitujen massaosuudet

Muovi + kuitu (til-%)	Kuidun m.osuus	Kuidun massa (g)	Muovin massa (g)
PP + pellava 15	0.2214	332.1	1167.9
PP + sellu 15	0.2214	332.1	1167.9
PP + lasi 15	0.3289	493.4	1006.7

LIITE 2: RUISKUVALUPARAMETRIT

Standardikoesauvojen ruiskuvalupöytäkirja

sarjan nimike:	luonnonkuitu ruiskuvalut, koesauvat			
ruiskuvalukone:		Krauss-Maffei		
aika:		15/11/2013	työnsuorittaja: JH	
paikka:		Poly		
muottitiedot:		2-pesä Campus		
materiaali:		luonnonkuitu+PE/PP/Mater-Bi		
matriisi:		PE	Mater-Bi	PP
ruiskutusnopeus:	(mm/s)	100	100	100
ruiskutusaine	(bar)	taulukoitettu erikseen*		
paineenvaihto	hydr.(bar)			
	matka(mm)	13	15	13
jälkipaine	(bar)	600	550	700
jäähdytysaika	(s)	20	15	20
jälkipaineaika	(s)	5	6	6
annostusmatka	(mm)	82+4	86	82+4
annostusnopeus	(rpm)	120	100	120
vastapaine	(bar)	30	30	30
tyyny(mitattu)	(mm)	4	8	4
sylinterilämmöt	1.(°C)	190	140	200
	2.	180	135	195
	3.	175	130	190
	4.	170	125	185
muottilämpötilat	etumuotti	40	40	40
	takamuotti	40	40	40
huomautukset:		Materiaaleja kuivattu Somoksessa 60 °C tarpeen mukaan 24-48 h		

Standardikoesauvojen ruiskuvalupöytäkirja, ruiskutuspainet*

Materiaali	Ruiskutuspaine (bar)
PE+sellu 5%	1000
PE+sellu 15%	1100
PE+sellu 15%+MAPE	1070
PE+sellu 25%	1260
PE+lasi 5%	1020
PE+lasi 15%	1050
PE+lasi 25%	1200
PE+wollastoniitti 5%	980
PE+wollastoniitti 15%	1070
PE+wollastoniitti 25%	1240
Mater-bi+pellava 15%	1420
Mater-bi+sellu 15%	1600
Mater-bi+wollastoniitti 15 %	1200
PP+pellava 15%	1420
PP+sellu 15%	1480
PP+lasi 15%	1340

Orientaatiokoesauvojen ruiskuvalupöytäkirja

sarjan nimike:	luonnonkuitu, orientaatiokappaleet		
Ruiskuvalukone:		Krauss-Maffei	
aika:		15/11/2013	työnsuorittaja: JH
paikka:		Poly	
muottitiedot:		orientaatiomuotti	
materiaali:		luonnonkuitu+PE	
ruiskutusnopeus:	(mm/s)	90	
ruiskutusaine	(bar)	taulukoituu erikseen**	
paineenvaihto	hydr.(bar)		
	matka(mm)	10	
jälkipaine	(bar)	700	
jäähtytisaika	(s)	20	
jälkipaineaika	(s)	6	
annostusmatka	(mm)	92+4	
annostusnopeus	(rpm)	150	
vastapaine	(bar)	30	
tyyny(mitattu)	(mm)	4	
sylinterilämmöt	1.(°C)	190	
	2.	185	
	3.	180	
	4.	175	
muottilämpötilat	etumuotti	40	
	takamuotti	40	

huomautukset:	Materiaaleja kuivattu Somoksessa 60 °C 24 H
----------------------	--

Orientaatiokoesauvojen ruiskuvalupöytäkirja, ruiskutuspainet**

Materiaali	Ruiskutusaine (bar)
PE+pellava 5%	1280
PE+pellava 15%	1360
PE+pellava 25%	1420
PE+sellu 5%	1320
PE+sellu 15%	1380
PE+sellu 25%	1480
PE+lasi 5%	1240
PE+lasi 15%	1320
PE+lasi 25%	1440

LIITE 3: VETOKOKEIDEN TULOKSIA

Standardikoesauvojen vetokoetulokset

Materiaali	Vetolujuus (MPa)	Vetolujuus keskihajonta (MPa)	Kimmokerroin (MPa)	Kimmokerroin keskihajonta (MPa)
PE-HD	21,02	0,46	554,30	71,17
PE-HD + wollastoniitti 5%	22,73	0,10	975,87	228,78
PE-HD + wollastoniitti 15%	27,61	0,79	1703,40	340,45
PE-HD + wollastoniitti 25%	31,50	0,60	2484,06	506,42
PE-HD + sellu 5%	22,26	0,25	615,11	137,16
PE-HD + sellu 15%	23,03	0,51	1182,28	222,45
PE-HD + sellu 15% + MAPE	27,70	0,38	1349,76	178,97
PE-HD + sellu 25%	24,05	0,61	1554,07	107,13
PE-HD + pellava 6,8%	23,30	0,15	1213,35	75,39
PE-HD + pellava 14,1%	24,21	0,26	1375,35	298,83
PE-HD + pellava 14,1% + MAPE	30,37	0,25	1636,80	271,63
PE-HD + pellava 22%	24,94	0,17	2323,57	373,02
PE-HD + lasi 5%	29,92	0,58	2015,71	199,75
PE-HD + lasi 15%	49,68	0,71	2882,85	863,89
PE-HD + lasi 25%	54,39	0,77	4317,76	1203,10
PP	34,05	0,25	1478,87	58,22
PP + sellu 15%	31,80	0,30	2217,64	172,81
PP + pellava 15%	31,81	0,92	2588,76	275,79
PP + lasi 15%	51,64	0,89	5692,25	745,10
Mater-Bi	11,52	0,17	162,73	22,24
Mater-Bi + wollastoniitti 15%	14,37	0,08	473,73	53,28
Mater-Bi + sellu 15%	19,43	0,79	685,72	165,68
Mater-Bi + pellava 15%	18,38	0,20	686,62	97,96

Orientaatiokoesauvojen vetokoetulokset (1/2)

Pellava B							
Kuitupitoisuus	5 til-%		15 til-%		25 til-%		
	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)	
	20.05	555.54	19.64	780.69	16.80	888.75	
	20.05	562.28	20.72	822.37	16.77	916.46	
	20.00	556.50	19.49	757.61	16.03	869.51	
	20.67	573.83	18.12	740.11	16.60	902.94	
	20.23	591.64	18.61	755.05	14.90	667.81	
	21.09	586.51	18.47	770.13	17.49	970.94	
	20.79	588.58	19.04	782.53	15.30	844.98	
	21.11	600.69	20.28	804.72	16.17	871.38	
	21.99	635.45	18.64	764.19	17.93	946.51	
Keskiarvo	20.66	583.44	19.22	775.27	16.44	875.47	
Keskihajonta	0.67	25.37	0.88	25.67	0.97	87.23	
Pellava A							
Kuitupitoisuus	5 til-%		15 til-%		25 til-%		
	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)	
	24.67	497.56	21.39	824.36	20.13	998.45	
	18.72	667.48	22.55	850.32	19.03	954.49	
	19.82	648.40	21.61	795.68	19.46	981.55	
	21.84	617.24	22.50	862.38	20.21	1029.91	
	21.16	591.35	22.38	852.38	19.51	1025.59	
	21.52	593.40	21.76	845.90	20.37	1086.76	
	21.16	602.91	21.58	870.22	20.59	1074.16	
	21.91	642.38	21.67	841.84	19.97	1062.22	
	21.14	599.18	21.41	845.71	19.26	1030.58	
Keskiarvo	21.33	606.65	21.87	843.20	19.83	1027.08	
Keskihajonta	1.62	49.00	0.47	21.97	0.54	43.59	
Sellu B							
Kuitupitoisuus	5 til-%		15 til-%		25 til-%		
	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)	
	19.68	500.57	16.29	648.80	17.61	804.08	
	19.76	529.09	16.35	620.64	14.49	748.68	
	19.51	530.74	16.68	668.59	16.12	814.08	
	20.04	547.74	15.29	622.67	15.94	804.14	
	19.96	531.74	16.25	646.95	16.93	786.39	
	19.89	529.02	16.76	654.13	17.36	793.51	
	20.17	525.40	17.27	696.04	15.56	803.32	
	19.77	525.32	18.28	710.15	16.23	794.88	
	20.72	526.16	18.96	699.20	16.71	792.50	
Keskiarvo	19.94	527.31	16.90	663.02	16.33	793.51	
Keskihajonta	0.35	12.14	1.12	32.81	0.96	18.73	

Orientaatiokoesauvojen vetokoetulokset (2/2)

Sellu A							
Kuitupitoisuus	5 til-%		15 til-%		25 til-%		
	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)	
	22.51	592.64	19.50	677.35	20.25	850.50	
	22.68	614.23	19.02	692.75	19.96	833.37	
	22.19	573.82	19.71	698.53	22.47	877.69	
	22.13	581.51	20.24	706.37	21.98	912.08	
	20.91	545.70	20.07	684.00	20.64	875.07	
	20.58	518.31	20.44	682.02	18.05	849.08	
	21.71	550.87	20.55	751.20	20.92	900.47	
	21.97	545.18	21.27	766.83	19.63	864.38	
	21.21	528.45	20.20	698.75	18.89	856.15	
Keskiarvo	21.77	561.19	20.11	706.42	20.31	868.75	
Keskihajonta	0.72	31.40	0.65	31.44	1.40	25.38	
Lasi B							
Kuitupitoisuus	5 til-%		15 til-%		25 til-%		
	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)	
	22.59	641.39	28.73	1166.06	30.69	1375.72	
	22.36	646.74	27.68	1174.16	29.25	1339.63	
	22.54	657.47	28.79	1137.38	31.96	1430.13	
	22.03	643.34	27.62	1129.13	29.96	1310.02	
	22.13	635.70	28.15	1180.39	29.55	1443.17	
	22.08	650.38	31.52	1202.23	33.42	1568.48	
	23.47	687.45			32.46	1436.44	
	23.42	685.74					
Keskiarvo	22.58	656.02	28.75	1164.89	31.04	1414.80	
Keskihajonta	0.57	19.92	1.44	27.41	1.59	84.93	
Lasi A							
Kuitupitoisuus	5 til-%		15 til-%		25 til-%		
	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)	
	28.67	843.96	36.02	1324.66	36.39	1496.12	
	28.59	835.30	34.55	1333.27	31.39	1334.62	
	28.80	804.82	33.50	1321.28	35.76	1459.39	
	28.83	805.54	35.97	1394.41	31.99	1429.79	
	28.39	801.84	41.03	1506.60	33.01	1449.10	
	28.17	773.52	36.59	1390.77	33.19	1427.65	
	28.12	747.84	35.32	1354.40			
	28.54	781.27					
	27.88	763.97					
Keskiarvo	28.44	795.34	36.14	1375.05	33.62	1432.78	
Keskihajonta	0.33	31.84	2.39	65.23	2.02	54.14	

LIITE 4: ISKUKOKEIDEN TULOKSIA

Polyeteeni		Leveys (mm)	Paksuus (mm)	Voima (J)	kJ/m^2
PE + lasi 5%	1	7.81	3.66	0.249	8.71098
	2	7.64	3.65	0.251	9.00093
	3	7.73	3.65	0.251	8.89613
	4	7.80	3.66	0.237	8.30181
	5	7.63	3.66	0.246	8.80906
	Keskiarvo				
	Keskihajonta				0.26927
PE + lasi 15%	1	7.84	3.68	0.261	9.04642
	2	7.92	3.67	0.273	9.39229
	3	7.81	3.64	0.273	9.60307
	4	7.79	3.65	0.263	9.24965
	5	7.74	3.67	0.279	9.82194
	6	7.95	3.69	0.273	9.30613
	Keskiarvo				9.40325
	Keskihajonta				0.27412
PE + lasi 25%	1	7.76	3.68	0.263	9.20972
	2	7.83	3.66	0.242	8.44447
	3	7.94	3.68	0.263	9.00093
	4	7.84	3.69	0.246	8.50340
	5	7.94	3.68	0.254	8.69291
	6	7.89	3.65	0.267	9.27132
	Keskiarvo				8.85379
	Keskihajonta				0.35745
PE + wollastoniitti 5%	1	7.84	3.69	0.254	8.77993
	2	7.81	3.71	0.242	8.35200
	3	7.79	3.69	0.237	8.24488
	4	7.95	3.68	0.263	8.98961
	5	7.75	3.7	0.239	8.33479
	6	7.82	3.7	0.239	8.26018
	Keskiarvo				8.49357
	Keskihajonta				0.31293
PE + wollastoniitti 15%	1	7.73	3.66	0.171	6.04415
	2	7.95	3.67	0.139	4.76411
	3	7.83	3.71	0.153	5.26691
	4	7.81	3.7	0.16	5.53691
	5	7.94	3.68	0.156	5.33896
	6	7.84	3.68	0.148	5.12977
	Keskiarvo				5.34680
	Keskihajonta				0.42791
PE + wollastoniitti 25%	1	7.95	3.69	0.139	4.73829
	2	7.77	3.69	0.131	4.56903
	3	7.77	3.7	0.139	4.83495
	4	7.91	3.7	0.137	4.68104
	5	7.87	3.64	0.148	5.16637
	6	7.95	3.68	0.142	4.85371
	Keskiarvo				4.80723
	Keskihajonta				0.20461

PE + sellu 5%	1	7.9	3.63	0.312	10.87980
	2	7.87	3.68	0.316	10.91100
	3	7.88	3.6	0.3	10.57530
	4	7.82	3.61	0.303	10.73319
	5	7.92	3.69	0.307	10.50478
	6	7.81	3.7	0.311	10.76236
	Keskiarvo				10.72774
	Keskihajonta				0.16179
PE + sellu 15%	1	7.83	3.67	0.23	8.00387
	2	7.92	3.63	0.251	8.73056
	3	7.86	3.67	0.237	8.21599
	4	7.88	3.66	0.249	8.63360
	5	7.86	3.67	0.242	8.38932
	6	7.93	3.68	0.251	8.60107
	Keskiarvo				8.42907
	Keskihajonta				0.27932
PE + sellu 15% + MAPE	1	7.95	3.63	0.161	5.57895
	2	7.85	3.62	0.16	5.63043
	3	7.82	3.64	0.171	6.00742
	4	7.88	3.66	0.161	5.58237
	5	7.86	3.63	0.16	5.60778
	6	7.86	3.66	0.16	5.56181
	Keskiarvo				5.66146
	Keskihajonta				0.17119
PE + sellu 25%	1	7.92	3.68	0.176	6.03865
	2	7.95	3.65	0.199	6.85793
	3	7.95	3.66	0.207	7.11414
	4	7.86	3.65	0.187	6.51818
	5	7.93	3.67	0.184	6.32235
	6	7.95	3.67	0.194	6.64919
	Keskiarvo				6.58340
	Keskihajonta				0.38224

Materbi					
Mater-bi + wollastoniitt	1	7.64	3.76	0.341	11.87061
	2	7.45	3.81	0.354	12.47160
	3	7.56	3.78	0.345	12.07273
	4	7.46	3.78	0.316	11.20615
	5	7.8	3.78	0.316	10.71768
	6	7.68	3.8	0.349	11.95861
	Keskiarvo				11.71623
	Keskihajonta				0.63836
Mater-bi + pellava	1	7.86	3.71	0.295	10.11639
	2	7.57	3.73	0.32	11.33301
	3	7.61	3.72	0.291	10.27934
	4	7.65	3.73	0.295	10.33836
	5	7.5	3.72	0.311	11.14695
	6	7.71	3.72	0.303	10.56441
	Keskiarvo				10.62975
	Keskihajonta				0.49751
Mater-bi + sellu	1	7.86	3.71	0.27	9.25907
	2	7.95	3.71	0.267	9.05254
	3	7.89	3.71	0.279	9.53133
	4	7.62	3.71	0.27	9.55069
	5	7.87	3.72	0.279	9.52986
	6	7.82	3.71	0.275	9.47877
	Keskiarvo				9.40038
	Keskihajonta				0.20180

Polypropeeni						
Puhdas PP	1	7.63	3.75	0.067	2.34163	
	2	7.45	3.8	0.073	2.57859	
	3	7.87	3.71	0.263	9.00756	
	4	7.79	3.7	0.057	1.97759	
	5	7.78	3.72	0.055	1.90038	
	Keskiarvo				3.56115	
	Keskihajonta				3.05703	
PP + lasi	1	7.76	3.67	0.123	4.31894	
	2	7.95	3.67	0.123	4.21572	
	3	7.9	3.7	0.12	4.10537	
	4	7.92	3.69	0.126	4.31141	
	5	7.91	3.7	0.123	4.20269	
	Keskiarvo				4.23083	
	Keskihajonta				0.08806	
PP + pellava	1	7.76	3.7	0.115	4.00529	
	2	7.65	3.74	0.12	4.19419	
	3	7.77	3.72	0.128	4.42839	
	4	7.88	3.75	0.12	4.06091	
	5	7.85	3.74	0.112	3.81484	
	Keskiarvo				4.10073	
	Keskihajonta				0.22832	
PP + sellu	1	7.86	3.68	0.115	3.97583	
	2	7.94	3.67	0.115	3.94649	
	3	7.85	3.72	0.123	4.21204	
	4	7.7	3.73	0.115	4.00404	
	("palanut" näyte)	5	7.77	3.63	0.094	3.33273
	Keskiarvo				3.89423	
	Keskihajonta				0.33081	

LIITE 5: KOVUUS- JA TIHEYSKOKEIDEN TULOKSIA

13.9.2013 IN		Puhdas PE-HD	PE-HD + woll 5litil%	PE-HD + woll 15litil%	PE-HD + woll 25litil%	PE-HD + sellu 5litil%	PE-HD + sellu 15litil%	PE-HD + sellu 25litil%	PE-HD + sellu 15litil% + MAPE	Mater-bi + woll 15litil%	Mater-bi + sellu 15litil%	Mater-bi + pellava 15litil%	
Tiheys	1.	0.948	1.046	1.236	1.415	0.973	1.030	1.080	1.026	1.463	1.289	1.288	
	2.	0.948	1.044	1.236	1.414	0.980	1.027	1.082	1.030	1.464	1.288	1.293	
	3.	0.948	1.042	1.241	1.414	0.976	1.027	1.079	1.003	1.454	1.291	1.291	
Veden lämpötila 22C	Keskianvo	0.948	1.044	1.238	1.414	0.976	1.028	1.080	1.020	1.460	1.289	1.291	
	Keskinaonta	0.000	0.002	0.003	0.001	0.004	0.002	0.002	0.015	0.006	0.002	0.003	
	1.	68	70	72	77	68	67	69	72	57	59	61	
	2.	68	69	72	77	69	70	73	72	58	58	59	
	3.	66	70	71	77	68	74	66	73	57	57	60	
Kovuus 51%	1.	68	71	71	75	70	69	71	71	58	58	61	
	2.	69	71	71	75	70	69	71	71	58	58	61	
	3.	67.8	69.6	71.8	76.2	68.6	70.2	70	71.8	57.6	58	60	
	4.	1.095	1.140	0.837	1.095	0.894	2.588	2.646	0.837	0.548	0.707	1.000	
	5.	63	65	68	72	64	62	65	68	54	57	57	
Kovuus 15 sekuntia	1.	63	65	68	72	64	62	65	68	54	57	57	
	2.	62	64	67	72	64	66	67	68	53	56	54	
	3.	60	65	67	72	62	69	62	66	54	54	56	
	4.	61	63	68	70	62	66	67	67	54	55	55	
	5.	63	65	68	70	65	65	65	69	54	55	55	
Kovuus 51%	Keskianvo	61.8	64.4	67.6	71.2	63.4	65.6	65.2	67.8	53.8	55.4	55.4	
	Keskinaonta	1.304	0.894	0.548	1.095	1.342	2.510	2.049	1.095	0.447	1.140	1.140	
18.10.2013 IN	Tiheys	5%	15%	25%	41.1.2013 IN	Puhdas PP	PP + lasi	PP + sellu	PP + pellava				
		1.026	1.182	1.343	Tiheys	0.908	1.149	0.989	0.981				
		1.027	1.183	1.341		0.907	1.148	0.995	0.998				
		1.027	1.183	1.339		0.907	1.146	0.992	0.974				
		1.027	1.183	1.341		0.907	1.148	0.992	0.984				
	Veden lämpötila 23C	Kovuus 0 sekuntia	0.001	0.001	0.002	Veden lämpötila	0.001	0.002	0.003	0.012			
		70	72	78	Kovuus 0 sekun	74	77	77	78				
		67	73	78	Shore D	71	77	79	78				
		72	72	78		73	77	74	79				
		70	71	78		75	78	77	77				
Kovuus 34%	72	73	75		74	78	77	77					
	70.2	72.2	77.4	kosteus 25%	73.4	77.4	76.8	77.8					
	2.049	0.837	1.342	lämpötila 23C	1.517	0.548	1.789	0.837					
	65	69	73	Kovuus 15 sekun	69	72	72	71					
	63	68	74	Shore D	66	73	73	72					
Kovuus 15 sekuntia	67	68	73		67	74	68	72					
	65	67	74		70	74	71	70					
	66	70	71		69	72	72	71					
	65.2	68.4	73	kosteus 25%	68.2	72.8	71.2	71.2					
	1.483	1.140	1.222	lämpötila 23C	1.643	0.837	1.924	0.837					