



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LAURA YLI-RANTALA  
BIOHAJOAVASTA MUOVISTA JA LUONNONKUIDUSTA VALMIS-  
TETTU KOMPOSIITTI  
Diplomityö

Tarkastajat: professori Pentti Järvelä  
ja tutkija Päivi Lehtiniemi-Perttu  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-  
voston kokouksessa 9. huhtikuuta  
2014

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

**YLI-RANTALA, LAURA:** Biohajoavasta muovista ja luonnonkuidusta valmistettu komposiitti

Diplomityö, 88 sivua, 5 liitesivua

Lokakuu 2014

Pääaine: Tekniset polymeerimateriaalit

Tarkastajat: professori Pentti Järvelä ja tutkija Päivi Lehtiniemi-Perttu

Avainsanat: luonnonkuitukomposiitti, kuitukangas, pellava, biomuovi, tärkkelys, kuidutus, puristusmuovaus

Luonnonkuidut ovat viime vuosina herättäneet kiinnostusta mahdollisina komposiittien lujitemateriaaleina ympäristöystävällisyytensä, keveytensä ja edullisuutensa vuoksi. Kun luonnonkuidut yhdistetään biohajoavaan muovimatriisiin, voidaan aikaansaada täysin biohajoava komposiitti. Ympäristölainsäädännön kiristyessä ja uusiutumattomien raaka-aineiden ehtyessä tämänkaltaisten materiaalien kehitys voi saada yhä suuremman jalansijan tulevaisuuden sovelluksissa. Tässä työssä tarkastellaan komposiittirakennetta, joka koostuu biohajoavasta tärkkelyspohjaisesta muovista ja pellavakuidusta. Työn tavoitteena on selvittää tärkkelyspohjaisen biomuovin kuidunmuodostuskyky, valmistaa biomuovikuiduista ja pellavakuiduista kuitukankaita, ja puristusmuovata nämä kuitukankaat komposiittilevyiksi. Työssä tutkitaan kuitupitoisuuden vaikutusta kuitukangaskomposiittien veto-, taivutus- ja iskulujuusominaisuuksiin. Myös dynaamista mekaanista analyysia sekä optista mikroskopiaa ja pyyhkäisyelektronimikroskopiaa käytetään komposiittien karakterisoinnissa. Tulosten pohjalta pohditaan mahdollisia sovelluskohteita tämänkaltaisille kuitukangaskomposiiteille.

Tärkkelyspohjaisesta biomuovista valmistettiin onnistuneesti kuitua sulakuidutusmenetelmällä. Biomuovikuidusta ja pellavakuidusta karstattiin ja neulattiin kuitukankaita, jotka puristusmuovattiin jälkeinpäin onnistuneesti komposiiteiksi. Pellavakuitupitoisuudet komposiiteissa olivat noin 30, 50 ja 70 paino-%. Puhtaasta biomuovista koostuvan kuitukankaan ja levyn valmistus ei sen sijaan onnistunut, koska puhdas biomuovikuitu tukki karstauskoneen.

Korkeimmat veto- ja taivutusominaisuudet saavutettiin 30 % pellavaa sisältäneillä komposiiteilla. Korkeammilla kuitupitoisuuksilla komposiittien taivutus- ja vetolujuus sekä jäykkyysarvot selkeästi heikkenivät. Kuitupitoisuuden vaikutus iskulujuuteen oli vähemmän selkeä, koska kaikki koekappaleet eivät murtuneet testissä. Syy heikkoihin mekaanisiin ominaisuuksiin korkeammilla kuitupitoisuuksilla oli liian alhainen muovipitoisuus ja siitä seurannut kuitujen riittämätön kostuminen matriisilla. Mikroskopian perusteella voitiin todeta, että pellavapitoisuuksilla 50 % ja erityisesti 70 % komposiittien rakenteessa oli lukuisia huokosia ja matriisittomia alueita. Myös epäjärjestäytynyt kuituorientaatio ja pellavakuitujen seassa olevat epäpuhtaudet vaikuttivat todennäköisesti negatiivisesti komposiittien lujuusarvoihin.

Komposiittien mekaanisia ominaisuuksia voitaisiin mahdollisesti parantaa käyttämällä puhtaampaa pellavakuitumassaa ja optimoimalla sekä karstaus- että puristusmuovausprosesseja. Potentiaalisia sovelluskohteita tämänkaltaisille kuitukangaskomposiiteille voivat olla esimerkiksi autojen sisäosien kuormaa kantamattomat komponentit, äänenvaimennuslevyt ja puutarhojen juuriesteet. Komposiittien soveltavuudesta näihin käyttökohteisiin tarvitaan kuitenkin vielä lisätutkimuksia koskien komposiittilevyjen äänieristysominaisuuksia ja biohajoavuutta.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Materials Engineering

**YLI-RANTALA, LAURA:** Composite made from biodegradable plastic and natural fibres

Master of Science Thesis, 88 pages, 5 Appendix pages

October 2014

Major: Technical polymer materials

Examiners: Professor Pentti Järvelä, Researcher Päivi Lehtiniemi-Perttu

Keywords: natural fibre composite, nonwoven, flax, bioplastic, starch, fibre spinning, compression moulding

Lately, natural fibres have attracted attention as potential reinforcement materials in composites because of their environment-friendly nature, lightness and affordability. A fully biodegradable composite can be made by adding natural fibres into a biodegradable plastic matrix. The development of these kinds of materials may increase in importance in future applications as environmental legislation tightens and non-renewable material sources dry up. In this thesis a composite structure made from biodegradable starch-based plastic and flax fibres is studied. The purpose of the work is to find out if starch-based bioplastic can be formed into fibres, to fabricate nonwovens that consist of bioplastic fibres and flax fibres and to compression mould these nonwovens into composite sheets. The effect of fibre content on the tensile, flexure and impact properties of the nonwoven composites is analysed. Dynamic mechanical analysis, optical microscopy and scanning electronic microscopy are also utilized in composite characterization. Based on the results the potential applications of the nonwoven composites are considered.

The starch-based plastic was successfully made into fibres by a melt spinning process. The bioplastic fibres and flax fibres were carded and needle-punched into nonwovens which were subsequently successfully compression moulded into composites. The flax fibre contents in the composites were about 30, 50 and 70 weight-%. However, the fabrication of nonwovens and sheets consisting of pure bioplastic fibre was not successful, because the pure bioplastic fibre caused an obstruction in the carding machine.

The tensile and flexural properties were found to be the highest with the composites with 30 % flax. With higher fibre contents the tensile and flexural strengths and moduli values clearly decreased. The effect of fibre content on impact strength was more unclear, because not all of the samples broke during the test. The reason for the poor mechanical properties with higher fibre contents was the insufficient amount of plastic and therefore inadequate wetting of the flax fibres with the matrix. With microscopy it could be observed that with fibre contents of 50 % and especially of 70 %, there existed a lot of voids and matrix-free areas in the structure of the composites. Random fibre orientation and impurities within the flax fibre mass most likely also had a negative effect on the composites' strength values.

The mechanical properties of the composites could perhaps be increased by using a more pure flax fibre mass and optimizing both the carding and the compression moulding processes. The potential applications of this kind of nonwoven composites could be for example non-bearing car indoor components, sound-absorbing panels and root barriers in gardens. However, more information is still needed regarding the sound-absorbing properties and biodegradability of the composites to confirm their suitability for these applications.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Materiaaliopin laitoksen LUOMA-hankkeelle (Luonnonmateriaalien mahdollisuudet polymeerimatriiseissa) kevään ja kesän 2014 aikana.

Työn ohjaajina toimivat tutkija Päivi Lehtiniemi-Perttu sekä professori Pentti Järvelä. Haluan kiittää heitä työn aikana saamistani ohjeista ja neuvoista. Pentille kiitokset mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta ja Päiville kiitokset avusta liittyen työn kokeellisen osan suunnitteluun ja läpiviemiseen. Kiitokset kuuluvat myös tohtorikoulutettava Ville Myllärille kapillaarireometritestauksessa avustamisesta, yliopistonlehtori Marja Rissaselle neuvoista koskien muovikuidun ja kuitukankaan valmistusta, erikoislaboratoriomestari Esa Leppäselle ja käyttöinsinööri Tommi Lehtiselle muovikuidun ja kuitukankaan valmistuksen mahdollistamisesta sekä käyttöinsinööri Maija Järventaustalle, käyttöinsinööri Sinikka Pohjoselle ja tutkimusapulainen Pekka Laurikaiselle testauksissa avustamisesta. Kiitokset myös kaikille muillekin, jotka ovat antaneet neuvoja työhöni liittyen ja siten edesauttaneet saamaan työni valmiiksi.

Lopuksi haluan esittää kiitokset ystäville, perheelle ja erityisesti Matiakselle tuesta ja kannustuksesta sekä diplomityön tekemisen että koko opiskelun aikana.

Tampereella 14. syyskuuta,

Laura Yli-Rantala

# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Luonnonkuidut .....	3
	2.1 Luonnonkuitujen jaottelu .....	3
	2.2 Kuituesimerkkejä .....	4
	2.2.1 Pellava.....	4
	2.2.2 Hamppu.....	6
	2.2.3 Puukuidut.....	6
	2.3 Luonnonkuitujen edut ja heikkoudet.....	7
3	Biomuovimatriisi .....	9
	3.1 Termien määritelmät .....	10
	3.2 Biohajoavat muovit .....	11
	3.2.1 Polylaktidi.....	12
	3.2.2 Tärkkelys .....	14
	3.2.3 Polyhydroksialkanaaatit.....	15
4	Biokomposiitit.....	17
	4.1 Rakenne ja adheesio .....	17
	4.2 Kuitukangaskomposiitit .....	19
	4.3 Ominaisuudet .....	20
	4.3.1 Mekaaniset ominaisuudet .....	20
	4.3.2 Pitkäaikaisominaisuudet .....	23
	4.3.3 Eristysominaisuudet.....	25
	4.3.4 Ympäristöystävällisyys .....	26
	4.4 Sovellusesimerkkejä.....	27
	4.4.1 Autoteollisuus .....	28
	4.4.2 Rakennusteollisuus .....	29
	4.4.3 Täysin biopohjaisten komposiittien sovellukset.....	30
5	Muovien kuidutus .....	33
	5.1 Muovien kuidutettavuus.....	33
	5.2 Biohajoavat muovikuidut.....	33
	5.3 Kuidutusmenetelmät .....	35
	5.3.1 Sulakuidutus.....	35
	5.3.2 Kuivakuidutus.....	36
	5.3.3 Märkäkuidutus .....	37
6	Biokomposiittien prosessointimenetelmät .....	38
	6.1 Puristusmuovaus eli ahtopuristus.....	38
	6.1.1 Kuitukankaiden valmistus.....	38
	6.1.2 Kuitukankaiden puristusmuovaus.....	39
	6.1.3 Puristusmuovauksen parametrit.....	40
	6.2 Ekstruusio.....	42
	6.3 Ruiskuvalu .....	43

6.4	Prosessoinnin ongelmia.....	44
7	Komposiittien valmistaminen .....	45
7.1	Materiaalit .....	45
7.2	Prosessointimenetelmät.....	45
7.2.1	Muovin kuidunmuodostuksen testaus kapillaarireometrillä.....	46
7.2.2	Muovin sulakuidutus.....	47
7.2.3	Kuitukankaiden valmistus.....	51
7.2.4	Kuitukankaiden puristusmuovaus.....	53
7.3	Näytteenvalmistus .....	56
8	Testausmenetelmät.....	58
8.1	Mekaaniset testit.....	58
8.1.1	Vetokoe.....	58
8.1.2	Taivutuskoe.....	58
8.1.3	Iskukoe.....	59
8.2	Dynaaminen mekaaninen analyysi (DMA).....	59
8.3	Mikroskooppinen tarkastelu.....	59
8.3.1	Pyyhkäisyelektronimikroskopia (SEM).....	59
8.3.2	Optinen mikroskopia.....	59
9	Tulosten tarkastelu .....	60
9.1	Mekaanisten testien tulokset .....	60
9.1.1	Vetokoe.....	60
9.1.2	Taivutuskoe.....	63
9.1.3	Iskukoe.....	65
9.2	DMA-testien tulokset.....	67
9.3	Mikroskooppinen tarkastelu.....	70
9.3.1	SEM-kuvat .....	70
9.3.2	Optinen mikroskopia.....	74
9.4	Tuloksiin vaikuttavat tekijät.....	76
9.5	Komposiittien potentiaaliset sovelluskohteet.....	76
10	Johtopäätökset.....	78
	Lähteet.....	80
	Liite 1: Sulakuidutusraportti .....	89
	Liite 2: Komposiittien vetokokeiden tuloksia .....	90
	Liite 3: Taivutuskokeiden tuloksia.....	91
	Liite 4: Iskukokeiden tuloksia.....	92

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

-CH <sub>3</sub>	Metyyliryhmä
$a_c$	Charpy-iskulujuus
$dtex$	Lineaarinen massatiheys eli kuidun massa grammoina 10 000 metriä kohti
$\varepsilon_r$	Murtovenymä
$E'$	Varastomuoduli
$E''$	Häviömoduuli
$E_f$	Taivutusmoduuli
$E_t$	Youngin moduuli
$\sigma_f$	Taivutuslujuus
$\sigma_t$	Vetomurtolujuus
$T_g$	Lasittumislämpötila
$\tan \delta$	Vaimennuskerroin, kuvaa materiaalin viskoosin ja elastisen käyttäytymisen suhdetta
CA	Selluloosa-asettaatti
CD	Poikkisuuntaan
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
CO <sub>2</sub> -neutraali	Hiilidioksidineutraali materiaali ei tuota ylimääräistä hiili- dioksidia ilmakehään palaessaan tai kompostoituaessaan
DMA / DMTA	Dynamic Mechanical (Thermal) Analysis eli dynaaminen mekaaninen (terminen) analyysi
EU	Euroopan Unioni
MD	Konesuuntaan eli karstaussuuntaan
N/A	Tulos ei saatavilla
PBS	Polybuteenisukkinaatti
PCL	Polykaprolaktoni
PDLA	Poly-D-laktidi
PDLLA	Poly-D,L-laktidi
PE	Polyeteeni
PE-HD	Polyethylene High Density eli korkean tiheyden polyeteeni
PE-LD	Polyethylene Low Density eli matalan tiheyden polyeteeni
PET	Polyeteenitereftalaatti
PGA	Polyglykolidi
PHA	Polyhydroksialkanaaatit
PHB	Polyhydroksibutyaatti
PHBV	Polyhydroksibutyaattivaleraatti, 3-hydroksibutyaatin ja 3- hydroksivaleraatin kopolymeeri
PLA	Polylaktidi
PLLA	Poly-L-laktidi
PP	Polypropeeni

PS	Polystyreeni
PU	Polyuretaani
PVA	Polyvinyyliasettaatti
PVC	Polyvinyylikloridi
PVOH	Polyvinyylialkoholi
SEM	Scanning Electron Microscopy eli pyyhkäiselektronimikroskopia
TGA	Termogravimetria
THC	Tetrahydrokannabinoli
TPS	Termoplastinen tärkkelys
UV-säteily	Ultraviolettisäteily



# 1 JOHDANTO

Komposiitti on kahden tai useamman materiaalin yhdistelmä rakenne, joka koostuu vähintään kahdesta eri faasista. Tavallisesti toinen materiaaleista on lujittavassa muodossa esimerkiksi kuituina, kun taas toinen materiaali toimii matriisimateriaalina, joka sitoo kokonaisuuden yhteen ja samalla siirtää ulkoisen kuormituksen kuitujen kannettavaksi. Tyypillinen esimerkki tällaisesta kuitukomposiitista on lasikuitulujitettu muovi, jossa matriisina on käytetty joko kesto- tai kertamuovia. Lasikuitu ja useimmat synteettiset muovit valmistetaan kuitenkin uusiutumattomista raaka-aineista. Erityisesti hajoamaton ja palamaton lasikuitu vaikeuttaa komposiitin kierrättämistä ja loppusijoittamista [1]. Vaikea kierrätettävyys onkin yksi synteettisten kuitukomposiittien ongelmista. Nykyään materiaalien kierrätettävyys ja ympäristöystävällisyys ovat saaneet jalansijaa tuotteiden kehityksessä, sillä kuluttajien ympäristötietoisuus on kasvanut, ja lisäksi myös lainsäädäntö ohjaa kehitystä ympäristöä säästävien ja uudelleenkäytettävien materiaalien puoleen. Esimerkiksi Euroopan Unionin (EU) jätedirektiivi (2008) velvoittaa ehkäisemään jätteen syntymistä ja edistämään jätteiden hyödyntämistä luonnonvarojen säästämiseksi [2]. Lisäksi erityisesti autoteollisuudessa kierrätettävien materiaalien käyttöön kannustaa EU:n romuajoneuvo-direktiivi, jonka mukaan vuoteen 2015 mennessä romuajoneuvojen painosta on uudelleenkäytettävä ja hyödynnettävä vähintään 95 % sekä uudelleenkäytettävä ja kierrätettävä vähintään 85 % [3].

Eräs tapa ratkaista materiaalien kierrätyksen ongelmia on valmistaa tuotteita ympäristöystävällisistä luontoperäisistä materiaaleista, kuten biomuoveista ja luonnonkuiduista, jotka biohajoavat tai kompostoituvat käyttökänsä päätteeksi. Perinteinen lasikuitukomposiitti onkin tietyissä sovelluskohteissa mahdollista korvata biokomposiitilla, jossa joko lujite, tai sekä lujite että matriisi molemmat ovat peräisin uusiutuvista raaka-ainelähteistä. Nykypäivän biokomposiitit koostuvat pääasiassa luonnonkuiduilla lujuitetuista raakaöljypohjaisista biohajoamattomista muoveista. Tämän työn tarkoituksena on valmistaa biokomposiitti, jonka materiaaleina käytetään pellavakuitua ja sulakuidutusmenetelmällä valmistettua, osittain bio- ja tärkkelyspohjaista biohajoavaa muovikuitua. Kuiduista valmistetaan karstaamalla kuitukangasta ja kuitukankaista muodostetaan komposiitti puristusmuovaustekniikalla. Tämänkaltaisten puolivalmisteista prässättyjen komposiittien sovelluskohteisiin kuuluvat esimerkiksi autojen sisäosien paneelit ja kojelaudat [4, s. 68]. Työn tavoitteena on selvittää, miten tärkkelyspohjaisen biomuovin kuidutus ja kuitukankaan valmistaminen onnistuvat, ja minkälaiset ominaisuudet ovat kuitukankaista puristusmuovatuilla biokomposiiteilla.

Työn ensimmäisessä, eli teoreettisessa osassa, perehdytään yleisesti luonnonkuituihin ja biohajoaviin muoveihin ja näiden ominaisuuksiin sekä tarkastellaan yleisellä ta-

solla muovin kuidutusta ja yleisimpiä kuidutusmenetelmiä. Lisäksi keskitytään luonnonkuiduilla lujitettujen kestonmuovien ja biohajoavien muovien tärkeimpiin ominaisuuksiin ja sovelluskohteisiin sekä perehdytään tyypillisiin kestonmuovipohjaisten luonnonkuitukomposiittien prosessointimenetelmiin. Painoarvona selvityksessä ovat biomuovimatriisipohjaiset ja kuitukankaista puristusmuovautut luonnonkuitukomposiitit.

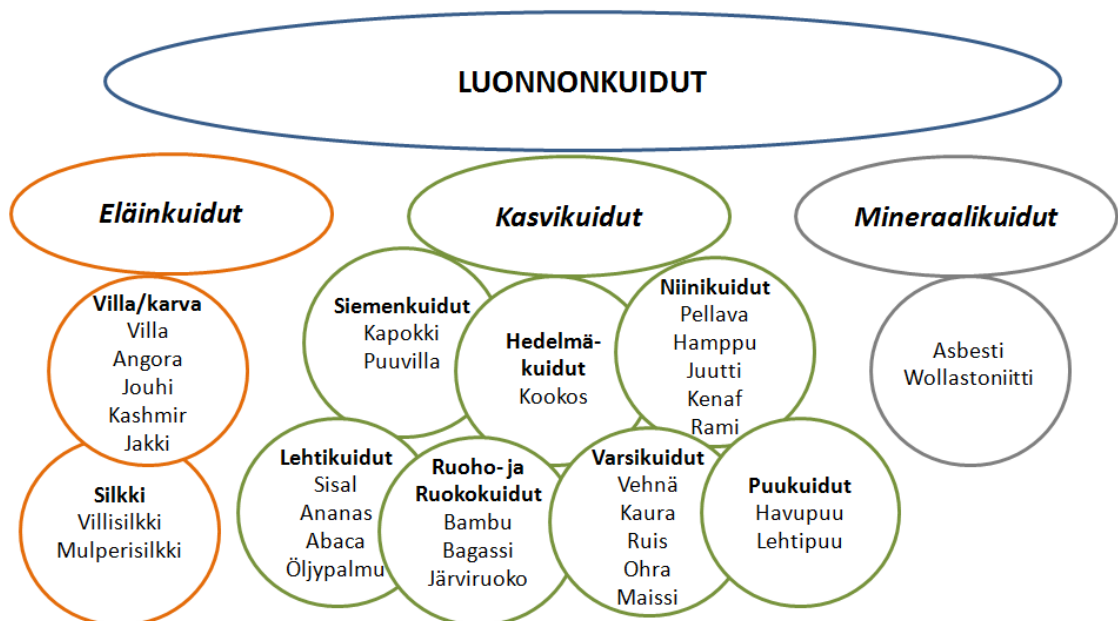
Työn kokeellisessa osuudessa tarkastellaan aluksi tärkkelyspohjaisen biomuovin kuidunmuodostuskykyä. Ensin muovikuidun valmistukseen liittyvää muovin sulakäytäytymistä testataan kapillaarireometrilla. Tämän jälkeen varsinainen kuidunvalmistus tapahtuu sulakuidutusmenetelmällä. Sulakuidutetuista biomuovikuiduista ja pellavakuiduista valmistetaan kuitukankaita mekaanisilla karstaus- ja neulausprosesseilla. Valmiista kuitukankaista muodostetaan lopuksi puristusmuovaustekniikalla kuitukangaskomposiitteja, joiden mekaanisia ja termis-mekaanisia ominaisuuksia sekä rakennetta tutkitaan erilaisin testimenetelmin. Tuloksissa tarkastellaan kuitupitoisuuden vaikutuksia komposiittien lopullisiin ominaisuuksiin ja pohditaan myös komposiittien potentiaalisia sovelluskohteita.

## 2 LUONNONKUIDUT

Nimensä mukaisesti luonnonkuidut ovat luonnossa sellaisenaan esiintyviä kuituja, joista yleisimpiä komposiittikäytössä ovat erilaiset kasvikuidut. Erityisesti kasvikuitujen ekologisuus, biohajoavuus ja hinta edesauttavat niiden käyttöä suurilla markkinoilla autotai rakennusteollisuudessa [5, s. 42]. Tässä luvussa perehdytään luonnonkuitujen jaotteleluun, muutamiin kuituesimerkkeihin sekä luonnonkuitujen etuihin ja heikkouksiin komposiittikäytössä.

### 2.1 Luonnonkuitujen jaottelu

Luonnonkuidut voidaan jaotella ryhmiin eri tavoin. Kuvassa 2.1 luonnonkuidut on luokiteltu kolmeen eri ryhmään sen perusteella mistä kuitu luonnossa saadaan ja samalla kunkin alalajin alle on koottu muutamia esimerkkilajeja. Kasvikuidut saadaan kasvien eri osista, eläinkuidut ovat peräisin eläimistä ja mineraalikuidut puolestaan luonnossa esiintyvistä mineraaleista. Puukuidut ovat sinänsä poikkeus kasvikuitujen ryhmässä, koska ne voidaan jakaa alalajeina havu- ja lehtipuihin, joihin molempiin kuuluu lukuisia eri lajeja. Puukuidut voidaan lähteestä riippuen luokitella myös omaksi ryhmäkseen siten, että kasvikuidut jaotellaan joko puuperäisiin kuituihin ja ei-puuperäisiin kuituihin. [6, s. 4; 7, s. 65.]



**Kuva 2.1.** Luonnonkuitujen luokittelua alkuperän mukaan (muokattu lähteestä [5, s. 45; 6, s. 4]).

Kasvikuidut koostuvat kemiallisesti pääosin selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Selluloosa on lujaa ja jäykkää, kun taas hemiselluloosa ja ligniini toimivat eräänlaisena liimana pitäen selluloosamikrofibrillit yhdessä [8, s. 119]. Selluloosapitoiset kuidut ovat tavallisesti lujempia ja jäykempiä kuin proteiineista koostuvat eläinkuidut, minkä vuoksi kasvikuituja, tarkemmin sanottuna puu- ja niinikuituja, yleensä käytetään luonnonkuitukomposiittien lujite- tai täyteainemateriaaleina [7, s. 64-65].

Selluloosakuiduista lujimpia ovat hamppu, juutti ja pellava, ja näistä pellavalla ja hampulla on suurimmat Youngin moduulin arvot eli suurin jäykkyys. Lujuusarvojensa lisäksi hamppu- ja pellavakuiduilla on korkeat pituus-halkaisijasuhteet, mikä on suotuisa ominaisuus komposiitin lujitteena käytettävälle kuidulle. [7, s. 65.] Mekaanisten ominaisuuksien vertailussa luonnonkuitujen lujuusarvot eivät sellaisenaan yllä lasikuitujen tasolle, mutta kun huomioon otetaan myös luonnonkuitujen alhainen tiheys (~1.4 g/cm<sup>3</sup>) verrattuna E-lasikuituun (~2.5 g/cm<sup>3</sup>), saadaan ominaisuudet painoon nähden melko vertailukelpoiseksi kuitujen välille. Niinpä joidenkin luonnonkuitujen, yleensä niinikuitujen, ominaisjäykkyysarvot ja ominaisvetolujuudet (jäykkyyden ja vetolujuuden suhde tiheyteen) ovat melko verrattavissa lasikuitujen vastaaviin arvoihin. [9, s. 9.] Tämän vuoksi luonnonkuitukomposiittien on ajateltu sopivan erityisesti lasikuitukomposiittien korvaajiksi tietyissä sovelluskohteissa. Tästä eteenpäin luonnonkuiduilla tarkoitetaan kasvikuituja, ellei toisin mainita.

## 2.2 Kuituesimerkkejä

Suomessa puukuidut ovat kaupallisesti selkeästi tärkein luonnonkuituryhmä, mutta myös varsikuiduilla, kuten oljilla, heinillä ja järviruo'oilla, sekä niinikuiduilla, kuten pellavalla ja hampulla, on potentiaalia kaupallisiin sovelluksiin [1]. Näitä kasveja on mahdollista viljellä tai kasvattaa myös Suomen ilmasto-oloissa. Seuraavaksi luonnonkuiduista tarkastellaan pellavaa, hampppua sekä puukuituja, jotka kaikki soveltuvat luonnonkuitukomposiittien täyteaineiksi tai lujitemateriaaleiksi.

### 2.2.1 Pellava

Pellava (*Linum usitatissimum* L.) on yksivuotinen, 0.5 - 1.25 m korkeaksi kasvava kasvi, jolla on ohut, noin 1.6 - 3.2 mm paksu varsi. Kuvassa 2.2 on havainnollistettu pellavakasvin kukintoa. Pellavaa viljellään sekä kuitujen (kuitupellava) että siementen (öljypellava) vuoksi. Kuitupellavan viljelyssä suositaan tiivistä istutustiheyttä, jotta vältettäisiin varren haarautuminen ja aikaansaataisiin pitkiä, ohutvartisia ja suoria kasveja. Öljypellavan viljelyssä istutustiheys on päinvastoin harvempi, jotta kasvi haarautuisi enemmän ja tuottaisi enemmän siemeniä, joista pellavaöljy puristetaan. [10, s. 89-90; 11, s. 463-464.]



*Kuva 2.2. Pellavan kukintoa. Kuva: Laura Yli-Rantala.*

Pellavakuitua käytetään selkeästi eniten tekstiilisovelluksissa (83 %). Muita käyttöalueita ovat paperi- (9 %), komposiitti- (6 %) ja rakennussovellukset (1 %) ja näiden lisäksi muut tuotteet (1 %). [12, s. 36.] Öljypellavaa viljellään ensisijaisesti pellavaöljyn vuoksi, mutta sen kuidullekin on käyttökohteensa. Öljypellavan kuitua voidaan hyödyntää kuitukangastuotteissa sekä lujitemateriaaleina rakennuslevyissä, muoveissa ja muissa komposiiteissa. Öljypellavakuitumattojen sovelluskohteisiin kuuluvat esimerkiksi eristeet, suodatinmateriaalit, huonekalujen pehmusteet, sisustuspaneelit, eroosion hallintaan liittyvät sovellukset ja puutarhojen kasvualustat. [13.] Tämän työn kokeellisessa osassa käytetty pellavakuitu onkin peräisin juuri öljypellavalajikkeesta.

Pellavakuidut kasvavat pellavan varressa kuitukimppuina, joita on varressa 15–40 riippuen pellavalajista ja viljelyyn liittyvistä muuttujista. Jokainen kuitukimppu sisältää 10–40 peruskuitua, jotka ovat tavallisesti 15–20  $\mu\text{m}$  paksuja ja 20–30 mm pitkiä. Kuitukimput irrotetaan ja erotellaan niinikuitujen varresta liotuksen avulla. Liotuksessa mikro-organismit hajottavat kuitukimppuja ympäröivät rakenneosat, jolloin kuidut irtoavat niitä ympäröivästä puumaisesta aineksestä. Liotus tapahtuu yleensä vesiliotuksena, ketoliotuksena tai kemiallisena liotuksena. Vesiliotuksessa irrotuksen aikaansaavat pääosin bakteerit, ketoliotuksessa sienet ja kemiallisessa liotuksessa heikot hapot tai emäkset. Liotuksen jälkeen varret kuivataan ja kuidut erotellaan rikkomalla eli loukuttamalla varren puumainen aines pieniksi päistäreiksi. Päistäreet poistetaan pellavasta lihtaamalla. Lihtauksessa osa kuiduista katkeaa ja näistä katkenneista kuiduista voidaan valmistaa puhdistuksen jälkeen rohdinlankaa. Lihdattu pellava on valmista toimitettavaksi kehäämölle, jossa pellava kammataan eli häkilöidään ennen kehruuta. Häkilöinnissä pitkäkuituinen ja lyhytkuituinen pellava erotellaan toisistaan. Lyhytkuituinen pellava (rohdin) syntyy siis pitkäkuituisen pellavan sivutuotteena. [10, s. 91, 94, 102-103; 11, s. 464-465; 14.]

Ominaisuuksiltaan pellavakuitu soveltuu hyvin luonnonkuitukomposiittien lujitteeksi. Pellava on yksi vahvimmista kasvikuiduista, ja vielä vahvempi kosteana [11, s. 467]. Kuidut kuitenkin menettävät asteittain lujuuttaan altistuessaan auringonvalolle [5, s. 70]. Pellavan tiheys ( $1.45 \text{ g/cm}^3$ ) on alhainen verrattuna perinteiseen lasikuitulujitteeseen ( $2.54 \text{ g/cm}^3$ ) [15], mikä on etu, kun halutaan aikaansaada keveitä ja lujia komposiittira-

kenteita. Pellavakuitujen hinta voi kuitenkin kohota suhteellisen korkeaksi työläiden tuotantovaiheiden vuoksi. Pellavakuituja käytetään nykyään lujitemateriaaleina erityisesti korkean jalostusarvon tuotteissa, joihin kohdistuu vain keskitason kuormituksia, kuten autojen sisäosien komponenteissa. [5, s. 71-72.]

### 2.2.2 Hamppu

Hamppu (*Cannabis sativa L.*) on nopeakasvuinen yksivuotinen kasvi, jota yleensä viljellään kuitusadon vuoksi. Muita viljelysytitä ovat öljynvalmistuksessa käytettävät hamppunsiemenet tai lääkinnällisiin ja päihdetarkoituksiin käytettävät kannabinoideyhdisteet, kuten esimerkiksi tetrahydrokannabinoli (THC). Kuitujen kasvatukseen tarkoitettujen kuituhamppulajit voivat kasvaa jopa 4.5 m korkeiksi varren ollessa 4 - 20 mm paksu. Siementen vuoksi viljeltävät lajit ovat sen sijaan matalampia ja pensasmaisia. Hampun kuituja hyödynnetään erityisesti köysien, tekstiilien ja paperin valmistuksessa. Keskeinen ero teollisen hampun ja lääkinnälliseen tai päihdekäyttöön tarkoitettun marihuanan välillä on kasvissa olevan psykoaktiivisen THC:n määrä. Teollisessa hampussa THC-pitoisuus on matala, 0.6 %, verrattuna marihuanalajeihin, joissa THC-pitoisuus on korkea, 3 - 20 %. [5, s. 72; 7, s. 65-66; 11, s. 471.]

Hamppukuitujen erottelu ja prosessointi muistuttavat pellavan vastaavia työvaiheita. Hampun tiheys on  $1.47 \text{ g/cm}^3$ , eli selkeästi alhaisempi kuin lasikuitulujitteilla. Pellavaan verrattuna hamppukuitu on pidempää, karkeampaa ja vaikea valkaista. Hampulla on myös alhainen murtovenymä. Yksi hampun eduista on sen tauti- ja tuholaiskestävyys. Lisäksi hampulla on hyvä kosteudenkesto, jonka ansiosta se lahoaa vedessä hyvin hitaasti. [5, s. 41, 74; 7, s. 65; 11, s. 471.]

### 2.2.3 Puukuidut

Suomi tunnetaan metsäisenä maana, ja siten onkin ymmärrettävää, että puukuidut muodostavat Suomen kaupallisesti tärkeimmän luonnonkuituryhmän. Puukuidut voidaan jakaa kahteen alalajiin sen perusteella saadaanko kuidut havu- vai lehtipuista. Havupuukuitujen pituus on yleensä 3-8 mm, kun taas lehtikuitujen pituus on tavallisesti keskimäärin 1 mm. Kuitujen halkaisijat vaihtelevat tyypillisesti välillä 15–45  $\mu\text{m}$ . [16, s. 11.] Puuta hyödynnetään puumuovikomposiittisovelluksissa erityisesti rakennus- ja autoteollisuudessa. Komposiiteissa suositetaan usein havupuiden kuituja niiden korkeamman pituus-halkaisija-suhteen vuoksi. [17, s. 353.] Kestomuoveista matriisimateriaalina käytetään tyypillisesti edullisia valtamuoveja [16, s. 1].

Luonnonkuitukomposiiteissa lujitteena käytetty puu voi olla sekoitettuna matriisiin monessa muodossa, esimerkiksi lastuina, hiutaleina, kuituina tai kuitumassana [6, s. 7]; useimmiten puu on komposiiteissa partikkeli- tai jauhomuodossa [18, s. 242]. Puulla on täyteaineena monia hyviä puolia, kuten edullisuus tilavuusyksikköä kohti, laaja saataavuus luonnossa, alhainen tiheys, matalampi prosessointivälineistön kulutus kuin useilla epäorgaanisilla täyteaineilla, mahdollisuus pintakäsittelyyn ja turvallisuus (ei terveys-

haittoja). Puun ominaisuudet kuitenkin vaihtelevat samojenkin puulajien kohdalla riipuen lähteestä, lajista ja kasvukaudesta. [17, s. 351.]

Puukuitujen käyttö polymeerikomposiiteissa on vähäisempää kuin puujauhon, koska kuitujen hinta on korkeampi ja kuitujen prosessointi perinteisillä muovin prosessointimenetelmillä on haastavampaa kuin puujauhon tapauksessa. Puukuiduilla on hyvä lujuitepotentiaali komposiittimateriaaleissa, koska kuitujen lujuus ja kohtuullisen hyvä pituus-halkaisija-suhde mahdollistavat tehokkaan kuormituksen siirron matriisilta kuiduille, jos kuitujen ja matriisin välillä on hyvä adheesio eli tartunta. Puujauhon lujuitepotentiaali on sen sijaan puukuituja alhaisempi, mutta puujauholla täytettyjen komposiittien mekaaniset ominaisuudet ovat silti riittävät moniin sovelluskohteisiin. [16, s. 13-14.]

## 2.3 Luonnonkuitujen edut ja heikkoudet

Nykyään tuotteiden ympäristöystävällisyydelle ja kierrätettävyydelle annetaan yhä enemmän painoarvoa. Luonnonkuidut ovat tässä suhteessa herättäneet paljon kiinnostusta, koska kuidut ovat saatavilla suoraan luonnosta uusiutuvista raaka-ainelähteistä. Luonnonkuitujen merkittävimpiin hyviin puoliin luetaan usein niiden edullisuus, uusiutuvuus ja helpompi kierrätettävyys tai hävitettävyys synteettisiin kuituihin nähden [1]. Alla on lueteltu luonnonkuitujen tärkeimpiä hyviä puolia [5, s. 41-42; 7, s. 64; 19, s. 68; 20, s. 306]:

- Edullisuus ja runsas saatavuus
- Alhainen tiheys lasikuitulujitettuihin komposiitteihin verrattuna
- Usein hyvät lujuusominaisuudet painoonsa nähden
- Hyvät termiset ja akustiset eristysominaisuudet
- Korkea sähköinen resistanssi
- Biohajoavuus, kierrätettävyys, myrkyttömyys
- Uusiutuva raaka-ainelähde, jonka tuotannossa syntyy vähän hiilidioksidipäästöjä
- Työntekijäystävälliset prosessointiolosuhteet
- Työvälineiden kuluminen vähäisempää kuin lasikuitulujitteiden tapauksessa
- Hyvä adheesio hydrofiilisiin (vesihakuisiin) matriisimateriaaleihin kuitujen hydrofiilisuuden vuoksi

Etujensa lisäksi luonnonkuiduilla on luonnollisesti myös heikkoutensa. Näihin kuuluvat [5, s. 44-45; 7, s. 64; 19, s. 68; 20, s. 306; 21, s. 136]:

- Erilaisista alkuperistä ja käsittelymenetelmistä johtuva kuitujen epätasalaatuisuus
- Heikko lämmönkesto yli 200 °C:ssa, mikä rajoittaa luonnonkuitujen prosessointia korkeissa lämpötiloissa sulavien kestopuuvien kanssa
- Kuitujen hydrofiilisyys, joka aikaansaa kosteuden absorptiota ja kuitujen heikon adheesion hydrofobiseen (vesipakoiseen) matriisimateriaaliin → johtaa usein komposiitin heikkoihin mekaanisiin ominaisuuksiin
- Alttius lahoamiselle ja heikko pitkäaikaiskestävyys
- Heikko palonkesto

- Kuitujen taipumus kasaantua yhteen (agglomeroitua) sulaprosessoinnin aikana

Vaikka luonnonkuitujen hyväksi puoleksi luetaan usein niiden edullisuus, riippuu kuitujen lopullinen hinta kuitenkin tuotannon kustannuksista. Laadukkaiden luonnonkuitujen valmistus voi vaatia monia työläitä työvaiheita, minkä vuoksi esimerkiksi Euroopassa kasvatetun pellavan hinta voi kivuta liian korkeaksi, jotta se olisi kilpailukykyinen lasikuituun nähden. Lähitulevaisuudessa EU:ssa ja Pohjois-Amerikassa viljeltävät kuitukasvit eivät kilpailekaan maailmanlaajuisilla markkinoilla ilman EU:n tai valtion tukipalkkioita, koska niiden valmistuskustannukset ovat suhteellisen korkeita verrattuna synteettisiin lujitemateriaaleihin. Länsi-Euroopassa kuitukasvien tuotanto voidaan pitkällä aikavälillä saada kannattavaksi vain, jos tuotantokustannukset voidaan peittää ilman tukipalkkioita. [5, s. 43, 51.] Edullisimmillaan luonnonkuidut ovat tyypillisesti raakakuituna (epäjärjestäytyneenä katkokuitumassana), jota voidaan hyödyntää esimerkiksi kuitukankaiden valmistuksessa. Raakakuitujen ja kuitukankaiden hinnat ovat siis yleensä kilpailukykyisiä synteettisiin vastineisiinsa nähden. [22.] Lopullisen hinnan kannalta on kuitenkin aina otettava huomioon myös kuitujen mahdollisesti vaatimat pintakäsittelymenetelmät, jotka tuovat oman lisäivunsa kustannuksiin. Kyseiset käsittelymenetelmät voivat olla tarpeen esimerkiksi luonnonkuitujen hydrofiilisen luonteen vähentämiseksi, jotta komposiitille saataisiin hyvät mekaaniset ominaisuudet.



### 3 BIOMUOVIMATRIISI

Biomuovit ovat herättäneet paljon kiinnostusta viime vuosina mahdollisina luonnonkuitukomposiittien matriisimateriaaleina. Syyt tähän ovat pääosin ympäristöperäisiä. Biohajoavan muovin lujitus biohajoavilla luonnonkuiduilla voi aikaansaada täysin biohajoavan komposiitin, ja mikäli tällaisella komposiitilla pystyttäisiin korvaamaan perinteisiä biohajoamattomia komposiitteja, voitaisiin ympäristöä rasittavan kaatopaikkajätteen määrää vähentää. Kierrätettävien komposiittimateriaalien kehitys onkin tarpeellista, sillä perinteisten synteettisillä kuiduilla lujitettujen komposiittien kierrätys ja uudelleenkäyttö on teknisesti ja taloudellisesti käytännössä mahdotonta [5, s. 43]. Biohajoavuuden lisäksi biopohjaisten polymeerien tutkimukseen kannustavat raakaöljypohjaisten synteettisten polymeerien hintavaihtelut sekä mahdollisuus hiilidioksidineutraalien materiaalien tuotantoon ilmastonmuutoksen minimoimiseksi [23, s. 445]. Hiilidioksidineutraaliudella tarkoitetaan, että materiaali ei tuota ylimääräistä hiilidioksidia ilmakehään pallessaan tai kompostoituaan [24, s. 252].

Biomuovien käytön rajoitteina ovat kuitenkin toistaiseksi olleet niiden hinta ja suorituskyky. Biomuovit ovat suhteellisen kalliita materiaaleja verrattuna yleisesti käytettyihin valtamuoveihin ja lisäksi biomuovien ominaisuudet ovat usein heikommat kuin synteettisillä vastineillaan. Kuitulujitetuissa komposiiteissa suorituskyvyn suhde hintaan on tärkeä, minkä vuoksi biopolymeerit eivät ole olleet suosittuja matriisimateriaaleja. Biomuovien käytön rajoituksia on kuitenkin mahdollista lievittää eri tavoin. Ominaisuuksien parantamiseksi biomuoveja voidaan seostaa muihin polymeereihin tai vaihtoehtoisesti biomuoviin voidaan lisätä erilaisia lujite- tai täytemateriaaleja. Biomuovien hintaa voidaan alentaa käyttämällä täyteaineena halpoja kuitulähteitä, kuten vehnänolkia. On kuitenkin huomioitava, että luonnonkuidut usein alentavat komposiitin iskulujuusominaisuuksia enemmän kuin perinteiset täyteaineet. [23, s. 445-446: 25, s. 2.]

Biomuovien käyttökohteet ovat vuosien saatossa laajentuneet. Kalleutensa vuoksi biopolymeerien hyödyntäminen on alun perin ollut rajoittunut pääasiassa erikoistuotteisiin, kuten lääketieteen implantteihin ja ompeleisiin. Kasvavan ympäristötietoisuuden, parempien valmistusprosessien ja saantojen sekä uuden lainsäädännön myötä biopolymeerien käyttö on kuitenkin viime aikoina jo keskittynyt enemmän kertakäyttöisiin kulutustuotteisiin, kuten pusseihin, ruoan pakkaamiseen, vaippoihin ja kosmeettisiin astioihin. [20, s. 305.] Luonnonkuidujen hyödyntäminen biomuovien lujitemateriaalina on myös ollut tutkimuksen kohteena, ja erilaisia käyttökohteita tämänkaltaisille komposiiteille on jo kehitetty (katso luku 4.4.3). Tulevaisuuden haasteena on löytää biohajoaville muoveille yhä enemmän sovelluskohteita, jotta saavutettaisiin suurtuotannon edut, eli yksikkökustannusten lasku tuotantomäärän kasvaessa [6, s. 27; 19, s. 94].

### 3.1 Termien määritelmät

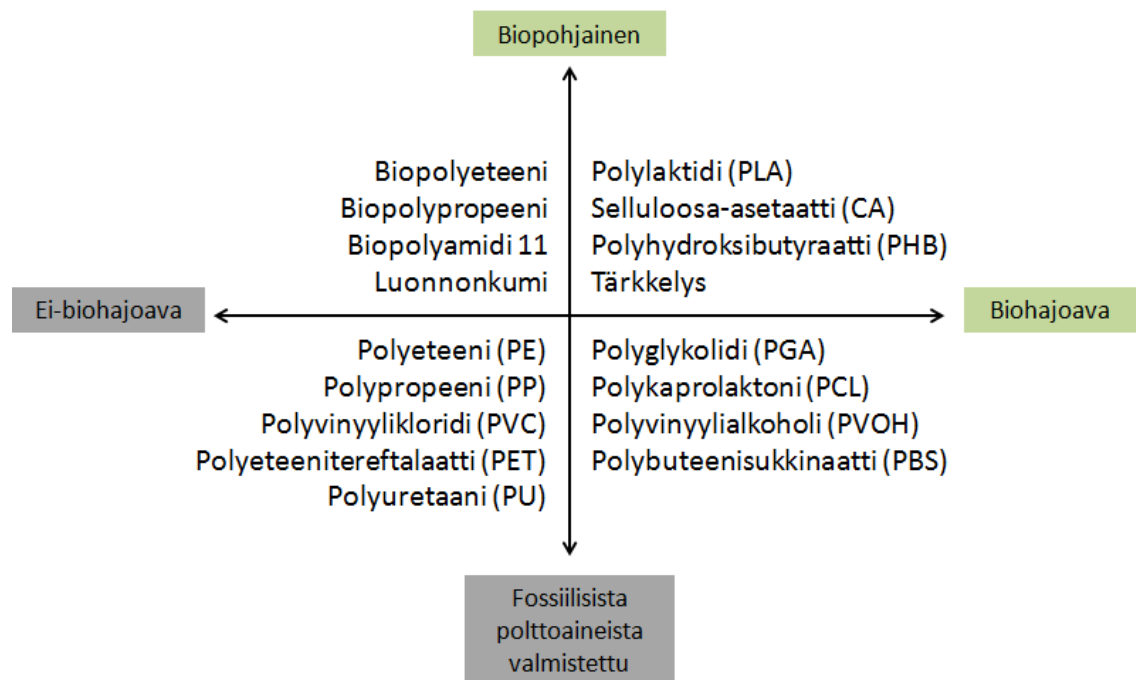
Kirjallisuudessa käytetään monia termejä kuvaamaan biomuoveja ja biohajoavuutta. Näihin kuuluvat muun muassa termit ”hajoava” (*degradable*), ”biohajoava” (*biodegradable*), ”kompostoituva” (*compostable*), ”biopohjainen” (*bio-based*) ja ”biopolymeeri” tai ”biomuovi” (*biopolymer, bioplastic*). Termien määritelmille ei ole olemassa tarkkaa yksimielisyyttä, ja niitä saatetaankin käyttää osittain limittäin. [26, s. 77.] Hajoavalla polymeerillä tai muovilla tarkoitetaan kuitenkin yleensä muovia, joka voi hajota erilaisilla menetelmillä fysikaalisesti, kemiallisesti tai biologisesti (biohajoaminen). Biohajoavat muovit taas ovat muoveja, jotka hajoavat luonnollisten mikro-organismien toiminnan seurauksena tietyn ajanjakson jälkeen hiilidioksidiksi (CO<sub>2</sub>), metaaniksi, epäorgaanisiksi yhdisteiksi tai biomassaksi. Biohajoaminen kuitenkin usein tapahtuu samanaikaisesti tai sen voi panna alulle ei-biologinen hajoaminen, kuten fotolyysi (valon aiheuttama hajoaminen) tai hydrolyysi (veden aiheuttama hajoaminen). Biohajoavuus ei riipu vain muovin alkuperästä, vaan myös muovin kemiallisesta rakenteesta ja ympäristötekijöistä. Kompostoituvuuden määritelmä on biohajoavuutta tiukempi, ja siihen liittyvät erityiskriteerit koskien biohajoamisen nopeutta, jäännösmateriaalin maksimimäärää tietyn ajanjakson jälkeen ja vaatimus siitä, että materiaalilla ei ole haitallisia vaikutuksia lopulliseen kompostiin tai kompostointiprosessiin. [9, s. 11, 14; 26, s. 77; 27, s. 399-400; 28, s. 11.]

Biomuovit luokitellaan eri ryhmiin sen perusteella, ovatko muovit valmistettu uusiutuvista luonnonvaroista vai raakaöljystä ja ovatko muovit biohajoavia vai eivät. Biopohjaisella polymeerillä tarkoitetaan polymeeriä, joka on syntetisoitu uusiutuvista raaka-aineista. Biopohjaista polymeeriä ei kuitenkaan suoraan voida pitää ympäristöä säästävänä materiaalina, koska ympäristöystävällisyys riippuu raaka-ainelähteestä, tuotantoprosessista sekä siitä, kuinka materiaali käsitellään käyttöikänsä loppuun. On myös huomattava, että biopohjainen muovi ei aina ole biohajoava (kuten biopohjainen polyeteeni tai biopolyamidi 11) ja toisaalta kaikki biohajoavat polymeerit eivät ole biopohjaisia (esimerkiksi polykaprolaktoni PCL tai polyglykolidi PGA). Käytännössä voidaan siis määrittellä kolmen tyyppin biomuoveja [26, s. 79.]:

- 1) Biopohjaiset biopolymeerit, jotka valmistetaan uusiutuvista raaka-aineista ja ovat biohajoavia
- 2) Biopohjaiset biopolymeerit, jotka valmistetaan uusiutuvista raaka-aineista ja eivät ole biohajoavia
- 3) Biopolymeerit, jotka valmistetaan raakaöljystä ja ovat biohajoavia

Kuvassa 3.1 on jaoteltu biomuoveja ryhmiin edellä mainittujen kriteereiden perusteella. Kuvassa ylhäällä oikealla ovat biopohjaiset ja biohajoavat muovit, ylhäällä vasemmalla biopohjaiset ja biohajoamattomat muovit, alhaalla oikealla raakaöljypohjaiset biohajoavat muovit ja alhaalla vasemmalla raakaöljypohjaiset biohajoamattomat muovit. Kuva ei ole kaikenkattava, vaan akseleille on kerätty muutamia esimerkkimuoveja kustakin ryhmästä. Biopohjaisia materiaaleja pidetään usein ympäristön kannalta suotuisimpana materiaalivaihtoehtona, mutta biopohjaisuus on toisaalta herättänyt myös

eettisiä kysymyksiä koskien ruoantuotannon ja materiaalityönteon välistä tärkeysjärjestystä; jotkin biomuovit kun voidaan valmistaa esimerkiksi maissia perusraaka-aineena käyttäen.



**Kuva 3.1.** Biomuovien luokittelua biopohjaisuuden ja biohajoavuuden mukaan (muokattu lähteestä [26, s. 79]).

Synteettisiin, biohajoamattomiin muoveihin kuuluvat valtamuovit (esimerkiksi polyeteeni PE ja polypropeeni PP) kattavat edelleen selkeästi suurimman osan polymeerien markkinoista. Nykyään käytetyimpiin biopohjaisiin ja biohajoaviin muoveihin luetaan muun muassa tärkkelys ja polyhydroksialkanaoattien (PHA) ryhmä, johon polyhydroksibutyraatti (PHB) kuuluu. Raakaöljypohjaiset biohajoavat polymeerit (polykaprolaktoni PCL, polybuteenisukkinaatti PBS) voivat raakaöljypohjaisuudestaan huolimatta hajota mikro-organismien toiminnan seurauksena. Biohajoamattomien biopohjaisien polymeerien pohjamateriaalina on käytetty bioperäistä tuotetta: polyamidi 11 voidaan valmistaa risiiniöljystä ja biopolyeteeni puolestaan bioetanolista, joka on valmistettu sokeriruo'osta. Myös eräät luonnossa esiintyvät biopolymeerit, kuten luonnonkumi, kuuluvat biohajoamattomiin biopohjaisiin polymeereihin. [26, s. 79.]

## 3.2 Biohajoavat muovit

Taulukossa 3.1 on esitelty biohajoavien muovien tyypillisiä ominaisuuksia ja vertailumateriaaleiksi on valittu luonnonkuitukomposiittien matriisimateriaaleina usein käytettyjä raakaöljypohjaisia kestumuoveja. Biohajoavien muovien sulamislämpötiloista voidaan päätellä, mitkä muoveista sopisivat matriisimateriaaleiksi luonnonkuitukomposiitteihin. Luonnonkuidut eivät kestä yli 200 °C:n prosessointilämpötiloja, joten mat-

riisimuovien sulamislämpötilan on oltava riittävän matala prosessointia varten [20, s. 311].

**Taulukko 3.1. Biohajoavien muovien ja valtamuovien tyypillisiä ominaisuuksia.**

Polymeeri	Ominaisuus						Lähde
	Tiheys (g/cm <sup>3</sup> )	Lasittumis- lämpötila (°C)	Sulamis- lämpötila (°C)	Kimmo- moduuli (GPa)	Veto- lujuus (MPa)	Murto- venymä (%)	
PLA*	1.21–1.25	45–60	150–162	0.35–3.5	21–60	2.5–6	[15]
PLLA	1.24–1.30	55–65	170–200	2.7–4.14	15.5–150	3–10	[15]
PDLLA	1.25–1.27	50–60	amorfinen	1–3.45	27.6–50	2–10	[15]
PHB	1.18–1.262	5–15	168–182	3.5–4	40	5–8	[15]
PCL	1.11–1.146	(-65) - (-60)	58–65	0.21–0.44	20.7–42	300–1000	[15]
PGA	1.50–1.707	35–40	220–233	6–7	60–99.7	1.5–20	[15]
PE-HD	0.94–0.97	(-140) - (-100)	130–137	1.07–1.09	22–31	10–1200	[29]
PE-LD	0.916–0.93	< -40	105–115	0.1–0.3	8.3–34	100–800	[30]
PP	0.9–0.91	-20	168–175	1.14–1.55	31–41	100–600	[31]
PS	1.05	85–110	amorfinen	2.8–3.5	35–84	1.0–4.5	[32]

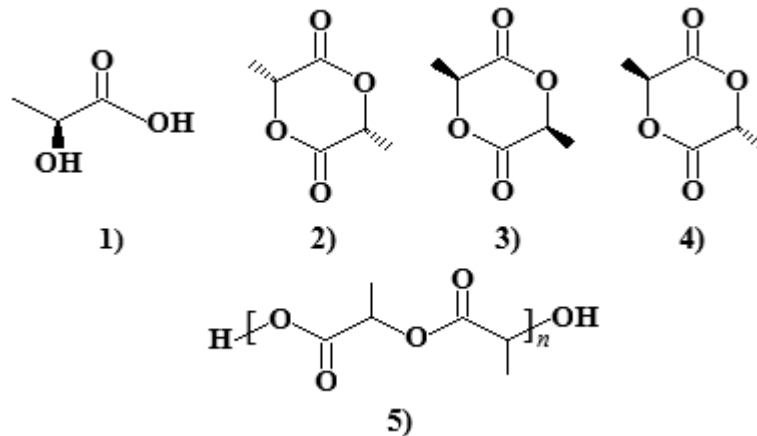
\*PLA, jolle ei ole kirjallisuudessa tarkemmin määritelty koostumusta laktidi-isomeerien D tai L osalta. PLA:n ajatellaan tässä yhteydessä tarkoittavan pääasiassa ei-syndiotaktisia poly-D,L-laktideja [15]. PLLA=poly-L-laktidi; PDLA=poly-D,L-laktidi (syndiotaktinen); PHB=polyhydroksibutyraatti; PCL=polykaprolaktoni; PGA=polyglykolidi; PE-HD=korkean tiheyden polyeteeni; PE-LD=matalan tiheyden polyeteeni; PP=polypropeeni, PS=polystyreeni

Van de Velde & Kiekens ovat julkaisussaan arvioineet biomuovien soveltuvuutta luonnonkuitukomposiittien matriisimateriaaleiksi muun muassa sulamislämpötilan perusteella. Heidän mukaansa taulukon 3.1 biomuoveista PGA ei sovellu matriisimateriaaliksi, koska sen sulamislämpötila on liian korkea ja lisäksi sen tiheys on liian suuri energiansäästötarkoituksiin. PCL puolestaan on hyvin kevyt materiaali, mutta sen alhainen sulamislämpötila estää lopullisen komposiitin käytön hiemankin korotetuissa lämpötiloissa. PLA ja PHB voivat ominaisuuksiltaan sopia matriisimateriaaleiksi, mutta PHB:n ongelmaksi voi muodostua liian matala lasittumislämpötila. [15.] PHB:n ominaisuuksia voidaan kuitenkin muokata esimerkiksi kopolymeroimalla 3-hydroksibutyraatti 3-hydroksivaleraatin kanssa polyhydroksibutyraatti-ko-valeraatiksi (PHBV) [28, s. 19]. Näin ollen potentiaalisimpia luonnonkuitukomposiittien matriisimateriaaleja lienevät PLA ja PHB:n kopolymeerit. Eräs kaupallisesti tärkeä biomuovi taulukon 3.1 ulkopuolelta on termoplastinen tärkkelys (TPS), jota on myös käytetty biokomposiittien matriisimateriaalina [19, s. 69]. Seuraavaksi käydään läpi tarkemmin polylaktidin, tärkkelyksen ja polyhydroksialkanoaatteihin kuuluvan PHB:n ominaisuuksia.

### 3.2.1 Polylaktidi

Polylaktidi (PLA) on alifaattinen polyesteri ja kestopolymeeri. Polylaktidia voidaan valmistaa joko suoralla kondensaatiolla maitohaposta tai syklisen laktidin renkaanavautumispolymeeraatiolla. Maitohappo on muun muassa maissin fermentaatiotuote eli käymistuote. Laktidi on maitohapon syklinen dimeeri, joka voi esiintyä kolmessa eri muodossa.

sa: kahtena stereoisomeerina L- ja D-laktidina, sekä raseemisena D,L-laktidina. L-laktidi on luonnollisesti esiintyvä isomeeri, kun taas D,L-laktidi on D-laktidin ja L-laktidin synteettinen sekoitus. Kuvassa 3.2 on havainnollistettu maitohapon, laktidien ja polylaktidin rakenteita. PLA on kemialliselta luonteeltaan hydrofobinen polymeeriketjussa olevien metyyliryhmien (-CH<sub>3</sub>) vuoksi. [21, s. 124; 27, s. 413; 28, s. 20; 33, s. 1; 34.]



**Kuva 3.2.** Molekyylirakenteet 1) Maitohappo 2) L-laktidi, 3) D-laktidi, 4) D,L-laktidi (mesolaktidi) 5) Polylaktidi. (Muokattu lähteestä [33, s. 2].)

Yleisesti käytettyihin PLA-lajikkeisiin kuuluvat L-laktidista koostuva poly-L-laktidi (PLLA) ja L-laktidin ja D-laktidin kopolymeeri poly-D,L-laktidi (PDLLA). Homopolymeerit PLLA ja PDLA (poly-D-laktidi) ovat osakiteisiä, kun taas raseeminen PDLLA on amorfinen muovi. PDLLA:lla on heikompi vetolujuus, korkeampi venymä ja paljon nopeampi hajoamisnopeus kuin PLLA:lla. [28, s. 20; 33, s. 1.]

Polylaktidin ominaisuudet ovat vertailukelpoisia moniin pakkausteollisuudessa käytettäviin synteettisiin muoveihin nähden. Esimerkiksi mekaanisilta ominaisuuksiltaan ja maku- ja hajubarrieriltaan polylaktidi on vertailukelpoinen polyeteenitereftalaatin (PET) kanssa. PET:iin verrattuna PLA on kuitenkin herkempi kemialliselle ja biologiselle hydrolyysille. PLA:n käyttöä tietyissä sovelluskohteissa rajoittavat myös suhteellisen matala lasittumislämpötila  $T_g$  (noin 55–65 °C) sekä alhainen iskulujuus ja haurastumisraja. PLA:lla on hidas kiteytymisnopeus, minkä vuoksi prosessoinnilla aikaansaadaan pääosin amorfisia tuotteita. Polylaktidin ominaisuuksia on kuitenkin mahdollista räätälöidä, sillä sen termiset ja mekaaniset ominaisuudet sekä hajoamisominaisuudet riippuvat mikrorakenteesta sekä kahden laktidistereoisomeerin suhteesta ja jakautumisesta polymeeriketjussa. Polylaktidista on mahdollista saada joko jäykkää tai taipuisaa materiaalia, ja se voidaan kopolymeroida muiden muovien kanssa. Ominaisuuksia ja hajoamistaipumusta voidaan muokata täyteaineilla, iskuskiteillä, kuitulujitteilla, seostuksella ja pintakäsittelyillä. [27, s. 414; 28, s. 20; 33, s. 1-2.]

PLA:ia käytetään tällä hetkellä monilla aloilla aina lääketieteellisistä sovelluksista pakkausmateriaaleihin ja maataloustuotteisiin. PLA:sta on myös mahdollista valmistaa kuitua tekstiilitarkoituksiin. Kuitua voidaan käyttää esimerkiksi kuitukankaissa, joiden

mahdollisia sovelluskohteita ovat kertakäyttövaatteet, vaipat ja naisten hygieniatuotteet. Tulevaisuudessa PLA:n sovellusalueisiin kuulunevat myös erilaiset kuljetus- ja rakennusovellukset, sähkölaitteet ja elektroniikka. [33, s. 4, 135.] Polylaktidin käyttö luonnonkuitukomposiittien matriisimateriaalina on myös herättänyt kasvavaa kiinnostusta. Tyypillisesti 20–40 painoprosentin luonnonkuitulisäys kaupalliseen polylaktidiin kasvattaa sen lujuusominaisuuksia, mutta muovin iskulujuus voi alentua luonnonkuitulujitteiden vuoksi. [27, s. 434-435.]

### 3.2.2 Tärkkelys

Tärkkelysmuovit saapuivat markkinoille kymmenkunta vuotta sitten ja nykyään tärkkelys on yksi tärkeimmistä ja runsaimmin luonnollisesti esiintyvistä biohajoavista biopolymeereistä. Tärkkelys koostuu pääosin kahdesta polysakkaridista, amyloosista ja amylopektiinistä ja sen tärkeimpiin teollisiin lähteisiin kuuluvat maissi, vehnä, peruna, tapioka ja riisi. Tärkkelysrakeet ovat hydrofiilisiä ja niillä on vahvat molekyylien väliset vetysidokset. Vahvan vetysitoutumisen ja kiteisyyden vuoksi tärkkelyksellä on heikot prosessointiominaisuudet, sillä tärkkelyksen sulamislämpötila on korkeampi kuin sen terminen hajoamislämpötila: lämpötilan noustessa tärkkelys siis termisesti hajoaa ennen sulamistaan. [23, s. 439; 28, s. 16; 35, s. 7.]

Tärkkelyksen käytettävyyden parantamiseksi tärkkelys yleensä muutetaan termoplastiseen muotoon (termoplastinen tärkkelys, TPS). Tämä tapahtuu tuhoamalla tärkkelyksen luontainen kiderakenne paineen, lämmön, mekaanisen työn tai pehmittimen avulla. Korkean tärkkelyspitoisuuden muovit ovat hyvin hydrofiilisiä ja hajoavat helposti ollessaan kosketuksissa veden kanssa. Tärkkelystä voidaan kuitenkin modifioida kemikaaleilla siten, että osa hydroksyyliyhdistä korvataan esimerkiksi ester- tai eetteriryhmillä. Vähäinkin kemiallinen muokkaus voi merkittävästi muuttaa tai parantaa tärkkelyksen reologisia, fysikaalisia tai kemiallisia ominaisuuksia. [28, s. 16.] Modifioimatontakin termoplastista tärkkelystä voidaan prosessoida perinteisten muovien tapaan, mutta kosteusherkkyyys rajoittaa sen käyttöä monissa sovelluskohteissa. Modifioimatonta tärkkelystä käytetään esimerkiksi liukenevissa kompostoituvissa solu-muoveissa, muotoon muovattavissa osissa ja myös polystyreenin korvaajana. [9, s. 12-13.]

Erilaisia termoplastisia sovelluksia varten tärkkelys seostetaan usein muihin polymeereihin, kuten polykaprolaktoniin (PCL) tai selluloosapohjaiseen polymeeriin prosessointi- ja kestävyysominaisuuksien parantamiseksi. Polykaprolaktoni parantaa tärkkelysmuovin vedenkestävyyttä ja sulalujuutta sekä auttaa pehmittämään tärkkelyksen. [9, s. 13; 23, s. 448; 28, s. 22-23.]

Tärkkelys on täysin biohajoava materiaali monissa ympäristöolosuhteissa, joten sen avulla on mahdollista kehittää biohajoavia tuotteita erityismarkkinoiden kysyntää varten. Alkuperäisiin termoplastisen tärkkelyksen sovelluskohteisiin kuuluivat biohajoavat roskapussit ja maataloudessa hyödynnettävät filmit. Nykyään termoplastista tärkkelystä hyödynnetään erityisesti pakkausteollisuudessa ja muihin käyttökohteisiin kuuluvat kalastuksessa ja puutarhanhoidossa käytettävät tuotteet ja monet pienen mittakaavan ruis-

kuvalusovellukset. Eräs mielenkiintoinen sovellusesimerkki on Novamont-yrityksen tärkkelyspohjaisen Mater-Bi®:n käyttö renkaissa renkaan vierimisvastuksen vähentämiseksi; tällöin polttoaineen kulutus laskee ja ajo-ominaisuudet paranevat. [23, s. 439; 28, s. 57; 36]

Mater-Bi:tä käytetään myös tämän työn kokeellisessa osassa. Mater-Bi-muovilajikkeet koostuvat tyypillisesti maissitärkkelyksestä ja synteettisestä komponentista, joka voi olla esimerkiksi biohajoava polyesteri (polyvinyyliaasettaatti PVA tai polykaprolaktoni PCL) tai selluloosajohdannainen polymeeri. Mater-Bi:tä on olemassa kalvojen, levyjen, solumuovien ja ruiskuvalutuotteiden valmistukseen soveltuvina lajikkeina. Tutkimusten perusteella Mater-Bi on potentiaalinen biohajoavien luonnonkuitukomposiittien matriisimateriaali, mutta komposiittien mekaanisiin ominaisuuksiin, prosessoitavuuteen ja biohajoavuuteen vaikuttavat kuitenkin paljon käytetyt luonnonkuidut ja Mater-Bi-lajike sekä kuitupitoisuus ja prosessointitekniikat. Eri Mater-Bi-lajikkeita on julkaisuissa lujitettu muun muassa pellavalla, ramilla ja sisalilla. Yleisesti ottaen luonnonkuiduilla lujitetuilla termoplastisilla tärkkelysmuoveilla on hyvä kuitujen ja matriisin välinen adheesio, ja tyypillisesti kuidut parantavat merkittävästi tärkkelyksen lujuus- ja jäykkyysarvoja. [23, s. 439, 447-448; 28, s. 15; 37, s. 259, 262; 38.]

### 3.2.3 Polyhydroksialkanoaatit

Polyhydroksialkanoaatit (PHA) ovat biohajoavia alifaattisia polyestereitä, jotka valmistetaan suoraan tiettyjen bakteerien käymisreaktioiden avulla. Ryhmään kuuluu ominaisuuksiltaan hyvin monenlaisia polymeerejä, jotka vaihtelevat jäykistä ja hauraista muoveista elastomeereiksi. Polyhydroksialkanoaatit jaetaan eri polymeerityyppeihin ketjunpituuden, funktionaalisten ryhmien ja tyydyttymättömien sidosryhmien määrän perusteella. Suurempi tyydyttymättömyys lisää polymeerin kumimaisia ominaisuuksia ja erilaiset funktionaaliset ryhmät muuttavat polymeerin fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. [9, s. 16; 28, s. 18.]

Lyhytketjuinen homopolymeeri polyhydroksibutyraatti (PHB) on tavallisin polyhydroksialkanoaatteihin kuuluva polymeeri. Kaupalliseen käyttöön PHB:lla on heikot fysikaaliset ominaisuudet, sillä se on jäykkää, haurasta ja vaikea prosessoida. Ominaisuuksien parantamiseksi polyhydroksibutyraattia on kopolymeroitu esimerkiksi polyhydroksivaleraatin kanssa. PHB:iin verrattuna polyhydroksibutyraattivaleraatti PHBV on taipuisampaa, lujempaa ja helpompi prosessoida. [28, s. 18-19.] PHBV:t ovat hyvin kiteisiä polymeerejä, joiden sulamis- ja lasittumislämpötilat ovat samankaltaisia polypropeenin kanssa. Kaupallisella nimellä Biopol® saatavaa PHBV:ia on käytetty shampoo-pullojen ja kosmeettisissa rasioiden materiaalina. PHBV:n laajemman kaupallisen käytön ongelmina ovat olleet korkea hinta, hajoamis- ja sulamislämpötilan pieni ero ja matala iskulujuus sekä huoneenlämpötilassa että matalissa lämpötiloissa. Tutkimus- ja kehitystyötä kuitenkin tehdään polyhydroksialkanoaattien kilpailukyvyyn parantamiseksi. Tulevaisuudessa PHB-pohjaisten polymeerien sovelluksia voivat olla kertakäyttötuotteet, kuten vaipat, roskapussit ja pikaruokatarvikkeet. [9, s. 17; 21, s. 131.]

PHB:ia ja PHBV:ia on jonkin verran tutkittu myös mahdollisina biohajoavien komposiittien matriisimateriaaleina. Komposiittien lujitemateriaaleina on käytetty esimerkiksi puuta, vehnänolkia, ananaslehtikuituja ja juuttia. Julkaisuissa luonnonkuiduilla lujitetuilla PHB-komposiiteilla on raportoitu olevan hyvä kuitujen ja matriisin välinen adheesio ja riittävän hyvä lujuus, mutta iskulujuus on yleensä alhainen. Hauras PHB-matriisi on mahdollista korvata taipuisalla PHBV:lla, mutta tyypillisesti tämän seurauksena lujuus- ja jäykkyysarvot laskevat. [23, s. 447; 39, s. 191.]

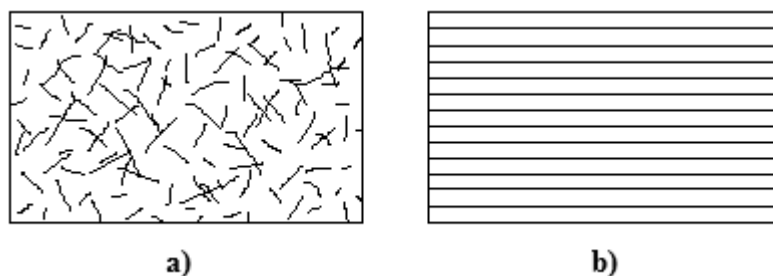


## 4 BIOKOMPOSIITIT

Biokomposiitin määritelmä vaihtelee hieman lähteestä riippuen. Biokomposiitilla voidaan tarkoittaa komposiittia, jossa sekä matriisi että lujitekuidut ovat peräisin uusiutuvista raaka-ainelähteistä [25, s. 3]: toisin sanoen komposiitissa matriisina on biopohjainen/biohajoava muovi ja lujitteena käytetään luonnonkuituja. Tällaista komposiittia nimitetään kirjallisuudessa myös usein ”vihreäksi komposiitiksi” (*green composite*), koska se koostuu täysin uusiutuvista raaka-aineista ja on siten tavallisesti biohajoava tai kompostoituva. Toisaalta biokomposiitin määritelmään voi sisältyä edellä mainitun komposiitin lisäksi myös sellainen komposiitti, jossa vain toinen komponenteista, matriisi tai lujite, on peräisin uusiutuvista raaka-ainelähteistä [27, s. 400; 40, s. 5-6]. Jälkimmäiseen määritelmään kuuluisi siis esimerkiksi luonnonkuiduilla lujitettu biohajoamaton muovi, joka sellaisenaan ei ole täysin biohajoava tuote. Tässä luvussa biokomposiitteihin luetaan molempien määritelmien mukaiset komposiitit, mutta painoarvo on kohdistettu luonnonkuiduilla lujitettuihin biomuoveihin ja kuitukangaskomposiitteihin, joiden valmistus sisältyy työn kokeelliseen osuuteen.

### 4.1 Rakenne ja adheesio

Kuitukomposiitit, joihin myös luonnonkuitukomposiitit kuuluvat, koostuvat matriisista ja sitä lujittavista kuiduista. Kuidut voivat olla lyhyitä, pitkiä tai jatkuvia. Jatkuvat kuidut voidaan orientoida kuitukomposiitissa tiettyyn suuntaan, kun taas lyhyet katkokuidut orientoituvat matriisissa tyypillisesti satunnaisesti. Kuitukomposiittien perusrakenteita on havainnollistettu kuvassa 4.1.



**Kuva 4.1.** Kuitulujitettujen komposiittien perusrakenteet: (a) katkokuitulujitettu komposiitti ja (b) jatkuvakuitulujitettu komposiitti.

Komposiittien parissa luonnonkuituja käytetään yleensä ruiskuvaluun soveltuvina katkokuituina tai puristusmuovattavina kuitukankaina tai -mattoina, jotka koostuvat satunnaisesti järjestäytyneistä katkokuiduista. Lyhyiden kuitujen ja niiden satunnaisen

järjestäytymisen vuoksi katkokuitukomposiittien mekaaniset ominaisuudet ovat suhteellisen heikot verrattuna jatkuvakuitulujitettuihin komposiitteihin. [41.] Kestomuovipohjaisten luonnonkuitukomposiittien ruiskuvalussa ja kompaundointimenetelmissä voidaan käyttää vain suhteellisen lyhyitä kuituja, mutta puristusmuovatuissa komposiiteissa myös pidempien kuitujen käyttö on mahdollista [42]. Jatkuvakuitukomposiittitarkoitukseen luonnonkuidut on tyypillisesti ensin kehrättävä langaksi.

Kuitukomposiitissa kuidut kantavat komposiittiin kohdistuvaa kuormaa. Kuormituksen on siirryttävä matriisimateriaalilta kuiduille ilman, että kuidut liikkuvat matriisissa. Tämä vaatii kuitujen kostumisen matriisilla ja siitä seuraavan hyvän adheesion kuitujen ja matriisin välille. [12, s. 26.] Erityisesti kestomuovipohjaisissa luonnonkuitukomposiiteissa adheesio on kriittinen tekijä. Luonnonkuidut ovat polaarisia ja hydrofiilisiä, kun taas yleisesti matriisina käytetyt valtamuovit ovat poolittomia ja hydrofobisia. Tästä poolisuuserosta seuraa yhteensopimattomuus kuitujen ja matriisin välille, mikä johtaa komposiitin heikkoon lujuuteen ja kestävyteen. [7, s. 70-71.]

Luonnonkuitujen hydrofiilistä luonnetta voidaan vähentää erilaisin pintakäsittelymenetelmin. Nämä menetelmät voidaan pääpiirteissään jakaa fysikaalisiin ja kemiallisiin menetelmiin. Fysikaalisilla menetelmillä kuitujen rakennetta ja pintaominaisuuksia, kuten pinnankarheutta, voidaan muuttaa ilman kemikaaleja. Kuidun kemiallinen koostumus ei tällöin muutu liiallisesti ja parantunut adheesio johtuu yleensä kuitujen ja matriisin välisestä parantuneesta mekaanisesta lukittumisesta: toisin sanoen materiaali ikään kuin ankkuroituu paremmin toisen materiaalin pinnan epätasaisuuksiin. Fysikaalisiin menetelmiin kuuluvat esimerkiksi korona-, plasma-, ja lämpökäsittelyt. Kemiallisissa käsittelyissä kuidut käsitellään erilaisilla kemikaaleilla adheesion parantamiseksi. Kemikaaliksi voidaan valita aine, jonka ominaisuudet ovat kahden yhteensopimattoman materiaalin (hydrofiilinen ja hydrofobinen) välimaastosta. Kemiallisiin pintakäsittelymenetelmiin kuuluvat esimerkiksi kytKentäaineiden käyttö ja oksaskopolymerointi. [43, s. 128-143.] Viimeaikaisten tutkimusten mukaan kovalenttisten sidosten muodostaminen kuitujen ja matriisin välille maleaatti- ja silaanikytkentäaineiden avulla onkin osoittautunut lupaavaksi keinoksi adheesion parantamisessa [44, s. 392]. Eräs suosittu menetelmä on myös luonnonkuitujen alkalikäsittely eli merserointi, joka voidaan toisaalta laskea fysikaaliseksi menetelmäksi sen pinnankarheutta lisäävän vaikutuksen vuoksi. Merseroinnissa laimeaa natriumhydroksidiliuosta käytetään poistamaan kuiduissa olevia keinotekoisia ja luonnollisesti esiintyviä epäpuhtauksia. Samalla käsittely saa kuitukimput pilkkoutumaan pienemmiksi kuiduiksi kasvattaen siten kuitujen pinta-alaa, joka on kontaktissa matriisin kanssa. [43, s. 130.] Adheesion parantumisen lisäksi alkalikäsittelyn on joissakin tutkimuksissa todettu parantavan myös jonkin verran lignoselluloosakuitujen lämmönkestävyyttä [7, s. 71].

Luonnonkuitujen adheesio biopolymeereihin voi olla parempi kuin hydrofobisten valtamuovien tapauksessa, koska muun muassa tärkkelyspohjaiset muovit ovat luonteeltaan hydrofiilisiä. Hydrofiilisen biomuovimatriisin ja luonnonkuitujen polaarisuuden samankaltaisuus voi siten edesauttaa niiden välistä adheesiota [15]. Esimerkiksi pella-vakuitulujitetulla PHB-pohjaisilla komposiiteilla on havaittu parempi kuitujen ja matrii-

sin välinen adheesio kuin vastaavilla polypropeenikomposiiteilla [45]. Luonnonkuitujen hydrofiilisyyden vähentämiseen tähtäävät pintakäsittelyt eivät siis välttämättä ole tarpeen sellaisissa biohajoavissa komposiiteissa, joissa luonnonkuiduilla ja matriisimateriaalilla on samankaltainen hydrofiilinen luonne. Hydrofiilisyyden kuitenkin kasvattaa komposiitin vedenottoa ja siksi kuitujen pintakäsittelyt voivat olla hyödyllisiä, jos käsittelyillä pystytään pienentämään kuitujen kosteusherkkyttä. [46.]

Biokomposiittien tapauksessa on tärkeää valita oikea kuitujen käsittelymenetelmä. Vilaseca *et al.* [47] ovat tutkimuksessaan tarkastelleet pintakäsittelyjen vaikutusta biokomposiittien mekaanisiin ominaisuuksiin. Alun perin käsittelemättömien juuttikuitujen ja tärkkelyspohjaisen biopolymeerin hydrofiiliset ominaisuudet olivat samankaltaiset. Kun juuttikuidut käsiteltiin fenyyli-isosyanaatilla, niiden polaarinen luonne heikkeni. Tämä vähensi polaaristen sidosten muodostumista juuttikuitujen ja tärkkelyspohjaisen biopolymeerin välille, alentaen siten lopullisen komposiitin mekaanista lujuutta ja jäykkyyttä. Toisaalta kuitujen natriumhydroksidikäsittely lisäsi vetysidoksien muodostumista kuitu-matriisi-rajapinnalle ja johti komposiitin parempiin veto- ja taivutuslujuusarvoihin. Vetysidosten muodostumisen lisäksi kohentuneen adheesio todettiin johtuvan kuitujen pinnan karkenemisen seurauksena parantuneesta mekaanisesta lukittumisesta materiaalien välillä.

## 4.2 Kuitukangaskomposiitit

Tämän työn kokeellisessa osassa valmistetaan pellavasta ja biohajoavasta muovikuidusta puristusmuovaamalla kuitukangaskomposiitteja, joten on syytä perehtyä tarkemmin siihen, mitä kuitukangaskomposiitilla tarkoitetaan (puristusmuovaustekniikkaan ja kuitukankaiden valmistukseen paneudutaan luvussa 6.1). Tässä yhteydessä kuitukangaskomposiitilla tarkoitetaan komposiittia, joka koostuu päällekkäin ladotuista kuitukan-kaista tai matoista, jotka paineen ja lämpötilan avulla puristetaan yhtenäiseksi komposiittirakenteeksi. Matriisin muodostava muovi on joko kestopuovikuituna kuitukan-kaassa tai kalvoina luonnonkuitukankaiden välissä. Kuitumuodossa oleva muovi sulaa puristusmuovauksen aikana matriisiksi, kun taas luonnonkuitu säilyy rakennetta lujittavana materiaalina. Tyypillinen esimerkki rakenteesta on pellavasta ja polypropeenikuiduista koostuva kuitukangasmatto. Pitkistä luonnonkuiduista ja kestopuovikuiduista koostuvia kuitukankaita hyödynnetään erityisesti autoteollisuuden komposiiteissa. [42; 48, s. 109.]

Luonnonkuiduista ja kestopuovikuiduista valmistettuja kuitukankaita käytetään usein komposiittien valmistuksessa edullisuutensa vuoksi. Kudotuilla kankailla komposiiteille saataisiin oletettavasti paremmat lujuusominaisuudet, mutta kudotut kankaat ovat kuitukankaita kalliimpia [48, s. 109]. Kestomuovipohjaisilla kuitukangasrakenteilla on mahdollista aikaansaada tuotteelle yhtenäinen paksuus ja tiheys, mutta rakenteet voidaan valmistaa vain katkokuiduista. Tällaisen komposiitin kuituorientaatio on suurimaksi osaksi satunnainen ja mekaaniset ominaisuudet ovat rajoitetut, minkä vuoksi kyseiset komposiitit soveltuvat heikosti vaativiin sovelluskohteisiin. [44, s. 392; 49, s.

526.] Joissakin tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että karstatuista kuitukankaista valmistettujen komposiittien mekaaniset ominaisuudet ovat paremmat karstaussuuntaan kuin poikkisuuntaan nähden [50; 51]. Karstauksen aikana kuidut voivat siis orientoitua enemmän radan suuntaisesti. Karstausmenetelmä on käyty läpi luvussa 6.1.1.

Monissa tutkimuksissa on valmistettu erilaisia luonnonkuitupohjaisia kuitukangaskomposiitteja. Tyypillisesti muovikuituna on käytetty polyolefiineja. Esimerkiksi polypropeenikuituja on käytetty yhdessä muun muassa kenaf-, juutti-, rami-, bagassi- ja hampukkuitujen kanssa [51; 52; 53]. Olemassa on myös jonkin verran julkaisuja kuitukangaskomposiiteista, joissa matriisimateriaalina on biohajoava muovi. Useimmiten julkaisut koskevat PLA-kuiduista tai -kalvoista ja luonnonkuiduista valmistettuja kuitukangaskomposiitteja, joissa luonnonkuituina on käytetty esimerkiksi kenafia, pellavaa, puuvillaa, juuttia tai hampua [50; 54; 55; 56; 57; 58]. Joissakin tutkimuksissa luonnonkuiduille on ennen prosessointia tehty alkali- ja/tai silaanikäsittely [58]. PLA:n lisäksi matriisimateriaalina on käytetty myös biohajoavaa PHB:ia kalvomuodossa kenafkuiturainojen välissä [56]. Puristusmuovauksen jälkeinen prosessointikin on mahdollista, sillä eräässä tutkimuksessa karstatut pellava/PLA ja Cordenka/PLA-matot puristusmuovattiin ensin levyiksi, jotka jälkeenpäin vielä silputtiin pelleteiksi ruiskuvalua varten [59]. Tärkkelyspohjaisista kuitukangaskomposiiteista julkaisuja löytyy sen sijaan vain rajoitetusti. Eräässä tutkimuksessa on valmistettu muiden biokomposiittien ohella tärkkelyspohjaisia kuitukangaskomposiitteja pinoamalla päällekkäin tärkkelyspohjaisia muovikalvoja ja pellavakuitumattoja. Tutkimuksen pellavakuitumatot valmistettiin paperitehdasteekniikalla (*paper mill technique*). [60.]

### 4.3 Ominaisuudet

Kiinnostus luonnonkuitukomposiitteja kohtaan on kasvanut nopeasti niiden erinomaisen suorituskyvyn, prosessointietujen, biohajoavuuden, alhaisen hinnan ja alhaisen tiheyden vuoksi [19, s. 113-114]. Tässä luvussa keskitytään kestumuovipohjaisten luonnonkuitukomposiittien mekaanisiin ominaisuuksiin, pitkäaikaisominaisuuksiin, eristysominaisuuksiin ja ympäristöystävällisyyteen. Esimerkkeiksi on valittu pääosin puristusmuovattuja ja ruiskuvalulla valmistettuja katkokuitukomposiitteja, joissa lujittavina materiaaleina ovat niinikuidut.

#### 4.3.1 Mekaaniset ominaisuudet

Katkokuitulujitettujen polymeerikomposiittien mekaaniset ominaisuudet riippuvat monista seikoista, kuten kuitujen ja matriisin mekaanisista ominaisuuksista, kuitupitoisuudesta ja kuitulujitteen muodosta (kuitu- vai kangasmuoto), kuitujen pituus-halkaisijasuhteesta ja orientaatiosta, mahdollisten pehmittimien käytöstä sekä kuitujen ja matriisin välisestä adheesiosta. Kuitujen pituus-halkaisijasuhteen tulisi olla tiettyä kriittistä arvoa suurempi, jotta kuidussa olisi maksimijännitys ennen komposiitin murtumista. [37, s. 260; 46.] Kuten luvussa 2.1 jo mainittiin, luonnonkuitujen mekaaniset ominaisuudet ovat itsessään alhaisemmat kuin lasikuiduilla, mutta luonnonkuitujen alhaisen tiheyden

ansiosta ominaisuudet saadaan kuitenkin painoon nähden melko vertailukelpoiseksi kuitujen välille. Yleisesti ottaen niinikuitujen ominaisjäykkyydsarvot ja ominaisvetolujuudet ovat melko verrattavissa lasikuitujen vastaaviin arvoihin. [9, s. 9; 61.] Kenaf-, hamppu- tai pellavapohjaisilla komposiiteilla on yleensä hyvät veto- ja taivutusominaisuudet, kun taas lehtikuitupohjaisilla komposiiteilla on parempi iskulujuus. Vahva rajapintasitoutuminen kuitujen ja matriisin välillä on kriittinen tekijä, jotta komposiitille saataisiin hyvät mekaaniset ominaisuudet. [9, s. 25-26.]

Kuitupitoisuudella on suuri vaikutus komposiitin lujuusominaisuuksiin. Yleensä korkeammalla kuitupitoisuudella komposiitista saadaan jäykempi ja lujempi, mutta lujuuttava vaikutus laskee samalla merkittävästi murtovenymää [62, s. 406]. Kuitupitoisuutta ei voida kasvattaa rajattomasti, sillä tyypillisesti kuitupitoisuudella on optimaalinen arvonsa, jonka jälkeen komposiitin murtolujuus ei enää kasva, vaan alkaa laskea. Optimaalinen kuitupitoisuus riippuu paljon materiaaleista ja valmistusmenetelmistä, mutta tutkimusten perusteella kestomuovipohjaisen luonnonkuitukomposiitin maksimilujuus saavutetaan tyypillisesti noin 20–40 painoprosentin luonnonkuituosuuksilla. Jäykkyyden (kimmomoduulin) on sen sijaan havaittu yleensä kasvavan asteittain kuitumäärän lisääntyessä. [63.] Tyypillisesti vetolujuuden parantamiseksi tarvitaan vahva rajapintasitoutuminen ja kuitujen orientoituminen kuormituksen suuntaan, kun taas moduulin määrittävät kuitujen määrä, kuitujen kostuminen matriisilla ja korkea kuitujen pituus-halkaisija-suhde [64].

Kestomuovipohjaisten luonnonkuitukomposiittien taivutuslujuusarvot ovat tyypillisesti vetolujuusarvoja suurempia. Lyhytkuituisten luonnonkuitukomposiittien iskulujuus (sitkeys) on sen sijaan yleensä heikko verrattuna lasikuitukomposiitteihin. Iskulujuus kuvaa materiaalin kykyä vastustaa murtumaa nopean iskun aikana. Katkokuitulujitetuissa komposiiteissa iskulujuuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten matriisin ominaisuudet, kuitutilavuusosuus sekä matriisin ja kuitujen välinen sidosljuuus. Heikko iskulujuus rajoittaa luonnonkuitukomposiittien käyttöä iskunkestävyyttä vaativissa sovelluskoh-teissa. Joidenkin tutkimusten mukaan luonnonkuitujen ja matriisin välisen adheesio-n parantaminen esimerkiksi kytkentäaineiden avulla voi selkeästi kohentaa iskulujuusarvoja, vaikkei lasikuitukomposiittien iskulujuusarvoja välttämättä saavuteta. Toisaalta on raportoitu myös päinvastaisia tuloksia, joiden mukaan hyvä adheesio on syy heikompiin iskulujuustuloksiin, koska heikko adheesio kuitujen ja matriisin välillä johtaa suurem-paan energianabsorptiokykyyn. [59; 62, s. 427, 443-445; 65, s. 247-249.]

Taulukkoon 4.1 on koottu biomuovimatriisista ja luonnonkuiduista koostuvien komposiittien mekaanisia ominaisuuksia. Kuitukangaskomposiittien mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttaa aiemmin mainittujen seikkojen lisäksi kuitukankaiden karstauskertojen määrä ja se, neulataanko tai sidotaanko raina muilla tavoin ennen puristusmuovausta. Hargitai *et al.* [51] tarkastelivat tutkimuksessaan hamppu/PP-kuiturainojen karstauskertojen vaikutusta komposiittien ominaisuuksiin ja havaitsivat, että kahdesti karstatuista kuitukankaista valmistetuilla komposiiteilla oli parempi vedenkestävyys ja paremmat taivutusominaisuudet kuin kerran karstatuilla vastineillaan. Lisäksi kahdesti karstatuilla kuitukankailla saavutettiin korkeammat poikkisuunnan lujuusominaisuudet

ja matalammat konesuunnan ominaisuudet verrattuna kerran karstattuihin kuitukankaisiin. Tämä viittaa siihen, että kahdesti karstatuista kuitumatoista valmistetut komposiitit olivat rakenteeltaan isotrooppisempia (ominaisuudet samankaltaiset suunnasta riippumatta). Tuplakarstausta kuitenkin alensi komposiittien iskulujuutta sekä kone- ja että poikkisuunnassa 25–30 % kerran karstattuihin kankaisiin nähden. [51.]

**Taulukko 4.1.** Eri prosessointimenetelmillä valmistettujen biopohjaisten komposiittien mekaanisia ominaisuuksia (kuituja ei esikäsitelty). (a) valmistettu ruiskuvalamalla (b) valmistettu puristusmuovamalla kuitukankaita, matriisi on kuituina tai kalvoina (c) karstattu, puristusmuovattu ja ruiskuvalettu. Merkkien selitykset:  $\sigma_t$ =vetolujuus;  $E_t$ =Youngin moduuli;  $\varepsilon_r$ =murtovenymä;  $\sigma_f$ =taivutuslujuus,  $E_f$ =taivutusmoduuli,  $a_c$ =Charpy-iskulujuus. MD=karstaussuuntaan, CD=poikkisuuntaan, N/A=ei saatavilla.

<b>Matriisi</b>	$\sigma_t$	$E_t$	$\varepsilon_r$	$\sigma_f$	$E_f$	$a_c$	
<b>+luonnonkuitu</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(GPa)</b>	<b>(%)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(GPa)</b>	<b>(kJ/m<sup>2</sup>)</b>	
<b>(paino-%)</b>							
a)Tärkkelyspohjainen	8.0	0.36	4.7	11.0	0.27	-	[66]
+pellava 10 %	11.5	0.75	2.7	15.5	0.63	12.1 <sup>a</sup>	
+pellava 20 %	15.0	1.14	2.6	21.5	0.97	16.7 <sup>a</sup>	
+pellava 30 %	17.0	1.32	2.1	25.0	1.47	16.3 <sup>a</sup>	
a)Tärkkelyspohjainen	13.2	0.60	22.6	19.2	N/A	81.4 <sup>a</sup>	[47]
+juutti 10 %	17.9	1.09	7.7	28.4	N/A	15.7 <sup>a</sup>	
+juutti 20 %	20.4	1.69	3.2	31.0	N/A	11.4 <sup>a</sup>	
+juutti 30 %	22.2	2.47	1.8	36.4	N/A	10.5 <sup>a</sup>	
b) PLA-kuitukangas	30.1	3.82	0.83	N/A	N/A	24.4 <sup>b</sup>	[50]
+puuvilla 40 % MD	41.2	4.24	3.07	N/A	N/A	28.7 <sup>b</sup>	
CD	26.1	3.49	1.93	N/A	N/A	22.9 <sup>b</sup>	
+kenaf 40 % MD	52.9	7.14	1.05	N/A	N/A	9.0 <sup>b</sup>	
CD	24.1	4.25	0.76	N/A	N/A	6.9 <sup>b</sup>	
+hamppu 40 % MD	57.5	8.06	1.24	N/A	N/A	9.5 <sup>b</sup>	
CD	28.9	4.24	1.09	N/A	N/A	7.9 <sup>b</sup>	
+hamppu+kenaf MD	61.0	7.76	1.22	N/A	N/A	11.8 <sup>b</sup>	
20 % + 20 % CD	34.4	4.92	0.97	N/A	N/A	8.5 <sup>b</sup>	
b) PLA-kuitukangas	52	3.4	N/A	96	3.2	17 <sup>b</sup>	[56]
+kenaf 40 % MD	82	7.6	N/A	126	6.9	14 <sup>b</sup>	
PHB-kalvo	22	2.2	N/A	43	1.6	5 <sup>b</sup>	
+kenaf 40 % MD	70	6.1	N/A	126	6.9	10 <sup>b</sup>	
c) PLA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	[59]
+10 % pellava	42.7	3.90	N/A	N/A	N/A	9.97 <sup>b</sup>	
+20 % pellava	49.2	5.06	N/A	N/A	N/A	10.5 <sup>b</sup>	
+30 % pellava	54.2	6.31	N/A	N/A	N/A	11.1 <sup>b</sup>	

Taulukon arvot on pyöristetty kolmen numeron tarkkuuteen ja keskihajonnat jätetty pois yksinkertaistuksen vuoksi. a=lovettu; b=loveamaton.

Taulukosta 4.1 nähdään, että biomuovien vetolujuusominaisuudet ja jäykkyys (Youngin moduuli) kohenevat luonnonkuitulujitteilla ja lujitemäärän kasvaessa riippumatta siitä ovatko komposiitit ruiskuvalettu vai puristusmuovattu. Iskulujuusarvot sen sijaan eivät kasva suurimmalla osalla lujitetuista kappaleista verrattuna puhtaaseen matriisimateriaaliin, vaikka lujitemäärän lisäys joissakin tapauksissa kohentaakin iskulu-

juusarvoja. Kuitukangaskomposiittien tuloksista on havaittavissa paremmat mekaaniset ominaisuudet karstaussuuntaan kuin poikkisuuntaan nähden.

Tyypillisesti eri prosessointimenetelmillä valmistettujen komposiittien mekaaniset ominaisuudetkin ovat erilaiset. Lanzillotta *et al.* havaitsivat tutkimuksessaan, että puristusmuovatuilla pellava/PLA-komposiiteilla oli korkeampi lujuus kuin vastaavilla ruiskuvaletuilla komposiiteilla. Tämän katsottiin johtuvan siitä, että puristusmuovauksessa kuitupituudet olivat suuremmat (14 mm) kuin ruiskuvaluprosessissa, jossa kuidut katkeilivat paljon lyhyemmiksi (0.3 - 0.4 mm). Puristusmuovattujen näytteiden jäykkyys oli kuitenkin pienempi kuin ruiskuvaletuilla kappaleilla, mikä saattoi johtua huokosista kuitujen ja matriisin rajapinnalla. [21, s. 139, katso 67.] Puristusmuovauksen parametrien vaikutuksia komposiitin ominaisuuksiin tarkastellaan luvun 6.1.3 yhteydessä.

### 4.3.2 Pitkäaikaisominaisuudet

Ympäristönäkökulmaa ajatellen materiaalien biohajoavuus nähdään usein positiivisena ominaisuutena. Biohajoavan muovimatriisin avulla luonnonkuitukomposiitista on mahdollista saada täysin biohajoava tuote, jolloin voidaan vähentää jätteiden määrää, säästää raakaöljypohjaisia materiaaleja ja samalla suojella ilmastoa hiilidioksidipäästöjen vähentyessä [68, s. 188]. Tuotteiden hallitsematon tai liian aikainen hajoaminen on kuitenkin ongelma pitkäikäisyyttä vaativissa käyttökohteissa. Biokomposiittien biohajoamisnopeus riippuu monista tekijöistä, kuten kuitupitoisuudesta, kummankin komponentin biohajoavuudesta sekä kuitujen ja matriisin rajapinnan laadusta. Heikosta adheesiosta seuraava huokoisuus voi johtaa tehostuneeseen vedenottoon ja nopeampaan biohajoamiseen. [21, s. 145.]

Biokomposiittien biohajoamista on tutkittu varsin rajoitetusti. Yleensä komposiittien biohajoavuutta testataan maaperässä ja biohajoavuus määritellään massan menetyksen perusteella eri standardien mukaisesti [46]. Scaffaro *et al.* [69] ovat tarkastelleet Mater-Bi/puujauho-komposiittien massanmenetyksnopeutta jätevesilietteessä. Tutkimuksessa havaittiin, että puujauhoa sisältäneet komposiitit biohajosivat nopeammin kuin pelkkä Mater-Bi. Syynä pidettiin puukuitujen kykyä toimia bakteerikasvun tukena ja matriisin ja täyteaineen rajapinnalla olleita virheitä ja huokosia.

Liu *et al.* [70] ovat puolestaan tutkineet puristusmuovattujen juutti/PBS-komposiittien biohajoavuutta ja pintakäsittelyiden vaikutusta biohajoavuuteen; juuttia käytettiin lujitemuodossa bulkkikuituna, kuitukankaina ja kudottuina kankaina. Tutkimuksessa havaittiin, että pienemmän kuituhalkaisijan komposiiteilla massanmenetys 180 päivän aikana kompostimaaperässä oli vähäisempää kuin suuremman kuituhalkaisijan komposiiteilla. Myös lujitekuidun muodolla oli merkitystä: massanmenetys oli suurimmillaan, kun lujite oli kudottuna kankaana ja pienimmillään, kun lujite oli bulkkikuituna. Suurimpia syitä tähän olivat bulkkikuitujen tasainen jakautuminen komposiitissa sekä kuitujen ja matriisin rajapintojen hyvä yhteensopivuus, mikä paransi komposiitin kykyä vastustaa ympäristön hyökkäyksiä. Pintakäsittelytulosten perusteella komposiittien massanmenetyksen järjestys suurimmasta pienimpään oli: PBS/käsittelemätön juutti, PBS/alkalikäsitelty juutti ja PBS/kytkentäaineella käsitelty juutti. Tutkimuksessa to-

dettiin, että juuttikuidun hydrofiilinen luonne heikentyi pintakäsittelyiden tuloksena ja samalla yhteensopivuus hydrofobisen PBS-matriisin kanssa parantui, mikä johti pienempään massanmenetykseen. [70.]

Kemialliset käsittelyt voivatkin siten olla tarpeen pitkäikäisten luonnonkuitukomposiittien aikaansaamiseksi. Luonnonkuitujen suojaaminen (kapselointi) ympäristöä kestäväällä polymeerimatriisilla yleensä vähentää biohajoamista, mutta ei kuitenkaan tee komposiitista täysin kestäväää ympäristötekijöitä kohtaan. Luonnonkuitujen biohajoamistaipumusta on mahdollista vähentää esimerkiksi asetyloinnilla, furfuryylialkoholikäsittelyllä tai lämpökäsittelyllä. [23, s. 443-444.]

Luonnonkuitukomposiittien pitkäaikaisominaisuuksien rajoitukset tulevat erityisesti vastaan ulkoilmaolosuhteissa, joissa komposiitit altistuvat erilaisille ympäristötekijöille, jotka vanhentavat komposiittia ja vaikuttavat negatiivisesti luonnonkuitukomposiittien ominaisuuksiin ja käyttöikään. Ulkoilmassa materiaalit altistuvat bakteerien ja muiden mikro-organismien lisäksi muun muassa auringon ultraviolettisäteilylle, lämpötilanvaihteluille, tuulelle, sateelle ja lumelle.

UV-säteily usein aiheuttaa komposiittien haalistumista, värimuutoksia, pinnan eroosiota ja kiillon katoamista, jotka vähentävät tuotteen käyttöikää. Lisäksi pitkittynyt UV-säteily voi johtaa murtuman kehittymiseen tuotteessa ja saada materiaalin alttiimmaksi muille vanhentaville ympäristötekijöille. Ympäristön olosuhteiden yhteisvaikutuksella on yleensä negatiivisempi vaikutus ominaisuuksiin kuin yksittäisillä tekijöillä. On esimerkiksi havaittu, että veden absorptio ja UV-säteily yhdessä laskevat puumuovikomposiittien mekaanisia ominaisuuksia enemmän kuin pelkkä ultraviolettisäteilyaltistus. [71, s. 472-473, 498.]

Luonnonkuitukomposiittien altistuminen ympäristön kosteudelle voi aiheuttaa monia ongelmia. Hydrofiiliset luonnonkuidut imevät kosteutta ja komposiitteihin päätyvä vesi voi toimia pehmittimenä ja siten sekä vaikuttaa komposiitin mittapysyvyyteen että heikentää komposiitin mekaanisia ominaisuuksia. Yleensä biokomposiittien mekaaniset ominaisuudet heikkenevät, kun veden absorptio kasvaa. Moduulin lasku voi kuitenkin olla vähemmän selkeää suurilla kuitupitoisuuksilla johtuen veden aiheuttaman matriisin pehmenemisen ja kuitujen lujittavuuden vastustavista vaikutuksista. [21, s. 144-145.] Veden absorptiosta johtuva kuitujen turpoaminen tai veden kulkeutuminen hydrofiilisen biopolymeerin läpi voi heikentää kuidun ja matriisin rajapintasitoutumista, millä puolestaan on negatiivinen vaikutus komposiitin lopulliseen lujuuteen. Turpoaminen voi lisäksi johtaa komposiitin mittasuhteiden muutoksiin erityisesti kuitupaksuuden suunnassa. Luonnonkuitulujitteita käytettäessä veden absorptio onkin otettava erityisesti huomioon, sillä esimerkiksi pellava absorboi melko suuria määriä vettä. Kuitujen ja/tai matriisin hydrofiilisyys vaikuttaa komposiitin kestävyuden lisäksi myös sen prosessoitavuuteen: materiaaliin absorboitunut vesi vapautuu korkeissa prosessointilämpötiloissa vesihöyryinä ja aikaansaa rakenteeseen huokosia. Huokokset voivat toimia jännityskeskittymäpisteinä ja voivat johtaa komposiitin ennen aikaiseen murtumiseen kuormituksen aikana. [7, s. 71; 15.] Hyvä kuitujen ja matriisin välinen adheesio yleensä alentaa rajapinnan ve-



denabsorption määrää ja nopeutta. Kuitujen vesiabsorptiotaipumusta voidaan vähentää esimerkiksi kuidussa olevien hydroksyyliyhymien asetyloinnilla. [65, s. 260.]

Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että pitkäaikaisominaisuudet ovat kriittisiä luonnonkuitukomposiittien käytettävyyden kannalta. Kosteuden absorptio on yksi suurimmista ongelmista komposiittien ulkoilmasovelluksissa. Vaikka kosteuden absorptiota ja biohajoamistaipumusta voidaan vähentää erilaisilla kuitujen pintakäsittelymenetelmillä, tarvitaan komposiittien pitkäaikaisominaisuuksien kohentamiseksi yhä tutkimuksia ja kehitystä.

### 4.3.3 Eristysominaisuudet

Luonnonkuitujen eduksi luetaan edullisuuden ja keveyden lisäksi hyvät ääni- ja lämmöneristysominaisuudet, jotka ovat tärkeitä esimerkiksi auto- ja rakennusteollisuuden sovelluksissa, erityisesti levymaisilla kappaleilla. Orgaanisilla materiaaleilla on tyypillisesti hyvät äänenabsorptio-ominaisuudet, mutta eristysominaisuudet riippuvat kuitenkin aina materiaalin rakenteesta ja tiheydestä [72]. Oldham *et al.* [73] ovat todenneet, että lupaavimpina huokoisina äänenabsorboijina pidetään sellaisia luonnonkuituja, joiden keskimääräinen halkaisija on pieni, ja jotka pakkautuvat helposti yhteen muodostaen tiiviin rakenteen. Erityisesti pellava ja rami ovat tehokkaita äänen korkeiden taajuuksien absorboijia, kun taas esimerkiksi sisal-kuidut soveltuvat heikommin vaimennusmateriaaleiksi karkeutensa ja huonon pakkautuvuutensa vuoksi. [73.] Lämmöneristysominaisuuksiltaan eri luonnonkuitueristeiden (hamppu-, juutti- ja pellavapohjaiset eristeet) on todettu olevan vertailukelpoisia perinteisiin eristyslevyihin (mineraalivilla, polystyreeni, polyuretaani) nähden [72].

Luonnonkuitujen eristekäytössä on kuitenkin omat haasteensa. Kokonaissuorituskyvyn arvioimiseksi tulee ottaa huomioon luonnonkuitujen kosteuserkkyys sekä pitkäaikais- ja palonkesto. Selluloosapitoiset lujitemateriaalit voivat kastuessaan altistua sieni-kasvustolle tai mikro-organismien hyökkäyksille, mikä voi estää käytön joissakin ympäristöissä. Ongelmia kosteuden kanssa ei kuitenkaan pitäisi ilmetä, jos rakennukset on huolellisesti suunniteltu. Luonnonkuitujen palonkesto on myös heikko, joten paloturvallisuuden parantamiseksi kuidut on yleensä käsiteltävä palonestoaineilla tai vaihtoehtoisesti luonnonkuitueristeet on asennettava paloturvallisten rakenteiden sisään. Äänieristetarkoituksissa käytettäviin luonnonkuituihin tarvitaan myös sopivia sidosaineita, jotka pitävät rakenteen koossa ja materiaalin pakkautuneessa muodossa. [72; 73.]

Thilagavathi *et al.* [74] ovat tarkastelleet polypropeenista ja bambu-, banaani- ja juuttikuiduista valmistettujen kuitukankaiden ääni- ja lämmöneristysominaisuuksia. Ääniabsorptiotestissä parhaiten pärjäivät bambu/PP-kuitukankaat, joiden ääniabsorptioprosentti oli pääsääntöisesti suurempi kaikilla tutkituilla taajuuksialueilla (800, 1000, 1250 ja 1600 Hz). Yli 800 Hz taajuuksilla millään kuitukankaalla ei kuitenkaan saavutettu asetettuja tavoiteabsorptiotasoja: absorptioprosenttia voidaan kuitenkin kasvattaa kasvattamalla kuitukankaiden paksuutta. 1600 Hz:ssä akustinen suorituskyky laski kaikilla kuitukankailla. Lämmöneristetarkoituksiin soveltuisivat materiaaleista parhaiten banaani/PP-kuitukankaat, joiden lämmönjohtavuus oli testimateriaaleista matalin. Ky-

seisen komposiittimateriaalin matala lämmönjohtavuus saattoi johtua kuitukankaiden suuremmasta paksuudesta. [74.]

#### 4.3.4 Ympäristöystävällisyys

Luonnonkuitukomposiittien käytön kannustimet ovat yleisesti ottaen joko ympäristö- tai kustannusperäisiä. Luonnonkuitukomposiittien onkin väitetty tarjoavan monia ympäristöetuja perinteisiin synteettisiin komposiittivastineisiinsa nähden. Etuihin kuuluvat pienentynyt riippuvuus uusiutumattomiin energia- tai materiaalivaroihin, pienemmät saaste- ja kasvihuonepäästöt, sekä parantunut energian talteenotto poltettaessa tuote käytön jälkeen [75]. Kestomuovipohjaisten luonnonkuitukomposiittien ympäristöystävällisyyttä verrataan tyypillisesti lasikuitukomposiitteihin, ja erityisesti luonnonkuitujen tuotannon pienempi energiantarve luetaan eduksi lasikuituihin nähden. Eräässä tutkimuksessa on todettu, että polypropeenipohjaisen hammppukuitumaton (kuitupitoisuus 65 %) vaatima energiankulutus koko eliniän ajalta vastaa vain noin 37 % kestumovipohjaisen lasikuitumaton (kuitupitoisuus 30 %) energiankulutuksesta [76]. Luonnonkuitukomposiittien on lisäksi todettu olevan todennäköisesti lasikuitukomposiitteja ympäristöystävällisempiä seuraavien seikkojen osalta [44, s. 388; 75]:

- Luonnonkuitujen tuotannosta seuraa vähemmän ympäristövaikutuksia kuin lasikuitujen tuotannosta
- Luonnonkuitukomposiiteissa on tyypillisesti suurempi kuitupitoisuus kuin lasikuitukomposiiteissa saman suorituskyvyn aikaansaamiseksi: tämä vähentää saastuttavamman (raakaöljypohjaisen) matriisipolymeerin pitoisuutta komposiitissa
- Kevyet luonnonkuitukomposiitit parantavat polttoainetehokkuutta ja vähentävät päästöjä erityisesti autoteollisuuden sovelluksissa
- Luonnonkuidut voivat hajota luonnollisesti tai ne voidaan polttaa elinikänsä päätteeksi energian tuottamiseksi, mikä helpottaa ongelmia liittyen keinokuitulujitettujen komposiittien kierrätykseen ja hävitykseen.

Täysin biohajoavat komposiitit voitaisiin lisäksi käyttöikänsä päätteeksi kompostoida mahdollisuuksien mukaan, jolloin jätteen määrä vähenisi entisestään. Biomuovista ja luonnonkuiduista valmistettuja biokomposiitteja pidetäänkin yleensä ympäristöystävällisenä vaihtoehtona synteettisestä muovista ja/tai täyteaineista valmistetuille komposiiteille [25, s. 3].

Olemassa on kuitenkin muutamia huomioitavia seikkoja, jotka estävät yksinkertaistetut päätelmät luonnonkuitukomposiittien ekologisesta paremmuudesta. On totta, että luonnonkuidut sitovat hiilidioksidia kasvunsa aikana ja vapauttavat sen jälleen lahotesaan tai polton aikana, minkä ansiosta luonnonkuitujen käyttö ei teoriassa lisää hiilidioksidipäästöjä. Käytännössä ympäristöystävällisyys ei kuitenkaan ole näin yksiselitteistä, sillä kuitujen prosessointi komposiiteissa hyödynnettävään muotoon vaatii energiaa, joka todennäköisesti saadaan fossiilisten polttoaineiden poltosta ja tämä puolestaan aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. [44, s. 388.] Luonnonkuitukomposiitin valmistuksen kokonaisenergiankäyttö riippuu puolestaan vahvasti loppukäyttökohteesta, sen tuotanto-

prosessista, ja tuotteen elinkaaren olosuhteista. Esimerkiksi pitkäkuituisten hampputekstiilien myötävaikutus hiilidioksidipäästöihin riippuu vahvasti kuitujen prosessoinnin tehokkuudesta, kehrulaitteistosta ja lopullisen tuotteen odotettavissa olevasta eliniästä. [5, s. 42.]

Ympäristöön kohdistuvat kokonaisvaikutukset tuleekin arvioida komposiitin koko eliniän ajalta. Luonnonkuitukomposiittien ympäristöedut voivat kadota, jos luonnonkuitukomposiiteilla on selkeästi lyhyempi käyttöikä kuin lasikuitukomposiiteilla. Vaikka lasikuituihin nähden luonnonkuitujen tuotannossa syntyy vähemmän vakavia ympäristövaikutuksia ja luonnonkuitujen käytöllä säästetään uusiutumattomia luonnonvaroja, on luonnonkuitujen viljelyssä käytettyjen lannoitteiden havaittu johtavan korkeampiin nitraatti- ja fosfaattipäästöihin, jotka lisäävät rehevöitymistä paikallisissa vesistöissä. Kuitujen tuotannon voidaan lisäksi ajatella varastavan resursseja maatalouden ruoantuotannolta. [42; 75.]

Luonnonkuitukomposiittien ympäristöystävällisyys onkin näin ollen arvioitava tapauskohtaisesti. Eräässä tutkimusraportissa tarkasteltiin puristusmuovattavien luonnonkuitukomposiittimattojen ja lasikuitumattojen ympäristövaikutuksia elinkaarianalyysin avulla. Raportin lopputuloksista kävi ilmi, etteivät luonnonkuitukomposiitit välttämättä ole ympäristöystävällisiä lasikuitukomposiittien korvaajia sellaisissa sovelluksissa, joissa lujuus ja iskulujuus ovat komposiitin käytön kannalta tärkeimmät ominaisuudet. Syynä tähän ovat torjunta-aineiden ja muiden kemikaalien käyttö pellavakuitujen viljelyn aikana sekä suurempi pellavakuitupitoisuuden tarve komposiitissa lujuuden ja iskulujuuden kriteereiden täyttämiseksi. Autoteollisuuden jäykkyyttä vaativissa sovelluksissa luonnonkuitukomposiittien ympäristövaikutukset todettiin lasikuitukomposiitteja pienemmäksi, mutta tämä johtui pääosin luonnonkuitujen matalammasta tiheydestä, jonka ansiosta polttoaineenkulutus käytön aikana on pienempää, eikä niinkään luonnonkuitujen ekologisuudesta. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että luonnonkuiduilla saavutettavat ympäristöedut ovat merkittäviä silloin, kun luonnonkuitukomposiittien käytöllä saavutetaan painosäästöjä lasikuitukomposiitteihin nähden. [77, s. 2-3.]

#### **4.4 Sovellusesimerkkejä**

Tutkimuksissa on havaittu, että luonnonkuitukomposiittien ominaisuudet painoonsa nähden ovat usein vertailukelpoisia lasikuitukomposiittien vastaavien ominaisuuksien kanssa. Luonnonkuitukomposiiteilla voidaan siis potentiaalisesti korvata lasikuitukomposiitteja erityisesti tuotteissa, joissa materiaalilta ei vaadita korkeaa kuormankantokykyä. [61.] Tänä päivänä luonnonkuiduilla lujitettujen kestomuovien käyttökohteet ovat pääosin autoteollisuuden ja rakennusteollisuuden parissa, mutta olemassa on myös lukuisia erityissovelluksia, joissa materiaalia hyödynnetään. Toistaiseksi suurin osa käytettyjen biokomposiittien matriisimateriaaleista on raakaöljypohjaisia, mutta esimerkiksi autoteollisuudessa on jo kehitteillä biokomposiitteja, joissa luonnonkuidut yhdistetään biopohjaiseen matriisimateriaaliin. [44, s. 390-391.] Suurimmat houkuttimet täysin bio-

hajoavien komposiittien käyttöön ovat niiden ympäristöystävällisyys, hajoavuus ja ympäristön säästäminen [19, s. 94].

#### 4.4.1 Autoteollisuus

Biokomposiitit ovat selkeä kiinnostuksen kohde erilaisissa autoteollisuuden sovelluksissa, koska ympäristöystävällisen mielikuvansa lisäksi luonnonkuituilla on alhainen tiheys ja suotuisat mekaaniset ominaisuudet. Lasikuituihin verrattuna luonnonkuituilla on lisäksi parempi absorbanssi törmäystilanteessa ja paremmat akustiset ja termiset eristysominaisuudet. Luonnonkuitujen matalan tiheyden ansiosta auton massaa voidaan vähentää, mikä vähentää polttoaineenkulutusta ja siitä johtuvia hiilidioksidipäästöjä. Lisäksi luonnonkuitukomposiittien tuotannon energiankulutus on yleensä matalampi kuin lasikuitukomposiiteilla. [9, s. 23; 42; 78, s. 78.]

Autoteollisuuden komposiiteissa käytetään pääsääntöisesti niinikuituja. Esimerkiksi vuonna 2005 luonnonkuituja (pois lukien puukuidut ja puuvilla) käytettiin Saksan autoteollisuuden komposiiteissa 19 000 tonnia. Pellavan osuus käytetyistä kuiduista oli yli 60 %, hamppukuitukimppujen noin 10 %, juutin ja kenafin 11 % ja sisalin noin 7 %. [78, s. 79.] Usein autosovellusten komposiitit on valmistettu kestopuovikuiduista ja luonnonkuiduista koostuvista kuitukankaista [44, s. 390]. Esimerkiksi EcoCor (Johnson Controls Inc.) on autoteollisuuden sovelluksissa hyödynnettävä muovattava matto, joka koostuu polypropeenista sekä niinikuiduista (pellava, hamppu, kenaf). Luonnonkuitupitoisuus matossa on 50 %. Matosta voidaan puristusmuovata esimerkiksi autojen istuimien selkänojien paneeleita. [79.]

Käytännössä kaikki suuret ajoneuvojen valmistajat hyödyntävät luonnonkuitukomposiitteja erityisesti henkilöautojen sisäosien rakenteissa ja kuorma-autojen hyttien vuorauksessa. Sovelluskohteisiin kuuluvat esimerkiksi ovipaneelien verhoilu, istuimien selkänojien verhoilu ja pehmikkeet, niskatuet, hattuhyllyt, kattoluukkujen sisäsuojukset ja käsinojat. Toistaiseksi harva autojen ulkoisista osista kuitenkaan valmistetaan luonnonkuitukomposiiteista. [5, s. 42-43; 42; 65, s. 256-257.] Syynä tähän on luonnonkuitukomposiittien heikot pitkäaikaisominaisuudet: luonnonkuitukomposiitit imevät ulkoilmaolosuhteissa kosteutta, josta seuraa mittasuhteiden muutoksia ja ominaisuuksien heikkenemistä. Autojen ulkoisiin osiin soveltuvia luonnonkuitukomposiitteja pyritään kuitenkin kehittämään ja muutamia esimerkkisovelluksiakin on jo olemassa. Esimerkiksi abaca-kuituja on käytetty auton ulkoisen aluslattian paneeleissa. Lisäksi Mercedes-Benz on hyödyntänyt pellavakuituja joidenkin automalliensa ulkoisissa osissa. [65, s. 259-260.]

Tutkimus- ja kehityssaavutusten myötä ympäristöä säästävien materiaalien hyödyntämisen ei välttämättä tarvitse rajoittua vain henkilöautojen ja rekkujen sisäosien rakenteisiin. Esimerkiksi Warwickin yliopisto (University of Warwick) on kehittänyt biopohjaisen kilpa-auton nimeltä *WorldFirst Formula 3 racing car*. Se on ensimmäinen Formula 3 -kilpa-auto, joka on valmistettu ympäristöä säästävistä ja uusiutuvista materiaaleista. Auton biopohjaisiin komponentteihin kuuluvat muun muassa porkkanoista ja muista juureksista johdettu rattimateriaali, istuin, joka koostuu pellavakuitu/soijaöljy-

vaahdosta ja biodiesel-moottori, joka on suunniteltu käymään jätesuklaasta ja kasviöljystä johdetulla polttoaineella. [80.] Myös Suomessa biomateriaalien hyödyntämistä autoteollisuudessa on innovoitu: UPM ja Metropolia-ammattikorkeakoulu ovat kehittäneet yhdessä *Biofore*-konseptiauton, jossa valtaosa muovista valmistetuista osista (muun muassa matkustamon lattia, keskikonsoli, keulan maski, sivuhelmat, kojetaulu, ovi-paneelit) on korvattu puupohjaisilla biomateriaaleilla. Lisäksi auto käy puupohjaisella uusiutuvalla dieselillä. [81.] Voidaankin katsoa, että tämänkaltaiset uudet biopohjaisten materiaalien innovaatiot voivat tulevaisuudessa tuoda mukanaan mitä monimuotoisimpia mahdollisuuksia autoteollisuuden saralla.

#### 4.4.2 Rakennusteollisuus

Autoteollisuuden lisäksi luonnonkuitukomposiittien toinen pääsovellusalue on rakennusteollisuus, jossa hyödynnetään erityisesti ekstruusiolla valmistettuja puumuovikomposiitteja erimuotoisina profiileina [44, s. 389]. Puumuovikomposiiteissa muovi on yleensä valtamuovia, kuten polypropeenä tai polyeteeniä, eivätkä komposiitit siten ole täysin biohajoavia. Euroopassa puumuovikomposiitteja käytetään esimerkiksi ikkunoiden karmissa, aitauksissa, ovissa, julkisivupaneeleissa, ja terassilautoissa. Puumuovikomposiitit voidaan valmistaa esimerkiksi puujätteestä ja kierrätetyistä muoveista, mikä antaa tuotteille ympäristöetuja perinteisiin muovituotteisiin nähden. [82, s. 29.] Suomessa puumuovikomposiitteja valmistaa esimerkiksi UPM, jonka tuotteisiin kuuluvat prosessien sivutuotteiden materiaaleista valmistetut ProFi Deck -terassilaudat [83].

Erääksi puumuovikomposiittien heikkoudeksi luetaan toisinaan niiden suhteellisen korkea tiheys: tyypillisen puumuovikomposiitin tiheys on esimerkiksi noin 2.5 kertaa suurempi kuin kuusen tiheys. Tiheyttä on kuitenkin mahdollista alentaa solustuksella, mikä voi myös luoda puumuovikomposiiteille uusia sovellusalueita, joissa vaaditaan keveyttä tai korkeampaa ominaisjäykkyyttä. [44, s. 392.] Solustettuja biokomposiitteja onkin tutkittu rakennusten eristyssovelluksia silmällä pitäen [25, s. 7].

Puumuovikomposiittisovellusten lisäksi muita biokomposiitteja voidaan mahdollisuuksien mukaan käyttää betonilautoituksissa, rakennustelineissä, kaiteissa, aidoissa, kehystyksissä, seinissä ja sisustuslevyissä, ikkunankarmissa, ovissa, lattioissa sekä koriste- ja kattopaneeleissa. Eräs mielenkiintoinen sovelluskohde biokomposiiteille olisi väliaikaisten asuntojen rakentaminen maanjäristysten, hurrikaanien tai muiden katastrofien runtelemille seuduille. Jos biokomposiitti olisi valmistettu kompostoituvista materiaaleista, voitaisiin asuntojen purkujäte kompostoida, kun tilanne seuduilla normalisoituu. Tällä tavoin voitaisiin välttää purkujätteen päätyminen kaatopaikoille. [25, s. 7-8.]

Nykyään biokomposiittien käyttö rakennusteollisuudessa on kuitenkin rajoittunut eirakenteellisiin sovelluksiin. Syitä tähän ovat kuitujen synnynnäiset riittämättömät lujuusominaisuudet ja komposiitin kuituarkkitehtuuri (kuitujen pituus-halkaisija-suhde, orientaatio ja pitoisuus komposiitissa). Keinotekoisten kuitujen ominaisuudet ovat yleensä yhtenäiset, kun taas luonnonkuitujen rakenne ja morfologia ovat heterogeenisiä ja epäsäännöllisiä. Luonnonkuitujen synnynnäiset ja prosessoinnin aikana syntyvät virheet alentavat kuitujen lujuusominaisuuksia ja voivat johtaa mikroskooppisiin murtu-

miin, kun kuituja käytetään komposiittien lujitteina. Lisäksi luonnonkuitukomposiitit koostuvat tyypillisesti satunnaisesti orientoituneista katkokuiduista, minkä vuoksi ne soveltuvat heikosti lujuutta vaativiin sovelluskohteisiin. Oman ongelmansa muodostaa myös jo aiemmin mainittu luonnonkuitujen taipumus absorboida vettä komposiitin käyttöön aikana, millä on yleensä negatiivinen vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin. Biokomposiittien parissa tehdään kuitenkin työtä rajoitteiden voittamiseksi, jotta käyttökohdeet saataisiin laajennettua myös rakenteellisiin osiin, kuten palkkeihin ja pylväisiin. [25, s. 9; 44, s. 391-392]

#### **4.4.3 Täysin biopohjaisten komposiittien sovellukset**

Täysin biopohjaiset komposiitit voivat tulevaisuudessa vallata markkinoita monilla sovellusaloilla ympäristöystävällisen mielikuvansa ansiosta. Tämänkaltaiset biokomposiitit voisivat olla ratkaisu sekä kasvavaan ympäristöuhkaan että raakaöljyn epävarmaan saatavuuteen [65, s. 261]. On kuitenkin huomioitava, että kaikki biopohjaiset komposiitit eivät ole biohajoavia. Biohajoavuus ei kuitenkaan ole aina biokomposiitin välttämätön vaatimus, koska esimerkiksi pitkäikäisissä rakennussovelluksissa tuotteen kestävyys on tärkeää [42].

Taulukkoon 4.2 on koottu tällä hetkellä kaupallisesti saatavilla olevia biopohjaisia (ja biohajoavia) komposiitteja ja niiden mahdollisia sovelluskohteita. Biohajoavia komposiitteja voidaan käyttää esimerkiksi massatuotetuissa lyhytikäisissä kulutustavaroissa tai tuotteissa, joita on tarkoitus käyttää vain kerran ennen hävitystä. Käyttökohteena voivat olla myös sisätilojen sovellukset, joiden odotettu elinikä voi olla useita vuosia. [19, s. 94.] Perinteisten komposiittien korvaaminen biohajoavilla vastineillaan vaatii kuitenkin yhä tutkimusta ja kehitystä. Haasteena on suunnitella sellaisia materiaaleja, jotka ovat rakenteellisesti ja toiminnallisesti vakaita varastoinnin ja käytön aikana, mutta jotka hajoavat mikrobien tai ympäristön vaikutuksesta hävityksen yhteydessä ja ilman merkittäviä ympäristövaikutuksia. [9, s. 22-23.]

**Taulukko 4.2.** Esimerkkejä biohajoavien komposiittien kaupallisista nimistä ja sovel-  
luskohteista [42].

Tuotenimi ja materiaali	Yritys	Sovelluskohde	Lähde
Woodcast® -Puu + biohajoava muovi	Onbone Oy (Suomi)	Työstettävä kipsausmateriaali	[84]
GreenLine -Pellava/hamppu + PLA	Jakob Winter (Saksa)	Kevyet paneelit huonekalusovelluksiin, tuolinistuimien kuoret, tuhkauurnat	[85]
Fibrolon® (F-laadut) -Puu + PLA	FKuR (Saksa)	Autojen sisäosien sovellukset, ruumisar- kut, tuhkauurnat; ruiskuvalettavat mo- nimutkaiset komponentit, ekstruusiolla valmistettavat profiilit, paneelit	[86]
Kareline® PLMS -Luonnonkuitu + PLA	Kareline (Suomi)	Kompostoituvat tuotteet, hautausmaa- tuotteet, kertakäyttöpakkaukset ja -astiat	[87]
P021J, P023J -Luonnonkuitu + PLA	GreenGran (Saksa)	Lelut, kulutusartikkelit, konstruktioso- vellukset, jäykät pakkausmateriaalit	[88]
BioFibra® -Puu + biomuovi BioCérès® -Vehnäjauho + biomuovi	FuturaMat (Ranska)	Puutarhanhoidon sovellukset, pakkauk- set, kertakäyttöiset tekniset osat	[89]

Kestomuovipohjaisia biokomposiitteja voidaan käyttää muun muassa leluissa, hau-  
tausmaatarvikkeissa, pakkauslaatikoissa, soittimissa ja sähkölaitteiden suojuksissa.  
Esimerkki viimeisestä on kenaf-kuiduilla lujitetun PLA:n käyttö matkapuhelimessa  
(NEC Corporation), jossa komposiitin biopohjaisen materiaalin pitoisuus on noin 90 %.  
[42.] Biohajoavista lignoselluloosakuiduista ja biopolymeereistä valmistettuja kom-  
posiitteja on käytetty autoteollisuuden kulkuneuvoissa, rakennusteollisuudessa (hurri-  
kaanin kestävät asunnot ja rakenteet erityisesti Yhdysvalloissa) ja eristyspaneelissa,  
sekä erikoistekstiileissä (geotekstiilit ja kuitukangastekstiilit). Eri tutkimuksissa on  
myös valmistettu biohajoavia kattopaneeleita, kosmeettisia pakkauksia, ruokailuvälinei-  
tä ja huonekaluja. [46.]

Myös biopohjaisten kuitukangaskomposiittien mahdollisia sovelluskohteita on arvi-  
oitu eri tutkimuksissa. Lee *et al.* [55] arvioivat tutkimuksessaan, että puristusmuovattuja  
silaanikäsiteltyjä PLA/kenaf-komposiitteja (50 painoprosenttia kenafia) voidaan hyö-  
dyntää autojen sisäkattojen valmistuksessa. Graupner *et al.* [50] tulivat tutkimuksessaan  
siihen johtopäätökseen, että kenaf- ja hampukkuitulujitettuja PLA-komposiitteja voitai-  
siin korkean vetolujuutensa ja jäykkyytensä ansiosta käyttää esimerkiksi huonekaluissa  
ja laudoituksissa, joissa ei vaadita korkeaa iskulujuutta. Puuvilla/PLA-komposiitit voi-  
sivat hyvän iskulujuutensa ansiosta soveltaa käytettäväksi autojen sisäosien komponent-  
teissa ja suojakypärissä. Lisäksi toisessa tutkimuksessa Graupner & Müssig [56] ovat  
lukeneet kenaf/PLA- ja kenaf/PHB-komposiittien mahdollisiin käyttökohteisiin autojen  
sisäosien sovellusten lisäksi myös mekaanisilta ominaisuuksiltaan vaativimmat raken-  
nelmat, kuten huonekalut, lelut tai sähkölaitteiden kotelot. PLA- ja PHB-komposiittien  
syttyvyys ja heikko lämpötilan- ja säänkesto ovat kuitenkin ongelmia, jotka tulee

ratkaista ennen kuin materiaaleja voidaan käyttää laajemmin ulkoilmasovelluksissa, kuten autojen ulkoisissa osissa tai tuulivoimateollisuudessa. [56.]

Edellä mainittujen lukuisten sovellusten lisäksi biopohjaisten materiaalien kehitys voi tulevaisuudessa tuoda mukanaan myös uusia innovaatioita. Tänä päivänä biomuovimatriisipohjaisten luonnonkuitukomposiittien laajamittainen kaupallistaminen on kuitenkin yhä lastenkengissä verrattuna laajemmin käytettäviin raakaöljypohjaisiin biokomposiitteihin. Syynä tähän on pääasiassa biopohjaisten matriisimateriaalien kalleus verrattuna perinteisiin valtamuoveihin. Biohajoavien polymeerien hinta on vähitellen laskemassa niiden käytön lisääntyessä, mutta käytön on kasvettava yhä enemmän, jotta saavutettaisiin kilpailukykyiset hinnat perinteisiin muoveihin nähden. Hinnan lisäksi biohajoavien komposiittien käytön rajoitteena voidaan pitää mahdollisia adheesio- ja sekoittuvuusongelmia luonnonkuitujen ja matriisimateriaalin kanssa. Vaikka luonnonkuitujen adheesio biohajoavaan hydrofiiliseen polymeerimatriisiin voi olla jopa parempi kuin polyolefiineihin, on luonnonkuitujen ominaisuuksia kuitenkin joskus parannettava kemiallisilla käsittelyillä (asetylointi, alkali-, silaani- tai maleiininhydridikäsittelyt). Teollisuuden sovellusten kannalta tämänkaltaiset kemialliset käsittelyt ovat hankalia ja kalliita, ja siksi niitä kannattaakin käyttää vain erityistapauksissa. [38.]

Edellä mainittujen rajoitteiden lisäksi monet biohajoaviin komposiitteihin liittyvät tekniikat ovat edelleen tutkimus- ja kehitystasella huolimatta siitä, että ympäristöystävälliset biohajoavat komposiitit antavat suunnittelijoille uusia mahdollisuuksia täyttää haastavia vaatimuksia (vesi- ja maaympäristöt, kompostoituvat pakkaukset). Biohajoavien komposiittien laajamittaisen kaupallistamisen avainasemassa voikin tulevaisuudessa olla nopeiden ja tehokkaiden prosessointimenetelmien kehittäminen ja käyttöönotto. [42; 46.]



## 5 MUOVIEIN KUIDUTUS

Muovien kuidutus (tai kehruu/kehräys) on tapahtuma, jossa muovigranulaatit muunnetaan kuitumaiseen muotoon. Tässä luvussa käydään läpi muovin kuidunvalmistuksen edellytyksiä, biohajoavien muovikuitujen materiaaleja ja tavallisimmat kuidutusmenetelmät.

### 5.1 Muovien kuidutettavuus

Muovin kuidunmuodostuksen kannalta tärkeä ominaisuus on muovin kuidutettavuus (tai kehrättävyys; *spinnability*). Polymeeriä voidaan pitää kuidutettavana, jos se: on kemiallisesti ja termisesti vakaa kuidutusolosuhteissa; kykenee tuottamaan katkeamattoman nestevirtauksen tai puolijähmeitä kuituja; ja voidaan helposti muuttaa kiinteäksi polymeeriksi. Kuidutettavuus on välttämätön, mutta ei riittävä edellytys kuitujen valmistukselle. Monet kehräytyvät nesteet, kuten öljy, eivät muodosta kuitua. Kuitua muodostaville materiaaleille on olemassa myös kuidutettavuusrajoituksia liittyen muun muassa nesteiden viskositeettiin. Jos kuidutettavan nesteen viskositeetti on liian matala, eli sulamislämpötila on liian korkea tai liuos on liian laimea, neste ekstrudoituu yksittäisinä pisaroina. Toisaalta liian korkea viskositeetti voi aiheuttaa koheesiomurtumia kuituun. [90, s. 396.]

Lopullisen kuidun ominaisuudet ovat monien tekijöiden summa. Esimerkiksi polypropeenikuidun ominaisuuksiin vaikuttavat polypropeenin moolimassajakauma ja homogeenisuus, kuidutuslämpötila, vetosuhde (*draw-down ratio*) ja kelauslaitteen vetonopeus (*take-up velocity*). Polypropeenikuitujen kuidutettavuus yleensä paranee, kun moolimassajakauma kapenee, massa on homogeenisempää, kuidutuslämpötila kasvaa, vetosuhde alenee ja kelauslaitteen vetonopeus laskee. Moolimassajakauman kavetessa kuidun lujuus (*tenacity*) kasvaa ja homogeenisemmän massan tapauksessa ominaisuuksien yhteneväisyys paranee. [91, s. 469.]

### 5.2 Biohajoavat muovikuidut

Perinteiset tekstiiliteollisuudessa paljon käytetyt synteettiset kuidut valmistetaan biohajoamattomista muoveista, kuten polyamidista ja polyesteristä. On kuitenkin mahdollista valmistaa myös biohajoavia muovikuituja. Tutkituin materiaali tällä saralla on polylaktidi, josta on valmistettu kuitua lukuisissa tutkimuksissa erilaisilla kuidutusmenetelmillä [15], ja jota on jo saatavilla myös kaupallisesti kuitumuodossa [92].

PLA:n sulakuidutusta on tutkittu erityisesti lääketieteellisiä sovelluskohteita varten. PLA-kuitujen alhainen sulalujuus, kapea prosessointi-ikkuna, hidas kiteytyminen ja

luontainen hauraus ovat kuitenkin heikkouksia, jotka rajoittavat PLA:n laajamittaista käyttöä. [93.] Polylaktidin hajoamista voi tapahtua sulakuidutuksessa, vaikka käytettäisiinkin kuivaa materiaalia, jonka kosteuspitoisuus on alle 0.005 %. Kuivakuidutuksella valmistetut kuidut sen sijaan hajoavat yleensä vain vähän. PLA-kuidun ominaisuudet ovat vertailukelpoisia PET- ja rayon-kuitujen kanssa, mutta myös kuidutusolosuhteilla on vaikutuksensa kuitujen ominaisuuksiin, kuten vetolujuuteen ja venymään. [28, s. 30.] Katkokuitutarkoituksia varten PLA-kuitu on tavallisesti poikkileikkaukseltaan pyöreä ja saatavilla pituuksilla 5-100 mm ja lineaarisella tiheydellä 1.4–19 dtex [94, s. 319]; dtex-arvo kuvaa kuidun painoa grammoina 10 000 metriä kohti ja on kuidun hienouden mita.

PLA-kuituja voidaan käyttää esimerkiksi vaatetuksessa, kalusteissa, maatalous- ja hygieniatuotteissa sekä monissa lääketieteellisissä sovelluksissa, kuten ompeleissa ja kudosteknologisissa tukirakenteissa (*scaffolds*). PLA soveltuu erinomaisesti lääketieteen sovelluksiin, koska sen hajoamistuotteena oleva maitohappo on täysin bioyhteensopiva ihmiskehon kanssa. [92.] PLA-katkokuiduista valmistetut kuitukankaat soveltuvat hygieniatuotteiden ja lääketieteellisten sovellusten lisäksi tee- ja kahvipusseihin, maatalous- ja puutarhakäyttöön ja geotekstiileihin. PLA-hartsia käytetään jatkuvien kuiturainojen valmistuksessa ja kaksikomponenttikuiduissa. Sähkökuidutettuja PLAnanokuiturainoja on lisäksi ehdotettu materiaaliksi kudosteknologian sovelluksiin. [94, s. 320.]

Muita biomuovikuituja ja niiden valmistusta koskevia julkaisuja on saatavilla rajoitetummin. Esimerkiksi polyhydroksialkanoaatteihin kuuluvan PHB:n ja PHBV:n sulakuidutusta on tutkittu, mutta kaupallisten lajikkeiden laatuvaihtelut (moolimassa, puhtaus) ovat aiheuttaneet ongelmia sulakuidutuksen aikana. Sulakuidutus on yleensä onnistunut vain pienen mittakaavan testeissä erityisten lisäaineiden, epätavallisten menetelmien tai monimutkaisten jälkikäsittelyjen avulla. PHB:lla ja PHBV:lla on melko kapea prosessointi-ikkuna, koska ne hajoavat nopeasti sulalämpötilojensa yläpuolella olevissa lämpötiloissa ja lisäksi niillä on matala sulaelastisuus, hidas kiteytymisnopeus ja ne ovat luontaisesti hauraita. Hufenus *et al.* [93] ovat pyrkineet ratkaisemaan PHB:n ja PHBV:n liittyvät ongelmat kaksikomponenttisten kuitujen avulla; tutkimuksessaan he onnistuivatkin valmistamaan kaksikomponenttista PHBV/PLA-kuitua siten, että kuidun ydin koostui PHBV:sta ja kuoriosasta PLA:sta. PLA-pitoisuus kuidussa kasvatti kuitujen vetolujuutta.

Tärkkelyspohjaisista muovikuduista on olemassa vain vähän julkaisuja. Kuitujen valmistusta on kuitenkin kokeiltu erityisesti kudosteknologian tukirakenteita silmälläpitäen. Sulakuidutettuja tärkkelyspohjaisia kuituja ovat valmistaneet esimerkiksi Gomes *et al.* [95] tärkkelys/PCL- ja tärkkelys/PLA-seoksista, sekä Pavlov *et al.* [96] tärkkelys/eteenivinyylialkoholi-, tärkkelys/PCL- ja tärkkelys/PLA-seoksista. Pavlov *et al.* tutkimuksessa kuidut valmistettiin kapillaarireometrillä sulakuidutusmenetelmää mukailleen. Molemmissa edellä mainituissa tutkimuksissa eri kuitujen halkaisijat olivat suhteellisen suuria; Gomes *et al.* tutkimuksessa kokoluokaltaan noin 150 - 480 mikrometriä ja Pavlov *et al.* tutkimuksessa noin 120 - 500 mikrometriä.

### 5.3 Kuidutusmenetelmät

Muovien kuidutusmenetelmiä on olemassa useita, mutta tavallisimmissa kaupallisissa menetelmissä, eli sula-, kuiva- ja märkäkuidutuksessa, peruseriaate on samanlainen; polymeerisula tai -liuos ekstrudoidaan lukuisia reikiä sisältävän kehrusuulakkeen eli spinneretin (*spinneret*) läpi ja suulakkeesta poistuttuaan filamentit kiinteytetään kuiduksi, joka lopuksi kelataan pyörivän rullan ympärille. [90, s. 393.] Kehruusuulake muistuttaa ulkonäöltään hieman suihkusuiutinta (kuva 5.1).



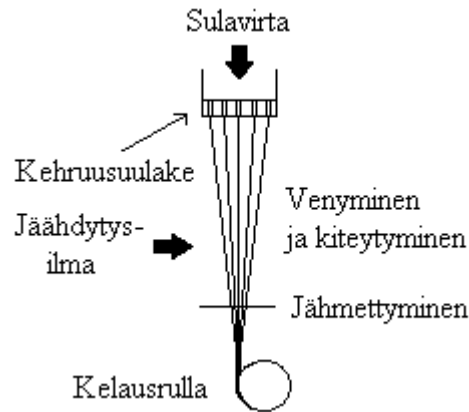
**Kuva 5.1.** Esimerkkejä sulakuidutuksessa käytettävistä kehrusuulakkeista. Tampereen teknillinen yliopisto.

Kiinteytyneet kuidut tyypillisesti venytetään kuiturakenteen vahvistamiseksi kuidutusprosessien aikana tai niiden jälkeen. Venytyksessä polymeeriketjut orientoituvat, jolloin kuidun lujuus, jäykkyys ja mittapysyvyys paranevat. [28, s. 30.] Venytyksen lisäksi kuitujen jälkikäsitteilyihin kuuluvat tarpeen mukaan kuitujen kihartaminen sekä leikkaaminen tai repiminen lyhyemmiksi pätkiksi katkokuitukäyttökohteita varten. Kihartaminen antaa muovikuiduille luonnonkuituja muistuttavan tuntuman ja parantaa myös lämmöneristystä ja elastisuutta [97, s. 56-57].

Seuraavaksi käydään läpi tavallisimmin käytetyt sula-, kuiva-, ja märkäkuidutusmenetelmät. Näiden menetelmien lisäksi olemassa on lukuisia muita vähemmän käytettyjä kuidutusmenetelmiä, joihin kuuluvat muun muassa ilmapäälukitus (*air-gap spinning*) ja nanokuitujen valmistukseen soveltuva sähkökuidutus (*electrospinning*) [92; 98, s. 263].

#### 5.3.1 Sulakuidutus

Sulakuidutus (tai sulakehruu; *melt spinning*) on yleinen synteettisten muovien kuidutusmenetelmä, joka soveltuu termisesti vakaille ja sulaville polymeereille. Tällöin muovi voidaan ekstrudoida sulatilaansa ilman termistä hajoamista. [28, s. 30.] Sulakuidutusprosessin periaate on kuvattu kuvassa 5.2. Sulakuidutusmenetelmässä polymeerigranulaatit syötetään ekstruuderiiin, jossa muovi sulaa ja homogenisoituu. Sula polymeeri ekstrudoidaan kehrusuulakkeen reikien läpi, jonka jälkeen sulat polymeerifilamentit jäädytetään ilmapirtauksen avulla. Kiinteytyneet polymeerikuidut kelataan lopuksi kelaus- eli puolausrullalle. [98, s. 258-259.] Sulakuidutuksessa syntyvän kuiturakenteen määrää kelauskoneen vetonopeus, vetolämpötila ja venytyssuhde (*draw ratio*) [92].

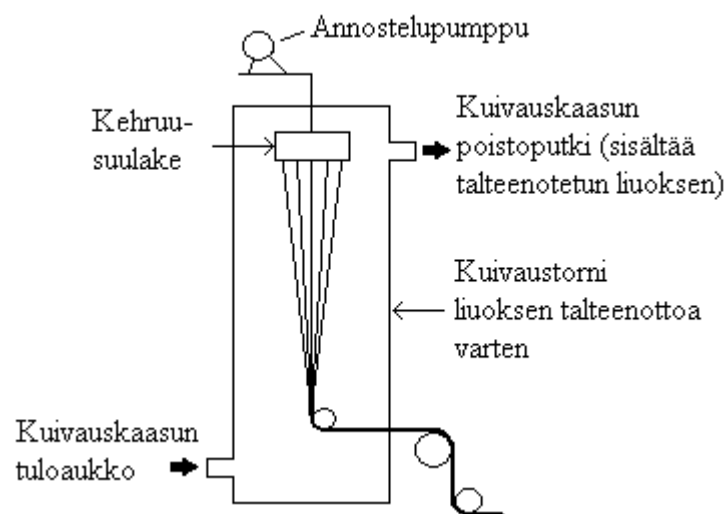


**Kuva 5.2.** Sulakuidutuksen periaate (muokattu lähteestä [98, s. 259]).

Kehruusuulakkeen rei'istä poistuttuaan polymeeriketjut ovat epäjärjestäytyneet, mutta pyörivän kelausrullan voima venyttää ja orientoi kuituja osittain samansuuntaisiksi. Kuitujen venytystä voidaan tehostaa myös erillisellä venytysvaiheella, joka voidaan integroida osaksi sulakuidutusprosessia tai suorittaa kuidutuksen jälkeen. Prosessin aikana tapahtuva venytys voidaan aikaansaada ennen kelausrullaa olevien lämmitettävien välirullien avulla (kuidutus-venytysprosessi). Venytyksessä välirullien lämpötilojen on oltava muovin lasittumislämpötilan yläpuolella. Tyypillisiä sulakuidutuksella valmistettavia polymeerejä ovat polyamidi ja polyesteri. [97, s. 32, 35, 54; 98, s. 258-259]

### 5.3.2 Kuivakuidutus

Kuivakuidutus (tai kuivakehruu; *dry spinning*) on liuoskuidutusmenetelmä. Menetelmä soveltuu polymeereille, joilla ei ole selkeää sulamispistettä, tai jotka hajoavat helposti lämmitettäessä ja jotka liukenevat haihdutettavissa oleviin liuottimiin [98, s. 262]. Kuivakuidutuksen periaatetta on havainnollistettu kuvassa 5.3.



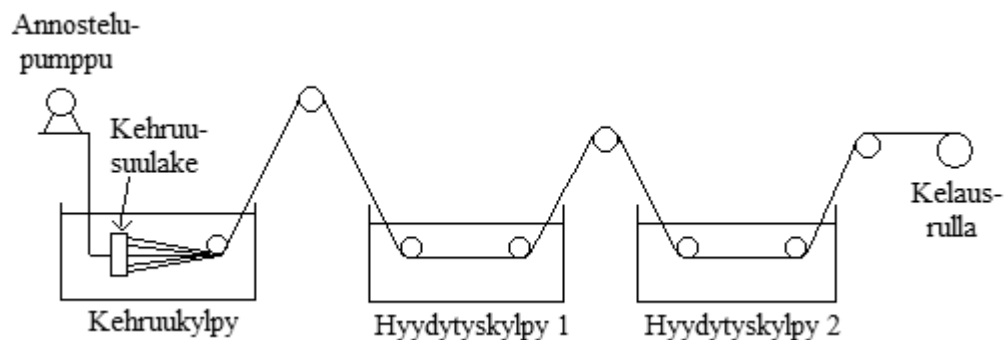
**Kuva 5.3.** Kuivakuidutuksen periaate (muokattu lähteestä [98, s. 262]).

Kuivakuidutuksessa 20–45 painoprosentin polymeeriliuos ekstrudoidaan kehruusuulakkeen läpi [99]. Kehruusuulake on sijoitettuna suljettuun kuivaustorniin tai -tunneliin,

joka sisältää inerttiä kaasua korkeassa lämpötilassa. Lämpötilan vaikutuksesta polymeeriliuoksen liuotin haihtuu ja kuitu kiinteytyy samalla, kun tornista poistuva kuuma kaasu kantaa suurimman osan liuksesta talteen. Kuivakuidutuksella on mahdollista saada korkea tuotantonopeus ja sen etuina märkäkuidutukseen nähden on korkeampi läpikulkevan aineen määrä ja suurempi kelausnopeus. Tyypillisiä kuivakuidutettavia polymeerejä ovat polyakrylonitriili ja polyvinyylidikloridi. [98, s. 262-263.]

### 5.3.3 Märkäkuidutus

Märkäkuidutus (tai märkäkehruu; *wet spinning*) on toinen liuosmenetelmä kuivakuidutuksen lisäksi. Märkäkuidutus soveltuu niille polymeereille, jotka eivät liukene haihdutettavissa olevaan liuottimeen tai hajoavat termisesti sulaessaan. Menetelmä on tyypillisesti hitaampi kuin sula- tai kuivakuidutus. [99.] Lisäksi märkäkuidutus on sulakuidutukseen verrattuna taloudellisesti kannattamattomampi prosessi, koska liuoksen poistaminen filamenteista aiheuttaa lisäkustannuksia [98, s. 261]. Kuvassa 5.4 on havainnollistettu märkäkuidutuksen periaatetta.



**Kuva 5.4.** Märkäkuidutuksen periaate (muokattu lähteestä [98, s. 260]).

Märkäkuidutuksessa 5-25 % polymeeriliuos pakotetaan kehrusuulakkeen reikien läpi kuidutuskylyssä [99]. Kuidutuskylystä poistuttuaan polymeerifilamentit kulkevat hyydytyskylyjen läpi kiinteiden kuitujen aikaansaamiseksi. Polymeeriin alun perin lisätty liuotin poistuu hyydytyskylyissä vastadiffuusion (*counter diffusion*) mekanismilla ja joissakin tapauksissa myös kemiallisella reaktiolla. Yleensä liuottimien poistamiseksi hyydytyskylyjä tarvitaan enemmän kuin yksi ja joskus jälkikäsittelyihin liittyviä vaiheita (pesu ja kuivaus) käytetään filamenttien lisävenyttämiseksi. Tyypillinen esimerkki märkäkuidutettavasta kuidusta on viskoosi. [98, s. 261.]

## 6 BIOKOMPOSIITTIIEN PROSESSOINTIMENETELMÄT

Tässä kappaleessa tutustutaan kestopuovipohjaisten luonnonkuitukomposiittien yleisiin prosessointimenetelmiin. Yleensä luonnonkuituja hyödynnetään katkokuitumuodossa ruiskuvalussa tai ekstruusiossa tai kuitukangasmattoina puristusmuovauksessa. Toistaiseksi ei ole kehitetty laajamittaisia valmistustekniikoita sellaisille luonnonkuitulujitetuille kestopuovikomposiiteille, joissa kuituorientaatio olisi järjestäytynyt. [7, s. 77.]

### 6.1 Puristusmuovaus eli ahtopuristus

Kestopuovien puristusmuovaus eli ahtopuristus on tavallisin prosessointimenetelmä biokomposiittien valmistuksessa [40, s. 8]. Esimerkiksi autoteollisuudessa, jossa hyödynnetään merkittävä osuus luonnonkuitukomposiiteista, kestopuovin muottiinpuristus on selkeästi käytetyin menetelmä (61 % osuus) ennen kertapuovin muottiinpuristusta (35 %) [78, s. 79]. Kestopuovien puristusmuovauksessa käytetään usein puoliteksiilivalmistetta, tyyppillisesti neulattua kuitukangasta, joka on valmistettu luonnonkuiduista ja kestopuovikuiduista. Luonnonkuitujen määrä kuitukankaassa on tavallisesti 30 - 60 massaprosenttia. [100, s. 415.]

#### 6.1.1 Kuitukankaiden valmistus

Tyyppillinen puolivalmiste kestopuovipohjaisten luonnonkuitukomposiittien puristusmuovauksessa on kuitukangas (*nonwoven*). Kudotuilla kankailla komposiitille saataisiin oletettavasti kuitukankaisiin verrattuna paremmat lujuusominaisuudet, mutta kuitukankaat ovat kudottuja kankaita edullisempia. [48, s. 109.] Kuitukangas voidaan määritellä kankaaksi, joka valmistetaan suoraan kuitu- tai kalvorainasta ilman langanvalmistusvaihetta [101, s. 141]. Käytännössä kuitukankaan valmistusprosessi voidaan jakaa kahteen vaiheeseen: kuitujen valmisteluun sopivaan muotoon sitomista varten eli rainanvalmistukseen ja varsinaiseen sitomisprosessiin [102, s. 130].

Kuituraina voidaan valmistaa erilaisilla menetelmillä mekaanisesti, aerodynaamisesti, hydrodynaamisesti tai niin sanottuna jatkuvana kuidutusmenetelmänä, jossa jatkuvista kuiduista valmistetaan raina suoraan kehruun jälkeen. Nämä menetelmät voidaan jaotella myös kuivarainaus- ja märkärainausprosesseihin: aerodynaaminen rainanmuodostus, mekaaninen rainanmuodostus ja jatkuvan kuiturainan valmistusprosessi (*spun-laid*) luetaan kuivarainausprosesseiksi, kun taas hydrodynaamisella rainanmuodostuksella tarkoitetaan märkärainausprosesseja. Kussakin menetelmässä on tyyppilliset kuitu-

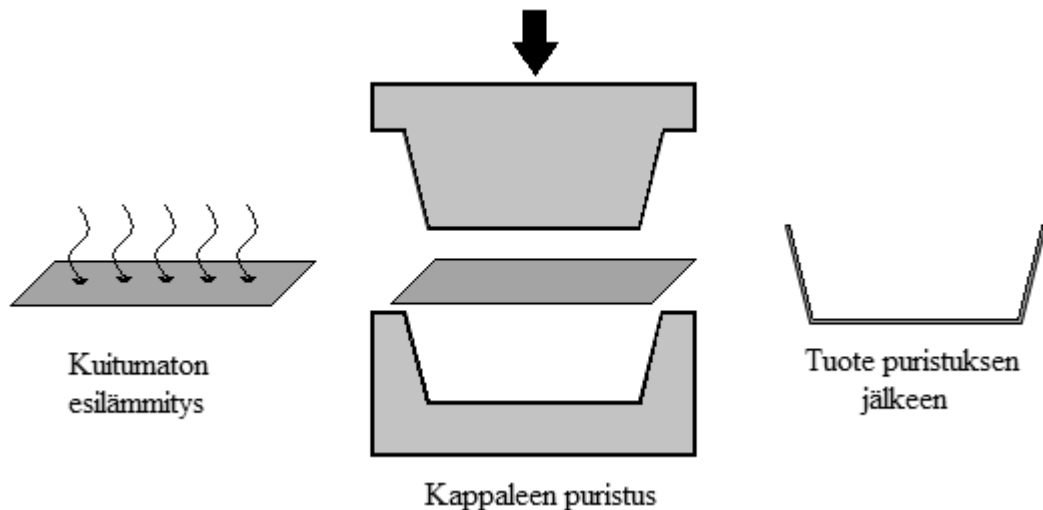
pituutensa: mekaanisesti muodostettavissa rainoissa käytettyjen katkokuitujen pituudet ovat yleensä 30 - 60 mm, aerodynaamisesti muodostettavissa rainoissa 5 - 40 mm ja hydrodynaamisesti muodostettavissa rainoissa 1 - 20 mm; jatkuvan kuiturainan valmistuksessa käytetään nimensä mukaisesti jatkuvia kuituja. [97, s. 169; 103, s. 32-33.]

Mekaanisella rainanvalmistuksella tarkoitetaan useimmiten karstausta. Karstauksessa karstauskone erottelee kuidut kuitukimpuista yksittäisiksi kuiduiksi, poistaa kuitumassasta epäpuhtauksia, kuten pölyä, päistäreitä ja lyhyitä kuituja sekä orientoi kuituja karstan suuntaiseksi. Karstauskone voi koostua esimerkiksi pyörivistä piikikkäistä te-loista, jotka erottelevat kuituja toisistaan ja muodostavat lopuksi kuiturainan. Aerodynaaminen rainanvalmistus tunnetaan yleensä ilmarainausmenetelmänä (*air-laid*). Ilmarainauksessa ilmavirta välittää kuidut jatkuvasti liikkuvan seulasylinterin päälle. Seula kuljettaa rainan seuraavaan prosessointivaiheeseen ja samalla ilma imetään pois kuljetusjärjestelmän lävitse. Syntyvä kuituraina on käytännössä isotrooppinen, koska kuidut ovat orientoituneet rainassa satunnaisesti joka suuntaan. Märkärainauksessa (*wet-laid*) kuidusta ja vedestä (ja mahdollisista sideaineista) muodostetaan puolestaan liete, joka viedään seulana toimivalle kuljetushihnalle, jossa neste erotetaan kuiduista ja raina kuivataan. [97, s. 172; 104, s. 174-176.]

Kuiturainan sitominen kestävämmäksi kankaaksi voi tapahtua monella eri tavalla joko mekaanisesti, kemiallisesti tai termisesti [97, s. 174]. Kuitukankaat voidaan sitoa esimerkiksi impregnoimalla kuidut sideaineiden kanssa kemiallisesti, sulattamalla kankaassa olevat termoplastiset kuidut lämmön avulla tai neulaamalla kuiturainat yhteen mekaanisesti [103, s. 33]. Tämän työn kokeellisessa osassa kuitukankaat sidotaan neulaamalla. Neulaus on tavallinen mekaaninen sidontamenetelmä, jossa karstattu kuituraina kulkee lukuisten neulojen muodostaman neulaniskuyksikön läpi. Neulauksen jäljiltä kuitukankaan kuidut ovat kietoutuneet toisiinsa perusteellisesti. Kestomuovikuituja sisältävät kuitukankaat voidaan jälkikäteen puristusmuovata komposiiteiksi. [48, s. 109, 111-112.]

### 6.1.2 Kuitukankaiden puristusmuovaus

Kestomuovikomposiittien puristusmuovauksesta on olemassa erilaisia muunnelmia, jotka eroavat toisistaan tavalla, jolla lujitteet ja polymeerimatriisi yhdistetään ja asetetaan muottiin. Lujitemateriaalina toimiva luonnonkuitu on tyypillisesti kuitukangasmuodossa. Matriisin muodostava polymeeri voi olla joko kuituina yhdistettynä luonnonkuituihin kuitukankaissa tai -matoissa (puolivalmisteet); esisulatetussa muodossa; jauheena, joka lisätään kuitumateriaalin joukkoon ennen puristusmuovausta; tai kalvoina luonnonkuitukankaiden välissä. [7, s. 80; 40, s. 8.] Kuvassa 6.1 on kuvattu kesto-muovipohjaisen luonnonkuitukomposiitin puristusmuovauksen periaatetta.



**Kuva 6.1.** Kestomuovipohjaisen kuitukankaasta valmistettavan luonnonkuitukomposiitin puristusmuovauksen periaate. Prosessista on olemassa muunnelmia sen mukaan, missä muodossa matriisimateriaalia käytetään. Tässä matriisi on kuituina sekoitettuna luonnonkuitujen joukkoon. (Muokattu lähteestä *JEC Composites*: [105, s. 106]).

Kuitukankaiden puristusmuovauksessa leikatut kangaspalat esilämmitetään ja jälkeenpäin siirretään puristusyksikköön, jossa ne puristusmuovataan haluttuun muotoon. Kappaleiden vääristyminen on prosessissa tavallinen ongelma. [100, s. 415.] Luonnonkuituista valmistetut kankaat voidaan vaihtoehtoisesti myös pinota (vuorotellen kesto-  
muovikalvojen kanssa) esilämmitetyn muottionkalon pohjalle, jonka jälkeen muotin yläosa lasketaan alas halutun prosessointipaineen saavuttamiseksi. Tällöin kesto-  
muovi sulaa ja komposiitti tiivistyy. Lopuksi puristusmuovattu komposiitti jäähdytetään ja poistetaan muotista. [7, s. 80.] Kestomuovikalvoja hyödyntävää menetelmää voidaan vapaasti suomennettuna kutsua kalvopinoamismenetelmäksi (*film-stacking method*). Tällä tavoin valmistettavan laminointirakenteen käyttö vaatii, että sulaessaan matriisin muodostava polymeeri virtaa helposti ja nopeasti, jotta luonnonkuidut kostuvat riittävästi matriisilla [48, s. 112].

Puristusmuovausta käytetään usein luonnonkuiduilla lujitettujen komponenttien valmistuksessa, koska luonnonkuiduista ja kesto-  
muovikuiduista koostuvassa kuitukankaassa luonnonkuidut kostuvat hyvin matriisimateriaalilla puristuksen yhteydessä. Puristusmuovaus soveltuu erityisesti autoteollisuuden suurimittaisiin rakennuskomponentteihin, joilla on yhtenäinen seinämäpaksuus. Tyypillisiä puristusmuovattavia kappaleita ovat auton sisäverhoilun osat, joihin luonnonkuitukomposiitit soveltuvat hyvä lujuutensa, jäykkyytensä ja alhaisen tiheytensä ansiosta. [104, s. 180.] Ruiskuvalu toisaalta soveltuu edullisempiin autojen ovisovelluksiin [78, s. 79].

### 6.1.3 Puristusmuovauksen parametrit

Puristusmuovauksen prosessointiparametreihin kuuluvat paine, lämpötila ja puristus-  
aika. Taulukkoon 6.1 on koottu julkaisuissa esiintyneitä prosessointiparametreja luonnon-  
kuiduista ja muovikuiduista koostuvien kuitukankaiden puristusmuovauksessa. Oikeat



parametrit riippuvat muun muassa materiaaleista, yhteenpuristettavien kankaiden pak-suudesta ja määrästä, sekä siitä, kuinka paksu tai luja komposiitti halutaan aikaansaada.

**Taulukko 6.1.** Julkaisuissa esiintyviä prosessointiparametreja ja -tietoja kuitukangas-komposiittien puristusmuovauksesta. Välilevyä/liuskoja käytetään paksuuden kontrol-lointiin.

Komposiitti	Paine, lämpötila, aika	Muut toimenpiteet	Välilevy/ liuska	Lähde
Puuvilla/PLA	4.2 MPa;	-	2 mm	[50]
Kenaf/PLA	180 °C;		(alumiini)	
Hamppu/PLA	20 min			
Hamppu/kenaf/PLA				
Kenaf/PLA	0.7 MPa; 200 °C; 5 min	Esipuristus karstauksen jälkeen	-	[55]
Öljypellava/PLA	4 MPa; 180 °C; 8 min	-	1 mm (alumiini)	[54]

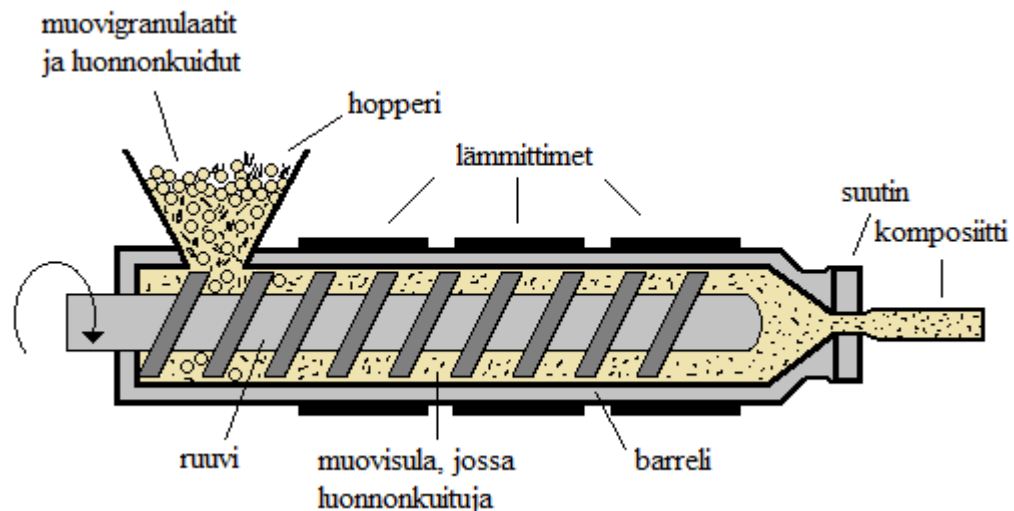
Puristusmuovauksen prosessointiparametrien vaikutuksia luonnonkuitukomposiittien ominaisuuksiin on tutkittu jonkin verran. Pervaiz & Sain [76] havaitsivat tutkimuksessaan, että puristusvoiman kasvattaminen paransi kalvopinoamismenetelmällä valmistettujen hamppu/PP-komposiittien taivutus- ja lujuusominaisuuksia. Alimuzzaman *et al.* [106] tutkimuksessa valmistettiin pellavakuitu-PLA-kankaita ilmarainausmenetelmällä eri pellavakuituosuuksilla ja prosessointimuuttujiksi valittiin puristuslämpötila (180–200 °C) ja puristusaika (5–15 min). Tuloksista havaittiin, että komposiittien veto- ja taivutuslujuusarvot laskivat, kun prosessointilämpötila ja puristusaika kasvoivat. Tämä johtui siitä, että lämpötilan kasvaessa PLA:n viskositeetti laski ja PLA pääsi virtaamaan komposiitin reunojen yli puristusmuovauksessa. PLA-hukka haurastutti biokomposiitteja, mikä johti pienempiin lujuuslukemiin. Myös komposiittien kimmomoduuli laski puristusajan kasvaessa, mutta lämpötilan vaikutus moduuliin ei ollut merkittävä. Suurin komposiittien mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttava tekijä oli kuitenkin pellavakuitupitoisuus. Parhaimmat veto- ja taivutuslujuusominaisuudet saatiin 50 % pellavapitoisuudella ja prosessointilämpötilalla 180 °C, ajalla 5 min ja paineella 50 bar (5 MPa).

Plackett *et al.* [57] ovat kuitenkin saaneet edellisestä tutkimuksesta poikkeavia tuloksia liittyen prosessointilämpötilaan. Heidän tutkimuksessaan juuttikuiduilla lujitetun PLA:n vetomurtolujuuden ja jäykkyyden maksimiarvot saavutettiin, kun kalvopinoamisprosessissa käytettiin korkeimpia prosessointilämpötiloja 210–220°C (muut käytetyt lämpötilat olivat 180, 190 ja 200 °C). Tutkimuksessa arveltiin, että polylaktidin pienentynyt viskositeetti korkeammassa lämpötilassa ja siten paremmat virtausominaisuudet ovat voineet edistää kuitujen kostumista ja siten johtaneet kasvaneeseen murtolujuuteen lämpötilan funktiona. Muillakin tekijöillä, kuten PLA:n kiteisyyden vaihteluilla,

komposiitin huokoisuudella ja juuttikuitujen pintakemialla on kuitenkin voinut olla vaikutuksensa tuloksiin.

## 6.2 Ekstruusio

Ekstruusio on perinteinen muovien prosessointimenetelmä, jolla voidaan valmistaa erilaisen poikkileikkauksen profiileja, putkia ja kalvoja. Luonnonkuitukomposiittien parissa sitä hyödynnetään erityisesti puumuovikomposiittien saralla, koska suurin osa puumuovikomposiittien sovelluksista tähtää perinteisen puutavaran korvaamiseen. Toinen merkittävä sovellusalue on levykappaleiden valmistus autoteollisuuden sovelluksiin. [17, s. 368.] Puumuovikomposiitit valmistetaan pääosin ekstruusiolla myös siitä syystä, että puujauheen lisäys muoviin kasvattaa sulapolymeerin viskositeettia siinä määrin, ettei ruiskuvalu ole mahdollista. Ruiskuvalussa puujauheen pitoisuus puumuovikomposiitissa onkin tavallisesti pienempi kuin 20 paino-%. [7, s. 91.] Kuvassa 6.2 on esitetty luonnonkuitukomposiittien ekstruusion periaate ja laitteisto.



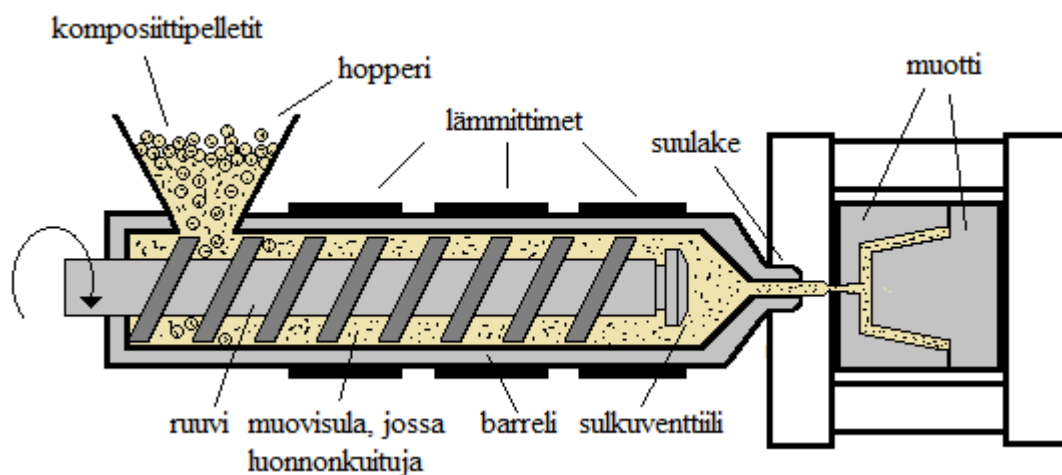
**Kuva 6.2.** Luonnonkuitukomposiittien ekstruusion periaate ja laitteiston osat (muokattu lähteestä [107] ja [21, s. 140]). Ekstruuderin pyörivä ruuvi sulattaa ja homogenisoi muovigranulaatit ja sekoittaa sulan muovin kuitujen kanssa. Sulamateriaali kulkeutuu barreliä pitkin lopuksi muodonantavalle suuttimelle. Suuttimesta poistuva komposiittiprofiili voidaan pätkiä halutunkokoisiksi paloiksi. [21, s. 140.]

Luonnonkuitukomposiittien ekstruusio on periaatteeltaan samankaltainen muovien ekstruusion kanssa. Luonnonkuitukomposiittien ekstruusiassa kestumuvipolymeeri ja lyhyet luonnonkuidut yhdistetään lämmitetyssä ekstruusiobarrelissa yhden tai kahden samaan suuntaan pyörivän ruuvien avulla (kaksiruuviekstruusio). Polymeeri sulaa ja sekoittuu luonnonkuitujen kanssa muodostaen komposiittisulan, joka kulkeutuu eteenpäin barreliä pitkin edelleen sekoittuen ja puristuen, jolloin sulan homogeenisuus paranee. Lopuksi sula poistuu barrelistä muodonantavan suuttimen läpi ja jäähtyessään muodostaa komposiittiprofiilin. [7, s. 78-79.]

Lyhytkuituisen kestumuovikomposiitin ekstruusio kaksiruuviekstruuderilla on tavallinen prosessointimenetelmä ennen ruiskuvalua, koska tällöin polymeerimatriisiin saadaan erinomainen kuitujakauma. Ekstrudoitu komposiitti voidaan pätkiä pelleteiksi, jotka voidaan edelleen ruiskuvalaa monimutkaisempiin muotoihin. [7, s. 78-79.] Kuitujen kuluminen on kuitenkin merkittävää useimmissa ruiskuvalua edeltävissä ekstruusio- ja kompaundointiprosesseissa ja siksi menetelmät eivät ole suositeltavia, jos kuitupituus halutaan säilyttää [20, s. 311]. Suurin osa prosessoinnin aikana tapahtuvista kuituvahingoista aiheutuu kuitujen välisestä kitkasta, kuitujen ja polymeerin välisestä kitkasta ja kuitujen ja ekstruuderin välisestä kitkasta. Kuitujen katkeamista voidaan vähentää syöttämällä polymeeri ensin pääsyöttöaukosta sisään ja syöttämällä kuidut vasta myöhemmin toisesta portista. Tämän avulla polymeeri ehtii sulaa ennen kontaktia kuitujen kanssa, mikä vähentää kuituihin kohdistuvia leikkausvoimia. [7, s. 78-79.]

### 6.3 Ruiskuvalu

Ruiskuvalua käytetään laajasti muottiin valettavien kestumuovien ja lujitettujen kestumuovien valmistuksessa. Prosessilla voidaan aikaansaada suuret tuotantomäärät korkeilla tuotantonopeuksilla. Komposiittien ruiskuvalussa esimuodostetut, yleensä ekstruusiokompaundoinnilla valmistetut, komposiittipelletit sulatetaan ruuvin avulla lämmitetyssä barrelissa, jota pitkin sulamassa siirtyy ruiskuvalukoneen suulakkeelle. Lopuksi komposiittisula ruiskutetaan suljettuun muottiin. [7, s. 79-80.] Kappaleen jäähtyttyä muotti avataan ja kappale poistetaan. Kuvassa 6.3 on esitetty ruiskuvalun periaate.



**Kuva 6.3.** Luonnonkuitukomposiittien ruiskuvalun periaate (muokattu lähteestä [107]). Komposiittipellettien muovi sulaa ruuvin pyöriessä. Sula komposiittimateriaali kulkeutuu suulakkeelle, josta se ruiskutetaan lopuksi muodonantavaan muottiin; kappaleen jäähtyttyä muotti avataan ja komposiitti poistetaan.

Standardiruiskuvalukonelaitteistolla luonnonkuitulujitettuja kestumuovikomposiitteja voidaan muovata monimutkaisiin muotoihin. Komposiittimateriaalin tulee virrata nestemäisesti prosessoinnin aikana ja siksi materiaali tavallisesti koostuu lyhyistä kuiduista suhteellisen pienillä kuitusuuksilla, jotka ovat tyypillisesti alle 50 paino-%

tai alle 30 tilavuus-%. Liian matala kuitupitoisuus voi johtaa riittämättömään lujitusvaikutukseen ja liian korkea kuitupitoisuus puolestaan heikkoon muovattavuuteen sekä komposiitin heikkoihin mekaanisiin ominaisuuksiin. Ruiskuvalu ei tyypillisesti aiheuta samantasoista mekaanista kitkaa komposiittisulaan kuin ekstruusio tai sulasekoitus (*melt mixing*), eikä tavallisesti johda merkittäviin kuituvaurioihin. [7, s. 79-80.]

## 6.4 Prosessoinnin ongelmia

Luonnonkuitukomposiittien prosessoinnin ongelmat johtuvat pitkälti jo aikaisemmin mainitusta luonnonkuitujen hydrofiilisestä luonteesta. Kuituihin absorboitunut vesi vapautuu prosessoinnin aikana korkeissa lämpötiloissa vesihöyrynä ja tekee materiaalista huokoista. Huokokset voivat toimia jännityskeskittymäpisteinä ja johtaa komposiitin enenaikaiseen murtumiseen kuormituksen aikana. [7, s. 71.]

Toinen prosessointia rajoittava seikka on luonnonkuitujen heikko lämpötilankesto. Luonnonkuitujen pitkäaikaisen prosessointilämpötilan ylärajana voidaan pitää 150 °C:tta, mutta kuidut voivat kestää myös lyhyitä altistusaikoja 220 °C:ssa. Liian pitkät tai korkeat lämpötila-altistukset voivat aiheuttaa haalistumista, haihtuvien yhdisteiden vapautumista, selluloosakomponenttien haurastumista tai heikon rajapintasitoutumisen kuitujen ja matriisin välille. [27, s. 439.] Komponenttien terminen hajoaminen johtaa komposiitin lujisuuden laskuun. Toisaalta myös liian alhainen prosessointilämpötila voi osoittautua haitalliseksi. Esimerkiksi ekstruusiossa liian alhaisissa prosessointilämpötiloissa polymeerisula on liian viskoosia virtaamaan kuitujen ympärille, mikä johtaa puutteelliseen kuitujen kostumiseen ja sitä myötä heikkoon komposiittiin. [7, s. 78-79.] Lämpötilarajoitusten vuoksi luonnonkuitukomposiiteissa käytettävät kestopuovimatriisit rajoittuvat pääosin polyolefiineihin, kuten polyeteeniin ja polypropeeniin [6, s. 19], tai muihin matalissa lämpötiloissa sulaviin muoveihin. Heikon lämmönkeston vuoksi lopullisen tuotteen käyttölämpötilatkaan eivät voi olla kovin korkeita. Esimerkiksi pel-lavakuitulujitettujen muovituotteiden käyttölämpötilat olisi hyvä pitää maksimissaan 100 °C:ssa [15].

Edellä mainittujen ongelmien lisäksi myös kuitujen tasainen syöttäminen ja annostelu ekstruuderiin tai ruiskuvalukoneeseen voi osoittautua vaikeaksi sulaprosessoinnissa. Lisäksi on otettava huomioon luonnonkuitujen riittävä sekoittuminen matriisimateriaalin kanssa. Riittämätön kuitujen sekoittuminen voi aiheuttaa kuitukasamia, mikä johtaa epähomogeenisiin kuitu- ja matriisipitoisiin alueisiin. Matriisipitoiset alueet ovat heikkoja, kun taas kuitukasamat ovat alttiita mikrohalkeilulle, joka edistää komposiitin mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä. Hyvän kuitujen sekoittumisen varmistamiseksi kuidut tulisi erotella toisistaan. Myös kuitujen modifiointi voi olla tarpeen hydrofiilisten kuitujen ja hydrofobisen matriisiin yhteensopivuuden parantamiseksi. Lisäksi on varmistettava, että kuitupituudet ovat sellaisia, että kuitujen takertumista toisiinsa ei tapahdu. Kuidut voidaan erotella toisistaan kemiallisella käsittelyllä, mutta erotus voi tapahtua myös komposiitin kompaundoinnin aikana ekstruusiossa tai ruiskuvalussa. [7, s. 71-72.]

## 7 KOMPOSIITTIEIEN VALMISTAMINEN

### 7.1 Materiaalit

Tämän työn kokeellisen osuuden materiaaleiksi valittiin tärkkelyspohjainen biomuovi Mater-Bi® CF04A (Novamont) ja öljypellava. Tärkkelyksen lisäksi biomuovi sisältää synteettistä komponenttia, jota ei ole erikseen mainittu muovin tiedoissa. CF04A soveltuu erityisesti muovikalvojen valmistukseen. Yrityksen datasheetin tietoja muovista on koottu taulukkoon 7.1. Materiaalista on myös aiemmin valmistettu LUOMA-projektin tiimoilta ruiskuvalettuja koesauvoja, joiden Youngin moduuliksi on määritetty 0.168 GPa, vetolujuudeksi 11.6 MPa, taivutusmoduuliksi 0.183 GPa ja taivutuslujuudeksi 8.79 MPa.

*Taulukko 7.1. Mater-Bi CF04A -biopolymeerin keskimääräisiä fysikaalisia ja mekaanisia ominaisuuksia [108].*

Ominaisuus	Keskiarvo	Testi/Standardi	Huomioitavaa
Sulamislämpötila	130 °C	DSC	raakapelletit
Tiheys	1.23 g/cm <sup>3</sup>	Pyknometri	raakapelletit, T=23 °C
Sulaindeksi	7 g /10 min	ASTM-D1238	160 °C / 5kg painolla
Murtolujuus	26 MPa	ASTM-D882	20 µm paksu puhalluskalvo
Murtovenymä	550 %	ASTM-D882	20 µm paksu puhalluskalvo
Youngin moduuli	0.2 GPa	ASTM-D882	20 µm paksu puhalluskalvo

Luonnonkuituna käytettiin liotettua, valkaisuaineella pestyä ja esirevittyä öljypellavaa. Pellava on lajikkeeltaan Laser ja se on viljelty vuonna 2005 Siuntiossa Helsingin yliopiston tutkimustilalla. Öljypellavaa ei varsinaisesti ole tarkoitettu kuitulujitemateriaaliksi ja siksi pellavakuitumassa ei ollut täysin puhdasta, vaan se sisälsi paljon päistäreitä ja muita epäpuhtauksia. Kuidut olivat lisäksi massassa pääosin kuitukimppuina.

### 7.2 Prosessointimenetelmät

Koska käytettävästä biomuovilaadusta ei tiettävästi aikaisemmin ollut valmistettu kuitua, oli Mater-Bin kuidutettavuutta ja sulakäyttäytymistä tarpeen testata pienemmällä skaalalla kapillaarireometrillä ennen kuidun suuremman määrän tuotantoa sulakuidutusmenetelmällä. Ennen kapillaarireometritestausta Mater-Bille ajettiin isoterminen kahden tunnin termogravimetria (TGA) 150 °C:ssa. Testillä varmistettiin, ettei biomuovi ala liiallisesti hajota termisesti pitkässä lämpötila-altistuksessa. TGA-tuloksen mukaan muovin lämpötilankesto oli riittävän hyvä, sillä happiatmosfäärissä muovi me-

netti massastaan kahden tunnin aikana vain noin 2 %. Muovin lämpötilankesto on tärkeää erityisesti sulakuidutuksen kannalta, koska muovi voi viipyä prosessoinnin aikana korotetuissa lämpötiloissa jopa puolen tunnin ajan.

### 7.2.1 Muovin kuidunmuodostuksen testaus kapillaarireometrillä

Mater-Bin kuiduttamista ja sulaominaisuuksia testattiin Göttfret Rheograph 6000 kapillaarireometrin avulla. Kapillaarireometriä käytetään tyypillisesti materiaalien viskositeettimittauksissa. Menetelmässä muovigranulaatit asetetaan sylinteriin, jossa granulaatit sulatetaan ja puristetaan männän avulla kapillaariputken läpi. Tässä tapauksessa halettiin selvittää pysyykö kapillaarista ulos tuleva ohut muovisäie katkeamattomana, kun sitä kelataan pahvirullan ympärille. Kapillaarireometrin alapuolelle oli testitilanteessa asetettu nopeudensäätimellä varustettu kelausmoottori, jonka avulla kapillaarista ulos tulevaa kuitua pystyttiin kelaamaan pahviputken ympärille. Muovigranulaatteja ei kuivattu ennen testausta, koska sitä ei erikseen suositeltu. Kuvassa 7.1 on havainnollistettu testilaitteistoa ja testaustilannetta.



**Kuva 7.1.** Kapillaarireometritestaus. Vasemmalla on kapillaarireometrilaitteisto ja oikealla testaustilanne, jossa kelausmoottori pyörittää pahvirullaa vakionopeudella ja kapillaarireometrin putkesta ulos tuleva muovikuitu kiertyy pahvirullan ympärille. Kuitu kiinnitettiin pahvirullaan maalarinteipin avulla.

Mater-Bin kuiduttumista testattiin eri lämpötiloissa ja erilaisilla kapillaarireometrin männännopeuksilla. Männännopeutta säätämällä pystyttiin vaikuttamaan kapillaarista ulos tulevan kuidun halkaisijaan: mitä pienempi männännopeus oli, sitä ohuempaa kapillaarista ulos tuleva kuitu oli. Lämpötilassa 150 °C ja kapillaarireometrin männännopeudella 0.1 mm/s kuitu ei kestänyt kelausta, vaan katkeili. Kuidutettavuuden parantamiseksi lämpötila nostettiin 160 °C:een ja tällöin kuitu pysyikin katkeamattomana kelausmoottorin ollessa täydellä kierrosnopeudella.

Seuraavaksi testattiin muovikuidun halkaisijan säätämistä. Kuitukankaan valmistusta ajatellen muovikuidun halkaisijan olisi hyvä olla samaa luokkaa käytettävän pellavakuidun halkaisijan kanssa (noin 20  $\mu\text{m}$ ). Muovikuidusta saatiin ohuempaa laskemalla männännopeutta ensin arvoon 0.05 mm/s, ja sen jälkeen arvoon 0.03 mm/s. Molemmilla nopeuksilla kuitu pysyi katkeamattomana lyhyen testausjakson ajan. Kelatut kuidut on esitelty kuvassa 7.2.



**Kuva 7.2.** Lämpötilassa 160 °C kapillarireometrin avulla kelatut kuidut. Männännopeudet vasemmalta oikealle: 0.1 mm/s, 0.05 mm/s ja 0.03 mm/s. Männännopeuden pienentyessä myös kuidun halkaisija pienenee.

Kuitujen halkaisijaa tarkasteltiin lähemmin optisella stereomikroskoopilla Leica MZ7.5. Pienimmällä männännopeudella (0.03 mm/s) halkaisija oli suuruusluokaltaan noin 55 mikrometriä ja suuremmalla männännopeudella (0.05 mm/s) halkaisija oli noin 80 mikrometrin luokkaa. Biomuovikuitujen halkaisijat olivat siis jonkin verran suuremmat kuin pellavakuiduilla. Sulakuidutusprosessissa muovin halkaisija pyritään saamaan vielä pienemmäksi, jopa 10–30 mikrometrin mittaiseksi. Kapillaaritestaus osoitti, että käytettävästä materiaalista pystytään valmistamaan kuitua ainakin noin 50 mikrometrin paksuisena.

## 7.2.2 Muovin sulakuidutus

Biomuovin sulakuidutus toteutettiin kuitu- ja tekstiilitekniikan laboratoriosulakuidutus-koneella Fourné. Laitteisto koostuu monen metrin korkeudella olevasta ekstruuderista ja maan tasalla olevasta kelausyksiköstä. Sulakuidutuksessa muovigranulaatit syötetään ekstruuderiin, jossa muovi sulaa ja homogenisoituu. Muovi poistuu ekstruuderista spinneretin reikien läpi ja muodostuvat kuitufilamentit valuvat painovoiman vaikutuksesta alas puhallusputken läpi, jolloin niihin kohdistuu puhallusilmaa. Puhallusputken jälkeen filamentit kulkevat vielä ilmaputken läpi jäähtyen ja kiinteytyen ennen varsinaista kelausyksikköä. Kelausyksikössä kuitu kulkee pyöriä lämmittävien välirullien kautta lopulliselle kelauspuolalle. Lämmittävät välirullat venyttävät ja orientoivat kuitua ja samalla pienentävät kuidun halkaisijaa. Kuvassa 7.3 on nähtävissä sulakuidutuslaitteiston kelausyksikkö.





**Kuva 7.3.** Sulakuidutuslaitteiston kelausyksikkö. Kohdassa A) kuitu valuu ylhäältä ekstruuderin kehrusuuttimen läpi alas lämmitettävälle välirullille B) galetti 1, C) galetti 2 ja D) duo. Näillä välirullilla kuitu edelleen venyy, orientoituu ja ohenee ennen lopullista rullalle kelausta (kohta E)).

Ensimmäisellä testauskerralla biomuovin sulakuidutus ei sujunut täysin ongelmitta. Kuitua yritettiin ensin kelata suoraan lopulliselle puolalle ilman lämmitettäviä välirullia useilla eri kelausnopeuksilla, mutta kuitu katkesi helposti ja tuli ekstruuderin suuttimesta ulos epätasaisina paksumpina ja ohuempina filamentteina. Granulaatteja ei ollut kuivattu ennen prosessointia, joten ongelma saattoi johtua siitä, että käytettyihin polymeerigranulaatteihin oli kerääntynyt kosteutta, joka höyrystyi ekstruuderissa aiheuttaen kuplimista ja kuiturainan katkeilua. Toinen mahdollinen ongelman syy saattoi olla liian matala prosessointilämpötila. Kuidutettavuuden parantamiseksi kehrupään lämpötilaa nostettiin 160 °C:sta arvoon 165 °C, ja tällä oli lievä positiivinen vaikutus kuidun valmistettavuuteen, sillä kuitua saatiin kelattua puolalle pidemmän aikaa. Huomattavaa prosessoinnin aikana oli kuitenkin kehrupumpun laajasti vaihdellut paine, jota täytyi jatkuvasti manuaalisesti säätää arvon vakioimiseksi.

Ilman välirullia kelattu kuitu oli silmämääräisesti melko paksua, joten seuraavaksi siirryttiin lämmitettävien välirullien käyttöön (testiajot 4-6). Kuitujen kelaus välirullien kautta onnistui suhteellisen hyvin, sillä kuidut pysyivät pitkään katkeamattomina. Lämmitettävien välirullien nopeudet ja lämpötilat on esitetty taulukossa 7.2, ja tes-



tiajoissa kelatut kuiturullat kuvassa 7.4. Laajemmat testausparametrit ovat nähtävissä sulakuidutusraportissa liitteessä 1.

**Taulukko 7.2.** Sulakuidutuksen välirullien nopeudet ja lämpötilat. Suluissa esitetyt lämpötila-arvot tarkoittavat alkuarvoa, josta lämpötila lähti laskemaan alaspäin prosessin aikana. Testiajossa 5 ja 6 prosessiparametrit pidettiin samoina. Puolausnopeus tarkoittaa loppukelauksen nopeutta.

Rullat	Testiajo 4	Testiajot 5 ja 6
<i>Galetti 1:</i>		
Nopeus (m/min)	218	225
Lämpötila (°C)	30 (39)	30
<i>Galetti 2:</i>		
Nopeus (m/min)	255	290
Lämpötila (°C)	40 (42)	40
<i>Duo:</i>		
Nopeus (m/min)	280	400
Lämpötila (°C)	50 (52)	50
<i>Puolausnopeus (m/min)</i>	275	380



**Kuva 7.4.** Testiajoissa kelatut kuiturullat 1-6 (testiajojen 6 rullia on kaksi kappaletta).

Testiajojen 4-6 kuitujen halkaisijoita pidettiin suotuisimpana kuitukankaan valmistusta ajatellen ja siksi näiden testiajojen kuitujen halkaisijat mitattiin suuntaa antavasti optisen stereomikroskoopin Leica MZ7.5 avulla. Kuitujen halkaisijat osoittautuivat kokoluokaltaan noin 50 - 60  $\mu\text{m}$  paksuisiksi; rullien päällimmäisissä kuitukerroksissa oli kuitenkin havaittavissa paksuusvaihteluita. Esimerkiksi rullalta 5 puretun kuidun alkupäässä havaittiin paksuudeltaan 30  $\mu\text{m}$  luokkaa olevia kuituja, mutta satunnaisesta kuiturykelmästä mitatut kuidut osoittautuivat pääsääntöisesti 50 - 60 mikronia paksuiksi. Testiajojen 4 ja 5-6 eri prosessointiparametreilla ei havaittu olevan suurta vaikutusta kuitujen paksuuteen. Satunnaista paksuuden vaihtelua saattoi selittää jo aiemmin mainittu prosessin aikana laajasti vaihdellut kehrupumpun paine.

Koska testiajojen kuitujen halkaisijat vaikuttivat riittävän ohuilta kuitukangastarkoituksiin, valmistettiin Mater-Bi-kuitua lisää varsinaisissa sulakuidutusajoissa testiajojen 5 ja 6 prosessointiparametreja käyttäen. Kuiduttamisen parantamiseksi muovigranulaatteja tällä kertaa kuivattiin 50 °C:ssa 48 h ennen sulakuidutusta. Granulaattien kuivaus paransi selkeästi biomuovikuidun valmistettavuutta. Varsinaisissa ajoissa ei havaittu enää testiajoissa ilmennyttä kehrupumpun paineen vaihtelua; paine kuitenkin vakioitui lukuarvoltaan hieman suuremmaksi kuin testiajoissa. Myöskään kuidun katkeilua prosessin aikana ei esiintynyt varsinaisissa ajoissa lainkaan. Kuitua kelattiin yhteensä reilun kilogramman verran rullille A, B ja C.

Sulakuidutuksen jälkeen biomuovikuitujen lujuusarvot ja hienous määritettiin testauslaitteistolla Textechno Favigraph standardien SFS-EN ISO 5079 ja SFS-EN ISO 1973 mukaisesti. Samalla määritettiin myös pellavan vastaavat arvot. Biomuovikuiduista testattiin sekä testiajojen 5 ja 6 kuituja (kuivaamattomat granulaatit) että varsinaisten sulakuidutusajojen kuituja rullalta B ja C (kuivatut granulaatit). Kuituja pidettiin vakioolosuhteissa kosteushuoneessa 60 % ± 5 % suhteellisessa kosteudessa ja 20 °C:n lämpötilassa vähintään 24 h ennen testausta. Jokaisesta materiaalista testattiin 20 yksittäistä kuitua. Taulukossa 7.3 on esitetty mittausten tulokset.

**Taulukko 7.3.** Kuitujen hienous ja mekaaniset ominaisuudet. *Ei-kuivattu=granulaatteja ei kuivattu ennen sulakuidutusta. Kuivattu=granulaatit kuivattiin ennen sulakuidutusta.*

<b>Materiaali</b>	<b>Lineaarinen tiheys (dtex)</b>	<b>Maksimilujuus (cN/dtex)</b>	<b>Venymä maksimilujuuden kohdalla (%)</b>	<b>Murtojuuus (cN/dtex)</b>	<b>Murtovenymä (%)</b>
Mater-Bi rulla 5 (ei kuivattu)	<b>23.5 ± 3.33</b>	<b>0.44 ± 0.02</b>	<b>39.6 ± 3.93</b>	<b>0.42 ± 0.01</b>	<b>94.7 ± 16.4</b>
Mater-Bi rulla 6 (ei kuivattu)	<b>25.3 ± 2.60</b>	<b>0.44 ± 0.01</b>	<b>41.3 ± 5.12</b>	<b>0.41 ± 0.01</b>	<b>92.5 ± 17.4</b>
Mater-Bi rulla B (kuivattu)	<b>28.1 ± 4.50</b>	<b>0.43 ± 0.01</b>	<b>43.7 ± 9.23</b>	<b>0.41 ± 0.01</b>	<b>101 ± 15.3</b>
Mater-Bi rulla C (kuivattu)	<b>29.9 ± 4.74</b>	<b>0.42 ± 0.02</b>	<b>67.6 ± 29.2</b>	<b>0.41 ± 0.02</b>	<b>98.5 ± 19.0</b>
Pellava	<b>5.16 ± 1.87</b>	-	-	<b>4.47 ± 1.61</b>	<b>3.86 ± 1.11</b>

Taulukosta 7.3 nähdään, että muovikuitujen lineaarinen tiheys on paljon pellavan arvoja suurempi. Tulos oli odotettavissa, koska muovikuidut olivat silminnähden pellovakuituja paksumpia. Rullien B ja C kuitujen lineaarinen tiheys osoittautui hieman rullien 5 ja 6 kuituja suuremmaksi. Toisin sanoen, vaikka granulaattien kuivaus helpotti muovikuidun valmistettavuutta, ei se kuitenkaan pääsääntöisesti näyttänyt aikaansaavan hienompia tai lujempia kuituja; tähän saattoi kuitenkin vaikuttaa myös prosessointipaineen ero eri prosessointikerroilla. Muovikuitujen lujuus-venymä-käyrissä ilmeni aaltoilua ja siksi maksimilujuus harvoin saavutettiin kuidun murtumiskohdassa. Maksimilu-

juuden ja murtolujuuden arvot ovat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan. Pellavakuidun ominaisuudet ovat odotusten mukaiset, sillä lujitemateriaalina sen lujuus on paljon muovikuituja suurempi ja toisaalta murtovenymä on selkeästi muovikuitujen arvoja matalampi.

### **7.2.3 Kuitukankaiden valmistus**

Kuitukankaiden valmistusta testattiin aluksi sulakuidutustestiajoissa kelatuilla biomuovikuiduilla ja pellavakuiduilla. Ennen kuitukankaan valmistusta kaikki biomuovikuidut pätkittiin noin 5 cm pituisiksi katkokuiduiksi. Sekä pellava- että muovikuidut olivat kosteushuoneessa suhteellisessa kosteudessa  $65 \pm 5 \%$  ja lämpötilassa  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  vähintään 48 h, jotta vältettäisiin kuitujen pölyäminen ja vahingoittuminen karstauksen aikana.

Kuitukangaskomposiitin valmistusta ajatellen olennaista on aikaansaada tasalaatuinen ja tasapaksu kuitukangas, jossa biomuovikuidut ja luonnonkuidut ovat sekoittuneet toisiinsa hyvin. Ennen karstausprosessia kuidut ajettiin kahdesti kuitu- ja tekstiilitekniikan avaajan (Schirp, Type 57) läpi pellavan ja biomuovikuidun sekoittumiseksi ja kuitumassan homogenisoimiseksi. Varsinainen kuituraina valmistettiin kuitu- ja tekstiilitekniikan karstauskoneella MCA500 ja neulattiin karstauksen jälkeen neulauskoneella MPR600. Neulaus sitoo kuiturainan tiiviimmäksi ja jäykemmäksi materiaaliksi. Tässä tapauksessa neulaussuunta oli karstaussuuntaan nähden poikittainen. Testiajoissa pellavan paino-osuudeksi valittiin 50 %, mutta todellisuudessa lopullisten kuitukankaiden pellavaosuus oli tätä pienempi, koska avaajan ja karstauksen aikana osa pellavan seassa olevista roskista erottui kuiduista. Karstauskoneen (kuva 7.5) käsittelyssä kuidut orientoituvat enemmän karstaussuuntaan kuin poikkisuuntaan nähden, joten oletettavasti lopullinen kuitukangas on jonkin verran lujempaa karstaussuuntaansa nähden.



**Kuva 7.5.** Vasemmalla kuvattu kuitumassan syöttö karstauskoneeseen ja oikealla karstattun kuiturainan poistuminen karstauskoneesta.

Ensimmäisessä karstaustestijossa valmistettu kuituraina osoittautui liian ohueksi, koska neulauksen yhteydessä kuitukankaaseen jäi reikiä ja selkeästi ohuita kohtia. Toisella testijolla kuitumassaa syötettiin karstauskoneeseen paksumpana kerroksena, jolloin myös kuiturainasta saatiin tasalaatuisempaa ja kestävämpää. Kun kuitukankaiden massaa verrattiin avaajaan syötettyyn kuitumäärän massaan, voitiin päätellä, että materiaalia joutui hukkaan avaajan ja karstauksen jäljiltä noin 13 %.

Testiajojen jälkeen kuitukankaita valmistettiin lisää testiajoja vastaavalla tavalla taulukon 7.4 osuuksien mukaisesti. Karstauskoneella yritettiin aluksi valmistaa myös täysin Mater-Bistä koostuvaa rainaa vertailumateriaaliksi, mutta puhdas muovikuitu tukki karstauslinjan eikä muodostanut koossapysyvää kuiturainaa, joten pelkästä biomuovikuidusta koostuvan kuitukankaan valmistuksesta oli luovuttava.

**Taulukko 7.4.** Karstattujen ja neulattujen kuitukankaiden massaosuudet. Pellavan massaosuus oli lopullisissa kuitukankaissa taulukon arvoja pienempi, koska avauksen ja karstauksen aikana osa pellavassa olevista roskista ja pääistäreistä erottui pellavakuiduista.

Materiaali (painoprosentteina)	Lyhenne
70 % pellava + 30 % Mater-Bi	70 % pellava
50 % pellava + 50 % Mater-Bi	50 % pellava
30 % pellava + 30 % Mater-Bi	30 % pellava

Avaajan ja karstauksen jäljiltä materiaalia joutui hukkaan kankaista riippuen 10 - 24 %. Hukka oli suurinta niissä kuitukankaissa, joissa pellavakuitua oli eniten, koska osa pellavassa olevista roskista erottui kuiduista prosessoinnin aikana. Kuitukankaat ovat nähtävissä kuvassa 7.6.



**Kuva 7.6.** Karstatut ja neulatut pellava/Mater-Bi-kuitukankaat.

Valmistetut kuitukankaat olivat pääsääntöisesti tasalaatuisia, mutta visuaalisen tarkastelun yhteydessä kankaissa oli paikoitellen havaittavissa ohuita läpikuultavia kohtia. Epätasapaksut kohdat kuitukankaissa johtuivat osittain siitä, että kuitumassaa oli vaikea syöttää karstauskoneeseen tasaisen paksuna kerroksena. Kuitukankaiden painot vaihtelivat 230 - 270 gramman välillä. Myös kankaiden pinta-aloissa oli vaihtelevuutta kankaasta ja kuitupitoisuudesta riippuen ja siten neliömassoissakin havaittiin runsaasti eroja ( $370 \text{ g/m}^2$  -  $650 \text{ g/m}^2$ ). Suuremmilla muovikuitumäärillä kuitukankaan pinta-ala oli pienempi ja vastaavasti neliömassa suurempi. Kuitukankaiden epätasalaatuisuus toisiinsa nähden on otettava huomioon, kun kankaista leikataan paloja komposiitin valmistusta varten.

#### **7.2.4 Kuitukankaiden puristusmuovaus**

Ennen varsinaisten komposiittilevyjen prässäystä testiajoissa valmistetuille kuitukankaille kokeiltiin muutamia prosessointiparametreja parhaimman kuitukangaskomposiitin aikaansaamiseksi. Kaikkien kuitukankaiden puristusmuovausta edelsi kuitukankaiden kuivaus uunissa  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ :ssa 48 h.

Komposiittien valmistuksessa käytettiin hydraulista lämmitettävää prässää MKH E60M. Komposiitin paksuuden säätämiseksi prässin väliin asetettiin 3 mm paksu välilevy, jossa oli kaksi muottionkaloa. Välilevyn molemmin puolin asetettiin leivinpaperit, jotta estettäisiin komposiitin tarttuminen puristusleukoihin. Prosessoinnissa kuitukankaista leikatut palat asetettiin muottilevyn syvennyksiin, jonka jälkeen lämmitetyt puristusleuat säädettiin puristumaan automaattisesti välilevyä vasten. Puristuksen jälkeen puristusleuat avattiin ja komposiittilevy siirrettiin pöydälle kahden levyn väliin jäähtymään ennen visuaalista tarkastelua.

Ensimmäisellä testauskerralla käytettiin kuitukangastestiajosten ohuinta kangasta, josta leikattiin kolme palaa siten, että yhdessä palassa pitkä sivu on karstaussuuntaan ja kahdessa palassa pitkä sivu on neulaussuuntaan eli poikittain karstaussuuntaan nähden. Kankaat leikattiin muottionkaloa pienemmäksi, koska puristuksessa kankaat painuvat kasaan ja niiden pinta-ala kasvaa. Leikatut kankaat pinottiin vuorotellen päällekkäin ja kangaspinoa puristettiin lämpötilassa 155 °C 8 minuutin ajan. Puristusleukojen yhdistyminen tapahtui automaatiotoiminnalla. Testitilanteessa painetta oli vaikea arvioida, koska testikappale oli niin ohut, että puristusleuat painuivat helposti välilevyyn kiinni ja voimaa ei saatu mitattua (mittari näytti nolaa). Puristusvoimaa ei ollut kuitenkaan syytä kasvattaa, koska komposiitteihin kohdistuva paine ei olisi ollut yhtään suurempi suuremmalla voimanarvolla. Tämä johtuu siitä, että komposiittiin kohdistuva maksimivoima on voima, jolla leuat puristavat komposiitit välilevyn paksuisiksi. Visuaalisen tarkastelun perusteella ensimmäisen testiajon komposiitti oli kostunut sulaneella muovilla melko riittävästi.

Toisella testikerralla käytettiin paksumpaa kuitukangasta. Testilämpötila nostettiin 160 °C:een kostumisen parantamiseksi ja puristusaikana pidettiin 8 min. Tällä kertaa kappaleen paksuus oli riittävän suuri paineen arviointiin, sillä leukojen yhteenpuristus vaati noin 43 kN voiman. Kun välilevyn pinta-ala otetaan huomioon, on välilevyn ja komposiitteihin kohdistuva paine 0.27 MPa. Visuaalisen tarkastelun perusteella toisen komposiitin pinnassa oli selkeästi nähtävissä tummempia kohtia, joista muovi oli kostuttanut kuidut läpi komposiitin. Komposiitissa ei kuitenkaan näkynyt palaneita kohtia, joten puristuslämpötila ei ollut liian korkea. Kuvassa 7.7 on nähtävissä testauksen koellevyt.



**Kuva 7.7.** Puristusmuovatut koekomposiittilevyt. Vasemmalla ensimmäisen koeajon kappale, oikealla toisen koeajon kappale. Toisen koeajon kappaleessa on nähtävissä enemmän tummentuneita kohtia, joissa sulanut muovi on kostuttanut kuidut läpi komposiitin.

Testikappaleiden perusteella loput komposiitit valmistettiin lämpötilassa 160 °C ja puristusajalla 8 min; paine puolestaan määräytyi koneen automaattisesti säätämän leukojen yhteenpuristavan voiman mukaan. Varsinaisten komposiittien valmistuksessa

kangaspaloja koottiin päällekkäin kolme tai neljä kankaiden paksuudesta riippuen siten, että ennen puristusta kankaiden kokonaispaksuus oli noin 10 mm luokkaa. Komposiiteille haluttiin aikaansaada melko tasalaatuiset ominaisuudet eri suuntiin nähden, joten kangaspaloja leikattiin sekä karstaussuuntaan että karstaussuunnan vastaisesti ja pinottiin päällekkäin vuorotellen. Pääsääntöisesti käytettiin testikappaleiden kolmen kankaan pinoamisjärjestystä (0/90/0); käytännössä keskikerroksen pitkän sivu leikattiin siis karstaussuuntaan ja pintakerroksissa poikittaiseen suuntaan. Komposiiteissa, joissa käytettiin neljää palaa kankaiden ohuuden vuoksi, keskikerroksen muodostivat kaksi ohuinta samansuuntaista palaa. Neljän kankaan pinoa käytettiin yhdessä 50 painoprosenttia pellavaa sisältävissä komposiiteissa sekä kaikissa 70 painoprosenttia sisältäneissä komposiiteissa. Puristusvoima osoittautui varsinaisten komposiittien valmistuksessa 88 kN:ksi ja paine 0.55 MPa:ksi, mikä on jonkin verran enemmän kuin testikappaleita valmistettaessa. Kuvassa 7.8 on esitetty valmiit komposiittilevyt.



**Kuva 7.8.** Valmiit puristusmuovatus komposiittilevyt.

Kun komposiitteja tarkasteltiin visuaalisesti, huomattiin että eniten muovia sisältäneet komposiitit olivat kostuneet parhaiten: 30 prosenttia pellavaa sisältäneissä komposiittilevyissä oli selkeästi havaittavissa eniten tummia, sulaneen muovin kastuttamia kohtia. 70 prosenttia pellavaa sisältäneet komposiittilevyt olivat puolestaan vaaleampia kuin muut levyt ja selkeästi tuntumaltaan kuitumaisempia. Pellavamäärän kasvaessa myös komposiittilevyjen paksuus hivenen kasvoi, koska kyseisissä levyissä pellavaa oli suhteessa enemmän kuin muovia, eivätkä kappaleet siten painuneet kasaan yhtä helposti kuin enemmän muovia sisältävät kappaleet. 30 prosenttia pellavaa sisältäneissä kappaleissa sulamuovi pääsi hieman virtaamaan muottonikalosta yli välilevyn päälle puristuksen aikana. Huomattavaa on, että kaikissa komposiiteissa oli paljain silmin nähtävissä lukuisia kuitujen kuoriosia ja muita roskia, jotka voivat mekaanisissa testeissä toimia virheinä ja heikentää komposiittien lujuutta.



### 7.3 Näytteenvalmistus

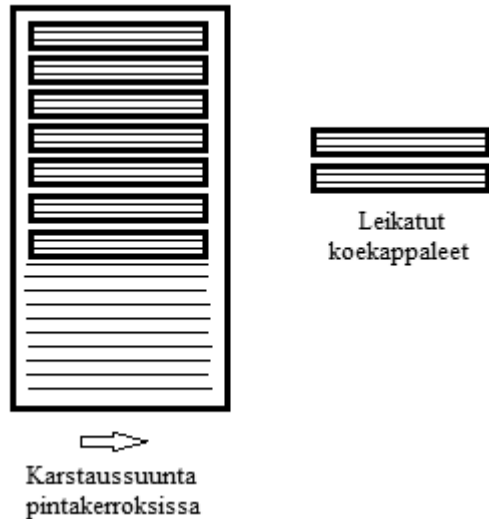
Näytteenvalmistus komposiiteista tuotti jonkin verran ongelmia. Levyjen työstäminen perinteisillä menetelmillä jyrsimällä tai leikkaamalla osoittautui vaikeaksi, koska leikkausterät repivät kuitupitoisten koekappaleiden reunaa liiallisesti ja lisäksi muovimatriisi sulii työstössä syntyneen lämmön vuoksi. Sulanut muovi liimasi osan koekappaleiden reunoista yhteen. Kuvassa 7.9 on havainnollistettu koekappaleiden reunan repeämää työstön jäljiltä.



**Kuva 7.9.** Iskukoekappaleiden työstössä koekappaleiden reuna repesi liiallisesti leikkauksen yhteydessä. Kyseisiä työstettyjä koekappaleita ei käytetty mekaanisessa testauksessa epätasaisen reunan vuoksi.

Työstöongelmien vuoksi veto- ja taivutuskoekoesauvat päädyttiin stanssaamaan levyistä irti prässin avulla. Saatavilla ei ollut muoveille tai muovikomposiiteille tarkoitettua standardistanssia, joten vetokoekappaleiden valmistuksessa käytettiin stanssia, joka oli tarkoitettu levyille tai kalvoille, joilla on suuri murtovenymä. Taivutuskoekappaleiden valmistuksessa käytettiin standardin kokoa suurempaa, leveydeltään 16 mm olevaa suorakulmaista stanssia. Stansseja käytettiin, koska mahdolliset työstön aiheuttamat virheet olisivat todennäköisesti vaikuttaneet liiallisesti mekaanisten testien tuloksiin. Koska iskukoekappaleille ei ollut olemassa sopivaa stanssia, päädyttiin sauvat leikkaamaan kokoonsa katkoteräveitsen avulla, jolloin reunoista saatiin tasaiset. Osa sauvoista lovettiin ja osa jätettiin loveamattomiksi; kaikissa koekappaleissa lovi ei ollut tasareunainen kuitupitoisen materiaalin vuoksi ja tämä saattaa vaikuttaa tuloksiin. Kuvassa 7.10 on esitetty komposiittien leikkaussuunta pintakerrosten karstaussuuntaan nähden.





**Kuva 7.10.** Näytteiden leikkaussuunta komposiittilevyistä. Komposiittien pintakerrokset olivat samansuuntaisia ja keskikerros näihin nähden poikittainen.

Sauvat leikattiin siten, että kuormitussuuntaan (eli esimerkiksi vetokuormituksen suuntaan) nähden komposiitin pintakerrokset olivat karstausuuntaisia. Toisin sanoen sauvat leikattiin levyistä poikittain, kuten kuvasta 7.10 voidaan havaita. Kutakin testiä varten leikattiin vähintään viisi koesauvaa. Levyistä leikattiin irti myös pienempiä pala- ja termisiä ja mikroskooppisia tarkasteluja varten.

## 8 TESTAUSMENETELMÄT

### 8.1 Mekaaniset testit

#### 8.1.1 Vetokoe

Vetokokeella selvitetään materiaalin kyky kestää vedon alaista kuormitusta. Kokeella saadaan selville materiaalin vetolujuus, murtovenymä ja kimmomoduuli, joista jälkimmäisin kuvaa materiaalin jäykkyyttä. Tässä työssä vetokoesauvat olivat standardin ISO 527-3 tyyppin 5 koekappaleen mukaisia. Sauvojen kokonaispituus oli 115 mm, päiden leveys 25 mm sekä kapean tasalevyisen osan leveys ja pituus 6 mm ja 33 mm. Kappaleet olivat noin 3 mm paksuja ja jokaisesta materiaalista testattiin vähintään 5 rinnakkaiskoesauvaa. Sauvat on esitetty kuvassa 8.1.



*Kuva 8.1. Stanssatut vetokoesauvat.*

Vetokoe suoritettiin standardin ISO 527-1 mukaisesti aineenkoestuslaitteistolla Instron 5967, 2 kN voimasellillä ja ilman ekstensiometriä. Vetonopeutena käytettiin 0.5 mm/min siihen asti, kunnes kappaleet olivat venyneet 0.3 %. Näin alkuosan kuvaajasta saatiin tarkempi kimmomoduulin laskemista varten. 0.3 % venymän jälkeen vetonopeus nostettiin arvoon 20 mm/min kappaleen murtumiseen saakka.

#### 8.1.2 Taivutuskoe

Taivutuskokeen avulla saadaan selville materiaalin kyky kestää taivuttavaa kuormitusta. Testillä selvitettiin materiaalin taivutuslujuus ja taivutusmoduuli. Taivutuskoe tehtiin kolmipistetaivutuksena standardin ISO 178 mukaisesti aineenkoestuslaitteistolla Instron 5967. Taivutuskoesauvojen dimensiot poikkesivat hieman standardin mitoista; sauvojen paksuus, leveys ja pituus olivat noin 3 mm, 16 mm ja 130 mm. Taivutustestissä tukipilarien välinen etäisyys oli 52 millimetriä. Testissä käytettiin 2 kN voimaselliä ja muo-

donmuutosnopeudeksi valittiin 10 mm/min. Kustakin materiaalista testattiin vähintään 5 koesauvaa.

### 8.1.3 Iskukoe

Iskukokeen avulla voidaan selvittää materiaalin iskunkestävyys. Tämä ilmaistaan tyyppillisesti energian absorptio avulla. Iskulujuus mitattiin standardin ISO 179-1 mukaisesti iskukoelaitteistolla CEAST Resil 5.5 J. Koekappaleiden paksuus, leveys ja pituus olivat noin 3 mm, 10 mm ja 80 mm ja iskukuormituksena käytettiin 5 J instrumentoimattomaa iskuvasaraa. Aluksi testit tehtiin loveamattomille sauvoille, mutta kaikki sauvat eivät murtuneet. Siten osa sauvoista lovettiin jälkepäin murtuman aikaansaamiseksi. Jokaisesta materiaalista testattiin vähintään 6 rinnakkaiskoesauvaa.

## 8.2 Dynaaminen mekaaninen analyysi (DMA)

DMA:lla (tai DMTA:lla) eli dynaamisella mekaanisella (termisellä) analyysillä voidaan tutkia materiaalin viskoelastista käyttäytymistä lämpötilan funktiona. Testillä saadaan selville koekappaleen varastomoduuli  $E'$ , häviömoduuli  $E''$  sekä vaimennustekijä  $\tan \delta$ . Näistä varastomoduuli kuvaa materiaalin elastista käyttäytymistä ja on verrannollinen materiaalin jäykkyyteen, kun taas häviömoduuli kuvaa materiaalin viskoosia käyttäytymistä ja energian häviämistä muodonmuutoksen aikana. Vaimennustekijä on häviömoduulin suhde varastomoduuliin lämpötilan funktiona. DMA:n avulla saadaan selville myös muun muassa materiaalin lasittumislämpötila.

DMA-testi suoritettiin kolmipistetaivutuksena Pyris Diamond DMA -laitteistolla. Taajuutena käytettiin 10 Hz ja lämmitysnopeutena 3 °C/min, kuormitusamplitudin ollessa 40 µm. Testin lämpötila-alue oli (- 70) – 130 °C.

## 8.3 Mikroskooppinen tarkastelu

### 8.3.1 Pyyhkäisyelektronimikroskopia (SEM)

SEM:lla (*scanning electron microscopy*) eli pyyhkäisyelektronimikroskopiolla tutkittiin komposiittien sisäistä rakennetta. SEM-kuvat otettiin Philips XL-30 pyyhkäisyelektronimikroskoopilla vetokoesauvojen murtopinnasta; sauvojen ehjät päät murrettiin alhaisissa lämpötiloissa nestetyössä hauraan murtopinnan aikaansaamiseksi ja pinnoitettiin kullalla ennen kuvausta.

### 8.3.2 Optinen mikroskopia

Komposiittien pinnan rakennetta tutkittiin käyttäen optista Leica MZ7.5 stereomikroskooppia. Mikroskoopilla saadaan otettua 3.15–100-kertaisia suurennoksia.

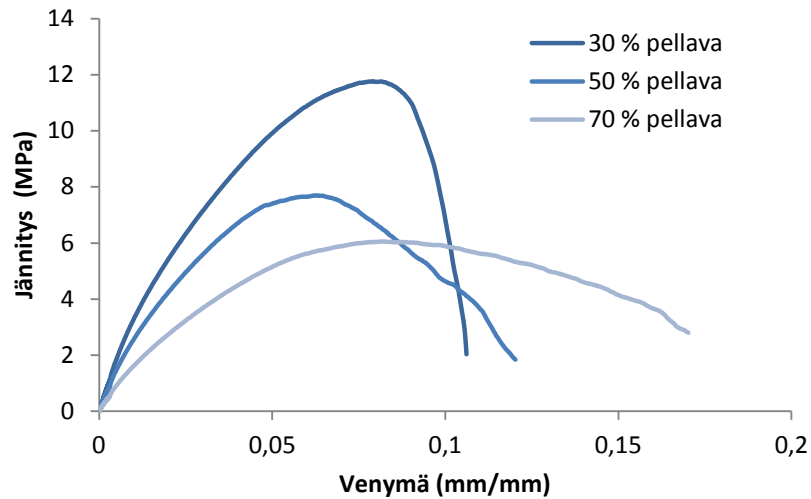
## 9 TULOSTEN TARKASTELO

Tässä luvussa käydään läpi testien tulokset. Koska puhtaasta tärkkelyspohjaisesta muovista koostuvaa kuitukangaskomposiittia ei onnistuttu valmistamaan vertailumateriaaliksi, on joitakin seuraavia tuloksia verrattu tietyn varauksin LUOMA:n aikaisemmassa testausraportissa [109] testattuihin ruiskuvalettuihin puhtaisiin Mater-Bi-sauvoihin. Eri prosessointimenetelmillä valmistettujen materiaalien ja erilaisille koekappaleille tehtyjen testien välinen luotettava vertailu on kuitenkin haastavaa, varsinkin jos testausparametrit eivät ole olleet yhtenevät ja siksi puhtaan muovin vertailun pohjalta tehtyjä johtopäätöksiä voidaan pitää vain suuntaa antavina.

### 9.1 Mekaanisten testien tulokset

#### 9.1.1 Vetokoe

Kuvassa 9.1 on esitetty komposiittimateriaalien keskimääräiset jännitys-venymä-käyrät. Tarkemmat mittaustulokset ovat nähtävissä liitteessä 2. Kuvan 9.1 perusteella komposiittien lujuusarvot eivät ole kovin korkeita, mutta toisaalta matriisimateriaalina toimiva tärkkelyspohjainen muovi on melko pehmeää ja joustavaa materiaalia, jonka lujuusarvot itsessään ovat alhaiset. On myös huomioitava, että komposiittien vetokokeissa käytetyt koekappaleet poikkeavat tyypillisesti käytetyistä standardikappaleista. Komposiittikoekappaleiden kapea tasalevyinen osa on oletettavasti herkkä komposiitissa oleville virheille. Näitä virheitä pellava/Mater-Bi-komposiiteissa on todennäköisesti paljon kuitujen sekaan jääneiden epäpuhtauksien ja kuitujen epäjärjestytyneisyyden vuoksi. Niinpä komposiittien lujuusominaisuudet voivat erota standardikoekappaleilla testatuista arvoista. Näitä vetokoetuloksia ei siis välttämättä voida luotettavasti vertailla muihin julkaisuihin, mutta tuloksia voidaan silti vertailla keskenään.



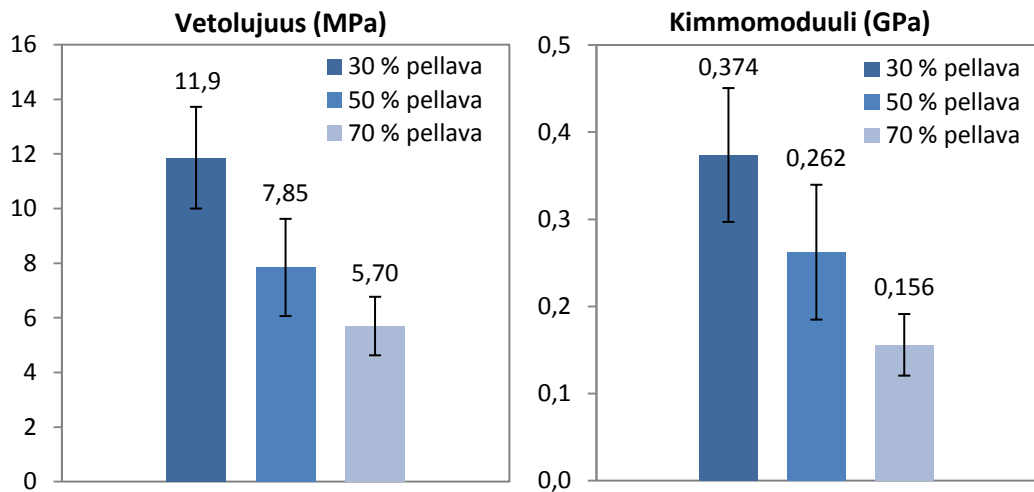
**Kuva 9.1.** Komposiittien keskimääräiset jännitys-venymä-käyrät.

Testin aikana koekappaleissa ei ollut havaittavissa kurouman syntyä ja sauvat murtuivat pääosin repeytymällä. Kappaleiden murtuessa koesauvojen päiden yhteen sotkeutuneet kuitukasaumat ylläpitivät komposiitissa vielä jonkinlaisen jännityksen. Siten aineenkoestuslaitteisto ei aina tunnistanut koekappaletta murtuneeksi repeämästä huolimatta. Tämä oli havaittavissa erityisesti 50 % ja 70 % pellavaa sisältäneissä komposiiteissa. Siten kyseisille kappaleille ei ole havaittavissa selkeää murtumispistettä maksimijännityksen kohdalla, vaan jännitys-venymä-käyrä laskeutuu loivasti kohti nollajännitystä. 30 % pellavaa sisältäneiden kappaleiden murtumisen laitteisto tunnisti paremmin, muttei silti kaikkien rinnakkaisvetojen kohdalla. Kuvassa 9.2 on havainnollistettu koekappaleiden murtumistapaa.



**Kuva 9.2.** Vetokoekappaleiden murtumistapa. Vasemmalla on kuvattu 30 prosenttia pellavaa sisältävä koesauvan vetokoetestaus ja murtuman synty. Oikealla kuvatuissa koesauvoissa on nähtävissä murtuneen sauvan kuitupitoinen pää (ylhäältä alaspäin 30 % pellavaa, 50 % pellavaa, 70 % pellavaa).

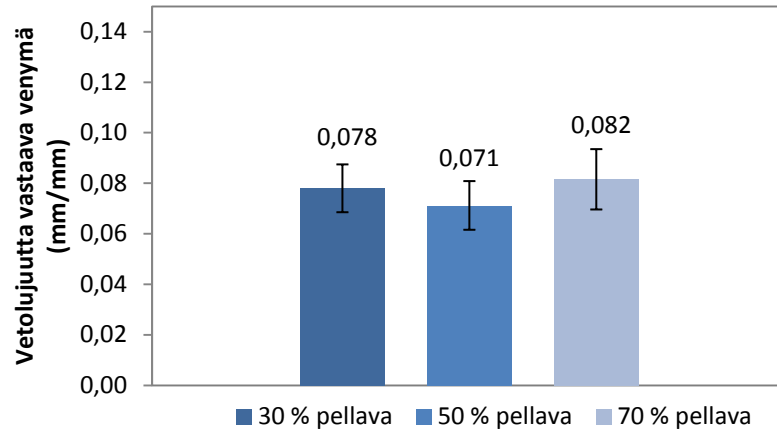
Pääsääntöisesti voidaan todeta, että pellavapitoisuuden kasvattaminen heikentää sekä komposiittien jäykkyyttä (käyrän alkuosan kulmakerroin) että vetolujuutta (suurin jännitys vetokokeen aikana). Tämä on havaittavissa myös kuvasta 9.3. Kimmomoduulin arvot on laskettu venymiä 0.0005 ja 0.0025 vastaavista jännityslukemista.



**Kuva 9.3.** Komposiittien vetolujuudet (eli maksimijännitykset vetokokeen aikana) ja kimmomoduulit. On huomattava, että koekappaleet poikkesivat standardista.

Kuitukomposiiteissa kuitumäärän lisäys tyypillisesti kasvattaa kappaleen jäykkyyttä, vaikkei vetolujuus kasvaisikaan. Pellavapitoisuuksilla 50 % ja 70 % kuitumäärät ovat kuitenkin todennäköisesti olleet niin suuria, että kuidut eivät ole sekoittuneet riittävän tasaisesti muovimatriisiin kanssa ja matriisipitoisuus on ollut liian matala kostuttamaan kuitujen pinnat. Tähän vaikuttaa myös käytetty prosessointimenetelmä, sillä esimerkiksi paineet puristusmuovauksessa ovat paljon pienemmät kuin ruiskuvalussa. Riittämätön kostuminen voi luoda rajapinnoille huokosia, jotka rajoittavat matriisin kuormankannon siirtymistä matriisia lujemmille kuiduille [55]. Murtolujuuden heikkeneminen viittaa tyypillisesti heikkoon adheesioon kuitujen ja matriisin välillä, mikä voi johtua puutteellisesta kuitujen kostumisesta. Pellavakuidut ovat myös lyhyitä ja epäjärjestäytyneitä. Jos luonnonkuidut eivät ole orientoituneet komposiitissa kuormituksen suuntaan, ne eivät voi toimia kuormankantajina matriisissa, vaan voivat sen sijaan toimia mahdollisina murtuman aiheuttavina virheinä [63]. Kuvasta 9.3 nähdään, että hajonta mekaanisissa ominaisuuksissa on melko suurta kaikkien komposiittien kohdalla. Tämä johtunee sekä luonnonkuitujen luontaisesta ominaisuuksien vaihtelusta että komposiittikappaleiden epätasalaatuisuudesta (katso luku 9.4).

Vaikka kuitumäärän kasvattaminen alensi komposiittien vetolujuutta ja jäykkyyttä, samaa ei havaittu tapahtuvan murtovenymän (kuva 9.4) kohdalla. Murtovenymän tarkka arviointi oli kuitenkin hankalaa selkeän murtumiskohdan puuttuessa, joten tässä yhteydessä murtovenymän on katsottu olevan maksimijännitystä vastaava venymänarvo.



**Kuva 9.4.** Maksimivetolujuutta vastaavat venymänarvot.

Kuvasta 9.4 nähdään, että vetolujuutta vastaavat venymänarvot ovat melko samansuuruiset kaikilla komposiiteilla. Tyypillisesti suurempi kuitumäärä alentaa komposiittien murtovenymää, mutta tässä tapauksessa vastaavaa ei havaittu. Tulos johtunee todennäköisesti suuresta kuitumäärästä, minkä vuoksi koekappaleet repesivät vähitellen selkeän murtumisen sijaan. Repeytyminen on voinut tapahtua esimerkiksi kuitujen katkeamisen vuoksi tai koska kuidut ovat irronneet matriisista vedon aikana. Kuitujen irtoaminen matriisista viittäisi heikkoon adheesioon komponenttien välillä.

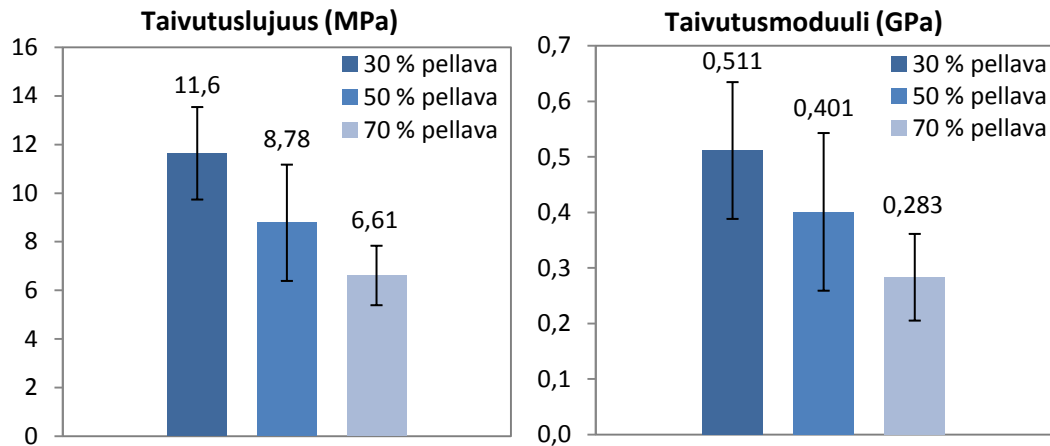
Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että parhaimmat jäykkyys- ja vetolujuusominaisuudet ovat 30 % pellavaa sisältävillä näytteillä, joissa muovimäärä on ollut todennäköisesti riittävän suuri kostuttamaan luonnonkuidut ja tuottamaan riittävän adheesioon kuitujen ja muovin välille. LUOMA-projektissa aikaisemmin ruiskuvalettuihin puhtaisiin Mater-Bi-koesauvoihin verrattuna (vetolujuus 11.6 MPa, Youngin moduuli 0.168 GPa) [109] pellavakuitujen voidaan tässä tapauksessa katsoa pääsääntöisesti kasvattavan muovin jäykkyyttä, mutta ei lisäävän vetolujuutta. Tämä johtopäätös on kuitenkin vain suuntaa antava, kuten luvun alussa mainittiin.

### 9.1.2 Taivutuskoe

Kuvassa 9.5 on esitetty taivutuskokeen tulokset eli taivutuslujuus ja taivutusmoduuli eli taivutusjäykkyys. Kuvassa 9.6 on puolestaan havainnollistettu taivutuskoeilannetta. Yksikään koekappaleista ei murtunut kolmipistetaivutuskokeen aikana, mutta taivutuskoesauvojen pinta rypistyi sauvan yläpintaan kohdistuvan puristavan voiman vaikutuksesta.

Kuvan 9.5 taivutuslujuus on maksimijännitys testin aikana. Taivutusjäykkyyksarvot on laskettu venymänarvoa 0.005 ja vaihtelevia venymänarvoja 0.009-0.018 vastaavista jännitysarvoista; syy vaihdeltiin venymänarvoon oli jännitys-venymä-käyrien alkuosassa ilmennyt epäjatkuvuuskohta, jossa jännitysarvo pysyi jonkin aikaa vakiona venymän kasvaessa. Jäykkyyden laskemiseen käytettäviä venymänarvoja täytyi siten säätää, jottei tasaisen jännityksen alue vääristäisi käyrän alun kulmakertoimen laskemista. Kyseinen epäjatkuvuuskohta johtui todennäköisesti aineenkoestuslaitteiston toiminnasta.

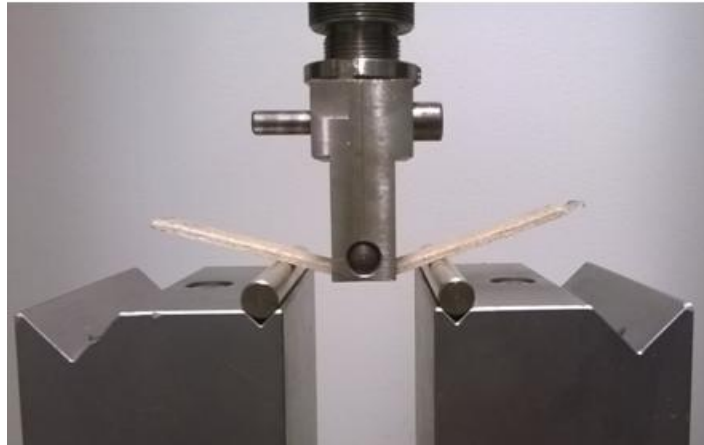
tavirheestä; mittapää ei ollut täysin lukittunut asentoonsa, vaan pystyi hieman liikkumaan testin aikana, minkä vuoksi käyrään ilmestyi tasannemainen alue ennen kuin sauva alkoi täysin kantaa mittapään painoa. Virheen vuoksi venymänarvot eivät pidä paikkaansa koko akselilla korjatuissa kuvaajissa, mutta virhe ei kuitenkaan vaikuttanut taivutuslujuuden arviointiin. Alkuperäiset ja korjatut esimerkkikuvaajat sekä tarkemmat mittaustulokset ovat nähtävissä liitteessä 3.



**Kuva 9.5.** Komposiittien maksimitaivutuslujuus ja taivutusmoduuli eli taivutusjäykkyys. Yksikään koekappaleista ei murtunut testin aikana.

Kuvan 9.5 tulokset ovat yhtenevät vetokoetulosten kanssa, sillä kuituosuuden kasvattaminen heikentää taivutuslujuutta ja -jäykkyyttä. Syy heikentävään vaikutukseen lienee sama kuin vetokoetulosten tapauksessa: kun kuitupitoisuus on liian suuri, kuidut eivät ole kostuneet matriisilla tarpeeksi, jolloin rajapinnalle on voinut syntyä huokosia. Tällöin myös kuormankannon siirtyminen matriisilta kuiduille on puutteellista ja sitä myötä lujuusominaisuudetkin ovat alhaiset. Kestomuovipohjaisten luonnonkuitukomposiittien taivutuslujuusarvot ovat tyypillisesti vetolujuusarvoja suurempia, ja tämä on havaittavissa myös 50 % ja 70 % pellavaa sisältävien komposiittien kohdalla. Lisäksi kaikkien komposiittien taivutusjäykkyysarvot ovat vetojäykkyysarvoja suurempia. Toisaalta tämänkaltainen taivutus- ja vetokoetulosten keskinäinen vertailu ei välttämättä ole mielekäästä tulosten suuren hajonnan ja testikappaleiden eroavaisuuksien vuoksi.





*Kuva 9.6. Koesauvojen kolmipistetäivutus.*

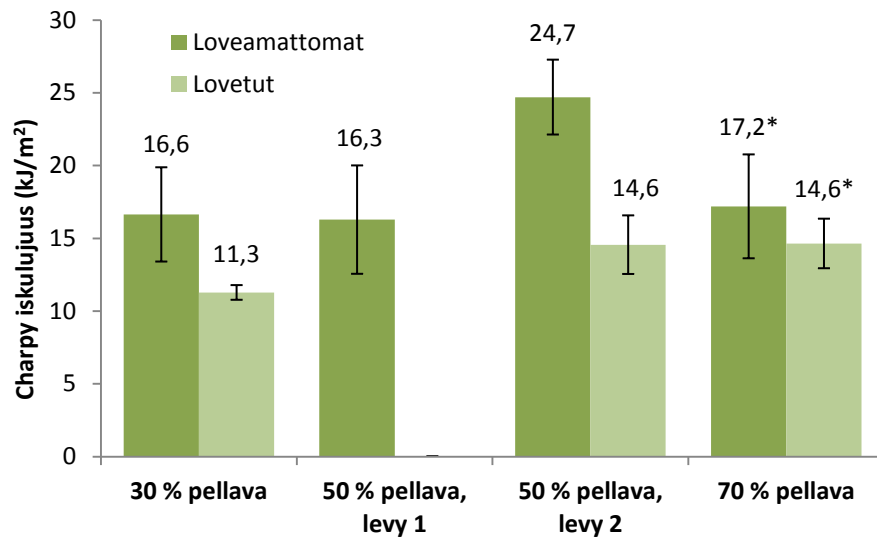
LUOMA:n aikaisemmassa testausraportissa [109] ruiskuvaletulle puhtaalle Mater-Bi:lle on määritetty taivutusmoduuliksi 0.183 GPa ja taivutuslujuudeksi 8.79 MPa. Näihin tuloksiin verraten pellavakuidun voidaan katsoa kasvattavan muovin taivutusjäykkyyttä kaikilla pitoisuuksilla, vaikka suuremmilla pitoisuuksilla taivutusjäykkyys pieneneekin. Taivutuslujuus puhtaaseen muoviin nähden kohenee selkeästi sen sijaan ainoastaan 30 % pellavapitoisuudella. Tämänkaltainen vertailu on kuitenkin vain suuntaa antavaa koekappaleiden, prosessointimenetelmien ja mahdollisten testausparametrien eroavaisuuksien vuoksi.

### 9.1.3 Iskukoe

Charpy-iskukokeen tulokset on esitetty kuvassa 9.7 ja tarkemmat mittaustulokset liitteessä 4. Iskukoe-kappaleet jouduttiin leikkaamaan levyistä veitsellä käsin ja lisäksi osassa lovetuista koekappaleista lovi ei ollut tasareunainen. Nämä seikat saattavat aiheuttaa tuloksiin ylimääräistä virhelähdettä. 50 % pellavaa sisältäneestä komposiitista testattiin kahta eri levymateriaalia (levy 1 ja levy 2), koska ensimmäinen levymateriaali ei riittänyt lovetujen koekappaleiden valmistukseen. Levystä 1 testattiin siis loveamattomat näytteet ja levystä 2 sekä loveamattomat että lovetut näytteet. Kuvan 9.7 perusteella voidaan todeta, että 50 % pellavaa sisältävän komposiitin kahdesta eri levymateriaalista leikatuilla näytteillä on huomattava ero iskulujuusominaisuuksissa. Syy tähän melko suureen eroon ei selvinnyt, mutta eri prosessointiparametreilla on voinut ollut vaikutusta asiaan; levymateriaalin 2 valmistuksessa käytettiin ohuempia kuitukankaita ja myös puristuspaine oli pienempi kuin levymateriaalin 1 valmistuksessa ja siten komposiittien rakenteissa voi olla eroja. Levymateriaalin 1 tapauksessa näytteistä suurin osa koostui neljästä kuitukangaskerroksesta, kun taas levymateriaalissa 2 kuitukangaskerroksia oli kolme. Silmin nähden levymateriaali 1 oli tuntumaltaan kuitumaisempi kuin levymateriaali 2. Joka tapauksessa erot eri levyjen ominaisuuksien välillä voivat siis olla suuret.

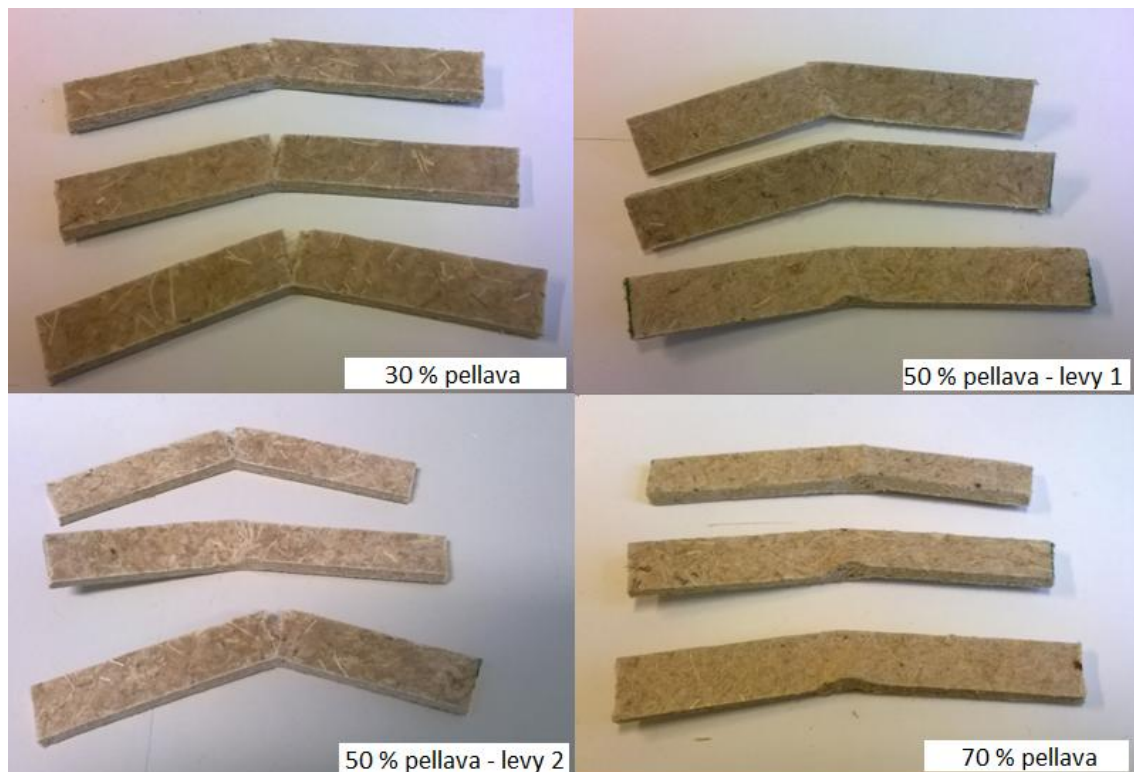
Lovetuista iskukoe-tuloksista on nähtävissä, että 30 % pellavaa sisältäneellä kappaleella iskulujuus näyttäisi olevan matalin, kun taas 50 % ja 70 % pellavaa sisältäneillä kappaleilla iskulujuudet ovat samankaltaiset. On kuitenkin huomioitava, että 70 % pel-

lavaa sisältäneet kappaleet eivät murtuneet iskun voimasta edes lovettuina. Siten 70 % pellavaa sisältäneiden komposiittien iskulujuusarvot eivät ole kovin vertailukelpoisia muihin arvoihin nähden.



**Kuva 9.7.** Iskukokeiden tulokset (Charpy, sekä loveamaton että lovettu). \*=ei murtumaa.

Lovelut 30 % ja 50 % pellavaa sisältäneet komposiitit murtuivat selkeästi, mutta loveamattomien komposiittien murtumistavoissa ja muodonmuutoksissa oli eroja. Loveamattomat kappaleet iskukokeen jäljiltä on esitetty kuvassa 9.8.



**Kuva 9.8.** Loveamattomien koekappaleiden murtuminen ja muodonmuutokset iskukokeen jäljiltä.

Kuvasta 9.8 nähdään, että 30 % ja 50 % (levy 2) pellavaa sisältäneissä kappaleissa on havaittavissa selkeä murtuman synty: koesauvat murtuivat iskukuormituksen kohdalta lähes kahdeksi erilliseksi palaseksi. 50 % (levy 1) ja 70 % pellavaa sisältäneiden komposiittien murtuminen oli sen sijaan vähemmän selkeää. Pellavapitoisuudella 70 % komposiitit eivät murtuneet iskusta, vaan kappaleissa tapahtui nurjahdusmainen muodonmuutos. Murtuma ei siis kyennyt ydintymään ja etenemään koekappaleissa, vaan iskuenergia hajaantui. Joidenkin kappaleiden tarkempi tarkastelu osoitti, että pellavakuitukangaskerrokset olivat iskun voimasta irronneet toisistaan (kuva 9.9). Tämä viittaa siihen, että päällekkäin pinottujen kuitukankaiden välinen sidoslujuus on ollut heikko ja muovin määrä lienee ollut riittämätön kostuttamaan suuren kuitumäärän. Osa 50 % pellavaa (levy 1) sisältäneistä loveamattomista koesauvoista murtui samantapaisesti kuin 30 % pellavaa sisältäneet sauvat, mutta joissakin koekappaleissa oli havaittavissa vain vastaava nurjahdusmainen muodonmuutos kuin 70 % pellavaa sisältäneissä komposiiteissa.



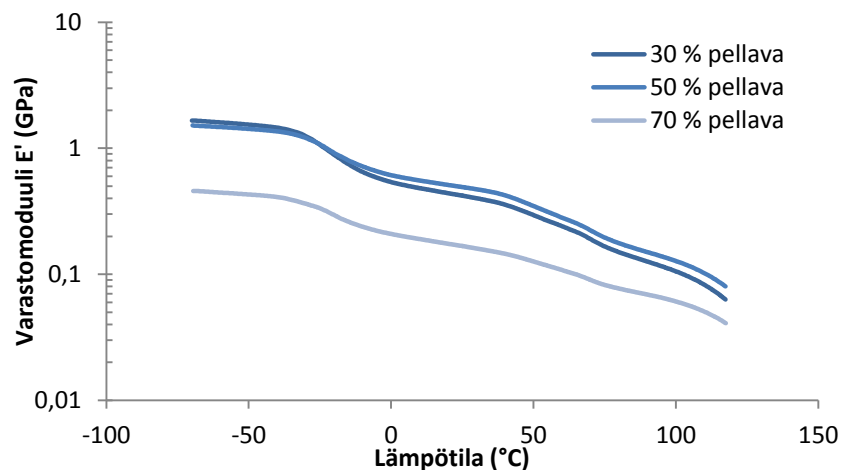
**Kuva 9.9.** Osassa 70 % pellavaa sisältäneistä koesauvoista neljä kuitukangaskerrosta erottui toisistaan iskun voimasta. Koekappale on hyvin kuitumainen ja muovin määrä on ollut riittämätön kostuttamaan suuren kuitumäärän. Kuva on otettu optisella stereomikroskoopilla Leica MZ7.5 (suurennos 12.6 -kertainen).

Ruiskuvalettu puhdas Mater-Bi ei aikaisemman LUOMA:n testausraportin [109] perusteella murtunut edes lovettona, joten kuitulisäyksen voidaan katsoa heikentävän muovin iskulujuutta ainakin pellavapitoisuuksilla 30 % ja 50 %. Tämä johtuu siitä, että tyypillisesti kuitulisäys luo materiaaliin jännityskeskittymäpisteitä, joiden vuoksi murtuman on helpompi ydintyä ja edetä [65, s. 248].

## 9.2 DMA-testien tulokset

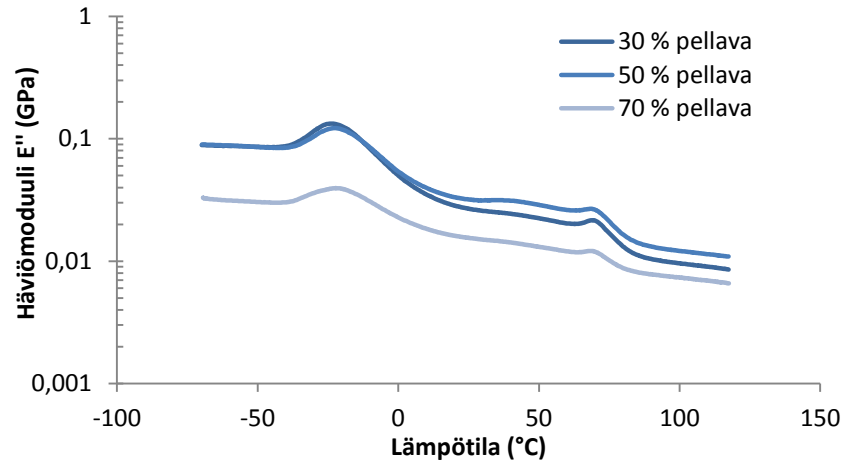
Kuvissa 9.10, 9.11 ja 9.12 on esitetty DMA-testien tulokset. Kuvassa 9.10 on nähtävissä komposiittien varastomoduulin käyrä, joka kaikkien komposiittien kohdalla laskee läm-

pötilan noustessa. Varastomoduuli on verrannollinen materiaalin taivutusjäykkyyteen. Selkeä pudotus varastomoduulissa on havaittavissa noin  $-25\text{ °C}$ :ssa. Tämä transiio kuvaa lasittumislämpötilaa, jossa materiaali (muovi) muuttuu lasimaisesta kumimaiseksi ja samalla materiaalin jäykkyys laskee. Lasittumislämpötila arvioidaan tyypillisesti joko häviömoduulin tai vaimennustekijän kuvaajasta. Häviömoduulin piikistä määritetty lasittumislämpötila vastaa yleensä parhaiten muilla termisillä analyysimenetelmillä määritettyjä lasittumislämpötiloja [110]. Kuvasta 9.10 nähdään, että 30 % ja 50 % pellavaa sisältäneiden komposiittien varastomoduuli on korkeampi kuin 70 % pellavaa sisältäneellä komposiitilla kaikissa lämpötiloissa.



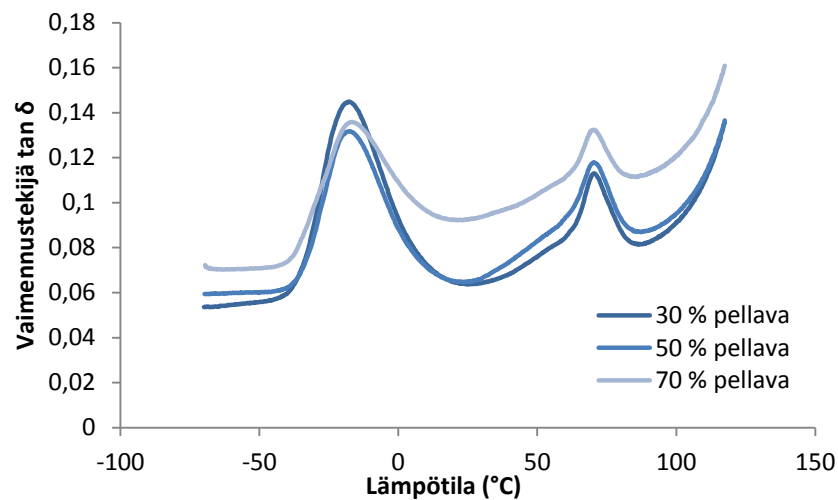
**Kuva 9.10.** Materiaalien varastomoduulit lämpötilan funktiona.

Varastomoduuli ja mekaanisten taivutuskokeiden moduulitulokset eroavat toisistaan jonkin verran. 70 % pellavaa sisältäneet kappaleet ovat DMA-testien perusteella taivutusjäykkyydeltään selkeästi kahta muuta materiaalia heikompia, kun taas lasittumislämpötilan yläpuolella 50 % pellavaa sisältäneen komposiitin varastomoduuli on hivenen korkeampi kuin 30 % pellavaa sisältäneellä komposiitilla. Huoneenlämpötilassa mitatuissa taivutuskokeissa kuitenkin havaittiin, että taivutusjäykkyys laskee melko tasaisesti kuitumäärän kasvaessa 30 %:sta 70 %:iin ja lisäksi 30 % pellavaa sisältäneellä komposiitilla taivutusjäykkyys oli pääsääntöisesti korkeampi kuin 50 % pellavaa sisältäneellä komposiitilla. Koetuloksissa oli kuitenkin suurehko hajonta, mikä voi selittää mahdollisuuden myös poikkeaville tuloksille taivutusjäykkyydessä. Lisäksi tuloksiin saattaa vaikuttaa se, että DMA-testissä 50 % pellavaa sisältänyt komposiittinäyte sisälsi vain kolme kangaskerrosta, kun taas taivutuskokeissa käytettyjen koekappaleiden kangaskerrosten määrä oli neljä. Pääsääntöisesti näyttää kuitenkin siltä, että liian suurella kuitupitoisuudella (70 %) kuidut eivät ole kostuneet tarpeeksi matriisilla, kuten aikaisemmin on mainittu.



**Kuva 9.11.** Materiaalien häviömoduulit lämpötilan funktiona.

Kuvassa 9.11. on esitetty komposiittien häviömoduulit. Kuvaajista on havaittavissa kaksi transitiota eli siirtymää; korkea piikki noin  $-25 - (-20)$  °C:n tienoilla sekä pienempi piikki noin  $65$  °C:n tietämillä. Häviömoduulin nopea nousu viittaa polymeerin rakenteen kasvaneeseen liikkuvuuteen (relaksaatioprosessi) [110]. Ensimmäinen piikki kuvaa jo mainittua lasittumislämpötilaa ja jälkimmäinen piikki on pienempi relaksaatio. Toinen relaksaatiopiikki voi johtua Mater-Bin sisältämistä muista komponenteista. Kuitumäärän lisäys ei juuri muuta lämpötiloja, joissa siirtymät tapahtuvat.



**Kuva 9.12.** Materiaalien tan delta lämpötilan funktiona.

Kuvassa 9.12 on esitetty komposiittien vaimennustekijä. Pellavapitoisuuksilla  $30\%$  ja  $50\%$  käyrät ovat jälleen melko samankaltaiset lukuun ottamatta pieniä eroja siirtymäpiikkien intensiteeteissä.  $70\%$  pellavaa sisältävän komposiitin  $\tan \delta$  on sen sijaan pääasiassa korkeampi kuin kahdella muulla materiaalilla koko lämpötila-akselilla, lukuun ottamatta lasittumislämpötilassa ilmenevää piikkiä. Korkea  $\tan \delta$  kuvaa, että materiaalin käyttäytyminen on enemmän viskoosia kuin elastista [111, s. 237]. Tyypillisesti tämä tarkoittaa sitä, että kun materiaaliin syntyy muodonmuutos, materiaali ei palaudu alkuperäiseen muotoonsa [110]. Taulukkoon 9.1 on koottu yhteenveto DMA-tuloksista.

**Taulukko 9.1.** DMA-tulosten yhteenveto. Lasittumislämpötila on määritetty häviömoduulin kuvaajan piikistä ja toinen siirtymälämpötila on määritetty sekä häviömoduulin että vaimennustekijän kuvaajan piikistä.

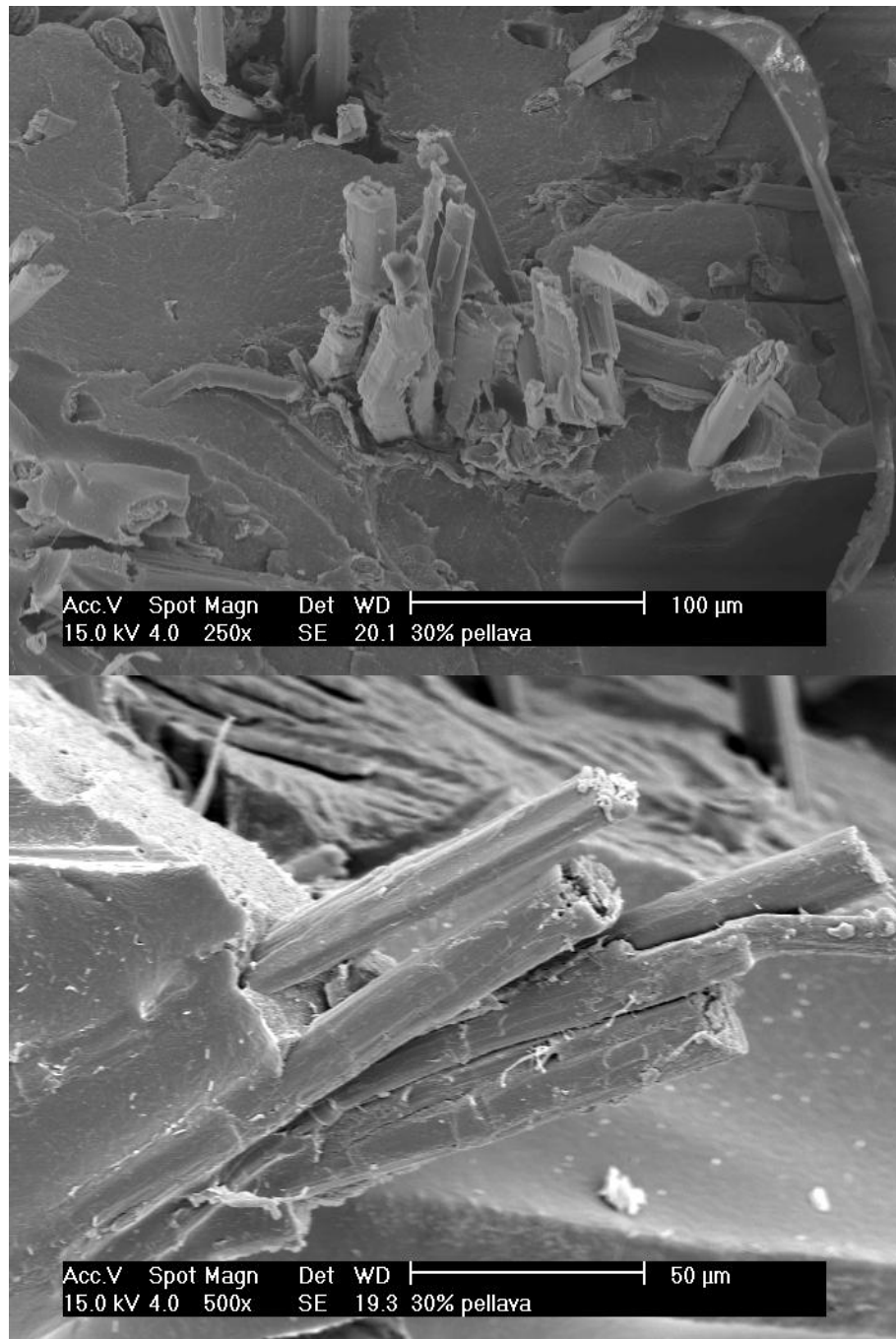
Materiaalin pellava- pitoisuus	Lasittumis- lämpötila (°C)	Toinen siirtymä- lämpötila (°C)		Varastomoduuli E' (GPa)		
	<i>E''</i>	<i>E''</i>	<i>tanδ</i>	-20 °C	0 °C	20 °C
30 %	-23.9	69.1	70.4	0.887	0.539	0.439
50 %	-23.4	68.4	70.8	0.921	0.613	0.512
70 %	-22.5	68.7	70.2	0.295	0.209	0.175

Taulukon 9.1 perusteella voidaan todeta, että lasittumislämpötila näyttäisi hieman kasvavan kuituosuuden kasvaessa, mutta erot ovat kuitenkin pieniä. Aikaisemmin LUOMA-projektissa tehdyn DSC-testin perusteella puhtaan Mater-Bi-granulaatin lasittumislämpötila on noin -34 °C:n tietämillä [109]. DSC-testistä arvioitu lasittumislämpötila on tyypillisesti lähellä DMA:n häviömoduulin piikistä mitattua arvoa, kun DMA-testin käytetty taajuus on 1 Hz. Suuremmilla taajuuksilla lasittumislämpötila tyypillisesti jonkin verran nousee. [111, s. 248, 271.] Tämän työn DMA-testi on tehty taajuudella 10 Hz. Käytännössä taulukon 9.1 lasittumislämpötilat ovat siis todennäköisesti hieman korkeammat kuin ne olisivat 1 Hz:lla mitattaessa. On kuitenkin oletettavissa, että kuitupitoisuus nostaa lasittumislämpötilaa puhtaaseen muoviin nähden ainakin jonkin verran. Mahdollinen lasisiirtymälämpötilan nouseminen voi selittyä sillä, että matriisipolymeerien ketjujen liike vaikeutuu, kun kuituja lisätään polymeeriin [65, s. 249-250].

## 9.3 Mikroskooppinen tarkastelu

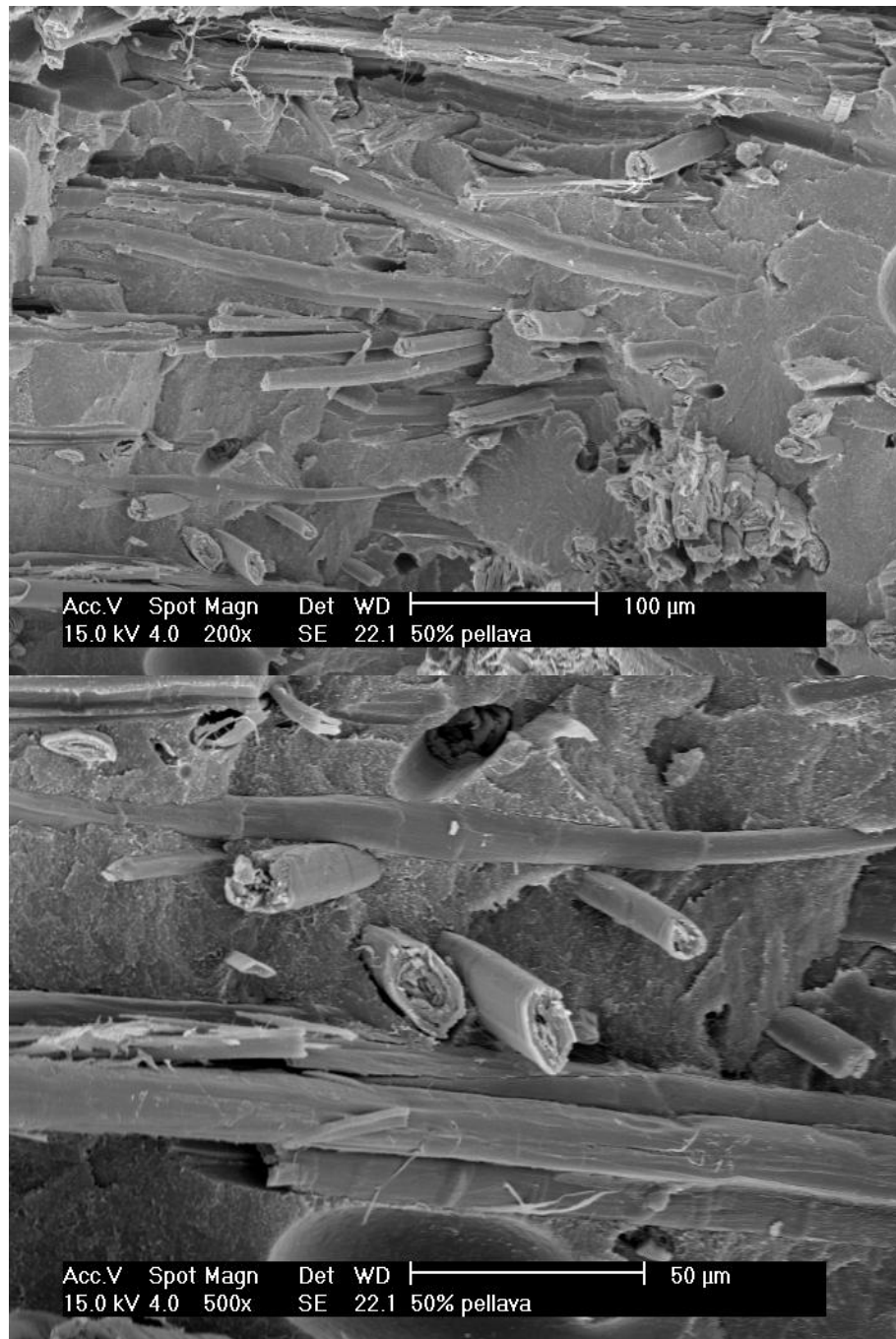
### 9.3.1 SEM-kuvat

Kuvissa 9.13, 9.14 ja 9.15 on esitetty SEM-kuvat komposiittien murtopinnasta. Kaikissa komposiiteissa oli nähtävissä lukuisia kuitukimppuja. Tämänkaltaisten epätasaisesti jakautuneiden kuitujen kostuminen matriisimateriaalilla on osittain puutteellista.



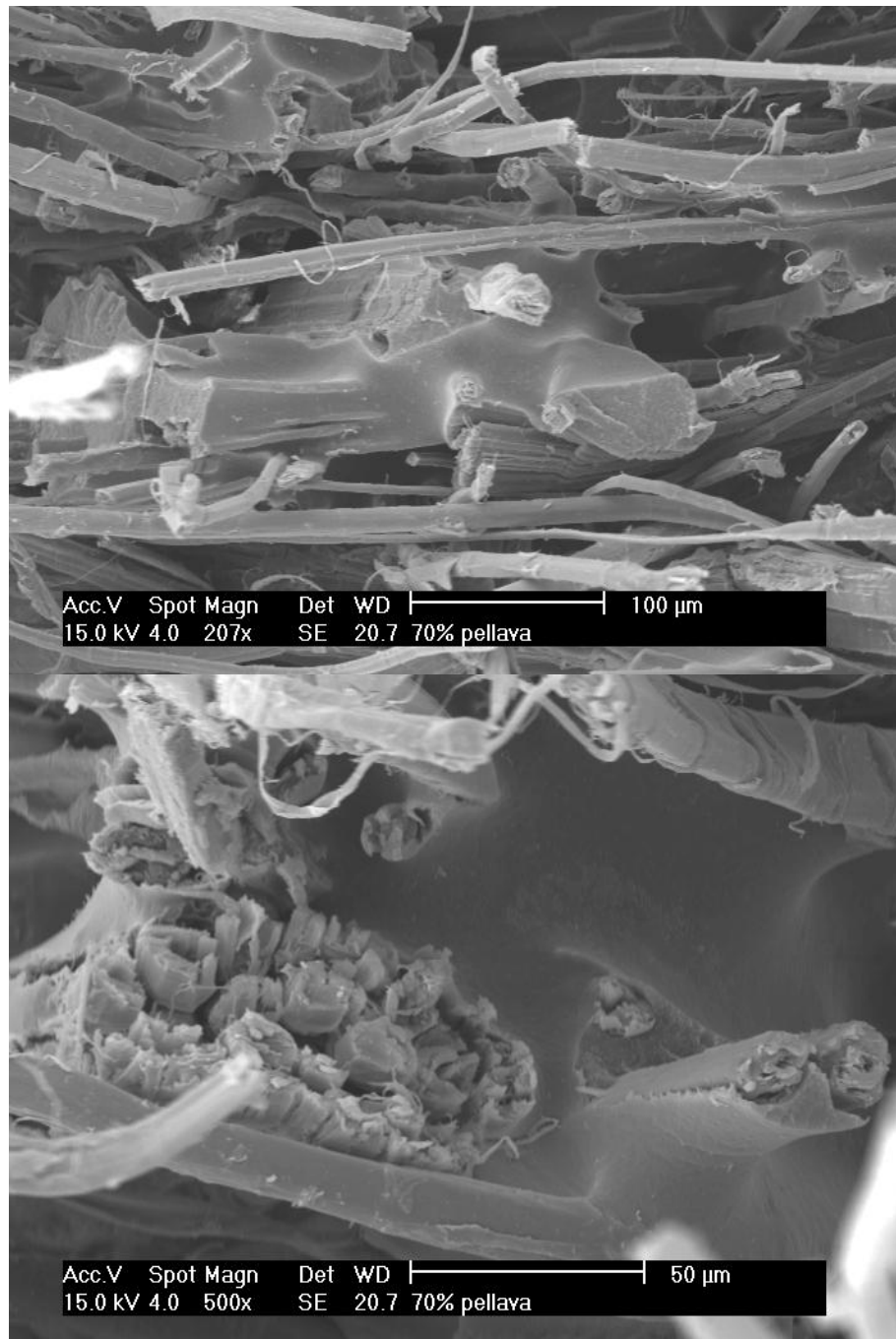
**Kuva 9.13.** SEM-kuvat 30 % pellavaa sisältäneestä komposiitista. Kuidut ovat matriisissa pääsääntöisesti ryhmittyneet yhteen ja niiden pinnalla on nähtävissä jonkin verran muovimatriisia.





**Kuva 9.14.** SEM-kuvat 50 % pellavaa sisältäneestä komposiitista. Ylemmässä kuvassa on nähtävissä suurehko kuitukimppu oikealla alalaidassa. Alempi kuva on suurennos ylemmän kuvan vasemmasta alalaidasta, ja siinä on nähtävissä katkenneita kuidunpäitä.





**Kuva 9.15.** SEM-kuvat 70 % pellavaa sisältäneestä komposiitista. Pellavapitoisuus komposiitissa oli niin suuri, ettei muovimäärä ollut riittävä ympäröimään kuituja ja siten rakenne oli hyvin huokoinen. Alemmassa kuvassa on nähtävissä suurehko kuitukimppu.

Kuvien perusteella muovin ja pellavakuitujen välillä on havaittavissa ainakin jonkin verran tartuntaa eli adheesiota niiltä osin, kun kuidut ovat kostuneet matriisilla. Tähän viittaa se, että kuvassa 9.13 joidenkin pellavakuitujen pinnassa on nähtävissä niihin tarttunutta muovimatriisia. Lisäksi kuvien 9.13 ja 9.14 perusteella matriisissa ei ole havaittavissa kovin paljon reikiä, ja kuitujen ja matriisin välillä ei pääsääntöisesti ole suuria rakoja, jotka viittaisivat puutteelliseen tartuntaan komponenttien välillä. Kuvassa 9.14 osa kuiduista on katkennut läheltä murtopintaa ilman kuitujen vetäytymistä ulos matrii-

sista eli ilman kuitujen pull-outia, mutta toisaalta havaittavissa on kuitenkin suurempia pull-out-pituuksia. Kuitujen suurempi pull-out-pituus viittaa yleensä heikompaan adheesioon.

Heikkoa adheesiota suurempi ongelma näyttäisi olevan puutteellinen matriisimäärä suuremmilla pellavakuitupitoisuuksilla. Erityisesti pellavapitoisuudella 70 % komposiitin rakenne on hyvin huokoinen: kuvassa 9.15 on nähtävissä paljon kuituja, joita matriisi ei ole ympäröinyt ja jotka ovat kontaktissa keskenään. Suurien kuitukimppujen kostuminen matriisilla on myös puutteellista, koska matriisi ei kostuta kuitukimppujen sisäosan kuituja. Tämänkaltainen huokoinen rakenne vaikuttaa negatiivisesti mekaanisiin ominaisuuksiin, koska kuormitus ei siirry tehokkaasti matriisilta kuitujen kannettavaksi.

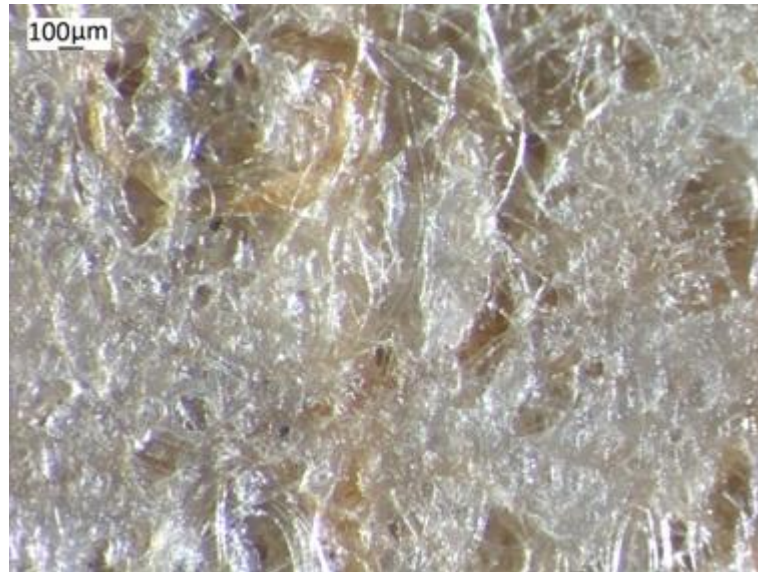
Kaiken kaikkiaan komposiittien mekaanisten ominaisuuksien heikkous korkeimmilla kuitupitoisuuksilla näyttäisi siis enemmän selittyvän puutteellisella matriisimäärällä ja siten huonolla kuitujen kostumisella ja huokoisella rakenteella kuin heikolla komponenttien välisellä adheesiolla. Adheesio laadussa on kuitenkin vaihteluita tarkastelukohtasta riippuen. Tähän voivat vaikuttaa esimerkiksi pellavakuitujen seassa olevat epäpuhtaudet ja luontainen vaihtelu rakenteessa. Suuremmilla pellavakuitupitoisuuksilla rakenteessa on myös enemmän epäpuhtauksia, jotka voivat toimia murtuman ydintäjinä ja vaikuttaa siten negatiivisesti mekaanisiin ominaisuuksiin. Myös kuitujen epätasainen jakautuminen matriisiin voi heikentää komposiittien lujuutta.

### 9.3.2 Optinen mikroskopia

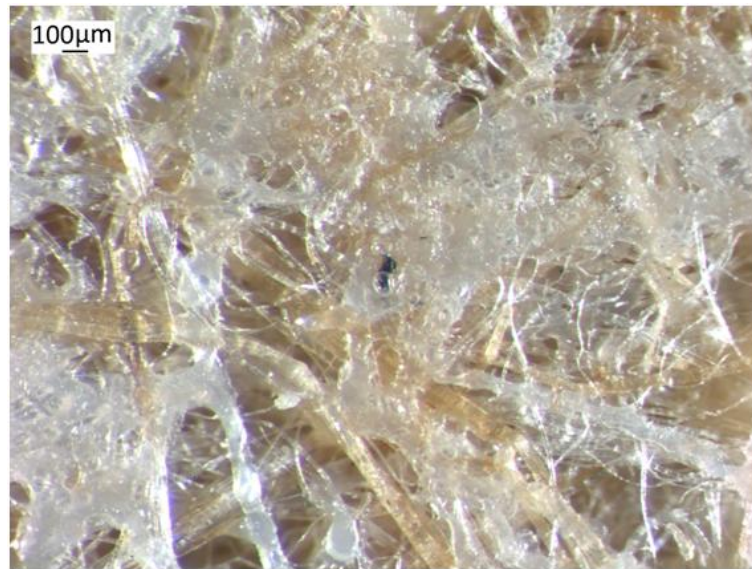
Optiset mikroskopiakuvat komposiittien pinnanlaadusta on esitetty kuvissa 9.16, 9.17 ja 9.18. Kuvista nähdään, että komposiittien pinnanlaaduissa on huomattavia eroja.



**Kuva 9.16.** 30 % pellavaa sisältävän komposiitin pinnanlaatu.



**Kuva 9.17.** 50 % pellavaa sisältävän komposiitin pinnanlaatu.



**Kuva 9.18.** 70 % pellavaa sisältävän komposiitin pinnanlaatu.

Kuvasta 9.16 nähdään, että pellavapitoisuudella 30 % komposiitin pinta on melko tasaisesti sulaneen muovin kostuttama ja pinnassa näkyy jonkin verran pienehköjä huokosia. Kuvista 9.17 ja 9.18 sen sijaan nähdään, että 50 % ja erityisesti 70 % pellavaa sisältäneiden komposiittien pinnassa on runsaasti suuria huokosia sekä alueita, joissa muovimäärä on ollut riittämätön ympäröimään pellavakuidut. Myös osa muovikuiduista on sulanut puutteellisesti. Kaikissa kuvissa on nähtävissä pellavakuitukimppuja ja pellavankuidun kuoriosia ja muita epäpuhtauksia. Huokoinen rakenne, kuitukontaktit ja epäpuhtaudet edesauttavat komposiittien mekaanisten ominaisuuksien laskua. Mikrokooppikuvista ei voitu todeta, että kuidut olisivat selkeästi orientoituneet matriisissa tiettyyn suuntaan.

SEM-kuvien ja optisen mikroskopian perusteella voidaan todeta, että 50 % ja 70 % pellavamäärä komposiitissa on liian suuri, jotta muovimäärä riittäisi tasalaatuisen matriisin aikaansaamiseksi. Jos tavoitteena on aikaansaada vähähuokoinen rakenne, jonka

lujuusominaisuudet ovat riittävän hyvät, tulisi komposiitit valmistaa alle 50 % pellavakuituosuuksilla.

## 9.4 Tuloksiin vaikuttavat tekijät

Testitulosten suurehko hajonta johtuneen sekä luonnonkuitujen luontaisesta ominaisuuksien vaihtelusta että komposiittikappaleiden epätasalaatuisuudesta. Epätasalaatuisuuteen voi vaikuttaa epäjärjestäytynyt kuituorientaatio, komposiittien valmistuksessa käytettyjen kangaskerrosten määrän ja paksuuden vaihtelu, pellavakuitukimppujen määrä pellavamassassa ja pellavamassan sekaan jääneet epäpuhtaudet. Koska kuitukangaskerrokset eivät itsessään olleet täysin tasalaatuisia, saattavat komposiittilevyjen rakenteetkin erota toisiinsa nähden. Erityisesti 50 % pellavaa sisältäneiden komposiittien testituloksissa on hyvä ottaa huomioon, että joissakin testeissä käytetyt komposiittinäytekappaleet koostuivat kolmesta kuitukangaskerroksesta ja joissakin neljästä. Kangaskerrosten lukumäärät eri testien näytekappaleissa on koottu taulukkoon 9.2.

**Taulukko 9.2.** Kuitukangaskerrosten määrä eri testikappaleissa.

	Vetokoe			Taivutuskoee			Iskukoe			DMA		
Pellavapitoisuus (paino-%)	30	50	70	30	50	70	30	50	70	30	50	70
Kuitukangaskerrosten lukumäärä	3	3	4	3	4	4	3	3 ja 4	4	3	3	4

Kuitulujitettujen komposiittien laatu riippuu merkittävästi kuitujen ja matriisin välisestä rajapinnasta, koska hyvin muodostunut rajapinta mahdollistaa kuorman siirron matriisilta kuiduille [65, s. 247]. Kuten aikaisemmin todettiin, kuitupitoisuuksiltaan korkeiden komposiittien heikot lujuusarvot selittyvät todennäköisesti matriisimäärän riittämättömyydellä; tällöin rakenteeseen muodostuu lukuisia huokosia ja kuitukontakteja, jotka laskevat komposiittien lujuutta. Myös kuitujen seassa olevat roskat voivat toimia murtumisen ydintymisen aikaansaajina. Parempia lujuusarvoja voitaisiin mahdollisesti aikaansaada puhtaammalla pellavakuitumassalla ja optimoimalla prosessointiparametreja. Jos komposiitit esimerkiksi puristettaisiin suuremmalla paineella ohuemmiksi kappaleiksi, voitaisiin mahdollisesti vähentää huokosten syntymistä rakenteeseen [76], helpottaa muovin sulamista ja siten parantaa lujuusominaisuuksia. Myös karstaussprosessin optimoiminen tasapaksujen kuitukankaiden aikaansaamiseksi voisi vähentää tulosten hajontaa.

## 9.5 Komposiittien potentiaaliset sovelluskohteet

Tässä työssä valmistetut komposiitit eivät todennäköisesti sovellu pitkäikäisiin ulkoilman sovelluskohteisiin oletetun biohajoavuutensa ja kosteuden absorptionsa vuoksi. Edellisissä LUOMA-projektin tutkimuksissa [109] on havaittu, että ruiskuvaletut pellava/Mater-Bi-komposiitit imevät vettä sitä enemmän mitä suurempi niiden kuitupitoisuus

on. Tässä työssä valmistettujen kuitukangaskomposiittien vedenotto onkin siis todennäköisesti suurta korkean pellavakuitupitoisuuden vuoksi. Mekaanisten ominaisuuksien vaatimattomuuden vuoksi tämänkaltaisia komposiitteja ei voida käyttää vaativissa olosuhteissa, joissa komposiittien tulisi kantaa kuormaa.

Kuitukangaskomposiitteja käytetään tyypillisesti autojen sisäosien sovelluksissa, kuten paneeleissa, ja myös tässä työssä valmistetut komposiitit voisivat soveltua tähän tarkoitukseen. Paneelisovellusten kannalta olisi hyvä selvittää, voidaanko komposiitteja valmistaa erilaisiin kaareviin muotoihin. Eräs sovelluskohde levymäisille kappaleille voisi olla sisätilojen äänenvaimennuslevy erityisesti huokoisimpien komposiittien tapauksessa. Sovelluskohteeksi voisivat soveltua myös esimerkiksi hautausmaatarvikkeet tai puutarhoissa käytettävät juuriesteet, joissa komposiitti päästäisi lävitseen kosteuden, mutta estäisi rikkaruohojen kasvamisen kasvin juurella. Komposiitit voisivat tällöin kestää maahan haudattuna esimerkiksi yhden kasvukauden ajan, jonka jälkeen ne hajoisivat maaperään luonnollisesti. Komposiittien tarkemman soveltuvuuden selvittämiseksi tarvitaan kuitenkin lisätutkimuksia koskien muun muassa komposiittilevyjen ääniabsorptio-ominaisuuksia ja biohajoavuutta ulkoilmaolosuhteissa.

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän LUOMA-projektille valmistetun työn tarkoituksena oli tutkia biopohjaisesta muovikuidusta ja luonnonkuidusta koostuvien kuitukankaiden ja komposiittien valmistavuutta ja ominaisuuksia. Työn kokeellisessa osuudessa onnistuttiin valmistamaan sulakuidutusmenetelmällä tarkkelyspohjaisesta biohajoavasta muovista kuitua, jonka halkaisija oli noin 50–60 mikrometrin luokkaa ja hienous noin 24–30 dtexiä. Tätä muovikuitua pystyttiin hyödyntämään pellavapitoisten kuitukankaiden valmistuksessa. Kuitukankaiden pellavakuitupitoisuuksiksi valittiin 30, 50 ja 70 painoprosenttia - karstaustuotoksella onnistuttiin siis valmistamaan hyvin suuren kuitupitoisuuden omaavia kuitukankaita. On kuitenkin huomioitava, että kuitupitoisuudet eivät olleet täysin tarkkoja, koska osa materiaalista joutui hukkaan prosessointivaiheiden aikana. Pelkästä biomuovikuidusta koostuvan kuitukankaan valmistaminen ei sen sijaan yrityksistä huolimatta onnistunut, koska puhdas biomuovikuitu tukkeutui karstauskoneeseen, eikä yhteinäistä kuiturainaa saatu aikaiseksi.

Pellavapitoisista kuitukankaista onnistuttiin valmistamaan komposiitteja puristusmuovaamalla kankaita päällekkäin lämmön ja paineen alaisena, jolloin muovikuitu sulii muodostaen komposiitin matriisin, kun taas luonnonkuitu pysyi rakennetta lujittavana komponenttina. Näytteenvalmistus komposiiteista osoittautui kuitenkin hankalaksi leikkaustyökaluilla osittain suuren kuitumäärän ja osittain muovin alhaisen sulamislämpötilan vuoksi. Niinpä osa komposiiteista päädyttiin leikkaamaan näytekappaleiksi katkote-räveitsellä ja osa koesauvoista stanssattiin.

Mekaanisten testien tulosten perusteella pellavapitoisuuden kasvattamisella oli negatiivinen vaikutus sekä veto- että taivutusominaisuuksiin. Komposiittien lujuusarvot olivat itsessään myös melko matalat, mutta on huomioitava, ettei matriisina toimineen muovimateriaalin lujuus ollut alun perin korkea. Kuitumäärän vaikutusta iskulujuuteen oli vaikeampi arvioida, koska kaikki koekappaleet eivät selkeästi murtuneet iskun voimasta, vaan osassa tapahtui nurjahdusmainen muodonmuutos. Pellavamäärän kasvatus saattoi kuitenkin vaikuttaa jonkin verran myönteisesti iskulujuuteen. DMA-testin tulosten perusteella kaikkien komposiittien lasinmuutoslämpötilat olivat suurin piirtein samaa luokkaa, ja varastomodulin arvot korreloivat jokseenkin taivutusjäykkyyden arvojen kanssa.

Mikroskopian perusteella komposiittien mekaanisten ominaisuuksien heikkous korkeimmilla kuitupitoisuuksilla johtui todennäköisesti enemmän puutteellisesta matriisimäärästä, siitä seuranneesta huokoisesta rakenteesta ja huonosta kuitujen kostumuksesta kuin heikosta komponenttien välisestä adheesiosta. Erityisesti 50 % ja 70 % pellavaa sisältäneiden komposiittien pintarakenteessa oli lukuisia huokosia ja matriisittomia

alueita. Suurilla kuitupitoisuuksilla muovia ei siis yksinkertaisesti ollut tarpeeksi luomaan tasaista matriisia kuitujen ympärille, ja tällöin kuormitus ei siirry tehokkaasti heikolta matriisimateriaalilta lujempien kuitujen kannettavaksi. Lisäksi suuremmilla pella-  
vakuitupitoisuuksilla rakenteessa on enemmän epäpuhtauksia, jotka voivat toimia mur-  
tuman ydintäjinä ja vaikuttaa negatiivisesti mekaanisiin ominaisuuksiin. Myös kuitujen  
epätasainen jakautuminen matriisiin ja läsnä olevat kuitukimput voivat heikentää kom-  
posiittien lujuutta. Lujuusominaisuuksia voitaisiin kenties räätälöidä puhdistamalla pel-  
lavakuitumassa epäpuhtauksista ja optimoimalla puristusmuovauksen parametreja. Esi-  
merkiksi ohuempien kappaleiden valmistus suuremmalla puristusaineella voisi vähen-  
tää komposiiteissa esiintyviä huokosia. Myös tasapaksujen kuitukankaiden aikaansaa-  
minen karstaussprosessin optimoinnin avulla voisi vaikuttaa myönteisesti lujuusarvoihin.

Tulosten perusteella komposiitit kannattaa valmistaa alle 50 % pella-  
vapitoisuuksilla, jos riittävät lujuusominaisuudet ovat sovelluskohteessa tärkeitä. Työssä valmistettuja  
komposiitteja ei heikkojen lujuusominaisuuksien vuoksi voida käyttää vaativissa kuor-  
mankantavissa sovelluksissa. Käyttöä ulkoilman pitkäikäisissä sovelluksissa rajoittaa  
lisäksi komposiittien biohajoavuus ja kosteuden absorptio, ellei tuotteen ole tarkoitus  
hajota luonnossa käyttönsä päätteeksi. Sopivia käyttökohteita ovat siis todennäköisesti  
sisätilojen sovellukset, joissa ei vaadita korkeaa kuormankantokykyä. Esimerkkejä täl-  
laisista sovelluskohteista ovat autojen sisäosien paneelit tai sisätilojen huokoiset äänen-  
vaimennuslevyt. Oletettavan biohajoavuutensa perusteella komposiitteja voitaisiin hyö-  
dyntää myös ulkoilman biohajoavissa sovelluskohteissa, kuten esimerkiksi puutarhojen  
juuriesteinä. Komposiittien soveltuvuudesta mainittuihin käyttökohteisiin tarvitaan kui-  
tenkin vielä lisätutkimuksia koskien komposiittilevyjen äänieristysominaisuuksia ja  
biohajoavuutta.

## LÄHTEET

1. Saastamoinen M., Vesanen K. & Saarinen J. Luonnonkuituja tuottavien kasvien tuotanto Sastamalan ympäristössä. Sastamalan koulutuskuntayhtymä, Huittinen, 2011.
2. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EY [WWW]. [viitattu 24.1.2014]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0098&from=FI>
3. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/53/EY, annettu 18 päivänä syyskuuta 2000, romuajoneuvoista. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti, 2000(L 269), s. 34-42.
4. Graupner N. & Müssig J. Technical Applications of Natural Fibres: An Overview. In: Müssig J. (ed.). Industrial Applications of Natural Fibres. Structure, Properties and Technical Applications. West Sussex, UK 2010, John Wiley & Sons. pp. 63-71.
5. Bismarck A., Mishra S. & Lampke T. Plant Fibers as Reinforcement for Green Composites. In: Mohanty A. K., Misra M. & Drzal L. T. (eds.). Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Boca Raton 2005, CRC Press. pp. 36 - 112.
6. Bledzki A. K., Sperber V. & Faruk O. Natural Wood and Fibre Reinforcement in Polymers. Shrewsbury 2002, Smithers Rapra. 156 p.
7. Wang H. & Lau A. K. T. Hemp and Hemp-Based Composites. In: Thakur V. K. (ed.). Green Composites from Natural Resources. 2013, CRC Press. pp. 63-94.
8. Lilholt H. & Madsen B. Properties of flax and hemp composites. In: JEC Composites. Flax and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry. Paris 2012, JEC Composites. pp. 119-140.
9. Mohanty A. K., Misra M., Drzal L. T., Selke S. E., Harte B. R. & Hinrichsen G., Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites: An Introduction. In: Mohanty A. K., Misra M. & Drzal L. T. (eds.). Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Boca Raton 2005, CRC Press. pp. 1-36.
10. Akin D. E. Flax - Structure, Chemistry, Retting and Processing. In: Müssig J. (ed.). Industrial Applications of Natural Fibres. Structure, Properties and Technical Applications. West Sussex, UK 2010, John Wiley & Sons. pp. 89-108.
11. Batra S. K. Other Long Vegetable Fibers\*: Abaca, Banana, Sisal, Henequen, Flax, Ramie, Hemp, Sunn, and Coir. In: Lewin M. (ed.). Handbook of Fiber Chemistry, Third Edition. 2006, CRC Press. pp. 453-520.
12. Verpoest I. A general introduction to composites, highlighting the advantages of flax & hemp composites. In: JEC Composites. Flax and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry. Paris 2012, JEC Composites. pp. 15-37.
13. Luostarinen M., Reijonen A., Mäkinen M. & J. Pirkkamaa. Öljypellavan kuidun



- hyödyntäminen. Jokioinen 1998, Maatalouden tutkimuskeskus. 50 s.
14. Virtuaaliammattikorkeakoulu. Pellavan kasvatusta ja korjuuta [WWW]. [viitattu 6.2.2014].  
Saataavissa:<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/030507/1086702266491/1146637794621/1146641094110/1146641234123.html>
  15. Van de Velde K. & Kiekens P. Biopolymers: overview of several properties and consequences on their applications. *Polymer Testing* 21(2002)4, pp. 433-442.
  16. Clemons C. Raw materials for wood-polymer composites. In: Oksman Niska K. & Sain M. (eds.). *Wood-Polymer Composites*. Boca Raton 2008, Woodhead Publishing Limited. pp. 1-22. Esikatseluversio.
  17. Godavarti S. Thermoplastic Wood Fiber Composites. In: Mohanty A. K., Misra M. & Drzal L. T. (eds.). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. Boca Raton 2005, CRC Press. pp. 347-390.
  18. Stokke D. D, Wu Q. & Han G. Introduction to Wood and Natural Fiber Composites. 2013, John Wiley & Sons. 320 p. Esikatseluversio.
  19. Sreekumar P. A. & Thomas S. Matrices for natural-fibre reinforced composites. In: Pickering K. L. (ed.). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Boca Raton 2008, Woodhead Publishing Limited. pp. 67-126.
  20. Duhovic M., Peterson S. & Jayaraman K. Natural-fibre-biodegradable polymer composites for packaging. In: Pickering K. L. (ed.). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Boca Raton 2008, Woodhead Publishing Limited. pp. 301-330.
  21. Plackett D. & Vázquez A. Natural polymer sources. In: Baillie C. (ed.). *Green Composites - Polymer Composites and the Environment*. Cambridge 2004, Woodhead Publishing. pp. 123-153.
  22. Madsen B. Properties of Plant Fibre Yarn Polymer Composites. An Experimental Study. Technical University of Denmark - Department of Civil Engineering, 2004.
  23. van den Oever M. & Bos H. Composites Based on Natural Resources. In: Müssig J. (ed.). *Industrial Applications of Natural Fibres. Structure, Properties and Technical Applications*. West Sussex, UK 2010, John Wiley & Sons. pp. 437-458.
  24. Suddell B. C. & Evans W. J. Natural Fiber Composites in Automotive Applications. In: Mohanty A. K., Misra M. & Drzal L. T. (eds.). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. Boca Raton 2005, CRC Press. pp. 231-259.
  25. Pilla S. Engineering Applications of Bioplastics and Biocomposites - An Overview. In Pilla S. (ed.). *Handbook of Bioplastics and Biocomposites Engineering Applications*. USA 2011, Wiley - Scrivener. pp. 1-15.
  26. Niaounakis M. *Biopolymers: Reuse, Recycling, and Disposal*. Oxford, UK 2013,

William Andrew. 432 p.

27. Rusu D., Boyer S. A. E., Lacrampe M.-F. & Krawczak P. Bioplastics and Vegetal Fiber Reinforced Bioplastics for Automotive Applications. In Pilla S. (ed.). Handbook of Bioplastics and Biocomposites Engineering Applications. USA 2011, Wiley - Scrivener. pp. 397-449.
28. Platt D. K. Biodegradable Polymers - Market Report. Shrewsbury, GBR 2006, Smithers Rapra. 169 p.
29. CRC Press - CHEMnetBASE. Polymers: A Property Database. Polyethylene, High density [WWW]. [viitattu 11.2.2014]. Saatavissa: <http://www.polymersdatabase.com>
30. CRC Press - CHEMnetBASE. Polymers: A Properties Database. LDPE [WWW]. [viitattu 11.2.2014]. Saatavissa: <http://www.polymersdatabase.com>
31. CRC Press - CHEMnetBASE. Polymers: A Property Database. Polypropylene [WWW]. [viitattu 11.2.2014]. Saatavissa: <http://www.polymersdatabase.com>
32. CRC Press - CHEMnetBASE. Polymers: A Property Database. Polystyrene [WWW]. [viitattu 11.2.2014]. Saatavissa: <http://www.polymersdatabase.com>
33. Hakkarainen M. & Wistrand A.-F. Update on Polylactide Based Materials. Shawbury, Shrewsbury, GBR 2011, iSmithers.176 p.
34. Bajpai P. K., Singh I. & Madaan J. Development and characterization of PLA-based green composites: A review. Journal of Thermoplastic Composite Materials 27(2014)1, pp. 52-81.
35. Johnson R. M. Biopolymers. Shrewsbury, GBR 2003, Smithers Rapra. 160 p.
36. Novamont. What is MATER-BI® [WWW]. [viitattu 9.1.2014] Saatavissa: <http://www.novamont.com/default.asp?id=505>
37. Vázquez A. & Alvarez V. A. Starch-Cellulose Fiber Composites. In: Yu L. (ed.). Biodegradable Polymer Blends and Composites from Renewable Resources. Hoboken, New Jersey 2009, John Wiley & Sons. pp. 241-286. Esikatseluversio.
38. La Mantia F. P. & Morreale M. Green composites: A brief review. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 42(2011)6, pp. 579-588.
39. Plackett D. Biodegradable polymer composites from natural fibres. In: Smith R. (ed.). Biodegradable polymers for industrial applications. Cambridge 2005, Woodhead Publishing Limited. pp. 189-218.
40. Thakur V. K., Thakur M. K., Gupta R. K., Prasanth R. & Kessler M. R. Green Composites An Introduction. In: Thakur V. K. (ed.). Green Composites from Natural Resources. 2013, CRC Press. pp. 1-10.
41. Goutianos S., Peijs T., Nystrom B. & Skrifvars M. Development of Flax Fibre based Textile Reinforcements for Composite Applications. Applied Composite Materials 13(2006)4, pp. 199-215.
42. Zini E. & Scandola M. Green composites: An overview. Polymer Composites

- 32(2011)12, pp. 1905-1915.
43. Zafeiropoulos N. E. Engineering the fibre-matrix interface in natural-fibre composites. In: Pickering K. L. (ed.). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Boca Raton 2008, Woodhead Publishing Limited. pp. 127-162.
  44. Hänninen T. & Hughes M. Historical, Contemporary and Future Applications. In: Müssig J. (ed.). *Industrial Applications of Natural Fibres. Structure, Properties and Technical Applications*. West Sussex, UK 2010, John Wiley & Sons. pp. 385-395.
  45. Shanks R. A., Hodzic A. & Wong S. Thermoplastic biopolyester natural fiber composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 91(2004)4, pp. 2114-2121
  46. Satyanarayana K. G., Arizaga G. G. & Wypych F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—An overview. *Progress in Polymer Science* 34(2009)9, pp. 982-1021.
  47. Vilaseca F., Mendez J. A., Pélach A., Llop M., Cañigüeral N., Gironès J., Turon X. & Mutjé P. Composite materials derived from biodegradable starch polymer and jute strands. *Process Biochemistry* 42(2007)3, pp. 329-334.
  48. Shanks R. Alternative solutions: recyclable synthetic fibre-thermoplastic composites. In: Baillie C. (ed.). *Green Composites - Polymer Composites and the Environment*. Cambridge 2004, Woodhead Publishing. pp. 100-122.
  49. Puglia D. & Kenny J. M. Applications of Natural Fibre Composites. In: Thomas S. & Pothan L. A. (eds.). *Natural Fibre Reinforced Polymer Composites - from Macro to Nanoscale*. Philadelphia 2009, Old City Publishing. pp. 523-539.
  50. Graupner N., Herrmann A. S. & Müssig J. Natural and man-made cellulose fibre-reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites: An overview about mechanical characteristics and application areas. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40(2009)6-7, pp. 810-821.
  51. Hargitai H., Rácz I. & Anandjiwala R. Development of Hemp Fibre – PP Nonwoven Composites. *Macromolecular Synopsia Special Issue: Advanced Polymers, Composites and Technologies* 239(2006)1, pp. 201-208.
  52. Chen Y., Chiparus O., Sun L., Negulescu I., Parikh D. V. & Calamari T. A. Natural Fibers for Automotive Nonwoven Composites. *Journal of Industrial Textiles* 35(2005)1, pp. 47-62.
  53. Lee B.-H., Kim H.-J. & Yu W.-R. Fabrication of long and discontinuous natural fiber reinforced polypropylene biocomposites and their mechanical properties. *Fibers and Polymers* 10(2009)1, pp. 83-90.
  54. Hallila T., Maijala P., Vuorinen J. & Viikari L. Enzymatic pretreatment of seed flax- and polylactide-commingled nonwovens for composite processing. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2013, February 7., pp. 1-12.
  55. Lee B.-H., Kim H.-S., Lee S., Kim H.-J. & Dorgan J. R. Bio-composites of kenaf

- fibers in polylactide: Role of improved interfacial adhesion in the carding process. *Composites Science and Technology* 69(2009)15-16, pp. 2573-2579.
56. Graupner N. & Müssig J. A comparison of the mechanical characteristics of kenaf and lyocell fibre reinforced poly(lactic acid) (PLA) and poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(2011)12, pp. 2010-2019.
  57. Plackett D., Andersen T. L., Pedersen W. B. & Nielsen L. Biodegradable composites based on l-poly(lactide) and jute fibres. *Composites Science and Technology* 63(2003)9, pp. 1287-1296.
  58. Huda M. S., Drzal L. T., Mohanty A. K. & Misra M. Effect of fiber surface-treatments on the properties of laminated biocomposites from poly(lactic acid) (PLA) and kenaf fibers. *Composites Science and Technology* 68(2008)2, pp. 424-432.
  59. Bax B. & Müssig J. Impact and tensile properties of PLA/Cordenka and PLA/flax composites. *Composites Science and Technology* 68(2008)7-8, pp. 1601-1607.
  60. Bodros E., Pilli I., Montrelay N. & Baley C. Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications? *Composites Science and Technology* 67(2007)3-4, pp. 462-470.
  61. Wambua P., Ivens J. & Verpoest I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology* 63(2003)9, pp. 1259-1264.
  62. Joffe R. & Andersons J. Mechanical performance of thermoplastic matrix natural-fibre composites. In: Pickering K. L. (ed.). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Boca Raton 2008, Woodhead Publishing Limited. pp 402-459.
  63. Ku H., Wang H., Pattarachaiyakoop N. & Trada M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering* 42(2011)4, pp. 856-873.
  64. Nabi Saheb D. & J. P. Jog J. P. Natural Fiber Polymer Composites: A Review. *Advances in Polymer Technology* 18(Winter 1999)4, pp. 351-363.
  65. Huda M. S., Drzal L. T., Ray D., Mohanty A. K. & Misra M. Natural-fibre composites in the automotive sector. In: Pickering K. L. (ed.). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Boca Raton 2008, Woodhead Publishing Limited. pp. 221-268.
  66. Cañigueral N., Vilaseca F., Méndez J. A., López J. P., Barberà L., Puig J., Pélach M. & Mutjé P. Behavior of biocomposite materials from flax strands and starch-based biopolymer. *Chemical Engineering Science* 64(2009)11, pp. 2651-2658.
  67. Lanzillotta C., Pipino A. & Lips D. New Functional Biopolymer Natural Fiber Composites From Agricultural Resources. ANTEC 2002 *Plastics: Annual Technical Conference, Volume 2: Materials*. San Francisco 2002, Society of

Plastics Engineers.

68. Sain M. & Panthapulakkal S. Green fibre thermoplastic composites. In: Baillie C. (ed.). *Green Composites - Polymer Composites and the Environment*. Cambridge 2004, Woodhead Publishing. pp. 181-206.
69. Scaffaro R., Morreale M., Lo Re G. & Mantia L. Degradation of Mater-Bi®/wood flour biocomposites in active sewage sludge. *Polymer Degradation and Stability* 94(2009)8, pp. 1220-1229.
70. Liu L., Yu J., Cheng L. & Yang X. Biodegradability of poly(butylene succinate) (PBS) composite reinforced with jute fibre. *Polymer Degradation and Stability* 94(2009)1, pp. 90-94.
71. Mishra S. Long-term performance of natural-fiber composites. In: Pickering K. L. (ed.). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Boca Raton 2008, Woodhead Publishing Limited. pp. 460-502.
72. Korjenic A., Petráněk V., Zach J. & Hroudova J. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings* 43(2011)9, pp. 2518-2523.
73. Oldham D. J., Egan C. A. & Cookson R. D. Sustainable acoustic absorbers from the biomass. *Applied Acoustics* 72(2011)6, pp. 350-363.
74. Thilagavathi G., Pradeep E., Kannaian T. & Sasikala L. Development of Natural Fiber Nonwovens for Application as Car Interiors for Noise Control. *Journal of Industrial Textiles* 39(2010)3, pp. 267-278.
75. Joshi S., Drzal L., Mohanty A. & Arora S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35(2004)3, pp. 371-376.
76. Pervaiz M. & Sain M. M. Carbon storage potential in natural fiber composites. *Resources, Conservation and Recycling* 39(2003)4, pp. 325-340.
77. C. Baillie. Why green composites? In: Baillie C. (ed.). *Green Composites - Polymer Composites and the Environment*. Cambridge 2004, Woodhead Publishing. pp. 1-8.
78. Piotrowski S. & Carus M. Natural Fibres in Technical Applications: Market and Trends. In: Müssig J. (ed.). *Industrial Applications of Natural Fibres. Structure, Properties and Technical Applications*. West Sussex, UK 2010, John Wiley & Sons. pp. 73-86.
79. Johnson Controls Inc. EcoCor | Johnson Controls Inc [WWW]. [viitattu 6.3.2014]. Saatavissa: [http://www.johnsoncontrols.com/content/us/en/products/automotive\\_experience/interiors/featured-stories/Natural\\_Materials/Natural\\_Fibers/EcoCor.html](http://www.johnsoncontrols.com/content/us/en/products/automotive_experience/interiors/featured-stories/Natural_Materials/Natural_Fibers/EcoCor.html)
80. University of Warwick. Formula 3 racing car powered by chocolate and steered by carrots [WWW]. [viitattu 7.3.2014].

- Saatavissa: [http://www2.warwick.ac.uk/newsandevents/pressreleases/racing\\_car/](http://www2.warwick.ac.uk/newsandevents/pressreleases/racing_car/)
81. UPM. UPM ja Metropolia yleänä esittelevät: Biofore-konseptiauto demonstroi biomateriaalien innovatiivista käyttöä autoteollisuudessa [WWW]. [viitattu 22.4.2014]. Saatavissa: <http://www.upm.com/FI/MEDIA/Uutiset/Pages/UPM-ja-Metropolia-ylpe%C3%A4n%C3%A4-esittelev%C3%A4t-Biofore-konseptiauto-demonstroi-biomateria-001-Tue-04-Mar-2014-09-31.aspx>
  82. Feldman D. & Akovali G. The Use of Polymers in Construction: Past and Future Trends. In: Akovali G. (ed.). Handbook of Polymers in Construction. Shrewsbury, GBR 2005, Smithers Rapra. pp. 13-34.
  83. UPM. UPM ProFi Deck - Usein kysyttyjä kysymyksiä [WWW]. [viitattu 17.4.2014].  
Saatavissa: <http://www.upmprofi.com/fi/tuotteet/deck/faq/Pages/default.aspx>
  84. Onbone Oy. Tuotteet / Woodcast® [WWW]. [viitattu 13.5.2014]. Saatavissa: <http://www.woodcast.fi/fi/lid38>
  85. Jakob Winter. GreenLine. Products made from natural fiber composites [WWW]. [viitattu 10.3.2014]. Saatavissa: <http://www.naturfaserverbundwerkstoffe.de/en/>
  86. FKUR. FKUR® Plastics - made by nature! FAQ - Fibrolon® [WWW]. [viitattu 17.3.2014]. Saatavissa: <http://www.fkur.com/produkte/fibrolon/faq-fibrolonr.html>
  87. Kareline - natural composites. Kareline® komposiittien soveltuvuus ja tyypillisiä käyttökohteita [WWW]. [viitattu 26.2.2014].  
Saatavissa: <http://www.kareline.fi/fi/tuotteet/>
  88. GreenGran. Granules made from GreenGran - for biobased and biodegradable materials [WWW]. [viitattu 17.3.2014].  
Saatavissa: <http://www.greengran.com/grades/grades.html>
  89. FuturaMat. FuturaMat bioplastics are made from renewable sources [WWW]. [viitattu 17.3.2014]. Saatavissa: <http://www.futuramat.com/english/our-products/>
  90. Giskey R. Polymer Process Engineering. 1995, Springer. 478 p. Esikatseluversio.
  91. Sen K. Polypropylene fibers. In: Gupta V. B, Kothari V.K (eds.). Manufactured Fibre Technology. 1997, Springer. pp. 457-479. Esikatseluversio.
  92. Gupta B., Revagade N. & Hilborn J. Poly(lactic acid) fiber: An overview. Progress in Polymer Science 32(2007)4, p. 455–482.
  93. Hufenus R., Reifler F. A., Maniura-Weber K., Spierings A. & Zinn M. Biodegradable Bicomponent Fibers from Renewable Sources: Melt-Spinning of Poly(lactic acid) and Poly[(3-hydroxybutyrate)-co-(3-hydroxyvalerate)]. Macromolecular Materials and Engineering 297(2012)1, pp. 75-84.
  94. Batra S. K. & Pourdeyhimi B. Introduction to Nonwovens Technology. Lancaster, Pennsylvania 2012, DEStech Publications, Inc. 337 p. Esikatseluversio.
  95. Gomes M. E., Azevedo H. S., Moreira A. R., Ellä V., Kellomäki M. & Reis R. L.

- Starch–poly( $\epsilon$ -caprolactone) and starch–poly(lactic acid) fibre-mesh scaffolds for bone tissue engineering applications: structure, mechanical properties and degradation behaviour. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine* 2(2008)5, pp. 243-252.
96. Pavlov M. P., Mano J. F., Neves N. M. & Reis R. L. Fibers and 3D Mesh Scaffolds from Biodegradable Starch-Based Blends: Production and Characterization. *Macromolecular Bioscience* 4(2004)8, pp. 776-784.
  97. Wulhorst B., Gries T. & Veit D. *Textile Technology*. Munich 2006, Hanser Publishers. 320 p.
  98. Han C. D. *Rheology and Processing of Polymeric Materials, Volume 2 - Polymer Processing*. New York 2007. Oxford University Press. 608 p.
  99. M. Rissanen. MOL-12236 *Materials Processing 2 - Textile Fibres*. Luentoaineisto 2013, TTY. Julkaisematon.
  100. Huber T., Graupner N. & Müssig J. *Natural Fibre Composite Processing: A Technical Overview*. In: Müssig J. (ed.). *Industrial Applications of Natural Fibres. Structure, Properties and Technical Applications*. West Sussex, UK 2010, John Wiley & Sons. pp. 408-421.
  101. Broughton Jr, R. M. & Brady P. H. *Nonwoven Fabrics*. In: Adanur, S. (ed.). *Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles*. 1995 CRC Press, pp. 141-160. Esikatseloversio.
  102. Smith P. A. *Technical fabric structures - 3. Nonwoven fabrics*. In: Horrocks A. R. & Anand S. C. (eds.). *Handbook of Technical Textiles*. Boca Raton, USA 2000, Woodhead Publishing. pp. 130-151. Esikatseloversio.
  103. Rouette H.-K. *Encyclopedia of Textile Finishing. N - Nonwovens Manufacture*. 2001, Woodhead Publishing. 40 p.
  104. Bledzki A. K., Jaszkiwicz A., Murr M., Sperber V. E., Lütendorf R. & Reußmann T. *Processing techniques for natural- and wood-fibre composites*. In: Pickering K. L. (ed.). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Boca Raton 2008, Woodhead Publishing Limited. pp. 163-192.
  105. Ziegmann G. & Elsabbagh A. *Production techniques for natural fibre polymer composites*. In: *JEC Composites. Flax and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry*. Paris 2012, JEC Composites. pp. 99-118.
  106. Alimuzzaman S., Gong R. H. & Akonda M. *Nonwoven polylactic acid and flax biocomposites*. *Polymer Composites* 34(2013)10, pp. 1611-1619.
  107. Tampereen teknillinen yliopisto. MOL-12236 *Materials Processing 2 - Introduction to Plastics Processing*. Luentoaineisto 2013, TTY. Julkaisematon.
  108. Novamont. *Technical data-sheet (preliminary) - Mater-Bi CF04A*. 2008.
  109. Lehtiniemi P. *LUOMA – PE-HD ja Mater-Bi/pellava-kompaundit*. Raportti 2013. Julkaisematon.

110. Sepe M. P. Dynamic Mechanical Analysis for Plastics Engineering - Introduction. 2002 William Andrew Publishing/Plastics Design Library. 189 p.
111. Ehrenstein G. W., Riedel G. & Trawiel P. Thermal Analysis of Plastics - Theory and Practice. 2004, Hanser Publishers. 400 p.



## LIITE 1: SULAKUIDUTUSRAPORTTI

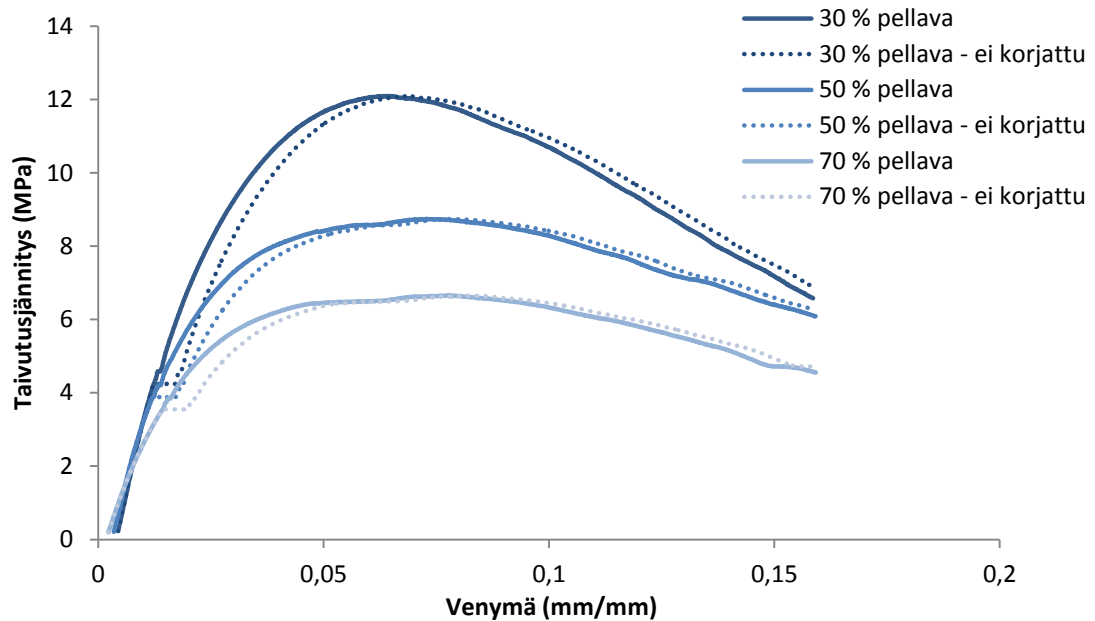
TTY/Tekstiili- ja vaateustekniikka Tampere	SULAKUIDUTUSRAPORTTI (SULAKEHRUURAPORTTI)							
Pvm 18.02.2014/19.3.2014								
Materiaali: Mater-Bi	Testiajot							Varsinaiset ajot
Näyte		Bio	Bio	Bio	Bio	Bio	Bio	Bio
Ajo no		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>A, B, C</b>
Suutinreikämäärä	kpl	10	10	10	10	10	10	10
Reiän halkaisija	mm	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Reiän pituus	mm							
L/D								
Extrudervyöhyke 1	°C	150	150	150	150	150	150	150
Extrudervyöhyke 2	°C	155	155	155	155	155	155	155
Extrudervyöhyke 3	°C	160	160	160	160	160	160	160
Ext.-pump.	°C	160	160	160	160	160	160	160
Pumpun lämpötila	°C	165	165	165	165	165	165	165
Kehruupään lämpötila	°C	165	165	165	165	165	165	165
Massa adapter	°C							
Massa suuttimella	°C							
Polymeeripaine: extruuderipumppu	bar							
Polymeeripaine: Pumppu-suutin	bar							
	Huom. Paineet vaihtelivat paljon testiajoissa							
Ruuvi	rpm/min	60		60	60	60	60	60
Pumppu	rpm/min	11.2		10.5	9.2	9.5	9.5	12.2
Pumpun tuotto	cm <sup>3</sup> /rpm	1.2	1.2	1.2				
Pumpun tuotto	g/h							
Ilmajäähdytys	k/e							
Galetti 1	m/min				218	225	225	225
Lämpötila	°C				30(39)	30	30	30
Galetti 2	m/min				255	290	290	290
Lämpötila	°C				40(42)	40	40	40
Duo	m/min				280	400	400	400
Lämpötila	°C				50(52)	50	50	50
Puolaus (kelaus)	m/min	227	350	300	275	380	380	380
DS		199	199	199	199	199	199	199
Venytyssuhde								
Lankanumero, teoreettinen	dtex							
Lankanumero, todellinen	dtex							
Kehruuöljy	k/e	e	e	e	e	e	e	e
Vesijäähdytys	k/e	k	k	k	k	k	k	k
Typpi	k/e	e	e	e	e	e	e	e

## LIITE 2: KOMPOSIITTIIEN VETOKOKEIDEN TULOKSIA

*Taulukko 1. Komposiittien vetokokeiden tulokset.*

30 % pellavaa	Vetolujuus (maksimijännitys) (MPa)	Maksimijännitystä vastaava venymä (mm/mm)	Kimmomoduli (GPa)
1	10.59	0.0811	0.322
2	9.24	0.0936	0.255
3	13.15	0.0750	0.422
4	11.77	0.0786	0.364
5	11.89	0.0647	0.412
6	14.54	0.0750	0.467
<b>Keskiarvo</b>	<b>11.86</b>	<b>0.078</b>	<b>0.374</b>
Keskihajonta	1.86	0.0095	0.077
50 % pellavaa			
1	8.99	0.0819	0.291
2	6.85	0.0855	0.183
3	5.31	0.0747	0.147
4	9.44	0.0653	0.330
5	10.22	0.0669	0.361
6	6.41	0.0608	0.236
7	7.70	0.0633	0.286
<b>Keskiarvo</b>	<b>7.85</b>	<b>0.071</b>	<b>0.262</b>
Keskihajonta	1.78	0.0096	0.077
70 % pellavaa			
1	5.87	0.1039	0.149
2	6.05	0.0819	0.171
3	6.92	0.0839	0.198
4	6.25	0.0741	0.179
5	5.32	0.0722	0.142
6	3.79	0.0733	0.097
<b>Keskiarvo</b>	<b>5.70</b>	<b>0.082</b>	<b>0.156</b>
Keskihajonta	1.07	0.012	0.035

### LIITE 3: TAIVUTUSKOKEIDEN TULOKSIA



*Kuva 1. Esimerkkikuvaajat alkuperäisistä ja korjatuista taivutuskoetuloksista. Taivutuskoetilanteessa mittapää pääsi liikkumaan testin aikana, jolloin käyrän alkuun ilmestyi tasannemainen alue. Korjatut kuvaajat on piirretty yhtenäisellä viivalla ja alkuperäiset korjaamattomat kuvaajat pisteviivalla. Korjatuissa kuvaajissa venymänarvot ovat osittain virheelliset, koska alkuperäisissä kuvaajissa ilmennyt tasannealue on poistettu.*

*Taulukko 2. Taivutuskokeiden tuloksia. Prosentit kuvaavat pellavan määrää.*

30 %	Taivutus- lujuus (MPa)	Taivutus- moduuli (GPa)	50 %	Taivutus- lujuus (MPa)	Taivutus- moduuli (GPa)	70 %	Taivutus- lujuus (MPa)	Taivutus- moduuli (GPa)
1	10.432	0.4795	1	5.912	0.2522	1	6.651	0.2675
2	11.223	0.4875	2	6.756	0.2909	2	6.778	0.3050
3	12.466	0.5759	3	8.744	0.4196	3	5.883	0.2472
4	9.011	0.3240	4	8.614	0.3712	4	8.494	0.4031
5	12.097	0.5039	5	10.014	0.4167	5	5.239	0.1940
6	14.583	0.6982	6	12.619	0.6559	-	-	-
<b>Keski- arvo</b>	<b>11.6</b>	<b>0.511</b>		<b>8.78</b>	<b>0.401</b>		<b>6.61</b>	<b>0.283</b>
Keski- hajonta	1.90	0.123		2.39	0.142		1.22	0.078

## LIITE 4: ISKUKOKEIDEN TULOKSIA

*Taulukko 3. Ensimmäisten iskokokeiden tulokset (Charpy, loveamaton). Murtumistyy-  
pit: H=murtuma saranamaisesti koekappaleeksi, P=osittainen murtuma, N= ei murtu-  
maa, vaan pelkkä muodonmuutos.*

Kappale	30 % pellava (loveamaton)				Murtumis- tyyppi
Isku	Energia (J)	Paksuus (mm)	Leveys (mm)	Iskulujuus (kJ/m <sup>2</sup> )	H, P, N
1	0.417	3.08	9.95	<b>13.61</b>	H
2	0.694	3.07	10.15	<b>22.27</b>	H
3	0.527	3.10	10.16	<b>16.73</b>	P
4	0.381	3.02	9.75	<b>12.94</b>	H
5	0.537	3.10	10.28	<b>16.85</b>	H
6	0.559	3.09	10.50	<b>17.23</b>	P
7	0.499	3.11	10.25	<b>15.65</b>	H
8	0.664	2.98	10.35	<b>21.53</b>	H
9	0.410	3.00	10.65	<b>12.83</b>	H
10	0.531	3.01	10.51	<b>16.79</b>	H
<b>Keskiarvo</b>	0.522	3.06	10.26	<b>16.64</b>	<b>H</b>
Keskihajonta	0.103	0.0484	0.2706	3.24	
Kappale	50 % pellava (levy 1 loveamaton)				Murtumis- tyyppi
Isku	Energia (J)	Paksuus (mm)	Leveys (mm)	Iskulujuus (kJ/m <sup>2</sup> )	H, P, N
1	0.575	3.37	10.65	<b>16.02</b>	N
2	0.732	3.21	10.65	<b>21.41</b>	H
3	0.404	3.35	10.68	<b>11.29</b>	P
4	0.672	3.26	10.88	<b>18.95</b>	P
5	0.613	3.42	10.30	<b>17.40</b>	N
6	0.748	3.35	10.42	<b>21.43</b>	P
7 (3 kerrosta)	0.450	3.30	10.18	<b>13.40</b>	N
8 (3 kerrosta)	0.423	3.30	10.35	<b>12.38</b>	P
9 (3 kerrosta)	0.591	3.27	10.12	<b>17.86</b>	H
10 (3 kerrosta)	0.421	3.20	10.35	<b>12.71</b>	H
<b>Keskiarvo</b>	0.563	3.30	10.46	<b>16.29</b>	<b>P(H, N)</b>
Keskihajonta	0.132	0.0706	0.2455	3.73	
Kappale	70 % pellava (loveamaton)				Murtumis- tyyppi
Isku	Energia (J)	Paksuus (mm)	Leveys (mm)	Iskulujuus (kJ/m <sup>2</sup> )	H, P, N
1	0.702	3.32	10.45	<b>20.23</b>	N
2	0.679	3.27	10.35	<b>20.06</b>	N
3	0.561	3.41	10.50	<b>15.67</b>	N
4	0.545	3.37	10.37	<b>15.60</b>	N
5	0.770	3.31	10.38	<b>22.41</b>	P
6	0.461	3.33	9.99	<b>13.86</b>	N
7	0.513	3.42	10.34	<b>14.51</b>	N
8	0.440	3.37	10.65	<b>12.21</b>	N
9	0.719	3.41	10.69	<b>20.24</b>	P
10 (virhe)	<del>0.308</del>	<del>3.41</del>	<del>10.42</del>	<del>8.67</del>	<del>N</del>
<b>Keskiarvo</b>	0.599	3.36	10.41	<b>17.20</b>	<b>N</b>
Keskihajonta	0.121	0.0522	0.2040	3.57	

**Taulukko 4.** Jälkimmäisten iskukokeiden tulokset (Charpy, lovetut ja loveamaton 50 % pellava levy 2). Murtumistyyppit: H=murtuma saranamaisesti koekappaleeksi, P=osittainen murtuma, N= ei murtumaa, vaan pelkkä muodonmuutos.

Kappale	30 % pellava (lovettu)				Murtumistyyppi
Isku	Energia (J)	Paksuus (mm)	Leveys (mm)	Iskulujuus (kJ/m <sup>2</sup> )	H, P, N
1	0.280	2.98	8.82	<b>10.65</b>	H
2	0.292	3.02	8.63	<b>11.20</b>	H
3	0.285	3.04	8.67	<b>10.81</b>	H
4	0.301	3.03	8.78	<b>11.31</b>	H
5	0.305	2.98	8.60	<b>11.90</b>	H
6	0.308	3.01	8.67	<b>11.80</b>	H
<b>Keskiarvo</b>	0.295	3.01	8.70	<b><u>11.28</u></b>	<b>H</b>
Keskihajonta	0.011	0.025	0.086	0.51	
Kappale	50 % pellava (levy 2 loveamaton)				Murtumistyyppi
Isku	Energia (J)	Paksuus (mm)	Leveys (mm)	Iskulujuus (kJ/m <sup>2</sup> )	H, P, N
1	1.004	3.36	10.45	<b>28.59</b>	H
2	0.964	3.35	10.53	<b>27.33</b>	P
3	0.754	3.32	10.12	<b>22.44</b>	H
4	0.823	3.29	10.56	<b>23.69</b>	H
5	0.854	3.30	10.59	<b>24.44</b>	H
6	0.743	3.26	10.48	<b>21.75</b>	H
<b>Keskiarvo</b>	0.880	3.32	10.45	<b><u>24.71</u></b>	<b>H</b>
Keskihajonta	0.103	0.031	0.192	2.57	
Kappale	50 % pellava (levy 2 lovettu)				Murtumistyyppi
Isku	Energia (J)	Paksuus (mm)	Leveys (mm)	Iskulujuus (kJ/m <sup>2</sup> )	H, P, N
1	0.404	3.25	8.32	<b>14.94</b>	H
2	0.374	3.27	8.70	<b>13.15</b>	H
3	0.365	3.25	8.47	<b>13.26</b>	H
4	0.321	3.18	8.18	<b>12.34</b>	H
5	0.481	3.33	8.22	<b>17.57</b>	H
6	0.436	3.22	8.40	<b>16.12</b>	H
<b>Keskiarvo</b>	0.397	3.25	8.38	<b><u>14.56</u></b>	<b>H</b>
keskihajonta	0.056	0.05	0.19	2.01	
Kappale	70 % pellava (lovettu)				Murtumistyyppi
Isku	Energia (J)	Paksuus (mm)	Leveys (mm)	Iskulujuus (kJ/m <sup>2</sup> )	H, P, N
1	0.368	3.35	8.50	<b>12.92</b>	N
2	0.372	3.30	8.65	<b>13.03</b>	N
3	0.444	3.26	8.25	<b>16.51</b>	N
4	0.434	3.37	8.51	<b>15.13</b>	N
5	0.391	3.35	8.58	<b>13.60</b>	N
6	0.475	3.35	8.50	<b>16.68</b>	N
<b>Keskiarvo</b>	0.414	3.33	8.50	<b><u>14.65</u></b>	<b>N</b>
Keskihajonta	0.043	0.041	0.135	1.70	