

Opinnäytetyö (AMK)

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2021

Sami Patteri

# HAMPPUKOMPOSIITTIMATERI AALIN PROSESSOITAVUUDEN TUTKIMINEN

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2021 | 58 sivua

Ohjaaja: Liisa Lehtinen, Turku AMK

Sami Patteri

# HAMPPUKOMPOSIITTIMATERIAALIN PROSESSOITAVUUDEN TUTKIMINEN

Opinnäytetyössä tutkittiin SataLiina Oy:n luonnonkuitukomposiittia, joka sisälsi polypropeenä (PP) ja luonnonkuituna hamppukuitua (30 %). Komposiitista tutkittiin kahta erilaista versiota, joissa toisessa matriisimuovina käytettiin ensiömuovia ja toisessa kuluttajapakkauksista valmistettua uusiomuovia. Työn tavoitteena oli tutkia materiaalin prosessoitavuutta ekstruusioprosessissa ja lisäävässä valmistuksessa.

Materiaalin prosessoitavuuden tutkimiseen käytettiin ekstruusioprosessia ja lisäävän valmistuksen menetelmää hyödyntävää isosuutintulostinta. Isosuutintulostin on pursotukseen perustuva 3D-tulostin.

Materiaalin prosessoinnin yhteydessä ekstruusioprosessin laitteistoa päivitettiin ottamalla käyttöön ja koeajamalla uusia lisälaitteita, jotka tekivät prosessista sopivamman luonnonkuitukomposiittien prosessoimiseen. Uusiomuovia sisältävästä komposiittimateriaalista valmistettiin ekstruusioprosessilla eriä, joissa oli matalampi kuitupitoisuus (5 %, 10 % ja 15 %) ja pienempi granulaattikoko verrattuna alkuperäiseen granulaattiin. Isosuutintulostimella materiaalia koeajettiin tulostuksessa alkuperäisellä 30 %:n sekä matalamman kuitupitoisuuden erillä. Ekstruuderilla valmistettujen erien lisäksi kuitupitoisuutta laskettiin sekoittamalla materiaaliin lisää muovia.

Ensiömuovista valmistettu komposiitti ei ollut prosessoitavissa ekstruuderilla eikä isosuutintulostimella niin, että materiaalin tutkimista olisi voitu jatkaa pidemmälle. Uusiomuovista valmistettu komposiitti ei tuottanut ongelmia ekstruusioprosessissa granulaatin valmistuksessa, mutta tasalaatuisen filamentin valmistaminen ei onnistunut. Isosuutintulostimella tehtyjen koeajojen perusteella alkuperäisen uusiomuovista valmistetun komposiitin granulaatit eivät virranneet tasaisesti tulostimessa ja kuitupitoisuuden laskeminen seostamalla ei riittänyt tasaamaan tulostuslaatua. Tasalaatuisin virtaus ja tulostuslaatu saavutettiin ekstruuderilla valmistetulla materiaalierällä, jonka kuitupitoisuus oli 5 %. Tulostuksien laatua heikensi PP:lle ominainen vääntymisen jäähdytymisen yhteydessä. Tulosten perusteella materiaali ei sovi pienten ja mittatarkkojen kappaleiden tulostamiseen. Sen sijaan materiaali voisi sopia paremmin käytettäväksi isompien kappaleiden tulostamisessa.

ASIASANAT:

luonnonkuitukomposiitti, hamppukuitu, lisäävä valmistus, ekstruusio

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Chemical and Materials Engineering

2021 | 58 pages

Supervisor: Liisa Lehtinen, TUAS

Sami Patteri

## STUDY ON PROCESSABILITY OF HEMP COMPOSITE MATERIAL

This thesis focuses on studying SataLiina Oy's natural fibre composite, which contained polypropylene (PP) and hemp fibre (30%) as the natural fibre. Two different versions of the composite were studied, one using primary plastic as the matrix plastic and the other using recycled plastic made from consumer packaging. The aim of the study was to examine the processability of the material in the extrusion process and in additive manufacturing.

An extrusion process and a large nozzle printer utilising an additive manufacturing method were used for studying the material. The large nozzle printer is an extrusion-based 3D printer.

While processing the material in the extrusion process, the process equipment was updated to be more suitable for processing natural fibre composites. This included the commissioning and trial runs of the new equipment. The composite made from recycled plastic was processed with extrusion to batches with lower fibre content (5 %, 10 % and 15 %) and smaller granulate size compared to the original granulate. The material was tested on the large nozzle printer with the original 30 % fibre content and with batches with smaller fibre content. In addition to extrusion, the fibre content of the material was lowered by increasing its content of plastic.

The composite made from primary plastic was not processable with the extruder or the large nozzle printer, in a manner which would have enabled further research on the material. The composite made from recycled plastic did not cause problems in the extrusion process during the producing of granulates, but no filament of even quality could be produced. Based on the test runs with the large nozzle printer, the original granules of recycled plastic composite did not flow evenly in the printer and lowering the fibre content by mixing was not enough to homogenize printing quality. The most stable flow and printing quality was achieved with a batch that was extruded to a composite with a 5 % fibre content. The printing quality was lowered by material warping during cooling, which is characteristic of PP in 3D printing. Based on the results composite material is not suitable for printing small or dimensionally accurate pieces. Instead, the material would be more suitable for printing larger pieces.

### KEYWORDS:

natural fibre composite, hemp fibre, additive manufacturing, extrusion

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO</b>	<b>8</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>9</b>
<b>2 KOMPOSIITTIMATERIAALIT</b>	<b>11</b>
2.1 Luonnonkuitukomposiitit ja luonnonkuidut	11
2.2 Muovikomposiitti ja muovit	12
2.2.1 Polypropeeni	13
2.2.2 Fortum Circo polypropeeni	13
2.3 RPP30 ja PP30	14
<b>3 EKSTRUUSIO</b>	<b>15</b>
<b>4 LISÄÄVÄ VALMISTUS</b>	<b>16</b>
4.1 Pursotukseen perustuvat 3D-tulostusmenetelmät FDM/FFF ja FGF	16
4.2 Lisäävässä valmistuksessa hyödynnettävät ohjelmistot	17
4.3 Muovit lisäävässä valmistuksessa	19
<b>5 CASE: EKSTRUUDERI</b>	<b>21</b>
5.1 Labtech kaksoisruuviekstruuderit	21
5.2 Ekstruusiolaitteiston päivittäminen	23
5.3 Laitteiden käyttöönotto ja koestus	24
5.3.1 Lisäsyöttöyksikkö	25
5.3.2 Ilmajäähdytysyksikkö	25
5.3.3 Vetolaite	26
5.3.4 Kelauslaite	27
5.4 Ekstruusiolinjaston ja materiaalien koeajot	28
5.4.1 Koeajot RPP30:llä ja CircoPP:llä	29
5.4.2 Koeajot PP30:lla ja ensiö-PP:llä	29
5.4.3 Syöttöyksiköiden yhtäaikainen käyttö ja syöttösuhteilla ajaminen	30
5.4.4 Ekstruusiolinjaston käyttäminen ja sopiva työjärjestys	33
5.5 Materiaalierien RPP5 ja RPP15 valmistus	34
5.5.1 RPP15:n valmistus	34
5.5.2 RPP5:n valmistus	34
5.6 Materiaalien koeajojen tulokset	35

<b>6 CASE: LISÄÄVÄ VALMISTUS</b>	<b>37</b>
6.1 Prenta isosuutintulostin	37
6.2 Komposiitin tulostaminen isosuutintulostimella	40
6.3 Komposiittimateriaalin tulostaminen	41
6.3.1 PP30- ja RPP30-granulaattien tulostaminen ja tulostusparametrien määrittäminen	42
6.3.2 Kuitupitoisuuden laskeminen sekoittamalla ja tulostusparametrien säätäminen	44
6.3.3 Materiaalin virtaaminen tulostettaessa (seos, jossa kuitupitoisuus 10 %)	48
6.4 Ekstruuderilla prosessoidun granulaatin käyttö isosuutintulostimessa	49
6.4.1 Seostustapojen vaikutus virtaamiseen RPP10:llä	50
6.4.2 Tulostuslämpötilan vaikutus tulosteen laatuun RPP10:llä	54
6.4.3 Lämpötilan vaikutus materiaalin virtaavuuteen RPP10:llä	56
6.4.4 RPP15:n ja RPP5:n tulostettavuus	57
<b>7 TULOKSET JA POHDINTA</b>	<b>60</b>
7.1 Ekstruuderin uudet laitteet	60
7.2 Hamppukuitukomposiitti materiaalina	61
7.2.1 PP30	62
7.2.2 RPP30 ja sen kuitupitoisuuden alentaminen ekstruusioprosessissa	62
7.2.3 RPP30 lisäävässä valmistuksessa	64
7.2.4 Matalamman kuitupitoisuuden granulaattien toiminta isosuutintulostimella	64
<b>8 YHTEENVETO</b>	<b>66</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>67</b>

## KUVAT

Kuva 1. Labtech kaksoisruuviekstruuderin rakenne.	22
Kuva 2. Ekstruusiolaitteiston kokoonpano ennen ja jälkeen päivityksen.	24
Kuva 3. Ilmajäähdytysyksikön hallintapaneeli.	26
Kuva 4. Vetolaite.	27
Kuva 5. Kelauslaite.	28

Kuva 6. RPP15 filamenttinäytteet.	36
Kuva 7. Isosuutintulostimen ekstruuderin osat erillään.	38
Kuva 8. Isosuutintulostimen laitteen suuttimen rakenne.	39
Kuva 9. Työssä käytettyjä tulostusmalleja.	41
Kuva 10. Tulostettu kappale (RPP30).	44
Kuva 11. Tulostettu kappale (seos, jossa kuitupitoisuus 15 %).	45
Kuva 12. Tulostettu kappale (seos, jonka kuitupitoisuus 10 %).	47
Kuva 13. Tulostetut kappaleet (erä 4).	51
Kuva 14. Eri virtauskertoimilla tulostetut kappaleet (erä 1).	54
Kuva 15. Lämpötilatestauksen tulostetut kappaleet (RPP10).	56
Kuva 16. Filamentin venyminen RPP5:llä.	63

## TAULUKOT

Taulukko 1. Komposiittimateriaalien tiedot.	14
Taulukko 2. Tulostusparametrit.	18
Taulukko 3. Ekstruuderin lämpötilaprofiili ja ajonopeudet.	29
Taulukko 4. Syöttönopeusarvot koeajossa.	32
Taulukko 5. RPP15-filamenttien paksuudet.	35
Taulukko 6. RPP5 filamenttien paksuudet.	36
Taulukko 7. Seoksien laskennalliset kuitupitoisuudet ja materiaalien sekoitussuhteet.	44
Taulukko 8. Tulostusparametrit (seos, jossa kuitupitoisuus 15 %)	45
Taulukko 9. Päivitetyt tulostusparametrit.	46
Taulukko 10. Materiaalin virtaustesti (seos, jossa kuitupitoisuus 10 %).	48
Taulukko 11. Ekstruuderilla prosessoidut erät ja granulaattikoot (kuitupitoisuus 10 %).	50
Taulukko 12. Tulostusparametrit (erä 0).	50
Taulukko 13. Virtauskertoimen vaikutus kappaleiden seinämäpaksuuksiin (erä 1).	53
Taulukko 14. Tulostusparametrit lämpötilatestissä RPP10:llä.	54
Taulukko 15. Tulostusparametrit (RPP15 ja RPP5).	58
Taulukko 16. Tulostettujen kappaleiden massat RPP5:lla.	58

## KAAVAT

Kaava 1. Trendiviivan yhtälö CircoPP:llä ja pääsyöttöyksiköllä.	31
Kaava 2. Esimerkki syöttönopeuden määrittämisestä kalibroitikuvaajan avulla.	32

## KUVIOT

Kuvio 1. Kalibrintokuvaaja pääsyöttöyksikkö ja CircoPP.	31
Kuvio 2 Eri virtauskertoimilla tulostettujen kappaleiden massat (erä 1).	52
Kuvio 3 Materiaalin virtaus eri lämpötiloissa (RPP10).	57

## KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

Ensiömuovi	Muovi, joka ei sisällä kierrätettyä uusiomuovia
FDM/FFF	Fused Deposition Modelling/ Fused Filament Fabrication, lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa käytetään materiaalilankaa.
FGF	Fused Granular Fabrication, Lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa käytetään materiaaligranulaattia.
PE	Polyeteeni
PLA	Polylaktidi
PP	Polypropeeni
RPP30	Uusio-PP:stä valmistettu hamppukuitukomposiitti, jossa on 30 % hamppukuitua.
PP30	Ensiö-PP:stä valmistettu hamppukuitukomposiitti, jossa on 30 % hamppukuitua.
Uusiomuovi	Siistauksen eli uusiokäytön vaiheen avulla valmistettu muovi.



# 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin SataLiina Oy:n luonnonkuitukomposiittimateriaalin prosessoitavuutta käyttäen ekstruusiota ja lisäävän valmistuksen menetelmää. SataLiina Oy on kehittänyt komposiitin osana tutkimus- ja kehitystyötä, jonka tarkoituksena on edistää hammppukasvin osien käyttöä materiaaleissa. Tämän työn tavoitteena oli edistää komposiitille sopivien käyttökohteiden löytymistä tutkimalla, kuinka materiaali käyttäytyy prosessoitaessa. Luonnonkuitukomposiitti koostuu hammppukuidusta ja polypropeenista ja siitä on kaksi eri versiota, joita nimitetään tässä työssä merkkilyhdistelmillä PP30 ja RPP30. RPP30-komposiitti koostuu hammppukuidusta ja uusio-polypropeenista (uusio-PP). PP30-komposiitissa on uusio-PP:n sijaan käytetty ensiö-PP:tä.

Luonnonkuitukomposiitin ideana on olla kiertotaloutta edistävä materiaali kahdella tapaa. Uusio-PP jatkaa komposiitin kautta tehtävänsä toimia hiilivarastona ja luonnonkuitu materiaalissa vähentää käytetyn muovin määrää. Lisäksi hammppukuidun lähteenä oleva hammppukasvi on kasvaessaan sitonut itseensä hiiltä ja tätä kautta myös vähentää materiaalin ympäristövaikutusta.

Prosessointimenetelminä työssä käytetään ekstruusioprosessia ja lisäävän valmistuksen menetelmää hyödyntävää isosuutintulostinta. Työssä hyödynnettävät laitteet kuuluvat Turun ammattikorkeakoulun laitekantaan. Työn osana myös päivitetään ekstruusiolaitteistoa sopivammaksi luonnonkuitukomposiitin prosessoinnille. Päivittämiseen kuuluu uusien lisälaitteiden käyttöönotto, koekäyttö ja ohjeistuksen päivittäminen sisältämään uuden laitekoonpanon käyttöohjeistuksen.

Opinnäytetyön käytännön osuus on toteutettu Case-tutkimuksina. Alkuun ennen käytännön case-tutkimuksia työssä käydään läpi komposiittimateriaaliin ja sen raaka-aineisiin liittyvä teorialtutkimus. Tämän jälkeen kerrotaan ekstruusioprosessin ja lisäävän valmistuksen menetelmien teoriataustaa. Case-tutkimukset on jaettu käytettäviin prosessointimenetelmiin eli ekstruusioprosessiin ja lisäävään valmistukseen. Case-tutkimukset koostuvat käytettävien laitteiden esittelystä ja toimintojen läpikäynnistä sekä tutkimustyön selostuksesta ja tuloksien analysoinnista. Lisäksi ekstruuderin Case-tutkimuksessa käydään läpi laitteiston päivittäminen ja uusien laitteiden koeajaminen.

Case-tutkimusten jälkeen työn pohdintaosiossa käydään läpi Case-tutkimuksien tuloksia, pohditaan ekstruuderin uusien laitteiden toimivuutta ja peilataan materiaalin

prosessoinnin tuloksien avulla materiaalin soveltuvuutta prosessoitavaksi käytetyillä menetelmillä. Lisäksi pohditaan materiaalin käytettävyyden näkökulmasta sopivia jatkotutkimuksia, jotka edistäisivät sopivan käyttökohteen löytymistä. Työn lopussa on lisäksi yhteenveto, josta löytyy tiivistettynä koko työn sisältö ja tulokset.

## 2 KOMPOSIITTIMATERIAALIT

Komposiitiksi nimitetään materiaalia, joka koostuu kahdesta tai useammasta eri materiaalista, joista toinen on matriisiaine ja toinen tai loput aineet ovat lujiteaineita. Komposiiteille on olennaista, että sen koostavat materiaalit toimivat yhdessä, mutta eivät ole kuitenkaan liunneet toisiinsa. (Sorsa J., 2015 s. 227)

Matriisiaineena komposiiteissa on joko muovi, metalli tai keraami. Lujiteaineena käytetään esimerkiksi erilaisia synteettisiä kuituja (esim. lasi- ja hiilikuidut) tai luonnonkuituja (esim. puu- tai hamppukuitu). Näiden lisäksi komposiittiin voi kuulua myös erilaisia lisäaineita tarvittavien ominaisuuksien mukaan. Komposiitissa lujite kantaa pääosan kohdistuvasta voimasta ja matriisiaineen tehtävänä on sitoa lujiteaineet toisiinsa ja siirtää komposiittiin kohdistuvaa rasitusta kuidulta toiselle. (Sorsa J., 2015 ss. 227-229)

Tämän työn rajoissa tutkittavassa luonnonkuitukomposiitissa matriisiaineena on muovia ja lujiteaineena luonnonkuitua. Muovina on käytetty polypropeenaa, toisessa materiaali-versiossa ensiömuovia ja toisessa taas kierrätettyä Fortum Circo-muovia. Luonnonkuiduna molemmissa versioissa on käytetty hamppukuitua.

### 2.1 Luonnonkuitukomposiitit ja luonnonkuidut

Luonnonkuitukomposiiteissa lujitemateriaalina on luonnonkuitu. Luonnonkuitua saadaan luonnosta eläimistä ja kasveista mekaanisesti tai kemiallisesti erottamalla. Eläinperäisiin kuituihin kuuluu muun muassa karvat, villat ja höyhenet. Kasvipäisiä kuituja saadaan esimerkiksi puusta, olkikasveista sekä muista kasveista kuten hampusta. Näiden lisäksi luonnonkuiduksi lasketaan mineraaliperäiset kuidut, joista esimerkkinä asbestikuidut. (Al-Oqla F., 2017 s. 24.)

Tässä työssä tutkitussa komposiitissa oli luonnonkuiduna käytetty hamppukuitua. Hampukuitu luokitellaan kasvikuuduissa niinikuitujen kategoriaan. Niinikuidut sijaitsevat kasvin varressa ja niistä erotetaan yksittäisiä hamppukuituja liottamalla. Hampua voi kasvaa laajasti erilaisissa olosuhteissa ja se kasvaa nopeasti tuottaen pitkiä ja vahvoja niinikuituja. Hampukuitua on käytetty jo pitkään köysimateriaalin ja paperin valmistukseen, mutta nykyään käyttöä on laajennettu muun muassa komposiitteihin. (Parkkinen H., 2018 ss. 15-17.)

Luonnonkuitujen käytössä komposiiteissa etuna on käytetyn luonnonkuidun uusiutuvuus ja ekologisuus. Kuitukasvi on kasvaessaan sitonut itseensä hiilidioksidia. Lisäksi vaikka komposiitti elinkaarensa lopussa päätyisi hävitettäväksi polttamalla, hiilijalanjälki on luonnonkuidun osalta neutraali. Luonnonkuitu korvaa ja vähentää suoraan muovin määrää materiaalissa ja myös tätä kautta pienentää komposiittimateriaalin kokonaishiilijalanjälkeä. Muovia säästämällä myös muovien valmistukseen kuluviin fossiilisten raaka-ainesten käyttöä voidaan vähentää. Luonnonkuidut aiheuttavat kuitenkin myös negatiivisia vaikutuksia materiaalin ominaisuuksiin. Luonnonkuidut kestävät muoveja heikommin suuria lämpötiloja ja kosteita olosuhteita. Luonnonkuitujen rakenne hajoaa korkeissa lämpötiloissa, mikä vaikuttaa suoraan materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Lisäksi useat luonnonkuidut ovat hydrofiilisiä materiaaleja eli ne absorboivat itseensä kosteutta. Nämä ominaisuudet asettavat tiettyjä rajoja materiaalin prosessointiin ja jopa mahdollisten loppukäyttökohteiden valintaan. Luonnonkuitukomposiitin suunnittelussa tulee ottaa huomioon nämä ominaisuudet niin prosessointimenetelmien kuin käyttökohteiden valinnassa. Tärkeää on, että loppukäytössä materiaalin ekologisuus ja siitä saatavat hyödyt ylittävät materiaalin ominaisuuksista johtuvat ongelmat. (Al-Oqla F., 2017 ss. 33-35.)

## 2.2 Muovikomposiitti ja muovit

Muovikomposiitiksi voi nimittää komposiittia, jonka matriisiaineena on käytetty muovia (Sorsa J., 2015). Muovi määritellään standardissa materiaaliksi, joka koostuu pääasiassa suurimolekulaarisesta polymeeristä. Lisäksi standardi määrittää, että valmistettaessa kappaleeksi, tällöisen materiaalin tulee olla jossain prosessin vaiheessa muokattavissa virtaavassa tilassa. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2013)

Muovi toimii yleisenä nimityksenä erilaisille polymeerimateriaaleille. Eri muovien luokittelussa käytetään muovin rakenteesta ja prosessoitavuudesta kertovia termejä kerta- ja kestumuovit. Erona näissä muovityypeissä on, että kertamuoveja voidaan muokata muotoonsa vain kerran, mutta kestumuovit voidaan sulattaa ja prosessoida uudelleen. Kestumuovit pehmenevät lämmitettäessä ja kovenevat jälleen jäähtyessä. Tämä ominaisuus on lisäksi toistettavissa ja juuri se mahdollistaa kestumuovien uudelleen prosessoinnin ja muokkaamisen. Tämänkin jaottelun sisään kuuluu lukuisia erilaisia muoveja, joiden ominaisuudet erottavat ne toisistaan. Muovit eroavat toisistaan esimerkiksi lämmönkesto-, sähkönjohtavuus ja kemikaalinkesto-ominaisuuksien suhteen. Muoveja on

moniin eri käyttötarkoituksiin ja sovelluksiin niiden monipuolisten ominaisuuksien ansiosta. (Muoviteollisuus Ry.)

### 2.2.1 Polypropeeni

Polypropeeni eli PP kehitettiin vuonna 1951 amerikkalaisen yhtiön Phillips Petroleumin toimesta polyeteenin (PE) haastajaksi. PP soveltui PE:n tavoin monipuolisesti useaan työstömenetelmään ja sitä alettiin kehittämään kylmänkestävyyden ja iskulujuuden parantamiseksi. Nykyään PP on toiseksi käytetyin muovi Euroopassa. PP käytetään laajasti pakkausmuovina, auton sisäosissa ja muun muassa kuitumuovina. (Järvinen P., 2017 s. 34)

Erilaisia PP tyyppisiä on kolme: PP-homopolymeeri (PP-H), PP-blokkikopolymeeri (PP-C) ja PP-satunnais- eli randomkopolymeeri (PP-R). PP-H on perinteisen PP:n muoto. PP-C:ssä ja PP-R:ssä taas polypropeeniin on kopolymeroitunut eteeniä. PP-C:ssä eteeni on säännöllisinä jaksoina PP-ketjuissa ja PP-R:ssä nämä jaksot on sijoittuneet satunnaisesti. Satunnainen eteenijaksojen sijoittuminen tekee PP-R:stä läpinäkyvää. PP-H sopii hyvin ruiskuvaluttavaksi ja kestää lämpöä PE:tä paremmin. PP sopii myös muun muassa muovipakkauksien saranoiden valmistamiseen, koska saranamateriaalina se kestää toistuvaa taivuttamista. PP-C:llä on PP-H:ta ja PP-R:ää paremmat pakkasenkesto ominaisuudet. Ominaisuuksiltaan PP-C:stä tehdyt tuotteet ovat pakkasenkestävyyden lisäksi pehmeitä ja joustavia. (Järvinen P., 2017 ss. 34-36)

PP:tä käytetään monipuolisesti erilaisiin käyttökohteisiin ympäri maailman. PP:tä prosessoidaan yleensä käyttämällä ekstruusio- tai ruiskuvaluprosessia. Näitä prosesseja hyödyntäen siitä valmistetaan laajasti erilaisia tuotteita eri käyttötarkoituksiin. Valmistettaviin tuotteisiin kuuluu muun muassa pakkauksia, levyjä, putkia ja kalvoja. (Järvinen P., 2017 ss. 36-37)

### 2.2.2 Fortum Circo polypropeeni

Fortum Circo on Fortum Oyj:n valmistama uusioraaka-aine, joka on valmistettu pääosin kotitalouksien muovipakkausjätteestä sekä teollisuuden muovijätteistä. Fortumin muovijalostamossa muovipakkausjäte lajitellaan infrapunateknologian avulla PP- ja PE-

jakeisiin. Jakeet pestään ja jalostetaan muovigranulaatiksi. Fortumin muovinjalostusprosessi on suunniteltu pitämään lopputuote tasalaatuisena. (Fortum Oyj, 2021)

Fortum Circo-uusiomuovimateriaalit on kehitetty vastuulliseksi vaihtoehdoksi ensiömuovimateriaalille. Fortum valmistaa mainituista jakeista peruslaatuja, mutta tarvittaessa räätälöi materiaaleja asiakkaalle sopivaksi. Peruslaatuisena uusio-PP:sta on saatavilla kaksi eri versiota PP-920 ja PP-928. (Fortum Oyj, 2021). Tässä työssä tarkastelun alaisessa komposiitissa on käytetty PP-928-polypropeenä.

### 2.3 RPP30 ja PP30

Tässä työssä tutkittiin komposiitteja, joiden lyhenteenä ja tunnisteena käytetään RPP30:tä ja PP30:tä. RPP30 vastaa CircoPP:stä valmistettua komposiittia ja PP30 vastaa taas ensiö-PP:tä sisältävää komposiittia. Taulukosta 1 käy tarkemmin ilmi komposiittien tiedot ja niiden sisältämät materiaalit.

Taulukko 1. Komposiittimateriaalien tiedot.

Lyhenne	Matriisiaine/muovilaatu	Pitoisuus (%)	Lujiteaine/Luonnonkuitu	Pitoisuus (%)
RPP30	Fortum CircoPP-928	70	Hamppukuitu	30
PP30	Moplen HP2674	70	Hamppukuitu	30

Työn aikana materiaalin kuitupitoisuutta laskettiin lisäämällä muovin määrää materiaalissa. Tässä työssä näitä prosessoituja eriä käsiteltäessä hyödynnettiin alkuperäisen komposiitin lyhennettä niin, että lyhenteen numeroa muutetaan kuitupitoisuutta vastaavaksi.

### 3 EKSTRUUSIO

Ekstruusio on yleisesti käytössä oleva jatkuvatoiminen muovin muokkaus- ja valmistusmenetelmä. Ekstruusio on toinen nimitys prosessille nimeltään suulakepuristus. Ekstruudereita on käytössä yksiruuviekstruuderit, jotka sopivat useimpien kestumuovien työstöön ja kaksoisruuviekstruuderit, jotka sopivat paremmin esimerkiksi kitkalämmölle herkkien materiaalien prosessointiin. (Järvinen P., 2017 s. 154)

Ekstruuderissa on siis yksi tai kaksi ruuvia, jotka pyörivät sylinterin sisällä. Ruuvi plastisoi muovimateriaalin paineen, kitkan ja lämmön avulla. Plastisointi on käytännössä muovin sulattamista, jolloin siitä tulee muovattavaa ja helpommin virtaavaa. Paine sylinteriin ja materiaaliin luodaan ruuvilla, jonka kierteiden väliin jäävä tila tihenee päätyä kohti. Kitka luodaan ruuvin kierrosnopeudella. Mitä nopeampaa ruuvi pyörii, sitä enemmän kitkaa muovattavaan materiaaliin kohdistuu. Lämpöä syntyy kitkan avulla, mutta sitä lisätään myös ruuvien sylinterin ympärillä olevien lämpövästusten avulla. (Järvinen P., 2017 s. 154)

Ekstruudereita on olemassa erikokoisia. Muovaustarpeen mukaan ekstruuderien ruuvien pituus ja halkaisija sekä niiden suhde vaihtelee. Lisäksi vaihtelee lämpövyöhykkeiden pituus ja määrä. Tavoitteena ekstruusiosprosessissa on tehdä prosessoitavasta muovista ja mahdollisista muista materiaaleista mahdollisimman homogeeninen massa. Tämä massa johdetaan suulakkeelle, jonka jälkeen muovimassa on valmis seuraavaan prosessivaiheeseen. (Järvinen P., 2017 s. 154)

## 4 LISÄÄVÄ VALMISTUS

Lisäävä valmistus on muovituotteiden valmistusmenetelmä, joka tunnetaan yleisesti 3D-tulostuksena. Lisäävä valmistus eroaa perinteisistä muovikappaleiden valmistus- ja muokausmenetelmistä monipuolisuudellaan, muokattavuudellaan ja materiaalitehokkuudellaan. Perinteisemmissä muovituotteiden valmistusmenetelmissä, kuten valamis- ja työstömenetelmissä, prosessi on suunniteltu tietyille tuotteille ilman suurta muokattavuutta. Esimerkiksi ruiskuvalamisessa käytetään kiinteää muottia, johon muovimateriaali paineen avulla siirretään ja jossa muotin mukainen kappale muodostuu materiaalin jäähtyessä muottiin. Jos mainitussa menetelmässä halutaan valmistaa jokin muu kappale, täytyy vaihtaa muottia. Erilaisissa työstömenetelmissä taas työstetään isommasta pinta-alasta, kuten esimerkiksi levystä, pienempiä kappaleita. Työstömenetelmässä leikattava tuote voi olla muokattavissa, mutta menetelmässä materiaalia menee hukkaan, kun ylimääräinen materiaali leikataan tuotteen ympäriltä pois. (Hausman K., 2014 ss. 11-15)

Lisäävässä valmistuksessa kolmiulotteisesti (3D) mallinnettu tuote valmistetaan kerros kerrallaan juuri sopivasta määrästä materiaalia. Lisäävä valmistusprosessi alkaa 3D-mallinnuksesta. Mallinnus tehdään virtuaalisesti tietokoneohjelmalla piirtämällä kolmiulotteinen kappale. Kappaleen mallinnuksen jälkeen malli täytyy vielä muuntaa 3D-tulostusta varten formaattiin, jossa kappale jakaantuu tulostettaviin kerroksiin. Tämän mallinnuksen avulla 3D-tulostin rakentaa kappaleen aloittaen pohjakerroksesta, jonka päälle kappale tulostuu kerros kerrallaan. Lisäävän valmistuksen hyötyihin lukeutuu mahdollisuus toteuttaa persoonallisia tuotteita ja monimutkaisia osia resurssitehokkaasti ja kestävä kehitys huomioiden. Koska 3D-tulostimeen voidaan itse suunnitella haluttu kappale, on sen mahdollisuudet todella laajat ja persoonalliset. (Hausman K., 2014 s. 16)

### 4.1 Pursotukseen perustuvat 3D-tulostusmenetelmät FDM/FFF ja FGF

FDM tulee sanoista Fused Deposition Modeling ja on käytännössä sama menetelmä kuin FFF, joka tulee sanoista Fused Filament Fabrication. Menetelmästä on käytössä nämä kaksi nimeä siksi, että FDM on erikseen rekisteröity tuotemerkiksi ja näin ollen sen käyttö on rajoittuneempaa. (Hausman K., 2014) Menetelmälle ei ole käytössä suomenkielisiä termiä tai nimeä. (Lähteenmäki E., 2016)



FDM/FFF on hyvin tunnettu lisäävän valmistuksen menetelmä, joka perustuu aineen sulattamiseen ja pursottamiseen. Käytännössä menetelmä on varsin yksinkertainen. Menetelmää hyödyntävässä tulostimessa on oltava lämmitysyksikkö, tapa liikuttaa materiaalia ja suutin. Yleisesti tässä menetelmässä käytetään materiaalifilamenttia. Käytännössä kyseisessä menetelmässä tietokone liikuttaa tulostimen suutinta kappaleen muotojen mukaisesti. Samalla filamenttia liikutetaan rullalla kohti suutinta lämmitysyksikön kautta ja sulanut materiaali valuu suuttimen päästä hiljalleen muodostaen kappaleen. (Lähteenmäki E., 2016)

FGF tulee sanoista Fused Granular Fabrication ja on menetelmänä pääpiirteittäin samankaltainen FDM/FFF menetelmän kanssa. Filamentin sijaan materiaalina käytetään granulaatteja. Menetelmä muistuttaa toiminnaltaan ekstruusiota ja filamenttirullan tilalla onkin ekstruuderiruuvi. Granulaatit syötetään yleensä omalla painollaan pystyasennossa olevan ruuvin ylä- tai alkupäähän, josta ruuvi kuljettaa materiaalia kohti suutinta. Ruuvin ympärillä on lämmitysyksikkö, joka tuottaa lämpöä materiaalin sulattamiseen. Sulanut materiaali johdetaan sitten suuttimen kautta tulostuspöydälle. FGF-tulostimissa on mahdollista olla useampia lämpövyöhykkeitä materiaalin tasaisemman sulattamisen mahdollistamiseksi. Lisäksi suuttimia pystyy usein vaihtamaan tarpeen mukaan esimerkiksi eri kokoiseksi. FGF-tulostimilla on potentiaalia olla kustannustehokkaampi vaihtoehto, kun sitä verrataan FDM/FFF-tulostimiin. FDM/FFF-tulostimissa käytettävä filamentti onkin usein valmistettu granulaatista, joten käytännössä FGF-tulostinta käyttämällä on mahdollista päästä eroon turhista prosessointivaiheista. (Juggerbot3D, 2020)

#### 4.2 Lisäävässä valmistuksessa hyödynnettävät ohjelmistot

Lisäävässä valmistuksessa hyödynnetään tietokoneohjelmistoja kolmiulotteisen kappaleen mallintamiseen ja muokkaukseen 3D-tulostimelle sopivaan muotoon. Mallintamiseen käytetään yleisesti CAD-ohjelmistoja (computer aided design) eli tietokone avusteisia suunnittelu ohjelmistoja. Jotta CAD-ohjelmistolla piirretty ja suunniteltu kappale voidaan tulostaa, on se ensin tallennettava sopivaan tiedostomuotoon 3D-tulostusohjelmistoa varten. (Järvinen P., 2017 s. 186)

Yleisesti käytössä oleva tiedostoformaatti on STL (standard triangle language). STL-formaatin tarkoituksena on määrittää 3D-mallin geometria tasokolmioiden avulla. STL-formaatilla haastavat kaarevatkin pinnat voidaan kuvata mahdollisimman tarkasti tiedostoon. Riittävän tarkan geometrian saavuttamiseksi pinta jaetaan tarpeeksi pieniin

kolmioihin. Käytännössä tiedosto sisältää jokaisen kolmion geometriset tiedot nurkkapisteiden koordinaatteina ja normaaleina suuntavektoreina. 3D-tulostusohjelma mallintaa kappaleen STL-tiedoston geometristen mittatietojen avulla. STL-tiedostoa tallennettaessa on hyvä muistaa, että se sisältää vain lukuja, joten mittayksikkö pysyy samana CAD- ja 3D-tulostusohjelman välillä. Yleisesti mittayksikkönä 3D-tulostuksessa ja mallinnuksessa on käytössä millimetrit. (AIPWorks, 2019)

3D-tulostusohjelmat tunnetaan slicer-ohjelmistoina. Tulostusohjelman tarkoituksena on prosessoida STL-tiedostosta kappale tulostettavaan muotoon, jotta kone voi käsitellä kappaleen kerros kerrallaan. Tulostusohjelmia on olemassa monia erilaisia, mutta niitä yhdistää yleisimmät tulostuksen kannalta kriittiset säädettävät parametrit ja asetukset. (GoPrint3D, 2016)

Työssä käytetty slicer-ohjelma oli Simplify3D. Simplify3D mahdollistaa monien tulostusparametrien säätämisen. Ohjelmaan on säädetty laitteen kiinteät asetukset, kuten tulostusulottuvuuksien mitat ja muut tiedot, jotka eivät muutu, vaikka materiaali tai tulostettava kappale vaihtuisi. Kun tulostusparametrit on määritelty Simplify3D-ohjelmistossa tulostettavalle kappaleelle, luodaan ohjelmalla G-tiedosto, joka sisältää kaiken tulostimelle siirrettävän datan. G-tiedosto ajetaan tulostimelle, jonka perusteella tulostin muodostaa kappaleen.

Tulostusparametrit ovat tärkeässä osassa, kun halutaan tulostaa mahdollisimman täydellinen ja mallin mukainen kappale halutusta materiaalista. Seuraavassa taulukossa 2 kerrotaan tärkeimmistä tulostusparametreista, joilla määritetään tulostuksen asetukset. Esimerkkinä hyödynnetään Simplify3D ohjelmiston asetuksia.

Taulukko 2. Tulostusparametrit.

Parametri		Tiedot
Suomeksi	English	
Kerroskorkeus	Layer thickness	Kerroskorkeus määrittää, kuinka tarkasti kappale on jaettu kerroksiin korkeussuunnassa. Käytännössä mitä pienempi kerroskorkeus, sitä enemmän kerroksia kappaleeseen tulee. Enemmän kerroksia toisaalta parantaa tulostuksen laatua, mutta lisää huomattavasti tulostusaikaa.
Kehäasetukset	Outline/perimeter settings	Kehäasetuksilla määritetään, kuinka monta ulkokehää kappaleeseen tulostetaan ennen täyttöä.

		Ulkokehien sopiva määrä tekee kappaleesta vahvemman.
Kiinteiden kerroksien määrä	Solid layers	Kerroksien määrän lisäksi voidaan määrittää kiinteitä kerroksia tulostettavan kappaleen pohja- ja/tai päällisiin kerroksiin. Näillä kiinteillä kerroksilla vahvistetaan kappaleen alku- ja loppurakennetta.
Täyttö	Infill	Täytön asetuksilla voidaan säätää, kuinka iso osa kappaleen sisärakenteesta täytetään materiaallilla. Esimerkiksi valittaessa 25 %:n täyttöaste, tulostaa laite täyttöön 25 % muovia verrattuna siihen, mitä menisi kiinteän kerroksen tulostamiseen. Täytössä käytetään täyttökuvioita, joista yleisimmät löytyy yleensä tulostusohjelmien asetuksista. Erilaiset kuviot on suunniteltu vahvistamaan kappaleen rakennetta, jopa hyvin matalalla täyttöasteilla. Sopivan täyttökuvion ja -asteen määrittää yleensä tulostettavan kappaleen vaatimukset.
Lisäominaisuudet	Additions	Lisäominaisuuksina tulostusohjelmissa on mahdollisuus tulostaa kappaleelle alusta, tukikehä ja/tai tukirakenne. Alusta-asetuksilla kappaleen alle tulostuu ensin alusta, jonka päälle itse kappale muodostetaan. Tulostusalustalla voidaan parantaa pohjan tulostuslaatua joidenkin materiaalien kanssa.
Tulostusnopeus	Speed	Tulostukseen on mahdollista määrittää nopeuksia monipuolisesti eri vaiheisiin. Esimerkiksi tässä työssä hyödynnettävässä Simplify3D ohjelmistossa säädetään yleisnopeus ja sitten eri toiminnoille säädetään nopeustaso suhteessa tähän nopeuteen. Esimerkiksi voidaan säätää 25 mm/s:iin tulostusnopeus ja lisäksi, että täytön tulostuksen nopeus on 60 % säädetystä tulostusnopeudesta.
Lämpötilat	Temperatures	Tulostusta varten on mahdollista määrittää suuttimen ja tulostusalustan lämpötila.
Suutinkoko ja tulostusleveys	Nozzle diameter, Printing width	Asetuksiin säädetään tieto tulostimeen asennetusta suuttimesta ja määritetään sen mukaan tulostusleveys.

#### 4.3 Muovit lisäävässä valmistuksessa

Lisäävän valmistuksen menetelmät ja laitteet asettavat erilaisia vaatimuksia käytettävien materiaalien suhteen. Laitteesta riippuen materiaali täytyy olla esimerkiksi tietyssä muodossa. Yleisesti muovia hyödyntävien 3D-tulostimien materiaali syötetään tulostimeen filamentin eli materiaalilangan muodossa. Filamentti on yleensä tulostimesta riippuen

halkaisijaltaan joko 1,75 mm tai 3 mm. Filamentilla on useita laatuvaatimuksia ja filamentin laatu vaikuttaa suoraan tulostuksen laatuun. Vaihtelut filamentin muodossa, paksuudessa ja puhtaudessa vaikuttavat tulostettavaan kappaleeseen ja voivat jopa tukkia tulostimen. Filamentin lisäksi materiaali voi olla granulaattimuodossa. (Hausman K., 2014 ss. 64-65)

Nykyään 3D-tulostuksessa on käytössä lukuisia eri kestopuoveista valmistettuja filamentteja. Näistä yksi yleisimmistä muovilaaduista on polylaktidi (PLA). PLA on biopohjainen ja biohajoava kestopuovi, joka valmistetaan fermentoimalla kasvipohjaisista raaka-aineista. PLA on helpon prosessoitavuutensa vuoksi yleensä varma valinta käytettäväksi 3D-tulostimessa. Se ei vaadi korkeita lämpötiloja eikä lämmitettyä tulostusalustaa ja lisäksi se on kestävyyteensä nähden edullista materiaalia. PLA on haurasta, mutta sitä pystyy silti käyttämään monissa eri käyttökohteissa. (Simplify3D, 2021)

Tässäkin työssä käytetty PP-muovi sen sijaan on lähtökohtaisesti haastavampi materiaali käyttää lisäävässä valmistuksessa. Jäähdyessään PP vääntyy voimakkaasti. Lisäksi PP tarttuu heikosti normaalisti käytössä olevaan lasiseen tulostusalustaan. Kasaan painuessaan materiaali irtoaa vielä helpommin tulostusalustasta, joten tulostusalustan merkitys on suuri. PP:tä tulostettaessa suositellaankin käytettäväksi joko erillistä PP:sta valmistettua tulostusalustaa tai pakkausteippiä. PP tarttuu parhaiten itseensä, joten tämän takia on hyvä käyttää samaa materiaalia myös tulostusalustana. Jäähdytymisen seurauksia voi myös lieventää tulostuksen aikana tulostusalustan lämmityksellä ja jäähdytyksen minimoimisella. PP:lle suositellaan 220–250 °C:n tulostuslämpötilaa. Vaikka materiaali sulaa jo huomattavasti alemmissa lämpötiloissa, takaa korkeampi, esimerkiksi 240 °C:n tulostuslämpötila paremman kerroksien välisen adheesion. Tulostuspedille suositellaan 85–100 °C:n lämpötilaa. (Simplify3D, 2021)

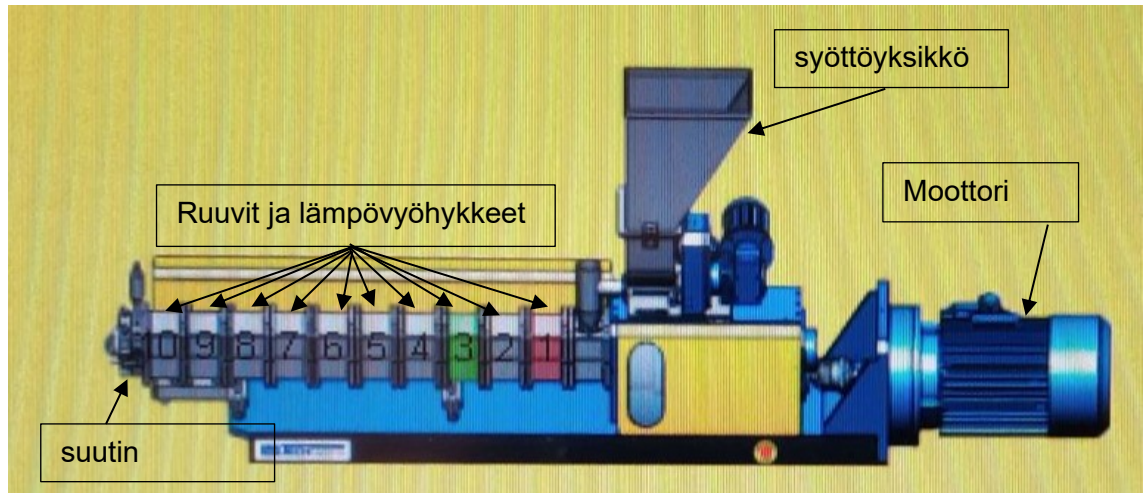
## 5 CASE: EKSTRUUDERI

Tässä työssä ekstruuderia ja ekstruusioprosessia hyödynnettiin materiaalin prosessoitavuuden tutkimuksessa sekä komposiitin kuitupitoisuuden ja raekoon muokkaamisessa. Osana materiaalin prosessoitavuuden tutkimista yritettiin valmistaa materiaalista materiaalilankaa eli filamenttia. Käytössä ollut ekstruusiolaitteisto on Turun ammattikorkeakoulun laitekantaan kuuluva laboratoriotason Labtech kaksoisruuviekstruuderin.

Osana tätä opinnäytetyötä suoritettiin käyttöönotto ja koekäyttö uusille ekstruusioprosessin lisälaitteille. Turun ammattikorkeakoulun laitekantaan kuuluva Labtechin kaksoisruuviekstruuderin päivitettiin sopivammaksi filamenttien valmistusta varten asentamalla siihen uusi kelaus- ja vetolaite. Lisäksi asennettiin uusi ilmajähdytykseen perustuva jäähdytysjärjestelmä, joka sopii vesijähdytysjärjestelmää paremmin kosteudelle herkkien materiaalien prosessointiin. Samalla otettiin käyttöön myös lisäsyöttöyksikkö, jonka kautta voidaan syöttää toista raaka-ainetta. Käyttöönottoon sisältyi uusien laitteistojen toimintaan tutustuminen, koekäyttö ja olemassa olevien käyttöohjeiden päivittäminen käsittelemään myös uusien laitteiden käyttöön liittyvän ohjeistuksen.

### 5.1 Labtech kaksoisruuviekstruuderin

Labtech kaksoisruuviekstruuderin on laboratoriomittakaavan ekstruusioprosessilaitte. Laite koostuu moottorista, syöttöyksiköstä, kahdesta ekstruusiuruuvista, useista lämpövyöhykkeistä ja suuttimesta. Suuttimen jälkeen on vielä materiaalinjäähdytysyksikkö ja granulaatin valmistamiseen tarkoitettu leikkuriyksikkö. Lisäksi laitteen yhteydessä on käyttöjärjestelmä, jonka kautta laitteen toimintoja pääasiallisesti hallitaan. Kuvassa 1 on laitteen käyttöjärjestelmän näytöltä otettu mallinnus laitteen rakenteesta. Kuvaan on osoitettu laitteen tärkeimmät osat.



Kuva 1. Labtech kaksoisruuviekstruuderin rakenne.

Prosessi alkaa materiaalin syöttämisellä ekstruuderin syöttöyksikköön. Syöttöyksikössä on oma kuljetinruuvi, jonka nopeutta säädellään käyttöjärjestelmän kautta. Käyttöjärjestelmän kautta säädetään myös lämpövyöhykkeiden ja suuttimen lämmitystä sekä ekstruuderin ruuvien pyörimisnopeutta. Säätomahdollisuuksien lisäksi käyttöjärjestelmän kautta on mahdollista seurata suuttimen painetta ja moottorin tehoja, jotka ovat tärkeää informaatiota ajon aikana. Ajon aikana syöttöyksikkö syöttää materiaalia pääruuvien alkupäähän, josta pääruuvit alkavat kuljettamaan ja plastisoimaan materiaalia lämpövyöhykkeiden läpi. Lämpövyöhykkeitä on tässä laitteessa yhdeksän ja viimeisenä on lisäksi suutin. Lämpövyöhykkeiden lämpötilat säädetään prosessoitavan materiaalin mukaan sopivaksi ja jaetaan tasaisesti sekä yleensä niin, että alkupäässä on alhaisempi lämpö, keskellä kaikkein korkein ja suutinta kohden jäähtyy hieman. Tämä mahdollistaa materiaalin tasaisen muovautumisen sen edetessä ekstruuderissa. (Labtech Engineering CO. Ltd., 2016)

Kuuma ja muovautunut materiaali tulee ulos ekstruuderin suuttimesta, suuttimen määrittämässä muodossa. Tässä laitteessa on mahdollista käyttää suuttimesta tulevan profiilin muotona joko filamenttia tai materiaalilevyä. Tämän työn prosessiajoissa käytössä on filamenttia muodostava suutin. Kyseinen suutin muodostaa kaksi filamenttia samanaikaisesti.

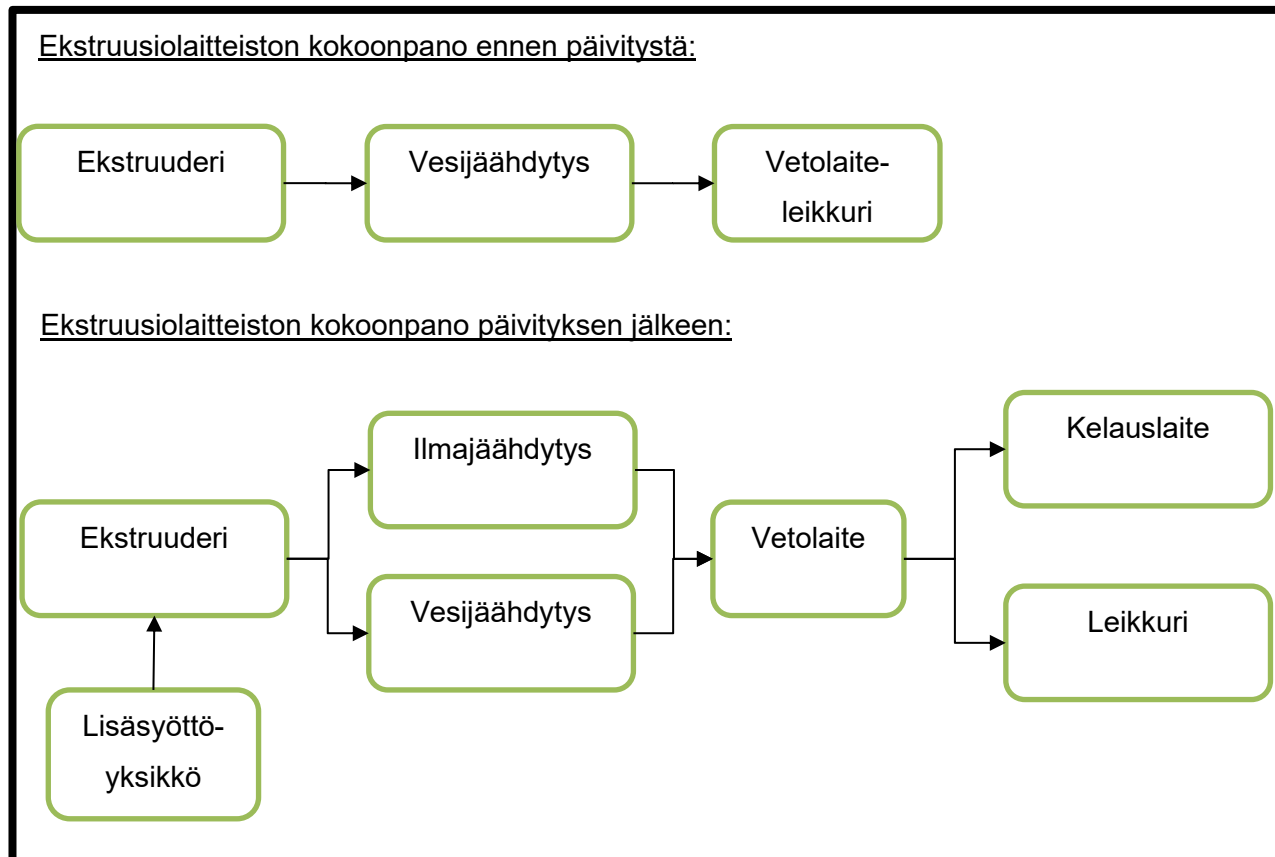
Suuttimen jälkeen materiaali täytyy jäähdyttää, jotta sitä on helpompi käsitellä, ja että se jää muotoonsa. Entisessä kokoonpanossa ekstruusioprosessiin kuuluivat

vesijäähdytysyksikkö ja leikkuri, jonka yhteydessä oli vetolaite. Vesijäähdytyksessä on etunsa jäähdytystehon suhteen, kun materiaali saadaan jäähtymään mahdollisimman nopeasti suuttimen jälkeen, mutta vesijäähdytys ei sovi kaikille materiaaleille. Esimerkiksi se ei sovi tässä työssä tutkittavalle luonnonkuitukomposiitille, jonka ominaisuuksiin kuuluu kosteuden absorboiminen. Vesijäähdytyksessä ekstruuderin suuttimesta tuleva kuuma materiaalifilamentti ohjataan suoraan kylmään veteen, jossa materiaali jäähtyy tehokkaasti lähes välittömästi. Materiaalia kelataan vesialtaan kautta ja johdetaan puhaltimen kautta vetolaitteelle. Puhaltimen tarkoituksena on kuivata materiaalifilamentti pintapuolisesti ennen leikkuria. Puhallin ei kuitenkaan kykene kuivaamaan materiaalin rakenteeseen pääsyttä kosteutta.

Käytössä ollut vetolaite-leikkuri-yhdistelmä koostuu filamentin vetämiseen käytettävästä rullaparista ja leikkurista. Laitteen heikkoutena on aiemmin ollut vetonopeuden säätämisen rajoitteet ja leikkurin jumiutuminen. Riippuen materiaalista, filamentin sulalujuus voi olla heikkoa, jolloin se ei kestä suuria vetonopeuksia. Laitteessa pystyykin säätämään vain vetonopeutta ja leikkurin pyörimisnopeus kasvaa suoraan suhteessa vetonopeuteen. Ongelmana onkin ollut, että leikkuri jumiutuu liian alhaisilla nopeuksilla, jolloin hauraampaa materiaalia ei käytännössä pystynyt vetämään ja leikkaamaan samanaikaisesti.

## 5.2 Ekstruusiolaitteiston päivittäminen

Kuvassa 2 on mallinnettu ekstruusiolaitteiston kokoonpano ennen ja jälkeen päivityksen. Ekstruusiolaitteistoon kuului ennen päivitystä ekstruuderin lisäksi vesijäähdytys materiaalin jäähdyttämistä varten ja vetolaite-leikkuriyhdistelmä materiaalin granulointia varten. Granuloinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä materiaalin leikkaamista granulaatiksi. Uusien lisälaitteiden käyttöönoton ja laitekokoonpanon päivityksen jälkeen prosessissa on vaihtoehtoinen jäähdytysjärjestelmä, ilmajäähdytys, sekä uusi veto- ja kelauslaite. Lisäksi otettiin käyttöön jo olemassa ollut lisäsyöttöyksikkö, johon tuli käyttöjärjestelmään saapuneen päivityksen myötä mahdollisuus automaattiseen ohjaamiseen.



Kuva 2. Ekstruusilaitteiston kokoonpano ennen ja jälkeen päivityksen.

Päivitykset mahdollistavat ekstruusioprosessin monipuolisemman hyödyntämisen erilaisten materiaalien, esimerkiksi luonnonkuitukomposiittien prosessointiin. Päivityksen jälkeen ekstruuderiä käyttäessä on mahdollista valita ajettavan materiaalin tarpeen mukaan sopiva jäähdytysmenetelmä. Lisäksi materiaalitarpeen mukaan on jatkossa mahdollista valita, kerätäänkö filamentti talteen kelauslaitteella, vai leikataanko se suoraan granulaatiksi jatkoprosessointia varten.

### 5.3 Laitteiden käyttöönotto ja koestus

Kun uudet lisälaitteet oli asennettu paikoilleen ja ekstruuderin käyttöjärjestelmä päivitetty, oli aika uusien lisälaitteiden käyttöönotolle ja koestukselle. Käyttöönottoon ja koestukseen sisältyi laitteiden toimintojen läpikäynti ja toiminnan varmistaminen.



Uusina lisälaitteina käyttöön otettiin lisäsyöttöyksikkö, ilmajäähdytysyksikkö, vetolaite ja kelauslaite. Koestuksen tavoitteena oli koeajaa uudet lisälaitteet ja varmistaa niiden toiminta ennen varsinaisia koeajoja komposiittimateriaaleilla.

### 5.3.1 Lisäsyöttöyksikkö

Alkuun testattiin lisäsyöttöyksikön toiminta ohjelmiston ja käyttöjärjestelmän näkökulmasta. Käyttöjärjestelmän päivityksen yhteydessä tuli mahdolliseksi säätää lisäsyöttöyksikön syöttönopeutta ekstruuderin käyttöjärjestelmän kautta. Lisäksi tuli mahdolliseksi synkronoida lisäsyöttöyksikön syöttönopeus ekstruuderin ruuvien nopeuden kanssa. Sama toiminto on käytössä myös pääsyöttöyksiköllä.

Koestuksen aikana testattiin syöttönopeuden säätäminen ja synkronointi. Lisäsyöttöyksikkö ja liitännät toimivat odotusten mukaisesti, eli niitä pystyi hallitsemaan ja ajamaan käyttöjärjestelmän kautta.

### 5.3.2 Ilmajäähdytysyksikkö

Seuraavaksi testattiin ilmajäähdytysyksikön toimintaa. Ilmajäähdytysyksikkö koostuu kahdeksasta tuulettimesta ja kuljetinhihnasta. Tuulettimet ovat kiinni kahdessa nostettavassa kannessa. Nostettavat kannet helpottavat filamenttien läpivientiä jäähdyttimen läpi. Jäähdyttimen hallintapaneeli näkyy kuvassa 3. Jäähdyttimen hallintapainikkeisiin kuuluvat päävirtakytkin, ON- ja OFF-napit sekä nopeudensäätöruuvi kuljetinhihnalle. Jäähdytystehon säätöä varten löytyy kytkimet 1 ja 2. Jäähdytystehon kytkimet 1 ja 2 käynnistävät molemmat joka toisen tuulettimen, eli käytännössä on mahdollista säätää jäähdytystehoa alemmaksi sammuttamalla puolet tuulettimista.



Kuva 3. Ilmajäähdytysyksikön hallintapaneeli.

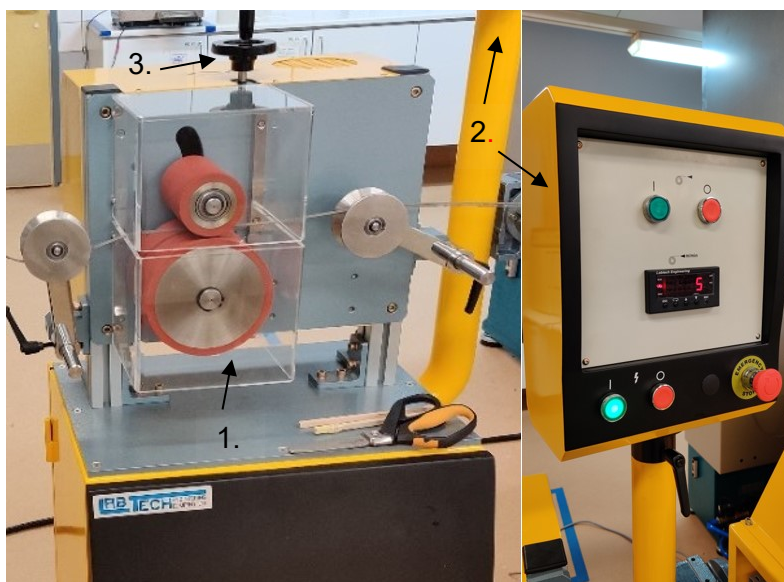
Ensimmäisten testien aikana ei ilmennyt toimintaan liittyviä ongelmia. Jäähdytysteho oli riittävä ja filamentit sai ohjattua kuljetinhihnalle. Jäähdytystehon todettiin olevan riittävä ainakin tilanteessa, jossa kaikki tuulettimet olivat päällä ja ekstruderin jälkeen ensimmäinen kansi oli nostettuna ylös. Huomattiin, että ainakin ajon alkuvaiheessa materiaalin hallitseminen ja käsittely vaati, että ensimmäinen kansi on avattuna. Käytännössä jäähdyttimen käyttö menee seuraavasti:

- Käynnistetään haluttu määrä tuulettimia (puolet tai kaikki).
- Käynnistetään kuljetinhihna sopivalla nopeudella (säädetään kohdilleen myöhemmin).
- Ensimmäinen eli lähimpänä ekstruderia oleva kansi avataan, otetaan vastaan filamentit puutikuilla lämpimältä materiaailta suojautuen ja ohjataan kuljetinhihnalle.
- Säädetään kuljetinhihnan nopeus niin, että se on samassa tahdissa ekstruderista tulevan filamentin kanssa. Filamentin lähtiessä etenemään kuljetinhihnalla, on kaikki mennyt onnistuneesti. kuljetinhihna ei käytännössä kykene vetämään filamenttia, eikä sen ole tarkoituskaan, vaan materiaali lepää kuljetinhihnan päällä. Mutta se ei saa myöskään estää filamentin kulkua.

### 5.3.3 Vetolaite

Seuraavana testattiin vetolaite. Vetolaitteen tarkoituksena on vetää filamenttia tietyllä nopeudella sääten samalla paksuutta, johon filamentti asettuu vedon voimasta.

Kuvassa 4 on nuolilla osoitettuna kelauslaitteen eri osat ja oikealla näkyy erikseen kuvattuna laitteen hallintayksikkö.



Kuva 4. Vetolaite.

Testeissä kävi ilmi, että käytännössä laite toimii, mutta vetopyörien ympärillä oleva suo-  
jamuovi (1.) on liian suuri ja filamentille tarkoitettu aukko joissain tilanteissa liian kapea.  
Nämä hankaloittavat laitteen käyttöä, koska pienikin mutka filamentissa jää helposti ju-  
miin suojen sisälle. Laitteen pyörimisnopeutta säädetään hallintayksikön (2.) kautta.  
Jotta filamentti mahtuu rullien väliin, tulee yläpuolella säätää sopivalle korkeudelle yläpuo-  
lella olevan säätimen (3.) avulla.

#### 5.3.4 Kelauslaite

Viimeisenä testattiin uusi kelauslaite (kuva 5). Kelauslaitteessa on säädettävä moottori,  
joka pyörittää kela (1.) halutulla nopeudella, sekä kelausta helpottava ohjain (2.). Oh-  
jaimen tarkoituksena on jakaa filamentti tasaisesti kelan koko leveydelle. Ohjain liikkuu  
sivuttain raiteen mukaisesti ja sivuttaisliikkeen nopeus ja pituus on erikseen säädettä-  
vissä käytettävän kelakoon mukaan.



Kuva 5. Kelauslaite.

Haastavaksi osuudeksi kelauslaitteen käytössä osoittautui alkuun saada filamentti kiinni kelaan oikein, jotta kelaaminen voitaisiin aloittaa. Tämän onnistuttua kelaaminen toimi odotetulla tavalla.

#### 5.4 Ekstruusiolinjaston ja materiaalien koeajot

Kun oli varmistettu uusien lisälaitteiden toiminnasta yksittäisinä laitteina, oltiin valmiita koeajamaan laitekokoonpanoa kokonaisuudessaan. Näissä koeajoissa käytettiin materiaalina tässä työssä tutkittavia komposiittimateriaaleja.

Tavoitteena koeajoissa oli varmistua laitekokoonpanon toiminnasta käytännössä, löytää hyviä toimintatapoja käyttöohjeistusta varten ja prosessoida komposiittimateriaalia. Materiaalin ja laitekokoonpanon koeajamisen lisäksi tavoitteena oli valmistaa komposiiteista eriä, joissa on matalampi kuitupitoisuus. Komposiittimateriaalien kuitupitoisuutta vähennettiin lisäämällä muovin määrää komposiitissa ekstruderin avulla.

Koeajoissa kuitupitoinen materiaali oli kuivattu ennen prosessointia ekstruuderilla mahdollisen kosteuden poistamiseksi. Koeajoissa käytössä ollut lämpötilaprofiili ja alkuun säädetyt ajonopeudet näkyvät taulukosta 3. Lämpötilaprofiili pysyi koeajojen aikana samana, mutta ajonopeuksia muutettiin tarpeen mukaan.

Taulukko 3. Ekstruuderin lämpötilaprofiili ja ajonopeudet.

Lämpötilaprofiili (°C)											Ajonopeudet (rpm)	
Suutin	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Pääruuvi	Syöttönopeus
190	190	200	200	200	200	190	180	180	175	170	70	6

#### 5.4.1 Koeajot RPP30:llä ja CircoPP:llä

Ensimmäisessä koeajossa tavoitteena oli testata yleisesti koko prosessin toimintaa käytännössä. Koeajoa varten sekoitettiin erä CircoPP:stä ja RPP30:sta. Erään tuli 1/3 osaa kuitupitoista RPP30:a ja 2/3 osaa CircoPP:tä, jolloin saatiin erä, jossa on kokonaisuudessaan 10 %:n kuitupitoisuus.

Koeajon aikana materiaali ei aiheuttanut ongelmia. Vetonopeus pidettiin kuitenkin vielä alhaisena, jotta materiaali ei katkeaisi. Alhaisen vetonopeuden takia filamentti jäi halkaisijaltaan paksuksi. Filamentti pilkottiin leikkurilla granulaatiksi käytettäväksi isosuutintulostimella.

#### 5.4.2 Koeajot PP30:lla ja ensiö-PP:llä

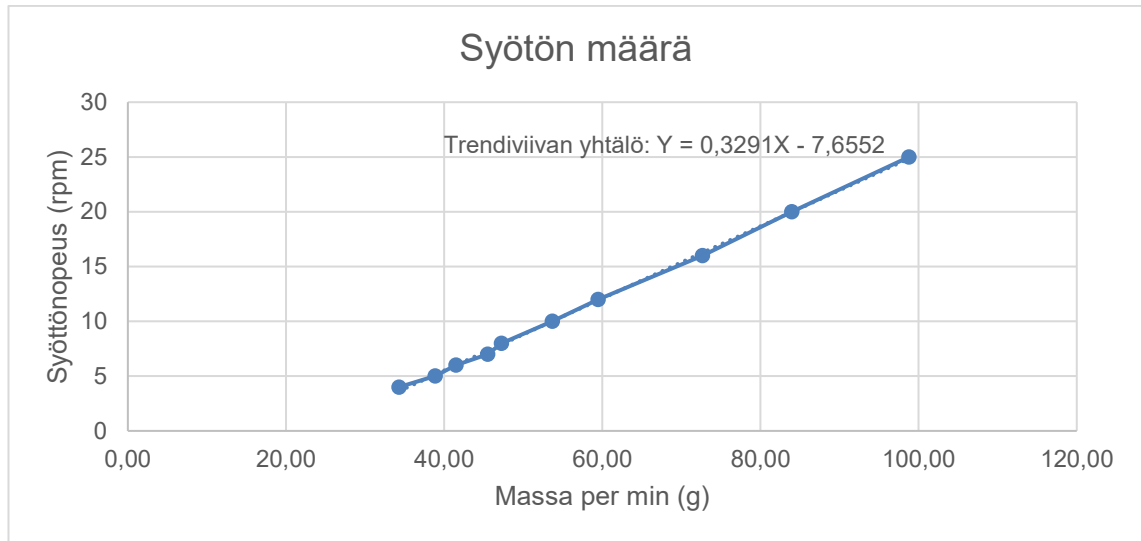
Seuraavassa koeajossa sekoitettiin erä PP30:a ja ensiö-PP:tä (HP2674). Materiaaleja sekoitettiin erään 1/3 PP30:sta ja 2/3 HP2674:ää. Tämä koeajo osoittautui hyvin hankalaksi johtuen materiaalin ominaisuuksista. Materiaalifilamenttien sulalujuus oli heikkoa, jonka takia ne eivät kestäneet omaa painoaan tullessaan ulos ekstruuderin suuttimesta,

eikä vetävää voimaa juuri ollenkaan, vaan katkesivat vetolaitteen aiheuttaessa vetoa filamentteihin.

Tässä vaiheessa tehtiin huomio, että ilmajäähdytysyksikkö on liian kaukana ekstruuderin suuttimesta. Tämän takia materiaali joutui kestämään omaa painoaan ennen jäähdytystä. Tämä ongelma ratkaistiin siirtämällä jäähdytysyksikköä lähemmäs suutinta. Siirtäminen poisti roikkumisongelman. Katkeamisongelma ratkesi ajo- ja vetonopeutta huomattavasti alentamalla, jolloin materiaali saatiin pysymään ehjänä vetolaitteelle asti. Materiaali ei kuitenkaan kestänyt prosessointia vetolaitetta pidemmälle. Materiaali oli jäähtyneenä niin haurasta, että se ei kestänyt kelaamista lainkaan. Käytännössä filamentit katkesivat heti, kun niihin kohdistui taivuttavaa voimaa. Tämä teki filamentin kelaamisesta mahdotonta. Koeajosta opittiin, että jäähdyttimen täytyy olla lähempänä ekstruuderia ja että kelaaminen vaatii filamentilta taipuisuutta. Koeajo toi myös esiin ongelmia ensiö-PP:stä valmistetun luonnonkuitukomposiitin (PP30) prosessoitavuudesta.

#### 5.4.3 Syöttöyksiköiden yhtäaikainen käyttö ja syöttösuhteilla ajaminen

Seuraavassa koeajossa testattiin materiaalin syöttöyksiköiden toimintaa. Tavoitteena oli määrittää kalibrintokuvaaja syöttöyksiköille, jotta materiaalien sekoittaminen onnistuisi syöttämällä materiaaleja samanaikaisesti eri syöttöyksiköistä käyttäen suhteellisia syöttönopeuksia. Määrittäminen tehtiin mittaamalla, kuinka paljon materiaalia virtasi pää- ja lisäsyöttöyksikön läpi minuutin aikana eri syöttönopeuksilla. Määritykset tehtiin molemmille syöttöyksiköille ja materiaaleista CircoPP:lle ja RPP30:lle. Molemmista syöttöyksiköistä tehtiin kummallekin materiaalille kalibrintokuvaaja. Kalibrintokuvaajassa pystyakselilla (Y-akseli) on asetettuna syöttönopeus ja vaaka-akselilla (X-akseli) materiaali-massa, joka tuli läpi minuutin aikana kyseisellä nopeudella. Mittaustulosten kautta kalibrintokuvaajaan muodostui trendiviiva ja trendiviivan yhtälö. Esimerkkinä alapuolella on näkyvissä kuvio 1, jossa on kalibrintokuvaaja CircoPP määrittämisestä pääsyöttöyksiköllä.



Kuvio 1. Kalibrintokuvaaja pääsyöttöyksikkö ja CircoPP.

Kalibrintokuvaajien trendiviivojen yhtälön avulla tehtiin taulukkolaskentaohjelmalla laskuri. Laskuriin voi määrittää halutun materiaalmäärän ja syöttösuhteen. Yksittäisen materiaalin määrän perusteella laskuri antaa säädettävän syöttönopeuden kummallekin syöttöyksikölle. Trendiviivan yhtälössä Y on kuvaajan mukaisesti syöttönopeus ja X on massa per minuutti. Tehdyssä laskurissa yhtälöä käytettiin suoraan määrittämään säädettävä syöttönopeus (Y-arvo) halutulle määrälle materiaalia (X-arvo).

$$Y = 0,3291X - 7,6552$$

jossa X = massa per minuutti (g/min)

Y = Syöttönopeus (rpm)

Kaava 1. Trendiviivan yhtälö CircoPP:llä ja pääsyöttöyksiköllä.

Esimerkiksi, jos halutaan 50 g/min CircoPP:tä pääsyöttöyksikön läpi, kaava 1 toimii alapuolella näkyvän kaavan 2 mukaisesti. Esimerkin mukaan pääsyöttöyksikön nopeudeksi säädettäisiin 8,8 rpm, jos haluttaisiin pääsyöttöyksikön syöttävän materiaalia 50 g/min.

$$0,3291 \times 50,0 - 7,6552 = 8,8$$

Kaava 2. Esimerkki syöttönopeuden määrittämisestä kalibrintokuvaajan avulla.

Syöttönopeus on sekä syöttöyksikkökohtainen, että materiaalikohtainen. Testeissä kävi ilmi, että eri materiaalien välillä on virtauseroja, jotka johtuvat oletettavasti granulaattien erilaisesta mittasuhteista ja tiheydestä. Materiaalimäärä määritettiin punnitsemalla ja esimerkiksi RPP30 granulaatit ovat suurempia, mutta kevyempiä kuin CircoPP granulaatit. Eri syöttöyksiköiden virtauseroihin vaikuttaa tietenkin ruuvikuljettimien erilaisuus. Varsinaisessa pääsyöttöyksikössä on yksi iso ruuvi ja lisäsyöttöyksiköllä kaksi pienempää ruuvia. Näiden syiden vuoksi jatkossa täytyy tulevan käyttäjän tehdä määrittäminen vähintään käyttämälleen syöttöyksikölle ja materiaalille, jos haluaa syöttää materiaalia tietyn määrän minuutissa. Materiaali- ja syöttöyksikkökohtaisuuden vuoksi mitään yleispätevää taulukkomallia ei voitu tehdä jatkossa käytettäväksi.

Seuraavassa koeajossa hyödynnettiin määritettyjä syöttösuhdearvoja ja laskuria. Syötösuhteina käytettiin 1/3 RPP30:ta ja 2/3 CircoPP:tä. Seossuhteilla ajaminen molempia syöttöyksiköitä käyttäen sujui hyvin ja lopputulos oli samanlaatuista kuin punnitsemalla tehty seos. Taulukossa 4 näkyy käytetyt materiaalisuhteet ja niiden perusteella lasketut syöttöyksiköiden nopeudet kyseiselle materiaalille.

Taulukko 4. Syöttönopeusarvot koeajossa.

massa (g) kokonaismäärä per min				
		70 g		
			Syöttönopeudet (rpm)	
Materiaali	Materiaalisuhteet	Per min (g)	Pääsyöttöyksikkö	Lisäsyöttöyksikkö
Circo	2/3	46,7	7,7	14,5
RPP30	1/3	23,3	4,0	11,7



#### 5.4.4 Ekstruusiolinjaston käyttäminen ja sopiva työjärjestys

Koeajojen aikana vakiintui sopiva työjärjestys ekstruusioprosessin optimoimiseksi. Tämä ohjeistus ja työjärjestys päivitettiin kaksoisruuviekstruuderin käyttöohjeisiin.

- Aluksi säädetään sopivat lämmöt materiaalin mukaan ja aloitetaan alhaisella ajonopeudella sen mukaan, miten materiaalia alkaa virtaamaan suuttimesta.
- Filamentin virratessa sopivalla nopeudella suuttimesta, asetetaan ne ilmajähdyttimen kuljetinhihnalle ja säädetään hihnan nopeus sopivaksi. Kuljetinhihna ei kykene vetämään filamenttia, mutta se ei saa estää filamentin kulkua, joten nopeus on hyvä olla yhtenäinen materiaalin virtauksen kanssa.
- Filamenttien tullessa läpi ilmajähdyttimestä, on hyvin tärkeää olla aiheuttamatta minkään suuntaista voimaa filamentteihin. Jos filamentteihin kohdistuu voimaa, tulee niihin välittömästi mutkia ja muoto vääristyy kelauskelvottomaksi. Tämä voidaan välttää pitämällä filamentit suorana ennen asettamista vetolaitteeseen. Kun filamentit ovat onnistuneesti vetolaitteessa, materiaali on helpommin hallittavissa. Vetolaite estää voiman välittymisen jäähdytysosioon, jolloin filamenttiin ei pääse muodostumaan mutkia tai muita epämuodostumia.
- Tämän ansiosta tässä vaiheessa filamenttia voi ajaa pidemmän matkaa ylimääräistä ennen kelauslaitteeseen asentamista, ilman huolta virtauksen estymisestä.
- Seuraavassa vaiheessa otetaan filamenttien loppupää tai leikataan filamentit loppupään tekemiseksi. Filamenttien päädyt asetetaan kelaan niin, että filamentit lukittuvat kelaan.
- Käynnistetään kelauslaite ja kelataan alkuun nopeammalla vauhdilla, jotta vapaana oleva filamentti saadaan kelattua.
- Säädetään kelausnopeus sopivaksi. Kelausnopeus on sopiva, kun filamentit kelautuvat kireänä kelaan, mutta kelauslaite ei aiheuta lisävetovoimaa materiaaliin.

Koeajoista saatu 10 %:nen luonnonkuitukomposiittimateriaali päädyttiin ajamaan leikkurin kautta granulaatiksi. 3D-tulostimen kannalta sopivan paksuista filamenttia ei saatu tehtyä näiden koeajojen aikana. Osa materiaalista ajettiin myös kahdesti ekstruuderin läpi.

## 5.5 Materiaalierien RPP5 ja RPP15 valmistus

Edellisten koeajojen aikana valmistettiin RPP30:sta erät, joissa kuitupitoisuus on laskettu 10 %:iin (RPP10). Seuraavaksi tavoitteena oli valmistaa granulaattia materiaalista 5 %:n (RPP5) ja 15 %:n (RPP15) kuitupitoisuuksilla.

Ajoissa päätavoitteena oli valmistaa granulaattia käytettäväksi isosuutintulostimella, mutta tarkoituksena oli samalla testata, olisiko materiaalista mahdollista valmistaa sopivan paksuista filamenttia. Sopivan paksuisella filamentilla tarkoitetaan tässä halkaisijaltaan 1,75 mm filamenttia. Lisäksi filamentin laatu tulisi olla tasainen. Onnistuessaan tämänkaltainen filamentti sopisi käytettäväksi esimerkiksi 3D-tulostamisessa.

### 5.5.1 RPP15:n valmistus

Ensin valmistettiin 15 %:n materiaalierä RPP15. Materiaalilaimennokseen sekoitettiin 1/2 RPP30:tä ja 1/2 CircoPP:tä. Ekstruuderiin asetettiin aiemmissa koeajoissa vakiintuneet lämpötilat. Pääruuvin ajonopeutena käytettiin 60–70 rpm. Syöttönopeudeksi asetettiin 6 rpm.

Materiaalin virtauksessa ekstruuderissa ei ilmennyt ongelmia. Kun filamentti saatiin johdatettua vakaasti vetolaitteeseen, alkoi materiaalin sulalajuuden rajojen koettelu. Vetonopeus asetettiin alkuun arvoon 3 m/min ja nostettiin 0,1 m/min kerrallaan nopeutta. Kun päästiin lähelle ja yli 4 m/min vetonopeuteen, alkoi materiaalin sulalajuudessa näkymään epävakautta. Vetonopeudessa 4,5 m/min filamentit katkesivat välittömästi ja 3,9–4,4 vetonopeuksissa ne katkeilivat hetken vetämisen jälkeen. Materiaalille sopiva maksimivetonopeus oli 3,8 m/min, jossa filamentti ei katkennut vedon aikana. Tämä ei kuitenkaan ollut riittävä vetonopeus sopivan filamenttipaksuuden saavuttamiseksi.

### 5.5.2 RPP5:n valmistus

Toisena valmistuseränä valmistettiin kuitupitoisuudeltaan 5 %:sta materiaalia. Erään sekoitettiin 1/6 RPP30:tä ja 5/6 CircoPP:tä. Erän prosessointiin käytettiin jälleen samoja parametreja. Materiaali kulki ekstruuderin läpi ilman ongelmia. Materiaalifilamentti johdettiin vetolaitteeseen ja vetonopeus säädettiin alkuun arvoon 3,0 m/min. Tämä erä sieti

selvästi enemmän vetoa, joten nopeutta kasvatettiin hiljalleen tällä kertaa 0,2 m/min kerrallaan.

Materiaali kesti jopa 6,8 m/min vetonopeuden. Tässä pisteessä filamentista tuli epävaakaata ja se katkesi helposti. Vetonopeuden ylärajan löytymisen jälkeen vetonopeus laskettiin arvoon 6,6 m/min. Filamentin halkaisijaa mitattiin valmistuksen aikana ja näytti siltä, ettei halkaisija laskenut ainakaan pitkälle matkalle alle 2 mm:n.

## 5.6 Materiaalien koeajojen tulokset

Koeajojen aikana ei onnistuttu tekemään 3D-tulostimeen sopivaa filamenttia. Koeajojen aikana käytetyt vetonopeudet eivät riittäneet venyttämään filamenttia riittävästi, joten filamentin halkaisija jäi liian suureksi. Filamentin pitäisi olla halkaisijaltaan 1,75 mm ja laadultaan tasaista, jotta sitä voisi käyttää perinteisessä 3D-tulostimessa.

Taulukossa 5 esitetään valmistettujen RPP15-filamenttien paksuuksien keskiarvo, keskihajonta, maksimi, minimi ja mediaani. Otoluku (n) oli 27. Käytännössä tämä tarkoittaa, että filamentin halkaisija mitattiin 27 eri kohdasta. Tuloksista on huomattavissa vaihtelua ja hajontaa jo senkin vuoksi, että halkaisija muuttui vetonopeuden vaihtelun myötä. Tärkeintä onkin tarkastella minimilukua, joka kertoo ohuimman filamentin. Teoriassa 1,8 mm filamentin paksuus on jo melko lähellä tavoiteltua, mutta valitettavasti filamentin paksuus ei ollut tasaista. Mitatessa huomasi, että filamentin halkaisija vaihteli useammasta kohdasta, eikä pysynyt samana pitkiä matkoja. Tästä voi päätellä, ettei vetonopeus vaikuta tasaisesti filamentin halkaisijaan tai materiaali venyy epätasaisesti johtuen joko laitteistosta tai materiaalista.

Taulukko 5. RPP15-filamenttien paksuudet.

n=	27
Keskiarvo	2,3 mm
Keskihajonta	14,6 %
Maksimi	2,9 mm
Minimi	1,8 mm
Mediaani	2,27 mm

Kuvassa 6 näkyy filamenttikappaleita eri kohdista valmistuserää. Kuvista on nähtävissä filamentin epätasaisuus, halkaisijan vaihtelut ja ohuimman kohdan heikko rakenne. Koko valmistuserä päädyttiin ajamaan granulaatiksi filamentin epätasaisuuden vuoksi.



Kuva 6. RPP15 filamenttinäytteet.

Taulukossa 6 on RPP5 filamenttien paksuuksien keskiarvo, keskihajonta, maksimi, minimi ja mediaani.

Taulukko 6. RPP5 filamenttien paksuudet.

n=	28
Keskiarvo	2,1 mm
Keskihajonta	19,5 %
Maksimi	2,8 mm
Minimi	1,1 mm
Mediaani	2,16 mm

Taulukon 6 arvoja ja filamenttinäytteitä tarkastellessa kävi ilmi filamentin epätasaisuus. Ohuimmat kohdat olivat pääosin lyhyitä pätkiä filamentissa, ja paksuus vaihteli muutenkin tiheästi, samalla tavalla kuin RPP15:n kanssa. Myös tämä materiaali leikattiin granulaatiksi käytettäväksi isosuutintulostimella.

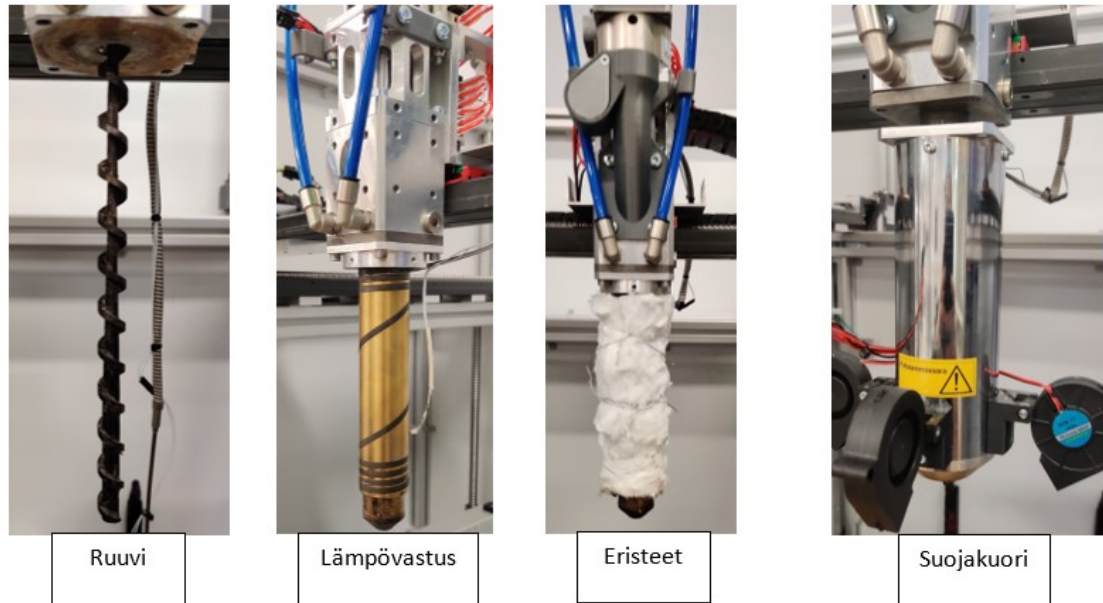
## 6 CASE: LISÄÄVÄ VALMISTUS

Tässä työssä komposiittimateriaalin prosessoitavuutta tutkittiin lisäävässä valmistuksessa hyödyntämällä Prentan FGF-450 isosuutintulostinta, joka on lisäävän valmistuksen applikaatio. Tavoitteena oli tutkia kuinka RPP30- ja PP30-materiaalit sopivat käytettäväksi lisäävässä valmistuksessa. Tutkittavia ja tarkasteltavia asioita oli materiaalin käyttäytyminen tulostimessa, tulostuksen aikana ja sen jälkeen.

Käytännön tutkimukset aloitettiin selvittämällä sopivat prosessointiparametrit komposiittien tulostamiseen. Tämän jälkeen prosessiparametreja muokattiin tulostuksien onnistumisen ja materiaalin käyttäytymisen mukaan. Materiaalia testattiin tulostimessa alkupe räisenä RPP30-granulaattina ja myöhemmin erilaisina seoksina ja versioina, joissa vaihteli sekä granulaattikoko että kuitupitoisuus.

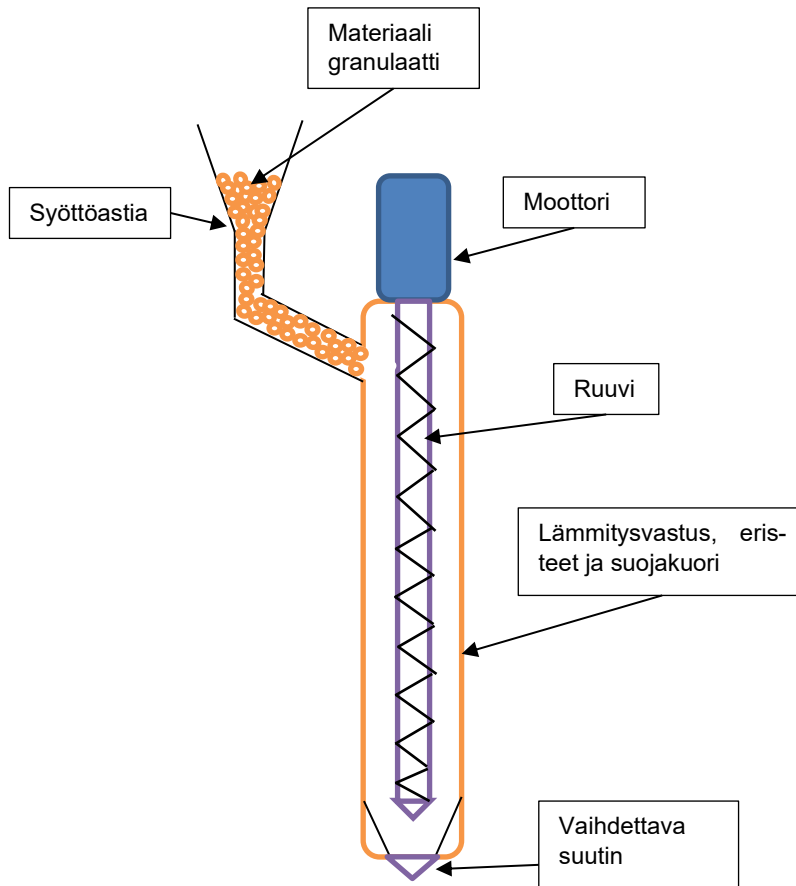
### 6.1 Prenta isosuutintulostin

Prenta Isosuutintulostin on FGF (Fused Granular Fabrication) -menetelmää hyödyntävä isosuutintulostin, joka poikkeaa perinteisemmästä FDM/FFF-3D-tulostimista. Tulostimessa on filamentin kuljettimen sijaan ekstruuderiruuvi, jonka ympärillä on lämmitysyksikkö. Lämmitysyksikkö on käytännössä lämmitysvastus, joka on kierretty ruuvin suoja-kuoren ympärille. Materiaali syötetään tulostimen ruuville suoraan granulaattimuodossa. Ekstruuderin ruuvi kuljettaa materiaalia kohti suutinta ja matkalla materiaali sulaa lämmityksen ja kitkan ansiosta. Suuttimesta sula materiaali sitten joutuu tulostuspöydälle, johon tulostettava kappale muokkautuu kerros kerrallaan. Kuvassa 7 näkyy havainnollistavasti tulostimen suuttimen osat erillään kuvattuina.



Kuva 7. Isosuutintulostimen ekstruderin osat erillään.

Kuvassa 8 on kuvattu laitteen ekstruderin osat ja sijainnit laitteessa. Kuvasta poiketen suojakuoren alaosassa on lisäksi kiinnitettynä neljä tuuletinta, joita käytetään tulosteen jäähdyttämiseen tulostuksen aikana.



Kuva 8. Isosuutintulostimen laitteen suuttimen rakenne.

Isosuutintulostimessa on vaihdettava suutin ja suutin koon voi vaihtaa tarpeen ja materiaalin mukaan. Tulostimessa on käytössä seuraavat suuttimen koot: 0,4 mm, 0,6 mm, 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm ja 3,0 mm. Suuttimen koko tarkoittaa päätysuuttimen halkaisijaa, josta sula materiaali tulee ulos. Suuttimen määrää käytännössä minkä paksuisena materiaali tulee suuttimesta ulos eli tulostusleveyden. Tulostimen kokonaislaitteistoon kuuluu lisäksi lämmitettävä lasinen tulostusalue ja suljettava tulostustila. Tulostusalueen mitat tässä laitteessa on 470 mm x 480 mm x 450 mm.

Tulostaessa tulostusasetukset ajetaan koneeseen Simplify3D-ohjelmistolla luodulla G-tiedostolla. Se sisältää kaikki tulostuksen parametrit ja ajotiedot tulostuksen suorittamiseksi. Lisäksi tulostimessa on oma käyttöjärjestelmä, mistä voi ajonkin aikana muun muassa muuttaa lämpötiloja ja nopeuksia tarvittaessa.

## 6.2 Komposiitin tulostaminen isosuutintulostimella

Tässä työssä tutkittavassa luonnonkuitukomposiitissa on sekaisin hamppukuitua ja polypropeenä (PP). Luonnonkuitu vähentää materiaalissa olevan PP:n määrää ja sitä kautta vaikuttaa materiaalin tulostusominaisuuksiin. Muovin vähentäminen seoksessa voi myös tarkoittaa vähemmän vääntyilyä jäähtymisen seurauksena. Vaikka PP:lle suositellaan korkeaa tulostuslämpötilaa, on komposiitin tapauksessa huomioitava, että kuitumateriaali palaa helposti korkeissa tulostuslämpötiloissa. Näin ollen tulostuslämpötilaa on hyvä laskea niin paljon kuin mahdollista, ilman että vaikuttaa kriittisesti materiaalin virtaukseen ruuvissa ja suuttimessa. Lisäksi luonnonkuitu komposiitissa vaikuttaa suuttimen koon valintaan. Komposiitissa kuitujen partikkelikoko voi vaihdella ja nämä partikkelit voivat tukkia pienemmän suuttimen.

Isosuutintulostimessa on mahdollista määrittää laitteen lämpötiloja, tulostusnopeutta, materiaalin virtausta ja jäähtymisen tehoa. Säädot pystytään tekemään manuaalisesti laitteen käyttöjärjestelmän kautta tulostusohjelman ollessa käynnissä tai ennen tulostusta. Suurin osa tulostusasetuksista tulee tulostusohjelmasta lähetettävän G-tiedoston kautta laitteelle, mutta käyttöjärjestelmä mahdollistaa mainittujen asetusten säätämisen myös tulostuksen aikana.

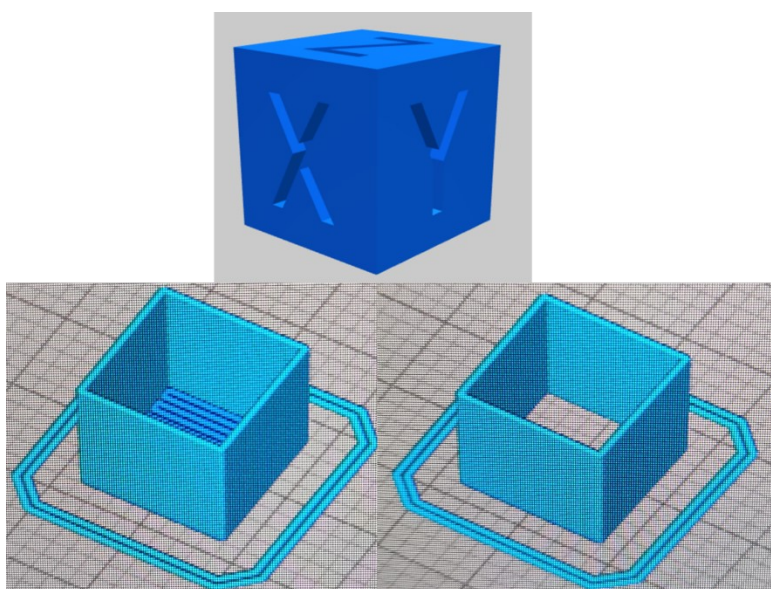
Laitteen oikeanlaisen toiminnan varmistamiseksi on tärkeää, että tulostusalusta on kalibroitu ohjeiden mukaisesti aina suuttimen vaihdon tai alustaan tehtyjen muutoksien yhteydessä. Tulostusalustan kalibrointi varmistaa, että alusta on oikealla etäisyydellä tulostimesta. Kun tässä työssä tulostettiin PP:tä sisältävää komposiittia, pinnoitettiin tulostusalusta pakkausteipillä. Alkuun tulostuksissa käytettiin Simplify3D:n PP:lle suosittelemaa tulostuspedin lämpötilaa 100 °C, mutta myöhemmin todettiin tämän olevan turhan korkea. Näin korkea lämpötila ei auttanut kappaletta pysymään tulostuspedissä, vaan pikemminkin haittasi pakkausteipin kiinnittymistä. Tämän jälkeen käytettiin tulostuspedissä 60 °C:n lämpötilaa.

Tulostusparametrit määritetään tulostusohjelmiston kautta. Tässä työssä käytettiin tulostusohjelmistona Simplify3D-ohjelmistoa. Tulostusparametrien asetukset määritettiin käytettävän suutinkoon, tulostusmallin ja materiaalin mukaan.

Tulostusmalleina työssä käytettiin yksinkertaisia muotoja tulostusparametrien määrittämiseksi. Suuttimenkärjen koko määrittää tulostusleveyden ja sopivan tulostuskorkeuden. Tulostusleveyden määrittämisen kautta suuttimen koko asettaa vaatimuksia myös



tulostettavalle kappaleelle. Kappaleessa ei voi olla reunoja tai viivoja, joiden leveysmitta alittaa asetetun tulostusleveyden. Tulostusohjelmiston lisätoiminnoista käytössä oli reuna-alue (skirt). Reuna-alueen tarkoituksena on tukea teipin pitoa itse tulostettavan kappaleen ympärysalueelta. Kuvassa 9 näkyy ylimpänä alkumäärittämissä käytössä ollut XYZ-kuutio ja alhaalla tulostustyön kokeellisessa vaiheessa paljon käytetty yksinkertaisempi kuutio-tulostusmalli pohjalla tai ilman. Pohjaa käytettiin tilanteen mukaan antamaan kappaleelle pitoa tulostusalustaan nähden.



Kuva 9. Työssä käytettyjä tulostusmalleja.

### 6.3 Komposiittimateriaalin tulostaminen

Tavoitteena oli tutkia materiaalin käyttäytymistä 3D-tulostuksessa ja isosuutintulostimessa. Jos materiaali osoittautuisi ominaisuuksiltaan sopivaksi isosuutintulostimelle, olisi siitä mahdollista tulostaa erilaisia kappaleita tarpeen mukaan ja lukuisiin käyttötarkoituksiin. Tätä varten materiaali piti saada ensin onnistuneesti tulostimen läpi ja löytää sopivat parametrit tulostamiseen.

Sopivien parametrien löydyttyä tutkimuksia jatkettiin materiaalin eri versioiden tulostamisella ja parametreja säädettiin tulostuksien laadun mukaan. Materiaalin eri versioihin kuului kuitupitoisuudeltaan matalammat versiot ja seokset.

### 6.3.1 PP30- ja RPP30-granulaattien tulostaminen ja tulostusparametrien määrittäminen

Materiaalin tulostamisen testaaminen alkoi RPP30- ja PP30-granulaattien käytöllä tulostimessa. Materiaalit kuivattiin ennen tulostamista. RPP30- ja PP30-granulaateissa koko vaihtelee, mutta keskimäärin granulaattien halkaisija on 3–4 mm ja pituus jopa 5 mm. RPP30-materiaalin kuitupitoisuus on 30 % ja matriisi on kierrätettyä CircoPP:tä (PP-928). PP30-granulaateissa on sama kuitupitoisuus, mutta matriisina on käytetty ensiö-PP:tä.

Ensin testattiin PP30-granulaattien syöttämistä tulostimeen. Jostain syystä materiaali ei toiminut tulostimella. Useiden yrityksien jälkeen materiaalia ei saatu kulkemaan tulostimen läpi niin, että olisi voitu tehdä jatkotestauksia. Materiaalin käytöstä tulostimessa päätettiin luopua ja keskittyä täysin RPP30-materiaaliin.

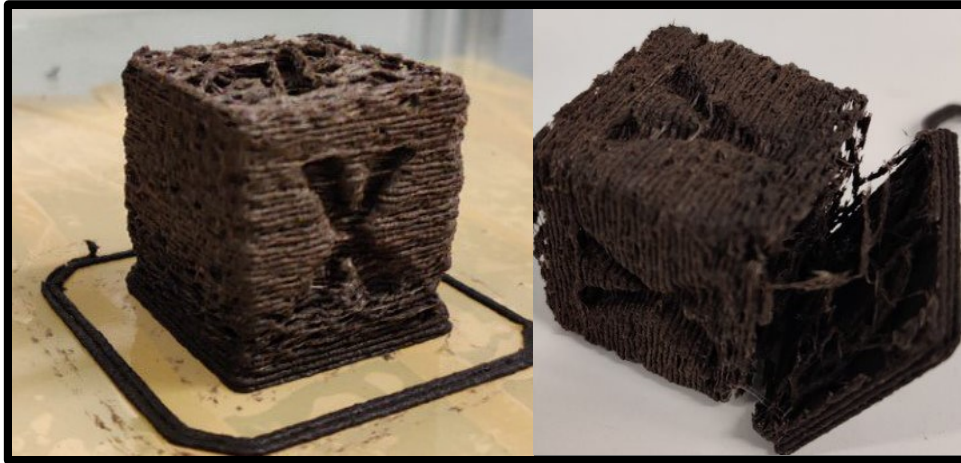
Myös RPP30-materiaalin tulostumisessa oli alkuun monia hankaluuksia. Komposiittimateriaali ei virrannut tasaisesti tulostimen ekstruuderissa ja paloi lämpötilan noustessa liian korkeaksi. Sopivaa tulostuslämpötilaa lähdettiin määrittämään testaamalla materiaalin virtausta. Tämä tehtiin lämmittämällä ekstruuderin ensin 210 °C:seen ja pyörittämällä laitteen ruuvia laitteen siihen tarkoitetun toiminnon kautta. Tämän jälkeen sama toistettiin 10 °C:n välein. Lämpötilan ollessa 210 °C tulostimen suuttimesta tuleva materiaali oli melko vaalean ruskeaa, mutta materiaalia tuli hyvin pieni määrä. Lämpötiloissa 220–230 °C alkoi materiaalissa näkymään palamisen merkkejä, pinnasta näkyi virtausvirheitä ja materiaalin väri alkoi tummenemaan. Kun lämpötilaa nostettiin 240 °C:seen materiaali oli jo tumma ja selvästi oli tapahtunut palamista.

Sopivaksi tulostuslämpötilaksi tässä vaiheessa valikoitui 230 °C, jossa materiaali virtasi parhaiten, mutta palaminen oli vähäistä. Testauksen perusteella 240 °C on selvästi liikaa komposiitille ainakin näin korkealla kuitupitoisuudella, ja alemmissä lämpötiloissa materiaali virtasi hyvin heikosti. Materiaalin virtaamisen varmistamiseksi tulostimen asetuksista säädettiin virtaus 200 %:iin. Ensimmäisissä tulostustesteissä yritettiin käyttää tulostimien virtausasetuksien sijaan Simplify3D-ohjelmiston omaa virtauskerrointa, mutta

tämä säätö vaikutti tehottomalta tässä vaiheessa. Materiaalin jäähdyttämistä varten tuulettimien teho asetettiin 25 %:iin.

Halkaisijaltaan eri suuruisia suuttimia kokeiltiin, jotta löydettäisiin sopiva suuttimen koko käytettäväksi tulostustesteissä. Tulostimessa käytössä olevista suuttimista lähdettiin liikkeelle isoimmasta ja kokeiltiin suutin kerrallaan, miten materiaali kulkee suuttimen läpi. Materiaali jäi jumiin 1 mm:n suuttimeen, joten tämän pienempien suuttimien testaamisesta luovuttiin. Pienin suutin, josta materiaali tuli tasaisesti läpi, oli 1,5 mm:n suutin. Suuttimista suurin eli 3 mm:n suutin vaati täyttyäkseen enemmän materiaalia ja testauksen perusteella tulostimen maksimi 200 %:n virtausasetus ei riittänyt täyttämään suutinta kokonaan. Tämä saattaisi vaikuttaa suoraan tulostuksen laatuun jatkossa. Suutinten testaamisen jälkeen päädyttiin valitsemaan 2 mm:n suutin, joka osoittautui suuttimista vaikaimmaksi ja sopivimmaksi käytettävänä olleen mallin perusteella.

Vaikka materiaali virtasi ja osa kerroksista onnistui hyvin, oli materiaalin virtaus erittäin epätasaista. Kerroksia jäi tulostumatta tulostuksen eri vaiheissa ja materiaali tummeni huomattavasti. Positiivisena huomiona oli, että kappale ei vääntynyt jäähtyessään. PP:n ominaisuus vääntyä on olettavasti vähentynyt kuidun ansiosta. Kuvassa 10 on kyseinen kappale tulostettuna ja tulostuspedistä irrotettuna. Huomaa kappaleen reunoista puuttuvien kerroksien kohdalla olevat syvänteet ja aukot. Samasta syystä myös kerroksien välinen kiinnittyvyys oli paikoin heikkoa, mikä johti pohjakerroksen irtoamiseen, kun kappale irrotettiin tulostuspedistä. Tummosta väristä ja materiaalin rakenteesta on havaittavissa materiaalin palamisen merkkejä. Epäilyksenä on, että joko granulaattien kokojakauma tai korkea kuitupitoisuus haittasi materiaalin sulamista ja virtausta.



Kuva 10. Tulostettu kappale (RPP30).

### 6.3.2 Kuitupitoisuuden laskeminen sekoittamalla ja tulostusparametrien säätäminen

Seuraavaksi lähdettiin testaamaan kuitupitoisuuden vaikutusta laskemalla komposiitin kuitupitoisuutta. Kuitupitoisuuden laskeminen tehtiin käytännössä niin, että komposiittigranulaattia sekoitettiin ensiö-PP:n kanssa eri massasuhteilla ja seosta syötettiin raaka-aineena tulostimeen. Muovina käytettiin ensiö-PP:tä (PPH 9040), joka on ominaisuuksiltaan mahdollisimman lähellä CircoPP:tä. Fortum CircoPP:n sulaindeksi on 20 g/10min (230 °C/2,16 kg) ja PPH9040:n sulaindeksi arvo on 25 g/10min. Tämä tarkoittaa käytännössä, että materiaalien sulavirtausominaisuudet ovat lähellä toisiaan. Seoksien laskennalliset kuitupitoisuudet ja niiden sekoitussuhteet näkyvät taulukosta 7.

Taulukko 7. Seoksien laskennalliset kuitupitoisuudet ja materiaalien sekoitussuhteet.

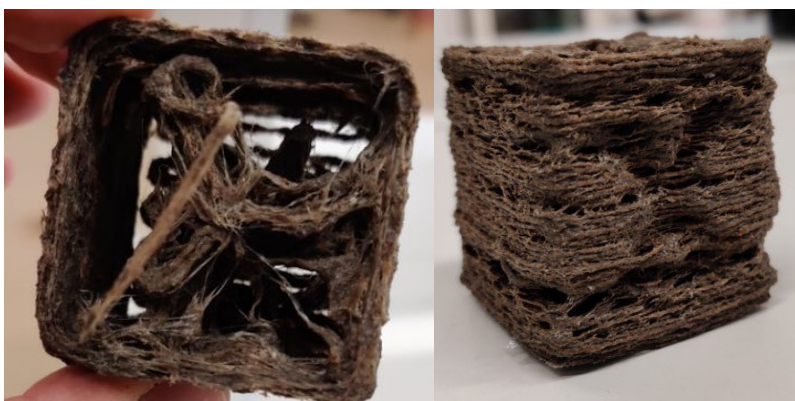
Laskennallinen kuitupitoisuus (%)	RPP30	PPH 9040
15	1:2	1:2
10	1:3	2:3
5	1:6	5:6

Seostetut granulaatit sekoittuivat ruuvissa ja seos virtasi suuttimesta edellisiä tulostuksia paremmin. Tämän ansiosta seuraavaksi oli mahdollista määrittää paremmin optimaalisia tulostusparametreja. Lähdettiin tulostamaan seuraavilla parametreilla (taulukko 8).

Taulukko 8. Tulostusparametrit (seos, jossa kuitupitoisuus 15 %)

Parametri	Arvo	Yksikkö
Suuttimen koko	2	mm
Malli	Testikuutio 40 x 40 x 40	mm x mm x mm
Tulostuskorkeus	1	mm
Suuttimen lämpötila	230	°C
Tulostuspedin lämpötila	100	°C
Tulostusnopeus	45	mm/s
Ulkokehän nopeus	60	%
Täytön tulostuksen nopeus	60	%

Tulostusjälki 15 %:n sekoituksen kohdalla oli huonolaatuista. Kappaleesta huomasi jälleen, että tulostuksen aikana oli jäänyt kokonaisia kerroksia tulostumatta. Lisäksi sisäpuolen täyttö oli jäänyt vajaaksi ja pinta rosoiseksi, kuten kuvasta 11 näkyy.



Kuva 11. Tulostettu kappale (seos, jossa kuitupitoisuus 15 %).

Materiaalisekoituksella, jonka kuitupitoisuus on 15 %, testattiin tulostaa muutamaan kertaan, mutta laatu ei parantunut. Näiden testitulostuksien aikana kuitenkin säädettiin muutamia parametria, joilla vaikutti olevan positiivisia vaikutuksia. Testien perusteella päätettiin alentaa muun muassa tulostusnopeutta ja kerroskorkeutta tulostuksen laadun parantamiseksi. Nopeuden alentaminen antoi materiaalille aikaa virrata ja kiinnittyä kerrokseen, ilman että materiaaliin kohdistui venyttävää voimaa. Kerros- eli tulostuskorkeuden laskulla vaikutti olevan positiivista vaikutusta kerroksien laatuun. Parametrit tehtyjen muutoksien jälkeen taulukossa 9. Lisäksi tässä vaiheessa poistettiin jäähdytys koko kappaleen osalta. Tämän tavoitteena oli parantaa kerroksien välistä kiinnittymistä, kun materiaali oli mahdollisimman lämmintä kiinnittymisen hetkellä.

Taulukko 9. Päivitetyt tulostusparametrit.

Parametri	Arvo	Yksikkö
Suuttimen koko	2	mm
Malli	Testikuutio 40 x 40 x 40	mm x mm x mm
Tulostuskorkeus	0,6	mm
Suuttimen lämpötila	230	°C
Tulostuspedin lämpötila	100	°C
Tulostusnopeus	25	mm/s
Ulkokehän nopeus	60	%
Täytön tulostuksen nopeus	60	%

Seuraavaksi tulostettiin materiaaliseosta, jonka kuitupitoisuus oli 10 %. Tulostuksessa käytettiin taulukon 9 mukaisia parametrejä. Tulostusjälki oli huomattavasti aiempaa parempaa. Täyttö onnistui asetetun kuvion mukaisesti ja itse tulostuksen aikana ei ilmennyt ongelmia. Pohjakerrokset alkoivat kuitenkin vääntyä edellisiä tulostuksia enemmän. Tämä johtuu oletettavasti siitä, että muovin osuus materiaalissa oli huomattavasti alku-peräistä suurempi, mikä nostaa esille PP:n ominaisuuksia. Kuvassa 12 näkyy tulostettu kappale.



Kuva 12. Tulostettu kappale (seos, jonka kuitupitoisuus 10 %).

Tässä vaiheessa vaihdettiin seuraavia testejä varten tulostusmallia XYZ-kuutiosta onttoon kuutioon. Tavoitteena oli testata materiaalin virtauksen tasaisuutta mittaamalla tulostettavien kappaleiden seinämäpaksuuden vaihtelua. Tähän tarkoitukseen oli sopivin ontto kuutio ilman täyttöä, kuviointia ja päällisiä kerroksia.

Kappaleen seinämäpaksuus määräytyy tulostusleveyden kautta, joka taas määräytyy käytettävän suuttimen mukaan. Ohjelma määrittää automaattisesti sopivan tulostusleveyden suuttimen halkaisijan mukaan. Käytössä olleen suuttimen (2 mm) kanssa ohjelma määrittä tulostusleveydeksi 2,4 mm. Lisäksi virtausasetus oli edelleen asetettuna 200 %:iin, joka käytännössä kaksinkertaisti materiaalin käytön perusasetuksiin nähden.

Tulostetun kappaleen seinämäpaksuus oli 2,1 mm–2,3 mm, eli pientä heittoa oli asetettuun 2,4 mm:n arvoon. Kappale ei kuitenkaan ollut tasalaatuinen, vaan reunojen paksuus vaihteli niin kerroksien kuin eri sivujenkin välillä.

Seuraavaksi testattiin vielä kuitupitoisuudeltaan 5 %:n seos. Tätä tulostettiin suoraan edellisen tulostuksen mukaisilla parametreilla. Heti ensimmäisenä tämän materiaalisekoituksen kohdalla huomasi, että vääntymistä oli huomattavasti enemmän. Tämä vääristi kappaleen pohjan kulmia kappaleen jäähtyessä. Muuten materiaali virtasi jo huomattavasti paremmin. Tämä oli havaittavissa seinämäpaksuuksien kasvusta kappaleessa verrattuna 10 %:lla seoksella tulostettuihin kappaleisiin. Kuitupitoisuuden laskulla oli selvä vaikutus virtauksen sujuvuuteen. Kappaleessa seinämäpaksuudet vaihtelivat 3–4 mm välillä. Seinämäpaksuuksien perusteella materiaalin virtaus oli liiankin

voimakasta. Tämän vuoksi seuraavaksi laskettiin 200 %:n virtausasetus 100 %:iin ja tulostettiin kappale uudelleen. Tällöin paksuudet tasaantuivat ja seinämäpaksuus oli 1,9–2,0 mm.

Seuraavissa tulostuksissa otettiin virtausasetuksen sijaan käyttöön tulostusohjelmisto Simplify3D:stä löytyvä virtauskerrointoiminto (extrusion multiplier). Toiminnon pitäisi ajaa sama asia kuin tulostimessa virtausasetukset, mutta erona on, että säädön pystyy tekemään suoraan mallin G-tiedostoon. Tämä toiminto ei vaikuttanut toimivan ensimmäisten testitulostuksien aikana. Oletettavasti alkuun testatun kuitupitoisuudeltaan 30 %:n materiaalin virtaus oli niin heikkoa ja epätasaista, että virtauskerroinasetuksen merkitys jäi materiaalin virtausvaihtelun merkitsevyyttä vähäisemmäksi. Virtauskerroimen toiminta varmistettiin vielä kokeilemalla kaksinkertaista virtauskerrointa 5 %:lla seoksella. Tuloksena saatiin kappale, jonka seinämäpaksuudet olivat 3–4 mm, eli tuloste vastasi aiemmin tulostimen 200 %:n virtausasetuksella tulostettua kappaletta.

### 6.3.3 Materiaalin virtaaminen tulostettaessa (seos, jossa kuitupitoisuus 10 %)

Koska materiaali oli virrannut epätasaisesti, testattiin seuraavaksi 10 %:sen seoksen tulostamista ensin eri virtauskerroimen asetuksilla ja lopuksi rinnakkaisnäytteillä. Tällä kertaa seinämäpaksuuden sijaan mitattiin kappaleen massa eli kuinka paljon materiaalia tulostin oli käyttänyt kappaleen tekemiseen. Taulukossa 10 näkyy käytetyt virtauskerroinasetukset ja tulostettujen kappaleiden massat.

Taulukko 10. Materiaalin virtaustesti (seos, jossa kuitupitoisuus 10 %).

Tulos- tuskerta	Virtausker- roin	Massa (g)	Huomioita
1.	2,50	10,7	
2.	2,00	-	Ei tulostunut (liian pieni virtauskerroin)
3.	2,40	6,4	
4.	2,45	7,3	Hieman epätasainen, kerroksia jäänyt tulostumatta
5.	2,48	7,5	
6.	2,50	6,5	Rinnakkaisnäyte



7.	2,50	6,8	Rinnakkaisnäyte
----	------	-----	-----------------

Taulukon 10 tuloksista on huomattavissa tulostuksen epätasaisuus. Materiaalia virtasi ensimmäisessä tulostuksessa huomattavasti rinnakkaisnäytteitä (tulostukset 6 ja 7) enemmän, ja virtauskerroin ei korreloinut materiaalin massan kanssa. Epäilyksenä on, että materiaalin virtausvaihtelut johtuivat granulaatin koon vaihteluista, joka on aiheuttanut häiriöitä materiaalin syöttöön ja sitä kautta virtaukseen ruuvissa. Materiaalin virratessa tulostimeen eri kokoiset granulaatit syöttyvät epätasaisesti. Tämän vuoksi myös virtaus suuttimella vaihtelee. Lisäksi satunnaiset suuremmat granulaatit voivat hetkittäin jopa estää materiaalin kulkua. Tämä selittäisi sen, että ensimmäinen tulostus poikkesi niin paljon peräkkäisistä tulostuksista, jotka tehtiin neljän onnistuneen tulostuksen jälkeen täysin samoilla asetuksilla. Tätä oletusta testattiin myöhemmin tasalaatuisemmalla granulaatilla.

Tehtyjen testitulostuksien perusteella materiaalille pystyttiin määrittämään yleispätevät tulostusasetukset, jotka sopivat käytettäväksi lisäävässä valmistuksessa 2 mm suuttimella. Samoja parametrejä hyödynnetään myös jatkossa.

#### 6.4 Ekstruuderilla prosessoidun granulaatin käyttö isosuutintulostimessa

Ekstruuderin case-tutkimuksen aikana tuotettiin RPP30-komposiitista kuitupitoisuudeltaan matalampia ja granulaattikooltaan pienempiä eriä. Toisin kuin aikaisemmin isosuutintulostimen testeissä, tällä kertaa materiaalin kuitupitoisuuden laskemiseen käytettiin ensiö-PP:n sijaan CircoPP:tä, jota on käytetty kyseisen komposiitin valmistuksessa. Tavoitteena oli pitää hiilijalanjälki mahdollisimman matalana käyttämällä uusiomuovia.

Materiaalista valmistettiin useampi erä RPP10:tä ja lisäksi erät RPP15:ta ja RPP5:tä. RPP10-erät poikkeavat toisistaan sekoitustavoiltaan. Nämä erilaiset RPP10 erät sekä erikseen sekoitettu erä toimivat vertailuerinä RPP10:n testaamisessa isosuutintulostimella. Lisäksi RPP10:llä suoritettiin tulostuslämpötilaan liittyviä testejä, joiden tavoitteena oli testata komposiitin tulostamista matalammissa lämpötiloissa. Lopuksi tulostamisen testausta jatkettiin RPP15:lla ja RPP5:lla.

#### 6.4.1 Seostustapojen vaikutus virtaamiseen RPP10:llä

Komposiittimateriaalia, jonka kuitupitoisuus oli 10 %, valmistettiin useampi erä ja jokainen erä leikattiin granulaatiksi. Nämä erilaiset erät poikkesivat toisistaan sekoitustavaltaan. Ensimmäiset erät valmistettiin punnitsemalla ja sekoittamalla materiaalit ennen ekstruuderia ja myöhemmät erät käyttämällä useampaa syöttöyksikköä ja ajamalla materiaaleja ekstruuderiiin kalibroiduilla syöttönopeuksilla. Lisäksi prosessointikertojen vaikutuksen tutkimista varten yhdestä erästä osa ajettiin kahteen kertaan ekstruuderin läpi. Granulaattikoko vaihteli hieman sekoitettujen ja syöttösuhteilla ajetun erien välillä, koska ekstruuderilla tuotetun filamentin halkaisija vaihteli. Filamentin halkaisija vaikutti suoraan leikatun granulaatin halkaisijaan, mutta pituus pysyi vakiona, kun leikkurissa pidettiin vakionopeus. Taulukossa 11 on listattuna isosuutintulostimelle testaukseen otetut materiaalit. Seuraavissa testeissä on mukana sekoitettu erä 10 %:sta materiaalista.

Taulukko 11. Ekstruuderilla prosessoidut erät ja granulaattikoot (kuitupitoisuus 10 %).

Erä	Materiaali	Koko	
		Halkaisija (mm)	Pituus (mm)
1	RPP10 kerran prosessoitu (punnittu)	≤ 2	≤ 2,7
2	RPP10 kahdesti prosessoitu	≤ 2	≤ 2,7
3	RPP10 syöttösuhteilla valmistettu	≤ 3	≤ 2,7
0	10 %:nen seos: 2/3 CircoPP ja 1/3 RPP30	CircoPP: ≤ 4 RPP30: ≤ 4	CircoPP: ≤ 3 RPP30: ≤ 5

Ensimmäisenä tulostimeen syötettiin erän 0 seosta. Tulostusparametrit taulukossa 12. Tulostusnopeutena käytettiin 20 mm/s.

Taulukko 12. Tulostusparametrit (erä 0).

Parametri	Arvo	Yksikkö
-----------	------	---------

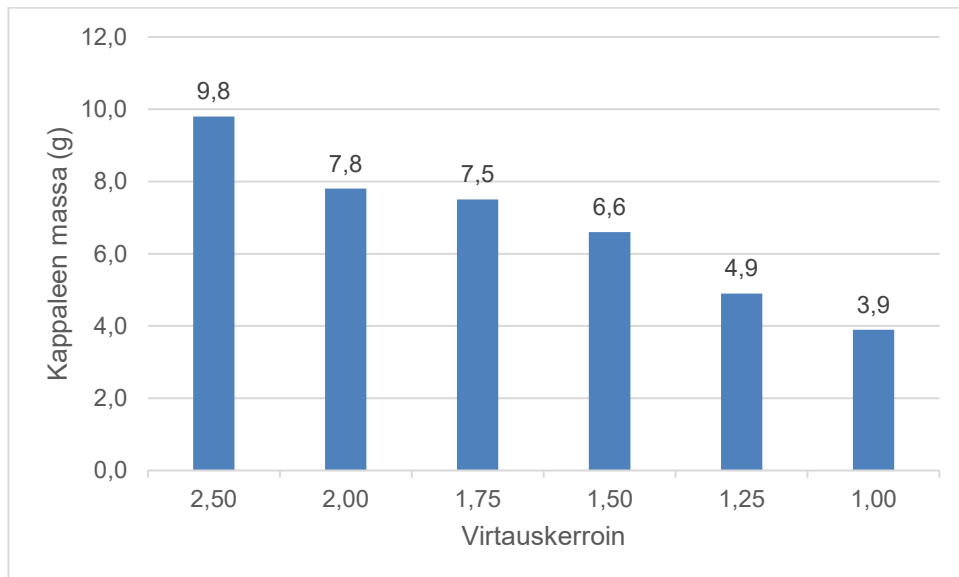
Suuttimen koko	2	mm
Virtauskerroin	2,5	kerroin
Malli	Testikuutio 40 x 40 x 40	mm x mm x mm
Tulostuskorkeus	0,6	mm
Suuttimen lämpötilä	230	°C
Tulostuspedin lämpötilä	100	°C
Tulostusnopeus	20	mm/s
Ulkokehän nopeus	60	%
Täytön tulostuksen nopeus	60	%

Ensimmäinen tulostus alkoi hyvin, mutta puolivälissä tulostusta syöttö alkoi jumittua. Tämän vuoksi tulostus keskeytettiin ja ruuvia pyöritettiin, kunnes materiaalia tuli taas tasaisesti suuttimesta. Seuraavassa tulostuksessa selvitettiin materiaalin virtausominaisuuksia uudella tavalla. Tällä kertaa tulostettiin samalla ohjelmalla kolme kappaletta vierekkäin. Tulostimen asetukset asetettiin niin, että tulostin muodostaa jokaisen kappaleen kerrokset peräjälkeen. Tarkoituksena oli hyödyntää useamman kappaleen tulostusta ja testata virtauksen tasaisuutta kappaleiden kerroksien muodostuksessa. Näin tehdessä mahdolliset virtausongelmat korostuvat jokaisen kolmen kappaleen samaan kerrokseen. Kuvasta 13 on havaittavissa, että pohjakerroksissa materiaali on virrannut selvästi paremmin, keskivaiheen jälkeen heikommin ja taas loppua kohden paremmin. Tämän perusteella voitiin päätellä, että materiaalin virtaus ruuvissa ei ole tasaista tulostuksen aikana.



Kuva 13. Tulostetut kappaleet (erä 4).

Seuraavaksi tulostettiin erän 1 granulaatilla. Granulaatti siivilöitiin mahdollisten pitkiksi jääneiden granulaattien poistamiseksi, ja näin varmistettiin mahdollisimman tasainen syöttö. Ensimmäinen tulostus tehtiin samoilla taulukon 12 mukaisilla parametreillä ja tulokseksi saatiin paksureunainen, mutta tasainen kappale. Kappaleessa seinämäpaksuudet olivat 3,6–3,8 mm ja massa oli 9,8 g. Erän 1 tulosteiden seinämäpaksuudet ylittivät asetetun tulostusleveyden arvon (2,4 mm). Tämä kertoi materiaalin virtaavan paremmin tulostimessa ja aiheuttaneen jopa liikasyöttöä käytetyillä virtauskerroinasetuksilla (2,5). Seuraavaan tulostukseen alennettiin virtauskerrointa. Virtauskerroin laskettiin arvosta 2,5:stä 2,0:aan. Tuloksena saatiin kappale, jonka seinämäpaksuudet olivat 2,6–3,0 mm ja joka painoi 7,8 g. Tämän jälkeen kokeiltiin tulostukset vielä virtauskerroimilla 1,75, 1,25 ja 1,00. Erän 1 tulostettujen kappaleiden punnitustulokset kuviossa 2.



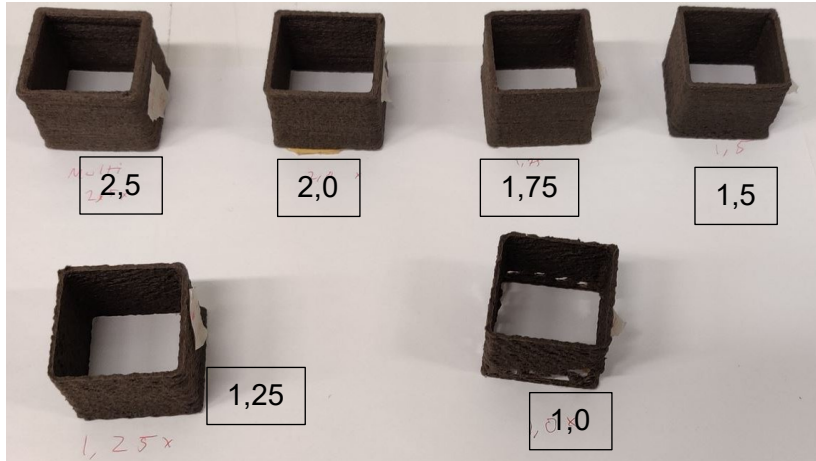
Kuvio 2 Eri virtauskerroimilla tulostettujen kappaleiden massat (erä 1).

Taulukossa 13 on tulostettujen kappaleiden mitatut seinämäpaksuuksien minimi- ja maksimiarvot kappaleiden eri sivuista. Virtauskerroimella 1,00 tulostetun kappaleen seinämät olivat liian ohuita mitattavaksi, joten ne puuttuvat taulukosta.

Taulukko 13. Virtauskertoimen vaikutus kappaleiden seinämäpaksuuksiin (erä 1).

Tulostus- kerta	Virtaus- kerroin	Seinämäpaksuudet (mm)	
		Minimi	Maksimi
1	2,50	3,6	3,8
2	2,00	2,6	3,0
3	1,75	2,4	2,8
4	1,50	2,3	2,5
5	1,00	-	-
6	1,25	1,9	2,0

Ekstruuderilla prosessoitua granulaattia voidaan tulostaa alhaisemmalla virtauskertoimella kuin erän 0 seosta, mutta virtauskertoimet 1,00 ja 1,25 olivat liian matalia. Virtauskertoimella 1,00 kappaleeseen jäi useita aukkoja ja syöttö oli selvästi liian vähäistä. Virtauskertoimella 1,25 kappale tulostui, mutta vajaana jättäen aukkoja seinämiin. Erän 1 granulaattien paremman virtaamisen huomaa, kun vertaa tuloksia erän 0 (seos) tulostuksiin. Erän 0 tulostukset eivät onnistuneet virtauskertoimella 2,00 eikä sitä alhaisemmillä virtauskertoimilla. Erän 1 tulostuksissa onnistuttiin tulostamaan eheä kappale jopa 1,50 virtauskertoimella. Kuvassa 14 esitellään eri virtauskertoimilla tulostetut erän 1 kappaleet.



Kuva 14. Eri virtauskertoimilla tulostetut kappaleet (erä 1).

Seuraavaksi testattiin tulostamista erän 2 ja 3 granulaateilla. Myös näiden erien granulaatit siivilöitiin ennen tulostimeen syöttöä. Tulostukset tehtiin virtauskertoimilla 2,00, 1,75, 1,50 ja 1,25. Tulostumisen suhteen erien välillä ei ollut eroa, kun verrattiin erän 1 tulostuksiin. Vaatisi tarkempia tutkimuksia, että selviäisi, onko useampi prosessointikerta tai erilainen materiaalien syöttötapa ekstruusioprosessissa vaikuttanut materiaalin kestävyteen tai rakenteeseen. Kuitenkaan mitään silmännähdessä tai käsin tunnuksella huomattavaa eroa ei ollut havaittavissa.

#### 6.4.2 Tulostuslämpötilan vaikutus tulosteen laatuun RPP10:llä

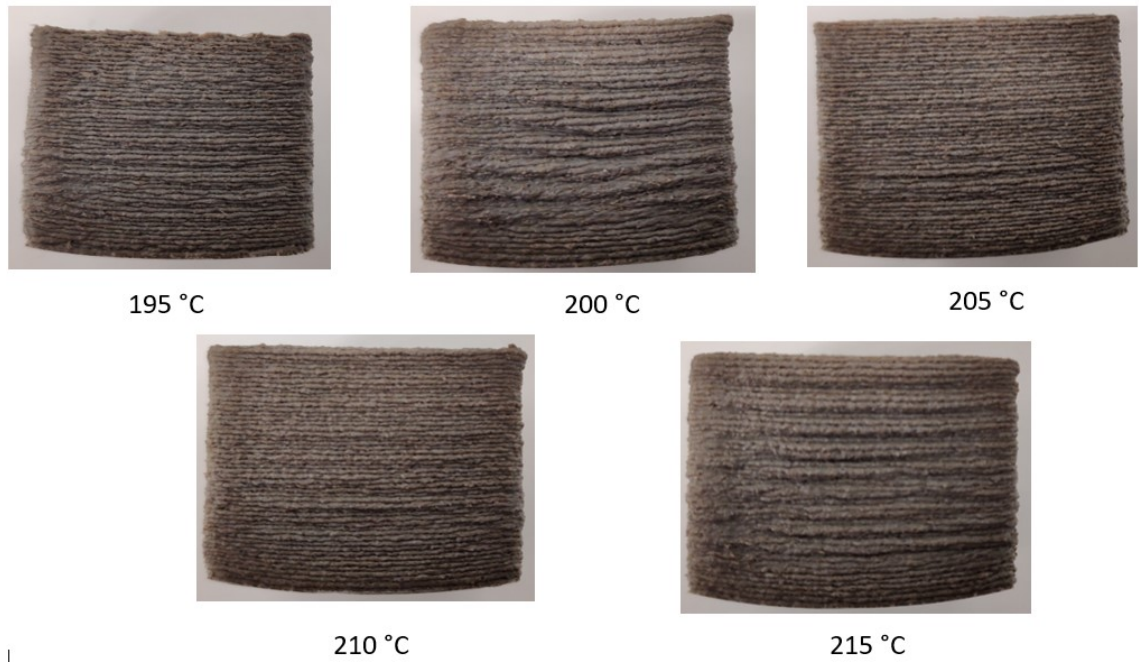
Ekstruusiolla prosessoidun materiaalin virratessa tasaisemmin tulostimessa päätettiin kokeilla alhaisempia tulostuslämpötiloja. Lämpötilatesti suoritettiin tulostamalla 5 kappaletta pohjallisia mallikuutiota eri lämpötiloilla. Tarkoituksena oli vertailla materiaalin virtaamisen lisäksi sen tummentumista eri lämpötiloissa. Parametrit tulostetuille kappaleille Taulukossa 14.

Taulukko 14. Tulostusparametrit lämpötilatestissä RPP10:llä.

Parametri	Arvo	Yksikkö
Suuttimen koko	2	mm

Virtauskerroin	2,5	kerroin
Malli	Testikuutio 40 x 40 x 40	mm x mm x mm
Tulostuskorkeus	0,6	mm
Suuttimen lämpötila	Malli 1: 195 Malli 2: 200 Malli 3: 205 Malli 4: 210 Malli 5: 215	°C
Tulostusnopeus	20	mm/s
Ulkokehän nopeus	60	%
Täytön tulostuksen nopeus	60	%

Kuvassa 15 on tulostetut kappaleet. Tulosteista on havaittavissa eroja sekä sävyssä että seinämän tasaisuudessa. Kaikista tasaisin seinämä oli 210 °C:ssa tulostetussa kappaleessa ja väri tummeni tulostaessa 215 °C:ssa. Joka tapauksessa itse tulostumisessa ei esiintynyt ongelmia, vaan kaikki kappaleet tulostuivat kokonaisina myös alhaisemmassa lämpötilassa.

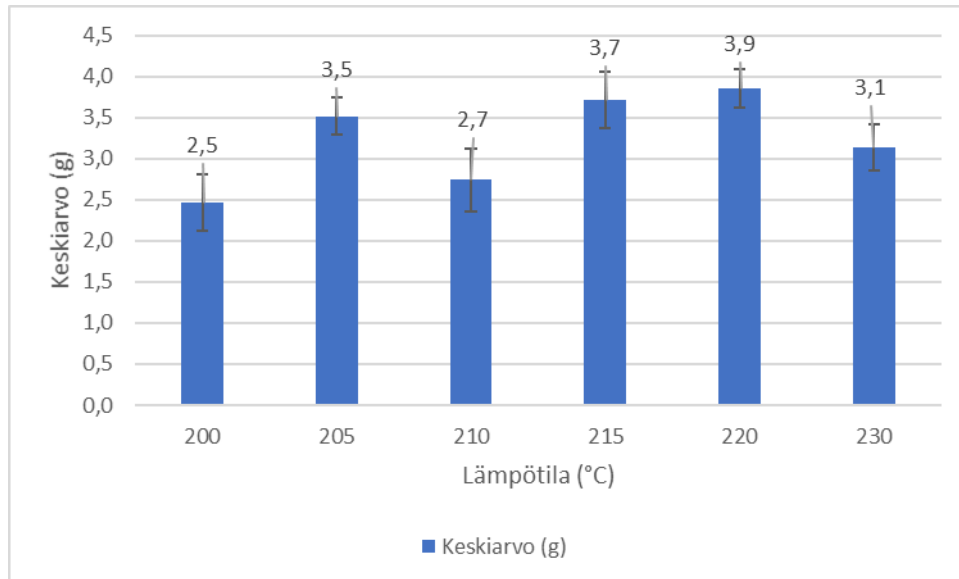


Kuva 15. Lämpötilatestauksen tulostetut kappaleet (RPP10).

#### 6.4.3 Lämpötilan vaikutus materiaalin virtaavuuteen RPP10:llä

Seuraavassa lämpötilatestissä tarkoituksena oli pääasiassa testata materiaalin virtausta aiempaa testiä laajemmalla lämpötila-alueella. Materiaalia valutettiin tulostimen toiminnolla, joka pyörittää ruuvia vakionopeudella ja vakioajan verran. Valutetun materiaalin määrä määritettiin punnitsemalla. Tulokset kuudella eri lämpötilalla kuviossa 3.





Kuvio 3 Materiaalin virtaus eri lämpötiloissa (RPP10).

Tuloksista on havaittavissa materiaalin virtausvaihtelut. Samalla lämpötilalla tulostettujen näytteiden virtauksessa esiintyi hajontaa. Tämä kertoo siitä, että materiaali ei edelleenkään virrannut täysin vakiona tulostimen läpi, vaikka aikaisemmin RPP10:llä tulostettujen kappaleiden laatu oli parempi verrattuna seostuksella tulostettuihin kappaleisiin. Testin aikana tehtiin myös mielenkiintoinen havainto. Materiaalia on tulostuksen aikana yleensä aikaisemmin valunut suuttimesta, kun ruuvi on pysähtynyt. Testin aikana huomattiin, että tämä valuminen alkoi 220 °C:n tulostuslämpötilassa ja 230 °C:ssa valuminen oli selvästi voimakkaampaa. Sitä alemmissä lämmöissä valumista esiintyi huomattavasti vähemmän kuin aikaisemmin. Valumisen loppuminen tai ainakin sen vähentyminen olisi siis yksi positiivista vaikutuksista mitä tulisi, jos materiaali voisi tulostaa alemmalla lämmöllä.

#### 6.4.4 RPP15:n ja RPP5:n tulostettavuus

Seuraavaksi testattiin ekstruuderilla valmistettuja eriä, joissa kuitupitoisuudet olivat 15 % (RPP15) ja 5 % (RPP5). Tulostuksissa käytettiin taulukon 16 mukaisia parametreja ja ainoastaan virtauskerrointa muutettiin sen mukaan, kuinka eheinä kappaleet tulostuivat.

Taulukko 15. Tulostusparametrit (RPP15 ja RPP5).

Parametri	Arvo	Yksikkö
Suuttimen koko	2	mm
Virtauskerroin	1,5–2,5	kerroin
Malli	Testikuutio 40 x 40 x 40	mm x mm x mm
Tulostuskorkeus	0,6	mm
Suuttimen lämpötila	210	°C
Tulostusnopeus	20	mm/s
Ulkokehän nopeus	60	%
Täytön tulostuksen nopeus	60	%

Ensimmäisenä tulostettiin RPP15:ttä. Materiaalia tulostettiin virtauskertoimilla 2,0, 2,1 ja 2,2. Jokaisella virtauskertoimella tulostettiin kaksi rinnakkaista kappaletta. Kappaleet tulostuivat suhteellisen hyvin ottaen huomioon 15 %:n kuitupitoisuuden, mutta jostain syystä kappaleen pohjat jäivät hyvin hauraiksi. Käytännössä kappaleiden pohjat irtosivat, kun kappaleen irrotti tulostusalustasta. Lisäksi kappaleissa oli havaittavissa virtauksen vajavaisuutta. Tulosteille ei ollut tarkoituksenmukaista tehdä massojen vertailua, koska osasta kappaleista irronnut pohjaosa olisi vääristänyt tuloksia.

Alhaisemman kuitupitoisuuden RPP5:lla tulostaminen aloitettiin virtauskertoimella 2,0 ja taulukon 15 mukaisilla tulostusparametreillä. Tulostusjälki oli melko paksua, minkä vuoksi seuraavat kappaleet tulostettiin alemmilla virtauskertoimilla 1,75 ja 1,50. Myös RPP5:stä tulostettiin kullakin virtauskertoimen asetuksella 2 rinnakkaisnäytettä. Taulukossa 16 on listattuna RPP5:lla tulostettujen kappaleiden massat.

Taulukko 16. Tulostettujen kappaleiden massat RPP5:lla.

Virtauskerroin	Massa (g)		Ero (g)
	Kappale 1	Kappale 2	
2	14,3	13,7	0,6

1,75	11,7	12,0	0,3
1,5	10,4	10,5	0,1

Kuten tuloksista on nähtävissä, oli tämän erän tulosteet tähän mennessä tasaisimmat, kun vertailtiin samalla virtauskertoimella tulostettujen rinnakkaisten kappaleiden määriä. Kappaleet tulostuivat eheämpinä, kuin RPP15:ttä tulostaessa, mikä kertoo materiaalin virtaavan tulostimessa paremmin. Materiaalissa oli muovin suhteellisen määrän kasvun takia jälleen havaittavissa PP:lle ominaista voimakasta vääntymistä jäähtymisen yhteydessä. Vääntyminen vaikuttaa lähinnä kappaleen pohjakerrokseen taivuttaen kappaleen kulmia. Jatkossa tämä voisi olla ongelmallinen ominaisuus, jos vääntymisen seurauksena kappale irtoaa esimerkiksi tulostusalustasta.

## 7 TULOKSET JA POHDINTA

Työssä tavoitteena oli tutkia uusiomuovista ja hammppukuidusta valmistetun luonnonkuitukomposiittimateriaalin prosessoitavuutta ja tätä kautta edistää käyttökohteiden löytymistä materiaalille. Prosessoitavuuden tutkiminen oli hyvin käytännönläheistä ja suoritettiin prosessoimalla materiaalia ekstruuderilla ja isosuutintulostimella, jatkuvasti kuitenkin analyttisesti arvioiden materiaalin ominaisuuksia ja käyttäytymistä.

Opinnäytetyöhön kuului myös ekstruusiolinjan uusien lisälaitteiden koeajot ja käyttöönotto. Uudet lisälaitteet olivat kriittisiä työssä tutkittavan komposiitin näkökulmasta. Uusien laitteiden ansiosta kosteudelle herkkää luonnonkuitukomposiittia pystyttiin prosessoimaan altistamatta sitä vedelle. Samalla ekstruusioprosessiin lisätyt veto- ja kelauslaite mahdollistivat järjestelmällisemmän filamentin vetämisen ja keräämisen.

### 7.1 Ekstruuderin uudet laitteet

Uusien laitteiden käyttöönotossa tai koeajojen aikana ei tullut esille mitään isoja ongelmia laitteiden tulevaa käyttöä koskien ja laitteet saatiin otettua onnistuneesti käyttöön. Ilmajäähdytysyksikkö osoittautui testien perusteella toimivaksi vaihtoehdoksi vesijäähdytykselle, kunhan käytössä huomioidaan heikompi jäähdytysteho. Kuten voitiin olettaa, ilmajäähdytyksen jäähdytysteho ei vastannut vesijäähdytyksen tasoa. Käytännössä materiaali jäähdyi riittävästi mentyään jäähdyttimen läpi, mutta pysyi lämpimänä selvästi vesijäähdytystä pidempään. Ilmajäähdytyksen hitaampi toiminta aiheutti käytännön hankaluutta ajoissa. Materiaalifilamentin pysyessä lämpimänä pidempään siihen syntyi helpommin mutkia. Esimerkiksi silloin, kun filamentti ei päässyt kulkemaan vapaasti jäähdyttimen jälkeen. Tämä tulee ottaa huomioon materiaalifilamenttien hallinnassa jäähdyttimen jälkeen ja vetokoneelle asetettaessa. Vetokoneen jälkeen filamenttia voi käsitellä vapaammin, koska siinä vaiheessa linjastoa filamentti on asettunut muotoonsa ja jäähdytynyt. Filamentin epämuodostumisen voisi mahdollisesti estää lisäämällä jonkinlaiset urat filamentteille jäähdyttimen kuljetinhihnaan, jotka voisivat estää filamenttien sivuttaisliikkeen täysin. Muutaman kerran koeajoissa filamentit ajautuivat lämpimänä yhteen, mutta tämä ongelma poistui lähes täysin, kun jäähdytin sijoitettiin uudelleen lähemmäs ekstruuderin suutinta. Yhteensulautumista tapahtui tämän jälkeen vain satunnaisesti mutkien muodostumisen yhteydessä. Mainitut urat kuljetinhihnessa voisi poistaa

tämänkin ongelman. Urien suunnittelussa tulisi kuitenkin ottaa huomioon, että ne eivät saisi muovata filamenttien pyöreää muotoa. Vaihtoehtoisesti jäähdyttimen lopussa voisi olla omat pienemmät vetorullat, joihin filamentit ajautuisivat tullessaan jäähdyttimen läpi, ja jotka tukisivat filamentteja.

Vetokone toimi tuplafilamentin kanssa, kunhan materiaalin sai suorana asetettua koneeseen. Koeajoissa vetorullien muovisuoja osoittautui liian isokokoiseksi ja siinä oleva aukko filamentille kapeaksi. Tämä hankaloitti filamentin asettamista vetorullien väliin. Ongelmaa syntyi etenkin silloin, kun filamentteihin muodostui mutkia. Nämä mutkat jäivät helposti jumiin vetorullien suojamuoviin aiheuttaen lisää mutkia filamenttiin. Muuten vetokoneella nopeuden säätö oli helppoa, ja laitteella oli hyvä kokeilla materiaalin vetolujuuden rajoja filamentin katkeamispisteeseen.

Kelauslaite teki filamentin hallinnasta huomattavasti käytännöllisempää entiseen kokoonpanoon verraten. Käytännössä aikaisemmin, jos halusi ajaa materiaalin filamentiksi, täytyi materiaali ajaa hallitusti lattialle. Nyt kelauslaitteen ansiosta filamentin saa automaattisesti kerättyä kelaan ajon aikana. Käytännön ongelmana nousi kuitenkin esille, että jos filamenttia haluaisi käyttää esimerkiksi 3D-tulostuksessa, pitäisi kela purkaa kahteen kelaan. Ekstruuderit tuottaa suuttimellaan kahta filamenttia samanaikaisesti ja tämä kelauslaite on suunniteltu yhden kelan pyörittämiseen ja käytännössä molemmat filamentit ajettiin samanaikaisesti kelaan. Tämä tekee kuitenkin vain yhden filamentin suoraan kelalta käytön mahdolliseksi. Koeajojen aikana nousi esille idea, että laitteeseen asennettaisiin kaksi pienempää kela, ja filamentit ajettaisiin omiin keloihin. Tätä ei käytännössä testattu tämän työn aikana. Se on kuitenkin asia, mitä voisi testata jatkossa, etenkin jos aletaan valmistamaan enemmän filamentteja 3D-tulostinta varten.

## 7.2 Hamppukuitukomposiitti materiaalina

Hamppukomposiitti käyttäytyi työssä käytetyissä menetelmissä lupaavasti. Yllättävää ja jopa positiivista oli, että uusiomuovista valmistettua hamppukomposiittia oli selvästi helpompi prosessoida ja käsitellä kuin ensiömuovista valmistettua varianttia.

Materiaalit aiheuttivat kuitenkin sellaisenaan ongelmia ja vaativat tämän johdosta kuitupitoisuuden laskemista. Kuitupitoisuutta laskettiin lisäämällä komposiitissa olevan joko ensiö- tai uusiomuovin määrää sekoittamalla ja prosessoimalla materiaalit ekstruusiosprosessissa.

### 7.2.1 PP30

Ensiö-PP:stä valmistetun komposiitin PP30:n prosessointi ei onnistunut ekstruuderilla eikä isosuutintulostimella. Työn tuloksien perusteella tästä materiaalista ei voida prosessoida ekstruuderilla filamenttia ominaisuuksiensa vuoksi. Ekstruusioprosessissa materiaali oli hyvin haurasta sekä lämpimänä että jäähtyneenä. Ekstruusioprosessissa materiaalia prosessoitiin 10 %:n kuitupitoisuuden seoksena. Materiaalin sulalujuus oli heikkoa ja se katkesi helposti vetokoneen vetäessä materiaalia. Tämä teki filamentin paksuuden säätämisen mahdottomaksi. Jäähtyneenä taas materiaalin joustavuus oli vähäistä eikä se kestänyt taivuttamista, jota väistämättä tapahtuu kelaamisen yhteydessä. Tämä tarkoitti käytännössä sitä, että materiaalifilamentit napsahtivat poikki kiertyessään kelan ympärille.

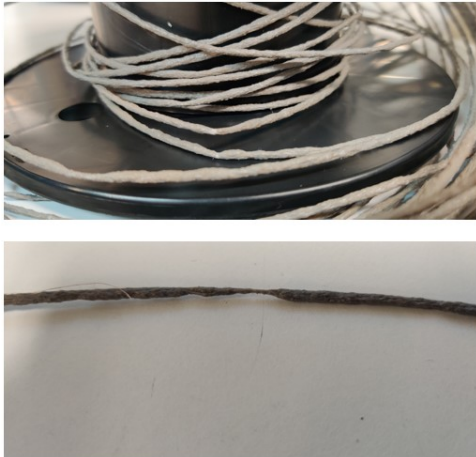
Isosuutintulostimella materiaali virtasi heikosti tai ei ollenkaan tulostimen ruuvissa. Tämän jälkeen, kun kokeiltiin RPP30 materiaalia, oli ero huomattava. Virtausongelmien vuoksi PP30 tulostamisen jatkotestaamisesta luovuttiin.

### 7.2.2 RPP30 ja sen kuitupitoisuuden alentaminen ekstruusioprosessissa

RPP30 eli uusiomuovista valmistettu hammppukomposiitti antoi lupaavampia tuloksia verrattuna ensiö-PP:stä valmistettuun komposiittiin. Ekstruuderilla prosessoitaessa materiaali virtasi tasaisesti eikä se palanut. Ekstruuderissa käytettiin prosessoitaessa lämpöprofiilia, jossa maksimilämpö oli 200 °C. RPP30-materiaalin kuitupitoisuutta laskettiin jatkoprosessointia varten 15 %:n (RPP15), 10 %:n (RPP10) ja 5 %:n (RPP5) pitoisuuksiin. Materiaali kesti myös kelaamista ja valmistettuja filamentteja pystyikin ajamaan kelauslaitteella pääosin automaattisesti.

RPP15- ja RPP5-materiaalien vetokestävyiden rajoja ja sulalujuutta koeteltiin ekstruusioprosessissa. Tämän tarkoituksena oli selvittää, onko materiaalista mahdollista valmistaa ohutta filamenttia käytettäväksi perinteisellä 3D-tulostimella. Kuitupitoisuus vaikutti suoraan vetolujuuteen ja RPP5 kesti vetämistä korkeammalla vetonopeudella kuin RPP15. Kuitenkaan edes RPP5:stä ei kyetty valmistamaan riittävän ohutta filamenttia, joka soveltuisi käytettäväksi perinteisessä 3D-tulostimessa. Lisäksi halkaisija vaihteli lyhyilläkin väleillä niin, ettei voida puhua tasalaatuisesta filamentista. Joko materiaalista, prosessointiparametreista tai laitteista johtuen filamentti vaikutti venyneen jaksoittain.

Filamentti venyi eri kohdista enemmän jättäen filamentin ohuemmaksi ja toisista kohdista taas vähemmän jättäen sen paksummaksi. Kuvassa 17 näkyy filamentin paksuuden vaihtelu lyhyilläkin väleillä.



Kuva 16. Filamentin venyminen RPP5:llä.

Tämä ilmiö tuntui tulevan esille useammin vetonopeuden kasvaessa. Tähän voi olla syynä esimerkiksi kuitumateriaalin sijoittuminen komposiitin rakenteessa. Materiaali voi olla venynyt enemmän kohdista, missä lujiteainetta eli kuitua on vähemmän ja taas vähemmän kohdista missä kuitua on enemmän. Mahdollista on myös, että materiaalin määrä ekstruuderin ruuvissa ei ollut riittävä tasaisen filamentin tuottamiseen. Yksi mahdollinen syy myös on, että vetolaitteen veto kohdistuu filamenttiin jotenkin aaltomaisesti venyttäen materiaalia jaksoina. Tämä kuitenkin tarkoittaisi, että vetorullat pyörisivät säännöllisen epätasaisesti ja tämmöistä ei ollut testien aikana havaittavissa. RPP5:n kohdalla tuli ensimmäisen kerran esiin myös filamentin profiilin muuttuminen. Filamentin pitäisi olla pyöreää muodoltaan, jollaisena se myös tulee ekstruuderin suuttimesta, mutta nyt profiilin muoto vääristyi kulmikkaaksi. Muodon vääristyminen ei ollut säännöllistä, mutta sitä alkoi esiintymään enemmän vetonopeuden kasvaessa. Jäi epäselväksi, missä vaiheessa epämuodostuminen tapahtui ja mistä syystä, mutta tämä ominaisuus viimeistään tekee filamentista kelvotonta käytettäväksi tulostimella. Näiden asioiden selvittäminen ja varmistaminen vaatisi laitteen toiminnan ja materiaalin koostumuksen jatkotutkimuksia, mutta tämän työn rajoissa sopivan tasalaatuista filamenttia ei mainittujen

ominaisuuksien vuoksi saatu tuotettua. Tämä ei kuitenkaan haitannut työssä, koska materiaalifilamentit käsiteltiin lopulta granulaatiksi käytettäväksi isosuutintulostimella.

### 7.2.3 RPP30 lisäävässä valmistuksessa

Isosuutintulostimella RPP30-materiaalia kokeiltiin sekä sellaisenaan että erilaisilla kuitupitoisuuksilla. Materiaalia syötettiin isosuutintulostimeen RPP30-granulaattina, seoksina ja ekstruuderilla prosessoituna.

RPP30-granulaatteja syötettäessä ongelmaksi osoittautui granulaattikoko ja korkea kuitupitoisuus. Isosuutintulostimen syöttöaukko rajoitti suhteellisen suurien granulaattien virtausta ruuviin ja tämä aiheutti katkoja materiaalin virtaukseen. Lisäksi korkean kuitupitoisuuden vuoksi materiaali paloi herkästi tulostuslämpötiloissa. Voidaan myös olettaa, että nämä ominaisuudet lisäksi tehostivat toisiaan. Materiaalin virratessa heikosti se on kauemmin altistuneena lämmölle ja palaessaan se taas virtaa vielä heikommin. Tämän vuoksi materiaalista valmistettiin eriä matalammalla kuitupitoisuudella.

Seostuksella tehdyt erät puolsivat osaltaan koosta johtuvan virtausongelman teoriaa. Materiaalivirtaus suuttimessa parani huomattavasti, kun kuidun suhteellinen määrä tulostimen läpi menevässä materiaalissa väheni, mutta virtaus ei ollut tasaista. Syöttöhäiriöt aiheuttivat tulostuksessa jaksoittain esiintyviä virtauseroja, jotka näkyivät vajaina kappaleina. Materiaalivirtaukseltaan tasaisimmat tulostukset saatiin käyttämällä ekstruuderilla valmistettuja granulaatteja.

### 7.2.4 Matalamman kuitupitoisuuden granulaattien toiminta isosuutintulostimella

Ekstruuderilla prosessoidut granulaatit virtasivat selvästi paremmin, mutta sisälsivät edelleen haasteita tulostuksessa. Kuitupitoisuudesta riippuen materiaalin virtaus oli epätasaista, mikä kävi ilmi tulostettujen kappaleiden massaeroista. Massat kertoivat suoraan, minkä verran materiaalia kappaleeseen on suuttimesta virrannut. RPP15 ja RPP10 toimivat tulostuksessa seoksia paremmin, mutta tehtyjen virtaustestien perusteella materiaalien virtaaminen oli edelleen epäsäännöllistä. Lisäksi tulostusjälki RPP15 ja RPP10 tulostuksissa oli epätasalaatuista. Parhaat tulokset materiaalin virtaavuuden ja tulostuslaadun suhteen saavutettiin RPP5:llä, jolla kappaleiden massat eivät poikenneet toisistaan juurikaan ja laatu tasaisempaa.



Tämän työn tulostusten perusteella voidaan sanoa, että testatut materiaalit eivät sovi mittatarkkojen kappaleiden tulostamiseen. RPP5:llä jäähtymisen yhteydessä tapahtuva vääntyminen jo itsessään vääristää tulostetun kappaleen mittasuhteita. Tämän perusteella voi myös todeta, ettei materiaalia ole optimaalista käyttää ainakaan pienempien kappaleiden tulostamiseen. Pienemmässä kappaleessa vääntyminen muuttaa suhteellisesti enemmän kappaleen kokonaismittoja. Lisäksi tarkemman tulostusjäljen saavuttamiseksi lisäävässä valmistuksessa käytetään yleensä pienempiä suuttimia kuin mistä materiaalia saatiin menemään tämän työn aikana läpi. Isommat suuttimet, kuten esimerkiksi tässä työssä käytetty 2 mm:n suutin, sopivat sen sijaan erinomaisesti isompien kappaleiden tulostamiseen säästäten tulostusaikaa. Materiaali voisikin sopia paremmin nimenomaan isompien kappaleiden tulostamiseen, jolloin muun muassa pieni vääntyminen ei häittäisi.

Onnistuneiden tulosteiden rakenne oli ulkoisen tarkastelun perusteella vahva. Onnistuneet tulosteet työn aikana olivat yksinkertaisia mallikappaleita ja kuutiota, jotka tulostuivat kokonaan. Kappaleet eivät hajonneet helposti puristaessa ja etenkin täytön kanssa kappaleet olivat lujatekoisia. Kappaleiden lujatekoisuus antaa lupaavan kuvan materiaalin käytöstä kestävyttä vaativien kappaleiden tulostamiseen. Tulosteiden kestävyden varmistaminen johonkin tiettyyn tarkoitukseen vaatisi kuitenkin jatkotutkimuksia ja kestävyystestejä.

## 8 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin Sataliina Oy:n luonnonkuitukomposiittia, joka sisältää polypropeenia (PP) ja luonnonkuituna hamppukuitua. Komposiitista oli valmistettu tutkittavaksi kaksi eri versiota, joista toiseen oli käytetty ensiö-PP:tä (PP30) ja toiseen uusiokäytettyä CircoPP:tä (RPP30). Luonnonkuitua materiaaleissa on 30 %. Työn tavoitteena oli tutkia materiaalin prosessoitavuutta ekstruusioprosessissa ja lisäävässä valmistuksessa.

Materiaalin prosessoitavuuden tutkimiseen käytettiin ekstruusioprosessia ja lisäävän valmistuksen menetelmää hyödyntävää isosuutintulostinta Isosuutintulostin on pursotukseen perustuva 3D-tulostin.

Komposiittimateriaaleja prosessoitiin laboratoriotason ekstruusioprosessilla. Prosessin yhteydessä laitteistoa päivitettiin ottamalla käyttöön ja koestamalla uusia lisälaitteita. Lisälaitteet tekivät prosessista sopivamman luonnonkuitukomposiittien prosessoimiseen. Ekstruusioprosessilla komposiittimateriaalista valmistettiin eriä (RPP15, RPP10 ja RPP5), joissa oli matalampi kuitupitoisuus ja pienempi granulaattikoko verrattuna alkuperäiseen granulaattiin. Isosuutintulostimella materiaalia prosessoitiin eli koeajettiin tulostuksessa alkuperäisellä 30 %:n sekä matalamman kuitupitoisuuden erillä. Ekstruuderilla valmistettujen erien lisäksi kuitupitoisuutta laskettiin sekoittamalla materiaaliin lisää muovia.

Ensiömuovista valmistettu PP30 ei toiminut ekstruuderissa eikä isosuutintulostimella niin, että materiaalin tutkimista olisi voitu jatkaa pidemmälle. Uusiomuovista valmistettu RPP30 ei tuottanut ongelmia ekstruusioprosessissa ja granulaatin valmistuksessa, mutta filamentin valmistaminen jatkokäyttöä varten ei onnistunut. RPP30-granulaateilla ei saavutettu isosuutintulostimella tasaista tulostuslaatua. Myöskään RPP30:n kuitupitoisuuden laskeminen seostamalla ei riittänyt tekemään materiaalista tulostuskelpoista. Sen sijaan materiaali toimi tulostuksessa paremmin matalammilla kuitupitoisuuksilla ja pienemmällä granulaattikoolla. RPP15 ja RPP10 toimivat tulostuksessa seoksia paremmin, mutta materiaalien virtaaminen oli edelleen epäsäännöllistä ja tulostusjälki epätasalaatuista. RPP5:llä saavutettiin tasaisimmat tulostukset ja onnistuttiin tulostamaan eheitä kappaleita. RPP5-tulosteiden laatua kuitenkin heikensi PP:lle ominainen vääntyminen jäähtymisen yhteydessä. Tämän vuoksi RPP5 ei sovi pienten ja mittatarkkojen kappaleiden tulostamiseen. Sen sijaan materiaali voisi sopia paremmin käytettäväksi isompien kappaleiden tulostamisessa.

## LÄHTEET

- AIPWorks. 2019.** 3D-tulostus: Tietoa: STL-formaatti. *STL-formaatti*. [Online] AIPWorks, 2019. [Viitattu: 18. 11 2020.] <https://aipworks.fi/3d-tulostus/tietoa/stl-formaatti/>.
- Al-Oqla F. & Salit M. 2017.** *Materials Selection for Natural Fiber Composites*. Duxford : Woodhead Publishing, 2017. ISBN: 978-0-08-100958-1.
- Fortum Oyj. 2021.** Circo:Fortum.fi. [Online] Fortum Oyj, 2021. [Viitattu: 3. helmikuu 2021.] <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/kierratys-ja-jatepalvelut/kierratys/muovit/circo>.
- GoPrint3D. 2016.** what-is-slicing-software-and-what-does-it-do. *GoPrint3D*. [Online] GoPrint3D, 6. Heinäkuu 2016. [Viitattu: 24. Maaliskuu 2021.] <https://www.goprint3d.co.uk/blog/what-is-slicing-software-and-what-does-it-do/>.
- Hausman K. & Horne R. 2014.** *3D Printing for dummies*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2014. ISBN 978-1-118-66075-1.
- Juggerbot3D. 2020.** WEBINAR: FUSED FILAMENT FABRICATION VS FUSED GRANULATE FABRICATION (PELLET PRINTING). [Online] Juggerbot3D, 20. Huhtikuu 2020. [Viitattu: 26. Helmikuu 2021.] <https://juggerbot3d.com/fused-filament-fabrication-vs-fused-granulate-fabrication/>.
- Järvinen P. 2017.** *Muovit ja muovituotteiden valmistus*. Porvoo : Bookwell Oy, 2017. 978-952-93-8690-1.
- Labtech Engineering CO. Ltd. 2016.** Instruction Manual for Scientific Twin-Screw Extruder Types LTE20-44 (Part I). *Operating Instructions*. Samutprakan, Thailand : s.n., 2016.
- Lähteenmäki E. 2016.** Ainetta lisäävät menetelmät. [Online] Muoviyhdistys.fi, 23. Heinäkuu 2016. [Viitattu: 10. helmikuu 2021.] <https://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/23/osa-21-ainetta-lisaavat-valmistusmenetelmat-additive-manufacturing/>.
- Muoviteollisuus Ry.** Muovien luokitus:Plastics.fi. *Plastics.fi*. [Online] Muoviteollisuus Ry.[Viitattu: 8. Helmikuu 2021.] [https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/muovien\\_luokitus/](https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/muovien_luokitus/).

**Parkkinen H. 2018.** *Kuituominaisuuksien vaikutus luonnonkuitukomposiittien ominaisuuksiin.* Helsinki : Helsingin yliopisto, 2018.

**Simplify3D. 2021.** Home: Support: Materials Guide. [Online] Simplify3D, 2021. [Viitattu: 8. Tammikuu 2021.] <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/polypropylene/>.

**Sorsa J. 2015.** *Materiaalitekniikka.* Helsinki : Sanoma Pro Oy, 2015. ISBN 978-952-63-0666-7.

**Suomen standardisoimisliitto SFS. 2013.** *Plastics - Vocabulary (ISO 472:2013).* s.l. : Suomen standardisoimisliitto SFS, 2013. SFS-EN ISO 472:2013.