

Opinnäytetyö (AMK)

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2022

Vesa Saksi

BIOMUOVIENTEN JA - KOMPOSIITTIENTEN 3D- TULOSTETTAVUUS

TURKU AMK 
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2022 | 62 sivua ja 3 liitesivua

Ohjaaja: Liisa Lehtinen, Turun ammattikorkeakoulu

Vesa Saksi

Biomuovien ja -komposiittien 3D-tulostettavuus

Opinnäytetyön tarkoituksena oli testata erilaisten biomuovien ja -komposiittien 3D-tulostettavuutta. Päämäärinä oli perehtyä työssä käytettävään Prenta Oy:n valmistamaan isosuutintulostimeen, ja selvittää, mitkä biopohjaiset materiaalit soveltuvat 3D-tulostukseen.

Kirjallisessa osiossa perehdytään syvemmin isosuutintulostimeen ja sen toimintaperiaatteeseen. Osiossa käsitellään muovin käyttöä 3D-tulostuksessa sekä työssä käytettävät testausmateriaalit. Käytännön osuudessa käydään läpi testausprosessia ja saatuja tuloksia. Lopuksi esitetään kehitysehdotuksia ja jatkosuunnitelmia.

Testien lopputuloksena saatiin tietoa materiaalien käytettävyydestä 3D-tulostuksessa. Testiajojen avulla käytetyille materiaaleille määritettiin tulostusparametrit. Opinnäytetyöstä saadun tiedon avulla voidaan kehittää uusia tulostusmateriaaleja. Tietojen pohjalta voidaan myös suorittaa testausmateriaaleille jatkotutkimuksia.

Asiasanat:

3D-tulostus, reologia, tietokoneavusteinen suunnittelu, biomuovi, granulaatti, ekstruusio, FGF

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Chemical and Materials Engineering

2022 | 62 pages and 3 appendix pages

Supervisor: Liisa Lehtinen, Turku University of Applied Sciences

Vesa Saksi

Usability of bioplastics and biocomposites in 3D printing

The purpose of the thesis was to test the usability of various bioplastics and biocomposites in 3D printing. The goals were to get familiar with the 3D printer used in the project and to find out which bio-based materials are suitable for 3D printing.

In the literature review, the used 3D printer and its principles of operation are discussed. The section goes through the use of plastic in 3D printing, as well as the testing materials used in the project. The practical part of the study deals with the testing process and the obtained results. Finally, the suggestions for developing the materials and possible future plans are presented.

The test results provided information on the usability of the materials in 3D printing and their parameters. The data gained from the thesis can be used to create new printing materials. The data can also be a basis for further studies on the tested materials.

Keywords:

3D printing, rheology, computer-assisted design, bioplastic, granulate, extrusion, FGF

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	8
1 Johdanto	9
2 3D-tulostaminen	11
2.1 3D-tulostuksesta yleisesti	11
2.2 3D-tulostusprosessi	12
2.2.1 CAD-mallin luonti	12
2.2.2 STL-mallin viipalointi	12
2.2.3 Kappaleen 3D-tulostus	14
2.2.4 Jälkikäsittely	14
2.3 Isosuutintulostin	15
2.3.1 Toimintaperiaate	15
2.3.2 Hyödyt ja haitat	17
3 Tulostusmateriaalit	19
3.1 Muovin ominaisuudet	19
3.1.1 Leikkausvoimat	19
3.1.2 Muovien sulakäyttäytyminen	22
3.1.3 Muovin käyttö 3D-tulostuksessa	23
3.2 Yleiset tulostusmateriaalit	24
3.3 Biodolomer F40	25
3.4 Formi 3D	26
3.5 Arctic Biomaterials PLA-Fi	27
3.6 Arctic Biomaterials PLA-Mi	28
3.7 Durasense 3D Plus 50	29
4 Prosessisuunnitelma	30
4.1 Testikappale	30
4.2 Prosessiparametrit	31
4.3 Testiajosuunnitelma	31

5 Testiajojen tulokset	34
5.1 Biodolomer F40	34
5.2 Formi 3D	38
5.3 Arctic Biomaterials PLA-Fi	40
5.4 Arctic Biomaterials PLA-Mi	42
5.5 Durasense 3D Plus 50	45
5.6 Muita huomioita	48
6 Johtopäätökset	52
6.1 Biodolomer F40	52
6.2 Formi 3D	52
6.3 Arctic Biomaterials PLA-Fi	53
6.4 Arctic Biomaterials PLA-Mi	53
6.5 Durasense 3D Plus 50	54
6.6 Koejärjestely ja kehitysehdotukset	54
7 Yhteenveto	56
Lähteet	57
 Kaavat	
Kaava 1. Leikkausvoiman kaava.	19
Kaava 2. Leikkausviskositeetin kaava (Mezger 2011, 27).	20
 Kuvat	
Kuva 1. Stereolitografiatulostimen eri osat (Formlabs n. d.).	11
Kuva 2. AutoCADissa virtuaalimallin vieminen .stl-tiedostoksi.	13
Kuva 3. Isosuutintulostin Prenta FGF-450.	15
Kuva 4. Ekstruuderin syöttöputki.	16
Kuva 5. Two-Plates-Model -malli (Mezger 2011, 21).	20
Kuva 6. Kolme eri viskositeettikäyrää (Anton Paar 2022a).	21

Kuva 7. Biodolomerin granulaattia viivaimen vieressä. Asteikko senttimetreinä.	25
Kuva 8. Formi 3D:n granulaattia viivaimen vieressä.	26
Kuva 9. PLA-Fi:n granulaattia viivaimen vieressä.	27
Kuva 10. PLA Mi:n granulaattia viivaimen vieressä.	28
Kuva 11. Durasense 3D Plus 50:n granulaattia viivaimen vieressä.	29
Kuva 12. AutoCADilla tehty testikappale mittoineen, yksiköt millimetreinä.	30
Kuva 13. Biodolomerista 1,5 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	34
Kuva 14. Biodolomerista 1,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	35
Kuva 15. Biodolomerista tulostetut testipalikat, joissa molemmissa on 80 %:n täyttöaste. Vasemmalla 2,0 mm ja oikealla 1,0 mm suuttimella tulostettu.	35
Kuva 16. Formi 3D:stä 2,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	38
Kuva 17. Formi 3D:stä 1,5 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	38
Kuva 18. Formi 3D:stä 1,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	39
Kuva 19. Reunoissa olevia tulostusvirheitä PLA-Fi:stä valmistetussa kappaleessa.	40
Kuva 20. PLA Fi:stä 2,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	41
Kuva 21. PLA Fi:stä 1,5 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	42
Kuva 22. PLA Fi:stä 1,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	42
Kuva 23. Aukkoinen PLA-Mi:stä valmistettu testikappale.	43
Kuva 24. PLA Mi:stä 1,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	44
Kuva 25. PLA Mi:stä 1,5 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	44
Kuva 26. PLA Mi:stä 2,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	44
Kuva 27. Durasensestä 2,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	46
Kuva 28. Durasensestä 1,5 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	46
Kuva 29. Durasensestä 1,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.	46
Kuva 30. Durasense 3D:stä (vas) ja Formi 3D:stä (oik) 1,0 mm suuttimella ja 50 %:n täyttöasteella tulostetut testikappaleet.	48

Kuviot

Kuvio 1. Materiaalivalinnan vaikutus tulostuksen kestoan.	36
---	----

Kuvio 2. Suuttimen ja alustan lämpötilojen keskiarvot eri materiaaleille.	36
Kuvio 3. Kappaleiden massojen keskiarvot, maksimit, minimi ja mediaanit.	37
Kuvio 4. Tulostettujen kappaleiden massat 80 %:sella täyttöasteella.	37
Kuvio 5. Materiaalien ekstruusiokertoimien keskiarvot.	41
Kuvio 6. Täyttöasteen vaikutus tulostuksen keston.	49
Kuvio 7. Tulostettujen kappaleiden massat 20 %:sella täyttöasteella.	49
Kuvio 8. Suutinkoon vaikutus tulostuksen keston.	50
Kuvio 9. Täyttöasteen vaikutus kappaleen massa.	51
Kuvio 10. Ekstruusiokertoimen vaikutus tulostuksen keston.	51

Taulukot

Taulukko 1. Käytetyt materiaalit, suutinkoot ja täyttöasteet.	32
Taulukko 2. Materiaaleista käytety testikoodit.	33
Taulukko 3. Käytettyjen helmareunojen määrä materiaalienkohtaisesti.	48

Liitteet

Liite 1. Materiaalien tulostusparametrit	
--	--

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Adheesio	Tarttuvuus.
CAD	Computer aided design. Tietokoneavusteinen suunnittelu, jonka avulla pystytään luomaan virtuaalisia 3D-malleja.
Ekstruuder	Laite, jonka avulla pystytään suorittamaan ekstruusio.
Ekstruusio	Muovien muovausmenetelmä, jossa lämmityselementtien ympäröivä ruuvi kuumentaa muovin ja pursottaa sen suuttimen läpi.
FDM	Fused deposition molding. 3D-tulostusmenetelmä, jossa sulanutta filamenttimateriaalia pursotetaan tulostusalustalle kerros kerrokselta.
FGF	Fused granulate fabrication. 3D-tulostusmenetelmä, jossa muovigranulaatit sulatetaan ja pursotetaan suuttimen kautta tulostusalustalle.
Granulaatti	Raemaisessa muodossa oleva materiaali. Työssä kaikki materiaalit olivat tässä muodossa.
Komposiitti	Kahden tai useamman materiaalin seos, jossa materiaalit toimivat yhdessä. Työssä käytettiin komposiittimateriaaleja.
PLA	Polylaktidi. Useissa työssä käytetyissä materiaaleissa oli polylaktidia.
SLA	Stereolitography. 3D-tulostusmenetelmä, jossa kappale muodostetaan kovettamalla hartsia ultraviolettivalolla.
STL	Stereolitografia-tiedostomuoto. CAD-ohjelmien tukema tiedostomuoto, joka sisältää kolmiulotteisen objektin pintageometrian informaation.

1 Johdanto

3D-tulostus on teknologiana ja valmistusmetodina kehittynyt nopeaa vauhtia vuosien varrella. Aina sen keksimisvuodesta 1981 lähtien 3D-tulostusta ja lisäävää valmistusta (additive manufacturing) on hyödynnetty monilla eri teollisuusaloilla. Alun perin materiaalitekniikassa hyödynnetty valmistusmetodi on levinnyt elintarviketekniikan ja lääketieteen osa-alueille. 3D-tulostus mahdollistaa osien ja kappaleiden valmistuksen monilla eri materiaaleilla. Se myös vähentää materiaali- ja logistiikkakustannuksia merkittävästi (VTT n. d.).

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin biomateriaalien ja -komposiittien hyödyntämistä 3D-tulostuksessa. Työssä käytetyt materiaalit ja komposiitit ovat biohajoavia. Biohajoavissa muovissa polymeeriketjut pilkkoutuvat herkemmin kuin perinteisissä muoveissa. Muovi luokitellaan biohajoavaksi, jos se hajoaa teollisessa kompostissa alle 6 kuukaudessa ja kotikompostorissa 12 kuukaudessa. (Kohvakka & Lehtinen 2019, 117.) Testausmateriaaleista suurin osa on valmistettu sekoittamalla PLA:han (polylaktidi) erilaisia täyteaineita. Näitä täyteaineita ovat esimerkiksi kalsiumkarbonaatti, lasikuitu ja selluloosa.

Materiaalien tulostettavuutta testattiin tulostamalla 3D-mallinnettu testikappale eri kokoisilla suuttimilla ja tulostusparametreilla. Tulostetut kappaleet tutkittiin silmämääräisesti eri ulkonäöllisten kriteereiden perusteella. Tämän avulla määritettiin, sopivatko niihin käytetyt materiaalit 3D-tulostukseen ja mihin sovellukseen.

Opinnäytetyö on osa Turun ammattikorkeakoulun, Turun yliopiston, Åbo Akademin ja Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston MMAM-hanketta (Multicomponent Materials Centre of Expertise for Additive Manufacturing). MMAM-hankkeen yhteistyökumppaneihini kuuluvat myös yritykset 3DTech Oy, Brinter Oy, Bayer AG ja Koneteknologiakeskus Turku Oy. Hanke pyrkii vahvistamaan, yhdistämään ja tehostamaan alueellista yhteistyötä ja osaamista muun muassa lisäävän valmistuksen, lääketieteen ja biomateriaalien alalla. MMAM pyrkii luomaan tutkimus, kehitys ja innovaatio -yhteistyöalustan, jonka avulla edistetään sellaisten uusien materiaaliyhdistelmien ja 3D-

tuotantoprosessien kehittämistä ja tutkimusta, jotka hyödyttävät alueellisia teollisuudenalojen ja teollisuuskumppaneita. (Turun ammattikorkeakoulu n. d.)

2 3D-tulostaminen

Opinnäytetyössä käytettiin kappaleiden tulostamiseen Prenta Oy:n valmistamaa FGF-450 isosuutintulostinta. Kyseinen laite sijaitsee Turun ammattikorkeakoulun prosessihallin tiloissa. Tiloissa suoritettiin osa opinnäytetyön käytännön osuudesta. Myös työssä käytetyt tulostusmateriaalit ja työkalut olivat saatavilla Turun ammattikorkeakoulun tiloissa.

2.1 3D-tulostuksesta yleisesti

3D-tulostaminen on lisäävän valmistuksen prosessi. Siinä digitaalisesta tiedostosta pystytään valmistamaan kolmiulotteinen esine tulostamalla se kerros kerrokselta. (BCN3D 2020.) Digitaalinen tiedosto tehdään tietokoneavusteisen suunnittelun (engl. Computer-Aided Design, CAD) avulla. Tämä tiedosto ohjaa tulostinta kappaleen tulostuksessa.

Ohjaus voi olla esimerkiksi tulostuspään liikuttamista ja sulan muovimassan ekstruudaamista kerroksittain, kuten FDM-metodissa (Fused Deposition Modeling). Se voi myös olla ultraviolettivaloa säteilevän näytön säätämistä ja rakennusalustan liikuttamista, kuten kuvassa 1 havainnollistetussa SLA-metodissa (Stereolitografia).



Kuva 1. Stereolitografiatulostimen eri osat (Formlabs n. d.).

Ensimmäinen 3D-tulostin kehitettiin vuonna 1981 Japanissa. Silloin Hideo Kodama yritti luoda metodin pikamallintamiselle (rapid prototyping). Hänen kehittämänsä laite polymerisoi valoherkkää hartsia kerros kerrokselta UV-valon avulla luoden kolmiulotteisen kappaleen. Tämä laite oli varhainen versio modernista SLA-tulostimesta. (BCN3D 2020.)

2.2 3D-tulostusprosessi

Kappaleen 3D-tulostaminen on moniosainen prosessi. Tulostuksessa jokaisen vaiheen onnistuminen on oleellinen osa tyydyttävää lopputulosta. Tässä kappaleessa käsitellään lyhyesti normaaliin 3D-tulostukseen kuuluvia vaiheita. Tämän tarkoituksena on myös korostaa työn aikana tehtyjä mahdollisia menetelmäeroja.

2.2.1 CAD-mallin luonti

Ensiaskel kappaleen 3D-tulostukseen on luoda siitä virtuaalinen malli. Internetissä on ladattavissa paljon erilaisia valmiita malleja. Mikäli haluaa tulostaa juuri tietynlaisen kappaleen pitää se mallintaa itse. Tähän on olemassa useita eri ohjelmia eri etuineen.

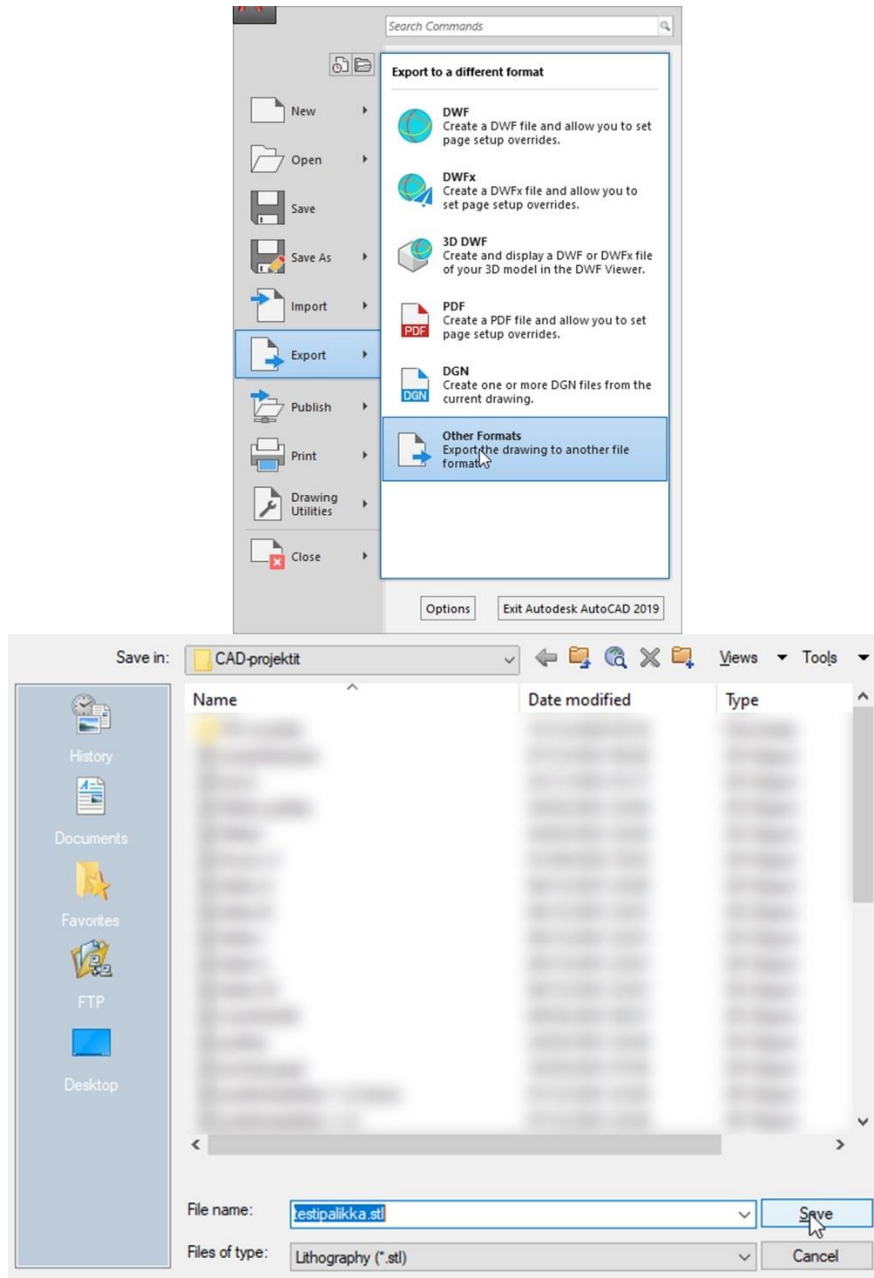
Tässä projektissa kaikki mallit on luotu AutoCAD-nimisellä mallinnusohjelmalla. AutoCAD on hyvä geometrinen rakenteiden mallintamiseen. Se ei kuitenkaan sovellu orgaanisten objektien, esimerkiksi ihmisten tai eläinten, luomiseen.

2.2.2 STL-mallin viipalointi

Kappale viipaloidaan STL-tiedostoksi (stereolitografia) sen mallintamisen päätökseksi. STL-tiedostojen avulla tulostimen käyttämä ohjausohjelma osaa muuntaa kolmiulotteisen kappaleen G-koodiksi.

G-koodin avulla tulostimen suutinpää saa muun muassa koordinaatit miten sen kuuluu liikkua tulostuspöydällä, miten paljon sen täytyy ekstruudata materiaalia,

ynnä muuta sellaista. AutoCADissa viipalointi tapahtuu yksinkertaisesti viemällä malli STL-tiedostomuodossa (kuva 2). Isosuutintulostimen käyttämä ohjausohjelma on Simplify3D.



Kuva 2. AutoCADissa virtuaalimallin vieminen .stl-tiedostoksi.

2.2.3 Kappaleen 3D-tulostus

Tulostimen ohjausohjelmistoon syötetään STL-tiedosto. Tämän jälkeen haetaan sopivat tulostusparametrit. Parametrien asettamiseen vaikuttaa eniten materiaalivalinta. Vaativampi materiaali vaatii tarkemmat parametrit. Jyrkät kulmat tai ulkonevat kohdat vaativat tukipilarien (support) asettamista. Tässä työssä käytetty testikappale ei tarvitse tukipilareita.

Täyttöaste (infill percentage) on tässä työssä useasti mainittu parametri. Sillä tarkoitetaan kappaleen sisärakenteen umpinaisuuden astetta. Kappaleen sisällä oleva tukirakenne on puolet kappaleen kokonaistilavuudesta, kun täyttöaste on 50 %. Kun täyttöaste on 100 %, kappale on täysin umpinainen.

Filamenttitulostimella yleiset täyttöasteet ovat 20 %:sta 50 %:iin. Täyttöaste vaikuttaa materiaalikulutuksen lisäksi kappaleen kestävyYTEEN. Tässä työssä täyttöasteet olivat yksi muuttuja testimateriaaleissa.

Komennon saatuaan tulostin alkaa tulostamaan kappaletta sille annetun G-koodin mukaan. Tulostimen suutinpää ei sisällä tulostinvirheitä havaitsevia sensoreita. Vaikeammat materiaalit epäonnistuvat useasti tulostuksen alkuvaiheessa. Tästä syystä tulostuksen aktiivinen seuraaminen on tärkeää. Myös tässä työssä tulostusta seurattiin aktiivisesti, sillä näin estettiin ajoissa tulostuksen epäonnistuminen. Seuraamalla tulostusta havaittiin myös ajoissa materiaalien reologisten ominaisuuksien aiheuttamat virheet tulostuksessa. Virheitä tulostuksessa ovat esimerkiksi yliekstruusio ja kappaleen irtoaminen tulostusalustasta.

2.2.4 Jälkikäsitely

Kappaletta voidaan jälkikäsitellä eri tavoin tulostuksen jälkeen. Tämä voi olla filamenttitulostuksessa esimerkiksi pintojen hiomista tai reikien poraamista. SLA-tulostuksessa jälkikäsitely on liiallisen hartsin poispeseminen ja kappaleen lopullinen kovettaminen UV-valolla. Tässä työssä kappaleita ei jälkikäsitellä

millään tavalla. Jälkikäsitteily piilottaisi mahdolliset tulostusvirheet, mikä vaikeuttaisi materiaalien soveltuvuuden arvioimista.

2.3 Isosuutintulostin



Kuva 3. Isosuutintulostin Prenta FGF-450.

Tässä kappaleessa tutustutaan hieman opinnäytetyössä käytettyyn laitteeseen, Prenta FGF-450 isosuutintulostimeen. Kuvassa 3 nähdään isosuutintulostin kokonaisuudessaan.

2.3.1 Toimintaperiaate

Nimensä mukaisesti FGF-450 isosuutintulostin pohjautuu FGF-tulostusmenetelmään. Toisin kuin yleisempään FDM-tekniikkaan painottuvilla filamenttitulostimilla FGF-450:ssä tulostuskärkenä toimii pystyasennossa oleva

ekstruuderiruuvi. Ruuviin syöttyä tulostusmateriaali sen yläpuolella olevan syöttöputken (kuva 4) ja syöttösuppilon avulla.



Kuva 4. Ekstruuderin syöttöputki.

Ruuvien pyörimisliike liikuttaa granulaatin lämpöelementin läpi. Yhdessä ruuvista aiheutuneen kitkan kanssa se sulattaa materiaalin. Sula materiaali työntyy lopulta ruuvien alapuolella olevan suuttimen kautta tulostusalustalle. (Sainisto 2021, 23.)

Isosuutintulostin on tarkoitettu käytettäväksi termoplastisten muovien kanssa. Tapauskohtaisesti se soveltuu myös erilaisten komposiittimateriaalien tulostamiseen. Pääsääntöisesti käytettävä materiaali on oltava jonkinlaisessa granulaattimuodossa. Granulaattimuoto edistää materiaalin kulkua ekstruuderiruuvien läpi holvaantumatta.

Holvaantumisella tarkoitetaan ilmiötä, jossa materiaali muodostaa koossa pysyviä holveja. Holvit kykenevät kannattamaan niiden yläpuolella olevaa massaa. (Lehtonen 2008, 24-25.) Tämä estää materiaalin syötön ekstruuderiruuviin. Holvaantumista voi tapahtua materiaalin ollessa hyvin kostea, hienojakoista tai sähköisesti staattista.

Tulostimen liikeradat rajoittuvat 470 mm x 480 mm x 450 mm kokoisen kuution alueelle. Tulostettavan kappaleen on mahdollista tämän alueen sisälle. Ekstruuderin lämpötilan saa asetettua korkeintaan 260 °C:seen. Maksimissaan 150 °C:einen tulostusalusta auttaa ehkäisemään kappaleiden kutistumista tulostamisen aikana. (Sainisto 2021, 25.)

2.3.2 Hyödyt ja haitat

Positiivisin puoli isosuutintulostimessa on sen kyky tulostaa suuria kappaleita nopeasti. Tämä johtuu sen sisällä olevasta ruuviekstruuderista. Se kykenee luomaan suuremman paineen ja täten potentiaalisesti suuremman pursotustilavuuden (Sainisto 2021, 24).

Myös käytetty tulostusmassa on laitteelle eduksi. Materiaalia ei tarvitse muuttaa filamentiksi ollakseen tulostettavassa muodossa. Se voidaan syöttää suoraan granulaattimuodossa laitteeseen.

Granulaattiseosta voi halutessaan muokata tulostuksen aikana lisäämällä syöttösuppiloon muita granulaattimateriaaleja. Tällöin kappaleen koostumusta voidaan muuttaa paljon.

Laitteella on myös negatiiviset puolensa. Pienten kappaleiden tarkka tulostaminen on lähes mahdotonta suutinpään epätarkkojen liikkeiden vuoksi. Tulostustapa estää tulostusmateriaalin refraktiota. Refraktiossa tulostin vetää materiaalia hieman takaisin suuttimen sisälle. Näin ekstruuderin liikuessa materiaalia ei pääse valumaan ulos ja pingottamaan filamenttihaituvia kappaleen ympärille. Tämä tapahtuu perinteisessä filamenttitulostimessa pienten syöttörullien pyörittäessä filamenttia pois kuumasta suutimesta ennen materiaalin sulamista.

Isosuutintulostimen sisällä oleva ekstruuderiruuvi ei tähän fyysisesti pysty materiaalin ollessa jo sulaa sen poistuessa ruuvista. Tästä syystä kompleksit kappaleet voivat tulostua hyvin sotkuisen näköisiksi, ja ne vaativat paljon jälkikäsittelyä.

Näiden haasteiden lisäksi isosuutintulostimessa on ohjelmistotasolla koodausvirhe. Virhe estää sitä tulostamasta tietyn pituisia kappaleita. Tämä ilmiö ei haitannut opinnäytetyössä tehtyjen testien suorittamista testikappaleen pienen koon ansiosta. Myös Juhani Sainisto omassa opinnäytetyössään kohtasi kyseisen ilmiön työskennellessään saman isosuutintulostimen kanssa (Sainisto 2021, 41).

3 Tulostusmateriaalit

Tässä luvussa käydään läpi muovia yleisesti, sen sulakäyttäytymistä 3D-tulostuksessa, yleisiä 3D-tulostukseen käytettyjä materiaaleja, sekä testeissä käytetyt materiaalit. Listataan myös hieman niiden ominaisuuksia sekä muita tietoja valmistajilta.

3.1 Muovin ominaisuudet

Muovi määritellään aineeksi, jonka oleellisena ainesosana on suurikokoinen polymeeri ja jota virtaus voi muokata jossain tuotteen valmistusprosessin vaiheessa. Muovit koostuvat pitkistä polymeeriketjuista sekä lisäaineista. Muovit ovat seoksia, kun taas polymeerit ovat puhtaita kemiallisia yhdisteitä. Termoelasteja ja kumeja ei lasketa muoveiksi. (Kohvakka & Lehtinen 2019, 40.)

3.1.1 Leikkausvoimat

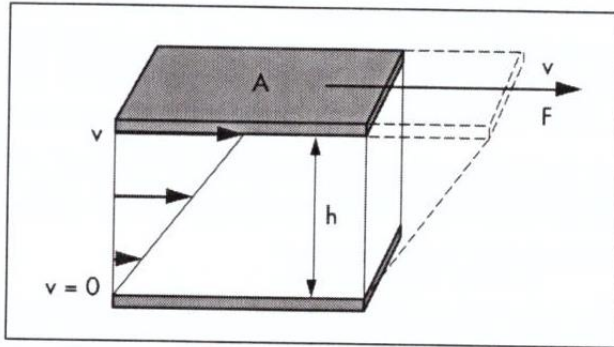
Leikkausvoima (shear force) tarkoittaa voimaa, joka työntää yhtä kappaleen osaa tiettyyn suuntaan ja toista kappaleen osaa vastakkaiseen suuntaan. Leikkausjännitys (shear stress) johdetaan leikkausvoimasta (kaava 1).

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Kaava 1. Leikkausvoiman kaava.

Leikkausvoiman kaavassa τ on leikkausjännitys, F on leikkausvoima Newtonissa ja A on leikkausalue neliömetreissä. Leikkausjännityksen yksikkö on $1 \frac{N}{m^2}$, tai 1 Pa (pascal).

Leikkausvoima ja leikkausjännitys määritetään käyttämällä Two-Plates-Model -mallia (kuva 5). Ylempi levy leikkausalueella A asetetaan liikkeelle leikkausvoimalla F ja tuloksena oleva nopeus v mitataan. Levyjen välissä on etäisyys h, ja näyte leikataan tässä leikkausraossa. (Mezger 2011, 21.)



Kuva 5. Two-Plates-Model -malli (Mezger 2011, 21).

Viskositeetti johtuu fluidissa olevien molekyylien liikkeestä suhteessa toisiinsa. Fluidilla tarkoitetaan aineita, joiden rakenneosat voivat liikkua vapaasti. Nesteet ja kaasut ovat fluideja. (Mezger 2011, 26.) Kun molekyylit joutuvat liikkumaan toistensa vieressä, tästä syntyy kitkaa. Kitka aiheuttaa virtausvastustusta. Isommat komponentit aiheuttavat enemmän kitkaa, ja ovat syy korkeampaan viskositeettiin. (Anton Paar 2022c.)

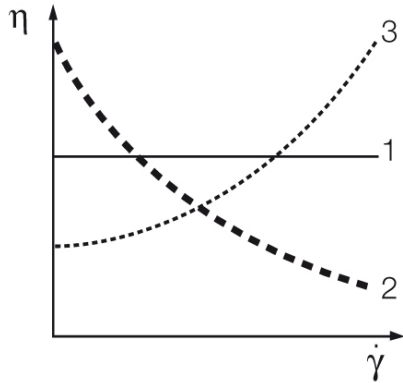
Kaikilla fluideilla on tietty virtausvastus, joka voidaan määrittää viskositeetilla. Leikkausviskositeetin kaava näkyy kaavassa 2. Viskositeetti määritellään seuraavasti: leikkausjännityksen ja vastaavan leikkausnopeuden suhteen arvo on vakio. (Mezger 2011, 27.)

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Kaava 2. Leikkausviskositeetin kaava (Mezger 2011, 27).

Kaavassa η on viskositeetti, τ leikkausjännitys ja $\dot{\gamma}$ leikkausnopeus. Kuvassa 6 puolestaan nähdään kolme eri viskositeetikäyrää. Fluidi 1 on newtonilainen

fluidi, eli sen viskositeetti ei muutu leikkausnopeuden muuttuessa. Fluidi 2 ohenee leikkausnopeuden funktiona ja 3 tihenee leikkausnopeuden funktiona.



Kuva 6. Kolme eri viskositeetikäyrää (Anton Paar 2022a).

Muovit ovat viskoelastisia materiaaleja. Kun niihin kohdistuu leikkausjännitystä, niissä ilmenee viskositeettisiä ja elastisia ominaisuuksia. Muovien viskoelastisuuden elastinen puoli nousee enemmän esiin alhaisemmissa lämpötiloissa. Tällöin niiden molekyyliverkostot ovat jäykempiä. Niiden viskositeetti puolestaan nousee esiin korkeissa lämpötiloissa ja/tai hitaammissa liikkeissä. Niissä molekyyliverkostot ovat taipuisampia ja liikuteltavampia. (Anton Paar 2022a.)

Muovien viskositeetti ohenee leikkausnopeuden funktiona. Tämä johtuu siitä, että levossa polymeeriketjut supistuvat kerämaisiksi. Polymeeriketjujen päät kietoutuvat toistensa ympärille. Kun muoviin kohdistuu leikkausvoimaa, kerämaiset muodot orientoituvat soikeiksi. Tämän seurauksena molekyylit purkautuvat toisistaan. Yksittäisellä molekyylillä on vähemmän virtausvastustusta kuin toisiinsa kietoutuneilla molekyyliylärakenteilla (molecule superstructure). (Anton Paar 2022b.)

Viskoelastisuus otetaan huomioon 3D-tulostuksessa säätämällä suuttimen lämpötilaa, halkaisijaa ja tulostusnopeutta. Muovimateriaali on saatava tiettyyn lämpötilaan, jotta sen viskositeetti olisi tarpeeksi pieni tulostamiseen. Tämä

saavutetaan sekä ekstruuderin lämpöelementeillä että ekstruuderiruuvin pyörimisliikkeen luomalla kitkalla.

Suutinpään liikkeen on oltava tarpeeksi hitaita, jotta sulaan materiaaliin ei kohdistu liian suuria leikkausvoimia. Se ei kuitenkaan voi olla liian hidas, tai tulostuksessa menee liikaa aikaa. Tämän aikana materiaali voi kuumentua liikaa ekstruuderissa, jolloin sen viskositeetti laskee liikaa. Komposiittimateriaali voi pahimmassa tapauksessa palaa, jota tapahtui perehtymisen aikana.

Tulostimen suuttimen halkaisija on oltava sopiva materiaalille ja tulostettavalle kappaleelle. Isojen kappaleiden tulostuksessa isommasta suuttimesta on hyötyä. Tällöin pystytään käyttämään korkeampia tulostuspään liikkeitä, sillä materiaaliin ei kohdistu yhtä isot leikkausvoimat. Ekstruuderilla saa myös työnnettyä enemmän sulaa massaa ulos. Tämä nopeuttaa tulostusprosessia.

3.1.2 Muovien sulakäyttäytyminen

Muovit jaotellaan amorfisiin ja osakiteisiin muoveihin (Kohvakka & Lehtinen 2019, 45). Osakiteiset muovit aloittavat kiteytymisprosessin jäähtyessään. Kiteytyessään molekyyliketjut laskostuvat tiiviiksi rakenteeksi. Muovien kiteisyysaste kertoo, kuinka monta prosenttia sen sisäisestä rakenteesta on kiteytynyt. Loppuosa muovista jää amorfiseksi. Tästä syystä osakiteiset muovit kutistuvat, kun ne jäähtyvät. Yleinen osakiteinen muovi on PP (polypropeeni). (Plasthouse 2018.)

Amorfiset muovit eroavat osakiteisistä niiden sisäiseltä rakenteeltaan. Amorfisella muovilla polymeerin molekyyliketjut ovat sotkeentuneet (entangled) toisiinsa ilman järjestystä. Tämä järjestäytymätön sisäinen rakenne säilyy jäähtyessä. Tästä syystä se kutistuu jäähtyessään vähemmän kuin osakiteiset. Amorfisella muovilla ei ole sulamispistettä, vaan lasisiirtymälämpötila. Tämän lämpötilan alapuolella molekyyliketjujen liike on estynyt. Useimmat PLA-filamentit ovat amorfisia. (Plasthouse 2018.)

Osakiteiset materiaalit ovat haastavampia tulostaa kuin amorfiset. Jäähtyessään ne kutistuvat, minkä seurauksena tulostettu kappale voi irrota tulostusalustasta. Tätä voidaan helpottaa kuumentamalla tulostusalusta ja poistamalla jäähdytys. Tällöin materiaali jäähtyy hitaammin. Hitaammin jäähtyvä materiaali pysyy pidempään pehmeänä, jolloin sen adheesio alustaan säilyy hyvänä. Huono puoli hitaassa jäähtymisessä on materiaalin merkittävämpi kutistuminen, sillä se pystyy luomaan isompia kiteitä. Mitä nopeammin osakiteinen tulostusmassa kuten PP jäähtyy, sitä vähemmän se kiteytyy. Tämä johtuu siitä, että nopea jäähdyttäminen jähmettää polymeerien mikrorakenteet paikalleen ennen polymeeriketjujen järjestäytymistä. (Cousenau 2012, IV.)

Muoviseoksiin lisätään erilaisia täyte-, apu- ja lisäaineita. Ne voivat olla kiinteitä, nestemäisiä tai kaasumaisia aineita. Täyteaineita ovat esimerkiksi kalsiumkarbonaatti tai orgaaninen kuitu. Apuaineita ovat erilaiset voitelu- ja irrotus-aineet. Lisäaineita voi puolestaan olla erilaiset värit, pigmentit ja lujitteet. Aineita lisätään useiden eri syiden vuoksi. Niillä voidaan kasvattaa tilavuutta, muuttaa jäykkyyttä, alentaa kovettumiskutistumaa tai parantaa kemiallisia ominaisuuksia. (Lujitemuovi 2019.)

3.1.3 Muovin käyttö 3D-tulostuksessa

Materiaalista riippuen täyteaineet on otettava huomioon 3D-tulostuksessa käytettävissä lämpötiloissa. Esimerkiksi puukuitua sisältävät materiaalit voivat syttyä palamaan korkeissa lämpötiloissa. On tärkeää löytää jokaiselle materiaalille optimaalinen lämpötila, jossa se on tulostettavaa ilman tulipaloriskiä.

Sekä muovityyppi että sen täyteaineet voivat vaikuttaa tulostusmassan ekstruusion. Materiaali voi tulostuksen alussa ekstruudaantua joko liian nopeasti tai hitaasti. Tämän estämiseksi suutin on valmistettava ennen kappaleen tulostusta. Suuttimen valmistelulla tarkoitetaan vaihetta, jossa tulostusmateriaalia pursotetaan hieman suuttimesta. Tämän avulla varmistetaan

tulostusmateriaalin tasainen virtaus. Yleinen keino valmistella suutin on tulostaa kappaleelle helmat (skirt).

Helmat ovat ohuet kappaleen ympäröivät reunat. Usein helmat tai helmareunat ovat noin 15 mm etäisyydellä kappaleesta, ja niiden avulla ekstruuderin suutin saadaan valmisteltua itse kappaleen tulostusta varten.

Helmojen tulostamisen aikana poistuvat mahdolliset ali- ja yliekstruusiot, jotka voivat johtua materiaalin hitaasta etenemisestä ekstruuderiruuuissa tai suuttimeen pakkautumisesta. Näin itse kappaleeseen ei tule heti tulostuksen alussa tulostusvirheitä.

Täyteaineet voivat vaikuttaa myös alustan tarttuvuuteen. Tämän ratkaisemiseksi on useita keinoja. Yksi näistä ratkaisuista on myös helmojen käyttö. Asettamalla helmojen etäisyyden kappaleesta 0 mm:ksi luodaan tulostettavalle objektille pieni jalusta (brim). Tämä jalusta lisää tulostusalustan kanssa kosketuksessa olevan materiaalin pinta-alaa. Jalusta parantaa kappaleen adheesiota tulostusalustaan.

3.2 Yleiset tulostusmateriaalit

PLA:sta valmistettu filamentti on yleisimpiä 3D-tulostuksessa käytettäviä materiaaleja. Se on biohajoavaa materiaalia. PLA:ta valmistetaan luonnollisista materiaaleista kuten maissitärkkelyksestä. PLA:han pystytään sekoittamaan erilaisia ominaisuuksia muokkaavia täyteaineita. Täyteaineet voivat muuttaa esimerkiksi filamentin ulkonäköä tai vahvuutta. PLA:n hyviä puolia ovat muun muassa sen halpuus, myrkyttömyys ja helppokäyttöisyys tulostuksessa. Se on samalla kuitenkin varsin hauras materiaali. PLA:n kemikaali- ja lämmönkestävyys ovat myös huonommat verrattuna perinteisiin petrokemiallisesti valmistettuihin muoveihin. (All3DP 2021.)

PLA:n lisäksi filamenttitulostuksessa käytetään muun muassa nailonia (PA eli polyamidi), ABS:ää (akryylinitriilibutadienistyreeni) ja PETG:tä (glykolimodifioitu polyeteenitereftalaatti). Näillä kaikilla materiaaleilla on omat

vahvuutensa ja heikkoutensa. Ominaisuuksiensa perusteella ne soveltuvat useiden erilaisten kappaleiden tulostamiseen.

3.3 Biodolomer F40

Biodolomer F40 on seos biohajoavaa PBAT:tä (polybuteeni-adipaattitereftalaatti), PLA:ta ja kalsiumkarbonaattia (CaCO_3). Se on materiaalina valkoista linssimuotoista granulaattia (kuva 7). Biodolomer on tässä työssä käytetyistä materiaaleista helpoiten tulostettavin. Tästä syystä tulostimeen perehtyminen suoritettiin suurimmaksi osaksi sitä käyttäen.



Kuva 7. Biodolomerin granulaattia viivaimen vieressä. Asteikko senttimetreinä.

Helppokäyttöisyytensä ja hyvien reologisten ominaisuuksiensa vuoksi tässä työssä kaikki vertailut pohjataan aina Biodolomerilla valmistettuihin kappaleihin. Biodolomerin tiheys on keskimäärin $1,365 \text{ g/cm}^3$. (Gaia BioMaterials 2018.)

3.4 Formi 3D

Metsäyhtiö UPM:n kehittämässä Formi 3D -granulaateissa on sekoitettu PLA-muoviin selluloosakuitua. Materiaalina se on sylinterimäistä ja vaaleaa granulaattia (kuva 8). Materiaalista tulostettujen kappaleiden pinta on puumaisen karhea.

Selluloosakuidun ansiosta materiaali kutistuu vähemmän kuin puhdas PLA. Selluloosakuidun vuoksi se myös jäähtyy nopeammin. Se on ongelma erityisesti leveissä kappaleissa kutistumisen ja taipumisen vuoksi.

Perehtymisen aikana huomattiin Formi 3D:n tarttuvuuden tulostuspintaan olevan huonompi kuin Biodolomerilla. Tästä syystä se tarvitsi korkeammat lämpötilat ja jalustan. Nämä paransivat sen adheesiota tulostusalustaan. Formi 3D:n tiheys on $1,2 \text{ g/cm}^3$. Se on siis hieman kevyempää Biodolomeriin verrattuna. (UPM Formi 2019.)



Kuva 8. Formi 3D:n granulaattia viivaimen vieressä.

3.5 Arctic Biomaterials PLA-Fi



Kuva 9. PLA-Fi:n granulaattia viivaimen vieressä.

Arctic Biomaterialsin valmistama PLA-Fi on lasikuitulujitettua PLA:ta. Sen kaupp nimi on BSGF40-B2000. Materiaalin tiheys on $1,5 \text{ g/cm}^3$. Biohajoava lasikuitu tuo materiaaliin lujuutta ja lämmönkestävyyttä. (ABMComposite 2022.)
Materiaalina PLA-Fi on vaaleaa karheaa granulaattia. Granulaateissa selvästi näkyy ja tuntuu lasikuitu. Se ei kuitenkaan ärsytä ihoa lasikuidun tavoin.
Kuvassa 9 näkyy lähikuva PLA-Fi:n granulaatista.

3.6 Arctic Biomaterials PLA-Mi



Kuva 10. PLA Mi:n granulaattia viivaimen vieressä.

Toinen materiaali Arctic Biomaterialsilta on PLA-Mi, kauppanimeltään MFA30-B2000. Se on olomuodoltaan samanlainen kuin PLA-Fi. Tässä PLA:han on sekoitettu mukaan mineraaleja. Mineraalit tuovat komposiitista valmistettuihin kappaleisiin lujuutta ja lämmönkestävyyttä. Se sisältää kokonaisuudessaan 75 % biopohjaista materiaalia. Tästä materiaalista muovin osuus on täysin kompostoituvaa. Mineraaliseoksen tarkkoja tietoja ei ole saatavilla. PLA-Mi:n tiheys on $1,5 \text{ g/cm}^3$. (ABMComposite 2022.) Materiaalina se on harmaata granulaattia (kuva 10).

3.7 Durasense 3D Plus 50



Kuva 11. Durasense 3D Plus 50:n granulaattia viivaimen vieressä.

Stora Enson kehittämän Durasense 3D Plus 50 -materiaalin koostumus on hieman samanlaista kuin Formi 3D -materiaalissa. PLA:n sijaan Durasensen muovipohjana toimii PP (Matmatch 2022). Materiaali on ruskeaa ja puumaista granulaattia (kuva 11). Tulostuessa se muistuttaa tekstuuriltaan paljon puuta.

Puukuidun ansiosta PP ei pääse jäähtyessään kutistumaan yhtä paljon kuin esimerkiksi uusio-PP. Teoriassa Durasense 3D soveltuu paremmin 3D-tulostukseen. Sillä on silti sama huono tarttuvuus lasiseen tulostusalustaan kuin normaalilla uusio-PP:llä.

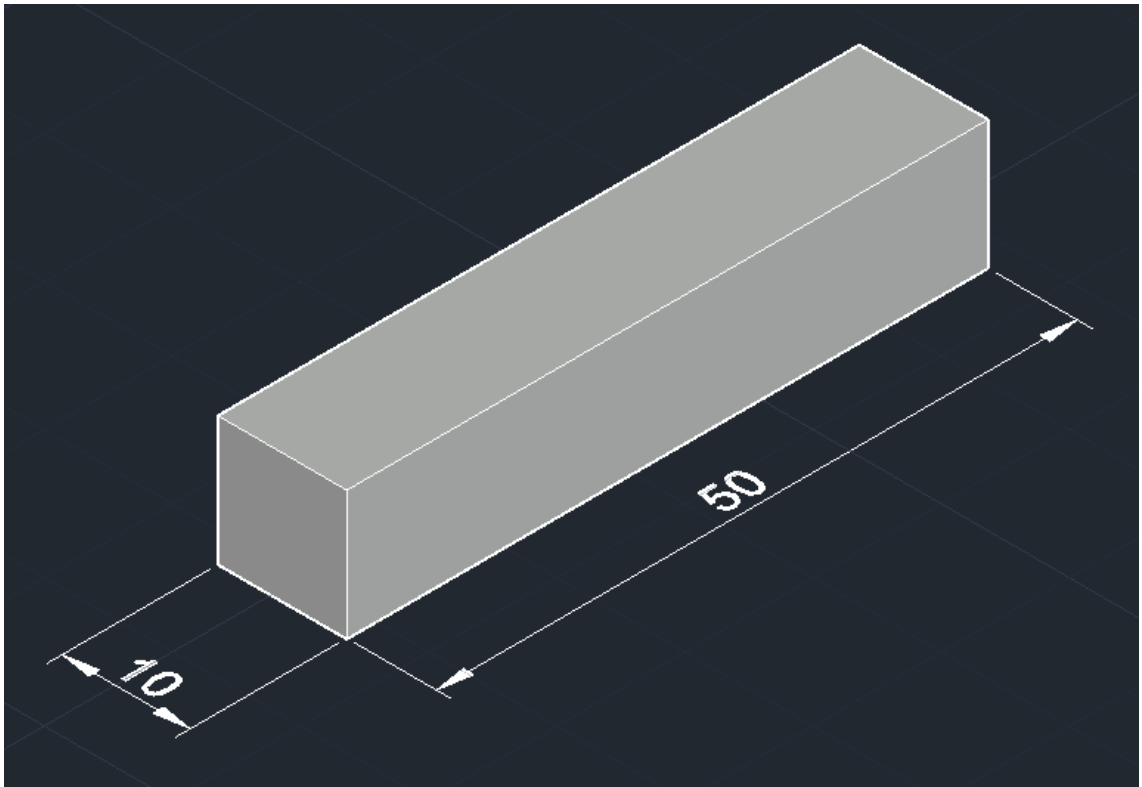
Isoja kappaleita tulostaessa pakkausteipin käyttäminen tulostusalustan peittämiseen oli pakollista. Tässä työssä sitä ei käytetty testien verrannollisuuden säilyttämiseksi. Durasense 3D:n tiheys on $1,1 \text{ g/cm}^3$ (Matmatch 2022). Se on kevyempää kuin Biodolomer.

4 Prosessisuunnitelma

Tässä kappaleessa käydään läpi kaikki suunnitelmaan liittyvät osa-alueet ja mitkä niiden kokonaisosuudet työssä ovat.

4.1 Testikappale

Testikappaleeksi mallinnettiin 5,0 cm x 1,0 cm x 1,0 cm kokoinen kappale (kuva 12). Pienen kokonsa vuoksi se pystyttiin tulostamaan hyvin nopeasti. Tämän avulla nopeiden parametrimuutosten tekeminen oli mahdollista aikarajoitusten puitteissa. Materiaalikulutus oli myös pieni jokaisen kappaleen kohdalla, ja näin ei ollut riskiä joutua keskeyttämään testausta materiaalivajeen vuoksi. Pienen koon ansiosta voitiin myös välttää luvussa 2 mainittu isosuutintulostimen ohjelmistovirhe.



Kuva 12. AutoCADilla tehty testikappale mittoineen, yksiköt millimetreinä.

4.2 Prosessiparametrit

Prosessiparametreihin valittiin jokaiselle materiaalille yhteensä yhdeksän muuttujaa: kolme eri täyttöastetta ja kolme eri suutinkokoa. Täyttöasteiksi valittiin 20 %, 50 % ja 80 %. Ne ovat yleensä kaikista käytännöllisimmät 3D-tulostuksessa ja riittävän eri kohdissa täyttöasteskaalassa.

Tulosten kannalta ei ole merkittävää testata esimerkiksi 100 % tai 5 % täyttöasteita. Ne ovat hyvin epäkäytännöllisiä suurimmalle osalle tulostuksia. 1,0 mm, 1,5 mm ja 2,0 mm suutinkoot puolestaan valittiin sen takia, että ne ovat isosuutintulostimella tulostettaessa käytännöllisimmät. Ne myös sopivat testikappaleen kokoisen objektin tulostamiseen.

4.3 Testiajosuunnitelma

Ajosuunnitelmassa määritettiin kaksi tärkeää kohtaa: aikataulu ja hyväksytyn kappaleen kriteerit. Lista kriteereistä oli lyhyt ja subjektiivinen. Se oli kuitenkin tarpeeksi objektiivinen muiden testausmetodien puuttuessa. Kappaleen piti muistuttaa virtuaalimalliaan mahdollisimman tarkasti.

Tulostettujen kappaleiden piti olla suorakulmaisia. Kappaleessa ei saanut olla suuria tulostusvirheitä, esimerkiksi isoja reikiä tai kerrossiirtymiä. Kappaleen piti kestää käsittelyä hajoamatta. Kaikki kriteerit sekä tulostettavuuden että valmiin kappaleen ulkonäön osilta verrattiin Biodolomerilla tulostettuihin kappaleisiin. Biodolomerin tiedettiin olevan reologialtaan hyvä materiaali 3D-tulostamiseen perehdytyksessä tulleen kokemuksen perusteella.

Taulukko 1. Käytetyt materiaalit, suutinkoot ja täyttöasteet.

Materiaali	Suutinkoko (mm)	Täyttöasteet (%)
BD	2,0	80, 50, 20
	1,5	
	1,0	
ACF	2,0	80, 50, 20
	1,5	
	1,0	
ACM	2,0	80, 50, 20
	1,5	
	1,0	
F3D	2,0	80, 50, 20
	1,5	
	1,0	
D3D	2,0	80, 50, 20
	1,5	
	1,0	

Jokainen materiaali testattiin kolmella suutinkoolla ja kolmella eri täyttöasteella (taulukko 1). Materiaaleja kohden muuttujia tuli yhteensä yhdeksän.

Testikappaleiden tulostuksia oli 45. Kappaleiden tulostamiseen varattiin aikaa n. 1,5 tuntia kappaletta kohden. Siihen sisältyi sekä tulostusparametrien säätäminen että tulostusaika. Asetettu aikaraja johtui isosta näytemäärästä.

Hyväksytyyn kappaleen kriteerit painottuivat testiajon aikana tulostuksen ulkonäköön. Tulostukseen varatun aikarajan aikana tehtiin mahdollisimman monta variaatiota prosessiparametreihin. Lopulta kaikista lähimmäksi päässyt variantti hyväksyttiin ja sen parametrit tallennettiin. Tässä valitun kappaleen edut tulivat hyvin esiin. Kuutiomaisen objektin tulostusjälkeä on helppo tarkastella esimerkiksi siitä, ovatko sen sivut suorat.

Tulokset kirjattiin Excel-tiedostoon mahdollisten parametrivariaatioiden lisäksi. Näitä olivat esimerkiksi kerroskorkeuden muutos, syöttönopeuden vaihtaminen ja lämpötilan nostaminen. Excelliin kirjattiin myös ne parametrit, joita ei tarvinnut muuttaa. Näin materiaalien parametreja pystyttiin helpommin vertailemaan. Tilan säästämiseksi jokaiselle materiaalille annettiin oma testikoodi.

Testikoodeja käytetään myös kuvioissa, jotka esittelevät tuloksia. Taulukossa 2 listataan käytetyt testikoodit.

Taulukko 2. Materiaaleista käytety testikoodit.

Testikoodi	Materiaali
BD	Biodolomer F40
ACF	Arctic Biomaterials PLA-Fi
ACM	Arctic Biomaterials PLA-Mi
F3D	Formi 3D
D3D	Durasense 3D Plus 50

5 Testiajojen tulokset

Tässä luvussa käydään läpi materiaalien testiajoista saadut olennaiset tulokset. Näihin kuuluvat muun muassa erot lämpötiloissa, ekstruusiokertoimessa ja valmiin kappaleen massoissa. Luvussa käsitellään lopuksi myös yleisiä huomioita tulostimen toiminnasta. Kaikkien materiaalien parametrit on listattu kaksiosaiseen liitteeseen 1. Sinne on merkitty olennaisimmat parametrit tulostuksen onnistumisen kannalta: ekstruuderin lämpötila, tulostusalustan lämpötila, ekstruusiokerroin, tulostusnopeus ja kerroskorkeus. Liitteessä olevat termit noudattavat samoja koodeja kuin taulukko 2:ssa mainitut testikoodit.

5.1 Biodolomer F40

Kaikista testattavista materiaaleista Biodolomer osoittautui parhaimmaksi tulostusmateriaaliksi. Sen erinomainen tarttuvuus tulostusalustaan yhdistettynä sen hyvään kerrostarttuvuuteen näkyi siitä tulostettujen kappaleiden lähes virheettömässä ulkonäössä. Erityisesti 1,5 mm ja 1,0 mm suuttimilla tulostetut kappaleet vastasivat lähes täydellisesti virtuaalimalliaan (kuvat 13 ja 14).

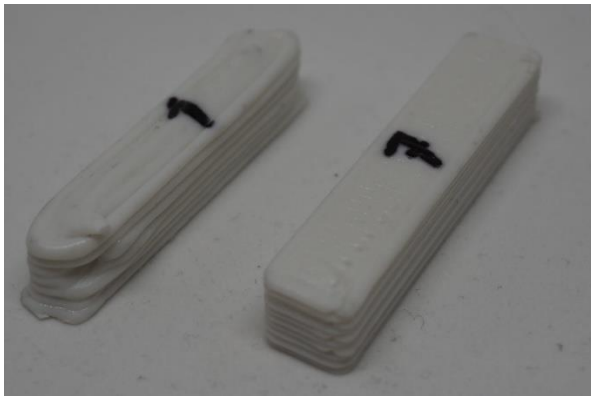


Kuva 13. Biodolomerista 1,5 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.



Kuva 14. Biodolomerista 1,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

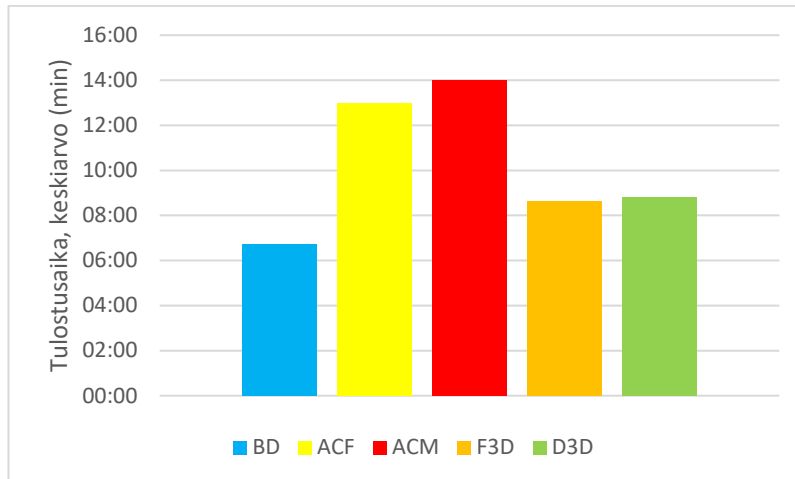
Väljemmän aikataulun puitteissa olisi myös 2,0 mm suuttimella tulostetun kappaleen asetukset saatu hienosäädettyä vastaamaan laadultaan pienempiä suutinkokoja (kuva 15). Paranneltavaa olisi esimerkiksi tulostusnopeudessa.



Kuva 15. Biodolomerista tulostetut testipalikat, joissa molemmissa on 80 %:n täyttöaste. Vasemmalla 2,0 mm ja oikealla 1,0 mm suuttimella tulostettu.

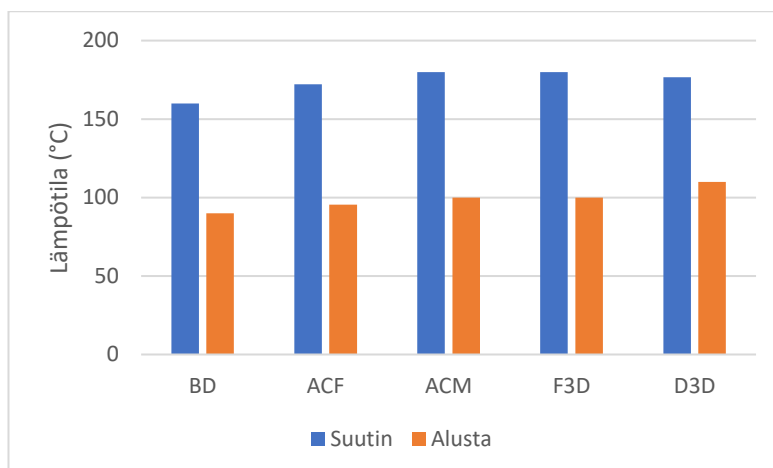
Muiden kappaleiden kohdalla tehtiin pieniä hienosäätöjä asetuksiin kosmeettisten aspektien parantamiseksi. Esimerkiksi ekstruusiokerrointa kasvatettiin, jotta saatiin päälliskerroksen aukot täytettyä. Testitulokset kertovat Biodolomerin hyvästä reologisesta suorituskyvystä.

Biodolomerilla tulostettujen kappaleiden tulostusprosessin kesto (6 min 44 s) oli kaikkia muita materiaaleja lyhyempi (kuvio 1). Materiaalin sietäessä suurempia leikkausvoimia sillä voi tulostaa kappaleen korkeammalla tulostusnopeudella.



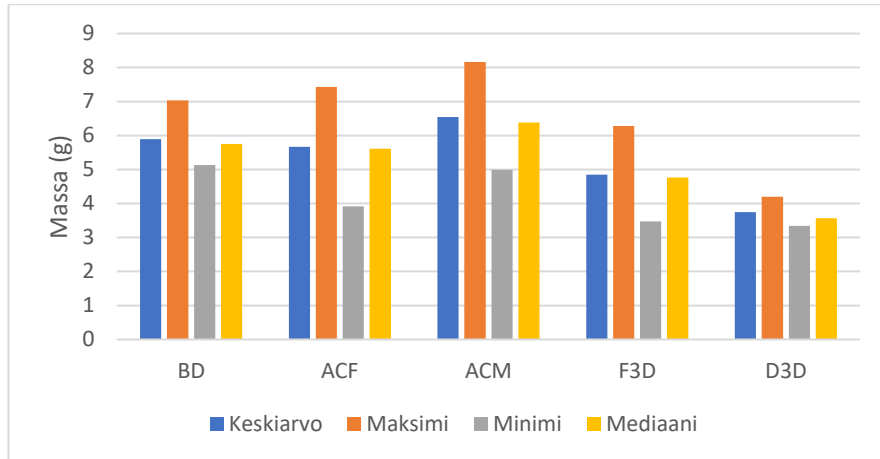
Kuvio 1. Materiaalivalinnan vaikutus tulostuksen kestoon.

Biodolomerin vaatimat lämpötilat (160 °C suuttimelle ja 90 °C alustalle) olivat myös muita testattuja materiaaleja pienempiä (kuvio 2). Tämä sekä lyhentää esivalmisteluita lämmitysajan pienentyessä että säästää energiaa. Hyvän tarttuvuuden vuoksi tulostuksen aikana pystyttiin käyttämään jäähdytystä helpottamaan kappaleen käsittelyä. Lähes kaikkien muiden materiaalien kohdalla jäähdytys oli kytkettävä pois niiden huonon tarttuvuuden vuoksi. Biodolomerin jäähdytys aloitettiin 2. kerroksen aikana 25 %:sella teholla.



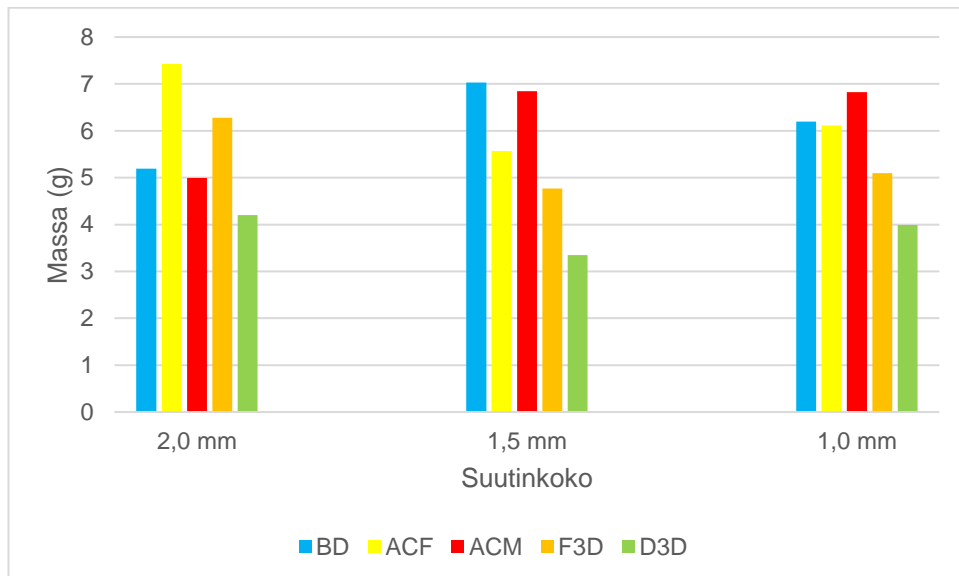
Kuvio 2. Suuttimen ja alustan lämpötilojen keskiarvot eri materiaaleille.

Biodolomerilla tulostetut kappaleet olivat keskimäärin toiseksi raskaimpia (kuvio 3). Siitä valmistetut kappaleet painoivat keskimäärin 5,9 grammaa. Tämä johtuu todennäköisesti Biodolomerin kalsiumkarbonaattipitoisuudesta.



Kuvio 3. Kappaleiden massojen keskiarvot, maksimit, minimi ja mediaanit.

Se on oletettavasti tiheämpää materiaalia kuin muissa aineissa käytetyt täyteaineet. Raskaimmat Biodolomerista tehdyt kappaleet olivat 1,5 mm suuttimella ja 80 %:sella täyttöasteella tulostetut objektit (kuvio 4).



Kuvio 4. Tulostettujen kappaleiden massat 80 %:sella täyttöasteella.

Syyt suurempaan massamäärään ovat suuri täyttöaste ja suutinkoko. Kappaleesta ei tule sitä raskaampaa mitä suurempi suutinkoko on, sillä suuremmilla suuttimilla Simplify3D ohjaa ekstruuderin tulostamaan väljemmin. Suuremmalla ekstruusioleveydellä tulostusmassa leviää laajemmalle alueelle. Tämä massa ei ole yhtä tiheää kuin samaan kohtaan pienemmällä ekstruusioleveydellä tulostettu tiiviisti pakkautunut massa.

5.2 Formi 3D

Biodolomeriin verrattuna Formi 3D:llä oli huonompi tarttuvuus alustaan. Tämä johtui oletettavasti selluloosakuidusta. Huonon tarttuvuuden korjaamiseksi korotettiin sekä ekstruuderin että alustan lämpötiloja.



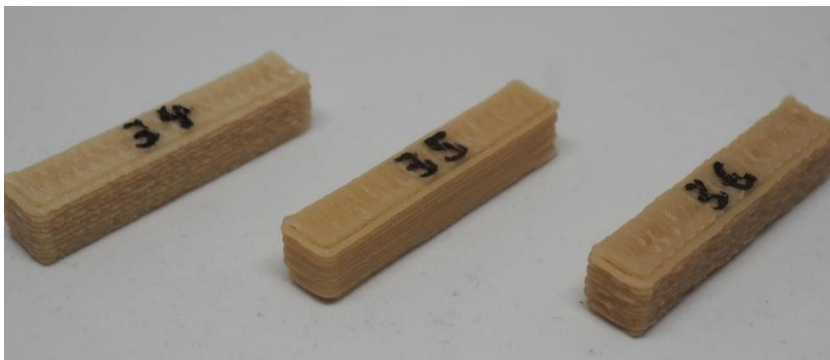
Kuva 16. Formi 3D:stä 2,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

Muuten Formi 3D tulostui hyvin. Siitä tehdyt kappaleet olivat kestäviä ja ulkonäöllisesti lähes identtisiä virtuaalimallin kanssa (kuvat 16, 17 ja 18).



Kuva 17. Formi 3D:stä 1,5 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

Materiaali on myös hyvin optimisoitu tulostuslämpöön. Sen sisältämä selluloosakuitu ei pala tulostuksen aikana. Tulostetuilla kappaleilla oli miellyttävä puumainen tekstuuri.



Kuva 18. Formi 3D:stä 1,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

Formi 3D:stä tulostetut kappaleet olivat kevyempiä (4,8 g) kuin Biodolomerin vastaavat (kuvio 3). Tämä todennäköisesti johtuu Formin sisältämästä selluloosakuidusta. Se on kevyempää materiaalia kuin Biodolomerin kalsiumkarbonaatti.

Formi 3D pitää myös olla lämpimämpää kuin Biodolomer ollakseen tulostettavissa. Alunperin testit aloitettiin samalla lämpötilalla kuin Biodolomerilla. Se oli kuitenkin liian alhainen Formi 3D:lle. Sen kerrostarttuvuus ja adheesio alustaan olivat huonot alhaisemmassa lämpötilassa. Tästä johtuen sekä suuttimen (180 °C) että tulostusalustan (100 °C) lämpötilaa nostettiin hieman. Tämä paransi tarttuvuutta merkittävästi.

Formi 3D oli positiivisista aspekteista huolimatta vaativampi materiaali tulostaa kuin Biodolomer. Vaativuus näkyy useissa tulostusasetuksissa. Tulostettaessa Formi 3D:llä suuttimen tekemät liikkeet säädettiin hitaammaksi (15 mm/s) kuin Biodolomerilla (19 mm/s). Näin materiaaliin ei kohdistunut liian voimakkaita leikkausvoimia. Leikkausvoimien pienentyessä se pystyi tarttumaan tulostusalustaan.

Tästä johtuen Formilla tulostaessa tulostuksen kesto (8 min 38 s) oli hieman suurempi kuin Biodolomerilla (kuvio 1). Formi 3D vaati kuitenkin keskimäärin

pienemmän ekstruusiokertoimen (0,88) kuin Biodolomer (0,92) tarttuakseen tulostusalustaan. Isompi ekstruusiokerroin tekee tulostetun kappaleen pohjan pinta-alasta hieman suuremman. Se parantaa sen mahdollisuuksia pysyä kiinni alustassa tulostuksen aikana.

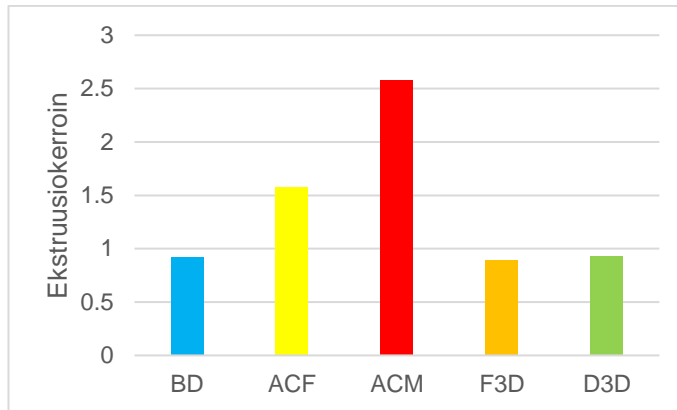
5.3 Arctic Biomaterials PLA-Fi



Kuva 19. Reunoissa olevia tulostusvirheitä PLA-Fi:stä valmistetussa kappaleessa.

Arctic Biomaterialsin PLA-Fi, testinimikkeenä lyhyesti ACF, osoittautui heti haastavammaksi materiaaliksi. Se oli Biodolomeriin verrattuna jäykempää ja tarttui huonommin. Siitä tehdyissä kappaleissa oli myös lukuisia pieniä kosmeettisia virheitä (kuva 19).

Tulostaessa jäähdytys oli kytkettävä pois. Muuten PLA-Fi jäähdyi liian nopeasti ja sen tarttuvuus huononi merkittävästi. Myös ekstruusiokerrointa oli nostettava. Se oli kappaleita tulostettaessa yleensä korkeampi (1,58) kuin Biodolomerilla (kuvio 5).



Kuvio 5. Materiaalien ekstruusiokertoimien keskiarvot.

Tulostuksen kesto oli myös merkittävästi pidempi (12 min 58 s) kuin Biodolomerilla (kuvio 1, s. 36). Pidempi kesto kertoo materiaalin vaativuudesta. Materiaali vaati myös Formi 3D:n tavoin korkeammat tulostuslämpötilat (172 °C suuttimelle ja 96 °C alustalle). Niitä nostamalla kerrostarttuvuus ja adheesio tulostusalustaan pysyi tarpeeksi hyvänä tulostuksen onnistumisen kannalta.

Materiaali osoittautui tarttuvuutensa osalta haastavaksi 1,0 mm suuttimella. Sen kerroskorkeus oli pakko alentaa 0,8 mm:iin verrattuna Biodolomerin ja muiden materiaalien 1,0 mm:iin.

Tulostuksen aikana vaihdettiin myös tulostettavien kerroksien aloituspiste optimaalisesta satunnaiseen. Tämän asetusmuutoksen myötä suutin valitsi aina kerroskohtaisesti satunnaisen aloituskohdan tulostukselle. Optimaalisella asetuksella suutin aloitti tulostuksen aina samasta kohdasta. Tämä kuitenkin aiheutti tulostuksen loppuvaiheessa kappaleen kerrosten pullistumisen yläreunoista. Satunnainen aloituspiste korjasi tämän ongelman.



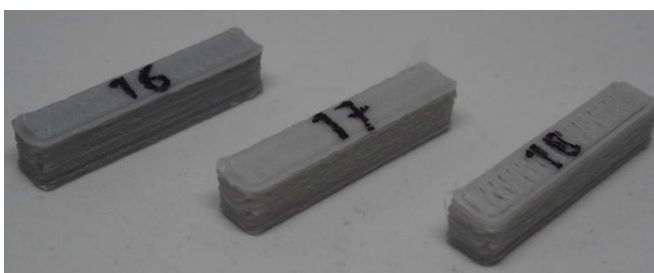
Kuva 20. PLA Fi:stä 2,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

Näistä parametrimuutoksista ja muista haasteista huolimatta PLA Fi:stä onnistuttiin tulostamaan hyviä kappaleita (kuvat 20, 21 ja 22).



Kuva 21. PLA Fi:stä 1,5 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

Materiaalina se sopii hyvin 3D-tulostamiseen. Siitä tulostetut kappaleet olivat hyvin kestävä.



Kuva 22. PLA Fi:stä 1,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

Ne eivät aiheuttaneet käsiteltäessä minkäänlaista reaktiota paljaalle iholle lasikuidustaan huolimatta.

5.4 Arctic Biomaterials PLA-Mi

Toinen komposiitti Arctic Biomaterialsilta oli PLA-Mi, testinimikkeenä ACM. Lasikuituversioon verrattuna PLA-Mi oli haastava materiaali tulostaa. Haastavuus johtui enimmäkseen sen huonosta tarttuvuudesta. Sen adheesio tulostusalustaan oli heikko. Tämän vuoksi sen asetusten pohjana käytettiin aiemmin hyväksi todettuja Formi 3D:n parametreja.



Kuva 23. Aukkoinen PLA-Mi:stä valmistettu testikappale.

Lukuisten yritysten jälkeen saatiin ensimmäiselle testille parametrit, jolla saatiin tyydyttävä tulos. Tästä huolimatta kappaleen päälliskerros jäi hyvin aukkoiseksi (kuva 23). Sitä ei onnistuttu korjaamaan asetuksia muuttamalla.

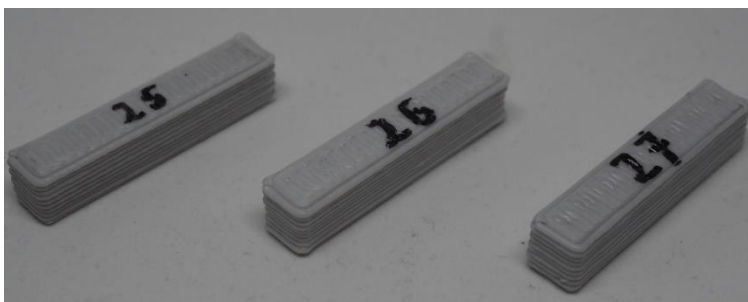
Kappale tulostettiin epähuomiossa korkeammalla nopeudella (90 mm/s) kuin aiemmat testikappaleet. Se ei heikentänyt adheesiota alustaan. Tästä huolimatta seuraavissa kappaleissa palattiin silti varmuuden vuoksi hitaampaan nopeuteen (15 mm/s).

Huono tarttuvuus johtuu todennäköisesti PLA-Mi:n mineraalipitoisuudesta. Sillä on eri ominaisuudet kuin Formi 3D:n selluloosakuidulla, Biodolomerin kalsiumkarbonaatilla ja PLA-Fi:n lasikuidulla. Nämä muut täyteaineet eivät merkittävästi vaikuttaneet materiaalin adheesioon alustaan.

Vaikuttavia tekijöitä voi olla useita. Mineraalisekoituksen konsentraatio voi olla PLA-Mi:ssä liian korkea, partikkelikoko liian suuri tai jokin muu asia heikentää PLA:n tarttuvuutta. Huono tarttuvuus näkyy siinä, että materiaali tarvitsee suuren ekstruusiokertoimen. Se on PLA-Mi:llä kaikista testimateriaaleista suurin (2,58) (kuvio 5, s. 44).

Suuri ekstruusiokerroin on tarpeellinen, mikäli halutaan parantaa kappaleen tarttuvuutta alustaan kasvattamalla pohjakerroksen pinta-alaa. Käytetty mineraaliseos on selvästi raskaampaa kuin aikaisempien materiaalien

kalsiumkarbonaatti, lasi- ja selluloosakuitu. Tämä näkyi PLA-Mi:stä tulostettujen kappaleiden massassa (6,54 g), jotka olivat kaikista suurimmat (kuvio 3, s. 37).



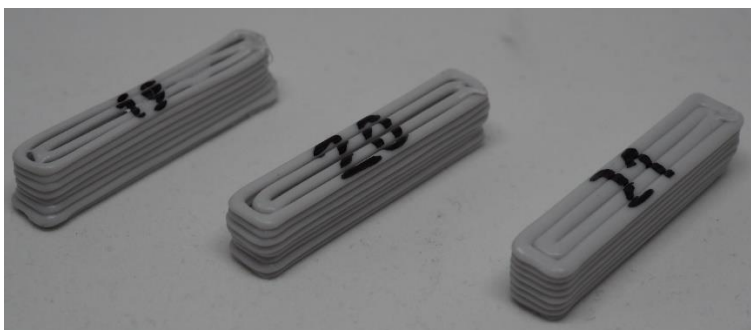
Kuva 24. PLA Mi:stä 1,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

Tulostusajat (14 min) olivat kaikista testatuista materiaaleista pisimmät (kuvio 1, s. 36). Tämä johtui hitaammista suutinliikkeistä ja muista parametrimuutoksista.



Kuva 25. PLA Mi:stä 1,5 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

Materiaali soveltuu välttävästi 3D-tulostamiseen. Sillä saa tulostettua kestäviä virtuaalimalliaan muistuttavia kappaleita (kuvat 24, 25 ja 26).



Kuva 26. PLA Mi:stä 2,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

Halutun tuloksen saavuttaminen on kuitenkin hyvin aikaa vievää ja haastavaa. Se vaatii räätälöidyt parametrit, jotta tulostus onnistuisi. Sopivilla parametreilla PLA-Mi:llä pystyy silti saavuttamaan tyydyttävän lopputuloksen.

5.5 Durasense 3D Plus 50

Kaikista testatuista materiaaleista Durasense 3D oli haastavin tulostaa. Sillä oli huono tarttuvuus tulostuspintaan lukuisista parametrimuutoksista huolimatta. PP-pohjainen Durasense ei tartu helposti mihinkään muuhun kuin PP:hen. Testien aikana tulostusalustaa ei tällä materiaalilla päällystetty. Pinnoite olisi vääristänyt testiympäristöä ja sitä kautta siitä saatuja tuloksia.

Durasense 3D:n isoimmat ongelmat olivat sen nopea jäähtyminen ja materiaalin kuivuus. Se oli sulana hyvin murenevaa ja haurasta. Sen leikkausvoimien kesto oli heikko. Myös materiaalin tarttuvuus oli huono. Tarttuvuuden parantamiseksi nostettiin lämpötiloja paljon (177 °C suuttimelle ja 110 °C alustalle) Biodolomerin tulostusparametrejä korkeammaksi (kuvio 2, s. 37). Lopulliset tulostetut kappaleet olivat hyvin yliekstruudatun näköiset, sillä ekstruusiokerroksen kohottaminen (0,93) oli ainoa tapa saada materiaali tarttumaan kiinni tulostusalustaan.

Durasense 3D:n ekstruusiokerroin oli tästä kohotuksesta huolimatta vain muutaman sadasosan korkeampi kuin Biodolomerin ekstruusiokerroin. Biodolomerilla tulostetuissa kappaleissa ei kuitenkaan keskimäärin ole yliekstruudauksen jälkiä. Ero johtuu todennäköisesti Durasense 3D:n epätasaisemmasta sulavirrasta, jolloin materiaali ei virtaa tasaisesti suuttimesta koko tulostuksen ajan.



Kuva 27. Durasensestä 2,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

Kuvissa 25, 26 ja 27 näkyy myös materiaalin epätasainen sulavirtaus ryppyisenä tulostusjälkenä.



Kuva 28. Durasensestä 1,5 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

Yliekstruusio ei aina toiminut, sillä kappaleet irtosivat usein tulostuksen loppupuolella. Tämä johtui siitä, että kappaleet käyristyivät jäähtyessään.



Kuva 29. Durasensestä 1,0 mm kokoisella suuttimella tulostetut testipalikat.

PP kutistuu todella paljon jäähtyessään, sillä se on osakiteinen muovi. Vaikka Durasensen puukuitupitoisuus hieman estikin materiaalin kiteytymistä, se ei silti pysäyttänyt sitä.

Lämpötilojen nostamisessa oli myös ongelmallista tulipaloriski. Durasensen sisältämä puukuitu paloi tulostuslämpötilassa. Tämän pystyi havainnoimaan suuttimesta nousevasta hennosta savusta ja palaneen puun hajusta. Durasense 3D oli siis myös paloturvallisuusriski, kun sillä tulostettiin.

Durasense 3D:n positiivinen ominaisuus oli sen keveys. Siitä tulostettujen kappaleiden massat olivat kaikista materiaaleista kevyimmät (3,74 g), kuten kuvioista 3 (s. 37) näkyy. Lopulliset kappaleet olivat myös hyvin kestäviä. Yliekstrudaantuneet kerrokset olivat tiiviisti pakkaantuneet toisiinsa kiinni.

Durasense 3D Plus 50 ei ole reologialtaan sopiva materiaali kappaleiden tulostamiseen. Sen huono kerrostarttuvuus oli sen isoin ongelma, mutta muita huonoja puolia olivat muun muassa materiaalin palaminen siinä lämpötilassa, jossa se on tulostettavaa.

Jokaisen tulostuskerran päätteeksi materiaali oli poistettava täysin ekstruuderista tulipaloriskin välttämiseksi. Tästä aiheutui merkittävä materiaalihukka. Näin ei tarvinnut toimia Formi 3D:n kanssa, sillä se ei sisältänyt samanlaisia matalassa lämpötilassa leimahtavia yhdisteitä.

Materiaalina Durasense 3D oli liian kuiva, mikä vaikutti edellämainittuihin ominaisuuksiin. Testauksien aikana kerrostarttuvuutta yritettiin kompensoida nostamalla ekstruusiokerrointa ja alustan lämpötilaa, mikä oli tarpeellista etenkin 1,0 mm suuttimella. Tämä johti kuitenkin yliekstruusioon, jonka vuoksi lähes kaikki tulostetut kappaleet hylättiin.



Kuva 30. Durasense 3D:stä (vas) ja Formi 3D:stä (oik) 1,0 mm suuttimella ja 50 %:n täyttöasteella tulostetut testikappaleet.

Kuvassa 30 verrataan Durasense 3D:llä ja Formi 3D:llä valmistettuja kappaleita keskenään. Molemmista valmistetut kappaleet muistuttavat virtuaalimallia, mutta Durasense 3D:llä oli paljon enemmän reologisia virheitä. Kompleksimman tai suuremman kappaleen tulostuksessa Durasense epäonnistuisi.

5.6 Muita huomioita

Materiaalitestausten aikana havaittiin myös muita Aspekteja parametreistä ja materiaaleista. Huono tarttuvuus näkyi helmareunojen määrässä, ja niiden etäisyydestä kappaleesta. Helmoja ja niiden pienempää etäisyyttä kappaleesta tarvittiin enemmän mitä huonompi tarttuvuus oli. Taulukossa 3 näkyy, miten kaikista vaikeiten tulostettavalla materiaalilla oli myös suurin helmamäärä ja pienin etäisyys.

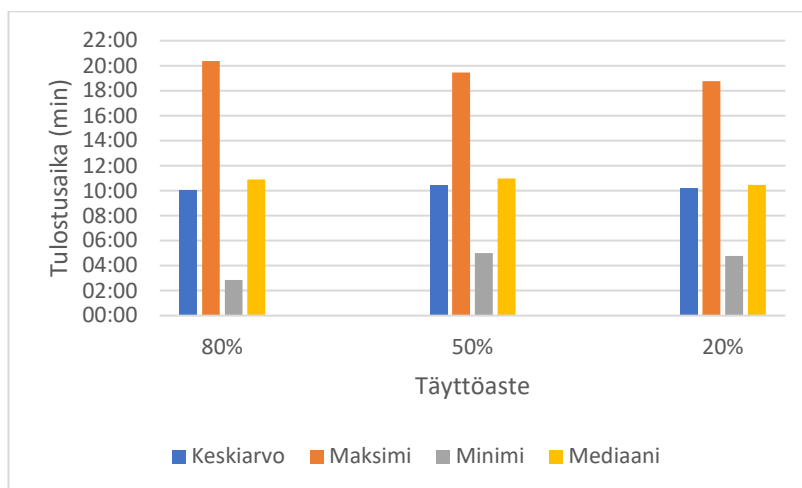
Taulukko 3. Käytettyjen helmareunojen määrä materiaalikohtaisesti.

Helmareunojen määrä	Etäisyys kappaleesta (mm)
BD	2 15
ACF	2 15
ACM	2 0
F3D	2 0
D3D	3 0

Muihin materiaaleihin verrattuna PLA-Mi:llä, Formi 3D:llä ja Durasense 3D:llä oli merkittävästi huonompi tarttuvuus. Tästä johtuen niistä tehtyjen kappaleen

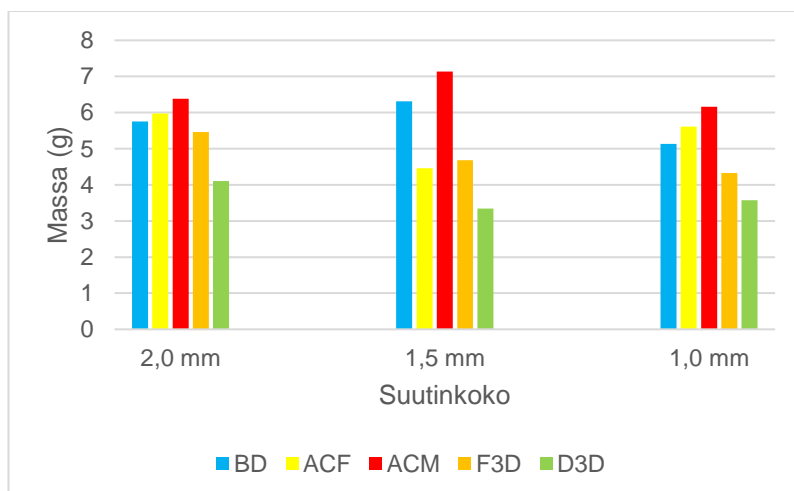
ympärille tulostettavan helman oli pakko olla kiinni kappaleessa, jotta se pysyisi paikallaan tulostuksen aikana.

Täyttöaste ei näyttänyt vaikuttavan tulostuksen keston. Kuviossa 6 nähdään, että kaikki arvot 80 %, 50 % ja 20 % täyttöasteen väleillä ovat melkein identtiset.



Kuvio 6. Täyttöasteen vaikutus tulostuksen keston.

Suutinkoon vaikutus Biodolomerista ja PLA-Mi:stä tulostettujen kappaleiden massoihin oli yllättävä. Kuten kuvioissa 7 näkyy, suurimmaksi osaksi 1,5 mm kokoisella suuttimella nämä materiaalit tulostuivat massoiltaan suuremmiksi huolimatta täyttöasteesta. Sama toistui 50 %:sella ja 80 %:sella täyttöasteella.

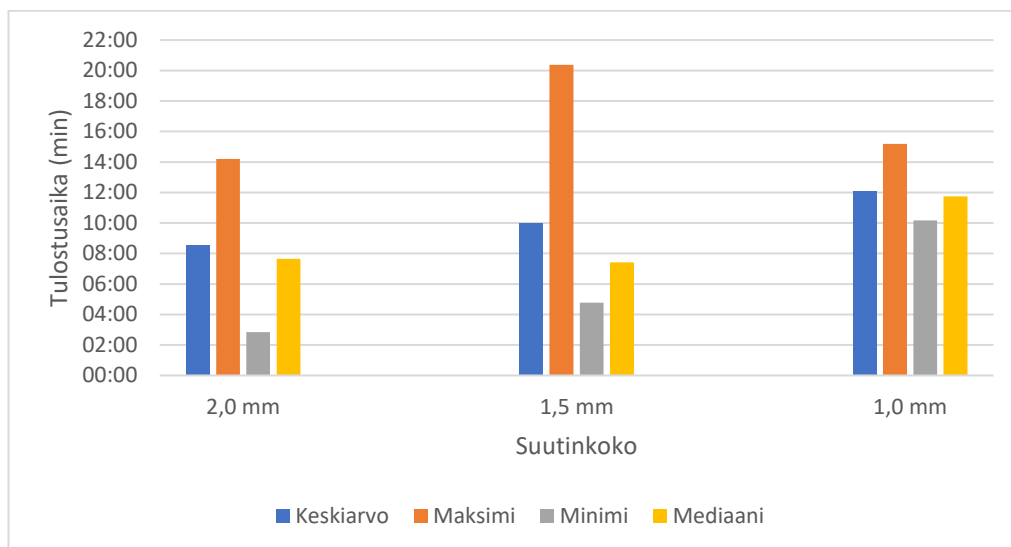


Kuvio 7. Tulostettujen kappaleiden massat 20 %:sella täyttöasteella.

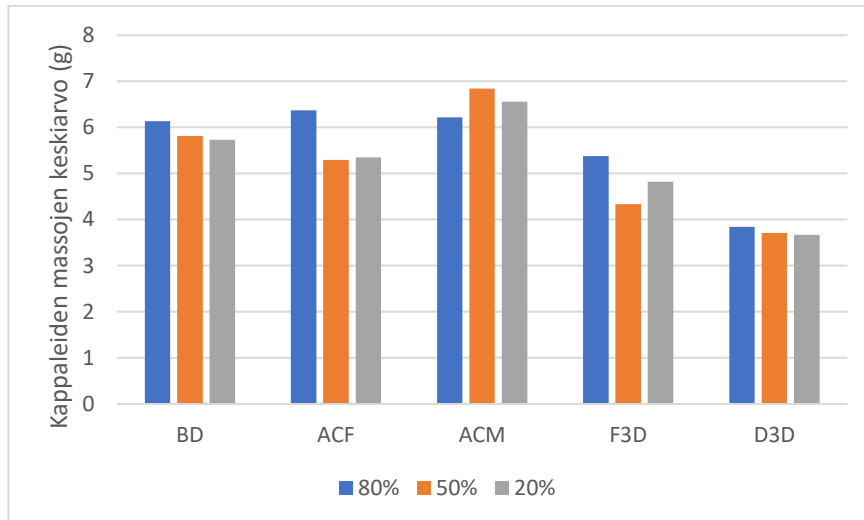
Tämä on yllättävää muovin viskoelastisuuden vuoksi. Teoriassa mitä suurempi suutin on, sitä paremmin materiaali virtaa. Näyttäisi kuitenkin siltä, että 1,5 mm suutin oli optimaalisen kokoinen Biodolomerille ja PLA-Mi:lle. Materiaaleihin oli kohdistuneet mahdollisesti sopivat leikkausnopeudet, ja siksi niistä tehtyjen kappaleiden massat olivat suurimmat.

Tämä voisi johtua esimerkiksi Biodolomerin ja PLA-Mi:n täyteaineiden partikkelikoosta. Formi 3D:n ja Durasense 3D:n kohdalla suutinkoko näyttäisi korreloivan suoraan kappaleen massaan. Niissä partikkelikoko on mahdollisesti heikentänyt materiaalin virtausta pienemmillä suutinkoilla.

Testiajoista saatiin myös ennalta arvattavia tuloksia. Näyttäisi siltä, että pienempää suutinta käyttäessä tulostusaika pitenee. (kuvio 9). Tämä ilmiö johtuu siitä, että pienemmällä suuttimella vähemmän tulostusmateriaalia pääsee ekstruudaantumaan suuttimesta kuin suuremmalla suuttimella.



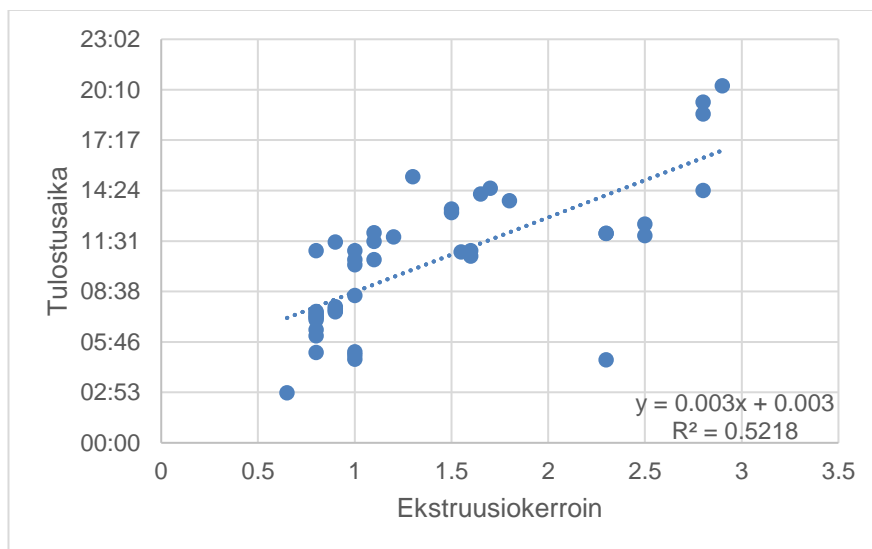
Kuvio 8. Suutinkoon vaikutus tulostuksen keston.



Kuvio 9. Täyttöasteen vaikutus kappaleen massaan.

PLA-Mi:tä lukuun ottamatta pienempi täyttöaste pääsääntöisesti korreloi pienemmän massan kanssa. Kuvio 9 näkyy, miten monella materiaalilla 50 %:n tai 20 %:n täyttöasteella tulostettu kappale oli kevyempi kuin 80 %:n täyttöasteella.

Suurempi ekstruusiokerroin puolestaan näyttää hieman pidentävän tulostuksen kestoa, kuten kuvio 10 näkyy. Kuvion alareunassa on lineaarisen suuntaviivan korrelaatiokerroin.



Kuvio 10. Ekstruusiokerroimen vaikutus tulostuksen kestoon.

6 Johtopäätökset

Tähän luvussa käsitellään johtopäätöksiä materiaalitestauksien tuloksista, ja listataan mahdollisia kehitysehdotuksia niiden perusteella.

6.1 Biodolomer F40

Sekä perehdytyksen että testiajojen aikana havaittiin, että Biodolomer on ideaali materiaali 3D-tulostukseen. Se tulostuu matalissa lämpötiloissa, kutistuu jäähtyessään hyvin vähän, ja kestää erinomaisesti suuria leikkausvoimia. Siitä valmistetut kappaleet ovat kestäviä, miellyttävän tuntuisia ja biohajoavia.

Materiaalina Biodolomer on optimaalinen, ja sitä ei tarvitse parannella 3D-tulostusta varten. Biodolomerista valmistetut kappaleet tulostettiin 160 °C:lla ekstruuderilla ja 90 °C:lla tulostinalustalla. Materiaalille asetettu ekstruusiokerroin oli keskimäärin 0,92 ja tulostusnopeus 19 mm/s.

6.2 Formi 3D

Tämä materiaali vaikutti alustavasti haasteelliselta verrattuna Biodolomeriin huonon tarttuvuuden vuoksi. Parametrisäätöjen jälkeen silläkin tulostaminen onnistui. Lämpöparametreiksi todettiin 180 °C:isen ekstruuderin ja 100 °C:isen tulostinalustan olevan hyvät. Materiaalille asetettu ekstruusiokerroin oli keskimäärin 0,89 ja tulostusnopeus 15 mm/s.

Komposiitin positiivinen puoli on sen lähes olematon kutistuminen. Sen Biodolomeria huonompi tarttuvuus korjaantuu hitaammilla tulostusnopeuksilla. Sillä saa hyvin tulostettua isojakin kappaleita.

Tulostusta varten Formi 3D:tä saattaisi pystyä parantamaan tarttuvuutta lisäävällä täyteaineella, mutta se ei sitä välttämättä tarvitse. Sen sisältämän selluloosakuidun konsentraation laskeminen ratkaisisi myös todennäköisesti tarttuvuusongelman.

6.3 Arctic Biomaterials PLA-Fi

Jäykkyydestä ja huonosta tarttuvuudesta huolimatta PLA-Fi on täysin toimiva tulostusmateriaali. Tulostukset suoritettiin keskimäärin 172 °C:lla ekstruuderilla ja 96 °C:lla tulostinalustalla. Materiaalille asetettu ekstruusiokerroin oli keskimäärin 1,58 ja tulostusnopeus 15 mm/s.

Parametrien hienosäätämällä ja mahdollisesti esikäsittelemällä tulostusalustan tästä komposiitista pystyy hyvin tulostamaan erilaisia kappaleita.

Tulostusmassan kestävyys on erinomainen, ja se ei myöskään lasikuidun karheudesta huolimatta aiheuta käsiteltäessä mitään reaktioita iholle.

Materiaalia voisi mahdollisesti parantaa jonkinlaisella lisäaineella, joka pienentäisi sen viskositeettiä tulostuslämpötilassa. Tämä myös mahdollisesti helpottaisi tarttuvuutta tulostusalustaan.

6.4 Arctic Biomaterials PLA-Mi

PLA-Mi osoittautui hyvin hankalaksi materiaaliksi, ja se kaipaa paljon hienosäätöä. Valmiit kappaleet ovat hyvin kestäviä ja neutraalin tuntuisia kädellä, mutta tarttuvuutta alustaan on parannettava. Ongelmakohtiin on olemassa useita ratkaisuja.

Mikäli mineraalisekoituksen konsentraatio on liian korkea, voisi sitä pienentää. Tämä ratkaisisi materiaalin liian nopean jäähtymisen ja huonon tarttuvuuden, sillä PLA:n konsentraation kasvaessa komposiitissa sen positiiviset reologiset puolet tulisivat paremmin esiin.

Mikäli syy huonoon tarttuvuuteen on liian suuri partikkelikoko, voisi sen ratkaista jauhamalla seoksen pienemmäksi. Materiaalilla on paljon potentiaalia. Korjaustoimenpiteiden jälkeen sillä todennäköisesti pystyisi tulostamaan komplekseja ja kestäviä kappaleita ongelmitta. PLA-Mi:stä valmistetut kappaleet tulostettiin 180 °C:lla ekstruuderilla ja 100 °C:lla tulostinalustalla. Materiaalille asetettu ekstruusiokerroin oli keskimäärin 2,58 ja tulostusnopeus keskimäärin

23 mm/s. Mikäli ensimmäisen testikappaleen nopeutta ei lasketa mukaan, keskimääräinen nopeus olisi 15 mm/s.

6.5 Durasense 3D Plus 50

Durasense 3D on materiaalina aivan liian kuivaa ja haurasta 3D-tulostamiseen. Pieni tiheys ja hyvä lujuus tulostetuissa kappaleissa ovat hyviä ominaisuuksia. Ne eivät kuitenkaan riitä kompensoimaan huonoa tarttuvuutta ja materiaalin palamista tulostamisen aikana. Kappaleet tulostettiin keskimäärin 177 °C:lla ekstruuderilla ja 110 °C:lla tulostinalustalla. Ekstruusiokerroin oli 0,93 ja tulostusnopeus 15 mm/s.

Adheesio-ongelmat korjaantuisivat laskemalla komposiittiseoksen viskositeettiä. Toinen vaihtoehto on vaihtaa PP johonkin toiseen muovityyppiin, tai vähentää puukuidun konsentraatiota materiaaliseoksessa. Durasense 3D:n reologisia ominaisuuksia on ylipäättänsä paranneltava, jotta se soveltuisi 3D-tulostukseen. Muokkausten myötä Durasense 3D voisi olla toimiva vaihtoehto Formi 3D:lle.

6.6 Koejärjestely ja kehitysehdotukset

Materiaalitestauksessa käytetty isosuutintulostin Prenta FGF-450 soveltuu tyydyttävästi erilaisten testikappaleiden tulostamiseen. Sen käyttämä tulostusmenetelmä on eduksi uusien muovien ja komposiittien testauksessa, sillä materiaaleja ei tarvitse prosessoida filamentiksi.

Tulostimessa oleva ohjelmistovika kuitenkin rajoittaa sen käytettävyyttä tietyissä osa-alueissa. Monimutkaisempien ja isojen kappaleiden tulostamisessa tulostimen suorituskyky on rajoittunut ilman ohjelmistopäivitystä. Tämä voi mahdollisesti rajoittaa tai estää materiaalien jatkotutkimukset.

Opinnäytetyön tarkoitus ei ollut kehittää kaupallisia tuotteita, vaan luoda niistä saaduista testituloksista pohja uusien materiaalien kehittämiseksi. Koska

jokainen testattu materiaali oli koostumukseltaan ja ominaisuuksiltaan hyvin erilainen, mahdollisia kehityskohteita on myös useita.

Materiaalitestauksia voisi jatkaa esimerkiksi testaamalla erilaisia tulostusalustapinnoitteita. Tutkimuskohteina voivat olla muun muassa materiaalikohtaiset adheesiota parantavien menetelmien selvittäminen.

Erilaiset teipit, liimat, ynnä muut voisivat ratkaista adheesio-ongelmat huonosti tarttuville materiaaleille. Materiaaleista tehdyille kappaleille voisi myös suorittaa erilaisia mekaanisia ominaisuuksia mittaavia testejä. Kemikaalikestävyys ja biohajoavuus ovat myös potentiaalisia tutkimuskohteita.

Projektin aikana materiaaleilla oli tulosteltu yksinkertaisia kappaleita. Mahdollinen jatkotutkimus olisi testata materiaalien suorituskykyjä kompleksimpien ja isompien rakenteiden tulostamisessa.

Durasense 3D:n testeistä saatua dataa voisi käyttää uusio-PP -pohjaisen tulostusmateriaalin kehittämiseen. PP:n kierrätysaste on edelleen muihin muoveihin verrattuna alhainen, ja sen käyttökohteita lisäämällä kierrätysastetta saataisiin todennäköisesti nostettua (Chasan E. 2019). Uusio-PP:n muuntaminen helppokäyttöiseksi 3D-tulostusmateriaaliksi olisi kiertotalouden kannalta hyvä askel.

7 Yhteenveto

Valmistusmetodina 3D-tulostaminen on kehittynyt nopeasti, sekä sen laitteistovalikoima on lisääntynyt. Prentan FGF-450 prototyyppi on yksi kehityksen merkeistä, mikä pienten parannusten jälkeen olisi täysin kelvollinen 3D-tulostin perinteisen FDM-tulostimien rinnalle. Tulostimena FGF-450 soveltui hyvin uusien materiaalien testaukseen. Tässä työssä sitä käytettiin biopohjaisten materiaalien 3D-tulostettavuuden tutkimiseen.

Sopivan CAD-mallin suunnittelu testeille oli tärkeää. Virtuaalimallin piti olla pieni ajan säästämiseksi. Sen piti kuitenkin olla myös tarpeeksi kookas ollakseen tulostettavissa isosuutintulostimella.

Sekä perehtymisessä että testiajojen aikana Biodolomer osoittautui optimaaliseksi materiaaliksi 3D-tulostukseen. Komposiitti on reologisilta ominaisuuksiltaan hyvä sekä nopeaan prototyyppittämiseen että suurien ja kompleksien kappaleiden luomiseen.

Pieniä adheesio-ongelmia lukuun ottamatta Formi 3D on toimiva materiaali 3D-tulostamiseen. Se on hyvä, selluloosakuitua hyödyntävä vastine Biodolomerille.

Testeissä selvisi, että PLA-Fi ja PLA-Mi olivat tyydyttävän hyvät vaihtoehdot Biodolomerin rinnalla. Tulostushankaluuksista huolimatta niillä pystyi valmistamaan kestäviä ja virtuaalimallinsa mukaisia kappaleita.

Durasense 3D osoittautui käyttökelttomaksi materiaaliksi testeissä. Se vaatii paljon paranteluja päästäkseen edes kohtalaiselle tasolle. Durasense 3D:tä ei voida luokitella soveltuvaksi 3D-tulostamiselle.

Testiajoista saatuja tuloksia ja observaatiota voidaan käyttää uusien tulostusmateriaalien luomiseen. Biopohjaisten ja uusiomuovia hyödyntävien materiaalien kehittäminen olisi askel kohti tehokkaampaa kiertotaloutta. Tietojen pohjalta voidaan suorittaa myös jatkotutkimuksia esimerkiksi adheesiota tulostusalustaan lisäävien aineiden vaikutuksesta testimateriaaleihin.

Lähteet

ABMComposite. 2022. ArcBiox BSGF40-B200 Preliminary Technical Data Sheet. Viitattu 31/3/2022 osoitteessa <https://abmcomposite.com/wp-content/uploads/Preliminary-TDS-ArcBiox-BSGF40-B2000.pdf>

ABMComposite. 2022. ArcBiox MFA30-B2000 Technical data sheet. Viitattu 31/3/2022 osoitteessa <https://abmcomposite.com/wp-content/uploads/TDS-ArcBiox-MFA30-B2000.pdf>

All3DP. 2021. PLA Plastic / Material - The Ultimate Guide. Viitattu 13/4/2022 osoitteessa <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>

Anton Paar. 2022a. Basics of rheology - Viscoelastic behavior. Viitattu 27/5/2022 osoitteessa <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-rheology/#oscillation-tests-and-viscoelasticity>

Anton Paar. 2022b. Internal structures of samples and shear-thinning behavior. Viitattu 27/5/2022 osoitteessa <https://wiki.anton-paar.com/en/internal-structures-of-samples-and-shear-thinning-behavior/>

Anton Paar. 2022c. Introduction to rheology. Viitattu 2/6/2022 osoitteessa <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-rheology/#introduction-to-rheology>

BCN3D. 2020. What is 3D Printing? Everything You Need to Know. Viitattu 12/12/2021 osoitteessa <https://www.bcn3d.com/what-is-3d-printing-everything-you-need-to-know/>

BCN3D. 2020. When Was 3D Printing Invented? The History of 3D Printing. Viitattu 12/12/2021 osoitteessa <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>

Chasan, E. 2019. There's Finally a Way to Recycle the Plastic in Shampoo and Yogurt Packaging. Bloomberg. Viitattu 20/4/2022 osoitteessa <https://www.bloomberg.com/news/features/2019-09-25/polypropylene-plastic-can-finally-be-recycled>

Cousineau, J. 2012. Effect of cooling rate and mold counter pressure on the crystallinity and foaming control in microcellular injection molded polypropylene parts. Väitöskirja. Master of Science in Engineering. Ohio: Wright State University. Viitattu 2/6/2022 osoitteessa

https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws_etd/send_file/send?accession=wright1341861656&disposition=inline

Formlabs. n. d. Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. Viitattu 12/12/2021 osoitteessa <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>

Gaia BioMaterials. 2018. Biodolomer F40 Product Datasheet. Viitattu 11/4/2022. Ruotsinkielinen versio saatavilla osoitteessa https://gaiabiomaterials.com/sv/datasheet/Biodolomer_F40_swe.pdf

Kohvakka, J. & Lehtinen, L. 2019. Hyvä, paha muovi. Helsinki: Minerva Kustannus Oy.

Lehtonen, P. 2008. Rakeisen kiintoaineen varastointi. Opinnäytetyö. Kemiantekniikan koulutusohjelma. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. Viitattu 20/5/2022 osoitteessa <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/8581/Lehtonen.Pyry.pdf?sequence=2>

Lujitemuovi. 2019. Täyte- ja apuaineet. Viitattu 27/5/2022 osoitteessa <https://www.lujitemuovi.fi/raaka-aineet/3-3-tayte-ja-apuaineet/>

Matmatch. 2022. DuraSense 3D Plus 50. Viitattu 31/3/2022 osoitteessa <https://matmatch.com/materials/stor0009-durasense-3d-plus-50>

Mezger, T. 2011. The Rheology Handbook. Hanover: Vincentz Network GmbH & Co.

Plasthouse. 2018. Muovien jaottelusta. Viitattu 10/5/2022 osoitteessa <https://plasthouse.fi/muovit/mita-muovit-on/>

Sainisto, J. 2021. Isosuuttimellisen 3D-tulostimen ylösajo. Opinnäytetyö. Prosessi- ja materiaalitekniikka. Turku: Turun ammattikorkeakoulu. Viitattu 13/4/2022 osoitteessa

<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/503642/Sainisto%20Juhani.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Turun ammattikorkeakoulu. n. d. MMAM Homepage. Viitattu 12/12/2021 osoitteessa <https://mmam.turkuamk.fi/>

UPM Formi. 2019. UPM Formi 3D Technical Specification. Viitattu 31/3/2022 osoitteessa <https://www.upmformi.com/siteassets/documents/formi-3d/upm-formi-3d-product-data-sheet-en.pdf>

VTT. 2021. Teollinen 3D-tulostus. Viitattu 12/12/2021 osoitteessa <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/teollinen-3d-tulostus>

Materiaalien tulostusparametrit

Testattava materiaali	Ekstruuderin lämpötila (°C)	Alustan lämpötila (°C)	Ekstruusiokerroin	Tulostusnopeus (mm/s)	Kerroskorkeus (mm)
BD 80 % 2,0 mm	160	90	0.65	50	1.4000
BD 50 % 2,0 mm	160	90	0.8	15	1.4000
BD 20 % 2,0 mm	160	90	0.8	15	1.4000
BD 80 % 1,5 mm	160	90	1	15	1.4000
BD 50 % 1,5 mm	160	90	1	15	1.4000
BD 20 % 1,5 mm	160	90	1	15	1.4000
BD 80 % 1,0 mm	160	90	1	15	1.0000
BD 50 % 1,0 mm	160	90	1	15	1.0000
BD 20 % 1,0 mm	160	90	1	15	1.0000
ACF 80 % 2,0 mm	180	100	1.5	15	1.4000
ACF 50 % 2,0 mm	180	100	1.5	15	1.4000
ACF 20 % 2,0 mm	170	90	1.65	15	1.4000
ACF 80 % 1,5 mm	170	90	1.55	15	1.0000
ACF 50 % 1,5 mm	170	90	1.6	15	1.0000
ACF 20 % 1,5 mm	170	90	1.6	15	1.0000
ACF 80 % 1,0 mm	170	100	1.3	15	0.8000
ACF 50 % 1,0 mm	170	100	1.7	15	0.8000
ACF 20 % 1,0 mm	170	100	1.8	15	0.8000
ACM 80 % 2,0 mm	180	100	2.3	90	1.4000
ACM 50 % 2,0 mm	180	100	2.3	15	1.4000
ACM 20 % 2,0 mm	180	100	2.3	15	1.4000

Testattava materiaali	Ekstruuderin lämpötila (°C)	Alustan lämpötila (°C)	Ekstruusiokerroin	Tulostusnopeus (mm/s)	Kerroskorkeus (mm)
ACM 80 % 1,5 mm	180	100	2.9	15	1.4000
ACM 50 % 1,5 mm	180	100	2.8	15	1.4000
ACM 20 % 1,5 mm	180	100	2.8	15	1.4000
ACM 80 % 1,0 mm	180	100	2.8	15	1.0000
ACM 50 % 1,0 mm	180	100	2.5	15	1.0000
ACM 20 % 1,0 mm	180	100	2.5	15	1.0000
F3D 80 % 2,0 mm	180	100	1	15	1.0000
F3D 50 % 2,0 mm	180	100	0.9	15	1.0000
F3D 20 % 2,0 mm	180	100	0.9	15	1.0000
F3D 80 % 1,5 mm	180	100	0.8	15	1.0000
F3D 50 % 1,5 mm	180	100	0.8	15	1.0000
F3D 20 % 1,5 mm	180	100	0.8	15	1.0000
F3D 80 % 1,0 mm	180	100	0.9	15	1.0000
F3D 50 % 1,0 mm	180	100	0.8	15	1.0000
F3D 20 % 1,0 mm	180	100	1.1	15	1.0000
D3D 80 % 2,0 mm	180	100	0.8	15	1.4000
D3D 50 % 2,0 mm	180	100	0.9	15	1.4000
D3D 20 % 2,0 mm	180	100	0.9	15	1.4000
D3D 80 % 1,5 mm	180	100	0.8	15	1.4000
D3D 50 % 1,5 mm	180	100	0.8	15	1.4000
D3D 20 % 1,5 mm	180	100	0.8	15	1.4000
D3D 80 % 1,0 mm	170	130	1.1	15	1.0000
D3D 50 % 1,0 mm	170	130	1.1	15	1.0000

Testattava materiaali	Ekstruuderin lämpötila (°C)	Alustan lämpötila (°C)	Ekstruusiokerroin	Tulostusnopeus (mm/s)	Kerroskorkeus (mm)
D3D 20 % 1,0 mm	170	130	1.2	15	1.0000