

3D-TULOSTUSPROSESSIN KEHITTÄMINEN MUOTIN- VALMISTUKSESSA

Korpinen Teemu

Opinnäytetyö

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

2025

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Teemu Korpinen	Vuosi	2025
Ohjaaja(t)	TkT Ari Pikkarainen		
Työn nimi	3D-tulostusprosessin kehittäminen muotinvalmistuksessa		
Sivumäärä	60 + 2		

Opinnäytetyön aiheena oli 3D-tulostusprosessin kehittäminen muotinvalmistuksessa käyttäen FDM-tekniikkaa ja PLA-materiaalia. Tavoitteena oli kehittää luotettava ja toistettava tulostusmenetelmä, joka tuottaa laadullisesti hyväksyttäviä valumalleja. Tutkimuskysymyksinä olivat: millä parametreilla saavutetaan hyvä pinnanlaatu ja tarttuvuus tulostusalustaan sekä miten asetuksia voidaan säätää eri filamenttien ja suuttimien vaihtuessa.

Tietoperustassa käsiteltiin lisäävän valmistuksen perusteita, erityisesti materiaalin pursotukseen perustuvaa FDM-tekniikkaa sekä PLA:n ja ASA:n materiaaliominaisuuksia. Lisäksi syvennyttiin tulostusparametrien vaikutuksiin, kuten kerroskorkeuteen, suuttimen halkaisijaan, lämpötiloihin, täyttöasteeseen ja eri kalibrointimenetelmiin. Tietoperusta pohjautui laajaan lähdemateriaaliin, joka koostui vertaisarvioiduista tutkimuksista, alan asiantuntijalähteistä sekä teknisestä ohjeistosta. Tutkimus toteutettiin kokeellisesti käyttämällä Creatbot D1000 -tulostinta ja Orcaslicer-ohjelmistoa, jonka kalibrointityökaluja hyödynnettiin asetusten optimoinnissa. Tuloksia analysoitiin visuaalisesti ja käytännön toimivuuden perusteella.

Tulokseksi saatiin optimoidut tulostusasetukset, joilla saatiin parannettua tulostusjälkeä ja vähennettyä yleisiä ongelmia, kuten kappaleen irtoamista alustasta, pinnan epätasaisuutta ja pursotushäiriöitä. Opinnäytetyön lopputuotteena muodostettiin valmis tulostusprofiili sekä ohjeistus FDM-tulostimen käyttöön hiekkavalumallien valmistuksessa. Työn tuloksia voidaan hyödyntää erityisesti prototyyppivalmistuksessa sekä valimoyritysten kehitysprojekteissa, joissa vaaditaan ketteriä valmistusratkaisuja.

Avainsanat 3D-tulostus, FDM, muotinvalmistus, PLA, tulostusparametrit, hiekkavalumalli

Mechanical Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Teemu Korpinen	Year	2025
Supervisor(s)	Ari Pikkarainen, D.Sc. (Tech.)		
Title	Development of a 3D Printing Process for Mold Manufacturing		
Number of pages	60 + 2		

The aim of this thesis was to develop a 3D printing process for mold manufacturing using FDM technology and PLA material. The objective was to create a reliable and repeatable printing method capable of producing casting patterns of acceptable quality. The research questions focused on identifying which parameters result in good surface quality and bed adhesion, and how settings should be adjusted when using different filaments and nozzle types.

The theoretical framework covered the fundamentals of additive manufacturing, particularly FDM technology, as well as the material properties of PLA and ASA. Attention was given to the effects of various printing parameters, such as layer height, nozzle diameter, temperatures, infill density and different calibration methods. The knowledge base was built on an extensive range of sources including peer-reviewed research, expert literature, and technical documentation. The study was carried out experimentally using a Creatbot D1000 3D printer and Orcaslicer software, with its calibration tools used for setting optimisation. The results were analysed based on visual inspection and practical performance.

The outcome was a set of optimised printing settings that improved print quality and reduced common issues such as warping, uneven surfaces, and extrusion faults. The final deliverables included a completed print profile and user guide for applying FDM printing in the production of sand-casting patterns. The results are particularly applicable to prototyping and development projects in foundries requiring agile manufacturing solutions.

Keywords 3D printing, FDM, mold manufacturing, PLA, print parameters, sand-casting pattern

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
1.1	Työn tarkoitus ja tavoitteet.....	7
1.2	Työn rajausta.....	8
1.3	Menetelmät.....	8
1.4	Aiemman tutkimuksen merkitys.....	9
2	LISÄÄVÄ VALMISTUS.....	10
2.1	Lisäävän valmistuksen menetelmät.....	10
2.2	Materiaalin pursotus.....	11
2.3	3D-tulostusprosessi.....	13
2.4	FDM-tekniikka hiekkavalumallin valmistuksessa.....	14
3	TULOSTUSMATERIAALIT: PLA JA ASA.....	18
3.1	PLA (polylaktidi).....	18
3.2	ASA (akryylinitriili-styreeni-akrylaatti).....	20
4	FDM-TULOSTUKSEN KERROSTEN VÄLINEN TERMINEN LIITTYMINEN JA MEKAANINEN KESTÄVYYS.....	22
4.1	Liittämiseen vaikuttavat parametrit.....	22
4.2	Liittymisen vaiheet ja mekanismit.....	22
4.3	Mekaaninen kestävyys ja siihen vaikuttavat tekijät.....	23
5	3D-TULOSTUSPROSESSIN OPTIMOINTI.....	26
5.1	Tulostimen kalibrointi ja materiaalikohtaiset asetukset.....	27
5.1.1	Tulostusalustan kalibrointi (Bed calibration).....	27
5.1.2	Z-offset.....	27
5.1.3	Materiaalin virtaus (Flow rate).....	28
5.1.4	Pressure Advance/ Linear advance.....	28
5.1.5	Retraction (vetäytyminen).....	28
5.1.6	Maksimaalinen tilavuusnopeus (Max Volumetric Speed).....	29
5.1.7	Suuttimen halkaisijan vaikutus.....	29
5.1.8	Tulostuslämpötila pursotussuutin ja peti.....	30
5.2	Tulostusparametrien säätö ja prosessin hallinta.....	30
5.2.1	Tulostusnopeus.....	30

5.2.2	Kerrospaksuus	31
5.2.3	Täyttökuvio ja täyttöaste	31
5.2.4	Jäähdytys	33
5.2.5	Seinämävahvuudet ja ironing	34
5.3	Prosessin laadunvarmistaminen	35
6	YLEISIMMÄT ONGELMAT JA NIIDEN HALLINTA FDM-TULOSTUSPROSESSISSA	36
6.1	Tulostetun kappaleen irtoaminen alustasta	36
6.2	Huono pinnanlaatu ja epätasaiset kerrokset	37
6.3	Warping eli kappaleen käpristyminen	37
6.4	Ali- ja ylipursotus	39
7	JÄLKIKÄSITTELYMENETELMÄT	41
7.1	Mekaaniset menetelmät.....	41
7.2	Kemialliset menetelmät.....	41
7.3	Pinnoitteet ja maalaus	42
8	LAITTEISTO JA OHJELMISTO	44
8.1	Creatbot D1000	44
8.2	Orcaslicer 2.2.0	46
9	TULOKSET	48
9.1	Optimoidut tulostusasetukset.....	48
9.1.1	Materiaalikohtaiset asetukset PLA	50
9.1.2	Slicer-asetukset.....	50
9.2	Testitulokset ja valmiin valumallin arviointi.....	51
9.3	Valmiit slicing-tiedostot	53
9.4	Käyttöohjeistus	53
10	YHTEENVETO JA POHDINTA.....	54
	LÄHTEET	57
	LIITTEET	61

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

PLA	Polylaktidi
ASA	Akrylinitriilistyreeniakrylaatti
FDM	Materiaalia lisäävä muovaus
SEM	Elektronipyyhkäisymikroskooppi
MEK	Metyyliketoni
THF	Tetrahydrofuraani
ABS	Akrylinitriilibutadieenistyreeni

1 JOHDANTO

3D-tulostustekniikan käyttö teollisessa muotinvalmistuksessa on yleistynyt merkittävästi viime vuosina. Tämä johtuu sen monista eduista, kuten valmistuksen nopeudesta, suunnitteluvapaudesta, geometrisesta monimutkaisuudesta sekä valmistuksen kustannustehokkuudesta, erityisesti pienissä tuotantomäärissä ja prototyypeissä. Näiden ominaisuuksien ansiosta 3D-tulostus tarjoaa merkittäviä kilpailuetuja verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin, kuten koneistukseen tai valuun. (Ferretti, Santi, Leon-Cardenas, Freddi, Donnici & Frizziero 2021, 1–3.) Erityisesti materiaalin pursotukseen perustuva FDM-tekniikka (Fused Deposition Modeling) on lisännyt suosiotaan, sillä se mahdollistaa monimutkaisten ja geometrisesti haastavien muotojen toteuttamisen, jotka eivät ole perinteisillä menetelmillä aina mahdollisia tai taloudellisesti järkeviä (Acierno & Patti 2023, 1–2).

Teollisen mittakaavan tehokas hyödyntäminen vaatii kuitenkin perusteellista ymmärrystä tulostusprosessista sekä sen tarkkaa hallintaa. Erityisesti materiaalivalinnat, tulostusparametrien optimointi ja prosessinhallinta ovat kriittisiä tekijöitä, jotta saavutetaan vaaditut laatuvaatimukset, kuten mittatarkkuus, pinnanlaatu ja mekaaniset ominaisuudet (Acierno & Patti 2023, 3).

1.1 Työn tarkoitus ja tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää ja tehostaa FDM-tekniikkaan perustuvaa 3D-tulostusprosessia erityisesti hiekkavalumallien valmistuksessa. Työssä hyödynnetään Creatbot D1000 -tulostinta, jonka ominaisuudet mahdollistavat suurten ja tarkkojen mallien valmistuksen. Keskeisenä tavoitteena on optimoida tulostusparametreja niin, että lopputuloksena saavutetaan valimon asettamat laatuvaatimukset täyttävät tulosteet. Lisäksi pyritään kehittämään systemaattinen ja selkeä prosessi, jonka avulla valumallien valmistus on mahdollista toteuttaa mahdollisimman vähäisellä jälkikäsittelyllä.

Työn keskeiset tavoitteet ovat seuraavat:

- Optimoida tulostusparametrit kuten lämpötila, nopeus ja materiaalin virtaus siten, että lopputuote täyttää valimon vaatimukset.

- Laatia selkeät ja yksityiskohtaiset ohjeet tulostusprosessin vaiheista käyttäjävirheiden minimoimiseksi.
- Tuottaa valmiita slicing-tiedostoja, jotka mahdollistavat tehokkaan ja laadukkaan tulostuksen myös ilman syvällistä teknistä asiantuntemusta.
- Minimoida jälkikäsittelyn tarve valitsemalla tulostusparametrit ja menetelmät, jotka tuottavat mahdollisimman laadukkaan ja valmiin pinnan.

1.2 Työn rajaus

Tässä opinnäytetyössä keskitytään FDM-menetelmän optimointiin käyttäen toimeksiantajayrityksen käytössä olevia PLA- (polylaktidi) ja ASA- (akrylinitriilistyreeniakrylaatti) materiaaleja. Työn ulkopuolelle jätetään muut lisäävän valmistuksen menetelmät ja materiaalit. Työn painopisteenä on erityisesti hiekkavalumalien valmistus, joten muita muotINVALMISTUKSEN tekniikoita käsitellään vain yleisellä tasolla.

Toimeksiantajan toivomuksesta yrityksen nimi pidetään anonyyminä, ja osa tuloksista sekä menetelmistä esitetään yleisellä tasolla liikesalaisuuksien suojaamiseksi. Tämä tietoturva vaatimus vaikuttaa erityisesti menetelmäkuvausten tarkkuuteen ja yksityiskohtaisuuteen raportoinnissa.

1.3 Menetelmät

Opinnäytetyössä hyödynnetään kokeellista lähestymistapaa, jossa tulostusparametreja testataan systemaattisesti ja optimoidaan niiden perusteella saadun datan avulla. Käytännössä työ sisältää erilaisten parametrikombinaatioiden kokeilua ja niiden vaikutusten analysointia sekä testikappaleiden valmistusta ja niiden laadun arviointia valimon asettamien standardien mukaan.

Keskeisinä tutkimusmetodeina ovat konstruktiiivinen tutkimus ja kokeellinen kehitystyö. Konstruktiiivisen tutkimuksen kautta pyritään kehittämään käytännönläheisiä ratkaisuja toimeksiantajan kohtaamiin haasteisiin. Lisäksi tulosten validointiin käytetään vertailevaa analyysiä aiempiin tutkimuksiin sekä empiiristen testitulosten analysointia. (Lukka 2014.)

1.4 Aiemman tutkimuksen merkitys

Aiemmat tutkimukset osoittavat selvästi, että FDM-tekniikan tulostusparametrit kuten lämpötila, tulostusnopeus ja materiaalivalinnat vaikuttavat merkittävästi lopputuotteen laatuun ja ominaisuuksiin (Acierno & Patti 2023, 3). Erityisesti PLA-materiaalin käyttöön liittyvät tutkimukset ovat osoittaneet merkittäviä etuja sekä laadullisesti että kustannustehokkuuden näkökulmasta (Chahdoura, Bahloul, Tlija & Tahan 2024). Näiden tutkimustulosten hyödyntäminen tukee ja perustelee myös tämän työn tavoitteita Creatbot D1000 -tulostimen asetusten optimoimiseksi juuri valimokäyttöön sopivaksi.

2 LISÄÄVÄ VALMISTUS

Lisäävä valmistus (Additive Manufacturing, AM) on valmistusteknologia, jossa kappaleet rakennetaan kerros kerrokselta materiaalia liittämällä. Tämä eroaa perinteisistä menetelmistä, joissa materiaalia poistetaan tai muovataan halutun muodon aikaansaamiseksi. (ISO/ASTM 52900:2021, 6.)

Lisäävän valmistuksen merkitys on kasvanut viime vuosina monilla teollisuudenaloilla kuten ilmailussa, lääketieteessä ja muotINVALMISTUKSESSA. Teknologia mahdollistaa monimutkaisten geometrioiden toteuttamisen, nopeuttaa tuotekehitystä ja alentaa kustannuksia, etenkin pienissä tuotantosarjoissa ja prototyyppien valmistuksessa. (Yang, Wang, Xue, Wang & Yang 2025, 1–2.)

2.1 Lisäävän valmistuksen menetelmät

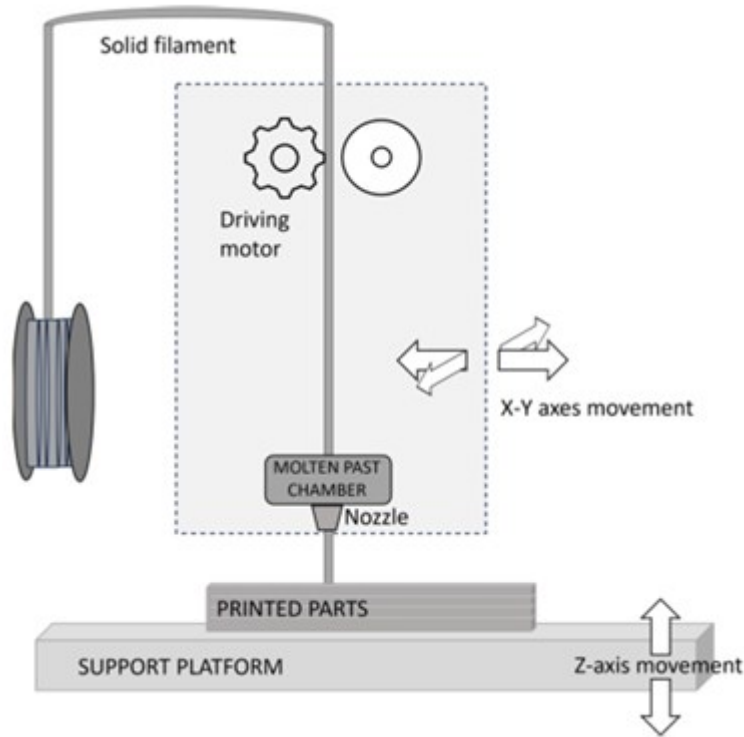
Lisäävän valmistuksen menetelmät jaotellaan seitsemään kategoriaan ISO/ASTM 52900 -standardin mukaan:

- Sideaineen suihkutus (BJT), jossa nestemäinen sideaine kohdistetaan valikoidusti jauheeseen sitomaan partikkelit yhteen. Tämä menetelmä mahdollistaa monimutkaisten kappaleiden valmistuksen ilman korkeita lämpötiloja ja soveltuu erityisesti hiekkavalumuottien valmistukseen.
- Suorakerrostus (DED), jossa materiaali syötetään sulatusalueelle ja liitetään kohdennetulla lämpöenergiällä, kuten laser, elektronisuihku tai plasma. Tämä tekniikka mahdollistaa metalliosien rakentamisen ja korjaamisen.
- Materiaalin pursotus (MEX), jossa termoplastinen materiaali pursotetaan suuttimen kautta ja kerrostetaan kappaleeksi. Tämä on yleisin lisäävän valmistuksen menetelmä.
- Materiaalin suihkutus (MJT), jossa rakennusmateriaali suihkutetaan tippoina ja kovetetaan valikoidusti. Käytetään usein fotopolymeerien ja vahamateriaalien tulostuksessa.

- Jauhepetisulatus (PBF), jossa lämpöenergia sulattaa tai sintraa jauhepedissä olevan materiaalin haluttuihin kohtiin. Tämä tekniikka on erityisen yleinen metallien ja keraamien valmistuksessa.
- Kerroslaminointi (SHL), jossa materiaalileikkeitä liitetään toisiinsa muodostaen lopullisen kappaleen. Käytetään esimerkiksi komposiittirakenteiden valmistuksessa.
- Valokovetus altaassa (VPP), jossa nestemäinen muovi kovetetaan valoaktiivisella polymeroinnilla. Käytetään erityisesti tarkkojen ja sileäpintaisten komponenttien valmistuksessa. (ISO/ASTM 52900:2021, 7-8.)

2.2 Materiaalin pursotus

Materiaalin pursotus (Material Extrusion, MEX) on yksi yleisimmistä 3D-tulostusmenetelmistä, jossa materiaalia lisätään kerros kerrokselta sulattamalla ja suulakepuristamalla termoplastista filamenttia. Tunnetuin MEX-menetelmä on FDM, jossa filamenttimateriaali sulatetaan ja pursotetaan suuttimen läpi kerroksittain alustalle. (Godec ym. 2022, 33–36.) FDM-tulostimen perusrakenne koostuu suulakepuristussuutinyksiköstä, tulostusalustasta ja filamentinsyöttöjärjestelmästä (kuvio 1).



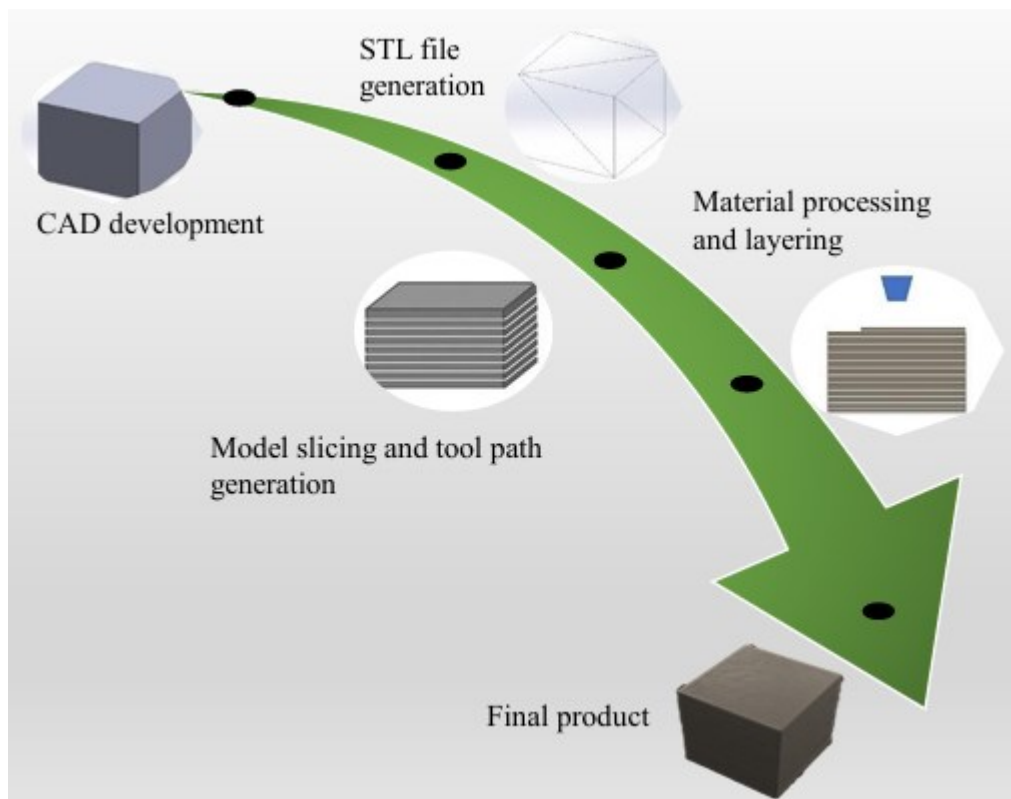
Kuvio 1. FDM-tulostimen perusrakenne (Acierno & Patti 2023, 3)

Tulostusprosessin aikana filamenttimateriaali syötetään puristusrullien avulla kuumennetun suuttimen läpi, jossa se sulaa ja suutin liikkuu X- ja Y-suuntaan ennalta määritellyn reitin mukaisesti muodostaen kappaleen kerros kerrokselta. Jokaisen uuden kerroksen annetaan jäähtyä ja kiinnittyä aiemmin tulostettuun materiaaliin ennen seuraavan kerroksen lisäämistä. Kun kerros on tulostettu, tulostusalusta laskeutuu Z-suunnassa, ja prosessi jatkuu, kunnes koko kappale on valmis. (Acierno & Patti 2023, 2.)

Lopuksi mahdolliset tukirakenteet poistetaan manuaalisesti. Koska FDM-tulostuksessa kappale muodostuu kerroksittain, sen mekaaniset ominaisuudet voivat vaihdella eri suunnissa. Tulostetut kappaleet käyttäytyvät transversaalisesti isotrooppisina materiaaleina, joissa materiaalin kerrosrakenne vaikuttaa merkittävästi lopputuotteen kestävyteen ja ominaisuuksiin. (Yao, Ye, Deng, Zhang & Mei 2020, 1–2.)

2.3 3D-tulostusprosessi

FDM-tulostusprosessin onnistuminen riippuu useista tekijöistä, kuten tulostusparametreista, materiaalivalinnasta sekä jälkikäsittelymenetelmistä. Tulostusasetusten optimoinnilla voidaan merkittävästi parantaa valmistettujen osien mekaanisia ominaisuuksia, pinnanlaatua ja vähentää tulostusvirheiden todennäköisyyttä sekä tuotantoaikaa. (Yang ym. 2025, 2–3.) Näiden vaiheiden hallinta alkaa digitaalisen mallin luonnista ja jatkuu aina lopulliseen jälkikäsittelyyn saakka, kuten kuviossa 2 on esitetty.



Kuvio 2. 3D-tulostusprosessi (Kafle ym. 2021, 4)

Prosessi käynnistyy luomalla digitaalinen 3D-malli CAD-ohjelmistolla, kuten SolidWorks tai Fusion 360. Malli suunnitellaan tarkasti ottaen huomioon valitun materiaalin ominaisuudet ja valmistusmenetelmän erityisvaatimukset. Suunnitteluvaiheessa huomioidaan esimerkiksi mittatarkkuus, tukirakenteiden tarve sekä lopputuotteen pinnanlaatu ja lujuusvaatimukset. (Kafle, Bhatta, Joshi, Adhikari & Parajuli 2021, 3–4.)

Mallinnuksen jälkeen 3D-malli muunnetaan esimerkiksi STL- tai 3MF-tiedostomuotoon, jotka ovat yhteensopivia eri tulostusohjelmistojen kanssa (Hubs 2023b). Tämä tiedosto tuodaan slicer-ohjelmistoon, kuten Orcaslicer tai Simplify3D, jossa määritellään tarkasti käytettävät tulostusparametrit. Näitä parametreja ovat esimerkiksi kerrospaksuus, täyttöprosentti, tulostusnopeus, suuttimen lämpötila sekä alustan lämpötila. Nämä valinnat vaikuttavat suoraan kappaleen laatuun, mekaanisiin ominaisuuksiin sekä pinnanlaatuun. (Kafle ym. 2021, 4–5; Yang ym. 2025, 2–3.)

Viipaloinnin tuloksena saadaan G-koodi, joka sisältää yksityiskohtaiset ohjeet tulostimen liikkeille, materiaalin pursotukselle sekä lämpötila-asetuksille. Valmis G-koodi syötetään tulostimeen, ja tulostusprosessi käynnistyy. (Kafle ym. 2021, 3.)

Tulostuksen jälkeen kappaleet irrotetaan tulostusalustalta, ja mahdolliset tukirakenteet poistetaan manuaalisesti tai käyttämällä sopivia jälkikäsittelymenetelmiä. Lopullisen kappaleen laadun varmistamiseksi jälkikäsittely voi sisältää mekaanisia menetelmiä, kuten hiontaa tai kemiallisia menetelmiä, kuten höyrytasoittamista. (Godec ym. 2022, 53–55.)

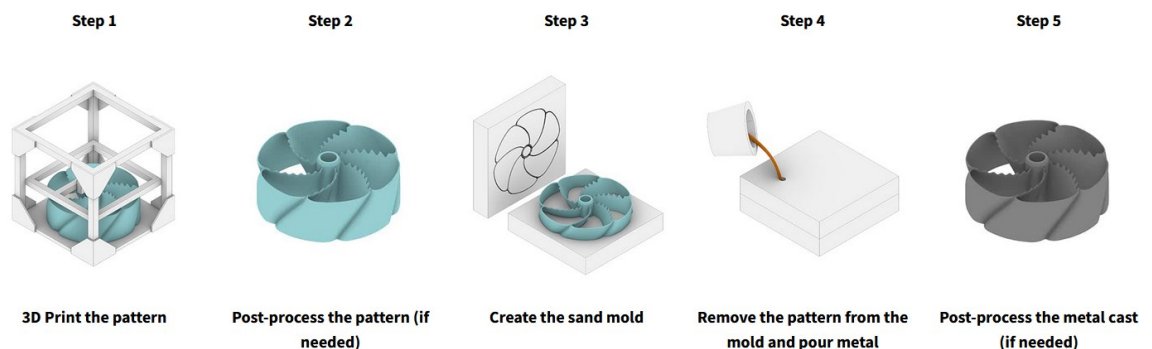
2.4 FDM-tekniikka hiekkavalumallin valmistuksessa

AM-tekniikan soveltaminen hiekkavalumuottien valmistukseen tarjoaa monia etuja verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Erityisesti FDM-tekniikka mahdollistaa nopean ja kustannustehokkaan valmistusprosessin, sillä se ei edellytä erillisten työkalujen valmistamista, kuten perinteiset menetelmät. Tämä vähentää sekä tuotantoaikaa että kustannuksia merkittävästi. (Portoacă, Istrate, Radu, Popa, Roşca & Bălăceanu 2023, 1–4.) Lisäksi FDM-tekniikalla tuotetut mallit mahdollistavat monimutkaisten geometrioiden ja sisäisten rakenteiden, kuten valukanavien, toteuttamisen ilman kokoonpanoa tai moniosaisia rakenteita. Tämä suunnitteluvapaus mahdollistaa komponenttien ja valumallien valmistuksen, joita ei voida toteuttaa perinteisin menetelmin. Se tarjoaa selviä etuja erityisesti silloin, kun valmistettavat osat ovat geometrisesti haastavia tai yksilöllisiä. (Ferretti ym. 2021, 1–2.)

Yksi keskeisistä eduista on tuotantoprosessin joustavuus ja mahdollisuus sisäiseen valmistukseen, mikä vähentää riippuvuutta ulkopuolisista toimijoista ja mahdollistaa nopean reagoinnin tuotantomäärien muutoksiin. Lisäksi FDM-tekniikan avulla saavutettu hyvä pinnanlaatu vähentää jälkikäsittelyn tarvetta, mikä edelleen parantaa prosessin tehokkuutta ja kustannustehokkuutta. (Kafle ym. 2021, 5.)

Haasteena lisäävän valmistuksen käytössä muotinvalmistuksessa on edelleen lopputuotteen tasalaatuisuuden varmistaminen, sillä kerroksittainen valmistustapa voi aiheuttaa esimerkiksi pinnan epätasaisuutta sekä anisotropiaa eli materiaalin mekaanisten ominaisuuksien suuntariippuvuutta, jossa eri suunnissa mitatut ominaisuudet, kuten veto- ja taivutuslujuus, voivat vaihdella. Näitä ongelmia voidaan kuitenkin hallita tehokkaasti prosessin huolellisella optimoinnilla sekä käyttämällä soveltuvia jälkikäsittelytekniikoita. (Chahdoura ym. 2024, 1–3.)

Hiekkavalumuotti muodostetaan yleensä pakkaamalla hienojakoinen valimohiekka 3D-tulostetun valumallin ympärille. Tämän jälkeen hiekka kovetetaan siten, että se säilyttää tarkasti valumallin muodon. Valumuotti koostuu yleensä kahdesta erillisestä puoliskosta, jotka yhdistetään ennen metallin valamista. Kun sulametalli kaadetaan muottiin, se täyttää muotin ontelon ja jähmettyy muodostaen lopullisen valukappaleen. Valukappaleen jäähtyessä hiekkamuotti rikotaan, jolloin valmis kappale voidaan ottaa esille (kuvio 3). (Bigrep 2024.)



Kuvio 3. Hiekkavalumuotin toimintaperiaate (Bigrep 2024)

Hiekkamuotin hienojakoinen hiekka mahdollistaa tarkan ja yksityiskohtaisen pinnanmuodon, mikä tarkoittaa, että valumallin pinnanlaatu ja geometriset yksityiskohdat siirtyvät suoraan valetulle kappaleelle. Tämän vuoksi 3D-tulostetun valumallin pinnanlaatu on erityisen tärkeää, sillä se vaikuttaa suoraan lopputuotteen visuaalisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin.

Jotta 3D-tulostettua hiekkavalumallia voidaan käyttää hiekkavalumuotin valmistukseen, sen pinnanlaadun on oltava mahdollisimman sileä ja mitoituksen on pyrittävä määriteltyjen toleranssien sisällä. FDM-tekniikalla valmistetut mallit soveltuvat sekä vihreän hiekan että no-bake-hiekan valuprosesseihin, joissa mallien on kestettävä hiekan tiivistämisestä aiheutuva puristusaine, joka on alle 20,7 MPa (Stratasys 2025). Tämä on otettava huomioon täyttöastetta ja täyttökuviota valittaessa.

Taulukossa 1 esitetty DCTG-toleranssiluokitus (Dimensional Casting Tolerance Grade) määrittää valettujen kappaleiden mittapoikkeamien sallitut rajat millimetreinä. Valetulle kappaleelle asetettu toleranssi on DCTG-12, mikä tarkoittaa, että valumallin on vastattava tiukempia DCTG-8- tai DCTG-10-toleranssivaatimuksia. Mitä pienempi DCTG-luokka on, sitä tiukemmat ovat sallitut mittapoikkeamat. Esimerkiksi DCTG-8-luokassa mittapoikkeamat ovat merkittävästi pienempiä kuin DCTG-12-luokassa, mikä mahdollistaa tarkemman ja laadukkaamman lopputuotteen valmistuksen. (SFS-EN ISO 8062-3:2023, 13.)

Taulukko 1. Valetun kappaleen toleranssiluokitus ja sallitut mittapoikkeamat (SFS-EN ISO 8062-3:2023, 14)

Nominal dimensions related to the moulded part		Linear dimensional tolerance for dimensional casting tolerance grade (DCTG) ^a															
		DCTG 1	DCTG 2	DCTG 3	DCTG 4	DCTG 5	DCTG 6	DCTG 7	DCTG 8	DCTG 9	DCTG 10	DCTG 11	DCTG 12	DCTG 13	DCTG 14	DCTG 15	DCTG 15wt ^b
-	≤ 10	0,09	0,13	0,18	0,26	0,36	0,52	0,74	1	1,5	2	2,8	4,2	-	-	-	-
> 10	≤ 16	0,1	0,14	0,2	0,28	0,38	0,54	0,78	1,1	1,6	2,2	3	4,4	-	-	-	-
> 16	≤ 25	0,11	0,15	0,22	0,3	0,42	0,58	0,82	1,2	1,7	2,4	3,2	4,6	6	8	10	12
> 25	≤ 40	0,12	0,17	0,24	0,32	0,46	0,64	0,9	1,3	1,8	2,6	3,6	5	7	9	11	14
> 40	≤ 63	0,13	0,18	0,26	0,36	0,5	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	10	12	16
> 63	≤ 100	0,14	0,2	0,28	0,4	0,56	0,78	1,1	1,6	2,2	3,2	4,4	6	9	11	14	18
> 100	≤ 160	0,15	0,22	0,3	0,44	0,62	0,88	1,2	1,8	2,5	3,6	5	7	10	12	16	20
> 160	≤ 250	-	0,24	0,34	0,5	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	14	18	22
> 250	≤ 400	-	-	0,4	0,56	0,78	1,1	1,6	2,2	3,2	4,4	6,2	9	12	16	20	25
> 400	≤ 630	-	-	-	0,64	0,9	1,2	1,8	2,6	3,6	5	7	10	14	18	22	28
> 630	≤ 1 000	-	-	-	-	1	1,4	2	2,8	4	6	8	11	16	20	25	32
> 1 000	≤ 1 600	-	-	-	-	-	1,6	2,2	3,2	4,6	7	9	13	18	23	29	37
> 1 600	≤ 2 500	-	-	-	-	-	-	2,6	3,8	5,4	8	10	15	21	26	33	42
> 2 500	≤ 4 000	-	-	-	-	-	-	-	4,4	6,2	9	12	17	24	30	38	49
> 4 000	≤ 6 300	-	-	-	-	-	-	-	-	7	10	14	20	28	35	44	56
> 6 300	≤ 10 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	16	23	32	40	50	64

^a For wall thicknesses in grade DCTG 1 to DCTG 15, one grade coarser applies (see Clause 9).

^b Grade DCTG 15wt (wall thickness) exists only for wall thicknesses of castings generally specified to DCTG 15.

Taulukon vasemmanpuoleisessa sarakkeessa esitetään kappaleen nimellismittat, ja samalla rivillä ilmoitetaan kyseisten mittojen sallitut poikkeamat. Esimerkiksi, jos suunniteltu kappaleen pituus on 150 mm, saa mittapoikkeama DCTG-8-luokan mukaan olla $\pm 1,8$ mm.

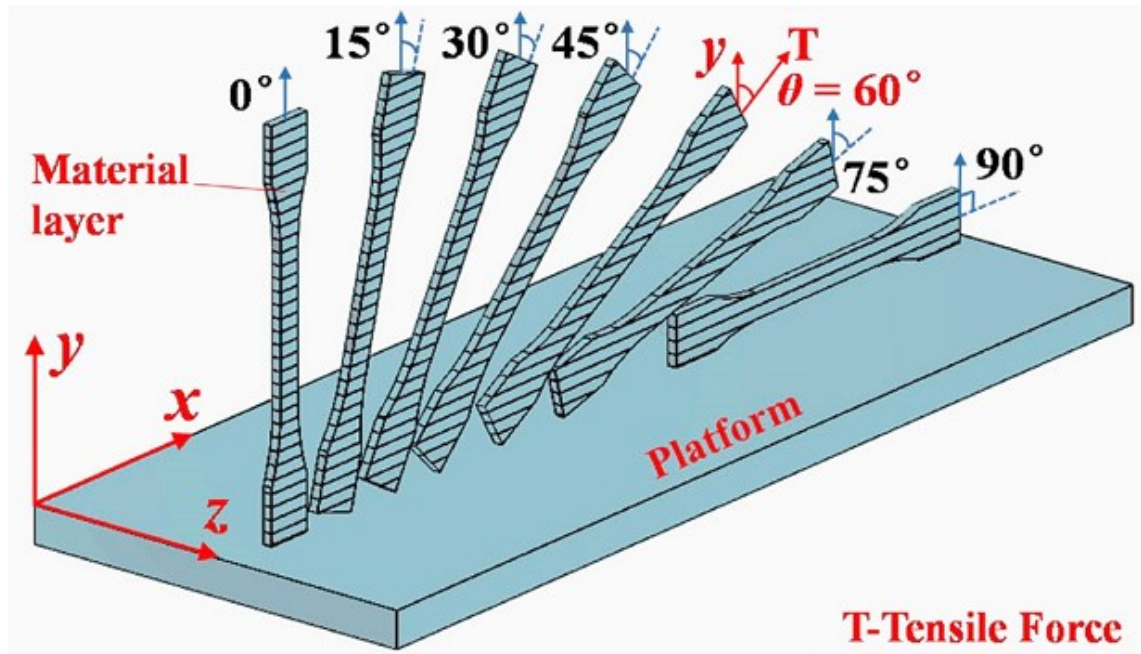
3 TULOSTUSMATERIAALIT: PLA JA ASA

FDM-tekniikassa käytettävien materiaalien valinnalla on merkittävä vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, tarkkuuteen, pinnanlaatuun ja käyttöympäristöön soveltuvuuteen. Tässä luvussa käsitellään kahta yleisesti käytettyä tulostusmateriaalia, PLA ja ASA. Molemmilla materiaaleilla on omat erityisominaisuutensa, käyttökohteensa sekä tulostusparametrien asettamista koskevat vaatimukset, jotka on otettava huomioon, jotta saavutetaan halutut ominaisuudet lopputuotteessa.

3.1 PLA (polylaktidi)

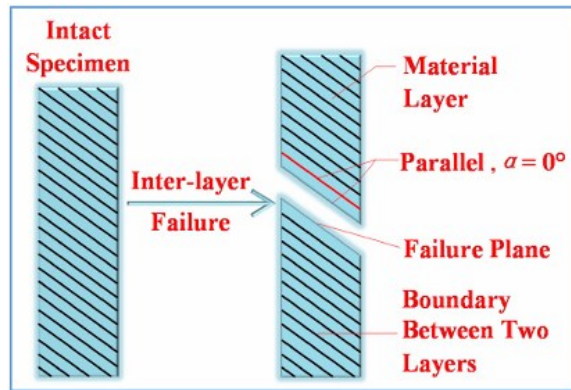
Polylaktidi (PLA) on yksi yleisimmin käytetyistä materiaaleista FDM-tulostuksessa. Se on biohajoava termoplastinen polymeeri, jota valmistetaan uusiutuvista luonnonvaroista, kuten maissitärkkelyksestä ja sokeriruo'osta. PLA:n etuja ovat sen helppo tulostettavuus, hyvä mittatarkkuus ja ympäristöystävällisyys. Se ei vaadi välttämättä lämmitettyä tulostusalustaa ja sillä voidaan tuottaa suhteellisen jäykkiä ja kevyitä rakenteita, mikä tekee siitä suosituksen valinnan prototyyppien ja muottien valmistuksessa. (Yao ym. 2020, 1.)

PLA:n mekaaniset ominaisuudet riippuvat voimakkaasti valituista tulostusparametreista, kuten kerrospaksuudesta, tulostuslämpötilasta ja erityisesti tulostussuunnasta (Kuvio 4). Tutkimusten mukaan PLA:n vetolujuus voi vaihdella merkittävästi eri tulostussuuntien välillä. Esimerkiksi 90° suuntaan (Z-akselin suuntaisesti) tulostettujen kappaleiden vetolujuus voi olla jopa 55,86 MPa, kun taas 0° suuntaan (X-Y-tasossa) tulostettujen kappaleiden vetolujuus on huomattavasti alhaisempi, noin 26,90 MPa. Lisäksi pienemmällä kerrospaksuudella (esimerkiksi 0,1 mm) saavutetaan parempi pinnanlaatu ja korkeampi vetolujuus, kun taas suurempi kerrospaksuus (esimerkiksi 0,3 mm) lisää tulostusnopeutta, mutta voi heikentää kappaleen mekaanisia ominaisuuksia. (Yao ym. 2020, 3–7.)

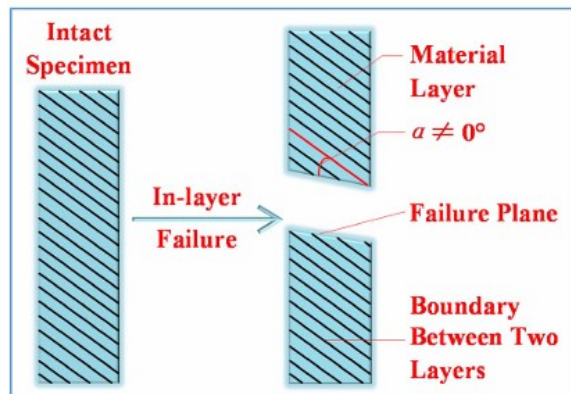


Kuvio 4. Tulostussuunnat (Yao ym. 2020, 3)

Tulostussuunnalla on vaikutusta myös murtumakäyttäytymiseen. Inter-kerros- ja intra-kerrosmurtumat ovat tyypillisiä PLA:lle, ja niiden esiintyvyys riippuu tulostussuunnasta sekä kerrospaksuudesta (kuvio 5). Inter-kerrosmurtuma tapahtuu materiaalikerrosten välissä, kun taas intra-kerrosmurtuma tapahtuu kerroksen sisällä. Näiden murtumatyyppien hallinta edellyttää huolellista tulostusparametrien optimointia. (Yao ym. 2020, 6–7.)



(a) Inter-layer failure mode.



Kuvio 5. Inter-kerros- ja intra-kerrosmurtumat (Yao ym. 2020, 5)

3.2 ASA (akrylinitriili-styreeni-akrylaatti)

ASA on kestävä ja mekaanisesti vahva termoplastinen polymeeri, joka soveltuu erityisesti ulkokäyttöön sen erinomaisen UV-säteilyn kestävyysansioista. ASA tarjoaa paremmat mekaaniset ominaisuudet kuin perinteisesti käytetty ABS (akrylinitriili-butadieeni-styreeni), sillä se kestää paremmin sään vaikutuksia ja lämpötilan vaihteluita. Lisäksi sen hyvä kerrosten välinen tarttuvuus parantaa lopullisen tuotteen iskunkestävyyttä ja kokonaislujuutta. (Raam Kumar, Sridhar, Venkatraman & Venkatesan 2021, 1316.)

Tulostussuunta ja täyttöaste vaikuttavat merkittävästi myös ASA-materiaalin lujuuteen. Tutkimusten mukaan Z-suuntaan (90°) ja 100 % täyttöasteella tulostetut kappaleet saavuttavat korkeimman vetolujuuden, jopa 52,2 MPa. Tämä ylittää perinteisesti ruiskuvalettujen ASA-osien vetolujuuden, joka on noin 44,2 MPa. Tämä osoittaa, että optimaalisesti valituilla tulostusparametreilla voidaan

saavuttaa jopa ruiskuvalettuja osia parempia mekaanisia ominaisuuksia. (Raam Kumar ym. 2021, 1318–1319.)

ASA:n käsittelyssä tulee huomioida mahdolliset haasteet, kuten kutistuminen ja vääntyminen tulostuksen aikana. Näitä ongelmia voidaan minimoida käyttämällä lämmitettyä tulostusalustaa sekä suljettua ja kontrolloitua tulostuskammiota. Lisäksi tulostusnopeuden ja jäähdytysprosessin optimoinnilla voidaan vaikuttaa merkittävästi lopputuotteen laatuun. ASA soveltuu erityisesti teollisiin ja ulkokäyttöön tarkoitettuihin sovelluksiin, kuten autoteollisuuden komponentteihin, säänkestäviin koteloihin ja rakennusmateriaalien valmistukseen. (Raam Kumar ym. 2021, 1317.)

4 FDM-TULOSTUKSEN KERROSTEN VÄLINEN TERMINEN LIITTYMINEN JA MEKAANINEN KESTÄVYYS

FDM-tulostuksessa kerrosten välinen terminen liittyminen tarkoittaa peräkkäisten filamenttikerrosten yhdistymistä yhdeksi kiinteäksi rakenteeksi. Tämä sidos on ratkaiseva lopputuotteen mekaanisten ominaisuuksien, kuten vetolujuuden ja iskunkestävyyden kannalta. Kerrosten välinen sidonta perustuu materiaalin pinta-energian, viskositeetin ja lämpötilan hallintaan, jotka mahdollistavat polymeeriketjujen diffuusion kerrosten rajapinnalla. (Acierno & Patti 2023, 12.)

4.1 Liittämiseen vaikuttavat parametrit

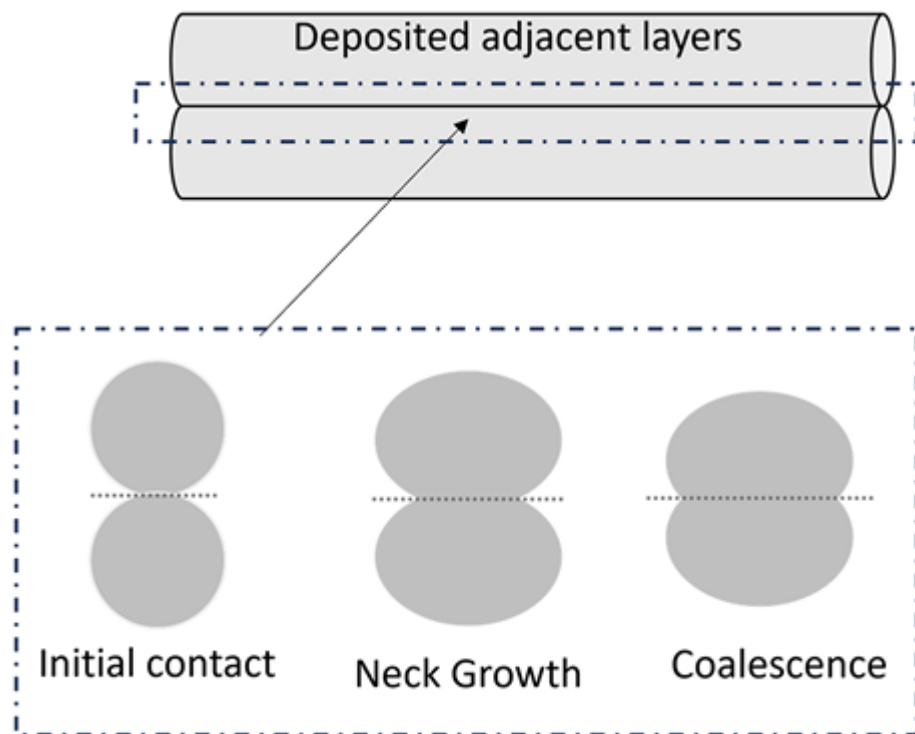
Liittämisen laatuun vaikuttavat keskeisesti seuraavat parametrit:

- Tulostuslämpötila: Liian matala lämpötila johtaa heikkoon kerrosten väliin sidokseen, koska materiaali ei sula kunnolla, eikä polymeeriketjujen diffuusio pääse tapahtumaan riittävästi. Liian korkea lämpötila taas voi aiheuttaa materiaalin hajoamista, mittatarkkuuden heikkenemistä ja pinnanlaadun huonontumista.
- Tulostusnopeus ja jäähdytys: Liiallinen nopeus vähentää materiaalin riittävästä kontaktiaikaa, mikä heikentää sidoksen muodostumista. Nopean jäähdytyksen myötä materiaali jäähtyy liian nopeasti estäen molekyylien diffuusion.
- Materiaaliominaisuudet: Viskositeetti ja leikkausnopeuden vaikutukset ovat keskeisiä. Useimmat termoplastiset polymeerit ovat leikkausohenevia (shear-thinning), jolloin viskositeetti vähenee materiaalin virratessa suuttimesta korkeilla leikkausnopeuksilla. (Acierno & Patti 2023, 13–14.)

4.2 Liittymisen vaiheet ja mekanismit

Terminen liittyminen kerrosten välillä tapahtuu kolmessa päävaiheessa (kuvio 6):

1. Pintakontakti (initial contact): Ensimmäisessä vaiheessa filamentti tulee kontaktiin aiemmin tulostetun kerroksen kanssa. Tässä vaiheessa materiaalin on oltava riittävän sulaa muodostaakseen hyvän kontaktin.
2. Kaulan muodostuminen (neck growth): Pintajännityksen vaikutuksesta vierekkäiset kerrokset yhdistyvät, muodostaen kiinteän yhteisen rajapinnan.
3. Kerrosten yhteenliittyminen (coalescence): Polymeeriketjut diffundoituvat kerrosten rajapintojen yli, muodostaen mekaanisesti vahvan liitoksen. Tämä vaihe on olennaisin, koska se määrää lopullisen sidoksen lujuuden. (Accierno & Patti 2023, 12–13.)



Kuvio 6. Kerrosten välinen liittyminen (Accierno & Patti 2023)

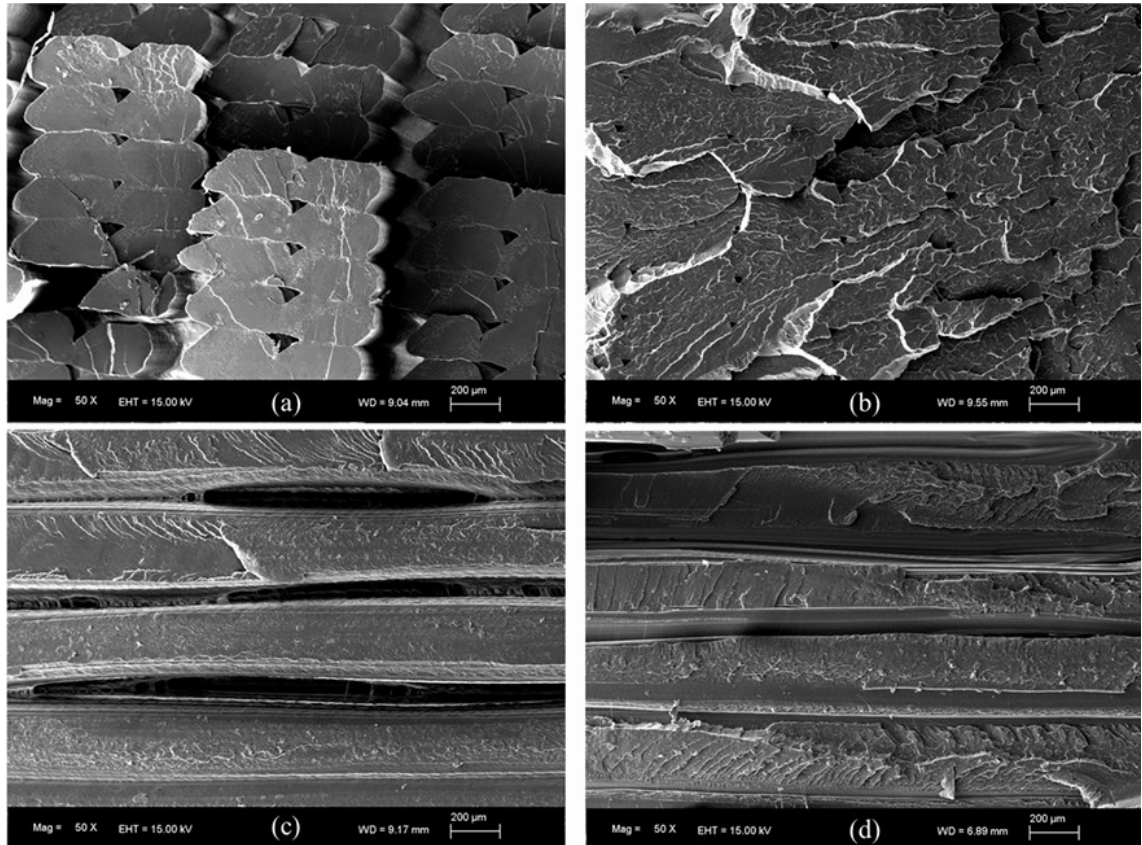
4.3 Mekaaninen kestävyys ja siihen vaikuttavat tekijät

FDM-tulosteet ovat rakenteeltaan anisotrooppisia, ja mekaaniset ominaisuudet voivat vaihdella merkittävästi tulostussuunnan mukaan. Erityisesti pystysuunnassa (Z-akselilla) tulostetut kappaleet ovat alttiimpia murtumille heikomman kerrosten välisen sidoksen vuoksi. (Yao ym. 2020, 4.)

Kerrosten välistä sidontaa voidaan arvioida käyttäen Dahlquist-kriteeriä, joka määrittää materiaalin tarttuvuuden minimijoustavuuden ja maksimijäykkyyden avulla. Käytännössä tämä tarkoittaa, että pursotetun materiaalin on pysyttävä riittävässä lämpötilassa (esimerkiksi yli 120 °C) vähintään yhden sekunnin ajan, jotta saavutetaan riittävä polymeeriketjujen diffuusio ja sitä kautta hyvä mekaaninen kestävyys. (Acierno & Patti 2023, 14.)

Tulostusparametrien, kuten kerrospaksuuden, lämpötilan, tulostusnopeuden ja jäähtymisen huolellinen optimointi voi merkittävästi parantaa kappaleiden mekaanista kestävyttä. Esimerkiksi pienemmät kerrospaksuudet ja hitaammat tulostusnopeudet johtavat yleensä parempaan kerrosten väliseen liittymiseen ja siten parempiin mekaanisiin ominaisuuksiin. (Yao ym. 2020, 6.)

Pursotussuuttimen lämpötilalla on ratkaiseva merkitys materiaalin virtaavuuteen ja kerrosten väliseen liittymiseen. Liian matalalla lämpötilalla PLA ei sula riittävästi, jolloin näkyy selkeitä ilmarakoja kerrosten välillä ja mekaaninen kestävyys heikkenee. Korkeammilla lämpötiloilla kerrosten välinen tartunta paranee, ja materiaalin rakenne tiivistyy. (Rivera-López ym. 2024, 10–12.) Kuviossa 7 esitetään pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM, scanning electron microscope) otetut kuvat vetokoekappaleiden murtopinnoista.

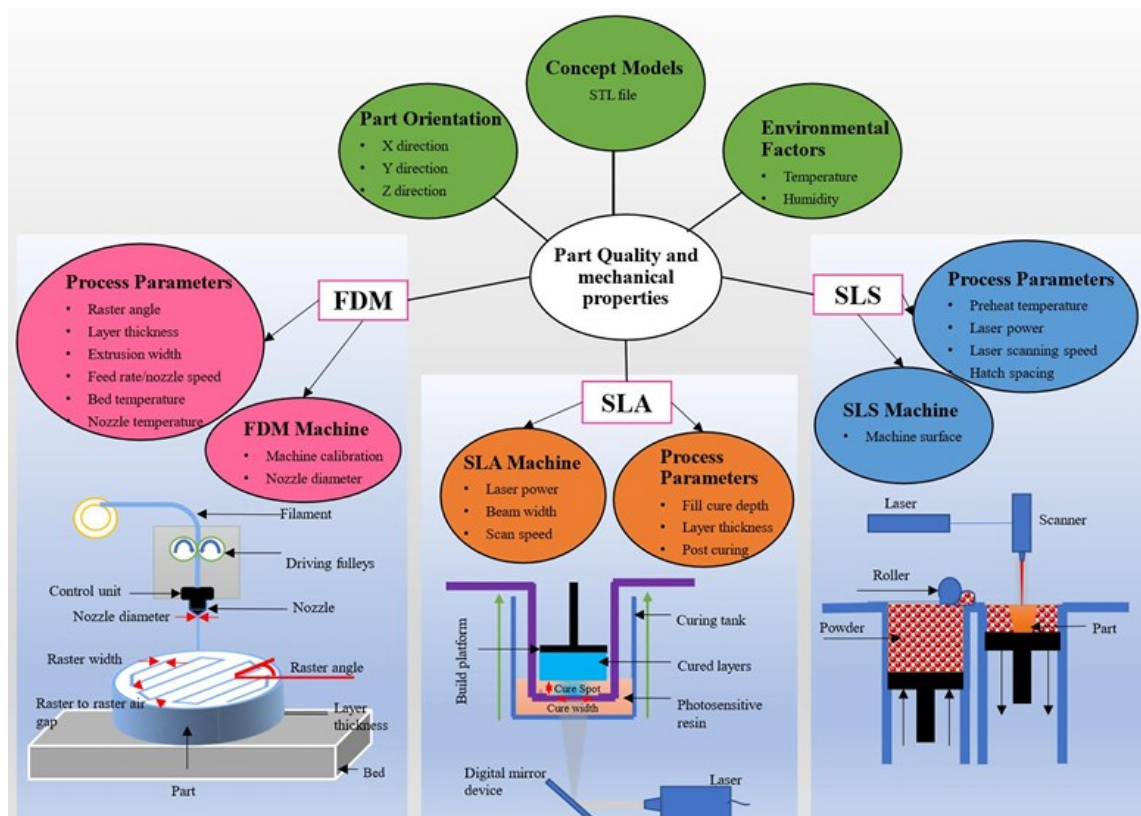


Kuvio 7. SEM-kuvat vetokoe-kappaleiden murtopinnasta (Rivera&Lopez 2024, 11)

Vaakasuuntaisesti tulostetuissa näytteissä (kuvat a ja b) nähdään selkeä ero 180 °C ja 240 °C lämpötiloilla valmistettujen kappaleiden välillä: matalassa lämpötilassa näkyy erillisiä kerroksia ja rakoja, kun taas korkeassa lämpötilassa kerrokset ovat tiiviisti liittyneet yhteen. (Rivera-López ym. 2024, 11.) Poikittaissuunnassa tulostetuissa kappaleissa (kuvat c ja d) lämpötilalla ei ollut tilastollisesti merkittävää vaikutusta mekaanisiin ominaisuuksiin. Tämä viittaa siihen, että tiettyissä tulostussuunnissa lämpötilan optimoinnilla on suurempi vaikutus. Tutkimuksen mukaan optimaalinen pursotussuuttimen lämpötila PLA:lle on välillä 220–240 °C, jolloin saavutetaan tasapaino hyvän kerrostarkunnan ja ylipursotuksen välille. (Rivera-López ym. 2024, 12.)

5 3D-TULOSTUSPROSESSIN OPTIMOINTI

3D-tulostusprosessin optimointi käsittää toimenpiteet, joilla parannetaan tulostuksen laatua, tarkkuutta, luotettavuutta ja tehokkuutta. Optimointiin kuuluvat tulostimen kalibrointi, parametrien säätäminen, materiaalien ja viipalointiasetusten valinta sekä jälkikäsittely. Prosessin optimoinnilla saavutetaan parempi pinnanlaatu, mekaaniset ominaisuudet ja mittatarkkuus sekä vähennetään virheitä ja tulostusaikaa. (Kafle ym. 2021, 4–5.) Erilaiset prosessiparametrit, laiteominaisuudet ja ympäristötekijät vaikuttavat osien laatuun ja mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten kuviossa 8 esitetään.



Kuvio 8. Tulostusparametrit (Kafle ym. 2021, 4)

Optimointi voidaan jakaa kolmeen pääalueeseen:

1. Tulostimen kalibrointi ja materiaali-kohtaiset asetukset
2. Tulostusparametrien säätö ja prosessin hallinta
3. Tulostuksen laadunvarmistus ja ongelmien hallinta

5.1 Tulostimen kalibrointi ja materiaalikohtaiset asetukset

Kalibrointi on tärkeä askel ennen varsinaista tulostusta. Väärin kalibroitu tulostin voi johtaa mittavirheisiin, kappaleen vääntymiseen sekä siihen, että suutin osuu tulostusalustaan (Kafle ym. 2021, 5). Lisäksi laitevalmistajan huolto-ohjeiden noudattaminen on välttämätöntä tulostimen suorituskyvyn ylläpitämiseksi.

Materiaalikohtaiset asetukset ja kalibroinnit tulee tehdä aina uuden materiaalin kohdalla laadun varmistamiseksi. Esimerkiksi optimaaliset arvot voivat vaihdella materiaalin, värin ja filamenttikelojen välillä. (Prusa3d 2025f.)

5.1.1 Tulostusalustan kalibrointi (Bed calibration)

Tulostusalustan kalibroinnin tarkoituksena on varmistaa, että suuttimen ja alustan välinen etäisyys on tasainen ja vakio koko tulostusalueella. Tasoituksen avulla varmistetaan, että suutin liikkuu tasaisesti alustalla ja filamentti kiinnittyy kunnolla ensimmäiseen kerrokseen. (Kafle ym. 2021, 5.)

Tulostusalustan säätö suoritetaan ensin manuaalisesti säätöruuvien avulla, minkä jälkeen automaattinen kalibrointi käyttää anturia mittaamaan alustan korkeuserot. Ohjelmisto kompensoi nämä erot luomalla virtuaalisen verkon (bed mesh), joka varmistaa tasaisen tulostuksen myös hieman epätasaisella alustalla. (Prusa3d 2025a.)

5.1.2 Z-offset

Z-offset määrittää suuttimen ja tulostusalustan välisen etäisyyden ja on tärkeä tekijä ensimmäisen kerroksen tarttuvuuden ja tulosteen laadun kannalta. Oikein säädetty Z-offset-arvo takaa optimaalisen filamentin pursotuksen, kun taas liian pieni etäisyys voi aiheuttaa suuttimen tukkeutumisen ja liian suuri etäisyys johtaa huonoon tarttuvuuteen ja kerrosten väliseen heikkoon sidokseen. (Prusa3d 2025d.)

Z-offsetin säätöön vaikuttavat useat tekijät, kuten käytetyn materiaalin ominaisuudet, suuttimen halkaisija ja tulostusympäristö. Esimerkiksi korkeamman lämpötilan materiaalit vaativat pienempää etäisyyttä alustasta tartunnan parantamiseksi. (Prusa3d 2025b.)

5.1.3 Materiaalin virtaus (Flow rate)

Materiaalin virtaus (flow rate) vaikuttaa materiaalin määrään, joka tulee suuttimesta ulos suhteessa ohjelmiston laskemiin arvoihin. Materiaalin virtauksen optimointi on olennaista, jotta saavutetaan tarkka ja laadukas tulostusjälki, sillä virtausasetukset määrittävät osaltaan tulosteen lopullisen mittatarkkuuden ja pinnanlaadun. (Prusa3d 2025f; Qidi3d 2025a.)

Liian suuri virtaus aiheuttaa materiaalin ylipursotusta, mikä heikentää mittatarkkuutta ja lisää jälkikäsitteilyn tarvetta. Liian pieni virtaus johtaa materiaalin aliekstruusioon, jolloin kappaleesta tulee hauras ja altis murtumiselle. Virtausasetukset kalibroidaan yleensä kokeellisesti, tulostamalla kalibrintikappaleita ja tekemällä tarvittavat säädöt tulosten perusteella. (Prusa3d 2025f; Qidi3d 2025a.)

5.1.4 Pressure Advance/ Linear advance

Pressure advance/ Linear advance eli paine-ennakointi on kalibrintitekniikka, joka ennustaa suuttimessa tapahtuvan paineen kertymisen tulostuksen aikana. Tulostimen laiteohjelmisto hyödyntää tätä ennustetta vähentääkseen filamentin pursotusta juuri ennen pysähtymistä ja hidastamista, mikä estää ylimääräisten materiaalikertymien muodostumisen erityisesti terävissä kulmissa. Tätä säätöä ohjaa niin sanottu K-arvo, joka määrittää Linear Advance -toiminnon vaikutuksen tulostukseen. (Prusa3d 2025g.)

Tämän kalibrinti voi olla tarpeellista, kun käytetään eri valmistajien filamentteja tai vaihdetaan suutinkokoa. Lisäksi kalibrintia tarvitaan silloin, kun tulostusparametrit kuten lämpötila tai linjavahvuus muuttuvat. (Qidi3d 2025b.)

5.1.5 Retraction (vetäytyminen)

Retraction, eli vetäytyminen, on tärkeä säätö filamenttisäikeiden muodostumisen (stringing) estämiseksi tulostuksen aikana. Kun tulostuspää siirtyy alueelta toiselle ilman materiaalin pursotusta, filamenttia vedetään takaisin suuttimesta, mikä vähentää ylimääräisen materiaalin valumista. (Prusa3d 2025h.)

Retraction asetusten säätämisessä tulee kuitenkin välttää liian korkeita arvoja, koska ne voivat johtaa alipursotukseen, kerrosten välisiin koloihin tai extruuderin

jumiutumiseen. Siksi asetusten optimointi on tärkeää, jotta saavutetaan paras mahdollinen tulostuslaatu ilman toimintahäiriöitä. (Bambulab 2025).

5.1.6 Maksimaalinen tilavuusnopeus (Max Volumetric Speed)

Maksimaalinen tilavuusnopeus määrittää suurimman filamenttimäärän, jonka suutin voi käsitellä sekunnissa (mm^3/s). Tämä asetus toimii eräänlaisena "nopeusrajoittimena", joka varmistaa, ettei filamentin syöttö ylitä suuttimen kykyä käsitellä materiaalia, mikä voisi johtaa tulostusvirheisiin. Oikean arvon määrittäminen riippuu käytetystä filamentista ja tulostimen kyvyistä. (Prusa3d 2025i.)

Tämän parametrin kalibrointi suoritetaan erityisesti silloin, kun käytetään kolmannen osapuolen filamenttia, jolle ei ole ennalta määritelty sopivaa tilavuusnopeutta tulostinohjelmistossa. Kalibrointitestissä selvitetään filamentin maksimaalinen tilavuusnopeus, jolloin voidaan säätää tulostusnopeutta ja -asetuksia materiaalin mukaan. Kalibrointi on suositeltavaa myös, jos tulostimeen vaihdetaan erikokoisia tai eri materiaalista valmistettuja suuttimia tai jos käytetään merkittävästi normaalia korkeampia tai matalampia tulostuslämpötiloja. Kalibrointi voi olla tarpeen myös silloin, kun havaitaan pursotuksen ongelmia, kuten täyttöjen katkeamista tai näkyviä puuttuvia linjoja mallin pinnassa. (Qidi3d 2025c.)

5.1.7 Suuttimen halkaisijan vaikutus

Suuttimen halkaisija vaikuttaa tulostuksen yksityiskohtaisuuteen ja nopeuteen. Pienempi halkaisija mahdollistaa tarkemmat yksityiskohdat mutta hidastaa tulostusta, kun taas suurempi halkaisija nopeuttaa tulostusta, mutta heikentää tarkkuutta ja pinnanlaatua. Halkaisijan valinta perustuu käyttötarkoitukseen. (Acierno & Patti 2023, 12–13.)

Suuttimen halkaisijalla on lisäksi merkittävä rooli kerroskorkeuden valinnassa. Yleinen suositus on, että kerroskorkeus ei ylitä 80 % suuttimen halkaisijasta. Tämän rajan ylittäminen voi johtaa heikkoon kerrosten väliseen tartuntaan ja huonoon pinnanlaatuun. Esimerkiksi 0,4 mm suuttimella maksimikerroskorkeus on noin 0,32 mm. Tätä pienempi kerroskorkeus parantaa yksityiskohtien tarkkuutta, mutta kasvattaa tulostusaikaa. Oikean kerroskorkeuden ja suuttimen halkaisijan

yhteensovittaminen on siten tärkeää sekä mekaanisen laadun että tulostusnopeuden kannalta. (3DJake 2024.)

5.1.8 Tulostuslämpötila pursotussuutin ja peti

Tulostuslämpötila vaikuttaa ratkaisevasti materiaalin viskositeettiin, kerrosten väliseen sidontaan ja siten tulosteen kokonaislaatuun. Alhainen tulostuslämpötila voi aiheuttaa kerrosten välistä heikkoa tartuntaa, kun materiaali ei sula tarpeeksi muodostaakseen vahvaa sidosta. Liian korkea lämpötila taas aiheuttaa materiaalin termistä hajoamista, johtaa mittatarkkuuden menetykseen ja heikentää pinnanlaatua. (Acierno & Patti 2023, 12–13.)

Lämmitetyn tulostusalustan tarkoitus on ensisijaisesti parantaa tulostettavan materiaalin tarttuvuutta alustaan ja ehkäistä kappaleen vääntymistä tai irtoamista tulostuksen aikana. Tämä saavutetaan pitämällä tulostusalusta lämpimänä, mikä tasapainottaa lämpötilan jakautumista ja vähentää tulostuskappaleeseen kohdistuvia sisäisiä jännityksiä. Alustan lämpötila asetetaan tyyppillisesti hieman käytettävän materiaalin lasisiirtymälämpötilan alapuolelle. Esimerkiksi PLA:n lasisiirtymälämpötila on noin 55–60 °C, ja sille suositeltu alustalämpötila on 50–60 °C. Näin varmistetaan, että ensimmäinen kerros tarttuu riittävän hyvin alustaan pehmenemättä kuitenkaan liikaa, mikä voisi aiheuttaa muodonmuutoksia (Polymaker 2023; Yang ym. 2025, 3–4.) Lämpötilan optimoinnissa kannattaa käyttää materiaalitoimittajan suosituksia lähtökohtana ja hienosäätää niitä koetulosteiden avulla.

5.2 Tulostusparametrien säätö ja prosessin hallinta

Kun tulostimen kalibrointi ja materiaalienkohtaiset asetukset ovat kunnossa, seuraava vaihe on tulostusparametrien säätäminen tulostettavan kappaleen käyttötarkoituksen mukaisesti. Näillä asetuksilla voidaan vaikuttaa muun muassa kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin, pinnanlaatuun, sekä itse tulostusaikaan.

5.2.1 Tulostusnopeus

Tulostusnopeus vaikuttaa tulostuksen tehokkuuteen, pinnanlaatuun ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Liian hidas nopeus pidentää valmistusaikaa ja voi aiheuttaa

materiaalin ylikuumentamista. Liian nopea tulostus puolestaan voi heikentää kerrosten sidosta ja vähentää mittatarkkuutta. Nopeuden optimointi on materiaali-kohtaista ja riippuu myös käytetystä suuttimen koosta. (Acierno & Patti 2023, 13–14.)

Optimaalinen tulostusnopeus löydetään usein käytännön kokeilujen avulla vertailemalla eri nopeuksilla tulostettujen kappaleiden laatua ja lujuutta. Näin löydetään paras mahdollinen yhdistelmä laatua, tarkkuutta ja tehokkuutta kullekin materiaalille ja sovellukselle.

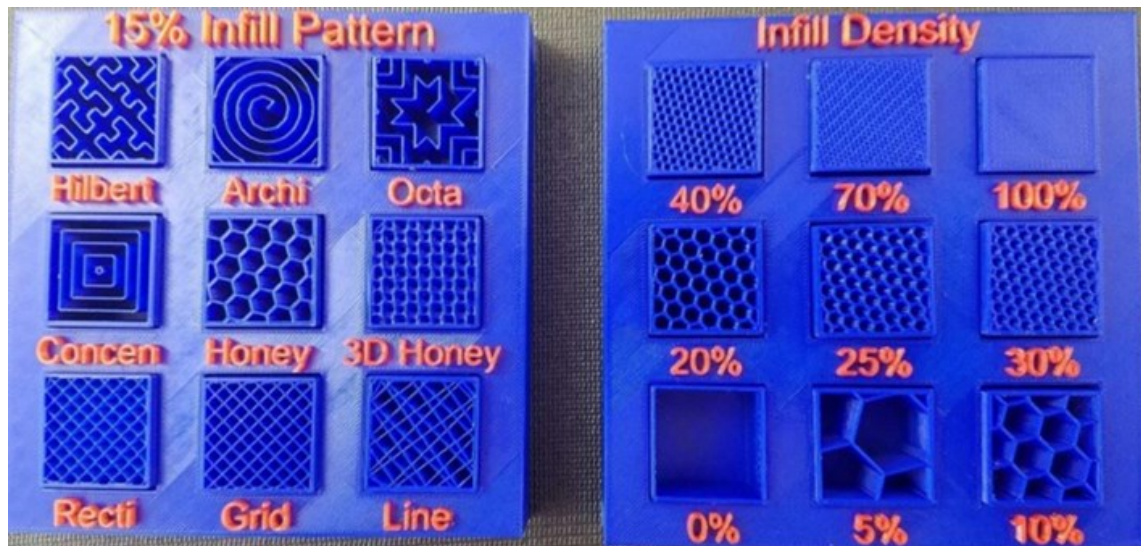
5.2.2 Kerrospaksuus

Kerrospaksuuden valinta vaikuttaa suoraan tulostuksen pinnanlaatuun ja tulostusaikaan. Ohuet kerrokset parantavat pinnanlaatua mutta kasvattavat valmistusaikaa, kun taas paksummat kerrokset nopeuttavat prosessia mutta voivat vähentää tulosteen yksityiskohtaisuutta. (Acierno & Patti 2023, 14.)

Kerrospaksuuden valintaan vaikuttavat erityisesti käyttökohteen vaatimukset. Tarkkuutta vaativissa sovelluksissa suositaan ohuita kerroksia, kun taas nopeutta ja kustannustehokkuutta painottavissa kohteissa voidaan käyttää paksumpia kerroksia.

5.2.3 Täyttökuvio ja täyttöaste

Täyttökuvio ja täyttöaste ovat keskeisiä parametreja 3D-tulostuksessa, jotka vaikuttavat suoraan valmistettujen kappaleiden mekaanisiin ominaisuuksiin, painoon, pinnanlaatuun ja materiaalikulutukseen (Lubombo & Huneault 2018, 214–215; Ferretti ym. 2021, 2–5). Kuviossa 9 on esitetty erilaisia täyttökuvioita ja täyttöasteita.



Kuvio 9. Täyttökuvioita ja täyttöasteita (all3dp 2023)

Täyttökuvio määrittää kappaleen sisäisen rakenteen geometrian. Tyypillisiä täyttökuvioita ovat suoraviivainen, ristikko, kolmio, hunajakkeno ja gyroid. Täyttökuvion valinta vaikuttaa kuormituksen jakautumiseen, rakenteen jäykkyyteen ja valmistuksen keston. Esimerkiksi gyroid- ja hunajakennomaiset kuviot jakavat kuormitusta useampaan suuntaan ja tarjoavat hyvän kompromissin keveyden ja lujuuden välillä. (Lubombo & Huneault 2018, 223–224; Ferretti ym. 2021, 5.)

Täyttökuvio vaikuttaa myös kappaleen anisotropiaan, eli mekaanisten ominaisuuksien suuntariippuvuuteen. Lubombo ja Huneault (2018, 222–225) havaitsivat, että täyttökuvion vaihtaminen samassa täyttöasteessa voi lisätä kappaleen jäykkyyttä jopa kaksinkertaiseksi ja lujuutta jopa 82 %. Erityisesti kolmio- ja hunajakennomaiset kuviot osoittautuivat rakenteellisesti vahvemmiksi kuin suoraviivaiset tai diagonaaliset kuviot.

Täyttöaste ilmaisee, kuinka suuri osa kappaleen sisätilavuudesta täytetään tulostusmateriaalilla. Täyttöaste voi vaihdella täysin ontosta (0 %) täysin kiinteään (100 %). Korkea täyttöaste parantaa lujuutta ja jäykkyyttä, mutta lisää valmistusaikaa ja materiaalinkulutusta. Vastaavasti matala täyttöaste nopeuttaa valmistusta ja säästää materiaalia, mutta samalla heikentää rakenteellista kestävyttä. (Lubombo & Huneault 2018, 218; Spoerk ym. 2019, 5–6.)

Täyttökuvion ja -asteen yhdistelmä määrittää kappaleen kokonaisvaltaisen suorituskyvyn. Ferretti ym. (2021, 5) osoittivat, että gyroid-kuvion ja 20 % täyttöasteen yhdistelmällä voidaan saavuttaa muottikäytössä mekaanisesti riittävän kestävä rakenne, joka kestää myös alipainelaminoinnin kuormituksen. Vastaavia havaintoja tehtiin myös Lubombon ja Huneaultin (2018, 226) tutkimuksessa, jossa todettiin, että osa täyttökuvioista mahdollistaa paremman mekaanisen suorituskyvyn alhaisemmillä täyttöasteilla.

Tulostusparametrien valinta tulisi siis aina suhteuttaa kappaleen käyttötarkoitukseen. Esimerkiksi rakenteellisiin osiin voidaan valita vahvempi täyttökuvio kuten hunajakennomainen tai kolmio, yhdistettynä korkeampaan täyttöasteeseen. Vastaavasti kevyemmissä tai visuaalisissa osissa voidaan käyttää yksinkertaisempia kuvioita ja alhaisempaa täyttöä. (Lubombo & Huneault 2018, 226; Spoerk ym. 2019, 5–6.)

5.2.4 Jäähdytys

Jäähdytysprosessilla on keskeinen merkitys FDM-tekniikalla valmistettujen kappaleiden laadun, mitanpitävyyden ja mekaanisen kestävyuden kannalta. PLA-materiaalilla liian nopea jäähtyminen voi johtaa jäännösjännitteiden kertymiseen, kerrosten välisiin delaminaatioihin ja kappaleen vääntymiseen. Hitaampi ja hallittu jäähdytys edistää materiaalin jännitystilojen tasaantumista ja voi näin parantaa tulosteen rakenteellista eheyttä. (Acierno & Patti 2023, 12–15; Bute ym. 2023, 2750.)

Tulostuksen aikana materiaalin jäähtyminen vaikuttaa suoraan filamenttien väliin tarttuvuuteen. Kun kerros jäähdytetään liian nopeasti alle kriittisen lämpötilan ennen uuden kerroksen levittämistä, saattaa tartunta jäädä heikoksi. Esimerkiksi hyvän kerrosten välisen sidoksen varmistamiseksi PLA-materiaalin tulisi pysyä yli 120 °C lämpötilassa vähintään yhden sekunnin ajan, jotta saavutetaan optimaalinen diffuusio ja fuusio. (Acierno & Patti 2023, 15.)

Jäähdytyksen hallinnalla on vaikutusta myös tulostettujen osien anisotropiaan. Epätasainen jäähtyminen voi aiheuttaa suuntautuneita jännityksiä ja johtaa materiaalin lämpölaajenemiskertoimien vaihteluun eri suunnissa. Tämä voi vaikuttaa

erityisesti osien toiminnallisuuteen, kun ne altistuvat lämpökuormitukselle käytön aikana. (Bute ym. 2023, 2747–2749.)

PLA on puolikiteinen termoplastinen materiaali, jonka kiteytymisaste vaikuttaa suoraan sen mekaanisiin ominaisuuksiin. Nopea jäähtyminen tulostuksen jälkeen estää kiteiden muodostumista, jolloin materiaalin jäykkyys ja lujuus jäävät alhaisiksi. Toisaalta hidus jäähdytys tai jälkilämpökäsittely (esim. 100–130 °C:n lämpötilassa) lisää kiteytymistä ja parantaa kappaleen rakenteellista suorituskykyä. (Bute ym. 2023, 2750.)

Alustan lämpötila on merkittävä parametri, jolla voidaan hallita jäähdytystä. Riittävän lämmin alusta estää ensimmäisten kerrosten ennenaikaisen jäähtymisen ja mahdollistaa paremman tartunnan alustaan. Tämä pienentää kappaleen vääntymisriskiä ja parantaa mitanpitävyyttä PLA-tulosteissa. (Acierno & Patti 2023, 14; Rivera-López ym. 2024, 7.)

5.2.5 Seinämävahvuudet ja ironing

Seinämävahvuuksilla tarkoitetaan ulkoseinämien sekä ylä- ja alakerrosten paksuutta ja määrää. Näillä parametreilla on keskeinen rooli FDM-tekniikalla valmistettujen kappaleiden mekaanisten ominaisuuksien, pinnanlaadun ja rakenteellisen kestävyuden kannalta. Seinämävahvuudet määritellään yleensä suuttimen halkaisijan monikertoina. Seinämien määrän kasvattaminen lisää erityisesti kappaleen jäykkyyttä ja vetolujuutta, mutta kasvattaa samalla materiaalin kulutusta ja tulostusaikaa. (Kuznetsov ym. 2018, 4–5; Patil ym. 2021, 4881.)

Ylä- ja alakerrosten riittävä määrä vaikuttaa merkittävästi kappaleiden visuaaliseen ja rakenteelliseen laatuun. Erityisesti yläkerrokset estävät täyttökuvion (infill) näkymistä yläpinnan läpi ja mahdollistavat sileämmän, ehyemmän pintarakenteen. Tarvittava kerrosten määrä riippuu käytetystä kerrospaksuudesta. Esimerkiksi 0,3 mm:n kerrospaksuudella kolmen kerroksen kokonaispaksuus (0,9 mm) on katsottu vähimmäistasoksi. Vastaavasti 0,1 mm:n kerrospaksuudella suositeltava vähimmäismäärä on yhdeksän kerrosta. Kuviossa 10 on esitettyinä yläkerrosten määrän vaikutus kappaleen pinnanlaatuun. Vasemmalta oikealle 1, 2, 3 ja 5 kerrosta 0,1 mm kerrospaksuudella tulostettuna. (Prusa3d 2025d.)



Kuvio 10. Yläkerrosten määrän vaikutus (Prusa3d 2025d)

Tulosteiden pinnanlaatua voidaan edelleen parantaa hyödyntämällä ironing-asetusta. Ironing on toiminto, jossa suutin liikkuu yläpinnan yli erittäin ohuella materiaalivirralla tasoittaen pintaa ja täyttäen pienetkin epätasaisuudet. Tämä prosessi vähentää näkyviä kerrosjälkiä ja parantaa pinnan sileyttä ilman mekaanista jälkikäsitelyä. On kuitenkin huomioitava, että ironing lisää tulostusaikaa, erityisesti suurilla pinta-aloilla, ja saattaa joissakin tapauksissa lisätä lämpökertymän riskiä, mikä voi johtaa suuttimen tukkeutumiseen. (Prusa3d 2020e.)

5.3 Prosessin laadunvarmistaminen

Laadunvarmistaminen on keskeinen osa tulostusprossia, erityisesti silloin kun pyritään tuottamaan mittatarkkoja ja toiminnallisia komponentteja. Laadunhallinta alkaa jo ennen tulostusta oikeiden prosessiparametrien määrittelystä ja laitteiston kalibroinnista ja jatkuu aina valmiin kappaleen mittaukseen sekä arviointiin saakka. (Ureña ym. 2022, 291–296.)

Valmiin kappaleen tarkastusvaiheessa käytetään visuaalista arviointia, mittatarkkuuden tarkastelua sekä pinnanlaadun mittaamista. Mittaustulokset voivat toimia palautteena seuraaviin tulostuskierroksiin, muodostaen palautesilmukan, jonka avulla prosessin toistettavuutta ja luotettavuutta voidaan parantaa asteittain. Edistyneissä sovelluksissa hyödynnetään myös ei-tuhoavia testausmenetelmiä, kuten röntgentomografiaa ja ultraäänikuvantamista, sisäisten virheiden, kuten huokosten, halkeamien tai sulamattomien alueiden havaitsemiseksi. (Ureña ym. 2022, 291–296.)

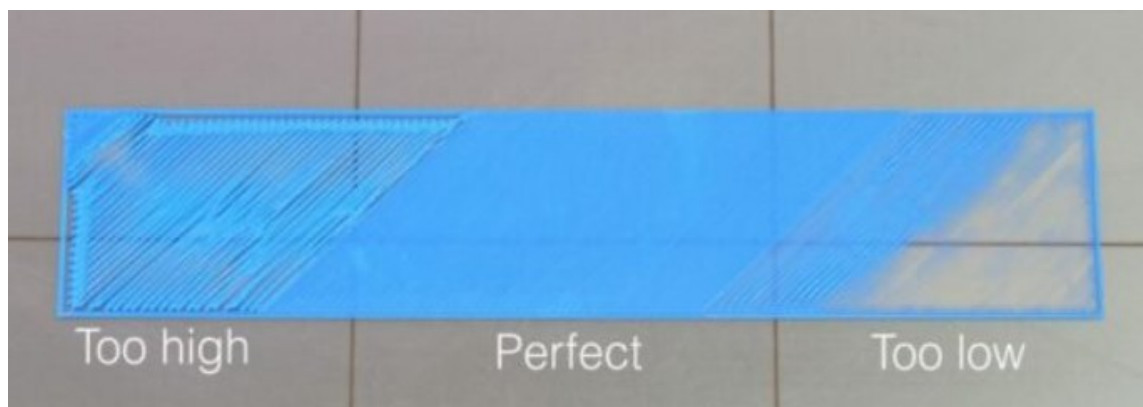
6 YLEISIMMÄT ONGELMAT JA NIIDEN HALLINTA FDM-TULOSTUSPROSESSISSA

3D-tulostuksessa esiintyy toistuvasti ongelmia, jotka voivat heikentää lopputuotteen laatua tai estää tulostusprosessin onnistumisen. Yleisimpiä haasteita ovat kappaleiden irtoaminen alustasta, ongelmat pinnanlaadussa, mittapoikkeamat, sekä tukirakenteisiin liittyvät vaikeudet. Usein ongelmien taustalla on virheellisiä tulostusasetuksia, puutteita kalibroinnissa tai tulostusympäristön olosuhteissa.

Tässä luvussa käsitellään yleisimpiä FDM-tulostusprosessiin liittyviä ongelmia ja niiden taustalla olevia syitä. Lisäksi esitetään tehokkaita ratkaisuja, joilla voidaan parantaa sekä tulosteiden laatua että tulostusprosessin luotettavuutta.

6.1 Tulostetun kappaleen irtoaminen alustasta

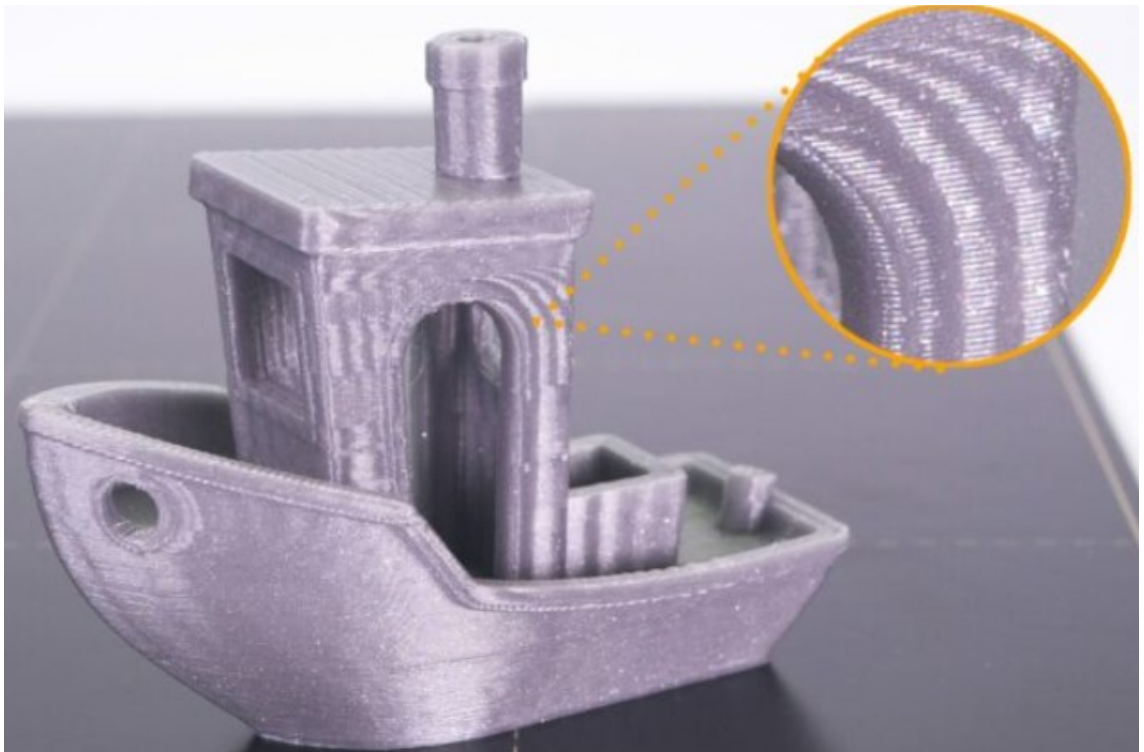
Kappaleen irtoaminen alustasta on yksi FDM-tulostuksen yleisimmistä ongelmista. Syynä voi olla muun muassa väärä Z-offset arvo, liian alhainen alustan lämpötila, alustan likaantuminen tai sopimaton materiaaliyhdistelmä. Tarttuvuuden parantamiseksi suositellaan esimerkiksi PEI-pinnoitettua alustaa PLA:lle, tulostusalustan lämmön säätämistä ja tarvittaessa liimapuikon käyttöä. Myös tulostusalustan puhtaus on ratkaiseva tekijä. (Prusa3d 2025d.) Kuviossa 11 on esitettyä pursotussuuttimen etäisyyden vaikutus tulostusalustasta.



Kuvio 11. Ensimmäinen kerros (Prusa3d 2025d)

6.2 Huono pinnanlaatu ja epätasaiset kerrokset

Huonon pinnanlaadun ja epätasaisten kerrosten syynä on usein virheellisesti valitut tulostusparametrit kuten liian korkea kerrospaksuus, virheellinen tulostuslämpötila tai virtausnopeus. Lisäksi pinnanlaadun virheet voivat viestittää laitteen mekaanisista ongelmista (kuvio12).



Kuvio 12. Ghosting-ilmiö (Prusa3d 2025c)

Ghosting on ongelma, joka on havaittavissa kappaleessa useina aaltojälkinä terävien kulmien jälkeen. Tämä johtuu usein X/Y akseleiden hihnojen väärästä jännityksestä, kuluneista lineaarilaakereista tai tulostuksen aikana esiintyvistä täristä. (Prusa3d 2025c.)

6.3 Warping eli kappaleen käpristyminen

Warping tarkoittaa FDM-tulostuksessa yleisesti esiintyvää ongelmaa, jossa kappaleen kulmat tai reunat irtoavat alustasta jäähtymisen aikana tapahtuvan epätasaisen kutistumisen seurauksena (kuvio 13). Kun materiaalin eri osat jäähtyvät eri nopeuksilla, syntyy sisäisiä jännityksiä, jotka voivat aiheuttaa kappaleen muodonmuutoksia. Erityisesti suuret, tasaiset pinnat ja terävät kulmat ovat herkkiä

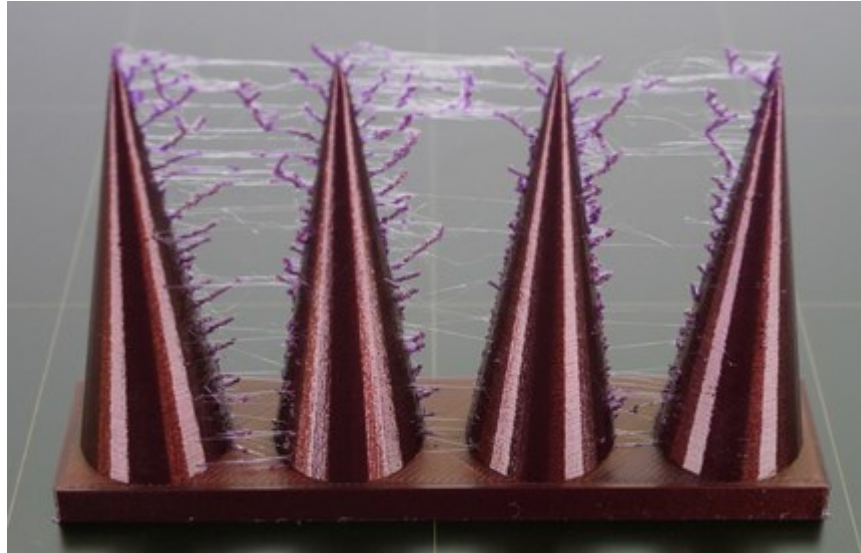
käpristymiselle, koska lämpötilaerot ja kutistumisvoimat keskittyvät näihin kohtiin. (Spoerk ym. 2020, 7.)



Kuvio 13. Warping-ilmiö FDM-tulostuksessa (Prusa3d 2025j)

Warpingin ehkäisemiseksi käytetään lämmitettyä tulostusalustaa ja suljettua tulostuskammiota, jotka auttavat säilyttämään tasaisemman lämpötilajakauman koko tulostuksen ajan. Lisäksi suositellaan käyttämään riittävää alustalle tarttuvaa ensimmäistä kerrosta, optimoimaan materiaalin virtausparametrit sekä valitsemaan tulostettavien kappaleiden suunnittelussa geometrisia muotoja, jotka vähentävät kulmien jyrkkyyttä ja siten minimoivat sisäisten jännitteiden syntymistä. (Spoerk ym. 2020, 7.)

Stringing-ilmiössä suutin jättää kappaleeseen ohuet langat, jotka muodostuvat, kun sula materiaali valuu tai venyy suuttimesta kahden tulostuspisteen välillä (kuvio 14). Ilmiön yleisiä syitä ovat liian korkea tulostuslämpötila, puutteelliset takaisinventoasetukset (retraction) tai liian suuri materiaalin virtaus. Näitä ongelmia voidaan vähentää optimoimalla tulostuslämpötila, pienentämällä virtausta ja säätämällä retraction-asetukset materiaalin mukaan. Esimerkiksi retraction-pituuden ja -nopeuden säätö voi vaikuttaa merkittävästi langan muodostumiseen. (Prusa3D 2025h.)



Kuvio 14. Stringing-ilmiö (Prusa3d 2025h)

6.4 Ali- ja ylipursotus

Alipursotuksessa suuttimesta tuleva materiaalmäärä on liian pieni suhteessa ohjelmoidun kerroksen tilavuuteen. Tämä johtaa huonoon kerrosten tartuntaan, huokoiseen rakenteeseen ja heikentyneeseen lujuuteen. Syynä voi olla esimerkiksi virheellinen materiaalin virtaus (flow rate), liian matala tulostuslämpötila tai osittain tukkeutunut suutin. (Prusa3d 2025f.)

Ylipursotuksessa taas materiaalia tulee liikaa, mikä aiheuttaa kerrosten paisumista, mittatarkkuuden heikkenemistä ja huonontunutta pinnanlaatua. Ongelmat voidaan minimoida kalibroimalla materiaalin virtaus oikein ja tarkistamalla suuttimen kunto sekä lämpötilan soveltuvuus filamentille. (Prusa3d 2025f.) Kuviossa 15 on esitettyä vasemmalta oikealle alipursotus, sopiva ja ylipursotus.

Gaps between the lines



Underextrusion

Too much material in the corner
and more visible layers



OK



Overextrusion

Kuvio 15. Ali- ja ylipursotus (Prusa3d 2025f)

7 JÄLKIKÄSITTELYMENETELMÄT

FDM-tekniikalla valmistettujen kappaleiden pinnanlaatu ei aina vastaa käyttötarkoituksen vaatimuksia suoraan tulostuksen jälkeen. Pinnankarheus, näkyvät kerrosrajat ja mahdolliset valmistusvirheet voivat vaikuttaa osan toiminnallisiin ominaisuuksiin ja ulkonäköön, jolloin jälkikäsittely on usein tarpeellista. Jälkikäsittelyllä voidaan parantaa kappaleiden mekaanisia, kemiallisia, termisiä ja esteettisiä ominaisuuksia sekä niiden mittatarkkuutta ja kestävyyttä. (Dizon, Gache, Cascolan, Cancino & Advincula. 2021, 2.)

7.1 Mekaaniset menetelmät

Mekaanisia menetelmiä käytetään yleensä pinnankarheuden vähentämiseen ja näkyvien kerrosten tasoittamiseen. Näitä ovat muun muassa hionta, kiillotus ja rakojen täyttö.

Hionta on yksinkertainen menetelmä, jolla saavutetaan tasaisempi pinta ja parempi mittatarkkuus. Hiontaan käytetään erilaisia hiomapapereita tai hiomakoneita riippuen käsiteltävän pinnan muodosta ja halutusta lopputuloksesta. (Dizon ym. 2021, 10.)

Kiillotus täydentää hiontaa ja parantaa kappaleen pinnanlaatua edelleen. Kiillotuksessa voidaan käyttää kiillotusainetta tai -vahoja, joiden avulla saavutetaan erittäin sileä ja kiiltävä pinta. (Hubs 2023a.)

Rakojen täyttö toteutetaan erityisesti, kun pinnalla on näkyviä aukkoja tai epätasaisuuksia. Täytteenä käytetään tavallisesti epoksihartsia tai vastaavaa materiaalia, joka levitetään epätasaiselle pinnalle ja hiotaan lopuksi tasaiseksi. (Dizon ym. 2021, 10.)

7.2 Kemialliset menetelmät

Kemiallisten menetelmien tavoitteena on saavuttaa sileämpi pinta tai kappaleiden välinen sidos liuottamalla kappaleen uloimpia kerroksia. Näistä yleisimpiä ovat höyrytasoitus, epoksinnoitus, upottaminen ja kylmähitsaus. (Hubs 2023a.)

Höyrytasoitus on kemiallinen menetelmä, jossa kappale altistetaan liuottimen höyrylle, joka sulattaa pinnan ohuelti, mikä tasoittaa kerrosten väliset rajat ja parantaa pinnanlaatua. Tämä menetelmä sopii erityisesti ABS- materiaalille, joka reagoi hyvin asetonihöyryyn. (Ferretti ym. 2021, 3; Dizon ym. 2021, 11.)

Epoksinnoitus lisää kappaleen lujuutta ja kestävyyttä samalla tasoittaen pinnan epätasaisuuksia. Epoksikerroksen paksuutta voidaan säädellä tarpeen mukaan, ja sen avulla saadaan myös hyvä mekaaninen suoja. (Dizon ym. 2021, 10.)

Upottaminen tarkoittaa kappaleen upottamista liuottimeen lyhyeksi aikaa, jolloin pinta tasoittuu kemiallisen sulamisen kautta. Tätä menetelmää voidaan käyttää erityisesti ABS-muoville käyttämällä asetonia, kun taas PLA-materiaalille voidaan hyödyntää esimerkiksi metyylietyyliketonia (MEK) tai tetrahydrofuraania (THF). (Hubs 2023a.)

Kylmähitsaus on menetelmä, jota käytetään erityisesti ABS-muovista valmistettujen osien yhteen liittämiseen. Prosessissa käytetään asetonia, joka liuottaa ABS-materiaalia ja mahdollistaa osien kemiallisen sitoutumisen toisiinsa. Kappaleiden yhdistämiseksi niiden pinnat käsitellään kevyesti asetonilla ja puristetaan yhteen, kunnes liuotin haihtuu ja syntyy vahva sidos. (Hubs 2023a.)

7.3 Pinnoitteet ja maalaus

Maalauksella ja erilaisilla pinnoitteilla voidaan paitsi parantaa kappaleen ulkonäköä myös antaa sille erityisominaisuuksia, kuten UV-säteilyltä suojaava kerros tai vedenkestävyys. Pohjamaalaus ja varsinainen pintamaalaus parantavat pintalaatua ja suojaavat kappaletta ympäristövaikutuksilta. (Dizon ym. 2021, 14–15.)

Metallipinnoituksella voidaan lisätä kappaleen kestävyyttä, kulutuksenkestoa sekä sähkönjohtavuutta. Tämä voidaan tehdä elektrolyttisesti tai kemiallisesti riippuen kappaleen käyttötarkoituksesta. (Dizon ym. 2021, 18–19.)

Kuviossa 16 on esitetty esimerkkejä eri jälkikäsittelymenetelmistä. Vasemmalta oikealle nähdään seuraavat käsittelyvaihtoehdot: kylmähitsaus, rakojen täyttö, käsittelemätön pinta, hiottu, kiillotettu, maalattu ja epoksinnoitettu.



Kuvio 16. Jälkikäsitellyt kappaleet (Hubs 2023a)

8 LAITTEISTO JA OHJELMISTO

Tulevat testit ja tulosteet suoritetaan Creatbot D1000 -tulostimella, joka on suunniteltu teolliseen käyttöön sekä Orcaslicer-viipalointiohjelmistolla, joka tarjoaa monipuoliset työkalut tulostusprosessin hallintaan. Näiden yhdistelmä mahdollistaa tehokkaan tulostuksen ja laadukkaiden teknisesti vaativien kappaleiden valmistuksen.

8.1 Creatbot D1000

Kuviossa 17 on Creatbot D1000 suurikokoinen FDM-tulostin, jossa käytetään Marlin 2 -firmware-ohjelmistoa. Tulostimen 1000 × 1000 × 1000 mm tulostusalue mahdollistaa suurten valumallien valmistamisen yhtenä kappaleena ilman liitoksia. Korkea maksimitulostuslämpötila (420 °C) sekä lämmitettävä kammio tukevat laajaa materiaalivalikoimaa, kuten PLA:ta ja ASA:ta. Tulostusalueesta koostuu neljästä erillisestä 500 × 500 mm alumiinilevystä ja teksturoiduista PEI-jousiteräsvyistä. Suositeltu tulostusnopeus on 60 mm/s, ja maksimi 120 mm/s (Creatbot 2025). Tämän työn aikana tulostimessa käytetään messinkisuutinta, jonka halkaisija on 0.8 mm.



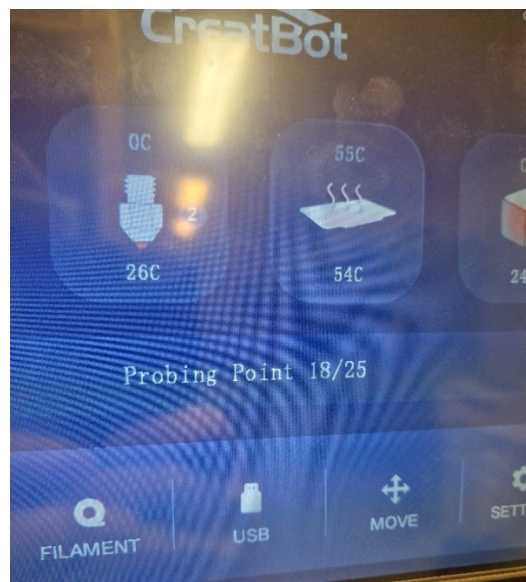
Kuvio 17. Creatbot D1000 tulostin (Cadsolutions 2025)

Laite sisältää automaattisen alustan kalibrointijärjestelmän (auto bed leveling), joka mittaa korkeuden 100 pisteestä valmistajan mukaan (Creatbot 2025). Tulostimen käyttö kuitenkin osoittaa mittapisteiden rajoittuvan 25:een, kuten Octoprintin kuvioista 18 on havaittavissa.

Mesh z Height in: mm					
0	-0.302	-0.153	0.007	0.018	-0.029
250	-0.367	-0.225	-0.094	-0.060	-0.055
500	-0.189	-0.096	0.080	-0.031	-0.068
750	-0.227	-0.085	0.298	0.086	0.074
1000	-0.073	-0.241	0.169	-0.162	0.090
	0	250	500	750	1000
	x - Position			y - Position	

Kuvio 18. Creatbot D1000 probe pisteiden todellinen määrä

Todellisten mittapisteiden määrä 25 voidaan todeta myös tulostimen ohjauspaneelista (kuvio 19). Mittapisteiden todellisen määrän ero ilmoitettuun nähden voi vaikuttaa tulostusalustan tasaisuuden optimointiin ja sitä kautta tulostettujen kappaleiden laadun tasaisuuteen.



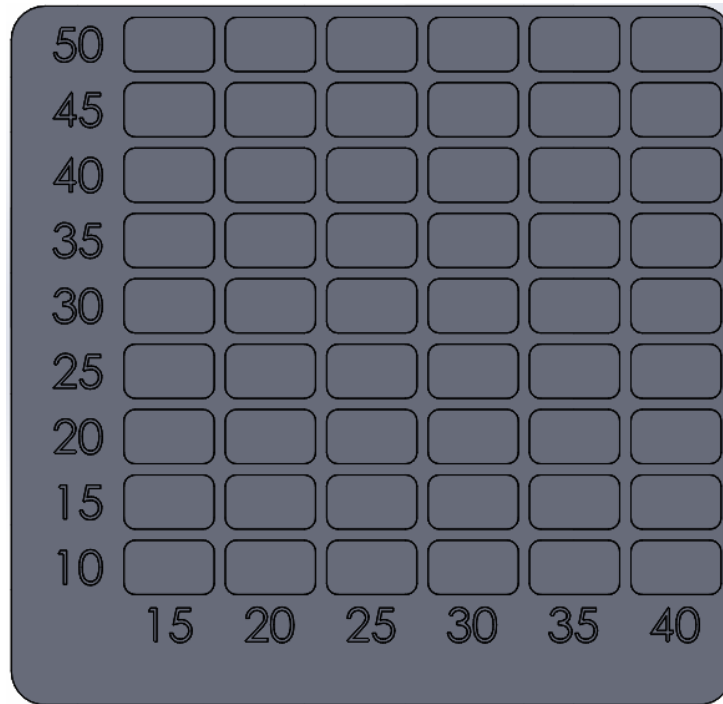
Kuvio 19. Creatbot D1000 probe pisteiden määrä

8.2 Orcaslicer 2.2.0

Tässä työssä käytetty viipalointiohjelmisto on Orcaslicer versiossa 2.2.0. Kyseessä on avoimen lähdekoodin viipalointiohjelma, joka perustuu Bambu Studion lähdekoodiin. Orcaslicer on kehitetty 3D-tulostusprosessin ohjaamiseen siten, että se muuntaa digitaaliset 3D-mallit tulostimen ymmärtämäksi G-koodiksi. Tämä G-koodi määrittää kerros kerrokselta, miten tulostin rakentaa fyysisen mallin. (Orcaslicer 2025.)

Ohjelmisto sisältää useita hyödyllisiä ominaisuuksia, kuten kalibrointityökaluja (esim. tulostuslämpötila, materiaalin virtaus ja paineen ennakko) sekä asetuksia tulostusparametrien optimointiin. Orcaslicer tukee useita yleisiä 3D-tulostinmalleja, erityisesti Marlin- ja Klipper-laiteohjelmistoihin perustuvia koneita. Lisäksi ohjelmisto toimii hyvin yhdessä Octoprintin kanssa, jonka kautta G-koodi lähetetään verkkopohjaisesti tulostimelle. Octoprintin avulla voidaan etäohjata ja valvoa tulostusprosessia, ja seurata esimerkiksi tulostusalustan lämpötilaa reaaliajassa. (Orcaslicer 2025.)

Ohjelmiston kalibrointityökaluihin ei sisälly erillistä työkalua ironing-asetusten säätöön, joten tätä varten kehitettiin työn aikana kuviossa 20 esitetty kalibrointityökalu, jonka avulla testattiin ironing-toiminnon nopeusarvoja välillä 15–40 mm/s sekä virtauksen arvoja välillä 10–50 %



Kuvio 20. CAD kuva ironing kalibrintityökalusta

9 TULOKSET

Työn tavoitteena oli kehittää 3D-tulostusprosessia siten, että saavutetaan valimokäyttöön sopiva valumalli mahdollisimman vähäisellä jälkikäsittelyllä sekä ratkaista kappaleiden irtoaminen alustasta. Lisäksi tavoitteena oli luoda selkeä käyttöohjeistus prosessin toteuttamiseksi.

Tässä luvussa esitellään työn aikana saavutetut tulokset valumallin valmistuksessa FDM-tekniikalla. Luku on jäsennetty siten, että ensin kuvataan optimoidut tulostusasetukset (materiaali- ja slicer-asetukset), minkä jälkeen käsitellään testituloksia ja valmiin testikappaleen onnistumista.

Optimointi keskittyi erityisesti tulostetun kappaleen pinnanlaadun parantamiseen ja alustaan tarttuvuuden tehostamiseen. ASA-materiaali jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle, koska PLA-materiaalilla saavutettiin tarvittavat ominaisuudet kustannustehokkaasti. Valumallin geometria ja käyttötarkoitus huomioiden mekaanisten ominaisuuksien optimointi ei ollut tarpeellista.

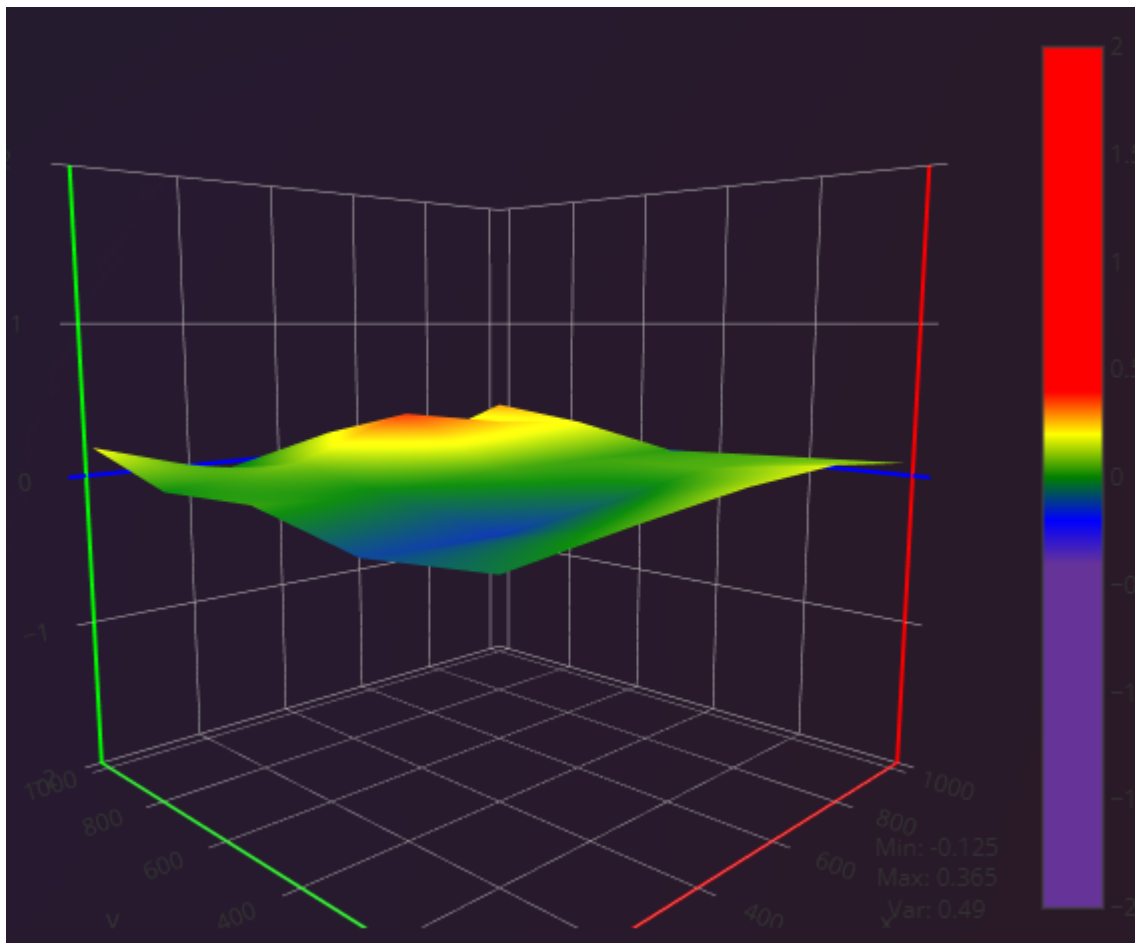
Tulosten arviointi toteutettiin kolmella eri osa-alueella: pinnanlaatu, mittatarkkuus sekä kerrosten välinen sidos. Pinnanlaatu arvioitiin silmämääräisesti tarkastelemalla, sekä kädellä tunnustelemalla tulosteen pintoja eri valaistusolosuhteissa. Mittatarkkuus todettiin vertaamalla tulosteen mittoja STL-tiedoston mittoihin. Mittaukset suoritettiin työntömitalla, ja kohteiksi valittiin useita eri kohtia mallin eri suunnista, jotta mahdolliset geometriasta johtuvat poikkeamat voitiin havaita. Kerrosten välistä sidoslujuuutta arvioitiin mekaanisesti taivuttamalla tai vääntelemällä tulosteita käsin. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin kerrokset ovat tarttuneet toisiinsa ja ilmeneekö delaminaatiota. Vaikka menetelmä ei tuota tarkkoja mitta-arvoja, se antaa riittävän käsityksen tulostusparametrien vaikutuksesta mekaaniseen kestävyyteen kerrosten välillä.

9.1 Optimoidut tulostusasetukset

Tulostusparametreja säädettiin systemaattisesti luvun 5 mukaisesti, jotta lopputuloksesta saatiin tasalaatuinen ja virheetön. Keskeisiä säädettäviä parametreja olivat suuttimen ja tulostusalustan lämpötilat, materiaalin virtaus, tulostusnopeus, kerrospaksuus sekä täyttöprosentti ja täyttökuvio.

Kokeellisen tutkimuksen perusteella määritettiin optimaaliset tulostusparametrit Colorfabb PLA-materiaalille (liite 1) käyttäen Creatbot D1000 -tulostinta. Optimointi toteutettiin vaiheittain: ensin laitteen kalibrointi, sitten materiaalikohtaisten asetusten säätö käyttäen Orcaslicerin kalibrointityökaluja ja lopuksi slicer-asetusten hienosäätö.

Tulostusalusta tasattiin ensin manuaalisesti sen alapuolella olevista 20 säätöruuvista valmistajan ohjeiden mukaisesti, minkä jälkeen suoritettiin automaattinen tasoitus (auto bed leveling), josta tulostimen etäohjaus ohjelmisto Octoprint muodosti visuaalisen verkon (kuvio 21).



Kuvio 21. Visuaalinen bed mesh Octoprint sovelluksessa

Kuvasta voidaan todeta alustan korkein (0.365 mm) ja matalin (-0.125 mm) kohta, sekä näiden erotus (0.49 mm). Testikappaleiden silmämääräisen tarkastelun perusteella laite pystyi kompensoimaan alustassa olevat korkeuserot, joten alustan katsottiin olevan hyväksyttävässä kunnossa.

9.1.1 Materiaalikohtaiset asetukset PLA

Kokeiden perusteella seuraavat materiaalikohtaiset asetukset PLA- materiaalille tuottivat parhaan lopputuloksen:

- Tulostuslämpötila: 215 °C. Tämä tuotti hyvän pinnanlaadun sekä riittävän kerrosten välisen sidoksen.
- Tulostusalustan lämpötila: 55 °C. Tämä osoittautui optimaaliseksi kappaleen tarttuvuuden kannalta, mikä vähensi merkittävästi kappaleiden irtoamista alustasta ja oli linjassa aiempien Yang ym. (2025) havaintojen kanssa.
- Materiaalin virtaus: 0.95. Tämä varmisti hyvän pinnanlaadun ja mittatarkkuuden.
- Pressure advance/ linear advance -toimintoa ei voitu hyödyntää tulostimen nykyisellä firmwarella.

9.1.2 Slicer-asetukset

Seuraavat slicer-asetukset osoittautuivat optimaaliksi valumallin valmistuksessa:

- Kerrospaksuus: 0.3 mm, ensimmäinen kerros 0.4 mm 1.06 materiaalin virtauskertoimella. Tämä yhdistelmä tarjosi hyväksyttävän pinnanlaadun, kohtuullisen tulostusajan ja paransi kappaleen tarttuvuutta kompensoimalla alustan epätasaisuuksia entisestään.
- Täyttökuvio ja täyttöaste: 20 % rectilinear-täyttö osoittautui parhaaksi suhteessa kestävyteen, aikaan ja materiaalin käyttöön, mikä riitti luvussa 2.4 esitettyihin valuprosessin kuormituksiin.
- Seinien määrä: Kolme seinää paransi pinnanlaatua ja lisäsi kestävyttä, vaikka hieman pidensikin tulostusaikaa.

- Ylä- ja alakerrosten määrä: Viisi yläkerrosta riitti peittämään täyttökuvion, sekä muodosti siistin ja ehyen pinnan, joka on linjassa Prusa3d kanssa. Kolme alakerrosta toi kappaleeseen tarvittavan keston.
- Tulostusnopeudet: Ensimmäisen kerroksen nopeus nostettiin 8.4 mm/s:sta 30 mm/s:iin, ensimmäisen kerroksen täyttönopeus 12.6 mm/s:sta 50 mm/s:iin ja ulkoseinämien nopeudet 29.2 mm/s:sta 54 mm/s:iin. Nämä nopeuden nostot vähensivät tulostusaikaa merkittävästi ilman laadun heikkenemistä.
- Ironing: Sopivimmaksi yhdistelmäksi kalibrointityökalun perusteella valikoitui nopeus 40 mm/s ja virtaus 30 %, joka on nähtävissä kuviossa 22 keskellä. Myös pienemmällä nopeudella ja materiaalin virtauksella saavutettiin hyviä tuloksia, mutta prosessin keston vuoksi korkeampi nopeus ja virtaus on parempi.



Kuvio 22. Ironing asetusten tulokset nopeuden 40 mm/s osalta

Näillä asetuksilla ratkaistiin toimeksiantajan haasteet, kuten heikko pinnanlaatu sekä kappaleen irtoamien alustasta. Samalla tulostusprosessi nopeutui ja jälkikäsittelyn tarve minimoitiin.

9.2 Testitulokset ja valmiin valumallin arviointi

Optimoiduilla asetuksilla valmistettu valumalli, jota ei julkaista julkisesti osoitti merkittävän laadun parantumisen aikaisempiin tulosteisiin nähden, samalla saatiin myös tulostusaikaa vähennettyä, sekä jälkikäsittelyn tarve minimoitua.

Valmiin valumallin tavoitteena oli todentaa:

- Pinnan tasaisuus minimaalisella jälkikäsittelyllä.
- Kappaleen kiinni pysymisen alustassa koko tulostuksen ajan.

- Kehittää tulostusprosessia yleisesti.

Tulostuksen perusteella:

- Pinnanlaatu oli siisti ilman merkittäviä pursotusvirheitä ja tällaisenaan valimokäyttöön sopiva. Valumallin pinnanlaatu vastasi kuviossa 23 olevaa testikappaleen keskikohdan pintaa.
- Jälkikäsitteily rajoittui brimmin poistamiseen.
- Kappale pysyi kiinni alustassa koko tulostuksen ajan.
- Materiaalin menekkiä sekä tulostusaikaa saatiin vähennettyä sopivalla täyttökuvioilla, riittävällä täyttöasteella sekä nopeus asetuksilla.



Kuvio 23. Saavutettu pinnanlaatu

Valumallin mekaanisten ominaisuuksien riittävyys vahvistettiin valimon toimesta. Tästä johtuen mekaanisia ominaisuuksia ei ollut tarpeen erikseen mitata tämän työn puitteissa.

9.3 Valmiit slicing-tiedostot

Työn tuloksena luotiin valmiit slicing-tiedostot valumalleista, joita ei julkaista julkisesti, mutta ne on luovutettu toimeksiantajan vapaaseen käyttöön. Nämä tiedostot sisältävät optimoidut tulostusparametrit valumalleihin, joiden avulla voidaan valmistaa laadukkaita valumalleja suoraan tuotantoon.

Slicing-tiedostot testattiin käytännössä useilla eri tulostuskerroilla. Tulostetut kappaleet osoittivat toimivuutensa ja toistettavuutensa johdonmukaisesti, mikä takaa luotettavan tulostuksen myös tulevaisuudessa.

9.4 Käyttöohjeistus

Työn yhteydessä ei laadittu erillistä käyttöohjeistusta, sillä tämä työ, laitevalmistajan omat käyttö- ja huolto-ohjeet sekä toimeksiantajan tiloissa annettu henkilökohtainen perehdytys katsottiin riittäviksi itsenäisen käytön varmistamiseksi. Perehdytyksessä käytiin läpi kaikki laitteen käytön kannalta olennaiset asiat, kuten tulostusalustan kalibrointi, suuttimen vaihto, offset-säädöt sekä visuaaliset esimerkit onnistuneesta ensimmäisestä kerroksesta.

Näiden ohjeiden ja annetun opastuksen avulla käyttäjä pystyy itsenäisesti käyttämään laitetta. Käyttäjä pystyy myös ratkomaan yleisimmät ongelmatilanteet ilman syvällistä teknistä osaamista 3D-tulostuksesta.

10 YHTEENVETO JA POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää ja tehostaa FDM-tekniikkaan perustuvaa 3D-tulostusprosessia erityisesti hiekkavalumallien valmistuksessa PLA-materiaalilla. Työssä onnistuttiin määrittämään ja optimoimaan keskeiset tulostusparametrit, joiden avulla saavutettiin merkittäviä parannuksia kappaleiden pinnanlaatuun ja alustaan tarttuvuuteen minimaalisella jälkikäsittelyllä.

Työn tutkimuskysymykset olivat seuraavat:

- Miksi kappaleet irtoavat alustasta tulostuksen aikana?
- Miten pinnanlaatu saadaan valimokäyttöön sopivaksi mahdollisimman vähällä jälkikäsittelyllä?
- Miten voidaan taata laadukkaat tulosteet myös jatkossa?
- Miten prosessia voidaan kehittää yleisesti?

Yhteenvetona voidaan todeta, että kappaleiden irtoaminen alustasta johtui ensisijaisesti epätasaisesta pedistä, jonka tasaisuudessa ja z-offsetin asettamisessa ilmeni puutteita. Oikealla pedin tasausmenetelmällä, optimoiduilla lämpötiloilla ja z-offsetilla ongelma ratkaistiin. Pinnanlaadun osalta ratkaiseviksi tekijöiksi osoittautuivat oikeat tulostusparametrit (esimerkiksi tulostusnopeus, kerrospaksuus ja lämpötilat) sekä ironing-toiminto, jotka yhdessä vähensivät näkyviä kerrosrajoja ja muita pintavirheitä. Laadun ylläpito varmistettiin tallentamalla toimiviksi todetut viipalointiasetukset ja perehdyttämällä tulostimen käyttäjät koneen käyttöön sekä säännölliseen huoltoon. Prosessin kehittämisessä huomioitiin erityisesti kustannustehokkuus muun muassa lyhentämällä tulostusaikoja sekä käytettävyyttä parannettiin uusimalla viipalointiohjelmisto, joka mahdollistaa uuden filamenttierän vaivattoman kalibroinnin.

Optimoiduilla tulostusasetuksilla parannettiin sekä lopputuotteiden laatua että valmistukseen kuluvaan aikaan. Tämä näkyi pinnoiltaan sileämpinä hiekkavalumalleina, joita voitiin käyttää suoraan valimokäytössä vähäisellä jälkikäsittelyllä. Eri-tyisesti täyttökuvioiden ja täyttöasteen tarkastelu osoitti, että oikeilla asetuksilla

voidaan saavuttaa huomattavasti parempi jäykkyys ja lujuus sekä samalla vähentää materiaalin kulutusta, mikä tukee aiempien tutkimusten havaintoja (Lubombo ym. 2018). Rectilinear-täyttökuvio 20 % täyttöasteella osoittautui valumallien kannalta optimaaliseksi ratkaisuksi, koska se tarjosi hyvän tasapainon lujuuden, materiaalinkäytön ja valmistusajan välillä. Tulostusnopeuden optimoinnilla onnistuttiin lyhentämään valmistusaikoja ilman merkittävää laadun heikkenemistä, mikä tukee prosessin teollista sovellettavuutta.

Opinnäytetyössä ei käsitelty henkilötietoja tai muita eettisesti arkaluonteisia tietoja, joten eettiset riskit olivat vähäisiä. Luotettavuus varmistettiin testaamalla samoja tulostusparametreja useissa eri tulosteissa. Lisäksi käytetyt lähdemateriaalit perustuivat vertaisarvioituihin tutkimuksiin ja luotettavien toimijoiden julkaisuihin. Näiden seikkojen johdosta tuloksilla on suoraan hyödynnettävyyttä yrityksille, jotka valmistavat 3D-tulostettuja hiekkavalumalleja: optimoitu prosessi auttaa vähentämään hukkaa, parantamaan laatua ja lyhentämään läpimenoaikoja. Jatkossa automaation ja laadunvalvonnan kehittäminen esimerkiksi reaaliaikaisilla prosessimittauksilla sekä etävalvonnalla voisi edelleen varmistaa tulostuslaadun ja laajentaa teknologian käyttöä teollisessa sarjatuotannossa. Myös muiden filamenttimateriaalien hyödyntäminen vastaavalla optimoidulla prosessilla voisi avata uusia sovellusmahdollisuuksia.

Työn aikana vahvistui käsitys siitä, miten merkittävä vaikutus oikeilla tulostusparametreilla on lopputuotteen laatuun ja valmistustehokkuuteen. Konkreettiset koheet osoittivat, että jo pienetkin muutokset tulostimen asetuksissa voivat ratkaisevasti vaikuttaa kappaleiden tarttuvuuteen alustaan, niiden pinnanlaatuun sekä tulostusaikaan. Projektin myötä syventyi osaaminen FDM-tekniikasta ja sen käytöstä teollisessa ympäristössä.

Opinnäytetyön tavoitteet saavutettiin: FDM-tekniikkaan perustuva 3D-tulostusprosessi saatiin optimoitua niin, että hiekkavalumallien pinnanlaatu ja kappaleiden tarttuvuus alustaan paranivat merkittävästi. Käytännön testaus vahvisti, että sopivat kerrospaksuudet, oikea z-offset, suuttimen ja pedin lämpötilojen optimointi sekä täyttökuvioiden järkevä valinta pienentävät valmistuskustannuksia ja nopeuttavat läpimenoaikoja. Jatkokehityksen kannalta kiinnostavia suuntia ovat

esimerkiksi eri materiaalien yhdistäminen tuotantoprosessissa, tulostuksen reaaliaikainen laadunvalvonta sekä automaation lisääminen, joiden avulla Creatbot D1000-tulostimen tehokkuutta, luotettavuutta ja prosessin ennakoitavuutta voitaisiin edelleen parantaa.

Kokonaisuutena opinnäytetyössä kertynyt tieto 3D-tulostusprosessin kehittämisestä muodostaa vankan perustan tuleville tutkimuksille sekä käytännön kehityshankkeille. Yritykset voivat hyödyntää työn tuloksia suoraan FDM-tekniikkaan perustuvien prosessiensa kehittämisessä, mikä puolestaan edistää kilpailukykyä ja tuotannon joustavuutta.

LÄHTEET

3D Jake. 2024. 3D-printer nozzle guide. Viitattu 14.4.2025.
<https://www.3djake.com/info/guide/3d-printer-nozzle-guide>.

Acierno, D. & Patti, A. 2023. Fused Deposition Modelling (FDM) of Thermoplastic-Based Filaments: Process and Rheological Properties-An Overview. *Materials*, 16(24), 7664. Viitattu 18.10.2024.
<https://doi.org/10.3390/ma16247664>.

Bambulab. 2025. Retraction. Viitattu 9.4.2025.
<https://wiki.bambulab.com/en/software/bambu-studio/parameter/retraction>.

Bigrep. 2024. Sand casting patterns. Viitattu 11.12.2024.
<https://bigrep.com/applications/sand-casting-patterns/>.

Bute, I., Tarasovs, S., Vidinejevs, S., Vevere, L., Sevchenko, J. & Aniskevich, A. 2023–02. Thermal properties of 3D printed products from the most common polymers. *International journal of advanced manufacturing technology*, 124(7-8), 2739-2753. Viitattu 25.3.2025. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10657-7>.

Cadsolutions. 2025. CreatBot D1000 3D-tulostin. <https://www.an-cadsolutions.fi/tuote/creatbot-d1000-3d-tulostin/>.

Chahdoura, S., Bahloul, R., Tlija, M. & Tahan, A. 2024. Multi-objective optimization of PLA-FDM parameters for enhancement of industrial product mechanical performance based on GRA-RSM and BBD. *Progress in additive manufacturing*. Viitattu 18.10.2024. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00711-z>.

CreatBot. 2025. CreatBot D1000. Viitattu 10.4.2025.
<https://www.creatbot.com/en/creatbot-d1000.html>.

Ferretti, P., Santi, G. M., Leon-Cardenas, C., Freddi, M., Donnici, G. & Frizziero, L. 2021. Molds with Advanced Materials for Carbon Fiber Manufacturing with 3D Printing Technology. *Polymers*, 13(21), 3700. Viitattu 18.10.2024.
<https://doi.org/10.3390/polym13213700>.

Godec, D., Gonzalez-Gutierrez, J., Nordin, A., Pei, E. & Ureña Alcázar, J. 2022. *A Guide to Additive Manufacturing*. 1st ed. 2022. Cham: Springer International Publishing. Viitattu 5.2.2025.
<https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/94945>.

Hubs. 2023a. Post-Processing FDM Printed Parts. Viitattu 6.3.2025
<https://www.hubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts/>.

Hubs. 2023b. What is FDM (fused deposition modelling) 3D printing? Viitattu 5.2.2025. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>.

Kafle, A., Luis, E., Silwal, R., Pan, H. M., Shrestha, P. L. & Bastola, A. K. 2021-09-15. 3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA). *Polymers*, 13(18), 3101. Viitattu 25.4.2025. <https://doi.org/10.3390/polym13183101>.

Kuznetsov, V. E., Solonin, A. N., Urzhumtsev, O. D., Schilling, R. & Tavitov, A. G. 2018-03-13. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process. *Polymers*, 10(3), 313. Viitattu 5.2.2025. <https://doi.org/10.3390/polym10030313>.

Lubombo, C. & Huneault, M. A. 2018–12. Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts. *Materials today communications*, 17, 214-228. Viitattu 15.3.2025. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.09.017>.

Lukka, K. 2014. Konstruktiivinen tutkimusote. *Metodix*. Viitattu 5.11.2024. <https://metodix.fi/2014/05/19/lukka-konstruktiivinen-tutkimusote/>.

Orcaslicer. 2025. Official documentation and realese notes. Viitattu 14.4.2025. <https://github.com/SoftFever/OrcaSlicer>.

Patil, P., Singh, D., Raykar, S. J. & Bhamu, J. 2021. Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for printing Polylactic Acid (PLA) polymer components. Elsevier Ltd. Viitattu 30.3.2025.

Polymaker. 2023. PolyLite™ PLA – Technical Data Sheet. Viitattu 25.3.2025. <https://polymaker.com>

Prusa3d. 2025f. Extrusion multiplier calibration. Viitattu 31.3.2025. https://help.prusa3d.com/article/extrusion-multiplier-calibration_2257.

Prusa3d. 2025c. Ghosting and ringing. Viitattu 31.3.2025. https://help.prusa3d.com/article/ghosting-and-ringing_112137.

Prusa3d. 2025e. Guide to Ironing: How to make top surfaces super smooth with PrusaSlicer 2.3 (RC). Viitattu 31.3.2025. https://blog.prusa3d.com/make-top-surfaces-super-smooth-ironing-prusaslicer-2-3-beta_41506/.

Prusa3d. 2025d. Layers and perimeters. Viitattu 31.3.2025. https://help.prusa3d.com/article/layers-and-perimeters_1748.

Prusa3d. 2025g. Linear advance. Viitattu 31.3.2025. https://help.prusa3d.com/article/linear-advance_2252.

Prusa3d. 2025b. Live Adjust Z. Viitattu 31.3.2025. https://help.prusa3d.com/article/live-adjust-z_112427.

Prusa3d. 2025i. Max volumetric speed. Viitattu 31.3.2025. https://help.prusa3d.com/article/max-volumetric-speed_127176.

Prusa3d. 2025a. Mesh bed leveling. Viitattu 31.3.2025. https://help.prusa3d.com/article/mesh-bed-leveling_112163.

Prusa3d. 2025h. Stringing and oozing. Viitattu 31.3.2025.
https://help.prusa3d.com/article/stringing-and-oozing_1805.

Prusa3d. 2025j. Warping. Viitattu 31.3.2025.
https://help.prusa3d.com/article/warping_2011.

Qidi3d. 2025a. Extrusion multiplier. Viitattu 14.4.2025.
<https://wiki.qidi3d.com/en/software/qidi-slicer/calibration/extrusion-multiplier>.

Qidi3d. 2025c. Max Volumetric Speed. Viitattu 14.4.2025.
<https://wiki.qidi3d.com/en/software/qidi-studio/calibration>.

Qidi3d. 2025b. Pressuse advance. Viitattu 14.4.2025.
<https://wiki.qidi3d.com/en/software/qidi-studio/calibration>.

Raam Kumar, S., Sridhar, S., Venkatraman, R. & Venkatesan, M. 2024. Polymer additive manufacturing of ASA structure: Influence of printing parameters on mechanical properties. Elsevier Ltd. Viitattu 25.2.2025.

Rivera-López, F., Pavón, M. M. L., Correa, E. C. & Molina, M. H. 2024. Effects of Nozzle Temperature on Mechanical Properties of Polylactic Acid Specimens Fabricated by Fused Deposition Modeling. *Polymers*, 16(13), 1867. Viitattu 25.2.2025. <https://doi.org/10.3390/polym16131867>.

SFS-EN ISO 8062-3:2023. Geometrinen tuotemääritys (GPS). Muotilla valmistettujen kappaleiden mittatoleranssit ja geometriset toleranssit. Osa 3: Valukappaleiden mittojen yleistoleranssit, geometriset yleistoleranssit ja työstövarat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO/ASTM 52900:202. Lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Perusteet ja sanasto. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

Spoerk, M., Holzer, C. & Gonzalez-Gutierrez, J. 2020-03-20. Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage. *Journal of applied polymer science*, 137(12), -n/a. Viitattu 15.3.2025. <https://doi.org/10.1002/app.48545>.

Stratasys. 2025. FDM for sand casting. Viitattu 26.3.2025.
https://www.stratasys.uk/siteassets/3dlc/higher-education/tag_fdm_sandcasting_en_0915-web.pdf?v=48f56f.

Ureña, J. 2022. Quality control in additive manufacturing. Teoksessa Codec, J. M., Pan, H. M. & Luis, E. (toim.) *A guide to additive manufacturing*. Basel: MDPI, 291–296. Viitattu 7.4.2025.

Yang, Y., Wang, Y., Xue, B., Wang, C. & Yang, B. 2025-01-01. Optimization of Fused Deposition Modeling Parameters for Mechanical Properties of Polylactic Acid Parts Based on Kriging and Cuckoo Search. *Aerospace*, 12(1), 38. Viitattu 25.2.2025. <https://doi.org/10.3390/aerospace12010038>.

Yao, T., Ye, J., Deng, Z., Zhang, K., Ma, Y. & Ouyang, H. 2020-05-01. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. *Composites. Part B, Engineering*, 188, 107894. Viitattu 30.2.2025. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107894>.

LIITTEET

Liite 1. ColorFabb PLA tekninen tuotekortti

Liite 1 1(2). ColorFabb PLA tekninen tuotekortti

ColorFabb PLA tekninen tuotekortti

Technical datasheet		colorFabb		
PLA Economy				
Date of issue:	September 4th, 2023			
Version:	v2.0			
Description				
colorFabb PLA Economy is a high quality PLA 3D printing filament. An impact modifier is added to improve toughness for this range of materials. The PLA Economy is available on large 2,2 spools in a various colors.				
Typical Properties				
Mechanical Properties - 3D Printed				
	Method	Value		Unit
		XY	Z	
Youngs Modulus	Tensile, ISO 527-1A	3300	3350	MPa
Tensile Strength	Tensile, ISO 527-1A	70	71	MPa
Elongation at break	Tensile, ISO 527-1A	3,5	3,5	%
Flexural Modulus	Flexural, ISO 178	2400	2200	MPa
Flexural Strength	Flexural, ISO 178	97	85	MPa
Impact Strength	Charpy Notch, ISO 179	4.0	N/A	kJ/m ²
Mechanical Properties - Injection Molded*				
	Method	Value		Unit
Youngs Modulus	Tensile, ISO 527-1A	3500		MPa
Tensile Strength	Tensile, ISO 527-1A	45		MPa
Elongation at break	Tensile, ISO 527-1A	≤5.0		%
Flexural Strength	Flexural, ISO 178	N/A		MPa
Charpy Impact Strength	Charpy Notch, ISO 179	≤5.0		kJ/m ²
Density	ISO 1183	1,2		g/cm ³
Thermal Properties				
	Method	Value		Unit
Glass Transition Temp.	DSC, ISO 11357	55-60		°C
Melting Temp.	DSC, ISO 11357	150-160		°C
Decomposition Temp.	TGA, ISO 11358	N/A		°C
Heat Deflection Temp.	HDT-B, ISO 75	60		°C
Melt Flow Index	MFI, (210°C/2.16 kg), ISO 1133-A	6		g/10min
Melt Flow Index	MFI, (190°C/1,16 kg), ISO 1133-A	3		g/10 min

Liite 1 2(2). ColorFabb PLA tekninen tuotekortti

Filament Specifications

	Unit		
Diameter	mm	1.75	2.85
Max. roundness deviation	mm	± 0.05	± 0.1
Ovality	%	≥95	≥95
Net. Filament weight	g		

Guideline for print settings

	Unit	
Nozzle Temp.	°C	195-220
Bed Temp.	°C	50-60
Bed / surface modification	-	Tape or Glue
Active cooling fan	%	100
Print Speed	mm/s	40-100