

Opinnäytetyö (AMK)

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2021

Juhani Sainisto

# ISOSUUTTIMELLISEN 3D- TULOSTIMEN YLÖSAJO

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2021 | 54 sivua

Ohjaaja: Liisa Lehtinen, Turku AMK

Juhani Sainisto

## ISOSUUTTIMELLISEN 3D-TULOSTIMEN YLÖSAJO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli ylösajaa Turun ammattikorkeakoulun Prenta Oy:n valmistama isosuuttimellinen FGF-tulostusmenetelmää käyttävä 3D-tulostin. Ylösajon päämäärinä oli määrittää tulostimen suorituskykyä tulostamalla eri muovimateriaaleja ja tuottaa erilaisia 3D-muotoja tulostusalustalle. Lisäksi tavoitteena oli suorituskyvyn määritysten pohjalta laatia käyttöohjeistus laitteelle. Isosuuttimellinen ruuvitulostin käyttää materiaalin pursotusta eli ekstruusiomenetelmää muovin tulostamiseen muovigranulaatista, mikä mahdollistaa suurempien suuttimien käytön verrattuna perinteiseen filamentti-3D-tulostamiseen.

Kirjallisessa osiossa käsitellään 3D-tulostuksen periaatetta, historiaa, tulostusprosessin vaiheita sekä yleisiä tulostusmenetelmiä. 3D-tulostimen käyttämää FGF-tulostusmenetelmän toimintaperiaatetta sekä sen ominaisuuksia käydään läpi sekä käsitellään työssä käytetyt tulostusmateriaalit ja tulostettavat mallit.

Käytännön osuudessa käsitellään tehdyt testiajot ja niiden pohjalta tehdyt havainnot ja kokemukset. Testiajoissa valmistettujen kappaleiden tulostusparametrit ja kappaleille tehdyt aistinvaraiset määrytykset ovat käsiteltynä niiden tulostusjärjestyksessä. Testiajoissa valmistettujen kappaleiden tarkastelussa kiinnitettiin huomiota eri suutinkoilla tulostettujen kappaleiden tulostustarkkuuteen, tulostusnopeuteen sekä kappaleen kestävyteen.

Tehdyn työn tuloksina saatiin laitteen käytöstä kokemusta ja tämän kokemuksen pohjalta laadittiin laitteelle käyttöohjeistus. Tulostimella tehdyistä testiajoista määritettiin laitteen suorituskykyä tulostaa PLA- ja ABS-muovimateriaaleja eri suuttimilla ja tulostusparametreillä. Työssä tehdyt testiajot ovat pieni osa tulostimella tehtävistä mahdollisista testiajoista, kun otetaan huomioon suuri määrä saatavilla olevia tulostusmateriaaleja ja tulostusolosuhteita. Tämä opinnäytetyö toimii pohjatyönä tulevaisuudessa tehtäville jatkotutkimuksille sekä jatkokehityksille.

ASIASANAT:

3D-tulostin, 3D-mallinnus, CAD, ekstruusio, granulaatti, PLA, ABS

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Chemical and Materials Engineering

2021 | 54 pages

Supervisor: Liisa Lehtinen, Turku University of Applied Sciences

Juhani Sainisto

## START-UP OF A FGF 3D PRINTER

The purpose of this thesis was to start-up a new 3D printer model FGF-450 manufactured by Prenta Oy, at Turku University of Applied Sciences. The main objective of the start-up was to measure the performance of the 3D printer by printing different plastic materials with it using different-sized dies and 3D shapes. An instruction manual was prepared based on the observations made during the testing. The 3D printer uses the FGF printing method in which the main operating principle is extrusion method. The extrusion method allows the use of larger dies in the printing process allowing larger extrusion volumes than the traditional FDM printing method.

In the literature review, the principle of 3D printing, its history, the phases of the printing process, and some commonly used printing methods are discussed. The principle of operation of the FGF printing method used by the 3D printer and the features of the printer are examined in the chapter, as well as the printing materials and the printable models used.

In the discussion of the practical part of the study, the tests carried out with the printer and the observations made are described. In the chapter the manufactured 3D pieces and the sensory observations made are listed in the order the pieces were manufactured. The main examination points for the manufactured 3D pieces were printing resolution, printing speed and the durability of object.

The results of the tests conducted provided experience in the use of the 3D printer, and an instruction manual was created based on this experience. The test runs provided insight on the performance of the 3D printer for printing both PLA and ABS plastic materials with different die sizes and printing parameters. The total of the conducted test runs are a small portion of all the possible testings with the 3D printer taking into consideration the vast number of options for different printing materials and parameters. However, this thesis can serve as a baseline study for further additive manufacturing development.

KEYWORDS:

3D printer, 3D modeling, CAD, extrusion, pellets, PLA, ABS

# SISÄLTÖ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO</b>                                    | <b>6</b>  |
| <b>1 JOHDANTO</b>  | <b>9</b>  |
| <b>2 3D-TULOSTAMINEN</b>   | <b>10</b> |
| 2.1 3D-Tulostamisen periaate   | 10        |
| 2.2 3D-tulostamisen historia   | 11        |
| <b>3 3D-TULOSTUSPROSESSI</b>   | <b>15</b> |
| 3.1 Virtuaalisen CAD-mallin luonti                                       | 15        |
| 3.2 Virtuaalisen STL-mallin viipalointi                                  | 16        |
| 3.3 Kappaleen 3D-tulostus  | 17        |
| 3.4 Tulostetun kappaleen jälkikäsittely                                  | 18        |
| <b>4 3D-TULOSTUSMENETELMÄT</b>   | <b>19</b> |
| 4.1 Muovipursotus (FDM)  | 19        |
| 4.2 Stereolitografia (SLA)   | 20        |
| 4.3 Selektiivinen laser-sintraus (SLS)                                   | 22        |
| 4.4 Prenta Oy:n FGF-450 isosuuttimellisen 3D-tulostimen toimintaperiaate | 23        |
| 4.5 Työssä käytetyt tulostusmateriaalit                                  | 26        |
| 4.5.1 PLA-tulostusmateriaali   | 26        |
| 4.5.2 ABS-tulostusmateriaali   | 28        |
| <b>5 TULOSTETTAVAT 3D-MALLIT</b>   | <b>29</b> |
| 5.1 Tulostettava vetosauvamalli  | 29        |
| 5.2 Tulostettava 3DBenchy-malli  | 31        |
| <b>6 ISOSUUTTIMELLISEN 3D-TULOSTIMEN TESTIAJOT</b>                       | <b>33</b> |
| 6.1 Huomioituja asioita FGF-450 tulostimesta                             | 34        |
| 6.2 PLA-ajot   | 37        |
| 6.3 ABS-ajot   | 47        |
| <b>7 JOHTOPÄÄTÖKSET</b>  | <b>52</b> |
| <b>8 LÄHTEET</b>   | <b>53</b> |

# KUVAT

|  |    |
|--|----|
| Kuva 1. Poistava menetelmä vs. lisäävä menetelmä (Bitfab, 2021).   | 11 |
| Kuva 2. Charles Hull:in kehittämä stereolitografiatulostin (3DR Holdings, 2015).   | 12 |
| Kuva 3. Moderni MakerBot Replicator+ (FDM-tulostin) (MakerBot Industries, 2021).   | 13 |
| Kuva 4. FormLabs 1+ (SLA-tulostin) (3Dnatives, 2021).  | 14 |
| Kuva 5. 3D-tulostamisen vaiheet.   | 15 |
| Kuva 6. 3D-objekti STL-tiedostomuodossa (Pick3DPrinter, 2021).   | 16 |
| Kuva 7. Kiinteä virtuaalinen malli ja viipaloitu malli Simplify3D-tulostusohjelmassa. Oikealla puolella olevassa mallissa näkyvät erilliset viipaleet.                 | 17 |
| Kuva 8. Filamentti-FDM-tulostusmenetelmän havainnekuva (Pick3DPrinter, 2021).  | 20 |
| Kuva 9. SLA 3D-tulostusmenetelmän havainnekuva (Satishkumar, 2016).  | 21 |
| Kuva 10. SLS-3D-tulostusmenetelmän havainnekuva.   | 22 |
| Kuva 11. Prenta Oy:n FGF-450 isosuuttimellinen tulostin.   | 24 |
| Kuva 12. FGF-450 tulostimen ekstruuderit.  | 25 |
| Kuva 13. FGF-450 3D-tulostimen suuttimet.  | 26 |
| Kuva 15. Työssä käytetty Biodolomer F40 900310 PLA.  | 27 |
| Kuva 16. Työssä käytetty PLA-3052D.  | 27 |
| Kuva 17. Työssä käytetty PLA-3521D.  | 27 |
| Kuva 18. Työssä käytettyä uusio-ABS-tulostusmateriaalia RR3010.  | 28 |
| Kuva 19. Vetosauvan tekninen-piirros.  | 30 |
| Kuva 20. Tulostettavan vetosauvamallin kiinteä virtuaalinen malli.   | 31 |
| Kuva 21. 3DBenchy-malli (Creative Tools, 2021).  | 32 |
| Kuva 22. Biodolomer F40 900310 tulostettu 3DBenchy-malli, jossa havaittavissa ylimääräinen tulostusmateriaalin valuminen suuttimesta pingottuneiden lankojen muodossa. | 34 |
| Kuva 23. Uusiosyöttömateriaali sekä seos ensiö- ja uusiomateriaalia (ABS-muovi).   | 35 |
| Kuva 24. Mallikuva työssä käytetystä ensiö-PLA-muovigranulaatista.   | 35 |
| Kuva 25. Ensimmäiset PLA-vetosauvatulosteet.   | 37 |
| Kuva 26. Kappaleen täyttö lisätty 100 %:iin.   | 38 |
| Kuva 27. Kappaleen täytön hienosäätöä.   | 39 |
| Kuva 28. Kappaleen lineaarinen täyttökuviointi.  | 40 |
| Kuva 29. Lineaarisen täyttökuvioinnin ongelmakohta.  | 40 |
| Kuva 30. Suuttimen koko 1 mm ja vain ylä- ja alakerros lineaarisella kappaleen täytöllä  | 41 |
| Kuva 31. 1 mm:n suuttimella tulostettuja vetosauvoja   | 42 |
| Kuva 32. Kerrosten adheesioongelma 0,6 mm:n suuttimella.   | 42 |
| Kuva 33. 0,6 mm:n suuttimella prosessiparametrein muutettuja sauvoja.  | 43 |
| Kuva 34. 3DBenchy-malli tulostettuna 1 mm:n suuttimella.   | 44 |
| Kuva 35. 3DBenchy-malli tulostettuna 2 mm:n suuttimella.   | 45 |
| Kuva 36. 0,6 mm:n suuttimella tulostettu 3DBenchy-malli vas. 50 % täyttö, oik. 10 % täyttö.  | 46 |
| Kuva 37. Vasen: PLA-3521D:llä tulostettu 3DBenchy-malli, oikealla PLA-3052D:llä tulostettu.  | 46 |
| Kuva 38. 3 mm:n suuttimella tulostetun vetosauvan leveä kohta.   | 47 |
| Kuva 39. 0,6 mm:n suuttimella tulostettuja ABS-vetosauvoja.  | 48 |
| Kuva 40. 0,6 mm suuttimella hienosäädetty pursotuskerrointa ABS-muoville.  | 49 |
| Kuva 41. Epäonnistunut 3DBenchy-malli ABS-muovilla.  | 49 |
| Kuva 42. Tulostusparametrien muutosten jälkeinen testi.  | 50 |
| Kuva 43. 3DBenchy ABS-muovilla ja materiaalialustalla.   | 51 |

## TAULUKOT

Taulukko 1. Vetosauvan tekniset mitat.

30

## KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

|             |  |
|-------------|--|
| 3D-tulostin | Muovien prosessointimenetelmä, joka tuottaa sulatetusta muovigranulaatista ekstruusion avulla fyysisen esineen virtuaalisen mallin mukaan. |
| ABS         | Akryylinitriilibutadienistyreeni. Työssä käytettiin ABS muovia sekä ensiö-ABS:ää.  |
| AM          | Additive Manufacturing. Materiaalia lisäävä valmistusteknologia.   |
| CAD         | Computer aided design. Virtuaalisessa muodossa oleva 3D-objekti.   |
| Ekstruusio  | Muovien sulatyöstötekniikka, jossa pyörivä ruuvi pursottaa sulatetun muovigranulaatin suuttimen läpi.                                      |
| FDM         | Fused deposition molding. Yksi yleisimmistä 3D-tulostusmenetelmistä.   |
| Granulaatti | Raemaisessa muodossa oleva muovimateriaali.  |
| MMAM        | Turun AMK:n lisäävän valmistuksen osaamiskeskus-hanke, Multicomponent Materials Centre of Expertise for Additive Manufacturing.            |
| PLA         | Polylaktidi. Työssä käytettiin erilaatuisia PLA muoveja.   |
| Slicing     | 3D-mallin ”viipalointi”, jossa 3D-tulostimen ohjelmisto muuntaa virtuaalisen mallin tulostimelle lähetettäväksi koodijonoksi.              |
| SM          | Subtractive manufacturing. Materiaalia poistava valmistusmenetelmä.  |

SLA

Stereolithography. Stereolitografia, jossa ultraviolettivalon avulla kovetetaan polymeereja.



# 1 JOHDANTO

Lisäävä valmistus on sen keksimisvuodesta 1989 kehittynyt jatkuvasti eri teknologia-aloilla. Erityisesti materiaaaliteknologian alalla, jossa erilaisiin laitteisiin ja koneisiin vaaditaan jatkuvasti hyötysuhteeltaan parempia sekä edullisempia osia (Noorani, 2017, s. 1). Lisäävän valmistuksen kehitystä jatketaan edelleen, mikä nähdään uusina laitehankintoina ja testiajoina koulutusaloilla.

Tämän oppinnäytetyön tarkoituksena oli ylösajaa suomalaisen Prenta Oy:n valmistama isosuuttimellinen 3D-tulostin malli FGF-450, joka saapui Turun ammattikorkeakoululle keväällä 2020. Ylösajon päämäärinä oli tulostimen suorituskyvyn määrittäminen erilaisilla suutinkoilla ja muovimateriaaleilla sekä laatia käyttöohjeistus laitteelle testiajojen pohjalta.

Oppinnäytetyö on osa MMAM-hanketta (Multicomponent Materials Centre of Expertise for Additive Manufacturing), joka on osaamiskeskushanke Turun ammattikorkeakoulun, Turun yliopiston, Åbo Akademin ja Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston kanssa. MMAM-hankkeen yritys yhteistyökumppaneita ovat 3DTech Oy sekä Brinter Oy. Osaamiskeskuksen tavoitteena on vahvistaa, yhdistää ja parantaa alueellista yhteistyötä lisäävän valmistuksen, lääketieteen, hammaslääketieteen, lääkeannostelun ja biomateriaalien tutkimusaloilla luomalla TKI (Tutkimus, kehittäminen ja innovaatio)-yhteistyön alustan. (Turku AMK, 2021.)

Aikaisempaa kokemusta 3D-tulostamisesta oli kertynyt ammattikorkeakoulun opintojen aikana erilaisissa materiaalimoduulin opinnoissa, joissa oli toimeksiantoja tuottaa erilaisia sovellutuksia 3D-tulostusta käyttäen. Näissä toimeksiannoissa käytettiin Prenta Oy:n valmistamaa filamenttitulostinta, jonka käyttökoke-  
musta olen paljon peilannut isosuuttimelliseen-3D-tulostukseen siirryttäessä. 3D-tulostuksessa käytettiin ammattikorkeakoululla sijaitsevia materiaaleja sekä työkaluja.

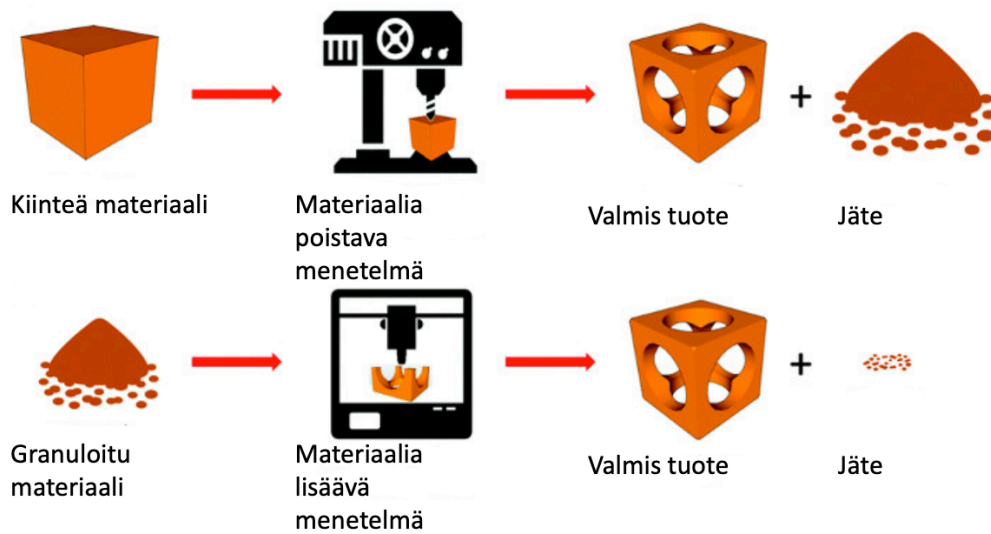
## 2 3D-TULOSTAMINEN

Opinnäytetyössä käytetty isosuuttimellinen 3D-tulostin oli Prenta Oy:n valmistama FGF-450-malli. Laite sijaitsee Turun ammattikorkeakoulun Lemminkäisenkadun yksikön laboratoriossa, jossa tämän opinnäytetyön käytännön osuus suoritettiin. Luvussa käsitellään 3D-tulostusta ja sen periaatetta sekä menetelmän historiaa.

### 2.1 3D-tulostamisen periaate

3D-tulostaminen on esimerkki materiaalia lisäävästä teknologiasta (eng. additive manufacturing, AM), jonka periaatteena on käyttää tietokoneavusteista suunnittelua (eng. Computer-Aided-Design, CAD) ohjaamaan tulostinlaitteistoa syöttämään sulaa muovimateriaalia taso tasolta luodakseen kolmiulotteisen muodon (GE Additive, 2021).

Materiaalia lisäävä teknologia on vastakohta materiaalia poistavalle teknologialle (eng. subtractive manufacturing, SM) (Kuva 1). Materiaalia poistavaa teknologiaa kutsutaan myös nimityksellä yleiset valmistustekniikat. Materiaalia lisäävän teknologian etuna yleisiin valmistustekniikoihin, jossa materiaalikappaleesta poistetaan poraamalla, sorvaamalla tai hiomalla materiaalia, on se että ylimääräisten palojen (jätteen) syntyminen on vähäisempää. Molempia valmistustekniikoita yhdistää silti tietokoneavusteinen suunnittelu (Noorani, 2017, s. 32.).



Kuva 1. Poistava menetelmä vs. lisäävä menetelmä (Bitfab, 2021).

3D-tulostamisen tavoite on luoda nopeasti ja kustannustehokkaasti monimutkaisia tai yksinkertaisia 3D-muotoja suoraan CAD-tiedostosta käyttämättä ulkoisia työstömenetelmiä kuten poraamista, sorvausta tai hiomista. 3D-tulostamisessa virtuaalinen objekti tulee viipaloida (eng. slicing), eli objekti käsitellään 3D-tulostin ohjelmalla, joka muuntaa virtuaalisen objektin tulostimelle lähetettäväksi koodijonoksi (Noorani, 2017, s. 31). Työssä käytetty viipalointi-ohjelma oli Simplify3D.

3D-tulostamisesta on kehittynyt synonyymi teollisen valmistuksen ja tutkimuksen kanssa, sillä se on tutkimusten mukaan yksi suosituimmista prototyypin valmistusmenetelmistä. Menetelmän nopeus ja kustannustehokkuus ovat luoneet siitä tehokkaan työkalun teollisuus- ja harrastusaloille (Monroe Engineering, 2020.).

## 2.2 3D-tulostamisen historia

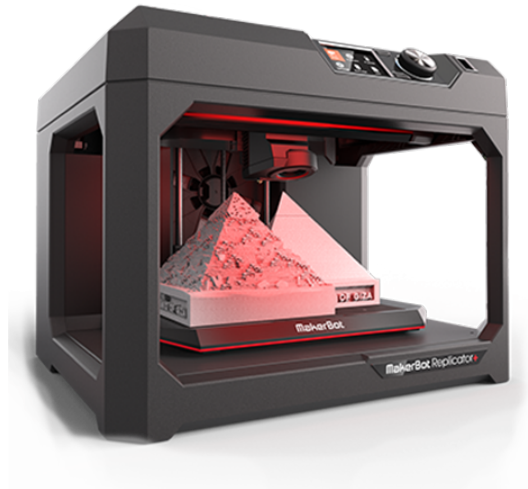
Aikaisin tallenne 3D-tulostamisesta materiaalia lisäävän teknologian avulla on vuodelta 1981. Japanilainen Hideo Kodama käytti ultraviolettivaloa kovettamaan polymeerejä, josta muodostui kiinteä kappale. Ultraviolettivaloa käyttävää

tulostusmenetelmää kutsutaan stereolitografiaksi (eng. stereolithography, SLA) (Me3D Pty. Ltd, 2018.).

Amerikkalaista Charles Hullia, joka perusti yrityksen 3D Systems pidetään kuitenkin 3D-tulostuksen keksijänä, koska hän hankki 1984 ensimmäisenä patentin 3D-tulostukseen, joka käytti samanlaista tekniikkaa kuin Hideo Kodaman laitteisto (Kuva 2). Yleisimmän tulostusmenetelmän muovipursotuksen (eng. fused deposition modeling, FDM) kehittäjä amerikkalainen Scott Crump patentoi kyseisen menetelmän vuonna 1989, jolloin hän myös perusti Stratasys-yrityksen (Noorani, 2017, s. 4.).



Kuva 2. Charles Hull:n kehittämä stereolitografiatulostin (3DR Holdings, 2015).



Kuva 3. Moderni MakerBot Replicator+ (FDM-tulostin) (MakerBot Industries, 2021).

3D Systems:n ja Stratasys:n moni patentti vanhentui 2000-luvun alkupuolella johtaen erityisesti FDM-menetelmän yleistymiseen kuluttajakäytössä. Yleisimmät maailmanlaajuisesti kuluttajakäytössä olevat 3D-tulostimet ovat MakerBot Replicator (Kuva 3) sekä FormLabs 1+ (Kuva 4) (Noorani, 2017).

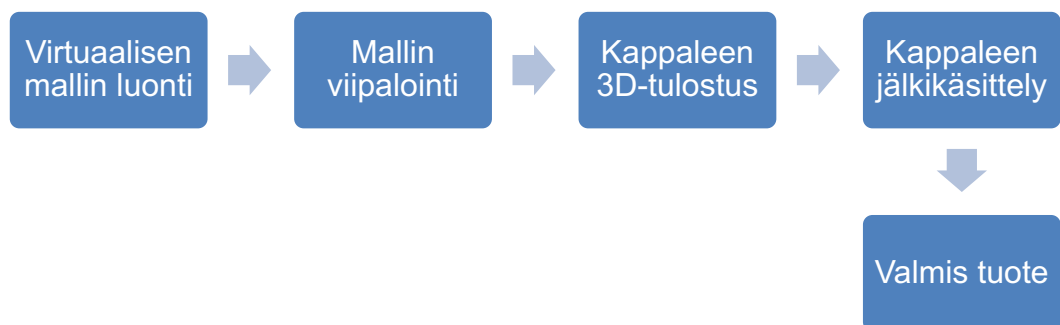


Kuva 4. FormLabs 1+ (SLA-tulostin) (3Dnatives, 2021).

### 3 3D-TULOSTUSPROSESSI

Luvussa käsitellään 3D-tulostusprosessin eri vaiheita. Kaikilla tulostetuilla kappaleilla on useampia yhteisiä prosessivaiheita, jotka ovat valmistettu nykyisillä tai kehittyvillä 3D-tulostusprosesseilla (Noorani, 2017, s. 35).

Pääsääntöisesti 3D-tulostaminen voidaan jakaa viiteen eri vaiheeseen: virtuaaliseen mallin luontiin, mallin viipalointiin, kappaleen 3D-tulostukseen ja kappaleen jälkikäsittelyyn (Kuva 5). Vaiheiden toteutus vaihtelee käytettävistä välineistä ja materiaaleista, kuitenkin jokainen tulostettava fyysinen esine noudattaa edellä mainittuja vaiheita (Noorani, 2017, s. 5.).

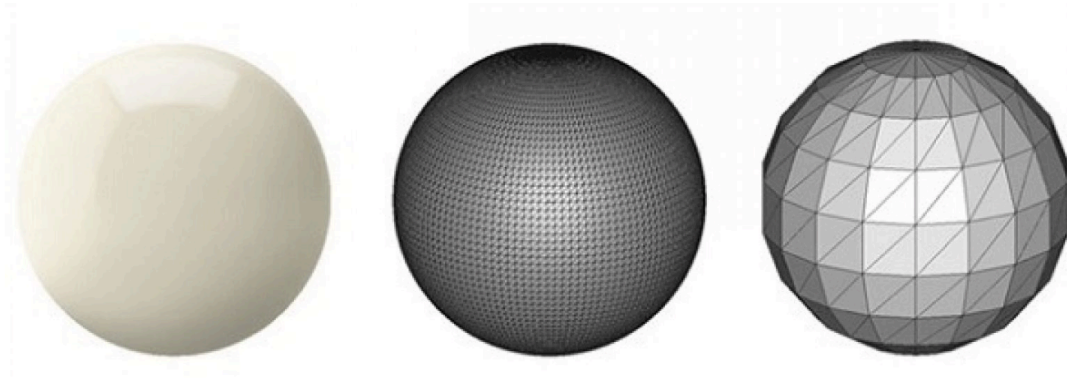


Kuva 5. 3D-tulostamisen vaiheet.

#### 3.1 Virtuaalisen CAD-mallin luonti

3D-tulostusprosessin ensimmäinen vaihe on CAD-mallin luominen. Mallin tulee olla kiinteä virtuaalinen kolmiulotteinen muoto. Virtuaalinen malli luodaan sen tarkoitukseen tehdyllä ohjelmalla (Monroe Engineering, 2020.). Esimerkkejä ohjelmista ovat AutoCAD, Pro/Engineer ja Solid Works. Luotu CAD-malli muutetaan STL-tiedostomuotoon (Standard Tessellation Language), joka on valittu

standardiksi 3D-teollisuudessa. STL-tiedostomuoto muuntaa virtuaalisen 3D-mallin kolmiulotteiseksi lankakaavioksi (Kuva 6) (Noorani, 2017, s. 5.).



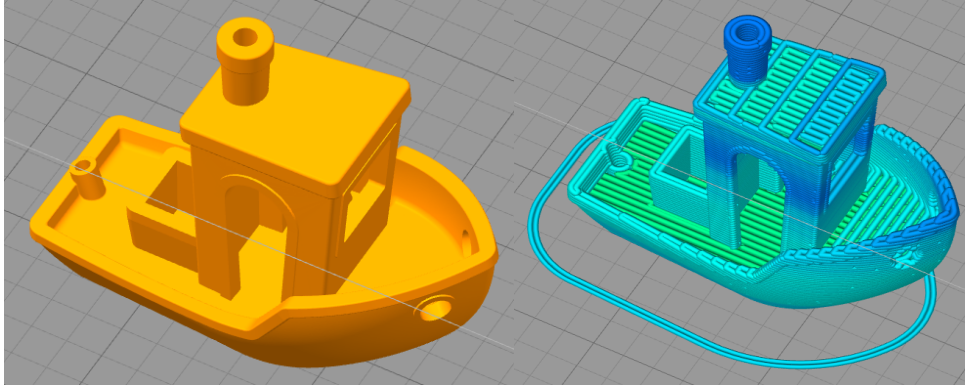
Kuva 6. 3D-objekti STL-tiedostomuodossa (Pick3DPrinter, 2021).

### 3.2 Virtuaalisen STL-mallin viipalointi

STL-mallin viipalointi suoritetaan sille tarkoitetulla viipalointi-ohjelmalla esim. Simplify3D:llä. Ohjelma muokkaa STL-tiedoston tulostimelle lähetettäväksi g-koodijonoksi. Viipalointiohjelmalla voidaan muokata 3D-mallin ulottuvuuksia ja tulostusparametrejä (Noorani, 2017, s. 6.).

Kuvassa 7 on kiinteä kolmiulotteinen malli muunnettu g-koodimuotoon. Mallin muuntaminen g-koodiksi eli geometriseksi koodiksi jakaa mallin viipalointi-ohjelman ennalta määrättyjen parametrien mukaisiksi tasoiksi. Tulostuskerrosten paksuus, korkeus ja mallin tulostustäyttöaste voidaan määrittää viipalointivaiheessa 3D-tulostimen suutinkoon rajoissa (HowToMechatronics, 2021).





Kuva 7. Kiinteä virtuaalinen malli ja viipaloitu malli Simplify3D-tulostusohjelmassa. Oikealla puolella olevassa mallissa näkyvät erilliset viipaleet.

### 3.3 Kappaleen 3D-tulostus

Virtuaalisen mallin muuntaminen fyysiseen muotoon tapahtuu g-koodin välittämällä 3D-tulostimelle, jolloin tulostin alkaa suorittamaan mallin tulostamista olettaen, että tiedostossa ei ole korruptiota ja tulostimen lämpötilat ovat asetetuissa lukemissa. 3D-tulostin suorittaa tulostusta ennalta määrättyjen g-koodijonojen mukaan, jolloin laite voidaan jättää ilman aktiivista valvontaa (Monroe Engineering, 2020.).

Yhteistä 3D-tulostimilla on yhden g-koodikerroksen tulostaminen kerrallaan vaikka tulostusmateriaali tai tulostusmenetelmä vaihtelisi. Tulostusajat vaihtelevat tulostettavien kappaleiden lukumäärästä, koosta sekä tulostusparametreistä. Suuri vaikutus tulostusohjelmassa olevalla parametrillä on tulostuskappaleen laatu eli kappaleen täyttöaste, joka määrittelee kappaleen sisäisen täytön sekä tulostusnopeuden (Noorani, 2017, s. 40.).

### 3.4 Tulostetun kappaleen jälkikäsittely

Valmis 3D-tuote voidaan jälkikäsitellä eri menetelmin, riippuen käytetystä materiaalista ja käyttötarkoituksesta. Tuotetta voidaan viimeistellä esim. hiomalla, poraamalla tai käyttämällä liuottimia tulostetun kappaleen pinnan tasoittamiseksi. Tukirakenteet, joita on käytetty 3D-tulostuksessa, voidaan poistaa jälkikäsittelyvaiheessa. Jotkin tukirakenteet voivat olla hankalia poistaa riippuen tulostetun kappaleen muodosta (Monroe Engineering, 2020.).

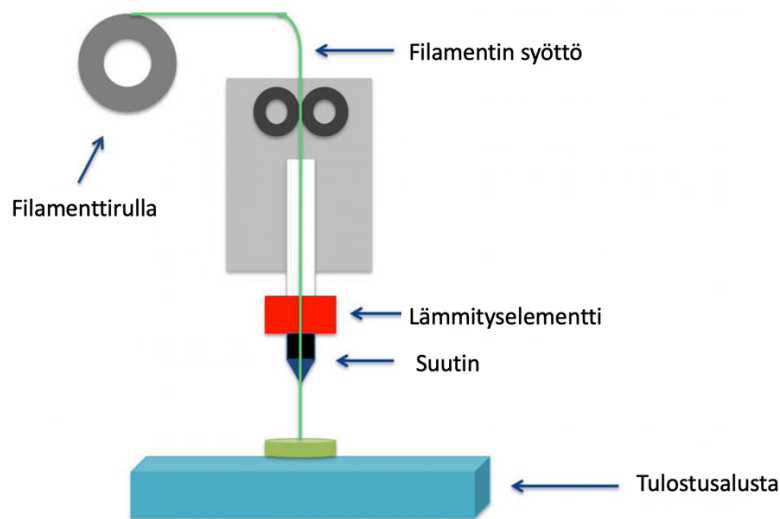
## 4 3D-TULOSTUSMENETELMÄT

Kaikkien 3D-tulostimien toimintaperiaate ei ole samanlainen, esimerkiksi edellisessä luvussa mainitut FDM- ja SLA-tulostimet eroavat toisistaan toimintaperiaatteiltaan. Siitä huolimatta ne noudattavat materiaalia lisäävän teknologian (AM) perusperiaatetta. 3D-tulostusmenetelmät voidaan jakaa ryhmiin pääsääntöisesti tulostusmateriaalien mukaan kiinteisiin, neste- sekä jauhemateriaaleihin. Jokaiselle menetelmälle on siis ominaista virtuaalinen 3D-objekti, ohjelmiston käyttö sekä fyysisen kappaleen muodostamiseen sovelluksesta riippuva käytettävä aine (Noorani, 2017, s. 5.).

ISO/ASTM 52900:2015 on kansainvälinen standardi, joka standardisoi lisäävässä valmistuksessa eli 3D-tulostuksessa käytettävän terminologian. Standardissa on määritelty yhteensä seitsemän 3D-tulostusmenetelmää. Perinteisiä tulostusmenetelmiä ovat muovipursotus eli FDM, stereolitografia eli SLA ja jauhepetisulatus eli SLS (Simpson, 2019.).

### 4.1 Muovipursotus (FDM)

Muovipursotus eli FDM-menetelmä (Kuva 8) on yksi yleisimmistä 3D-tulostusmenetelmistä, jossa kappale tulostetaan käyttämällä ekstruusiomenetelmää. Tulostusmenetelmä perustuu muovimateriaalin ekstruusioon tulostussuuttimen läpi tulostusalustalle. Laitteen ekstruuderia liikutetaan X-, Y- ja Z-akseleilla, jolloin muovia pursotetaan kolmiulotteiseen muotoon (Noorani, 2017, s. 101.).



Kuva 8. Filamentti-FDM-tulostusmenetelmän havainnekuva (Pick3DPrinter, 2021).

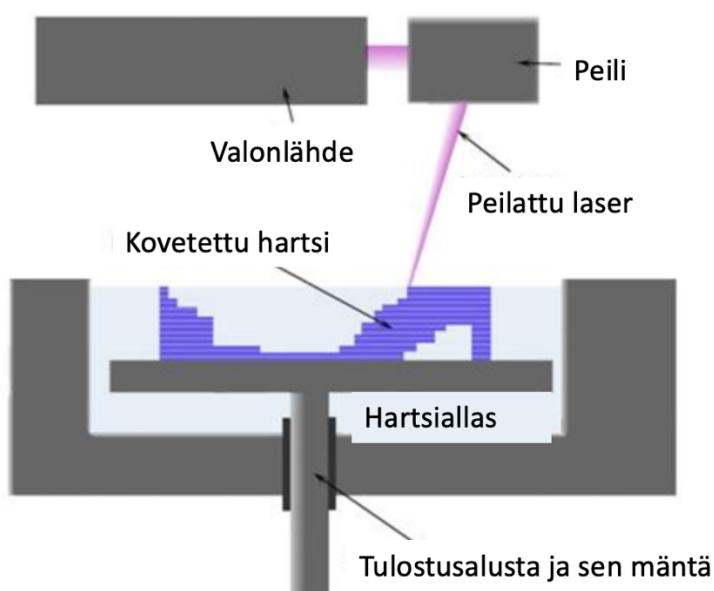
Ekstruusio on materiaalin työstömenetelmä, jossa lämmitettyä materiaalia työnnetään suuttimen läpi, joko pyörivällä ruuvilla, rullalla, männällä tai paineilmalla. Ekstruuderissa materiaali lämmitetään lämmityselementein sekä kitkan avulla. 3D-tulostusekstruusiossa pursotusmateriaalina voi olla nauhamaista muovifilamenttia tai raemaista muovigranulaattia (Plastics International, 2021).

Tulostettavat yksittäiset kerrokset eli viipaleet määrätään viipalointiohjelmalla, joihin 3D-tulostin purstottaa muovia g-koodin osoittamin koordinaatein. Ekstruuderi keskeyttää muovin pursotuksen tulostuspään siirtyessä tulostettavan kappaleen uuteen viipaleeseen. Jokaisen kerroksen päälle tulostettu uusi kerros sitoutuu alempaan kerrokseen muodostaen siten valmiin kappaleen (Noorani, 2017, s. 101.).

#### 4.2 Stereolitografia (SLA)

Stereolitografia tulostusmenetelmässä (Kuva 9) tulostettava kappale muodostetaan valopolymerisoimalla hartsia. Valokovettuva hartsi varastoidaan laitteessa

olevaan altaaseen, jossa on läpinäkyvä pohja. Pohjan läpi hartsiin syötetään valoa laitteen alla olevalla valonlähteellä esim. laserilla. Laitteen tulostusalusta sijaitsee melkein hartsialtaan pohjalla tulostuksen alkuvaiheessa jättäen pohjan ja tulostusalustan väliin ensimmäisen tulostettavan kerroksen välisen tilan. Ensimmäinen kovettunut hartsi kerros muodostaa tulostettavan kappaleen ensimmäisen kerroksen, jonka päälle valonlähde muodostaa uusia kerroksia tulostusalustan noustessa tulostettavan viipaleen verran hartsialtaassa ylöspäin (Noorani, 2017, s. 107-108.).



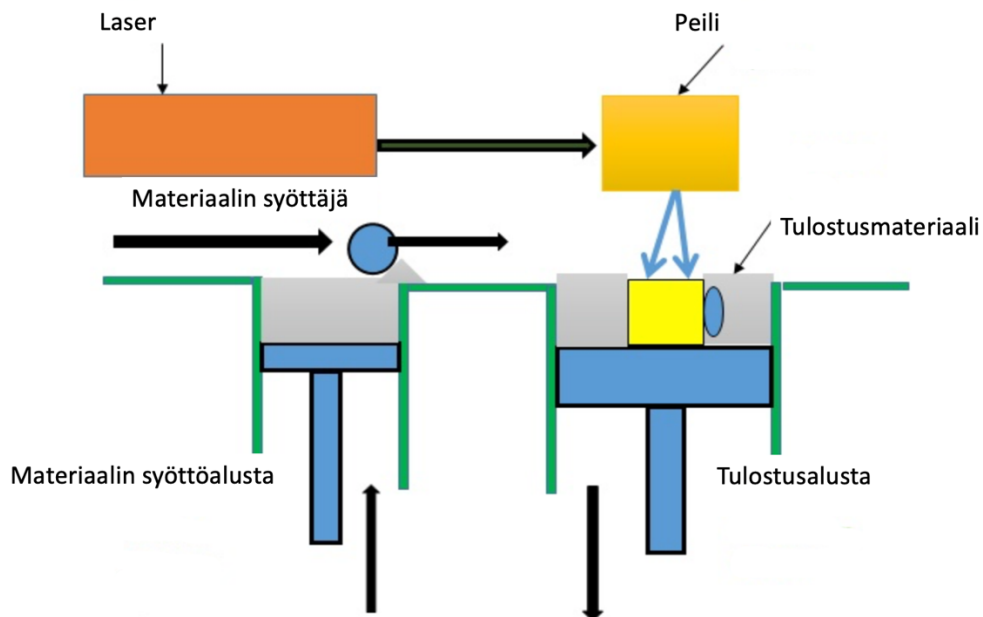
Kuva 9. SLA 3D-tulostusmenetelmän havainnekuva (Satishkumar, 2016).

SLA-tulostusmenetelmä eroaa melko paljon perinteisestä FDM-tulostusmenetelmästä tulostusmateriaalin sekä kappaleen muodostamistavan mukaan. Kuitenkin molemmat menetelmät muodostavat kappaleen erillisistä kerroksista CAD-mallin pohjalta. SLA-menetelmän etuihin kuuluu FDM-menetelmään verrattuna sen kyky tulostaa suuremman tulostusresoluution kappaleita. Form 1+ SLA -tulostimen tulostusresoluutio on neljä kertaa suurempi kuin esim. MakerBot Replicator

FDM -tulostimen, (Form 1+ 0,025 mm ja Makerbot Replicator 0,1 mm) (Noorani, 2017, s. 107-108.).

#### 4.3 Selektiivinen laser-sintraus (SLS)

SLS-menetelmässä (Kuva 10) tulostusmateriaalina käytetään jauhemaista poly-  
meeriä tai metallia. Jauhemateriaalipartikkelit sulatetaan kiinni toisiinsa käyttä-  
mällä lämpöenergiaa eli sintrataan. Lämpöenergian lähteenä voidaan käyttää la-  
seria tai infrapunaa, joiden kohdistusta ohjataan peilien avulla. Tulostuksessa  
käytettävä jauhemateriaali sijaitsee tulostusalustalla, jossa jauhetta lämmitetään  
tulostettavan kappaleen yksittäisen kerroksen eli viipaleen mukaan (Noorani,  
2017, s. 110.).



Kuva 10. SLS-3D-tulostusmenetelmän havainnekuva.

Kaikkien eri tulostettujen viipaleiden välissä tulostusalusta laskee tulostettavan kerroksen paksuuden verran. Jokaisen tulostetun viipaleen päälle lisätään uusi kerros tulostusmateriaalia, joka on tulostettavan kerroksen paksuinen. Prosessi toistuu niin kauan, että tulostettava kappale on valmis. Tulostusmenetelmän suurimpia etuja ovat sen kyvyt luoda valmis kappale, joka vaatii erittäin vähäistä jälkikäsittelyä samalla jättämällä sintraamatonta materiaalia, joka on uudelleenkäytettävää. Menetelmän haittapuolia ovat sen korkea hinta ja mekaaninen monimutkaisuus (Noorani, 2017, s. 111.).

#### 4.4 Prenta Oy:n FGF-450 isosuuttimellisen 3D-tulostimen toimintaperiaate

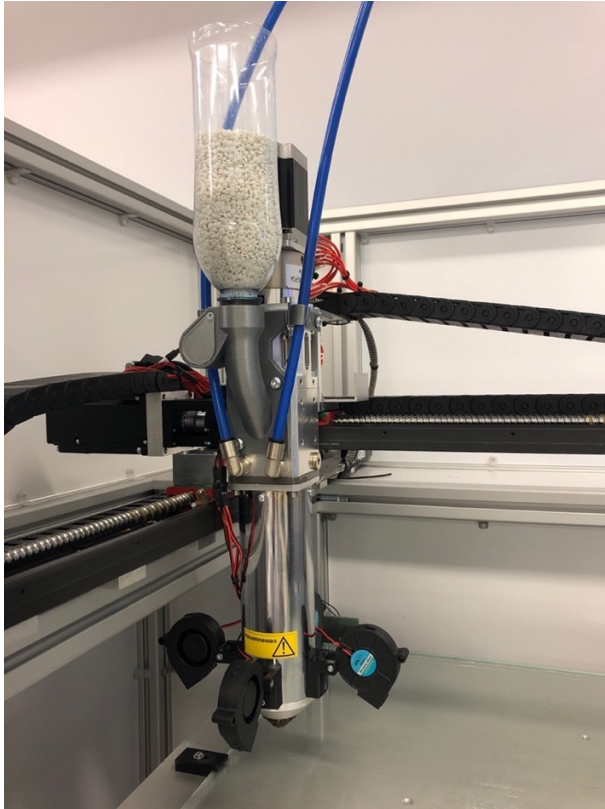
FGF-450-tulostin (Kuva 11) muodostaa FGF-tulostusmenetelmällä fyysisen 3D-kappaleen käyttämällä virtuaalista 3D-mallia. Tulostimen tulostuskärki on ekstruuderin, jonka sisällä on ruuvi, joka saa syöttömateriaalin vertikaaliasennossa olevasta syöttösuppilosta. Laitteen ekstruuderiruuvi työntää muovigranulaatin lämpöelementistä läpi, jolloin sulanut muovi kulkee tulostimen suutinosan kautta tulostusalustalle.



Kuva 11. Prenta Oy:n FGF-450 isosuuttimellinen tulostin.

FGF-tulostusmenetelmä eli ruuvipursotus eroaa FDM-menetelmästä, jossa syöttömateriaali on muovifilamenttia tulostusmateriaalin olomuodolla sekä tulostusmateriaalin kuljetustavalla. FGF-menetelmässä käytetään muovigranulaattia tai jauhemaista syöttömateriaalia, joka syötetään ruuviekstruuderiin (Kuva 12). Ruuviekstruuderissa on lämmityselementti, jonka tuottama lämpö plastisoi pursotettavan muovin. Plastisoitu muovi pursotetaan tulostusalustalle, jolloin se muodostaa fyysisen kappaleen. Ruuviekstruuderilla saadaan suurempi paine, joka kohdistuu tulostusalustalle sekä tulostettavaan kappaleeseen, jolloin potentiaalinen pursotustilavuus on suurempi filamenttitulostukseen verrattaessa (DSM, 2021.).





Kuva 12. FGF-450 tulostimen ekstruuderit.

3D-tulostin on suunniteltu pääsääntöisesti termoplastisten muovien tulostamiseen, laite kuitenkin soveltuu myös erilaisten komposiittimateriaalien tulostamiseen. Tulostettavan muovimateriaalin muovityyppi voi olla ensiö- tai uusiotyyppiä ja olomuoto murska-, jauhe- tai granulaattimuodossa. Laitteen maksimiliikeradat X-akselilla on 470 mm, Y-akselilla 480 mm ja Z-akselilla 450 mm. Laitteen maksimilämpötila suuttimelle on 260 °C ja tulostusalustalle 150 °C.

Prenta FGF-450 isosuuttimellisessa 3D-tulostimessa on käytettävissä 0,4; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0 ja 3 mm:n suuttimia, (Kuva 13) jolloin yli 1,5 mm:n suuttimet mahdollistavat yhdessä ekstruuderiruuvin kanssa muovin suuren syöttönopeuden suhteessa perinteiseen FDM-tulostukseen. FDM-tulostimissa on perinteisesti käytössä 0,4 ja 0,6 mm:n suuttimet ja tulostusmateriaalin syöttö tulostinalustalle tapahtuu lämmitetyn suuttimen läpi kulkevalla muovifilamentilla.



Kuva 13. FGF-450 3D-tulostimen suuttimet.

#### 4.5 Työssä käytetyt tulostusmateriaalit

3D-tulostimen tulostusmateriaalit valittiin yleisten 3D-tulostuksessa käytettävien materiaalien mukaan. Pääsääntöisesti työssä testiajettavat materiaalit olivat PLA- (polylaktidi) ja ABS-muoveja (akryylinitriilibutadieenistyreeni). PLA-muoveja testattiin kolme erityyppistä, kun taas ABS-muoveja testattiin ensiö- ja uusiolaa- tuina.

##### 4.5.1 PLA-tulostusmateriaali

PLA-muovi on yksi käytetyimmistä termoplastisista materiaaleista 3D-tulostuk- sessa. Materiaali on hiilineutraali ja biohajoava polymeeri, joka valmistetaan so- kerikasveista, kuten tapiokasta, maissista tai sokeriruosta. Materiaalia voidaan tulostaa ilman lämmitettävää tulostusalustaa, koska materiaali sulaa melko alhai- sessa lämpötilassa. PLA:n sulamispiste on n. 160 °C, mutta materiaali sitoutuu paremmin yli 180 °C lämpötilassa. PLA on melko hauras polymeeri muihin ter- moplastisiin materiaaleihin verrattuna, materiaalia voidaan kuitenkin vahvistaa eri lisäaineilla. (Noorani, 2017, s. 95.). Työssä käytetyissä PLA-muoveissa Biodolo- mer-PLA (Kuva 14) sisältää lisäaineita muovin pehmentämiseen, kun taas PLA- 3052D (Kuva 15) ja PLA-3521D (Kuva 16) eivät sisällä pehennysaineita.



Kuva 14. Työssä käytetty Biodolomer F40 900310 PLA.



Kuva 15. Työssä käytetty PLA-3052D.



Kuva 16. Työssä käytetty PLA-3521D.

#### 4.5.2 ABS-tulostusmateriaali

ABS-muovi on yleisessä käytössä teollisuudessa esim. lasten leluissa kuten Lego-palikoissa. ABS:n sulamispiste on korkeampi kuin PLA:n, noin 230 °C. Materiaalin huomattava ominaisuus on sen taipumus kutistua jäähtyessään, jolloin lämmitettävä tulostusalusta on tarpeellinen. ABS-muovi tuottaa tulostettaessa höyryjä, jotka tulee huomioida hyvällä ilmanvaihdolla, höyryjen hengittämisen välttämiseksi (Noorani, 2017, s. 96.) (Kuva 17).



Kuva 17. Työssä käytettyä uusio-ABS-tulostusmateriaalia RR3010.

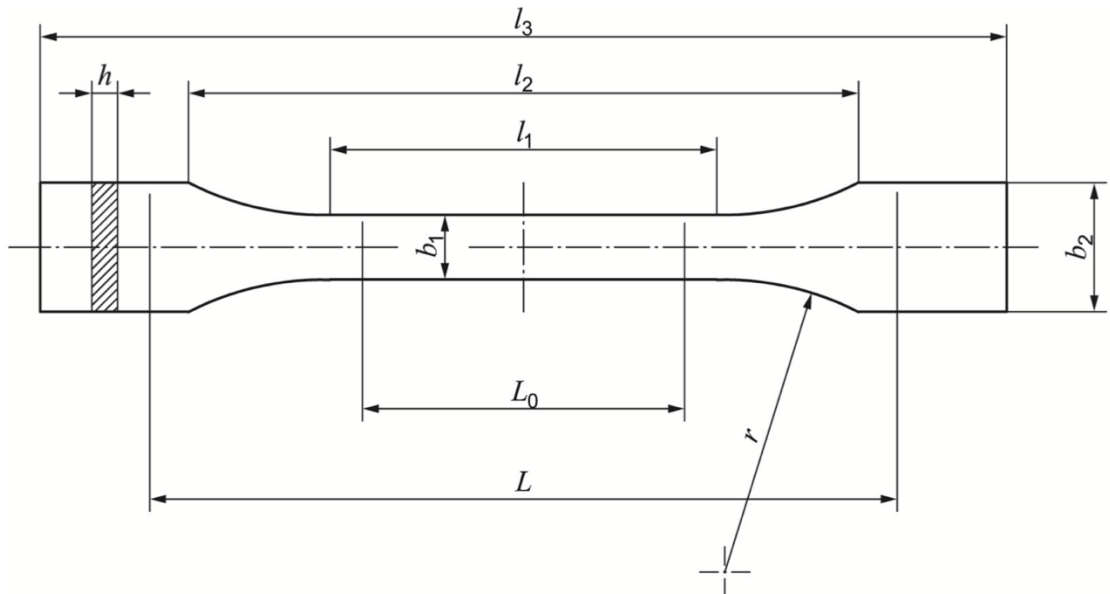
## 5 TULOSETTAVAT 3D-MALLIT

Ruuvitulostimen testiajoissa määritettiin tulostimen suorituskykyä eri muoviai-neilla ja ajoparametreilla. Testiajoissa 3D-malleina käytettiin standardisoitua ve-tosauvamallia sekä yleisesti 3D-tulostimien suorituskyvyn määrittämiseen käytet-tyä 3DBenchy-mallia. 3D-malleja tulostettiin pääosin PLA- ja ABS-muoveilla. Tu-lostimella ajettiin myös komposiittimuoveja, joita käsitellään luvussa erikseen omina tapauksinaan.

Tulostettavien mallien valinta suoritettiin niiden mitattavien sekä aistinvaraisesti havaittavien ominaisuuksien mukaan. Tulostettuja vetosauvoja voidaan mitata veto- ja taivutuskokein määrittämään tulostuksen ajoparametrien vaikutusta tu-lostetun kappaleen vahvuuteen. 3DBenchy-mallia käytetään enemmän tuloste-tun kappaleen aistinvaraiseen suorituskyvyn määrittämiseen. 3DBenchy-malli on Creative Tools:n valmistama 3D-malli, työssä muut käytetyt mallit piirrettiin Auto-desk:n valmistamalla selainpohjaisella Tinkercad-ohjelmalla.

### 5.1 Tulostettava vetosauvamalli

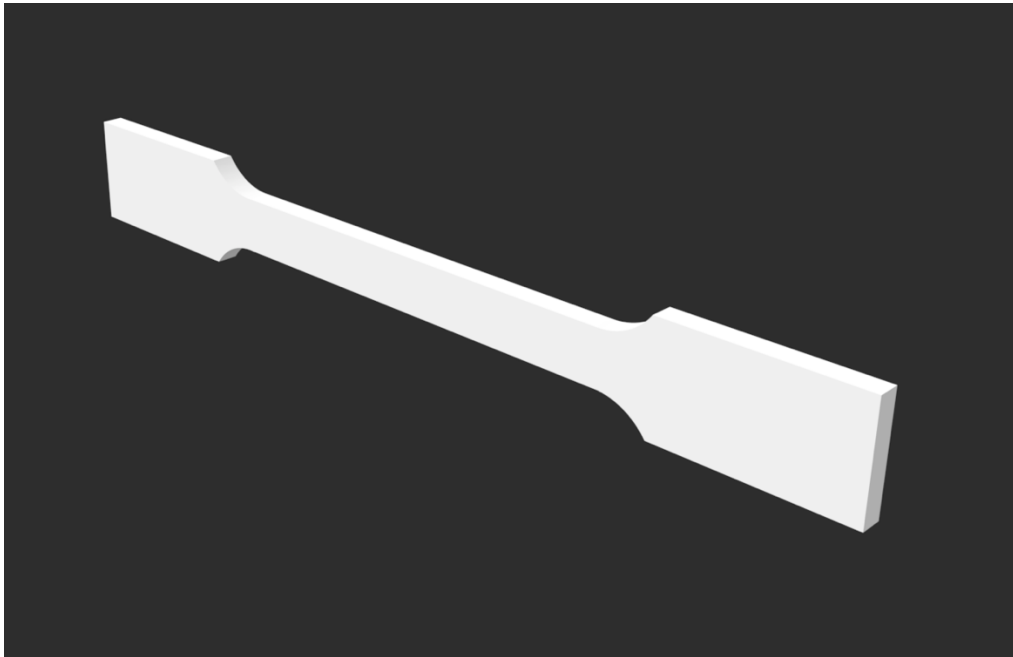
Vetosauva on standardin ISO 527-2:2012 *Muovit – Veto-ominaisuuksien määrit-täminen*, näytteen 1A:n mukaan piirretty (Kuva 18 ja Taulukko 1). Standardin määrittelemä vetosauva on tarkoitettu valmistettavaksi ruiskuvalu- tai ahtopuris-tusmenetelmää hyväksi käyttäen (SFS-EN ISO 527-2:2012). 3D-tulostamiseen malli (Kuva 19) valittiin siksi, että tulostetusta kappaleesta pystytään määrittä-mään tulostuksen tarkkuutta ja halutessaan voitaisiin kvantifioida tulostuksen laa-tua.



Kuva 18. Vetosauvan tekninen-piirros (SFS-EN ISO 527-2:2012, s. 8).

Taulukko 1. Vetosauvan tekniset mitat (SFS-EN ISO 527-2:2012, s. 9).

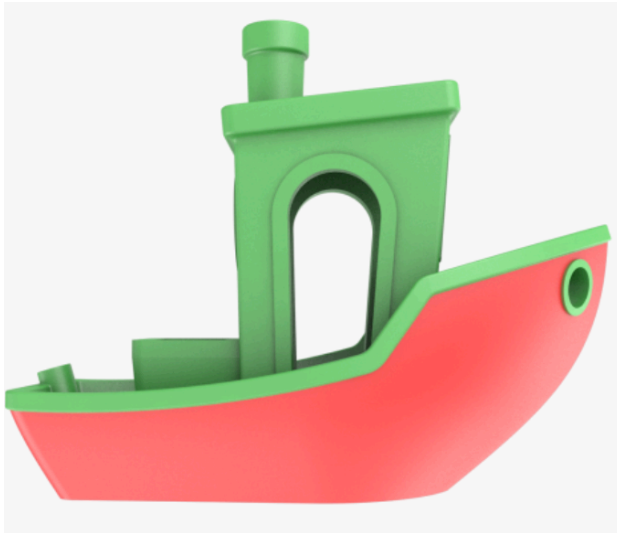
|       | Koekappaleen tyyppi     | 1A (mm)         |
|-------|-------------------------|-----------------|
| $l_3$ | Kokonaispituus          | 170             |
| $l_1$ | Kapean yhdensuuntai-    | $80 \pm 2$      |
| $r$   | Säde                    | $24 \pm 1$      |
| $l_2$ | Leveiden yhdensuun-     | $109,3 \pm 3,2$ |
| $b_2$ | Päiden leveys           | $20,0 \pm 0,2$  |
| $b_1$ | Kapean osan leveys      | $10,0 \pm 0,2$  |
| $h$   | Suosittelun paksuus     | $4,0 \pm 0,2$   |
| $L_0$ | Suosittelun mittapituus | $75,0 \pm 0,5$  |
| $L$   | Pidikkeiden alkuperäi-  | $115 \pm 1$     |



Kuva 19. Tulostettavan vetosauvamallin kiinteä virtuaalinen malli.

## 5.2 Tulostettava 3DBenchy-malli

3DBenchy-mallilla (Kuva 20) on monia geometristä muotoa, joka antaa monta eri tarkastelukohtaa aistinvaraiselle laadun määrittämiselle. Mallia pidetään yleisesti haastavana tulostettavana, mutta 1:1 tulostettuna mallin tulostusaika pysyy usein alle kahdessa tunnissa, riippuen tulostinsuuttimen koosta ja ajoparametreista. Monien tarkastelukohtien sekä suhteellisen nopean tulostusajan vuoksi malli valittiin pääsääntöiseksi testikappaleeksi.



Kuva 20. 3DBenchy-malli (Creative Tools, 2021).

3D-malli on muodoltaan yksinkertainen laiva, jonka eri muodot, riippuen 3D-tulostimesta näyttää helposti kohdat, jotka tuottavat virheitä tulostamisvaiheessa. Mallilaivan runko on suuri, ylöspäin kaareva alue, joka varsinkin FDM-tulostuksessa näyttää tulostuskerroksen yli- tai aliekstruusio-ongelmat. Malli on symmetrinen poikkileikkattuna vertikaalisesti keulasta takaosaan, josta voidaan määrittää, tapahtuuko tulostaessa vinoutumista tai kiertymistä (Creative Tools, 2021.).

3D-mallilaivan kansi- ja piippuosa on vaakatasossa mallin pohjatason kanssa, jolla saadaan näkyviin mallin päällikerrosten laatutasoa. Piippuosa on sylinterin muotoinen, joka määrittää muutokset pyöreän muodon tulostamisessa. Mallin takaosassa ja pohjassa on upotettua tekstiä, jolla voidaan määrittää korkean tulostusresoluution laatua (Creative Tools, 2021.).

3D-mallin kajuuttaosan katto ja katon ulkoreunat ovat ilman tukevaa rakennetta. 3D-tulostaessa tämänkaltaiset tulostusvaiheet usein johtavat tulostusprosessin epäonnistumiseen. Käytettävällä tulostusohjelmistolla voidaan näitä osioita varten luoda tukirakenne, joka poistetaan jälkikäsittelyn yhteydessä. Mallin katto ja rungon reunat nousevat loivassa kulmassa, joka osoittaa tulostettujen tasojen kiinnityksen ja täytön (Creative Tools, 2021.).



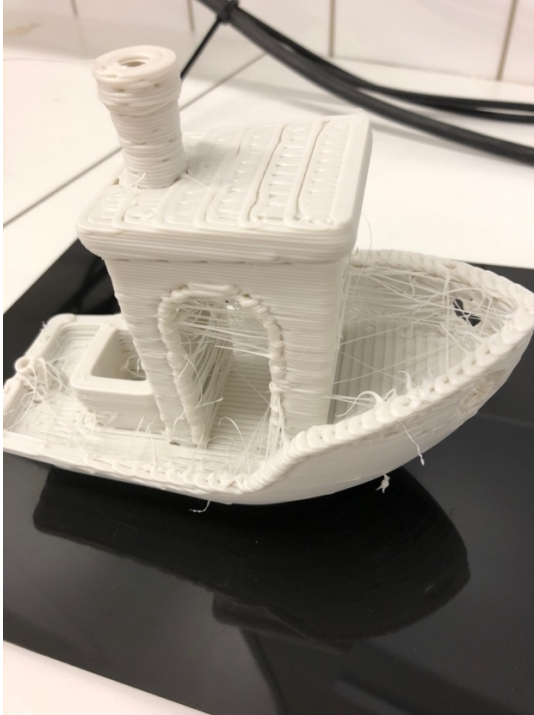
## 6 ISOSUUTTIMELLISEN 3D-TULOSTIMEN TESTIAJOT

Isosuuttimellisen 3D-tulostimen testiajojen tavoitteena oli määrittää ruuvi-3D-tulostimen kykyä tulostaa eri muotoja ja materiaaleja erilaisin prosessiparametrein. Tavoitteen saavuttamiseksi käytettiin edellä mainittuja tulostusmalleja ja materiaaleja. Käytännön osuus suoritettiin työtä varten laaditun suunnitelman mukaan, jossa oli työn aloittamista varten kirjattu alustava työjärjestys.

Työ aloitettiin käyttämällä tulostusmateriaalina Biodolomer F40 900310 PLA-muovia, lähtökohtaisesti tulostimeen Prenta Oy:n edustajan puolesta saadun perehdytyksen vuoksi, jossa saatujen havaintojen perusteella materiaali soveltuisi hyvin suorituskyvyn määrittämisen lähtökohdaksi. Edellä mainittu tulostusmateriaali on stabiili tulostaessa, koska sen kyky sitoutua tulostustasoon on hyvä, sekä muovin sulaindeksi on korkea, jolloin materiaalin ekstruusio ei tuota rasittavia voimia ruuville.

Testiajojen alkuvaiheessa suoritettiin kolmen, viiden ja kuuden kappaleen tuotantosarjoja standardisoidulla vetosauvamallilla. Tuotantosarjojen kappalemääriä nostettiin työn edetessä, jotta yksittäisen tulostuksen ajan kulutus vähenisi, sekä pystyttäisiin näkemään tulostusalustan eri kohtiin tulostamisen vaikutusta kappaleisiin.

Tulostettujen kappaleiden laadun määrittämisessä eniten huomiota kiinnitettiin tulostetun kappaleen resoluutioon eri suuttimilla sekä yksittäisiin laadullisiin ongelmiin, joita tulostaessa voi tapahtua. Tulostimelle ominainen kyvyttömyys vetää tulostusmateriaalia takaisin ekstruuderiin tuotti selvän tarkastelukohteen testiajoihin. Takaisinvedon puutteen vuoksi on mahdollista, että muovia valuu tulostussuuttimesta tulostusprosessin aikana (Kuva 21) silloinkin, kun tulostusmateriaalin pursotuksen tulisi olla pysähdyksissä.



Kuva 21. Biodolomer F40 900310 tulostettu 3DBenchy-malli, jossa havaittavissa ylimääräinen tulostusmateriaalin valumisen suuttimesta pingottuneiden lankojen muodossa.

### 6.1 Huomioituja asioita FGF-450 tulostimesta

Tehtyjen testiajojen perusteella havaittiin, että sekoitettaessa ensiö- sekä uusio-materiaalia keskenään syötön tasaisuus kasvoi eikä materiaali holvaantunut yhtä paljon syöttösuppilon kuin puhdas uusiosyöttömateriaali. Ensiö- ja uusiosyöttö-materiaalin seossuhde on oltava vähintään 1:1 materiaalin massan mukaan (Kuva 22). Käytettäessä ensiögranulaattia materiaalin kulku syöttöputkeen oli tasaisista granulaattikoon ollessa kuitenkin alle 5 mm:ä halkaisijaltaan (Kuva 23). Yli 5 mm:n halkaisijaltaan olevat syöttömateriaalit saattavat holvaantua ekstruuderiruovin syöttöputkeen (Kuva 22). Havainnot tehtiin rouhitun ABS-muovin testiajoissa.



Kuva 22. Uusiosyöttömateriaali sekä seos ensiö- ja uusiomateriaalia (ABS-muovi).



Kuva 23. Mallikuva työssä käytetystä ensiö-PLA-muovigranulaatista.

Työssä havaittiin, että kappaleen fyysinen koko, käytettävä tulostusmateriaali sekä tulostusaika tulee huomioida työn suorituksen ja tulostusprosessin helpottamiseksi. Kappaleen fyysistä kokoa voidaan seurata suoraan viipalointiohjelmasta, jossa kappaletta voidaan skaalata suuremmaksi tai pienemmäksi alkupe-  
räisestä koosta. Eri suuttimien käyttö vaikuttaa suoraan tulostusresoluutioon eli tulostustarkkuuteen, jolloin tulostettaessa monimutkaisia kappaleita alle 1 mm:n kokoisten suuttimien käyttö oli suositeltavaa. Suutinkoon tuplaantuessa tulostamiseen kuluva aika lähes puolittuu käytettäessä muuten samankaltaisia prosessiparametrejä.

Tulostusmateriaalin vaikutukset tulostusprosessiin riippuivat materiaalin ominaisuuksista. Suurimpia vaikutuksia tulostusprosessiin tehdyssä työssä oli materiaalin kulku syöttösuppilossa, materiaalin kulkeutuvuus sulana, sekä materiaalin sitoutuvuus. Muovimateriaalien partikkelikoot vaikuttivat suoraan niiden kulkeutuvuuteen syöttösuppilossa ja materiaalien kulkuun ekstruuderin sisällä lämmityselementin asetetut lämpötilat. Tarvittaessa syötettävän materiaalin partikkelikoko varmistetaan siivilöimällä ja tulostuksessa käytettävät lämpötilat valitaan materiaalin sulamispisteen mukaan.

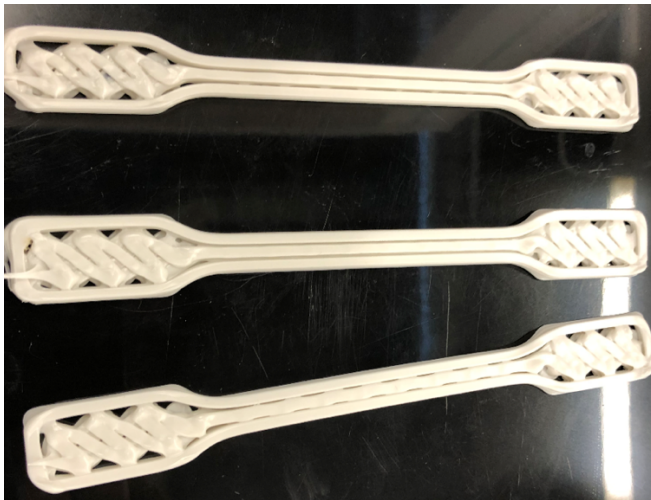
Jokaisen 3D-tulostettavan kappaleen varsinainen tulostusaika oli riippuvainen edellä mainituista ominaisuuksista sekä tulostusprosessin asetuksista. 3D-tulostimen asetukset mahdollistivat mm. tulostimen ekstruuderin liikkumisnopeuden erillisen säädön ja pursotuksen nopeuden säädön. Näillä asetuksilla oli suuri vaikutus varsinaiseen tulostusaikaan, joka saattoi olla monia tunteja riippuen tulostettavasta kappaleesta varsinkin pienemmillä suuttimilla kuten 0,4 mm ja 0,6 mm.

FGF-tulostimille on tyypillistä, että ne eivät kykene vetämään tulostusmateriaalia takaisin ekstruuderiin. Tästä johtuen tulostuskärjen liikkuessa X- ja Y-akselien suuntaisesti tulostettavan kappaleen tyhjien tilojen yli saattaa muodostua pingotuneita muovilankoja sekä yksittäisen tulostuskerroksen loppuvaiheessa mahdollisia yliekstruusiokohtia.

## 6.2 PLA-ajot

Suurin osa tulostetuista kappaleista tulostettiin eri PLA-laaduista. Materiaalin käyttöasteeseen vaikuttivat aikaisemmin mainitut ominaisuudet sekä materiaalin hyvä saatavuus. PLA-ajoja suoritettiin koko opinnäytetyön käytännön osuuden aikana, sillä materiaali antoi parhaimmat mahdollisuudet erilaisten ajoparametrien testaamiseen.

Ensimmäiset PLA-ajot suoritettiin standardisoiduilla vetosauvamalleilla ja suurimmalla 3 mm:n suuttimella. Vetosauvasarjoja tulostettiin 3 mm:n suuttimella aluksi, jotta tulostimen toiminta tulisi tutuksi pienellä ajan kulutuksella ja pystyittäisiin näkemään, onko suhteellisen pienen kappaleen tulostaminen mahdollista isojen suuttimien kanssa. Tulostusparametreina PLA:lle käytettiin suuttimen lämpötilana 195 °C ja tulostusalustan lämpötilana 50 °C.



Kuva 24. Ensimmäiset PLA-vetosauvatulosteet.

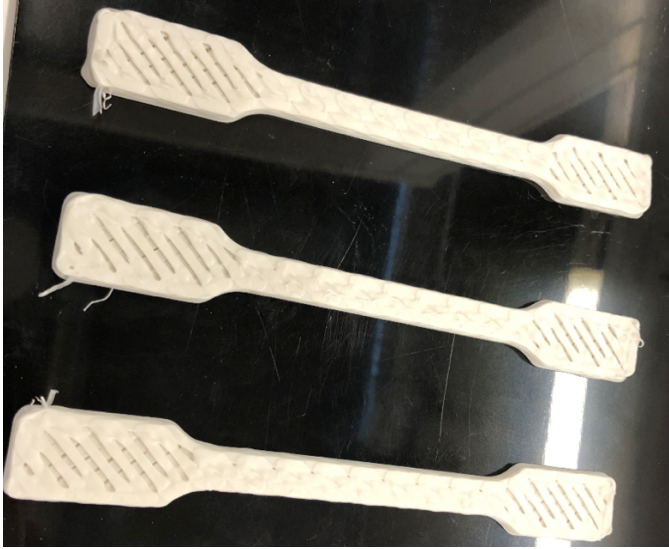
Ensimmäisessä tulosteessa (Kuva 24) on havaittavissa melko huomattava kappaleen alitäyttö vetosauvan leveimmässä kohdassa, jolloin seuraavassa

testiajossa kappaleen täyttö lisättiin 100 %, kun aikaisemmassa mallissa kappaleen täyttö oli 50 %. Muilla tavoin tulostusprosessiparametrit olivat samoja.



Kuva 25. Kappaleen täyttö lisätty 100 %:iin.

Kappaleen täyttöasteen muutoksilla 50 %:sta 100 %:iin saatiin valmiin tulostuskappaleen laatua muokattua paljon (Kuva 25). Vaikka kappaleen täyttö oli täydellinen eikä kappaleeseen muodostunut tyhjiä kohtia, kappaleen viimeisessä kerroksessa oli havaittavissa yliekstruusiota, joka johti epätasaiseen pintaan.



Kuva 26. Kappaleen täytön hienosäätöä.

Vetosauvamallin täyttöä yritettiin hienosäätää vähentämällä kappaleen kokonais-  
täyttöä 100 %:sta alas 90 %:iin (Kuva 26). Odotettu tulos muutoksella oli saada  
viimeisen kerroksen yliekstruusio poistettua, mutta pienen muutoksen pohjalta  
voidaan havaita, että muutos johti välittömään aliekstruusioon viimeisellä kerrok-  
sella.



Kuva 27. Kappaleen lineaarinen täyttökuviointi.

Vetosauvan päällikerroksen epätasaisuuden poistamiseksi tulostusprosessia muutettiin niin, että kappaleen täytön muoto muutettiin lineaariseksi. Lineaarinen täyttö tuottaa jokaisen kappaleen kerroksen pitkittäisillä pursotuksilla (Kuva 27). Aikaisempien tulosteiden kerrosten täyttö oli tapahtunut tulostettavan kuvion kulmasta kulmaan, jolloin tulostettavan kerroksen pinta-alueelle tulee enemmän yksittäisiä pursotuksia.

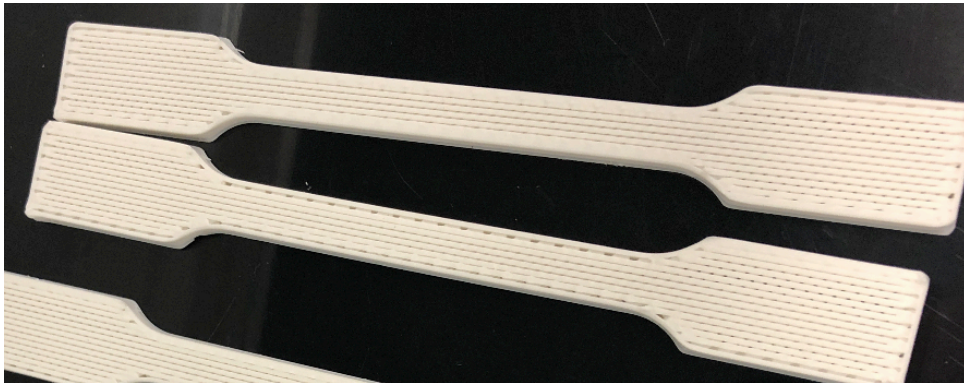


Kuva 28. Lineaarisen täyttökuvioinnin ongelmakohta.

Lineaarisen täytön ongelmakohtaksi 3 mm:n suuttimella tulostettaessa muodostui laitteen tapa jättää kokonaan tulostamatta kappaleen keskimäinen linja



(Kuva 28). Laitteen tulostinkärki liikkuu täytettävän linjan kohdalla tulostusnopeutta, mutta jättää materiaalin pursottamatta. Tulostimen viipalointiohjelman asetuksia muutettiin pursotuskertoimen välillä 1,3 sekä 2,0 ja täyttökerroksen reunan ylityksen määrää 15 %:n ja 50 %:n välillä tuottaen kuvan 28 mukaisia tuloksia. Kuvan 28 vetosauvojen pursotuskerroin oli 1,3.



Kuva 29. Suuttimen koko 1 mm ja vain ylä- ja alakerros lineaarisella kappaleen täytöllä.

Tulostettaessa pienemmällä (1 mm) suuttimella pystyttiin poistamaan keskimmäisen linjan pursotusongelma (Kuva 29). Tulostettavan kappaleen täyttöasteen ollessa 90 % ja ensimmäisen ja viimeisen tulostuskerroksen ollessa lineaarisella täytöllä kappaleeseen ei muodostu pursottamatta jääneitä linjoja. Varsinaisen pursotusongelman aiheuttajaa ei löydetty työtä suorittaessa, ongelma oli ainoastaan havaittavissa suuremmilla suuttimilla tulostettaessa (2,00 mm tai 3,00 mm).



Kuva 30. 1 mm:n suuttimella tulostettuja vetosauvoja.

1 mm:n kokoista tai pienempää suutinta käytettäessä standardin kokoisten vetosauvojen mittasuhteet olivat lähellä standardin asettamia mittoja (Kuva 30). Tulostettaessa 0,6 mm:n suuttimella ongelmakohtaksi kehittyi kappaleen yksittäisten kerrosten keskinäinen adheesio (Kuva 31).



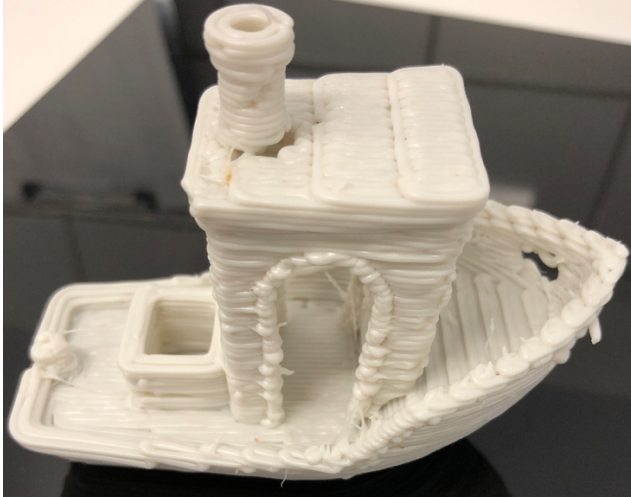
Kuva 31. Kerrosten adheesioongelma 0,6 mm:n suuttimella.

Adheesion parantamiseksi tulostuslämpötilaa nostettiin kymmenen asteen asteelin 195 °C:sta 225 °C:een ja pursotuskerrointa nostettiin samalla 1,6:sta 2,0:aan. Kerrosten keskinäinen adheesio parantui muutetuilla parametreilla eniten lämpötilassa 225 °C pursotuskertoimen ollessa 2,0 (Kuva 32) ilman huomattavaa tulostustarkkuuden heikentymistä, eikä kerrosten välinen sidos murtunut lievästi käsin taivutettaessa.



Kuva 32. Muutetuilla prosessiparametreilla tulostettuja sauvoja 0,6 mm:n suuttimella.

3DBenchy-mallin tulostamiset aloitettiin 1 mm:n suuttimella ja Biodolomer PLA:lla. Ensimmäiseksi testiajoksi mallin tulostus onnistui kohtalaisesti ottaen huomioon, että laivan kajuuttaosion sisälle tai keulan alle ei tulostettu minkäänlaisia tukirakenteita (Kuva 33). Malli on tulostettu 100 %:n täytöllä, 195 °C:n suuttimlämpötilalla ja 50 °C:n tulostusalustalämpötilalla. Huomiokohtia on yksittäisten kerrosten yliekstruusiot sekä lievät kerrosten kiertymiset pursotuksen kulkiessa ylöspäin.



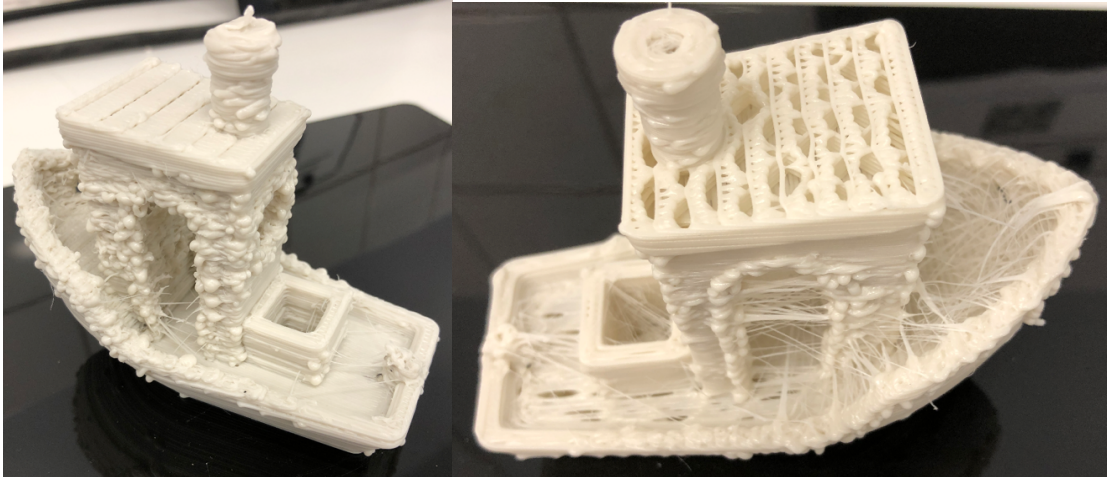
Kuva 33. 3DBenchy-malli tulostettuna 1 mm:n suuttimella.

Siirryttäessä 1 mm:n suuttimesta 2 mm:n suuttimeen muodostui kappaleeseen enemmän pingottuneita lankoja kappaleen tyhjiin välikohtiin (Kuva 34). Osasyynä lankojen muodostumiseen voi olla mallin skaalaus kolminkertaiseksi aikaisempaan testiajoon verrattuna, jolloin tulostinkärjen pidempi kulkumatka tyhjän tilan yli pursotusten välissä mahdollistaa muovin pidempiaikaisen valumisen suuttimesta.



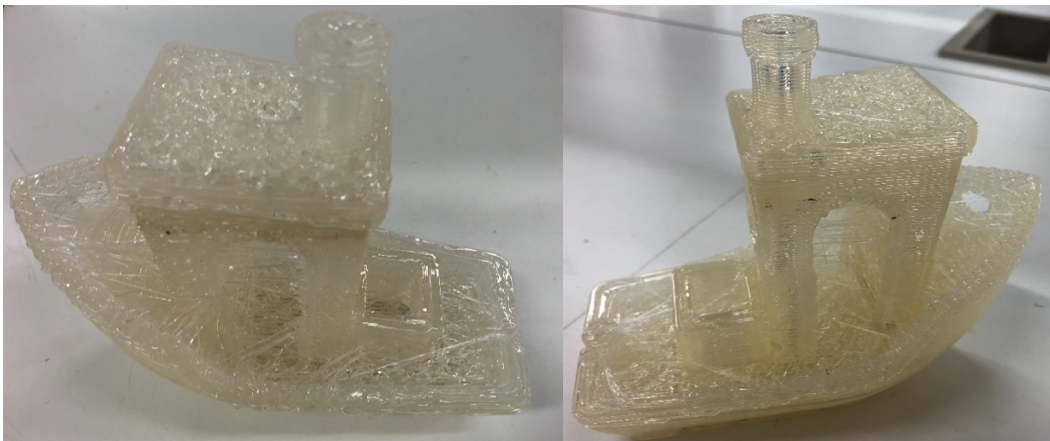
Kuva 34. 3DBenchy-malli tulostettuna 2 mm:n suuttimella.

Tulostettavan kappaleen alempia täyttöasteita verrattaessa kappaleiden tulostuslaatu heikkeni tulostettaessa 0,6 mm:n suuttimella (Kuva 35). 50 % täyttöasteella kappaleeseen muodostui paljon ylipursotuksen aiheuttamia paisumia. Ylipursotuksen korjaamiseksi kappaleen täyttöä laskettiin 10 %:iin ja tulostuskerrosten ulkoreunan ylitysastetta laskettiin 50 %:sta 25 %:iin, mutta muutos johti päälikerrosten aliekstruusioon ja suureen muovilankojen määrään.



Kuva 35. 0,6 mm:n suuttimella tulostettu 3DBenchy-malli vas. 50 % täyttö, oik. 10 % täyttö.

Jälkimmäisinä tehtyihin PLA-ajoihin sisältyi erilaatuisen PLA-muovin tulostaminen. Kumpikaan tulostusmateriaaleista PLA-3521D ja PLA-3052D (Kuva 36) eivät sisällä muovia pehmentäviä lisäaineita. Verrattuna Biodolomer F40 900310 PLA:han materiaaleja pystyttiin tulostamaan samankaltaisilla tulostusparametreillä sekä materiaalin tulostettavuus pysyi samankaltaisena kuin aikaisemmissa PLA-kappaleissa. Tulostetut kappaleet tulostettiin 2,0 mm:n suuttimella ja samanlaisilla parametreillä kuin Biodolomer-kappaleet.



Kuva 36. Vasen: PLA-3521D:llä tulostettu 3DBenchy-malli, oikealla PLA-3052D:llä tulostettu.

Ominaista PLA-3521D- ja PLA-3052D-muovimateriaalista valmistetuissa mal-  
leissa oli niiden jäykkyys verrattuna Biodolomer F40 900310:aan verrattuna. Mo-  
lemmat muovimateriaalit muistuttivat lujuudeltaan kaupallisesta perinteisestä  
PLA:sta tulostettuja kappaleita. Molemmilla materiaaleilla tulostettaessa muovi-  
lankojen muodostuminen oli kohtalaista.

### 6.3 ABS-ajot

ABS-muovin tulostuksen alussa käytettiin samaa mallia kuin PLA-ajoissa. ABS-  
muovi vaatii tulostamisessa korkeammat lämpötilat ja materiaalilla on tapana ku-  
tistua jäähtyessään johtaen kappaleiden vääntymiseen ja irtoamiseen tulostus-  
alustasta kesken tulostusprosessin. Materiaalin suutinlämpötilana käytettiin 245  
°C ja tulostusalustan lämpötilana 120 °C. Korkea tulostusalustan lämpötila auttaa  
kappaleen pitämiseen lämpimänä, mutta korkeilla tulostuskappaleilla vääntymi-  
nen on todennäköisintä.



Kuva 37. 3 mm:n suuttimella tulostetun vetosauvan leveä kohta.

3 mm:n suuttimella tulostettaessa ABS-muovia (Kuva 37) ongelmaksi kehittyi materiaalin valuminen suuttimesta tulostinkärjen siirtymävaiheissa. Materiaalin valumisen estämiseksi siirryttiin pienempiin suuttimiin, joilla on pienempi todennäköisyys valuttaa materiaalia suuttimesta kesken siirtymävaiheiden.

Siirryttäessä pienempään suuttimeen saavutettiin erittäin hyvä tulostuksen tarkkuus ja materiaalin valuminen suuttimesta pysähtyi (Kuva 38). Tulostukseen käytetty 0,6 mm:n suutin tuottaa tarkan tulostusjäljen, mutta haittapuolina suuttimen käytössä on sen vaikutus tulostusaikaan. Kuuden sauvan sarjan tulostamiseen 3 mm:n suuttimella kului n. 20 min ja 0,6 mm:n suuttimella samaan tulostukseen kului lähes 2 h.



Kuva 38. 0,6 mm:n suuttimella tulostettuja ABS-vetosauvoja.

Tarkempaan tulostuslaatuun päästiin hienosäätämällä pursotuskerrointa 0,6 mm suuttimella 2,0:sta 1,5:een (Kuva 39). Kappaleen pinta oli erittäin tasainen ja kappaleen terävien kulmien taitoskohdat olivat suorakulmia. Kappaleen mittasuhteet sopivat standardin määrittelemiin mittoihin.





Kuva 39. 0,6 mm suuttimella hienosäädetty pursotuskerrointa ABS-muoville.

Tulostettaessa 3DBenchy-mallia ABS-muovista ei saatu valmistettua yhtäkään valmista kappaletta. Keskeisin ongelmakohta mallia tulostettaessa oli kappaleen irtoaminen tulostusalustasta, joka johti muovin pursotuksen kulkeutumisen väärin kohtiin (Kuva 40). Tulostettavan kappaleen tulostusalustaan sitoutumisen parantamiseksi vähennettiin kappaleen jäähdytystä ja lisättiin tulostusalustan lämmitystä. 3DBenchy-ABS-ajoissa oli käytössä 2 mm:n suutin sekä suutinlämpötila oli 245 °C ja tulostusalusta 120 °C.



Kuva 40. Epäonnistunut 3DBenchy-malli ABS-muovilla.

Kuvassa 41 on tulostusalustan lämpötilaa nostettu 135 °C:een ja aikaisemmasta ajosta, jossa kappaleen jäähdysteho oli 50 %, laskettiin kappaleen jäähditys 0 %:iin asti. Tulostusparametrien muutoksen jälkeen kappale yhä irtosi alustasta ja johti tulostuksen epäonnistumiseen.



Kuva 41. Tulostusparametrien muutosten jälkeinen testi.

ABS-muovin huonoa kiinnittyvyyttä tulostusalustaan yritettiin vähentää asettamalla erikeeper-vesiseosta (1:1) tulostusalustaan. Vaikka alustassa oli kiinnittymiseen auttavaa seosta, jokainen 3DBenchy-aiho irtosi tulostusalustasta kesken tulostuksen. Tulostusohjelman asetuksista valittiin tulostettavaksi tulostusmateriaalista valmistettava alusta, jonka tulostin tulostaa kappaleen alle ja luo tulostuskappaleelle sitoutumisalustan (Kuva 42).



Kuva 42. 3DBenchy ABS-muovilla ja materiaalialustalla.

ABS-muovilla ei saatu valmista 3DBenchy-mallia tulostettua jokaisen aihion irrotessa tulostusalustasta kesken tulostusprosessin, mutta lähimmäs valmista kappaletta päästiin käyttämällä materiaalialustaa. Materiaalialustan käyttö vähensi huomattavasti tulostettavan kappaleen kiertymistä ja tulostusparametrien lisäsäädöillä kyettäisiin todennäköisesti saavuttamaan valmis kokonainen kappale.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Isosuuttimellisen 3D-tulostimen kanssa suoritetusta työstä pystyttiin havainnoidaan monia työn tavoitteisiin liittyneitä teknisiä asioita, kuten materiaalin käyttäytyminen eri tulostuslämpötiloissa, tulostettavan materiaalin partikkelikoon vaikutukset ja millaisiin tulostustarkkuuksiin päästään osilla suuttimista. Suoritettujen testiajojen perusteella nähtiin, että kappaleiden laatuun vaikuttavat monet eri olosuhteet sekä asetukset.

Kun työn tarkoituksena oli määrittää 3D-tulostimen suorituskykyä ja tutustua laitteen toimintaan, saatiin suoritetusta työstä näkemyksiä käyttöohjeistuksen kirjoittamiseen ja materiaalia jatkotutkimuksiin laitteen kanssa. Käyttöohjeistus kirjoitettiin Turun AMK:n käyttämään LEAN-alustaan, jossa käydään läpi laitteen yksityiskohtainen käyttö, turvallisuusmääräykset sekä toimintaperiaate. Käyttöohjeistus on hyväksytty vertaispalautteen avulla ja se antaa käyttäjälle valmiudet isosuuttimellisen 3D-tulostimen turvalliseen operointiin.

Ottaen huomioon monet erilaiset mahdollisuudet 3D-tulostamisen toteuttamiseen, kuten käytettävät materiaalit ja erilaiset tulostusparametrit, voidaan nähdä, että suoritetussa työssä on vain osa laitteella mahdollisista suoritettavista ja toteutettavista testauksista ja kokeista. Opinnäytetyötä voidaan käyttää lähtökohdaksi tulevaisuudessa toteutettaviin jatkotutkimuksiin ja testiajoihin, jotka kuuluvat lisäävän valmistuksen aihepiiriin.

## 8 LÄHTEET

3Dnatives. (15. maaliskuu 2021). *3D Printer : Form 1+*. Noudettu osoitteesta <https://www.3dnatives.com/en/3D-compare/imprimante/form-1#!>

3DR Holdings. (10. kesäkuu 2015). *You Can Now See the First Ever 3D Printer* . Noudettu osoitteesta <https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>

Bitfab. (15. maaliskuu 2021). *Online 3D Printing Service*. Noudettu osoitteesta <https://bitfab.io/blog/additive-manufacturing/>

Craftcloud. (16. Toukokuu 2021). *All3DP*. Noudettu osoitteesta <https://all3dp.com/2/simplify3d-beginner-s-guide-to-this-premium-slicer/>

Creative Tools. (10. Toukokuu 2021). *About #3DBenchy*. Noudettu osoitteesta <http://www.3dbenchy.com/features/>

Creative Tools. (31. Toukokuu 2021.). *3DBenchy features*. Noudettu osoitteesta <http://www.3dbenchy.com/features/>

DSM. (29. Toukokuu 2021.). *3D Printing with Fused Filament Fabrication and Fused Granulate Fabrication*. Noudettu osoitteesta [https://www.dsm.com/additive-manufacturing/en\\_US/insights/blog/3d-printing-with-fused-filament-fabrication-and-fused-granulate-fabrication.html](https://www.dsm.com/additive-manufacturing/en_US/insights/blog/3d-printing-with-fused-filament-fabrication-and-fused-granulate-fabrication.html)

GE Additive. (15.. maaliskuu 2021.). *Additive manufacturing: What is Additive Manufacturing*. Noudettu osoitteesta <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>

HowToMechatronics. (26. Toukokuu 2021). *G-code explained*. Noudettu osoitteesta <https://howtomechatronics.com/tutorials/g-code-explained-list-of-most-important-g-code-commands/>

MakerBot Industries. (15. maaliskuu 2021). *MakerBot Replicator+*. Noudettu osoitteesta <https://store.makerbot.com/replicator>

Me3D Pty. Ltd. (2018). *History of 3D printing*. Noudettu osoitteesta <https://me3d.com.au/2018/history-of-3d-printing/>

Monroe Engineering. (8. Heinäkuu 2020.). *The Basic Steps of 3D Printing*. Noudettu osoitteesta <https://monroeengineering.com/blog/the-3-basic-steps-of-3d-printing/>

Noorani, R. (2017). *3D Printing: Technology, Applications, and Selection*. Taylor & Francis Group.

Pick3DPrinter. (16. Toukokuu 2021). *2021 Best sites for 3D printing STL Files*. Noudettu osoitteesta <https://pick3dprinter.com/3d-printer-stl-files/>

Pick3DPrinter. (28. Toukokuu 2021). *3D Printer Types*. Noudettu osoitteesta <https://pick3dprinter.com/3d-printer-types/>

Plastics International. (28. Toukokuu 2021). *What is Extrusion?* Noudettu osoitteesta <https://www.plasticsintl.com/blog/what-is-extrusion/>

Satishkumar, S. (2016). *A Review on Stereolithography*. Semantic scholar.org.

SFS-EN ISO 527-2:2012. (2012). *SFS-EN ISO 527-2:2012*. Helsinki: SFS.

Simpson, T. (11. Marraskuu 2019.). *Additive Manufacturing Standards*. Noudettu osoitteesta <https://www.additivemanufacturing.media/articles/standards-for-additive-manufacturing>

Turku AMK. (12. huhtikuu 2021). *MMAM*. Noudettu osoitteesta Multicomponent Materials Centre of Expertise for Additive Manufacturing: <https://mmam.turkuamk.fi>