

Opinnäytetyö (AMK)

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2021

Lauri Renholm

# BRINTER GRANU TOOL - TYÖKALUN KÄYTTÖÖNOTTO



Lauri Renholm

# BRINTER GRANU TOOL -TYÖKALUN KÄYTTÖÖNOTTO

Opinnäytetyö toteutettiin Turun Ammattikorkeakoululle. Opinnäytetyössä tutkittiin Brinter 3D-tulostimen Granu Tool -työkalun toimintaa PLA:lla eli polyaktidilla, joka on eniten käytetty 3D-tulostusmateriaali. Tavoitteena oli saada etsittyä mahdollisimman hyvät parametrit, jotta päästään laadukkaaseen tulostusjälkeen.

Granu Tool -työkalu perustuu Fused Granula Fabrication (FGF) tekniikkaan eli sillä voidaan tulostaa muovia, joka on muodoltaan pellettimaista. Normaalisti 3D-tulostuksessa tulostettava materiaali on muodoltaan säiemäistä filamenttia, mutta materiaalin muuttaminen filamentiksi voidaan jättää väliin FGF-tekniikkaa käyttävällä tulostimella. Opinnäytetyössä koeajettiin kahta eri mallikappaletta eri parametreilla ja tutkittiin näiden vaikutusta tulostuksen laatuun.

Opinnäytetyön lopputuloksena opittiin Granu Tool -työkalun toiminnasta, eri parametrien muutosten vaikutus ja saatiin tulostettujen kappaleiden laatu hyväksi. Tulostimella tulostettujen kappaleiden mittasuhteet vastasivat 3D-malleja, joten tulostimen mittaustarkkuus on hyvä. Parametrien muutoksilla havaittiin olevan iso vaikutus tulosteen laatuun ja aikaan. Esimerkiksi lämpötilan laskulla saatiin vähennettyä tulostusmateriaalin leviämistä. Tulostetut kappaleet saatiin laadullisesti hyväksi koeajojen aikana, mutta laatua olisi voitu parantaa, jos aikaa olisi ollut enemmän käytössä opinnäytetyön tekemiseen.

Tulevaisuudessa mielenkiintoista olisi tutkia Granu Tool -työkalun käyttäytymistä eri materiaaleilla ja miten parametreja täytyy muokata. Eri materiaalilla tulostettaessa voitaisiin verrata käytettyjä parametreja tässä opinnäytetyössä käytettyihin parametreihin.

## ASIASANAT:

3D-tulostus, PLA, Lisävä valmistus, Ekstruusio

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Chemical and Materials Engineering

2021 | 39 pages

Lauri Renholm

## COMMISSIONING OF BRINTER GRANU TOOL

The thesis, implemented for Turku University of Applied Sciences, examined the operation of the Brinter 3D printer extrusion tool with polylactic acid. The purpose was to find the best possible parameters to achieve a satisfactory print quality.

The Granu Tool is based on Fused Granular Fabrication (FGF) technology; therefore, it can be used to print with pellet-like plastic. Typically, the material used for 3D printing is filament, but this is not necessary with printers using FGF technology. In the thesis, two different samples were tested with different parameters, and their impact on print quality was studied.

During the course of the thesis project, the operation of the Granu Tool and the impact of parameter changes were studied, and satisfactory quality of the printed pieces was achieved. The proportions of the printed elements matched the 3D models, so the measurement accuracy of the printer is sufficient. The changes in parameters proved to significantly impact the quality and duration of the output, such as the decrease in temperature, which reduced the spread of the printing material. The printed pieces were qualitatively good during test runs, but the quality could have been better if more time-had been available for the thesis.

In the future, it would be interesting to explore the behaviour of the Granu Tool with different materials and how parameters-would need to be modified. When printing with different material, the parameters used could be compared with the parameters used in this thesis.

### KEYWORDS:

3D printing, PLA, additive manufacturing, extrusion

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>6</b>
<b>2 AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS</b>	<b>7</b>
2.1 Nesteen polymerisointi	8
2.2 Materiaalin suihkut	9
2.3 Sideaineen suihkut	10
2.4 Materiaalin pursot	11
2.5 Jauhepetisulatus	12
2.6 Kerroslaminointi	13
2.7 Suorakerrostus	14
<b>3 FGF-TEKNIikka JA SEN SOVELLUKSET</b>	<b>16</b>
3.1 Kaupalliset sovellukset	17
3.1.1 BLB Industries	17
3.1.2 Colossus	18
3.1.3 Composite Additive Manufacturing	19
3.2 Brinter	20
3.2.1 Granu Tool	21
3.2.2 PLA	22
<b>4 KOEAJOJEN 3D-MALLIT</b>	<b>23</b>
<b>5 KOEAJOT</b>	<b>26</b>
5.1 3DBenchy	26
5.2 XYZ 20-mm Calibration Cube	32
<b>6 LOPPUPÄÄTELMÄT JA YHTEENVETO</b>	<b>37</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>38</b>

## KUVAT

Kuva 1 Nesteen polymerisointi toimintaperiaate (5)	9
Kuva 2 Materiaalin suihkutuspöly toimintaperiaate (7)	10
Kuva 3 Sideaineen suihkutuspöly toimintaperiaate (8)	11
Kuva 4 Materiaalin pursotuspöly toimintaperiaate (11)	12
Kuva 5 Jauhepetisulatus toimintaperiaate (12)	13
Kuva 6 Kerroslaminointi toimintaperiaate (16)	14
Kuva 7 Suorakerrostus toimintaperiaate (18)	15
Kuva 8 FGF-tulostimen toimintaperiaate (19)	16
Kuva 9 The Box-tulostin (20)	17
Kuva 10 Colossus-tulostin (21)	18
Kuva 11 AM Flexbot-tulostin (22)	19
Kuva 12 Brinter-tulostin	20
Kuva 13 Granu Tool -työkalu	21
Kuva 14 3DBenchy (28)	23
Kuva 15 3DBenchy mitat (29)	24
Kuva 16 XYZ 20-mm Calibration Cube (27)	25
Kuva 17 3DBenchy koeajo 1	27
Kuva 18 3DBenchy koeajo 2	29
Kuva 19 3DBenchy koeajo 3	31
Kuva 20 XYZ 20-mm Calibration Cube koeajo 1	33
Kuva 21 XYZ 20-mm Calibration Cube koeajo 2	34
Kuva 22 XYZ 20-mm Calibration Cube koeajo 3	36

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tehtiin Turun Ammattikorkeakoulun Lemminkäisenkadun kampuksella. Työ suoritettiin käyttämällä Brinter 3D-tulostinta. Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää Brinter 3D-tulostimen Granu Tool -työkalun käyttömahdollisuuksia ja tutustua työkalun toimintaan, jotta jatkossa muiden opiskelijoiden on helppo käyttää sitä.

3D-tulostamisen juuret johtavat aina 1984 vuoteen asti, jolloin Charles Hull kehitti idean ensimmäisestä 3D-tulostimesta. Tämän jälkeen 3D-tulostamisesta on tullut koko ajan yleisempää ja nykypäivänä onkin mahdollista, että kotitaloudesta löytyy 3D-tulostin. Yleensä kotitalouksissa käytettävät 3D-tulostimet ovat FDM-tekniikkaan pohjautuvia tulostimia, joilla tulostetaan muovipohjaisia kappaleita. On hyvä, että moni korkeakoulu on panostanut viime vuosina paljon 3D-tulostamiseen, sillä sen yleistyminen ja kustannustehokkuus lisäävät varmasti sen käyttöä myös tulevaisuudessa. (1)

Brinter Oy on suomalaisen 3DTech Oy:n omistama yritys, jonka tarkoituksena on kehittää 3D-biotulostus ratkaisuja lääke-, bioteknologia- ja kosmetiikkateollisuuden, yliopistojen ja tutkimuslaitosten tarpeisiin. Heidän päätuotteensa on Brinter 3D-biotulostin, jonka Turun Ammattikorkeakoulu on hankkinut käyttöönsä. Tulostimelle on saatavilla monenlaisia työkaluja, mutta opinnäytetyössä keskitytään tutkimaan Granu Tool -työkalun toiminnallisuutta PLA:lla.

Opinnäytetyön alkuosassa käsitellään, mitä 3D-tulostaminen tarkoittaa ja mitä erilaisia tekniikoita 3D-tulostaminen pitää sisällään. FGF-tekniikkaan tutustutaan tarkemmin, koska opinnäytetyössä käytetty Granu Tool -työkalu perustuu sen toimintaan. FGF-tekniikka on yksi materiaalin pursotuksen alalajeista. Opinnäytetyön keskiosassa esitellään työssä käytetty 3D-tulostin ja Granu Tool -työkalu. Tämän lisäksi tutustutaan PLA:han materiaalina.

Lopussa käydään läpi tulostimella suoritettut testit ja niiden tulokset. Osio pitää sisällään myös kehitysehdotuksia, miten kannattaisi jatkaa Granu Tool -työkaluun tutustumista ja käyttäjäkokemuksia laitteesta.

## 2 AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Lisäävä valmistus tarkoittaa prosessia, jossa rakennetaan kappaletta kerros kerrokselta tietokoneella tehdyistä kolmiulotteisista mallista suoraan lopputuotteeksi. Lisäävä valmistus pitää sisällään suuren joukon erilaisia valmistustekniikoita. Teknologia mahdollistaa erilaisten kappaleiden valmistuksen nopeasti ilman monimutkaista suunnittelua. (2)

Lisäävän valmistuksen prosessi voidaan yleisesti jakaa kahdeksaan eri vaiheeseen: mallintaminen CAD-ohjelmalla, tiedoston muuttaminen STL-tiedostoksi, STL-tiedoston siirto tulostimelle, tulostimen parametrien asettaminen, tulostaminen, kappaleen irrottaminen, jälkikäsittely ja kappaleen soveltaminen käyttötarkoitukseensa. CAD-ohjelmalla tehdään kolmiulotteinen malli halutusta kappaleesta. Tämän mallin tiedosto muutetaan STL-tiedostomuotoon. STL on yleisimmin käytetty tiedostomuoto lisäävässä valmistuksessa. Kun tiedosto on siirretty tulostimelle, voidaan kappaleen kokoa, sijaintia ja suuntaa vielä muokata. Tulostimelle täytyy asettaa parametrit, joiden mukaan se alkaa tulostamaan mallia. Tärkeimpiä parametreja ovat kappaleen täyttöaste, runkojen lukumäärä, tason korkeus, lämpötila ja tulostusnopeus. Itse tulostus on automaattinen prosessi. Tämän jälkeen kappale poistetaan tulostimesta. Jälkikäsittelyssä kappaleesta voidaan poistaa tukirakenteita, puhdistaa tai vahvistaa kappaleen rakenteita. Jälkikäsittely on usein manuaalista työtä, joka vaatii aikaa ja huolellisuutta. Ennen kuin kappale voidaan ottaa käyttöön se voi vaatia vielä maalaamista ja pohjustusta, jotta saavutetaan vaadittu pintamateriaali kappaleelle. (3)

Lisäävässä valmistuksessa on paljon potentiaalia ja se pitää sisällään paljon vahvuuksia. Kappaleita voidaan lähettää digitaalisesti, kunhan vastaanottajalla on tarvittavat välineet kappaleen tulostamiseen. Tämä mahdollistaa nopean toimituksen ja vähentää riippuvuutta logistiikasta. Kappaleita voidaan tulostaa nopeasti ja erilaisia muotoja voidaan tulostaa ilman monimutkaista valmistusprosessin suunnittelua. Tämä mahdollistaa, että kappaleista voidaan tehdä yksilöllisiä käyttötarkoituksen mukaan. Lisäävässä valmistuksessa materiaalitehokkuus on todella tehokasta. Käytetty materiaali vastaa kappaleeseen vaadittua materiaalmäärää, minkä takia hukkamateriaalia ei tule. Jos kappale tarvitsee tukirakenteita, ylimääräinen materiaali on usein kierrätettävissä tai mahdollista käyttää uudelleen. (4)

Lisäävää valmistusta voidaan tehdä monella eri tekniikalla. Käytetty tekniikka valitaan sen mukaan, mikä on käyttökohde, tulostettava materiaali ja tulostettavan kappaleen

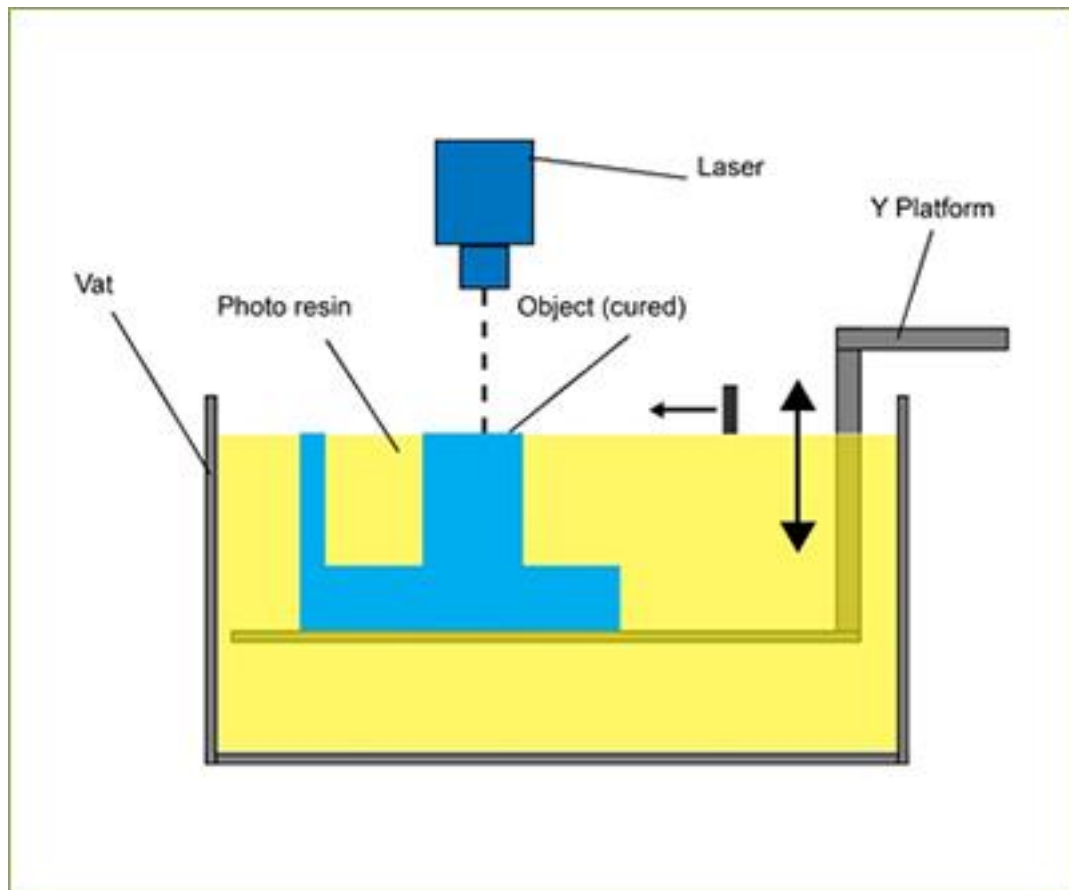
koon mukaan. Erilaiset tekniikat ovat nesteen polymerisointi, materiaalin suihkutetus, si-deaineen suihkutetus, materiaalin pursotus, jauhepetisulatus, kerroslaminointi ja suorakerrostus.

## 2.1 Nesteen polymerisointi

Nesteen polymerisoinnissa kiinteytetään altaassa nestemäistä valopolymeeriä. Kiinteytys tapahtuu UV-valon avulla. Muodostettava kappale muotoillaan kerros kerrokselta ja aina, kun yksi kerros on saatu tehtyä, pudotetaan petiä niin, että edellinen kerros menee nestemäisen rajapinnan alle. Kun kappale on valmis, nostetaan peti ylös ja annetaan ylimääräisen nesteen valua pois. Tämän jälkeen kappale vaatii loppukäsittelyn. Aluksi ylimääräiset nesteet ja tukirakenteet poistetaan. Kappale pestään käyttämällä isopropaanolia, jonka jälkeen se pestään siitä vettä ja ilmaa hyväksi käyttäen. Lopuksi kappale kuivatetaan. UV-valoa voidaan käyttää uunina lopuksi, jos halutaan varmistaa tulosteen korkea laatu. (5)

Nesteen polymerisoinnin suurin vahvuus on sen tarkkuus. Se on tarkin kaikista lisäävän valmistuksen valmistusmenetelmistä. Se on myös suhteellisen nopea ja sillä voidaan tehdä isoja kappaleita. Se ei kuitenkaan ole suosituin valmistusmenetelmä, sillä se on kallis, jälkikäsittely on aikaa vievää ja se vaatii yleensä tukirakenteita rakentamisvaiheessa. (5)





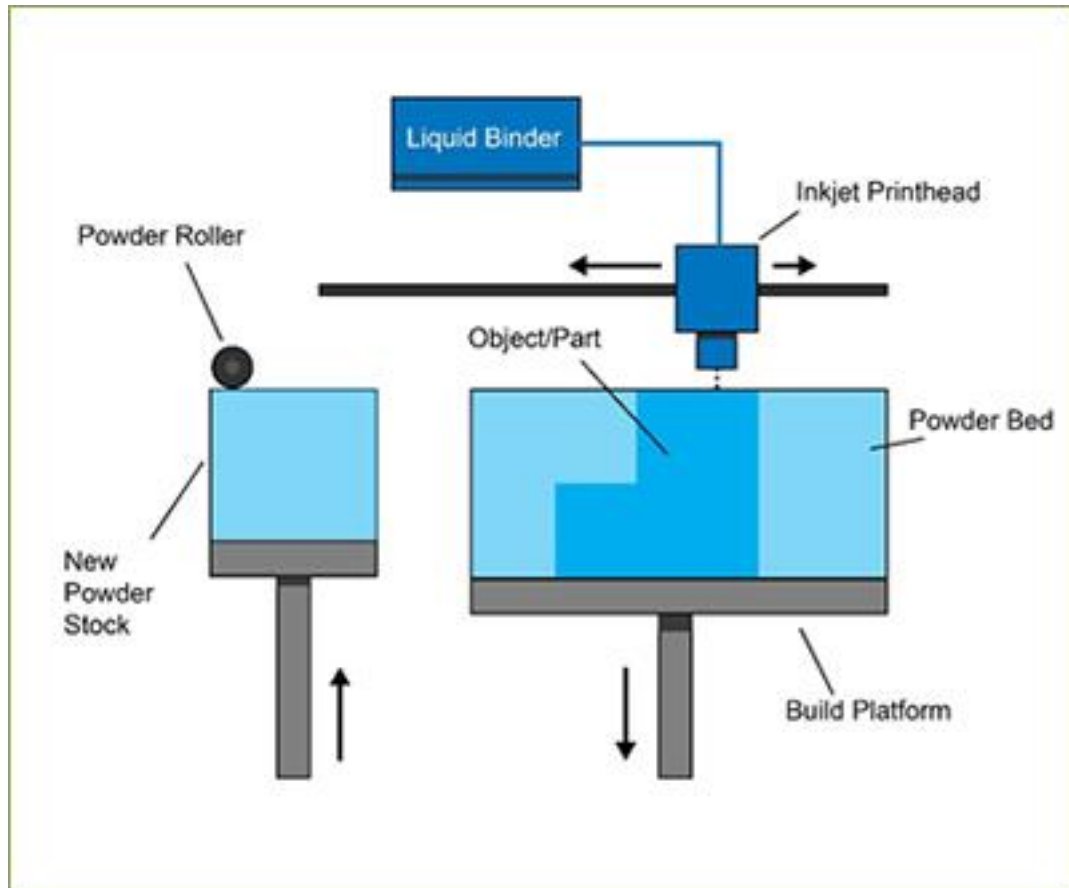
Kuva 1 Nesteen polymerisointi toimintaperiaate (5)

## 2.2 Materiaalin suihkutetus

Materiaalin suihkutuksessa suihkutetaan pisaroitunutta tulostusmateriaalia pedille, joka laskee alaspäin aina, kun on saanut edellisen kerroksen tehtyä. Materiaali kovetetaan ruiskuttamisen jälkeen UV-valolla. (6)

Materiaalin suihkutuksen vahvuus on pisaroiden tarkkuus, joka vähentää syntyvää jätettä. Lisäksi voidaan käyttää yhden kappaleen tekemiseen montaa eri materiaalia tai värejä. Materiaalin suihkutuksessa tarvitaan usein tukirakenteita ja materiaalit ovat hyvin rajattuja, jotka rajoittavat sen käyttöä. Materiaaleina voidaan käyttää ainoastaan vahvaisia materiaaleja tai muoveja. (7)





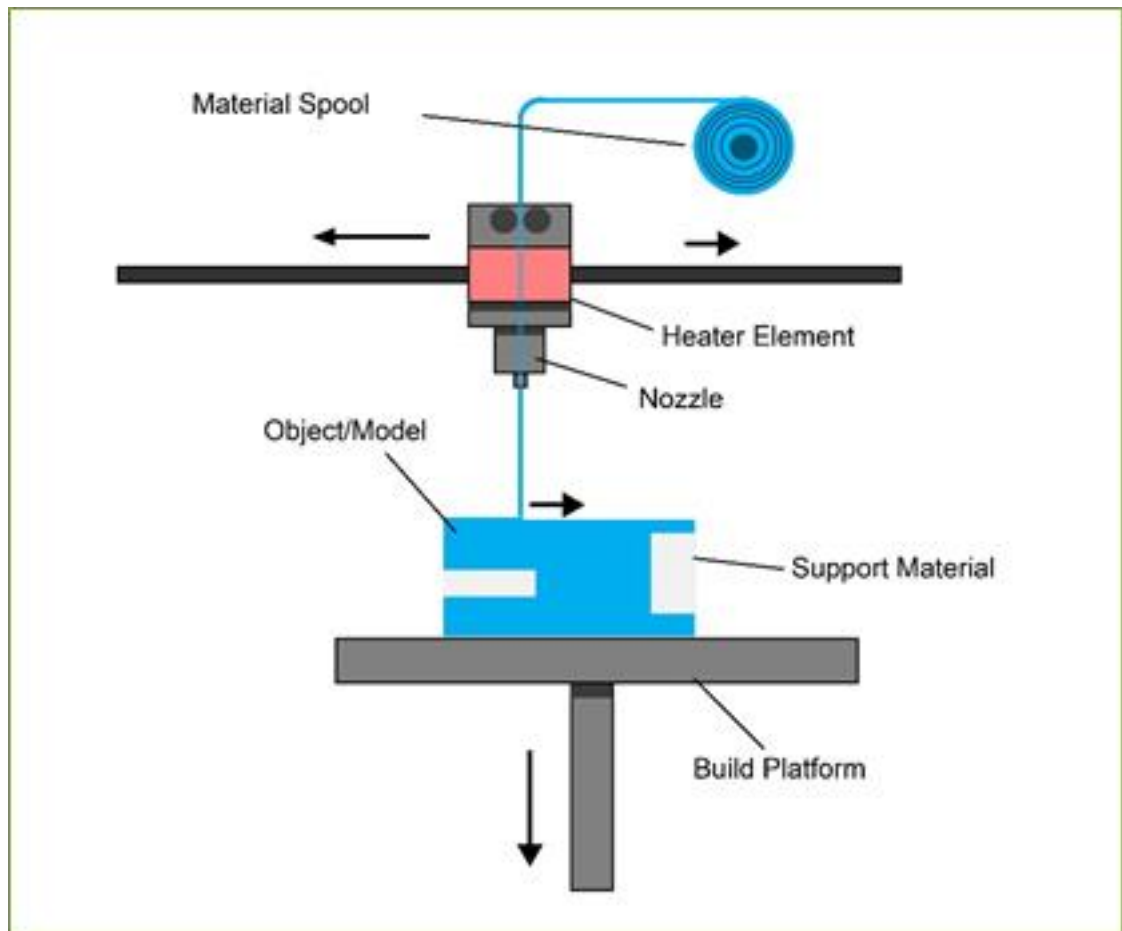
Kuva 3 Sideaineen suihkutuksen toimintaperiaate (8)

#### 2.4 Materiaalin pursotus

Materiaalin pursotus on tällä hetkellä suosituin markkinoilla oleva tekniikka. Materiaalin pursotuksessa materiaali johdetaan säiliöstä tulostimen kärkeen mekaanisen voiman avulla. Materiaalin täytyy olla olomuodoltaan puolikiinteää, kun se tulee ulos tulostimen kärjestä. Materiaalin olomuotoa voidaan säätää joko lämpötilan avulla tai kemiallisen muutoksen avulla. Pursotuksessa kerroksia tehdään yksi kerrallaan ja kun yksi kerros on tehty valmiiksi, täytyy laitteen liikkua ylöspäin tai täytyy petiä laskea alaspäin. (9)

Suosituin materiaalin pursotuksen alainen teknologia on Fused Deposition Modelling eli FDM. Tämän tekniikan kehitti yhdysvaltalainen Stratys-niminen yritys. Sille myönnettiin patentti vuonna 1992 teknologian kehittämistä. FDM:ssä nesteytetään polymeeri lämmön avulla. Syötettävä polymeeri on rakenteeltaan säiemäistä. FDM:än suurimmat vahvuudet ovat eri materiaalien laaja variaatio ja hyvät mekaaniset ominaisuudet. Teknologialla valmistetut polymeeripohjaiset kappaleet ovat vahvimpia rakenteeltaan kuin

millään muulla tekniikalla valmistetut kappaleet. Sen huono puoli on tulostuksen hitaus verrattuna muihin vastaaviin tekniikoihin. (10)



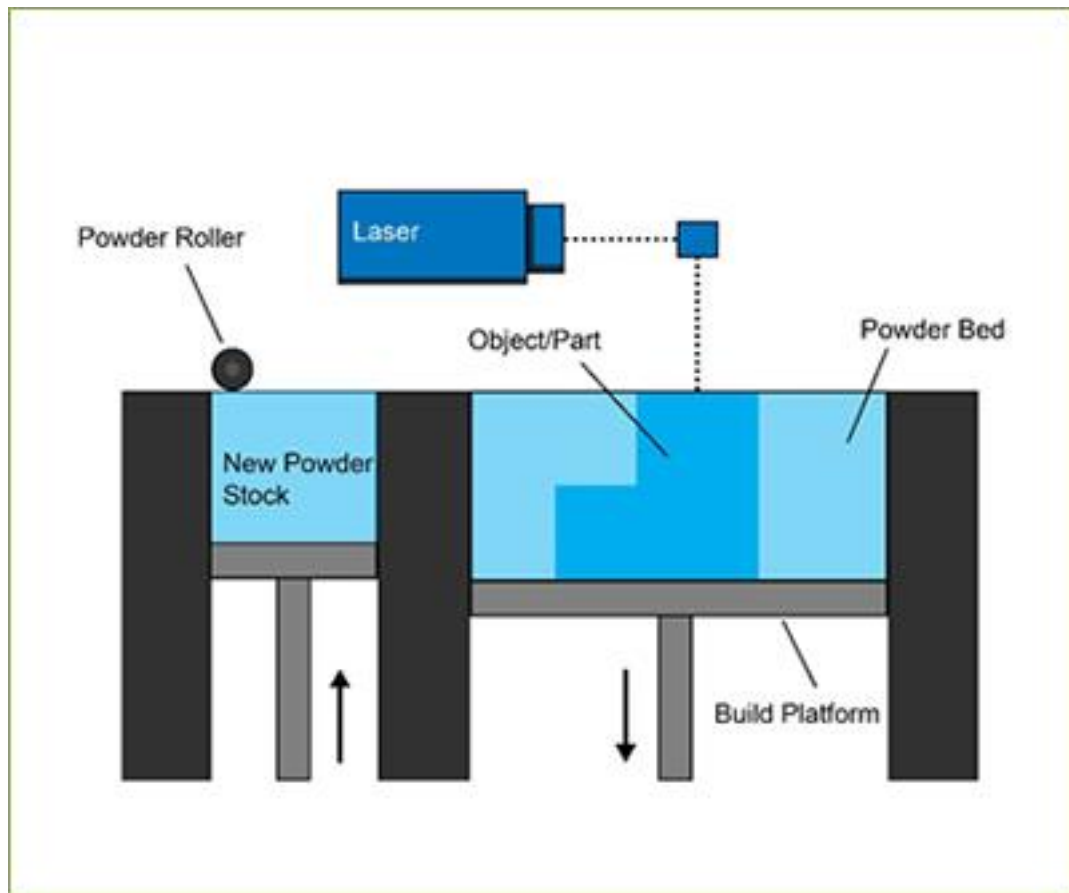
Kuva 4 Materiaalin pursotus toimintaperiaate (11)

## 2.5 Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatuksessa pedille laitetaan jauhetta, joka on tyypillisesti muovi- tai metallipohjaista. Tämän jälkeen laser sulattaa kappaleen kerroksen poikkileikkauksen mukaan. Petiä lasketaan alaspäin kappaleen kerroksen paksuuden verran ja sen päälle levitetään jauhekerros. Jauhepetisulatuksessa kappale tulostetaan kerros kerrokselta ja tätä järjestystä jatketaan, kunnes kappale on valmis. (6)

Jauhepetisulatuksen hyvät puolet ovat, että se on halpa, mahdollista käyttää visuaalisissa malleissa ja prototyypeissä, ei tarvita tukirakenteita, jos ei käytetä metallipohjaista jauhetta ja voidaan käyttää todella isoa variaatiota eri materiaaleja. Menetelmä on

suhteellisen hidas, rajallinen koko kappaleelle ja se käyttää paljon energiaa, joten se on haasteellinen käyttää joidenkin kappaleiden tulostamiseen. (12)



Kuva 5 Jauhepetisulatus toimintaperiaate (12)

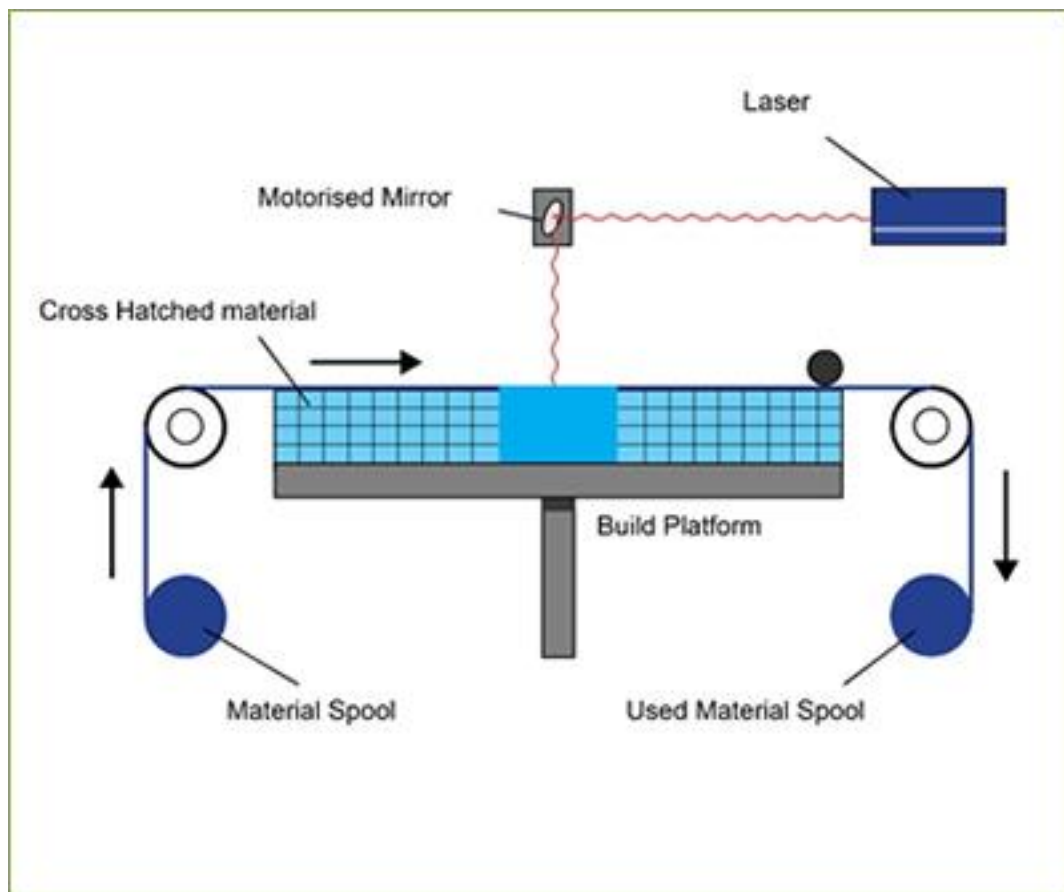
## 2.6 Kerroslaminointi

Tekniikoista kerroslaminointi oli yksi ensimmäisistä lisäävän valmistuksen menetelmistä, joka kaupallistettiin. Kerroslaminointi sisältää kaksi erilaista prosessia: bond-then-form ja form-then-bond. Kerrokset ladotaan päällekkäin ja muotoillaan sen jälkeen tai ne muotoillaan ensin ja pinotaan sen jälkeen riippuen käytetystä laminointitekniikasta. Materiaaleina voidaan teoriassa käyttää mitä vain arkkimaista materiaalia, joka voidaan pilkkoa laserilla tai mekaanisesti. Alun perin materiaalina käytettiin paperia. (13)

Bond-then-form -prosessissa asetetaan aluksi laminaatti paikalleen. Tämän jälkeen kerros liitetään toiseen kerrokseen, jonka jälkeen se pilkotaan haluttuun muotoon. Tätä kiertoa jatketaan, kunnes kappale on valmis. Ylimääräinen materiaali jätetään kappaleeseen

kannattelemaan tulostuksen loppuun asti. Lopuksi ylimääräinen materiaali poistetaan käyttämällä puun veistotyökaluja. (14)

Form-then-bond -prosessissa järjestys on päinvastainen verrattuna bond-the-form -prosessiin, sillä siinä kerrokset muotoillaan ja sen jälkeen vasta yhdistetään. Tätä prosessia on tyypillisesti käytetty metalleissa ja keraamisissa materiaaleissa, jotka on termisesti sidottu. Tämän prosessin hyvä puoli verrattuna bond-then-form -prosessiin on, ettei ole vaaraa vaurioittaa muita kerroksia, kun kerrosta leikataan muotoonsa. (15)



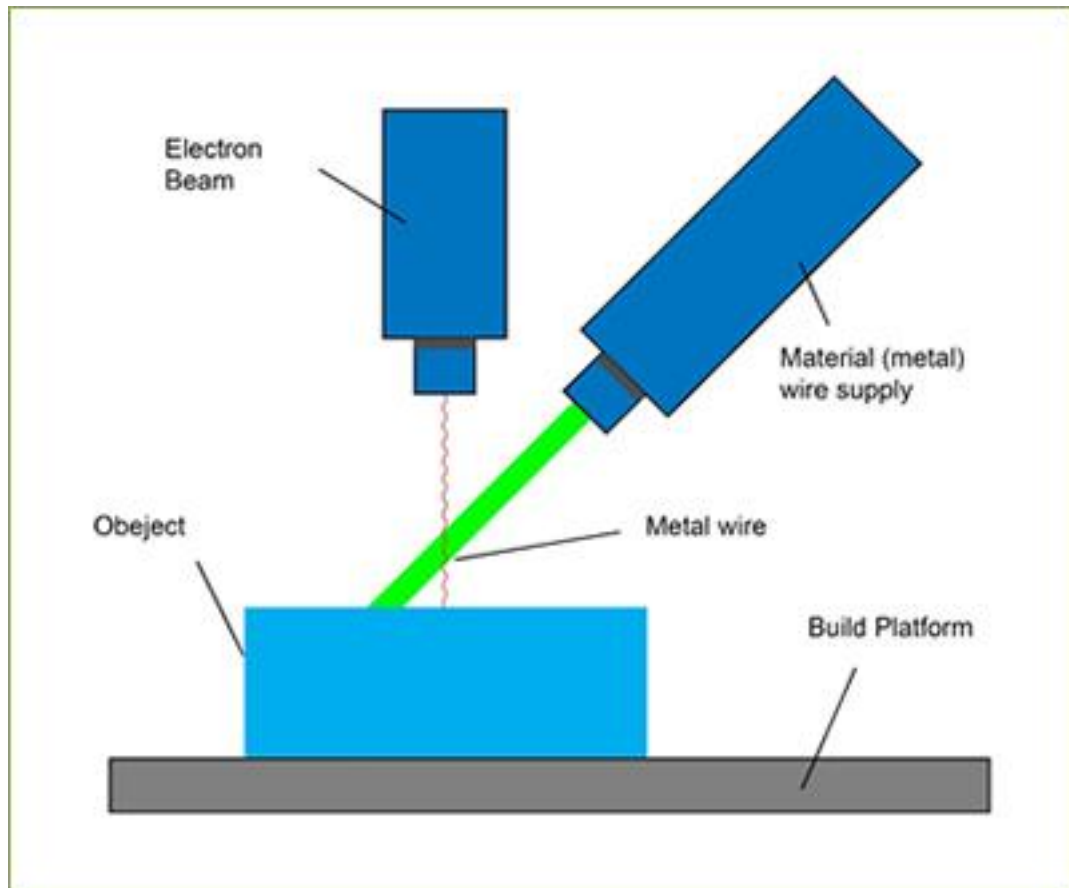
Kuva 6 Kerroslaminointi toimintaperiaate (16)

## 2.7 Suorakerrostus

Suorakerrostuksessa materiaalia johdetaan tulostimen kärkeen samalla, kun sitä sulatetaan laserilla tai elektronisella säteellä. Suorakerrostuksessa voidaan käyttää teoriassa materiaaleina polymeerejä, keramiikkaa ja metallimatriisikomposiitteja, mutta pääasiassa siinä käytetään materiaalina metallipohjaisia jauheita. Suorakerrostusta voidaan käyttää samoihin käyttötarkoituksiin kuin laserpinnoitusta tai plasmahitsausta, mutta

pääasiassa sitä käytetään monimutkaisempien asioiden tekoon suoraan CAD-tiedostoista. (17)

Menetelmän tärkein etu on, että sillä voidaan tulostaa muotoja jo valmiiseen kappaleeseen. Sen hyviin puoliin kuuluu myös, että siinä voidaan materiaali kesken kaiken ja prosessin tuotto on suurempi kuin muilla metallien 3D-tulostusmenetelmillä. (6)

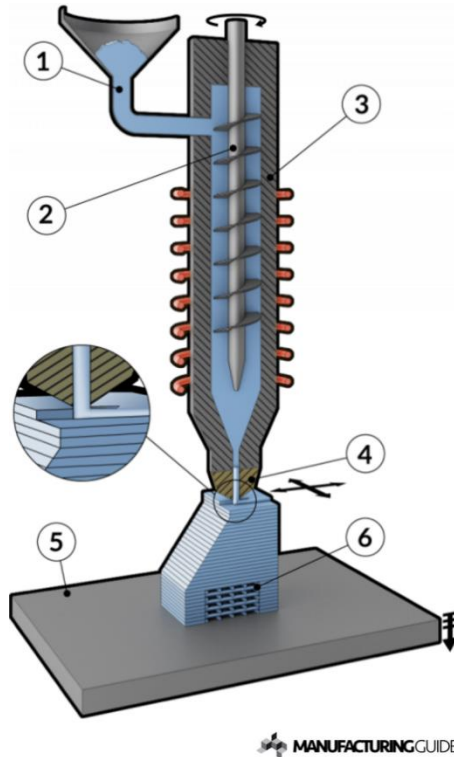


Kuva 7 Suorakerrostus toimintaperiaate (18)

### 3 FGF-TEKNIikka JA SEN SOVELLUKSET

Fused Granular Fabrication (FGF) on materiaalin pursotuksen alalaji. Sen avulla on mahdollista syöttää materiaalia ilman, että sitä muutetaan ensiksi säiemäiseksi filamentiksi. FGF:ssä raaka-ainetta syötetään pelletteinä tulostimelle. Koska pellettiä ei tarvitse muuttaa filamentiksi säästetään raaka-aineen kustannuksissa. (19)

FGF-tekniikalla toimivassa tulostimessa pelletti syötetään syöttöruuviin, joka lämmittää pelletit ja työntää ne eteenpäin. Lämmityksen ansiosta pelletit muuttuvat homogeeniseksi massaksi, joka syötetään tulostuspäähän. Massan virtausta kontrolloidaan tulostuspään muodon ja koon avulla. Isompi tulostuspää kasvattaa tulostuksen nopeutta, mutta huonontaa tulostuksen laatua, kun taas pienemmän pään vaikutus on päinvastainen. Massan annetaan virrata tulostuspäästä tasaisella nopeudella ja haluttu kappale rakentuu kerros kerrokselta. Jokaisen kerroksen jälkeen rakennusalustaa lasketaan tai tulostuspäätä nostetaan, jonka jälkeen tehdään uusi kerros. FGF tulostuksessa voidaan käyttää hyväksi tukirakenteita, jotta saadaan rakennettua monimutkaisempia kappaleita. (19)



Kuva 8 FGF-tulostimen toimintaperiaate. 1. Syöttösuppilo 2. Syöttöruuvi 3. Lämpövastus 4. Tulostuskärki 5. Tulostuspeti 6. Tulostettavaan kappaleen tukirakenne (19)



### 3.1 Kaupalliset sovellukset

Markkinoilla on tarjolla monenlaisia FGF-tekniikkaan perustuvia tulostimia. Kaupallisessa mittakaavassa olevat FGF-tekniikalla toimivat tulostimet ovat usein keskittyneet isojen kappaleiden tulostamiseen. Tässä kappaleessa tutustutaan ruotsalaisen BLB Industries:in, belgialaisen Colossuksen ja alankomaalaisen Composite Additive Manufacturing (CEAD) tulostimiin.

#### 3.1.1 BLB Industries

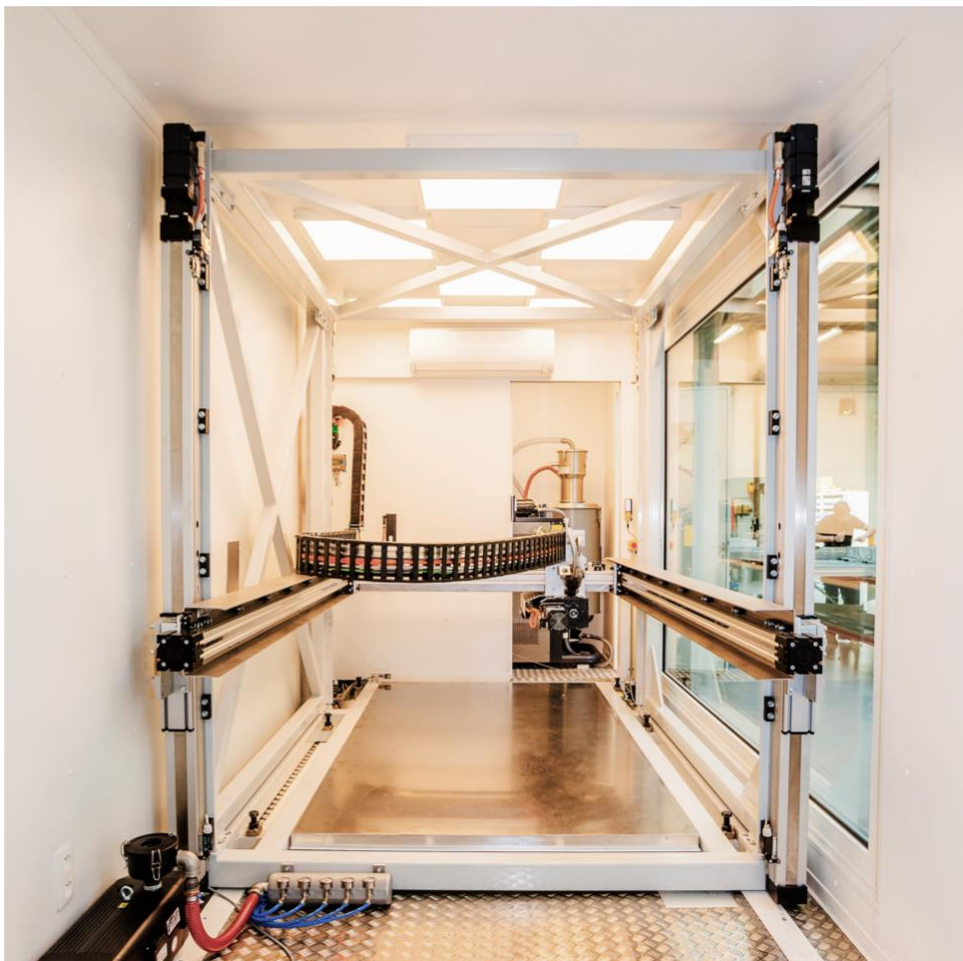
BLB Industries tarjoaa teollisen mittakaavan tulostimia, joita myydään pakettina tai räätälöidään tarvittaessa vastaamaan asiakkaan tarpeita. Pakettina myytäviä tulostimia kutsutaan The Box -tulostimiksi ja ne valmistetaan yrityksen kotimaassa Ruotsissa. The Box -tulostimet (kuva 9) kykenevät tulostamaan 1500x1000x1000 millimetristä aina 2000x2000x1500 millimetriin asti. Tulostusnopeudet vaihtelevat 250 g/h ja 30 kg/h välillä riippuen käytetystä materiaalista, suuttimesta ja tulostuspäystä. (20)



Kuva 9 The Box-tulostin (20)

### 3.1.2 Colossus

Colossus (kuva 10) valmistaa tulostinta, joka on keskittynyt huonekaluihin, rakennustyömaan sovelluksiin ja isoihin 3D-kappaleisiin. Colossuksen tulostimella on mahdollista myös käyttää kierrätettyjä materiaaleja, koska tulostin perustuu FGF-tekniikkaan. Tulostimia on helppo kustomoida vastaamaan asiakkaan tarpeita ja tästä hyvä esimerkki onkin, että tulostimista voidaan tehdä liikuteltavia tai paikallaan olevia kiinteitä yksiköitä. Tulostimesta on nyt tehty toisen sukupolven malli ja kolmas on tulossa markkinoille pian. (21)



Kuva 10 Colossus-tulostin (21)

### 3.1.3 Composite Additive Manufacturing

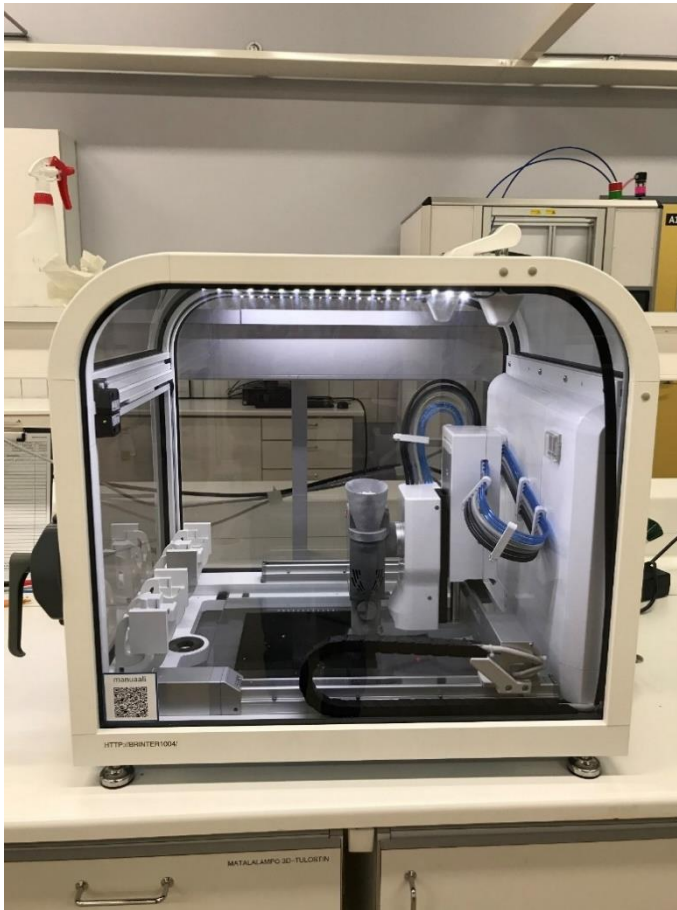
CEAD tarjoaa kokonaisratkaisuja, jotka pitävät sisällään tulostuspään, robotin, tulostusalustan ja näihin sopivan automaatiojärjestelmän. Asiakas voi halutessaan ostaa koko paketin tai sitten vain pelkästään tulostuspään. Yrityksen tarjoamaa robottia kutsutaan AM Flexbotiksi (kuva11). Tulostuspää yhdistetään Comau NJ60-2.2 robottiin, jota ohjataan Siemensin Sinumerik -ohjausjärjestelmällä. Robotin tulostusalusta on kooltaan 1.2x1,8 m. Varsinainen tulostuspää on 29 kg painava yksikkö, joka voi myös toimia itsenäisesti. Tulostuspää pystyy tulostamaan maksimissaan 12 kg materiaalia tunnissa ja siihen pystyy varastoimaan 25 kg materiaalia. Erilaisia suuttimia tulostuspäähän on tarjolla koosta 2 millimetristä aina 12 millimetriin asti. (22)



Kuva 11 AM Flexbot-tulostin (22)

### 3.2 Brinter

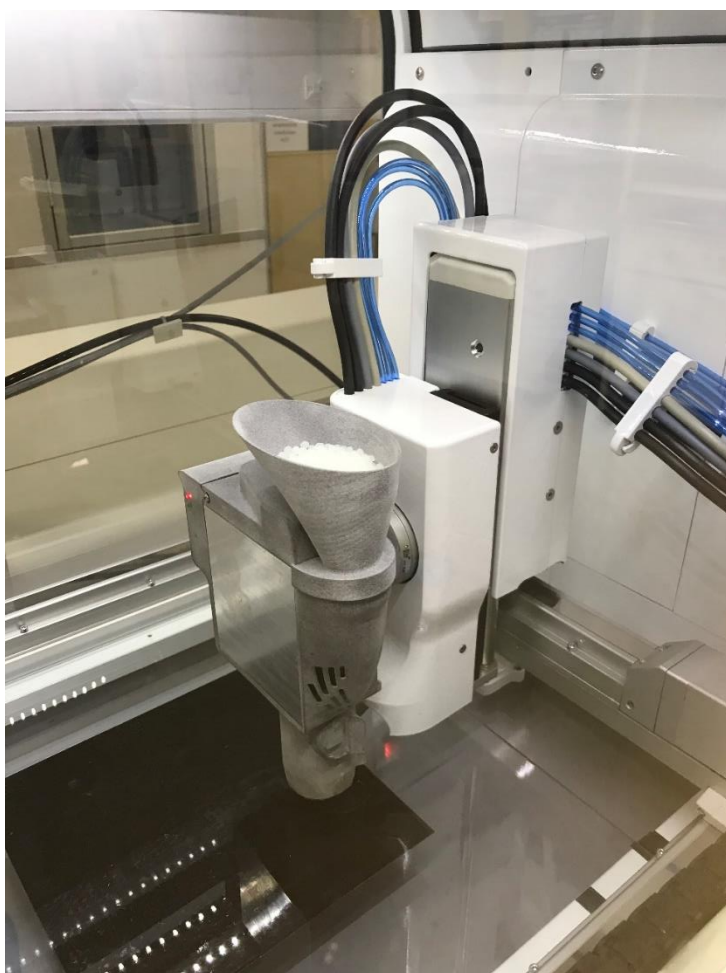
Brinter (kuva 12) on 3D-biotulostin, joka rakentaa CAD-mallista kerros kerrokselta mallin mukaisen kappaleen. Biotulostus tarkoittaa biomateriaalin tulostamista ja se voisi tulevaisuudessa mahdollistaa esimerkiksi ihmisten elinten tulostamisen. Biotulostus mahdollistaa myös sen, että lääketeollisuudessa ei välttämättä tarvitse käyttää koe-eläimiä vaan niiden sijaista voidaan käyttää tulostettuja eläviä rakenteita. Brinterillä voidaan tulostaa maksimissaan 300x300x100 mm kokoisia kappaleita. Tulostimella voidaan käyttää maksimissaan neljää erilaista työkalua, jotka laite tunnistaa itse, kun ne ovat työkalutelineessä. Tämä mahdollistaa eri materiaalien käytön samassa tulostuksessa. Tulostimelle on saatavilla monenlaisia työkaluja, joita käyttäjä voi ostaa tarpeensa mukaan. (23) (24)



Kuva 12 Brinter-tulostin

### 3.2.1 Granu Tool

Granu Tool (kuva 13) on Brinterin työkalu, jolla voi tulostaa pellettimaista kestopuovi-materiaalia tai sekoituksena sitovaa ainesta ja jauhemaista täyttöaineista. Materiaali sulatetaan työkalun sisällä lämmön avulla ja se syötetään ulos tulostuskärjestä pyörivän ruuvin avulla. Työkalu voidaan lämmittää aina 250 celsiusasteeseen saakka. Granutoolista on olemassa kaksi eri versiota Brintterille, Granu Tool Black ja Granu Tool White. Granu Tool White on tarkoitettu käytettäväksi muovien kanssa ja Granu Tool Black on tarkoitettu käytettäväksi metallijauheen ja sidontamateriaalin kanssa. Opinnäytetyössä käytettiin Granu Tool White -työkalua. (25)



Kuva 13 Granu Tool -työkalu

### 3.2.2 PLA

PLA eli polyaktidi on biohajoava kesto­muovi, jota voidaan valmistaa esimerkiksi maissi­tä­rkkelyksestä, sokeriruo’osta, tapiokan juurista tai perunan tä­rkkelyksestä eli PLA:ta tehdään uusiutuvista resursseista. PLA on tämän takia ympäristöystävällinen materiaali toisin kuin muut petrokemianteollisuuden tekemät muovit kuten ABS tai PVA. PLA:ta käytetään paljon esimerkiksi lää­keteollisuudessa, koska sillä on kyky luontaisesti hajota epäorgaaniseksi maitohapoksi kehossa. Kirurgisesti istutetut ruuvit, tapit ja muut kappaleet hajoavat normaalisti ihmiskehossa 6–24 kk aikana. PLA:ta käytetään myös lau­kuissa, elintarvikepakkauksissa, kertakäyttöastioissa ja hygieniatuotteissa. Rakenteel­taan PLA on kovaa, mutta hivenen haurasta, kunhan se on ensin viilentynyt tarpeeksi.

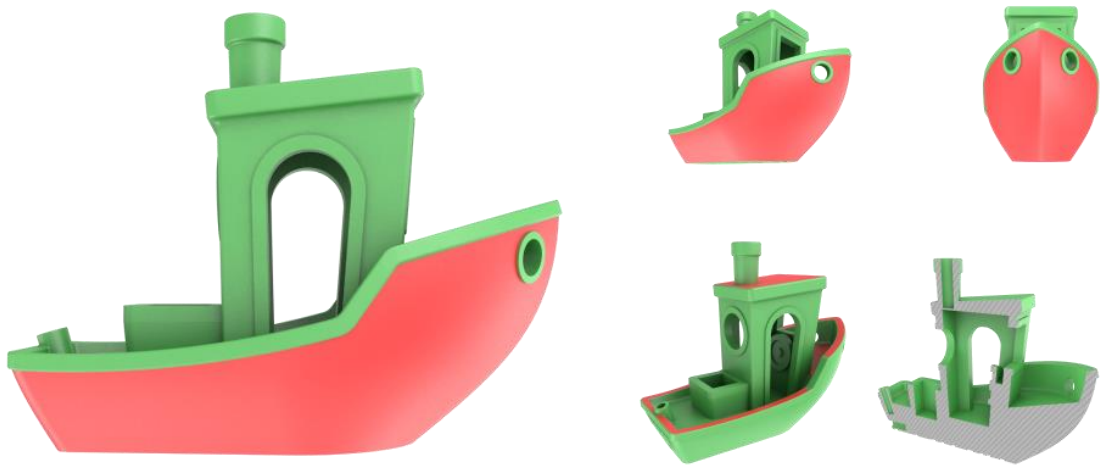
Normaalisti PLA:ta tulostetaan 160–220 celsiusasteessa, joka on matalampi kuin mo­nella muulla materiaalilla. Lämmitettävä tulostuspeti ei ole pakollinen, kun käytetään PLA:ta materiaalina tulostuksessa, mutta se usein parantaa tulostuksen laatua. PLA on hidas jäähtymään ja tämän takia jotkut asiantuntijat suosittelevatkin tuulettimen käyttöä jäähdytyksessä. Lämmitettynä PLA tuoksuu kuin sokerimassa tai vaahterasiirappi. Se ei kuitenkaan savua, kuten vaikka lämmitetty ABS. Tämän takia tulostaminen sisätiloissa on turvallista, jopa ilman erillistä ilmastointia. (26)

PLA:sta onkin 3D-tulostajien keskuudessa tullut yleiseksi materiaaliksi sen turvallisuu­den ja ympäristöystävällisyyden takia. Sen huono puoli on, ettei se kestä lämpöä paljon, sillä se alkaa pehmentyä jo 50 celsiusasteessa. Tämä rajoittaa esimerkiksi kuumailma­puhaltimen käyttöä loppuviimeistelyssä. Toisaalta tämä taas helpottaa kappaleen muo­toilua ja korjattavuutta. (26)

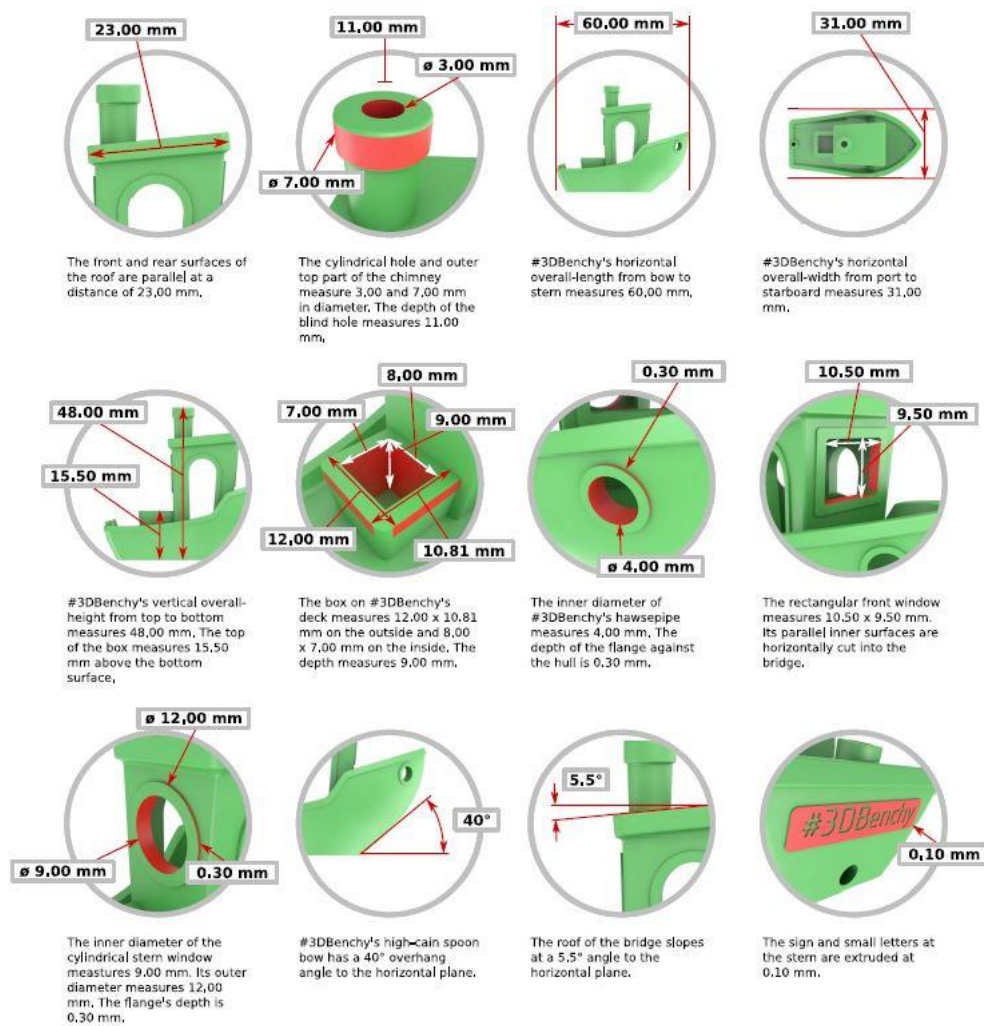
## 4 KOEAJOJEN 3D-MALLIT

Tulostimen testaamiseen käytettiin kahta testimallia, jotka on suunniteltu 3D-tulostimen ominaisuuksien testaamiseen. Ensimmäinen käytetty malli on 3DBenchy (kuva 14), jota pidetään kaikkein kuuluisimpana 3D-tulostamista varten suunniteltuna testikappaleena. Toinen malli on XYZ 20-mm Calibration Cube -kappale (kuva 16). Tulostamisessa käytettiin raaka-aineena PLA:ta. (27)

3DBenchy on laivalta näyttävä kappale, joka on suunniteltu testaamaan monipuolisesti 3D-tulostimien ominaisuuksia. Sen suunnittelussa on otettu huomioon asioita, jotka normaalisti tuottavat ongelmia monelle 3D-tulostimelle. Tällaisia kohtia ovat esimerkiksi pienet yksityiskohdat, tasaiset vaakasuorat pinnat, symmetrisyys, kaarevat pinnat, erilaiset reiät ja sylinterimäiset muodot. Kappaleen mittoja verrataan tulostetun kappaleen mittoihin (kuva 15). 3DBenchy:ä on ladattu melkein 4000 kertaa Thingiverse-sivulta. (28)



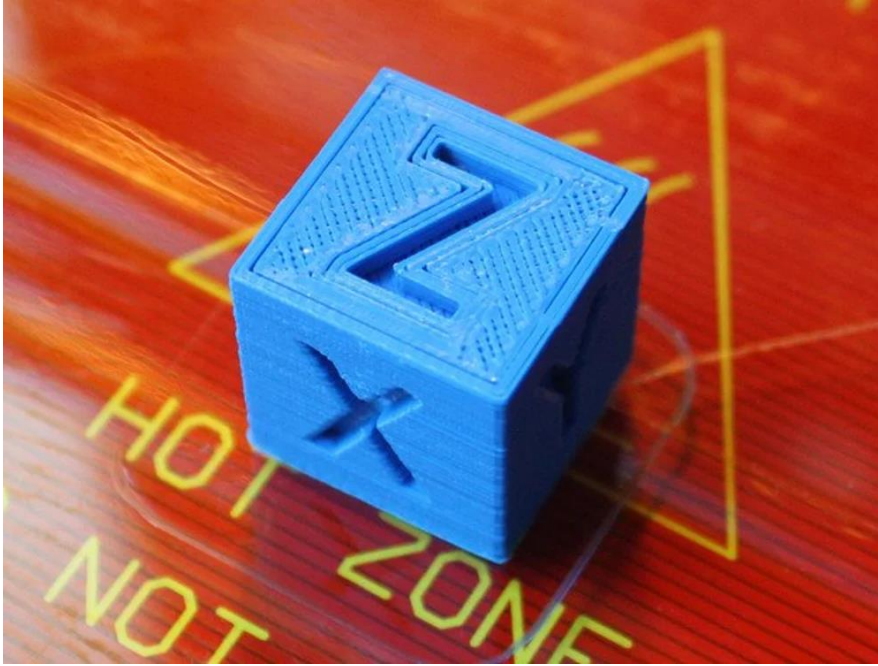
Kuva 14 3DBenchy (28)



Kuva 15 3DBenchy mitat (29)

XYZ 20-mm Calibration Cube on kuutiota muistuttava kappale, jonka reunoilla X, Y ja Z kirjaimet. Kappaleen reunat ovat 20 mm mittaisia. Kappaleen on tarkoitus olla yksinkertainen, nopea ja helppo tapa testata tulostinta. Sen pääasiallinen tarkoitus on testata tulostimen mittaustarkkuutta vertaamalla tulostetun kappaleen mittoja mallinnetun kappaleen mittoihin. Kappaleella voidaan testata myös tulostimelle muita optimaalisia asetuksia kuten mm. lämpötilaa ja tulostusnopeutta. Kappaletta on ladattu Thingiverse-sivulta yli 1000 kertaa. (27)





Kuva 16 XYZ 20-mm Calibration Cube (27)

## 5 KOEAJOT

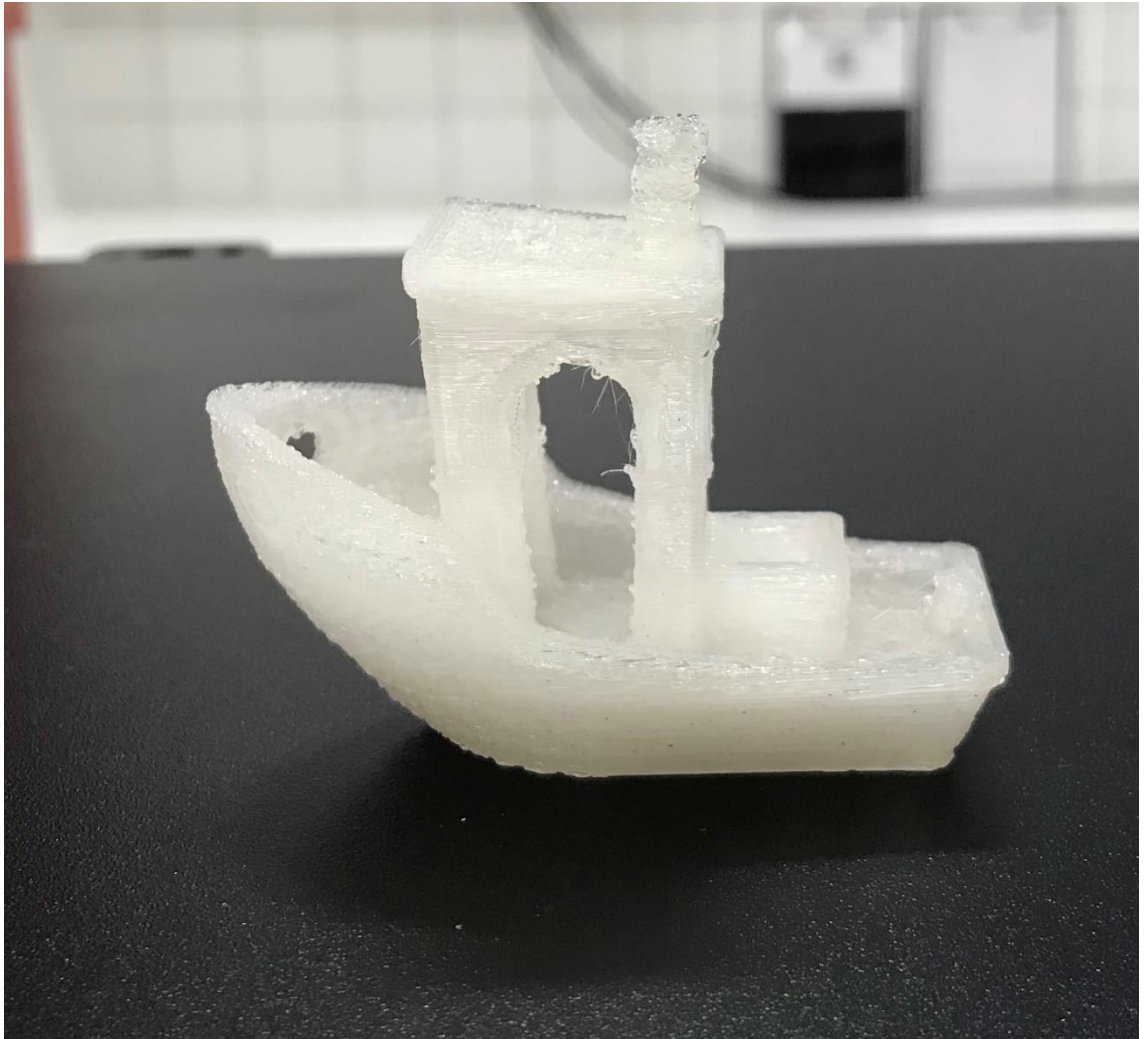
### 5.1 3DBenchy

Ensimmäiseksi laitettiin tulostumaan 3DBenchy -laiva. Laivalle löytyi tulostukseen suositellut parametrit kappaleen valmistajan sivuilta. (30)

Laiva tulostettiin seuraavilla parametreilla:

- Tulostuslämpötila 210 °C
- Täyttöaste 10 %
- Kerrospaksuus 0,2 mm
- Tulostusnopeus 40 mm/s
- Liikkumisen nopeus 100 mm/s
- Ei tukirakenteita
- 0,4 mm tulostuskärki

PLA:lle suositellaan käytettäväksi 180–220 °C lämpötilaa, joten käytetty parametri on viitearvon sisällä. (31)



Kuva 17 3DBenchy koeajo 1

3DBenchyn tulostus kesti noin kaksi tuntia ja tulostuksen laatu oli kohtalainen. Mitoiltaan laiva vastasi 3D-mallin mittoja hyvin, paitsi korkeuden osalta. Laivan pohjassa ja takana oleva nimikyltissä olevat tekstit olivat hankalasti erotettavissa. Suurin osa pienistä yksityiskohdista onnistui hyvin, kuten laivan takaosassa oleva onkivavan teline ja pieni reikä laivan perässä. Tulosteen savupiippu oli rakenteeltaan epätasainen ja tulostusmateriaali oli levinnyt, jonka takia piippu ei vastaa 3D-mallin korkeutta. Savupiipun epätasaisuus ja materiaalin leviäminen voi johtua liian korkeasta lämpötilasta. 3DBenchy oli symmetrinen molemmilta puolilta. Kaarevat pinnat ja eri kulmissa tulostetut yksityiskohdat onnistuivat hyvin. Tyhjän päälle tulostaminen onnistui suhteellisen hyvin. Hytin sisäänkäynneissä ja hytin edessä olevassa neliönmuotoisessa ikkunassa on havaittavissa yläkulmissa pientä materiaalin roikkumista. Hytin takana oleva ympyränmuotoinen ikkuna oli laadultaan

hyvä ja sen yläreunassa ei ollut havaittavissa materiaalin roikkumista kuten muissa hytin aukoissa.

3D-mallin ja tulostetun kappaleen mittojen vertailu:

Mittauspaikka	3D-malli (mm)	Tulostettu kappale (mm)
Hytin katto	23	23
Laivan pituus	60	60
Laivan leveys	31	31
Laivan korkeus pohjasta korkeimpaan kohta- taan	48	46
Neliönmuotoisen ikkunan korkeus	9,5	10
Neliönmuotoisen ikkunan leveys	10,5	10

3DBenchy tulostettiin kolme kertaa ja toisella kerralla lämpötilaa oli laskettu, jotta nähtäisiin, vaikuttaako lämpötilan tiputus tulosteen laatuun.

3DBenchy tulostettiin toisella koeajolla seuraavilla parametreilla:

- Tulostuslämpötila 190 °C
- Täyttöaste 10 %
- Kerrospaksuus 0,2 mm
- Tulostusnopeus 40 mm/s
- Liikkumisen nopeus 100 mm/s
- Ei tukirakenteita
- 0,4 mm tulostuskärki



Kuva 18 3DBenchy koeajo 2

3DBenchyn tulostus kesti toisella tulostuskerralla noin kaksi tuntia ja laadultaan tulostus oli hieman parempi kuin ensimmäisen koeajon tuloste. Mitoiltaan laiva vastasi 3D-mallin mittoja, lukuun ottamatta korkeutta. Laivan pohjassa teksti oli selkeästi erotettavissa, mutta laivan takana olevan nimikyltin teksti oli hankalasti erotettavissa. Laivan pienet yksityiskohdat onnistuivat yhtä hyvin kuin ensimmäisellä tulostuskerralla. Vaikka tuloslämpötilaa laskettiin ei piipun laatu parantunut, vaan tulostusmateriaali levisi samalla tavalla kuin ensimmäisellä kerralla. Tuloste oli symmetrinen ja kaarevat pinnat tulostuivat hyvin. Hytin sisäänkäyntien päällä ja neliönmuotoisessa ikkunassa oli vähemmän materiaalin roikkumista kuin ensimmäisellä tulostuskerralla. Ympyränmuotoisessa hytin ikkunassa ei ollut havaittavissa materiaalin roikkumista.

3D-mallin ja tulostetun kappaleen mittojen vertailu:

Mittauspaikka	3D-malli (mm)	Tulostettu kappale (mm)
Hytin katto	23	23
Laivan pituus	60	61
Laivan leveys	31	31
Laivan korkeus pohjasta korkeimpaan kohtaan	48	44
Neliönmuotoisen ikkunan korkeus	9,5	10
Neliönmuotoisen ikkunan leveys	10,5	11

Kolmannella tulostuskerralla kerrospaksuutta laskettiin ja tulostusnopeutta kasvatettiin. Kerrospaksuuden laskemisella koitettiin saada parempaa laatua. Kerrospaksuuden alentamisen takia päätettiin nostaa tulostusnopeutta, jotta tulostamiseen vaadittu aika säilyisi suurin piirtein samana kun aikaisemmillä tulostuskerroilla.

3DBenchy tulostettiin kolmannella koeajolla seuraavilla parametreilla:

- Tulostuslämpötila 190 °C
- Täyttöaste 10 %
- Kerrospaksuus 0,15 mm
- Tulostusnopeus 50 mm/s
- Liikkumisen nopeus 150 mm/s
- Ei tukirakenteita
- 0,4 mm tulostuskärki



Kuva 19 3DBenchy koeajo 3

3DBenchyn tulostus kesti kolmannella tulostuskerralla 2 h 10 min ja oli laadultaan parempi kuin kaksi edellistä tulostetta. Mitoiltaan laiva vastasi 3D-mallin mittoja. Laivan piippu saatiin tulostettua kolmannella tulostuskerralla ilman materiaalin leviämistä. Vaikka kerrospaksuutta laskettiin ei saatu selvästi näkymään laivan nimikyltissä olevaa tekstiä. Materiaalin roikkumista oli havaittavissa saman verran kuin toisella tulostuskerralla.

Mittauspaikka	3D-malli (mm)	Tulostettu kappale (mm)
Hytin katto	23	23
Laivan pituus	60	61
Laivan leveys	31	31
Laivan korkeus pohjasta korkeimpaan kohtaan	48	49
Neliönmuotoisen ikkunan korkeus	9,5	10
Neliönmuotoisen ikkunan leveys	10,5	10

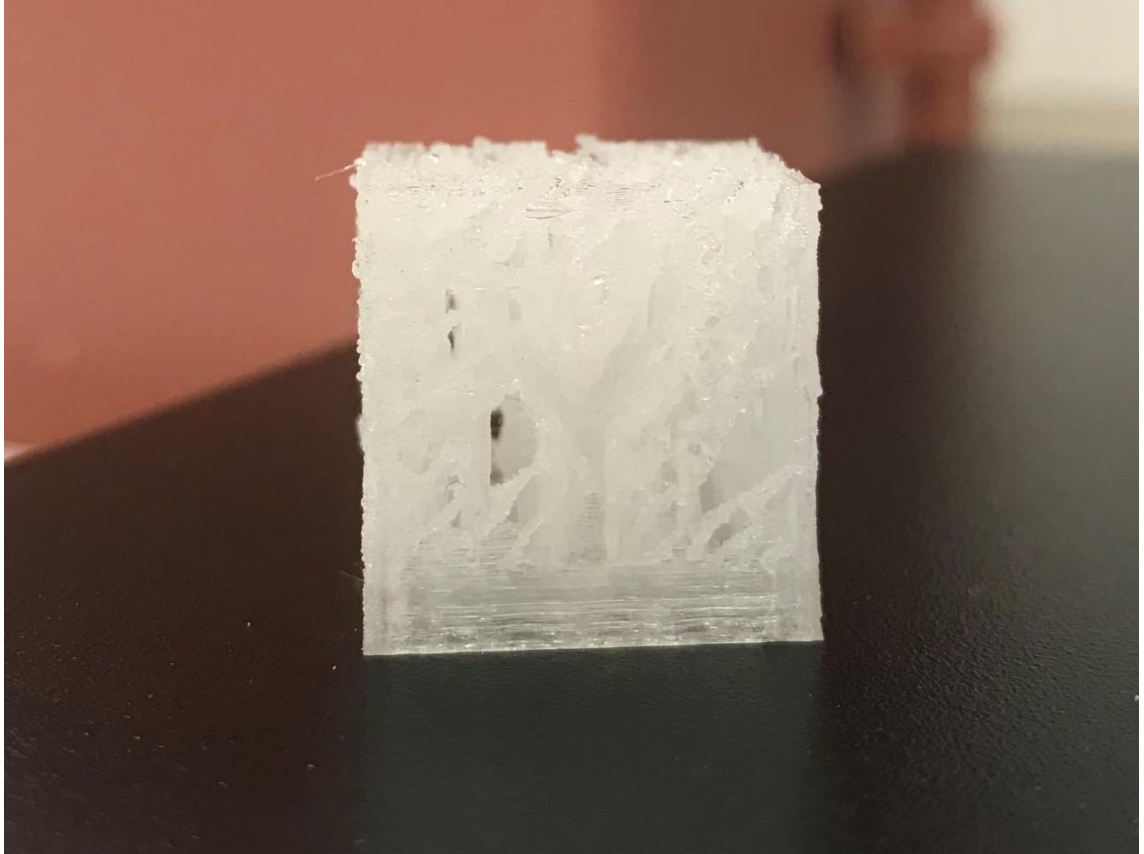
## 5.2 XYZ 20-mm Calibration Cube

Toisena tulosteena laitettiin tulostumaan XYZ 20-mm Calibration Cube. Käytetyistä parametreista täyttöaste ja kerrospaksuus on poimittu Thingiverse-sivulta. Näitä parametreja suositellaan käytettäväksi kyseisen kappaleen kanssa. (32)

XYZ 20-mm Calibration Cube tulostettiin seuraavilla parametreilla:

- Tulostuslämpötila 200 °C
- Täyttöaste 30 %
- Kerrospaksuus 0,1 mm
- Tulostusnopeus 40 mm/s
- Liikkumisen nopeus 100 mm/s
- Ei tukirakenteita
- 0,4 mm tulostuskärki





Kuva 20 XYZ 20-mm Calibration Cube koeajo 1

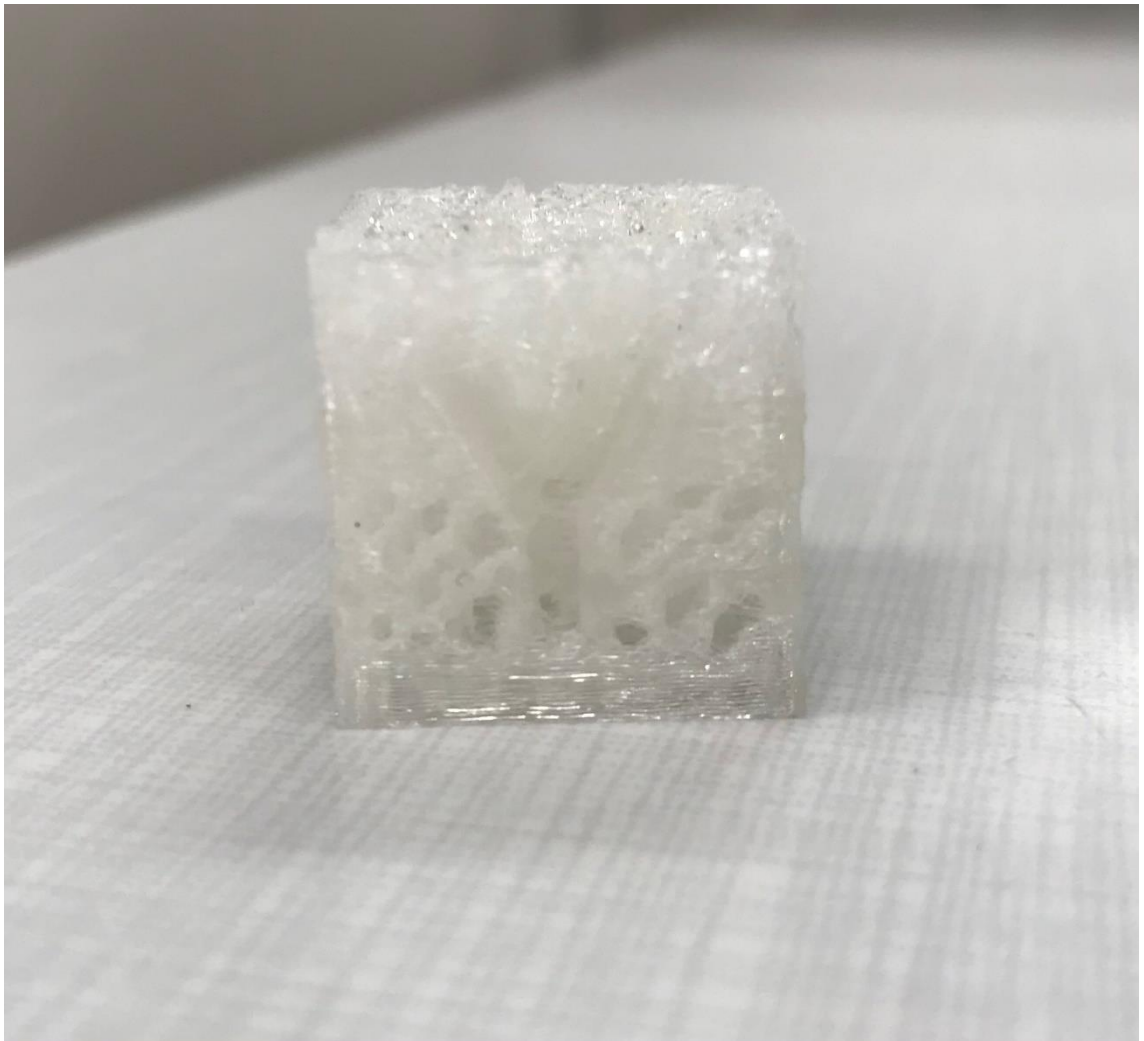
XYZ 20-mm Calibration Cube tulostaminen vei aikaa noin tunnin ja tulostuksen laatu oli kohtalainen. Mitoiltaan kuutio vastasi 3D-mallin mittoja, joka kertoo tulostimen mittaus-tarkkuuden olevan hyvä. Kuutiossa olevista kirjaimista X ja Y erottuvat selkeästi, mutta Z-kirjain ei erotu. Tulostetun kappaleen reunat ja ylin kerros ovat hieman rosoiset. Tämä voi johtua siitä, että kappaleen täyttöaste on ollut liian pieni.

Mittauspaikka	3D-mallin mitat (mm)	Tulostettu kappale (mm)
X-sivu	20	20
Y-sivu	20	20
Z-sivu	20	20

Toisella tulostuskerralla täyttöastetta ja kerrospaksuutta nostettiin. Tällä yritettiin saada parempaa laatua ilman, että tulostusaika kasvaisi merkittävästi.

XYZ 20-mm Calibration Cube toisen koeajon parametrit:

- Tulostuslämpötila 200 °C
- Täyttöaste 70 %
- Kerrospaksuus 0,2 mm
- Tulostusnopeus 40 mm/s
- Liikkumisen nopeus 100 mm/s
- Ei tukirakenteita
- 0,4 mm tulostuskärki



Kuva 21 XYZ 20-mm Calibration Cube koeajo 2

XYZ 20-mm Calibration Cube kesti toisella tulostuskerralla noin 45 minuuttia ja oli laadultaan hieman parempi kuin ensimmäinen tuloste. Toisella tulostuskerralla täyttöastetta oli nostettu 70 % ja kerrospaksuutta nostettu 0,2 mm. Tämän avulla saatiin tulostettuun kappaleeseen enemmän massaa ja samalla saatiin vähennettyä myös tulostamiseen

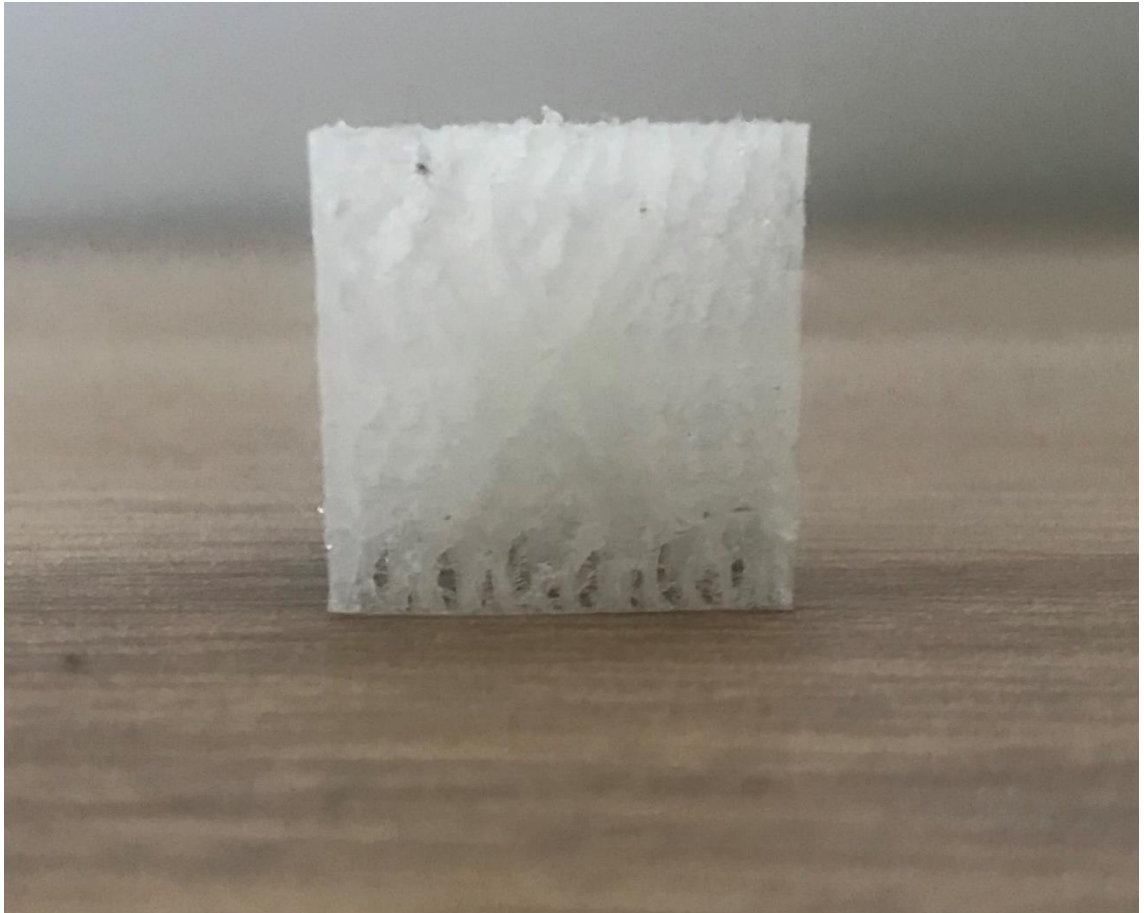
kulunutta aikaa. Toisessakin tulosteessa mittasuhteet vastasivat 3D-mallin mittasuhteita. Kirjaimista X ja Y erottuvat selkeämmin kuin ensimmäisessä, mutta Z kirjain ei erottunut kovin selkeästi. Kuution reunat olivat vähemmän rosoiset kuin ensimmäisellä tulostuskerralla.

Mittauspaikka	3D-mallin mitat (mm)	Tulostettu kappale (mm)
X-sivu	20	20
Y-sivu	20	20
Z-sivu	20	20

Kolmannella tulostuskerralla laskettiin täyttöaste samaksi kuin ensimmäisellä tulostuskerralla. Tulostusnopeutta ja kerrospaksuutta laskettiin. Tällä haluttiin nähdä, saadaanko parempi laatu korkeammalla täyttöasteella vai pienemmällä tulostusnopeudella ja matalammalla kerrospaksuudella.

XYZ 20-mm Calibration Cube kolmannen koeajon parametrit:

- Tulostuslämpötila 190 °C
- Täyttöaste 30 %
- Kerrospaksuus 0,1 mm
- Tulostusnopeus 20 mm/s
- Liikkumisen nopeus 50 mm/s
- Ei tukirakenteita
- 0,4 mm tulostuskärki



Kuva 22 XYZ 20-mm Calibration Cube koeajo 3

Kolmannella tulostuskerralla XYZ 20-mm Calibration Cuben tulostaminen vei noin 55 minuuttia ja oli laadultaan hyvä. Tulostaminen vei kolmannella tulostuskerralla enemmän aikaa kuin toisella kerralla, mutta laatu oli huomattavasti parempi. Tulosteen mittasuhteet vastasivat 3D-mallin mittasuhteita. X, Y ja Z kirjaimet erottuivat kaikki selkeästi tulosteesta. Kuution reunat olivat vähemmän rosoiset kuin aikaisemmillä tulostuskerroilla ja kirjaimissa oli enemmän syvyyttä.

Mittauspaikka	3D-mallin mitat (mm)	Tulostettu kappale (mm)
X-sivu	20	20
Y-sivu	20	20
Z-sivu	20	20

## 6 LOPPUPÄÄTELMÄT JA YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutustua Brinter tulostimen Granu Tool -työkaluun ja testata sen toimivuutta. Työ toteutettiin Turun Ammattikorkeakoulun tiloissa.

Opinnäytetyöprosessin aikana opin paljon 3D-tulostamisesta ja pääsin tutustumaan erilaisiin tulostustekniikoihin. Ennen opinnäytetyön aloittamista minulla ei ollut mitään kosketuspintaa 3D-tulostamiseen. Uskonkin, että opinnäytetyöstä saamasta tietoudesta tulee vielä olemaan hyötyä jatkossa työelämässä.

Tulostimella testattiin yleisimpiä kappaleita, joiden tarkoitus on testata 3D-tulostimen toimivuutta. Opinnäytetyön aikana opittiin tulostimen toiminnasta ja päästiin näkemään, miten eri parametrit vaikuttavat tulosteen laatuun.

Tulostimella tulostetuissa kappaleissa olivat mittasuhteet tarkat, joka kertoo tulostimen mittaustarkkuuden olevan hyvä. Pienillä parametrien muutoksilla havaittiin olevan suuri vaikutus tulostuksen laatuun ja aikaan, kuten esimerkiksi lämpötilan laskulla saatiin vähennettyä tulostusmateriaalin leviämistä. Opinnäytetyön tekemisen aikana saatiin parannettua tulosteen laatua. Tulosteen laatua olisi saatu enemmän parannettua, jos olisi ajettu enemmän koeajoja, mutta aika opinnäytetyön tekemiseen loppui kesken.

Tulevaisuudessa tulostimella voitaisiin kokeilla myös muita materiaaleja kuin PLA:ta. Lisäksi eri materiaaleilla voitaisiin tutkia, miten eri parametrit vaikuttavat niihin. 3D-tulostamisessa täytyy etsiä jokaiselle materiaalille sille optimit parametrit, joten PLA:lla käytetyt parametrit eivät välttämättä toimi esim. ABS:illa eli akrylibutadieenisyreeneillä.

## LÄHTEET

1. **Stokes, M.** *3D Printing for Architects with MakerBot*. 1., painos. Packt Publishing, 2013. s. 22.
2. **Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B.** *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototypin, and Direct Digital Manufacturing*. 2., uudistettu painos. New York: Springer, 2015. ss. 1–2.
3. **Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B.** *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototypin, and Direct Digital Manufacturing*. 2., uudistettu painos. New York : Springer, 2015. ss. 4-6.
4. **Loughborough University.** What is Additive Manufacturing? [Online] [Viitattu: 1.10. 2020.] Saatavissa <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/whatisam/>.
5. **Loughborough University.** VAT Photopolymerisation. [Online] [Viitattu: 21. 9. 2020.] Saatavissa <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>.
6. **Dimecc: Chekurov, S., Eklund, P., Kujanpää, V., Pekkarinen, J., Syrälä, K. & Vihi-  
nen, J.** *3D-tulostuksen suunnittelu- ja päätöksenteko-opas yrityksille*. [Online] [Viitattu: 21. 9. 2020.] Saatavissa [https://www.teknologiainfo.net/sites/teknologiainfo.net/files/download/DIMECC\\_3D\\_tulostuksen\\_suunnittelu\\_ja\\_paatöksenteko\\_opas\\_yrityk-sille.pdf](https://www.teknologiainfo.net/sites/teknologiainfo.net/files/download/DIMECC_3D_tulostuksen_suunnittelu_ja_paatöksenteko_opas_yrityk-sille.pdf).
7. **Loughborough University.** Material Jetting. [Online] [Viitattu: 22. 9. 2020.] Saatavissa <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>.
8. **Loughborough University.** Binder Jetting. [Online] [Viitattu: 22. 9. 2020.] Saatavissa <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>.
9. **Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B.** *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototypin, and Direct Digital Manufacturing*. 2., uudistettu painos. New York : Springer, 2015. ss. 147-148.
10. **Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B.** *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototypin, and Direct Digital Manufacturing*. 2., uudistettu painos. New York: Springer, 2015. ss. 160–161.
11. **Loughborough University.** Material Extrusion. [Online] [Viitattu: 15.2.2021.] Saatavissa <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>.
12. **Loughborough University.** Power Bed Fusion. [Online] [Viitattu: 30. 9. 2020.] Saata-  
vissa <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>.
13. **Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B.** *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototypin, and Direct Digital Manufacturing*. 2., uudistettu painos. New York : Springer, 2015. s. 219.
14. **Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B.** *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototypin, and Direct Digital Manufacturing*. 2., uudistettu painos. New York : Springer, 2015. ss. 220–222.

15. **Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B.** *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2., uudistettu painos. New York : Springer, 2015. ss. 222–224.
16. **Loughborough University.** Sheet Lamination. [Online] [Viitattu: 15.2.2021.] Saatavissa <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>.
17. **Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B.** *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2., uudistettu painos. New York : Springer, 2015. ss. 245-246.
18. **Loughborough University.** Directed Energy Deposition. [Online] [Viitattu: 15.2.2021.] Saatavissa <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>.
19. **Manufacturing Guide.** Fused Granular Fabrication. [Online] [Viitattu: 15.1.2021.] Saatavissa <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-granular-fabrication-fgf>
20. **BLB Industries.** The Company. [Online] [Viitattu: 5.1.2021.] Saatavissa <https://blbindustries.se/the-company/>.
21. **Colossus.** Printers. [Online] [Viitattu: 5.1.2021.] Saatavissa <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/whatisam/>.
22. **CEAD.** Solutions. [Online] [Viitattu: 5.1.2021.] Saatavissa <https://cead-am.com/solutions/>.
23. **Brinter.** Brinter – 3D BioPrinter. [Online] [Viitattu: 10.1.2021.] Saatavissa <https://www.brinter.com/product/brinter-1-3d-bioprinter/>.
24. **Turun Sanomat: Alapaattikoski, S.** Salolainen bioprintteri voi vähentää eläinkokeita. [Online] [Viitattu: 10.1.2021.] <https://www.ts.fi/uutiset/talous/4157516/Salolainen+bioprintteri+voi+vahentaa+elainkokeita++hurjissa+tulevaisuudenkuivissa+jopa+elinian+pidentaminen+ja+nalanhadan+helpottaminen>
25. **Brinter.** *User Guide – 1.2.* Brinter, 2020
26. **3D Printing For Beginners.** Filamentprinter. [Online] [Viitattu: 1.2.2021.] Saatavissa <http://3dprintingforbeginners.com/filamentprimer/>.
27. **All3dP: Hullette, T.** 10 Best 3D Printer Test Print Models. [Online] 2021 [Viitattu: 4.2.2021.] Saatavissa <https://all3dp.com/2/3d-printer-test-print-10-best-3d-models-to-torture-your-3d-printer/>.
28. **CreativeTools.** Features. [Online] [Viitattu:4.2.2021.] Saatavissa <http://www.3dbenchy.com/features/>.
29. **CreativeTools.** Analyse. [Online] [Viitattu:15.2.2021.] <http://www.3dbenchy.com/dimensions/>.
30. **CreativeTools.** 3D Print. [Online] [Viitattu: 4.2.2021.] Saatavissa <http://www.3dbenchy.com/3d-print/>
31. **3DInsider: Flynt, J.** 3D Printer Settings for PLA Filament – a Beginner’s Guide. [Online] 2020 [Viitattu: 7.2.2021.] Saatavissa <https://3dinsider.com/pla-filament/>
32. **Thingiverse: iDig3Dprinting** XYZ 20-mm Calibration Cube. [Online] 2016 [Viitattu: 4.2.2021.] Saatavissa <https://www.thingiverse.com/thing:1278865>.