



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# VIIPALOINTIOHJELMIEN VERTAILU FDM- TULOSTUKSESSA

Tatu Tähkänen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2019

# TIIVISTELMÄ

Viipalointiohjelmien vertailu FDM-tulostuksessa

Tatu Tähkänen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2019, 32 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Jouko Heikkala

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on luoda katsaus 3D-tulostuksessa käytettäviin prosesseihin sekä vertailla FDM-tulostuksessa käytettäviä viipalointiohjelmiä keskenään. Kolmea suosittua yksityiskäyttöön soveltuvaa viipalointiohjelmaa vertailtiin niiden alkuperäisasetuksilla. Vertailu tehtiin ominaisuuksien, nopeuden ja tulostettujen testikappaleiden perusteella. Vertailussa havaittiin selkeitä eroja etenkin ohjelman ja tulostuksen nopeudessa mutta myös testikappaleiden laadussa. Ominaisuuksien vertailun ja testikappaleiden perusteella yksityiskäyttäjä saa paremman käsityksen viipalointiohjelman ominaisuuksista ja osaa siten valita tarpeisiinsa sopivimman ohjelman.

*Asiasanat: 3D-tulostus, FDM, G-koodi, viipalointiohjelma*

# ABSTRACT

Comparison of slicing software on FDM printing

Tatu Tähkänen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2019, 32 pp.

Supervisor at the university: Jouko Heikkala

The aim of this Bachelor's thesis is to provide an overview of 3D printing processes and to compare slicing software used in FDM printing. Three popular slicing software suitable to private users were compared with their original settings. The comparison focused on the software's features, speed, and printed test models. Notable differences between the software and printing speed, as well as the quality of test prints, were found. Based on the comparison of features and the test prints, a private user gains a better understanding of the slicing software features and may choose the software most suitable for his/her needs.

*Keywords: 3D printing, FDM, G-code, slicing software*

# ALKUSANAT

Tämä työ kuuluu Oulun yliopiston konetekniikan koulutusohjelman kandidaatintutkielman osakokonaisuuteen. Työn päätarkoituksena on perehtyä 3D-tulostuksessa FDM-teknologiaa käyttävien tulostimien erilaisten viipalointiohjelmien ominaisuuksiin ja eroavaisuuksiin. Työ on toteutettu syyslukukauden 2019 aikana. Haluaisin kiittää työn ohjaajaa ja tarkistajaa Jouko Heikkalaa asiallisesta ja selkeästä opastuksesta.

Oulu, 26.9.2019

*Tatu Tähtänen*

Työn tekijä

# SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	7
2 3D-TULOSTAMINEN .....	8
2.1 Historia .....	9
3 3D-TULOSTUKSEN TEKNOLOGIAT .....	11
3.1 FDM .....	11
3.2 SLA ja DLP .....	11
3.3 SLS .....	12
3.4 Materiaalin suihkutus .....	13
3.5 DMLS ja SLM .....	13
3.6 Sideainesuihkutus .....	14
4 TULOSTUSPROSESSI .....	16
4.1 3D-mallinnus .....	16
4.2 STL-tiedosto .....	16
4.3 Viipalointiohjelma .....	16
4.4 G-koodi .....	17
4.5 FDM-tulostin .....	18
4.6 Jälkikäsittely .....	19
5 VERTAILLUT VIIPALOINTIOHJELMAT .....	20
5.1 Simplify3D .....	20
5.2 Ultimaker Cura .....	21
5.3 PrusaSlicer .....	21
6 VIIPALOINTIOHJELMIEN TESTAUS .....	23
6.1 Vertailumallitiedostot .....	23
6.2 Käytettävä laitteisto .....	23
7 VIIPALOINTIOHJELMIEN VERTAILU .....	25
7.1 Simplify3D-testit .....	25
7.2 Ultimaker Cura -testit .....	26
7.3 PrusaSlicer-testit .....	26
7.4 Vertailun tulokset .....	27
8 YHTEENVETO .....	30
LÄHDELUETTELO	

## **MERKINNÄT JA LYHENTEET**

CAD	Computer Aided Design
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DLP	Digital Light Processing
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolithography-teknologia
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolithography-tiedostomuoto

# 1 JOHDANTO

3D-tulostuksessa viipalointi tarkoittaa prosessia, jossa viipalointiohjelma muuttaa 3D-mallin geometrian 3D-tulostimelle ymmärrettäväksi G-koodiksi, jonka perusteella se valmistaa fyysisen kappaleen. Valitsin tämän aiheen, koska 3D-tulostus teknologiana on erittäin ajankohtainen ja sillä on yhä suurempi rooli valmistavien yritysten toiminnassa. Valitsin tämän aiheen myös siksi, että viipalointiohjelmista on tehty hyvin vähän vertailuja yksityisille käyttäjille, vaikka erilaisia viipalointiohjelmia on olemassa jo kymmeniä ja uusia tulee koko ajan.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää kolmen yksityiskäytössä suosituimman viipalointiohjelman ominaisuuksia ja eroavaisuuksia FDM-teknologiaa (Fused Deposition Modeling) käyttävissä 3D-tulostimissa. Vertailun tarkoituksena on helpottaa yksityishenkilön viipalointiohjelman valintaa omiin tarpeisiinsa.

Työn teoriaosassa tarkastellaan 3D-tulostuksen kehitystä sen synnystä nykypäivään sekä tulevaisuuden näkymiä. Tämän lisäksi tutustutaan 3D-tulostuksen eri teknologioihin, tulostusprosessiin sekä vertailtaviin viipalointiohjelmiin. Käytännön osassa vertaillaan viipalointiohjelmien käytettävyyttä, ominaisuuksia ja nopeutta sekä tulostetaan ohjelmien alkuperäisillä asetuksilla testikappaleita, joiden laatua verrataan toisiinsa.

## 2 3D-TULOSTAMINEN

3D-tulostaminen on ainetta lisäävä valmistusprosessi, jossa digitaalisesta kolmiulotteisesta mallista luodaan sitä vastaava fyysinen kappale lisäämällä materiaalia kerroksittain. Erilaisia ainetta lisääviä 3D-tulostustekniikoita on olemassa lukuisia, ja niillä jokaisella on omat hyötynsä ja rajoituksensa.

Redwood ym. (2018, s. 9) mukaan 3D-tulostuksen vahvuuksia ovat sen joustavuus, nopeus ja hinta, etenkin prototyyppien ja yksittäiskappaleiden valmistuksessa. 3D-tulostimilla on kyky valmistaa yhdessä työvaiheessa geometrialtaan erittäin haastavia kappaleita, jotka eivät muilla valmistusmenetelmillä onnistuisi. Muissa valmistusmenetelmissä uusien kappaleiden valmistus tai muutos kappaleiden muodossa vaatii yleensä uuden työkalun, muotin tai pidikkeen. 3D-tulostuksessa voidaan yhdessä työvaiheessa valmistaa useita erilaisia kappaleita, vaihtaa kappaleen väriä tai jopa materiaalia.

Horvathin ja Cameronin (2018, s. 288) mukaan 3D-tulostuksen suurin vahvuus on nopeiden prototyyppien valmistus. Nopeassa prototyyppien valmistuksessa on tärkeää suunnitella, valmistaa ja testata kappaletta mahdollisimman nopeassa ajassa ja kyetä helposti muuttamaan kappaleen rakennetta vaikuttamatta kuitenkaan itse valmistusprosessiin. Ennen 3D-tulostamista prototyypin valmistus kesti viikkoja, sillä aina kun prototyypin rakenteeseen tehtiin muutos, jouduttiin myös valmistusprosessia muokkaamaan. Nykyään 3D-tulostuksen ansiosta prototyypin valmistus saattaa kestää vain muutamia päiviä (3D Hubs 2018, s. 8).

Valmistusmenetelmien hintaa tarkastellessa on selvää, että 3D-tulostaminen on tällä hetkellä ainoastaan järkevä vaihtoehto prototyyppien ja erittäin pienten valmistuserien teossa. Tähän on syynä alhainen alkuinvestointi, sillä valmistus hoituu yhdellä laitteella. Hintaehtuina perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna ovat myös alhainen materiaalihävikki sekä tarpeettomuus lisätyökaluille (3D Hubs 2018, s. 8).

3D-tulostuksen heikkouksia ovat pinnanlaatu ja toistettavuus. Koska 3D-tulostuksessa materiaalia lisätään kerroksittain, voidaan jo paljaalla silmällä havaita kerrosten väliset selvät rajat. Etenkin kappaleen kaltevilla pinnoilla kerrosten erot korostuvat. Pinnanlaatua voidaan parantaa viimeistelyllä tai pienentämällä kerrospaksuutta, mutta nämä pidentävät



valmistusprosessin kestoja ja lisäävät kustannuksia. 3D-tulostaminen ei siis sovi suurta tarkkuutta vaativien kohteiden valmistukseen (Redwood ym. 2018 s. 9)

Massatuotannossa käytetyissä valmistusmenetelmissä, kuten ruiskuvalutekniikassa, kappaleiden laatu pysyy hyvin samana ja eroavaisuuksista johtuvaa hävikkiä tapahtuu vähän. 3D-tulostuksessa jo pienet muutokset materiaalissa tai tulostusympäristössä aiheuttavat muutoksia lopulliseen kappaleeseen. Tästä syystä 3D-tulostimet ja niiden materiaalit tulee pitää hyvin kontrolloidussa ympäristössä (3D Hubs 2018, s. 10).

## 2.1 Historia

Ensimmäinen 3D-tekniikkaan liittyvä patentti on merkitty tohtori Hideo Kodamalle toukokuussa vuonna 1980. Kodaman patentissa kuvataan fotopolymeerinen pikavalmistus, jossa astiassa olevaa nestemäistä fotopolymeeriä kovetetaan UV-valon avulla. Kodama ei kuitenkaan koskaan saanut kaupallistettua teknologiaansa (Dormehl 2019).

Vuonna 1986 Chuck Hull kehitti SLA-tekniikalla (Stereolithography-tekniikka) toimivan laitteen, jolle sai myös patentin. Tässä 3D-tulostustekniikassa laser kovettaa nestemäistä hartsia valikoidusti kerros kerrokselta (Hull 1986). Samana vuonna Hull perusti yrityksen nimeltä 3D Systems, joka esitteli ensimmäisen kaupallisen 3D-tulostimen. Vuonna 1987 Carl Deckard Texasin yliopistosta kehitti vaihtoehtoisen 3D-tulostustekniikan, jossa nestemäisen hartsin sijaan jauhepartikkeleita sidotaan toisiinsa laserin avulla (Dormehl 2019).

Vuonna 1989 S. Scott Crump ja Lisa Crump kehittivät ja patentoivat uuden aineita lisäävän valmistusmenetelmän nimeltä FDM. Tässä tekniikassa sulanutta polymeerifilamenttia lisätään tulostusalustalle kerroksittain kappaleen valmistamiseksi. Samana vuonna Crumpit perustivat yrityksen nimeltä Stratasys, joka on säilynyt yhtenä merkittävimmistä yrityksistä aineita lisäävän valmistuksen saralla (Crump 1989).

Artikkelissaan Dormehl (2019) kertoo, että vuonna 1999 käytettiin leikkauksessa ensimmäistä kertaa 3D-tulostettua elintä, kun laboratorioissa valmistettu virtsarakko siirtoistutettiin potilaalle Wake Forestin kehittämällä tekniikalla. Keinotekoinen virtsarakko valmistettiin ottamalla ensin tietokonekerroskuva potilaan virtsarakosta, josta

tulostettiin biohajoava malli. Solut kasvatettiin potilaasta otetusta kudoksenäytteestä, jotka sitten asetettiin kerroksittain biohajoavaan malliin ja lopulta istutettiin potilaaseen.

Kun osa FDM-tekniikan patenteista vanhentui vuonna 2004, Adrian Bower aloitti avoimeen lähdekoodiin perustuvan RepRap-projektin. Sen tavoitteena oli auttaa harrastajia rakentamaan oma 3D-tulostin, joka pystyi tulostamaan lähes kaikki siinä käytettävät osat itse. Ideana oli saada 3D-tulostus kaikkien saataville, sillä nyt 3D-tulostuksen harrastajat pystyivät tulostamaan 3D-tulostimia tuttaviltaan (Horvath ja Cameron 2018, s. 7).

Vuonna 2007 Alankomaissa perustettiin 3D-tulostuspalveluja tarjoava yritys nimeltä Shapeways. Myös Shapewaysin ideana oli saada 3D-tulostus kaikkien saataville, mutta 3D-tulostimien sijaan Shapeways pyytää asiakkaita lähettämään 3D-tiedoston, jonka yritys sitten tulostaa ja lähettää asiakkaalle (Shapeways).

FDM-tekniikan pääpatentin vanhentumisen myötä vuonna 2009 alkoi kuluttajamarkkinoille virrata useita kohtuuhintaisia 3D-tulostimia valmistavia yrityksiä. Näistä tunnetuin on Makerbot, joka on myös luonut verkossa toimivan 3D-tiedostokirjaston Thingiversen, jonne käyttäjät voivat tallentaa omia 3D-tiedostojaan muiden ladattavaksi (Dormehl 2019).

Jo nyt tekniikan kehitys ja huoli ympäristöstä on kasvattanut metallin suosiota 3D-tulostuksen materiaalina. Metallivalmisteisissa kappaleissa perinteisesti syntynyt materiaalihävikki tulee vähenemään radikaalisti, ja kappaleet voidaan suunnitella aiempaa keveämmiksi. Rakennuksia 3D-tulostetaan jo sementistä, ja tekniikan kehittyessä käytön on arveltu lisääntyvän rakennusalalla tulevina vuosina. Rakennusten 3D-tulostus on erittäin nopeaa ja halpaa, ja se onkin jo suosittu tekniikka alueilla, joilla esimerkiksi maanjäristykset tuhoavat rakennuksia usein. Lääketieteessä on otettu isoja harppauksia viime vuosina, ja tulevaisuudessa kokonaisen biotulostetun elimen siirtäminen ihmiseen saattaa olla normaali toimenpide.

## 3 3D-TULOSTUKSEN TEKNOLOGIAT

### 3.1 FDM

FDM-tekniikassa materiaalia syötetään nauhana pursotuspäähän, joka on varustettu kuumennetulla suuttimella. Kun suutin saavuttaa halutun lämpötilan, moottori työntää materiaalia suuttimen läpi, joka samalla sulaa. 3D-tulostin liikuttaa pursotuspäätä määrättyllä radalla levittäen sulanutta materiaalia, joka jähmettyy ja muuttuu takaisin kiinteäksi. Kun taso on valmis, liikkuu joko tulostusalausta alaspäin tai pursotuspäätä ylöspäin, ja prosessia toistetaan, kunnes kappale on valmis. Tulostuksen jälkeen kappale on valmis mutta tarvitsee yleensä jälkikäsittelyn, kuten tukimateriaalin poiston ja pinnan hiomisen.

3D Hubsin (2018, s. 17) mukaan FDM on kustannustehokkain tapa valmistaa räätälöityjä termoplastisia osia ja prototyyppejä. Sillä on myös lyhin läpimenoaika johtuen teknologian joustavuudesta. Huonoina puolina FDM-tekniikassa on alhainen tarkkuus ja resoluutio verrattuna muihin 3D-tulostusteknologioihin. Kappaleissa esiintyy todennäköisesti silmällä havaittavia kerroksia, joten jälkikäsittely on usein tarpeen. Kerroksimainen valmistus myös aiheuttaa sen, että kappaleet eivät ole kovin lujia, joten ne eivät sovellu lujuutta vaativiin mekanismeihin.

### 3.2 SLA ja DLP

SLA ja DLP (Digital Light Processing) ovat samankaltaisia prosesseja, jotka käyttävät ultraviolettivaloa kovettamaan nestemäisen hartsin astiassa. SLA käyttää pisteestä pisteeseen kulkevaa laseria kovettamaan hartsin, kun taas DLP käyttää projektorin heijastamaan yksittäisen kuvan jokaiselle tasolle. Tulostamisen jälkeen kappaleet tulee puhdistaa ylimääräisestä hartsista ja altistaa UV-valolle kestävyuden parantamiseksi. Tämän jälkeen tukimateriaali poistetaan ja pinnalle tehdään jälkikäsittely, jos laatuvaatimukset ovat korkeita (Horvath ja Cameron 2018, s. 43).

SLA- ja DLP-tulosteet ovat pinnanlaadultaan huomattavasti FDM-tulosteita parempia, joten jälkikäsittely ei usein ole tarpeen. Ne ovatkin ihanteellisia tekniikoita visuaalisuutta korostavien prototyyppien luontiin. Toiminnallisten prototyyppien luontiin ne eivät kuitenkaan sovellu FDM-tulosteita paremmin haurautensa vuoksi. SLA- ja DLP-

tulosteita ei tule myöskään käyttää ulko-olosuhteissa, sillä niiden mekaaniset ominaisuudet ja väri muuttuvat auringon UV-valon vaikutuksesta (3D Hubs 2018, s. 19).

### 3.3 SLS

Redwood ym. (2018 s. 74) mukaan SLS (Selective Laser Sintering) eli lasersintraus on teknologia, jossa ensin jauhetta sisältävä astia kuumennetaan hieman jauhemateriaalin sulamispisteen alapuolelle. Tämän jälkeen telalla levitetään ohut kerros jauhetta tulostustasolle. Laser skannaa jauhekerrosta määrätyistä kohdista, joissa lämpö saa jauhehiukkaset sitoutumaan toisiinsa. Kun kerros on sintrattu, tulostustaso liikkuu halutun matkan alaspäin – yleensä 0.1 mm – ja prosessi toistetaan, kunnes astiassa on valmis kappale sintraamattoman jauheen ympäröimänä.

Tulostusprosessin jälkeen astian täytyy jäähtyä ennen kuin kappaleet voidaan poistaa sintraamattoman jauheen seasta ja puhdistaa. Joitakin jälkikäsittelymenetelmiä voidaan tehdä kappaleiden ulkonäön parantamiseksi, kuten kiillotusta tai värjäystä (3D Hubs 2018, s. 21).

SLS-osat ovat lähestulkoon isotrooppisia eli ne kestävät ulkoisia voimia suunnasta riippumatta, joten ne ovat ihanteellisia mekaanisiksi osiksi ja prototyypeiksi. Koska tukimateriaalia ei tarvita sintraamattoman jauheen toimiessa tukimateriaalina, voidaan lasersintraamalla valmistaa geometrialtaan erittäin haastavia kappaleita (Horvath ja Cameron 2018, s. 48). Lasersintraus sopii valmistusmenetelmäksi maksimissaan noin sadan kappaleen eriin, sillä tulostusastia voidaan hyödyntää koko sen tilavuuden verran. Tämä mahdollistaa useiden kappaleiden valmistamisen yhden tuotantoajan aikana (3D Hubs 2018, s. 21).

SLS-tulosteilla esiintyy sisäistä huokoisuutta, ja niiden pinnanlaatu on rosoinen. Jos vaatimuksena on tasainen pinnanlaatu ja vesitiiviys, on jälkikäsittely välttämätön. Laajat tasaiset pinnat sekä pienet reiät vaativat erityistä tarkkailua, sillä ne ovat alttiita lämmön aiheuttamalle vääntymiselle ja ylisintraukselle (3D Hubs 2018, s. 21).

### 3.4 Materiaalin suihkutus

Materiaalin suihkutus toimii samalla periaatteella kuin tavallisessa mustetuloestimessa. Yksittäiselle tasolle tulostamisen sijaan tulostetaan kuitenkin usealle tasolle, jotka sitten liitetään yhteen kiinteään kappaleen luomiseksi. Useat tulostuspäät suihkuttavat satoja pisaroita fotopolymeerejä tulostustasolle, jotka kovetetaan UV-valon avulla. Yhden tason valmistuttua tulostustaso liikkuu yhden tason verran alaspäin ja prosessi toistetaan. Materiaalin suihkutus vaatii aina tukimateriaalia. Tukimateriaali on vesiliukoista, ja se poistetaan jälkikäsittelyssä (Horvath ja Cameron 2018, s. 48).

Materiaalin suihkutus on kaikista tarkoin 3D-tulostusteknologia. Se on myös yksi harvoista 3D-tulostusprosesseista, jolla kappale voidaan valmistaa eri materiaaleilla ja väreillä. Materiaalin suihkutuksella saadaan erittäin sileä pinta ja hyvä mittatarkkuus, joka on verrannollinen jopa ruiskuvalukappaleeseen. Tästä syystä materiaalin suihkutus sopii yksityiskohtaisen pinnan vaativiin osiin. Materiaalin suihkutus on teknologiana yksi kalleimmista 3D-tulostusprosesseista, joten se ei ole vielä taloudellisesti kannattavaa monessakaan yrityksessä. Lisäksi teknologiassa käytettävä materiaali tekee osista hauraita ja UV-säteilylle alttiita, joten ne eivät sovellu toiminnallisiksi osiksi (3D Hubs 2018, s. 23).

### 3.5 DMLS ja SLM

DMLS (Direct Metal Laser Sintering) eli metallin lasersintraus ja SLM (Selective Laser Melting) eli lasersulatus ovat 3D-tulostustekniikoita, joissa kappaleet valmistetaan samalla tavalla kuin SLS-tulostimilla: laserilla yhdistetään jauhepartikkeleita toisiinsa kerros kerrokselta. Pääerona SLS-teknologiaan on kuitenkin se, että valmistetut kappaleet ovat metallisia. DMLS- ja SLM-teknologian ero on hienoinen: SLM saavuttaa jauhepartikkeleiden sulamispisteen, kun taas DMLS lämmittää metallipartikkelit vain siihen pisteeseen, että ne yhdistyvät toisiinsa molekyyllitasolla. DMLS ja SLM vaativat aina tukirakenteita kuumien lämpötilojen aiheuttamien vääristymien takia. Tulostuksen jälkeen metalliset tukirakenteet tulee poistaa joko manuaalisesti tai koneistuksen avulla. Koneistuksella voidaan samalla parantaa kappaleen toiminnan kannalta kriittisten piirteiden, kuten reikien, tarkkuutta. Lopuksi kappaleet lämpökäsitellään jälkijännitysten poistamiseksi (Redwood ym. 2018 s. 124)

DMLS ja SLM ovat ihanteellisia teknologioita geometrialtaan monimutkaisten metallikappaleiden valmistukseen, joita ei perinteisillä valmistusmenetelmillä voida valmistaa. DMLS:n ja SLM:n tavoitteena on valmistaa entistä kevyempiä ja vähemmän materiaalia tarvitsevia kappaleita alentamatta niiden suorituskykyä tai jopa parantaen sitä. DMLS- ja SLM-menetelmässä on mahdollista käyttää monia metalliseoksia, kuten superseoksia, joita on lähes mahdotonta käyttää muissa valmistusmenetelmissä (3D Hubs 2018, s. 25).

Kappaleen valmistus DMLS- ja SLM-tulostimilla on erittäin kallista, ja sen kustannukset ovat tuhansista euroista kymmeneen tuhansiin euroihin. Tästä syystä kappaleita tulisi valmistaa ainoastaan silloin, kun valmistus muilla valmistusmenetelmillä on liki mahdotonta. Lisäksi nykyisten DMLS- ja SLM-tulostimien rakennustilavuus on pieni, sillä tulostusprosessi vaatii tarkat olosuhteet, joita suurissa tilavuuksissa on vaikea hallita (3D Hubs 2018, s. 25).

### **3.6 Sideainesuihkutus**

Sideainesuihkutus on joustava valmistusteknologia erilaisiin käyttötarkoituksiin halvoista 3D-metallitulosteista hiekkavalamuottien valmistukseen. Sideainesuihkutuksessa ohut kerros jauhepartikkeleita (metalli-, akryyli- tai hiekkakivi-) asetetaan rakennustasolle. Sen jälkeen sidosainetta suihkutetaan määrättyihin kohtiin tasolla, joissa jauhepartikkelit sitoutuvat toisiinsa. Prosessi toistetaan kerros kerrokselta, kunnes kappale on valmis. Lopuksi kappale poistetaan ylimääräisen sidosaineen joukosta ja puhdistetaan. Tässä vaiheessa kappale on hyvin huokoinen ja jälkikäsittely on kappaleen käyttötarkoituksesta riippuen tarpeen (Hoskins 2018, s. 47-49).

Sideainesuihkutuksella voidaan valmistaa metalliosia ja värivalmiita prototyyppejä murto-osalla DMLS- ja SLM-valmistuksen hinnasta. Suurikokoiset hiekkakiviosat kannattaa myös valmistaa sideainesuihkutuksella, sillä prosessissa suuret lämpötilat eivät aiheuta ongelmia, kuten osan vääntymistä (3D Hubs 2018, s. 27).

Tukimateriaalin tarpeettomuuden vuoksi sideainesuihkutuksella voidaan valmistaa geometrialtaan monimutkaisia metalliosia. Lasersintrauksen tavoin yhden tuotantoajon aikana voidaan valmistaa useita kappaleita rakennustilavuuden rajoissa. Osilla on

kuitenkin alhaisemmat mekaaniset ominaisuudet niiden huokoisuuden takia (3D Hubs 2018, s. 27).

Osien jälkikäsittely täytyy ottaa erityishuomioon osan piirteiden suunnittelussa. Haurauden vuoksi pieniä yksityiskohtia tulee välttää murtumisriskin pienentämiseksi. Metalliosat saattavat myös muotoutua väärin, jos sintrausta tai partikkeleiden sitoutumista ei ole tuettu riittävästi (3D Hubs 2018, s. 27).

## 4 TULOSTUSPROSESSI

Tässä kappaleessa on tarkoitus käydä läpi, miten ideasta syntyy valmis 3D-tulostettu kappale. Prosessin eri vaiheet ja niissä käytettävät työkalut käydään yksityiskohtaisesti läpi.

### 4.1 3D-mallinnus

Tulostusprosessi alkaa 3D-mallin luomisella. 3D-mallit ovat digitaalisia esityksiä kappaleesta. Internetistä löytyy valmiita ilmaisia ja maksullisia 3D-malleja tai palveluita, jotka tekevät asiakkaan haluaman 3D-mallin. Mallinnusohjelmien avulla käyttäjä voi myös itse suunnitella haluamansa 3D-mallin. 3D-mallintamisen oppiminen vie aikaa, ja erilaisia mallinnusohjelmia löytyykin sekä aloittelijoiden, suurten teollisuusyritysten että animaatiostudioiden tarpeisiin. Eräs vaihtoehto 3D-mallin tekoon on myös 3D-skannauslaitteet, joilla 3D-malli luodaan jo olemassa olevasta kohteesta.

### 4.2 STL-tiedosto

Ennen kuin voidaan tulostaa mitään, tarvitaan 3D-mallitiedosto, jonka viipalointiohjelma tunnistaa. Tällaisella tiedostolla voidaan viipalointiohjelmassa luoda 3D-tulostimelle käskyt, joita se osaa suorittaa kappaleen valmistamiseksi. Kaikista tyypillisin tiedostoformaatti 3D-tulostamisessa on STL (Stereolithography-tiedostomuoto), jota voidaan käyttää kaikenlaisissa 3D-tulostimissa. Muita yleisiä tiedostomuotoja ovat OBJ ja 3MF. Yksinkertaistettuna STL-tiedosto määrittelee pisteet, jotka se yhdistää kolmioiksi niin, että muodostuu suljettu kappaleen geometria. STL-tiedostoa kutsutaan myös kuorimalliksi, sillä se voidaan nähdä onttona mallina, jolla on äärettömän ohut kuori. Kaikissa 3D-mallinnusohjelmissa voidaan mallinnettu kappale tallentaa STL-tiedostona, joka voidaan sitten viedä viipalointiohjelmaan (Kloski ja Kloski 2016, s. 94)

### 4.3 Viipalointiohjelma

3D-tulostimet eivät voi käyttää STL-tiedostoa suoraan, vaan väliin tarvitaan viipalointiohjelma, jolla luodaan 3D-tulostimelle käskyt. Viipalointiohjelmaan viety STL-tiedosto muunnetaan ohuisiin horisontaalisiin viipaleisiin. Näiden viipaleiden avulla



voidaan 3D-tulostimelle muodostaa liikeradat sekä kertoa, missä kohdin materiaalia tulee lisätä.

Erilaisia viipalointiohjelmia on nykyisin kymmeniä ja uusia tulee koko ajan lisää. Asetusten saaminen ihanteellisiksi yhdelle tulostimelle voi olla hankalaa, joten useimmat 3D-tulostinvalmistajat ovatkin luoneet avoimen lähdekoodin viipalointiohjelmista uuden, omalle tulostimelleen ihanteellisen viipalointiohjelman. Viipalointiohjelmissa voidaan määrittää useita eri muuttujia, joista yleisimpiä ovat mm. 3D-tulostimien rakennustilavuus ja -geometria, käytettävä materiaali, tulostinpään nopeus sekä tulostusalustan ja tulostinpään lämpötila (Kloski ja Kloski 2016, s. 54).

Yksi viipalointiohjelmien tärkeimmistä ominaisuuksista on mahdollisuus simuloida ja tarkastella koko tulostusprosessia kerros kerrokselta, joissain ohjelmissa jopa liikeradoittain. Simulointi on hyvä tapa varmistaa nopeasti tulostusprosessin onnistuminen, jonka jälkeen muutoksia on vielä helppo tehdä, jos jokin ei näytä menevän oikein.

#### **4.4 G-koodi**

Viipalointiohjelmalla 3D-tulostimelle luotua käskyjen sarjaa kutsutaan G-koodiksi. G-koodi syötetään 3D-tulostimelle joko wifin välityksellä tai tietokoneelta USB-portin, USB-muistitikun tai SD-kortin kautta riippuen siitä, mitä vaihtoehtoja käytettävällä 3D-tulostimella on. 3D-tulostimen oma laiteohjelma tulkitsee G-koodia käsky kerrallaan ja ohjaa laitteiston toimintoja käskyjen toteutukseen (Horvath ja Cameron 2018, s. 85).

G-koodi on vanha ohjelmointikieli, joka on alun perin suunniteltu koneiden työkalujen hallintaan. Sen alkuperä ulottuu 1950-luvulle, ja sen suosio perustuu joustavuuteen ja kykyyn suorittaa toimintoja vähäisellä laskentateholla. Tyypillisiä G-koodin käskyjä ovat suuttimen lämpötilan asettaminen haluttuun lämpötilaan, tulostinpään pitäminen paikallaan, kunnes lämpötila on saavutettu, ja tulostinpään liikuttaminen haluttuihin xyz-pisteisiin avaruustasossa (Horvath ja Cameron 2018, s. 86).

Jokainen rivi G-koodia joko käskee 3D-tulostinta suorittamaan pieniä tehtäviä tai asettaa parametreja arvoille. Otetaan esimerkiksi pieni osa G-koodia:

G21

G90

G1 X12.000 Y32.477 Z3.200 E0.1626

Tämän esimerkin alussa G21 käskee 3D-tulostimen laiteohjelmaa käyttämään laskemisessa millimetrejä. G90-komennolla käsketään laiteohjelmaa käyttämään absoluuttista koordinaatistoa. G1-komento käskee tulostinpäätä liikkumaan xyz-koordinaatistossa pisteeseen (12.000, 32.477, 3.200). Tämän liikkeen aikana 0.1626 millimetriä filamenttia pursotetaan ulos (Horvath ja Cameron 2018, s. 86).

Horvathin ja Cameronin (2018, s. 86-87) mukaan 3D-tulostimet, joissa on useampia tulostinpäitä, tarvitsevat G-koodissa oman käskyn oikean tulostinpään valintaan. Tämä tapahtuu työkalunvaihtokäskyllä T. Monissa avoimen lähdekoodin kahden tulostinpään 3D-tulostimissa T0 valitsee ensimmäisen tulostinpään ja T1 toisen. T0-komennon jälkeen kaikki G-koodin rivit suoritetaan ensimmäisellä tulostinpäällä, kunnes uusi Tx-komento tulee vastaan.

## 4.5 FDM-tulostin

Kun 3D-mallista viipalointiohjelman avulla luotu G-koodi on valmis, voi itse tulostus alkaa. Filamenttirulla asetetaan sille tarkoitettuun telineeseen joko 3D-tulostimen viereen tai yläpuolelle. Filamenttilanka tulee työntää manuaalisesti sormin aina pursotinpäähän asti. Tämän jälkeen tulostusalusta täytyy vielä kalibroida oikealle korkeudelle, jos 3D-tulostimessa ei ole automaattista tason kalibrointia tai tulostuspäähän on vaihdettu erikorkuinen suutin. Näiden toimenpiteiden jälkeen voidaan 3D-tulostimen valikosta valita haluttu G-koodi, jonka jälkeen laiteohjelma ohjaa koko 3D-tulostusprosessin.

Tulostuksen alkua on syytä seurata tarkasti, sillä lähes kaikilla halvoista kotikäyttöisistä kalliisiin teollisuuslaitoksen 3D-tulostimiin on ongelmana huono tarttuminen tulostusalustaan. Tarttumista voidaan parantaa monin eri tavoin: kalibroimalla tulostusalustan korkeus ihanteelliseksi, asentamalla suoran alustan, käyttämällä tarttumista parantavaa teippiä ja sidosaineita kuten hiuslakkaa tai puikkoliimaa sekä asettamalla tulostusnopeus alhaisemmaksi ensimmäiselle kerrokselle.

## 4.6 Jälkikäsittely

Kun 3D-tulostettu kappale on valmis, se voidaan irrottaa tulostusalustasta joko käsin tai tiukasti tarttuessaan työkalun avulla. Tukimateriaali poistetaan käsin, pihdeillä tai materiaalista riippuen myös liuottamalla tai koneistamalla. Lopuksi pinta käsitellään hiomalla, koneistamalla tai kemiallisilla aineilla tulostusmateriaalista riippuen.

## 5 VERTAILLUT VIIPALOINTIOHJELMAT

Tässä työssä vertailtiin kolmea suosittua FDM-tulostuksessa käytettävää viipalointiohjelmaa: maksullista Simplify3D:tä sekä ilmaisia Ultimaker Curaa ja PrusaSliceria.

### 5.1 Simplify3D

Simplify3D on vuonna 2013 perustettu 3D-tulostamiseen tarkoitettujen ohjelmistojen tuottaja, ja sen pääkonttori sijaitsee Cincinnatiassa Yhdysvalloissa. Simplify3D:tä markkinoidaan ammattilaisille tarkoitettuna viipalointiohjelmana, ja se onkin hinnaltaan 149 Yhdysvaltojen dollaria. Simplify3D tekee yhteistyötä 3D-tulostimia valmistavien yritysten kanssa yli 30 maassa, ja se tukeekin lähes kaikkia saatavilla olevia 3D-tulostimia. Ohjelmasta löytyy valmiit asetukset yli sadalle erilaiselle 3D-tulostimelle (3D Printing Business Media 2019).

Simplify3D on käyttöliittymältään hyvin aloittelijaystävällinen. Ohjelma luo ensimmäisellä käynnistyskerralla automaattisesti käyttäjän 3D-tulostimen optimaaliset asetukset. 3D-mallin tuonti ohjelmaan on yksinkertaista, ja sen siirtely, kääntö, skaalaus ja korjaus on helppoa. Tulostusprosessin muokkaaminenkin hoituu vain muutamalla säädettävällä parametrilla, mutta ammattikäyttäjää varten löytyy suuri määrä asetuksia tulostusprosessin hallintaan. Yksi ohjelman vaikuttavimmista ominaisuuksista on sen yksityiskohtainen tulostusprosessin simulointi verrattuna muihin ohjelmiin. Simuloinnissa tulostusprosessia voi tarkastella kerroksittain tai jopa suutinpään yksittäisinä liikkeinä. Käyttäjä voi myös valita, haluaako nähdä esim. tulostuspään matkustusliikkeen, tukimateriaalin, mallin seinämän tai täyttömateriaalin eri väreinä simulaatiossa.

Toinen erinomainen ominaisuus ohjelmassa on tukimateriaalin vapaa käsittely. Simplify3D luo automaattisesti tukimateriaalit malliin mutta antaa käyttäjälle täyden vapauden muokata niitä. Käyttäjä voi poistaa tukimateriaalia tai lisätä sitä haluamiinsa kohtiin. Simplify3D myös sallii käyttäjän muokata mallia sen eri kerroksilla. Käyttäjä voi määrittää, millä korkeudella hän haluaa esim. erilaisen seinämän paksuuden, kerrospaksuuden, tulostusnopeuden tai lämpötilan.

## 5.2 Ultimaker Cura

Cura on avoimeen lähdekoodiin perustuva viipalointiohjelma, jota 3D-tulostimia valmistava yritys Ultimaker kehittää ja ylläpitää yhteisönsä voimin. Koska Curan juuret ovat avoimessa lähdekoodissa, tuli se markkinoille ilmaisena ohjelmistona ja on pysynyt sellaisena aina tähän päivään asti. Ultimaker päivittää jatkuvasti viipalointiohjelmaansa ja sallii käyttäjiensä kehittää kolmansien osapuolien liitännäisiä varmistukseen ohjelmiston pysymisen teknologian kärjessä.

Cura soveltuu niin aloittelijoille kuin ammattilaisillekin. Ohjelmasta löytyy kaikkien yleisimpien FDM-tulostimien optimiasetukset, ja niiden muokkaaminen jälkikäteen on yksinkertaista. 3D-mallien tuonti Curaan on helppoa, ja niitä voidaan muokata kuten Simplify3D:ssä. Tulostusprosessin simulointi näyttää suutinpään liikkeitä ja arvioi prosessissa kuluvan ajan sekä käytetyn materiaalin määrän. Käyttöliittymässä näkyvät vain kaikista tärkeimmät asetukset, mutta ammattilaisille löytyy säädettäväksi yli 200 erilaista asetusta, jotka ovat ohjelman käytön selkeyttämiseksi piilotettuina. Tukimateriaalin hallinta Curassa ei ole vielä kovin edistyksellistä. Ohjelma osaa luoda tukimateriaalin, sitä voidaan poistaa yksittäisiltä pinnoilta, ja sen lukuisia parametreja voidaan muokata, mutta käyttäjä ei voi manuaalisesti lisätä sitä haluamiinsa kohtiin.

## 5.3 PrusaSlicer

PrusaSlicer on Tšekin Prahassa 3D-tulostimia valmistavan Prusa Researchin oma viipalointiohjelma. Se on vuonna 2011 RepRap-yhteisön avoimeen lähdekoodiin perustuvan Slic3rin jatkokehitetty versio (Slic3r 2019). Slic3r on tunnettu viipalointiohjelmien edelläkävijänä, ja monet nykyisissä viipalointiohjelmissä löytyvistä ominaisuuksista ovatkin saaneet alkunsa siitä.

Slic3rin monimutkaisen käyttöliittymän sijaan PrusaSlicerissa on panostettu selkeyteen ja aloittelijaystävällisyyteen. Ohjelmassa on selkeästi merkitty kolme eri käyttäjämoodia vihreällä (yksinkertainen), keltaisella (edistynyt) ja punaisella (asiantuntija). Näiden merkintöjen avulla käyttäjä osaa muokata asetuksia oman osaamisensa perusteella. Valitettavasti PrusaSlicer tarjoaa valmiit asetukset vain sen omiin 3D-tulostimiin, mutta oman tulostimen tulostusparametrit on helppo syöttää ohjelmaan. 3D-mallin tuonti ja muokkaaminen ohjelmassa on helppoa eikä juuri eroa Simplify3D:stä ja Curasta.

Ohjelmassa on automaattinen tukimateriaalin luonti, mutta asiantuntija-asetuksilla voi tukimateriaalia lisätä myös manuaalisesti haluamiinsa kohtiin. Simulointi näyttää tulostusprosessin kerros kerrokselta, ja eri vaiheet on erotettu väreillä. Lisäksi simulointi laskee prosessissa kuluvan ajan sekä käytettävän materiaalin määrän ja hinnan.

## 6 VIIPALOINTIOHJELMIEN TESTAUS

### 6.1 Vertailumallitiedostot

Viipalointiohjelmien vertailua varten luotiin kuvassa 1 esiintyvät mallitiedostot käyttäen Autodesk Fusion 360 -mallinnusohjelmaa. Vertailuun luotiin kolme erilaista mallitiedostoa erilaisia tarkoituksia varten. Ensimmäinen mallitiedosto on suuri (13,7 Mt) ja geometrialtaan monimutkainen lähes koko tulostustilan täyttävä malli, jonka avulla voidaan vertailla tiedoston ohjelmaan tuomiseen sekä simuloinnin luomiseen kulunutta aikaa. Tätä mallitiedostoa ei kuitenkaan tulosteta, sillä siihen kuluisi useita päiviä. Toinen mallitiedosto on 90 asteen kulmassa oleva kaari, jonka avulla tutkittiin viipalointiohjelmien tukirakenteiden muodostumista sekä irrotettavuutta varsinaisesta kappaleesta. Kolmanteen mallitiedostoon luotiin erilaisia piirteitä, joiden avulla tutkittiin, miten viipalointiohjelmat suoriutuvat mm. mittatarkkuuksista, terävistä reunoista, ohuista seinämistä, piikeistä, rei'istä, silloista sekä jyrkistä ja pyöreistä reunoista.



Kuva 1. Vertailtavat mallitiedostot.

### 6.2 Käytettävä laitteisto

Kaikkia kolmea viipalointiohjelmaa käytettiin vuoden 2015 kannettavalla MacBook Pro -tietokoneella, jonka prosessorina toimi 2.9 GHz:n Intel Core i5 -suoritin. Muistia oli 8 Gt, näytönohjaimena toimi Intel Iris Graphics 6100, ja ohjelmistoversiona oli macOS Mojave 10.14.6.

Vertailumallien tulostaminen suoritettiin samanlaisissa olosuhteissa 20 celsiusasteen lämpötilassa ilmankosteuden ollessa 38 prosenttia. Testikappaleet tulostettiin samalla Creality CR-10 -tulostimella, joka on yksi suosituimmista yksityiskäytössä olevista

FDM-tulostimista. Materiaalina käytettiin espanjalaisen BQ-yhtiön valmistamaa PLA-filamenttia, jonka paksuus on 1.75 millimetriä ja jonka suositeltu tulostuslämpötila on 200-220 celsiusastetta. Väriksi valittiin taivaansininen, jotta laatuero tulosteiden pinnoissa tulisivat selkeämmin esiin.



## 7 VIIPALOINTIOHJELMIEN VERTAILU

Viipalointiohjelmia vertailtiin tässä työssä niiden viimeisimmillä saatavilla olevilla vakailta versioilla, jotka olivat Simplify3D 4.1.2, Ultimaker Cura 4.2.1 ja PrusaSlicer 2.1.0. Koska tässä työssä oli tarkoitus vertailla viipalointiohjelmia ilman asetusten yksityiskohtaisempaa säätöä, ei oletusasetuksiin tehty juurikaan muutoksia. Vertailukelpoisuuden vuoksi asetettiin kaikissa viipalointiohjelmissä kuitenkin kerrospaksuudeksi 0,2 mm, suutinpään nopeudeksi 60 mm/s ja tulostuslämpötilaksi filamentin valmistajan suositus 210 celsiusastetta. Tukirakenteiden vertailua varten valittiin ohjelmissä tukirakenteen muodostus horisontaalisesti 60 asteeseen asti.

### 7.1 Simplify3D-testit

Simplify3D oli vertailtavista ohjelmistoista nopein. Suurikokoisen ja geometrialtaan haastavan 3D-mallin tuonti ohjelmaan kesti alle sekunnin, ja tulostusprosessin simulointiin kului aikaa 57 sekuntia.

Tukimateriaalitestissä Simplify3D muodosti tukimateriaalin siksakkimaisesti tulostusalustasta kappaleen alapintaan saakka. Tukimateriaalia muodostui myös hieman kappaleen reunojen yli, mikä lisäsi kappaleen tuettavuutta. Simplify3D:n tukimateriaali oli kaikkein helpoin irrottaa, mutta se ei jättänyt tuettua pintaa aivan yhtä sileäksi kuin muilla testatuilla kappaleilla. Toisaalta helppo irrotettavuus ei jättänyt kappaleen alareunoihin irrotusjälkiä toisin kuin muiden ohjelmien testikappaleilla.

Sekä piirteiden tulostusta testaavan mallitiedoston tuonti ohjelmaan että sen simulointi kestivät alle sekunnin. Simulointi arvioi tulostusajaksi 45 minuuttia, joka todellisuudessa oli 51 minuuttia 28 sekuntia. Tulostetun testikappaleen reunakohdissa oli selkeitä koloja, joita ei muilla ohjelmistoilla tulostetuissa kappaleissa juurikaan esiintynyt. Testimallissa kahden eri ympyrän seinämän paksuus suunniteltiin niin, etteivät ne mene tasan suutinpään halkaisijan kanssa. Simplify3D oli ainut ohjelma, joka ei osannut täyttää näitä seinämiä. Ohjelma ei myöskään tulostanut suutinpään levyistä 0,4 millimetrin seinämää, joka havaittiin jo simulointivaiheessa sen puuttumisena. Lisäksi filamentin takaisin vetoa eli retraktiota vertailevissa piirteissä, etenkin terävässä pystypiikissä, havaittiin ylimääräistä materiaalia reunoilla. Mittatarkkuudessa Simplify3D oli selkeästi paras, ja terävien reunojen, siltojen sekä kaltevien pintojen tulostus onnistuivat siltä hyvin.

## 7.2 Ultimaker Cura -testit

Ultimaker Cura oli tiedoston tuonnissa ja sen simuloinnissa kokonaiskestoltaan hitain. Ensimmäisen 3D-mallin tuonti ohjelmaan kesti jopa 2 minuuttia 58 sekuntia, ja sen simulointiin kului 58 sekuntia.

Tukimateriaalitestissä Cura loi tukimateriaalia siksakkimaisesti, kunnes 1 mm ennen kappaleen pintaa se muuttui ruudukkomaiseksi paremman pinnanlaadun aikaansaamiseksi. Tukimateriaali tarttui kappaleen pintaan niin tiukasti, että sitä ei ilman pihtejä saanut irti rikkomatta kappaletta. Tarttumiskohdan pinnanlaatu oli Simplify3D:tä vain hieman parempi, mutta luja kiinnittyminen aiheutti irrotuksessa jälkiä kappaleen alareunoihin.

Kolmannen mallitiedoston tuonnissa ohjelmaan kesti noin 4 sekuntia ja sen simuloinnissa alle sekunti. Curan simulointi oli ylivoimaisesti tarkin, sillä se arvioi tulostusajaksi 66 minuuttia, joka todellisuudessa oli 66 minuuttia 13 sekuntia. Testikappaleen tulostuksessa Cura onnistui parhaiten; siinä oli selkeästi tasaisin tulostuspinta niin tasaisella alustalla kuin kaarevilla pinnoillakin. Tämä näkyy etenkin testikappaleen jyrkimmän kohdan parhaimpana alapintana. Cura suoriutui myös parhaiten rektraktiotestissä, sillä pinnoilla ei ollut ylimääräistä materiaalia tai koloja. Ohjelma osasi täyttää kaikki seinämät, se loi parhaimman näköiset sillat, ja sen mittatarkkuus sekä terävien reunojen muodostus olivat hyviä. Mittatarkkuudessa se hävisi Simplify3D:lle, eikä se kyennyt simuloimaan ja tulostamaan 0,4 millimetrin levyistä seinämää.

## 7.3 PrusaSlicer-testit

Suurikokoisen mallin tuonti ohjelmaan kesti vain alle sekunnin, mutta sen simulointiin kului eniten aikaa: 1 minuutti 30 sekuntia.

Tukimateriaalitestissä PrusaSlicer muodosti tukimateriaalia ensin siksakkimaisesti kaksi kerrosta hieman loppua tukimateriaalia leveämmälle pinta-alalle, minkä jälkeen se muodosti uutta siksakkikuviota 90 astetta kääntäen edelliseen. Lähempänä kappaleen pintaa tukimateriaali muuttui samankeskiseksi kappaleen kanssa paremman pinnanlaadun takaamiseksi. Tukimateriaalia myös muodostui kappaleen reunojen ulkopuolelle lisäämään kappaleen tukevuutta. Tukimateriaalin irrotus onnistui helposti käsin, mutta se

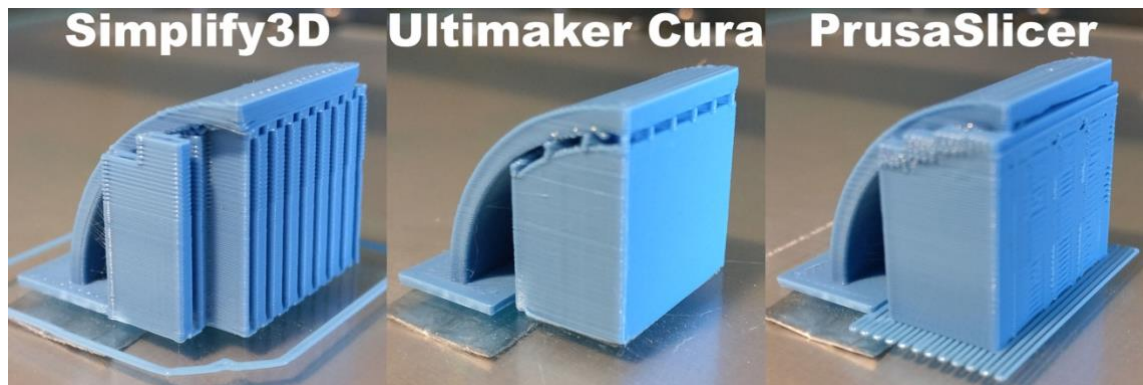
jätti kappaleen alareunoihin ylimääräistä materiaalia. Muuten tuetun pinnan laatu oli yhtä hyvä Curan kanssa.

Kolmannen mallitiedoston tuonti ohjelmaan kesti alle sekunnin ja sen simulointi noin kaksi sekuntia. Simulointi arvioi tulostusajaksi 54 minuuttia 53 sekuntia, joka todellisuudessa oli 59 minuuttia 1 sekunti. PrusaSlicerilla tulostetun kappaleen pinnalla näkyivät selkeästi suutinpään liikeradat ja pieniä koloja tähtikuvion terävissä reunoissa sekä yhden reiän pinnalla. Ohjelma teki muita paksumman ensimmäisen kerroksen, mikä huononsi läpi menevien reikien mittatarkkuutta ja sai ohuimmat urat umpeen. Retraktiosta johtuvia pinnan virheitä voi havaita koko testikappaleen alueella johtuen ohjelman alkuperäisasetuksissa muita selvästi alhaisemmasta retraktiomatkasta, joka oli 2 mm. Simplify3D:ssä ja Curassa retraktiomatka oli taas 5 mm. Muutoin mittatarkkuus, sillat ja kaltevien tasojen pinnanlaatu olivat lähellä Curan tasoa. PrusaSlicer oli ainut, joka kykeni tulostamaan 0,4 millimetrin levyisen seinän, mutta kaikkien kyseisellä ohjelmalla tulostettujen seinien mittatarkkuus oli huono.

## **7.4 Vertailun tulokset**

Nopeustestien perusteella suurikokoisia kappaleita tulostavan ja vanhemman tietokoneen omaavan käyttäjän paras vaihtoehto olisi Simplify3D sen nopeuden ja keveyden kannalta. Simplify3D suorittaa esim. mallin skaalauksen ja kahdentamisen välittömästi, kun taas Curalla tämä voi viedä jopa minuutteja.

Kuvassa 2 nähtävä tukimateriaalin muodostus alkuperäisillä asetuksilla oli hyvin erilainen kullakin ohjelmalla, vaikkakin kaikki muodostivat sen enimmäkseen siksakkimaisesti. Simplify3D ja PrusaSlicer käyttivät tukimateriaalin muodostukseen enemmän materiaalia ja aikaa kuin Cura mutta olivat myös tukevampia. Curassa tätä oli ehkä kompensoitu tukimateriaalin lujalla tarttumisella kappaleen pintaan, minkä takia irrotuksessa jouduttiin käyttämään apuvälineitä ja pinnanlaatu kärsi. Mutkikkaampia kappaleita tulostavan kannalta Simplify3D ja PrusaSlicer ovat etulyöntiasemassa, sillä näillä ohjelmilla tukimateriaalia voidaan muokata hyvin vapaasti.



Kuva 2. Tukimateriaalin muodostus 90 asteen kulmassa olevaan kaareen ohjelmien alkuperäisillä asetuksilla.

Viimeisten testikappaleiden (Kuva 3) tulostuksessa havaittiin selkeitä eroja eri ohjelmien alkuperäisten asetusten välillä. Vaikka tulostuksen pääparametrit eli kerrospaksuus ja tulostusnopeus asetettiin kaikissa samaksi, suoriutuivat PrusaSlicer noin 15 prosenttia ja Cura noin 29 prosenttia Simplify3D:tä hitaammin, mikä oli yllättävää näinkin pientä kappaletta tulostaessa. 3D-tulostuksessa hitaus merkitsee usein parempaa pinnanlaatua, mikä näkyikin Curalla tulostetussa testikappaleessa. Cura arvioi tulostusprosessin keston minuutilleen oikein, kun taas Simplify3D arvioi keston alakanttiin noin 13 prosenttia ja PrusaSlicer noin 7 prosenttia.

Mittatarkkuudessa Simplify3D päihitti Curan ja PrusaSlicerin selvästi. Työntömitalla mitattaessa Simplify3D:n testikappaleen mittatarkkuus vaihteli ainoastaan välillä 0 – +0,05 mm, kun se Curalla vaihteli välillä -0,16 – +0,17 mm ja PrusaSlicerilla -0,25 – +0,12 mm. Lisäksi Simplify3D kykeni ainoana ohjelmana muodostamaan kaikki seitsemän uraa niiden umpeutumatta – jopa kapeimman 0,05 mm:n uran. Molemmat Cura sekä PrusaSlicer onnistuivat vain neljän leveimmän uran muodostamisessa kapeimman uran ollessa 0,3 mm.

Siltojen, terävän pystypiikin, terävien reunojen, kaarien ja pyöreiden pintojen muodostuksessa ei testikappaleissa havaittu juurikaan eroja. Curan testikappaleen erinomainen pinnanlaatu ja jyrkän kaaren muodostus olivat todennäköisesti tulosta alkuperäisasetuksissa seinämien alhaisemmasta tulostusnopeudesta. PrusaSlicerin testikappaleen pinnoilla ylimääräinen materiaali on todennäköisesti helppo poistaa muuttamalla filamentin retraktiomatka samaksi kuin muilla ohjelmilla.



Kuva 3. Testikappaleiden tulostus alkuperäisillä asetuksilla.

On huomioitavaa, että testikappaleet tulostettiin lähestulkoon ohjelmien alkuperäisillä asetuksilla ja niiden vähäisellä muokkauksella päästäisiin jo hyvin samanlaisiin tulostusaikoihin ja pinnanlaatuihin. Kappaleen laatuun vaikuttavia ominaisuuksia, joita ei asetuksia säätämällä voi muuttaa, ovat ohjelmien pienten piirteiden tunnistus ja mittatarkkuus joillakin piirteillä.

## 8 YHTEENVETO

Viipalointiohjelmien käytön yksinkertaistamiseen ja aloittelijaystävällisyyteen on viime aikoina panostettu erittäin paljon. Käyttöliittymä oli kaikissa ohjelmissa hyvin selkeä ja samankaltainen. Yleisimmät asetukset löytyivät selkeästi jaoteltuina välilehtien alta tarkempien asetusparametrien ollessa piilossa mutta tarpeen mukaan kokeneelle käyttäjälle helposti löydettävissä. 3D-tiedoston tuonti ja sen muokkaaminen onnistuivat kaikissa hyvin samankaltaisen kaavan mukaan. Ennen sekavanolaiset käyttöliittymät ovat muovautuneet niin selkeiksi, ettei ohjelman käytettävyyks ole enää suurikaan peruste viipalointiohjelman valinnalle.

Nopeutta, erinomaista mittatarkkuutta, yksityiskohtaista simuloinnin tarkastelua ja tukimateriaalin säätömahdollisuutta haluavan valinta on Simplify3D, jos 149 Yhdysvaltojen dollaria ei tunnu liian suurelta investoinnilta. Ultimakerin 3D-tulostimen omistavan tai erinomaiseen pinnanlaatuun vähäisimmällä asetusten säädöillä tähtäävän valinta on Ultimaker Cura. PrusaSlicer sopii parhaiten käyttäjälle, joka omistaa Prusa Researchin 3D-tulostimen tai haluaa siirtyä Slic3rista tuttuun mutta entistä monipuolisempaan ohjelmaan.

Yksityiskäyttöön sopivimman viipalointiohjelman valinta on nykyään vaikeaa, sillä ne muistuttavat hyvin paljon toisiaan eikä yhdelläkään ohjelmista ole selkeää kilpailuvalttia toiseen nähden. Simplify3D oli ennen selkeän käyttöliittymänsä ja runsaiden ominaisuuksiensa ansiosta helppo valinta jopa hintaansa nähden, mutta tiheästi päivittyvät Cura ja PrusaSlicer ovat ottaneet tämän etumatkan kiinni ja ovat vieläpä ilmaisia. Kaikkien viipalointiohjelmien säätömahdollisuudet ovat jo niin valtavat, että niillä päästään laadultaan hyvin samankaltaisiin 3D-tulosteisiin.

# LÄHDELUETTELO

Crump, S., (Stratasys), 1989. Apparatus and method for creating three-dimensional objects [verkkodokumentti]. United States Patent 5121329.

Dormehl, L., 2019. The brief and building history of 3D printing. Digitaltrends [verkkodokumentti]. Portland: Digitaltrends. Saatavissa: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/history-of-3d-printing-milestones/> [viitattu 6.9.2019]

Horvath, J., Cameron, R., 2018. Mastering 3D Printing in the Classroom, Library, and Lab. New York: Apress, 310 s. ISBN 978-1-4842-3501-0

Hoskins, S., 2018. 3D Printing for Artists, Designers and Makers. 2 painos. Lontoo: Bloomsbury Visual Arts, 168 s. ISBN 978-1-4742-4867-9

Hull, C., (UVP), 1986. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography [verkkodokumentti]. United States Patent 4575330.

Kloski, LW., Kloski, N., 2016. Getting Started with 3D Printing: A Hands-on Guide to the Hardware, Software, and Services Behind the New Manufacturing Revolution. San Francisco: Maker Media, 219 s. ISBN 978-1-680-45020-0

Redwood, B., Schöffler, F., Garret, B., 2018. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. Amsterdam: 3D Hubs B.V., 304 s. ISBN 978-90-827485-0-5

Shapeways, 2018. Shapeways, About [verkkodokumentti]. Eindhoven: Shapeways. Saatavissa: <https://www.shapeways.com/about> [viitattu 6.9.2019].

Slic3r, 2019. Slic3r, About [verkkodokumentti]. Rooma: Slic3r. Saatavissa: <https://slic3r.org/about/> [viitattu 16.9.2019].

3D Printing Business Media, 2019. Simplify3D [verkkodokumentti]. Lontoo: 3DPBM. Saatavissa: <https://www.3dprintingbusiness.directory/company/simplify3d/> [viitattu 16.9.2019].

3D Hubs, 2018. What is 3D Printing? The definitive guide [verkkodokumentti]. Amsterdam: 3D Hubs B.V. Saatavissa: <https://www.3dhubs.com/get/3d-printing-guide/> [viitattu 5.9.2019]. 46 s.