



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Alexi Istanmäki

Viipalointiohjelmien soveltuvuus ammattimaiseen 3D-tu- lostukseen

Opinnäytetyö
Kevät 2022
Automaatiotekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Automaatiotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Koneautomaatio

Tekijä: Aleksi Istanmäki

Työn nimi: Viipalointiohjelmien soveltuvuus ammattimaiseen 3D-tulostukseen

Ohjaaja: Samuel Suvanto

Vuosi:2022

Sivumäärä:67

Liitteiden lukumäärä:2

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää suomalaiselle 3D-tulostimia suunnittelevalle ja valmistavalle miniFactory-osakeyhtiölle, onko suosituimpien 3D-tulostuksen viipalointiohjelmien välillä merkittäviä eroja saatavilla olevien ilmaisten ohjelmistojen joukossa. Tavoitteena on tehdä kattava tutkimus ja mitata eri viipalointiohjelmien soveltuvuutta yrityksen tulostimille.

Tavoitteena oli selvittää, säilyykö tulostettavien mallien laatu samana muiden ohjelmien kanssa ja onko muissa ohjelmissa samat säätöominaisuudet ja asetukset kuin yrityksen oletusohjelmassa. Mikäli vastaus tutkimuskysymykseen osoittautuu positiiviseksi, voisi teoriassa kynnys ostaa yrityksen valmistamia tulostimia laskea huomattavasti. Opinnäytetyön teoriaosuudessa tutkittiin 3D-tulostusta yleisemmin sekä keskityttiin yleisimpiin tulostustekniikoihin, viipalointiohjelmiin ja itse tulostamiseen. Työn käytännön osiossa etsittiin viipalointiohjelmien joukosta lupaavimmat ohjelmistot, joita testattiin käytännössä viipaloimalla tulostettava testikappale ja tulostamalla se yrityksen valmistamalla 3D-tulostimella.

Työn tuloksena miniFactory sai kattavan tiedon viipalointiohjelmistojen ilmaisversioiden nykytilanteesta. Tulosteiden laadulliset erot ja ohjelmistojen helppokäyttöisyys sekä tarvittavien ominaisuuksien löytyminen olivat etusijalla ohjelmistojen valitessa. Yritys voi todentaa toimivansa oikean ohjelmiston parissa. Lisäksi yritys sai tietää, mitä ominaisuuksia muissa viipalointiohjelmissa on jatkossa syytä seurata ja mitä ei.

¹ Asiasanat: 3D-tulostimet, 3D-mallinnus, 3D-tulostus, 3D, kolmiulotteisuus, CNC,

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Automation Engineering

Specialisation: Machine Automation

Author: AleksI Istanmäki

Title of thesis: Suitability of Professional Programs for 3D-printing

Supervisor: Samuel Suvanto

Year:2022

Number of pages:67

Number of appendices:2

The purpose of the thesis was to learn if there are any differences between the most popular 3D-printing slicer programs. There are available both free and paid versions. The aim was to conduct a comprehensive study on the profitability of different slicing programs. It was important to examine whether the quality of the copies is the same when using other programs and whether other programs have the same adjustment features and settings as the default program, Simplify3D, used by the company. If the research results prove to be positive, i.e., if the printers of the company can be used with other slicing programs, it means that the profitability of in-house printers will increase and the threshold for buying their products will fall considerably. What justifies this statement is that the number of skilled users could theoretically multiply, and many hours of additional training and possible recruitment could be avoided.

The thesis studied 3D-printing in general, concentrating on the most common printing technologies, applications, and results.

The thesis project progressed in an exemplary manner with only minor complications and challenges. The printers of the company were interesting and easy to use. The study included an appropriate amount of information search and practice.

As the result of the thesis, miniFactory received comprehensive information on the status of free versions of slicer software currently available. Qualitative differences in printouts and the ease of use of licenses, as well as finding the necessary features, were priorities when choosing the software. MiniFactory found out that it has chosen the right software for their printers. In addition, the company learned which features in other slicer programs should be monitored in the future and which ones are not that relevant.

¹ Keywords: 3D-printing, 3D-printer, slicer, freeware, Simplify3D, printing technologies, miniFactory, printer, additive manufacturing,

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	1
Thesis abstract	2
SISÄLTÖ	3
Kuvaluettelo.....	5
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	8
1 JOHDANTO	9
1.1 Työn tausta	9
1.2 Työn tavoite.....	9
1.3 Työn rakenne	9
1.4 Yritysesittely	10
2 3D-TULOSTAMINEN.....	11
2.1 3D-tulostamisen historia.....	11
2.2 Tulostamisen teknologia ja tekniikka	11
2.3 FFF-Teknologia.....	13
2.4 Viipalointi ja G-koodi.....	15
2.5 Yleisimmät käyttötarkoitukset.....	18
2.6 Factory Ultra 3D -tulostin.....	19
3 VIIPALOINTIASETUKSET	21
3.1 Lämpötila.....	21
3.2 Tason korkeus.....	23
3.3 Nopeus.....	24
3.4 Tulostettavan kappaleen täyttö.....	26
3.5 Tartunta avustaja tulostusalustalle	27
3.6 Tukirakenne.....	28
3.7 Yhteenveto	29
4 TULOSTAMISEEN VALMISTELU	31
4.1 3D-mallin tarkistus viipalointiohjelmassa	32
4.2 Suuttimet ja alusta.....	33

4.3 Tulostuslangan kunnan tarkastus, määrä ja johtavuus.....	34
4.4 Tulostimen kalibrointi.....	36
5 VIIPALOINTIOHJELMIEN SELVITYS	39
5.1 Lähtökohta	39
5.2 Tutkimustyö.....	39
5.3 Tulos	40
5.4 Ohjelmistojen valinta jatkotutkimuksiin	42
6 TULOSTAMINEN	43
6.1 Simplify3D.....	43
6.2 CraftWare Pro	45
6.3 PrusaSlicer.....	49
7 TULOKSET	59
8 POHDINTAA JA YHTEENVETO	61
LÄHTEET	62
LIITTEET	64

Kuvaluettelo

Kuva 1. 3D Printer Support Test, tulostuspiireissä laajalti käytetty tukimateriaalien testaamiseen käytetty kappale (Ultimaker, 2021).	14
Kuva 2. 3D Printer Support Test Simplify3D -ohjelmistolla generoituna.	15
Kuva 3. Simplify3D-ohjelmassa generoitu .gcode-tiedosto avattuna Notepad++-ohjelmalla.....	17
Kuva 4. miniFactory Ultra 3D -tulostin, miniFactoryn arkistoista saatu studiokuva.	20
Kuva 5. Suuttimen lämpötilatorni. (O'Connell, 2021).	22
Kuva 6. Lämmitettävän kammion selkeyttävä kuva (Minifactory, i.a. -a).....	23
Kuva 7. Tason korkeuden laadullisia eroja verrattuna tason korkeuteen, suuttimen leveyteen ja nopeuteen. (43dprint, 2021).....	24
Kuva 8. Feedrate-nopeuksia havainnollistava kuva. (easy3dhome, 2021).	25
Kuva 9. Suosituimpia täyttökuvioita tulostettaville osille (tianseoffice, 2019).	26
Kuva 10. Tartunta-avustaja tulosteelle Simplify3D-ohjelmalla generoituna.....	28
Kuva 11. miniFactory Ultralla tulostettu kappale, missä vasemmassa kappaleessa on tukirakenne paikallaan ja oikealla sama kappale ilman tukea. MiniFactory arkistoista saatu studiokuva.	29
Kuva 12. Tulostuslaatuun vaikuttavat tekijät tiivistetysti (3dprinterchat, 2017).....	30
Kuva 13. 3DBenchy (3dbenchy, 2020).	31
Kuva 14. 3DBenchy reikä kyljessä esimerkkinä siitä, että internetistä ladattu kappale ei ole alkuperäinen tai on muokattu, tarkoituksenaan vahingoittaa tai vaikeuttaa toisten työtä. Kuvassa Simplify3D-ohjelmalla generoitu 3DBenchy-malli esimerkkinä Viipalointiohjelman asetukset.....	33

Kuva 15. CraftWaren laskema arvio tulostuslangan tarpeesta sekä tulostusajoista. CraftWarella generoitu esimerkki.....	34
Kuva 16. Tulostuslangan lämmitetty kammio. Vasemmalla oleva tulostuslanka on loppumassa.	35
Kuva 17. miniFactory Ultran tulostuskammio on ruostumatonta terästä.	37
Kuva 18. Lämpötilojen tasaantumisten vuoksi odotettava aika.....	37
Kuva 19. Filamentin viime hetken lataaminen ennen tulostamista. Ylärivillä voidaan todentaa 1. Suutin 1 lämpö, 2. Suutin 2 lämpö, 3. Pedin lämpö, 4. Tulostuskammion lämpötila ja 5. Tulostuslangan kammion lämpötila.....	38
Kuva 20. Viipalointiohjelmien valintaan tehty Excel-taulukko.....	41
Kuva 21. Simplify3D -ohjelman generoimat arviot.	43
Kuva 22. Kappaletta on tulostettu noin 50 %.	44
Kuva 23. Simplify3D-ohjelmistolla generoitu ja tulostettu valmis 3DBenchy-malli. Kun oli saatu vertailukelpoinen malli tulostettua, voitiin lähteä tulostamaan uudella ohjelmistolla luotuja G-koodeja. Tavoitteena oli päästä vähintään yhtä laadukkaalle tasolle tulostusajasta riippumatta, mutta kuitenkin niin, ettei aikaa menisi enemmän.	45
Kuva 24. CraftWare Pro-ohjelmisto.	46
Kuva 25. Simplify3D käyttää takaisinvedossa syöttönopeutta 2,60 mm ja nopeus on 25 mm/s. Tämän kuvan malli on tehty CraftWarella syöttönopeudella 0,15 mm ja nopeus on 15 mm/s	47
Kuva 26. Osa takaisinvedon tutkimiseen käytetyistä tiedostoista.	47
Kuva 27. CraftWare-arvot ilman takaisinvetoa.....	48
Kuva 28. CraftWare Pro -ohjelmistolla generoitu ja tulostettu valmis 3DBenchy-malli.....	49
Kuva 29. PrusaSlicer-viipalointiohjelma.....	50

Kuva 30. PrusaSlicerin generoimat erittäin tarkasti jaotellut arvot.	51
Kuva 31. Pursottimen ja lämpöpedin välys liian suuri.	52
Kuva 32. PrusaSlicerin ensimmäinen loppuun asti päässyt tulostus.	53
Kuva 33. Solid Edgellä muokattu 3DBenchy sopivan kokoiseksi.	54
Kuva 34. Kuva PrusaSlicerin tuuletusasetuksista.	55
Kuva 35. Onnistunut 3DBenchyn savupiippu.	55
Kuva 36. Epäonnistunut tulostus. Hytin puolikas oli katkennut tulostuksen aikana pois, mutta tulostus oli silti jatkunut loppuun saakka ilman uusia ongelmia.	56
Kuva 37. PrusaSlicerilla tehty onnistunut tulostus.	57
Kuva 38. Vasemmalla PrusaSlicerilla ja oikealla Simplify3D:llä tulostettu malli.	58

Käytetyt termit ja lyhenteet

3D	Tarkoittaa kolmiulotteista kohdetta.
ABS	Akrylinitriilibutadieenistyreeni on eräs kestävä muovilaatu.
CAD	Computer-aided Design tai tietokoneavusteinen suunnittelu. Käytetään tietokonetta apuvälineenä etenkin insinöörien ja arkkitehtien harjoittamassa suunnittelutyössä.
FFF	Fused filament fabrication. Sulatetun filamentin valmistus on 3D-tulostusprosessi, jossa käytetään jatkuvaa kestumuovimateriaalista valmistettua filamenttia.
G-koodi	G-koodi on yleisimmin käytetty työstökoneen numeerisen ohjauksen ohjelmointikieli.
Matriisi	Matriisi on matematiikassa suorakulmainen riveihin ja sarakkeisiin jaettu taulukko, jonka alkiot ovat lukuja tai lausekkeita.
PLA	Polylaktidi on yksi kenties tunnetuimmista biopohjaisista biohajojavista muoveista, yleisesti käytetty 3D-tulostamisessa.
Slicer	Viipalointi tai viipalointiohjelma, on tietokoneohjelmisto, jota käytetään suurimmassa osassa 3D-tulostusprosesseja 3D-objektimallin muuntamiseksi tulostimille ymmärrettävään muotoon.
STL, OBJ, 3MF	3D-mallien yleisimpiä tiedostomuotoja.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Työn toimeksiantajana toimi miniFactory Oy Ltd. Työn aihe syntyi yrityksen tarpeesta selvittää eri viipalointiohjelmistojen soveltuvuutta yrityksen valmistamien 3D-tulostimien 3D-mallien viipalointien laadintaan. Yritys on käyttänyt tulostimillaan ainoastaan Simplify3D-ammattilaisohjelmistoa, joka vaatii kertamaksuisen lisenssin. Yrityksen tavoitteena on tutkia, voidaanko heidän tulostimiaan käyttää lukuisilla ilmaisohjelmistoilla, poissulkematta lisenssin vaativia ohjelmistoja ilman, että tulostuksen korkeat laatutavoitteet menetetään.

Koska yrityksen tulostimien tuottamat laadukkaat komponentit ovat kestävyydeltään jopa metallin tasoisia ja niitä voidaan nähdä muun muassa ajoneuvo- ja lentokoneteollisuuden tuotteissa, edut eri viipalointiohjelmien käytöstä olisivat huomattavat asiakaskunnan kasvattamisessa.

1.2 Työn tavoite

Tavoitteena on tehdä kattava tutkimus eri viipalointiohjelmien soveltuvuudesta yrityksen tulostimelle. Olennaisena on tutkia, pysyykö tulostettavien kappaleiden laatu samana muilla ohjelmilla ja onko muilla ohjelmilla mahdollisuus samoihin säätöominaisuuksiin ja asetuksiin kuin yrityksen oletusohjelmalla. Mikäli vastaus kysymykseen osoittautuu positiiviseksi, eli yrityksen tulostimia pysytään käyttämään muilla viipalointiohjelmissa, se voisi tarkoittaa asiakasomisteisten tulostimien kannattavuuden kasvua, ja samalla kynnyksen ostaa heidän tarjoamiaan palveluita laskisi. Asiakaskunta voisi potentiaalisesti laajentua merkittävästi, koska omien 3D-tulostimien hankkiminen yritysten käyttöön helpottuisi.

1.3 Työn rakenne

Tutkimus alkaa johdannolla, jossa on kerrottu työn taustoista, tavoitteista, rakenteesta sekä yrityksestä, johon tutkimus toteutetaan. Teoriaosassa käsitellään ja perehdytetään lukija yleisesti 3D-tulostamiseen. Siinä kerrotaan myös yrityksen omasta tulostimesta tarkemmin. Osiossa on keskitytty syventävästi tulostuslaadullisiin näkökulmiin ja itse

tulostamisen valmistelun teoriaan, sillä se on olennainen osa tätä työtä. Teoriaosuuden jälkeen kerrotaan viipalointiohjelmien valinnoista. Tämän jälkeen siirrytään itse tulostamisen vaiheeseen edellisessä vaiheessa valittuja ohjelmistoja käyttäen. Tulostusvaihe-osio kertoo tarkasti eriteltynä, minkälaisia tuloksia saatiin jokaisella ohjelmalla. Työosuuden jälkeen kerrotaan saaduista tuloksista vielä uudelleen kootusti. Pohdinnan ja yhteenvedon jälkeen lopussa esitellään työssä käytetyt lähteet sekä liitteet.

1.4 Yritysesittely

miniFactory Oy Ltd on perustettu joulukuussa 2012 (MiniFactory, i.a. -b). Yrityksellä on toistakymmentä yhteistyökumppania maailmanlaajuisesti. Yritys käyttää muoviteollisuudessa materiaalia lisääviä teknologioita. Yritys tarjoaa ammattilaisille ympäri maailmaa luotettavia 3D-tulostinlaitteistoja. Yrityksen päämarkkina on Euroopassa, mutta myynti on vilkasta myös Aasiassa ja USA:ssa. miniFactoryn visio on olla kansainvälinen johtaja osatuotannon innovaatioissa.

miniFactoryn nykyinen tarjonta on rakennettu päätuotteen ympärille (MiniFactory, i.a. -b). Päätuotteena on erikoismuovien teolliseen 3D-tulostukseen suunniteltu Ultra 3D -tulostin. Laitteet valmistetaan Seinäjoella ja niiden suomalaisuusaste on yli 90 %. Lippulaivat tuotteidensa lisäksi yhtiö tarjoaa myös prosessinvalvontajärjestelmiä, jotka tukevat painettujen osien ammattimaista valmistusta ja sertifiointia. Jokaisen myydyn Ultra 3D -tulostimen lisäksi laitteistolle tarjotaan koulutus miniFactoryn työntekijöiden tai valtuutetun jälleenmyyjän toimesta laitteiston loppukäyttäjälle. Vähittäismyyntiverkoston lisäksi miniFactoryn verkostoon kuuluvat maailman johtavat materiaalivalmistajat.

2 3D-TULOSTAMINEN

3D-tulostaminen tai ainetta lisäävä valmistaminen on prosessi, jossa digitaalisesta tiedostosta tehdään kolmiulotteisia kiinteitä esineitä (3DPrinting, i.a.). 3D-tulostetun objektin luominen toteutetaan ainetta lisäävillä prosesseilla. Additiivisessa prosessissa objekti luodaan asettamalla peräkkäisiä materiaalikerroksia, kunnes objekti on luotu. Jokainen näistä kerroksista voidaan nähdä ohueksi viipaloituna poikkileikkauksena kohteesta. 3D-tulostus on vastakohta ainetta poistavalle valmistukselle, jossa leikataan/koverretaan metalli- tai muovipala esimerkiksi jyrsinkoneella. 3D-tulostuksen avulla voidaan tuottaa monimutkaisia muotoja käyttämällä vähemmän materiaalia kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä.

2.1 3D-tulostamisen historia

Keksimisestään lähtien ja jo 50 vuoden ajan 3D-tulostustekniikka on kehittynyt nopeasti, ja sillä on ollut merkittäviä vaikutuksia sekä teollisessa että kaupallisessa maailmassa (Siencedirect, 2018). Stereolitografia, selektiivinen lasersintraus ja sulatepinnoitusmallinnus olivat ensimmäisiä laajalti menestyneitä 3D-tulostusmenetelmiä, joita käytettiin alun perin teollisten prototyyppien valmistukseen. 3D-tulostustekniikka kehitettiin pian käytettäväksi laajamittaiseen valmistukseen useilla aloilla, erittäin monimutkaisten osien suunnitteluun ja jopa henkilökohtaiseen käyttöön. Erityisesti terveydenhuollossa 3D-tulostus helpottaa potilaskohtaisempia lääketieteellisten ratkaisujen löytämistä, kuten leikkauksen suunnittelua ja implanttien suunnittelua. Lisäksi 3D-biotulostusteknologialla on olennainen rooli kudostekniikan ja biolääketieteellisen tutkimuksen edistämisessä. Kun 3D-tulostus kehittyy jatkuvasti, sillä on todennäköisesti suuri vaikutus terveydenhuoltoon tulevaisuudessa.

2.2 Tulostamisen teknologia ja tekniikka

3D-tulostus voi luoda fyysisiä objekteja suunnitellusta geometrisesta matriisista lisäämällä peräkkäin materiaalia (3Dprinting, i.a.). Tällä hetkellä 3D-tulostusta käytetään ensisijaisesti kustomoidun materiaalin tuottamiseen, kuten esimerkiksi sydänpumppuihin, korukokoelmiin tai 3D-tulostettuihin sarveiskalvoihin. Esimerkkejä yksittäisistä 3D-tulostetuista kohteista ovat mm. PGA-rakettimoottori tai terässilta Amsterdamissa. 3D-tulostusta harjoitetaan eri teollisuudenaloilla, kuten rautatie-, avaruus-, ilmailu- tai elintarviketeollisuudessa

sulkematta pois yksityisten henkilöiden projekteja kuten työkaluja tai figuureja (3DPrinting, i.a.). 3D-tulostustekniikka on saanut alkunsa kolmiulotteisesta kerros kerrokselta -valmistustekniikasta. Rakenteet tulevat suoraan tietokoneavusteisesta suunnittelusta (CAD). 3D-tulostus avaa uusia mahdollisuuksia monille, varsinkin yrityksille, jotka haluavat parantaa tuotantotehokkuutta ja omavaraisuutta. Perinteiset kestopuovut (PLA, ABS jne.), keramiikka, grafeenipohjaiset materiaalit ja metalli ovat materiaaleja, jotka voidaan tulostaa käyttämällä 3D-tulostustekniikkaa.

Teknologiana 3D-tulostuksella on potentiaalia kehittää monia teollisuudenaloja sekä muuttaa tuotantolinjoja (3DPrinting, i.a.). 3D-tulostuksen käyttöönotto lisää tuotantonopeutta ja alentaa kustannuksia. Samaan aikaan kuluttajien kysynnällä on enemmän vaikutusvaltaa lopputuotteeseen sekä sen tuotantoon. 3D-tulostusteknologiaa käytettäessä globaalien kuljetusten tarve on merkittävästi vähentynyt. Syynä tälle on mahdollisuus käyttää energiaa ja aikaa säästävää kalustonseurantatekniikkaa tuotantolaitosten sijaitessa lähempänä loppukäyttäjää. 3D-tulostustekniikan käyttöönotto voi muuttaa yrityksen logistiikkaa. Yritysten logistiikka pystyy hallitsemaan koko prosessin sekä tarjoamaan kattavammat ja alusta loppuun saakka ulottuvat palvelut.

Samaan aikaan 3D-tulostustekniikan käyttöönotolla valmistuksessa on myös haittoja. Esimerkiksi 3D-tulostustekniikan käyttö vähentää valmistustyövoiman käyttöä (3DPrinting, i.a.). Tämä vaikuttaa automaattisesti suuresti niiden maiden talouteen, jotka ovat erityisen riippuvaisia matalan ammattitaitovaatimuksen työpaikoista. 3D-tulostusteknologian varjopuolia on myös rikollisuus. Tapauksista saa välillä lukea uutisista, myös Suomessa. 3D-tulostamisen avulla käyttäjät voivat tulostaa monenlaisia esineitä, kuten veitsiä, aseita ja muita vaarallisia objekteja. Siksi 3D-tulostuksen käyttöä ja myyntiä tulisi jossain määrin kyetä seuraamaan terrorismin estämiseksi niin etteivät rikolliset saa kehiteltyä arsenaalia viranomaisten sitä huomaamatta. Myös tuotteiden väärentäminen on helppoa, mikäli väärentäjät saavat käsiinsä tuotteen piirustukset tai mallit. Tämä johtuu siitä, että 3D-tulostustekniikan käyttö on yksinkertaista ja nykyään alkuun pääsee hyvin pienellä rahoituksella.

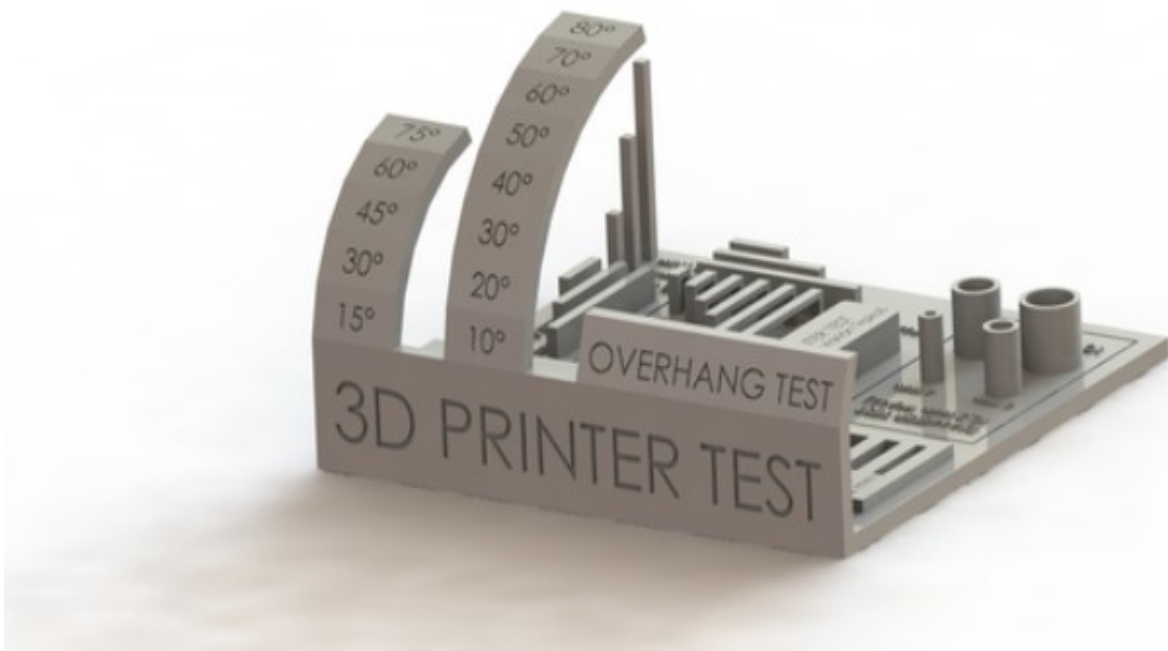
2.3 FFF-Teknologia

Koska miniFactory Ultra käyttää FFF-teknologiaa (eng. Fused Filament Fabrication), on hyvä tutustua aiheeseen lähemmin, koska FFF-3D-tulostusta käytetään laajalti valmistusteollisuudessa nopean läpimenoajan vuoksi (Ultimaker, 2021). 3D-tulostimet tuottavat nopeasti esimerkiksi työkaluja ja varaosia, jotka ylläpitävät tuotantolinjan maksimaalista käytettävyyttä ja tuottavuutta korvaamalla rikkoutuneita osia. Niitä käytetään joustavasti loppukäyttöosien, kuten mittilaustyönä valmistettujen laatumittareiden tai pienten erien ensisajojen luomiseen, nopeuttamaan tuotteen markkinoille tuloa.

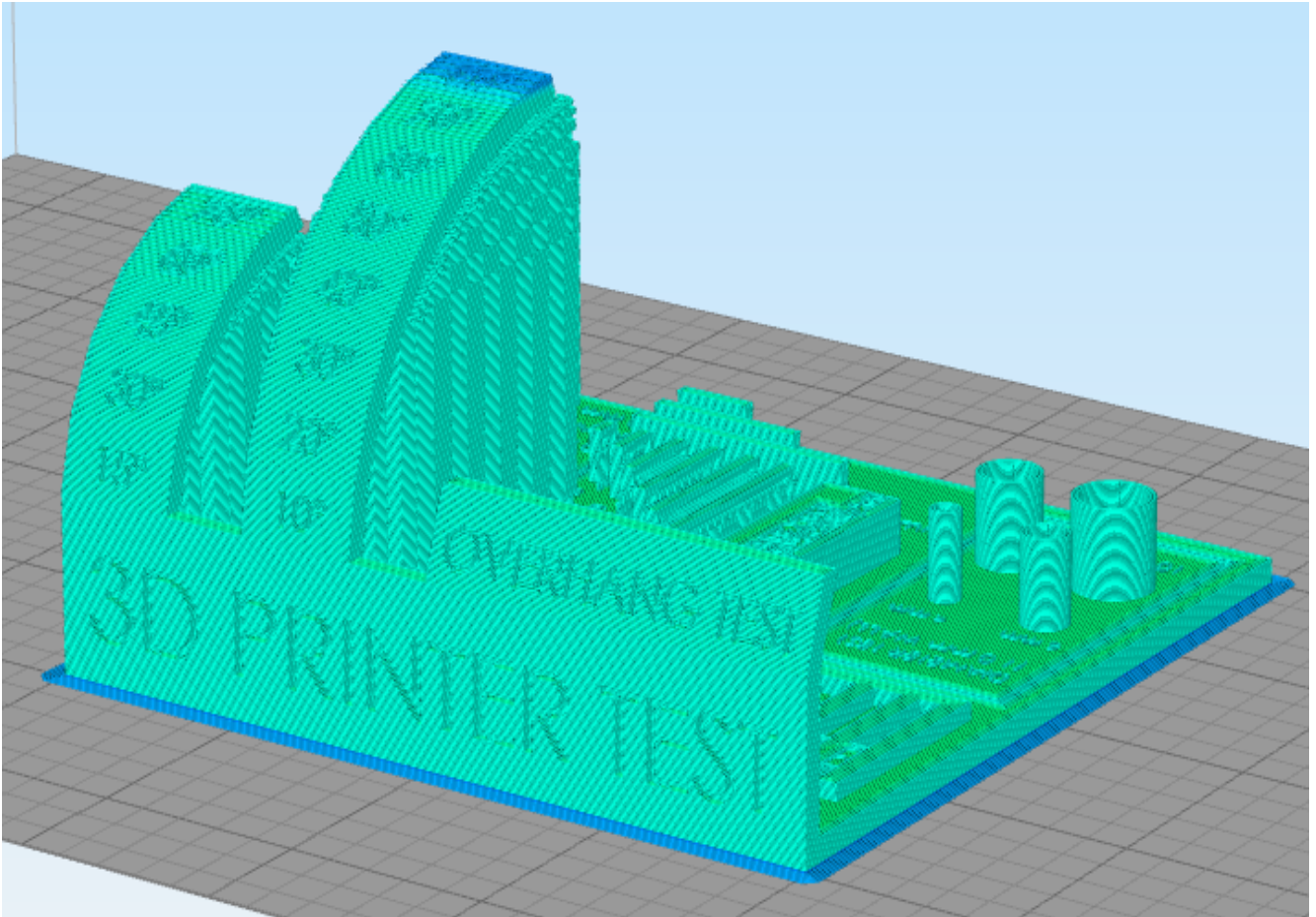
Prototyyppejä tehtäessä edulliset materiaalit ja lyhyet tulostusajat tekevät FFF-3D-tulostuksesta ihanteellisen lääketieteellisten yksilökohtaisten proteesien suunnitteluprosessiin (Ultimaker, 2021). 3D-tulostettujen prototyyppien avulla voidaan testata toiminnallisesti teknisiä osia tai visualisoida konsepteja ja valmistaa esimerkiksi suunnitteluvaiheessa olevien tehdassolujen fyysisiä simulaatioita, toisin sanoen pienoismalleja.

Muovipolymeerit ovat eniten käytettyjä FFF-teknologiassa, ja niitä onkin tarjolla lukemattomiin käyttötarkoituksiin (Ultimaker, 2021). Komposiitteja, joissa polymeerit yhdistetään hiili-, metalli-, lasikuituihin tai muiden materiaalien kuituihin, käytetään myös laajasti erilaisiin rakenteellisiin kohteisiin, vaikka niitä ei voidakaan tulostaa luotettavasti kaikilla FFF-3D-tulostimilla. Teknisesti on mahdollista tulostaa myös elintarvikkeita ja biologisia tahnoja 3D-tulostustekniikalla, vaikka tämä on tyypillisesti varattu kokeellisiin tai tutkimussovelluksiin.

Toinen tärkeä materiaaliluokka FFF-tulostimille tunnetaan nimellä "tukimateriaali" (Ultimaker, 2021). Tätä tarvitaan, kun osan suunta tai muoto tekee mahdottomaksi tulostaa alhaalta ylöspäin esimerkiksi osa, jossa on suuri ulkonema (kuva 1). Tukimateriaalit on suunniteltu helposti irrotettaviksi ja ne yleensä generoidaan kuvan (kuva 2) mukaisesti automaattisesti viipalointiohjelmalla.



Kuva 1. 3D Printer Support Test, tulostuspiireissä laajalti käytetty tukimateriaalien testaamiseen käytetty kappale (Ultimaker, 2021).



Kuva 2. 3D Printer Support Test Simplify3D -ohjelmistolla generoituna.

FFF-3D-tulostimien materiaali myydään tyypillisesti filamenttirullina, joista kukin sisältää 250 – 1000 grammaa materiaalia (Ultimaker, 2021). Materiaali voi maksaa yhden kilogramman rullissa alle 20 eurosta aina yli 400 euroon saakka.

2.4 Viipalointi ja G-koodi

Viipalointiohjelma (englanniksi *slicer*) on ohjelmisto, joka muuttaa 3D-mallitiedoston (STL, OBJ, 3MF jne.) G-koodiskriptiksi, minkä 3D-tulostimen laiteohjelmisto voi tulkita (3DPrinting i.a.). Ilman viipalointiohjelmaa tulostin ei tietäisi, miten sen tulee toimia. Sen avulla voidaan määrittää asetukset, jotka määräävät, kuinka malli tulostetaan. Joitain erittäin tehokkaita ja suosittuja ohjelmia ovat Cura, PrusaSlicer ja Simplify3D.

3D-tulostimien tulostuksen ohjelmointikieli on vuosien varrella vakiintunut (Simplify3d, i.a.-a). 3D-tulostimet käyttävät numeerisesti ohjattua ohjelmointikieltä, joka koostuu sarjasta G-

koodi-komentoja. Useimmat näistä komennoista alkavat G-kirjaimella, mutta on myös joi-
tain yleisiä konekohtaisia koodeja, jotka alkavat M-kirjaimella. Nämä komennot kertovat
3D-tulostimelle tarkalleen, mitä toimia sen tulee suorittaa, minne liikkua, mitä nopeutta
käyttää, mitkä lämpötilat asetetaan ja paljon muuta. On hyödyllistä omata perustiedot G-
koodista, jotta voidaan ymmärtää, kuinka 3D-tulostin toimii, sekä suorittaa virheenkorjauk-
sen tai huollon koneelle sekä tarkistaa tulostustiedostot.

3D-mallin "viipalointi" tarkoittaa CAD-ohjelmalla suunnitellun 3D-mallin (yleensä .stl-muo-
dossa) leikkaamista yksittäisiin tasoihin (Carolo, 2020.). Ohjelmisto muuntaa digitaaliset
3D-mallit tulostusohjeiksi 3D-tulostimelle objektin rakentamiseksi. Itse mallin lisäksi oh-
jeissa on käyttäjän syöttämiä 3D-tulostusparametreja, kuten kerroskorkeus, nopeus ja tuki-
rakenteen asetukset (näihin asetuksiin syvennyttään myöhemmin luvussa kolme).

Jokainen 3D-tulostustekniikka luo 3D-objekteja lisäämällä materiaalia kerros kerrokselta
(Carolo, 2020.). Viipalointi-ohjelmisto on siksi nimetty oikein, koska se käytännössä "leik-
kaa" 3D-malleja useiksi vaakasuoriksi 2D-kerroksiksi, jotka myöhemmin tulostetaan yksi
kerrallaan. Ajettaessa mallia esimerkiksi Simplify3D-ohjelman läpi, ohjelmisto luo auto-
maattisesti G-koodin komennot, jotka ovat tarpeen mallin tulostamiseksi. Näitä komentoja
voidaan tarkastella tallentamalla G-kooditiedosto esimerkiksi työpöydälle ja avaamalla sit-
ten G-kooditiedosto tekstieditorissa, kuten muistiossa tai Notepad++-ohjelmassa.

```

187 ; internalThinWallType,1
188 ; thinWallAllowedOverlapPercentage,15
189 ; singleExtrusionMinLength,1
190 ; singleExtrusionMinPrintingWidthPercentage,50
191 ; singleExtrusionMaxPrintingWidthPercentage,200
192 ; singleExtrusionEndpointExtension,0.2
193 ; horizontalSizeCompensation,0
194 G90
195 M83
196 M106 S0
197 M140 S80
198 M106 P2 S1
199 M106 P3 S0.6 F5
200 M572 D0:1 S0.00 ;Pressure advance for Novamid 1030
201 ; Set extruder temperatures
202 G10 P0 S280 R280
203 G10 P1 S0 R0
204 ; Set Chamber temperature
205 M141 S80
206 T99 ; Disable all tools
207 T0 ; Choose the right extruder
208 G92 E0 ; zero extruder
209 G1 Z5 F5000 ; Raise bed into position
210 ; M42 P5 S1 ; Enable Vacuum (disabled for now)
211 ; END OF STARTING SCRIPT
212 ; process Process1
213 ; layer 1, Z = 0.250
214 T99
215 T0 ; Select tool
216 T0
217 G1 E-2.6000 F900
218 ; feature skirt
219 ; tool H0.250 W0.480
220 G1 Z0.500 F600
221 G1 X208.271 Y90.510 F6000
222 G1 Z0.250 F600
223 G1 E2.6000 F900
224 G1 X208.229 Y90.752 E0.0122 F630
225 G1 X208.098 Y91.196 E0.0231
226 G1 X208.009 Y91.410 E0.0116
227 G1 X207.651 Y92.062 E0.0371
228 G1 X207.607 Y92.135 E0.0042

```

Kuva 3. Simplify3D-ohjelmassa generoitu .gcode-tiedosto avattuna Notepad++-ohjelmalla.

Vaikka G-koodi on useimpien 3D-tulostimien vakiokieli, jotkin koneet voivat käyttää erilaisia tiedostomuotoja tai komentoja (Carolo, 2020). Vaikka tulostin käyttäisi eri tiedostomuotoa, kuten .x3g-tiedostoa. Esimerkiksi viipalointiohjelma Simplify3D vie silti sekä .gcode-että .x3g-tiedostot valittuun sijaintiin. Tämä on varsin hyödyllistä, koska monet muut tiedostomuodot ovat itse asiassa binääritiedostoja. Tekstin katsominen G-kooditiedostossa on paljon helpompaa kuin lukuisten 1- ja 0-lukujen lukeminen binääritiedostoista.

Kun avataan gcode-tiedosto tekstieditorissa, voidaan huomata, että jokainen komento on yleensä lueteltu erillisellä rivillä (Carolo, 2020). Rivin alku kertoo, minkä tyyppinen komento se on, ja sen jälkeen voi olla useita lisäargumentteja. Tiedostoon voidaan kirjoittaa kommentteja asettamalla puolipiste kommentin eteen, tällöin kone jättää sen huomioimatta (kuva 3).

Tulostin voi käyttää joko absoluuttista tai relatiivista paikannusta. Absoluuttinen paikannus tarkoittaa, että käsketään 3D-tulostinta siirtämään tulostuspää tarkkaan XYZ-

koordinaatiston sijaintiin (Carolo, 2020). Relatiivista paikannusta käytetään, kun halutaan kertoa tulostimelle, kuinka kauas sen tulee liikkua nykyisestä sijainnista. G90-komentoa käytetään, kun käsketään tulostinta käyttämään absoluuttista paikannusta, ja G91-komennot ovat relatiivista paikannusta varten. Suurin osa gcode-tiedostoista käyttää absoluuttista paikannusta, koska viipalointiohjelmisto on jo määrittänyt tarkat XYZ-koordinaatit, joihin siirrytään. Jos ei tiedetä työkalupään aiempaa sijaintia tai tiedetään vain, että halutaan siirtää pöytä tietyn etäisyyden verran akselia pitkin, voidaan käyttää relatiivista asemointia. G90 ja G91 ohjaavat paikoitustilaa X-, Y- ja Z-akseleille, mutta voidaan myös käyttää G-koodi-komentoja M82:ta tai M83:a asettamaan ekstruuderin eli pursotin (E-akseli) absoluuttiseen tai relatiiviseen paikannukseen. miniFactory Ultra 3D-tulostin käyttää M83-komentoa eli relatiivista paikannusta. Tämä on tärkeä asia muistaa seuraavia osioita lukiessa.

2.5 Yleisimmät käyttötarkoitukset

Additiivinen valmistus eli lisäävä valmistus on valmistusmenetelmä, jonka kehitystä ohjaavat suurelta osin teollisuuden ja lääketieteen tarpeet (GE additive, i.a.). Valmistusmenetelmien käyttö on teknisistä rajoitteista johtuen keskittynyt pääasiassa prototyyppien ja pientuotantoon, mutta viime vuosien kiihtyvä kehitysvauhti on muuttanut tämän. Valmistusmenetelmien suora käyttö valmiiden tuotteiden valmistuksessa on yhä yleisempää kaikkien toimialojen yrityksissä.

Eri toimialojen välillä on suuria eroja siinä, miten lisäävä valmistus on laajentunut toimialan käyttöön (GE additive, i.a.). Useat teollisuudenalat osaavat jo hyödyntää tätä menetelmää prototyyppien ja työkalujen (mukaan lukien muottien) valmistuksessa, mutta harvat yritykset ovat kehittäneet kattavan strategian tämän valmistusmenetelmän käyttämiseksi tuotannossa ja liiketoiminnassa. Lisäävän valmistuksen hyödyt tulee mitata valmistuskustannusten lisäksi myös lopputuotteen ominaisuuksien ja toimitusketjun ja asiakkaiden tuottaman lisäarvon perusteella. Ilmailu- ja avaruusteollisuus on ollut alan eturintamassa tämän menetelmän kehittämisen lähtien. Tässä selkeinä ajureina ovat olleet mm. käytettyjen materiaalien kuten titaanin korkea hinta, sekä selkeät saavutettavat hyödyt massan vähenemisen seurauksena. Käyttöosuus muilla toimialoilla on kasvanut viimeisen vuosikymmenen aikana, ja auto- ja ajoneuvoteollisuus on tällä hetkellä yksi suurimmista lisäävän valmistuksen käyttäjistä.

2.6 Factory Ultra 3D -tulostin

Yrityksen oman 3D-tulostimen (kuva 4) pääominaisuuksia on kyky tuottaa 250°C:een lämmitetty kammio ja näin se pystyy tuottamaan erinomaisia osia (Industrial 3d printing with minifactory ultra, i.a.). Tämän seurauksena kuluttajilla on käytössään laaja valikoima materiaaleja teknisistä polymeereistä korkean suorituskyvyn polymeereihin ja komposiitteihin. MiniFactory Ultra -tulostimilla kuluttajat voivat tulostaa osia omien ja asiakkaidensa tarpeiden mukaan. Ultra 3D -tulostimet sopivat monenlaisiin korkeiden lämpötilojen materiaaleihin ja sovelluksiin. Tämä maksimoi tulostimen käytön ja kustannustehokkuuden. Koska korkean suorituskyvyn polymeeritulostus on teknisesti hyvin intensiivistä, siitä voi nopeasti tulla monimutkaista ja laadukas tulostin helpottaa huomattavasti prosessia.

MiniFactory Ultra 3D -tulostimen kulmakiviä on luotettavuus ja yksinkertainen työnkulku (Industrial 3d printing with minifactory ultra, i.a.). Työn suorittamiseen on monia teknisiä ratkaisuja ja intuitiivisia vaiheita, mikä tekee tulostamisesta helppoa ja kätevää käyttäjille. Lisäksi miniFactory Ultra -tulostimet tekevät suurimman osan työstä itse, joten kuluttajat voivat keskittyä olennaiseen. Laatu ja luotettavuus ovat kaiken toiminnan perusta. Siksi käytetään vain korkealaatuisia komponentteja ja tarkkuuskoneistettuja runkoja. Tämä varmistaa, että käyttäjät saavat 3D-tulostettujen osien parhaan laadun ja toistettavuuden. MiniFactory Ultra -tulostimissa on tehokas tekniikka, joka varmistaa, että tulostin pysyy tarkkana tulostusprosessin aikana.

MiniFactory Ultra 3D -tulostin on hyvä ratkaisu korkean suorituskyvyn polymeerien luotettavaan 3D-tulostukseen (Industrial 3d printing with minifactory ultra, i.a.). Lisäksi se on kestävyuden vuoksi yksi markkinoiden kustannustehokkaimmista ratkaisuista. Yritys on toimittanut miniFactory Ultra 3D -tulostimia yli 20 maahan. Yritys onnistui tekemään miniFactory Ultra -tulostimesta helppokäyttöisen käyttäjilleen. Asiakastyytyväisyys on ollut huippuluokkaa.



Kuva 4. miniFactory Ultra 3D -tulostin, miniFactoryn arkistoista saatu studiokuva.

3 VIIPALOINTIASETUKSET

Viipalointiasetukset ovat tärkeitä, koska jokainen 3D-tulostin on erilainen, jokainen materiaali on erilainen ja jokainen 3D-malli on erilainen (O'Connell, 2021). Materiaaleista voidaan lisäksi mainita, että vaikka olisi kymmenen vuotta käytetty samaa filamenttia, esimerkiksi PLA:ta samalta valmistajalta, niin jokainen erä filamenttirullia voi käyttäytyä tulostettaessa eri tavalla. Tämä siitä huolimatta, että asetukset olisivat samat kuin ennen. Tulostimet ja materiaalit vaativat siksi aina erilaisia asetuksia hyvän tulostuslaadun saavuttamiseksi. Kun 3D-malli on muotoiltu, seuraava vaihe on antaa tulostustiedot, kuten kerroksen korkeus, nopeus, osien sijainti ja useita muita valmistukseen liittyviä asetuksia. Nämä käyttäjän syöttämät arvot määritetään ennen tulostusta. Jos halutaan korkealaatuisia tulosteita tai vain tulostaa jotain mahdollisimman nopeasti, on tiedettävä viipalointiohjelman ensisijaiset asetukset.

3.1 Lämpötila

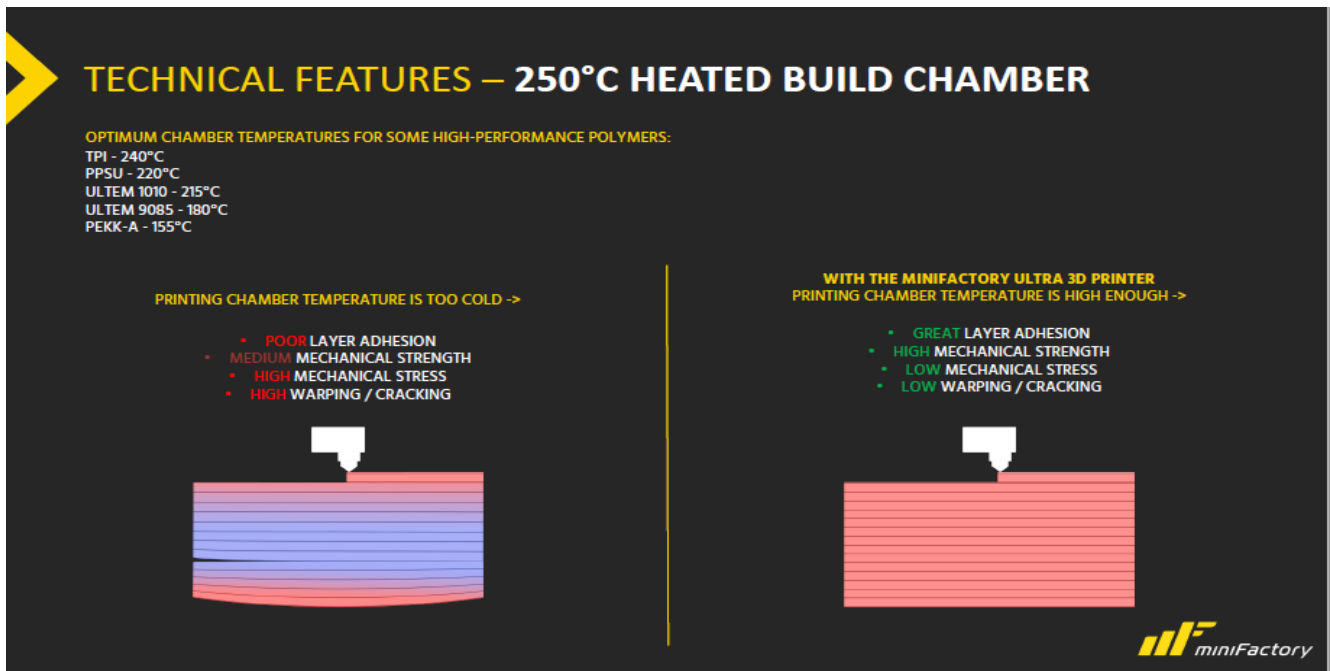
Ensimmäisenä parametrinä on lämpötila (O'Connell, 2021). Suuttimen lämpötila on viipalointiohjelman tärkein yksittäinen asetetus, koska ilman sopivaa lämpötilaa (ei liian kylmää, ei liian kuumaa) mikään tulostus ei toimi. Suuttimen lämpötilan tulisi olla ensimmäinen asia, joka säädetään viipalointiohjelmissa aina, kun tulostaminen aloitetaan uudella filamentilla. Voidaan myös tulostaa lämpötilatorni, mistä nähdään, mitkä arvot toimivat parhaiten.



Kuva 5. Suuttimen lämpötilatorni. (O'Connell, 2021).

Liian korkea suuttimen lämpötila aiheuttaa ylipursotusta ja läiskiä sekä halkeamia kaikilla tulosteessa (O'Connell, 2021.). Spektrin toisessa päässä liian alhainen lämpötila aiheuttaa alipursotusta, jossa kaikkia kerroksia ei ole täysin painettu. Tämä koskee kuitenkin vain suuttimen lämpötilaa. Tulostusalustan lämpötila on aivan toinen osa-alue 3D-tulostuksessa. Jos laitteessa on lämmitetty lämpöpeti, alustan lämpötila on toinen asetus, jota voidaan säätää. Se vaikuttaa siihen, kuinka hyvin tuloste kiinnittyy alustaan. Yleisesti ottaen kuumempi lämpöpeti tarjoaa paremman tarttuvuuden, kun taas viileämpi voi johtaa vääntymiseen. Lämpötilan noustessa liian korkeaksi, osa voi silti vääntyä lämpöpedissä. Ostetun materiaalin mukana tulevat suositellut lämpöarvot niin suuttimelle kuin myös lämpöpedille.

Lämmitetty kammio on tärkein ominaisuus, kun etsitään parasta mahdollista laatua tulostetuista osista (Minifactory, i.a. -b). Jokaisella polymeerillä on lasittumislämpötila. Kun työskennellään amorfisten materiaalien, kuten PPSU:n tai PEKK-A:n kanssa, on tärkeää, että materiaalia ympäröivä ympäristö on optimaalisessa lämpötilassa. Monissa tapauksissa optimaalinen lämpötila kuumennetulle kammiolle on lähellä painettavan polymeerin lasittumislämpötilaa. Lasittumisessa polymeerit ovat rakenteellisessa relaksaatiossa. Tasaisen jäähtymisen ansiosta vältetään myös muuten näkymättömiltä ongelmilta, kuten painetun osan sisäiseltä jännitykseltä.



Kuva 6. Lämmitettävän kammion selkeyttävä kuva (Minifactory, i.a. -a).

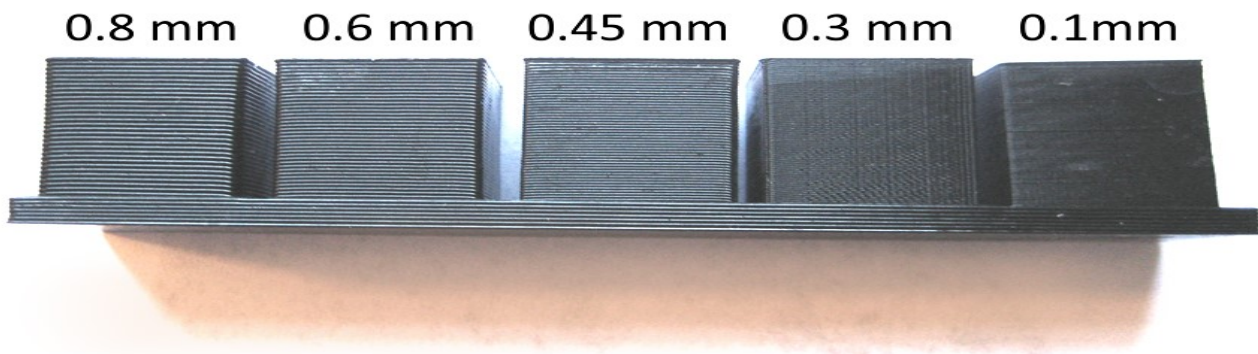
3.2 Tason korkeus

Tason korkeus on toinen erittäin vaikuttava tekijä leikkurissa, ja se viittaa tulosteen jokaisen kerroksen korkeuteen (O'Connell, 2021). Mitä pienempi kerroskorkeus, sitä enemmän kerroksia tarvitaan kokonaistulosteessa. Tämä tarkoittaa, että tulostimella on enemmän tilaa luoda rajallisia yksityiskohtia osista, kuten miniatyyreistä. Toisin sanoen enemmän kerroksia tarkoittaa pidempiä tulostusaikoja ja heikompia osia. Esimerkiksi 0,3 mm paksu kerros voi olla noin 24 % vahvempi, kuin 0,1 mm paksu kerros.

Kerroskorkeutta asetettaessa halutaan löytää sopiva tasapaino tulostusajan, yksityiskohtien ja osan lujuuden välillä (O'Connell, 2021). Jotkut valmistajat hyväksyvät "maagisen numeron" teorian, jossa asetetaan kerroskorkeuden askelmoottori luonnollisen askeletäisyyden kerrannaisena. Monissa yleisissä tulostimissa askeletäisyys on 0,04 mm, joten 0,16, 0,2 ja 0,24 mm:n korkeudet toimivat hyvinä yksityiskohtaisina, tasapainoisina ja nopeina arvoina.

Kerroksen korkeus ei saa ylittää 80 % suuttimen halkaisijasta (O'Connell, 2021). Jos käytetään tavallista 0,4 mm:n suutinta, kerroksen maksimikorkeus on noin 0,32 mm. Kun taas

0,6 mm:n suuttimella on kuitenkin mahdollista saavuttaa jopa 0,48 mm:n kerroskorkeus. Näitä rajoituksia lukuun ottamatta nämä kaksi parametria ovat toisistaan riippumattomia.

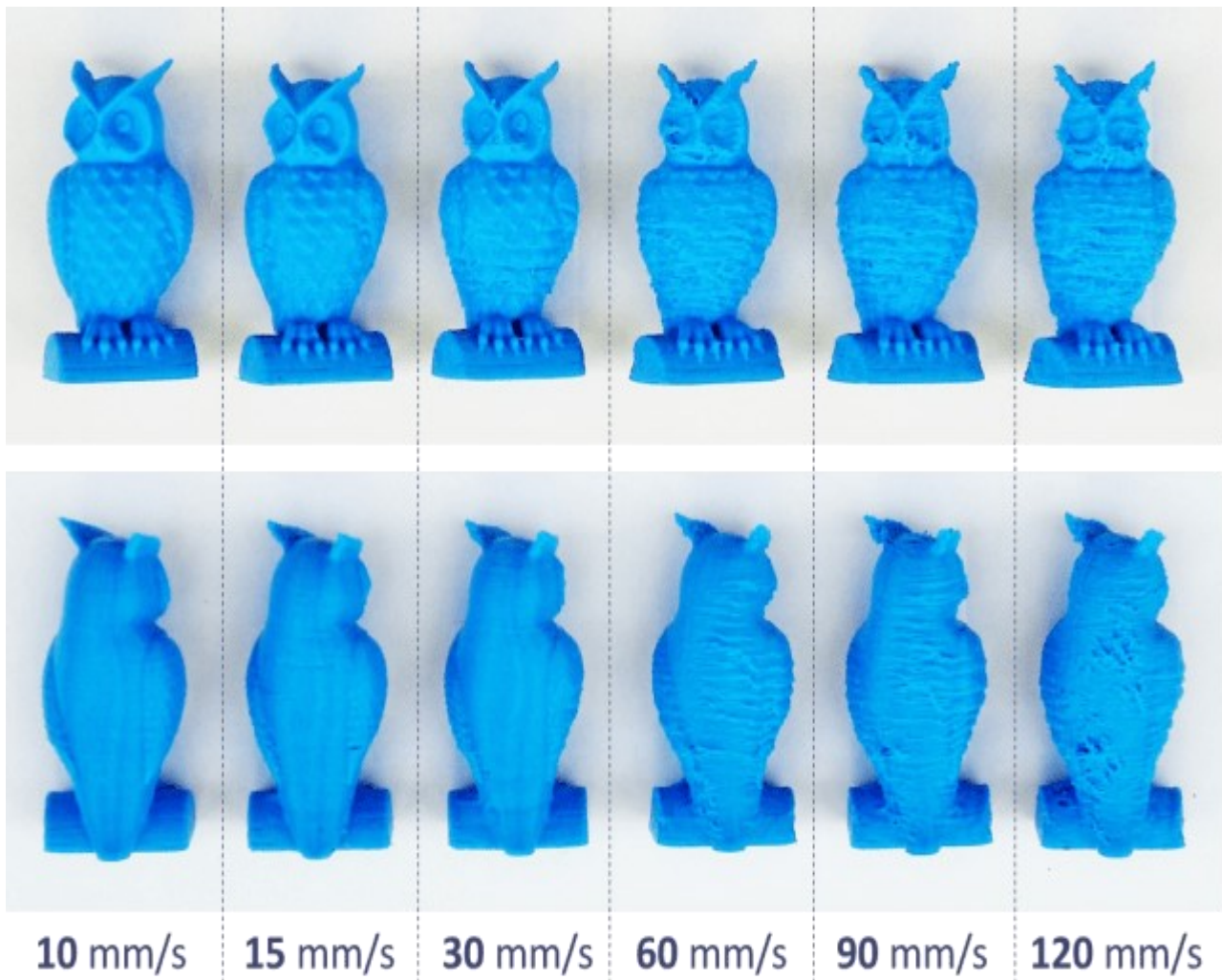


Kuva 7. Tason korkeuden laadullisia eroja verrattuna tason korkeuteen, suuttimen leveyteen ja nopeuteen. (43dprint, 2021).

3.3 Nopeus

Nopeus on kolmas asetus (O'Connell, 2021). Nopeudella tarkoitetaan nopeutta, jolla tulostimen tulostuspää eli suutin, liikkuu. Yleisesti puhuttaessa "nopeus" kattaa monia erilaisia asetuksia, ei vain oletusliikenopeutta. Voi esimerkiksi olla hyödyllistä säätää tiettyjä oletusarvoista johdettuja nopeuksia, kuten täyttönopeutta, seinän nopeutta ja niin edelleen.

Yleensä on hyvä jättää tietyt nopeusasetukset rauhaan ja säätää vain oletusnopeutta (O'Connell, 2021). Useimmissa viipalointiohjelmassa tietty nopeus valitaan kerroksen korkeuden ja materiaalin perusteella, mutta jos käytössä on erittäin laadukas ammattitason tulostin, voidaan kokeilla nostaa tulostusnopeutta tulostusaikojen lyhentämiseksi. Toisaalta voi olla hyvä vähentää nopeutta aina, kun kohdataan tulostuksessa havaittuja laatuongelmia. Hitaat nopeudet helpottavat ongelmia aiheuttavan asetuksen tunnistamista (kuva 8), mikäli ongelma johtuu jostain muusta seikasta kuin nopeudesta.



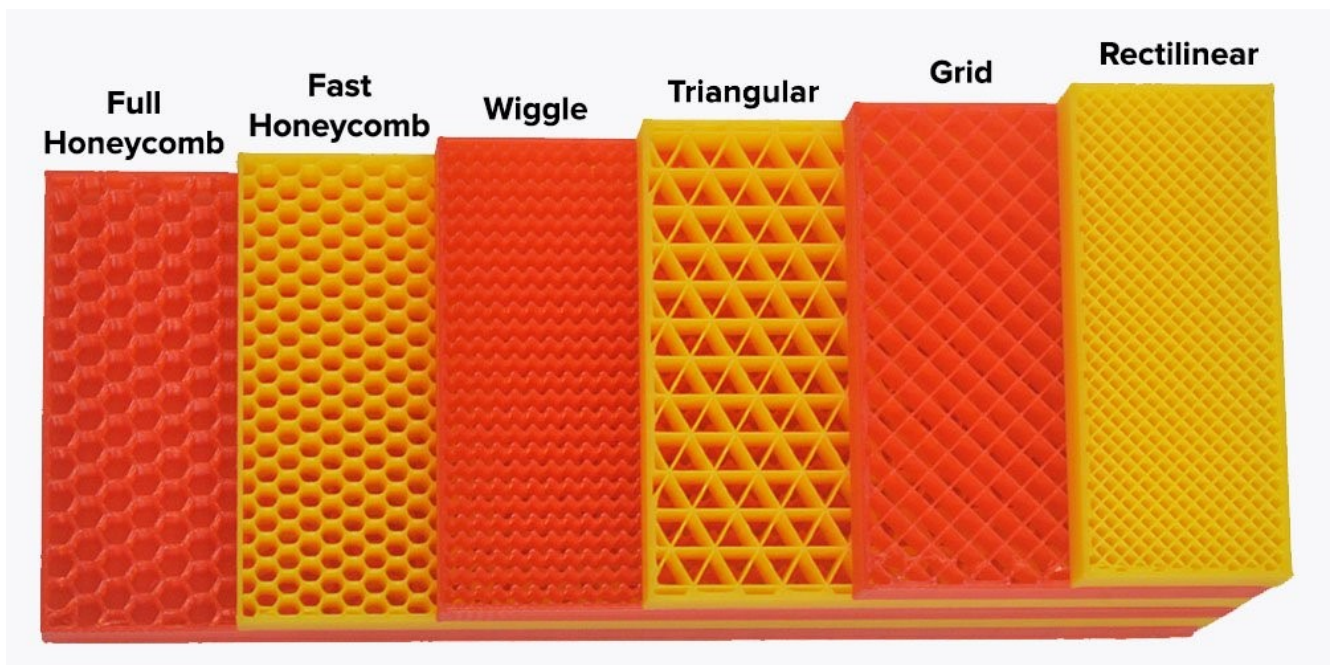
Kuva 8. Feedrate-nopeuksia havainnollistava kuva. (easy3dhome, 2021).

Tulostuspään liikenopeus on eri asia kuin varsinainen tulostuksen aikainen liikenopeus, eikä sitä tarvitse säätää kovin usein, jos koskaan (O'Connell, 2021). Loogisinta on pitää se lähellä viipalointiohjelman oletusarvoa, joka on luultavasti noin 150 mm/s. Liikenopeus säätää, kuinka nopeasti tulostimen tulostuspää liikkuu, kun se ei purista filamenttia. Matkustusnopeuden lisääminen voi säästää huomattavasti tulostusaikaa, mutta sen liiallinen lisääminen voi johtaa esimerkiksi tulostuslangan haivenien "leijumiseen", kaataa herkkiä rakenteita tai jopa johtaa kerroksen siirtymiseen ja siten tulostusvirheeseen.

3.4 Tulostettavan kappaleen täyttö

Täyte on 3D-tulostettujen osien sisäistä täyttöä, ja se on ominaisuus, jota ei voida saavuttaa perinteisillä valmistusmenetelmillä, kuten ruiskuvalulla (O'Connell, 2021). Täyteen avulla voidaan hallita paremmin osan lujuutta, painoa, materiaalinkulutusta ja sisäistä rakennetta ilman, että tarvitsee säätää sen ulkonäköä tai ulkoisia ominaisuuksia. Viipaloijassa täyttöä voidaan ohjata käyttämällä täyttötiheyden määrää prosentteina ja täyttökuvioita, joka on täytön rakenne tai muoto.

Vankemmat täyttökuviot ja suuremmat täyttötiheydet pidentävät tulostusaikoja ja kuluttavat enemmän materiaalia, mutta lisäävät osan lujuutta ja painoa (O'Connell, 2021). Valittavana on monia täyttökuvioita (kuva 9), joista jokaisella on oma muotoilu ja ominaispiirteensä. Asettamalla täyttötiheyden tietyllä kuviolla saavutetaan kappaleelle haluttu vahvuus, materiaalinkulutus ja tulostusaika.



Kuva 9. Suosituimpia täyttökuvioita tulostettaville osille (tianseoffice, 2019).

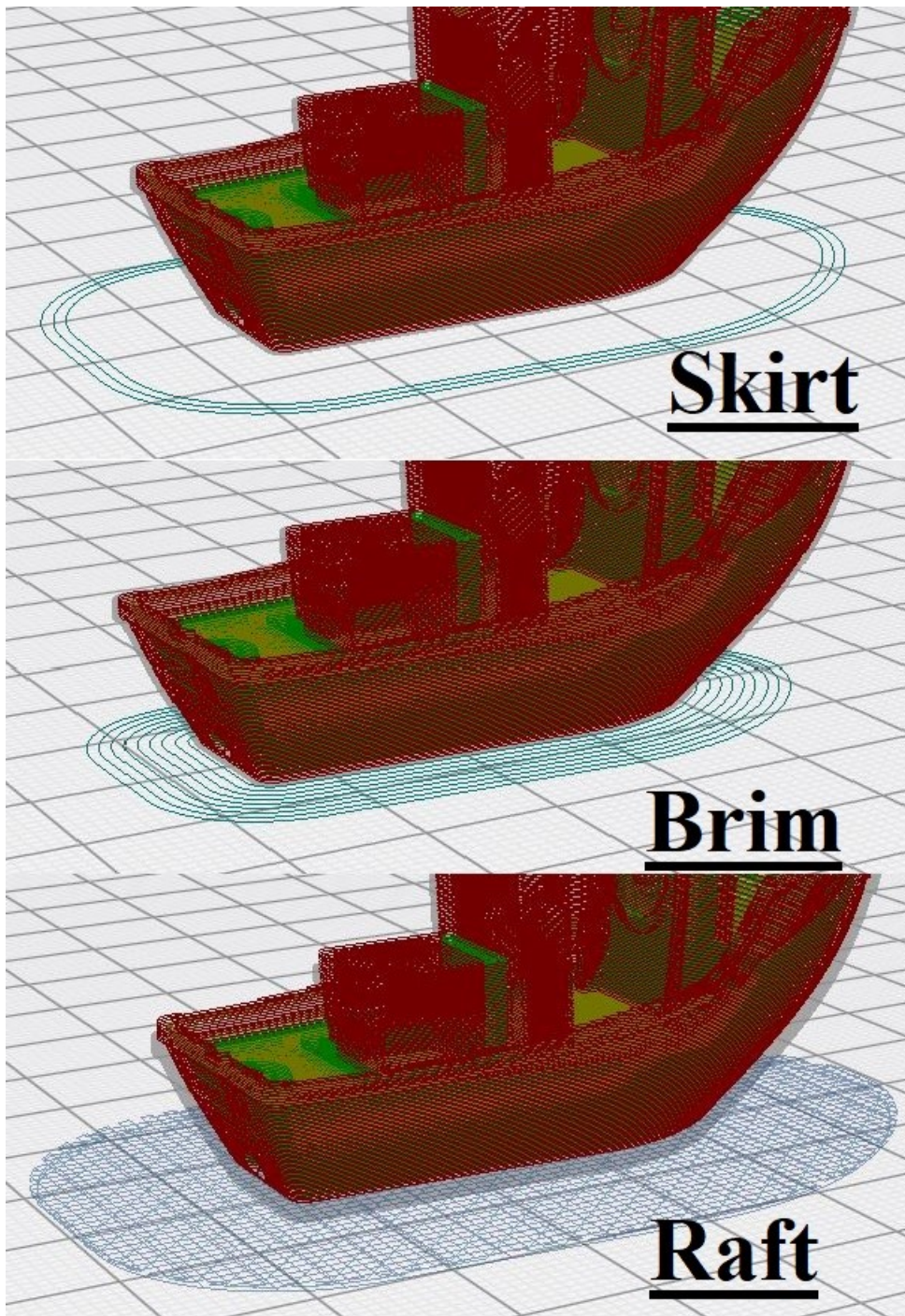
3.5 Tartunta avustaja tulostusalustalle

Kiinnittymisapu on fyysinen ominaisuus, joka lisätään tulosteeseen (O'Connell, 2021). Viipalointiohjelma generoi sen automaattisesti halutun mallin ja arvojen mukaan. Kiinnittymisapu on suunniteltu parantamaan alustan tarttuvuutta. Tulostusalustan tarttuvuus kertoo, kuinka hyvin osa kiinnittyy tulostuspintaan. Se on tyypillisesti tärkeintä ensimmäiselle kerrokselle. Tartunta-avustajaa on kolmessa päämuodossa (kuva 10).

Skirt. "Hame" on etäinen ja irrallinen kehä, joka rajaa tulostuksen (Simplify3D, i.a. -b). Hameet eivät auta mallin tarttumisessa, mutta auttavat saamaan materiaalin virtaamaan suuttimen läpi ajoissa, jotta ensimmäinen kerros alkaa sujuvasti. Hameesta voi olla hyötyä myös pedin korkeuden säätämisessä viime hetkellä manuaalisesti. Ellei toisin ole asetettu, monet viipalointiohjelmat luovat automaattisesti hameen jokaiselle tulosteelle.

Brim. "Lieri" on joukko viivoja, jotka on kiinnitetty tulosteen ensimmäisen kerroksen ulkopuolelle ja jotka leviävät sen pohjasta (Simplify3D, i.a. -b). Jos tulostettava kappale olisi esimerkiksi sylinteri, reunus näyttäisi kirjaimellisesti silinterin reunalta. Tämä asetus on hyvä vaihtoehto, jos mallilla on tulostuspedin kiinnittymisongelmia.

Raft. "Lautta" on tulostuspedille tulostuva perusta, jolle tulostin tulostaa halutun kappaleen (Simplify3D, i.a. -b). Kun tulostetaan lauttoja, viipalointiohjelmat yrittävät yleensä säästää materiaalia jättämällä tilaa vierekkäisten rivien väliin. Tämä on hyvä lähestymistapa lattian kiinnittymiseen, sillä tulosteen ei tarvitse koskaan koskettaa pintaa. Tästä voi olla hyötyä, kun vääntyminen on ongelma, mutta se saattaa vaikuttaa tulosteen pohjan laatuun irrottaessa.



Kuva 10. Tartunta-avustaja tulosteelle Simplify3D-ohjelmalla generoituna.

3.6 Tukirakenne

Tuet ovat yksi merkittävimpiä asetuksia. Tartunta-apuvälineiden tapaan ne ovat viipalointiohjelmien generoimia (O'Connell, 2021). Tuet ovat rakenteita, jotka säilyttävät tulostettavien mallien ulkonevat ominaisuudet. Tukirakenteeseen liittyvät asetukset sisältävät

ylityskulman ja vähimmäistukialueen. Edellinen määrittää vähimmäiskulman, jonka ylityksen on oltava, ennen kuin leikkuri luo tuen sen pitämiseksi pystyssä. Jälkimmäinen säätelee vähimmäispinta-alaa (mm^2), joka tukirakenteella on oltava mukana tulosteessa.

Muut tukiasetukset ja -vaihtoehdot ovat myös tärkeitä (O'Connell, 2021). Esimerkiksi osien orientaatiolla on keskeinen rooli tukirakenteiden syntyemisessä. Muita tukiasetuksia ovat tulostusnopeus, tuen täyttötiheys ja paljon muuta. Olennaisena on tasapainotella riittävän tuen ja materiaalin vähimmäiskulutuksen välillä, mikä johtaa jälleen tulostettavan kappaleen valmistusnopeuteen.



Kuva 11. miniFactory Ultralla tulostettu kappale, missä vasemmassa kappaleessa on tukirakenne paikallaan ja oikealla sama kappale ilman tukea. MiniFactory arkistoista saatu studiokuva.

3.7 Yhteenveto

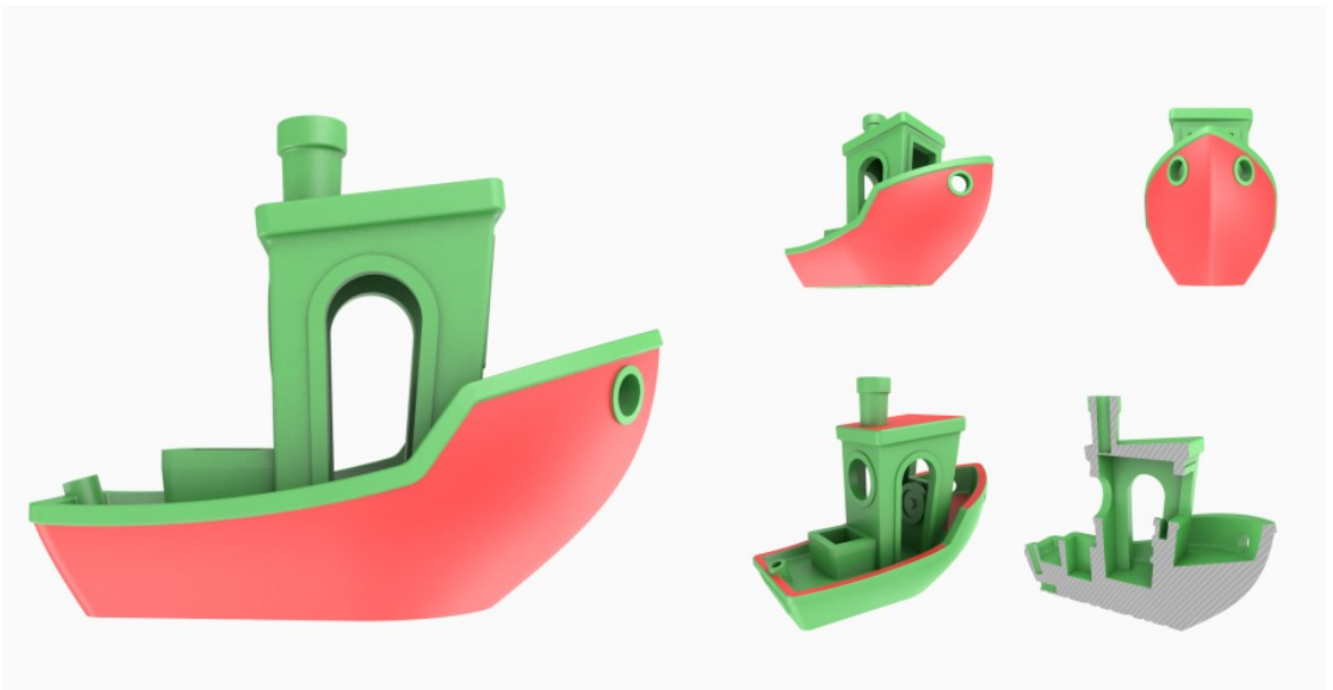
Kuvassa (kuva 12) on hyvin pelkistäen malliin selitetty, millä tavalla jokainen asetus vaikuttaa tulostamiseen (3dprinterchat, 2017). Arvot ovat suuntaa antavia viitearvoja, ja todellinen kultainen keskitie löytyy testaamisella. Mutta nämä kuitenkin johtavat oikeille jäljille ja syyn tulostuslaadullisiin ongelmiin voi löytää helposti kyseisestä kuvasta.



Kuva 12. Tulostuslaatuun vaikuttavat tekijät tiivistetysti (3dprinterchat, 2017).

4 TULOSTAMISEEN VALMISTELU

Testikappaleeksi valittiin 3D-tulostamisen yhteisössä erittäin hyväksi tunnettu ja koettu malli nimeltään 3DBenchy (3dbenchy, 2020). 3DBenchy on CAD-malli, joka on suunniteltu erityisesti 3D-tulostimien tarkkuuden ja ominaisuuksien testaamiseen. Kappaleen suunnitellut yritys Creative Tools kuvailee 3DBenchyä vapaasti suomennettuna "hauskaksi 3D-tulostuksen kidutustestiksi", ja se julkaistiin huhtikuussa 2015. Moniosainen ja monivärinen malli julkaistiin heinäkuussa 2015. Suunnittelijat kieltäytyvät julkaisemasta lähdekoodia eivätkä salli muutoksia. Koska kappaleen asema on yleisesti vakiintunut suorituskykytestiksi, sen uskotaan olevan maailman 3D-tulostetuin objekti. Kappaleella on laivan ulkoasu, joka on suunniteltu 3D-tulostimien monipuoliseen testaukseen. Se suunniteltiin sellaisten tekijöiden perusteella, jotka tyypillisesti aiheuttavat ongelmia monille 3D-tulostimille. Näitä pisteitä ovat esimerkiksi pienet yksityiskohdat, tasaiset vaakapinnat, symmetriat, kaarevat pinnat, erilaiset reiät ja sylinterin muodot (liite 1 ja 2).



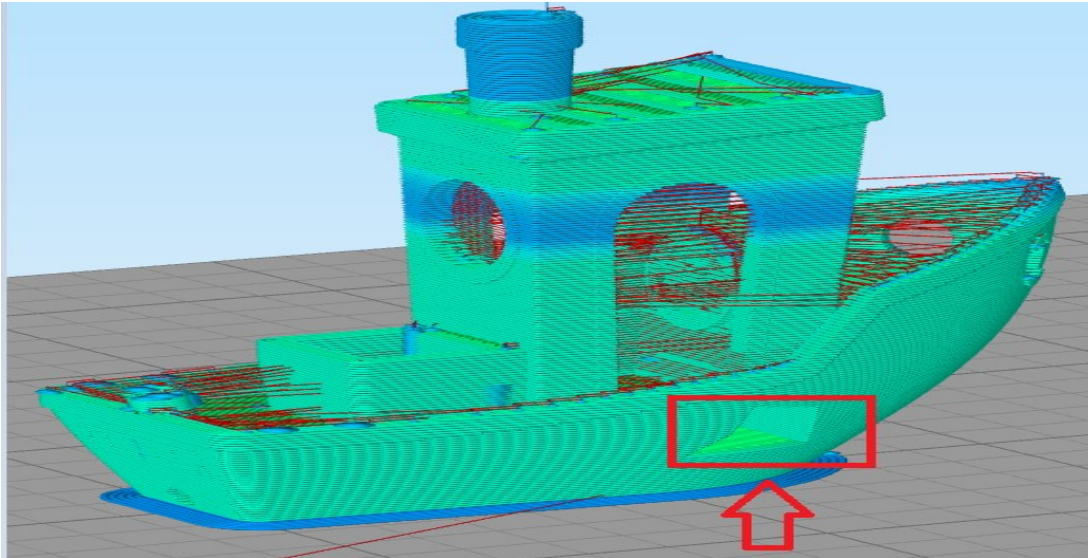
Kuva 13. 3DBenchy (3dbenchy, 2020).

Tässä tutkimuksessa edellisistä malleista poiketen testiä ei tehdä kaksivärisenä, mikä vaatisi kahden eri filamentin käyttöä (Filament2print, 2017). Tätä mallia tulostetaan yksivärisenä ja filamenttina käytetään DSM Novamid ID1030 CF10 (3d-tulostus, i.a.). Hiilikuituvahvisteiset PA6/66-polyamidit on suunniteltu toiminnallisiin prototyypppeihin ja teollisiin sovelluksiin, jotka vaativat korkeampaa lämmönkestävyyttä, sekä osiin, jotka vaativat poikkeuksellista jäykkyyttä ja kestävyyttä, mikä voidaan usein saavuttaa vain ruiskuvalulla. Sen käyttökohteita ovat muun muassa ajoneuvoteollisuuden osat, urheiluvälineet, työkalut, proteesit ja muut erityistä kestävyyttä ja kovuutta vaativat kohteet.

Seuraavaksi on hyvä lähteä tarkastelemaan ennen kappaleen tulostamista valmisteltavia vaiheita, sen jälkeen kun edellisessä osiossa on valittu oikeat parametrit tulostettavan kappaleen ja filamentin perusteella.

4.1 3D-mallin tarkistus viipalointiohjelmassa

Kun 3D-tulostimen käyttäjä suunnittelee tai lataa internetmalleja, jotka halutaan tulostaa, on hyvä tarkistaa malli ja varmistaa, että siinä ei ole avoimia alueita vastakappaleiden tai pintojen välillä (Filament2print, 09.08.2017). Ne aiheuttavat virheitä aukkojen muodossa tai filamentin leijumista tai paakkuuntumista kappaleessa. Tämä voidaan välttää tarkistamalla tilanne esikatselun avulla, jolla tulostetaan tai luodaan G-koodi ja etsitään edellä mainittuja aukkoja tai huonoja liitoksia kappaleesta.



Kuva 14. 3DBenchy reikä kyljessä esimerkkinä siitä, että internetistä ladattu kappale ei ole alkuperäinen tai on muokattu, tarkoituksenaan vahingoittaa tai vaikeuttaa toisten työtä. Kuvassa Simplify3D-ohjelmalla generoitu 3DBenchy-malli esimerkkinä Viipalointiohjelman asetukset

Tulostusparametrit ovat erittäin tärkeitä (lämpötila, nopeus, tukityyppi jne.). Ne on sovitettava jokaiseen materiaaliin, jokaiseen kappaleeseen, filamentin halkaisijaan ja käyttäjän käyttämään 3D-tulostinmalliin (Filament2print, 2017). Jotta virheitä ei tapahtuisi, on noudatettava aina valmistajan ohjeita tulostusfilamenttien osalta (lämpötila ja tulostusnopeus) sekä suoritettava tulostustestejä eri lämpötiloissa, jos epäkohtia ilmenee. Yksinkertainen testi on tulostaa torni (kuva 5) ja vaihdella lämpötilaa 5 °C 1 cm:n välein ja katsoa, mikä lämpötila tuottaa parhaan tuloksen.

4.2 Suuttimet ja alusta

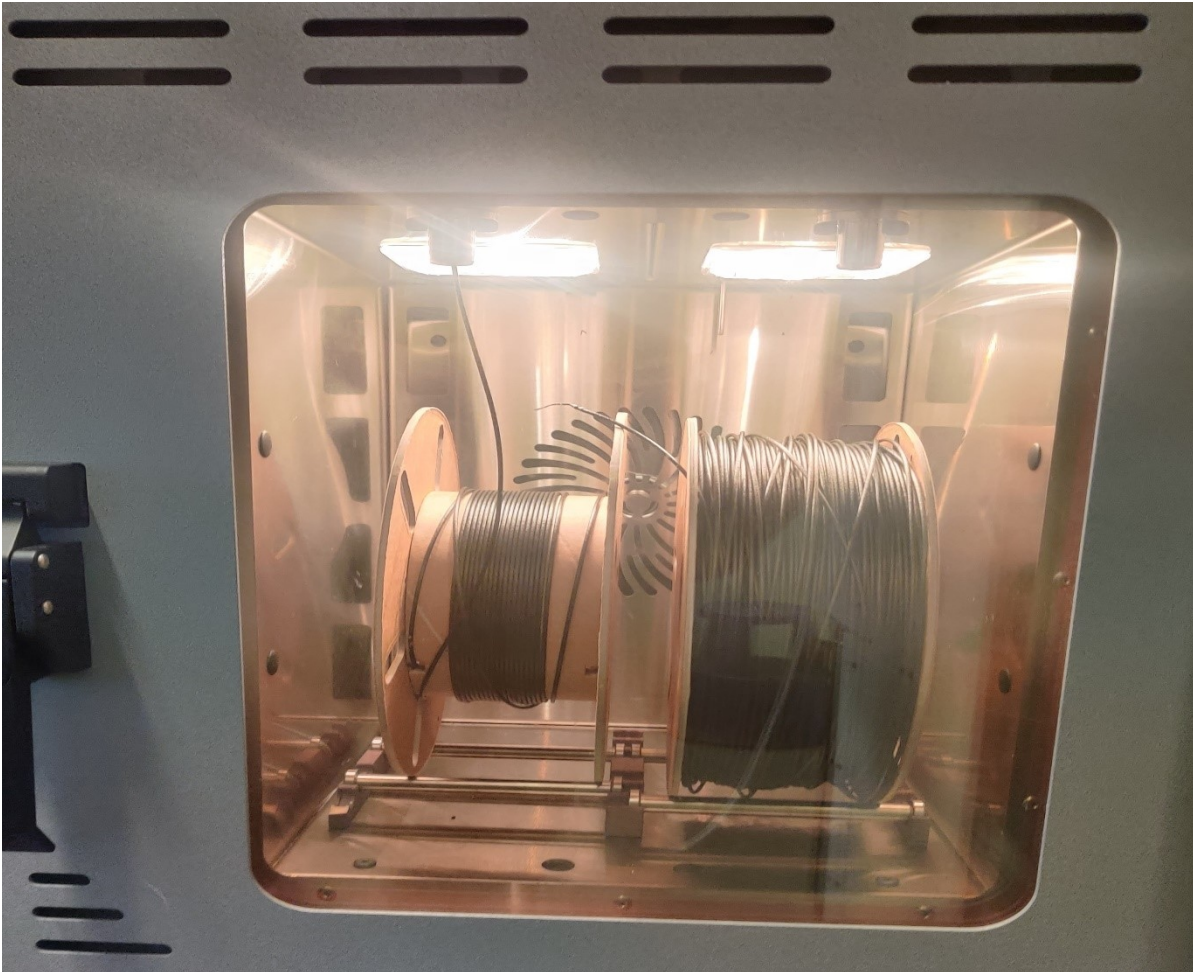
Alustan kunto on ratkaiseva, varsinkin "vääristymän" välttämiseksi (Filament2print, 2017). Ensin on kuitenkin hyvä puhdistaa suutin tai suuttimet, mikäli käytetään kaksoispursotusta teräsharjalla. miniFactory Ultra käyttää lasialustaa ja se puhdistetaan aina ennen tulostusta isopropanolipuhdistusaineella. Puhdistuksen aikana on hyvä varmistaa, ettei tulostetavalla pinnalla ole filamentin jäämiä tai muita epäkohtia. Tämän jälkeen voidaan lisätä tulostuspinnalle ensimmäiselle kerrokselle tarttumista helpottavaa sitovaa ainetta. Tähän soveltuu periaatteessa perinteinen hiuslakka, mutta työssä käytettiin 3D-tulostamiseen tarkoitettua liimaa.

4.3 Tulostuslangan kunnan tarkastus, määrä ja johtavuus

Tulostuslangan riittämättömyys tai sen virheet ovat yksi yleisimmistä epäonnistuneeseen tulostukseen johtavista ongelmista (Filament2print, 2017). Mikä tahansa 3D-tulostusohjelma, esimerkiksi Craftware, Cura tai Simplify3D, auttaa arvioimaan valmistettavaan kappaleeseen käytettävän materiaalin määrän. Näillä tiedoilla voidaan tarkistaa, onko käytävissä oleva filamenttimäärä riittävä, ja näin vältetään epätäydelliset 3D-tulosteet. Lisäksi tarkistetaan, että lanka on silmämääräisesti ehyt, koska langan valmistuserät voivat olla virheellisiä. Valmistellessa tulostusta on hyvä tehdä langan päähän 45 asteen leikkaus, niin että lanka työntyy helposti aina suuttimelle saakka.

TOTAL STATISTICS				184 / 184	
Duration	2:13:39				
Finish	22:16				
Filament length	71.059 mm				
Extruding move	1.649 m	(1.1%)	0:01:11	(0.9%)	
Travel move	150.732 m	(98.9%)	1:59:59	(89.8%)	
Z move	206.261 mm	(0.1%)	0:00:13	(0.2%)	
Retract-prime	25.731 m		0:12:15	(9.2%)	
Price and weight:					
- CraftPLA:	~0.09 \$		~0.2 g		

Kuva 15. CraftWaren laskema arvio tulostuslangan tarpeesta sekä tulostusajoista. CraftWarella generoitu esimerkki.



Kuva 16. Tulostuslangan lämmitetty kammio. Vasemmalla oleva tulostuslanka on loppumassa.

Seuraava vaihe, joka on tehtävä ennen 3D-tulostuksen aloittamista, on filamentin ja sen kulkureitin puhdistus (Filament2print, 2017). Tällä tyhjennyksellä estetään filamentin tuleminen ulos suuttimesta viiveellä, muutoin 3D-tulostus on työstettävä uudelleen, koska ensimmäisiin kerroksiin ei ole johdettu materiaalia. Tämä prosessi voidaan tehdä manuaalisesti kuumentamalla pursotin käytettävän filamentin lämpötilaan ja työntämällä sitä, kunnes virtaus on jatkuvaa. Monilla laitevalmistajilla löytyy myös automaattinen toiminto tälle vaiheelle. Yksi keino on myös lisätä kerrosten määrää esimerkiksi lisäämällä kappaleelle "Skirt" (Sivu 27–28) ennen 3D-tulostuksen aloittamista. Tätä parametria muutetaan käytetyssä viipalointiohjelmassa.

4.4 Tulostimen kalibrointi

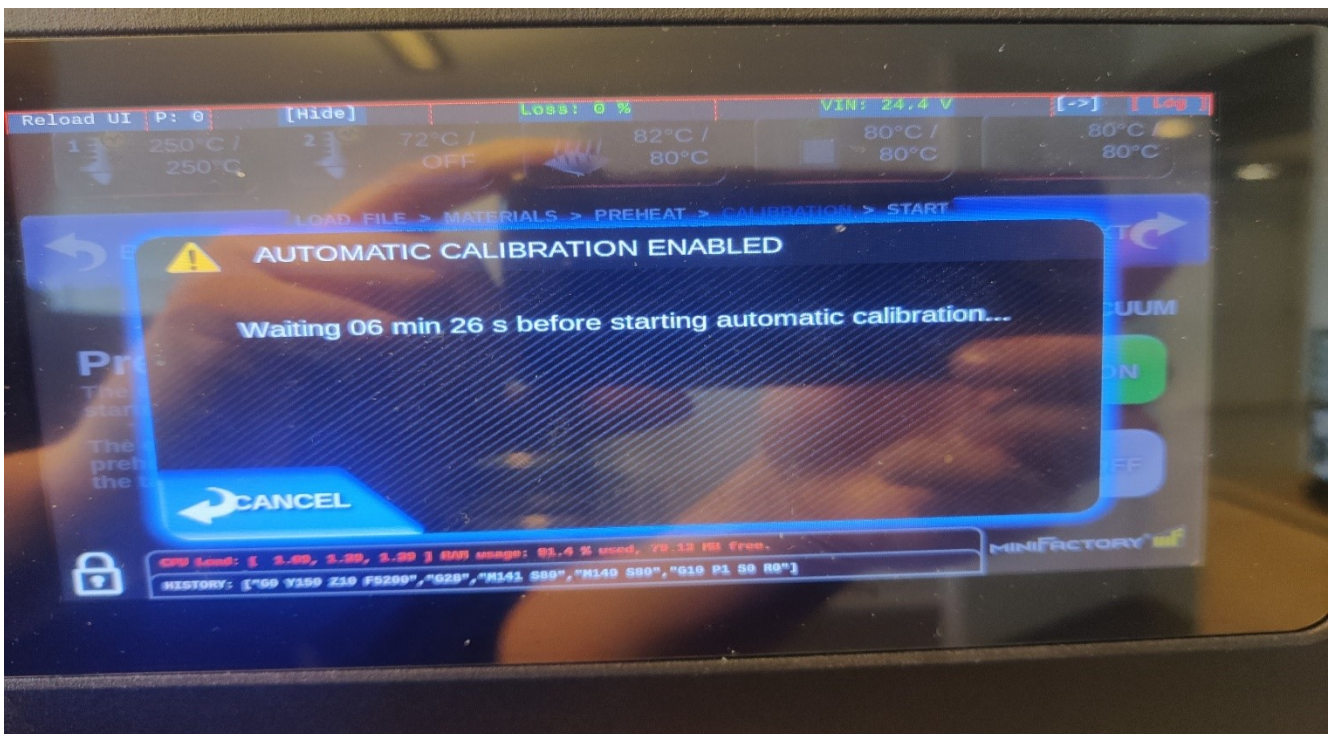
Yksi tärkeimmistä 3D-tulostimessa kalibroitavista osista on alusta (Simplify3D, i.a. -c). Jos sitä ei ole tasattu kunnolla, todennäköisyys, että saa hyviä tulostustuloksia on hyvin heikko. Tämä alustakalibrointiprosessi voi 3D-tulostimen mallista riippuen tapahtua seuraavilla tavoilla:

- Auto leveling assisted: Joissakin 3D-tulostimissa on tämä järjestelmä. Se koostuu korkeuden säädöstä kiertämällä jalustan ruuveja, jotka muuttavat punaisen värin vihreäksi oikealla korkeudella.
- Compensating level: 3D-tulostin mittaa pisteillä valitun suuttimen ja alustan välisen etäisyyden. Sitten tulostuksen aikana z-akseli muuttaa korkeutta samassa kerroksessa, jotta suuttimen ja pohjan välinen etäisyys pysyy aina vakiona.
- Manual leveling: Säädetään pedin tasoa kiertämällä itse pedin jalustan ruuveja.

miniFactory Ultra käyttää automaattista Compensating level -tasoitusta (Filament2print, 2017). Ennen kalibrointia täytyy ensin asettaa tulostuslämpötilat ja odottaa niiden saavuttamisen jälkeen noin 10 minuuttia. Tulostin on ohjelmoitu odottamaan 10 minuuttia, mutta tämä voidaan myös ohittaa, mikäli halutaan esimerkiksi nopeasti testata tiedostoa. Lämpöliike aiheuttaa lämpölaajenemista (Peda, i.a.). Mitä enemmän metalliosia kuumennetaan, eli niihin syötetään energiaa, sitä suurempi on rakenteellisten hiukkasten värähtely. Kun rakenneosat vaativat enemmän tilaa värähdelläkseen, materiaali laajenee. Tästä syystä kalibrointi tehdään vasta, kun jokainen kappale on saavuttanut lämpötilan vaihdosta aiheutuneet muutokset.



Kuva 17. miniFactory Ultram tulostuskammio on ruostumatonta terästä.



Kuva 18. Lämpötilojen tasaantumisten vuoksi odotettava aika.

Kalibroinnin jälkeen voidaan vielä kerran varmistaa filamentin johtavuus ennen tulostuksen aloittamista. Mikäli kaikki edellä luetellut kohdat ovat kunnossa, voidaan tulostus aloittaa.



Kuva 19. Filamentin viime hetken lataaminen ennen tulostamista. Ylärivillä voidaan todentaa 1. Suutin 1 lämpö, 2. Suutin 2 lämpö, 3. Pedin lämpö, 4. Tulostuskammion lämpötila ja 5. Tulostuslangan kammion lämpötila.

5 VIIPALOINTIOHJELMIEN SELVITYS

Yritys käyttää maksullista ammattilaistason Simplify3D-viipalointiohjelmistoa. Tämän opinäytetyön puitteissa haluttiin kokeilla, olisiko mahdollista käyttää myös jotain toista ilmaista, edullista ja ammattitasoista viipalointiohjelmistoa Simplify3D-ohjelmiston rinnalla. Ohjelmiston olisi kyettävä generoimaan luotettava G-koodi vaativimmillekin FFF-materiaalisekoituksille, esimerkiksi hiilikuituvahvistetuille filamenteille.

5.1 Lähtökohta

Aloituspalaverissa sovittiin, että selvitetään eri viipalointiohjelmien mahdollisuuksia, mutta tehdään rajausta kymmeneen lupaavaan ohjelmistoon. Näitä ohjelmistoja lähdettiin etsimään 3D-tulostusalan johtavilta verkkosivustoilta sekä alan tunnetuimmista blogikirjoituksista. Oletuksena oli, että tällainen tieto on parhaiten löydettävissä käyttäjien itsensä kirjaamina listoina, sillä ohjelmistojen käytettävyys ja toimivuus vaatii laajan käyttökokemuksen jokaisesta viipalointiohjelmasta. Aiheesta on julkaistu laajasti materiaalia, joten vaiheen ajateltiin olevan yksinkertainen. Lopputulos kiteytettäisiin Excel-taulukkoon ja työhön valikoituneet ohjelmistot käytäisiin läpi sekä päätettäisiin, mitkä ohjelmistoista valittaisiin tarkempaan tarkasteluun.

5.2 Tutkimustyö

Ohjelmistojen rajaaminen ei ollut helppoa. Blogeista saatiin käytännössä hyvää tietoa, mutta oli vaikeaa löytää luotettavaa tietoa. Osa tekstistä oli selkeästi sponsoroitua.

Luotettavia sivustoja löytyi esimerkiksi all3dp, mikä on ehkäpä suurin 3D-tulostamiseen liittyvä verkkosivu. Sivusto antoi kattavaa tietoa heidän mielestään parhaimmista viipalointiohjelmistoista. Tästä sivustosta tuli hyvä tietolähde työhön. Vastaan tuli myös muita sivustoja, joissa lueteltiin suunnilleen samat ohjelmistot, mutta tietyt ohjelmistot löytyivät jatkuvasti kärkisijoilta.

Työn toimeksiantajan laatima 13 kohdan kriteeristön soveltuville ohjelmistoille oli seuraavan listan kaltainen:

1. Dual print eli mahdollisuus kaksoispursottimelle
2. Infill "täyttö" eli pystytään muokkaamaan lähinnä sitä, kuinka tuloste täytetään ja täyttömuodoista vähintään yksi: Rectangular, Triangle tai Honeycomb (suorakulmainen, kolmio tai hunajakkeno).
3. Heated Chamber, "lämmitettävä kammio" on harvinainen asetus, mutta yrityksen tulostimille välttämätön ominaisuus. Tulostimissa on yleensä lämmitettävä alusta, mutta yrityksen käytössä on sen lisäksi edellä mainittu ominaisuus, joka pitää periaatteessa "uunin" tavoin lämmön halutussa lämpötilassa.
4. Kerroksittainen pyörimisnopeus, eli mahdollisuus muokata esimerkiksi kymmenen ensimmäisen kerroksen jälkeen jäähdyttimen nopeutta.
5. Origin offset, valinnainen toiminto, mutta hyvä olla. Asetuksella pystytään kasvattamaan tulostusala keinoitekoisesti siirtämällä origoa.
6. Flip build table, käytännössä saadaan "peilikuva"-kappale tulostettua.
7. Duet on internetissä käytettävä suosittu ja helppo selainkäyttöliittymä tulostamisen eri asetusten muokkauksista aina tulostamisen monitoroimiseen.
8. Tulostusnopeuden määrittäminen 5 mm/s-100 mm/s.
9. Speed override. Nopeuden ohittaminen kesken tulostuksen.
10. Tool change retraction, eli filamentin poisveto-ominaisuus, kun työkalua vaihdetaan.
11. Layer modifications (valinnainen), ei löydy yrityksen käyttämästä Simplify3D-ohjelmasta, mutta tarkoittaa kerroksien muokkausta.
12. Korkean lämpötilan tuki FFF-materiaalien tulostamiseen.
13. Käyttäjätavallisuus ja helppokäyttöisyys.

5.3 Tulos

Edellä mainittujen kriteerien perusteella tehtiin kattava Excel-taulukko, joka jaotteli selkeästi otollisemmat viipalointiohjelmat (kuva 20). Selkeys oli tärkeä kriteeri. Jos ominaisuuksia puuttui, ei ohjelmaa valittu mukaan. Lähtökohtana oli kuitenkin saada parempi tai vastaava viipalointiohjelma kuin yrityksen oletuksena käyttämä Simplify3D.

SLICERIT	SIMPLIFY	Cura	Slic3r	PrusaSlicer	Repetier-Host	Craftware	MatterControl	KissSlicer	MakerBot Print
Dual Print	X	X	X		X	X	X		
Rectangular, Triangle, Honeycomb	X	X	X	X		Triangle/Honeycomb			
Heated Chamber	X					X			
Kerroksittainen pyörimisnopeus	X				X	X			
Origin offset x-28	X	X	X		X	X			
Flip build table	X								
Duet	X	X	X	X	X	X			
Speed 5mm/s-110mm/s	X	X	X	X	X	X		X	
Speed override	X					?			
Tool change retraction	X	X	X		X	X			
Layer modifications								X	
Korkea lämpötila FFF yarten	X	X	X	X	X	X		X	
Helppokäyttöisyys	X	X				X			

Kuva 20. Viipalointiohjelmien valintaan tehty Excel-taulukko.

Potentiaalisesti viipalointiohjelmaksi valikoitui Craftbotin valmistama Craftware Pro -ilmaisohjelmisto. Se sisältää kaikki halutut asetukset pois lukien kaksi valinnaista kohtaa. Craftware Pro -ohjelmisto vaikuttaa siltä, että se on tehty ammattilaisten toimesta, jotka ovat olleet aiemminkin tekemisissä 3D-mallinnuksen ja -tulostamisen kanssa. Craftware Pro ei ole niin helppokäyttöinen, kuin Simplify3D, tai esimerkiksi erittäin suosittu ilmaisohjelmisto Cura, mutta pienellä vaivannäöllä ja tutustumisella, se vaikuttaa varsin potentiaaliselta ohjelmistolta.

Craftware Pro sisältää oman viipalointiohjelmiston lisäksi CAD-työkaluja, mitä ei esimerkiksi Simplify3D tarjoa. Huomioitavaa on, että se tarjoaa oman CAD-mallinnuksensa ilmaiseksi. Tehty malli tallennetaan viipalointiohjelmalle sopivaan tiedostomuotoon, mikä edelleen muuttaa sen tulostimille ymmärrettäväksi G-koodiksi. Yleensä nämä CAD-ohjelmistot eivät ole halpoja. Ilmaisia ohjelmia toki löytyy, mutta ne eivät yleensä ole kovin hyviä. Tässä vaiheessa tämän työn tarkoituksena ei kuitenkaan ollut selvittää CAD-mahdollisuuksia, mutta siitä voidaan tehdä lisätyö tai huomio lopullisissa tuloksissa.

5.4 Ohjelmistojen valinta jatkotutkimuksiin

Alustavan ohjelmistoselvityksen jälkeen oli mahdollista tehdä päätös siitä, mitä ohjelmistoja valitaan seuraavaan vaiheeseen, jossa ohjelmistoja testataan käytännössä testitulosten kautta. Tulosten selvittyä valinnaksi selkeytyi loogisesti CraftWaren ilmaisohjelmisto, jota lähdetään testaamaan työssä eteenpäin. Cura-ohjelmistoa oltaisiin suositeltu mukaan, mutta yritys oli päättänyt lähteä itse selvittämään sen soveltuvuutta heidän tulostimilleen tämän tutkimuksen aikana.

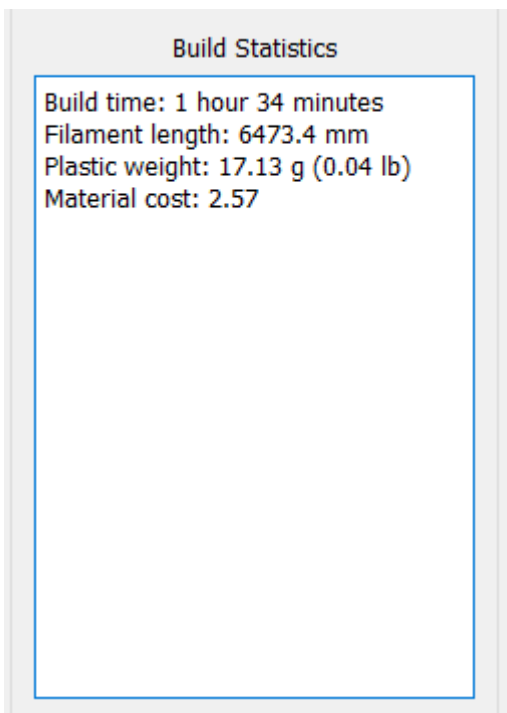
Jatkosta päätettiin siten, että seuraavana tehtävänä oli tehdä tai löytää tulostettava testikappale ja sille laatuasteikot. Lisäksi olisi mahdollisesti hyvä yrittää ottaa vielä joku toinen viipalointiohjelma vertailuun, mikä olisi todennäköisesti taulukon perusteella Slic3r-, PrusaSlicer- tai RepetierHost-ohjelmisto.

6 TULOSTAMINEN

Kun kaikki parametrit olivat kohdillaan asetuksissa sekä kaikki mahdollinen oli tehty onnistuneen tulostuksen varmentamiseksi, oli testivaiheen aloittaminen mahdollista.

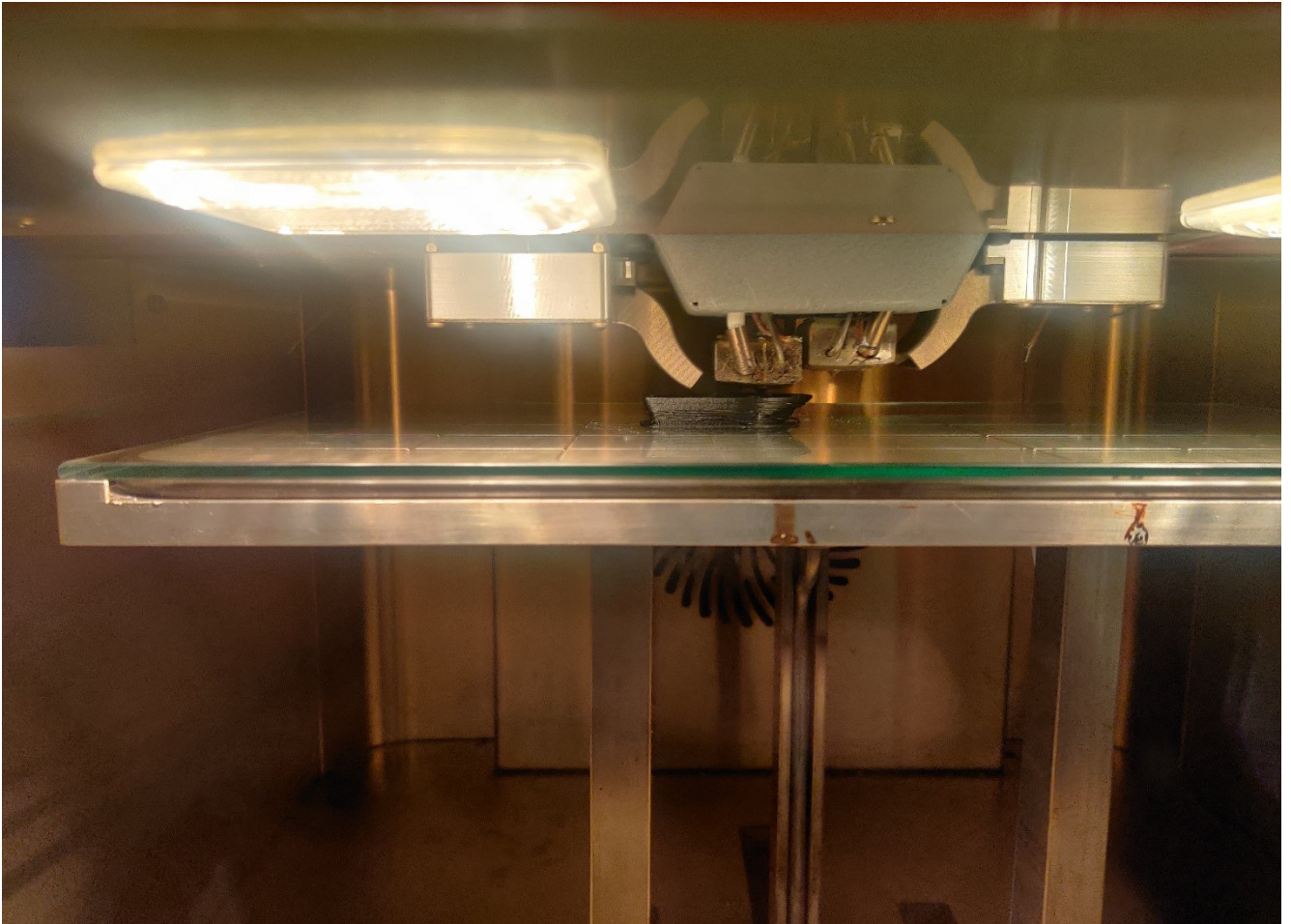
6.1 Simplify3D

Ensimmäiseksi generoitiin tulostimelle G-koodiksi 3DBenchy.gcode-tiedosto yrityksen oletussovelluksella Simplify3D-ohjelmalla. Näin saatiin vertailukelpoinen kappale, johon oli hyvä verrata minkälaista laatua, aikaa ja filamentin kulutusta oltiin hakemassa tutkittavilla viipalointiohjelmilla.



Kuva 21. Simplify3D -ohjelman generoimat arviot.

Edellisessä kuvassa näkyvän statistiikan mukaan (kuva 21) aikaa kuluisi noin puolitoista tuntia. Tulostuslankaa kuluisi noin 6473 millimetriä ja se painaisi noin 17,13 grammaa. Nämä arvot ovat hyvin paljon viitteellisiä ja etenkin ajan suhteen tulokset voivat vaihdella.



Kuva 22. Kappaletta on tulostettu noin 50 %.

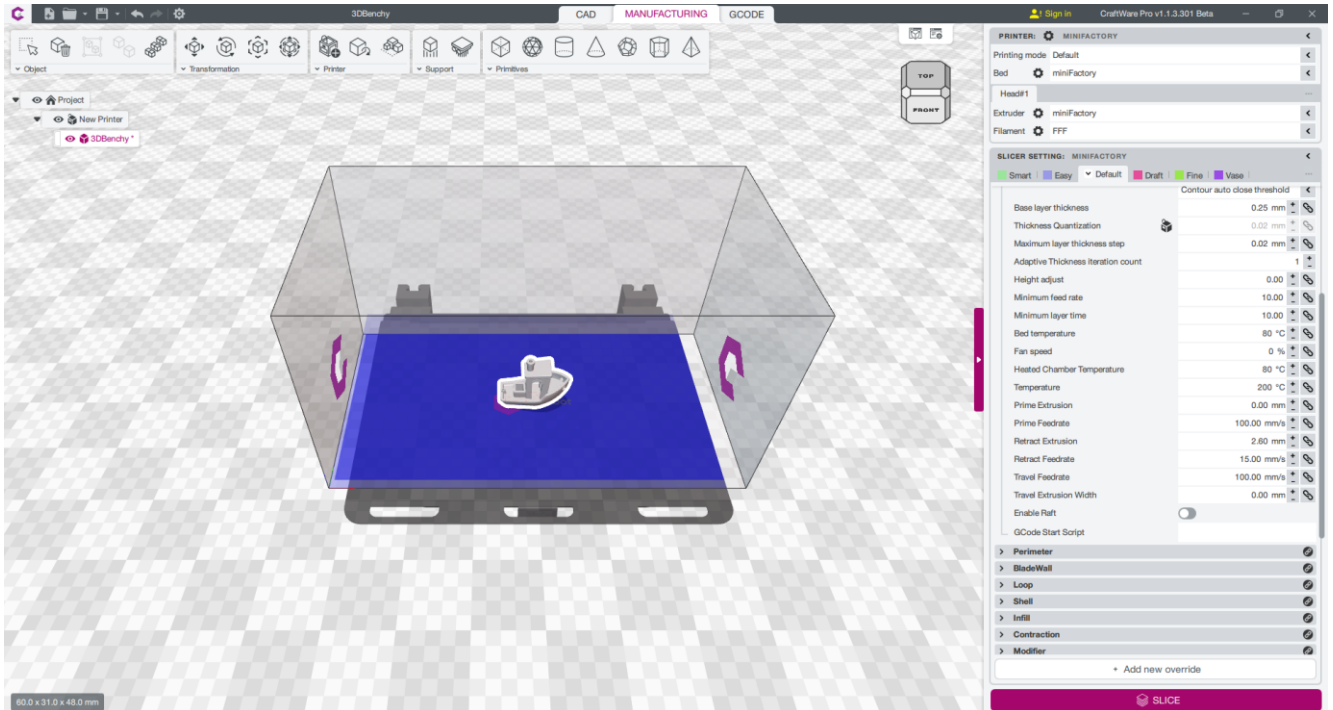
Tulostuksessa ei ilmennyt ongelmia (kuva 23). Tämä oli oletettavaa, sillä vastaavia malleja on tulostettu vastaavan prosessin mukaisesti huomattava määrä aiemminkin. Koko prosessi on jo hioutunut kohdalleen Simplify3D-ohjelmaa käyttäen.



Kuva 23. Simplify3D-ohjelmistolla generoitu ja tulostettu valmis 3DBenchy-malli. Kun oli saatu vertailukelpoinen malli tulostettua, voitiin lähteä tulostamaan uudella ohjelmistolla luotuja G-koodeja. Tavoitteena oli päästä vähintään yhtä laadukkaalle tasolle tulostusajasta riippumatta, mutta kuitenkin niin, ettei aikaa menisi enemmän.

6.2 CraftWare Pro

Craftware Pro-sovelluksen asetukset löytyivät suhteellisen helposti ja miniFactory Ultran ulottuvuudet, nopeudet ja muut parametrit saatiin hyvin nopeasti kohdilleen. Ainoa haaste oli oikeastaan, että CraftWare käyttää jossain määrin omia nimityksiään asetuksista, mikä on yleisesti 3d-viipalointiohjelmille ominaista.

















Kuva 24. CraftWare Pro-ohjelmisto.

Ensimmäisessä tulosteessa huomattiin heti alkumetreillä vakava ongelma. Tulostin tulos-
taa kyllä hienosti, mutta jättää noin 2–4 cm:n mittaisen raon tehdessään ”Brim”-piirrettä eli
lieriä alkuun (katso sivut 27–28). Viaksi todettiin liian suuri retraction-asetuksen määrä tai
nopeus, eli langan takaisinvento oli liian rajua. Seuraavaan tulostukseen säädettiin takaisin-
vetoa huomattavasti pienemmäksi.

Takaisinvedon säätämiseen ei ajallisesti mennyt kuin ehkä kaksi työpäivää, mutta työ oli
sinänsä turhauttavaa, koska vaikka kuinka takaisinvetoa säädettiin, niin mikään ei toiminut
(katso kuvat 25 ja 26). Konsultoimalla yrityksellä työskentelevää ohjaajaa, tultiin siihen tu-
lokseen, että miniFactory Ultra on tarkoitettu lukemaan relativista M82 G-koodia, kun taas
CraftWare kirjoittaa G-koodin absoluuttisesti M82-komentoon. Tässä vaiheessa tapahtuu
tulostimessa jokin ristiriita eikä se ymmärrä tehdä oikein takaisinvetoa.



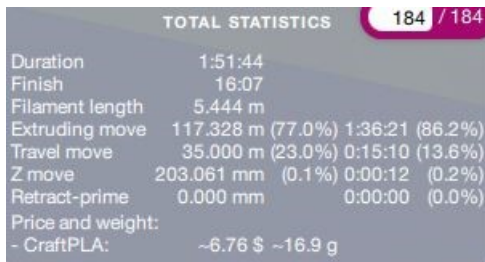
Kuva 25. Simplify3D käyttää takaisinvedossa syöttönopeutta 2,60 mm ja nopeus on 25 mm/s. Tämän kuvan malli on tehty CraftWarella syöttönopeudella 0,15 mm ja nopeus on 15 mm/s

 3DBenchy_Craftware.gcode	11.3.2022 13.02	Repetier-Host	9 435 kt
 3DBenchy_Craftware_4.gcode	11.3.2022 13.29	Repetier-Host	8 451 kt
 3DBenchy_retract.gcode	17.3.2022 8.46	Repetier-Host	9 270 kt
 3DBenchy_retract0.gcode	18.3.2022 12.30	Repetier-Host	8 426 kt
 3DBenchy_retract2.gcode	17.3.2022 9.14	Repetier-Host	9 111 kt
 3DBenchy_Retract2mm.gcode	18.3.2022 13.03	Repetier-Host	9 339 kt
 3DBenchy_retract3.gcode	17.3.2022 9.52	Repetier-Host	9 114 kt
 3DBenchy_retract4.gcode	17.3.2022 9.54	Repetier-Host	9 114 kt
 3DBenchy_retract5.gcode	17.3.2022 10.20	Repetier-Host	9 245 kt
 3DBenchy_retract6.gcode	17.3.2022 10.40	Repetier-Host	9 013 kt
 3DBenchy_retract7.gcode	18.3.2022 8.47	Repetier-Host	9 342 kt
 3DBenchy_retract8.gcode	18.3.2022 11.12	Repetier-Host	8 990 kt
 3DBenchy_retract9.gcode	18.3.2022 11.40	Repetier-Host	9 086 kt
 3DBenchy_retract10.gcode	18.3.2022 12.06	Repetier-Host	8 835 kt

Kuva 26. Osa takaisinvedon tutkimiseen käytetyistä tiedostoista.

Kun vika oli todettu, päätettiin kokeilla tulostamista kokonaan ilman takaisinvento-ominaisuutta. Näin saatiin tulostettua kokonainen kappale pienin vajaavaisuuksin (katso kuva 28). Tästä voitiin viimeistään päätellä ja varmistaa, että CraftWaren luoma G-koodi ei kykene kommunikoimaan tulostimen kanssa oikein ainakaan takaisinvedon kanssa. Kun CraftWareen asetettiin samat takaisinventoarvot kuin Simplify3D ohjelmaan, arvioi sovel- lus tulostusajaksi yli kolme tuntia, mikä oli myös omituista ja hälyttävää. Jos tätä toiminta ei käytetä, päästään lähelle Simplify3D:n avioita (katso kuvat 21 ja 27). Vaikka

retraction on tärkeä työkalu useimmissa tulostimissa, siitä huolimatta miniFactory Ultralla tulostetut kappaleet eivät kärsi laadukkaan lämmönsäädön vuoksi.



The image shows a screenshot of the CraftWare software interface. At the top, it displays 'TOTAL STATISTICS' and a progress indicator '184 / 184'. Below this, a list of statistics is provided, including duration, finish time, filament length, and various move types with their respective distances, percentages, and times. At the bottom, the price and weight for the print job are listed.

TOTAL STATISTICS				184 / 184	
Duration	1:51:44				
Finish	16:07				
Filament length	5.444 m				
Extruding move	117.328 m (77.0%)	1:36:21	(86.2%)		
Travel move	35.000 m (23.0%)	0:15:10	(13.6%)		
Z move	203.061 mm (0.1%)	0:00:12	(0.2%)		
Retract-prime	0.000 mm	0:00:00	(0.0%)		
Price and weight:					
- CraftPLA:	-6.76 \$	-16.9 g			

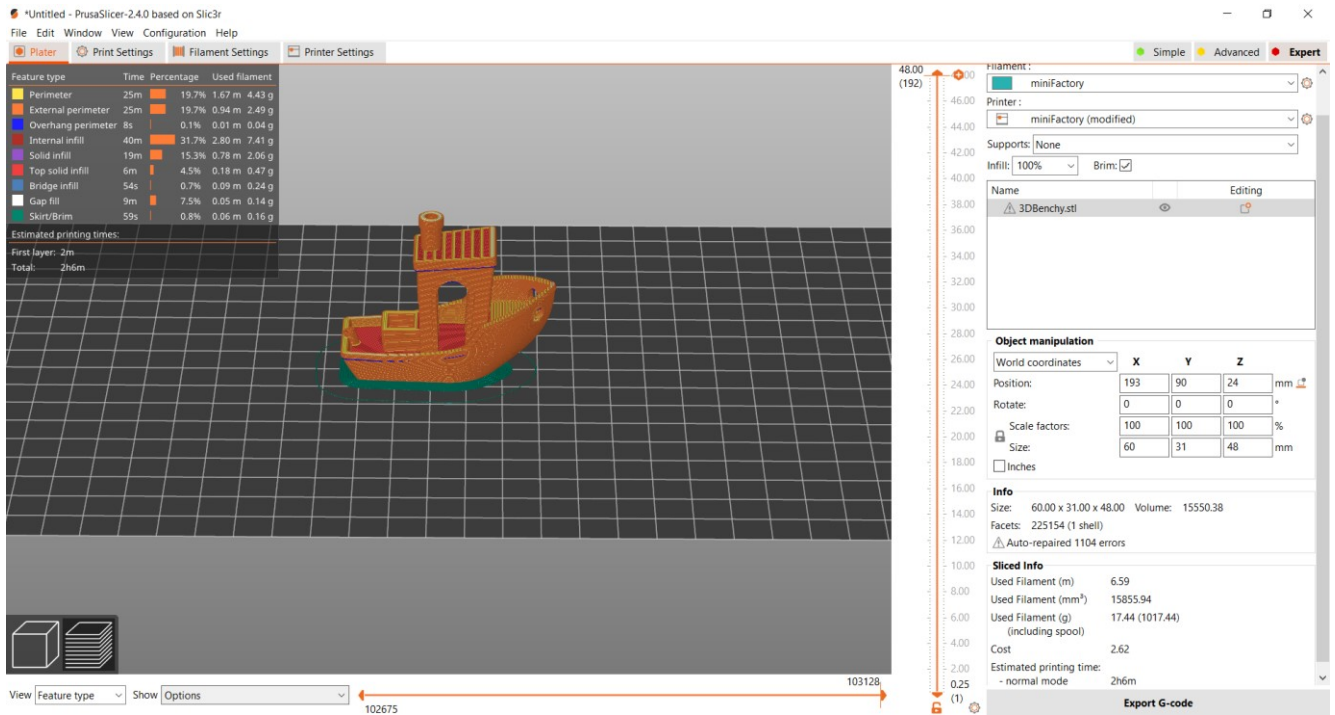
Kuva 27. CraftWare-arvot ilman takaisinvetoa.



Kuva 28. CraftWare Pro -ohjelmistolla generoitu ja tulostettu valmis 3DBenchy-malli.

6.3 PrusaSlicer

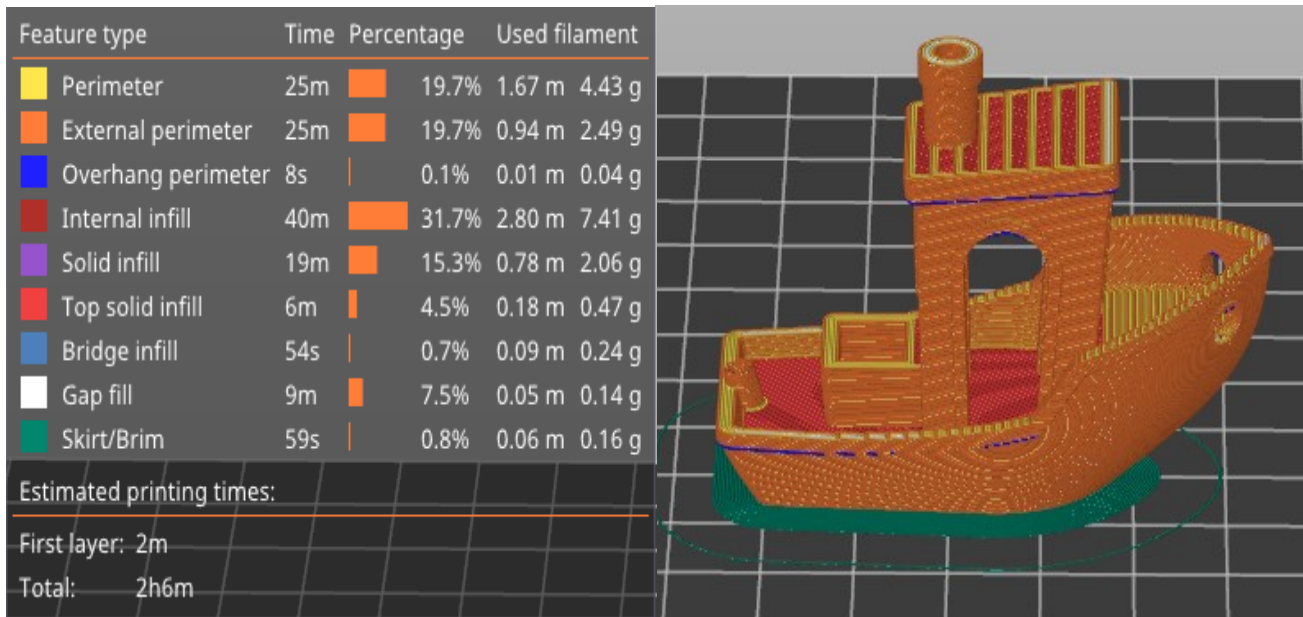
Toisena ohjelmana testattiin PrusaSlicer ohjelmistoa, koska se olisi CraftWaren kaltaisesti niin sanotusti uusi aluevaltaus. RepetierHost-ohjelmisto päätettiin jättää pois. Huomioidaan tässä kohtaa, että Slic3r jätettiin pois, koska kehittäjät ovat lopettaneet sen päivittämisen. Nykyiset ohjelmistoversiot olivat hyvin epävakaita ja ne kaatuivat lähes heti.



Kuva 29. PrusaSlicer-viipalointihjelma.

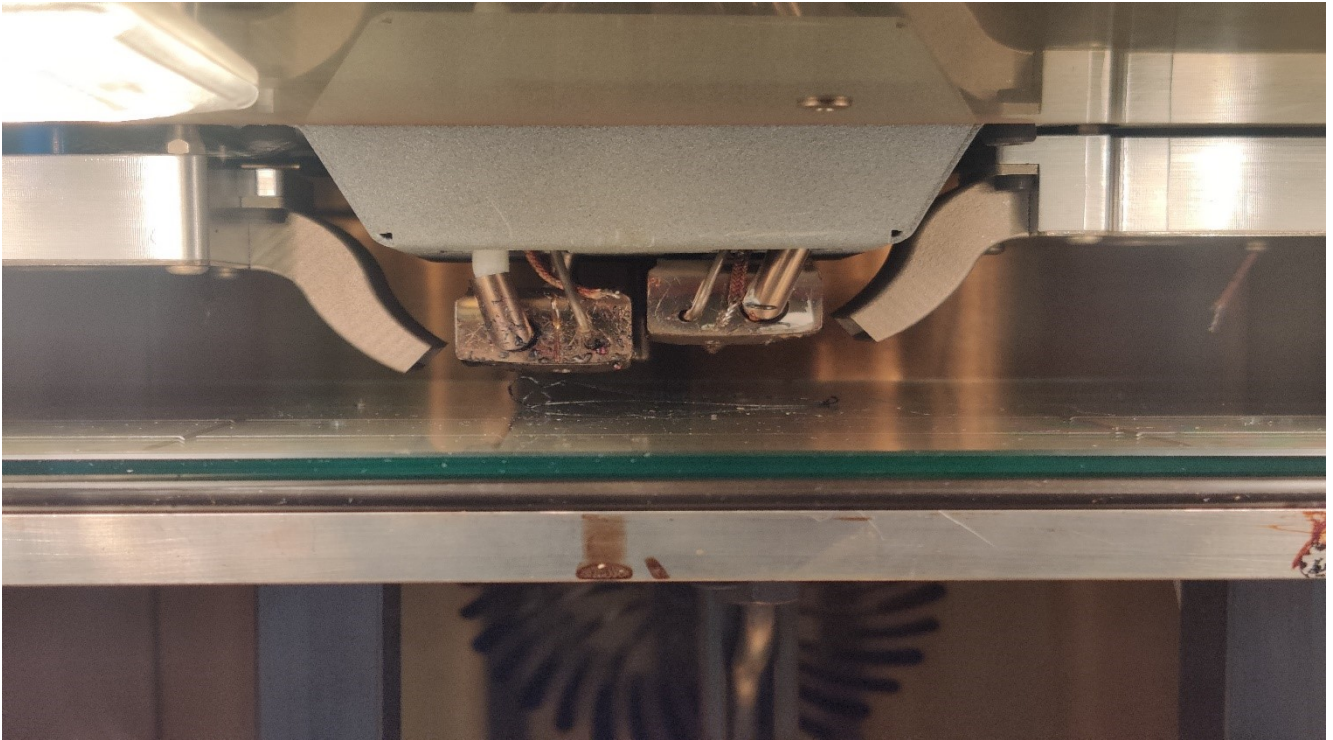
PrusaSlicer oli yllättävän helppokäyttöinen. Oikeat asetukset löytyivät näppärästi ja turhat asetukset loistivat poissaolollaan. Esimerkiksi CraftWarella on ohjelmassaan niin paljon eri asetuksia, että niiden parissa kuluu paljon aikaa. Miinuspuolena voidaan heti alkuun mainita Heated Chamber -ominaisuuden eli lämmitettävän kammion puuttuminen. Sitä ei ole, joten se joko asetetaan päälle kopioimalla G-koodiin komento tai asettamalla se tulostimesta manuaalisesti päälle ja lämpenemään haluttuun lämpötilaan. Toisena huomiona G-koodia lukiessa tuli vastaan se, että PrusaSlicer generoi koodin myös absoluuttiseen M82-muotoon, eikä relatiiviseen M83-komentoon. Tätä ei voida asetuksista muuttaa tai G-koodia muokata.

Yrityksen kanssa sovittiin tulostuspäivä G-koodin tarkastamiseen ja tulostamiseen. Käytettäessä samoja arvoja kuin aiemmin PrusaSlicer arvioi tulostamisen ajan ja materiaalin käytön osalta Simplify3D:n tuloksia hyvin lähelle osuvat lukemat (kuva 30) ja (kuva 21). CraftWare laski tulostusajaksi yli kolme tuntia. PrusaSlicerin ja Simplify3D:n ero on noin puoli tuntia.



Kuva 30. PrusaSlicerin generoimat erittäin tarkasti jaotellut arvot.

G-koodin tarkastamisen jälkeen voitiin siirtyä tulostamisen vaiheeseen. Simplify3D-ohjelmasta piti kopioida alku- ja loppuskripti PrusaSlicerin generoimaan .gcode-tiedostoon. Alkuun oli havaittavissa heti ongelmia. Jostain syystä extruderin eli pursottimen ja tulos-
tinalustan välillä oli neljä-viisi millimetriä liikaa välystä, mikä johti siihen, ettei tulostus-
lanka kiinnittynyt kunnolla tulostusalustaan (kuva 31).



Kuva 31. Pursottimen ja lämpöpedin välys liian suuri.

Mielenkiintoisen tästä viasta tekee se, että automaattisessa kalibroinnissa z-akseli ja peti paikoitetaan niin, että tulostamisen pitäisi alkaa optimaaliselta etäisyydeltä. Seuraavassa vaiheessa asiaa kompensoitiin ohjelmistossa vähentämällä neljä millimetriä pedin kokonaistulostusalueesta, mikä oli 180 millimetriä. Näin huijattiin tulostinta uskomaan, että peti olisi ylempänä, mutta sekään ei auttanut. Jostain syystä välys jäi liian suureksi. Tulostamista kokeiltiin myös auttaa laittamalla tulostuksen alkaessa manuaalisesti kompensointiä tulostimesta, mutta koska tulostaessa jokainen millimetrin kymmenys voi merkittävästi vaikuttaa tulostuslaatuun, on se ihmisen silmälle lähes mahdoton tehtävä.

Seuraavaksi testattiin tulostaa jokin aiemmin toiminut tiedosto, jotta voitaisiin todentaa, että vika ei ole mekaaninen. Tulostaminen lähti normaalisti käyntiin eikä prosessissa ollut mitään mainittavaa vikaa. Vika oli siis tällä hetkellä PrusaSlicerin luomassa G-koodissa tai käyttäjässä itsessään.

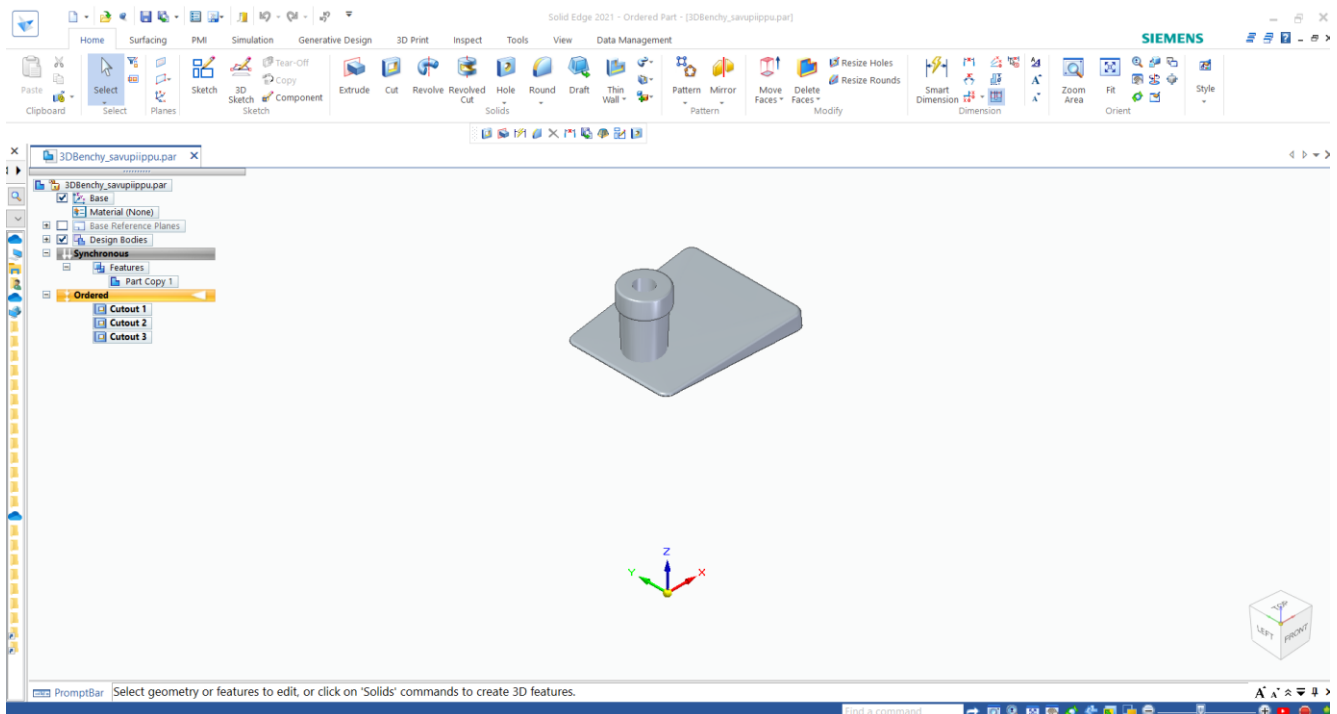
Päivän päätteeksi tehtiin vielä yksi kokeilu. Tekijä tarkasti ja vertaili PrusaSlicerin G-koodia Simplify3D:n toimivaan G-koodiin. Tällöin tehtiin huomio, että PrusaSlicerin koodissa ei ole selkeää merkintää siirtymisestä asetettuun z-akselin tason korkeuteen. Kun

tarkasteltiin PrusaSlicerin alkuperäistä koodia ilman alku- ja loppuskriptiä voitiin todeta, että tämä vaihe oli vahingossa leikattu pois. Jokaisella ohjelmistovalmistajalla on niin sanotusti oma "jalanjälki" tai "kieli" ja vanhasta tottumuksesta CraftWaren kanssa tämän työn tekijä kopioi alkuskriptin väärään kohtaan ja leikkasi muutaman oleellisen rivin koodia pois. Seuraavaksi tulostettiin malli korjatulla g-koodilla samoilla arvoilla kuin Simplify3D-malli ja saatiin tulokseksi (kuva 32) mukainen tuotos.



Kuva 32. PrusaSlicerin ensimmäinen loppuun asti päässyt tulostus.

Tulostus oli lähes täydellinen, osalta henkilökuntaa kysyttäessä sitä keuhuttiin oikein hyväksi. Ainoastaan savupiippu ei ole ehtinyt jäähtyä tarpeeksi. Mutta tämä ongelma oli vain asetuksista ja säädöistä riippuvainen, ja seuraavassa vaiheessa tulostettiin savupiippuja hienosäätäen asetuksia. Ensiksi oli kuitenkin hyvä leikata mallia pienemmäksi. Ei ole järkevää tuhlata kahta tuntia aikaa sekä tulostuslankaa, jos vasta tulostuksen loppupäässä itse ongelma ilmenee ja muuten tulostus on hyvä. 3DBenchy avattiin Siemensin CAD-mallinnukseen soveltuvalla Solid Edgellä ja mallia leikattiin sopivan kokoiseksi testikappaleeksi (kuva 33), jonka jälkeen se tallennettiin stl-formaattiin. Näin malli oli taas valmiina tulostettavaksi.



Kuva 33. Solid Edgellä muokattu 3DBenchy sopivan kokoiseksi.

Tulostusaika tippui merkittävästi, arvioitu kaksi tuntia ja kuusi minuuttia vaihtui 12 minuuttiin. Seuraavaksi säädettiin asetuksia siten, että jos tason tulostusaika on alle 10 sekuntia, tuulettimet alkavat puhaltaa täysillä, jotta tulostuslanka jäähmettyisi. Samalla tason tulostusnopeutta hidastetaan merkittävästi, muttei kuitenkaan alle 10 mm/s (kuva 36).

Enable

Keep fan always on:
 Enable auto cooling:

If estimated layer time is below ~10s, fan will run at 100% and print speed will be reduced so that no less than 10s are spent on that layer (however, speed will never be reduced below 10mm/s).
 If estimated layer time is greater, but still below ~60s, fan will run at a proportionally decreasing speed between 100% and 35%.
 During the other layers, fan will be turned off.

Fan settings

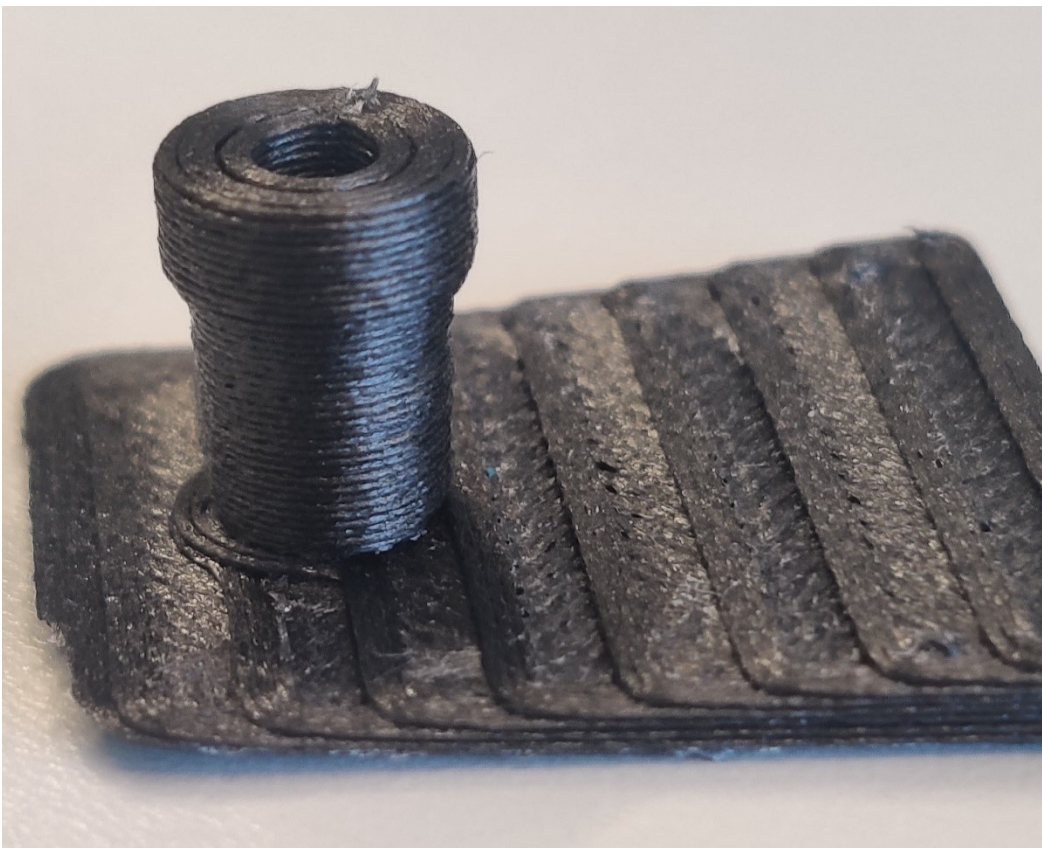
Fan speed: Min: % Max: %
 Bridges fan speed: %
 Disable fan for the first: layers
 Full fan speed at layer:

Cooling thresholds

Enable fan if layer print time is below: approximate seconds
 Slow down if layer print time is below: approximate seconds
 Min print speed: mm/s

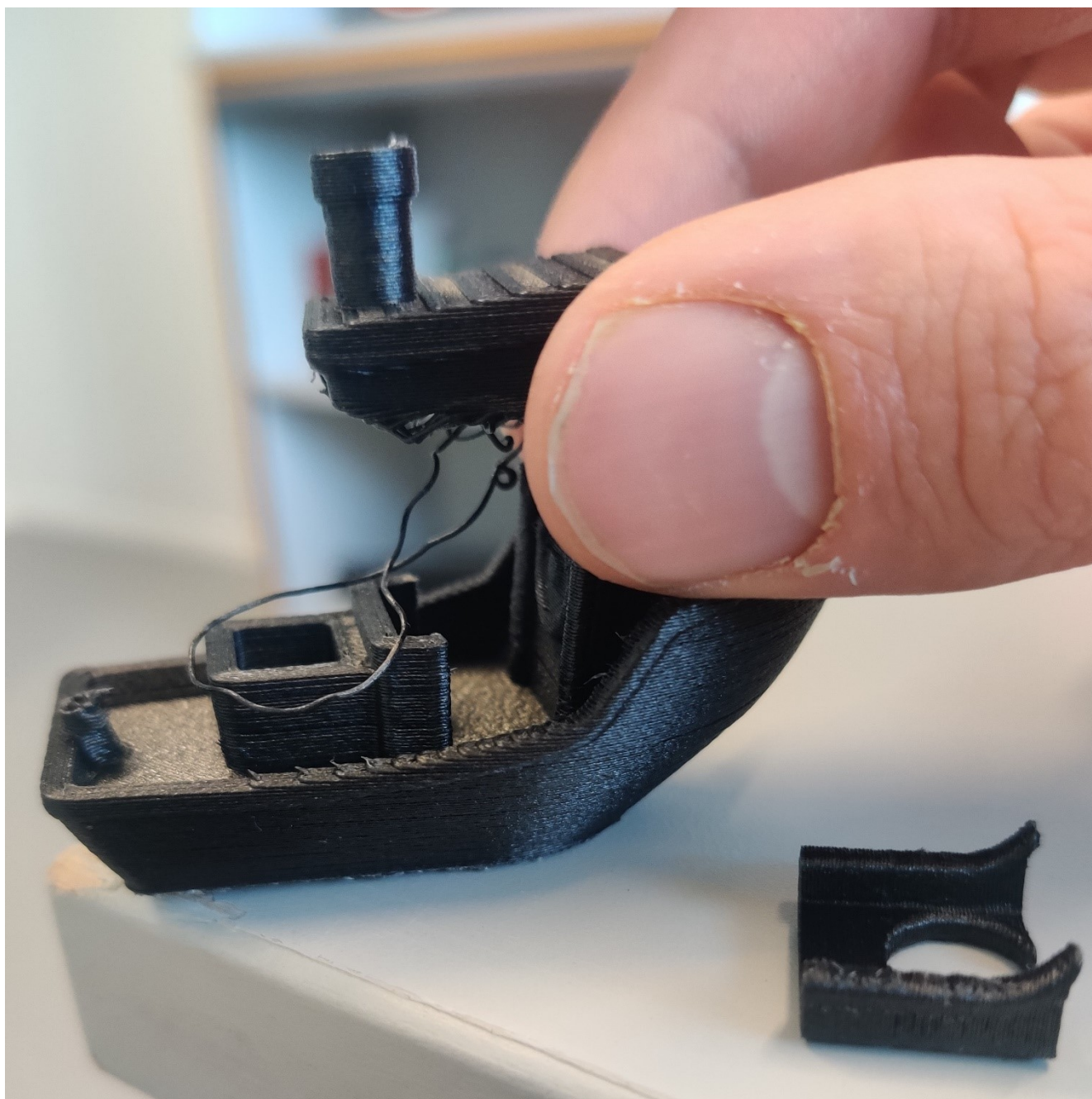
Kuva 34. Kuva PrusaSlicerin tuuletusasetuksista.

Seuraavaksi tulostettiin pelkkä savupiippu. Parin vuoden tulostuskokemuksen perusteella nämä hienosäädöt eivät yleensä mene heti oikein, mutta kaikeksi yllätykseksi nyt voidaan kuvan (kuva 35) mukaisesti todeta, että tulostus sujui erittäin hyvin.



Kuva 35. Onnistunut 3DBenchyn savupiippu.

Seuraavaksi yritettiin tulostaa vielä korjatuilla asetuksilla uusi kokonainen 3DBenchymalli, että voitaisiin varmentaa tulostuksen sujuvan täydellisesti alusta loppuun. Seuraavassa tulostuksessa ilmeni jokin komplikaatio hytin tulostamisen vaiheessa (kuva 36) mutta koska virhe voi olla vain satunnainen, laitettiin vielä sama tiedosto uudelleen tulostumaan. Savupiippu oli tulostunut erittäin hyvin.



Kuva 36. Epäonnistunut tulostus. Hytin puolikas oli katkennut tulostuksen aikana pois, mutta tulostus oli silti jatkunut loppuun saakka ilman uusia ongelmia.

Seuraava tulostus osoittautui onnistuneeksi eikä edellistä komplikaatiota ilmaantunut (kuva 37). Eroa oli hyvin vähän Simplify3D-malliin, jos ollenkaan. Joissakin kohdissa voitaisiin väittää tulosteen olevan jopa laadukkaampi (kuva 38). Henkilökunta oli tulostuksen laatuun erittäin tyytyväinen.



Kuva 37. PrusaSlicerilla tehty onnistunut tulostus.



Kuva 38. Vasemmalla PrusaSlicerilla ja oikealla Simplify3D:llä tulostettu malli.

7 TULOKSET

miniFactory sai työn tuloksena tutkimuksellisen katsauksen markkinoiden suosituimmista ilmaisista viipalointiohjelmistoista ja niiden soveltuvuudesta yrityksen itse valmistamille tulostimille. Tutkimustyöstä valikoitui kaksi viipalointiohjelmistoa, joilla voisi olla potentiaalisti jalansijaa liiketoiminnassa. Työn tarkoituksena ei ollut syrjäyttää yrityksellä käytössä olevaa maksullista lisenssiä omaavaa Simplify3D:tä vaan vertailla, kuinka sen rinnalle voitaisiin valjastaa muita ohjelmistoja

CraftWare Pron ilmaisen hinnan lisäksi sen houkuttelevin puoli on ohjelmiston interaktiivisuus, joskin valittavista asetuksista reilusti yli puolen voidaan sanoa olevan turhia. Jokainen asetusvaihtoehto sisältää tekstilaatikon, jossa on yksityiskohtaiset kuvaukset ja lisätietoja, joiden perusteella käyttäjät voivat olla lähestulkoon varmoja, kuinka asetus vaikuttaa heidän tulostukseensa. Plussaksi voidaan laskea myös ohjelmistosta löytyvä Heated Chamber -ominaisuus, mikä on erittäin harvinainen viipalointiohjelmisissa.

Laatu on hieman huonompi ja tulostusajat reilusti pidemmät kuin Simplify3D:llä. CraftWare ei tue niin monia täyttökuvioita kuin Simplify3D ja tarjoaakin vain muutamia perustäyttökuvioita. CraftWare ei toiminut oikein takaisinvetotoiminnon kanssa. Tämä johtuu todennäköisesti G-koodin tyylistä ja tähän ei pystytä vaikuttamaan. Ilman takaisinvetoa saatiin kyllä tulostettua oikeanlainen malli, mutta pidemmän kaavan mukaisissa isommissa tulostuksissa riski ongelmiin on niin suuri, että tämän ominaisuuden pois jättäminen olisi epäloogista. Siksi muut epäkohdat huomioon ottaen CraftWare Prota ei ole suositeltavaa käyttää yhdessä miniFacotry Ultra -tulostimien kanssa, ainakaan asiakaskäytössä.

PrusaSlicerin vahvuudet ovat hyvin neutraali ja yksinkertainen ulkonäkö sekä se, että ohjelmisto tuntuu alusta alkaen käyttäjäystävälliseltä. Eri käyttäjiä varten kokemusasteet on jaoteltu kolmeen osioon. Ammattilaiskäyttöön luodussa Expert-osiossa työkalut on jaettu neljään ei lokerikkoon, joissa on tarpeellinen määrä tärkeimpiä asetuksia hyvin jaettuna ja käyttäen oikeaa termistöä. Kokenut 3D-tulostaja pääsee nopeasti sisälle viipalointiohjelman toimintaan.

Kun ohjelma avataan ensimmäisen kerran, PrusaSlicer käynnistää konfigurointiavustajan, joka opastaa tulostimien ja materiaalien valinnassa. Kun avustaja on valmis, valitut

tulostimet ja materiaalit ovat käytettävissä päänäytössä. PrusaSlicer opastaa Simplify3D:n ja CraftWaren lailla käyttäjää. Esimerkiksi kun viedään kursori jonkin tietyn asetuksen päälle, selittää ohjelmisto yksityiskohtaisesti, mitä kyseinen asetus tekee.

Tulostuslaatu on erittäin hyvä, sitä voidaan kehua vähintään samanvertaiseksi kuin Simplify3D:llä viipaloidun tiedoston tuottamaa tulostuslaatua. Nopeudessa PrusaSlicer kuitenkin hävisi testeissä noin puoli tuntia. Siitä ei myöskään löydy Heated Chamber -ominaisuutta, eli se pitää lisätä käsin G-koodiin tai säätää manuaalisesti tulostimesta haluttuun arvoon.

PrusaSlicer voisi olla potentiaalinen ilmaisvaihtoehto Simplify3D:n rinnalle. Tutkimustyön tekijä voisi vahvasti suositella tätä ilmaisohjelmistoa yritykselle käytettäväksi.

G-koodin flavor tai firmware eli toisin sanoen G-koodin tyyli voi olla ratkaiseva tekijä retractionin, eli tulostuslangan takaisinvento -toiminnon ongelmassa. G-koodin tyylejä on joi-tain kymmeniä eri valmistajista riippuen. Alussa ajateltiin CraftWarella viipaloidun tiedoston tulostusongelmien liittyvän absoluuttisen ja relatiivisen paikoituksen ristiriitaan. PrusaSlicer todisti kuitenkin ongelmien olevan jotain muuta. PrusaSlicer käyttää myös absoluuttista paikannusta ja takaisinvento toimi täydellisesti samoilla asetuksilla, mitkä ovat käytössä Simplify3D:ssä. CraftWare ei toiminut ollenkaan näillä samoilla asetuksilla. Voidaan siis to-deta, että G-koodin tyyllillä voi olla ratkaiseva tekijä tulostuslaadullisissa ongelmassa jatkos-akin, jos yritetään kokeilla muita viipalointiohjelmia.

Absoluuttinen ja Relatiivinen paikoitus eroaa G-koodissa jonkin verran. Mutta vaikka mi-niFactory Ultra on suunniteltu käyttämään relatiivista liikettä, mitään merkittäviä komplikaatioita ei tässä työssä esiintynyt absoluuttisen G-koodin käytöstä, vaikka alun perin niin luul-tiin. Vaikka viipalointiohjelma generoisi G-koodin absoluuttiseksi, sen ei pitäisi olla on-gelma eikä este testata tulostamista yrityksen tulostimilla, kunhan alku- ja loppuskriptit ovat kunnossa.

Simplify3D vahvasti asemaansa markkinoiden parhaana ja yrityksen tarpeita vastaavana viipalointiohjelmana. 150 € maksava kertamaksu on erittäin edullinen hinta siitä, että tulos-laatu on aina lähes täydellinen ja ongelmia on vähän.

8 POHDINTAA JA YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli tehdä kattava tutkimus saatavilla olevista ilmaisista viipalointiohjelmista miniFactory-osakeyhtiölle ja testata niiden käyttäytymistä sekä soveltuvuutta yrityksen suunnitteleuille ja valmistamille tulostimille. Tulostamisesta syntynyt lopputuote on olennainen osa työn onnistumisen mittaamista. Opinnäytetyön tekijällä oli aiempaa kokemusta 3D-tulostamisesta entisessä työharjoittelussa ja työsuhhteessa, mikä helpotti koko työn tekoa huomattavasti.

Työ alkoi tutustumalla alkupalaverissa annettuihin, sovelluksilta vaadittaviin asetuksiin ja toimintoihin. Työtä varten tehtiin Excel-taulukko mittaamaan jokaisen sovelluksen kykyä toimia yrityksen valmistamien tulostimien kanssa. Näiden perusteella valikoitui kaksi viipalointiohjelmia, jotka esiteltiin testattavaksi seuraavassa palaverissa. Yrityksen ohjaaja perehdytti tutkimustyötä tekevän yrityksen oletusohjelman, Simplify3D käyttöön, helpottaakseen uusiin ohjelmiin tutustumista ja antaakseen kilpailevan vertailukohteen. Työn tekijä kalibroi jokaisen uuden käytettävän sovelluksen itse tulostimille käyttökelpoiseksi ja tulosti käyttöönoton jälkeen testitulosteet miniFactory Ultra -tulostimella.

Lopputulokseksi saatiin yritykselle kattava tutkimus markkinoiden suosituimmista ilmaisista viipalointiohjelmistoista ja niiden soveltuvuudesta yrityksen myymille, heidän itse valmistamilleen tulostimille. Molemmat jatkotutkimuksiin valitut viipalointiohjelmistot osoittautuivat potentiaalisiksi myös todellisen liiketoiminnan näkökulmasta. Työn tarkoituksena ei ollut syrjäyttää yrityksellä käytössä olevaa maksullista lisenssiä omaavaa Simplify3D:tä vaan vertailla, kuinka sen rinnalle voitaisiin valjastaa muita ohjelmistovalmistajia. Yritys sai myös tietää, mitkä ominaisuudet ovat merkittäviä tarkastellessa muita ohjelmistoja.

Tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista selvittää, voitaisiinko ilmaisohjelmia jatkokehittää ja kalibroida yritykselle toimivaksi ratkaisuiksi. Laaja kirjo erilaisia ilmaisohjelmia voisi poikia monia asiakassuhteita liiketoiminnassa, sillä se lisää osaavien tekijöiden määrää huomattavasti. CraftWare Prolla on esimerkiksi ohjelmassaan CAD-tietokoneavusteinen suunnitteluosio täysin ilmaiseksi. Tässä työssä päädyttiin siihen, että CAD-puoli ei kuulu osaksi tutkimusta sen viedessä liikaa aikaa, eikä se toki kuulunut alkuperäiseen toimeksiantoonkaan. Mutta tulevaisuudessa se voisi olla mielenkiintoinen kehityksen kohde.

LÄHTEET

- 3dbenchy. (2020). *#3DBenchy – A Small Giant in the World of 3D Printing*.
<https://www.3dbenchy.com/3dbenchy-a-small-giant-in-the-world-of-3d-printing/>
- 3DPrinting. (i.a.). *What is 3D Printing?* <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- 3dprinterchat. (15.4.2017) *3D Printing – Layer Height Under the Microscope*.
<https://3dprinterchat.com/3d-printing-layer-height-microscope/>
- 3d-tulostus. (i.a.). *DSM Novamid ID1030 CF10 PA6/66*. <https://www.3d-tulostus.fi/DSM-Novamid-ID1030-CF10-PA6/66>
- 43dprint. (01.11.2021). *What Is Layer Height in 3D Printing? Use This Knowledge to Improve the Quality!* <https://43dprint.org/layer-height-3d-printing/>
- all3dp. (06.01.2021). *Best 3d slicer software of 2021*. <https://all3dp.com/1/best-3d-slicer-software-3d-printer/>
- Carolo, L. (13.4.2020). *What Is a 3D Slicer? – Simply Explained*. <https://all3dp.com/2/what-is-a-3d-slicer-simply-explained/>
- easy3dhome. (19.3.2021). *3D Printing Speed – what is it?*
<https://www.easy3dhome.com/printing-speed/>
- Filament2print. (09.8.2017). *Tips for 3d Printing: Before Printing*. https://filament2print.com/gb/blog/26_tips-3d-printing-before.html
- GE additive. (i.a.). *What is additive manufacturing?* <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
- Industrial 3d printing with minifactory ultra. (i.a.). *INDUSTRIAL 3D PRINTING WITH MINIFACTORY ULTRA*. <https://minifactory.fi/industrial-3d-printer/why-minifactory-ultra/>
- Minifactory. (i.a. -a). *Heated chamber in 3d printing*. <https://minifactory.fi/heated-chamber-in-3d-printing/>
- Minifactory. (i.a. -b). *Minifactory – Your trusted partner in additive manufacturing*
<https://minifactory.fi/>
- O’Connell, J. (18.03.2021). *10 Most Important 3D Printer Slicer Settings*.
<https://all3dp.com/2/3d-slicer-settings-3d-printer/>

- Peda. (i.a.). *Lämpöenergia on aineen rakenneosasten liikettä*. <https://peda.net/siilinjarvi/ahmo/opiskelu/fysiikka/anna/8k/efysiikka-8/1loarl>
- Siencedirect. (2018). *History of 3D Printing*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128039175000018>
- Simplify3D. (i.a. -a). *3D printing g-code tutorial*. <https://www.simplify3d.com/support/articles/3d-printing-gcode-tutorial/>
- Simplify3D. (i.a. -b). *3D Rafts Skirts and Brims!* <https://www.simplify3d.com/support/articles/rafts-skirts-and-brims/>
- Simplify3D. (i.a. -c). *Beginner's Guide to Auto Bed Leveling in Simplify3D* <https://www.simplify3d.com/support/articles/beginners-guide-to-auto-bed-leveling/>
- tianseoffice. (06.9.2019). *What Is Infill in 3D Printing?* <https://www.tianseoffice.com/blog/how-to-use-infill-percentage-and-pattern-enhance-strength-save-material/>
- Ultimaker. (07.1.2021). *What is FFF fused filament fabrication technology for 3d printing*. <https://ultimaker.com/learn/what-is-fff-fused-filament-fabrication-technology-for-3d-printing>

LIITTEET

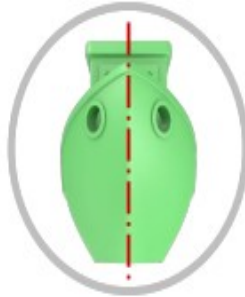
Liite 1. 3DBenchy "räjäytyskuva".

Liite 2. 3DBenchy mitattavia arvoja.

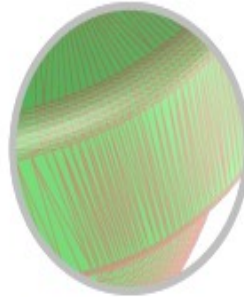
Liite 1. 3DBenchy ”räjäytyskuva” (3dbenchy, 2020).



The hull is a large, smooth overhanging curved surface that is challenging to 3D-print and clearly reveals any surface deviations.



#3DBenchy is perfectly symmetrical which makes any skewness and warping easy to detect.



The STL file is triangulated at a very high resolution which yields smooth surfaces. The maximum deviation from the original CAD file is set to 0.001 mm.



The top surfaces of the deck, box and chimney are planar, horizontal and parallel to the bottom plane.



If you have a high-resolution 3D printer, this is where you can shine! The letters on the stern are less than 2 mm tall and the thickness of #3DBenchy's nameplate is just 0.1 mm.



The chimney is designed to define concentric cylindrical shapes with inner and outer diameters. These clearly show deviations in roundness.



Overhang issues are the Achilles' heel of 3D printing. #3DBenchy offers several challenging areas such as in the difficult-to-reach inside of the bridge.



Low-slope-surfaces clearly show the layered structure of 3D printing. If printed horizontally, #3DBenchy's gunwale and roof of the bridge will reveal the layer-steps.



The rear window offers a large circular horizontal hole and the boat's wheel offers a round difficult-to-reach secluded feature.



The hawsepipe represents a small short horizontal hole and has a very thin flange against the hull.



The fishing-rod-holder provides a very small slightly-slanted blind hole.



The shallow letters at the bottom of the boat clearly reveal typical first-layer-squashing.

Liite 2. 3DBenchy mitattavia arvoja (3dbenchy, 2020).

