

Mika Korkiakoski

3D-TULOSTIMEN KÄYTTÖNOTTO JA OPTIMOINTI

Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Tuotantotalouden koulutus
Maaliskuu 2022



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Maaliskuu 2022	Tekijä/tekijät Mika Korkiakoski
Koulutus Tuotantotalous		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi 3D-TULOSTIMEN KÄYTTÖÖNOTTO JA OPTIMOINTI		
Työn ohjaaja Jari Kaarela, Sakari Pieskä		Sivumäärä 43 + 1
Työelämäohjaaja Pekka Haapala		
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin Centria-ammattikorkeakoululle. Työn toteuttamisessa hyödynnettiin Centria-ammattikorkeakoulun Robo3D Lab:n laitteita.</p> <p>Työn aiheena oli 3D-tulostus; sen kehittyminen, käyttökohteet sekä sen edut ja haasteet perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Lisäksi perehdyttiin ISO/ASTM 52900/2019-standardin mukaisiin aineita lisääviin valmistusmenetelmiin ja yleisimpiin 3D-tulostusmateriaaleihin. Aihe on laaja ja siksi työstä oli tavoitteena saada kattava yleiskuva alasta.</p> <p>Käytännön tavoitteena työssä oli Robo3D Lab:n uuden 3D-tulostimen käyttökuntoon saattaminen ja tulostimen vaatiman viipalointiohjelman asentaminen. Käyttöönoton yhteydessä tulostimella valmistettiin komponentteja yleisimmillä muovimateriaaleilla ja viipalointiohjelman parametrejä pyrittiin optimoimaan parhaimman lopputuloksen aikaansaamiseksi.</p> <p>Lähteinä työssä käytettiin muun muassa Savonia ammattikorkeakoulun 3D-tulostuksen opintojakson materiaalia ja alan internet sivuja. Tulostimen kokoonpano ja käyttöönotto suoritettiin laitteen mukana tulleita valmistajan ohjeita noudattamalla.</p>		
Asiasanat 3D-tulostus, 3D-tulostusmateriaalit, 3D-tulostusmenetelmät, materiaalia lisäävä valmistus		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date March 2022	Author Mika Korhikoski
Degree programme Industrial engineering and management		
Name of thesis SETTING UP AND OPTIMIZING 3D-PRINTER		
Centria supervisor Jari Kaarela, Sakari Pieskä	Pages 43 + 1	
Instructor representing commissioning institution or company Pekka Haapala		
<p>This thesis was done for Centria University of Applied Sciences. Centria's Robo3D Lab equipment was used to carry out the work.</p> <p>The topic of the work was 3D printing; its development, applications and advantages and challenges compared to traditional manufacturing methods. In addition, material-supplementing manufacturing methods and the most common 3D printing materials in accordance with the ISO / ASTM 52900/2019 standard were reviewed. The topic is broad and therefore the aim of the work was to get a comprehensive overview of the field.</p> <p>The practical goal of the work was to set up a new 3D printer in Robo3D Lab and to install the slicing software required by the printer. During commissioning, the printer was used to manufacture components with the most common plastic materials, and the parameters of the slicing program were optimized to achieve the best result.</p> <p>The sources used in the work were the material of the course on 3D printing at Savonia University of Applied Sciences and the Internet pages in the field. The printer was set up and commissioned according to the manufacturer's instructions that came with the device</p>		
Key words 3D printing, 3D printing materials, 3D printing techniques, additive manufacturing		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

CAD	Computer aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
Cartesian	3D-tulostimen rakenne, jossa tulostusalusta liikkuu Y-akselin suunnassa ja tulostussuutin sekä X- että Y-akselin suunnassa
Filamenti	Tulostuksessa käytettävä muovilanka
G-code	Viipalointiohjelmalla luotava tulostimen ohjaustiedosto
GrabCad	Pilvipohjainen palvelu, joka sisältää vapaasti ladattavia CAD-mallinnuksia
Granulaatti	Raemainen muovirouhe
Infiltraatio	Jälkikäsittelymenetelmä, jossa valmistuneesta kappaleesta poltetaan pois sideaine ja huokoiseen kappaleeseen imeytetään matalan lämpötilan metallia
Loppukovetus	Jälkikäsittelymenetelmä, jossa valmis kappale pinnoitetaan tai siihen imeytetään kovetusainetta
Multimateriaali	Useista eri materiaaleista koostuva kokonaisuus
Sintraus	Jälkikäsittelymenetelmä, jossa valmiista kappaleesta poltetaan pois sideaine ja jäljelle jäävät metallipartikkelit sintrautuvat kiinni toisiinsa
.stl	Viipalointiohjelman tukema tiedostomuoto
Thingiverse	Internet-sivusto, joka sisältää vapaasti käytössä olevia 3D-, laserleikkaus-, ja koneistusmalleja sekä tietoa tulostusarvoista
Viipalointiohjelma	Tulostuksen suunnittelu- ja simulointiohjelma

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS	2
2.1 Valmistusmenetelmien kehitys.....	2
2.2 Menetelmien hyödyt.....	4
2.3 Menetelmien haasteet.....	5
2.4 Käyttökohteet	5
3 ISO/ASTM 52900/2019-STANDARDIN MUKAISET VALMISTUSMENETELMÄT	9
3.1 Materiaalin pursotus (Material Extrusion)	9
3.2 Materiaalin suihkutus (Material Jetting).....	11
3.3 Sideaineen suihkutus (Binder Jetting)	12
3.4 Kerroslaminointi (Sheet Lamination)	13
3.5 Nesteen fotopolymerisointi (VAT Photopolymerization)	14
3.6 Jauhepetimenetelmät (Powder Bed Fusion)	15
3.7 Suorakerrostusmenetelmät (Directed Energy Deposition)	16
4 YLEISIMMÄT 3D-TULOSTUSMATERIAALIT	18
4.1 PLA (Polylactic acid)	18
4.2 ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)	19
4.3 ASA (Acrylonitrile styrene acrylate)	20
4.4 PETG (Polyethylene terephthalate, glycol-modified)	21
4.5 TPU (Thermoplastic polyurethane).....	22
4.6 PVA (Polyvinyl alcohol).....	23
5 TULOSTUSPROSESSI	24
5.1 Esikäsittely ja suunnittelu	25
5.2 Prosessointi	26
5.3 Jälkikäsittely ja viimeistely	27
6 3D-TULOSTIMEN KÄYTTÖÖNOTTO JA OPTIMOINTI	29
6.1 Tulostimen valmistelu ja käyttöönotto.....	29
6.2 Viipalointiohjelman asennus ja käyttöönotto.....	31
6.3 Testitulosteet.....	33
6.4 Tulokset.....	35
7 POHDINTA	40
LÄHTEET	41
LIITTEET	
KUVIOT	
KUVIO 1. Tulostuspalveluita käyttävien toimialojen jakautuminen vuonna 2020.....	6
KUVIO 2. 3D-tulostuksen käyttökohteiden jakaantuminen vuonna 2020	6

KUVIO 3. Materiaalin pursotuksen periaate	10
KUVIO 4. Materiaalin suihkutuksen periaate ja laitteisto	12
KUVIO 5. Nesteen fotopolymerisointi	15
KUVIO 6. Jauhepetimenetelmä	16
KUVIO 7. Tulostusprosessin vaiheet.....	24
KUVIO 8. Tukirakenteita vaaditaan yli 45° kulmassa oleville rakenteille.....	26

KUVAT

KUVA 1. 3D-tulostuksen pääkategoriat	9
KUVA 2. Sideaineen suihkutuksen periaate	13
KUVA 3. Kerros laminointilaitteisto ja tulostuksen periaate	14
KUVA 4. Suorakerrostuksen periaate.....	17
KUVA 5. ABS-muovin tulostamiseen sopivia koteloituja tulostimia	20
KUVA 6. TPU muovista valmistettu joustava juomapullo.....	22
KUVA 7. Tukimateriaalia vaatinut tuloste ja sama kappale tukimateriaali poistettuna.....	23
KUVA 8. Muodoiltaan optimoitu kappale.....	25
KUVA 9. Tulostimen komponentit ennen kokoonpanoa.....	29
KUVA 10. Laitteen mukana toimitetut työkalut ja oheistuotteet	30
KUVA 11. Suuttimen ja tulostusalustan välisen välyksen säätö	31
KUVA 12. Tulostimen lisäys Cura viipalointiohjelmaan	32
KUVA 13. Tulostimen asetusten korjaaminen	32
KUVA 14. Cura:n virtuaalinen tulostustilavuus ja valikot	34
KUVA 15. 0,28 mm ja 0,12 mm:n kerroskorkeudella tulostetut PETG kuutiot.....	35
KUVA 16. Valmistajan ja optimoiduilla parametreilla tulostettu ”benchy”	36
KUVA 17. 0,28 mm:n ja 0,12 mm:n kerroskorkeudella tulostetut PLA+ kuutiot.....	37
KUVA 18. ”Ironing” ominaisuuden vaikutus kappaleen ylimpään kerrokseen	37
KUVA 19. PLA+ filamentista valmistetut ”benchy”	38

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Muovitulosteiden pakolliset ja mahdolliset jälkikäsittelymenetelmät.....	28
--	----

1 JOHDANTO

Materiaalia lisäävän 3D-tulostamisen käyttö teollisuudessa yleistyy koko ajan. Erilaisia tulostusmenetelmiä ja -materiaaleja on paljon, ja ne kehittyvät jatkuvasti. Tulostamalla on mahdollista valmistaa tuotteita joihin perinteiset materiaalia poistavat valmistusmenetelmät eivät sovi.

Valitsin 3D-tulostuksen opinnäytetyöni aiheeksi omasta mielenkiinnosta alaa kohtaan. Tulostamista käsiteltiin opintojen yhteydessä olleella digitaalisen valmistustekniikan opintojaksolla, ja aiheen mielenkiintoisuuden vuoksi halusin oppia aiheesta lisää. Työssä perehdyttiin yleisimpiin tulostustekniikoihin ja materiaaleihin. Erilaiset alalajit huomioiden tulostusmenetelmiä on kymmeniä erilaisia. Tämän vuoksi työ rajattiin koskemaan vain standardin mukaisia päävalmistusmenetelmiä. Myös mahdollisia materiaaleja on tarjolla lukematon määrä, ja siksi työ rajattiin niiden osalta yleisimpiin muoveihin. Teoriaosuu- den tavoitteena oli vastata kysymykseen mitä 3D-tulostaminen on.

Toisena tavoitteena työssä oli uuden, Centrian käyttöön tulevan 3D-tulostimen kokoonpano ja käyttökuntoon saattaminen. Käyttöönoton yhteydessä asennettiin myös tulostusprosessin vaatima viipalointiohjelmisto. Tulostimella valmistettiin koekappaleita PLA+ ja PETG-filamenteista ja viipalointiohjelman parametrejä pyrittiin optimoimaan halutun lopputuloksen ja pinnanlaadun aikaansaamiseksi.

Lähteinä työssä käytettiin alan internet-sivustoja ja opintojaksojen materiaaleja. Alan nopea kehittyminen ja yleistyminen näkyivät internetissä selvästi. Materiaalia löytyi aiheesta valtavasti, ja osaltaan se teki aiheen rajaamisesta ja lähteiden luotettavuuden arvioinnista haasteellista.

Työn alussa käydään läpi materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien kehittymistä, niiden hyötyjä ja haasteita sekä käyttökohteita. Yleisimpien valmistusmenetelmien ja materiaalien jälkeen työssä on kerrottu tulostuksen valmistusprosessista ja työn loppuosa käsittelee tulostimen kokoonpanoa, käyttöönottoa, koekappaleiden tulostamista ja asetusten optimointia.

2 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Teollisuuden perinteiset valmistusmenetelmät ovat usein materiaalia poistavia tai materiaalia muovavia menetelmiä. Näissä kyseisissä menetelmissä valmistaminen aloitetaan raaka-aine ahiosta, josta menetelmän nimen mukaisesti joko poistetaan materiaalia tai sitä muovataan halutun lopputuloksen aikaansaamiseksi. Materiaalia poistavia ja muovavia valmistusmenetelmiä ovat esimerkiksi sorvaus, jyrsintä, valssaus ja takominen. Materiaalia lisäävissä valmistusmenetelmissä ahiota ei ole, vaan valmistaminen aloitetaan tyhjästä ja materiaalia lisätään vain haluttuihin kohtiin tietokoneohjattujen tulostimien avulla. (Alonen 2021a.)

2.1 Valmistusmenetelmien kehitys

Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät alkoivat kehittyä jo 1980-luvulla ja niiden historian voidaan ajatella jakaantuvan neljään eri pääkategoriaan. Vuosina 1980–1995 3D-tulostus sai menetelmänä alkunsa ja erilaiset varhaiset innovaatiot kehittyivät. Vuosien 1996–2009 välillä menetelmien käyttö yleisty, jonka jälkeen kaudella 2009–2014 FDM- ja SLA-menetelmien patentit raukesivat. Tämä johti tulostuksen maailmanlaajuiseen yleistymiseen. Uusimmalla, vuonna 2015 alkaneella ja nykyhetkiin saakka kestäneellä ajanjaksolla metallien tulostusmenetelmät ovat lisääntyneet ja erilaisten biotuotteiden tulostaminen on kehittynyt. Tulostamista on alettu ottaa käyttöön myös rakentamisessa. (3Dsourced 2021a.)

Nagoyan teollisessa tutkimuslaitoksessa työskennellyt Hideo Kodama julkaisi vuonna 1981 nopean prototyyppien valmistustekniikan, jossa kappale valmistettiin kerros kerrokselta fotopolymeerejä käsittelemällä. Kodama ei kuitenkaan koskaan hakenut patenttia menetelmälleen, vaan ensimmäinen stereolitoграфия menetelmää koskenut patentti myönnettiin kolme vuotta myöhemmin vuonna 1984 kolmelle ranskalaiselle insinöörille, Alain Le Méhauté:lle, Olivier de Witte:lle ja Jean Claude André:lle. Hekin hylkäsivät patentin pian, koska heidän mielestään menetelmä ei ollut liiketoiminnan kannalta ajateltuna menestyvä. Vain kolme viikkoa myöhemmin yhdysvaltalainen Charles Hull haki patenttia SLA-menetelmälle, jossa käytettiin .stl-tiedostoja ja digitaalista viipalointia. Patentti myönnettiin, Hull perusti 3D-systems:in ja julkaisi ensimmäisen 3D-tulostimen vuonna 1987. 3d-tulostaminen oli syntynyt. (3Dsourced 2021a.)

SLA-tekniikka sai kilpailijan vuonna 1988, kun amerikkalainen keksijä Carl Deckard sai patentin SLS-tekniikalle. Myös tässä menetelmässä kovetettiin polymeerikerroksia, mutta SLA-menetelmän uv-valokovetuksesta poiketen menetelmässä käytettiin laseria. Alan kilpailu koveni lisää heti seuraavana vuonna 1989, kun Scott Crumpin perustama Stratasys patentoi materiaalin pursotustekniikan ja Hans Langer perusti EOS:n Saksaan. SLA-, SLS- ja materiaalinpursotusmenetelmät ovat vielä tänäkin päivänä kolme tärkeintä valmistusmenetelmää muovien tulostamisessa. Ensimmäisen kehitysjakson loppupuolella 1993 syntyi vielä Massachusettsin teknologiainstituutin kehittämä sideaineen suihkutuskone. Siinä erilaisia tulosteita valmistettiin tärkkelys- ja kipsipohjaisista jauheista, joita yhdistettiin vesipohjaisilla sideaineilla. (3Dsources 2021a.)

Uusia tekniikoita alalle toivat metallitulostuskoneisiin erikoistunut, 1997 perustettu Arcam ja 1998 perustettu, materiaalin suihkutukseen perustuvan Polyjet-menetelmän esitellyt Objet Geometries. Lääketieteessä tulostamista hyödynnettiin ensimmäisen kerran vuonna 1999, kun Wake Forest -instituutin tutkijat onnistuivat tulostamaan kudosta ihmisen virtsarakkoon. Lääketieteellinen tulostaminen kehittyi edelleen ja vuonna 2002 tulostettiin ensimmäinen ihmisen munuainen. Tuloste ei ollut täysikokoinen, mutta se oli erittäin tärkeä vaihe biotulostamisen alalla, koska se mahdollisti puuttuvien siirtoelinten korvaamisen. (3Dsources 2021a.)

Vuosien 2004–2005 aikana alkoi 3D-tulostuksen yksi tärkeimmistä yksittäisistä tapahtumista, kun Bathin yliopiston tohtori Adrian Bowyer loi RepRap-projektin. Tulostuksessa käytetyt laitteet olivat tuohon aikaan yksinkertaisuudestaan huolimatta kalliita ja suurikokoisia. Tämän projektin lopputuloksena syntyi pienempikokoinen itse koottava tulostin, jolla oli mahdollista valmistaa samanlaisia tulostimia ja niiden osia myös kotiloissa. Tulostimen hankinta velvoitti tulostamaan osia uusille alan harrastajille. Projektista tuli suosittu ja se jatkoi 3D-tulostuksen leviämistä maailmanlaajuisesti. Vuonna 2008 lanseerattiin vapaasti käytössä olevia .stl-tiedostoja sekä 3D-, laserleikkaus-, ja koneistusmalleja ja tietoa tulostusarvoista sisältävä internet-sivusto Thingiverse. Nykyään se on Yhdysvaltojen 700 suosituimman verkkosivun joukossa ja se sisältää yli miljoona valmistettua stl-tiedostoa. Samana vuonna tulostettiin myös ensimmäinen täysin käyttövalmis ja kokoonpanoa vaatimaton jalkaproteesi. Proteesi sisälsi kaikki biologista raajaa vastaavat osat ja tulosteen ansiosta alan medianäkyvyys kasvoi. (3Dsources 2021a.)

Alan toinen tärkeä tapahtuma oli materiaalin pursotusmenetelmän patentin raukeaminen vuonna 2009. Raukeaminen mahdollisti tulostimien rakentamisen ilman juridisia ongelmia, ja tämä johti huimaan kasvuun alan suosiossa. Kaikki kehitys ei kuitenkaan ollut positiivista, sillä vuonna 2013 Cody Wilson

julkaisi yrityksensä sivuilla ohjeet toimivan asean tulostamiseksi. Yhdysvaltain hallitus määräsi tiedostot poistettavaksi, mutta ennen poistamista ohjeet sisältäneitä tiedostoja oli ehditty ladata jo yli 100 000 kertaa. Myös SLA- ja SLS-menetelmiä koskevat patentit raukesivat vuonna 2014. (3Dsourced 2021a.)

Uusinta kehitysaikakautta on hallinnut metallien tulostamisen yleistyminen. Esimerkiksi vuonna 2015 perustettu Desktop Metal on saanut kehitettyä metallilla toimivan, materiaalin pursottamiseen perustuvan menetelmän. Lisäksi he ovat kehittäneet sideaineen suihkutukseen perustuvan ja aiempia menetelmiä huomattavasti nopeamman metallitulostustekniikan. Tulostusmenetelmien käyttäminen on laajentunut myös rakennusallalle, jossa tulostamista on jo käytetty kokonaisten betonista valmistettujen talojen ja siltojen rakentamiseen. (3Dsourced 2021a.)

2.2 Menetelmien hyödyt

Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät ovat tehokkaita ja joustavia. Erityisesti nämä ominaisuudet korostuvat niissä tilanteissa, joissa valmistettava tuotantomäärä on pieni, kappale muodoltaan monimutkainen tai siihen tehdään jatkuvasti muutoksia. Digitaalisessa muodossa olevat valmistussuunnitelmat mahdollistavat muutosten tekemisen tarvittaessa hyvinkin lähellä tuotannon aloittamista. Myös tuotevalikoimaa on mahdollista muuttaa nopeasti. (Alonen, Alonen & Hietikko 2016, 7.) Laitteiden vaatimat asetusajat ovat yleensä pienet, ja usein ainoana vaadittavana toimenpiteenä on materiaalin vaihto. Kappaleiden valmistaminen aloitetaan usein ”tyhjästä” ja tämä mahdollistaa erilaiset, monimutkaisetkin geometriat ja kustomoinnit lähes rajattomasti. Myös uudenlaisia rakenteita on mahdollista kehittää ja siksi suunnittelussa voidaan keskittyä lopputuotteen ominaisuuksiin valmistusmenetelmien rajaamien mahdollisuuksien sijaan. Samoilla laitteilla on paljon erilaisia käyttökohteita ja niillä on myös mahdollista valmistaa paljon erilaisia tuotteita ilman lisäkustannuksia. (Alonen ym. 2016, 7; Alonen 2021a.)

Materiaalia lisätään vain tarvittaviin kohtiin ja tämän vuoksi ainehukka on perinteisiin poistaviin menetelmiin vähäistä. Hukkaa syntyy lähinnä tukirakenteista, jälkikäsitteilynä käytettävästä koneistuksesta ja tulostusmateriaaleista, joita jää yli ja joita ei voida enää käyttää uudelleen. Koska tuotteiden valmistaminen on nopeaa, ne on mahdollista valmistaa jopa juuri ennen tarvetta ja valmiiksi oikeassa paikassa. Tämä vähentää luonnollisesti myös sekä erilaisten varastojen tarvetta että logistiikan aiheuttamia kustannuksia. Tuotteet eivät myöskään vanhene varastoon. (Alonen ym. 2016, 7; Alonen 2021a.)

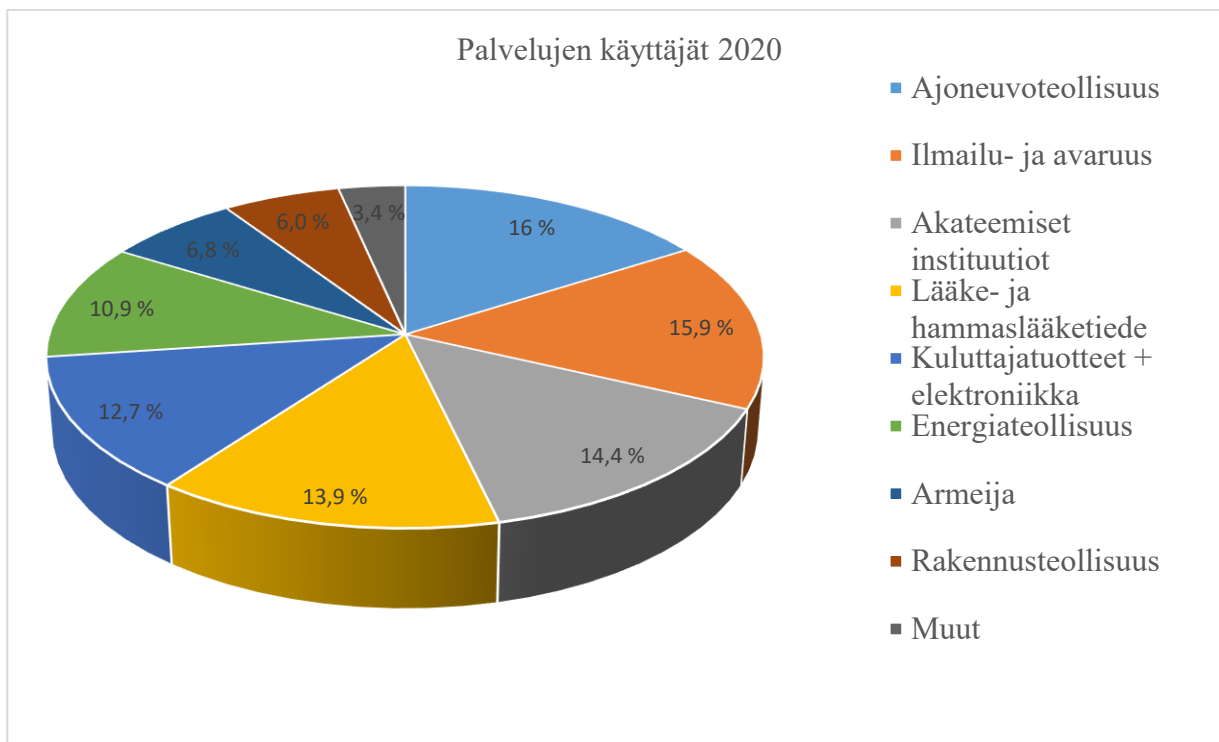
2.3 Menetelmien haasteet

Lukuisista hyvistä puolista huolimatta menetelmissä ovat myös omat haasteensa, jotka ovat hidastaneet niiden yleistymistä valmistusteknologiassa. Suurimpana haasteena tällä hetkellä on taloudellisuus, sillä suorat valmistuskustannukset ovat vielä usein perinteisiä menetelmiä suuremmat. Teollisuustason laitteet ovat kalliita, samoin tulostamisessa käytettävät metallit ja erikoismuovit. Valmistettavat kappaleet on aina suunniteltava valmistusmenetelmään sopivaksi, vaikka samaa kappaletta olisi jo valmistettu perinteisillä menetelmillä. Suunnittelu on kallista ja se nostaa kustannuksia edelleen. Suunnitteluohjelmat on myös usein suunniteltu tukemaan perinteisiä valmistusmenetelmiä, ja tämä aiheuttaa haasteita erilaisten vapaiden geometrioiden sekä multimateriaalituotteiden suunnittelussa. Vaikka tulostaminen olisi monessa kohteessa perinteistä valmistusmenetelmää helpompaa, se ei kustannusten vuoksi kannata. (Alonen ym. 2016, 9–10; Alonen 2021a.)

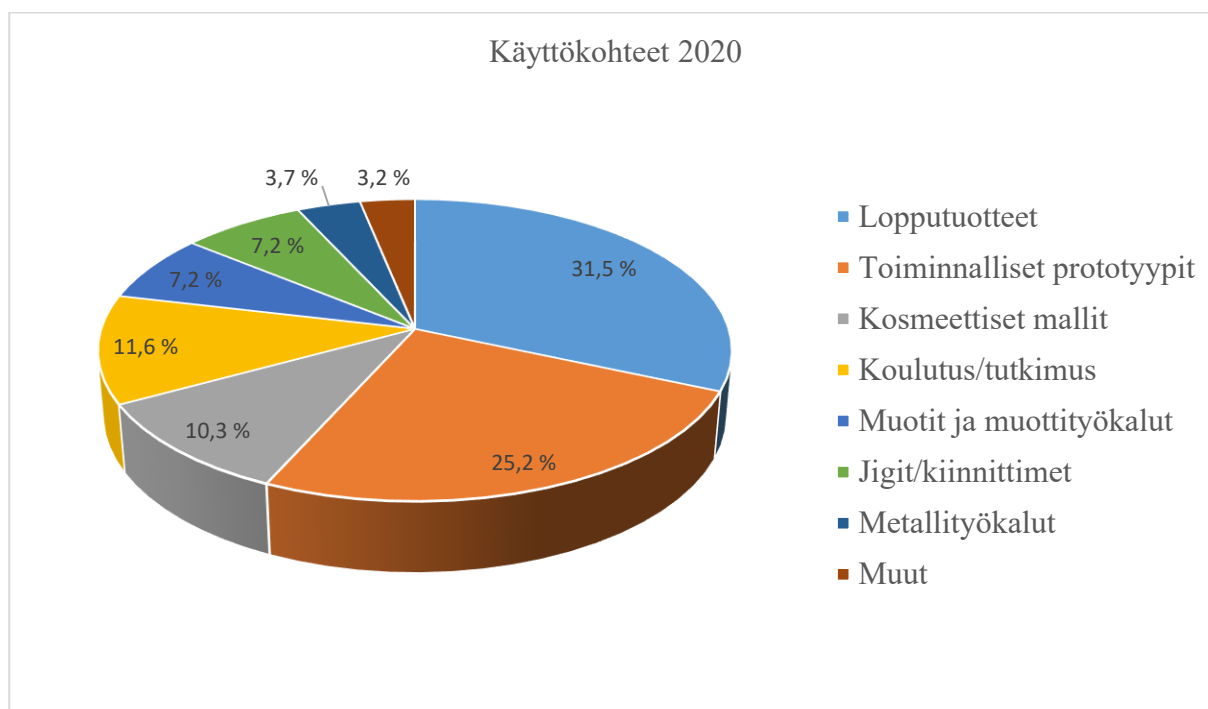
Valmiit kappaleet vaativat hyvin usein jälkikäsittelyä esimerkiksi toisiinsa liitettävien ja tiivistepintojen osalta. Tämä nostaa osaltaan valmistukseen käytettävää aikaa ja kuluja. Markkinoilla on myös viimeistelyä tekeviä tulostimia, mutta toistaiseksi ominaisuudesta saatava hyöty on pieni, koska laitteen tulostukseen käyttämää aikaa kuluu turhaan viimeistelyyn. Onnistunut lopputulos vaatii materiaalien ja menetelmien hyvää tuntemusta, ja erilaisia säädettäviä parametrejä on äärettömän paljon. Laatuun liittyviä haasteita menetelmissä ovat erilaiset toistettavuuteen ja luotettavuuteen liittyvät seikat sekä standardien puute. Alan laadunvalvonta ja tarkkailu ovat vielä kehitysvaiheessa, eikä niihin toistaiseksi ole olemassa yleisesti tunnettuja tai hyväksytyjä menetelmiä. (Alonen ym. 2016, 9–10; Alonen 2021a.)

2.4 Käyttökohteet

Monipuolisuutensa vuoksi 3D-tulostamista on mahdollista käyttää hyvin monilla eri aloilla (KUVIO 1). Tällä hetkellä menetelmien osuus maailman laajuisesta tuotannosta on vielä vain muutamia prosentteja, mutta esimerkiksi alan yrityksissä on arvioitu, että tulevaisuudessa 25–50 % tuotannosta tulee hyödyntämään tulostusta jollain tasolla. Aluksi tulostamista käytettiin lähinnä erilaisten prototyyppien valmistamiseen. Tämä käyttökohte on merkittävä edelleen, mutta materiaalien, tulostustarkkuuksien sekä pinnanlaatuksen parantuminen ovat lisänneet tulostamisen käyttökohteita sekä toiminnallisiin malleihin että lopputuotteisiin (KUVIO 2). (Alonen ym. 2016, 118; Alonen 2021a.) Samalla alan taloudellinen merkitys kasvaa koko ajan. Viime vuosina alan markkinat ovat kasvaneet vuosittain yli 20 %. Koronaviruksen aiheuttamasta kasvun hidastumisesta huolimatta alan markkinat olivat vuonna 2020 yhteensä 12,8 miljardia dollaria. (Alonen, 2021b.)



KUVIO 1. Tulostuspalveluita käyttävien toimialojen jakautuminen vuonna 2020 (mukaiillen Wohlers Report 2021)



KUVIO 2. 3D-tulostuksen käyttökohteiden jakaantuminen vuonna 2020 (mukaiillen Wohlers Report 2021)

Wohlers Report 2021:n mukaan materiaalia lisääviä menetelmiä käytettiin vuonna 2020 eniten ajoneuvoteollisuudessa. Alan käyttökohteita ovat erilaiset tutkimukset, prototyyppien-, muottien-, työkalujen- sekä osien- ja lopputuotteiden valmistus. Osia valmistetaan myös vanhoihin autoihin, ja menetelmän ansiosta pienetkin valmistusmäärät ovat mahdollisia eikä suuria, tilaa ja pääomaa sitovia varastoja tarvita. Lopputuotteiden valmistaminen on alalla vielä suhteellisen pientä, mutta sen osuus kasvaa koko ajan. Esimerkiksi BMW on valmistanut kahden vuoden aikana yli 300 000 sarjatuotanto-osaa tulostamalla. (Alonen 2021a; 2021b.)

Toiseksi suurin menetelmien käyttäjä on avaruus- ja ilmailuala, jossa tulostusta on käytetty menetelmien kehittämisen alkuajoilta lähtien. Ilmailuteollisuudessa komponenttien painolla on suuri merkitys, ja tulostus mahdollistaa komponenttien valmistamisen kevyistä ja erikoisemmistakin materiaaleista. Erikoismateriaalit ovat kalliita, mutta yleensä hinta ei ole alalla este muiden vaatimusten täytyessä. Eurooppalainen lentokone valmistaja Airbus on kertonut jo 2015 vuonna käyttävänsä yli tuhatta tulostamalla valmistettua osaa A350XWB -mallissaan. Yksi esimerkki tulostamalla valmistetusta komponentista on GE Aviationin valmistama polttoainesuutin. Suuttimia on valmistettu vuodesta 2016 ja kehitystyön tuloksena suuttimesta on saatu 25 % kevyempi ja viisi kertaa kestävämpi aiemmin käytössä olleisiin suuttimiin. Osien määrä väheni myös huomattavasti, kun aiempi kahdeksantoista osan kokonaisuus saatiin korvattua yhdellä osalla. (Alonen 2021a.)

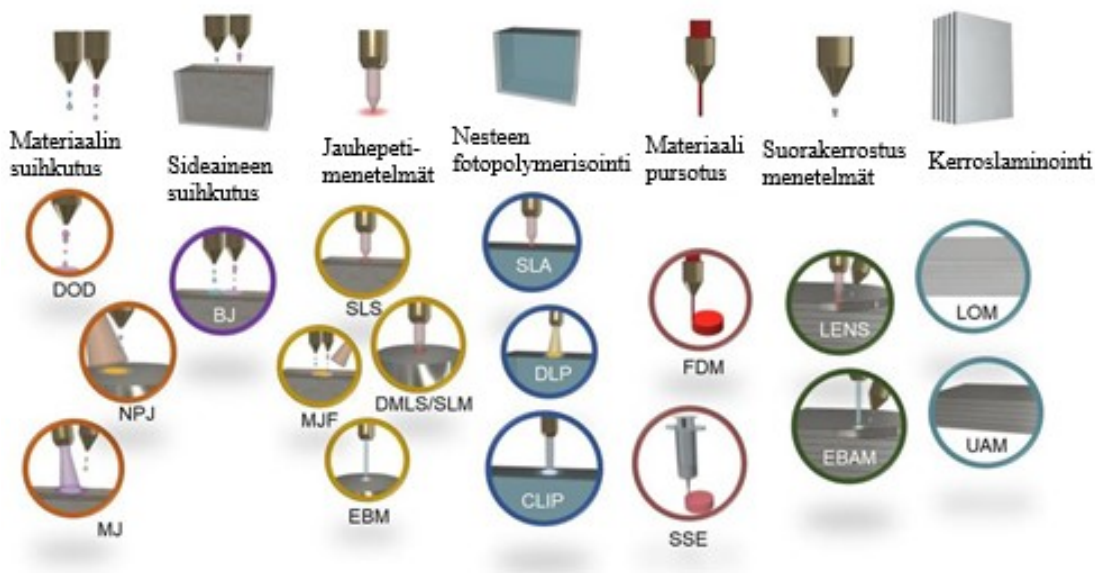
Lääketiede käyttää tulostamista implanttien, anatomisten mallien, proteesien, leikkaustyökalujen ja erilaisten leikkausohjureiden valmistamiseen. Potilaan kuvantamisen perusteella valmistettujen yksilöllisten ja anatomisten mallien avulla operaatioita on mahdollista suunnitella valmistella ennakkoon, minkä lisäksi malleja voidaan käyttää koulutukseen. Erilaisten proteesien valmistaminen tulostamalla on edullista ja potilaan tilanteen muuttuessa myös erilaiset muutokset ovat nopeita toteuttaa. Leikkauksissa käytettävät ohjurit valmistetaan potilaan anatomian mukaan, ja niiden avulla itse operaatio tapahtuu suunnitelman mukaisesti. Tämä vähentää inhimillisten virheiden mahdollisuuksia, helpottaa kirurgin työtä ja voi nopeuttaa operaatioita jopa useita tunteja. Hammaslääketieteessä pelkästään erilaisia metallisia hammaskruunuja ja siltoja tulostetaan miljoonia kappaleita vuodessa ja erilaisia muovisia oikomiskojeita satoja tuhansia kappaleita päivässä. (Alonen 2021a.)

Tulostus mahdollistaa myös erilaisten toiminnallisten- ja esittelymallien valmistamiseen. Malleilla voidaan esimerkiksi testata suunnitellun mekanismin toimivuutta pienemmässä mittakaavassa ja halvemmilla materiaaleilla ennen varsinaisen tuotteen valmistamista. Arkkitehtuurissa erilaiset pienoiskoon

esittelymallit helpottavat suunnitelmien visualisointia ja sovitustarkoituksessa tulostetuilla osilla on nopeaa ja halpaa testata kappaleen ulkomuotojen sopivuutta kokonaisuuteen. Teollisuudessa menetelmiä käytetään erilaisten valumuottien ja niiden osien, jigien ja kiinnittimien sekä erilaisten sovittimien ja suojiin valmistamiseen. Valumuottien valmistamisessa tulostaminen vähentää tarvittavien työvaiheiden määrää, ja samalla se mahdollistaa aiemmista menetelmistä poiketen jäähdytyskanavien optimaalisen suunnittelun muodon ja sijainnin suhteen. (Alonen 2021a.)

3 ISO/ASTM 52900/2019-STANDARDIN MUKAISET VALMISTUSMENETELMÄT

Materiaalia lisäävää valmistusta koskeva standardi ISO/ASTM 52900: 2019 jakaa valmistusmenetelmät seitsemään eri pääkategoriaan: materiaalin pursotukseen ja -suihkutukseen, sideaineensuihkutukseen, laminointiin, nesteen fotopolymerisointiin, ja sekä jauhepeti- että suorakerrostusmenetelmiin. Pääkategoriat on vielä mahdollista jakaa useisiin alatasoihin muun muassa valmistusmateriaalien ja valmistuslaitteen käyttämien tekniikoiden perusteella, jolloin käytettävissä olevien menetelmien määrä moninkertaistuu (KUVA 1).



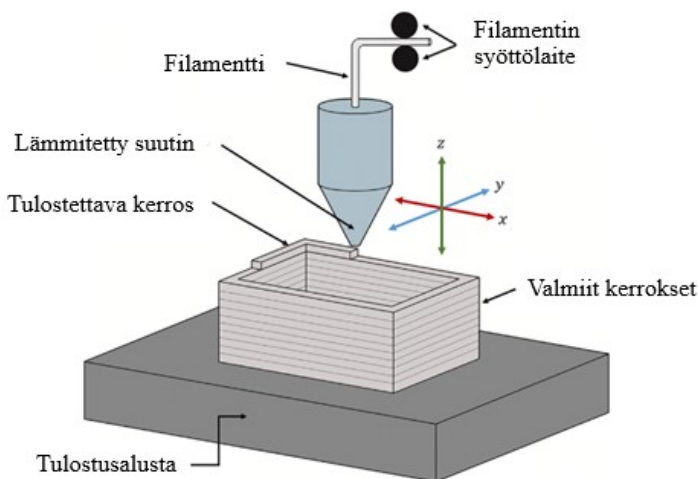
KUVA 1. 3D-tulostuksen pääkategoriat (mukailten Basit, Boyd, Gaisford, Goyanes, Jannin & Vithani 2018.)

3.1 Materiaalin pursotus (Material Extrusion)

Materiaalin pursotuksessa materiaalia lisätään valikoivasti haluttuihin kohtiin suuttimen tai suulakkeen kautta. Tällä hetkellä menetelmä on yleisin kuluttajatason laitteissa käytetty menetelmä. Muihin tulostusmenetelmiin verrattuna laitteiden valmistus ja niiden komponentit ovat edullisia. Tulostimien toimintaperiaate on yksinkertainen, ja lisäksi ne ovat helppokäyttöisiä. Ammatti- ja teollisuuskäyttöön tarkoitetuissa laitteissa hinnat nousevat, mutta samalla myös laitteiden laatu- ja luotettavuus paranevat merkittävästi. Kalliimmissa koneissa tulosteiden taso säilyy hyvänä suuriakin sarjoja valmistettaessa ja esimerkiksi tulostusalueen koko ja tulostusnopeus kasvavat sekä varustelutaso lisääntyvät. (Alonen 2021a.)

Laitteet on mahdollista jakaa hinnan perusteella kolmeen kategoriaan: <5000 € kuluttajatason laitteisiin, 5-50000 € ammattitason laitteisiin ja >50 000 € teollisuustason laitteisiin (Alonen 2021a).

Tuloste valmistetaan liikuteltavalle ja lämmitettävälle tulostusalustalle, johon muovinen tulostuslanka eli filamentti syötetään rullalta kuumen suuttimen läpi kerroksittain. Kuuma suutin saa kiinteän filamentin sulamaan, ja sulaa muovia syötetään haluttuihin kohtiin tietokoneavusteisesti. Kerroksen valmistuttua tulostusalustaa lasketaan alaspäin, ja uusi kerros tarttuu aiemmin pursotettuun pintaan. Pursotettu materiaali kovettuu jäähtyessään ja kerroksia toistetaan niin kauan, kunnes tuote on valmis. Kerroskorkeudet vaihtelevat konekoon mukaan. Pöytätason koneissa kerrokset ovat 0,10–0,30 mm paksuja, vastaavasti suurimmissa laitteissa tulostuskerros voi olla jopa 4,00 mm paksu (KUVIO 3).



KUVIO 3. Materiaalin pursotuksen periaate (mukaiillen Clarke, Hosseini, Kozutsky, Lacki, Shah & Sniner 2019.)

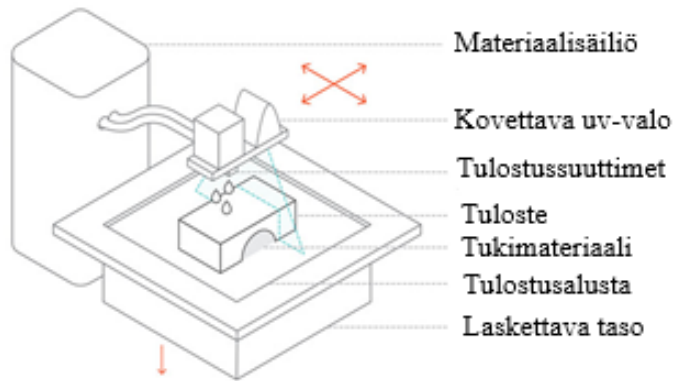
Harraste- ja kuluttajatasonlaitteissa filamenttina käytetään yleisimmin 1,75 tai 2,85 mm paksua muovilankaa. Suuremmissa ja teollisuustasonlaitteissa materiaali voi olla myös raemaisena muovirouheena eli granulaattina. Pursotuksessa voidaan käyttää myös erilaisia nesteitä, tahnoja ja geelejä. Kyseiset materiaalit kovettuvat usein kemiallisen reaktion ansiosta ilman ja ajan kanssa, eivätkä siten tarvitse erillistä lämmittämistä. (Alonen 2021a.)

Menetelmä vaatii useiden lämpötilojen hallintaa. Materiaalista riippuen tulostussuuttimen, alustan ja mahdollisen kotelon lämpötilat on määriteltävä oikein onnistuneen lopputuloksen aikaansaamiseksi. Erikoisemmat materiaalit vaativat kovia, jopa 500°C:een tulostuslämpöjä, ja siksi niiden tulostaminen ei kuluttajatasen laitteilla onnistu. Koska menetelmä mahdollistaa materiaalin käyttämisen vain tarvittavissa kohdissa, voidaan sisäosista valmistaa kennomaisia tai onttoja. Yleinen kappaleiden täyttöaste vaihtelee noin 20–30 %:n välillä. Rakenne ei heikennä kappaleen lujuutta, ja lisäksi tulostusnopeus kasvaa ja materiaalin tarve vähenee. Käyttökohteesta ja kappaleesta riippuen tuloste voidaan valmistaa myös umpinaisena. Umpinaista täyttöä voidaan käyttää esimerkiksi tilanteissa, joissa valmis kappale vaatii koneistamista tai siihen on porattava reikiä. Useilla suuttimilla varustetuilla laitteilla on myös mahdollista valmistaa erilaisia multimateriaalitulosteita. Muovien lisäksi materiaaleina voidaan käyttää erilaisia komposiitteja ja metalleja. Näiden materiaalien haittapuolena on se, että ne kuluttavat laitteita nopeammin ja tämän seurauksena tulostuksen tarkkuus alkaa kärsimään. (Alonen 2021a.)

Materiaalia ei voi pursottaa tyhjän päälle, ja siksi erilaisten tukien ja tukimateriaalien käyttö on huomioitava jo kappaleen suunnitteluvaiheessa. Muovien pursotuksessa tukimateriaalia tarvitaan, kun tulostettava muoto on alle 45° kulmassa tulostussuuntaan nähden. Pursottamalla on mahdollista valmistaa suuriakin kappaleita, mutta niiden ja suurten sarjojen valmistamiseen menetelmä on hidas. Valmiiden kappaleiden heikoin kohta on kerrosten välinen liitos. Myös tämä seikka on huomioitava ja sitä on mahdollista korjata suunnitteluvaiheessa mm. tulostussuuntaa ja sijoitusta muuttamalla. (Alonen 2021a.)

3.2 Materiaalin suihkutus (Material Jetting)

Materiaalin suihkutus muistuttaa periaatteeltaan paljon normaalia mustesuihkutulostusta. Menetelmässä suihkutetaan pisaranmuotoista, uv-kovettuvaa polymeeriä tai vahaa tulostusalustan haluttuihin kohtiin. Suihkutuksen jälkeen materiaali kovetetaan tulostussuuttimen liikkeitä seuraavalla uv-valolla. Kerroksen valmistuttua alkaa uuden kerroksen valmistaminen ja tätä toistetaan, kunnes kappale on valmis (KUVIO 4). Tulostusmateriaali on yleensä lämmitetty enintään 60°C:seen sen viskositeetin alentamiseksi. Laitteissa voi olla yksi tai useampia tulostuspäitä, joissa voi olla vielä useita erilaisia suuttimia. Suuttimien määrä vaikuttaa suoraan tulostusnopeuteen ja se mahdollistaa sekä tukimateriaalin käyttämisen että multimateriaalitulosteet. (Alonen 2021a.)

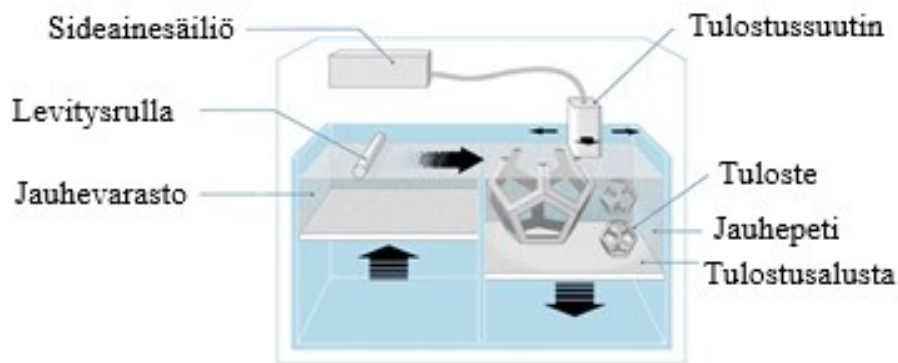


KUVIO 4. Materiaalin suihkutuksen periaate ja laitteisto (mukaillen Alexandra 2019a)

Tulostaminen onnistuu vain jo olemassa olevan tai tulostetun materiaalin päälle, ja siksi erilaisia suljettuja onttoja tai ristikkorakenteita ei ole mahdollista valmistaa. Menetelmä on hyvin tarkka, sillä se mahdollistaa hyvinkin ohuet, jopa 14 mikronin kerroskorkeudet. Pinnanlaatu on hyvä ja myös värillisiä ja läpinäkyviä tuotteita ovat mahdollista valmistaa. Käyttökohteiden suunnittelussa on huomioitava, että materiaalit ovat hauraita ja ne ikääntyvät. Lisäksi laitteet ja materiaalit ovat tällä hetkellä 3D-tulostusmenetelmien kalleimpia. (Alonen 2021a.)

3.3 Sideaineen suihkutus (Binder Jetting)

Sideaineen suihkutuksessa jauhemaista materiaalia liitetään nestemäisellä sidosaineilla suunnitellun kappaleen muotojen mukaisesti. Prosessi aloitetaan levittämällä jauhekerros tulostusalustalle, minkä jälkeen sideaine suihkutetaan haluttuihin kohtiin. Seuraavaksi tulostusalustaa lasketaan alas, levitetään uusi jauhekerros ja jatketaan sideaineen suihkuttamista. Tätä prosessia toistetaan kerroksittain kappaleen valmistumiseen saakka (KUVA 2). Menetelmässä käytetyt jauheet ovat pääsääntöisesti kipsiä, hiekkaa tai metallia. Valmistuneet kappaleet ovat hauraita ja vaativat usein lämmön avulla tehtävän kovetuksen jo ennen varsinaista jälkikäsittelyä. Jälkikäsittelynä tuotteille tehdään loppukovetus, infiltraatio tai sintraus. (Alonen 2021a.)

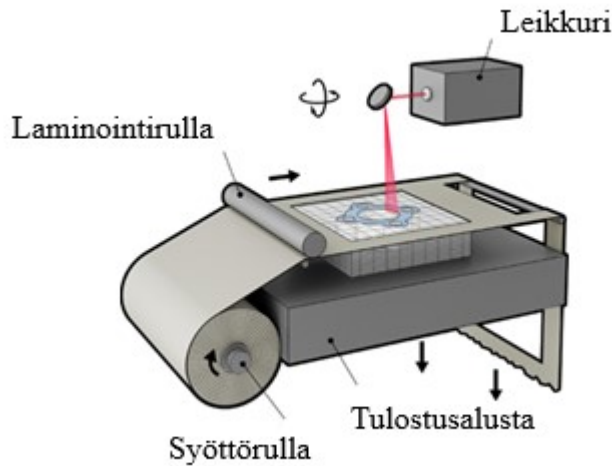


KUVA 2. Sideaineen suihkutus (mukaillen Alexandra 2019b)

Menetelmässä käytettävien laitteiden tulostusalue on yleensä suuri. Tämä mahdollistaa sekä sarjatuotannon että suurienkin kappaleiden valmistamisen. Materiaalina käytettävä jauhe toimii itse tukimateriaalina ja siten erillisiä tukimateriaaleja ei tarvita. Tulostaminen on myös jauhepeti- ja materiaalinsuihkutukseen perustuviin menetelmiin edullisempi, mutta käytössä olevien materiaalien määrä on vielä rajallinen. (Alonen 2021a.)

3.4 Kerroslaminointi (Sheet Lamination)

Kerroslaminoinnissa kappale valmistetaan päällekkäin yhdistettävistä materiaalikalvoista. Materiaalina voidaan käyttää muun muassa muovia, paperia, komposiitteja tai metallilevyjä. Prosessi aloitetaan syöttämällä materiaalia tulostusalustalle. Materiaali leikataan haluttuun muotoon, ja syntyneen muodon päälle syötetään uusi materiaalikerros. Kerros liitetään alla olevaan liuskaan ja leikataan muotoon, jonka jälkeen lisätään jälleen uusi materiaalikerros (KUVA 3). Muotoon leikkaaminen voidaan materiaalista riippuen suorittaa esimerkiksi laserilla tai erilaisilla terillä ja liittämiseen on mahdollista käyttää esimerkiksi ultraääntä, liimausta tai hitsausta. (Alonen ym. 2016, 25–27.)

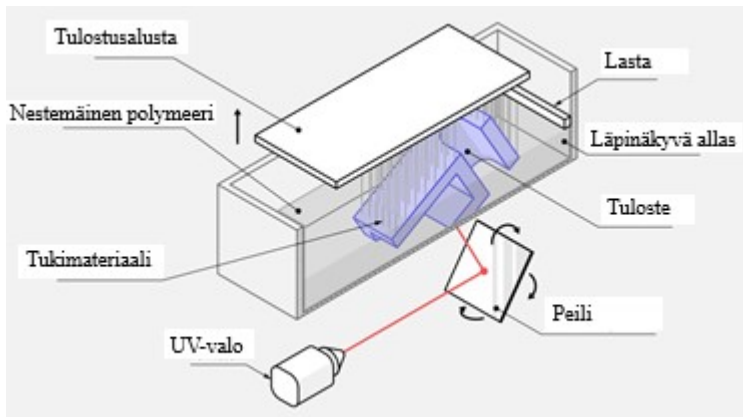


KUVA 3. Kerroslaminointilaitteisto ja tulostuksen periaate (mukailten Manufacturing Guide Sweden AB a.)

Menetelmässä käytetään vakiomateriaaleja, ja tämä mahdollistaa suhteellisen alhaiset valmistuskustannukset. Tukimateriaaleja ei tarvita ja matalan valmistuslämpötilan vuoksi tulosteisiin on mahdollista sijoittaa kiinteästi erilaisia antureita ja johdotuksia jo valmistamisen aikana. Myös erilaisten monimateriaalisten kappaleiden valmistaminen on mahdollista. Kerroskorkeudet määräytyvät valmistusmateriaalin paksuuden mukaan, ja valmiiden tuotteiden pinnanlaatu vaatii usein jälkikäsittelyä. Jälkikäsittely vie aikaa, ja samalla siitä voi syntyä paljon jätettä muihin valmistusmenetelmiin verrattuna. Menetelmällä on mahdollista valmistaa täysvärillisiä tulosteita, mutta erilaisten ontelorakenteiden valmistaminen on haasteellista. (Engineeringproductdesign. a.)

3.5 Nesteen fotopolymerisointi (VAT Photopolymerization)

Nesteen fotopolymerisoinnissa astiassa olevaa nestemäistä fotopolymeeriä kovetetaan valikoidusti valoaktivoituvan polymerisaation avulla. Prosessissa tulostusalusta on upotettuna fotopolymeeriastian ja tarvittavat kohdat kovetetaan kerroksittain säiliön pohjan läpi laserin tai valoprojektorin avulla. Kerroksen valmistuttua tuloste nostetaan altaasta ja varmistetaan että neste on levittänyt tasaisesti. (Alonen 2021a.) Varmistuksen jälkeen kappale lasketaan takaisin astiaan ja uuden kerroksen valmistaminen alkaa (KUVIO 5). Tulostussuunta voi olla myös päinvastainen, ja tällöin valmiita kappaleita lasketaan alaspäin.

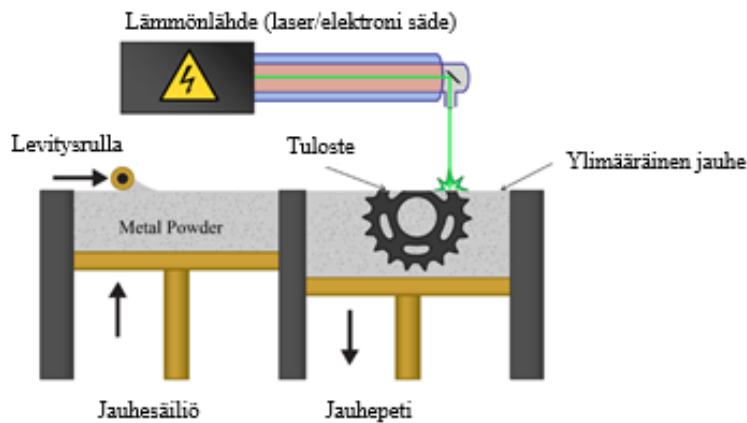


KUVIO 5. Nesteen fotopolymerisointi (mukaillen Armstrong)

Valmis tuloste pestään ja jälkikivetetaan uv-kammiossa. Valmiiden kappaleiden pinnanlaatu on hyvä, ja koska tulostettavat kerrokset ovat ohuita, 25–200 mikronia, ei kappaleissa ole näkyviä kerroksia. Tulosteet ovat mittatarkkoja ja menetelmällä on mahdollista valmistaa myös läpinäkyviä kappaleita. Myös tässä menetelmässä materiaalivalikoima on vielä rajallinen, ja laitevalmistajasta riippuen polymeerejä löytyy 4–10 erilaista. On myös huomioitava, että valmiit tulosteet ovat hauraita, minkä lisäksi esimerkiksi auringon valo haurastuttaa valmiita tuotteita entisestään. (Alonen 2021a.)

3.6 Jauhepetimenetelmät (Powder Bed Fusion)

Jauhepetimenetelmä on yleisin teollisella tasolla käytetty materiaalia lisäävä menetelmä. Menetelmässä tulostusalustalle levitettyä jauhetta liitetään yhteen selektiivisen lämmön avulla. Materiaaleina käytetään sekä muoveja että metalleja ja lämmönlähteenä voidaan käyttää esimerkiksi laseria tai elektronisuihkua. (Alonen 2021a.) Tulostusprosessi muistuttaa sideaineen suihkuttamista (KUVIO 6). Prosessi aloitetaan levittämällä jauhekerros tulostusalustalle, minkä jälkeen halutut kohdat sulatetaan yhteen lämmönlähteen avulla. Tämän jälkeen tulostustasoa lasketaan, levitetään uusi jauhekerros ja valmistetaan uusi kerros sulattamalla jne. (Alonen ym. 2016, 32.) Tulosteen valmistumisen jälkeen kammion annetaan jäähtyä. Ylimääräinen jauhe poistetaan, kappaleet irrotetaan ja yleensä valmis kappale vielä puhdistetaan lasikuulapuhaltamalla. (Alonen 2021a.)



KUVIO 6. Jauhepetimenetelmä (mukaiillen 3DEO)

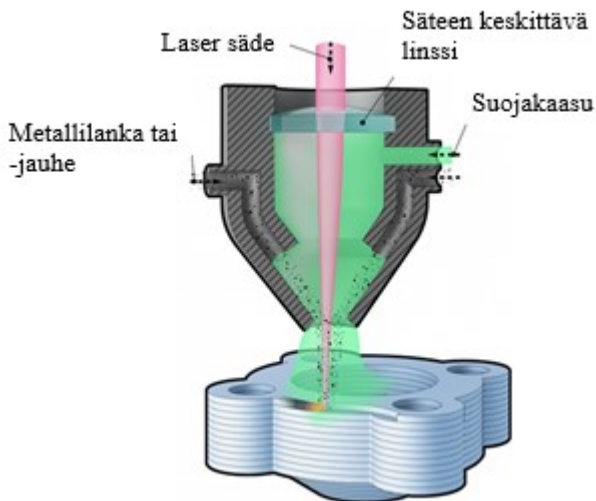
Valmistus tapahtuu suljetussa kammiossa, joka metalleja tulostettaessa täytetään usein myös suojakasuna toimivalla työllä tai argonilla. Tulostusprosessin aikana käyttämättä jäävä jauhe toimii tukirakenteena, joten erillisiä tukirakenteita ei tarvitse suunnitella eikä tulostaa. Menetelmä mahdollistaa koko tulostustilavuuden hyödyntämisen, ja samanlaisia osia on mahdollista useita kerralla ja sarjoina. (Alonen 2021a.)

Menetelmällä valmistettävien muovitulosteiden valmistuskustannukset ovat suhteellisen alhaiset, mutta metallien tulostuksessa käytettävät materiaalit ja laitteet ovat vielä kalliita. Materiaalivalikoima on laaja, ja muovien ja metallien lisäksi tulostaminen on mahdollista esimerkiksi lasista ja keramiikasta. Ylitse jäävää tulostusjauhetta on myös mahdollista kierrättää; 40 % tulostuksessa käytettävästä jauheesta on oltava uutta, mutta loput 60 % voi olla jo kertaalleen käytettyä. Menetelmä vaatii paljon valmistelevia toimenpiteitä varsinaisen tulostamisen lisäksi. Valmistelevia töitä ovat esimerkiksi jauheen esilämmitys, tyhjiön muodostaminen ja tulostuskammion jäähdyttäminen. Kappaleiden kerroskorkeus on noin 0,1 mm, tämän ja valmistelevien töiden vuoksi valmistaminen on suhteellisen hidasta. Valmistuneet kappaleet ovat myös rakenteeltaan heikkoja ja pinnanlaatu valmistusmateriaalin raekoosta riippuen karkea. Osat vaativat poikkeuksetta jälkikäsittelyä, mikä lisää valmistusaikaa ja kustannuksia. (Engineeringproductdesign. b.)

3.7 Suorakerrostusmenetelmät (Directed Energy Deposition)

Suorakerrostusmenetelmissä valmistusmateriaalia yhdistetään sulattamalla ja sijoittamalla sitä samanaikaisesti haluttuihin kohtiin kohdistetun lämpöenergian avulla. Lämmönlähteenä menetelmässä voidaan

käyttää esimerkiksi laseria, elektronisäteitä tai plasmakaarta. Sekä lämmönlähdettä että materiaalin syöt-
töä ohjataan joko robottivarren tai portaalijärjestelmän avulla (KUVA 4). Menetelmällä on mahdollista
valmistaa uusiakin osia, mutta tällä hetkellä sitä käytetään pääasiassa olemassa olevien kappaleiden kor-
jaamiseen. Yleisimmin suorakerrostuksen materiaalina käytetään metallia, mutta myös keraami- ja po-
lymeerimateriaalit ovat mahdollisia. (Engineeringproductdesign. c.)



KUVA 4. Suorakerrostuksen periaate (mukaiillen Manufacturing Guide Sweden AB b.)

Kappaleet valmistetaan yleensä suljetussa kammiossa. Materiaalista riippuen kammiosta tehdään tyhjiö
tai se voidaan täyttää suojakaasulla. Syötettävä materiaali voi olla lankaa tai jauhetta, yleisimmin käyte-
tyn prosessin lämmönlähteenä toimii laser, jolla sulatetaan jauhemaista materiaalia. Kerroskorkeudet
ovat suurempia kuin toisissa lisäävissä menetelmissä, ja tämän vuoksi valmistaminen on nopeaa. Valmiit
tuotteet ovat tiheitä ja vahvoja, mekaaniset ominaisuudet vastaavat valamalla ja takomalla tuotteita.
Suurten, jopa useita metrejä korkeita olevien osien valmistaminen on mahdollista. Materiaalin vaihto on
prosessin aikana mahdollista ja materiaalin hukka on pientä. (Engineeringproductdesign. c.)

Käytettävät laitteet ovat kalliita toisiin metallivalmistusmenetelmien laitteisiin verrattuna. Valmiiden
kappaleiden pinta muistuttaa valukappaleiden pintaa ja vaatii usein jälkikäsittelyä, mikä lisää valmis-
tusaikaa ja kustannuksia. Tukirakenteita ei tässä menetelmässä ole mahdollista edes käyttää, ja tämän
vuoksi esimerkiksi erilaisia kappaleissa olevia ulkonemia ei ole mahdollista valmistaa lainkaan. (En-
gineeringproductdesign. c.)

4 YLEISIMMÄT 3D-TULOSTUSMATERIAALIT

3D-tulostusmateriaaleina käytetään yleisimmin erilaisia muoveja ja metalleja. Muita käytössä olevia materiaaleja ovat hiekka ja keraamit sekä näiden erilaiset yhdistelmät ja betoni. Muovimateriaalit on mahdollista jakaa ominaisuuksiensa mukaan kahteen luokkaan: kesto- ja kertamuoveihin. Kestomuoveja voidaan sulattaa, jäädyttää ja käyttää uudelleen useita kertoja. Materiaalin ominaisuudet kuitenkin heikenevät hieman jokaisella uudelleensulatuskerralla, ja mikäli materiaalin ominaisuudet halutaan säilyttää, on uudelleen sulatuksen yhteydessä lisättävä joukkoon aina tuoretta materiaalia. Materiaalin pursotuksessa käytettävät filamentit ovat kestumuovia, ja esimerkiksi polymaitohappo eli PLA kestää kieräytystä 3–5 kertaa, minkä jälkeen sen ominaisuudet ovat merkittävästi heikentyneet. Jauhepetimenetelmissä käytettävien muovien tarjonta on vielä rajallista, mutta pursotuksiin käytettäviä filamentteja on jopa satoja erilaisia. (Alonen 2021a.)

Kertamuovit ovat nestemäisiä materiaaleja, jotka saadaan kovetettua valon ja/tai lämmön avulla. Mahdollisesti tarvittava lämpö syntyy itse kovettumisprosessissa, ja siksi ulkoista lämmönlähdettä ei vaadita. Kertamuoveja käytetään esimerkiksi nesteen fotopolymerisointimenetelmässä ja myös näiden muovien valikoima on laaja. Käyttökohteen mukaan valittavana on esimerkiksi kovia, joustavia, vahamaisia, korkeita lämpötiloja kestäviä sekä lääkinällisiin käyttökohteisiin tarkoitettuja muovilaatuja. (Alonen 2021a.)

Myös tulostusmetallit ovat jaettavissa kahteen eri luokkaan rautapitoisiin ja ei-rautapitoisiin. Rautapitoisia ovat esimerkiksi ruostumattomat- ja työkaluteräksset ja ei-rautapitoisia alumiini ja titaani. Tulostuksissa käytettävät metallilaadut ovat pääsääntöisesti seoksia. (Alonen 2021a.)

4.1 PLA (Polylactic acid)

Polymaitohappo eli PLA on yleisin materiaalin pursotuksessa käytetty muovilaatu. PLA on valmistettu uusiutuvista raaka-aineista kuten maissitärkkelyksestä tai sokeriruo'osta. Valmistusmateriaalien ansiosta muovi on biohajoavaa. Esimerkiksi mereen joutunut muovi hajoaa tyypillisesti noin 6–24 kuukauden aikana. Hajoavuutensa ansiosta materiaalia voidaan käyttää erilaisissa lääkinällisissä laitteissa kuten esimerkiksi ruuveissa, tapeissa ja tangoissa. Asennetut komponentit hajoavat elimistössä ajan kulu-

essa ja siksi niitä tarvitse poistaa erillisissä operaatioissa. Lääketieteen lisäksi PLA:ta käytetään elintarvikkeiden käsittelyssä, kuten elintarvikepakkauksissa, pulloissa ja erilaisissa muovikalvoissa. Näiden lisäksi siitä on edullista valmistaa tarkkoja komponentteja ja prototyyppejä muodon ja koon testaamiseksi. (Rogers 2015a; 3Dsourced. 2021b.)

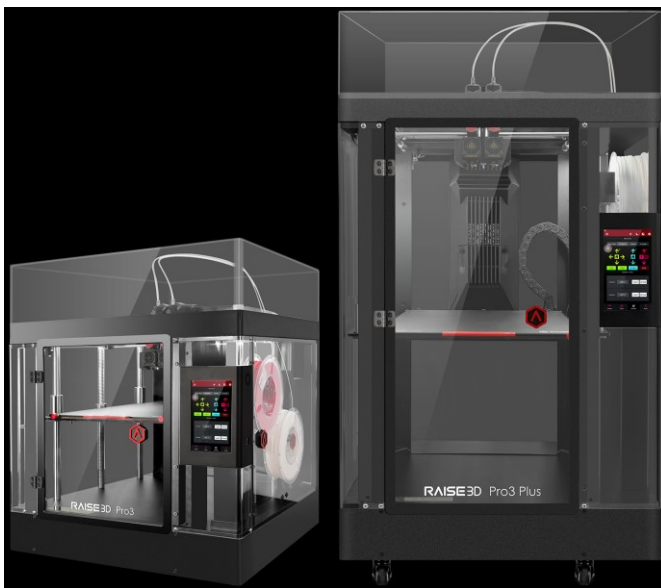
Materiaalin suosiota selittää sen helppo tulostettavuus. PLA tulostuu alhaisessa, noin 200–210°C:een lämpötilassa. Se ei ole altis vääntyilemään ja tämän vuoksi se ei välttämättä vaadi lämmitettyä tulostusalustaa, mutta parhaan lopputuloksen aikaansaamiseksi se on suositeltavaa. Filamentin tyypistä riippuen alustan lämmöksi suositellaan 30–70°C. PLA on myös yksi edullisimmista filamenteista ja hintaan verrattuna siitä on mahdollista valmistaa pinnanlaadultaan hyviä ja lujia komponentteja. Filamentteja on saatavilla 1,75 mm:n ja 2,85 mm:n paksuuksina sekä lukemattomissa eri väreissä. Valmiiden väri vaihtoehtojen lisäksi valmis komponentti on mahdollista maalata akryylimaleilla sekä hioa tai kiillottaa paremman pinnanlaadun aikaansaamiseksi. (3Dsourced. 2021b.)

PLA:lla on hyvä vetolujuus ja siitä valmistetut komponentit ovat jäykkiä. Lisäksi se kestää hyvin ultraviolettisäteilyä ja on yhteensopiva PVA-tukimateriaalien kanssa. Muovi on myös lähes hajuton, ja tämän vuoksi se soveltuu hyvin käytettäväksi toimistoissa ja koulutuksissa. Materiaalista valmistetut komponentit ovat kuitenkin hauraita eivätkä ne kestä kiertymistä. Liuottimia ja vettä PLA kestää heikosti, minkä lisäksi sen maksimikäyttölämpötila on noin 50°C. Siksi se ei sovellu kohteisiin, joita käytetään kuumassa tai ulkotiloissa. (BCN3D. PLA.)

4.2 ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)

ABS, akrylinitriilibutadienistyreeni, on PLA:n ohella toinen suosituimmista tulostuksessa käytettävistä muovilaaduista. Se ei ole biohajoava eikä uusiutuva, mutta sitä on mahdollista kierrättää, koska sitä voidaan sulattaa ja jäähdyttää useita kertoja ilman sen merkittävää hajoamista. Hinnaltaan ABS on yksi halvimmista filamenteista PLA:n ohella ja samalla se on myös yksi vahvimmista tulostusmateriaaleista hintaluokassaan. Se kestää ulkoisia iskuja, korkeita lämpötiloja, sähköä sekä syövyttäviä kemikalleja. Lujuusominaisuuksien vuoksi sitä on mahdollista käyttää prototyyppien ja mallien lisäksi erilaisissa lopputuotteissa kuten työkalujen suojakoteloissa ja pakkauksissa, sähköpistorasioissa, elektroniikan suojakoteloissa, putkissa ja tietokoneen näppäimistöissä. Myös LEGO-lelut on valmistettu ABS-muovista. Lääketieteellisiin implanteihin abs ei pääsääntöisesti sovi, ja ilman lisäaineita sen ultraviolettisäteilyn kesto on heikko. (Rogers 2015b; 3Dsourced 2022c.)

Tulostamisen kannalta ABS on PLA:ta haasteellisempi materiaali. Se on altis vääntyilemään ja halkeilemaan ja onnistuneeseen lopputulokseen pääseminen vaatii tarkkaa lämpötilojen hallintaa koko tulostusprosessin ajan. Tulostimen suutin vaatii noin 230°C:n lämpötilan, jonka lisäksi tulostusalustan on oltava lämmitetty noin 110°C. Myös tulostinta ympäröivän ilman lämpötila on saatava pysymään tasaisena, ja siksi ABS on tulostettava koteloitussa tulostimessa (KUVA 5). Tulostaminen aiheuttaa voimakasta hajua ja höyryjä, ja siksi tulostuspaikan hyvästä ilmanvaihdosta on muistettava huolehdittava. Valmiita osia on mahdollista koneistaa, hioa ja liimata. Kappaleita voi myös kiillottaa asetonilla tai maalata akryylimaleilla. (3Dsourced. 2022c.)



KUVA 5. ABS-muovin tulostamiseen sopivia koteloituja tulostimia (Raise3D)

4.3 ASA (Acrylonitrile styrene acrylate)

Akryliniitriilistyreeniakrylaatti, ASA, on sekä lujaa, kimmoisaa että sitkeää joten, se vastaa ominaisuuksiltaan hyvin paljon ABS-muovia. Sillä on kuitenkin parempi uv-säteilyn, lämmön ja kemikaalien kesto kuin ABS:llä eikä se kellastu. Siksi se soveltuu tulostettavista muoveista parhaiten ulkokäyttöön. Sitä on helpompi muokata kuin metalleja eikä se ruostu. Lisäksi se on metalleja halvempi materiaali. Näiden ominaisuuksien ansiosta ASA:a käytetään paljon autoteollisuudessa, jossa siitä valmistetaan mm. pus-kureita, peilikoteloita ja kokonaisia koripaneeleja. (Johansson 2020; 3Dsourced 2021d.)

Tulostaminen on ABS-muoviin verrattuna haasteellisempaa. Materiaali on altis halkeilemaan ja vääntymään, minkä lisäksi kerrosten tarttuvuus on väärillä lämpötiloilla huono. ABS:n tapaan ASA vaatii korkeat tulostuslämpötilat, noin 220–250°C ja lisäksi 90–110°C:n tulostusalustan. Tulostimen on oltava koteloitu ja valmiin kappaleen tulee antaa jäähtyä rauhassa. Tulostusten onnistuessa lopputuotteet ovat erittäin kestäviä ja materiaalin käyttöalue on huomattavasti laajempi kuin ABS:llä. (3Dsourced 2021d.)

4.4 PETG (Polyethylene terephthalate, glycol-modified)

PETG eli polyeteenitereftalaatti on suosittu tulostusmateriaali, jossa yhdistyvät PLA:n helppo tulostettavuus ja ABS-muovin tekniset ominaisuudet. PETG on glykolimuunneltu versio PET-muovista (polyeteenitereftalaatti), joka on hyvin yleinen materiaali muovipullojen valmistuksessa. Glykolimuunnos tekee siitä PET:hen verrattuna vähemmän hauraan, kirikkaamman ja kestävämmän. PETG on vahvaa ja joustavaa, minkä lisäksi se kestää hyvin lämpöä, iskuja ja vettä. Tulosteilla on hyvä mittatarkkuus, mutta kappaleen pinta on hieman pehmeä ja siksi se on altis kulumiselle ja naarmuuntumiselle. Hinnaltaan PETG on yleensä hieman PLA ja ABS muoveja kalliimpaa. (3Dsourced. 2021e.)

PETG:tä on mahdollista tulostaa edullisemmillaakin harrastetason tulostimilla. Tulostuslämpötila vaihtelee filamentista riippuen 220–260°C:n välillä. Materiaali ei ole altis vääntymiselle, ja siksi tulostusalustan lämmitys ei ole pakollista mutta parhaan lopputuloksen vuoksi se on suositeltavaa. Suositeltu alustan lämpötila on noin 70–90°C. Koteloitua tulostinta tai tulostuskammiota ei tarvita, mutta mikäli tällainen on käytössä, suositellaan kotelon tai kannen jättämistä auki tulostuksen ajaksi. PETG:llä on erinomainen kerrostarttuvuus, ja se voi aiheuttaa hankaluuksia valmiin kappaleen ja erilaisten tukien poiston suhteen. Kappaleen irrottamista tulostusalustasta voi helpottaa käyttämällä tulostusalustassa esimerkiksi maalarinteippiä, liimapuikkoa tai hiuslakkaa. Tukirakenteiden poistoa voi helpottaa käyttämällä useammalla suuttimella varustettua tulostinta, jolloin tukimateriaalina voidaan käyttää esimerkiksi helpommin poistettavaa PLA:ta. (3Dsourced 2021e.)

PETG ei aiheuta savuamista ja se on lähes hajuton tulostusmateriaali. Valmiita tuotteita ei voi kiillottaa asetonilla kuten ABS-muovia, mutta ne voidaan jälkikäsitellä hiomalla. Myös värivalikoima on laaja. Materiaali on elintarvike- ja juomaturvallinen, ja siksi materiaalia voi käyttää osiin, jotka ovat kosketuksissa ruoan kanssa. Sitä käytetään myös erilaisissa elektroniikan ja moottoreiden suojakoteloissa sekä komponenteissa, joilta vaaditaan vedenpitävyyttä. (3Dsourced. 2021e.)

4.5 TPU (Thermoplastic polyurethane)

Termoplastinen polyuretaani TPU on yleisimmin käytetty filamentti erilaisten joustavien komponenttien valmistamiseen (KUVA 6). Joustavien ominaisuuksien lisäksi se on melko vahvaa ja venyvää, ja lisäksi se kestää kemikaaleja sekä voimakkaitakin iskuja. Hinnaltaan TPU on hieman kalliimpaa kuin ABS ja PLA. Värivalikoima on laaja ja lisäksi sitä on saatavilla myös läpinäkyvänä. Se ei ole altis vääntymään, ja siksi se soveltuu hyvin myös pitkille ja ohuille osille. TPU:ta käytetään esimerkiksi puhelin- ja tablettitietokoneiden suojakoteloiden valmistamiseen, mutta elintarviketurvallisuutta vaativiin kohteisiin se ei sovi. (3Dsourced 2021f.)

TPU ei aiheuta hajuhaittoja tulostamisen yhteydessä. Sopiva tulostuslämpötila on 220–250°C ja noin 50°C:n tulostusalustaa suositellaan käytettäväksi, mutta pakollista sen käyttö ei ole. Lämpötilojen hallinta ei ole niin vaativaa kuin ABS:llä tai ASA:lla, ja siksi tulostaminen onnistuu myös koteloimattomalla tulostimella. Tulostusalustaan suositellaan tarttuvuuden parantamiseksi käytettäväksi liimapuikkoa tai teippiä. Joustavuuden ja pehmeiden vuoksi filamentti on altis kiertymään ja tukkeutumaan. Tämän vuoksi TPU:n tulostusnopeus on oltava huomattavasti toisia materiaaleja hitaampi, noin 20–30 mm sekunnissa. Tulostaminen onnistuu myös paremmin laitteella, jossa filamentin syöttölaite on tulostuspään välittömässä läheisyydessä. (3Dsourced 2021f.)



KUVA 6. TPU-muovista valmistettu joustava juomapullo (Carlota 2020)

4.6 PVA (Polyvinyl alcohol)

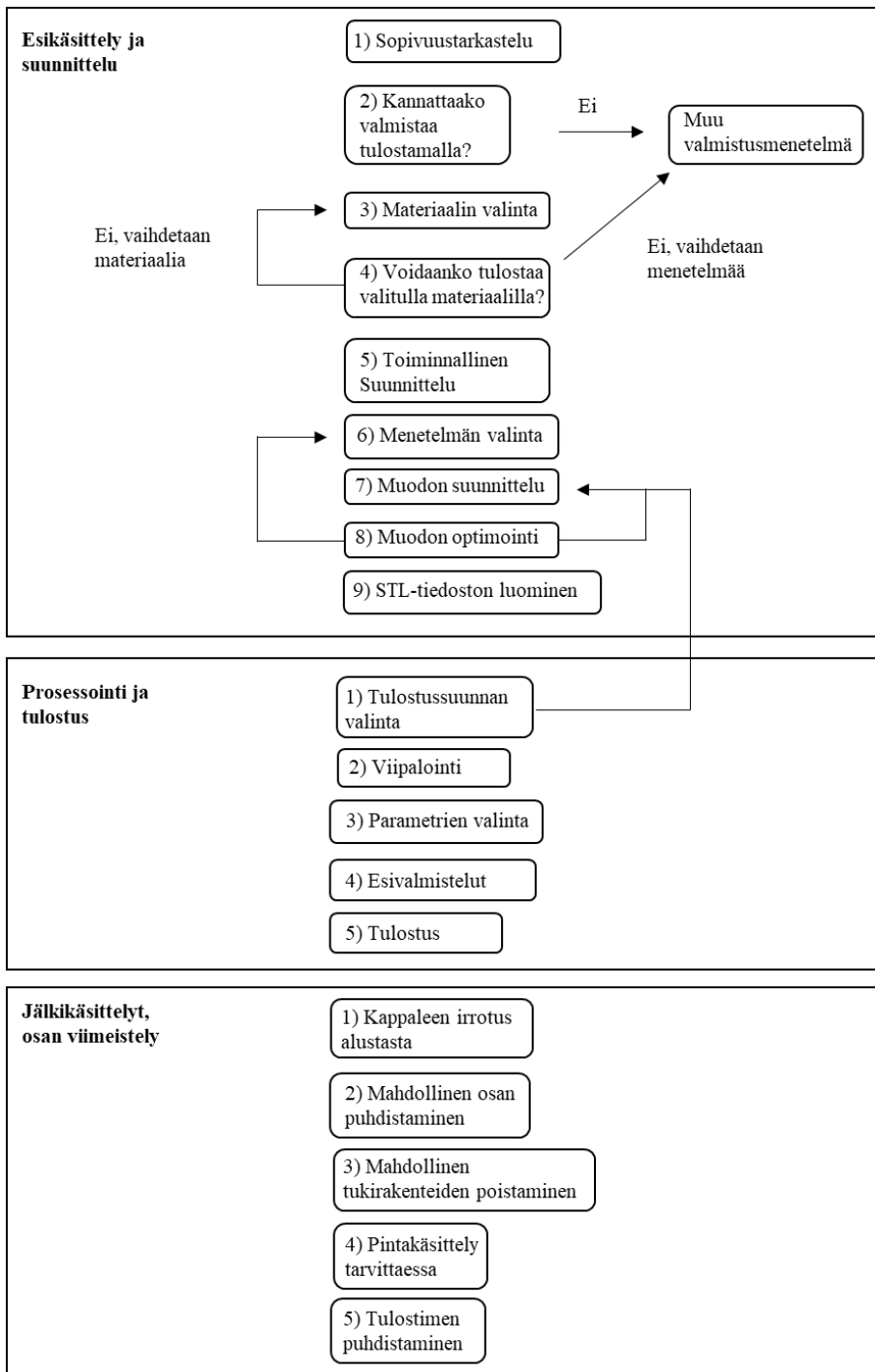
PVA eli polyvinyylialkoholi on pehmeää ja biohajoavaa muovia, jota käytetään hyvin yleisesti 3D-tulostuksissa tukimateriaalina toisille muovilaaduille. Suosio perustuu PVA:n vesiliukoisuuteen. Kappaleiden valmistaminen onnistuu kahdella tulostuspäällä varustetulla tulostimella, joista toinen tulostaa kappaleen valmistamiseen vaadittavaa materiaalia ja toinen tukimateriaalia. Valmiista kappaleesta tukimateriaali saadaan poistettua yksinkertaisesti pesemällä (KUVA 7). PVA:n tulostuslämpötila vaihtelee 185–200°C:n välillä. Tulostusalusta ei vaadi lämmitystä, mutta sitä käytettäessä suositeltu lämpö on 45–60°C. Koteloitua tulostinta ei vaadita. Materiaali on erittäin herkkä kosteudelle, ja tämä on huomioitava myös filamenttia säilytettäessä. Säilyttäminen vaatii ilmatiiviit astiat, jonka lisäksi erilaisten kosteudenpoistajien käyttö on suositeltavaa. PVA:ta käytetään tulostamisen lisäksi esimerkiksi itseliukenevissa astianpesukoneisiin tarkoitetuissa pesuainepakkauksissa. (Simplify3D. PVA.)



KUVA 7. Tukimateriaalia vaatinut tuloste ja sama kappale tukimateriaali poistettuna (Roberson 2021)

5 TULOSTUSPROSESSI

Käytettävästä menetelmästä riippumatta valmistusprosessi voidaan jakaa kolmeen eri päävaiheeseen: esikäsitteilyyn ja suunnitteluun, prosessointiin sekä jälkikäsitteilyyn ja viimeistelyyn (KUVIO 7).



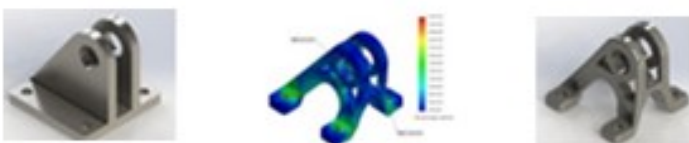
KUVIO 7. Tulostusprosessin vaiheet (mukaillen Alonen ym. 2016)

5.1 Esikäsittely ja suunnittelu

Valmistusprosessin aluksi on selvitettävä, onko osaa ylipäättään järkevää tai kannattavaa valmistaa materiaalia lisäävällä menetelmällä. Vaikka tekniikat ja menetelmät kehittyvät koko ajan ja menetelmän käyttö yleistyy, on silti edelleen paljon kohteita, joihin se ei sovi tai valmistaminen on perinteisillä menetelmillä järkevämpää. Erityisesti kustannuksia kannattaa tarkistella tuotteen elinkaarikustannusten kannalta valmistuskustannusten sijaan. Usein myös osaa, joka on suunniteltu valmistettavaksi perinteisillä valmistusmenetelmillä, ei ole järkevää tulostaa sellaisenaan, vaan se vaatii aina uudelleen suunnittelua. Valmistamista on mietittävä myös toimitusajan, varastointikustannusten, toimittajista riippuvuuden, vienti- ja tuontikustannusten sekä mahdollisesti parannettavan toiminnallisuuden kannalta. (Alonen 2021a.)

Materiaalin valinta on myös oleellinen osa valmistusprosessin aloittamista. Tulostettavien materiaalien valikoima on laaja ja se kasvaa jatkuvasti. Materiaaleina yleisimmin käytetyt muovit ja metallit ovat pääsääntöisesti aina erilaisia seoksia, ja tämä on myös huomioitava valmistettavan kappaleen rakennetta ja lujuutta ajatellen. Koska tulostaminen mahdollistaa kappaleisiin erilaisia rakenteita perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna, on kappaleen valmistusmateriaali mahdollista tietyissä tapauksissa muuttaa esimerkiksi metallista muoviin. (Alonen 2021a.)

Toiminnallisessa suunnittelussa tarkastellaan sekä osan tarkoitusta että asiakkaan tarpeita. Käyttökohde ja ympäristö asettavat suunnittelulle tiettyjä edellytyksiä, samoin osalta vaadittava elinikä. Valmistusmenetelmien rajoitukset tulee huomioida, samoin menetelmien vaatimat jälkikäsittelyt. Menetelmän valintaa ohjaavat pitkälti käytettävä materiaali, kappaleen koko ja lukumäärä, vaadittava pinnanlaatu sekä joissain tapauksissa tarjolla oleva konekanta. Osan muoto pyritään optimoimaan suunnitteluvaiheessa siten, että siitä saadaan kevyt, jäykkä ja/tai joustava (KUVA 8). Kappaleen muotoa kiinnitysten ja kuorimitusten suhteen on mahdollista optimoida suunnitteluohjelmistojen FEM-malleja hyödyntämällä (Alonen 2021a.)

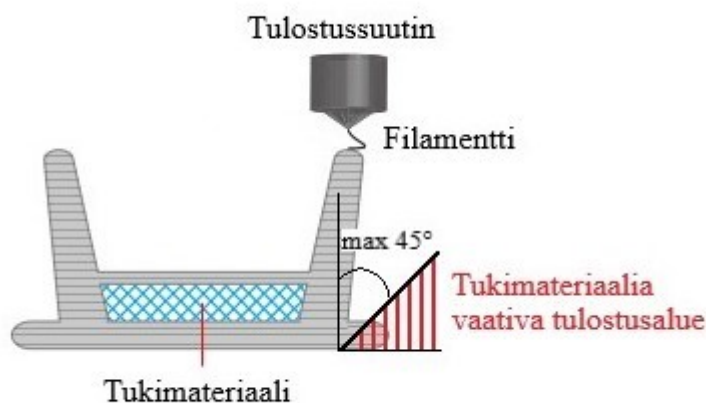


KUVA 8. Muodoiltaan optimoitu kappale (mukaillen Alonen ym. 2016)

Itse käytännön suunnittelu ja mallinnus suoritetaan CAD-ohjelmistoilla. Yleisimpiä käytössä olevia ohjelmistoja ovat mm. Solidworks, Autocad, Inventor, Vertex ja Autodesk Fusion360. Myös valmiita malleja on saatavilla mm. Thingiverse- ja Grabcad-palveluiden kautta. Valmis kappale tallennetaan yleisimmin käytettyyn .STL-tiedostomuotoon, joka siirretään viipalointiohjelmaan. Tulostusta varten on kehitetty myös .3MF- ja .AMF-tiedostomuodot, mutta niiden yleistymisen on vielä toistaiseksi ollut hidasta. (Alonen 2021a.)

5.2 Prosessointi

Varsinainen kappaleen tulostaminen suunnitellaan viipalointiohjelman avulla. Valmiiksi suunniteltu kappale tuodaan ohjelman sisältämään virtuaaliseen tulostustilavuuteen, jossa kappaleelle määritetään tarvittavat parametrit ja simuloidaan tulostus kerroksittain. Viipalointiin on mahdollista käyttää suunnitteluohjelmiin integroitua ominaisuuksia tai kokonaan erillisiä ohjelmia kuten Materialise, Ultimaker Cura, Repetier-Host ja Sli3er. Viipalointi aloitetaan määrittämällä kappaleelle tulostusasento. Koska kappale valmistetaan kerroksittain, tulostusasennolla on suuri merkitys vaadittaviin tukirakenteisiin ja tulostusaikaan. Tulostussuunnassa yli 45° olevat rakenteet vaativat yleensä tukimateriaalin käyttöä ja korkeammat kappaleet kasvattavat tulostusaikaa (KUVIO 8). Asento määrittää myös tulostussuunnan, joka vastaavasti vaikuttaa paljon kustannuksiin, valmistettavuuteen, kappaleen pinnanlaatuun ja mittatarkkuuteen. (Alonen 2021a.)



KUVIO 8. Tukirakenteita vaaditaan yli 45° kulmassa oleville rakenteille (mukailten Yasojima 2022)

Asennon määrittämisen jälkeen kappaleelle valitaan tulostusparametrit, jotka vaihtelevat käytettävän menetelmän ja materiaalin mukaan. Tyypillisimpiä muutettavia parametrejä ovat sisäosien täyttöaste ja rakenne, tulostuspään ja – alustan lämpötila, kappaleiden seinämävahvuudet, tukirakenteet, kerroskorkeus ja tulostusnopeus. Esimerkiksi materiaalin pursotusmenetelmässä sisäosien kennorakenteinen täyttöaste on yleensä 25–30 %, kerroskorkeudet 0,10–0,30 mm ja nopeus muutamia kymmeniä millimetrejä sekunnissa. Suurimmassa osassa siivutusohjelmia on tarjolla valmiita parametrejä, jonka lisäksi niitä on saatavilla laite- ja materiaalivalmistajilta. Parametrien valinnan ja viipaloinnin jälkeen prosessista luodaan G-code-tiedosto, joka syötetään tulostimeen kappaleen valmistamista varten. (Alonen 2021a.)

Ennen varsinaisen tulostamisen aloittamista tulostin on valmistettava käyttökuuntoon. Vaadittavat toimenpiteet riippuvat tulostusmenetelmästä, ja niihin sisältyvät esimerkiksi mahdollinen materiaalin vaihto ja sen riittävyden varmistaminen sekä tulostusalustan valmistelu. Materiaalin vaihto voi olla työläs, useita tunteja kestävä toimenpide tai vastaavasti yksinkertainen ja nopeasti toteutettava filamenttirullan vaihto. Tulostusalustan valmistelua ovat esimerkiksi materiaalin pursotuksessa alustan esilämmitys ja erilaisten tartuntaa lisäävien aineiden levittäminen. Valmistavien toimenpiteiden jälkeen alkaa varsinainen tulostaminen, joka voi kestää menetelmästä, materiaalista, kappaleen koosta ja tulostusnopeudesta riippuen muutamista minuuteista useisiin päiviin. (Alonen 2021a.)

5.3 Jälkikäsittely ja viimeistely

Myös tulosteiden jälkikäsittelyn tarve riippuu käytetystä valmistusmenetelmästä ja materiaalista. Muoveilla jälkikäsittelymahdollisuuksia on huomattavasti metalleja vähemmän (TAULUKKO 1). Kaikille valmistusmenetelmille yhteisiä jälkikäsittelyjä ovat valmiin kappaleen irrottaminen alustasta tai poistaminen kammioista, mahdollisten tukirakenteiden poisto, osien puhdistaminen ja tulostimen valmistelu seuraavaa tulostusta varten. Tyypillisiä jälkikäsittelyjä ovat myös huokoisten kappaleiden täyttö toisella materiaalilla, erilaiset lämpökäsittelyt sekä hionta ja kiillotus. Valmiit tulosteet täyttävät harvoin pinnanlaadulle ja toleransseille asetetut vaatimukset ja tämän vuoksi esimerkiksi kiinnityspinnat on käsiteltävä ainetta poistavilla menetelmillä kuten koneistamalla tai jyrsimällä. (Alonen 2021a.)

TAULUKKO 1. Muovitulosteiden pakolliset ja mahdolliset jälkikäsittelymenetelmät (mukaihen Alonen 2021a)

Menetelmä	Pakolliset	Mahdolliset
Materiaalin pursotus	irrotus alustasta, tukimateriaalin poisto	pintakäsittely (asetonihöyrytys, hionta, maalaus), koneistus
Jauhepetimenetelmät	jauheenpoisto kappaleesta ja kammioista	lisäaineen imeytys, pintakäsittely (hionta, maalaus), koneistus
Nesteen fotopolymerisointi	tukimateriaalin poisto, pesu	jatkokäsittely kovetusuunissa, lisäaineen imeytys, kiillotus, koneistus
Sidosaine menetelmät	jauheenpoisto	lisäaineen imeytys, hionta, maalaus, koneistus

6 3D-TULOSTIMEN KÄYTTÖNOTTO JA OPTIMOINTI

Robo3D Lab:iin sijoitettava ja työssä käyttöönotettava tulostin oli Crealityn valmistama Ender 3 S1. Valmistusmenetelmänä laite käyttää materiaalin pursotusta ja rakenteeltaan se on koteloimaton cartesian tyyppinen tulostin. Lämmitettävä tulostusalusta on kooltaan 220 mm x 220 mm ja laitteella voidaan tulostaa maksimissaan 270 mm korkeita kappaleita. Tulostusalustan suoruus tulostussuuttimeen nähden on varmistettu alustan automaattisella tasausominaisuudella. Vinossa oleva taso aiheuttaa erilaisia ongelmia tulostuksessa, kuten esimerkiksi kappaleen huonoa tarttuvuutta alustaan ja tulostuksen aikaisia irtoamisia. Lisäksi laitteesta löytyvät filamenttivahti ja sähkökatkojen varalle oleva muisti. Filamentin loppuessa tai katketessa tulostus keskeytyy ja muistin ansiosta tulostin pystyy jatkamaan tulostamista sähkökatkon jälkeen. Näiden ominaisuuksien ansiosta pitkäkään tuloste ei mene kyseisten toimintahäiriöiden vuoksi hukkaan. Tulostimella on mahdollista tulostaa yleisimpiä materiaaleja kuten PLA, PETG, ABS ja TPU (LIITE 1).

6.1 Tulostimen valmistelu ja käyttöönotto

Tulostimen käyttöönotto aloitettiin laitteen kokoamisella. Laite oli pakattu erittäin hyvin ja ennen kokoonpanon aloittamista vielä varmistettiin, että kaikki vaaditut osat ovat saatavilla (KUVA 9). Osien lisäksi laitteen mukana oli joukko erilaisia oheistarvikkeita ja tarvittavat työkalut kokoonpanoa varten (KUVA 10).



KUVA 9. Tulostimen komponentit ennen kokoonpanoa



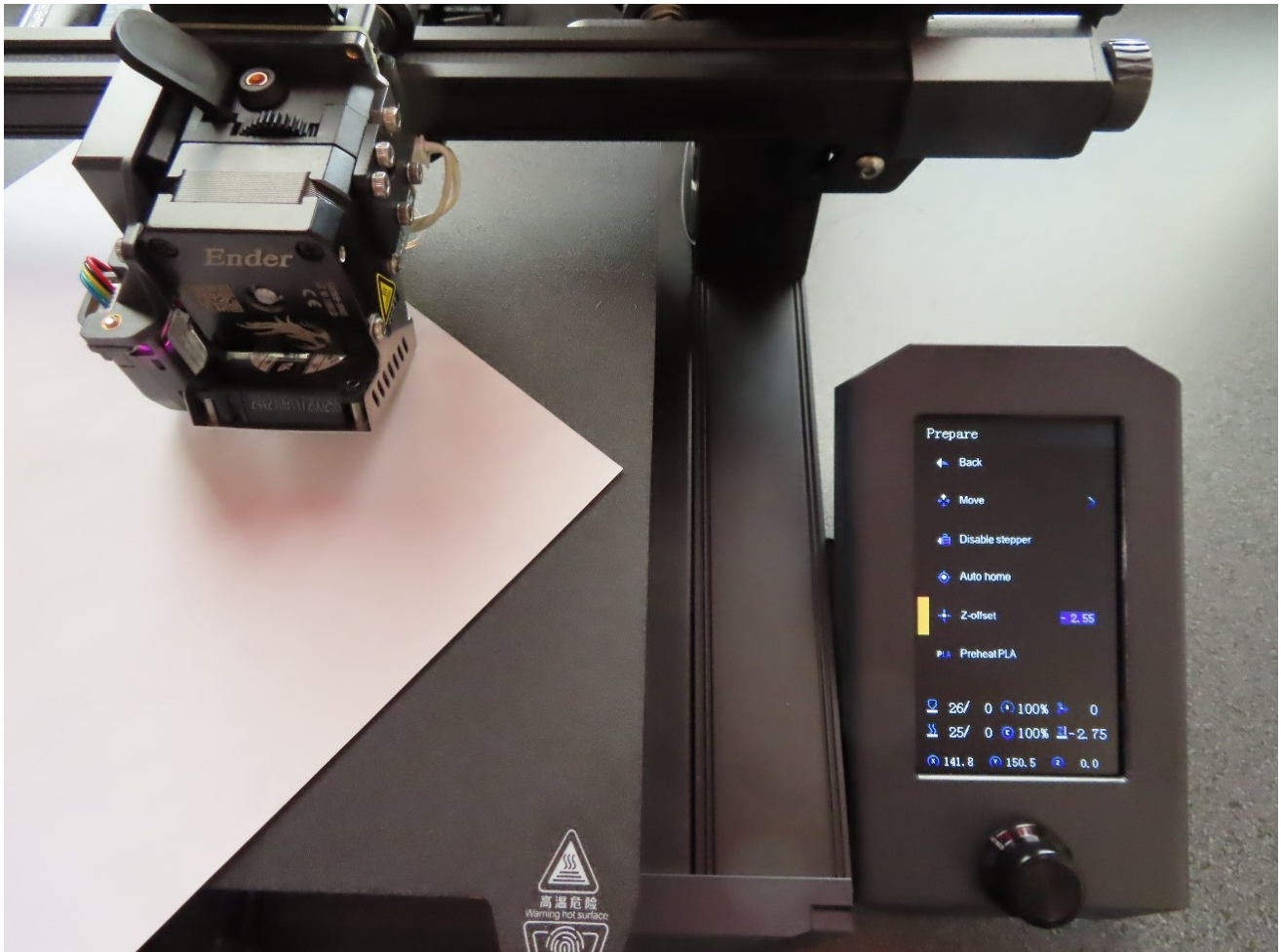
KUVA 10. Laitteen mukana toimitetut työkalut ja oheistuotteet

Kokoonpano suoritettiin mukana olleen valmistajan ohjeen mukaan. Ensimmäisenä toimenpiteenä kiinnitettiin suuttimen, syöttölaitteen ja alustan tasausanturin sisältämä kokonaisuus X-akselistoon. Johtosarjan kiinnikkeen kiinnityksen jälkeen Y-akselisto sekä näyttö kiinnitettiin tulostusalustaan. Seuraavaksi asennettiin teline filamentille sekä edellä mainittu filamenttivahti. Asennuksen viimeisinä vaiheina kytkettiin paikoilleen sähkösarjan liittimet ja varmistettiin, että virtalähteen käyttöjännitekatkaisin on oikeassa 230 voltin asennossa.

Laitteen kokoaminen oli helppoa ja nopeaa. Kokoonpano vaati vain muutamien ruuvien kiinnittämistä eikä minkäänlaista väärin kokoamisen mahdollisuutta mielestäni edes ollut. Myös sähkösarjan johtimien pituus ja liittinten mallit olivat sellaisia, että niitä oli käytännössä mahdoton asentaa väärin. Aikaa kokoonpanoon kului noin tunti, ja tästäkin ajasta suuri osa kului dokumentointiin ja komponentteihin tutustumiseen. Ainoa haasteellinen tilanne syntyi virtojen kytkennän jälkeen tulostimen valikkoon tutustuessa, kun laitteen valikon kieleksi vaihtui hetkeksi vahingossa ja virheellisesti kiina.

Ensimmäisenä toimenpiteenä laitteelle suoritettiin tulostusalustan tasaaminen. Tasaaminen kytketään päälle suoraan laitteen päävalikon ”Level” toiminnon kautta. Laitteen tulostuspää mittaa alustan kuudesta toista mittauspisteestä, kalibroi tarvittavat parametrit automaattisesti ja palaa takaisin lähtöpisteeseen. Mittauksen jälkeen suoritettiin suuttimen ja alustan välisen välyksen säätö. Säätö tapahtuu valikon ”Prepare” toiminnon kautta, josta valitaan kohta ”Z-offset”. Arvo säädetään kohdalleen siten, että suut-

timen ja alustan väliin jää tilaa normaali A4-paperiarkin paksuuden verran, noin 0.08–0.1 mm. Lähtöarvona tulostimessa oli 0,00 ja säädön jälkeen päädyttiin arvoon -2.55 (KUVA 11). Näiden toimenpiteiden jälkeen laite oli käyttökunnossa.

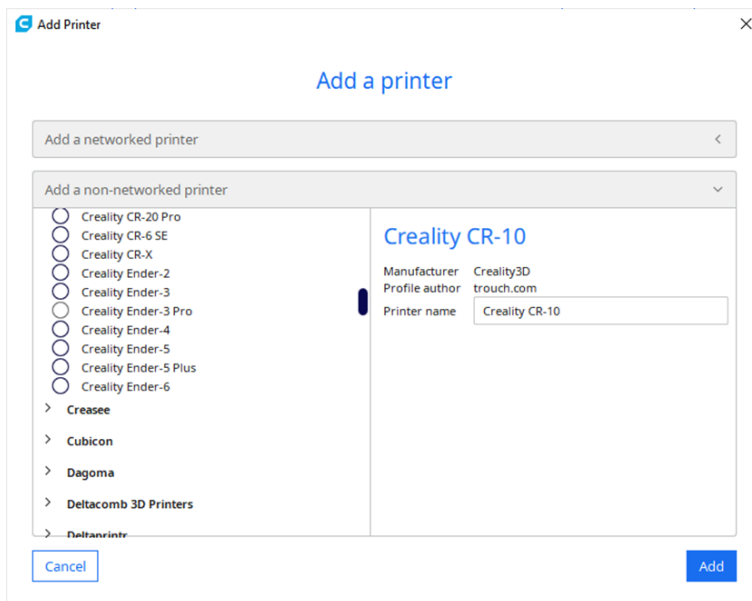


KUVA 11. Suuttimen ja tulostusalustan välisen välyksen säätö

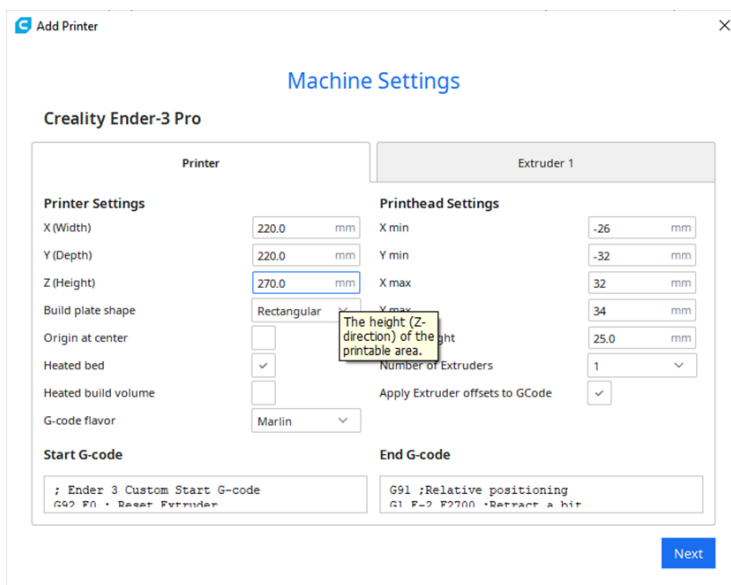
6.2 Viipalointiohjelman asennus ja käyttöönotto

Viipalointiohjelmaksi valittiin suosittu ja yleisesti käytössä oleva Ultimaker Cura. Ohjelma on ladattavissa vapaasti internet-osoitteesta: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>. Ohjelman sisältämät laite- ja materiaalioprofiilit päivittyvät jatkuvasti, asennusvaiheessa ohjelmasta oli käytössä versio 4.13.1. Asennuksen jälkeen ohjelmaan lisättiin käytettävä tulostin. Tämä tapahtui ”Add a non-networked printer” painikkeen kautta, joka listaa kaikki ohjelman tukemat valmistajat sekä tulostimet. Käyttöön otettu laite on mallina vielä niin uusi, että siihen ei valmista profiilia löytynyt. Tämän vuoksi profiiliksi valittiin

tyypiltään lähimpänä oleva Ender 3 Pro (KUVA 12). Profiilia muutettiin ainoastaan tulostustilavuuden osalta, jonka koko vaihdettiin vastaamaan käyttöönotettua tulostinta. ”Printhead settings” valikossa on mahdollista muuttaa tulostuspään kokoa ja mittoja. Näillä asetuksilla on merkitystä niissä tapauksissa, kun tulostustilavuudessa on useita kappaleita mutta niitä tulostetaan yhtä kappaletta kerrallaan. Asetuksien avulla tulostin estää erilaiset tulostuspään yhteentörmäykset toisten valmistuksessa olevien kappaleiden kanssa (KUVA 13).



KUVA 12. Tulostimen lisäys Cura viipalointiohjelmaan



KUVA 13. Tulostimen asetusten korjaaminen

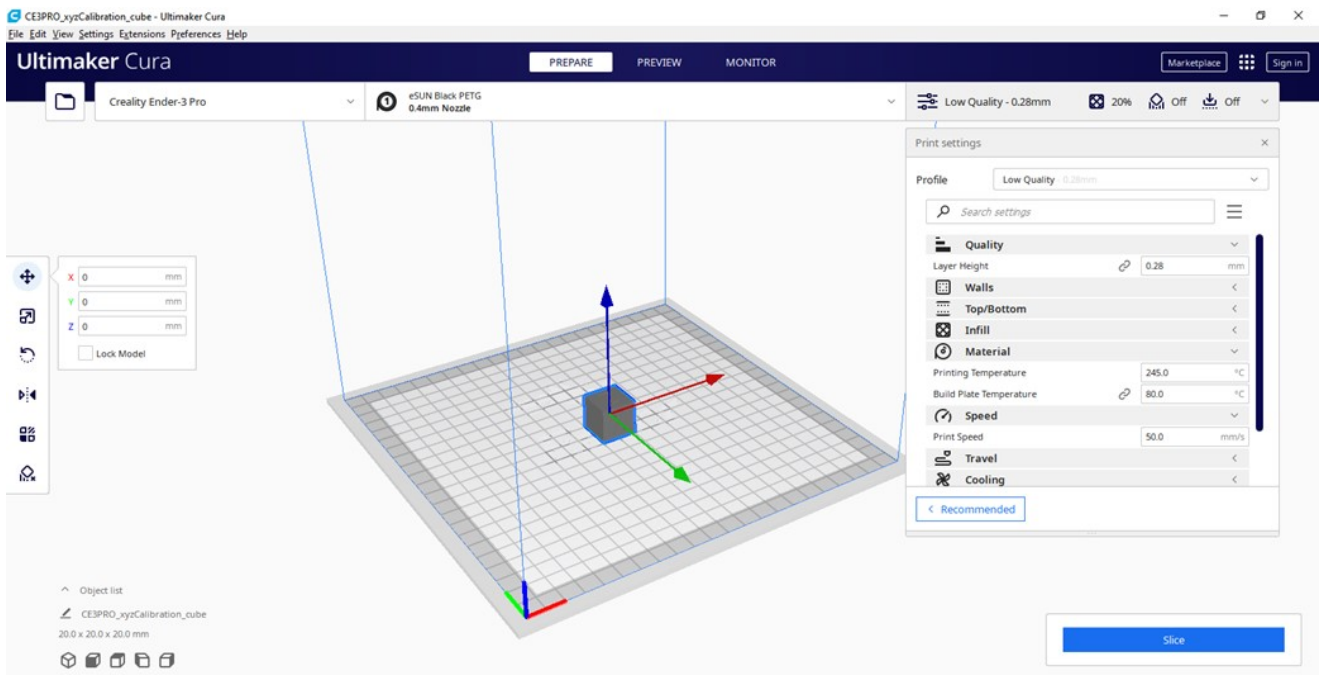
Asetusmuutosten ja valinnan jälkeen Cura avautui. Päänäkymässä ohjelma näyttää valitun tulostimen virtuaalisen tulostustilavuuden sekä päävalikot, joiden kautta voidaan hallita tulostinta, materiaaleja ja parametrejä. Parametrivalikosta on mahdollisuus valita joko ”recommended” tai ”custom”-tila. ”Custom”-tilassa parametrien säätömahdollisuuksia on käytössä huomattavan paljon ”recommended”-tilaa enemmän.

6.3 Testitulosteet

Tulostettavaksi kappaleeksi valittiin 20x20x20 mm:n kokoinen kalibrintikuutio, jonka .stl-tiedosto ladattiin Thingiverse palvelusta. Pienikokoisen testikappaleen käyttämiseen päädyttiin lyhyen tulostusajan vuoksi. Pinnanlaatujen erot näkyisivät pienistäkin kappaleista, eikä testauksen aloittaminen isolla kappaleella, uudella laitteella ja vierailta materiaaleilla ollut millään tavalla järkevää virheiden mahdollisuuksien vuoksi. Kuutioiden jälkeen laitteella tulostettiin kaarevien pintojen, pinnanlaadun ja tyhjän päälle tulostamisen koekappaleeksi suunniteltu ”bench”. Myös ”bench” ladattiin valmiina tiedostona Thingiversestä.

Tulostusmateriaaleina käytettiin eSunin valmistamia PETG ja PLA+ muovifilamentteja. PETG:lle Curasta löytyi valmis tulostusprofiili, ja tämän vuoksi laitteen testaaminen päätettiin aloittaa kyseistä filamenttia käyttäen. Valmistajan ja materiaalin valinnan lisäksi Curasta oli vielä valittava tulostussuuttimen koko, jonka jälkeen valittavana oli neljä laadultaan erilaista tulostusprofiilia; ”Low, Standard, Dynamic ja Super”. Profiileja vertaillaessa huomattiin, että kappaleiden pinnanlaatu on määritelty muuttamalla pelkästään tulostettavan kerroksen korkeutta. Kaikissa profiileissa oli sama 50,0 mm/s tulostusnopeus, sekä tulostussuuttimen 245°C ja alustan 80°C lämpötilat, mutta kerroskorkeudet vaihtelivat 0,28, 0,20, 0,16 ja 0,12 millimetrin välillä. Koska testitulosteissa keskityttiin pinnanlaatujen tarkkailuun, ei esimerkiksi erilaisia seinämävahvuuksia, täyttöä- tai tukimateriaaleja koskevia parametreja muutettu millään tavalla.

Curaan avattu kappale asemoidaan näytön vasempaan laitaan avautuvan valikon kautta. Myös muita ominaisuuksia sisältävä valikko avautuu, kun tulostustilavuudessa olevaa kappaletta klikataan hiirellä. Sopivan tulostusprofiilin ja sen sisältämien parametrien valinnan jälkeen tulostus viipaloidaan komennolla ”Slice” (KUVA 14). Viipalointi on mahdollista simuloida ylävalikossa olevan ”Preview” toiminnon avulla. Onnistuneen viipaloinnin jälkeen tiedosto tallennetaan .gcode-muodossa päävalikosta löytyvällä ”Export” komennolla. Tiedosto sisältää varsinaiset tulostimen ohjaustiedot kappaleen valmistamiseksi varten, ja tulostimeen tiedosto siirretään muistikortin avulla.



KUVA 14. Cura:n virtuaalinen tulostustilavuus ja valikot

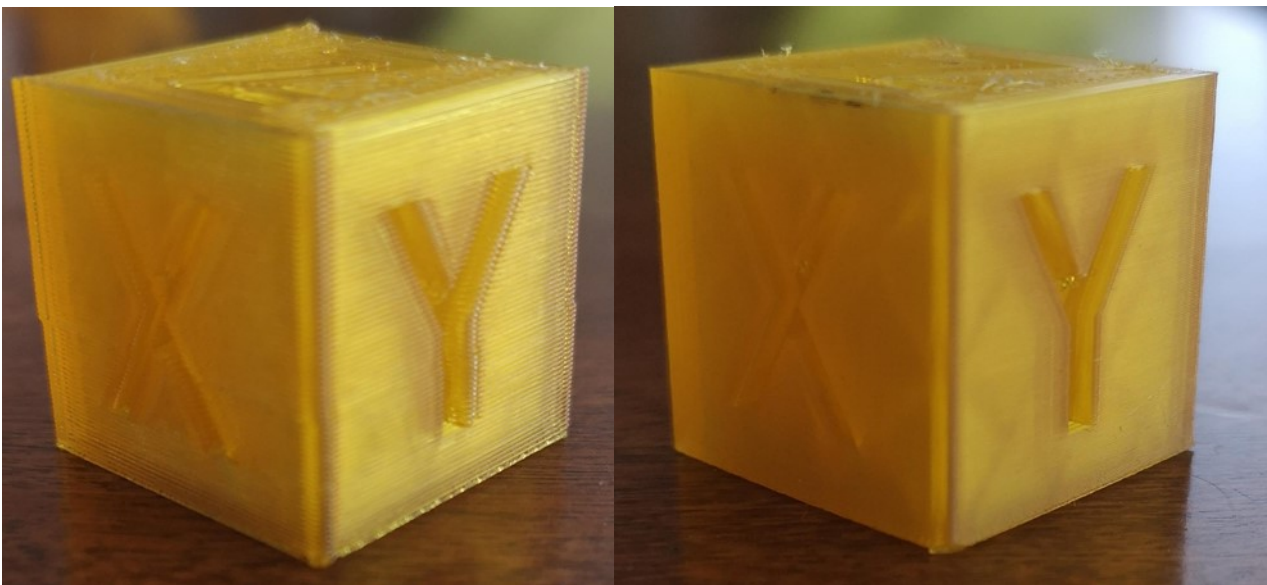
Ennen varsinaisen tulostamisen aloittamista kuutiolle luotiin gcode-tiedostot kaikille neljälle erilaatuiselle profiilille. Tulostusajan pituudesta johtuen ”bench” tulostettiin ainoastaan 0,20 mm:n kerroskorkeudella. Seuraavaksi tulostimelle suoritettiin esilämmitys, filamenttirulla ja muistikortti asennettiin paikalleen ja alustaan levitettiin tartuntaliima. Tulostaminen aloitettiin valikon ”Print” komennon kautta, joka avasi muistikortilla olevat tiedostot. Oikean tiedoston valitsemisen jälkeen tulostin jatkoi laitteen lämmittämistä asetettuihin lämpötiloihin ja tulostus alkoi. Ennen tulosteen aloittamista tulostin tekee muutamia ylimääräisiä tulostuksia alustaan. Tällä toimenpiteellä suutin puhdistuu mahdollisista vanhoista materiaaleista ja suuttimessa esimerkiksi materiaalin vaihdon vuoksi oleva ilma ja tyhjät kohdat poistuvat. Tulostuksen aikana laitteen näyttö näyttää sekä suuttimen että alustan lämpötilat, tulostukseen käytetyn- ja jäljellä olevan ajan, sekä tulostuksen valmiusasteen.

PLA+ filamentille Curasta ei löytynyt valmiita tulostusprofiileja. Materiaali muistuttaa paljon tavallista PLA:ta, ja siksi tulostusprofiilit valmistettiin perus PLA:n arvoja muuttamalla. PLA+ on hieman PLA:ta kovempaa, ja siksi se vaatii myös kovemman tulostuslämmön. Valmistajan ilmoittama suuttimen suosituslämpötila on 205°C - 225°C, ja luotuun profiiliin lämmöksi valittiin 210 °C. Tulostusalustan lämpönä

ja tulostusnopeutena käytettiin Curan PLA:lle tarjoamia arvoja 60°C ja 50 mm/s. Myös muut parametrit pidettiin vakioina. Profiilit luotiin kerroskorkeuksille 0,28, 0,20, 0,16 ja 0,12 mm ja profiileilla tulostettiin samanlaiset koekappaleet kuin PETG:lläkin.

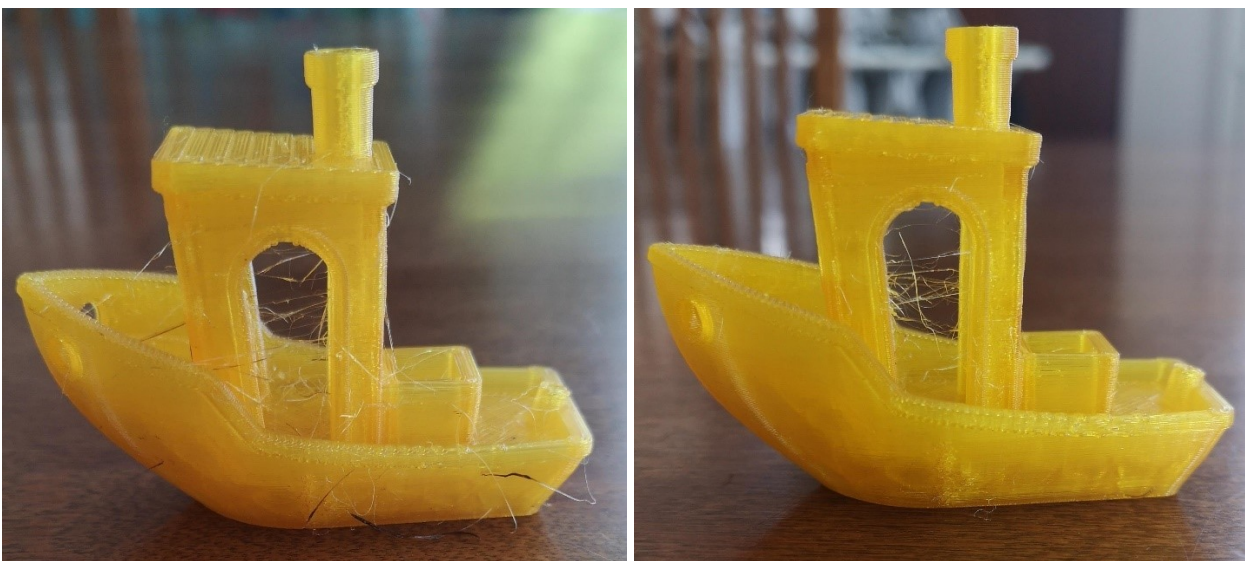
6.4 Tulokset

PETG kuutioiden tulostaminen sujui ilman ongelmia. Ainoa pinnanlaadun virhe havaittiin ensimmäisessä ja suurimmalla kerroskorkeudella tulostetussa kappaleessa, jossa yläosan kerrokset olivat siirtyneet kappaleen keskikorkeudella hieman eri kohtaan kappaleen alaosaan verrattuna. Muita pinnanlaadun ongelmia ei havaittu, pinnat olivat siistit ja tasaiset (KUVA 15). Kerroskorkeuksien vaihtelu kappaleiden välillä on havaittavissa helposti, mutta 0,20 mm:n ja 0,16 mm:n kerroksilla tulostetut kappaleet ovat laadultaan lähes identtiset. Kappaleen pienestä koosta huolimatta valmistusajoissa oli selvät erot. Heikoimmalla laadulla kappaleen tulostaminen kesti 31 minuuttia, ”std” ja ”dynamic”-laaduilla ajat kasvoivat 41 ja 44 minuuttiin. Parhaalla pinnanladulla ja pienimmällä kerroskorkeudella tulostetun kappaleen valmistaminen kesti jo 69 minuuttia. Ero on merkittävä ja se on huomioitava erityisesti suurempia kappaleita valmistettaessa. Käyttämisen tarpeellisuutta ja kannattavuutta on syytä harkita tulevan käyttökohteen mukaan ennen valmistamisen aloittamista.



KUVA 15. 0,28 mm:n ja 0,12 mm:n kerroskorkeudella tulostetut PETG kuutiot

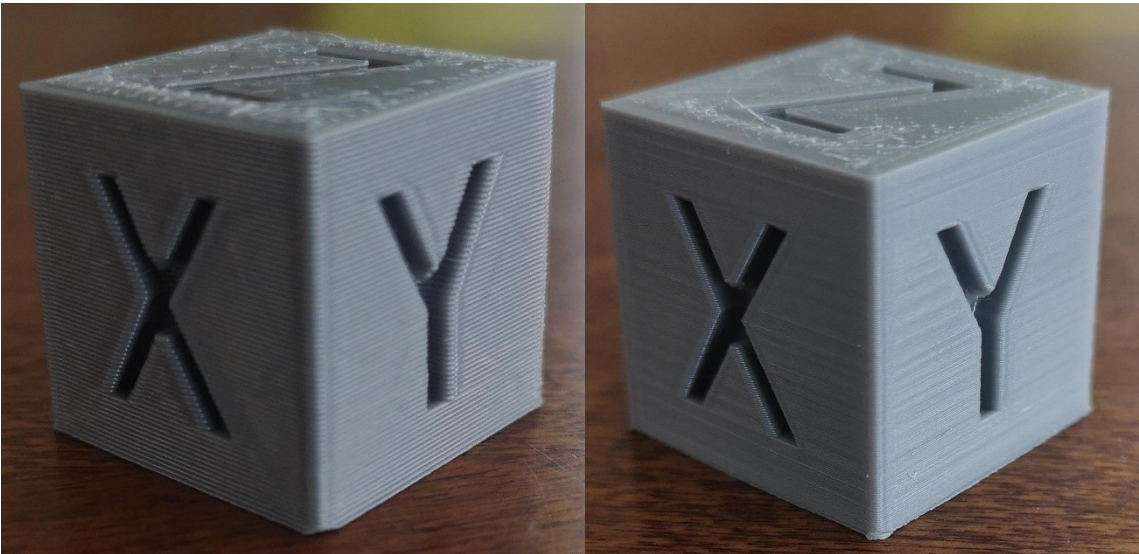
Myös ”benchyn” tulostaminen onnistui pinnanlaadun, kaarevien muotojen ja tyhjän päälle tulostamisen osalta hyvin. Ainoa tulosteessa havaittu virhe oli PETG:lle tyypillinen rihmamainen seitti, jota muodostui erityisesti tulosteen vasemmalle puolelle. Tulostin vetää syötettävää filamenttia takaisin päin tulosuuttimen liikkeessä tyhjien kohtien yli ja tulostusvirhe pyrittiin poistamaan säätämällä takaisinvedon pituutta ja nopeutta. Molempia parametrejä säädettiin useita kertoja ja lopputulosta saatiin parannettua huomattavasti, mutta ongelmaa ei saatu poistettua kokonaan. Parhain lopputulos saatiin 1 mm:n ja 25 mm/s parametreilla, jolloin rihman syntyminen väheni huomattavasti ja sitä muodostui enää ainoastaan kappaleen sisäosiin (KUVA 16).



KUVA 16. Valmistajan ja optimoiduilla parametreilla tulostettu ”benchyn”

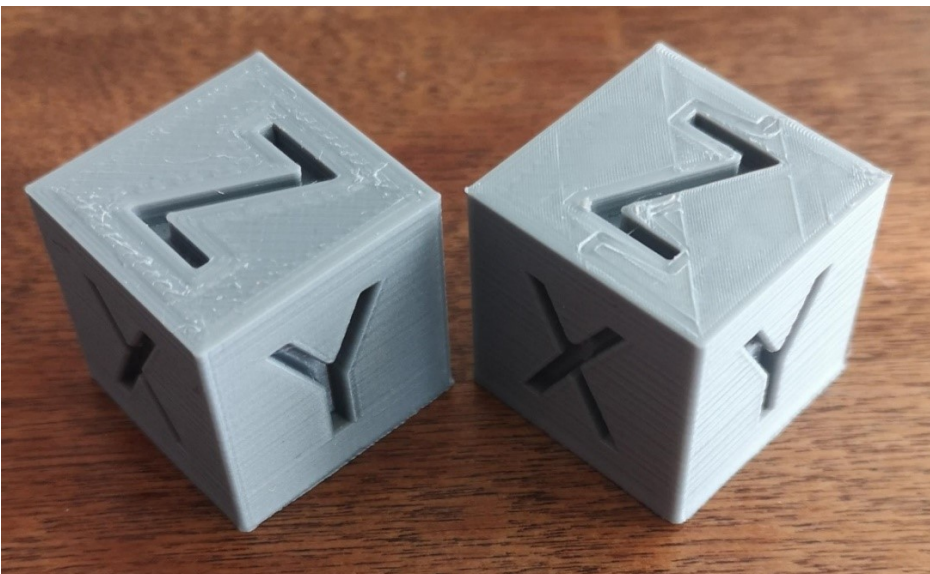
PLA+ filamentilla valmistetut kappaleet onnistuivat myös ilman suuria ongelmia (KUVA 17). Kappaleet tarttuivat hyvin alustaan ja niiden irrottaminen oli vaivatonta. Matalimmalla kerroskorkeudella tulostettu kappale on pinnaltaan erittäin siisti. Kuution pystysärmät ovat terävät ja pinnat virheettömät. 0,20 millimetrin kerroskorkeudella tulostetun kappaleen kerroksissa havaittiin muutamia harvempia kohtia, mutta muuten kappale oli onnistunut. Heikoimmalla laadulla tulostetussa kappaleessa on havaittavissa kaikkien terävien kulmien ulospäin työntymistä ja pyöristymistä. Muilta osin tämänkin tulosteen pinta vastasi tarkoitustaan hyvin. Kulmien pyöristymisongelmaa pyrittiin vähentämään säätämällä tulostuslämpöä ja nopeutta. Suuttimen lämpötilan muutos ei vaikuttanut asiaan, mutta kulmat saatiin terävämmäksi pudottamalla tulostusnopeutta 40 millimetriin sekunnissa. Koska ominaisuus poistui ohuemmilla

kerroskorkeuksilla, jätettiin alkuperäiseen tulostusprofiiliin nopeudeksi 50 mm/s. Tulostamisajat olivat kerroskorkeudesta riippuen 24, 30, 39 ja 60 minuuttia.



KUVA 17. 0,28 mm:n ja 0,12 mm:n kerroskorkeudella tulostetut PLA+ kuutiot

Kuution yläpintaan testattiin vielä Curan ”Ironing” ja ”Monotonic ironing order” ominaisuuksia. Ominaisuudet lisäävät kappaleeseen ylimääräisen, yhteen suuntaan- ja vähemmällä materiaalilla tulostetun kerroksen. Pinta tasoittui näitä ominaisuuksia käyttämällä huomattavasti (KUVA 18).



KUVA 18. ”Ironing” ominaisuuden vaikutus kappaleen ylimpään kerrokseen

Myös PLA+ ”bentchy” valmistettiin ensin 0,20 mm:n kerroskorkeutta käyttäen. Pinnanlaatu oli tässäkin kappaleessa hyvä ja tulostus onnistui ilman ongelmia. Ainoaksi virheeksi todettiin kappaleen vasemmassa sivussa näkyvä kerrosten saumakohta. Toinen tuloste valmistettiin 0,16 mm:n kerroskorkeudella ja lisäksi tulostusprofiiliin lisättiin edellä mainitut ”Ironing” ja ”Monotonic ironing order” ominaisuudet. Kerrosten saumakohta pyrittiin häivyttämään siirtämällä se kappaleen terävimpään kulmaan ja piilottamalla se sisäpuolelle Curan parametrien ”Z-Seam Alignment” ja ”Seam Corner Preference” avulla. Saumakohtaa ei saatu kokonaan näkymättömäksi, mutta tulos oli parempi joka tapauksessa. ”Ironing” ominaisuuden hyödyt jäivät tässä kappaleessa pieniksi (KUVA 19).



KUVA19. PLA+ filamentista valmistetut ”bentchy”

Viimeisenä kappaleena tulostettiin vielä osa hyötykäyttöön. Kyseessä oli BMW:n vetokoukun mekaniikkiin sopiva hammaspyörä. Mekanismiin avulla koukku voidaan taittaa sähköisesti auton puskurin alle piiloon ja takaisin käyttöasentoon tarvittaessa. Alkuperäiset hammaspyörät ovat myös muovia ja pyörien rikkoontuminen on varsin yleinen vika. Tilanne on haasteellinen siksi, että pyöriä ei saa varaosina enää lainkaan ja niiden rikkoontuessa koko vetokoukusta tulee käyttökelvoton. Hammaspyörän valmis piirustus ladattiin GrabCad-palvelusta, ja osa tulostettiin 0,12 millimetrin profiililla PETG:stä. Täytöksi määriteltiin 50 %, ja muut parametrit pidettiin vakioina. Tulostus onnistui hyvin, osan pinnanlaatu oli todella hyvä ja rikki ollut vetokoukku saatiin toimimaan.

Tulostin oli miellyttävän hiljainen käytön aikana. Sen esilämmitys ja tulostusvalmiuteen saattaminen oli nopeaa ja laitteen valikko oli yksinkertainen ja helppokäyttöinen. Myös tulostusalustan puhdistaminen oli äärettömän kätevää magneettikiinnityksen mahdollistaman nopean irrotuksen vuoksi. Tartunta-aineena käytetty liima todettiin myös hyväksi. Kappaleet pysyivät hyvin kiinni ja samalla liima helpotti kappaleiden irrottamista alustasta. PETG voi tarttua alustaan tiukasti, mutta liimaa käytettäessä ei havaittu mitään ongelmia asian suhteen. Liima on vesipestävä, alustan puhdistaminen oli tämänkin suhteen helppoa ja vaivatonta. Myös molemmat filamentit olivat miellyttäviä käyttää hajuttomuutensa ansiosta.

7 POHDINTA

Työn tavoitteina olivat yleisimpiin 3D-tulostusmenetelmiin ja materiaaleihin perehtyminen, uuden tulostimen käyttökuntoon saattaminen, viipalointiohjelman asentaminen sekä koekappaleiden tulostaminen ja parametrien optimointi.

Mielestäni pääsin työssäni asetettuihin tavoitteisiin hyvin. Aihe on todella laaja, mutta työn rajaaminen yleisimpiin valmistusmenetelmiin ja materiaaleihin onnistui; työhön saatiin tiivistettyä alan perusteet ja se vastaa yleisellä tasolla kysymykseen mitä 3D-tulostaminen on. Ala on kovassa kasvussa, tämän huomasi erityisesti lähteitä tutkiessa. Internetissä on valtavasti tietoa alaan liittyen, ja parhaimpien sekä luotettavien lähteiden valitseminen kaupallisten sivustojen seasta oli välillä haasteellista.

Työn mielenkiintoisimmaksi osaksi koin tulostimen käyttöönottoon liittyneet käytännön työt. Laitteen kokoonpano ja käyttöönotto, viipalointiohjelman asennus sekä koetulosteiden valmistus sujuivat kaikki ilman suuria ongelmia. Ainoa ongelma koko prosessissa koettiin viipalointiohjelman asennuksen yhteydessä. Käyttöön otettu tulostin on malliltaan niin uusi, että sen parametrejä ei löydetty viipalointiohjelmasta. Toinen haaste työn käytännön osassa olivat parametrien määrä ja niiden rajattomat säätömahdollisuudet. Säätöjä olisi voinut muuttaa ja koetulosteiden valmistamista jatkaa loputtomiin, mutta aikataulun puitteissa tähän ei ollut mahdollisuutta. Itse laitteen kokoonpano oli helppo ja nopea toimenpide. PETG filamentin käyttöönottamista helpottivat valmistajan valmiit parametrit, mutta PLA+ langalle parametrit jouduttiin säätämään itse. Tulostetuista kappaleista ilmeni myös konkreettisesti kerroskorkeuden vaikutus pinnanlaatuun. Kokonaisen käyttöönottoprosessin läpikäynti laitteen kokoonpanosta valmiisiin tulosteisiin myös opetti paljon. Itse laite vaikuttaa kaikilta osin laadukkaalta ja se on helppokäyttöinen.

Aiheen valintaan ja työn lopputulokseen olen tyytyväinen. Työ yhdisti sopivasti teoriaa ja käytäntöä, ja mielenkiinto alaa kohtaan kasvoi entisestään. Kiitokset vielä työn ohjaajille Jari Kaarelalle, Sakari Pieskälle ja Pekka Haapalalle.

LÄHTEET

3DEO. Saatavissa: <https://www.3deo.co/manufacturing/intro-to-metal-3d-printing-processes-powder-bed-fusion-dmls-sls-slm-lmf-dmp-ebm/>. Viitattu 03.02.2022.

3Dsourced. 2021a. The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2022. Saatavissa: <https://www.3dsourced.com/guides/history-of-3d-printing/>. Viitattu 13.01.2022.

3Dsourced. 2021b. PLA Filament: The Complete Guide (& Best PLA 3D Printers). Saatavissa: <https://www.3dsourced.com/3d-printer-materials/pla-filament-guide/>. Viitattu 08.01.2022.

3Dsourced. 2022c. ABS Filament: The Complete 3D Printing Guide. Saatavissa: <https://www.3dsourced.com/3d-printer-materials/abs-filament/>. Viitattu 08.01.2022.

3Dsourced. 2021d. ASA Filament: The Complete 3D Printing Guide. Saatavissa: <https://www.3dsourced.com/3d-printer-materials/asa-filament-complete-guide/>. Viitattu 08.01.2022.

3Dsourced. 2021e. The Complete PETG Filament 3D Printing Guide. Saatavissa: <https://www.3dsourced.com/3d-printer-materials/petg-filament/>. Viitattu 08.01.2022.

3Dsourced. 2021f. The Complete TPU Filament 3D Printing Guide. Saatavissa: <https://www.3dsourced.com/3d-printer-materials/tpu-filament-3d-printing/>. Viitattu 08.01.2022.

Alexandrea, P. 2019a. The Complete Guide to Material Jetting (PolyJet) in 3D Printing. Saatavissa: <https://www.3dnatives.com/en/polyjet100420174/>. Viitattu 30.01.2022.

Alexandrea, P. 2019b. The Complete Guide to Binder Jetting in 3D printing. Saatavissa: <https://www.3dnatives.com/en/powder-binding100420174/>. Viitattu 31.01.2022.

Alonen, A. 2021a. 3D-tulostuksen perusteet. Luentomuistiinpanot. Savonia ammattikorkeakoulu.

Alonen, A. 2021b. 3D-tulostuksen tilannekatsaus – Wohlers Report 2021. Saatavissa: <https://blogi.savonia.fi/3dtulostus/2021/04/30/3d-tulostuksen-tilannekatsaus-wohlers-2021/>. Viitattu 09.02.2022.

Alonen, A., Alonen, L., ja Hietikko, E. 2016. Lisäävän valmistuksen perusteet. 1.painos. Savonia-ammattikorkeakoulu, ALVO-hanke.

Armstrong, C. How to design parts for SLA 3D printing. Saatavissa: <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sla-3d-printing/>. Viitattu 31.01.2022.

Basit, A., Boyd, B., Gaisford, S., Goyanes, A., Jannin, V., Vithani, K. 2018. An Overview of 3D Printing Technologies for Soft Materials and Potential Opportunities for Lipid-based Drug Delivery Systems. Saatavissa: https://www.researchgate.net/figure/Graphical-representation-of-the-different-3DP-technologies-DOD-Drop-on-demand-MJ_fig1_328794890. Viitattu 31.01.2022.

BCN3D. PLA. Saatavissa: <https://www.bcn3d.com/product/pla-bcn3d-filaments/>. Viitattu 08.01.2022.

Carlota, V. 2020. All you need to know about TPU for 3D printing. Saatavissa: <https://www.3dnatives.com/en/tpu-3d-printing-040620204/#!> Viitattu 22.02.2022.

Clarke, T., Hosseini, A., Kozutsky, S., Lacki, M., Shah, J. & Sniner, B. 2019. Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/334546324_Large-scale_3D_printers_for_additive_manufacturing_design_considerations_and_challenges. Viitattu 30.01.2022.

Engineeringproductdesign. a. Saatavissa: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>. Viitattu 10.01.2022.

Engineeringproductdesign. b. Saatavissa: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/powder-bed-fusion/>. Viitattu 10.01.2022.

Engineeringproductdesign. c. Saatavissa: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/direct-energy-deposition/>. Viitattu 10.01.2022.

Johansson, K. 2020. Materiaaliesittelyssä 3DXTech 3DXMAX ASA. Saatavissa: <https://www.3d-tulostus.fi/uutiset/Materiaaliesittelyssa-3DXTech-3DXMAX-ASA>. Viitattu 08.01.2022.

Manufacturing Guide Sweden AB. a. Saatavissa: <https://www.manufacturingguide.com/en/laminated-object-manufacturing-lom>. Viitattu 10.01.2022.

Manufacturing Guide Sweden AB. b. Saatavissa: <https://www.manufacturingguide.com/en/laser-engineered-net-shaping-lens-0>. Viitattu 10.01.2022.

Raise3D. Introducing the Pro3 Series. Saatavissa: <https://www.raise3d.com/pro3-series/>. Viitattu 22.02.2022.

Roberson, D. What is 3D printing? Saatavissa: <https://ultimaker.com/learn/what-is-3d-printing>. Viitattu 19.01.2022.

Rogers, T. 2015a. Everything You Need to Know About Polylactic Acid (PLA). Saatavissa: <https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes>. Viitattu 08.01.2022.

Rogers, T. 2015b. Everything You Need to Know About ABS Plastic. Saatavissa: <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-abs-plastic>. Viitattu 08.01.2022.

Simplify3D. PVA. Saatavissa: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pva/>. Viitattu 08.01.2022.

Wohlers Report 2021. Saatavissa: <https://blogi.savonia.fi/3dtulostus/2021/04/30/3d-tulostuksen-tilannekatsaus-wohlers-2021/>. Viitattu 09.02.2022.

Yasojima. 3D Printing. Saatavissa: <https://yasojima-global.com/3dservice/print.html>. Viitattu 20.03.2022.

Ender-3 S1

“Sprite”, Bringing Your Ideas to Life

“Sprite” Direct
Dual-gear Extruder

CR Touch Automatic
Bed Leveling

High-precision
Dual Z-axis



Enhanced Strength More Reliability



“Sprite” Direct Dual-Gear Extruder

Compatible with
various filaments



CR Touch Automatic Bed Leveling

Easier leveling



32-bit Silent Mainboard

Silent printing



Z-axis Dual-Screw

Safe and stable



Supporting a Variety of Filaments

PLA/TPU/PETG/ABS



Quick Assembling

96% pre-installed



PC Spring Steel Print Sheet

Good adhesion and easy
to remove printed models



4.3-inch LCD Screen

Brand-new simple
UI interface



Practical Preset Interface

Strong expandability

Product Parameters

Modeling technology FDM	Printer size 487*453*622mm
Build size 220*220*270mm	Package size 540*510*260mm
Supported filament PLA/TPU/PETG/ABS	Printing layer thickness 0.05–0.35mm
Printing speed 150mm/s at the maximum	Nozzle diameter 0.4mm
Printing precision ±0.1mm	Maximum nozzle temperature 260°C
Number of nozzles 1	Maximum heatbed temperature 100°C
Filament diameter 1.75mm	Package gross weight 11.2kg
Machine net weight 9.1kg	Extruder gear ratio 1:3.5
Type of extruder “Sprite” Direct Extruder	Printing platform PC Spring steel sheet
Automatic bed leveling CR Touch	Mainboard 32-bit silent mainboard
Screen knob color screen	Resume printing supported
Filament sensor supported	Printing method Type-C USB/SD card
Rated voltage 115/230V	Supported language English/Chinese
Rated power 350W	Supported file format STL/OBJ/AMF
Slicing software Creality Slicer/Cura/Repetier-Host/Simplify3D	