

Kai Koskela

POLYMEERIEIN YHTÄAIKAINEN MULTI- MATERIAALI 3D-TULOOSTAMINEN

Tekniikan ja luonnontieteen tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Kai Koskela: Polymeerien yhtäaikainen multimateriaali 3D-tulostaminen (engl. Simultaneous Multimaterial 3D-printing of Polymers)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2022

Multimateriaali 3D-tulostaminen on yksi 3D-tulostustekniikan kehityssuunta, joka mahdollistaa yhden tai useamman materiaalin samanaikaista tulostamista. Työn tarkoitus on perehdyttää lukija polymeerien multimateriaali 3D-tulostuksen nykyiseen tilanteeseen. Kirjallisuustutkimusta suoritettiin seuraavilla kysymyksillä: Millaisia tekniikoita on kehitetty polymeerien multimateriaali 3D-tulostamiseksi, mitä tekniikoita käytetään polymeerien multimateriaali 3D-tulostamisessa, mitä työkaluja tarvitaan multimateriaali 3D-tulostukseen sekä, millainen tulevaisuus multimateriaali 3D-tulostamisella on. Työ on rajoitettu tulostusmenetelmiin, joilla voidaan tulostaa kahta tai useampaa materiaali samanaikaisesti. Tiedon suppeuden vuoksi, tietoa kerättiin tieteellisten artikkeleiden lisäksi valmistajien nettisivuilta. Kirjallisuusselvityksen lisäksi haastateltiin Tampereen Ammattikorkeakoulun multimateriaali 3D-tulostimesta vastaa laboratorioinsinööriä.

3D-tulostamisen (engl. Additive Manufacturing) perusajatus on kappaleiden luominen sitten, että materiaalia lisätään kerros kerrallaan, kunnes kappale on valmis. Polymeerien multimateriaali 3D-tulostamistekniikat voidaan luokitella kahteen menetelmään: materiaalin pursotus sekä materiaalin ruiskutus. Materiaalia pursottavissa menetelmissä kiinteää kuitumaista termoplastista materiaalia lämmitetään sulaksi ja puristetaan suuttimen läpi. Multimateriaalisuus saavutetaan tässä tekniikassa usean suuttimen käytöllä, jolloin voidaan tulostaa samanaikaisesti kahta tai useampaa materiaalia, riippuen ainoastaan suuttimien määrästä. Materiaalia ruiskuttavissa menetelmissä nestemäistä fotopolymeeriä ruiskutetaan ohut kerros, minkä jälkeen kerros kovetetaan UV valolla. Useat suuttimet ovat ominaista tekniikalle, joten multimateriaalisuus saavutetaan jo lisäämällä säiliöihin useampaa materiaalia.

Ohjelmistopuolella huomattiin, että useaa materiaalia sisältävien 3D-kappaleiden mallintamisessa syntyi ongelmia tiedoston tallentamisessa, sillä STL-tiedostoformaattilla voidaan tallentaa kappaleeseen vain yhtä materiaalia. Tämä on johtanut kahden kilpailevan standardin syntyyn: AMF sekä 3MF. Molemmissa voidaan määrittellä useampaa materiaalia kappaleeseen. Toista ratkaisua on haettu Slicer-ohjelmista, joiden tarkoitus on muuttaa 3D-kappale G-koodiksi. Slicer-ohjelmiin on lisätty toiminnallisuuksia, joilla voidaan määrittää kappaleeseen useampaa materiaalia ennen sen siirtämistä 3D-tulostimeen.

Työssä myös perehdyttiin seitsemään tapaukseen, joissa multimateriaali 3D-tulostusta käytettiin. Tapauksista huomattiin, että multimateriaali 3D-tulostimia käytetään lähtökohtaisesti lääketieteessä sekä yritysten tuotekehityksessä. Näistä tapauksista tehtiin päätelmä, että multimateriaali 3D-tulostaminen on vielä hyvin varhaisessa vaiheessa kehityksessä, minkä takia kaikki eivät vielä tiedä, mihin tätä tekniikkaa edes voisi käyttää. Tämän lisäksi huomattiin, että multimateriaali hyödyt piilevät usein sen mahdollisuudessa tulostaa veteen liukenevia tukirakenteita, mikä mahdollistaa kompleksienkin kappaleiden kehittämisen.

Avainsanat: Multimateriaali, 3D-tulostaminen, Materiaalin ruiskutus, Polymeerit, Lisäävä valmistus, Polymeerien 3D-tulostaminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. MULTIMATERIAALI TULOSTAMISEN KÄYTÖSSÄ OLEVAT TEKNIIKAT	3
2.1 Materiaalin pursotus.....	3
2.2 Materiaalin ruiskutus	5
3. MULTIMATERIAALI SUUNNITTELUN ERITYISPIIRTEET	7
3.1 Ohjelmisto.....	7
3.1.1 Tiedostoformaatit	9
3.1.2 Tulostusohjelmat.....	10
3.2 Materiaali	10
4. MULTIMATERIAALI TULOSTIMET HANKINTANA.....	12
5. TAPAUKSIA MULTIMATERIAALI 3D-TULOSTIMEN KÄYTÖSTÄ.....	15
6. POLYMEERIEEN MULTIMATERIAALI 3D-TULOSTAMISEN TULEVAISUUS	18
7. YHTEENVETO.....	20
LÄHTEET	22

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3MF	engl. 3D Manufacturing Format, 3D-tulostus tiedostoformaatti
ABS	Akryyliniiriibutadieenistyreeni, Termoplastinen polymeeri
ALV	Arvon lisä vero
AMF	engl. Additive Manufacturing Format, 3D-tulostus tiedostoformaatti
ASTM	Kansainvälinen järjestö, joka toimii standardien kanssa
CAD	engl. Computer aided design, Tietokone avusteinen suunnittelu
IGES	engl. Initial Graphics Exchange Specification, 3D-kappaleiden tallentamiseen käytetty tiedostoformaatti
FDM	engl. Fused Deposition modeling, Materiaalin pursotusnimike
FFF	engl. Fused Filament Fabrication, Materiaalin pursotusnimike
MMU2S	engl. Multi Material Upgrade 2S, multimateriaali päivitys Prusan 3D-tulostimiin
NURBS	engl. Non-uniform rational basis spine, 3D-kappaleiden tallentamiseen käytetty tiedostoformaatti
OBJ	3D-kappaleiden tallentamiseen käytetty tiedostoformaatti
PLA	Polylaktidi, Termoplastinen polymeeri
STEP	3D-kappaleiden tallentamiseen käytetty tiedostoformaatti
STL	3D-kappaleiden tallentamiseen käytetty tiedostoformaatti
UV	Ultravioletti
VRML	engl. Virtual Reality Modeling Language, 3D-kappaleiden tallentamiseen käytetty tiedostoformaatti

1. JOHDANTO

Vaikka 3D-tulostaminen ei ole ollut kotitalouksien käytössä kuin vasta lähiaikoina, 3D-tulostusteknologiaa on käytetty jo 1980-luvulta asti (Awari et al. 2021, s. 1). Tavallisiin tuotantomuotoihin, kuten koneistukseen tai valamiseen, verrattaessa 3D-tulostaminen on ollut kuitenkin huomattavasti kalliimpaa ja hitaampaa, minkä takia tämän teknologian kehitys on ollut hidasta. Mutta nyt 40 vuotta ensimmäisten patenttien jättämisten jälkeen, 3D-tulostusteknologia on kehittynyt nopeasti yritysten huomattessa 3D-tulostamisen tuomista mahdollisuuksista sekä yhteiskunnallisesta paineesta vähentää hukkaan menevää materiaalia.

3D-tulostus (engl. *Additive manufacturing*, AM) perustuu kappaleiden rakentamiseen kerros kerrallaan, kunnes kappale on valmis. Näitä kappaleita mallinnetaan CAD-ohjelmilla ja tallennetaan STL-tiedostoformaattiin. Tämä STL-tiedostoformaatti sitten viedään 3D-tulostimen omaan ohjelmaan, joka puolestaan muuttaa kappaleen sellaiseen muotoon, jota 3D-tulostin pystyy lukemaan. Tässä kuitenkin tulee jo ensimmäinen haaste, kun mietitään monen materiaalin 3D-tulostusta (jatkossa multimateriaali 3D-tulostus): STL-tiedostoformaatti ei anna käyttäjän valita mallinnetun kappaleen materiaaleja.

Opinnäytetyön tavoite on esitellä polymeerien multimateriaali 3D-tulostamisen nykyistä tilannetta, multimateriaali 3D-tulostuksen haasteita sekä mahdollisuuksia ja multimateriaali 3D-tulostuksen tulevaisuutta. Nykytilanteen tarkastelua sekä haasteita ja mahdollisuuksia tehdään kirjallisuusselvityksenä, jonka pohjalta tehdään johtopäätöksiä tulevaisuudesta. Tämän opinnäytetyön keskeisimpiä kysymyksiä ovatkin seuraavat:

- Mitä tekniikoita käytetään polymeerien multimateriaali 3D-tulostamisessa?
- Minkälaisia työkaluja multimateriaali 3D-tulostaminen vaatii suunnittelijalta?
- Miltä näyttää multimateriaali 3D-tulostamisen tulevaisuus?

Koska multimateriaali 3D-tulostimella voidaan tulostaa monta eri materiaalia, sitä on sovellettu metalli-, keraami- ja polymeeripohjaisiin tulostusmenetelmiin. Tässä työssä kuitenkin rajoitetaan materiaalin tarkastelu polymeeripohjaisiin multimateriaali 3D-tulostusmenetelmiin. Tarkastelussa tutkitaan kirjallisuudesta sekä valmistajien sivuilta tekniikoita, joita tällä hetkellä käytetään multimateriaali 3D-tulostamisessa. Tarkastelun ulko-

puolelle jäävät ratkaisut, joita käytetään lähtökohtaisesti tieteelliseen tutkimukseen. Tämän lisäksi tarkastellaan multimateriaali 3D-tulostamisessa käytettyjä materiaaleja sekä multimateriaalitulostamisen tuomia lisähaasteita materiaalien mekaanisten ominaisuuksien kannalta.

Tämän materiaalirajauksen lisäksi tuodaan myös suunnittelijan näkökulmaa multimateriaali 3D-tulostukseen. Kuten aiemmin on mainittu, nykyään yleisessä käytössä olevat STL-tiedostoformaattit eivät anna suunnittelijalle mahdollisuutta valita kappaleen materiaaleja. Tästä syystä on kehitetty formaatteja, kuten AMF (ASTM F42 & ISO/TC 261) ja 3MF (3MF Consortium), joissa molemmissa voidaan säätää parametreja, joita vaaditaan multimateriaali 3D-tulostukseen. (Chua et al. 2017, s. 81).

Työn rakenne mukailee keskeisimpiä kysymyksiä. Alkuun esitellään nykyään markkinoilla saatavilla olevia multimateriaali 3D-tulostamiseen käytettyjä tekniikoita sekä teknologiaa, jonka pohjalle tekniikat on rakennettu. Tämän jälkeen esitellään suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä, kuten ohjelmistovalintoja, tiedostoformaatteja sekä tulostusmenetelmien materiaaliin vaikuttavia tekijöitä. Kolmanneksi tarkastellaan, mitä hyötyjä ja haittoja eri polymeerien multimateriaali 3D-tulostuksessa käytetään sekä niihin liittyviä kustannuksia. Neljänneksi esitellään tapauksia multimateriaali 3D-tulostimien käytöstä. Sitten pohditaan, millainen tulevaisuus multimateriaali 3D-tulostamisella voisi olla. Lopuksi tehdään opinnäytetyöstä yhteenveto, jossa pohditaan, miten opinnäytetyö on onnistunut ja mitä voisi tarkastella tämän jälkeen.

2. MULTIMATERIAALITULOSTAMISEN TEKNIKKAT

Ennen kuin tarkastellaan multimateriaali 3D-tulostimien toimintaa, täytyy ensin selittää, miten 3D-tulostimet yleisesti toimivat. 3D-tulostaminen perustuu kappaleiden luomiseen kerroksittain, mihin on kehitetty monenlaista tekniikkaa, jotka jaetaan seuraaviin kategorioihin:

- materiaalin pursotus (*engl. Material extrusion*)
- materiaalin ruiskutus (*engl. Material Jetting*)
- sidosaineruiskutus (*engl. Binder Jetting*)
- laminointi (*engl. Sheet lamination*)
- nesteen fotopolymerisointi (*eng. VAT photopolymerization*)
- jauhepetimentelmät (*engl. Powder bed fusion*)
- suorakerrostusmenetelmät (*engl. Directed Energy deposition*) (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017, Savonian mukaan).

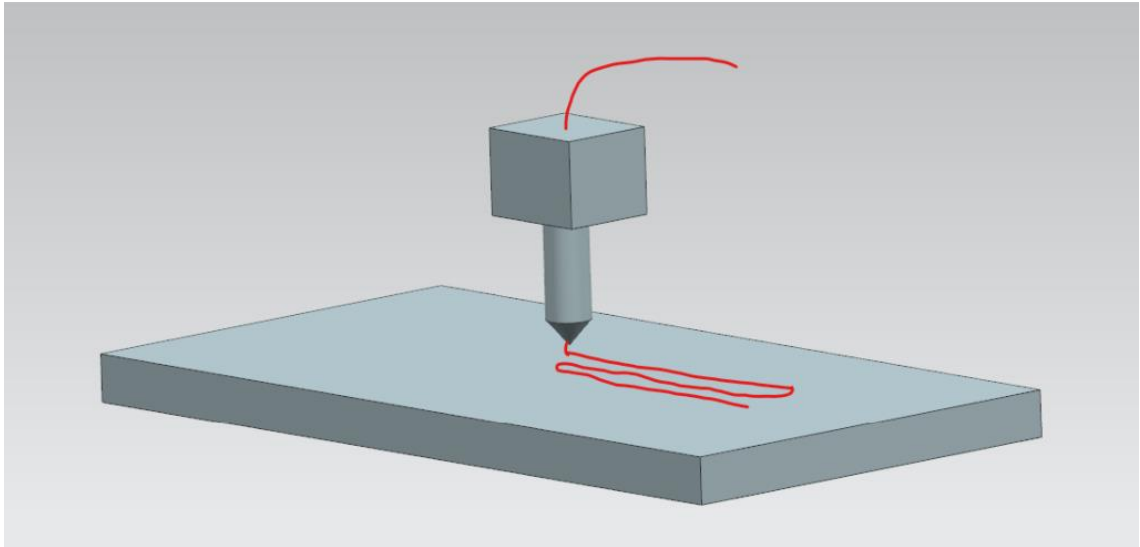
Näistä menetelmistä on, suorakerrostusmenetelmiä lukuun ottamatta, sovellettu polymeerien multimateriaali 3D-tulostukseen. Kun pursotus- sekä nesteen fotopolymerisointimenetelmät usein yhdistävät polymeerejä kuitujen kanssa parempien mekaanisten ominaisuuksien vuoksi, jauhepeti- sekä materiaalin ruiskutusmenetelmät usein käyttävät tulostukseen tarkoitettua materiaalin lisäksi tukimateriaalia. (Rafiee et al. 2020)

Tässä työssä multimateriaalitulostin määritellään tulostimena, jolla voidaan tulostaa yhtäaikaaisesti kahta tai useampaa materiaalia samaan aikaan tai voidaan vaihtaa käytettävää materiaalia nopeasti ilman käyttäjältä vaadittavia toimenpiteitä. Esimerkiksi Prusa i3 3D-tulostinta ei lasketa multimateriaalitulostimeksi, vaikka siinä on mahdollisuus muuttaa materiaalia kesken tulostusta.

2.1 Materiaalin pursotus

Nooranin (2017, s. 56) mukaan tyypillisesti materiaalia pursottavista tulostimista löytyvät pursotin, pursotusmekanismi sekä kehys. Pursotin itsessään koostuu suuttimesta sekä lämmittimestä, jonka tarkoitus on lämmittää materiaali puolisoluaan tilaan ennen varsinaista pursotusta. Pursotusmekanismin tarkoitus on sitten tuoda materiaalia rullalta pursottimeen. Viimeisenä kehys puolestaan antaa pursottimelle mahdollisuuden liikkua X-,

Y- ja Z-tasoissa, mikä antaa tulostimelle tämän kolmannen ulottuvuuden. (Noorani 2017, s. 56) Tämä havainnollistetaan kuvassa 1.



Kuva 1. Havainnollistus materiaalin pursotustekniikalle

Multimateriaali 3D-tulostimet pohjaavat kaikki tähän periaatteeseen. Eroavuuksia kuitenkin tulee siinä, kuinka multimateriaalisuus implementoidaan 3D-tulostamiseen. Implementointimenetelmät voidaan jakaa kahteen alakategoriaan: materiaalia sulattaviin menetelmiin sekä materiaalia pursottaviin menetelmiin ilman sulatusta. (Rafiee et al. 2020) Polymeereissä kuitenkin ei ole kirjoitushetkellä vielä kehitetty materiaalia sulattamattomia tekniikoita, joten niistä ei tässä työssä kerrota tarkemmin.

Materiaalia sulattavalla menetelmällä on monta nimitystä, mutta yleisimmässä käytössä olevat nimet ovat Fused Filament Fabrication (FFF) sekä Fused Deposition Modelling (FDM). Kahden nimityksen käyttäminen johtuu siitä, että FDM-nimitys on Stratasys -yhtiön tavaramerkki, joten RepRap kehitti tekijänoikeudettoman nimityksen FFF. (Jones et al. 2011).

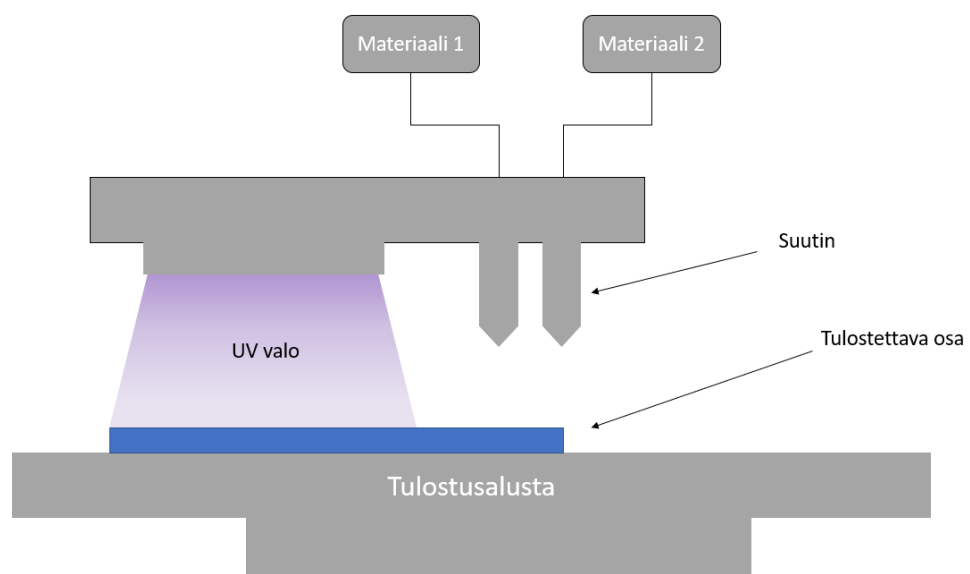
Itse materiaalia sulattavalla menetelmällä on monta tekniikkaa multimateriaali 3D-tulostukseen. Tyypillisesti, jotta monen materiaalin käyttö yhteen kappaleeseen onnistuu, käytetään pursottavissa multimateriaalitulostimissa kahta tai useampaa suutinta. Tätä tekniikkaa eivät kuitenkaan käytä kaikki, vaan esimerkiksi Mosaic sekä Prusa ovat luoneet erillisen laitteen, jonka avulla filamenttia voidaan helposti vaihtaa yhden pursottimen käytössä. Näitä ovat esimerkiksi Prusa MMU2S sekä Mosaic Palette (Mosaicmfg 2022; Prusa3d 2022)

Multimateriaalitulostuksessa monen suuttimen käyttö on kuitenkin huomattavasti yleisempi tekniikka kuin yhden suuttimen käyttö. Yhdessä monisuutinmenetelmässä käytetään yhtä pursotinta, jossa on kaksi suutinta. Tämä mahdollistaa itse kappaleeseen käytettävän materiaalin sekä tukimateriaalin tulostamisen samaan aikaan, mikä nopeuttaa tulostusprosessia. Tukimateriaali voi olla kappaleeseen käytetyn materiaalin kanssa samaa tai mahdollisesti eri, tyypillisesti vesiliukoista materiaalia. Vesiliukoisuus antaa mahdollisuuden tulostaa mekaanisesti komplekseja kappaleita. (Zortrax 2022; Zmorph 2022; Raise3D 2022)

Toisessa menetelmässä suuttimet ja samalla pursottimet voivat toimia toisistaan riippumattomasti tai yhdessä, mikä on aiemmasta menetelmästä seuraava askel. Tämä mahdollistaa kahden kappaleen tulostamisen samaan aikaan aiemman menetelmän hyötyjen lisäksi. (Flashforge 2022; Craftbot 2022; BCN3D 2022; Makergear 2022; Sindoh 2022)

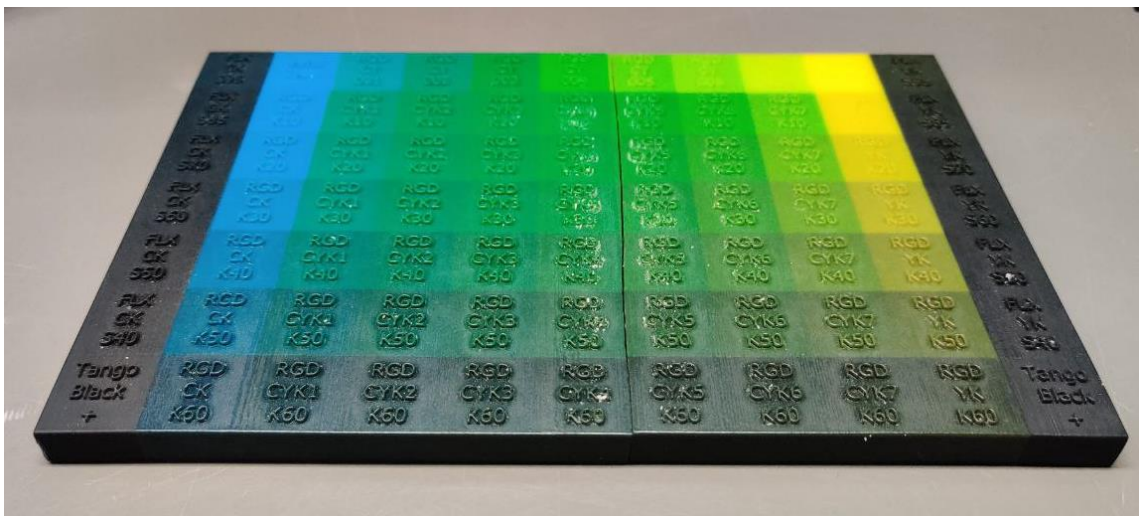
2.2 Materiaalin ruiskutus

Materiaalin ruiskutustekniikat itsessään ovat helposti muokattavissa multimateriaalitulostukseen. Materiaalin ruiskutustekniikassa materiaalia ruiskutetaan suuttimesta kerros materiaalia, minkä jälkeen sen kovetetaan UV valolla, kuten voidaan nähdä kuvassa 2 (Zhang & Jung 2018, s. 8–9). Materiaali on siis nestemäisessä muodossa, kun sitä ruiskutetaan, minkä jälkeen se kovetetaan UV valolla.



Kuva 2. Materiaalin ruiskutuksesta kuvitus kuva

Multimateriaalisuus saavutetaan tässäkin tekniikassa monen suuttimen käytöllä, missä suuttimista tuleva materiaali voivat olla keskenään erilaisia. Kuten materiaalia pursottavissa tekniikoissa, yhdestä suuttimesta tyypillisesti ruiskutetaan tukimateriaalia, joka voidaan helposti poistaa, ja muista suuttimista tulee itse kappaleeseen tuleva materiaali. Nestemäisen materiaalin käyttö kuitenkin mahdollistaa materiaalien sekoittamista keskenään. Kuvassa 3 voidaankin nähdä esimerkki monen materiaalin käytöstä yhdessä tulostuksessa, missä reunoille on tehty musta kumimainen osuus Stratasysin Tango -materiaalista ja keskelle tehty sekoitteita Stratasysin Vero -materiaalin sinisestä sekä keltaisesta.



Kuva 3. *Objet350 tulostimella tehty mallikappale Tampereen ammattikorkeakoulussa*

Materiaalin ruiskutusmenetelmässä tulee kuitenkin huomioida materiaalin poistaminen laitteesta kappaleen valmistuttua. Toisin kuin materiaalia pursottavissa menetelmissä, ruiskutukseen käytettävä materiaali täytyy olla neste. Mikäli nestettä ei pesuohjelmalla poisteta, voi se jäädä tukkimaan koko laitteen ja täten estämään sitä toimimasta myöhemmin. Pesuohjelma tyypillisesti tehdään aina materiaalia vaihtaessa tai, kun tiedetään, että tulostin tulee seisomaan hetken aikaa (J. Katajisto, Haastattelu 11.02.2022).

3. MULTIMATERIAALI SUUNNITTELUN ERITYISPIIRTEET

Tuotesuunnittelu – käsite, joka voi tarkoittaa tekoa, jossa tuotetta suunnitellaan, oli se sitten lentokone tai posliinilautanen, tai voi tarkoittaa tuotteen suunnittelua niin, että se olisi mahdollisimman haluttava (Rodgers & Milton 2011, s. 6). Tuotesuunnitteluun kuuluu viisi suurta osa-aluetta:

- Analyysi
- Syntesointi
- Simulointi
- Evaluointi
- Päätäminen (van Boeijen et al. 2014, s. 20).

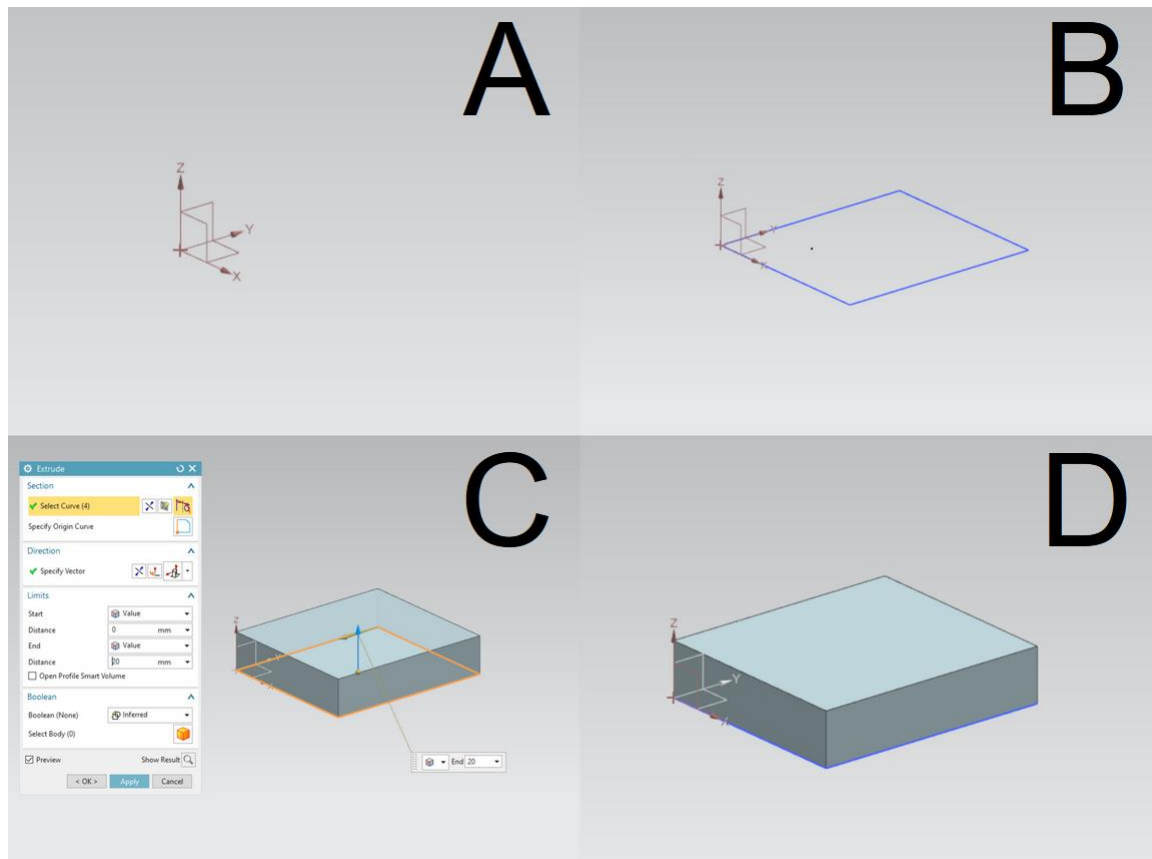
3D-tulostusta käytetään useimmiten tuotesuunnittelun simulointivaiheessa, mitä opinäytetyössä myöhemmin. Simulointivaiheessa pyritään luomaan ajatuksesta oikea kappale, mikä pitää sisällään tuotteen piirtämisen, mallintamisen sekä siitä prototyypin rakentamisen (van Boeijen et al. 2014, s. 20). Prototyyppejä käytetäänkin uusien ideoiden testaamiseen, kappaleiden ominaisuuksien viestimiseen sekä käyttäjäkokemuksen hahmottamiseen (Rodgers & Milton 2011, s. 101).

Kappaleen simulointiprosessi voisi kulkea seuraavasti. Alkuun saadaan tuoteidea, josta aletaan tekemään mahdollisia konsepteja. Konsepteista valitaan tietty, jota halutaan eniten lähteä kehittämään. Tätä konseptia sitten mallinnetaan CAD-ohjelmalla, minkä jälkeen se voidaan tulostaa 3D-tulostimella.

3.1 Ohjelmisto

CAD eli tietokone avustettu suunnittelu (engl. *computer aided design*) on ollut tuotesuunnittelijoiden käytössä jo 1960 -luvulta asti ja on tietokoneiden yleistymisen myötä ollut isona tekijänä nykyaikaisessa tuotesuunnittelussa (Krebs 2007, s. 8). CAD-ohjelmilla suunnittelijat pystyvät luomaan kaksiulotteisen kuvan lisäksi kolmeulotteisen mallin suunnitellusta kappaleesta. Tämä mahdollisuus yhdistettynä 3D-tulostamiseen mahdollistaa nopean prototyypin luomisen tuotesuunnittelun simulointi -vaiheeseen.

Tyypillisesti 3D-mallinnuksessa aloitetaan piirtämällä kaksiulotteinen kuva kappaleesta, jota käytetään itse kolmiulotteisen kappaleen pohjana. Tämän jälkeen voidaan joko alkaa lisäämään muita osioita pursottamalla. Tähän osaan voidaan sitten lisätä tai siitä voidaan alkaa poistamaan osia, jotta saadaan halutun mallinen kappale. Kuvassa 3 on esitetty yksinkertaisen kappaleen pursottaminen.



Kuva 4. Kuvasarja, jossa näkyy yksinkertaisen kappaleen pursottaminen kolmiulotteiseksi Siemens NX 12 ohjelmalla. A-kohdassa nähdään ainoastaan x-,y- ja z- koordinaatisto. Kohdassa B ollaan piirretty neliö x-,y-koordinaatistossa. Kuvassa C piirretty kuva ikään kuin nostetaan z-suunnassa. Kuvassa D on valmis 3D-malli.

CAD-ohjelmat mahdollistavat myös monia muita toimenpiteitä tehtäväksi mallinnuksen yhteydessä, kuten:

- Kokoonpanojen luomista monista erikseen mallinnetuista osista
- Luomaan osaperheitä, jossa kukin osaa on samanlainen rakenteeltaan, mutta yksityiskohdat, kuten esimerkiksi hampaiden määrä hammasrattaassa ovat eri
- Pintojen analyysiä. (Bryden 2014 s. 17–19)

Tyypillisesti, kun kappale on saatu mallinnettua, se viedään suunnittelijan valitsemissa tiedostoformaateissa erilliseen ohjelmaan. Tässä toisessa ohjelmassa määritellään mahdolliset tuet kappaleelle sekä muunnetaan kappale G-koodiksi. Ohjelmointikieleksi, joka kertoo laitteelle, mitä toimenpiteitä sen tulisi suorittaa kappaleen valmistamiseksi. (Micallef, 2015) Tätä toimenpidettä kutsutaan leikkaamiseksi (eng. slicing) (Evans, 2014 s. 28)

3.1.1 Tiedostoformaattit

Yleisin formaatti 3D-mallien tallentamiseen käytetään STL-formaattia (eng. *Standard triangulation language*). Syynä on STL-formaatin riippumattomuus käytetystä CAD-ohjelmasta sekä binääriin, että ASCII muotoon tallennus. Tämä ei tarkoita, etteikö STL formaatissa olisi mitään vikaa. Koska STL-formaatti ei tallenna topologista dataa kappaleesta, 3D-tulostimeen menevä kappale täytyy aina tarkastaa ennen tulostusta siltä varalta, että sieltä löytyisi ongelmia. (Chua et al. 2017 s. 77)

Muitakin mallinnusformaatteja löytyy myös, kuten NURBS, VRML, OBJ, STEP ja IGES, mistä kukin tuovat omat hyötynsä sekä haittansa ja ovat useimmiten luotu vastaamaan tietynlaiseen kysyntään. Yksikään näistä ei kuitenkaan vastaa multimateriaali 3D-tulostuksen vaatimukseen monen materiaalin tallentamisesta samaan kappaleeseen. Yleisesti myös 3D-tulostuksen lisääntyessä tuotannossa ollaan kaivattu standardisointia sekä korvaamista STL-formaatin vanhetessa. Seuraavaksi 3D-kappaleiden standardiksi on noussut kaksi kilpailevaa tiedostoformaattia: ASTM¹:n ja ISO²:n AMF-tiedostoformaatti sekä Microsoftin 3MF-tiedostoformaatti. (Bella 2015, Grabcad blog).

Näiden uusien formaattien hyöty piileekin niiden laajassa käytettävyydessä useamman eri ohjelmiston kanssa sekä mahdollisuus uusien piirteiden valitsemiseen kappaleeseen, kuten kappaleessa käytetyt värit sekä kappaleen osien materiaalit. (Chua et al. 2017, s. 81–82)

¹ engl. *American society for testing and materials*

² engl. *International standards organization*

3.1.2 Tulostusohjelmat

3D-tulostuksessa käytetään erillisiä ohjelmia, jotka muuntavat 3D-mallin tulostimien luettavaksi. Näitä ohjelmia kutustaan yleisnimityksellä Slicer. Näissä ohjelmissa määritetään tulostimen ekstruuderin kulkema rata, materiaalin ekstruusion ajankohta sekä materiaalien ekstruusion määrä. (Evans 2012, s. 37) Muutaman vuoden takaisten julkaisujen perusteella Slicer ohjelmissa voidaan nykyään määritellä kappaleiden pintoihin eriäviä materiaaleja tai tehdä eri materiaaleista koostuvista osista kokoonpano. Multimateriaali mahdollisuus on kehittynyt rinnan monisuuutin teknologian kanssa, sillä ohjelmat pohjaavatkin multimateriaalisuutensa siihen, että kappaleeseen määritetään, millä suuttimella tulostetaan mikäkin osa. (Stevenson 2016; Richter 2018).

Uusien 3D-tulostuksen tiedostoformaattien yleistyessä myös CAD ohjelmat ovat kehittyneet kohti helpompaa suunnittelua 3D-tulostimien kanssa. CAD ohjelmissa voidaan uusien ajattelutapojen myötä upottaa tietoa jo mallintamisen vaiheessa. Voxel eli volume pixel (suom. Tilavuus pixeli) osoittaa paikan x-,y- ja z-suunnissa (Ahirwar 2019, s. 37) on tällainen kehitys. Voxel-pohjaisilla ohjelmilla voidaankin mallintaa kappale niin, että voxeliin upotetaan tieto materiaalista sekä väristä (Grabcad 2022). Tämä mahdollistaa 3D-tulostamisen ilman ylimääräistä määrittelyä Slicer-ohjelmassa.

3.2 Materiaali

Multimateriaali 3D-tulostamisessa polymeerien tulostaminen on innovaation kärjessä. Suhteessa metalleihin sekä keraameihin polymeerejä on helpompi käsitellä sekä halvempi käyttää. (Bandyopadhyay & Heer 2018). Tästä syystä myös tuotesuunnittelun prototyyppien iterointivaiheessa usein suositaan kappaleen materiaalina polymeerejä.

Multimateriaaliin soveltuvia polymeerejä voidaan jakaa käyttökohteen mukaisesti: materiaalin pursotukseen käytettävät polymeerit sekä materiaalin ruiskutukseen käytettävät polymeerit. Pursotukseen käytettävät materiaalit ovat tyypillisesti termoplastisia ominaisuuksiltaan, mikä tekee niistä helposti sulatettavia, kun taas ruiskutukseen käytetään fotopolymeerejä (engl. *photopolymer*), jotka kovettuvat UV-valossa. (Fink 2018, s. 85-87)

Lopesin et al. (2018) tekemän tutkimuksen mukaan multimateriaalipursotuksessa rajat eri materiaalien välissä vähentävät Youngin moduulia sekä murtolujuutta. Mooren & Williamsin (2015) sekä Mueller et al. (2017) tutkimusten mukaan multimateriaali ruiskutuksessa syntyvät kappaleet eivät omaa suurempaa väsymisikää taikka murtolujuutta.

Tästä voidaan päätellä, että rajat materiaalien välissä ovat heikkoja multimateriaalipur-
sotuksessa, kun taas multimateriaaliruiskutuksessa rajat materiaalien välillä ovat yhtä
vahvoja kuin pohjamateriaalin oma koostumus.

Merkittäväksi tekijäksi multimateriaalitulostustekniikan ja materiaalin valintaan on mate-
riaalien kustannus. Tässä täytyy turvautua kolmansien osapuolien kauppoihin suuntaa
antavaan hinnoitteluun, sillä materiaalin valmistajat eivät itse kerro sivuilla, minkä hintai-
sia heidän materiaalinsa ovat. Kun materiaalin pursotusmenetelmän suosituimmat ma-
teriaalit, kuten ABS sekä PLA voivat maksaa 20–80 euroa kilolta, materiaalin ruiskutuk-
sessa käytettävä materiaali voi maksaa 200–600 euroa kilo (Evoked 2022; 3D E-shop
2022). Itse materiaalin lisäksi materiaalin ruiskutuksessa täytyy myös huomioida laitteen
puhdistukseen vaadittava materiaali, joka myös maksaa sen 60–150 euroa kilo (3D E-
shop 2022).

Prototyppinnissa materiaalin valinnassa hinta on yksi suurimmista tekijöistä alkuvai-
heessa, mutta sen lisäksi, kun päästään iterointikerroilla lähemmäksi lopullista tuotetta
pitää alkaa huomioimaan materiaalin valintaa muiltakin näkökulmilta. Noorani (2017, s.
96–97) esittääkin seuraavat asiat tarpeellisiksi huomioida materiaalin valinnassa 3D-tu-
lostamiseen yleisesti: käyttökohde, tehtävä, geometria sekä jälkikäsittely. Käyttökoh-
teessa huomioidaan mahdolliset tarpeet, joita kappale saattaa vaatia, kuten erilaisten
sertifiointien vaatimuksien täyttäminen tai kemikaalien vastustuksen. Tehtävässä puo-
lestaan huomioidaan olosuhteita, joissa kappale tekisi työtään, ja siihen kohdistuvia jän-
nityksiä, joita sen tulisi ympäristössään kestää. Geometria sisältää kappaleen dimensiot
ja jälkikäsittelyssä huomioidaan, mitä toimenpiteitä kappaleella vielä täytyy tehdä. (Noo-
rani (2017, s. 96–97)

4. MULTIMATERIAALI TULOSTIMET HANKINTANA

3D-tulostaminen mahdollistaa tuotesuunnitteluun helpon ja nopean tavan luoda kappaleita. Sen sijaan, että tilattaisiin muotti Kiinasta, odotettaisiin pari viikkoa sen saapumiseen ja sen saavuttua luomaan prototyyppiä muotin avulla, voidaan jo saman päivän aikana saada prototyyppi mallinnetusta kappaleesta (Bryden 2014, s. 130; J. Katajisto haastattelu, 25.2.2022). Logistiikan vähentämisen lisäksi alhaiset työvoima- sekä kappalekustannukset tekevät 3D-tulostamisesta varteenotettavan vaihtoehdon perinteisempiin tuotanto sekä tuotesuunnittelu menetelmiin (Bryden 2014, s.130).

Multimateriaali 3D-tulostaminen mahdollistaa entistä laajemman valikoiman materiaaleja sekä niiden välisiä yhdisteitä, joilla voidaan sitten leikata kappaleen kustannuksia tai testata, millaiset ominaisuudet kappale saa erilaisilla materiaaleilla tehdessä. Tämä myös mahdollistaa entistä kompleksisempien kappaleiden luomisen vesiliukoisten tukimateriaalien avulla. Suuremmat mahdollisuudet tuovat myös mukanaan suuremmat kustannukset.

Taulukkoon 1 on koottu multimateriaali 3D-tulostimien valmistajia sekä heidän nettikaupastaan tai maahantuojaan nettikauppojen nettisivuilta löytyvät hintatiedot. Tyhjät kohdat johtuvat siitä, ettei valmistaja valmista kyseistä tuotetta. Tämän lisäksi olen luokitellut tulostimet työpöytä tulostimiksi, eli tulostimiksi, joita käytetään ja markkinoidaan pääsääntöisesti koteihin sekä yksityiskäyttäjille, ja teollisuus tulostimiksi, joita käytetään ja markkinoidaan lähtökohtaisesti tuotantoa ja yrityksiä varten.

Taulukosta 1 voidaan huomata, että multimateriaali 3D-tulostimet ovat yleisesti kalliimpia kuin tavalliset 3D-tulostimet, kuten olisi voinut helposti todeta tutkimattakin. Kuitenkin valmistajien hintojen erolla voidaan huomata, että käyttötarkoitus huomioiden, että hinnat eivät kuitenkaan ole niin paljon suurempia kuin, mitä aluksi voisi odottaa.

Taulukko 1. Materiaali pursottavien 3D-tulostimien hintavertailu

Valmistaja	Työpöytä	Teollisuus	Työpöytä MM	Teollisuus MM
Zortrax sis.	2591 €	4079.60–	-	5567.60–
ALV		4332.56 €		5920.38 €

Raise3D ³ ei sis. ALV	-	-	3499–3999 \$	5249–7249 \$
Flashforge tietoa ei	328–1109\$	1480–1999\$	610–939 \$	3199–3539\$
Craftbot ei sis. ALV	1499€	2599–2999€	-	3299-3999\$
BCN3D sis. VAT	-	-	3995–7995€	9495–11495€
MakerGear tietoa ei	600-2550€	-	3299€	12500\$
Sindoh ei sis. ALV	1499€	-	2999€	15000 ja 50000€
Prusa sis. ALV	379-999€	-	1068 ⁴ -2099€	-

(Zortrax 2022; Raise3D 2022; Flashforge 2022; Craftbot 2022; BCN3D 2022; Makergear 2022; bilcotech.it 2022; solide.se 2022, Haastattelu Vikström A.; Prusa3d 2022)

Materiaalia ruiskuttavien menetelmien hyötyjä on lukuisia, kuten korkea tulostustarkkuus, nopea tulostusaika sekä toimistoystävällisyys. Tekniikan toiminnan takia kerrokset voivat olla tulostimesta ja tulostusmoodista riippuen 16 ja 55 mikrometrin välillä (Stratasys 2022; 3D Systems 2022). Tulostusaika riippuu aina kappaleen koosta, mutta suhteessa muihin 3D-tulostusmenetelmiin tulostaminen on nopeaa. Toimistoystävällisyys on myös suuri tekijä, sillä tulostin ei vaadi tällöin ylimääräisiä toimenpiteitä tilojen kannalta, joten se on helppo sijoittaa ympäristöön kuin ympäristöön. (Chua & Leong 2017, s.67). Tämän lisäksi materiaalia ruiskuttavat menetelmillä on hyvin helppo luoda multimateriaalikappaleita toimintatapansa vuoksi ja usein voidaan myös sekoittaa eri materiaaleja yhteen saavuttamaan halutut ominaisuudet.

Materiaalin ruiskutuksen hinnasto on huomattavasti yksinkertaisempi, sillä valmistajia on vain kaksi: Stratasysin PolyJet sekä 3D Systemsin MultiJet. Hintaluokaksi valmistajat ovat ilmoittaneet yhteydenotossa 45 000–50 000 € (3D-systems haastattelu sähköposti, 21.3.2022). Korkeiden investointihintojen lisäksi tulostimien pienet tilavuudet sekä materiaalien valikoimien vähyydet ovat selkeitä menetelmän heikkouksia. (Chua & Leong

³ Laskettu yhden vuoden takuulla. Lisäämällä takuuvuosia voi nostaa hintaa.

⁴ Laskettu yhden tulostimen hinta + multimateriaalilisäosa

2017, s.67) J. Katajiston kanssa tehdyn haastattelun (25.2.2022) aikana myös selvisi, että ruiskutuksessa käytettävillä materiaaleilla on hyllyikä. Tämä tarkoittaa, että yleisten korkeiden kustannuksien lisäksi täytyy huomioida myös, että materiaalia käytetään, sillä materiaalia ei voi ostaa varastoon suuria määriä materiaalin pilaantumisen vuoksi.

Materiaalin pursotuksen hyötyjä ovat suuret tulostusalueet, materiaalin vaihdon helppous, tukimateriaalin helppo poistaminen, minimaalinen jäte määrä sekä nopeasti toimivan kappaleen tekeminen. Verrattuna muihin 3D-tulostusmenetelmiin materiaalin pursottamisella on helpompi skaalata suuremmaksi, sillä kaikkia osia tarvitsee vain skaalata suuremmaksi. Tämän lisäksi materiaalin vaihto on helpompaa verrattuna esimerkiksi materiaalin ruiskutukseen, sillä suuttimesta ei tarvitse ajaa pesuainetta läpi, vaan pursottamista voidaan tehdä, kunnes aiempi materiaali on poistunut. Pursotuksessa myös tukien poistaminen on helppoa: ei tarvitse kuin katkaista ne irti tai pestä ne pois. Menetelmän toimintatavan vuoksi jätettäkään ei synny paljoa, sillä materiaalia kuluu ainoastaan kappaleeseen sekä sen tukemiseen. Ruiskupuristuksen ABS:n verrattaessa 3D-tulostettu ABS sisältää noin 85% mekaanisista lujuuksista, mikä mahdollistaa käyttövalmiiden kappaleiden tulostamisen. (Chua & Leong 2017, s.117)

Materiaalia pursottavien heikkouksia ovat puolestaan sen tarkkuudessa, hitaudessa sekä lämpötilakäsittelyssä syntyviä ennalta-arvaamattomia kutistumisia. Vaadittuja tarkkuuksia on vaikea saavuttaa filamentin kokojen takia. Prosessi on myös hidas suhteessa muihin 3D-tulostus menetelmiin, sillä pursottamisessa kuluu aikaa kappaleen täyttämiseen sekä pursotettavaa ainetta ei voida yleensä pursottaa lujempaa ilman, että joudutaan kompromisoimaan jossain muualla. Lisäksi, koska materiaali tulee lämmittää prosessin aikana, jäähtyessään materiaali alkaa kutistumaan ja voi mahdollisesti aiheuttaa erilaisia vääristymiä kappaleeseen. (Chua & Leong 2017, s.117)

Multimateriaalivariantit materiaalia pursottavista tulostimista sekä tekniikan kehitys ovat kuitenkin aika hyvin eliminoineet suurimmat heikkoudet. Multimateriaalitulostimien kahden suuttimen käyttö nopeuttaa tulostusaikoja sekä mahdollistavat useissa tapauksissa kahden kappaleen samanaikaisen tulostamisen. Kutistumisen aiheuttamille vääristymille on myös kehitetty tekniikoita, kuten tulostustason lämmittäminen sekä suljetun tilan tekeminen tulostimelle. Suljetussa tilassa ilman lämpötila ei vaihtelee, mikä mahdollistaa lämpimämmän ympäristön tulostettaville kappaleille. Tämän lisäksi tulostustason lämmitys hidastaa alimpien kerroksien kutistumisen, minkä avulla voidaan minimoida kutistumisen aiheuttamia vääristymiä.

5. TAPAUKSIA MULTIMATERIAALI 3D-TULOСТИMEN KÄYTÖSTÄ

Vaikka teknologia on suhteellisen uutta teollisuuden standardeilla, ovat jo monet yritykset alkaneet adoptoimaan sitä omaan toimintaansa. Tässä luvussa on tarkoitus esitellä eri valmistajien julkaisemia tarinoita siitä, miten multimateriaali 3D-tulostimet ovat auttaneet heidän asiakkaiden toiminnan parantamisessa.

Multimateriaali 3D-tulostusta käytetään nykyaikana lähtökohtaisesti kahteen tarkoitukseen: apuna lääketieteellisessä operoinnissa sekä yritysten tuotekehityksessä. Lääketieteessä suurin käyttökohde on erilaisten elinten korostaminen erilaisissa ihmisten anatomiaan liittyvissä kappaleissa. Näiden korostuksien avulla voidaan suunnitella erilaisia leikkauksia jo ennen kuin potilasta aletaan operoimaan. Esimerkiksi Bengdun sairaalassa tyypillisesti selkänikamaleikkauksia varten tarvittiin aiheeseen erikoistuneita kirurgeja, jotka tekivät operaatioon liittyviä porauksia intuitiivisesti. Nyt korostettujen 3D-tulostettujen kappaleiden avulla voidaan parantaa diagnosointia, suunnitella operaatioita etukäteen sekä antaa ohjeita muillekin kuin kyseiseen operaatioon erikoistuneille kirurgeille. Kuvassa 5 voidaan nähdä multimateriaali kappale, joka esittää ihmisen selkänikamaa. Kasvainta on korostettu vihreällä värillä, kun taas valtimo on korostettu punaisella. (Raise 3D 2022)



Kuva 5. Bengdun sairaalan 3D-tulostetut selkänikamat, jossa multimateriaalin avulla on korostettu eri osia. (Raise3D 2022)

Selkänikamaleikkauksien lisäksi multimateriaali ominaisuuksia käytetään luomaan kappaleita myös hammaslääketieteessä. Käyttökohde on hyvin samanlainen aiempaan, missä tulostetaan potilaan leuasta kappale, jonka avulla voidaan suunnitella etukäteen, miten leikkaus tulisi suorittaa. Lääketieteessä voidaan käyttää sekä materiaalia pursottavia menetelmiä sekä materiaalia ruiskuttavia menetelmiä riippuen tietenkin tarkkuusvaatimuksissa. (Craftbot 2022; J. Katajisto haastattelu 2022)

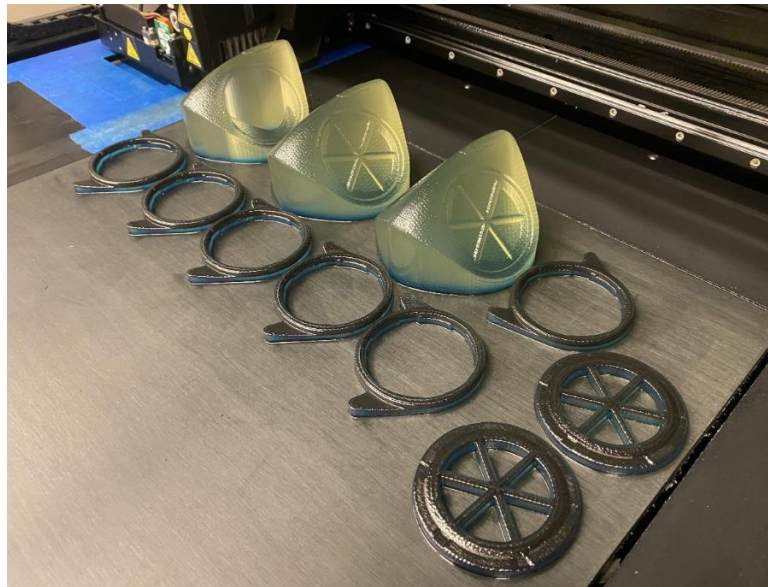
Toinen pääsääntöinen käyttökohde multimateriaali 3D-tulostimille on yritysten tuotekehitys. Yhtenä syynä multimateriaalitulostimen käyttämiselle on multimateriaalitulostimien mahdollisuus tulostaa helposti poistettavaa tukimateriaalia. Esimerkkinä ovat Camper sekä Kohler tuotekehitys. Kenkäyhtiönä Camperin tuotteet ovat kompleksisia muotoja, joita voidaan nyt veteen sulavan tukimateriaalin ansiosta tulostaa suoraan, mikä nopeuttaa suunnitteluprosessia, mikä on esitelty kuvassa 6 (BCN3D 2022). Keittiö ja vessa tuotteisiin erikoistuva Kohler puolestaan käyttää multimateriaali 3D-tulostimia lähökohtaisesti lopullisen tuotteen verifiointiin eli funktionaalisten prototyyppien tekemiseen. Läpinäkyvällä materiaalilla sekä veteen sulavalla tukimateriaalilla voidaan nähdä konkreettisesti, kuinka vesi heidän tuotteissaan virtaa (Stratasys 2022). Vaikka molemmilla tekniikoilla voidaan saavuttaa sulava tukimateriaali, tekniikan valitseminen on ollut riippuvainen muistakin tekijöistä. Kohlerin tapauksessa tarvittiin vedenpitäviä läpinäkyviä kappaleita, joita vain materiaalin ruiskutus pystyy tarjoamaan; Camperin tilanteessa vaadittiin tilavuuksiltaan suurempia tulostimia heidän tuotteitaan varten, mihin materiaalin pursotus on hyvä. (Stratasys 2022; BC3D 2022)



Kuva 6. Camperin 3D-tulostettu kengän prototyyppi. (BCN3D 2022)

Toinen syy multimateriaali 3D-tulostimien käyttämiseen on, että yrityksen tuote vaatii monenlaisien materiaalien sekoitusta. Yksi tapaus on Hyde Park Partners. Koska Hyde

Park Partnersin tuote voi olla valoa emittoiva, heidän tuotteensa vaatii variaatiota tuotteidensa koteloille, missä läpinäkyvää materiaalia käytetään kohtiin, joista valo emittoituu ja tavallista muovia käytetään muuhun koteloon. Tämän lisäksi osa kappaleista vaatii kumimaisen ulkopinnan, mikä voidaan materiaalia ruiskuttavalla menetelmällä lisätä helposti (3D-systems 2022) Toinen tapaus on ergonomisia kasvomaskeja tuottava Breathe99. Heidän tilanteessaan tuotekehitys oli hyvin hintavaa kappaleen materiaali-vaatimuksien takia, sillä sen tuli oli tarpeeksi pehmeä, jotta se olisi mukava naamalle, mutta tarpeeksi kova käsittelyyn. Tässä tapauksessa materiaalia ruiskuttavan menetelmän ominaisuus sekoittaa kahta olemassa olevaa materiaalia mahdollisesti prototyyppien iteroimista, jossa kappaleen kovuutta pystytiin muuttamaan heti seuraavaa kierrosta varten. (Stratasys 2022) Yhden iterointikierroksen prototyyppiä on havainnollistettu kuvassa 7.



Kuva 7. *Stratasys PolyJet tulostimella tehty multimateriaali prototyyppi (Stratasys 2022)*

Viimeisenä ovat yritykset, jotka eivät hyödynnä multimateriaali 3D-tulostuksen multimateriaalisuutta, mutta hyötyvät yleisesti 3D-tulostamisesta tuotekehityksessä. Tästä esimerkkinä on BORN Motor Co. moottoripyörä yhtiö. Vaikka he omistavatkin 3D-tulostimen, sen multimateriaaliominaisuuksien käyttöä ei olla esitelty ollenkaan (Stratasys 2022). Tämä viittaisi ajatukseen, että multimateriaali 3D-tulostusta ei vielä osata hyödyntää vielä kaikissa yrityksissä sekä, että multimateriaali 3D-tulostaminen olisi vasta kehityksensä alussa.

6. POLYMEERIEIN MULTIMATERIAALI 3D-TULO- STAMISEN TULEVAISUUS

Toisin kuin muissa luvussa tässä luvussa on tarkoitus tarkastella aiempien lukujen pohjalta multimateriaali 3D-tulostamisen tulevaisuutta. Suurimpina kysymyksinä ovat, mitkä ovat multimateriaali 3D-tulostamisen suurimmat haasteet sekä mitä multimateriaali 3D-tulostaminen vaatisi, että se voisi kukoistaa. Luvussa pääpaino on kirjoittajan mielipiteissä, mitkä perustellaan tässä opinnäytetyössä esitytetyllä teoriolla.

”Kaikki eivät aina ymmärrä, kuinka he käyttävät multimateriaali 3D-tulostamista” (suomenettu Stratasys Breathe99 case) on lainaus, joka kuvastaa hyvin multimateriaali 3D-tulostamisen nykyhetkeä. Vaikka 3D-tulostimien valmistajilla on monia asiakastarinoita siitä, kuinka asiakkaan ostama multimateriaali 3D-tulostin on parantanut tämän tuotekehitystä tai tuotantoa, harvemmin tarinoissa mainitaan multimateriaali ominaisuuksien käyttämisestä. Pääpainona ovat usein matalammat kustannukset sekä nopeampi tuotekehitys. Käyttäjille täytyy siis opettaa, miksi he haluaisivat 3D-tulostimen ylipäättään ennen kuin voidaan markkinoida multimateriaali ominaisuuksia.

Multimateriaali 3D-tulostimia valmistavien yritysten vähyys sekä käyttäjien opettaminen markkinoinnissa johtavan siis päätelmään, että multimateriaali 3D-tulostaminen on vasta teknologian kehityksen alkutaipaleessa. Kuten aiemmin on todettu, yhtenä haasteena on käyttäjien tietämättömyys teknologian hyödyntämiseen. Tämä haaste kuitenkin ratkeaa vain ajan myötä, sillä tavallisten 3D-tulostimien hankinta on tehty yhä edullisemmaksi ja tällä hetkellä materiaali pursottavan 3D-tulostimen voi saada 200–300€ hintaluokkaan (vertaa.fi 2022). Yksi mahdollisuus multimateriaalitulostimille onkin teknologian jatkuvan iteroinnin ja innovoinnin kautta hintojen laskemiseen sellaiselle tasolle, että vaadittu aloituspääoma olisi matalampi. Tämä tilanne on pitkällä aikavälillä mahdollinen, mutta on riippuvainen siitä, että 3D-tulostamisen osaamista kehitetään sekä multimateriaalitekno-
logiaan sijoittamista.

Materiaalin pursottamisessa on lähtökohtaisesti tapahtunut eniten kehitystä, sillä se on yleisimmässä käytössä oleva 3D-tulostuksen menetelmä. Kun monet valmistajat ovat alkaneet kehittämään multimateriaalisuutta lisäämällä suuttimia, toiset ovat kehittäneet menetelmiä, joilla muuntaa tavallinen materiaalia pursottava 3D-tulostin multimateriaali 3D-tulostimeksi. Tästä ovat esimerkkinä Prusan MMU2S sekä Mosaicmfg:n Palette 3, mitkä ovat lisäosia, joilla voidaan antaa 3D-tulostamille materiaalin vaihto ominaisuus

(Prusa 2022; Mosaicmfg 2022). Tämän lisäksi jo opinnäytetyön kirjoittamisen ajankohdalla on julkaistu uusi, Original Prusa XL, jossa multimateriaali ominaisuudet tulevat tulostimen kyvystä vaihtaa 5 eri suuttimen välillä (Prusa 2022).

Toinen tulevaisuus multimateriaali 3D-tulostamiselle on sen kehittymiseksi eri yritysten tarjoamaksi palveluksi. Koska multimateriaali 3D-tulostimen vaatima aloituspääoma on suuri pienemmälle yritykselle, voi olla järkevämpää käyttää alihankkijaa itse prototyypin 3D-tulostamiseen. Tällöin yrityksen ei myöskään tarvitse itse huolehtia 3D-tulostimen huollosta, vaan palvelun tarjoaja hoitaisi tämän. Tampereen ammattikorkeakoulun J. Kattajisto totesikin haastattelussa (25.02.2022), että he ovat saaneet pyyntöjä prototyyppien tulostamiselle. Hintaluokaksi prototyypin tulostamiselle annettiin haastattelussa vähintään 2 000€. Vaikka prototyypin hinta on tällöin korkeampi kuin, jos itse tulostaisi sen, alkupääomaa ei kuitenkaan tarvita tässä tilanteessa. Kuvitteellisessa tilanteessa, jossa yritys valmistaa teollisuusrobotiikkaan tarttuvia ja tarvitsisi näihin kumipintaiset sormet, olisi huomattavasti halvempaa ostaa multimateriaali 3D-tulostus palvelu 2 000€, kuin sijoittaa 45 000€ paria iterointikierrosta varten. Tämä johtaisikin tulevaisuuteen, jossa multimateriaalisuus olisi yrityksille enemmän palvelu kuin investointi. Tietenkin tämäkin tulevaisuus nojaa pohjaan, että yritykset oppivat hyödyntämään tavallista sekä multimateriaali 3D-tulostamista.

7. YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoite oli esitellä polymeerien multimateriaali 3D-tulostamiseen käytettyjä tekniikoita, tekniikoissa huomioitavia asioita sekä pohtia, millainen tulevaisuus multimateriaali 3D-tulostamisella voisi olla. Tuktimuskysymyksiä käytettiin seuraavia kysymyksiä:

- Mitä tekniikoita käytetään polymeerien multimateriaali 3D-tulostamisessa?
- Minkälaisia työkaluja multimateriaali 3D-tulostaminen vaatii suunnittelijalta?
- Miltä näyttää multimateriaali 3D-tulostamisen tulevaisuus?

Polymeerien 3D-tulostamisessa käytetään sekä materiaalin pursotus, että materiaalin ruiskutusmenetelmiä. Materiaalin pursotus menetelmissä käytetään pääsääntöisesti kahta tai useampaa suutinta. Nämä tulostimet jaetaan kahteen ryhmään: tulostimet, jossa on toisistaan riippuvaiset suuttimet sekä tulostimet, joissa on toisistaan riippumattomiin suuttimet. Materiaalin ruiskutusmenetelmässä puolestaan tekniikka pysy samana, missä fotopolymeeriä ruiskutuksen jälkeen kovetetaan UV-valolla.

CAD-ohjelmat sekä Slicer-ohjelmat todettiin myös olevan suunnittelijalle pakollisia työkaluja 3D-tulostamisen mahdollistamiseksi. CAD-ohjelmilla voidaan mallintaa haluttu 3D-malli, joka sitten voidaan siirtää Slicer-ohjelmaan, joka muuttaa 3D-mallin tulostimelle ymmärrettäväksi kieleksi. Multimateriaalisuus vaatii kuitenkin myös materiaalin valinnan mahdollisuuden, mitä yleisimmin käytössä olevalla tiedostoformaattilla ei ollut mahdollista tehdä. Tämä sitten on johtanut tilanteeseen, jossa ollaan kehitetty kaksi 3D-kappaleiden standardiformaatin tittelistä kilpailevaa tiedostoformaattia, AMF sekä 3MF. Molemmissa pystyy määrittämään kappaleeseen jo mallintamisen aikana materiaalit, mikä nyt on ollut Slicer-ohjelmien toimenkuvassa.

Multimateriaali 3D-tulostaminen on tekniikkana hyvin nuori, jolla on vielä paljon kasvun varaa. Kasvuun vaikuttavia tekijöitä kuitenkin ovat 3D-tulostamisen yleistyminen sekä sen käyttämisen osaaminen, mikä johtaisi myös multimateriaali 3D-osaamisen yleistymiseen sekä sen käyttämisen osaamiseen. Korkeiden aloitusinvestointien takia on myös mahdollista, että multimateriaali 3D-tulostamisesta tulee erikoistunut osaaminen ja tätä kautta palvelu kompleksien 3D-kappaleiden tulostamiseksi.

Opinnäytetyön tieto kerättiin alan ammattilaisten haastatteluilla, tieteellisten tekstien kirjallisuusselvityksillä sekä valmistajien tuotteiden verkkosivujen tarkastelulla. Kirjallisuudessa tavoitteena oli käyttää mahdollisimman uutta tietoa, mutta tekniikan nuoruuden takia, aiheesta on hyvin vähäisesti kirjoitettu. Tämän takia täytyi turvautua sitten valmistajien verkkosivuihin, vaikka ne eivät tyypillisesti ole sopivia lähteitä tieteelliselle tekstille. Tekniikan nuoruuden takia multimateriaali 3D-tulostimien käytöstä on myös vähän materiaalia. Tässäkin tilanteessa turvauduttiin valmistajien verkkosivuilla esiteltyihin case yrityksiin sekä Tampereen Ammattikorkeakoulun multimateriaali 3D-tulostimesta vastaavaan laboratorio insinööriin.

Tiedeyhteisölle opinnäytetyö ei tuo mitään uutta tietoa; opinnäytetyö mahdollistaa aiheeseen perehtymättömällekin mahdollisuuden tutustua polymeerien multimateriaali 3D-tulostukseen. Kontribuutiona onkin lukuisan lähteen tiedon tiivistäminen yhteen paikkaan sekä tämän tiedon kiteyttämisen helposti luettavaksi kokonaisuudeksi. Tällöin opinnäytetyötä voidaan käyttää kasvattamaan multimateriaali 3D-tulostimien yleistietämystä ja täten auttamaan myös tekniikan käytön osaamista sekä sen kehittämistä.

Opinnäytetyössä perehdyttiin hyvin yksilöllisesti tällä hetkellä saatavilla oleviin polymeeri multimateriaali 3D-tulostimiin. Vielä tarkemmin rajoituttiin tutkimaan kahta tai useampaa materiaalia samanaikaisesti tulostettaviin tekniikoihin, joten seuraavia tutkimuksen kohteita olisivat biomateriaalien, keraamien sekä metallien multimateriaali 3D-tulostimiin. Mikäli haluttaisiin pysyä polymeereissä, voitaisiin tutkia hiilikuiduilla vahvistettua tulostamista sekä muita yhden suuttimen multimateriaali 3D-tulostusmenetelmiä. Näiden lisäksi tieteellisessä tutkimuksessa käytettäviä multimateriaali 3D-tulostimia sekä niistä syntyviä tuotekonsepteja voitaisiin tutkia, mutta tästä on varmasti vielä vaikeampaa löytää hyvää tietoa.

LÄHTEET

- Awari, G. K., Thorat, C. S., Ambade & V., Kothari, D. P. (2021). Additive Manufacturing and 3D printing Technology: Principles and Applications, CRC Press, Boca Raton
- Chua, C. K., Wong C. H. & Yeong W. Y. (2017). Standards, Quality Control and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing, Elsevier Science & Technology, San Diego
- Savonia, Tietopankki, Menetelmät. Saatavissa (viitattu 14.2.2022): <https://3dtulos-tus.savonia.fi/fi/tietopankki/menetelmat>
- Rafiee, M., Farahani, R. D. & Therriault, D. (2020). Multi-Material 3D and 4D Printing: A Survey. Advanced Science; Weinheim Vol.7(12)
- Noorani, R. (2017). 3D Printing: Technology, Applications, and Selection, Taylor & Francis Group, Boca Raton FL.
- Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliverm V., Palmer, C. & Bowyer, A. (2011). RepRap – the replicating rapid prototyper, Robotica, Vol.29, Special Issue 1: Robotic Self-X Systems, pp. 177–191
- Zhang, J. & Jung, Y.G. (2018). Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications, Elsevier Science & Technology, Oxford
- Rodgers, P. & Milton, A. (2011). Product Design, Laurence King Publishing, London
- van Boeijen, A., Daalhuizen, J., Zijlstra, J. & van der Schoor, R. (2014). Delf Design Guide -Revised edition: Design strategies and methods, BIS Publishers
- Krebs, J. (2007). Basics CAD, Birkhäuser, Basel
- Bryden, D. (2014). CAD and Rapid Prototyping for Product Design, Laurence King Publishing, London
- Micallef, J. (2015). Beginning Design for 3D Printing, Apress, Berkley, kappale 4
- Evans, B. (2012) Practical 3D Printers The Science and Art of 3D Printing. Apress, Berkley
- Bella, D. (2015). 3D printing file format cage match: AMF vs. 3MF. GrabCAD blog. Saatavissa (viitattu 25.2.2022): <https://blog.grabcad.com/blog/2015/07/21/amf-vs-3mf/>
- Ahirwar, K. (2019). Generative Adversarial Networks Projects: Build Next-generation Generative Models Using TensorFlow and Keras, Packt Publishing, Birmingham
- Badyopadhyay, A. & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures, Materials Science and Engineering: Reports, Vol.129, pp. 1–16
- Fink, J. K. (2018). 3D Industrial Printing with Polymers, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken

Lopes, L.R., Silva A.F. & Carneiro, O.S. (2018). Multi-material 3D printing: The relevance of materials affinity on the boundary interface performance, Additive Manufacturing, Vol.23, pp. 45–52

Moore, J. P. & Williams, C. B. (2015). Fatigue properties of parts printed by PolyJet material jetting, Rapid Prototyping Journal, Vol.21, Iss. 6, pp. 675–685

Mueller, J., Courty, D., Spielhofer, M., Spolenak, R. & Shea, K. (2017). Mechanical properties of Interfaces in Inkjet 3D Printed Single- and Multi-Material Parts, 3D Printing and Additive Manufacturing, Vol.4, Iss. 4, pp.193–199

Zortrax (2022) Inventure tuotesivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://zortrax.com/3d-printers/inventure/>

ZMORPH (2022) i500 tuotesivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://zmorph3d.com/products/zmorph-i500/>

Raise3D (2022) Pro2 Series tuotesivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.raise3d.com/pro2-series/>

Flashforge (2022) Creator 4 tuotesivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.flashforge.com/product-detail/flashforge-creator-4-3d-printer>

Craftbot (2022) Craftbot Flow IDEX tuotesivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://craftbot.com/products/craftbot-flow-idex>

BCN3D (2022) Epsilon W27 tuotesivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.bcn3d.com/bcn3d-epsilon/?model=w27>

Makergear (2022) M3-ID tuotesivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.makergear.com/products/m3-id>

Grabcad (2022) Guide to Voxel Printing, päivitetty 4.12.2020. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://help.grabcad.com/article/230-guide-to-voxel-printing>

Evok3d (2022) Stratasys® compatible materials. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): https://www.evok3d.com.au/materials/stratasys-reg-compatible-materials/?rf=cn%3Fcn%3D715%257C717%26rf%3Dcn&sortby=highest_price

3D E-shop (2022) Prototyping consumables. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.3de-shop.com/shop/complex/category/22349849/brand/-/application/0?&sort-order-field=price&sort-order-type=-1&product-page=18&page=1>

3D E-shop (2022) Postprocessing consumables. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.3de-shop.com/shop/complex/category/22349849/brand/-/application/4?&sort-order-field=price&sort-order-type=-1&product-page=18&page=1>

Zortrax online store (2022) 3D Printers. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://store.zortrax.com/3d-printers>

Raise3D(2022) Raise3D online shop. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.raise3d.com/shop/>

Flashforge shop (2022) Flashforge 3D printers. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.flashforge.com/category/flashforge-3d-printer>

Craftbot webshop (2022) Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://eu.craftbot.com/>

Makergear (2022) Shop, 3D printers. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.makergear.com/collections/3d-printers>

Bilcotech (2022) Stampati, FFF, Sindoh. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://store.bilcotech.it/sindoh>

Prusa (2022) 3D printers, FFF Printers, tuote (Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.prusa3d.com/category/3d-printers/>

Stratasys case study (23.11.2021) Learn how startup launches ergonomic face mask with PolyJet 3D printing. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.stratasys.com/en/resources/case-studies/perfect-ppe-prototypes/>

Stratasys case study (19.5.2020) Kohler speeds product development with 3D printing. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.stratasys.com/en/resources/case-studies/kohler-case-study/>

3D Systems case studies (2016) 3D Printing Helps Drive Ingenuity and ROI at Hyde Park Partners. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/3d-printing-helps-drive-ingenuity-and-roi-hyde-park-partners>

BCN3D (2019) Camper revolutionizes footwear design process through in-house 3D printing. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.bcn3d.com/3d-printing-revolutionizes-product-design-at-camper/>

BCN3D, BORN Motor Co.'s exclusive 3D printed motorcycle parts. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.bcn3d.com/using-3d-printing-for-manufacturing-motorcycle-end-use-parts/>

Craftbot, The future is here: 3D prototyping broken and deformed bone anatomical models to educate doctors. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://craftbot.com/casestudies/Dr-Alexis-Dang>

Raise3D (12.3.2018) Spinal Surgeries See Increased Success Rate with 3D Printed Guides. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.raise3d.com/case/medical-vertebra-surgical-guides-increasing-odds/>

Stevenson, K. (25.1.2016) MeshMixer 3.0 Enables Multi-Material 3D Printing. Saatavissa (viitattu 30.3.2022): <https://www.fabbaloo.com/2016/01/meshmixer-30-enables-multi-material-3d-printing>

Richter, A. (12.1.2018) MatterControl: What's new. Saatavissa (viitattu 30.3.2022): <https://www.matterhackers.com/articles/mattercontrol-whats-new>

Vertaa.fi (2022) 3D-tulostimet. Saatavissa (viitattu 1.4.2022): https://www.vertaa.fi/3d_tulostimet/?quickViewCategory=3d_tulostimet&quickViewBrand=creality&quickViewProduct=3d_ender_3_3d_printer_large_build_heated_plate_pla_abs_544121893