

3D-TULOSTUKSEN HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET AJONEUVOKORJAAMOLLA

Malinen Mikko

Opinnäytetyö
Konetekniikka
Koneinsinööri (AMK)

2022

Konetekniikka
Koneinsinööri (AMK)

Tekijä	Mikko Malinen	Vuosi	2022
Ohjaaja	TkT Ari Pikkarainen		
Toimeksiantaja	Tapojärvi Oy		
Työn nimi	3D-tulostuksen hyödyntämismahdollisuudet ajoneuvokorjaamolla		
Sivu- ja liitesivumäärä	69 + 1		

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia 3D-tulostamisen hyödyntämismahdollisuuksia ajoneuvokorjaamolla. Kehittämiskohteena oli Tapojärvi Oy:n Kemimaan keskuskorjaamo, minne 3D-tulostamisen hyödyntämismahdollisuuksien tutkimisen lisäksi laadittiin 3D-tulostusmateriaalin valintataulukko pohjautuen yleisimmin käytettyihin tulostusmateriaaleihin. Korjaamolle kartoitettiin tarpeisiin soveltuva 3D-tulostuslaitteisto sekä niiden kustannukset. 3D-tulostusympäristön tarkoituksena on mahdollistaa yritykselle kustannustehokas ja tehokas 3D-tulostettavien osien valmistus omiin tarpeisiin.

Työssä tulostettiin varaosia eri tulostusmenetelmillä ja materiaaleilla tutkien tulostamisen kannattavuutta sekä toimivuutta varaosia ja muita hyödyntämiskohteita ajatellen. Työssä tutkittiin osien lisäksi 3D-tulostusmenetelmien, sekä 3D-tulostusmateriaalien välisiä eroja mahdollista 3D-tulostusympäristön laitekantaa varten.

Työn tulokseksi saatiin mahdollisia hyödyntämismahdollisuuksia 3D-tulostamiselle, sekä sen kannattavuutta. Yritykselle saatiin myös tietoa mahdollisen tulostusympäristön laitteistosta, kustannuksista, sekä tarvittavasta osaamisesta laitteiston mahdollisimman tehokkaan ja turvallisen käytön saavuttamiseksi.

Avainsanat

3D-tulostus, 3D-tulostusympäristö

Mechanical Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Mikko Malinen	Year	2022
Supervisor	Ari Pikkarainen, D.Sc. (tech.)		
Commissioned by	Tapojärvi Oy		
Subject of thesis	Possibilities of utilizing 3D printing in a vehicle repair shop		
Number of pages	69 + 1		

The subject of this thesis was to study the possibilities of utilizing 3D printing in a vehicle repair shop. The target for development was Tapojärvi Oy's central workshop in Keminmaa, where the possibilities of utilizing 3D printing were studied. In addition, a selection table for 3D printing materials was also made in the thesis, based on the most used printing materials. A cost estimate was also made for the 3D printing equipment suitable for the needs of the workshop. The purpose of the 3D printing environment is to enable a company to manufacture cost-effective and efficient 3D printable parts for its own needs.

In the work, spare parts were printed with different printing methods and materials, examining the profitability of printing, as well as the functionality in terms of spare parts and other utilization targets. In addition to the parts, the differences between 3D printing methods and 3D printing materials were studied in terms of the equipment base of a possible 3D printing environment.

The result of the work were potential applications for 3D printing, as well as its profitability. The company was also provided with information on the equipment and costs of a possible printing environment, as well as the necessary know-how to achieve the most efficient and safe use of the equipment.

Key words

3D-printing, 3D printing environment

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
1.1	Tavoitteet	8
1.2	Rajaukset	8
2	KEHITTÄMISTEHTÄVÄN TOIMINTAYMPÄRISTÖ	10
3	3D-TULOSTUS	11
3.1	3D-tulostamisen hyödyt ja haitat	11
3.2	Viipalointiohjelma	13
3.3	Tulostusmenetelmät	14
3.3.1	Pursotus - Material extrusion	15
3.3.2	Valokovetus altaassa - Vat polymerization	18
3.3.3	Jauhepetisulatus - Powder bed fusion	21
3.3.4	Materiaalin suihkutus - Material jetting	23
3.3.5	Sideaineen suihkutus - Binder jetting	25
3.3.6	Suorakerrostus - Direct energy deposition	27
3.3.7	Kerros laminointi - Sheet lamination	28
4	3D-TULOSTUSMATERIAALIT	30
4.1	PLA (Polyaktidi)	31
4.2	ABS (Akryylnitriilibutadieenistyreeni)	31
4.3	PETG (Polyeteenitereftalaatti)	32
4.4	TPE, TPU ja TPC	32
4.5	Nylon	33
4.6	PC (Polykarbonaatti)	33
4.7	PP (polypropeeni)	34
4.8	HIPS (Iskunkestävä polystyreeni)	34
4.9	ASA (Akryylistyreeniakrylonitriili)	34
5	TAKAISINMALLINNUS – REVERSE ENGINEERING	35
5.1	3D-skannerin toiminta	35
5.1.1	Laser 3D-skannerit	35
5.1.2	Strukturoituun valoon perustuvat 3D-skannerit	36
5.1.3	Fotogrammetria 3D-skannaus	37
5.2	Takaisinmallintamisen kannattavuus	38

6	TULOSTUSMENETELMÄN JA MATERIAALIN VALINTA.....	39
6.1	Tulostusmenetelmän valintaan vaikuttavat tekijä.....	39
6.2	Tulostusmateriaalin valintaan vaikuttavat tekijät.....	40
6.3	Materiaalinvalintataulukko.....	40
7	OSIEN VALMISTUS.....	42
7.1	Mallinnettavan osan valmistus.....	42
7.2	3D-skannatun osan valmistus.....	48
8	3D-TULOSTUSYMPÄRISTÖ.....	52
8.1	Laitekannan kartoitus.....	52
8.2	Tulostusympäristön suunnittelu.....	58
8.3	Tulostuslaitteiston kustannusarvio.....	59
9	TARVITTAVA OSAAMISEN KARTOITUS.....	61
9.1	Suunnitteluun tarvittava osaaminen.....	61
9.2	Tulostamiseen tarvittava osaaminen.....	61
10	POHDINTA.....	63
	LÄHTEET.....	65
	LIITTEET.....	68

ALKUSANAT

Haluan kiittää Ari Pikkaraista mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta, sekä erinomaisesta ohjaamisesta opinnäytetyön eri vaiheissa. Lisäksi haluan kiittää Tapojärvi Oy:n Markus Partasen panostusta ja aktiivista osallistumista.

Torniossa 4.5.2022

Mikko Malinen

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

UFP	Ultrafine particles
VOC	Volatile organic compound
FDM	Fused deposition modeling
SLS	Selective laser sintering
SLA	Stereolithography
SLM	Selective laser melting
PLA	Polylaktidi
ABS	Akrylinitriilibutadienistyreeni
PETG	Polyeteenitereftalaatti
TPE	Termoplastinen elastomeeri
TPU	Termoplastinen polyuretaani
TPC	Termoplastinen kopolyesteri
DLP	Digital light processing
CLIP	Continuous liquid interphase printing

1 JOHDANTO

3D-tulostaminen on yleistynyt merkittävästi viime vuosina niin yksityisten henkilöiden kuin yritystenkin keskuudessa. 3D-tulostuksen antamat mahdollisuudet ovat lähes rajattomat, sekä laitteiden yleistyessä hankintakustannukset ovat merkittävästi aikaisempaa pienemmät. Tämän vuoksi 3D-tulostus voi olla hyvinkin kannattava sijoitus esimerkiksi yritykselle, joka tarvitsee esimerkiksi vaikeasti saatavilla olevia tuotteita tai varaosia, mitkä olisi mahdollista valmistaa 3D-tulostimella.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia 3D-tulostamisen hyödyntämismahdollisuuksia Tapojärvi Oy:n Keminmaan ajoneuvokorjaamolla. Työssä selvitetään, onko 3D-tulostettuja osia mahdollista käyttää vikaantumisherkissä kohteissa tai muissa käyttökohteissa. Esimerkiksi louhintakoneiden varaosat ovat erittäin kalliita ja saatavuus voi olla haastavaa, jonka vuoksi 3D-tulostettavilla varaosilla voitaisiin saavuttaa merkittävät säästöt varaosakustannuksissa, sekä koneelle ei tulisi käyttökatkoja varaosien saatavuuden ollessa heikko. 3D-tulostaminen mahdollistaa myös tarvittaessa muidenkin kuin varaosien valmistamisen.

1.1 Tavoitteet

Tavoitteena on saada yritykselle toimiva ja nykyaikainen 3D-tulostusympäristö sekä ajantasainen käsitys 3D-tulostamisen tarjoamista mahdollisuuksista. Tulostusympäristö mahdollistaa yritykselle tulostusteknisesti mahdollisten varaosien valmistamisen. 3D-tulostusympäristö sisältää tulostimen lisäksi tarvittavat oheistarvikkeet, kuten tulostusmateriaalit, tarvittavat työkalut ja mahdollisesti tulostimelle oman poistoilmavahallinjärjestelmän, joka poistaa huoneilmasta tulostuksesta syntyvät päästöt.

1.2 Rajaukset

Työ rajataan varaosien tulostamisen osalta muovitulosteisiin. Työssä tulostettavien osien tarkoituksena on tutkia, mikä on mahdollista toteuttaa 3D-tulostamista hyödyntäen ja mikä ei, jonka vuoksi ei ole tarkoitus valmistaa lukuisia osia. Mikäli

jokin osa todetaan käyttökohteeseen soveltuvaksi, voi yritys hankkia niihin tarvittavat materiaalit, jolloin niitä voidaan mahdollisuuksien mukaan tulostaa koulun tarjoamilla välineillä. Vaihtoehtoisesti tulostuspalvelun voi myös hankkia ulkopuoliselta yritykseltä ennen kuin yrityksen oma 3D-tulostusympäristö on käyttövalmis.

2 KEHITTÄMISTEHTÄVÄN TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Kehittämisen kohteena on Tapojärvi Oy:n Keminmaan keskuskorjaamon varaosapuoli. Tapojärvi on vuonna 1955 perustettu suomalainen kaivos- ja tehdaspalveluihin erikoistunut yritys, jonka toiminnassa kiertotalous on merkittävänä osana mukana. (Kuva 1) Yritys on kasvava työllistäjä ja työllistää tällä hetkellä lähes 800 työntekijää 13 eri toimipisteessä, jotka sijaitsevat Suomessa, Ruotsissa ja Italiassa. Yritys panostaa paljon tutkimus- ja kehittämistyöhön ja sen innovaatiot säästävät luonnonvaroja, sekä materiaalien tehokkaalla käytöllä säästetään kustannussäästöjä. Esimerkiksi kuonista jatkojalostetut kiviainekset vähentävät ilmaston kuormitusta ja säästää samaan aikaan neitseellisiä materiaaleja. (Tapojärvi Oy 2021.)

Keminmaan keskuskorjaamolla huolletaan pääasiassa Kemin kaivoksella käytössä olevat kuorma- ja henkilöautot. Työkoneet huolletaan ja korjataan kaivoksella, koska ne vaativat lavettikuljetuksen. Isommat kunnostukset tehdään Keminmaan keskuskorjaamolla. Tapojärvellä on myös Kemin kaivoksella maan alla käytettävissä korjaamotilat, jossa tilaa on kuitenkin rajallisesti. Käytössä olevaa kalustoa on runsaasti ja koneet käyvät säännöllisesti määräaikaishuolloissa keskuskorjaamolla. Yrityksen laajaan kalustoon kuuluu esimerkiksi erilaiset maansiirto- ja louhintakoneet kaivostöitä varten, sekä henkilö- ja kuorma-autot. Yrityksellä on myös oma huoltohenkilöstö 11 eri huoltopisteessä. (Tapojärvi Oy 2021.)



Kuva 1. Tapojärven palvelut (Tapojärvi 2022)

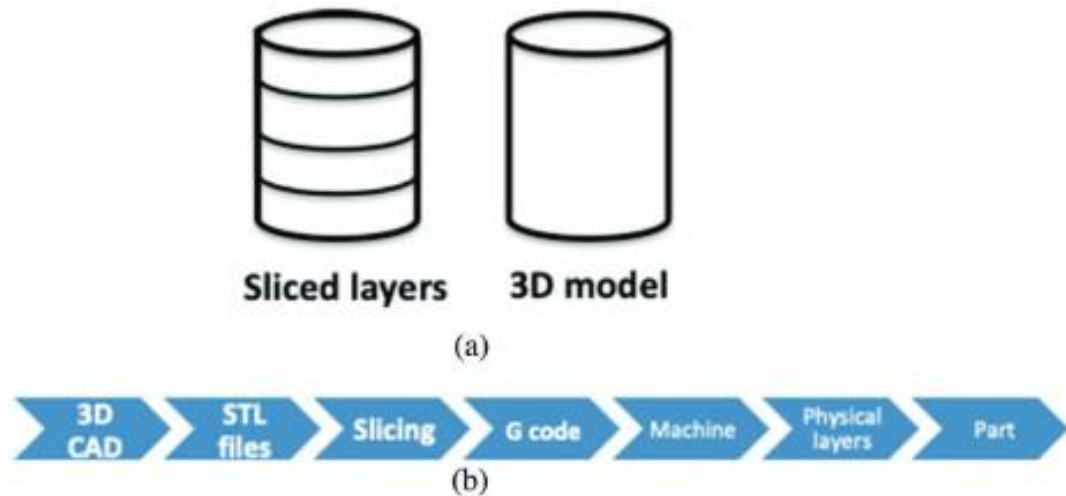
3 3D-TULOSTUS

3D-tulostus on yksi lisäävän valmistuksen menetelmä, jolla voidaan valmistaa osia. 3D-tulostamisessa haluttu kappale valmistetaan 3D-mallin perusteella kerros kerrokselta, minkä vuoksi se eroaa merkittävästi perinteisiin valmistusmenetelmiin nähden, joissa lähtötilanteena on jonkinlainen kappale, josta osa valmistetaan. (Redwood 2022b.) 3D-tulostus mahdollistaa sellaistenkin osien valmistamisen, joita ei yksinkertaisesti ollut aikaisemmin valmistaa, minkä ansiosta se antaa lähes täydellisen vapauden suunnittelijalle (Pannett 2019, 19). Kerroksen paksuus määrittää sen, kuinka lähellä alkuperäistä mallia tulostettu kappale on. Mitä ohuemat kerrokset, sitä tarkempi lopputuote. Kerrospaksuus on valmistettavan kappaleen resoluutio. (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 1–2.)

3D-tulostusta on käytetty pääasiassa tuotekehityksessä prototyyppien valmistukseen, mutta laitteiden ja tulostusmateriaalien kehitys on mahdollistanut sen, että tulostettu on hyvin lähellä valmista tuotetta. Käyttötarkoituksesta riippuen tulostamalla voidaan valmistaa täysin toimivia tuotteita tai osia. (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 1–2.) Ihanteellisimmat käyttökohteet 3D-tulostamiselle ovat osat, joissa on pieniä ja monimutkaisia geometrioita, kuten ilmailussa ja lääketieteessä käytettävät komponentit (Proto Labs 2022).

3.1 3D-tulostamisen hyödyt ja haitat

Merkittävimpana hyötynä 3D-tulostamisessa on sen mahdollisuus valmistaa kappaleita, jotka ovat perinteisillä valmistusmenetelmillä erittäin vaikeita tai jopa mahdottomia valmistaa. 3D-tulostaminen soveltuu erittäin hyvin erilaisten prototyyppien valmistamiseen, koska se on edullinen ja nopea tapa valmistaa erilaisia osia. (Redwood 2022b.) 3D-tulostusprosessin virtaviivaisuuden ansiosta se on nopeaa ja yksinkertaista, sekä monimutkaisenkään osan valmistaminen ei vaadi lukuisia erilaisia koneita ja työvaiheita (Kuva 2). 3D-tulostamisen tekee virtaviivaiseksi se, että kaikki työvaiheet voidaan tehdä tietokoneella. (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 9.)



Kuva 2. 3D-tulostetun osan valmistusprosessi (Kumar 2020, 4)

Hyötynä 3D-tulostamisessa on myös materiaalivalikoiman laajuus, mikä mahdollistaa sen, että voidaan valita käyttökohteeseen parhaiten sopiva materiaali. Tulostetut osat ovat myös kevyitä, mutta kuitenkin kestäviä painoonsa nähden niiden sisällä olevan kennorakenteen ansiosta. Osien keveys säästää materiaalin lisäksi esimerkiksi polttoaineen kulutusta ajoneuvoissa. (Horne & Hausman 2017, 15). 3D-tulostaminen on myös ekologista, koska siitä ei synny juuri ollenkaan jätettä. Jätteenä syntyy pääasiassa epäonnistuneita tulosteita ja tulosteista irrotettavia tukimateriaaleja. Nämä ovat kuitenkin täysin kierrätettävissä uudeksi filamentiksi, mutta se vaatii erilliset laitteet. (Redwood 2022b.)

Tulostamisen haittapuolina on tulostusprosessissa syntyvät UFP- (Ultrafine particles) ja VOC (Volatile organic compound) -päästöt. Tutkimuksissa on havaittu, että kestumuovien käsittely lämpötiloissa (180–280 °C) aiheuttaa kaasu- ja hiukaspäästöjä, mikä on yleinen tulostuslämpötila. Tulostuksessa yleisesti käytettyjen termoplastisten materiaalien lämpökäsittely, kuten PLA, ABS, PET ja PA voi aiheuttaa orgaanisia yhdisteitä. (Gu, Wensing, Uhde, & Salthammer 2019, 1.)

Tulostamisen terveyshaitat vaihtelevat myös käytettävän tulostusmenetelmän mukaan. Tulostuksessa syntyy terveydelle haitallisten kiinteiden ja nestemäisten nanohiukkasten lisäksi myös kaasumaisia yhdisteitä. Nanohiukkasiksi luetaan lä-

pimitaltaan 1–100 nm:n hiukkaset. Pursotuksessa altistutaan pääasiassa nano-hiukkasille, jotka syntyvät tulostuksen aikana, kun taas jauhepetitulostuksessa riskinä on jauhemaiset materiaalit, jotka voivat päätyä hengitysteihin ilman tarvittavaa suojautumista. Nestemäiset hartsit ovat voimakkaasti allergisoivia, joten on syytä suojata iho niitä käsitellessä. Nestemäistä hartsia käytetään valokovetuksessa. (Viitanen ym. 2017, 3,14.)

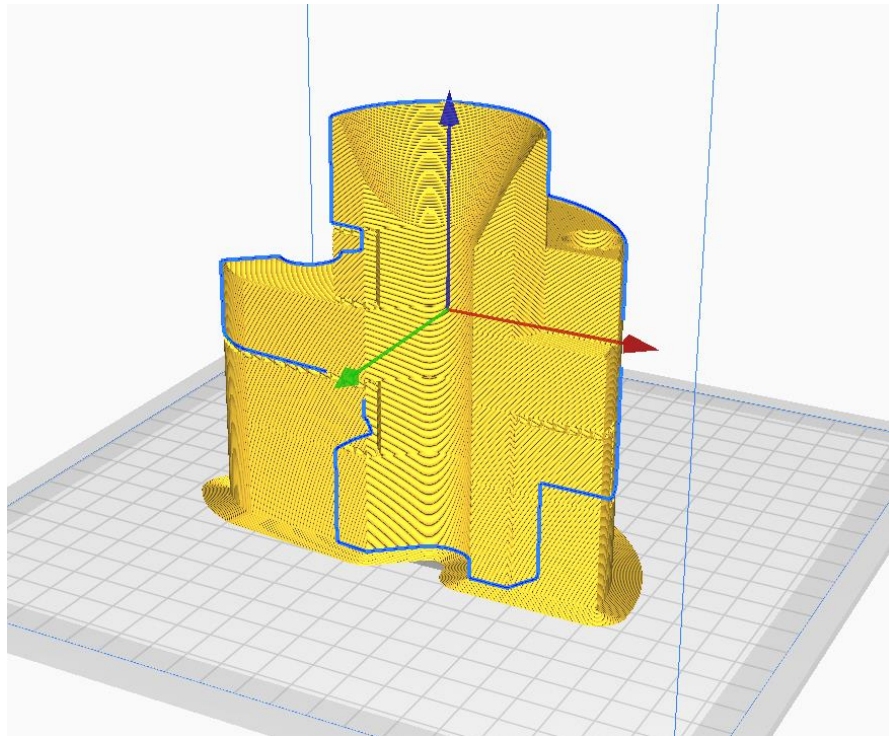
Tulostusprosessin lisäksi myös itse tulostusmateriaalin käsittelyssä, tulosteiden jälkikäsittelyssä sekä tulostuslaitteiston huoltotöissä voidaan altistua terveyshaitoille. Terveyshaitoilta voidaan suojautua tarpeen mukaan suojavälineillä, kuten suojakäsineillä ja hengityssuojaimella. Tulostusprosessissa syntyviä päästöjä voidaan vähentää tehokkaasti esimerkiksi tulostimen koteloinnilla tai riittävällä ympäristön ilmanvaihdolla. Riittävä huoneen ilmanvaihtokerroin riippuu huoneen tilavuudesta ja tulostusajasta, mutta $10 \text{ (dm}^3 \text{ /s) /m}^2$ on riittävä 168 m^3 huoneeseen tulostimen ollessa koko ajan käytössä. (Työterveyslaitos 2016, 25,32.)

3D-tulostamisella on myös rajoittavia tekijöitä, jotka on syytä ottaa huomioon suunniteltaessa 3D-tulostettavaa tuotetta. Yleisimmät rajoittavat tekijät 3D-tulostettavalle osalle ovat osan koko, valmistusmäärä sekä materiaalien asettamat rajoitukset. Useimmiten tulostimilla on rajattu tilavuus, mihin tulostettavan osan on mahduttava sisälle. Osia voi kuitenkin tulostaa osissa, jotka voidaan liittää toisiinsa tulostamisen jälkeen esimerkiksi liimaamalla. Myös tuotantomäärä on syytä ottaa huomioon, koska tulostamiseen kuluva aika voi pienelläkin osalla olla useita tunteja, minkä vuoksi isompien osien tulostaminen on vähemmän kannattavaa. Tämän lisäksi materiaalien asettamat rajoitukset on otettava huomioon, kuten esimerkiksi mekaaniset ominaisuudet, lämmön- ja kemikaalienkestävyys. (Horne & Hausman 2017, 29–31; Redwood 2022b.)

3.2 Viipalointiohjelma

Viipalointiohjelman päätarkoituksena on muuttaa digitaalinen 3D-malli 3D-tulostimelle soveltuvaksi valmistusohjeeksi. Ohjelman käyttäjä voi vaikuttaa tulostusparametreihin, jotka vaikuttavat merkittävästi tulostettavan kappaleen ominaisuuksiin, kuten esimerkiksi pinnanlaatuun ja kerrosten väliseen kestävyteen. Tulostusparametrejä, joihin voidaan vaikuttaa ovat esimerkiksi kerrospaksuus,

seinämävahvuus, tulostusnopeus, kappaleen asento, osan sisälle tuleva täyttökuvio, täyttötiheys sekä tukimateriaalit. Kaikkien viipalointiohjelmien perusperiaate on sama, koska kaikki tulostusmenetelmät lisäävät materiaalia kerros kerrokselta. Näin ollen viipalointiohjelma virtuaalisesti viipaloi 3D-mallin useiksi 2D-kerroksiksi, jotka tulostin valmistaa. (Carolo 2020.) Kuvassa 3 osa viipaloituna ja valmiina tulostettavaksi.

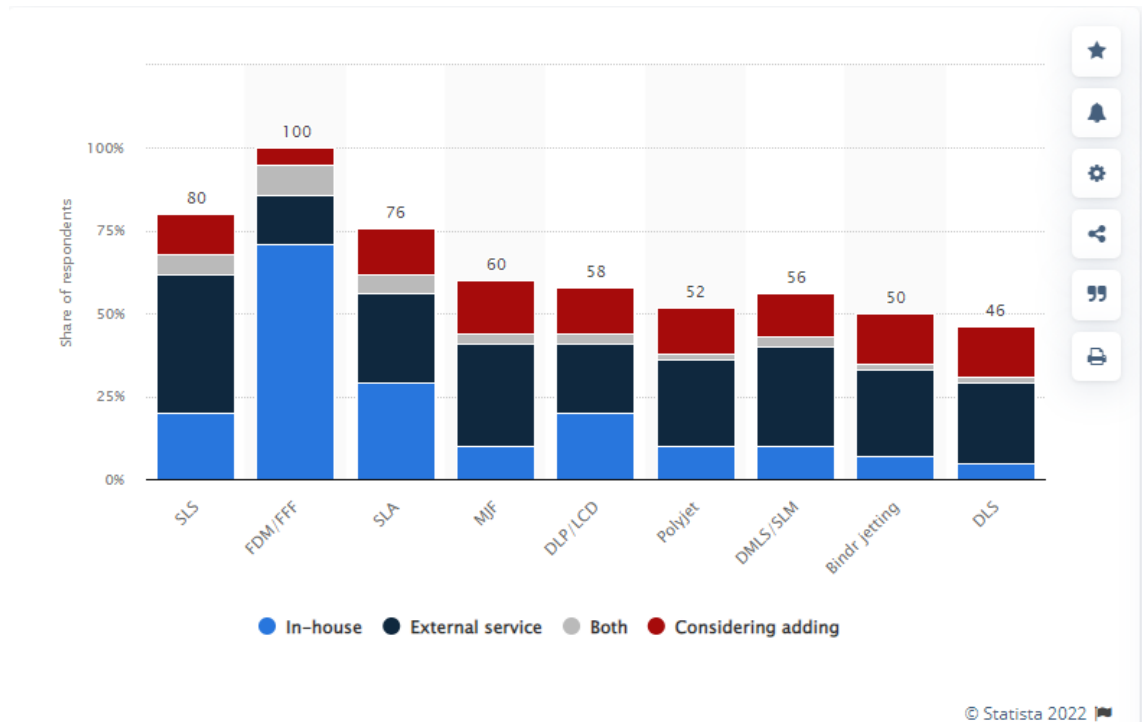


Kuva 2. 3D-tulostettava osa Ultimaker Cura viipalointiohjelmassa

3.3 Tulostusmenetelmät

3D-tulostamisen perusperiaate on, että haluttu 3D-malli valmistetaan kerros kerrokselta valmiiksi tuotteeksi. Tulostusmenetelmät kuitenkin eroavat toisistaan tulostimen toimintaperiaatteen mukaan ja ne on jaettu seitsemään pääryhmään. (Redwood 2022b; Horne & Hausman 2017, 19–28.) Merkittävimmät erot eri tulostusmenetelmien välillä on tulostimen toimintaperiaatteen lisäksi niissä käytettävät materiaalit, kustannukset, sekä tulostusnopeus. Näiden lisäksi mahdolliset lopputuotteet eroavat toisistaan mekaanisesti pinnanlaadultaan ja lujuudeltaan. (Redwood 2022b.)

Yleisimmät tulostustekniikat ovat FDM (Fused deposition modeling), SLS (Selective laser sintering) ja SLA (Stereolithography). Tulostustekniikoista FDM on ylivoimaisesti suosituin kuluttajien keskuudesta sen edullisuuden ja helppokäyttöisyytensä ansiosta, kuten kuviosta 1 voi havaita. Yrityksissä tulostusmenetelmien väliset erot eivät ole niin merkittävät kuin aikaisempina vuosina. (Alsop 2022.)

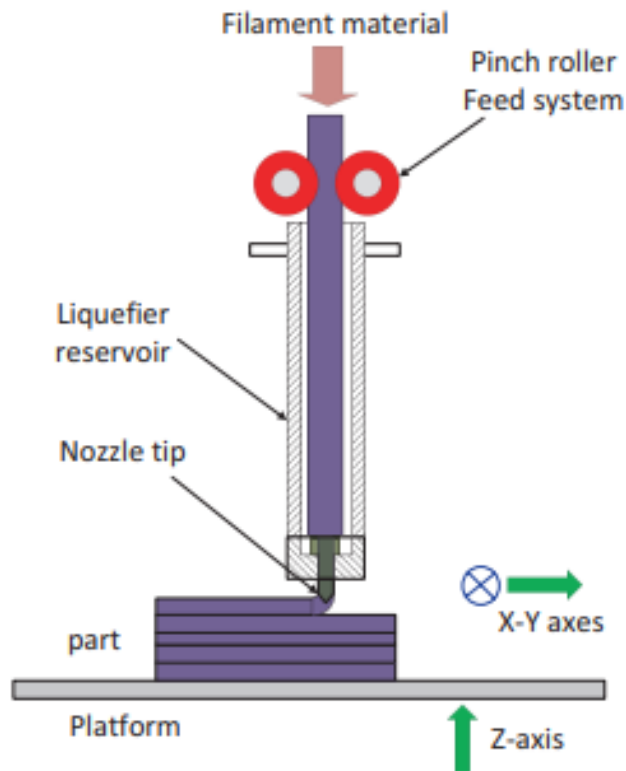


Kuvio 1. Käytetyimmät 3D-tulostusmenetelmät (Alsop 2022)

3.3.1 Pursotus - Material extrusion

Pursotus on yleisin tulostusmenetelmä polymeerikomposiiteille. Menetelmässä käytettävät yleisimmät käytettävät materiaalit ovat termoplastisia niiden alhaisen sulamislämpötilan vuoksi. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017,7; Fink 2018, 70.) Osa valmistetaan kerros kerrokselta pursottamalla sulaa termoplastista lisäainetta suuttimen läpi. Filamentiksi kutsuttava lisäaine on rullalla olevaa lankaa, jota syötetään suuttimen läpi tulostusalustalle, minkä jälkeen se kovettuu jäähtyessään (Kuva 4). Tulostusalusta on lämmitetty, jotta tuloste pysyy hyvin kiinni alustassa tulostuksen ajan. (Redwood 2022b) Suuttimen läpi syötettävä lisäaine on lähellä sulamispistettä, mikä tekee siitä puolikiinteää. Materiaalin syöttöpaineen pysyessä vakiona pysyy sen virtausnopeus samana. Virtausnopeudella ja

tulostuspään liikkumisnopeudella voidaan vaikuttaa kerroksen paksuuteen. (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 171.) Suutin liikkuu kolmella akselilla tulostusalustan päällä. Suutin liikkuu ensiksi x- ja y-akselilla halutun reitin mukaisesti, kunnes kerros on valmis, minkä jälkeen se liikkuu yhden kerroksen verran z-akselilla ylöspäin. Tämä toistetaan, kunnes haluttu kappale on valmis. (Redwood, 2022b)

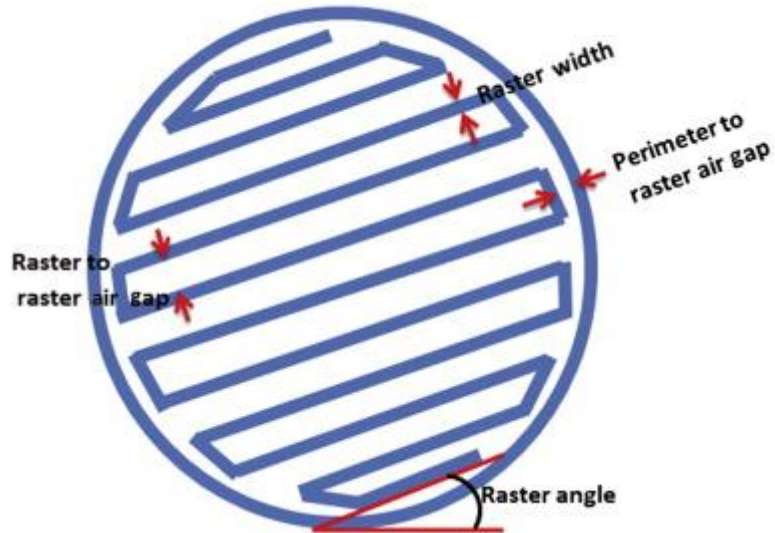


Kuva 3. Pursotuksen toimintaperiaate (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2015, 174)

Pursotuksen etuina on materiaalien ja laitteiden alhaiset hankintakustannukset. Tämän lisäksi materiaalivalikoima on erittäin laaja, sekä tulostusprosessi on helppo ja nopea, jonka vuoksi pursotus on yleisin tulostusmenetelmä työpöytäkäytössä. Materiaalien ominaisuuksia on paranneltu esimerkiksi sekoittamalla niihin muita materiaaleja. (Micallef 2015, 18; Redwood 2022b.)

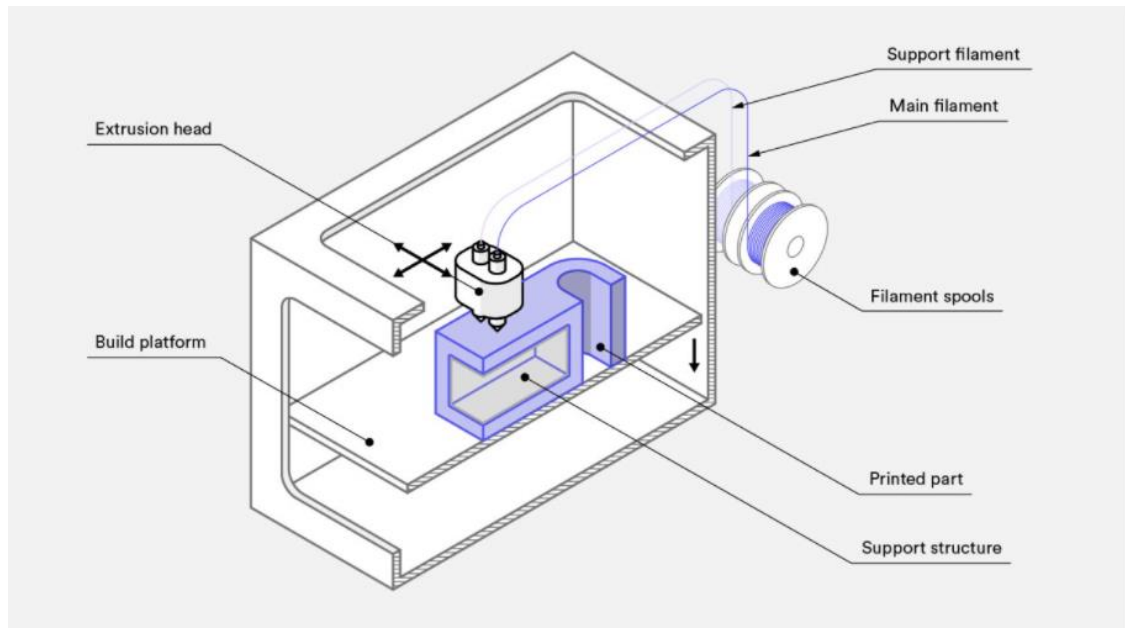
Huonoina puolina pursotuksessa on se, että tulosteiden kerrosten väliset liitokset eivät ole niin vahvoja. Osan lujuuteen vaikuttaa kuitenkin hyvin paljon kerrosten

paksuus, osan suuntaus tulostettaessa, rasterikulmasta, sekä rasterin välisestä ilmvälisestä (Kuva 5). (Fink 2018, 70; Redwood 2022b.) Tulosteet eivät myöskään välttämättä ole esteettisesti niin hyvän näköisiä kuin muilla tulostusmenetelmillä valmistetut tulosteet kerroksien näkyvyyden vuoksi.



Kuva 4. Rasterin kulma, paksuus ja ilmväli (Hashmi, S. 2014)

Pursotusmenetelmällä voidaan tehdä tarkkoja yksityiskohtia ainoastaan isommille osille materiaalin kerrostuksesta johtuen. Pienemmille osille 0,2 mm:n tarkkuudella suunnitteleminen ei ole kannattavaa, koska menetelmän kerrospaksuus on 0,05 – 0,3 mm ja toleranssi on $\pm 0,5$ mm (Micallef 2015, 96; Redwood 2022a.) Menetelmä on kuitenkin kustannustehokas ja materiaalivalikoima on laaja, mikä tekee siitä erittäin suosittua ja käyttökelpoista esimerkiksi toiminnalliseen testaukseen, konseptimallien ja prototyyppien valmistamiseen. Loppukäyttöön tarkoitettuja laadukkaita osia jopa $\pm 0,2$ mm:n toleranssilla voidaan kuitenkin valmistaa teollisuuskoneilla ja -materiaaleilla, mutta hankintakustannukset nousevat merkittävästi. (Formlabs 2022; Proto Labs 2022; Redwood 2022a.) Kuvassa 6 tyypillisen pursotusmenetelmää käyttävän FDM-tulostimen rakenne.

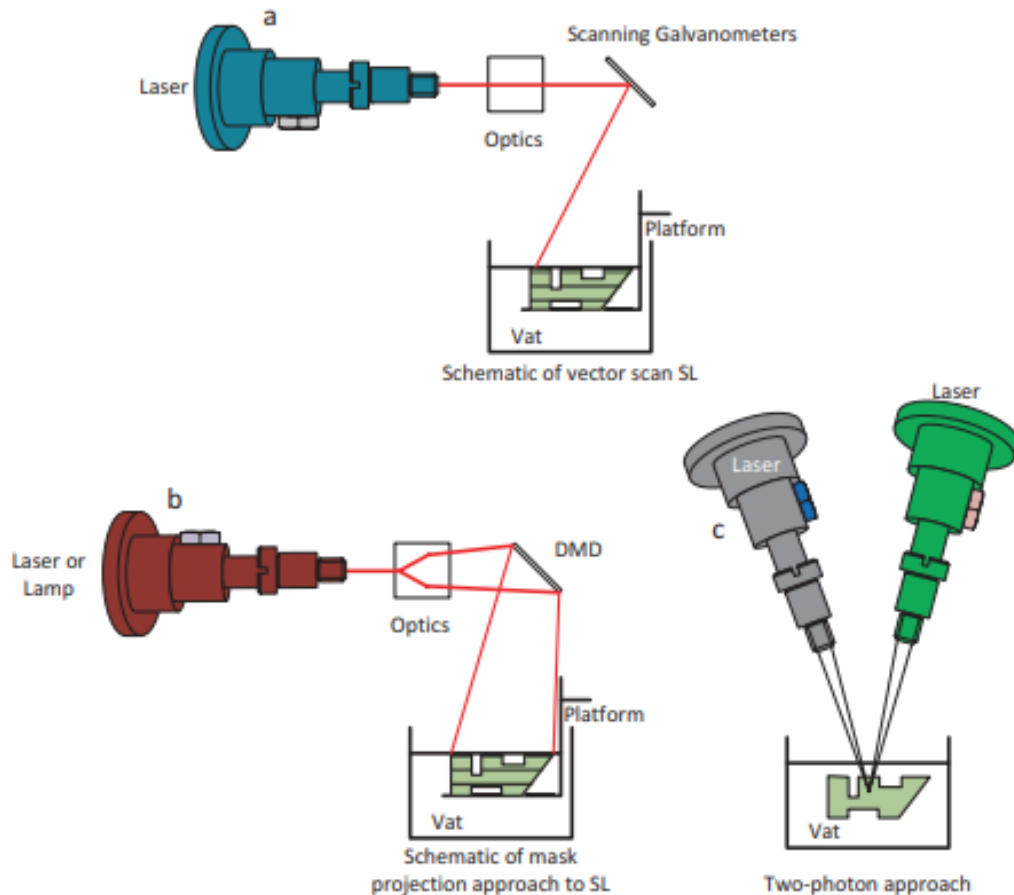


Kuva 5. Tyypillisen FDM-tulostimen rakenne (Redwood 2022a)

3.3.2 Valokovetus altaassa - Vat polymerization

Valokovetus altaassa on tulostusmenetelmä, jossa säteilyssä kovettuvaa nestemäistä hartsia kovetetaan valikoidusti UV-valolla (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017, 8). Se on erittäin tarkka tulostusmenetelmä, jolla voidaan tehdä 0,1 mm:n yksityiskohtia. Tulostusmenetelmällä voidaan saavuttaa jopa 10 µm:n kerrospaksuun tietyissä olosuhteissa Tulostusalusta on upotettuna hartsialtaaseen, jonka pintaan UV-valo kovettaa hartsin. Kerroksen valmistuttua tulostusalusta siirtyy kerroksen verran ja UV-laser kovettaa uuden kerroksen toisen kerroksen päälle. Tämä toistetaan, kunnes osa on valmis. (Micallef 2015, 96; Fink 2018, 73.) Kuvassa 7 on esitetty erilaisten valokovetusta käyttävien tulostimien toimintaperiaate.

Tulostuksen jälkeen osa on puhdistettava huolellisesti ylimääräisestä hartsista, jonka jälkeen se kovetetaan lopullisesti UV-valolla. Tulostimen käyttäjän on myös poistettava tukimateriaalit tulosteesta, joilla tuloste on kiinnitetty tulostusalustaan. (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 88.)

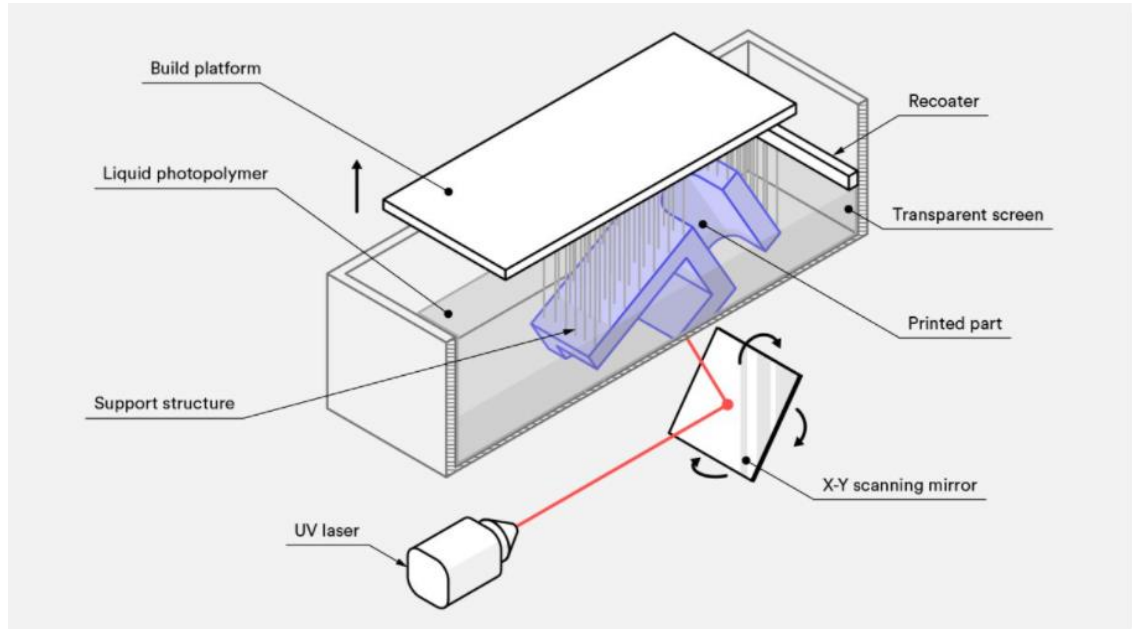


Kuva 6. Valokovetuksen toimintaperiaate (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 78)

Valokovetusta käytäviä 3D-tulostimia on saatavilla kolmea erilaista. SLA-tulostimet käyttävät yhtä lasersädettä, mikä mahdollistaa erittäin tarkan lopputuloksen (Kuva 7 a). DLP-tulostimet (Digital Light Processing) eroavat SLA-tulostimista siten, että ne käyttävät digitaalista valoprojektoria yksittäisen lasersäteen sijasta (Kuva 7 b). Valoprojektori heijastaa kerralla koko osan poikkileikkauksen, mikä mahdollistaa nopeamman tulostamisen. (Proto Labs 2022.) Nestemäisen hartsin kovettava valo tulee digitaaliselta näytöltä, jonka vuoksi osan resoluutio ei ole niin tarkka kuin laserilla valmistetun (Redwood 2022b). Kuvassa 8 on esitetty tyypillisen SLA-tulostimen rakenne.

CLIP-tulostimet (Continuous Liquid Interphase Printing) ovat käytännössä samoja kuin DLP-tulostimet, mutta tulostusalusta on jatkuvassa liikkeessä, jolloin saadaan tarkempi lopputulos, koska kerrosten väliset rajat tasoittuvat. (Redwood

2022b.) Two-photon polymerization (2PP) on valokovetusta käyttävä nanorakenteiden tulostusmenetelmä, joka mahdollistaa jopa $0,2 \mu\text{m}$:n resoluution (Kuva 7 c). (TU Wien 2021.)



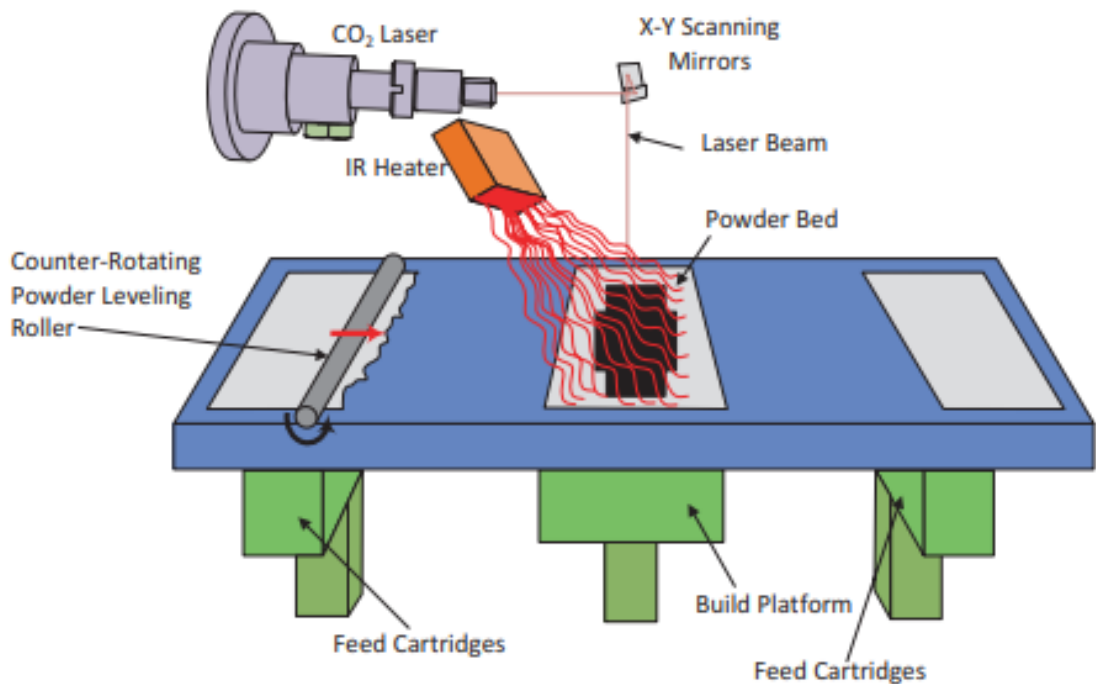
Kuva 7. SLA-tulostimen rakenne (Redwood 2022a)

Merkittävin etu valokovetuksella muihin tulostusmenetelmiin nähden on erittäin hyvä pinnanlaatu ja resoluutio, minkä vuoksi menetelmällä onnistuu hyvinkin monimutkaistenkin osien valmistus pienillä toleransseilla. Tämän lisäksi menetelmässä ei käytetä suutinta, jolloin vältetään suuttimen tukkeutumiselta, mikä on yleinen ongelma tulostettaessa. Tulostettavien osien tarkkuuteen ja kovettumisaikaan voidaan vaikuttaa lasertehon intensiteetillä, valotuksen kestolla sekä skannausnopeudella. (Fink 2018, 73–74.) Kovetuksen jälkeen osista saadaan täysin veden- ja ilmanpitäviä, mutta kovettamisen jälkeen osia ei enää voida sulattaa. Osat ovat myös täydellisen kovettumisen jälkeen isotrooppisia, eli ne ovat rakenteeltaan suunnasta riippumattomia toisin kuin FDM-tulostimella valmistetut tulosteet, joilla on taipumus rikkoutua kerrosten väliltä. (Redwood 2022b.) Menetelmällä tulostettujen osien tarkat yksityiskohdat, tiukat toleranssit, sekä sileä pinnan laatu parantavat osan toiminnallisuutta. Menetelmä soveltuu hyvin toimivien prototyyppien valmistamiseen sekä valumallien valmistamiseen. Tämän lisäksi se on laajasti käytetty lääketieteellisyydessä esimerkiksi anatomisissa malleissa, sekä hammashoidossa ja korujen prototyyppien valmistamisessa. (Formlabs 2022; Proto Labs 2022.)

3.3.3 Jauhepetisulatus - Powder bed fusion

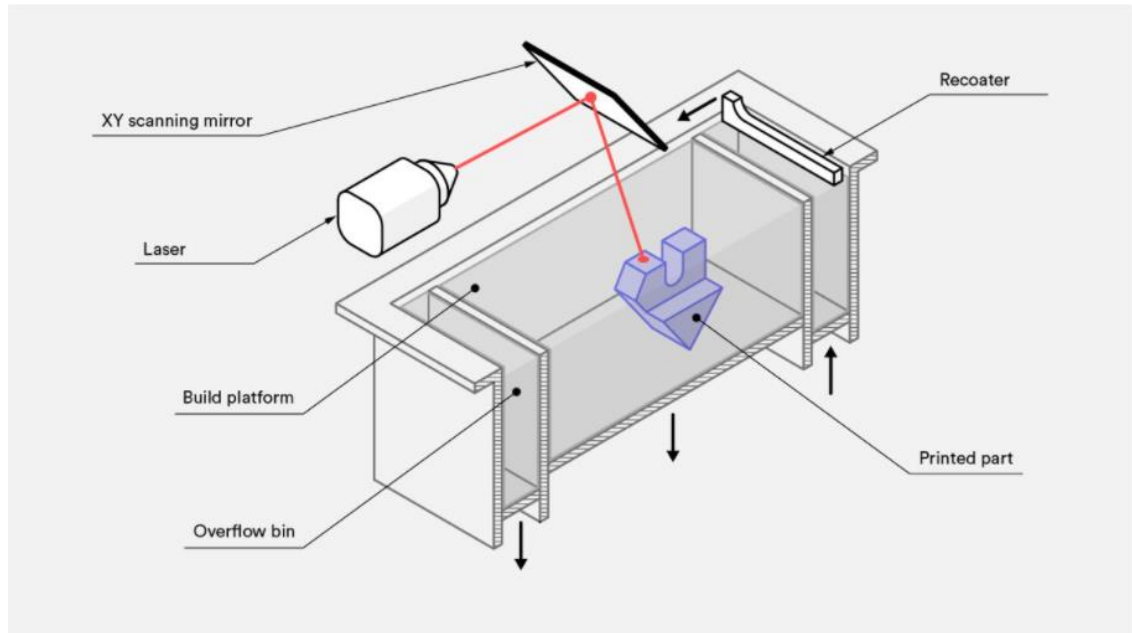
Jauhepetisulatusta käytetään Selective Laser Sintering (SLS) ja Selective Laser Melting (SLM) tulostusmenetelmissä (; SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017,7; Kumar 2022, 41). Menetelmien toimintaperiaate on sama, mutta SLM-menetelmää käytetään metallien tulostamisessa (Micallef 2015, 19). Tulostusmenetelmässä osa valmistetaan jauhealtaaseen. Kerrosten välissä tulostin tasoittaa jauheen pinnan, jonka jälkeen jauhekerros sulatetaan tai sintrataan valikoidusti aikaisempaan kerrokseen kiinni lasersäteellä (Kuva 9). (Fink 2018, 73; Kumar 2022, 41.) Menetelmä on samankaltainen, kuin sideaineen suihkutetus, mutta sideaineen sijasta käytetään laseria sulattamaan materiaalijauhe toisiinsa kiinni, jonka vuoksi menetelmässä käytetään jauhemaisia polymeerimateriaaleja (Micallef 2015, 19; Fink 2018, 73).

Osaa ympäröivä jauhe toimii tukimateriaalina, mikä on merkittävä hyöty muihin tulostusmenetelmiin nähden. Jauheen tulee antaa jäähtyä tulostusprosessin jälkeen, jonka jälkeen osa voidaan poistaa jauheesta ja puhdistaa. Jauhepetisulatuksessa pinnan laatu on yleensä karkea, mutta tarvittaessa osa voidaan viimeistellä esimerkiksi puhaltamalla lasikuulalla paremman pinnanlaadun saavuttamiseksi. Tulostusmenetelmän toleranssi on $\pm 0,3$ mm, mikä on hieman pursotusmenetelmää parempi. (Micallef 2015, 96; Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 127; Redwood 2022a.)



Kuva 8. Jauhepetisulatuksen toimintaperiaate (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 126)

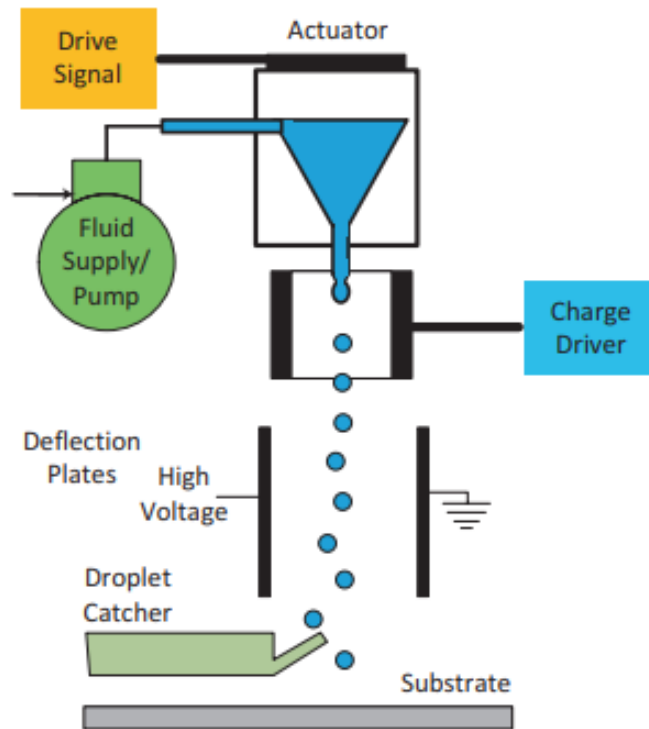
Jauhepetisulatuksella valmistetuilla osilla on parhaimmat mekaaniset ominaisuudet verrattuna muihin 3D-tulostusmenetelmiin, mutta osan pinnan resoluutio on hyvin rajallinen, jonka vuoksi tulostuspinta on karkea. Tulostettava materiaali voi myös sisältää epäpuhtauksia, koska tulostusprosessista ylijäävä jauhe käytetään uudelleen. (Fink 2018, 73.) Käytetyin materiaali on nylon, mutta erilaiset jauhe-sekoitukset ovat kasvattaneet suosiotaan (Redwood 2022b). Materiaalina voidaan käyttää käytännössä kaikkea, joka voidaan sulattaa (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 127). Tulostusmenetelmä on aikaa vievä, mutta suurissa osakokonaisuuksissa se on nopeampi sen ansiosta, että useita osia voidaan tulostaa jauheeseen päällekkäin kuution muotoisessa tilassa (Proto Labs 2022; Redwood 2022b). Menetelmä soveltuu hyvin toiminnallisten osien testaamiseen, sekä prototyyppien valmistamiseen ruiskupuristusta varten (Proto Labs 2022). Kuvassa 10 on esitetty tyypillisen SLS-tulostimen rakenne.



Kuva 9. SLS-tulostimen rakenne (Redwood 2022b)

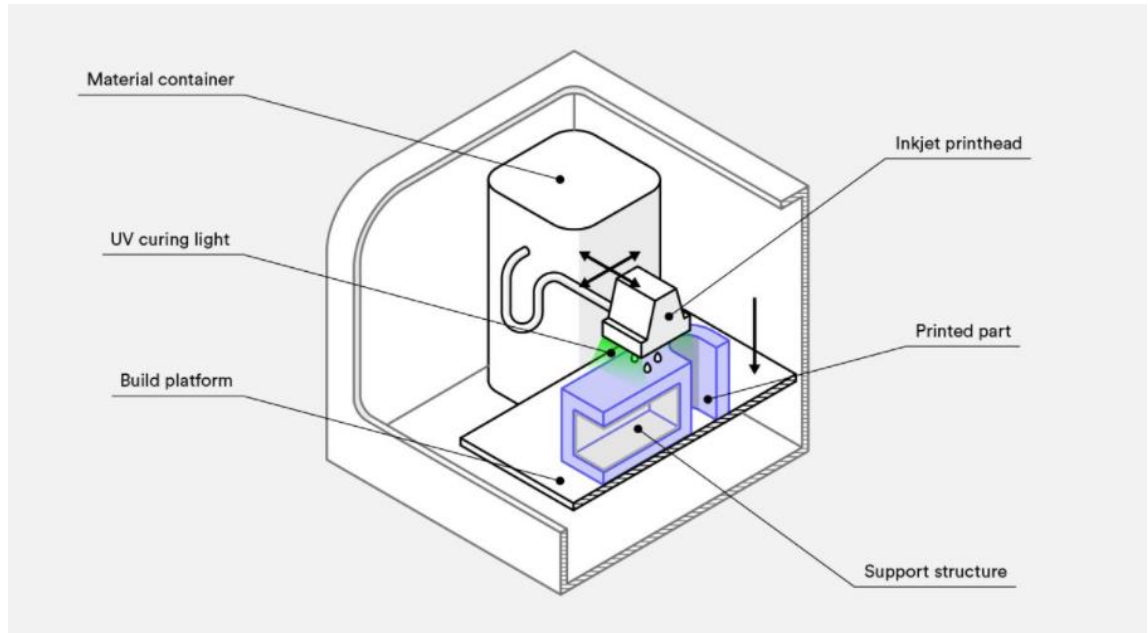
3.3.4 Materiaalin suihkutus - Material jetting

Materiaalin suihkutuksessa osa rakentuu pienistä nestemäisistä ftopolymeeri-hartsipisaroista. Satoja pieniä pisaroita suihkutetaan tulostusalustalle, jonka jälkeen ne kovetetaan lämmöllä tai UV-valolla (Kuva 11). Menetelmä on yksi nopeimmista ja tarkimmista 3D-tulostusmenetelmistä, mikä saa sen erottumaan muista menetelmistä. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017,7; Gregurić 2019.)



Kuva 10. Materiaalin suihkutuksen toimintaperiaate (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 216)

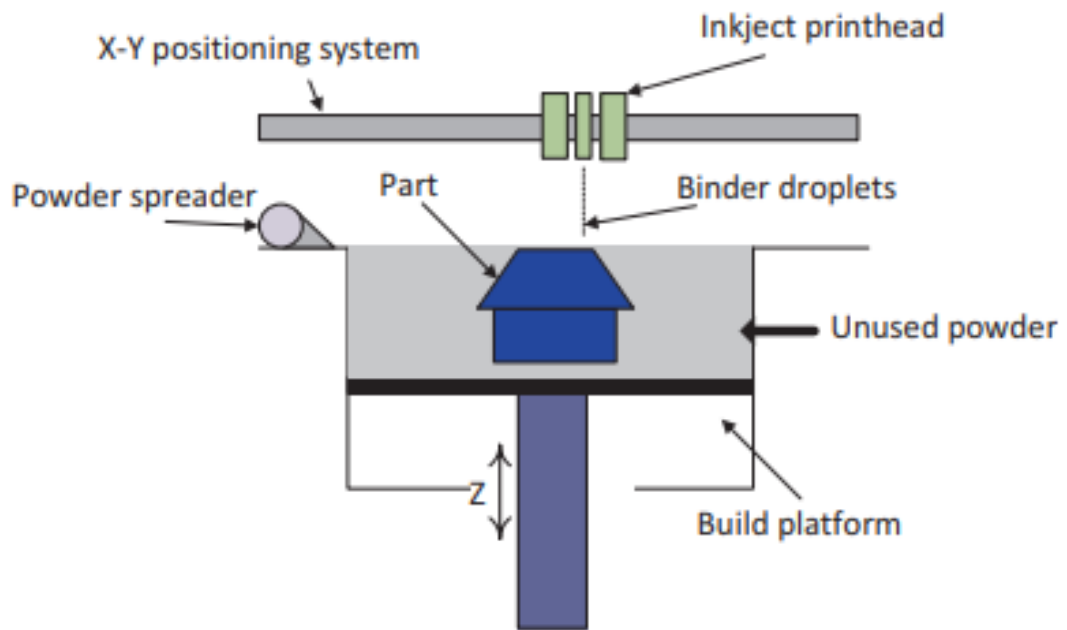
Menetelmässä käytettävien materiaalien valikoima on laaja. Tulostimella voidaan käyttää useaa eri materiaalia huolimatta siitä, että siinä on vain yksi tulostuspää. Tämä mahdollistaa esimerkiksi helposti irrotettavat tukimateriaalit tai joustavien ja kovien materiaalien samanaikaisen tulostamisen. Tulostusmenetelmän huonona puolena on sen kallis hinta sekä se, että tukimateriaalit tulostetaan kiinteänä, jonka vuoksi materiaalihävikkiä on normaalia enemmän. (Redwood 2022b.) Kuvassa 12 on esitetty tyypillisen materiaalin suihkutustulostimen rakenne.



Kuva 11. Materiaalisuihkutulostimen rakenne (Redwood 2022b)

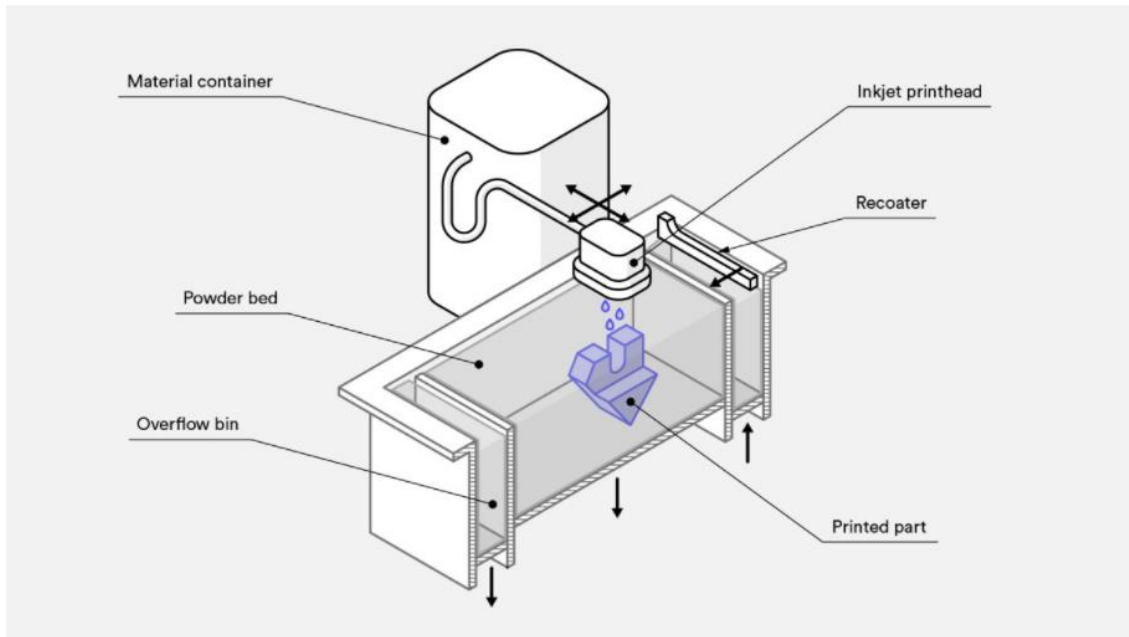
3.3.5 Sideaineen suihkutetus - Binder jetting

Sideaineen suihkutuksessa osa valmistetaan jauhepetiin kovettamalla valikoidusti siinä olevaa jauhetta. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017, 7.) Jauhe kovetetaan sideaineella, joka suihkutetaan tulostuspäässä olevien suuttimien läpi. Jauhepetiä lasketaan aina yhden kerroksen verran kerroksen valmistuttua, minkä jälkeen uusi jauhekerros levitetään valmistuneen kerroksen päälle, kuten esimerkiksi jauhepetisulatuksessa. Prosessi toistuu, kunnes osa on valmis, minkä jälkeen valmistetun osan annetaan kovettua jauhepedissä (Kuva 13). (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 287.)



Kuva 12. Sideaineen suihkutuksen toimintaperiaate (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 238)

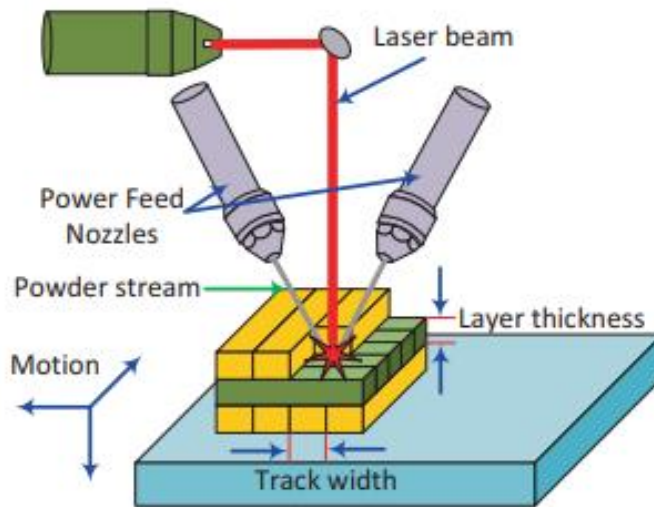
Materiaalivalikoima on hyvin laaja, koska sideaine pitää valmistettavat osat ka-
 sassa. Tämä mahdollistaa monien jauhemaisien materiaalien käyttämisen, kuten
 esimerkiksi metallien tai keraamien. Menetelmällä voidaan valmistaa edullisesti
 kestäviä osia hyvillä toleransseilla. Käyttöön tulevat osat joudutaan kuitenkin sint-
 raamaan, minkä vuoksi ne kutistuvat merkittävästi. Tämä voi vaikeuttaa valmis-
 tettävien osien suunnittelua. (Redwood 2022b.) Materiaalien edullisuus, tulostus-
 nopeus sekä suuri tulostustilavuus tekevät menetelmästä ihanteellisen monimut-
 kaisten osien massatuotantoon (Gregurić 2019.) Kuvassa 14 on esitetty tyypilli-
 sen sideainesuihkutulostimen rakenne.



Kuva 13. Sideainesuihkutulostimen rakenne (Redwood 2022b)

3.3.6 Suorakerrostus - Direct energy deposition

Suorakerrostuksessa osa valmistuu sulattamalla jauhetta tai lankaa samaan aikaan, kun sitä annostellaan tulostusalustalle. Materiaalin sulattamiseen käytetään yleensä elektronisuihkua, plasmaa tai laseria (Kuva 15). (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017, 7.) Menetelmää käytetään pääasiassa metallille, mutta se voi toimia myös keraameille ja polymeereille. (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 285).

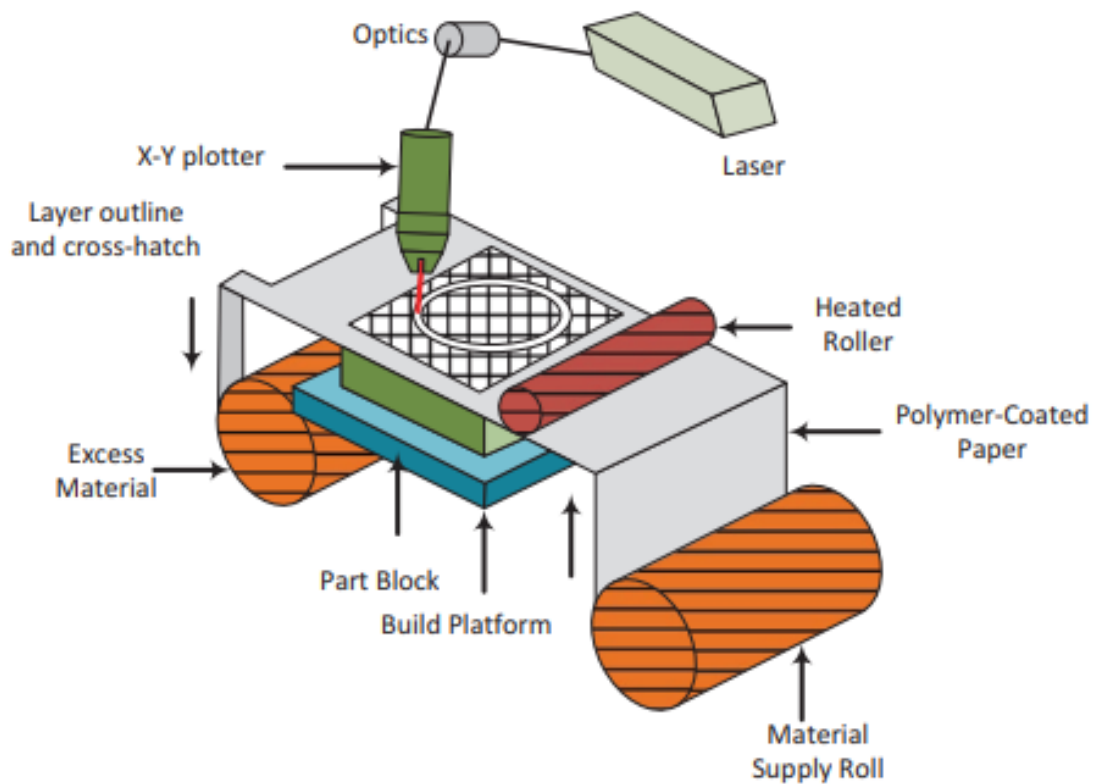


Kuva 14. Suorakerrostuksen toimintaperiaate Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 286)

Tulostimia on olemassa 3- ja 5 akselisia. 3-akselinen tulostin valmistaa osan pur-sotusmenetelmän tavoin kerros kerrokselta, mutta 5-akselinen tulostin voi lisätä materiaalia mistä kulmasta tahansa. Merkittävimpana etuna menetelmälle on sen nopeus, materiaalien edullisuus ja tulosteiden hyvät mekaaniset ominaisuudet. Tulostuksen pinnanlaatu on kuitenkin matalan resoluution vuoksi usein huono, minkä vuoksi ne vaativat jälkikäsittelyä paremman jäljen saavuttamiseksi. (Redwood 2022b.)

3.3.7 Kerroslaminointi - Sheet lamination

Kerroslaminoinnissa valmistettavan kappaleen poikkileikkaus leikataan kerros kerrokselta materiaaliarkista, minkä jälkeen ne liitetään toisiinsa (Kuva 16) (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017, 7). Leikkauksessa voidaan käyttää laseria tai mekaanista leikkuria. Käytetystä materiaalista riippuen leikatut kerrokset voidaan liittää toisiinsa esimerkiksi liimalla, lämmöllä tai hitsaamalla. (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 253–254.)



Kuva 15. Kerroslaminoinnin toimintaperiaate (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 254)

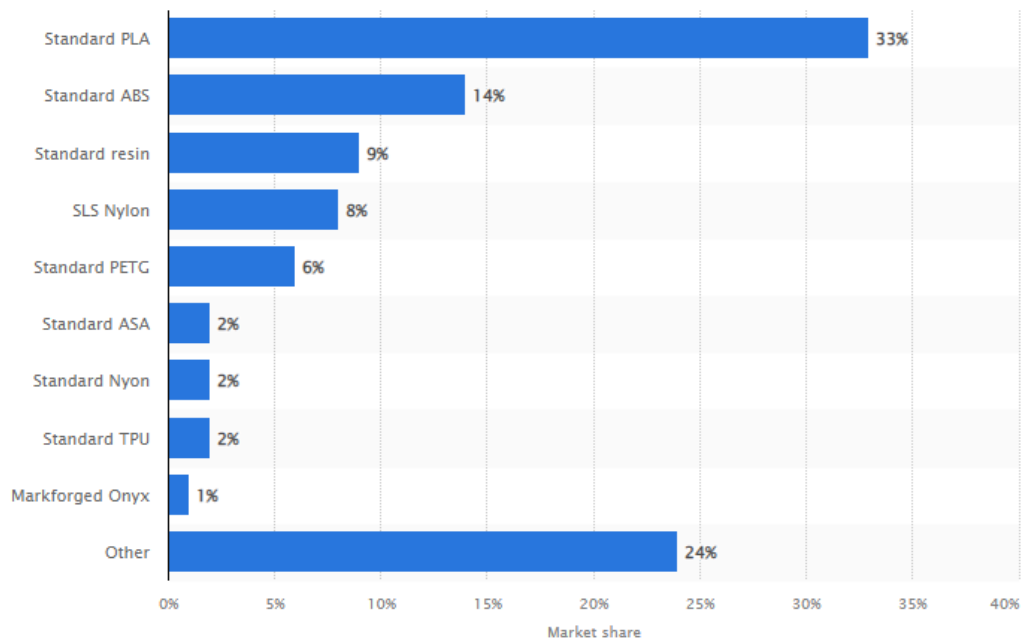
Menetelmässä voidaan käyttää materiaalina esimerkiksi paperia, erilaisia polymeerejä, keraameja ja lähes kaikkia metalleja. Kerroslaminointi on kustannustehokas ja sillä voidaan tehdä usean eri materiaalin kerrostuksia. Menetelmällä ei voida kuitenkaan valmistaa kovin monimutkaisia osia, minkä vuoksi esimerkiksi laserleikkurilla voidaan tehdä vastaavia osia. Kerrosten välinen heikkous myös huonontaa osien mekaanisia ominaisuuksia. (Redwood 2022b.)

4 3D-TULOSTUSMATERIAALIT

3D-tulostuksessa käytetään hyvin paljon erilaisia polymeerejä. Menetelmä onkin alun perin kehitetty käyttämään eri muovilaatuja, mutta myöhemmin menetelmää on alettu käyttämään myös komposiiteille, metalleille ja keraameille. (Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani 2021, 10.) Tämä opinnäytetyö on rajattu muovitulostuksiin, jonka vuoksi tässä luvussa tullaan käsittelemään ainoastaan erilaisten yleisimmin käytettyjen polymeeripohjaisten tulostusmateriaalien käyttöä 3D-tulostamisessa.

Muovien 3D-tulostamiseen käytetään erilaisia lankana, jauheena tai nestemäisenä hartsina saatavia materiaaleja. Materiaalin valinta vaihtelee tulostusmenetelmän ja käyttökohteen mukaan. Tulostuksessa käytettävät materiaalit vaativat erilaisia tulostusparametrejä tulostamisen onnistumiseen. Eri tulostusmateriaaleilla voidaan vaikuttaa tulostettavan tuotteen mekaanisiin tai esteettisiin ominaisuuksiin. (3Dnatives 2020.)

Pursotuksessa käytettävien materiaalien on erittäin laaja. Yleisimmät pursotuksessa käytettävät materiaalit ovat PLA, ABS, PETG, (Kuvio 2) sekä erilaiset joustavat materiaalit, kuten TPE, TPU ja TPC. Myös nylon, polykarbonaatti ja polypropeeni ovat yleisesti käytettyjä filamentteja. Erikoisempia materiaaleja ovat puu- tai metallitäytteiset filamentit, sähköä johtavat filamentit ja magneettiset filamentit. Muita erikoisominaisuuksia omaavia filamentteja ovat esimerkiksi pimeässä hohtava, väriä vaihtava tai biohajoava filamentit. Näiden lisäksi on olemassa myös lasi- ja hiilikuituvahvisteisia filamentteja, jotka ovat yleisimmin nylonia. (ALL3DP 2021.)



© Statista 2022

Kuvio 2. Käytetyimmät tulostusmateriaalit 2018. (Statista 2022)

4.1 PLA (Polyaktidi)

Polyaktidi eli PLA on yksi yleisimmistä pursotuksessa käytettävistä materiaaleista. Filamentti valmistetaan viljelykasveista, joka tekee siitä edullisen, uusiutuvan ja biohajoavan materiaalin. (Simplify3D 2022.) PLA-filamentti on edullista ja sitä voidaan tulostaa alhaisella lämpötilalla ilman lämmitettävää tulostusalustaa, koska siihen ei juurikaan tule lämpövääristymiä, mikä tekee siitä helppokäyttöisen materiaalin. Nämä seikat tekevät siitä suosituimman 3D-tulostusmateriaalin. PLA-filamentin huonoja puolia ovat sen matala lämmönkesto ja melko huonot mekaaniset ominaisuudet, mutta se on mittatarkka ja soveltuu erittäin hyvin esimerkiksi prototyyppien ja näköismallien valmistamiseen. (ALL3DP 2021.)

4.2 ABS (Akryylinitriilibutadienistyreeni)

ABS on myös hyvin suosittu ja edullinen tulostusmateriaali. Tulostaminen ABS-filamentilla on hieman vaikeampaa, kuin esimerkiksi PLA-filamentilla, minkä vuoksi se ei ole niin suosittua jokapäiväisessä tulostamisessa. ABS vaatii lämmitetyn tulostusalustan ja mielellään myös tartuntaliimaa lämpövääntelyn vuoksi. ABS-filamentin ominaisuudet ovat kuitenkin huomattavasti paremmat. (ALL3DP

2021; Formlabs 2022.) ABS on mekaanisilta ominaisuuksiltaan hyvin sitkeää ja iskunkestävää. Se kestää myös hyvin lämpöä, sekä kulumista ja soveltuu erinomaaisesti ulkokäyttöön ja toiminnallisiin prototyyppihin. (Formlabs 2022.) Tulostettaessa ABS-filamentilla huoneessa olisi hyvä olla riittävä ilmanvaihto tai tulos-
timessa kotelointi poistoilmajärjestelmään liitettynä hajujen ja muiden haitallisten yhdisteiden vuoksi. Mikäli tulostusympäristön lämpötilaan voidaan vaikuttaa, voidaan saada merkittäviä etuja, koska ABS voi kutistua merkittävästi jäähtyessään. (Formlabs 2022; Simplify3D 2022.)

4.3 PETG (Polyeteenitereftalaatti)

PETG on glykolilla lisäaineistettu versio PET:stä, joka on täysin kierrätettävä materiaali. Glykoli vähentää PET:n haurautta, jolloin saavutetaan ABS:n kaltaiset mekaaniset ominaisuudet. (3Dnatives 2020) PET on yksi maailman käytetyimmistä muoveista Raakaa PET:tä käytetään kuitenkin vain hyvin harvoin 3D-tulostamisessa, mutta PETG kasvattaa suosiotaan tulostuskäytössä. (ALL3DP 2021.) Se on puolijäykkä materiaali, jolla on hyvä iskunkestävyys ja lämpöominaisuudet. Tulostuspinta on kiiltävä sileä, mutta pehmeä, jonka vuoksi se altistuu kulumiselle. (Simplify3D 2022.) PETG on monipuolinen materiaali hyvillä ominaisuuksilla, sekä matalilla tulostuslämpötiloilla. Se kestää kosteutta ja kemikaaleja, minkä vuoksi se on hyvä kosteisiin olosuhteisiin tarkoitettujen toiminnallisten osien valmistukseen. (ALL3DP 2021; Formlabs 2022.)

4.4 TPE, TPU ja TPC

TPE, TPU ja TPC ovat joustavia materiaaleja hieman erilaisilla ominaisuuksilla. Materiaalia on saatavilla tulostuskäyttöön usealla eri shore-kovuudella pehmeästä kovaan. (3DJAKE 2022.) Termoplastiset elastomeerit (TPE) ovat kumimaisilla ominaisuuksilla omaavia muoveja. Kumimaiset ominaisuudet tekevät niistä erittäin joustavia ja kestäviä. Termoplastinen polyuretaani (TPU) on suosittu tulostusmateriaali, koska se on hieman jäykempää, kuin TPE, mikä tekee siitä helpompaa tulostaa. Se on myös hieman kestävämpää ja säilyttää elastiset ominaisuudet paremmin kylmässä. Termoplastinen kopolyesteri (TPC) on TPE:n variaatio, jolla on parempi kemikaalien-, uv-säteilyn- ja lämmönkestävyys. (ALL3DP

2021.) Joustavat materiaalit mahdollistavat muotoa muuttavien esineiden tulostamisen, mikä on paljon käytetty menetelmä muottien valmistamiseen. Niillä on myös hyvä iskunkestävyys ja erinomaiset värinänvaimennusominaisuudet Tulostusominaisuuksiltaan joustavat materiaalit ovat melko samanlaisia kuin PLA. (3Dnatives 2020; Formlabs 2022.)

4.5 Nylon

Nylon on hyvin suosittu materiaali jauhepölytulostuksessa, mutta nylonfilamenttia on myös saatavilla pursotustekniikkaa käyttäville tulostimille (3Dnatives 2020). Se on suosittu materiaali muoviteollisuudessa, joka tunnetaan sen kestävydestä ja joustavuudesta. Sillä on korkea iskun- ja kulutuksenkesto, minkä vuoksi se hyvä vaihtoehto kulutusta kestävien osien tulostamiseen. Nylonfilamenttien suurimpana haasteena on niiden taipumus imeä kosteutta ilmasta, joka aiheuttaa ongelmia tulostamisessa, eivätkä osat sovellu käytettäväksi kosteissa olosuhteissa. Tämän vuoksi filamentin varastointiin on kiinnitettävä huomiota enemmän, kuin perinteisiä filamentteja käytettäessä. (Simplify3D 2022.) Tämän lisäksi pursotusmenetelmää käytettäessä se vaatii korkean tulostusalustan ja suuttimen lämpötilan (ALL3DP 2021).

4.6 PC (Polykarbonaatti)

Polykarbonaatti on yksi kestävimmistä 3D-tulostuksessa käytettävistä materiaaleista. Se on läpinäkyvää ja kestää erittäin hyvin iskuja (ALL3DP 2021). Lisäksi se kestää erittäin hyvin korkeita lämpötiloja aina 150 °C saakka ilman fyysisiä muodonmuutoksia, jonka ansiosta se soveltuu hyvin osien valmistamiseen, joiden pitää kestää korkeita lämpötiloja. Polykarbonaatilla on taipumus imeä itseensä kosteutta, joka voi vaikuttaa heikentävästi sen ominaisuuksiin. Tämän vuoksi se pitää säilyttää ilmatiiviissä pakkauksessa. (3Dnatives 2020.) Tulostettaessa polykarbonaattia vaaditaan erittäin korkeita tulostusalustan ja suuttimen lämpötiloja, että kerrokset pysyvät toisissaan kiinni. Tulostusta helpottaa, jos se saadaan tehtyä suljetussa tilassa. (Simplify3D 2022.)

4.7 PP (polypropeeni)

Polypropeeni on kevyt, kestävä, joustava ja hyvän kemikaalienkeston omaava materiaali, jota käytetään paljon esimerkiksi autoteollisuudessa (3Dnatives 2020). Sillä on hyvä väsymiskestävyys, koska se on sitkeää. Tämän vuoksi se soveltuu hyvin vähälujisiin sovelluksiin (Simplify3D 2022). Se on kuitenkin hyvin vaikea tulostaa heikon kerrosten välisen tarttuvuuden ja voimakkaan lämpövääntelyn vuoksi (ALL3DP 2021).

4.8 HIPS (Iskunkestävä polystyreeni)

HIPS on polystyreenimuovin ja polybutadieenikumin sekoitus. Se on sitkeä ja joustava elintarviketurvallinenliukeneva materiaali. Sitä käytetään yleensä ABS:n tukimateriaalina, koska se liukenee limoneeniluiokseen. Liukenevan tukimateriaalin etuna on se, että sen poistamisesta ei jää jälkiä tulostettavaan osaan. Tukimateriaalina käyttämisen lisäksi sitä käytetään myös kulutusosissa, joissa materiaalin kevyempi paino on eduksi. (ALL3DP 2021; Simplify3D 2022.)

4.9 ASA (Akryylistyreeniakrylonitrili)

ASA on ominaisuuksiltaan hyvin samankaltainen, kuin ABS, mutta se on kehitetty kestävämpään paremmin UV-säteilyä ja ankaria sääolosuhteita. Tämän vuoksi se soveltuu hyvin tulosteisiin, jotka tulevat ulkokäyttöön. Ongelmana tulostettaessa on tulostusprosessin aikana syntyvät päästöt, sekä vääntyminen tulostamisen aikana. (Simplify3D)

5 TAKAISINMALLINNUS – REVERSE ENGINEERING

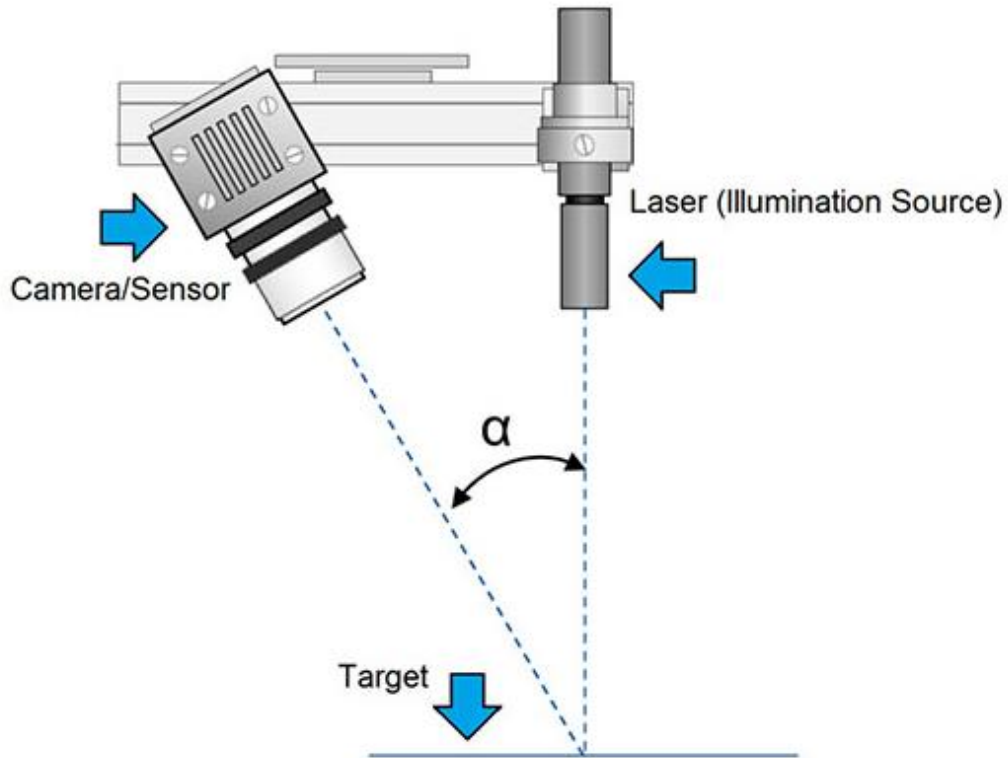
Takaisinmallinnuksella eli käänteisellä suunnittelulla tarkoitetaan 3D-tulostuksen yhteydessä 3D-mallin muodostamista jostain jo olemassa olevasta asiasta. 3D-mallia voidaan esimerkiksi muokata alkuperäisestä enemmän omaan käyttöön soveltuvaksi tai käyttää sellaisenaan. Takaisinmallinnusprosessiin käytetään yleensä 3D-skanneria, jonka avulla saadaan halutusta asiasta valmistettua digitaalinen malli. Menetelmä on erittäin nopea ja helppo verrattuna 3D-mallin mallintamiseen CAD-ohjelmalla esimerkiksi 3D-tulostamista varten, koska usein halutaan tulostaa jo jokin olemassa oleva kappale. (Sculpteo 2022.) 3D-skannaus on kuitenkin erittäin laaja aihe, minkä vuoksi tässä tekstiosiossa keskitytään pääasiassa 3D-tulostuksen yhteydessä yleisimmin käytettyjen 3D-skannausmenetelmien toimintaperiaatteisiin ja niiden tuomiin mahdollisuuksiin.

5.1 3D-skannerin toiminta

3D-skannerit pystyvät jäljittelemään erittäin tarkasti monimutkaistenkin kappaleiden alkuperäiset pinnanmuodot. 3D-skannereiden peruseriaate on aina sama. Kappaleen pinta käydään läpi ja se tallentuu digitaaliseksi kolmioverkoksi, josta kappaleen 3D-pintamalli muodostuu. Pintamalli muodostuu kolmiulotteisesta kolmioverkosta eli mesh-verkosta, joka kulkee kappaleen pinnan mukaisesti. Kolmioverkon avulla saadaan kappale tiedostomuotoon, mikä on yhteensopiva erilaisten CAD-ohjelmien kanssa. (Laserdesign 2022; English 2020.)

5.1.1 Laser 3D-skannerit

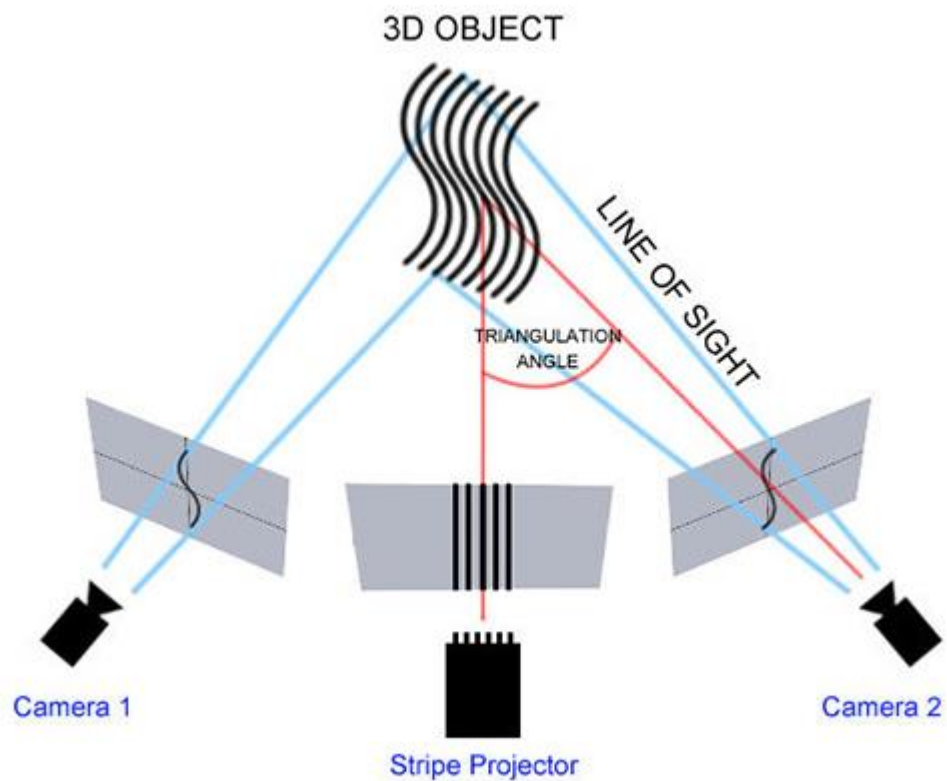
Laserskannerit käyttävät trigonometristä kolmiomittausta. Skanneri projisoi yhdellä tai usealla lasersäteellä kappaleeseen ja tallentaa niiden heijastuksen yhdellä tai useammalla sensorilla. Skanneri tekee pistemittauksia kappaleen etäisyydestä laservalon heijastuskulman ja skannerin etäisyyden perusteella (Kuva 17). Miljoonista mittauspisteistä koostuvasta pistepilvestä muodostetaan kolmiulotteinen kolmioverkko, joka muodostaa skannatun kappaleen pintamallin. Laserskannauksen etuina on, että sillä voidaan skannata kiiltäviä pintoja, eikä se ole niin herkkä muuttuville valo-olosuhteille. Yksinkertainen toimintaperiaate tekee siitä helppokäyttöisen ja edullisen. (3Dnatives 2019; Kamani 2020)



Kuva 16. Laser 3D-skannerin toimintaperiaate (3Dnatives 2019)

5.1.2 Strukturoituun valoon perustuvat 3D-skannerit

Strukturoitua valoa käyttävä 3D-skanneri heijastaa valokuvion skannattavaan pintaan. Useimmiten valokuvio on raitakuvio, joka muodostetaan digitaalisen spatiaalisen valomodulaattorin läpi kulkevasta valosta (Kuva 18). Skannerin kamera tarkastelee kappaleen pintaan heijastettavan kuvion muotoja ja määrittää kappaleen muodon käyttämällä trigonometristä kolmiomittausmenetelmää. Useimmiten kuluttajatason skannereissa käytettävä valo on valkoista, mutta sinisen valon tarkkuus on parempi, koska se ei ole niin herkkä heijastuksille ja läpinäkyville pinnoille. Menetelmän etuina laserskannaukseen verrattuna on erityyppisiä nopeita skannausajajia, suuri skannausalue sekä se, että skanneri on myös silmille turvallinen. Nopeasta skannauksesta huolimatta siinä on korkea resoluutio ja tarkkuus. (Flynt 2020; Kamani 2020)



Kuva 17. Strukturoituun valoon perustuvan 3D-skannerin toimintaperiaate (3Dnatives 2019)

5.1.3 Fotogrammetria 3D-skannaus

Fotogrammetria on yksinkertainen menetelmä, jossa yhdistetään kohteesta otettuja lukuisia valokuvia. Menetelmä käyttää algoritmeja yhdistääkseen kuvien vastaavia pistekolmioita. Kuvien käsittely tehdään ohjelmistolla, joka yhdistää kuvat pikseleiden perusteella, jotka vastaavat samoja fyysisiä pisteitä. Suurin etu fotogrammetrian käytössä on sen nopeus ja tarkkuus, jolla kappale saadaan tallennettua. Huonona puolena on kuvien käsittelyyn kuluva aika ja herkkyys valokuvien resoluutiolle. Valokuvat onnistuvat ottaa älypuhelimellakin, mutta hyvän lopputuloksen saamiseksi kamerassa on oltava korkea resoluutio. (Micallef 2015, 339; Kamani 2020.)

5.2 Takaisinmallintamisen kannattavuus

Takaisinmallintamisessa tärkein työkalu on 3D-skanneri. Markkinoilla on myös saatavilla skannereita, jotka ovat kuluttajienkin hintaluokassa. (Micallef 2015, 339.) Useimmiten 3D-skannattua kappaletta halutaan muokata jollain CAD-ohjelmalla. Tässä täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että skannatun 3D-mallin pinta koostuu kolmioverkosta, jonka muokattavuus on rajallinen. Mikäli skannattua mallia halutaan muokata enemmän, täytyy sen pinta mallintaa uudelleen käyttäen kolmioverkkoa hyväksi. Mallin koosta ja monimutkaisuudesta riippuen uudelleenmallintaminen voi olla kuitenkin erittäin työlästä ja aikaa vievää. (Sulkanen 2018.)

6 TULOSTUSMENETELMÄN JA MATERIAALIN VALINTA

Tulostusmenetelmän ja tulostusmateriaalin valintaan on useita seikkoja, jotka on hyvä ottaa huomioon. Tämä osio on laadittu teoriaosuuden pohjalta, minkä pohjalta myös materiaalin valintataulukko on laadittu.

6.1 Tulostusmenetelmän valintaan vaikuttavat tekijä

Tulostusmenetelmän tulisi ottaa huomioon jo ennen varsinaisen osan suunnittelua, koska se voi vaikuttaa merkittävästi sen suunnittelussa. Tulostusmenetelmän valintaa ennen materiaalin pitäisi käytännössä olla jo valittu, koska materiaalit vaihtelevat tulostusmenetelmien välillä. Tulostusmenetelmien väliset erot vaikuttavat huomattavasti esimerkiksi osan esteettisiin- ja mekaanisiin ominaisuuksiin, sekä jonkin verran toleransseihin. Useimmiten kaikkia tulostusmenetelmiä voidaan käyttää tulostettavalle osalle, mutta suunnittelussa on otettava huomioon joitain suunnitteluseikkoja tulostusmenetelmästä riippuen.

Tulostusmenetelmän valintaan vaikuttaa merkittävästi tulostettavan osan halutut ominaisuudet ja käyttökohde. Tämän vuoksi täytyy osata priorisoida osan tärkeimmät elementit. Esimerkiksi halutaanko visuaalisesti miellyttävä vai toiminnallinen osa. Visuaalisille osille valokovetus altaassa on useimmiten paras menetelmä, kun taas jauhepetisulatus tarjoaa parhaimmat mekaaniset ominaisuudet. Myös osan monimutkaisuus on merkittävä tekijä tulostusmenetelmää valittaessa. Erittäin monimutkaiset ja tarkat geometriat eivät ole välttämättä toteutettavissa pursotusmenetelmällä, jolloin jauhepetisulatus tai valokovetus altaassa voivat olla parempia tulostusmenetelmiä tähän tarkoitukseen.

Osien valmistusmäärä on myös merkittävä tekijä, koska yleisesti osien massatuotanto ei ole kannattavaa 3D-tulostamalla. Myös pieniä määriä valmistettaessa on hyvä ottaa huomioon käytettävän tulostusmenetelmän kustannukset ominaisuuksiin nähden, jotta tulostamisesta saadaan mahdollisimman kustannustehokasta.

6.2 Tulostusmateriaalin valintaan vaikuttavat tekijät

Tulostusmateriaalin valintaan vaikuttavat suurilta osin samat tekijät, kuin itse tulostusmenetelmän valintaa. Eniten tulostettavan osan materiaalin valintaan vaikuttavat osan halutut ominaisuudet, sekä käytettävä tulostin. Esimerkiksi pursotusmenetelmää käyttävissä tulostimissa on otettava huomioon, soveltuuko tulostin käytettävälle materiaalille. Esimerkiksi tulostusalustan ja suuttimen lämpötila täytyy olla riittävä tulostettavalle materiaalille. Jokaisella tulostusmateriaalilla useimmiten on omat vahvuudet ja heikkoudet, kuten tulostusmenetelmilläänkin. Esimerkiksi osien tulostettavuus on huomattavasti vaikeampaa mekaanisesti kestävämmillä materiaaleilla niiden korkeamman sulamispisteen vuoksi. Erikoisominaisuuksia omaavat materiaalit ovat myös huomattavasti kalliimpia, kuin tavalliset tulostusmateriaalit, joten on tärkeää miettiä osan käyttökohdetta ja kustannuksia materiaalin tarjoamiin ominaisuuksiin nähden. Materiaalivalintaa tehdessä on kuitenkin hyvä ottaa huomioon, onko halutulla materiaalilla mahdollista valmistaa haluttu osa. Joillain materiaaleilla esimerkiksi lämpövääntely on iso ongelma, joka voi vaikuttaa merkittävästi tulostettavan osan mittoihin. Myös muut materiaalikohtaiset tulostamista vaikeuttavat tekijät on otettava huomioon valintaa tehdessä.

6.3 Materiaalivalintataulukko

Materiaalivalintataulukon tarkoituksena on toimia ohjenuorana 3D-tulostamiseen käytettävän materiaalin valitsemiseen. Taulukkoon on koottu tällä hetkellä yleisimmät pursotusmenetelmässä käytettävät materiaalit niiden hyvän saataavuuden ja tietoperustan vuoksi. Yleisimmin käytettyjen materiaalien seasta löytyy kustannustehokkaita ja käyttökelpoisia materiaaleja moniin erilaisiin käyttökohteisiin. Taulukko auttaa selvittämään käyttökohteeseen mahdollisesti parhaiten sopivimman 3D tulostusmateriaalin haluttujen ominaisuuksien perusteella. Kuitenkin jo ennen materiaalin valintaa on kuitenkin otettava huomioon 3D-tulostuksen asettamat rajoitteet. Taulukkoon on listattu tulostettavan osan mahdollisesti haluttuja ominaisuuksia, jotka on merkitty materiaalikohtaisesti, mikäli ne pitävät

paikkaansa. Materiaalikohtaisesti taulukosta voi lisäksi katsoa materiaalin hyvät, sekä huonot ominaisuudet.

Taulukosta voidaan esimerkiksi katsoa, että ASA on hyvin ulkokäyttöön soveltuva osa, koska se kestää vettä ja uv-säteilyä tai esimerkiksi PLA on elintarviketurvallinen materiaali, mutta se ei sovellu kohteisiin, joissa halutaan esimerkiksi iskun- tai kemikaalienkestävyyttä. Taulukko on kokonaisuudessaan liitteenä 1.

Taulukko 1. Materiaalinvalintataulukko

Materiaalinvalinta				
Ominaisuudet	Materiaalit			
	PLA	PETG	ABS	HIPS
Iskunkestävä			X	X
Lämmönkestävä			X	X
Kemikaalienkestävä				
Joustava				
Vedenkestävä		X		
Väsymiskestävä		X		
UV-kestävä				
Läpinäkyvä				
Elintarviketurvallinen	X	X		X
Käyttökohteet	Prototyypit / näköismallit	Toiminnalliset prototyypit	Toiminnalliset osat	Liukeneva tukimateriaali
Vahvuudet	Edullinen, mittatarkka, helppo tulostaa	Kiiltävä ja sileä pinta, vähäiset hajut tulostettaessa	Edullinen, hyvät mekaaniset ominaisuudet, hyvä lämmönkestävyys	Edullinen, kevyt, hyvät mekaaniset ominaisuudet
Heikkoudet	Huono lämmönkestävyys, ei sovellu ulkokäyttöön	Huonot siltaominaisuudet	Voimakas lämpövaantely, tulostuksesta syntyvät hajut, kutistumisesta johtuva mittaepätarkkuus	Korkea tulostuslämpötila, vaatii ilmanvaihdon

7 OSIEN VALMISTUS

Työssä valmistetut osat valmistettiin Lapin AMK Kemin toimipisteessä sijaitsevassa 3D-tulostuslaboratoriossa. Tulostuslaboratorion laitekanta koostuu kolmesta yleisimmästä tulostusmenetelmästä, jotka ovat materiaalin pursotus, valokovetus altaassa ja muovien jauhepetisulatus. Näiden lisäksi laboratoriossa on Artec Leo 3D-skanneri, sekä 3devo filamentin valmistuslaitteisto, mikä mahdollistaa hävikin kierrättämisen lisäksi myös erikoismateriaalien valmistamisen. Tulostusprosessia varten valittiin muutama varaosa, joista tulostettavaksi päätyi kaksi varaosaa. Valikoituneet osat olivat Epiroc Boltec pultituskoneen kulutusosia, jotka oli alun perin valettu polyuretaanista. Osien valintaan vaikutti erityisesti materiaali, koska pyrittiin valmistamaan alkuperäistä vastaavia osia. Osien mallit valmistettiin 3D-skannerilla, sekä mallinnusohjelmalla. Valmistettavien osien tarkoituksena oli havainnollistaa 3D-tulostamisen mahdollisuuksia, sekä kokeilla eri tulostusmenetelmien ja materiaalien välisiä eroja käytännössä.

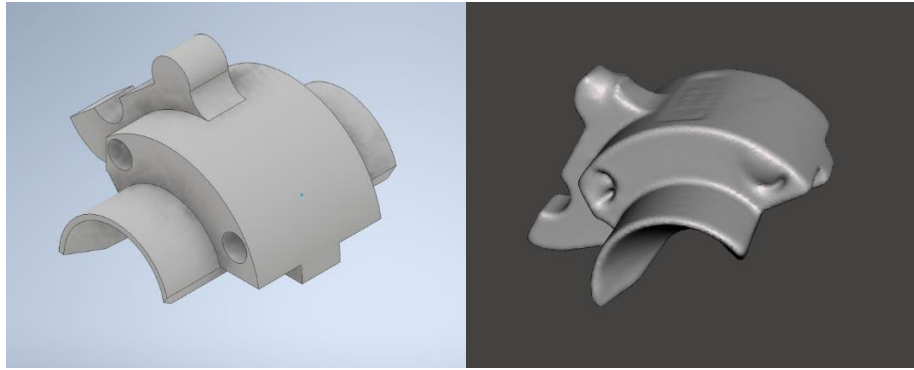
7.1 Mallinnettavan osan valmistus

Mallinnettavaksi osaksi valikoitui Epiroc Boltec pultituskoneen pulttimakasiinin tarraimen polyuretaaninen vastakappale (Kuva 19). Osan tarkoituksena on toimia hydraulisen puristimen toisena tartuntapintana. Pultituskonetta käytetään kallion lujitukseen kaivostunneleissa. Osa valikoitui valmistettavaksi, koska sen alkupeäinen materiaali oli polyuretaania, jota vastaavia tulostusmateriaaleja on saatavilla. Tavoitteena oli, että tulostettu osa soveltuisi käyttökohteeseen ja olisi ominaisuuksiltaan mahdollisimman lähellä alkuperäistä. Osan valitsemiseen vaikutti myös se, että pultituskone oli keskuskorjaamolla huollossa. Tämä mahdollisti osien koesovittamisen ja osien käyttökohteen paremman tarkastelun.



Kuva 18. Alkuperäinen varaosa asennettuna

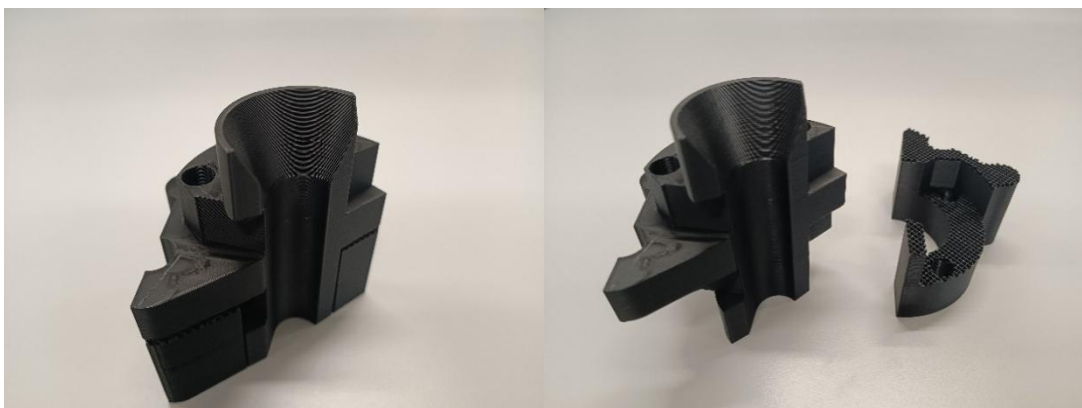
Mallinnus tehtiin Autodesk Inventor Professional mallinnusohjelmalla hyödyntäen takaisinmallinnusta eli alkuperäisen varaosan mittoja käytettiin tulostettavan osan mallintamiseen. Varaosa ensiksi myös 3D-skannattiin, mutta se päädyttiin myös mallintamaan, koska osan pintamalli olisi vaatinut suhteellisen paljon jälkikäsitteilyä. 3D-skannattuun pintamalliin olisi pitänyt saada kappaleen pulteille tarkoitetut reiät, sekä osan kulmat jäivät pyöreiksi, mikä on yleinen ongelma 3D-skannauksessa. Osan päällä sijaitseva pyöristys jäi myös vajaaksi sen vuoksi, että osa oli liian kiiltävä kyseisestä kohdasta. (Kuva 20)



Kuva 19. Varaosa mallinnettuna ja skannattuna

Osa tulostettiin ensiksi pursotusmenetelmällä PLA-filamentilla. Näin saatiin osasta valmistettua nopeasti ja helposti prototyyppi mittojen varmistamiseen. Käyttökohteessa alkuperäisen osan materiaali oli polyuretaani, mikä on hyvin iskua ja kulutusta kestävä elastinen materiaali. Osa kuitenkin vietiin keskuskorjaamolle mallikappaleeksi tuomaan esille 3D-tulostamisen mahdollisuuksia.

Tulostusmenetelmänä pursotus soveltui osalle hyvin, koska se oli yksinkertainen ja tukimateriaali irtosi osasta erittäin hyvin. (Kuva 21) Materiaalina PLA on hyvin edullinen ja käyttökelpoinen joissakin sovelluksissa. Osaa ei kuitenkaan asennettu käyttökohteeseen, koska PLA:n ominaisuudet eivät olleet käyttökohteeseen riittävät. Osat ovat käytössä kaivostyökoneessa, jonka vuoksi ne altistuvat runsaan mekaanisen kulutuksen lisäksi myös kosteudelle ja erilaisille kemikaaleille.



Kuva 21. PLA-filamentilla tulostettu prototyyppi osa tulostuksen jälkeen ja tukimateriaalien poiston jälkeen

Tämän vuoksi osa päädyttiin tulostamaan jauhepetimenetelmällä Sinterit Flexa tulostusmateriaalilla käyttäen Sinterit Lisa Pro tulostinta. Sinterit Flexa on TPU

jauhetta, jonka shore-kovuutta voidaan säädellä 80-90A tulostusparametrejä vaihtamalla. Jauhepetimenetelmässä usein käytetty PA12 materiaali ei sovellu kosteisiin olosuhteisiin, jonka vuoksi suljettiin pois materiaalivaihtoehdoista. Tämän vuoksi Flexa valikoitui materiaaliksi, koska se on joustavaa ja kemikaalien kestävä, jonka vuoksi se soveltui hyvin käyttökohteeseen. Osan tulostaminen kesti noin 44 tuntia. Tulostus epäonnistui todennäköisesti sen vuoksi, että tulostusmateriaali oli pakkaantunut säilytyksessä. Tämän vuoksi tulostin on mahdollisesti jättänyt tulostusalustaan tyhjiä kohtia aiheuttaen tulostamisen epäonnistumisen. (Kuva 22) Tulostusta ei kuitenkaan tehty aikataulusyistä uudestaan, koska TPU-jauheen käyttäminen vaatii erityisen huolellisen puhdistamisen tulostimelle ja muille tulostuksessa käytettäville välineille, kuten imurille ja työkaluille, koska tulostimessa käytetään pääsääntöisesti PA12 tulostusmateriaalia. Puhdistus täytyy tehdä huolellisesti, koska Flexa jauhe palaa tulostimeen matalamman käsitelylämpötilan myötä muodostaen karstaa. Tämän lisäksi tulostus voi mahdollisesti epäonnistua PA12 tulostusmateriaalia käytettäessä. Se on myös kestävä hyvin kemikaaleja. Lähes valmis osa kuitenkin vaikutti hyvin saman kaltaiselta, kuin alkuperäinen osa, jos huomioon ei oteta hieman karheampaa pintaa. Osa oli jäykkä, mutta hieman elastinen, sekä kerrosten välinen liitos oli erittäin hyvä.

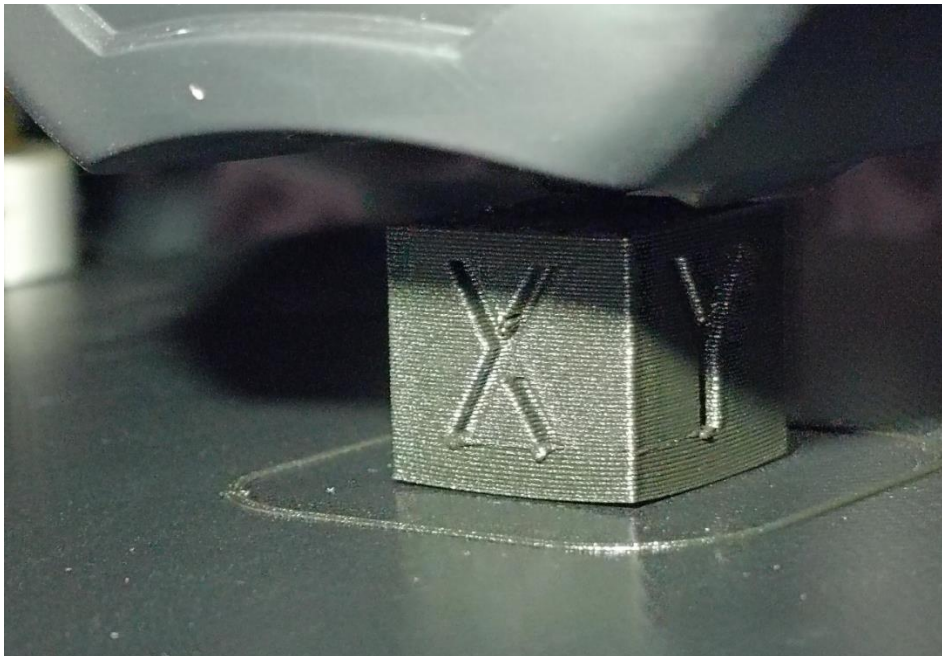


Kuva 22. Epäonnistunut jauhepetituloste

Jauhepetimenetelmän jälkeen päädyttiin kokeilemaan pursotusmenetelmää uudelleen ja hankkimaan kokeiltavaksi kahta TPU-pohjaista filamenttia kokeiltavaksi, jotka olivat Formfutura Python Flex ja Fiberlogy Mattflex 40D. Filamentit valikoituivat niiden hinnan, saatavuuden, sekä ominaisuuksien perusteella. Mo-

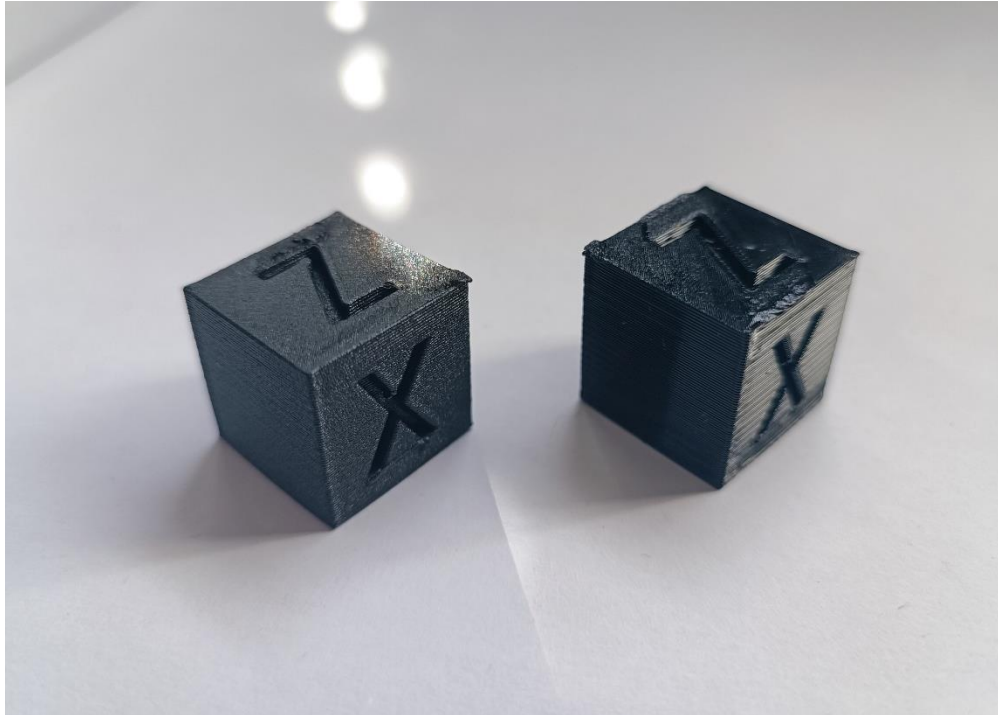
lemmilla filamenteilla on erittäin hyvä iskunkestävyys, elastisuus, puristuskestävyys, kemikaalien kestävyys, sekä hyvä lämmön kulutuksen kestävyys. Merkittävimmät erot materiaalien välillä on materiaalin kovuus. Formfuturan shore-koivuus on 98A ja Fiberlogyn 40D. Fiberlogyn filamentin saa eroamaan muista filamenteista sen mattamusta väri, joka tekee osista miellyttävän näköisiä, sekä vähentää huomattavasti kerrosten näkyvyyttä. Osien esteettisyydellä ei kuitenkaan tässä käyttökohteessa ollut merkitystä.

Molemmilla filamenteilla tulostettiin ensiksi koekappaleet Creality Ender 3 V2 tulostimella. Koekappaleeksi valittiin tulostimen kalibrointikuutio, josta voidaan hyvin havaita tulostimen mahdolliset säätötarpeet ennen kuin varsinaista osaa lähdetään tulostamaan uudella materiaalilla. Molemmilla materiaaleilla käytettiin samoja tulostusparametrejä, jotka olivat Formfuturan suositusparametrit. Tulostus onnistuu samoilla parametreillä, kuin PLA-filamentilla, mutta TPU-filamentteja käytettäessä suositellaan hieman korkeampaa suuttimen lämpötilaa 220–250°C verrattuna PLA:n 180–230°C. Molemmilla materiaaleilla testikappaleiden tulostaminen onnistui hyvin lukuun ottamatta pientä lämpövääntelyä, joka johtuu tulosteen epätasaisesta jäähtymisestä kappaleen kulmissa (Kuva 23).



Kuva 23. Koekappale tulostumassa

Myös materiaalien joustavuutta pääsi konkreettisesti kokeilemaan ja vertailemaan, kun tulosteet olivat valmiina (Kuva 24). Positiivisena yllätyksenä tuli tulostuksen hajuttomuus verrattuna esimerkiksi PLA:n tulostamiseen.



Kuva 24. Kalibrintikuutiot tulostettuna (Oikea Fiberlogy ja vasen Formfutura)

Osa päätettiin tulostaa hieman joustavammalla Fiberlogy 40D filamentilla. Tulostus tapahtui Creality Ender V2 tulostimella. Tulostus onnistui hyvin, mutta osa jäi huomattavasti alkuperäistä pehmeämmäksi johtuen tulostusparametreista. Tulostus tehtiin 30 % täyttötiheydellä ja 1,2 mm seinämävahvuudella, sekä 0,3 kerrospaksuudella. 100 % täyttötiheydellä osasta olisi tullut huomattavasti jäykempi ja kerroksien välinen liitos olisi kestävämpi, mutta tulostusaika olisi pidentynyt 14 tunnista noin 25 tuntiin. Aikataulun rajallisuuden vuoksi osa päädyttiin kokeilemaan tulostamista pienemmällä täyttötiheydellä, jolloin säästettiin huomattavasti aikaa, sekä lisäksi materiaalia. Tulostuksen lopputulos ei kuitenkaan ollut toivottu, jonka vuoksi seuraava osa tulostettiin suuremmalla täyttötiheydellä. 3D-tulostamisen etuna on kuitenkin se, että vain halutut kohdat voihaan tehdä tarvittaessa tiheämmällä täytöllä, mikä säästää materiaalia ja osasta tulee kevyempi. Kuvassa 25 alkuperäinen varaosa ja 3D-tulostettu osa.



Kuva 25. Alkuperäinen varaosa (vasen) ja 3D-tulostettu varaosa (oikea)

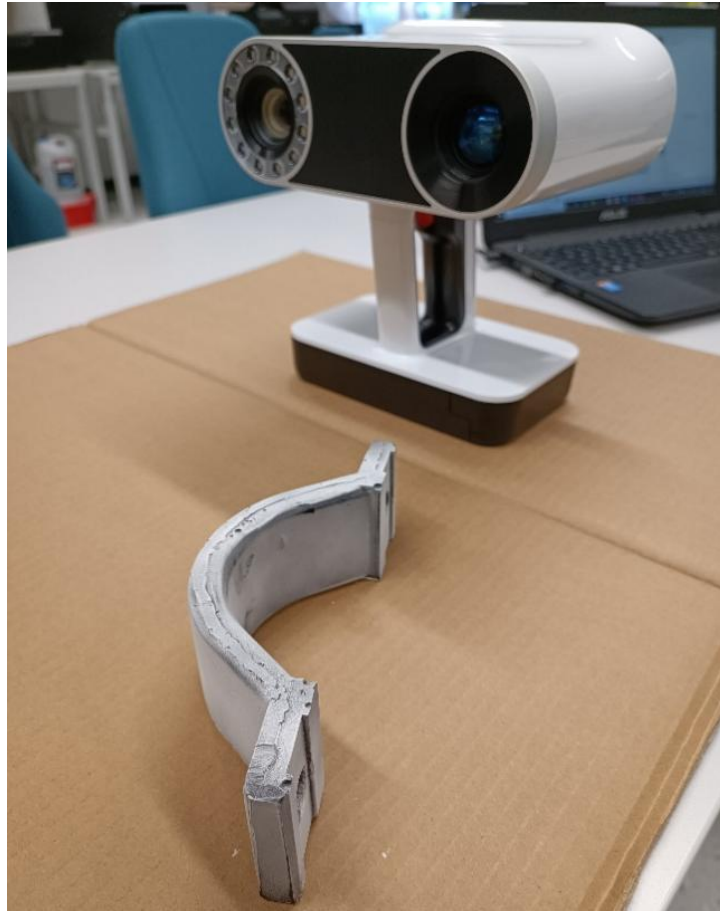
7.2 3D-skannatun osan valmistus

Skannaukseen valikoitui Epiroc Boltec pultituskoneen porakelkan letkujen kannake, koska se on hyvin yleinen polyuretaaninen kulutusosa (Kuva 26). Ennen kaikkea osan valintaan vaikutti se, että alkuperäinen materiaali oli jäykkää polyuretaania, jonka tapaisia filamentteja on saatavilla. Tämä lisäksi osa ei kuitenkaan ole kriittinen koneen toiminnan kannalta, jonka vuoksi 3D-tulostetun osan testaus ei aiheuta rikkoutuessaan käyttökatkoa. Yksi pultituskone oli keskuskorjaamolla huollossa, mikä mahdollisti osien käyttökohteen tarkemman tarkastelun.



Kuva 26. Valettu varaosa asennettuna käyttökohteeseen

Skannaus suoritettiin Artec Leo 3D-skannerilla Lapin AMK 3D-tulostuslaboratoriossa. Skannerin toimintaperiaate perustuu strukturoituun valoon. Alkuperäisen osan pinta oli kiiltävä, jonka vuoksi sen pintaan laitettiin 3D-skannaussuihketta (Kuva 27). Skannaussuihkeella saadaan kappaleen pinta matakksi, joka parantaa skannauksen laatua ja mahdollistaa kiiltävienkin pintojen skannauksen. Skannattu data käsiteltiin skannerin valmistajan Artec Studio 15 Professional ohjelmalla. Ohjelmalla pintamallista poistettiin kaikki tarpeettomat muodot ja tehtiin tarpeelliset muokkaukset. 3D-skannattua mallia ei tämän jälkeen enää käsitelty, koska ajatuksena oli kokeilla millaisen lopputuloksen saa tulostettua suoraan 3D-skannerin tallentamasta pintamallista.



Kuva 27. Artec Leo 3D-skanneri ja osa skannausvalmiina

Tämäkin osa päädyttiin ensiksi tulostamaan pursotusmenetelmällä, koska se oli geometrisesti hyvin yksinkertainen. Menetelmä soveltuu kyseiselle osalle hyvin, koska se saadaan helposti tulostettua siten, että osaan kohdistuvat isommat voimat eivät kohdistu suoraan kerrosten väliseen liitokseen. Kerrosten näkyvyys ei myöskään haitannut osassa, koska tärkeimpänä prioriteettina oli osan toimivuus. Pursotusmenelmälle on myös erittäin hyvin saatavilla materiaaleja erilaisilla ominaisuuksilla. Prototyypin materiaaliksi valikoitui ensiksi PLA sen edullisuuden ja helpon tulostettavuuden vuoksi, mutta osa tulostettiin kokeilun jälkeen myös TPU-filamentilla.

Alkuperäinen osa on valmistettu jäykästä polyuretaanista. Osaan kohdistuu paljon mekaanista kulumista, koska hydrauliletkut liukuvat sen pintaa pitkin. Tämän lisäksi osa altistuu myös kosteudelle ja erilaisille kemikaaleille, kuten pesuaineille. Lopulliseksi tulostusmateriaaliksi valikoitui Formfutura Python Flex TPU-filamentti, jonka shore-kovuus oli 98A. TPU sopii hyvin käyttökohteeseen, koska

se on ominaisuuksiltaan hyvin samankaltainen, kuin osan alkuperäinen materiaali. Sillä on hyvät mekaaniset ominaisuudet, sekä se kestää hyvin erilaisia kemikaaleja. Osan tulostettiin 90 % täyttötiheydellä, sekä 3 mm seinämävahvuudella, koska aikaisemmin tulostettu pultituskoneen osa jäi liian pehmeäksi. Näin saatiin vertailua tulostustiheyden vaikutuksista. Osan tulostusaika oli noin 20 tuntia, mutta tulostus onnistui ongelmitta (Kuva 28). Tulostettu osa oli hieman alkuperäistä osaa joustavampi. Tulostetun osan huonona puolena on se, että kerrosten väliset liitokset voivat kuitenkin irrota, mikäli osaa taivutetaan enemmän. Osia ei kuitenkaan aikataulusyistä kokeiltu käytännössä, koska haluttiin välttyä koneen käyttökatkoilta.



Kuva 28. Valettu varaosa ja 3D-tulostettu osa

8 3D-TULOSTUSYMPÄRISTÖ

3D-tulostusympäristön tarkoituksena on mahdollistaa yritykselle varaosien valmistamisen omiin tarpeisiin. Tulostusympäristön tulisi olla turvallinen ja tehokas työskentelytila, josta löytyy kaikki tarvittava osien valmistamista varten. Tulostusympäristö voi olla täysin erillinen tila tai esimerkiksi johonkin toimistoon sijoitettu työskentelypiste, riippuen laitekannan laajuudesta.

8.1 Laitekannan kartoitus

Tulostusympäristön laitekantaan vaikuttaa merkittävästi sen käyttötarkoitus. Mikäli tarkoituksena on esimerkiksi tulostaa lukuisia kulutusosia, tulisi tulostimia olla useampi, jolloin osien valmistus onnistuu helpommin. 3D-tulostaminen ei ole kuitenkaan paras mahdollinen valmistusmenetelmä suurille tuotantomäärille. Tämän vuoksi kannattavampaa olisi erikoisempien osien, prototyyppien tai muilla valmistusmenetelmillä haastavien osien valmistaminen. Tähän käyttötarkoitukseen riittäisi hyvin yksikin tulostin, koska työkoneiden komponentit eivät yleensä ole niin monimutkaisia, että niitä kannattaisi valmistaa tulostamalla. Tämän vuoksi tulostin ei tulisi olemaan niin aktiivisella käytöllä. Tulostimella voitaisiin kuitenkin valmistaa varastoon varaosia mahdollisten saatavuusongelmien varalta, sekä prototyyppisiä osia, jotka valmistettaisiin tämän jälkeen jollain muulla menetelmällä.

Kustannustehokkain ja korjaamon tarpeisiin sopiva tulostusmenetelmä on pursotus tai jauhepetisulatus. Pursotusmenetelmän puolesta puhuu menetelmää käyttävien tulostimien laaja valikoima, sekä erilaisten materiaalien hyvä saatavuus, mikä mahdollistaa materiaalin valinnan käyttökohteen asettamien vaatimusten mukaan. Pursotusmenetelmän suuren käyttäjäkunnan myötä siihen liittyen löytyy myös erittäin paljon tietoa ja käyttäjäkokemusta, mikä auttaa ongelmatilanteissa. Pursotusmenetelmällä valmistettujen osien lujuus, tarkkuus ja pinnanlaatu ovat myös riittävät useisiin eri käyttökohteisiin. Tulostimella tulisi kuitenkin olla mahdollista tulostaa lukuisia eri materiaaleja, mikä mahdollistaa tulostamisen käyttämisen erilaisissa käyttökohteissa. Tämän vuoksi tulostimessa tulisi olla mahdollisuus riittävän korkeille lämpötiloille, mikä mahdollistaa laajemman

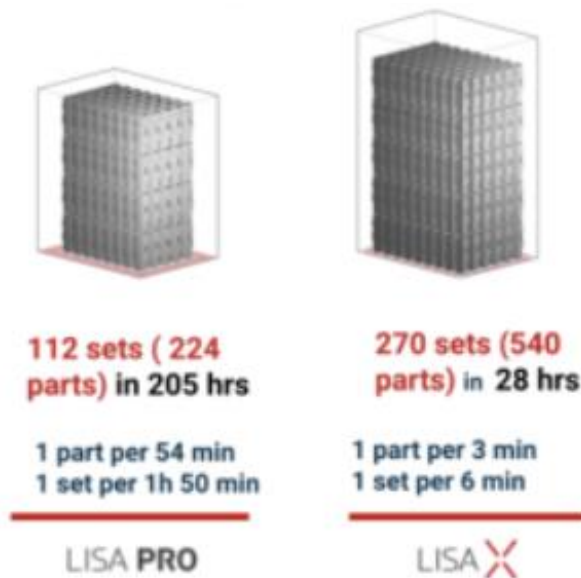
materiaalivalikoiman. Pursotusmenetelmää käyttävillä tulostimilla on myös hin- taansa nähden isoimmat tulostustilavuudet, mikä mahdollistaa isojenkin osien tu- lostamisen tai useamman osan samanaikaisen tulostamisen. Mikäli pursotusme- netelmän ominaisuudet eivät ole riittävät halutun osan tulostamiseen, eikä muuta kustannustehokasta valmistusmenetelmää ole, voi yritys tarvittaessa hankkia 3D- tulostamisen ostopalveluna. 3D-tulostamisen hankkiminen ostopalveluna ei vaa- tisi niin suuria laiteinvestointeja.

Jauhepetisulatus mahdollistaisi tarkkojen osien valmistamisen hyvillä mekaani- silla ominaisuuksilla, sekä useamman osan kokonaisuuksien nopean tulostami- sen. Tulostusmenetelmä on kuitenkin huomattavasti kalliimpi hankintakustannuk- siltaan, koska se vaatii kalliimman tulostimen lisäksi erillisen tilan ja välineet, jotka mahdollistavat pölysevän jauheen käsittelyn tehokkaasti. Tulostusprosessin hel- pottamiseksi tilassa olisi hyvä olla myös jauheimuri, jauhesihtti ja jälkikäsittelyyn tarkoitettu hiekkapuhalluskaappi, mitkä myös nostavat kustannuksia merkittä- västi. Kuvassa 29 on kaikki tarvittavat laitteet tehokasta jauhepetitulostusproses- sia varten.



Kuva 29. Sinterit tulostin ja tarvikkeet (Sinterit 2022)

Jauhepetisulatus on kuitenkin menetelmänä vielä hyvin tuore teollisuuden ulkopuolella, jonka vuoksi edullisempia pienempiä tulostimia on hyvin vähän tarjolla. Sinterit Lisa X on kuitenkin yksi vaihtoehto edullisimmista jauhepetitulostimista, mutta on kuitenkin huomattavasti suurempi investointi, kuin esimerkiksi pursotusmenetelmää käyttävä tulostin, jonka vuoksi se ei mahdollisesti ole niin kustannustehokas vaihtoehto. Sinterit Lisa X on huomattavasti edeltäjäänsä Sinterit Lisa Pro:ta nopeampi, sekä siinä on isompi tulostustilavuus (Kuva 30).



Kuva 30. Vertailussa Lisa Pro ja Lisa X tulostustilavuus ja -nopeus (Hanaphy 2021)

Filamenttien säilytys on myös hyvin oleellinen osa 3D-tulostuksen onnistumisen kannalta. Filamentit tulisi säilyttää suoralta auringonvalolta suojassa, kuivassa ja ilmatiiviissä tilassa, jolloin niihin ei pääsisi imeytymään kosteutta. Kosteus voi aiheuttaa ongelmia tulostamisessa, sekä huonontaa tulostetun osan laatua. Filamenteille on olemassa säilytyskaappeja, jotka pitävät ympäristön optimaalisena filamentin säilyvyyden kannalta. Esimerkiksi Smart3D Multimaterial Dryer, joka on jopa 30 filamenttirullan kapasiteetin omaava erittäin nopea filamentin kuivaus ja säilytyskaappi (Kuva 31) (Smart 3D 2022). Erillinen avattujen filamenttien säilytyskaappi tai tulostimen yhteydessä oleva materiaalienhallintayksikkö on hyvä

olla varsinkin, jos käytetään materiaaleja, jotka ovat herkkiä kosteudelle. Laitteisto ei kuitenkaan ole välttämätön, koska filamentit voidaan myös pakata vaakuipakkaukseen säilyvyyden parantamiseksi, kuten ne ovat myyntipakkauksissakin. Pakkaus suojaa filamentin kosteuden lisäksi esimerkiksi pölyltä ja muilta epäpuhtauksilta.



Kuva 31. Smart3D Multimaterial Dryer filamentin kuivaus- ja säilytyskaappi (Smart3D 2022)

Aikaisemmin mainittiin, että tulostimia on myös saatavilla filamentin hallintayksiköllä. Esimerkiksi BCN3D Epsilon W50 SC 3D-tulostin on varustettu materiaalinhallintayksiköllä, jossa on useamman filamenttirullan säilytyskapasiteetti (Kuva 32). Mallinimessä SC tarkoittaa Smart Cabinet järjestelmää, joka on 10 pienen rullan tai 4 ison rullan filamenttien kuivausjärjestelmä. Tämän tulostimessa on lisäksi aktiivihili HEPA-suodatin, joka estää tulostuksessa mahdollisesti syntyvien päästöjen pääsemisen huoneilmaan. Lisäksi tulostimen SC lisäosassa on säilytystilaa esimerkiksi avaamattomille filamenttirullille ja integroitu työtaso tietokoneelle, jossa on myös tulostukseen tarvittaville työkaluille säilytystila. Lisä-

osassa on myös varavirtalähde, joka mahdollistaa tulostamisen jatkamisen sähkökatkon jälkeen. Tulostin on myös saatavilla ilman BCN3D Smart Cabinet lisäosaa, jossa nämä ominaisuudet ovat lukuun ottamatta aktiivihiili HEPA-suodattinta. (BCN3D 2022.)



Kuva 32. BCN3D Epsilon W50 SC tulostin (BCN3D 2022)

Vastaavia tulostimia on myös muilta valmistajilta, kuten esimerkiksi Ultimakerilta. Ultimaker S5 Pro Bundle (Kuva 33) sisältää tulostimen lisäksi materiaaliaseman ja EPA-suodattimen. Ultimaker on hieman edullisempi, mutta merkittävimmät erot tulostimien välillä ovat BCN3D:n tulostimen merkittävästi isompi tulostustilavuus (BCN3D 420 x 300 x 400 mm ja Ultimaker, 330 x 240 x 300 mm) ja kaksi tulosuspäätä, mitkä mahdollistavat kaksinkertaisen tulostuskapasiteetin esimerkiksi käyttäessä tulostimen kopiointi tai peilikuva toimintoa. (Ultimaker 2022; BCN3D 2022.)



Kuva 33. Ultimaker S5 Pro Bundle (Ultimaker 2022)

3D-skanneri olisi myös hyvä lisä 3D-tulostusympäristöön. Useimmiten halutaan tulostaa jokin olemassa oleva osa. Skanneri mahdollistaisi esimerkiksi joissain tapauksissa osien tulostamisen täysin ilman 3D-mallintamista ja sitä voitaisiin hyödyntää muuhunkin kuin 3D-tulostamiseen. Esimerkiksi Einscan Pro 2X 3D-skanneri on edullinen 3D-skanneri, jota voidaan käyttää missä vain kannettavan tietokoneen kanssa. Laitteella voidaan skannata käsin tai kiinteässä tilassa esimerkiksi kääntöpöytä käyttäen. Laite on tarkoitettu pienien ja keskisuurien kohteiden skannaukseen, mutta laitteesta on myös saatavilla 2X-plus malli, joka on tarkoitettu keskisuurien ja suurien kohteiden skannaukseen (Kuva 34). Mikäli kuitenkin 3D-skannaukseen halutaan panostaa enemmän, on syytä ottaa huomioon esimerkiksi työssä käytetty Artec Leo 3D-skanneri. Skanneri on tällä hetkellä markkinoiden parhaimmistoa ammattitason 3D-skannereista. Se on täysin langaton ja sitä voidaan käyttää ilman tietokonetta. Hinta on kuitenkin huomattavasti esimerkiksi Einscan 3D-skannereita kalliimpi. On myös syytä ottaa huomioon,

että 3D-skanneri vaatii kuitenkin ohjelmiston 3D-skannatun datan käsittelyyn, sekä sen käyttöön perehtymistä. (3d-tulostus 2022a; 3d-tulostus 2022b.)



Kuva 34. Einscan Pro 2X ja Pro 2X-plus 3D-skannerit (3d-tulostus 2022a; 3d-tulostus 2022b.)

8.2 Tulostusympäristön suunnittelu

Tulostusympäristö sijoitetaan johonkin jo korjaamalla olemassa olevaan tilaan. Tulostimen tulisi sijaita sellaisessa paikassa, jossa huoneen lämpötila pysyisi mahdollisimman tasaisena, jolloin lämpötilan vaihtelusta aiheutuvat ongelmat saataisiin minimoitua. Riittävän hyvä ilmanvaihto ($10 \text{ (dm}^3 \text{ /s) /m}^2$) olisi myös hyvä ottaa huomioon tulostusympäristöä suunnitellessa varsinkin, jos tarkoituksena on käyttää avotulostimia, koska se on eduksi tulostuksesta aiheutuvien hajujen ja mahdollisten mikropartikkelien poistoa ajatellen. Avotulostimille on myös saatavilla kotelointeja, joka voidaan tarvittaessa liittää poistoilmajärjestelmään, joka imee tulostuksesta syntyvät päästöt pois ennen kuin ne leviävät huoneilmaan. Kotelointeja on myös varustettuna HEPA-suodatinyksiköllä, jolloin poistoilmajärjestelmään liittäminen ei ole tarpeen (Kuva 35). HEPA-suodatinyksiköitä on saatavilla myös erillisenä, mikäli koteloinnin haluaa valmistaa itse. Tulostimia on kuitenkin markkinoilla tulostimeen integroidulla koteloinnilla, sekä HEPA-suodattimella, mikä mahdollistaa tulostimen sijoittamisen esimerkiksi toimistotiloihin ilman mah-

dollisia sisäilmahaittoja. Koteloinnilla on myös muita merkittäviä etuja, kuten tasaiset tulostuslämpötilat, tulostimen suojaaminen pölyltä, sekä se vaimentaa tulostimesta lähtevää ääntä.



Kuva 35. Alveo3D valmistama 3D-tulostimen kotelo ja HEPA-suodatinyksikkö (Alveo3D 2022)

Tulostusympäristössä tulisi olla myös itse tulostimen lisäksi myös muut tarvittavat välineet. Tulostamista varten voisi olla erillinen tietokone tulostimen lähetyvillä, jolla 3D-mallit käsitellään tulostamista varten viipalointiohjelmalla. Myös tulostamisen jälkeen voidaan tarvita jonkinlaista jälkikäsittelyä, kuten tulostettujen osien liittämistä toisiinsa, tukimateriaalien poistoa ja pinnan viimeistelyä. Tulostusympäristön sijaintia korjaamalla suunniteltiin huomioiden lämpötilan tasaisuus ja huoneilman puhtaus, jonka vuoksi tulostimen sijoittaminen toimistotiloihin olisi järkevin ratkaisu. Tulostusympäristön lopullinen sijainti ja laitteisto jää kuitenkin henkilökunnan päätettäväksi, mikäli laitteistoa päädytään hankkimaan.

8.3 Tulostuslaitteiston kustannusarvio

Edellä mainituista laitteista tehtiin kustannusarviot. Laitteet valikoituivat kustannusarvioon sen vuoksi, koska ne ovat tehokkaita ja käyttövalmiita ammattikäyttöön tarkoitettuja kokonaisuuksia. Tämän vuoksi kuluttajille suunnatut tulostimet jäivät kokonaan pois. Tulostimet ovat yhteensopivia useimpien materiaalien kanssa ja sisältävät suodattimet, jolloin erillinen poistoilmalaitteisto tai ilmanvaih-

don tehostaminen ei ole välttämätöntä. Tulostimien lisäksi arvioon otettiin mukaan työssä esitellyt 3D-skannerit, sekä filamentin kuivauskaappi. Arviossa ei otettu huomioon pientarvikkeita tai muita mahdollisia tarvikkeita.

Taulukko 2. Tulostuslaitteiston kustannusarvio

Tulostuslaitteiston kustannusarvio		
Pursotusmenetelmä		ALV 24%
BNC3D Epsilon 50W SC	9 995,00 €	12 393,80 €
Sisältää:		
BNC3D Epsilon 50W	6 995,00 €	8 673,80 €
BNC3D Smart Cabinet	3 495,00 €	4 333,80 €
Yhteensä:	10 490,00 €	13 007,60 €
Ultimaker S5 Pro Bundle	9 350,00 €	11 594,00 €
Sisältää:		
Ultimaker S5	5 535,00 €	6 863,40 €
Ultimaker S5 Air Manager	750,00 €	930,00 €
Ultimaker S5 Material Station	2 750,00 €	3 410,00 €
Yhteensä:	9 035,00 €	11 203,40 €
Tulostusmateriaali (kg)	30,40 €	40,00 €
Filamenttiensäilytyskaappi		
Smart3D Multimaterial Dryer	3 225,00 €	3 999,00 €
3D-skanneri		
Einscan Pro X2	4 999,00 €	6 198,76 €
Einscan Pro X2-plus	6 299,00 €	7 810,76 €
Artec Leo	26 700,00 €	33 108,00 €
Jauhepetimenetelmä		
Sinterit Lisa X	17 258,00 €	21 400,00 €
Sinterit Lisa Pro	11 990,00 €	14 867,60 €
Material handling station	7 990,00 €	9 907,60 €
Sinterit Atex Vacuum Cleaner	2 790,00 €	3 459,60 €
Hiekkapuhalluskaappi	690,00 €	855,60 €
Tulostusmateriaali (kg)	130,00 €	161,20 €
Yhteensä: (Sinterit Lisa X)	28 858,00 €	35 783,92 €
Yhteensä: (Sinterit Lisa Pro)	23 590,00 €	29 251,60 €

9 TARVITTAVA OSAAMISEN KARTOITUS

Osalla henkilökunnasta on jo jonkinlainen käsitys 3D-tulostamisesta ja sen tuomista mahdollisuuksista ja käyttökohteista. 3D-tulostamiseen liittyen henkilökuntaa voidaan tarpeen mukaan kouluttaa esimerkiksi Lapin ammattikorkeakoulun Kemin Kosmos-kampuksella sijaitsevassa 3D-tuloslaboratoriossa. Lyhyelläkin vierailulla saataisiin henkilökunnalle ajantasainen käsitys erilaisista 3D-tulostusmenetelmistä, materiaaleista ja niiden tarjoamista mahdollisuuksista.

9.1 Suunnitteluun tarvittava osaaminen

3D-tulostettavan osan valmistaminen vaatii 3D-mallinnusosaamista. Tulostettavia 3D-malleja on myös laajasti ostettavissa ja vapaasti ladattavissa internetissä, mutta täyden hyödyn 3D-tulostamisesta saa irti, mikäli tulostettava tuote on mahdollista mallintaa itse. Prototyyppien tulostaminen vaatii enimmäkseen 3D-mallinnusosaamista, koska osat tulevat useimmiten näköismalliksi tai sovituskäyttöön. Mallintamisosaamisesta olisi hyötyä myös, jos 3D-tulostusympäristöön hankittaisiin 3D-skanneri. Täyden hyödyn skannerista saisi, mikäli skannattuja 3D-malleja pystyttäisiin tarvittaessa itse muokkaamaan.

Koska prototyyppien ja näköismallien lisäksi joskus voi olla tarkoituksena on tulostaa toiminnallisia osia, vaatii käyttökohteeseen soveltuvan osan tulostaminen materiaalitietämyksen lisäksi myös 3D-tulostamiseen tarkempaa perehtymistä. Käyttöön tulevaa 3D-tulostettavaa osaa suunniteltaessa on kuitenkin tärkeää tietää materiaalien asettamien rajoitusten lisäksi 3D-tulostamisen asettamat rajoitukset, mikäli tulostettavan osan halutaan soveltuvan käyttökohteeseen.

9.2 Tulostamiseen tarvittava osaaminen

3D-tulostaminen on yksinkertainen ja helppokäyttöinen prosessi. Tämän vuoksi esimerkiksi FDM-tulostimet ovat suuressa suosiossa kuluttajien keskuudessa. Varsinkin kalliimmat ja ammattikäyttöön suunnatut 3D-tulostimet ovat helppokäyttöisiä ja pitkälti automatisoituja laitteita. Nykyään markkinoilla olevissa laitteissa on myös selkeä käyttöliittymä, sekä hyvin vaiheistettu tarvittavat työvai-

heet. Tulostinta käyttävän henkilön olisi kuitenkin hyvä osata perusteet viipalointiohjelman käytöstä sekä tulostamisen aikana mahdollisten ongelmatilanteiden syyt ja tarvittavat toimenpiteet niitä varten. Myös mahdolliset terveysriskit on tiedostettava ja käytettävä tarpeen vaatiessa henkilökohtaisia suojaimia. Tarvittavaa osaamista voidaan hankkia esimerkiksi Lapin AMK tulostuslaboratoriossa sopimuksen mukaan järjestettävällä koulutuksella. Koulutuksen avulla yritys saa mahdollisimman ison hyödyn hankitusta laitteistosta.

10 POHDINTA

Projekti lähti hyvin käyntiin suunnitelman osalta, mutta heti varhaisessa vaiheessa ilmeni haasteita tulostettavien osien valinnassa. Tulostettavien osien kohteita olisi voinut mahdollisesti miettiä jo hyvissä ajoin ennen itse projektia, jolloin osia olisi päässyt kokeilemaan käytössä. Osien varsinainen testaaminen jäi kuitenkin pois, mikä olisi ollut mielenkiintoista. Testaaminen olisi kuitenkin vaatinut useamman kuukauden riippuen koneen käyttötunneista. Mikäli projektissa 3D-tulostetut osat olisivat toimitteet käyttökohteessa, ei niiden tulostaminen olisi siltikään kannattavaa.

Alkuperäisen osan hintaan nähden 3D-tulostaminen oli huomattavasti edullisempi ratkaisu, mutta yrityksellä on jo mahdollisuus ostaa kyseiset osat ulkopuoliselta yritykseltä valettuina osina. Valuosien hankintahinta on vain murto-osa alkuperäisten hinnasta, jonka vuoksi 3D-tulostettujen osien on vaikea kilpailla kannattavuudessa. Vaikka osien 3D-tulostaminen olisikin vielä edullisempi vaihtoehto, ei se kuitenkaan ole niin tehokasta pitkien tulostusaikojen ja pienen kapasiteetin vuoksi. Lisäksi pursotusmenetelmällä valmistetut osat eivät ole mekaanisilta ominaisuuksiltaan niin hyviä, joten osien toiminta-aika voi olla merkittävästi lyhyempi.

Työn päätavoitteena oli kuitenkin selvittää, voiko 3D-tulostamista hyödyntää jontekin korjaamolla. Vaikka tulostetut varaosat eivät saavuttaneet toivottuja tuloksia, näen kuitenkin, että 3D-tulostamista voitaisiin hyödyntää korjaamolla, kun sille löydetään oikea käyttökohde. Esimerkiksi erilaisten prototyyppien valmistaminen, koska silloin osalta ei vaadita niin hyviä mekaanisia ja muita ominaisuuksia. Myös erilaisten monimutkaisten osien valmistaminen olisi tehokasta 3D-tulostamalla. Yrityksellä on kuitenkin mahdollisuudet saada suhteellisen pienellä investoinnista suurikin hyöty, mikäli sitä osataan käyttää oikein. 3D-tulostuslaitteiston hankinnan myötä yrityksessä todennäköisesti alettaisiin huomaamaan erilaisia käyttökohteita, milloin 3D-tulostusta voitaisiin hyödyntää.

Työn aikana opin paljon 3D-tulostamiseen liittyvää teoriaa, kuten tulostusmenetelmistä ja materiaaleista. Myös erilaiset projektinhallintataidot kehittyivät. Projek-

tissa laadittiin myös 3D-tulostusmateriaalin valintaa helpottava taulukko, jota yritys voi hyödyntää ja soveltaa, mikäli tulostuslaitteistoa hankitaan. Kustannusarvio pyrittiin tekemään sellaisesta laitteistosta, joka täyttää korjaamon tarpeen. Laitteiksi valikoitui käyttövalmiit tulostuslaitteistot pursotus-, sekä jauhepetisulatusmenetelmille. Kustannusarvion eri vaihtoehdot sisältävät kaiken tarvittavan tehokkaalle 3D-tulostamiselle ja on myös suhteellisen kustannustehokas.

Jatkotutkimuksen kohteita voisi olla esimerkiksi 3D-tulostuslaitteiston sijoitus ja käyttöönotto korjaamolla, syvempi perehtyminen esimerkiksi varaosiin ja kartoitus tulostettavista osista. Myös osien testaamista voisi tutkia erilaisissa käyttökohteissa, mikäli mahdollisia kannattavia tulostuskohteita löytyy, sekä tutkia mahdollisen 3D-skannerin hyödyntämiskohteita.

LÄHTEET

- 3DJAKE 2022. Joustavat filamentit 3D-tulostimille. Viitattu 8.6.2022
<https://www.3djake.fi/filamentit/joustava-filamentti>
- 3Dnatives 2019. Laser Scanner vs Structured Light Scanner: which should you choose? 8.8.2019 Viitattu 24.4.2022 <https://www.3dnatives.com/en/laser-3d-scanner-vs-structured-light-3d-scanner-080820194/#!>
- 3Dnatives 2020. 3D Printing Materials Guide: Plastics. 8.6.2020 Viitattu 10.4.2022 <https://www.3dnatives.com/en/plastics-used-3d-printing110420174/#!>
- 3d-tulostus 2022a. Einscan Pro 2X 3D-skanneri. Viitattu 28.4.2022
<https://www.3d-tulostus.fi/Einscan-Pro-2X-3D-skanneri>
- 3d-tulostus 2022b. Einscan Pro 2X Plus 3D-skanneri. Viitattu 28.4.2022
<https://www.3d-tulostus.fi/Einscan-Pro-2X-Plus-3D-skanneri>
- ALL3DP 2021. Best 3D Printer Filament for 2022 – The Ultimate Guide. 27.12.2021 Viitattu 10.4.2022 <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>
- Alsop, T. 2020. Worldwide most used 3D printing materials, as of July 2018. 2.3.2020 Viitattu 10.4.2022 <https://www.statista.com/statistics/800454/worldwide-most-used-3d-printing-materials/>
- Alsop, T. 2021. Most used 3D printing technologies worldwide 2021. 19.5.2021 Viitattu 28.1.2022 <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>
- Alveo3D 2022. Safe 3D printing. Viitattu 23.4.2022 <https://www.alveo3d.com/en/>
- BNC3D. 2022. BCN3D EPSILON W50. Viitattu 21.4.2022
<https://www.bcn3d.com/bcn3d-epsilon/?model=w50>
- Carolo, L. 2020. What Is a 3D Slicer? – Simply Explained. 13.4.2020 Viitattu 23.4.2022 <https://all3dp.com/2/what-is-a-3d-slicer-simply-explained/>
- Gregurić, L. 2019. What Is Material Jetting? – 3D Printing Simply Explained. 21.3.2019 Viitattu 28.1.2022 <https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/>
- Gu, J., Wensing, M., Uhde, E & Salthammer, T. 2019 Characterization of particulate and gaseous pollutants emitted during operation of a desktop 3D printer. 5.1.2019 Viitattu 15.3.2022 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412018323663?via%3Dihub>
- Fink, J. 2018. 3D Industrial Printing with Polymers. Hoboken: Wiley

Flynt, J. 2020. Structured Light 3D Scanning: What Is It and How Does It Work? 1.10.2020 Viitattu 24.4.2022 <https://3dinsider.com/structured-light-3d-scanning/>

Formlabs 2022. Guide to 3D Printing Materials: Types, Applications, and Properties. Viitattu 16.4.2022 <https://formlabs.com/blog/3d-printing-materials/>

Gibson, I., Rosen, D., Stucker B & Khorasani M 2021. Additive Manufacturing Technologies. New York: Springer

Hanaphy, P. 2021. Sinterit unveils new “ten times faster” Lisa X ahead of Formnext: Technical specification and pricing. 11.9.2021 Viitattu 26.4.2022 <https://3dprintingindustry.com/news/sinterit-unveils-new-ten-times-faster-lisa-x-ahead-of-formnext-technical-specifications-and-pricing-199355/>

Hashmi, S. 2014. Comprehensive Materials Processing. Amsterdam: Elsevier

Horne, R & Hausman, K. 2017. 3D Printing for Dummies. Hoboken: Wiley

Interesting Engineering. 2020. How do 3D scanners work. Viitattu 28.1.2022 <https://interestingengineering.com/understanding-technology-how-do-3d-scanners-work>

Kamani, K. 2020. Types of 3D Scanning Technologies and 3D Scanners 6.29.2020 Viitattu 24.4.2020 <https://www.linkedin.com/pulse/types-3d-scanning-technologies-scanners-karan-kamani>

Kumar, S. 2020. Additive Manufacturing Processes. Cham: Springer

Laserdesign. 2022. What is 3D scanning. Viitattu 28.1.2022 <https://www.laser-design.com/what-is-3d-scanning>

Micallef, J. 2015. Beginning Design for 3D Printing. Berkeley: Apress

Pannett, L. 2019. Supercharg3d: How 3D Printing Will Drive Your Supply Chain. Hoboken: Wiley

Redwood, B. 2022a. Dimensional accuracy of 3D printed parts. Viitattu 24.4.2022 <https://www.hubs.com/knowledge-base/dimensional-accuracy-3d-printed-parts/>

Redwood, B. 2022b. Types of 3D printing. Viitattu 28.1.2022 <https://www.hubs.com/knowledge-base/types-of-3d-printing/>

Schwaar, C. 2021. Betting on Binder Jetting for Production Additive Manufacturing. 26.8.2021 Viitattu 10.4.2022 <https://all3dp.com/1/betting-on-binder-jetting-for-production-additive-manufacturing/>

Sculpteo. 2022. What is 3D scanning. Viitattu 28.1.2022 <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/what-is-3d-scanning/>

SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Helsinki: SFS.

Simplify3D. 2022. Ultimate 3D Printing Materials Guide. Viitattu 10.4.2022 <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>

Sinterit 2022. Sinterit Powder Handling Station Viitattu 22.4.2022 <https://sinterit.com/peripherals/phs/>

Smart3D 2022. Smart3D Multimaterial Dryer. Viitattu 3.5.2022 <https://www.smart3d.tech/smart3d/dryers/>

Sulkanen, A. 2018. Käänteinen suunnittelu 23.5.2018 Viitattu 24.4.2022 <https://www.an-cadsolutions.fi/kaanteinen-suunnittelu/>

Tapojärvi Oy 2021. Suomalainen kiertotalouden edelläkävijä, kaivos- ja tehdaspalveluiden erikoisosaaja. Viitattu 22.4.2022 <https://www.tapojarvi.com/en/front-page/#tapojarvi>

TU Wien 2021. AMT-equipment at TU Wien. Viitattu 16.4.2022 <https://amt.tu-wien.ac.at/equipment/>

Ultimaker 2022. Ultimaker S5 Pro Bundle. Viitattu 21.4.2022 <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-s5-pro-bundle>

Viitanen, A., Kangas, A., Huhtiniemi, M., Kanerva, T., Stockmann-Juvala, H., Säämänen, A., Kukko, K., Tuomi, J., Partanen, J., Kallonen, K & Hämeri, K. 2017. Materiaalia lisäävän valmistuksen (3D-tulostus) kaas- ja hiukkaspäästöt eri työvaiheissa. Työterveyslaitos 2017 Viitattu 15.3.2022 <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131891/Materiaalia%20lis%C3%A4%C3%A4v%C3%A4n%20valmistuksen%20%283D-tulostus%29%20kaasu-%20ja%20hiukkasp%C3%A4st%C3%B6t%20eri%20ty%C3%B6vaiheissa.pdf?sequence=1>

LIITTEET

Liite 1. Materiaalinvalintataulukko

Liite 1. Materiaalivalintataulukko

Materiaalivalintataulukko									
Ominaisuudet	Materiaalit								
	PLA	PETG	ABS	HIPS	Nylon	ASA	PC	PP	TPU
Iskunkestävä			X	X	X	X	X		
Lämminkestävä			X	X	X	X	X	X	
Kemikaalienkestävä									X
Joustava								X	X
Vedenkestävä		X				X			
Väsymiskestävä		X			X			X	X
UV-kestävä						X			
Läpinäkyvä							X		
Elintarviketurvallinen	X	X		X	X			X	
Käyttökohteet	Prototyypit / näkösmallit	Toiminalliset prototyypit	Toiminalliset osat	Lukeneva tulkinateriaali	Kulutusta kestävät osat	Ulkokäyttöön tarkoitettut osat	Lämminkestävät osat	Vähäliujiset osat	Joustavat ja pehmeät osat, kemikaaleja kestävät osat
Vahvuudet	Eduullinen, mittaattaka, helppo tulostaa	Kiittäviä ja sileä pinta, vähäiset häjät tulostettaessa	Eduullinen, hyvät mekaaniset ominaisuudet, hyvä lämmönkestävyys	Eduullinen, kevyt, hyvät mekaaniset ominaisuudet	Kestävä ja osittain joustava, kulutusta kestävä, ei epämiellyttäviä häjyjä tulostettaessa	Kestää hyvin UV-säteilyä, iskun ja kulutuksen kestävä, korkea lasitumis lämpötila	Iskunkestävä, lämpökestävä, voidaan taivuttaa hajottamatta	Sileä pinta, hyvä iskun ja kulutuksen kestävyys, hyvä lämmönkestävyys	Hyvät värinävaimennus ominaisuudet, iskunkestävyys, säilyvyys
Heikkouudet	Huono lämmönkestävyys, ei soveltu ulkokäyttöön	Huono silttaominaisuudet	Voimakas lämpöväärinely, tulostuksesta syntyvät häjät, kuitumisesta johtuva mittaepätarkuus	Korkea tulostuslämpötila, vaatii ilmanvaihdon	Lämpöväärinely, ei soveltu kosteaan ympäristöön	Kallis, vaatii korkean tulostuslämpötilan, vaatii ilmanvaihdon	Vaatii erittäin korkean tulostuslämpötilan, lämpöväärinely, imee kosteutta ilmastista	Kallis, voimakas väärinely, tarttumisen vaikeudet, heikot kerrosten välilt	Vaikea tulostaa, huono silttaominaisuudet, vaatii mahdollisesti suoraveo tulostuspäin