



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Oscar McCammond

# Metallitulostimen hankinta-analyysi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

17.05.2021

|  |  |
|--|--|
| Tekijä<br>Otsikko<br><br>Sivumäärä<br>Aika   | Oscar McCammond<br>Metallitulostimen hankinta-analyysi<br>58 sivua<br>17.05.2021   |
| Tutkinto   | Insinööri (AMK)  |
| Tutkinto-ohjelma   | Konetekniikka  |
| Ammatillinen pääaine   | Konetekniikka  |
| Ohjaajat   | Pekka Salonen, yliopettaja, ajoneuvo- ja konetekniikka<br>Juho Jalava-Kanervio, projekti-insinööri, ajoneuvo- ja konetekniikka |
| <p>Materiaalia lisäävän valmistuksen suosio on ollut nousussa jo vuodesta 2014 ja COVID-19-pandemiasta huolimatta lisäävän valmistuksen markkinat kasvoivat 7.5% vuonna 2020 [Wohlers Report 2021: 104]. Markkinoiden kasvu sekä teknologian suosio ei ole jäänyt huomaamatta ja siksi monet koulut ympäri maailmaa ovat jo hankkineet omat tulostuslaitteistonsa. Suomesakin metalli- ja muovitulostimia löytyy jo Savonian, Tampereen ja Turun AMK:sta sekä Lappeenrannan teknillisestä yliopistosta.</p> <p>Tämän insinööriyön tarkoitus oli analysoida metallitulostinmarkkinoita ja saatujen tulosten pohjalta suositella Metropolian koululle parasta mahdollista metallitulostinkokonaisuutta. Työssä käydään läpi yleiskatsaus suosituista tulostustekniikoista ja tulostinvalmistajista. Metropolian antamien kriteerien: hinnan, turvallisuuden ja koon pohjalta valittiin lopulliseen vertailuun kolmen eri valmistajan laitekokonaisuudet. Kyseisten valmistajien kanssa käytiin useampi viikko keskustelua sähköpostin välityksellä laitteiden ominaisuuksista, käyttövaatimuksista, valmistuksen kustannuksista ja laitekokonaisuuksien lopullisista hinnoista. Kaikki laitevalmistajat eivät olleet yhtä avoimia lopullisten kustannusten tai laitevaatimusten suhteen.</p> <p>Lopullisessa vertailussa arvioitiin tarkemmin laitteen toimittajilta saatuja tarjouksia, laitteiden ominaisuuksia ja käyttöturvallisuutta. Tehtyjen vertailujen pohjalta päädyttiin parhaimpaan mahdolliseen laitekokonaisuuteen, jota on suositeltu Metropolian koululle.</p> |  |
| Avainsanat   | Ostoanalyysi, 3D tulostus, metallitulostus, ainetta lisäävä valmistusmenetelmä   |

|  |  |
|--|--|
| Author<br>Title  | Oscar McCammond<br>Procurement analysis for metal printer  |
| Number of Pages<br>Date  | 58 pages<br>17.05.2021   |
| Degree   | Bachelor of Engineering  |
| Degree Programme   | Mechanical engineering & Production technologies   |
| Professional Major   | Mechanical engineering   |
| Instructors  | Pekka Salonen, yliopettaja, ajoneuvo- ja konetekniikka<br>Juho Jalava-Kanervio, projekti-insinööri, ajoneuvo- ja konetekniikka |
| <p>The popularity additive manufacturing has been on the rise since 2014 and despite COVID 19 pandemic, the manufacturing market grew by 7.5% in year 2020 [Wohlers Report 2021: 104]. Market growth and the popularity of technology have not gone unnoticed and therefore many schools around the world have already acquired their own printing equipment. Metal and plastic printers can already be found in Finnish Universities of Applied Sciences, such as in Savonia, Tampere and Turku, as well as in Lappeenranta University of Technology.</p> <p>The purpose of this thesis work was to analyze the metal printer market, and based on the results obtained, to recommend the best possible metal printer package to the Metropolia University of Applied Sciences. An overview of popular printing techniques and printer manufacturers is reviewed based on the criteria provided by Metropolia. Three different printer manufacturers were chosen for the final comparison based on their price, safety, and size. Discussions were held with the manufacturers for several weeks by e-mail on the characteristics of the devices, the requirements for usage, the cost of manufacturing as well as the final prices of the needed set of devices. Not all the device manufacturers were as transparent with the information concerning the final costs or device requirements.</p> <p>The final section of the thesis assessed the comparisons in more detail, concerning the received offers, features of the printers, and the safety. Based on the comparison, a conclusion was drawn, and the best possible printing packaged was recommended for Metropolia.</p> |  |
| Keywords   | Purchasing analysis, 3D printing, metal printing, additive manufacturing,  |

# Sisälllys

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | Johdanto  | 1  |
| 2 | Metallitulostimet   | 4  |
|   | 2.1 Opinnäytetyön rajaus ja tavoite                             | 4  |
|   | 2.2 Yleisimmät metallitulostimet markkinoilla                   | 5  |
|   | 2.3 Tulostimien valmistajat ja jälleenmyyjät Euroopassa         | 6  |
|   | 2.4 Metallitulostuksen edut ja haitat                           | 6  |
| 3 | Valmistustekniikka  | 7  |
|   | 3.1 Jauhepölytekniikka (SLS, SLM, DMLS, EBM)                    | 8  |
|   | 3.2 Suorakerrostus (DED)  | 11 |
|   | 3.3 Pursotus (FFF, FDM, BPE, BMD)                               | 13 |
|   | 3.4 Materiaalin / sideaineen suihkutuspöly (MJ, BJ)             | 15 |
| 4 | Metropolian asettamat valmistustekniikoiden luokitteluperusteet | 18 |
|   | 4.1.1 Tulostimen käyttöympäristö Metropoliasa                   | 18 |
|   | 4.1.2 Metropolian käyttötarpeet ja -kohteet                     | 18 |
|   | 4.1.3 Sopivimmat laitteet Metropolian käyttöön                  | 19 |
| 5 | Valittujen tulostimien käyttövertailu                           | 19 |
|   | 5.1 Tulostinkokonaisuuksien laitteistot                         | 19 |
|   | 5.1.1 Markforged 3D   | 19 |
|   | 5.1.2 Desktop Metal   | 20 |
|   | 5.1.3 SLM Solutions   | 21 |
|   | 5.2 Laitteiden operointiominaisuudet                            | 22 |
|   | 5.3 Laitteiden tulostuslaatu                                    | 26 |
|   | 5.3.1 Yleistä tulostuslaadusta                                  | 26 |
|   | 5.3.2 Vertailtavien laitteiden minimitarkeus                    | 27 |
|   | 5.3.3 Vertailtavien laitteiden tulostusalustan koko             | 28 |
|   | 5.4 Laitteiden tulostusaika                                     | 28 |
|   | 5.5 Laitteistojen ylläpito                                      | 32 |
|   | 5.5.1 Laitteistojen vaatima ylläpito ja perushuolto             | 32 |
|   | 5.5.2 Jättemateriaalin hävittäminen ja kierrätys                | 33 |

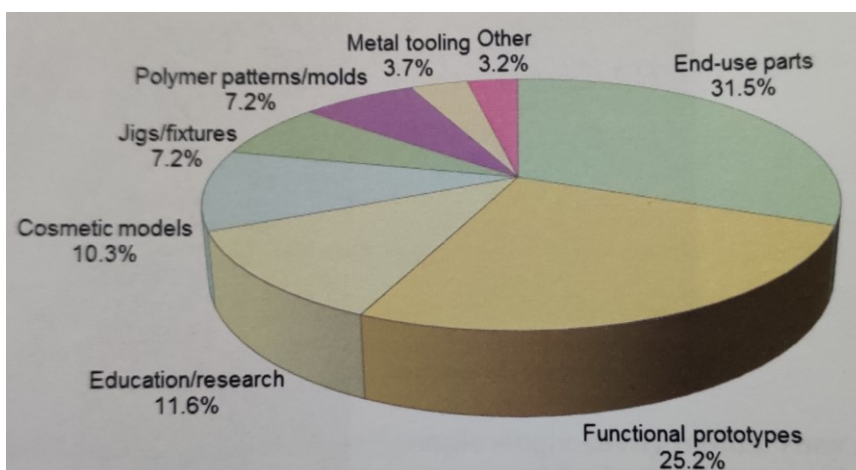
|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.6   | Laitteistojen vaatimat työtilat                        | 34 |
| 5.7   | Laitteiston koko ja sijoittelu työtilaan               | 35 |
| 6     | Turvallisuus   | 36 |
| 6.1   | Työtilan turvallisuusvaatimukset                       | 37 |
| 6.2   | Tarvittavat turvavarusteet                             | 37 |
| 7     | Laitteistojen hinnat ja käyttökulut                    | 37 |
| 7.1   | Myyntihinnat   | 37 |
| 7.1.1 | Markforgedin tarjous – Metal X                         | 38 |
| 7.1.2 | Desktop Metalin tarjous – Studio System 2              | 39 |
| 7.2   | Tila- ja käyttökustannukset                            | 40 |
| 7.2.1 | Työtilojen valmistelukustannukset                      | 40 |
| 7.2.2 | Materiaalikustannukset                                 | 40 |
| 8     | Tulostimien vertailu                                   | 43 |
| 8.1   | SLM 125  | 43 |
| 8.2   | Studio System 2:n ja Metal X:n vertailu                | 43 |
| 8.3   | Studio System 2:n ja Metal X:n käyttökustannusvertailu | 44 |
| 8.4   | Studio System 2:n ja Metal X:n turvallisuusvertailu    | 45 |
| 9     | Yhteenveto ja suositukset                              | 45 |
| 10    | Lähteet  | 46 |

## Lyhenteet ja termit

|      |                                |
|------|--------------------------------|
| AM   | Additive Manufacturing         |
| BJ   | Binder Jetting                 |
| BMD  | Bound Metal Deposition         |
| BPE  | Bound Powder Extrusion         |
| CAD  | Computer Aided Design          |
| CAM  | Computer Aided Manufacturing   |
| DED  | Direct Energy Deposition       |
| DMLS | Direct Metal Laser Sintering   |
| EBM  | Electron Beam Melting          |
| FDM  | Fused Deposition Modeling      |
| FFF  | Fused Filament Fabrication     |
| LOM  | Laminated Object Manufacturing |
| MJ   | Material Jetting               |
| PBF  | Powder Bed Fusion              |
| SLM  | Selective Laser Melting        |
| SLS  | Selective Laser Sintering      |
| VAT  | Photopolymerization            |

## 1 Johdanto

”Materiaalia lisäävä valmistus”, (Additive Manufacturing, AM) tai 3D-tulostus on yhteinen nimitys kaikille valmistusmenetelmille, joilla fyysinen kappale pystytään rakentamaan geometriakuvauksen eli tietokoneavusteisen suunnittelun (CAD:in) ja tulostuslaitteiston avulla. Standardin SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 mukaan kyseisiä eri menetelmiä käytetään laajasti eri sovelluksissa teknologiateollisuudessa, mutta niiden käyttö on myös yleistynyt muilla sektoreilla, kuten lääketieteessä, koulutuksessa, arkkitehtuurissa, kartografiassa sekä lelu- ja viihdeteollisuudessa. Kuva 1 edustaa lisäävän valmistuksen jakauman vuonna 2020. [Wohlers Report 2021: 104; SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017: 5.]



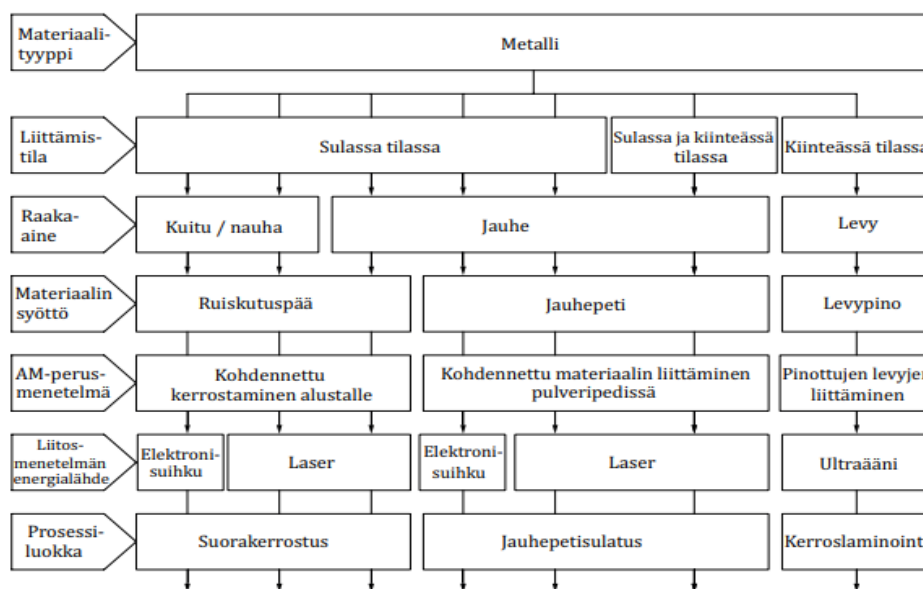
Kuva 1. Lisäävän valmistuksen jakauma 2020 (Wohlers Report 2020 s. 30).

3D-tulostuksessa voidaan hyödyntää erilaisia materiaaleja, jotka valitaan käyttötarkoituksen mukaan. Tässä lopputyössä keskitytään metallin tulostamiseen.

Metallien työstämisen voi jakaa karkeasti kolmeen pääkategoriaan: materiaalin muovaamiseen, poistamiseen ja lisäämiseen [SFS-EN ISO/ASTM 52900: 2017: 16]. 3D-tulostus kuuluu näistä kolmanteen kategoriaan. Materiaalia lisäävää valmistusta on kehitetty jo 80-luvulta saakka ja nykyisin se sisältää muovi-, metalli-, komposiitti- sekä keramiikkatulostusteknologiat. Ensimmäiset metallien lasersulatuksella (SLM) toimivat tulostinpatentit tehtiin jo vuonna 1995 Saksassa Fraunhofer-yhteisön toimesta. Lyhyen historian ja

monien uusien patenttien takia 3D-tulostus koki hidasta, mutta varmaa kasvua 2000-luvun alkupuolella. Vuodesta 2012 lähtien metallitulostus kasvoi ja kehittyi nopeasti, johon alkuperäisten tulostuspatenttien kuten ”Samanaikainen monikerroksinen kovettuminen stereolitografiassa 2014” (US5597520), ”Menetelmä ja laite kolmiulotteisen objektin tuottamiseksi stereolitografialla 2015” (US5554336) ja ”Menetelmä ja laite kolmiulotteisen objektin prototyyppien tekoon 2016” (US6007318), sekä monien muiden vanhentumisesta [Smalley ym. 1994; Hull W, Charles 1995 & Russell ym. 1996]. Myös suurten yritysten, kuten General Motors (GE) ja Hewlett-Packard (HP), massiiviset sijoitukset edistivät metallitulostuksen kehitystä. [Wohlers Report 2021: 18-20; Wohlers 2021: 28-29.]

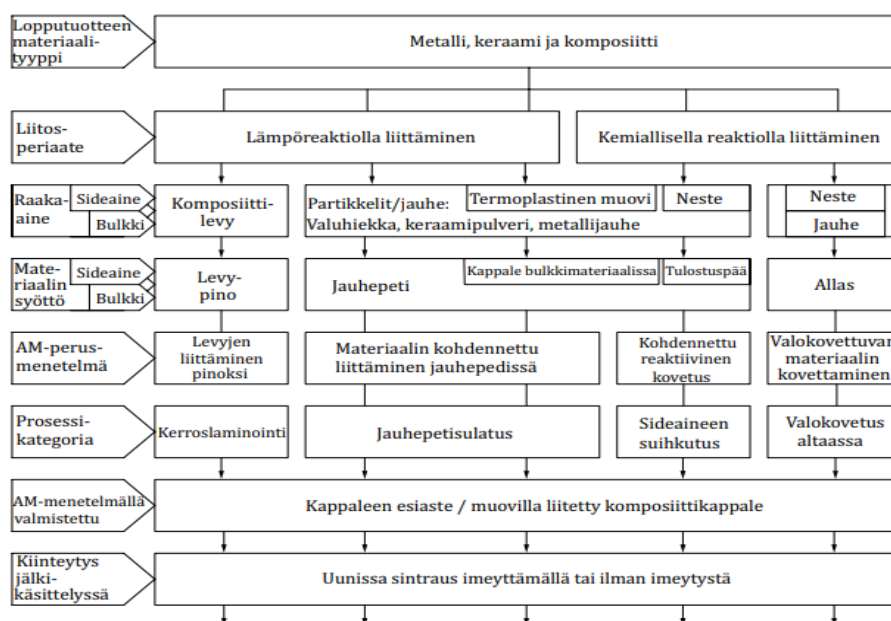
Tänä päivänä AM-prosessi voidaan jakaa kahteen kategoriaan, joista ensimmäinen on yksivaiheinen prosessi, missä kappale saa halutun geometrian ja tavoitellut materiaaliominaisuudet yhdessä prosessivaiheessa. Hyvänä esimerkkinä yksivaiheisesta AM-prosessista on jauhepetisulatusmenetelmä Selective Laser Melting (SLM), jossa valmistettu kappale on heti valmis tulostuksen jälkeen huomioon ottamatta tarvittavia jälkikäsittelyjä. Kuvassa 2 on esillä Standardin SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 mukainen yksivaiheinen prosessi. [SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017: 17-20.]



Kuva 2. Yksivaiheinen prosessi metallia lisäävässä valmistuksessa (EN ISO ISO/ASTM 52900:2017, s. 18).



Toisessa tapauksessa eli monivaiheisessa prosessissa kappale saavuttaa ensin halutun geometrian ja seuraavissa vaiheissa halutut materiaaliominaisuudet. Kappaleen jälkikäsitteilyä tai tukien poistoa ei kuitenkaan oteta huomioon prosessien vaiheissa. Bound Metal Deposition (BMD) eli pursotusmenetelmä toimii taas esimerkkinä monivaiheisesta AM-prosessista, sillä kappale vaatii tulostuksen jälkeen pesun, jossa sidosaine poistetaan kemiallisesti ja lopuksi sintrauksen uunissa, missä kappaleen lopullinen geometria saavutetaan. Kuvassa 3 on Standardin SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 todentama monivaiheinen prosessi. [SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017: 17-20.]



Kuva 3. Monivaiheinen prosessi metallia lisäävässä valmistuksessa (EN ISO ISO/ASTM 52900:2017, s. 19).

Ainetta lisäävässä valmistuksessa kappale suunnitellaan joko ensin tietokoneavusteisella sovelluksella eli CAD-ohjelmistolla kolmiulotteiseksi malliksi, tai 3D-skannaamalla fyysinen kappale suoraan ohjelmistoon. Kolmiulotteinen malli syötetään tulostimen omaan ohjelmistoon, jonka perusteella konkreettinen kappale tulostetaan. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa kappaleiden suunnittelun toiminnallisuuden kannalta paremmin, sillä aiemmin lähes mahdottomat tai liian työläät muodot perinteisillä materiaalia poistavilla ja muovaavilla prosesseilla pystytään nyt tulostamaan. Materiaalia lisäävällä prosessilla pystytään hyödyntämään materiaaleja ja monimutkaisia rakenteita entistä paremmin, mikä mahdollistaa sekä kevyemmät ja kestävämmät rakenteet että erinäisten

komponenttien yhdistämisen yhdeksi kokonaisuudeksi. Kuvassa 4 SLM-tulostettua Porschen moottorin painoa pystyttiin pudottamaan jopa 40 %. Kokoonpanosta saatiin neljäkymmentä eri osaa poistettua yhdistämällä moottorin eri osia ja verkkorakenteen myötä rakenteen jäykkyys parani huomattavasti. [Wohlers Report 2021: 19; Vossi Hypermuutos 2021.]



Kuva 4. SLM Solutions -laitteella tulostettu Porschen moottori (Vossin Hypermuutos PowerPoint s. 24).

## 2 Metallitulostimet

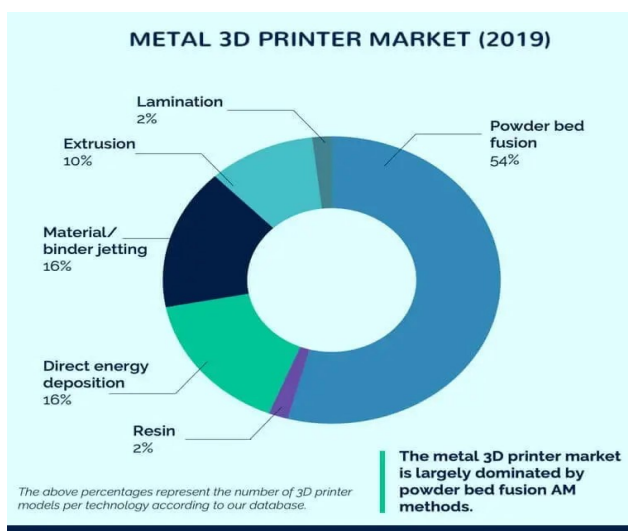
### 2.1 Opinnäytetyön rajaus ja tavoite

Metropoliassa on käyty jo erittäin pitkään keskustelua metallitulostimen hankinnasta opetus- ja tutkimuskäyttöön. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tehdä taustaselvitystä eri 3D-metallitulostimista tämänhetkisillä markkinoilla ja tuloksiin pohjautuen suositella parasta mahdollista ratkaisua uudesta tulostinkokonaisuudesta. Työssä otetaan kantaa Metropolian omiin tarpeisiin tulostimelle ja annettuihin vaatimuskriteereihin koskien turvallisuutta, käyttöympäristöä ja hintaa. Työssä sivutaan lyhyesti markkinaosuuksia, lai-

tevalmistajia, sekä eri tulostusprosesseja. Ensimmäisessä osassa opinnäytetyötä käydään metallitulostus läpi hyvin yleisellä tasolla, jonka jälkeen työ keskittyy pääsääntöisesti muutamaankin eri tulostinvaihtoehtoon annettujen vaatimusten perusteella. Valittuja tulostusprosesseja ja laitteistoja vertaillaan toisiinsa käyttäen hyväksi annettuja kriteerejä, kuten käyttöturvallisuutta, hintaa, ylläpitoa, kokoluokkaa, huoltoa, käyttörajoitteita, tilavaatimuksia, sekä tulostuslaatua ja -aikaa. Materiaali- ja laitetutkimukset perustuvat suureksi osaksi laitevalmistajien omiin tuoteselostuksiin ja ennalta suunnitellun testiosan ”benchmark” eli vertailutuloksiin.

## 2.2 Yleisimmät metallitulostimet markkinoilla

Suurin osa maailman 3D-metallitulostimista hyväksikäyttää jauhepetitekniikkaa (kuva 5) ja siihen kuuluvia eri prosesseja kuten DMP, SLM, SLS ja SLA:ta. Jauhepetitekniikka on teollisuuskäytössä suosituin prosessi, sillä se mahdollistaa suuremman tuotannon ja laajemman materiaalivalikoiman [Huckstepp 2019]. Muita suosittuja prosesseja ovat mm. pursotus (FFF ja FDM), materiaalin tai sideaineen suihkutusta (BJ ja MJ) ja suorakerrostus (DED). Vähemmän käytettyjä menetelmiä ovat kerroslaminointi (LOM) ja valokovetus altaassa (VAT Photopolymerization). Kuvassa 5 on Aniwaan 2019 vuonna tekemä tulostinmarkkinaraportti perustuen Aniwaan omaan dataan tulostimien myynnistä ja kysynnästä.



Kuva 5. Metallin 3D-tulostimien markkinaraportti 2019 (Cherdo 2021).

### 2.3 Tulostimien valmistajat ja jälleenmyyjät Euroopassa

3D-metallitulostimia valmistetaan ja toimitetaan ympäri maailmaa. Euroopan alueella merkittävimpiä toimijoita ovat kuitenkin taulukossa 1 esitellyt yritykset. Luokittelu perustuu myytyjen kappaleiden määrään ja yritysten kasvuun vuosien 2007–2020 aikana.

Taulukko 1. Suurimmat metallitulostintarjoajat Euroopassa (Wohlers Report 2021 s.113–117).

| Valmistaja    | Laitteen käyttämä prosessi   |
|---------------|------------------------------|
| Desktop Metal | Material Extrusion           |
| EOS           | Direct Metal Laser Sintering |
| 3D-systems    | Direct Metal Printing        |
| Renishaw      | Selective Laser Melting      |
| SLM Solutions | Selective Laser Melting      |
| Markforged    | Material Extrusion           |
| GE Arcam      | Electron Beam Melting        |
| Sisma         | Laser Metal Fusion           |
| Stratasys     | Fused Deposition Modeling    |
| Concept Laser | Direct Metal Laser Melting   |

### 2.4 Metallitulostuksen edut ja haitat

Ainetta lisäävä valmistus (AM) eli metallin 3D-tulostus pohjautuu pitkälti sitä aiemmin kehiteltyihin muovin 3D-tulostuksen menetelmiin ja käytäntöihin. Nykyisin metallin 3D-tulostuksen suosio on kasvanut eri teollisuusaloilla, sillä se poistaa suuren osan geometrisista rajoituksista, joita perinteiset valmistusmenetelmät asettavat ja näin ollen mahdollistaa vaihtelevien ja erittäin monimutkaisten osien valmistuksen mutkattomasti. Ainetta lisäävän valmistuksen tarkoitus ei ole kuitenkaan täysin korvata muita valmistusmalleja, vaan laajentaa perinteisten valmistusmenetelmien toistettavuutta ja luotettavuutta ”pien-tuotannossa” ja kustomoitujen osien valmistuksessa. [Alhonen ym. 2015: 8-10.]

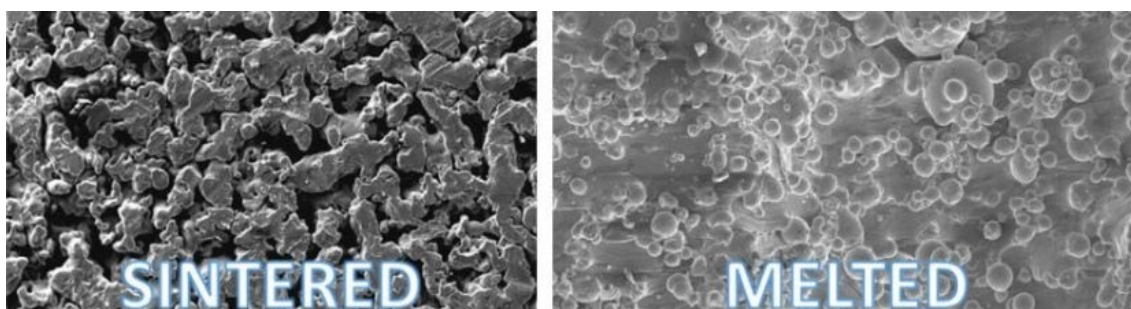
3D-tulostus luo myös uusia mahdollisuuksia suunnitteluun, sillä missä ennen keskityttiin optimoimaan kappaleet perinteisille valmistusmenetelmille, voidaan nyt ensisijaisesti optimoida kappaleen rakennetta. AM:n muita etuja ovat myös työkalujen, suurien tilojen ja varastojen tarpeettomuus, tuotteiden ja tuotannon helppo ja nopea muokattavuus, sekä valmistuksen helppo optimointi. Tuotteiden monimutkaisuus ei myöskään lisää kustannuksia ja ainehukka on erittäin vähäistä valmistuksessa. [Alhonen ym. 2015: 8-10.]

Eduista huolimatta ainetta lisäävä valmistus voi olla selkeästi kalliimpi tapa tuottaa osia, ainakin jos verrataan pelkästään koneiden, materiaalien ja kulutustarvikkeiden hintoja. Yksittäisten osien hinnat voivat olla satoja tai jopa tuhansia euroja kalliimpia verrattuna muihin valmistusmenetelmiin. On siis tärkeää hyödyntää AM:n tuomia ominaisuuksia kappaleissa, joiden valmistaminen muilla menetelmillä olisi vaikeaa ja kallista. (DFM) eli ”Design for manufacturability” on suunnittelufilosofia, jonka mukaan valmistuskustannuksia voidaan alentaa ottaen huomioon jokaisen menetelmän tuomat rajoitukset. Esimerkiksi naulojen tulostaminen olisi todella kallista ja erittäin turhaa 3D-tulostamalla, kun taas optimoimalla moottorin rakennetta ja tulostamalla se yhdestä kappaleesta voidaan säästää rahaa. Vaikka AM helpottaa kappaleiden muodon valintaa verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin, tulee kuitenkin ottaa huomioon AM:n tuomat uudet käytännön haasteet. Esimerkiksi laitteesta riippuen ohuimmat seinämien paksuudet vaihtelevat n. 0.25–2.5 mm välillä. Suuria kappaleita on mahdotonta tulostaa johtuen pienistä tulostus- alustoista. Noin 300x300x1000mm suuruisen tulostuksen pinnanlaatu vaatii monesti jälkikäsittelyä kerroksellisuuden takia. Riippuen tulostustekniikasta myös tukimateriaalin poisto voi vaatia erilaisia työstökoneita kuten lankasahaa. Kappaleisiin ei voi myöskään suunnitella onttoja rakenteita, joista tukimateriaalin poisto olisi mahdotonta. [Alhonen ym. 2015: 8-10; Bikas ym. 2020: 291-293.]

### 3 Valmistustekniikka

Metallin ainetta lisäävät prosessit voidaan jakaa karkeasti neljään pääkategoriaan: jauhepetimenetelmään, suorakerrostukseen, pursotukseen ja materiaalin sekä sideaineen suihkutukseen [Cherdo 2021]. Karkeasta rajauksesta huolimatta jokainen menetelmä kattaa yhden tai useamman eri valmistusprosessin, jotka pohjautuvat samaan konsep-

tiin, mutta joiden toimintaperiaate silti eroaa toisistaan. Hyvänä esimerkkinä tästä on jauhepetiteknikassa käytetty SLS (Selective laser sintering) ja SLM (Selective laser melting). Metallin sintrauksessa käytetään lämmön ja paineen yhdistelmää partikkelien tarttumiseksi yhteen. Sintratut osat ovat huokoisia ja vaativat lämpökäsittelyä osan vahvistamiseksi, tästä huolimatta ne eivät koskaan ole yhtä vahvoja kuin taotut metalliosat. Toisessa prosessissa laser taas sulattaa jauheen eri kerrokset yhteen riittävän korkeassa lämpötilassa saaden aikaan kiinteän kappaleen, joka ei tarvitse lämpökäsittelyä. Kuvassa 6 on vertailtu sintrauksen ja sulatuksen tuottamaa mikrorakennetta samasta materiaalista. [Total materia 2020.]



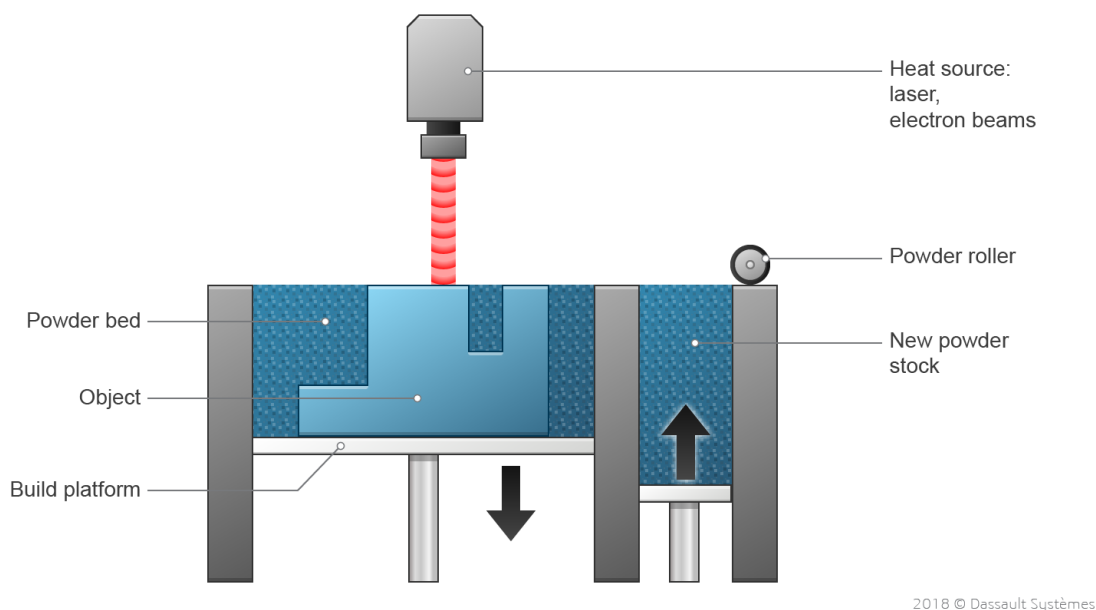
Kuva 6. Sintratun ja sulatetun metallin mikrorakenteen erot (Total Materia 2020).

Eri menetelmistä huolimatta kaikki tulostustekniikat pohjautuvat samaan periaatteeseen. Kaikissa näissä tapauksissa tulostettava materiaali lisätään ja kovetetaan tulostuspinnalle käyttäen eri menetelmiä. Tämän takia tulostuksen lopputulos, pinnanlaatu ja mikrorakenne vaihtelevat hyvinkin paljon riippuen käytetystä menetelmästä ja prosessista. Eri tulostustekniikoiden välillä on myös valtavia käyttöeroja. Niin kuin aiemmin esitetystä tulostimien markkinaosuusraportista (kuva 5.) voidaan todeta, jauhepetimenetelmä on yhä markkinoiden käytetyin tulostustekniikka. [Babu 2016: 730-734.]

### 3.1 Jauhepetiteknikka (SLS, SLM, DMLS, EBM)

”Powder Bed Fusion” eli suomeksi jauhepetiteknikka on maailman yleisimmin käytetty 3D-tulostustekniikka. Tämä 3D-tulostustekniikka mahdollistaa geometrisesti monimut-

kaisten tuotteiden valmistuksen äärimmäisellä tarkkuudella. Tarkkuuden ja muotojen aikaansaamiseksi laite käyttää yhtä tai useampaa lämpölähdettä, lähinnä laser- tai elektronisäteitä jauhepartikkeleiden sulattamiseksi kerroksittain ja siten muodostaen kiinteän osan. Jauhepetiteknikka tuo tullessaan useita käyttökelpoisia tekniikoita ja materiaaleja, mikä mahdollistaa vapaammat kädet suunnittelussa. Kuvassa 7 on esitelty yksinkertaistettu jauhepetilaitteen toimintamalli. [Dassault Systèmes 2021.]



**Kuva 7. Esimerkki jauhepetiteknikka-tulostuksen toimintamallista (3DEXPERIENCE 2020).**

Merkittävimmät jauhepetimenetelmät ovat:

### 1. SLS

SLS-prosessissa käytetään lasereita, jotka yhdistävät jauhemaista metallia sintraamalla kerros kerrokselta luoden kiinteän rakenteen. Lopullinen kappale puhdistetaan sitten harjoilla ja paineistetulla ilmalla ylimääräisestä jauheesta, joka kerätään talteen seuraavaa tulostusta varten. Pääasialliset käyttömateriaalit SLS-prosessissa ovat nylonpohjaiset materiaalit ja erilaiset alumiiniseokset. [Dassault Systèmes 2021.]

## 2. SLM / DMLS

SLM / DMLS-prosesseissa käytetään samoja teknisiä periaatteita kuin SLS-prosessissa, mutta tulostusmateriaalina käytetään yksinomaan metalleja. SLM-prosessissa jauhe sulatetaan täysin, jotta metalleja, kuten alumiinia, voidaan käyttää sekä kevyiden ja vahvojen varaosien että prototyyppien luomiseen. DMLS-prosesseissa käytetään eri metalliseoksia, kuten titaaniseoksia. Prosessissa jauhe sintrataan yhteen. Tämän vuoksi menetelmät edellyttävät lisätukea korkean jäännösjännitteen kompensoimiseksi ja vääristymien rajoittamiseksi. Taulukossa 2 on esitettyinä markkinoilla yleisesti käytettyjä SLM / DMLS-tulostimia ja niiden hinta-arvioita. [Dassault Systèmes 2021.]

## 3. EBM

EBM-tulostustekniikalla saavutetaan fuusio käyttäen suurenergistä elektronisuihkua. EBM-prosessilla voidaan vähentää jäännösjännitystä ja näin ollen pienentää vääristymien määrää. Prosessi kuluttaa vähemmän energiaa kuin muut jauhepetimenetelmät ja tuottaa kerroksia nopeammin kuin SLS-tekniikka. Tämä tulostusprosessi on suosituin ilmailu- ja lääketieteellisessä teollisuudessa. [Dassault Systèmes 2021.]

Taulukko 2. Yleisimpiä jauhepetilaitteita ja niiden hintoja.

| Nimi       | Hinta-arvio        | Tekniikka | Tulostuspedin koko (mm) |
|------------|--------------------|-----------|-------------------------|
| SLM 125    | 250 000 – 350 000€ | SLM/DMLS  | 125x125x75              |
| RenAM 500E | 250 000 – 400 000€ | SLM/DMLS  | 245x245x335             |

Alla laitevalmistajien tarjoamat kuvat kyseisistä koneista vuonna 2020 julkaistuista laite-esitteistä.





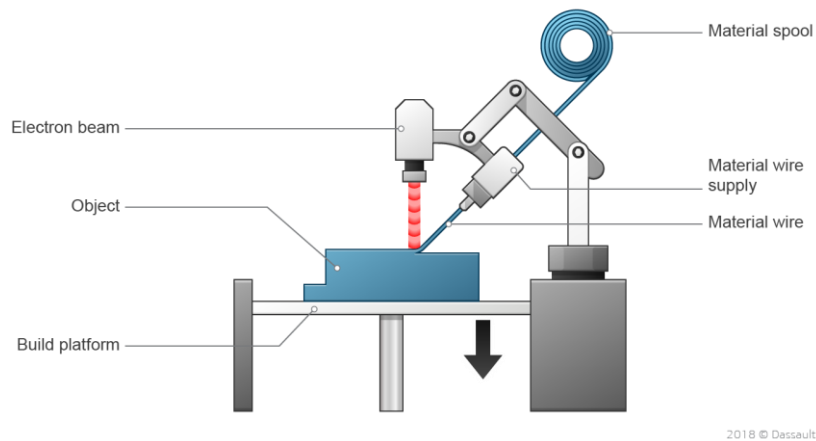
Kuva 8. SLM 125 (SLM Solutions brochure 2020).



Kuva 9. RenAM 500E (Renishaw brochure 2020).

### 3.2 Suorakerrostus (DED)

Suorakerrostuksessa eli “Direct Energy Deposition” luodaan kappaleita sulattamalla materiaalia suoraan kerros kerrokselta työalustalle. Tätä valmistustekniikkaa käytetään enimmäkseen metallijauheiden tai metallilangan kanssa. Suurin osa DED 3D-tulostimista ovat valtavia teollisuuskoneita, joiden operointi vaatii suljettua ja hallittua työympäristöä. Tyypillinen DED-tulostin koostuu suuttimesta, joka on asennettu moniakseliseen varteen suljetussa kehyksessä. Prosessi on hyvin samankaltainen pursotuksen kanssa, sillä suutin työntää materiaalin työstöpinnalle, missä laser tai elektronisuihku sulattaa materiaalin luoden fyysisen kappaleen (kuva 10). [Dassault Systèmes 2021.]



**Kuva 10. Esimerkki suorakerrostus-tulostuksen toimintamallista (3DEXPERIENCE 2020).**

Suurimpana erona pursotukseen on kuitenkin suuttimen mahdollisuus liikkua jopa viidellä eri akselilla, kun taas FFF-prosesseissa suutin liikkuu yleensä vain kahdella tai kolmella eri akselilla. Yleisesti käytetyt materiaalit DED-prosesseissa ovat mm. kupari, alumiini, titaani, ruostumaton teräs, työkaluteräs ja nikkelseokset. Taulukossa 3 on yleisiä DED-prosessia hyödyntäviä tulostimia ja niiden hinta-arvioita. [Dassault Systèmes 2021.]

**Taulukko 3. Yleisiä suorakerrostuslaitteita ja niiden hintoja.**

| Nimi               | Hinta-arvio        | Tekniikka | Tulostuspedin koko (mm) |
|--------------------|--------------------|-----------|-------------------------|
| Modulo 250         | 250 000 – 400 000€ | DED       | 400x250x300             |
| FormAlloy L-series | 200 000 – 300 000€ | DED       | 200x200x200             |

Alla laitevalmistajien tarjoamat kuvat kyseisistä koneista vuonna 2020 julkaistuista laite-esitteistä.



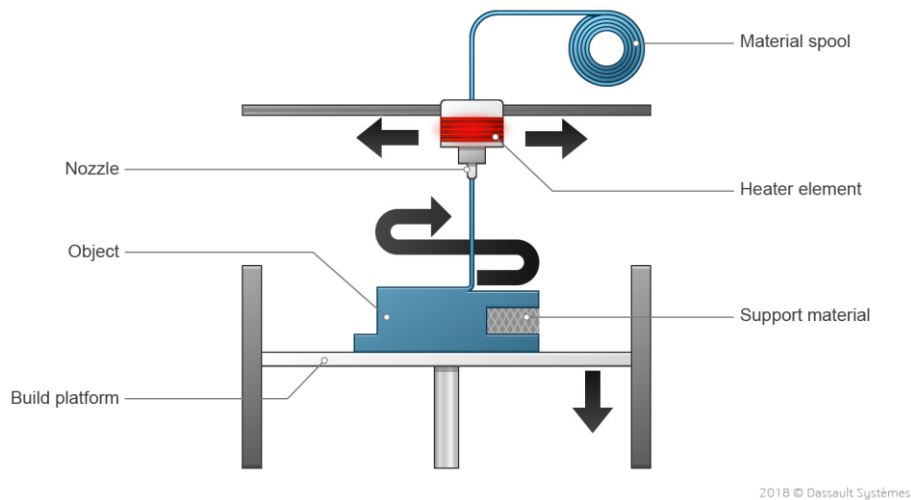
Kuva 11. Modulo 250 (BeAM solutions brochure 2020).



Kuva 12. FormAlloy L-series (FormAlloy brochure 2020).

### 3.3 Pursotus (FFF, FDM, BPE, BMD)

Metallin pursotusprosessi on hyvin samankaltainen muovin 3D-tulostuksen kanssa. Tulostusmateriaalia syötetään jatkuvalla tahdilla joko lankana kelasta tai patruunana lämmitetyn tulostussuuttimen pään läpi tulostusalustalle. Tulostus tapahtuu kerroksittain alustalle, jonka lämpöä voidaan hallita. Tulostussuutin liikkuu CAD-sovelluksen ohjajana kolmella eri akselilla saaden aikaan halutun muodon. Metallitulostimissa on yleensä kaksi suutinta, joista toinen on varattu tukimateriaalin ja tulostettavan materiaalin erotteluun käytetyn keraamin pursotukselle ja toinen itse tulostukseen. Kuvasta 13 voidaan todeta, että metallinpursotus on todellakin aivan samanlainen prosessi kuin tavallinen FDM-muovin tulostus. [Dassault Systèmes 2021.]



**Kuva 13. Esimerkki pursotustulostuksen toimintamallista (3DEXPERIENCE 2020).**

Vaikkakin pursotus on hyvin samankaltainen prosessi sekä muoville että metallille, suurimpina eroina ovat prosessin ajallinen kesto ja lisätoimintojen tarpeellisuus. Lisätoimintoihin lukeutuu mm. ”debind face” eli kemiallinen pesu, jossa materiaalista poistetaan muovinen sideaine, jota käytetään metallijauheen yhteensulautumiseen materiaalipatruunoissa. Pesun jälkeen kappaleet tullaan myös sintraamaan huokoisuuden vähentämiseksi ja pinnan laadun parantamiseksi. Kappale kutistuu noin. 20 % sintrauksessa, minkä vuoksi jo tulostusvaiheessa kappaleet tulostetaan 20 % suuremmiksi. Se tulee ottaa huomioon kappaleiden asettelussa alustalle. Monet kappaleet voivat vielä vaatia jälkikäsittelyä pinnanlaadun parantamiseksi sintrauksen jälkeen. Taulukossa 4 esiteltynä markkinoiden yleisimmät pursotuslaitteet ja niiden hintahaarukat. [Dassault Systèmes 2021.]

**Taulukko 4. Yleisiä pursotuslaitteita ja niiden hintoja.**

| Nimi                        | Hinta-arvio        | Tekniikka | Tulostuspedin koko (mm) |
|-----------------------------|--------------------|-----------|-------------------------|
| Metal X                     | 100 000 – 150 000€ | BPE       | 300x220x180             |
| Desktop Metal Studio System | 120 000 – 200 000€ | BMD       | 300x200x200             |

Alla laitevalmistajien tarjoamat kuvat kyseisistä koneista vuonna 2020 julkaistuista laite-esitteistä.

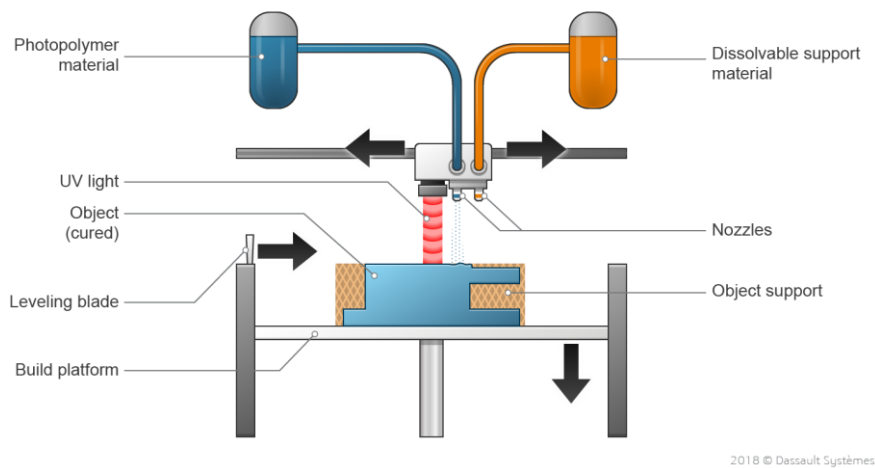


Kuva 14. Metal X (Markforged brochure 2020).

Kuva 15. Studio System 2 (Desktop Metal brochure 2020).

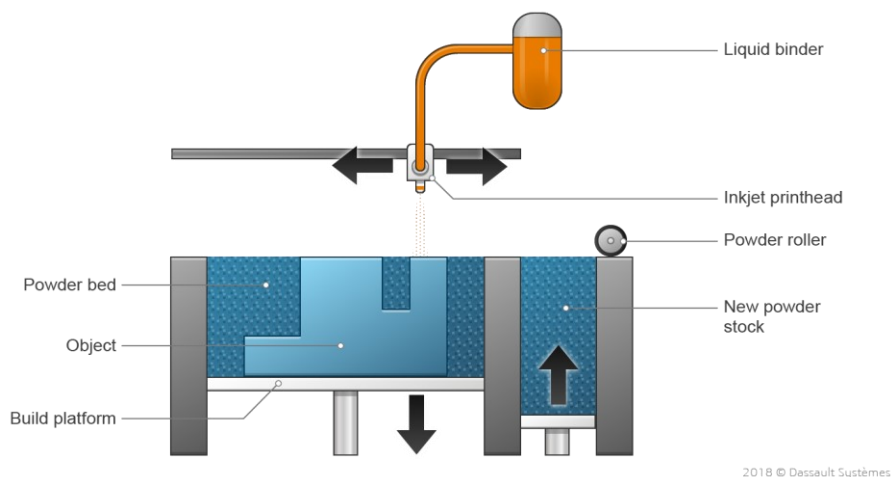
### 3.4 Materiaalin / sideaineen suihkutus (MJ, BJ)

”Material jetting” eli materiaalin suihkutusta on yleensä verrattu 2D-musteensuihkutusprosessiin. Hyödyntäen metalleja, fotopolymeerejä tai vahoja, jotka kiinteyttävät, kun niihin kohdistetaan valoa tai lämpöä, pystytään fyysinen osa tulostamaan hyvin tarkasti kerros kerrokselta. Materiaalin suihkutus mahdollistaa myös eri materiaalien 3D-tulostuksen samassa osassa. Prosessissa materiaalia suihkutetaan tulostuspinnalle sadoista eri pienistä suuttimista tulostuspäässä, jonka jälkeen se kovetetaan kerroksittain kohdistamalla siihen lämpöä tai UV-valoa. Materiaalin suihkutus on hyvin lineaarinen prosessi mikä tekee siitä nopean ja tehokkaan, mutta kappaleet vaativat lähes aina tukimateriaalia mikä tulostetaan samanaikaisesti toisesta suuttimesta, (kuva 16). Materiaalin suihkutus on erinomainen valinta todenmukaisten prototyyppien valmistukseen, sillä se tarjoaa korkeaa tarkkuutta ja erinomaista pinnanlaatua. Prosessi on kuitenkin erityisen kallista ja UV-aktivoitujen fotopolymeerit menettävät mekaaniset ominaisuutensa ajan myötä ja haurastuvat. [Dassault Systèmes 2021.]



**Kuva 16. Esimerkki materiaalin suihkutukseen perustuvan tulostuksen toimintamallista (3DEXPERIENCE 2020).**

”Binder jetting” eli sidosaineensuihkutus on prosessi, jossa käytetään jauhetta sekä sidosainetta. Jauhe, joka on yleensä keraamia tai metallia, levitetään ohueksi kerrokseksi tulostuspinnalle. Sideaineen suihkutusta tapahtuu tulostuspään kautta, joka suihkuttaa sen tasaisesti jauheen päälle. Suihkutuksen jälkeen kone asettelee uuden kerroksen jauhetta sitoutuneen kerroksen päälle toistuvasti, kunnes kappale on valmis. Kuva 17 esittää yksinkertaistettua sidosaineensuihkutusprosessia. [Dassault Systèmes 2021.]



**Kuva 17. Esimerkki sidosaineen suihkutukseen perustuvan tulostuksen toimintamallista (3DEXPERIENCE 2020).**

Tulostettu kappale on niin sanotusti "Green state" -nimisessä tilassa eli se on vielä keskeneräinen ja se vaatii siis vielä jälkikäsittelyä, kuten sintrausta. Monesti kappaleisiin lisätään seosaineita, joilla parannetaan niiden mekaanisia ominaisuuksia. Seosaine on yleensä joko syanoakrylaattiliima (keramiikan tapauksessa) tai pronssi (metallien tapauksessa). Toinen vaihtoehto on laittaa työkappale vihreässä tilassa uuniin ainejyvien sintraamiseksi. Taulukossa 5 esillä Sideaineen- ja materiaalin suihkutusta käyttäviä laitteita ja niille määritellyjä yleisiä hintatasoja. [Dassault Systèmes 2021.]

Taulukko 5. Yleisiä sidosaineen ja materiaalin suihkutuslaitteita ja niiden hintoja.

| Nimi                            | Hinta-arvio         | Tekniikka | Tulostuspedin koko (mm) |
|---------------------------------|---------------------|-----------|-------------------------|
| Desktop metal Production system | 700 000€ - 800 000€ | MJ        | 330x330x330             |
| DM P2500                        | 250 000 – 400 000€  | BJ        | 203x180x69              |



Kuva 18. Production System (Desktop Metal brochure 2020).

Kuva 19. DM P2500 (Digital Metal brochure 2020).

## 4 Metropolian asettamat valmistustekniikoiden luokitteluperusteet

Sekä valmistustekniikoiden että laitteiden valinta ja luokittelu perustuvat koulun antimiin lähtökriteereihin koskien käyttöympäristöä, tarpeita, käyttökohteita ja alkuperäistä budjettia. Lähtökohtaisesti luokittelussa on otettu huomioon kaikki valmistustekniikat ja laitevalmistajat, mutta jo alkuperäinen 200 000 - 250 000 € budjetti supistaa huomattavasti hankittavaksi sopivien laitteiden määrää. Mahdollisia laitekokonaisuuksia annetun budjetin rajoissa löytyy sekä jauhepeti- että pursotusmenetelmien joukosta.

### 4.1.1 Tulostimen käyttöympäristö Metropoliasa

Tulostinta ja kaikkia siihen tarvittavia lisäosia tullaan käyttämään kampuksella joko samassa laboratoriossa yhdessä muiden valmistuslaitteiden kanssa tai tarpeen vaatiessa sille tarkoitettussa omassa tilassa. Laitetta tullaan käyttämään opetusympäristössä, jossa oppilailla olisi mahdollisuus päästä tutustumaan ja käyttämään laitetta valvonnan alaisina.

### 4.1.2 Metropolian käyttötarpeet ja -kohteet

Pysyäkseen kilpailukykyisenä koulutuskohteena Metropoliasa tehtiin hankintapäätös omasta 3D-metallitulostimesta. Sen pääasiallinen käyttökohde olisi opetuksen ja tutkimustyön tukeminen Metropolian tekniikan aloilla ja pienten tilaustöiden valmistus yrityksille. Lisäämällä opiskelijoiden käytännön kokemusta tulostimista ja tulostusprosessista, voidaan opiskelijoille tarjota kattavampi perehdytys materiaalia lisäävien menetelmien opetuksessa.

Muualla Suomessa opetukseen ja tutkimukseen tarkoitettuja 3D-tulostimia on käytössä myös Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa ja Savonian, Tampereen ja Turun AMK:ssa [Heiskanen ym. 2019].



#### 4.1.3 Sopivimmat laitteet Metropolian käyttöön

Lopulliseen vertailuprosessiin selvisi kolme eri laitevalmistajaa ja heidän laitekokoaisuuksensa:

Taulukko 6. Lopullisen vertailun laitteet.

| Valmistaja    | Maahantuoja | Laite           |
|---------------|-------------|-----------------|
| Markforged 3D | PLM group   | Metal X         |
| Desktop Metal | Protech     | Studio System 2 |
| SLM Solutions | Vossi       | SLM 125         |

## 5 Valittujen tulostimien käyttövertailu

Lopullisessa luokittelussa päädyttiin kolmeen eri laitteeseen, joista kaksi käyttää pursotusmenetelmiä (BMD ja BPE) ja viimeinen jauhepetiteknikkaa (SLM). Pursotusmenetelmiä käyttävien Metal X:än ja Desktop System 2 välillä ei ole huomattavia eroja käytössä tai operoinnissa. Jauhepetiteknikkaa käyttävä SLM 125 -laite käyttää eri teknologiaa metallikappaleen tulostamiseen, jonka vuoksi laitteen käyttöönotto ja operointi vaatii hyvinkin erilaiset toimenpiteet.

### 5.1 Tulostinkokonaisuuksien laitteistot

#### 5.1.1 Markforged 3D

Taulukko 7. Tarvittavat laitteet tulostusprosessiin.

| Markforged 3D | Tuote                      |
|---------------|----------------------------|
| Metal X       | Tulostin                   |
| Wash 1        | Kemiallinen liuotusyksikkö |
| Sinter-2      | Sintrausuuni               |



Kuva 20 Metal X, Wash 1 ja Sinter-2 (Markforged brochure 2020).

Kaikki kolme laitetta kuvassa 20 ovat pakollisia kokonaisvaltaiseen tulostuksen operointiin. Tulostinkokonaisuutta on kuitenkin mahdollista kasvattaa ostamalla esimerkiksi useampi Metal X -tulostin, sillä pesurin ja sintrausuunin käyttökapasiteetti on huomattavasti tulostinta suurempi.

### 5.1.2 Desktop Metal

Taulukko 8. Tarvittavat laitteet tulostusprosessiin.

| Desktop Metal (PRO TECH) | Tuote                      |
|--------------------------|----------------------------|
| Studio System 2          | Tulostin                   |
| Desktop Metal Debinder   | Kemiallinen liuotusyksikkö |
| Desktop Metal Furnace    | Sintrausuuni               |



Kuva 21. Studio System 2, Desktop Metal Debinder ja Desktop Metal Furnace (Desktop Metal brochure 2020).

Kuvassa 21 esitelty Desktop Metallin tarjoama Studio System 2 eroaa Markforgedin paketista vain hieman, sillä se ei tarvitse jauheen liuotusyksikköä, vaan koko jälkikäsittelyprosessi tapahtuu uunin sisällä. Valitettavasti tähän prosessiin soveltuu tällä hetkellä vain 316L ruostumaton teräs. Tästä johtuen pakettiin sisällytettiin liuotusyksikkö, jotta kaikkia Desktop Metallin tarjoamia materiaaleja voisi vielä hyödyntää.

### 5.1.3 SLM Solutions

Taulukko 9. Tarvittavat laitteet tulostusprosessiin.

| SLM Solution (Vossi)  | Tuote                              |
|-----------------------|------------------------------------|
| SLM 125               | Tulostin                           |
| PSM 100               | Automaattinen jauheen seulontakone |
| Mallia ei spesifioitu | Jauheen kuivausuuni                |



Kuva 22. SLM 125 ja PSM 100 (SLM Solutions brochure 2020).

SLM Solutions -tulostinkokonaisuuteen kuuluu tulostimen lisäksi jauheen seulontalaitteisto, jolla vanhat, käyttämättömät jauheet saadaan seulottua takaisin ilmatiiviisiin jauheen säilytyskapseleihin (kuva 22). Seulontakoneen lisäksi monissa tapauksissa myös jauheen kuivausunille voi tulla tarvetta, jos jauheen sekaan pääsee kosteutta. Tulostin voi myös vaatia lisälaitteistoa, kuten erillisiä jäähdytysyksiköitä riippuen ilmanvaihdosta ja tilan koosta, jonne laite on asennettu.

## 5.2 Laitteiden operointiominaisuudet

On lukuisia eri tapoja vertailla 3D-tulostimien operointia ja käytön vaativuutta. Tässä tapauksessa on kuitenkin otettava huomioon, että tulostin tulee kouluun ja mahdollisesti jopa oppilaiden operointiin valvonnan alaisuudessa. Vertailuun valitut Desktop Studio System 2 ja Markforged Metal X ovat hyvin samankaltaiset metallitulostimet ja käyttävät samaa tulostustekniikkaa eri nimillä, Bound Metal Deposition (BMD) ja Bound Powder Extrusion (BPE). Laitteiden yhtäläisyydet ovat ajaneet yritykset jo useamman kerran oikeudenkäyntiin kopiointisyytteistä. Esimerkiksi vuonna 2018 Desktop haastoi Markforgedin oikeuteen patenttiloukkauksesta. [Maffei 2019.]

Sekä Studio System 2 että Metal X ovat yleiseen käyttöön suunniteltuja metallitulostimia. Tulostimet ovat turvallisia ja helppoja operoida jopa amatöörille valvonnan alaisuudessa, mikä tekee niistä ihanteellisia kouluympäristöön. Laitteet eivät vaadi erillisiä operointitiloja, vaan niitä voidaan pitää vaikka luokkahuoneessa, sillä laitteiden käyttämä metallijauhe on sidottu muovin kanssa yhteen.

Desktop Metal käyttää lyhyitä metallipatruunoita (kuva 23), jotka lastataan erilliseen kasettiin (kuva 24) tulostimessa. Patruunoita syötetään yksi kerrallaan kasetista tulostuspäähän, josta se sulatetaan tulostusalustalle. Materiaalin vaihdon yhteydessä kasetti, tulostin pää ja patruunan ohjaussauva tulee vaihtaa. [Studio System 2 User Guide.]

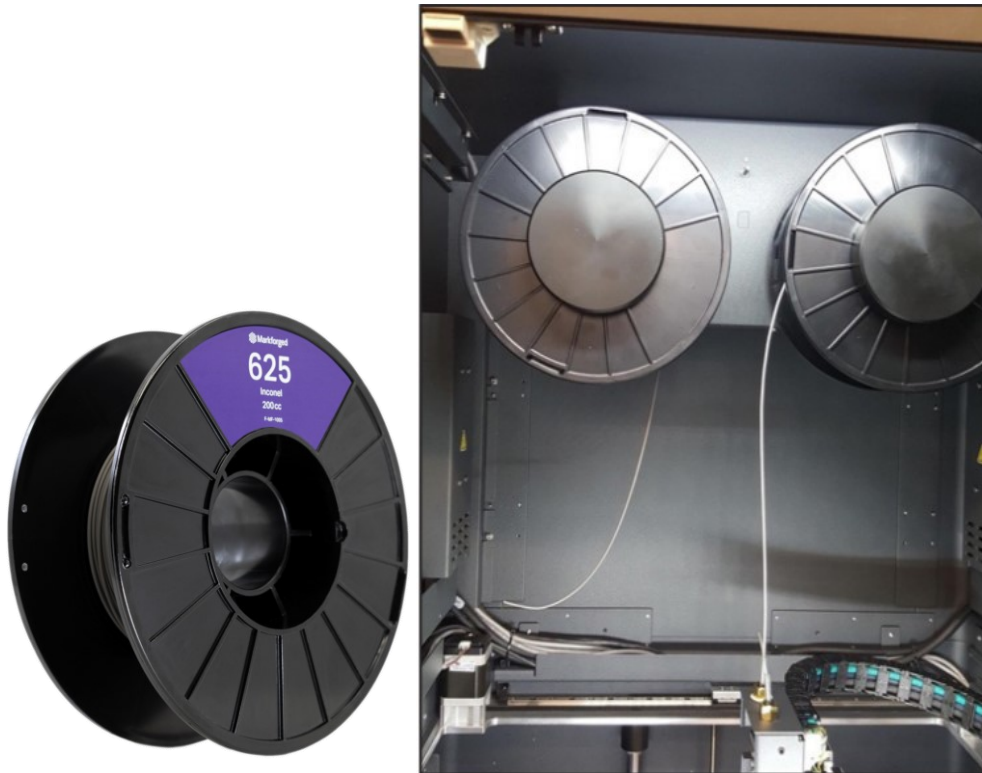


Kuva 23. Studio System 2 käyttämä metallipatruuna. (Desktop Metal Material brochure 2020).

kuva 24. Studio System 2 käyttämä metallipatruunakasetti. (SMG3D).

Markforged on taas lähestynyt materiaaleja samasta näkökulmasta kuin muovitulostuksessa. Heidän materiaalinsa ovatkin lankamaista metallia keloissa (kuva 24), mikä ripustetaan tulostimen sisälle aivan kuten muovitulostimissa (kuva 25). Tulostimen toiminta perustuu hyvin pitkälti FDM:ään ”Fused deposition modeling”, eli itse tulostus tapahtuu samalla tavalla kuin tavallinen PLA-muovitulostin tulostaisi kappaleen. Metallilanka vedetään tulostuspäähän, josta se sulatetaan tulostusalustalle. Materiaalin vaihdon yhteydessä ainoastaan kela täytyy vaihtaa uuteen materiaalin. Ennen seuraavaa tulostusta ”purge”-niminen operaatio tulee kuitenkin suorittaa, jotta tulostuspäähän jäänyt vanha

materiaali saadaan poistettua ennen kuin uudella materiaalilla ryhdytään tulostamaan.  
[Metal X User Guide.]



**Kuva 25.** Markforged:in käyttämä metallilanka (Markforged 3D Material brochure 2020).

**Kuva 26.** Markforged:in käyttämä metallilanka tulostimeen aseteltuna (Metal X User Guide).

Riippumatta laitteesta tulostuksen jälkeen kappale on ”Green state” -nimisessä tilassa. Se on noin 20% todellista kokoa suurempi ja huomattavasti hauraampi lopulliseen tilaan verrattuna. Tulostettuja kappaleita tulisi säilyttää mahdollisimman kuivassa tilassa, jottei niihin tulisi kosteusvaurioita. Tulostuksen jälkeen kappaleet tulee pestä kemiallisessa liuoksessa, joka poistaa muovisen sidoksen osista. Kemiallinen pesu on helppo suorittaa asettamalla kappaleet pesukoriin ja käynnistämällä kone. Ainoa tilanne, jolloin käyttäjä joutuu käsittelemään kemiallista liuotinta ”Opteon™ SF79\*” on vain, kun se pitää vaihtaa tai säiliötä pitää täyttää [Chemours 2019]. Pesun jälkeen kappaleet kuivatetaan ja lopuksi asetellaan sintrausuuniin. Sintrauksen yhteydessä kappaleet kutistuvat haluttuun alkuperäiseen kokoon. Koska operointi on helppoa ja mutkatonta, on kaikkien mahdollista päästä käyttämään laitetta valvonnan alaisina.

SLM Solutions tarjoaman SLM 125 -laitteen käyttö vaati huomattavasti kattavampaa tietämystä ja operointikokemusta. Vaativa käyttötaso johtuu pitkälti laitteessa käytettävästä metallijauheesta, joka on ihmiselle haitallista, jos sitä hengittää tai menee iholle (kuva 28). Henkilön, joka operoi, siivoaa ja ylläpitää laitetta, tulee osata käsitellä jauhetta oikein, käyttäen laitteen vaatimia suojavälineitä, kuten kokovartalosuoja-asua. Vaikka laite pystyy operoimaan ympäri vuorokauden, tulee sille asettaa yksi tai useampi kokoaikainen operoija, joka ylläpitää ja valvoo käyttöä. Vaaratilanteiden minimoimiseksi laitetta ei voi pitää yleisessä käytössä opiskelijoiden kesken, vaan sen käyttö tulee aina suorittaa operoijan valvonnan alaisuudessa. Toisin kuin FDM-laitteiden materiaalia, jonka säilytykseen riittää kuiva tila, tulee metallijauhe säilyttää kuivassa sekä ilmatiiviissä astiassa (kuva 28), jottei se pääsisi hapettumaan.



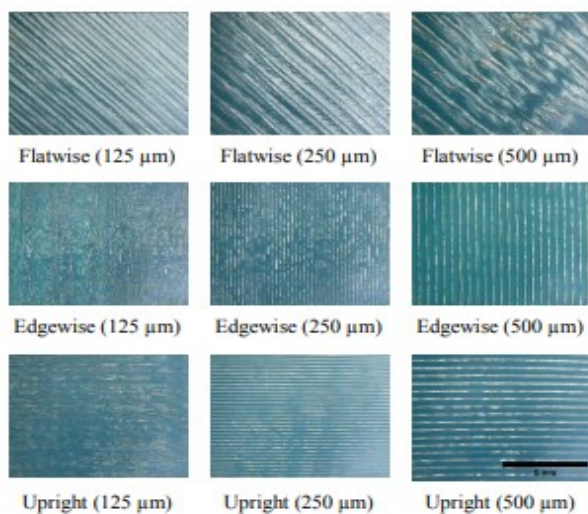
Kuva 27. Yleinen metallijauhe, jota voidaan käyttää SLM-prosessissa (inspire 2020).

Kuva 28. SLM 125 käyttämä ilmatiivis metallijauhesäiliö (TAMKJOURNAL).

### 5.3 Laitteiden tulostuslaatu

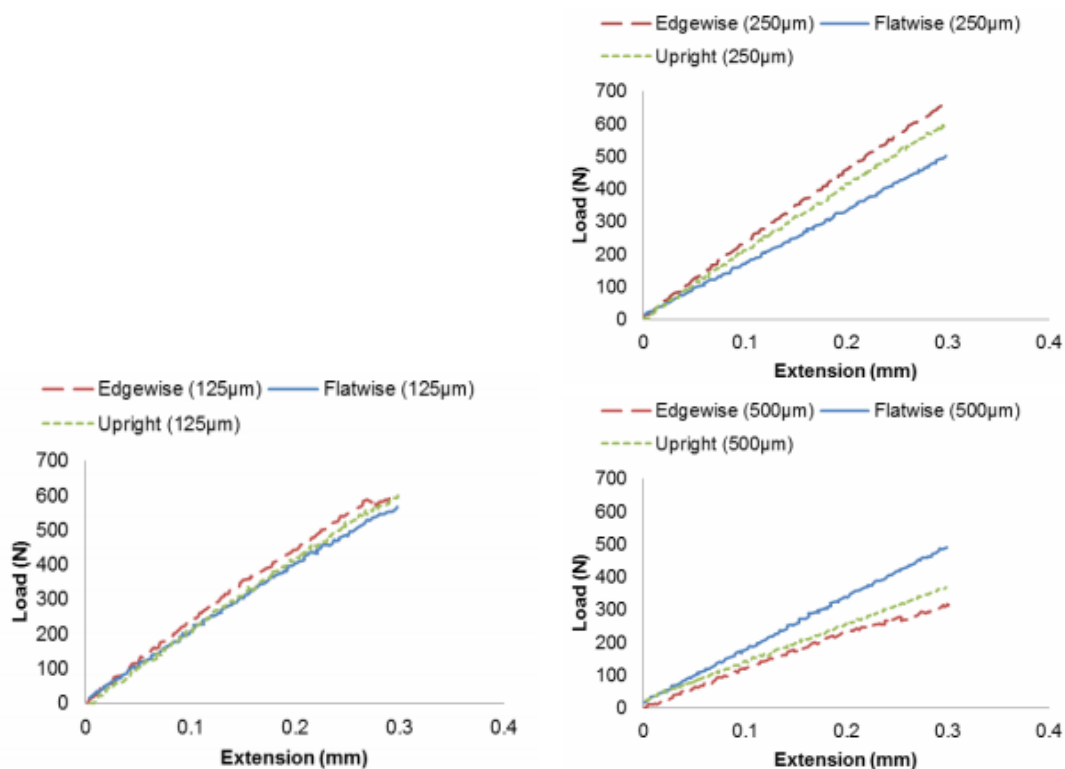
#### 5.3.1 Yleistä tulostuslaadusta

Tulostuslaatu on laaja käsite lisäävässä valmistuksessa eikä se ole suoraan verrannollinen mihinkään tiettyyn kappaleen ominaisuuteen. Teknologian kehittyessä laadun painopiste on kuitenkin siirtynyt lähemmäs kohti kappaleiden mekaanisia ominaisuuksia ja pinnan laatua. Tulostuksenlaatuun vaikuttaa moni asia, kuten tulostettava materiaali, tulostuslämpötila, laserinteho, tulostusnopeus, tulostussuunta ja kerrospaksuus. Moni valmistaja ilmoittaa kerroskorkeuden ja -paksuuden laitetiedoissaan, mutta sitä ei pidä kuitenkaan sekoittaa tulostuksen tarkkuuteen tai pienimmän mahdollisen yksityiskohdan kokoon. Lopullinen tulostustarkkuus on hyvin erilainen jokaiselle eri materiaalille ja riippuu pitkälti annetuista tulostusparametreistä. Kuvat 29 ja 30 tuovat ilmi kerrospaksuuden ja tulostussuunnan selvät vaikutukset kappaleen pinnan karheudessa ja mekaanisissa ominaisuuksissa. [Altan 2016; Kardys 2017.]



Kuva 29. Pinnan laatu kolmella eri kerrospaksuudella ja tulostussuunnalla (Altan, Kovan ja Topal s. 3).





Kuva 30. Kuormitus-venymäkäyrät kolmelle eri kerrospaksuudelle (Altan, Kovan ja Topal s. 3).

### 5.3.2 Vertailtavien laitteiden minimitarkkuus

Kerrospaksuus ei ole suoraan verrannollinen tulostuksen tarkkuuteen, mutta antaa silti hyvän lähtökohdan sen tutkimiseen. Desktop metallin ja Metal X välillä ei ole juurikaan eroja kerrospaksuuden kanssa, vaikkakin Desktop tarjoaa mahdollisuuden kahdelle eri resoluutiotulostukselle, joista toinen standardiversio on tarkoitettu nopeampaan tulostukseen. Kerrospaksuuden merkitys ei kuitenkaan ole läheskään niin tärkeä BPE- ja BMD-menetelmissä, sillä molempien menetelmien tulostuskappaleet sintrataan. Kappaleet kuitistuvat noin 20 % uunissa, mikä tulee ottaa huomioon tulostusvaiheessa. Sintraus parantaa kappaleiden pinnanlaatua ja mekaanisia ominaisuuksia. Jauhepetimenetelmää käyttävä SLM 125 ei kuitenkaan tarvitse sintrausta, jonka vuoksi kerrospaksuudella on suurempi merkitys tulostusvaiheessa. Tämän lisäksi jauhepetimenetelmällä valmistetut kappaleet vaativat aina jälkityöstöä. Ensin kappaleen ympäriltä tulee puhdistaa ylimää-

räinen metallijauhe, seuraavaksi irrottaa kappale tulostusalustasta ja poistaa tukirakenteet. Viimeisenä tulee kappaleen pinnat viimeistellä tarpeen mukaan, joko koneistamalla tai hiekkapuhaltamalla. [Sculpteo 2021; Luu 2018.]

Taulukko 10. Vertailuun otettujen laitteiden kerrospaksuus ja jälkikäsittelytarve. Tiedot otettu laitteiden esitteistä.

| Laite                         | Kerrospaksuus (µm)                                       | Jälkikäsittelyn tarve |
|-------------------------------|--|-----------------------|
| Metal X                       | 50-125   | kyllä                 |
| Desktop Metal Studio System 2 | 50-150 korkea resoluutio<br>150-300 standardi resoluutio | kyllä                 |
| SLM 125                       | 20-75  | kyllä                 |

### 5.3.3 Vertailtavien laitteiden tulostusalustan koko

Tulostusalustan koko asettaa teoreettisen maksimikoon tulostettaville kappaleille. Käytännössä tulostuksessa on kuitenkin huomioitava kappaleen kiinnitys ja tarvittavat tukimateriaalit. Tämän vuoksi kappaleiden lopullinen maksimikoko on huomattavasti tulostusalustaa pienempi. Jos osat ovat kuitenkin huomattavasti pienempiä, pystytään niitä tulostamaan useampi kerrallaan.

Taulukko 11. Laitteiden tulostuskoot - suoraan lainattu laitteiden esitteistä.

| Laite                       | Tulostuskammion koko (mm) | Tulostuskappaleen maksimikoko (mm) | Tulostuskappaleen maksimipaino (kg) |
|-----------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Metal X                     | 300 x 220 x 180           | 250 x 183 x 150                    | 10                                  |
| Desktop Metal Studio system | 300 x 200 x 200           | Ei mainittu                        | 6.5                                 |
| SLM 125                     | 125 x 125 x 125           | 75 x 75 x 75                       | Ei mainittu                         |

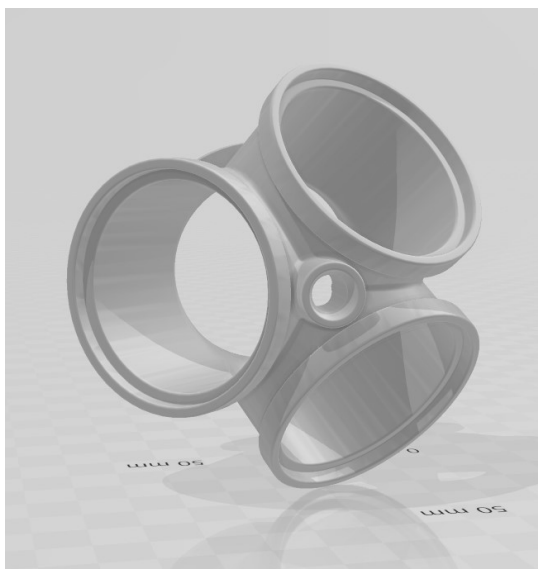
### 5.4 Laitteiden tulostusaika

Kappaleiden tulostusaika riippuu pitkälti tulostettavasta materiaalista ja halutusta tulostustarkkuudesta.

Metal X ja Studio System 2 käyttävät kolmivaiheista prosessia, jossa kappale ensin tulostetaan, jolloin se on ”Green state” -nimisessä vaiheessa. Tämän jälkeen se liuotetaan kemiallisessa pesunesteessä ”Debind phase”, jossa metallijauheeseen sidottu muovi poistetaan ja lopuksi se sintrataan uunissa. Johtuen kolmesta eri vaiheesta tulostusaika kasvaa tulostettaessa yksittäisiä osia. Molemmissa tapauksissa kemialliseen pesuun ja sintrausuuniin voidaan laittaa useita samasta materiaalista valmistettuja kappaleita samanaikaisesti, mikä vähentää kokonaistulostusaikaa. Desktop Metal on tuonut markkinoille vuonna 2020 uuden Studio System 2 -mallinsa, jonka avulla kemiallinen pesu jää kokonaan pois. Tämä ei kuitenkaan vähennä kokonaistulostusaikaa vaan ”Debind phase” siirtyy sintrauksen yhteyteen ja näin ollen sintrausaika pitenee. On myös huomioitava, että Studio System 2 tukee vain yhtä materiaalia 316L tällä hetkellä.

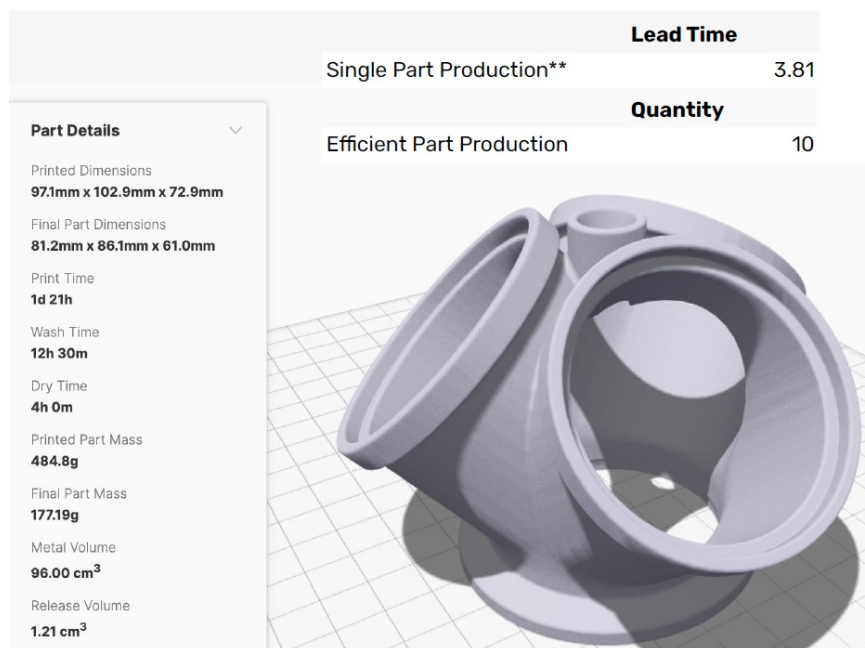
Jauhepetiteknikkaa käyttävä SLM 125 ei tarvitse eri vaiheita tulostusprosessissa, mikä näkyy heti tulostusajassa. Vaikka kappaleet vaativat jälkikäsittelyä tulostuksen jälkeen, on SLM 125 ylivoimaisesti nopeampi tulostamaan kappaleita.

Tulostusajan ja hinnan vertailuun tässä opinnäytetyössä on käytetty ”kollektori”-nimistä mallikappaletta (kuva 31), jonka mukaan kaikilta valmistajilta on haettu perusarvoja tulostuksen parametreista, kestosta ja hinnasta.



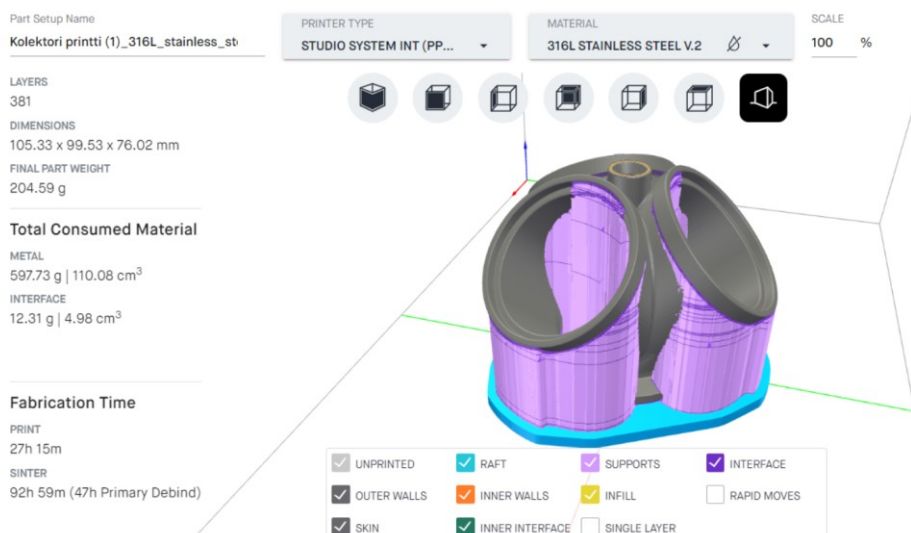
Kuva 31. Työssä käytetty mallikappale tulostusaikojen ja hintojen arviointiin.

Kappaleen CAD-tiedosto lähetettiin kaikille työssä arvioitaville tulostinvalmistajille.



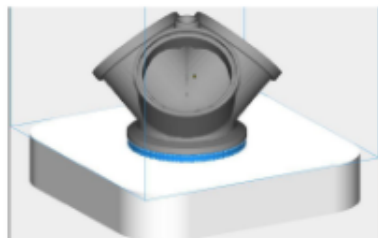
Kuva 32. Metal X tulostusaika-arvio Kollektori-kappaleesta.

Markforged sai työn arvioitua ensimmäisenä (kuva 32). Työssä oli otettu huomioon kaa-sun, sähkön ja materiaalin kulutus hinta-arviota annettaessa. Koska pesuun ja sintrauk-seen voidaan laittaa useita samasta metallista tulostettuja kappaleita, voidaan heti to-deta kappalehinnan laskevan, kun kappaleita valmistetaan suuremmassa erässä.



Kuva 33. Desktop Metal Studio System 2: tulostusaika-arvio Kollektori-kappaleesta.

Seuraava hinta- ja aika-analyysi tuli Desktop Metaliilta (kuva 33). He halusivat käyttää vertailussa uutta Studio System 2 -ominaisuutta jättäen pesuvaiheen välistä. Tästä johtuen kappaleen valmistamisessa on käytetty 316L terästä 17-4 PH teräksen sijaan, mikä on myös vaikuttava tekijä lopullisissa hintaeroissa.



#### Project Information

|                    |                               |
|--------------------|-------------------------------|
| Customer           | metropoliaAmmatti korkeakoulu |
| Engineer in Charge | Youngho Shin                  |
| Machine            | SLM 125                       |
| Material           | AISI10Mg                      |
| Part Name          | Kollektori printti            |
| No of Pieces       | 1                             |

#### Project Information

|                    |                               |
|--------------------|-------------------------------|
| Customer           | metropoliaAmmatti korkeakoulu |
| Engineer in Charge | Youngho Shin                  |
| Machine            | SLM 125                       |
| Material           | AISI10Mg                      |
| Part Name          | Kollektori printti            |
| No of Pieces       | 1                             |

#### Build Job Information

|                      |                           |
|----------------------|---------------------------|
| Parameterset used    | AISI10Mg_SLM_MBP3.0_60_CE |
| Layer Thickness      | 60 µm                     |
| Estimated Build Time | 6 h                       |
| Volume Part          | 32414 mm <sup>3</sup>     |
| Volume Support       | 1258 mm <sup>3</sup>      |
| Build Height         | 65 mm                     |
| Finishing            | 1 h                       |

Kuva 34. SLM 125 tulostusaika-arvio Kollektori-kappaleesta.

Viimeisin vertailutulos saapui SLM Solutionsilta (kuva 34). Tulostusmateriaaliksi oli kysytty yleisintä terästä, mutta valitettavasti sekaannuksesta johtuen kappaleen hinta-arvio oli teetätetty alumiiniseoksella.

Valmistajilta ei löytynyt täysin samoja materiaaleja vertailun tekemiseen. Siitä huolimatta vertailu antaa hyvän kuvan tulostusajoista, sekä eri vaiheiden todellisista kestoista koko prosessissa. SLM 125 on nopein tulostin, vaikka se vaatiikin jälkikäsitteilyä tulostuksen jälkeen. Studio System 2 ja Metal X välillä suurin ero on sintrauksessa, jonka kestossa on huomattava ero. Ero johtuu jo aiemmin mainitusta ”Debind phase” eli liuotuksesta, joka on Studio System 2:ssa siirretty sintrauksen yhteyteen.

Taulukko 12. Yhteenveto kaikkien laitteistojen tulostusajoista.

| Laite              | Materiaali                      | Tulostus-<br>aika (h) | Pesu (h) | Sintraus<br>(h) | Jälkikäsit-<br>tely (h) | Kokonais-<br>aika (h) |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------|----------|-----------------|-------------------------|-----------------------|
| Metal X            | 17-4 PH<br>Ruostumaton<br>teräs | 45                    | 16.5     | 30              | -                       | 96.5                  |
| Studio<br>System 2 | 316L Ruos-<br>tumaton teräs     | 27.25                 | -        | 93              | -                       | 120.25                |
| SLM 125            | AlSi10Mg                        | 6                     | -        | -               | 1                       | 7                     |

## 5.5 Laitteistojen ylläpito

Laitteiston jatkuva huolto ja kunnossapito on tärkeää, jotta viat ja ongelmat pystytään ennaltaehkäisemään, sillä laitteen korjaaminen on todella kallista ja aikaa vievää. Tällä hetkellä Suomesta ei löydy vielä yhtään korjaajaa tai pätevää huoltoasiantuntijaa Desktopin tai Markforgedin laitteisiin, vaan ongelman sattuessa lähimmät osaajat lähetettäisiin Ruotsista. PLM Groupin edustajan mukaan Markforged olisi kouluttamassa pätevää huoltoasiantuntijaa Suomen markkinoille ennen vuotta 2025. Molemmilta yrityksiltä löytyy rajoitetut varaosa- ja materiaalivarastot Euroopasta, mutta jos jotain isompaa hajoa, pitää se tilata USA:sta, jolloin toimitukset voivat venyä jopa kuuden kuukauden mittaisiksi. Vossi tarjoaa Suomessa SLM Solutions -laitteistoihin ammattipätevää huoltoa ja korjausta, jolloin huoltoa ei tarvitsisi odottaa yhtä kauan kuin muilla valmistajilla.

### 5.5.1 Laitteistojen vaatima ylläpito ja perushuolto

Kaikkien laitteiden kannalta on todella tärkeää puhdistaa tulostin jokaisen tulostuksen jälkeen. Puhdistusprosessi vaihtelee laitteistokohtaisesti, mutta yhtäläisyyksiäkin löytyy, kuten tulostinalustojen vaihto jokaisen tulostuksen jälkeen. Jauhepetimenetelmää käyttävän SLM 125 -laitteen kanssa on oltava erityisen tarkka siivousprosessissa, sillä on tärkeää, ettei ylimääräistä jauhetta jää tulostuskammioon. Tulostuksen jälkeen on tärkeää puhdistaa kammio ja kerätä ylimääräinen jauhe uuteen käyttöön.

Materiaalin vaihdon yhteydessä on myös tehtävä erillinen siivousprosessi. Desktopin Studio System 2:ssa tulee materiaalin vaihdon lisäksi myös muistaa vaihtaa tulostinpää ja materiaalin ohjaussauva. Markforgedin Metal X toimii samalla tavalla kuin normaali FDM-muovitulostin, minkä vuoksi pelkkä materiaalin vaihto riittää. Vaihdon jälkeen tulostin lämmittää uuden materiaalin ja työntää sitä pienen pätkän ulos tulostinpäästä näin puhdistuen vanhat metallijäänteet pois. Metallijauhetta käyttävässä SLM 125 on huomattavasti pidempi materiaalin vaihtoprosessi johtuen jauheen puhdistamisen hankaludesta. Laitteen tulostuskammio ja jauheen syöttöyksikkö tulee puhdistaa kokonaan vanhasta jauheesta.

Kaikki laitevalmistajat tarjoavat ilmaisia ohjelmistopäivityksiä nopeuttamaan ja parantamaan laitteita. Tämän lisäksi teknologian kehittyessä laitteiden fyysisiä päivityksiä, kuten esimerkiksi vanhan System 1 -laitteen päivitys System 2 -versioon on mahdollista hankkia edulliseen hintaan. Kaikille laitteille tulisi myös tehdä perushuoltoja huolto-ohjeiden suosittelemilla aikaväleillä, jotta laitteet pysyisivät operointikuntoisina mahdollisimman pitkään.

#### 5.5.2 Jättemateriaalin hävittäminen ja kierrätys

Kaikki tukimateriaali ja metallijäte Desktopin ja Markforged:in laitteissa on kierrätyskelpoista normaalien suomalaisten metallikierrätysseurojen mukaan. Ainoa ongelmajäte kyseisissä laitteissa on "Debinderin" eli kemiallisen pesurin pesuneste. Vaikka Markforgedin käyttämä Opteon™ SF79 on ympäristöystävällinen pesuneste, tulee se hävittää valmistajan ja käyttömaan suosittelemalla tavalla. Yhtä lailla tulee Desktopin "proprietary debind fluid" hävittää sille määrätyle tavalla.

SLM 125 käyttämät metallijauheet luokitellaan ongelmajätteiksi, johtuen niiden vaarallisuudesta pienen kokonsa vuoksi. Hukkajauhe päättyy yleensä vesipohjaisena lietteenä tulostimen puhdistusimuriin, josta se tulee poistaa ja hävittää lainmukaisella tavalla. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteikö niitä voisi kierrättää. Suomessa tulostimista tulleen metallijauheen määrä on vielä niin pientä, ettei sen kierrätys ole kannattavaa. Tästä syystä se hävitetään yleensä ongelmajätteenä tai erillisten sopimusten mukaan kierrätyskeskuksien kanssa. [Cumini 2018.]

## 5.6 Laitteistojen vaatimat työtilat

Työtilojen vaatimukset ovat hyvin samankaltaisia Desktopin ja Markforgedin laitteiden välillä, kun taas SLM 125 -laitteisto vaatii huomattavasti enemmän panostusta. Yhtenä suurimpana näistä eroista on ATEX-tilan tarve SLM-laitteistolle. Metallijauheen kanssa työskennellessä on myös huomioitava ilmainvaihto ja laitteiden asettelu niin, että ylimääräisen jauheen puhdistaminen olisi mahdollisimman helppoa. Jauheen sulatukseen laseria käyttävä SLM-laite tuottaa myös huomattavasti lämpöä prosessin aikana, minkä vuoksi voi olla tarpeellista hankkia erillinen jäähdytyn laitteiston yhteyteen optimaalisen huoneenlämmön ylläpitämiseen.

Kaikissa tapauksissa tulisi kuitenkin huomioida yleiset vaatimukset, kuten tasainen mahdollisesti antistaattisella pinnoitteella varustettu lattia. Seinien, lattioiden ja kattojen tulisi olla helposti siivottavissa, minkä vuoksi laitteita ei suositella aseteltavaksi ihan seinien viereen varsinkaan SLM 125 -tapauksessa. Laitteiden kanssa samassa tilassa tulisi olla myös jonkinlainen vesipiste, jossa voi puhdistaa osia tai suodattimia.

Laitteet olisi suositeltava sijoittaa omina yksikköinä sähkönsyöttöjärjestelmiin, jotta viikatilanteissa sähkö voitaisiin katkaista vain tarvittavilta laitteilta. Kaikki laitteistot vaativat myös Ethernet-yhteyttä, jota käytetään laitteiden etähallinnassa ja jatkuvassa valvonnassa. Kumpikaan Desktopin tai Markforgedin tulostimista ei vaadi erillistä ilmainvaihtoa toisin kuin SLM 125 -tulostin, mutta molemmissa tapauksissa laitekokonaisuuden sintrausuuni vaatii erillisen ilmanpoistokanavan.

Kaikki tulostimet vaativat myös suojakaasua, SLM 125 -tulostusprosessissa ja Metal X- sekä Studio System 2 -sintrausprosessissa. Tarvittava kaasu vaihtelee materiaalin mukaan, mutta yleisesti ottaen puhdas Argon soveltuu kaikille materiaaleille. Desktopin ja Markforgedin laitteiden materiaalit eivät vaadi erillistä säilytysyksikköä. Niitä voidaan käytännössä säilyttää missä tahansa kaapissa normaalissa ilmakesteudessa 30-50%, kun taas SLM 125 -materiaalit tulisi pitää palosuojatussa kaapissa ilmatiiviissä astioissa. Turvallisuuden takaamiseksi jokaisesta työtilasta tulee myös löytyä palosammutin. Alla oleva taulukko laitteiden vaatimuksista on suoraan lainattu molempien laitevalmistajien



asennusmanuaaleista. Vossi ei pystynyt tarjoamaan SLM 125-asennusmanuaalia tutkimukseen.

Taulukko 13. Suosituksia ja vaatimuksia laitteiden käyttöympäristöön.

| MarkForged         |           |           |           |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| Yksikkö            | Tulostin  | Pesuri    | Uuni      |
| Lämpötila (°C)     | 18.8-29.4 | 18.8-29.4 | 18.8-29.4 |
| Ilmankosteus %     | 0 - 95    | 0 - 95    | 0 - 95    |
| Syöttötaajuus (Hz) | 50-60     | 50-60     | 50-60     |
| Tulojännite (VAC)  | 200-240   | 200-240   | 200-240   |

| Desktop Metal      |          |         |         |
|--------------------|----------|---------|---------|
| Yksikkö            | Tulostin | Pesuri  | Uuni    |
| Lämpötila (°C)     | 18-25    | 18-25   | 18-25   |
| Ilmankosteus %     | 30-70    | 30-70   | 30-70   |
| Syöttötaajuus (Hz) | 50-60    | 50-60   | 50-60   |
| Tulojännite (VAC)  | 220-240  | 220-240 | 220-240 |

## 5.7 Laitteiston koko ja sijoittelu työtilaan

Laitteiden välillä ei ole suuria kokoeroja lukuun ottamatta SLM 125 -yksikköä, joka on huomattavasti kookkaampi kuin Metal X- tai Studio System 2 -tulostimet. Molempien Desktopin ja Markforgedin tulostuskokonaisuuksia voidaan jakaa osiin eli tarvittaessa tulostimet voidaan sijoittaa eri tiloihin pesurien ja uunien kanssa. Olisi kuitenkin loogisuuden kannalta hyvä pitää kaikki laitteet samassa tilassa.

SLM Solutionsin tarjoama laitekokonaisuus koostuu tulostimesta ja jauheensiivöintiyksiköstä. SLM 125 -tulostin on itsessään kookkain laite kaikista vaihtoehdoista. SLM:än laitteet ja materiaalivarasto tulisi kaikki pitää samassa tilassa, jotta jauheen liikkuminen voitaisiin minimoida ja samalla yksi ATEX-tila (räjähdysvaaralliset tilat) olisi riittävä koko tulostinkokonaisuudelle.

Kaikilta laitevalmistajilta löytyy oma ”Site prep guide” eli opas työtilojen valmisteluun ja laitteiden optimaalisiin paikannuksiin. Kaikkiin saatuihin tulostintarjouksiin kuuluu myös laitteistojen asennus ja käyttöönoton opastus paikan päällä. Taulukosta 14 tulee ilmi laitekokonaisuuksien eri osien koot ja painot, jotka tulee ottaa huomioon lopullisten laitteiden suunnittelussa.

Taulukko 14. Kaikkien valmistajien eri laitteiden painot (kg) ja koot (korkeus, leveys ja syvyys).

| <b>MarkForged</b>    |           |           |            |
|----------------------|-----------|-----------|------------|
| Yksikkö              | Tulostin  | Pesuri    | Uuni       |
| Paino (kg)           | 60        | 118       | 313        |
| Koko (K x L x S)(cm) | 112x58x53 | 110x68x61 | 152x137x81 |

| <b>Desktop Metal</b> |          |           |            |
|----------------------|----------|-----------|------------|
| Yksikkö              | Tulostin | Pesuri    | Uuni       |
| Paino (kg)           | 97       | 160       | 800        |
| Koko (K x L x S)(cm) | 95x83x53 | 104x74x56 | 216x138x76 |

| <b>SLM Solutions</b> |            |                         |   |
|----------------------|------------|-------------------------|---|
| Yksikkö              | Tulostin   | Jauheensiivöintiyksikkö |   |
| Paino (kg)           | 750        | Ei tiedossa             | - |
| Koko (K x L x S)(cm) | 246x140x90 | Ei tiedossa             | - |

## 6 Turvallisuus

Laitteiden käyttö- ja ympäristöturvallisuus on ehdottoman tärkeä huomioida metallitulostimien kanssa toimiessa. Turvallisuuden tärkeys korostuu entisestään, kun huomioidaan laitteiden käyttötarkoitus opetus- ja tutkimustyössä ja käyttöympäristö koulukeskuksessa. Mahdollisten turvallisuusriskien määrä kasvaa suoraan verrannollisesti käyttäjien määrään. Tämän vuoksi laitteita tulisi operoida vain laitekoulutuksen saaneen henkilön alaisuudessa. Käyttövalvonnan lisäksi olisi myös hyvä huoltaa ja ylläpitää laitteita sopivin aikaväleihin, jotta laitekohtaiset vikatapaturmat voidaan ennaltaehkäistä.

## 6.1 Työtilan turvallisuusvaatimukset

Turvallisuusmääräykset työtiloihin ovat laitekohtaiset ja löytyvät asennus- ja operointi-manuaaleista. Huomioon tulee ottaa erityisesti jalokaasujen, kuten Argonin kanssa työskentely ja sen tuomat vaarat. Työtiloihin tulee tulipalojen varalta sijoittaa riittävä määrä metallitulipaloihin soveltuvia sammuttimia. On erityisen tärkeää myös huomioida laite- ja materiaalivalmistajien turvallisuusohjeet, kun kyseessä on reaktiivisia materiaaleja, kuten SLM 125 -metallijauheet. Metallijauheiden kanssa turvallisesta työskentelystä löytyy lisää ohjeistusta ja standardeja ”European Powder Metallurgy Associationin” eli EPMA:n sivuilta, mutta tarkempi tieto on saatavilla vain erillismaksusta.

## 6.2 Tarvittavat turvavarusteet

Pursotustekniikkaan perustuvien Metal X- ja Studio System 2 -laitteet eivät vaadi erillisiä henkilökohtaisia suojaimia. Ainoa poikkeus tähän on pesuvaihe, jossa käytettävä liuotus-neste voi aiheuttaa ihottumaa tai ihoärsytystä. Tämän vuoksi kumihanskoja tulisi käyttää aina pesunesteen kanssa toimiessa.

Metallijauheen kanssa työskennellessä on otettava huomioon jauheen vaarallisuus ihmiselle. Metallijauheen vaaroista johtuen työtiloissa tulee aina käyttää kokovartalosuoja-pukua ja hengityssuojaa, jotta jauhetta ei pääsisi iholle tai hengityksen mukana keuhkoihin.

# 7 Laitteistojen hinnat ja käyttökulut

## 7.1 Myyntihinnat

Hintavertailuun saadut tarjoukset olivat Desktop Metalilta Studio System 2 -malliin sekä Markforgedilta Metal X -pakettiin. SLM Solutions ei antanut erillistä tarjousta, vaan ilmoitti tulostuspaketin hinnaksi n. 300 000 - 400 000 € euroa riippuen lisävarusteiden ja tilojen

työstön tarpeista. Markforgedin ja Desktop Metalin tarjoukset on käsitelty tarkemmin jäljempänä. Tarjoukset tulivat sähköpostissa ja niistä on otettu kuvakaappaukset tähän lopputyöhön.

### 7.1.1 Markforgedin tarjous – Metal X

Taulukko 15. Laitteistot ja niiden välittäjät.

|              |            |
|--------------|------------|
| Laite        | Metal X    |
| Valmistaja   | Markforged |
| Maahantuojat | PLM Group  |

Markforged on jo muutaman vuoden tehnyt yhteistyötä USA:ssa, sekä Euroopassa eri koulujen kanssa, mm. University of Oxford ja Savonian AMK:n kanssa. Markforged on tarjouksessa ottanut huomioon laitteiston käyttökohteen ja tarkoituksen. Tämän vuoksi he tekivät Metropolialle oman tarjouspaketin, jossa olisi tarkoitus luoda uusi yhteistyökumppanuus koulun sekä Markforgedin kanssa. Tämä kumppanuus toisi Metropolialle lukuisia etuja, kuten tutkimustyötä edistävää tiedonjakoa, Markforgedin tarjoamia koulutusohjelmia ja sertifikaatteja.

**Education and Research Promotion Packages**

**Partnership Program**

|   |   |  |
|---|---|--|
| <p><b>People</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>_Dedicated Markforged Account Team</li> <li>_Preferred Research/Education Partner status</li> </ul> | <p><b>Software and Services</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>_Unlimited access to additive curriculum + additive certifications (MCAE - Markforged Certified Additive Expert)</li> <li>_Eiger Fleet &amp; Blacksmith</li> <li>_3 Year Extended Warranty Plan</li> </ul> | <p><b>Technology</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>_Metal X Gen 2</li> <li>_Sinter 2</li> <li>_X7</li> <li>_Mark 2</li> <li>_3x Onyx One</li> </ul> |
|---|---|--|

**Advanced Package**

|   |   |
|---|---|
| <p><b>Software and Services</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>_10 additive certifications (MCAE)</li> <li>_3 Year Success Plan</li> <li>_Blacksmith</li> </ul> | <p><b>Technology</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>_Metal X Gen 2</li> <li>_Sinter 2</li> <li>_X7</li> </ul> |
|---|---|

**Standard Solution**

|   |   |
|---|---|
| <p><b>Software and Services</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>_5 additive certifications (MCAE)</li> <li>_3 Year Success Plan</li> </ul> | <p><b>Technology</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>_Metal X Gen 2</li> <li>_Sinter 1</li> <li>_Mark 2</li> </ul> |
|---|---|

Kuva 35. Markforgedin lähettämä yleistarjouspaketin sisältö.

Markforged:in tarjous kattaa tulostinkokonaisuuden lisäksi myös X7-komposiittitulostimen, sekä Blacksmith- ja Eiger Fleet -sovellukset tulostuskappaleiden analysointiin ja hallintaan. Alkuperäisessä tarjouspyynnössä kysyttiin vain Metal X -tulostinpaketin hintaa, minkä vuoksi saadusta tarjouksesta on vielä mahdollista karsia lopullista hintaa huokeammaksi.

### 7.1.2 Desktop Metalin tarjous – Studio System 2

Desktop Metalin alkuperäinen tarjous annettiin juuri julkaistusta Studio System 2 -versiosta, jossa ”Debinder” eli liuotusyksikkö -optiota ei tarvita. Koska versiolla ei voida tulostaa kuin yhtä materiaalia pyydettiin laitteistosta uutta tarjousta, jossa liuotusyksikön hinta olisi laskettu mukaan.

Taulukko 16. Laitteisto ja sen välittäjät.

|             |                 |
|-------------|-----------------|
| Laite       | Studio System 2 |
| Valmistaja  | Desktop Metal   |
| Maahantuoja | PROTECH         |

Desktop Metalin tarjouksessa on myös eritelty erilliset tulostimen kulutustavarat, kuten filtrit, tulostinalustat, kasetit ja uunivuoat. On myös hyvä huomata, että yksi suurimmista eroista tarjousten välillä on takuun kesto. Siinä missä Desktop Metal tarjoaa vuoden takuuta, on Markforgedilla 3 vuoden huoltotakuu laitteistolle.

Studio System 2 -versiolla voi tulostaa ainoastaan 316L ruostumatonta terästä, jonka vuoksi tarjoukseen pyydettiin myös lisänä ”Debinder” eli liuotusyksikkö. Näin Metropolia pystyisi hyväksikäyttämään kaikkia vanhoja materiaaleja, sekä uusia Studio System 2 tuomia ominaisuuksia.

## 7.2 Tila- ja käyttökustannukset

Vertailussa on tärkeä ottaa huomioon myös muut menot ja kulut, jotka aiheutuvat tulostimien hankinnasta ja käytöstä. On vaikeaa arvioida tulostinkokonaisuuksien hankinnasta aiheutuvia lopullisia kustannuksia, sillä niihin vaikuttaa moni muuttuja, kuten tarvittavat työtilat, käytettävät materiaalit, kulutustarvikkeet sekä välttämättömät oheislaitteet.

### 7.2.1 Työtilojen valmistelukustannukset

Työtilojen organisointi ja valmistelu voi olla erityisen kallista, varsinkin jos laitteistolle tulee järjestää ATEX-tilat. Jos sopivia tiloja ei löydy koulusta jo valmiina, voi ilmanvaihdon ja materiaalien säilytystilojen teettämisestä aiheutua suuriakin kustannuksia. Lisäksi tulostimet voivat tarvita lisälaitteistoja, kuten erillisiä jäähdytynyksikköjä halutun huonelämpötilan ja kosteuden ylläpitämiseen, sekä useita eri jälkikäsittelykoneita esimerkiksi sahoja, jyrsimiä, CNC-koneita tai erilaisia raepuhaltimia saavuttamaan toivottu pinnalaatu.

### 7.2.2 Materiaalikustannukset

Markforged tarjoaa kuusi eri tulostusmateriaalia omaan Metal X-tulostimeen, tämän lisäksi 316L ruostumattoman teräksen olisi määrä tulla käytettäväksi vuoteen 2022 mennessä. Materiaalit myydään kuutiosenttimetrihinnalla, sillä teräs tulee lankamaisena rullana kelassa (kuva 24).

Taulukko 17. Markforgedin tarjoamat materiaalit ja niiden hinnat.

| Materiaali                | Määrä (cc) | Hintaluokka * |
|---------------------------|------------|---------------|
| 17-4 PH Ruostumaton teräs | 200        | B             |
| Kupari                    | 200        | C             |
| Inconel 625 nikkeli seos  | 200        | D             |
| H13 Työkaluteräs          | 200        | C             |
| A2 Työkaluteräs           | 200        | C             |
| D2 Työkaluteräs           | 200        | C             |
| Keraaminen tukimateriaali | 200        | B             |

\* A: 0-100 €, B: 100-200 €, C: 200-300 €, D: 300-400 €, E: 400-500 €, F: 500-600 €, G: >600 €

Desktop Metalilla on käytössään viisi eri tulostettavaa metallia laitteeseensa, joista ainoastaan 316L teräs tukee uutta liuotusyksikötöntä prosessia. Koska Desktop Metal käyttää laitteessaan ladattavia kasetteja vaihtelee myyntipaino ja hinta kasettiin mahtuvien metallipatruunoiden mukaan. Protech tarjosi työhön kahden myydyimmän materiaalin myyntipainon ja -hinnan.

Taulukko 18. Desktop Metalin tarjoamat materiaalit ja niiden hinnat.

| Desktop Metal Studio system |            |               |
|-----------------------------|------------|---------------|
| Materiaali                  | Määrä (kg) | Hintaluokka * |
| 17-4 PH Ruostumaton teräs   | 4.2        | F             |
| 316L Ruostumaton teräs      | 4.5        | G             |
| H13 Työkalu teräs           |            |               |
| 4140 Hiiliteräs             |            |               |
| Kupari                      |            |               |

\* A: 0-100 €, B: 100-200 €, C: 200-300 €, D: 300-400 €, E: 400-500 €, F: 500-600 €, G: >600 €

SLM Solutions tarjoaa huomattavasti laajempaa ja halvempaa materiaalivalikoimaa, kuin Desktop tai Markforged. Metallijauhe myydään kilohinnoilla ja kaiken lisäksi tulostusmateriaalia on mahdollista ostaa muiltakin metallijauhevalmistajilta. Vossin mukaan materiaalin hintaan vaikuttaa myös ostettu kilomäärä, minkä vuoksi Vossilla oli antaa hinta-arvio vain kahdeksasta myydyimmästä metallijauheesta.

Taulukko 19. SLM Solutions tarjoamat materiaalit ja niiden hinnat.

| SLM Solutions SLM 125     |            |           |
|---------------------------|------------|-----------|
| Materiaali                | Määrä (kg) | Hinta (€) |
| 316L Ruostumaton teräs    | 1          | B         |
| Ti6Al4V Titaaniseos       | 1          | F         |
| Inconel 718 Nikkeliseos   | 1          | C         |
| Inconel 393 Nikkeliseos   | 1          | D         |
| AlSi10Mg Alumiiniseos     | 1          | A         |
| 1.2709 Työkaluteräs       | 1          | B         |
| H13 Työkaluteräs          | 1          | A         |
| 17-4 PH Ruostumaton teräs | 1          | A         |
| AlSi7Mg0.6                | 1          | -         |
| AlSi9Cu3                  | 1          | -         |
| HX                        | 1          | -         |
| IN625                     | 1          | -         |
| IN939                     | 1          | -         |
| 15-5PH (1.4545)           | 1          | -         |
| Invar 36                  | 1          | -         |
| TA15                      | 1          | -         |
| Ti (Grade 2)              | 1          | -         |
| CoCr28Mo6                 | 1          | -         |
| SLM Medident              | 1          | -         |
| CuNi2SiCr                 | 1          | -         |
| CuSn10                    | 1          | -         |
| CuCr1Zr                   | 1          | -         |

\* A: 0-100 €, B: 100-200 €, C: 200-300 €, D: 300-400 €, E: 400-500 €; F: 500-600 €, G: >600 €

Tulostuksessa ja sintrauksessa käytettävää Argon-kaasua voi hankkia helposti eri toimittajilta Suomesta. Kaasun hinta vaihtelee 300 - 600€ välillä riippuen oston litramäärästä, sekä onko kyseessä kaasun täyttö vai kokonaan uuden pullon ostaminen.



## 8 Tulostimien vertailu

### 8.1 SLM 125

Kaikista tulostinkokonaisuuksista löytyvät omat hyvät ja huonot puolensa. Tässä työssä päädyttiin kuitenkin hylkäämään SLM 125 -laite lopullisesta laitevertailusta. Hylkäykseen vaikutti mm. tulostimen erittäin pieni 125x125x125 mm tulostusala, mikä jää huomattavasti alle asetetun minimitulostuspinta-alan 200x200x200 mm. Tämän lisäksi kynnyskysymykseksi nousi tulostimen hinta, joka asettui jauheen seulontakoneen kanssa jo 250 000–300 000 € paikkeille edustajan antaman tarjouksen mukaisesti. Tulostimen hankinnan lisäksi koulun pitäisi tehdä merkittäviä investointeja tarvittaviin ATEX-tiloihin sekä operoinnin lisälaitteistoihin, kuten jäähdytysyksiköihin. SLM Solutions -tulostimet tarjoavat nopeaa ja tarkkaa tulostusta sekä huomattavasti laajempaa materiaalivalikoimaa kuin Markforged tai Desktop Metal, mitkä puolsivat sen valintaa.

### 8.2 Studio System 2:n ja Metal X:n vertailu

Niin kuin jo aikaisemmin esitellyistä laitetarjouksista voidaan todeta, molempien valmistajien laitekokonaisuuksien tarjoushinnat ovat samaa tasoa - tosin Desktop Metalin tarjous oli hieman edullisempi vaihtoehto. Markforgedin pakettitarjouksista paras oli ”Advanced package”, jonka myötä Metropolia saisi myös komposiittitulostimen koululle. Paketissa on myös paljon muuta tulostimien lisäksi. Alkuperäisessä tarjouksessa pyydettiin pelkkää hinta-arviota tulostimista, mutta pakettiin kuuluu myös Markforgedin omat sovellukset ”Eiger fleet ja Blacksmith” -kappaleiden suunnitteluun sekä analysointiin. Paketissa oli myös erillinen yliopistoille soveltuva tutkinto-ohjelma, jonka avulla opiskelijat voisivat suorittaa erilaisia sertifikaatteja liittyen lisäävään valmistukseen.

Desktop Metal tarjosi hyvin yksinkertaisen ja kompaktin paketin Studio System 2 -mallistaan. Tähän kuitenkin pyydettiin mukaan liuotusyksikkö, sillä tahtotila on, että tulostimella voitaisiin tulevaisuudessa tulostaa kaikkia mahdollisia materiaaleja Desktopin valikoimasta.

Laitteiden lisäksi on hyvä verrata tulostettavien kappaleiden hintoja. Hintoihin vaikuttaa itse materiaalikustannusten lisäksi kaasun, sähkön ja liuotusnesteiden käyttömäärä. Kappaleiden yksittäishinnat laskevat huomattavasti, kun erämääriä kasvatetaan (taulukko 20). Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että kaasun ja liuotusnesteiden kulutus ei muutu riippumatta siitä onko pesussa tai uunissa yksi vai useampi kappale yhtä aikaa. Onkin siis hyvä kerätä ainakin muutama kappale samaa materiaalia olevia tulostuskappaleita ennen kuin niitä aletaan liuottaa tai sintrata uunissa.

Taulukko 20. Tulostamisesta aiheutuvat kustannukset kappalemäärien mukaan.

| Tulostuskustannukset |                         |    |            |
|----------------------|-------------------------|----|------------|
|                      | (kpl) hinta erän mukaan |    |            |
| Laite                | 1                       | 10 | Materiaali |
| Studio System 2      | B                       | A  | 316L       |
| Metal X              | D                       | B  | 17-4 PH    |

\* A: 0-100 €, B: 100-200 €, C: 200-300 €, D: 300-400 €, E: 400-500 €, F: 500-600 €, G: >600 €

### 8.3 Studio System 2:n ja Metal X:n käyttökustannusvertailu

Käytön vertailu on erittäin hankalaa Studio System 2 ja Metal X välillä, johtuen useista samanlaisuuksista. Molemmat tulostimet perustuvat samaan tulostustekniikkaan (FDM), eikä tulostusalustalla tai tulostusnopeudellakaan juuri ole eroja. Tulostimien operointi on myös hyvin samankaltainen, kolmivaiheinen prosessi, jossa ensin kappaleet tulostetaan, sitten liuotetaan ja lopuksi sintrataan. Pieniä eroja huomaa laitteiden välillä mm. käytettävät materiaalit eroavat hieman, sillä siinä missä Markforged käyttää metallilankaa on Desktopilla pieniä metallipatruunoita. Materiaalin vaihtoprosessi on myös erilainen, sillä Metal X:ssä se tapahtuu samalla tavalla kuin missä tahansa muovitulostimessa, kun taas Studio System 2:ssa tulee vaihtaa tulostinpää, tulostuskasetti ja materiaalin ohjauskanava joka materiaalin vaihdon yhteydessä. Kuitenkin suurimmat erot nousevat esille vasta Studio System 2 tuomassa uudessa valmistusmallissa, jossa liuotusvaihe jää kokonaan pois. Näin päästään kokonaan eroon yhden vaiheen operaatiosta. Tähän vastauksena Markforged on tuomassa markkinoille uutta ”Gen 2 Metal X” -tulostinta, jonka on luvattu lähes puolittavan tulostusaikoja.

#### 8.4 Studio System 2:n ja Metal X:n turvallisuusvertailu

Lähtökohtaisesti molemmilla laitteilla on yhtäläiset turvallisuusvaatimukset sekä -riskit johtuen tulostustekniikoiden samankaltaisuuksista. Laitteet ovat lähes samankokoisia ja käyttävät samoja kaasuja ja materiaaleja. Suurimmat riskit laitteilla johtuvat väärinkäytöstä uunin tai liuotusaltaan kanssa. Argon-kaasun kanssa työskennellessä on myös otettava huomioon Euroopan asettamat turvallisuusohjeet kaasujen kanssa toimimisessa.

### 9 Yhteenveto ja suositukset

Tulostimien todellisen vertailun teettäminen on erityisen haastavaa, sillä se vaatisi toistuvaa fyysistä tulostimien testausta. Näin voitaisiin kerätä luotettavaa dataa tulostusnopeuksista eri materiaaleilla, sekä saada luotettavaa tietoa tulostuskustannuksista. Ei ole myöskään mahdollista arvioida täysin erilaisia tulostuksesta aiheutuvia juoksevia kuluja, sillä ne vaihtelevat riippuen tulostustarpeista, materiaaleista, sekä sen hetken markkinahinnoista koskien sähkön ja kaasun kulutusta. Työssä ei otettu tarkemmin kantaa mahdollisiin kuluihin, jotka aiheutuvat tilojen valmisteluista ja niihin tarvittaessa hankittavista lisävarusteista.

Tähän työhön ja sen vertailuihin on käytetty paljon oletuksia, jotka pohjautuvat laitevalmistajien tarjoamaan dataan. Valitettavasti kukaan valmistajista ei suostunut antamaan tuotteiden käyttömanuaaleja tai huoltokirjoja työtä varten, minkä vuoksi työssä ei käsitellä laitteiden käyttöä tarkemmin.

Kaikkiin laitevalmistajiin on oltu yhteydessä sähköpostitse usean kuukauden ajan, käyden läpi koulun tarpeita, vaatimuksia ja toiveita tulostimia kohtaan. Yhteistyö Markforgedin ja heidän välittäjänsä PLM Groupin kanssa sujui hyvin ja kitkatta. He tarjosivat auliisti tietoa hinnoista, laitteista, toimitus- ja huoltoajoista sekä laitesovelluksista. Markforgedin

markkinaosuus on viime vuosina ollut nousussa johtuen osittain lukuisista yhteistyöhankkeista eri koulujen kanssa ympäri maailmaa. Markforgedin lopulliseen tarjoukseen kuuluikin ”partnership status” eli yhteistyöstatus Metropolian kanssa, joka varmasti hyödyttäisi koulua oppilaidenkin näkökulmasta.

Markforgedin tarjoama paketti kattaa kaikki Metropolian asettamat lähtökriteerit ja kaiken lisäksi takaa jopa kolmen vuoden takuusopimuksen siinä missä Desktop Metal tarjosi vain vuoden takuusopimusta. Sopimukseen kuuluva Eiger Fleet -sovellus mahdollistaa myös helpon tulosteiden hallinnoinnin koululle. Sovellukseen voidaan luoda erillisiä käyttäjiä ja kansioita, jolloin opettajat pääsevät hallinnoimaan suunniteltuja osia ja niiden tuostamista, kun taas oppilaat pääsevät käsiksi omiin tai luokalle luotuihin CAD-kansioihin. Markforgedin kokonaisvaltainen tarjouspaketti olisi Metropolialle kyseisellä budjetilla sekä halutuilla minimivaatimuksilla varsin käypä ratkaisu.

## 10 Lähteet

Alonen, A; Hietikko, E; Hoffren, M; Kesonen, M; & Urpilainen, A; 2015. Kokemuksia metallikapaleiden ainetta lisäävästä valmistuksesta. Savonia ammattikorkeakoulu, Theseus-tietokanta.

Altan, Gurkan; Kovan, Volkan & Sabri Topal, Eyup. 2017. Effect of layer thickness and print orientation on strength of 3D printed and adhesively bonded single lap joints. Verkkoaineisto. ResearchGate. <[https://www.researchgate.net/publication/317751911\\_Effect\\_of\\_layer\\_thickness\\_and\\_print\\_orientation\\_on\\_strength\\_of\\_3D\\_printed\\_and\\_adhesively\\_bonded\\_single\\_lap\\_joints](https://www.researchgate.net/publication/317751911_Effect_of_layer_thickness_and_print_orientation_on_strength_of_3D_printed_and_adhesively_bonded_single_lap_joints)>. 05/2017. Luettu 11.04.2021.

Aniwaa. 2021. L-series FORMALLOY. Verkkoaineisto. <<https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/formalloy-l-series/>>. 2021. Luettu 22.03.2021

Babu S, S; Bourell L, David & Das, Suman. 2016. Metallic materials for 3D printing. Verkkoaineisto. <<https://link.springer.com/article/10.1557/mrs.2016.217>>. 10.10.2016. Luettu 15.03.2021.

Bakker, N; Lestrade, N. 2020. The Air Liquide European Standard guide for equipment and gases for Desktop Metal. 07/2020. Luettu 01.05.2021.

BeAM. 2021. Products. Verkkoaineisto. <<https://www.beam-machines.com/products/modulo250>>. 2021. Luettu 22.03.2021

Bikas, Harry; Koutsoukos, Sotiris; Lianos K, Andreas & Stavropoulos, Panagiotis. 2020. Manufacturability Assessment and Design for AM. Science direct. Verkkoaineisto. 2020. Luettu 20.04.2021.

Bornhorst J, W; Bredt F, J; Hatsopoulos I, M; Russell B, D; Seymour, M & Vogel J, M. 1996. Method and apparatus for prototyping a three-dimensional object. Patentti. Verkkoaineisto. <<https://patents.google.com/patent/US6007318>>. 20.12.1996. Luettu 20.02.2021.

Campbell, Ian; Diegel, Olaf; Kowen, Josph; Mostow, Noah & Wohlers Terry. 2021. Wohlers Report, 3D Printing and Additive Manufacturing. Colorado, USA: Wohlers Associates, Inc.

Chemours. 2019. Opteon SF79 liuotusneste. Verkkoaineisto. <https://www.opteon.com/fr/-/media/files/opteon/opteon-sf79-cleaning-fluid.pdf>>. 2019. Luettu 28.03.2021.

Cherdo, Ludivine. 2021. Metal 3D printers in 2021: a comprehensive guide. Verkkoaineisto. ANIWAA. <<https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/best-metal-3d-printer/>>. 11.01.2021. Luettu 10.02.2021

CLLAIM. 2017. Verkkoaineisto. Deliverable 1.1 Report on Additive Manufacturing. <[https://cllaimprojectam.eu/documents/CLLAIM\\_D1.1\\_Report%20on%20AM.pdf](https://cllaimprojectam.eu/documents/CLLAIM_D1.1_Report%20on%20AM.pdf)>. 2017. Luettu 15.02.2021.

Cumini, Anne; Laaksonen, Harri & Tanttari, Mari. 2018. Metallien 3D-tulostuksen materiaalien kierrätettävyys – haaste vai mahdollisuus? TAMK Journal. Verkkoaineisto. <<https://tamkjournal.tamk.fi/metallien-3d-tulostuksen-materiaalien-kierratettavyys-haaste-vai-mahdollisuus/>>. 11.01.2018. Luettu 25.04.2021.

Dassault Systèmes. 3D Printing-Additive. 3D Experience Marketplace. Verkkoaineisto. <<https://make.3dexperience.3ds.com/processes/photopolymerization>>. 2021. Luettu 10.01.2021.

Desktop Metal a. 2021. Materials. Verkkoaineisto. <<https://www.desktopmetal.com/materials>>. 2021. Luettu 20.03.2021.

Desktop Metal b. 2021. Studio System 2. Verkkoaineisto. <<https://www.desktopmetal.com/products/studio>>. 2021. Luettu 20.03.2021.

Desktop Metal c. 2019. Site Preparation Guide. Studio System. 2019. Luettu 25.03.2021.

Digital Metal. 2021. Tulostimet. Verkkoaineisto. <<https://digitalmetal.tech/printer-line/dm-p2500/>>. 2021. Luettu 22.03.2021

Duda, Thomas & Raghavan Vankat. 2016. 3D Metal Printing Technology. Verkkoaineisto. Sciedirect. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316325496>>. 28.10.2016. Luettu. 11.02.2021.

Gadagi, Basavraj & Lekurwale, Ramesh. 2020. A review on advances in 3D metal printing. Verkkoaineisto. Sciedirect. <[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320380573?casa\\_token=Vm3Oqekzmk0AAAAA:kLdoOb4BMk1M0v0htWeLl-PcF2qMG2ZuFZSWe9Jn4qJcjkG\\_ZvVsYlMLL3-YKguPpcPu65yiJM](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320380573?casa_token=Vm3Oqekzmk0AAAAA:kLdoOb4BMk1M0v0htWeLl-PcF2qMG2ZuFZSWe9Jn4qJcjkG_ZvVsYlMLL3-YKguPpcPu65yiJM)>. 14.10.2020. Luettu 11.02.2021.

Goodwin, Mícheal a. 2021. Education and Research Promotion Packages. Markforged. 03.04.2021. Luettu 03.04.2021.

Goodwin, Mícheal b. 2021. Kollektori printti. Markforged. Sähköposti. 03.04.2021. Luettu 03.04.2021.

Heiskanen, A; Korpela, M; Piili, H; Riikonen, N & Salminen A. 2019. Metallien 3D-tulostuksen tilanne Suomessa. Verkkoaineisto. LUT university. <[https://mfg40.fi/wp-content/uploads/2019/11/HT-5\\_2019-Metallien-3D-tulostuksen-tilanne-Suomessa-Korpela-Piili....pdf](https://mfg40.fi/wp-content/uploads/2019/11/HT-5_2019-Metallien-3D-tulostuksen-tilanne-Suomessa-Korpela-Piili....pdf)>. 05/2019. Luettu 15.04.2021.

Huckstepp, Alex. 2019. Digital Alloys' Guide to Metal Additive Manufacturing. Verkkoaineisto. <<https://www.digitalalloys.com/blog/powder-bed-fusion/>>. 06.05.2019. Luettu 19.04.2021

Hull W, C; Manners R, C; Smalley R, D; VanDorin L, S & Vorgitch J, T. 1994. Simultaneous multiple layer curing in stereolithography. Patentti. Verkkoaineisto. <<https://patents.google.com/patent/US5597520>>. 25.04.1994. Luettu 20.02.2021.

Hull W, Charles. 1995. Method and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Patentti. Verkkoaineisto. <<https://patents.google.com/patent/US5554336>>. 05.06.1995. Luettu 20.02.2021.

Hurmerinta, Max a. 2021. QUOTE Markforged Metal X Materials. PDF. PLM Group. 2021. Luettu 11.02.2021

Hurmerinta, Max b. 2021. Quote Markforged Metal X System Advanced package. PDF. 10.03.2021. Luettu 10.03.2021.

Inspire. Materials for 3D printing. Metal powder for the SLM process. <https://www.inspire.ethz.ch/en/research-for-the-industry/materials/raw-materials-3d-print/>>. Luettu 20.03.2021.

Kardys, Gary. 2017. How Strong Are 3D-Printed Metal Parts? Metallurgical Integrity in Metal Additive Manufacturing. Verkkoaineisto. Engineering 360. <<https://insights.globalspec.com/article/7458/how-strong-are-3d-printed-metal-parts-metallurgical-integrity-in-metal-additive-manufacturing>>. 26.12.2017. Luettu 15.01.2021.

Laine, Jari. 2021. Kollektori printti. Protech. Sähköposti. 19.03.2021. Luettu 19.03.2021.

Luu Duy, Nghia; Nai SharonLing, Mui & Nguyen Quy, Bau. 2018. The role of powder layer thickness on the quality of SLM printed parts. Verkkoaineisto. <[https://www.researchgate.net/publication/323680649\\_The\\_role\\_of\\_powder\\_layer\\_thickness\\_on\\_the\\_quality\\_of\\_SLM\\_printed\\_parts](https://www.researchgate.net/publication/323680649_The_role_of_powder_layer_thickness_on_the_quality_of_SLM_printed_parts)>. 07.2018. Luettu 08.03.2021

Maffei, Lucia. 2019. Markforged alleges 3D printing rival Desktop Metal breached settlement by spreading 'false' information. Boston Business Journal. Verkkoaineisto. <<https://www.bizjournals.com/boston/news/2019/07/31/markforged-alleges-3d-printingrival-desktop-metal.html>>. 31.07.2019. Luettu 29.04.2021.

Markforged a. 2020. Additive Manufacturing Trends Report. Verkkoaineisto. <<https://markforged.com/additive-manufacturing-movement2021>>. 2020. Luettu 21.01.2021.

Markforged b. 2021. Types of 3D Printing in Metal. Verkkoaineisto. <<https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal>>. 2021. Luettu 20.01.2021.

Markforged c. 2021. Materials. Verkkoaineisto. <<https://markforged.com/materials/2021>>. Luettu 21.03.2021.

Markforged d. 2021. Eiger Fleet & Blacksmith. Verkkoaineisto. <<https://markforged.com/software>>. 2021. Luettu 21.03.2021.

Markforged e. 2021. Metal X. Verkkoaineisto. <<https://markforged.com/3d-printers/metal-x>>. 2021. Luettu 21.03.2021.

Markforged f. 2019. Metal X User Guide. Verkkoaineisto. <[https://www.mark3d.com/de/wp-content/uploads/2019/12/MetalX\\_Printer\\_UserGuide-2.pdf](https://www.mark3d.com/de/wp-content/uploads/2019/12/MetalX_Printer_UserGuide-2.pdf)>. 2019. Luettu 21.03.2021.

Markforged g. 2020. Design Guide for 3D Printing with Metals. PDF. Markforged. 2020. Luettu 21.03.2021.

Markforged h. 2021. How to Build an Additive Manufacturing Center at Your University. PDF. Markforged. 2021. Luettu 21.03.2021.

Markforged i. 2021. Sinter 2 Facilities guide supplement. PDF. Markforged. 2021. Luettu 21.03.2021.

Markforged j. 2021. Materials Datasheet. PDF. Markforged. 2021. Luettu 21.03.2021.

Markforged k. 2021. Metal X System Facilities Guide. PDF. Markforged. 2021. Luettu 22.03.2021.

Markforged l. 2021. Product Specifications Metal X. PDF. Markforged. 2021. Luettu 22.03.2021.

Markforged m. 2021. Five Applications of Metal 3D Printing. PDF. Markforged. 2021. Luettu 22.03.2021.

Markforged n. 2021. Design Guide for 3D Printing with Metals. PDF. Markforged. 2021. Luettu 21.03.2021

Markforged o. 2020. Markforged Success Plans Overview. PDF. Markforged. 2020. Luettu 21.03.2021.



PLM Group. 2021. Tulostimet. Verkkoaineisto. <<https://plmgroup.fi/tuotteet/3d-tulostus/production-3d-printers/markforged-metal-x/>>. 2021. Luettu 25.03.2021.

Protech a. 2021. Desktop Metal Studio System 2 Tarjous. 04.04.2021.

Protech b. 2021. Desktop Metal. Studio System 2 tulostin. Verkkoaineisto. <<https://www.protech.fi/tuotteet/desktop-metal/studio-system-2>>. 2021. Luettu 22.03.2021.

Renishaw a. 2021. Manufacturing systems. Verkkoaineisto. <<https://markforged.com/software>>. 2021. Luettu 22.03.2021.

Renishaw b. 2021. Verkkoaineisto. <<https://markforged.com/software>>. 2021. Luettu 21.03.2021.

Roberts, Tess & Varotsis Bournias, Alkaios. 2020. 3D printing trends 2020. Verkkoaineisto. 3D HUBS. <<https://www.hubs.com/get/trends/>>. 01/2020. Luettu 20.01.2021.

Sculpteo. 2021. Layer thickness in 3D printing: An additive manufacturing basic. Verkkoaineisto. <<https://www.sculpteo.com/en/glossary/layer-thickness-definition/>>. 2021. Luettu 08.03.2021

SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. 2017. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdisty ry. SFS-Online. 24.03.2017. Luettu 10.01.2021.

SLM Solutions a. 2021. SLM 125 tulostin. Verkkoaineisto. <<https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/slm-125/>>. 2021. Luettu 22.03.2021.

SLM Solutions b. 2021. SLM materiaalivalikoima. Verkkoaineisto. <<https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/powders/>>. 2021. Luettu 22.03.2021.

SLM Solutions c. 2021. Overview Guide. SLM 125. 2021. Luettu 19.03.2021.

SLM Solutions d. 2021. Brochure. SLM 125. 2021. Luettu 19.03.2021.

SLM Solutions e. 2021. Material Data Sheet Ti6Al4V. SLM Solutions. 2021. Luettu 19.03.2021.

SLM Solutions f. 2021. Material Data Sheet AlSi10Mg. SLM Solutions. 2021. Luettu 19.03.2021.

SLM Solutions g. 2021. 3D Metals, Metal Variety. SLM Solutions. 2021. Luettu 19.03.2021.

SMG3D. 2021. Desktop Metal materiaali kasetti. Verkkoaineisto.

<[https://www.smg3d.co.uk/3d\\_printer\\_supplies/metal\\_alloys](https://www.smg3d.co.uk/3d_printer_supplies/metal_alloys)>. 2021. Luettu 01.05.2021.

Total Materia. 2021. Metal Powder Bed Fusion. Verkkoaineisto. <<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&LN=ES&NM=476>>. 04/2020. Luettu 08.04.2021.

Vossi, Marko a. 2021. Hypermuutos mahdollisuudeksi 3D-tulostuksella. PowerPoint esitys. SLM Solutions. 2021. Luettu 15.03.2021.

Vossi, Marko b. 2021. Kollektori printti. SLM Solutions. Sähköposti. 14.04.2021. Luettu 14.04.2021.

Vossi. 2021. Metallitulostimet. Verkkoaineisto. <<https://www.vossi.fi/valmistajat/slm-solutions/>>. 2021. Luettu 22.03.2021.

Wohlers, Terry. 2021. History of additive manufacturing. Verkkoaineisto. <<http://wohlersassociates.com/history2021.pdf>>. 2021. Luettu 30.01.2021.

Woikoski. 2019. Argon Ar 50 L 200 bar DIN 10 RPV kaasua. Verkkoaineisto. <<https://woikoski-tore.woikoski.fi/t200060-argon-ar-50-l-200-bar-din-10-rpv.html>>. 2019. Luettu 20.03.2021.