



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

METALLITULOOSTIMEN OHEISLAITTEISTON MÄÄRITTELY

Santeri Surma-aho

Opinnäytetyö
Joulukuu 2017
Kone- ja tuotantotekniikka
Älykkäät koneet



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Älykkäät koneet

SURMA-AHO, SANTERI:
Metallitulostimen oheislaitteiston määrittely

Opinnäytetyö 57 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Joulukuu 2017

Materiaalia lisäävä valmistus on ollut käytössä Suomessa 1980-luvulta lähtien. 2000-luvulla erityisesti kuluttajahintaluokan laitteistot ovat yleistyneet valmistustekniikan kriittisimpien patenttien vanhennuttua. Kuluttajalaitteiden käyttämät materiaalit eivät välttämättä täytä yrityksiensä materiaalivaatimuksia. Siksi materiaaliksi valitaan esimerkiksi ke-raami- tai metalliseos, joita ei edullisimmilla laitteilla pystytä valmistamaan.

Teollisuuden tarpeisiin pyritään vastaamaan myös Pirkanmaalla. Opinnäytetyön tarkoituksena on tukea 3D Invest -hankkeen laitehankintoja. Kyseessä on kolmevuotinen EAKR-hanke, jonka aikana hanketoimijat hankkivat useita eri AM-tekniikoiden laitteistoja oppimisympäristöihin. Tässä työssä käsitellään Tampereen ammattikorkeakoulun ja SASKY koulutuskuntayhtymän yhteishankintana toteutettua SLM 125HL -laitetta ja sen oheislaitteistoa. Laite saapui kesällä 2016 Vammalan ammattikoululle, kone- ja metalli-alan työsaliin.

Työn tarkoituksena oli määrittää riittävä oheislaitteisto oppilaitoksessa tapahtuvaan jauhepetitekniikan metallitulostukseen. Opinnäytetyössä on kerrottu millaisia jälkityöstömenetelmiä on olemassa ja mitä laitteiston ohelle voisi hankkia. Esitykset on tehty huomioiden minimitarpeet ja mahdollisesti myöhemmin tulevat tarpeet. Tehdyn selvityksen mukaan tilaan rakennettiin laitteiston toiminnan kannalta tarvittavat liitännät. Työn lopussa on esitetty toteutunut laiteympäristö oheislaitteineen. Työstä on hyötyä sekä hankkeelle että muille vastaavanlaisen laitteiston ostoa suunnitteleville tahoille.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Machine- and production technology
Intelligent machines

SURMA-AHO, SANTERI:
Defining the peripheral equipment for a metal printer

Bachelor's thesis 57 pages, appendices 2 pages
December 2017

Additive manufacturing has been in use since 1980s. In the 21st century, especially consumer 3D-printers has become more common with the aging of the most critical patents in manufacturing technology. The material used by consumer devices may not meet the material requirements of the companies. Therefore, a ceramic or metal is not being manufactured by the most advantageous devices is chosen as forerunner

Industry needs are also addressed in Pirkanmaa. The purpose of the thesis is to support equipment purchases for the 3D Invest -project. This is a three-year ERDF-funded project, during which project operators acquire several different AM technology facilities. This thesis deals with the joint acquisition of the Tampere University of Applied Sciences and the SASKY Municipal Education and Training Consortium for the SLM 125 HL and its peripheral equipment. The device arrived in the summer 2016 to Vammala vocational school's machine and metal workshop.

The purpose of the thesis was to define the adequate peripheral equipment for the metal printing of powder bed fusion technology in the school. The thesis describes the kind of post-work methods that exist and what the hardware could acquire. Presentations have been made taking into account the minimum needs and any future needs. According to a survey, the situation was built on unnecessary attachment for the operation of the equipment. The end of the report is a realistic device environment with its peripheral equipment. This work is useful for to purchase similar equipment.

Key words: 3D Invest, SLM, metal printing, additive manufacturing

SISÄLLYS

| | | |
|---|--|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 7 |
| 2 | LAITTEISTO | 9 |
| | 2.1 Aiheen rajausta | 9 |
| | 2.2 Metallitulostimien valmistajat | 9 |
| | 2.3 Yleisimmät laitteistot | 11 |
| | 2.4 Valmistusprosessi | 11 |
| 3 | VALMISTUSTEKNIikka | 14 |
| | 3.1 Tukirakenne | 14 |
| | 3.2 Kerrospaksuus..... | 16 |
| | 3.3 Lämpötila | 16 |
| | 3.4 Materiaalit..... | 17 |
| | 3.5 Suojakaasu | 18 |
| | 3.6 Laitteen avoimuus..... | 18 |
| | 3.6.1 Materiaaliparametrit..... | 19 |
| | 3.6.2 Lisenssit | 19 |
| 4 | KAPPALEEN SUUNNITTELU | 20 |
| 5 | KAPPALEEN JÄLKITYÖSTÖ..... | 21 |
| | 5.1 Jauheen poisto..... | 22 |
| | 5.2 Kappaleen irrotus alustasta | 22 |
| | 5.2.1 Vannesaha | 22 |
| | 5.2.2 Lankasaha..... | 22 |
| | 5.2.3 Kiekkojyrsin..... | 23 |
| | 5.2.4 Käsityökalut | 23 |
| | 5.3 Tukirakenteen poisto..... | 23 |
| | 5.3.1 Ohuet reiät ja ontelot..... | 24 |
| | 5.3.2 Roikkuvat pinnat | 24 |
| | 5.3.3 Alustan puhdistus | 25 |
| | 5.4 Kappaleen työstäminen..... | 26 |
| | 5.5 Pintojen viimeistely | 26 |
| | 5.6 Muut menetelmät | 27 |
| | 5.7 Lämpökäsittely..... | 28 |
| | 5.8 Pintakäsittely..... | 29 |
| 6 | LAADUN VARMISTUS | 30 |

| | | |
|------|--|----|
| 7 | TILAN SUUNNITTELU | 31 |
| 7.1 | Pienoismalli | 31 |
| 7.2 | Seinät ja lattia..... | 32 |
| 7.3 | Vesipisteet..... | 32 |
| 7.4 | Sähkönsyöttö..... | 32 |
| 7.5 | Ethernet | 32 |
| 7.6 | Suojakaasut | 33 |
| 7.7 | Paineilma | 33 |
| 7.8 | Ilmanvaihto | 33 |
| 7.9 | Muut määrittelyt..... | 34 |
| 7.10 | Toteutunut tilaratkaisu | 34 |
| 8 | APULAITTEET | 35 |
| 8.1 | Jäähdytin | 35 |
| 8.2 | Jauheen käsittely | 35 |
| 8.3 | Imuri..... | 36 |
| 8.4 | Varaosat | 36 |
| 9 | TURVALLISUUS | 37 |
| 10 | TOTEUTUNUT LAITEYMPÄRISTÖ | 38 |
| 10.1 | Pukuhuone | 38 |
| 10.2 | Operaattorin huone | 38 |
| 10.3 | Metallitulostimen käyttöympäristö | 39 |
| 10.4 | Raaka-aineiden käsittelyhuone | 42 |
| 10.5 | Muut tilat..... | 44 |
| 10.6 | Tilan jatkokehittäminen | 50 |
| 11 | POHDINTA..... | 51 |
| | LÄHTEET | 52 |
| | LIITTEET | 56 |
| | Liite 1. 3D Boosti ja 3D Invest laitteistot..... | 56 |

LYHENTEET JA TERMIT

| | |
|-------|---|
| AM | Additive Manufacturing |
| CAD | Computer Aided Design |
| CAM | Computer Aided Manufacturing |
| DED | Direct Energy Deposition |
| DFAM | Design For Additive Manufacturing |
| DMD | Direct Metal Deposition |
| EBM | Electron Beam Melting |
| EAKR | Euroopan aluekehitysrahasto |
| HIP | Hot Isostatic Pressing, paineenalainen lämpökäsittely |
| HSM | High Speed Machining |
| LENS | Laser Engineered Net Shaping |
| MIM | Metal Injection Molding |
| PBF | Bowder Bed Fusion |
| RP | Rapid Prototyping |
| SASKY | SASKY koulutuskuntayhtymä |
| SLM | Selective Laser Melting |
| SLS | Selective Laser Sintering |
| STL | Stereolithography, tiedostomuoto |
| TAMK | Tampereen ammattikorkeakoulu |
| TUKES | Turvallisuus- ja kemikaalivirasto |
| TTY | Tampereen teknillinen yliopisto |
| UPS | Uninterruptible Power Supply |

1 JOHDANTO

Horisontti 2020 -hankkeessa on määritetty yhdeksi tutkimuskohteeksi ainetta lisäävä valmistusmenetelmä. Pirkanmaan liitto lähti rahoittamaan EAKR-rahoituksella paikallisten oppilaitoksien Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK), SASKY koulutuskuntayhtymän (SASKY) ja Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) yhteishanketta toukokuussa 2015. (3D-pirkanmaa 2017a)

Hanketta edelsi Tredea OY:n toteuttama Metallien 3D-tulostus: Maisemaselvitys ja aktivointi -hankkeen Innovaatiokinkerit ja Opi ja oivalla -kokonaisuudet, joilla pyrittiin aktivoimaan paikallisia toimijoita. Ensimmäiset aiheen tiimoilta tehdyt kokoontumiset järjestettiin 11.3.2014. (Tredea 2014, 23)

TAMK, TTY ja SASKY olivat tätä ennen aktivoituneet omilla tahoillaan. Esimerkiksi SASKY oli osallistunut opetushallituksen Edu3D.fi -hankkeeseen osatoteuttajana. Kyseiseen hankkeeseen osallistui yhteensä 18 toisen asteen oppilaitosta. (Edu3D.fi 2017)

Oivallusten pohjalta käynnistettiin hanke, jonka ytimenä on yritysten tarpeiden ja motivaatioiden ymmärtäminen ja niihin vastaaminen. Hanketta rahoittivat Pirkanmaan Liitto ja Avoin Tampere. (Tredea 2014, 4)

Tredean koordinoima 3D-Pirkanmaa – 3D-tulostuksen akatemia -hanke toteutettiin vuoden mittaisena vuosina 2014–2015. Hankkeen tavoitteena oli luoda ja levittää valmiuksia, osaamista ja tietoa 3D-tulostuksesta (Tredea 2014, 13)

Pitkä valmistelujakso sisälsi muun muassa 3D-pirkanmaan innovaatiokinkerit 10.6.2014, joissa pyrittiin kasaamaan yhteen aiheesta kiinnostuneet oppilaitokset, yritysten edustajat ja yksityishenkilöt. Tapahtumassa muodostettiin kuusi ryhmää, jotka lähtivät vapaaehtoisesti viemään luotuja aiheita eteenpäin. (Tredea 2014, 13, 24-25)

Lopullinen hankekokonaisuus jakaantui kahteen osaan, 3D Boosti ja 3D Invest -hankkeiksi, joilla pyritään nopeuttamaan teollisuuden AM-tekniologioiden käyttöönottoa. Hankekokonaisuus sai EAKR rahoitusta ja valtion tukea yhteensä noin 850 000 euroa. Hankkeiden kokonaisbudjetti on noin 2,3 miljoonaa euroa. (SASKY 2015a)

3D Boosti -hankkeen tavoitteena on muodostaa Pirkanmaalle alan osaamiskeskittymä, joka koostuu paikallisten toimijoiden verkostosta (EURA, 2015a). 3D Invest -hankkeessa luodaan toimintaympäristöt tutkimukseen, koulutukseen ja osaamisen siirtoon hankkimalla tarvittavat laitteistot (EURA, 2015b).

Hankkeen aikana muodostetaan huomattava osaamiskeskittymä, joka kattaa kaikki merkittävät 3D-tekniikkaan liittyvät osa-alueet. Hankkeessa toteutetuilla ajanmukaisilla toimintaympäristöillä pyritään lisäämään yritysten kilpailukykyä ja kannattavuutta kustannustehokkuuden kasvaessa. (SASKY, 2015b)

3D Invest -hankkeeseen liittyvän laitteiston määrittely aloitettiin syksyllä 2014, jolloin ensimmäisiä hankkeessa käytettyjä esiselvityksiä ja muistioita laadittiin. Syksyn, kevään ja kesän aikana oppilaitoksissa vieraili useita laite-edustajia esittelemässä omia laitteistojaan. (TAMK, 2015)

Hankkeen virallinen rahoituspäätös saatiin toukokuussa 2015. Pari viikkoa myöhemmin, 11.6.2015 esiteltiin Sastamalan Vexve-areenalla hankkeiden toteuttamissuunnitelmat ja kaavailut yhteystyökuviot, kuten Suunta-hanke. (Aamulehti, 2015)

Hankekokonaisuutta täydentää syksyllä 2017 käynnistetty InDesigner -hanke, jonka tarkoituksena on lisätä yritysten 3D-suunnitteluosaamista. 3D-suunnittelun on havaittu olevan edellytys AM-tekniikan hyödyntämiselle yrityksissä. (EURA, 2017)

Liitteessä 1 on esitetty lista 3D Boosti ja 3D Invest -hankkeiden laitteistoista.

2 LAITTEISTO

3D Invest -hankkeessa toteutetut hankinnat ylittävät suurelta osin julkisen hallinnon kynnyksarvot, joten hankittavat kokonaisuudet kilpailutetaan Hilma-palvelussa. Hankintaprosessi on kuvattu Tuomo Myllymäen opinnäytetyössä 3D-tulostusjärjestelmän hankinta ja järjestelmien käyttökohdeselvitys kaupallisessa tuotannossa. (Myllymäki, 2016)

2.1 Aiheen rajaus

Erilaiset AM-valmistustekniikat ovat lueteltu ASTM (American Society for Testing and Materials) standardissa F2792. Tässä opinnäytetyössä keskitytään pelkästään metallien jauhetiteknikkaan (Powder Bed Fusion) perustuviin laitteisiin.

2.2 Metallitulostimien valmistajat

Euroopan alueella merkittävimpiä laitevalmistajia ovat Electro Optical Systems, 3D-systems, Realizer, Renishaw, SLM Solutions sekä Sisma (Wohlers Associates, 2017). Muita pienempiä ovat esimerkiksi OR Laser ja Desktop Metal.

Opinnäytetyön rajauksen vuoksi tässä työssä jätetään pois useita mielenkiintoisia ja tuotantoteknillisesti tehokkaita metallitulostuksen laitteistoja ja valmistusmenetelmiä, kuten digitaaliset metallit ja suorakerrostuslaitteistot.

Merkittävät metallitulostimien laitevalmistajat ja valmistustekniikat ovat lueteltu taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Laitteistojen toimintaperiaate

| Valmistaja | Valmistustekniikka | Jauhepetiteknikka |
|----------------------|----------------------------------|-------------------|
| 3D-systems | Direct Metal Printing | Kyllä |
| Additive Industries | Selective Laser Melting | Ei |
| AddUp | Direct Metal Laser Melting | Kyllä |
| Adira AddCreator | Tiled Laser Melting | Kyllä /Ei |
| Arcam | Electron Beam Melting | Kyllä |
| BeAM | Laser Metal Deposition | Ei |
| Consept Laser | LaserCusing | Kyllä |
| DM3D | Direct Metal Deposition | Ei |
| Desktop Metal | Binder Jetting | Ei |
| DMG Mori | DED/ SLM | Ei/kyllä |
| EOS | Direct Metal Laser Sintering | Kyllä |
| ExOne | Binder Jetting | Kyllä |
| Farsoon | Metal Laser Sintering | Kyllä |
| Gefertec | 3D Metall Druck | Ei |
| Hermle | Metal Powder Application | Ei |
| Höganäs | Digital Metal | Ei |
| Instek | Laser Aided Direct Metal Tooling | Ei |
| Joining Technologies | Lens Metal Deposition | Ei |
| Matsuura | Metal Laser Sintering | Kyllä |
| Mori Seiki | Laser Metal Deposition | Ei |
| Okuma | Laser Metal Deposition | Ei |
| Optomec | Laser Engineered Net Shaping | Ei |
| Orlas | Direct Metal Deposition | Kyllä |
| Realizer GmbH | Selective Laser Melting | Kyllä |
| Renishaw | Metal Powder Bed Fusion | Kyllä |
| Sodick | DMLS with HSM | Kyllä |
| Sisma | Laser Metal Fusion | Kyllä |
| SLM Solutions | Selective Laser Melting | Kyllä |
| Trumpf laser | Laser Cladding | Ei |
| Vadersystems | MagnetoJet | Ei |
| XJet | Nano Particle Jetting | Ei |

2.3 Yleisimmät laitteistot

Yleisimmät tekniikat on esitetty Savonia-ammattikorkeakoulun DeadMan-hankkeen lopuraportin luvussa 3. Hankkeessa haettiin kokemuksia metallikappaleiden valmistamisesta ainetta lisäävällä valmistusmenetelmällä. (Alhonen, Hietikko, Hoffren, Kesonen & Urpilainen, 2015, 18-35)

Kahden yleisimmän metallien jauhepetitekniiikan erot ovat kuvattu taulukossa 2.

TAULUKKO 2. EBM ja SLM tekniikoiden keskeiset eroavaisuudet

| | | |
|--|--|-------------------------------------|
| Ominaisuus | Electron Beam Melting | Selective Laser Melting |
| Lämmönlähde | Elektronisäde | Laser |
| Tulostuskammio | Tyhjiö | Inertti kaasu |
| Skannaus menetelmä | Deflektiokelat | Galvanometri |
| Energian imeytyminen | Konduktiosäädely | Absorptio säädely |
| Jauheen esilämmitys | Elektronisuihku | Infrapunalämmitys |
| Skannausnopeus | Erittäin nopea, magneettisesti ohjattu | Galvanometrin inertialla rajoitettu |
| Energian hinta | Kohtalainen | Korkea |
| Pinnanlaatu | Kohtalaisen huono | Kohtalaisen hyvä |
| Kyky valmistaa tarkkoja yksityiskohtia | Kohtalainen | Erinomainen |
| Materiaalit | Metallit (sähköä johtavat) | Polymeerit, metallit, keraamit |

2.4 Valmistusprosessi

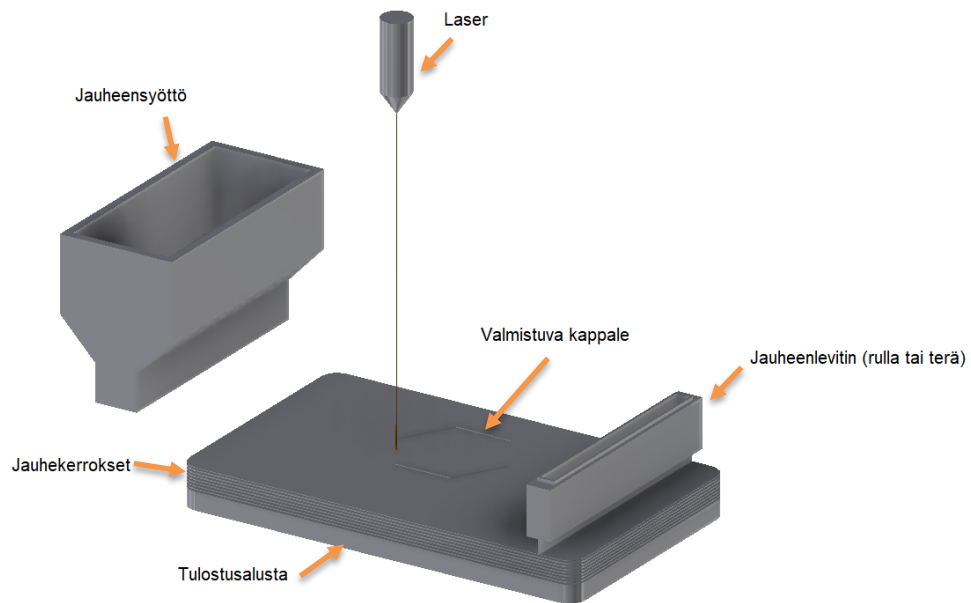
Metallien jauhepetitekniiikan (Powder Bed Fusion) laitteistoja on useita. Laitteistojen toiminnassa voi olla pieniä laitekohtaisia eroavaisuuksia. Suurimmassa osassa laitteista valmistettavat kappaleet valmistuvat kerros kerrokselta alhaalta ylöspäin lasersäteen kovettaessa jauhetta hapettomassa tulostuskammiossa.

Kappaleen valmistukseen tarvitaan ainakin seuraavat työvaiheet

1. Idea
2. Konseptointi ja CAD-mallinnus
3. STL-tiedoston luominen
4. Geometrian tarkistus ja kappaleen asettelu tulostusasentoon
5. Valmistusparametrien ja tukirakenteiden määrittely
6. Kappaleen valmistusprosessi
 - a. Materiaalin lataus
 - b. Tulostusalustan puhdistus ja asennus paikalleen
 - c. Tulostusparametrien asetukset ja kappaleen sijoitus
 - d. Kammion ilman poisto
 - e. Kammion täyttö suojakaasulla
 - f. Jauheen levitys
 - g. Jauheen sulatus
 - h. Tulostusprosessi (useita toistoja vaiheille 6. f-g)
 - i. Kammion jäähtytys
 - j. Kaasujen poisto
7. Jauheen poisto kappaleen ympäriltä
8. Kappaleen irrotus tulostusalustasta
9. Kappaleen tukirakenteen jälkityöstö
10. Jälkityöstö
11. Kappaleen soveltaminen haluttuun paikkaan. (Gibson, Rosen & Stucker, 2015, 60-65)

Valmistusprosessissa metallipartikkelit liitetään yhteen. Kovettamisprosessi tapahtuu CAD-mallin ja tarvittavien tukirakenteiden määräämällä alueella. Hienojakoinen metallijauhe liitetään kiinteäksi kappaleeksi esimerkiksi laserin, elektronisäteen tai ultraäänen perusteella. Kerroksen kovetettua kappaleen annetaan jäähtyä hetki ennen uuden jauhekerroksen levitystä. Tätä toistetaan niin pitkään kunnes kappale on valmistunut. (Sculpteo, 2017)

Erään jauhepetitekniikkaan perustuvan laitteiston toiminta on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Laitteiston toiminta (Kuva: Surma-aho, 2017)

Valmistusprosessi on hyvin samantapainen kuin muovin sintraus SLS-tekniikassa. Metallinen rakennusmateriaali vaatii hieman tarkemman säädellyn valmistusprosessin ja hapen poiston valmistusprosessista, mikä aiheuttaa suuremmat valmistuskustannukset laitteistoille. Myös laseryksiköiden teho on kasvatettu kymmenistä wateista useisiin satoihin watteihin.

3 VALMISTUSTEKNIikka

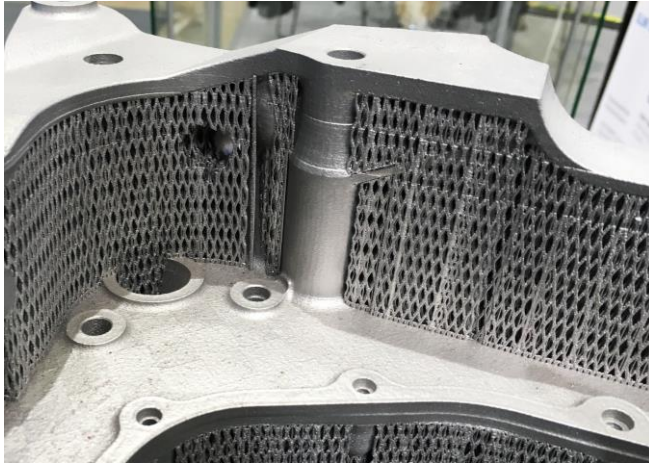
Valmistustekniikkaan liittyvät ilmiöt ovat kuvailtu tässä luvussa. Näitä ovat tukirakenteet ja valmistustekniikasta johtuvat ominaisuudet, kuten pienet yksityiskohdat ja kerrospaksuudet. Metallitulostimet vaativat muita AM-tekniikoita enemmän laitetta käyttävältä operaattorilta. Usein laitteistot ovat ammattikäytössä, sillä käyttäjiltä vaaditaan erityistä tietämystä materiaaleista, tarvittavista kalibroinneista, materiaalin käsittelystä, jälkityöstöstä ja laitteen tarvitsemista huoltotoimenpiteistä.

3.1 Tukirakenne

Tukirakenteet ovat tärkeässä roolissa jauhepetitekniikan metallikappaleiden valmistusprosessissa. Tukirakenteilla kohotetaan kappale irti valmistusalustasta ja tuetaan kappaleen roikkuvat muodot. Metallia sulattaessa muodostuu lämpöjännityksiä, joiden seurauksena kappaleen reunat voivat taipua. Materiaalista ja käytettävästä kerrospaksuudesta riippuen on mahdollista valmistaa jopa alle 35 asteen kulmat ilman tukirakenteita.

Tukirakennetta ja kappaleen ulkopuolista geometriaa voidaan tarvita lämmön siirtämiseen kappaleesta, jotta se voi jäähtyä tarpeeksi nopeasti. Oikein mitoitetuilla tukirakenteilla voidaan vaikuttaa kappaleen sisäisten jännityksien muodostumiseen.

Metallikappaleita valmistettaessa on tärkeää pyrkiä suunnittelemaan tukirakenteet helposti poistettaviksi. Valmistettavat tukirakenteet voivat olla myös osa kappaleen geometriaa, jolloin niitä ei tarvitse poistaa. Tällainen rakenne on esitetty kuvassa 2. Tukirakenteet vaikuttavat myös valmistusaikaan sekä kappaleiden valmistuskustannuksiin, siksi niiden määrää tulisi optimoida mahdollisimman paljon. (3D Hubs, 2017)



KUVA 2. Tukirakenne (Kuva: Surma-aho 2015)

Tukirakenteet ovat usein helposti poistettavia ja muistuttavat ulkomuodoltaan yleensä suorakulmiota, kartioita, yksittäisiä pilareita tai puita. Pilarirakenteet ovat yksittäisiä pisteitä jotka kohoavat alustasta tukien geometriaa. Nämä ovat helppo poistaa, mutta niihin kuluu usein paljon materiaalia. Puumuotoiset tukirakenteet ovat haasteellisempia vinottaisten tukien vuoksi, mutta niillä voidaan saavuttaa siistimpi pinta ja pienempi materiaalin kulutus. (Hoffren, 2014, 11–14)

Tietyissä tapauksissa tukirakenteet voidaan myös määrittää itse piirtämällä haluttu tukiverkosto CAD-ohjelmassa. Kuvassa 3 viipalointiohjelman on annettu luoda automaattinen tukirakenne.



KUVA 3. Automaattinen tukirakenne (Kuva: Surma-aho 2015)

3.2 Kerrospaksuus

Kappaleen valmistusaikaan voidaan vaikuttaa huomasti suurentamalla jauheen levityspaksuutta tiettyyn rajaan saakka. Suurempi kerrospaksuus voi vaatia enemmän lämpöä, eli suuremman laserin tehon täydellisen sulamisen saavuttamiseksi. Usein haasteeksi tulee erityisesti pienillä laitteilla jäähdytysajat. Kerrospaksuudella voidaan vaikuttaa kappaleen pinnan mittatarkkuuteen erityisesti kaltevilla pinnoilla, kuten kuvasta 4 on nähtävissä.



KUVA 4. Kappaleen kerrospaksuus (Kuva: Surma-aho 2015)

3.3 Lämpötila

Jokaiselle materiaalille on olemassa oma optimaalinen lämpötila, jossa materiaali sulatetaan jauheesta kiinteäksi kappaleeksi. Kyseinen muodonmuutos on valmistusnopeuden ja materiaalin ominaisuuksien funktio. Kappaleen geometria voi toisinaan pakottaa käyttämään pienempiä tai suurempia lämpötiloja. Usein lämpötilaa muokataan kasvattamalla laserin tehoa tai pienentämällä liikenopeutta.

Laserin tehon ollessa vakioitu paksuihin muotoihin sitoutuu enemmän energiaa kuin ohuisiin muotoihin. Kappaleen jäätyessä epätasaisesti muodostuu jännitystiloja jotka voivat aiheuttaa halkeamia tai säröjä. Eräs särö on nähtävillä kappaleen haarautumakohdassa kuvassa 5. (Hoffren, 2014, 13)

Lämpöhalkeamia voi esiintyä myös väärin suunnitellun kappaleen tai riittämättömien tukirakenteiden vuoksi (Stratasys, 2015, 10).



KUVA 5. Kappaleen lämpöhalkeama (Kuva: Surma-aho 2016)

3.4 Materiaalit

Laitteistovalmistaja määrittää usein valmistamiensa koneidensa käyttämät materiaalit ja laitteistoparametrit. Tyypillisimpiä materiaaleja ovat ruostumaton teräs-, alumiini-, titaani-, työkaluteräs-, koboltti- ja kuparipohjaiset seokset, jotka toimitetaan jauhemaisessa muodossa. (EPMA, 2017a)

Hapen kanssa reagoivat materiaalit, alumiini ja titaani, aiheuttavat haasteita laitteistokokonaisuudelle. Materiaali tulee säilyttää sellaisissa astioissa, ettei se pääse reagoimaan hapen kanssa. Muuten oksidointiprosessin sivutuotteena syntyvä lämpö voi aiheuttaa vakavan tulipalovaaran. Jauheen siivilöinti tulee tehdä hapettomassa tilassa, jossa on suo- jakaasu ehkäisemässä materiaalin reagoimista ympäröivän ilman kanssa.

Materiaalia sulattavan valmistusmenetelmän (SLM) keskeisistä materiaaleista ja niiden ominaisuuksista on saatavilla laaja määrä lisätietoa VTT:n tekemästä julkaisusta. Julkai- sun perusteella voidaan todeta, että SLM-tekniikalla valmistetut kappaleet vastaavat muokkaamalla valmistettuja kappaleita, mutta myötölujuus on suurempi sitkeyden ol- lessa hieman pienempi. (Jokinen & Riipinen, 2017, 13)

3.5 Suojakaasu

Suojakaasulla pyritään syrjäyttämään ilmassa olevat epäpuhtaudet, jotka tulostusprosessin aikana aiheuttavat kipinöintiä. Kipinöitä kutsutaan satelliiteiksi. Tulostuskammiossa oleva korkea happipitoisuus aiheuttaa nokeentumista valmistusprosessissa, mikä voi aiheuttaa ennenaikaisen linssin likaantumisen ja laserin vaurioitumisen. (Renishaw, 2017b)

Valmistusprosessissa käytettävä laite ja materiaali määrittelevät käytettävän suojaustyyppin. Yleisesti käytössä on DIN 17851 standardin mukaisesti Argon tai Typpi. Hapen poistamiseksi, valmistuskammio voidaan myös alipaineistaa, jolloin happipitoisuus voidaan saada valmistusprosessin vaatimalle tasolle.

Erityisesti reaktiivisille materiaaleille, alumiinille ja titaanille, alhainen happitaso on välttämättömyys. Happitaso tulee ohjeellisesti olla alle 50 partikkelia miljoonasta. (Renishaw, 2011)

3.6 Laitteen avoimuus

Laitteet voidaan jakaa yleistäen kahteen erilliseen alueeseen, suljettuun järjestelmään ja avoimeen järjestelmään. Suljetun järjestelmän etu on valmistuslaatu. Laitteelle on usein esiasetettu parametrit, jonka jälkeen käyttäjä voi valita sopivimman materiaalin käyttötarkoituksen mukaan. Osa parametreista voidaan laitekohtaisesti myös määrittää säädettäväksi tiettyjen raja-arvojen sisällä. Suljetun järjestelmän haittapuolena mainittakoon suuri rajoittuneisuus, joka voi tulla esiin esimerkiksi haastavan geometrian valmistamisen yhteydessä puutteellisina säätöparametreina. Tällöin kappaleen pinnan laatua ei saada välttämättä halutulle tasolle tai kappaleen sisälle voi muodostua liikaa sisäisiä jännityksiä.

Avoimen järjestelmän etu on laitteen laajempi säädettävyyys. Materiaalin laadun vaihtelut voidaan kompensoida esimerkiksi laserin tehoa kasvattamalla tai liikenopeutta pienentämällä. Tällöin käyttäjä voi itse vaikuttaa valmistettavan kappaleen laatuun suljettua järjestelmää enemmän. Usein avoimissa järjestelmissä on mahdollista valita materiaalin toimitus kolmannelta osapuolelta. Avoimen järjestelmänä haittapuolena on oikeiden parametrien haku, joka voi kestää useita kuukausia ennen kuin kappaleesta saadaan hyvälaatuinen.

3.6.1 Materiaaliparametrit

Tietyillä valmistajilla laitteistot ovat suunniteltu pelkästään yksittäisille materiaalille tai materiaaliryhmille. Tällöin laitteiston toimintaa on saatu optimoitua huomioiden valmistusprosessin erikoisvaatimukset. Muiden materiaalien tarvitsemat lisäosat voi olla mahdollista hankkia jälkikäteen erillisinä päivityspaketteina.

Laitteistojen materiaaliparametrit ovat yksi kohde, jossa voidaan säästää. Laitteistoa hankittaessa tulee huomioida erityisesti tulevat tarpeet ja miettiä tulevaisuuden käyttökohteita. Esiasetetut parametritiedot voivat maksaa lisää laitteiston hankinnan yhteydessä. Erityisesti reaktiivisten materiaalien käyttöä tulee pohtia tarkoin, sillä ne asettavat myös lisälaitteistoille omat vaatimuksensa, eikä kaikkia laitteistoja ole mahdollista päivittää vastaamaan reaktiivisten materiaalien asettamia edellytyksiä.

3.6.2 Lisenssit

Laitteiston täyden hyödyn saavuttamiseksi tarvitaan useita lisenssejä. Ohjelmistot voivat olla hankittu määräajaksi tai toistaiseksi voimassa olevilla sopimuksilla. Tyypillisesti tarvittavia lisenssejä ovat CAD-ohjelmistot, rakenneoptimointi-ohjelmistot, simulointiohjelmistot, viipalointiohjelmistot ja AM-laitteen vaatimat ohjelmistot. Näiden lisäksi jälkityöstössä käytettävät NC-jyrsimet tai uppokipinäkoneet voivat vaatia oman laitekohtaisen lisenssin.

Mallinnettavista geometrioista riippuen voi olla tarvetta hankkia useampia simulointi- ja CAD-lisenssejä. Erityisesti palveluntarjoajana toimiminen tuo haasteet asiakkaiden toimittamien natiiviedostomuotoisten geometrioiden vaatiman käänösprosessin takia.

Useat ohjelmistot ovat hinnoiteltu vuosittaiselle määräajalle ja yhdelle asennuskerralle. Laitteen käytöstä riippuen tulee huomioida tarvittavien lisenssien määrä ja siitä aiheutuvat kustannukset. Esimerkiksi useiden laitevalmistajien suosittama Magics, on Materiaalisen ohjelmisto joka maksaa useita tuhansia euroja lisäosineen yhtä lisenssiä kohti vuodessa. Tämä tulee huomioida erityisesti yrityksissä ja oppilaitoksissa, joissa halutaan esittää laitteiston toimintaa suuremmalle yleisölle ja tehdä useita simulaatioita tai harjoituksia samaan aikaan.

4 KAPPALEEN SUUNNITTELU

Ainetta lisäävän valmistusmenetelmän täysi potentiaali tulee esille DFAM – Design For Additive Manufacturing -suunnitteluperiaatetta käyttäen. Tyypillisesti DFAM-kappaleet käsittävät rakenneoptimointia, erilaisia ristikko- ja tukirakenteita, monimateriaalikokonaisuuksia ja massakustomointia. Edistyneemmät käyttäjät voivat optimoida osien sisäisiä resonansseja, jäähdytyspinta-alaa tai muita geometrioita, joissa voidaan hyödyntää AM-tekniikoiden luomia etuuksia.

AM-tekniikoiden etuuksia muihin valmistustekniikoihin verrattuna on esimerkiksi valmistettävien kappaleiden yksilöinti, massan optimointi, erillisten kappaleiden yhdistäminen kappalekokonaisuudeksi, kappaleiden sisäisten muotojen luominen (jäähdytyskanavat, kanavaoptimoinnit) ja erilaiset kennorakenteet jollaisia muilla valmistustekniikoilla ei ole mahdollista valmistaa. Optimoimalla geometriaa voidaan erillisiä osia yhdistää isommaksi osakokonaisuudeksi, jolloin kokoonpanon työvaiheet helpottuvat. (Bhavar, Kattire, Patil, Gujar & Singh, 2017, 4)

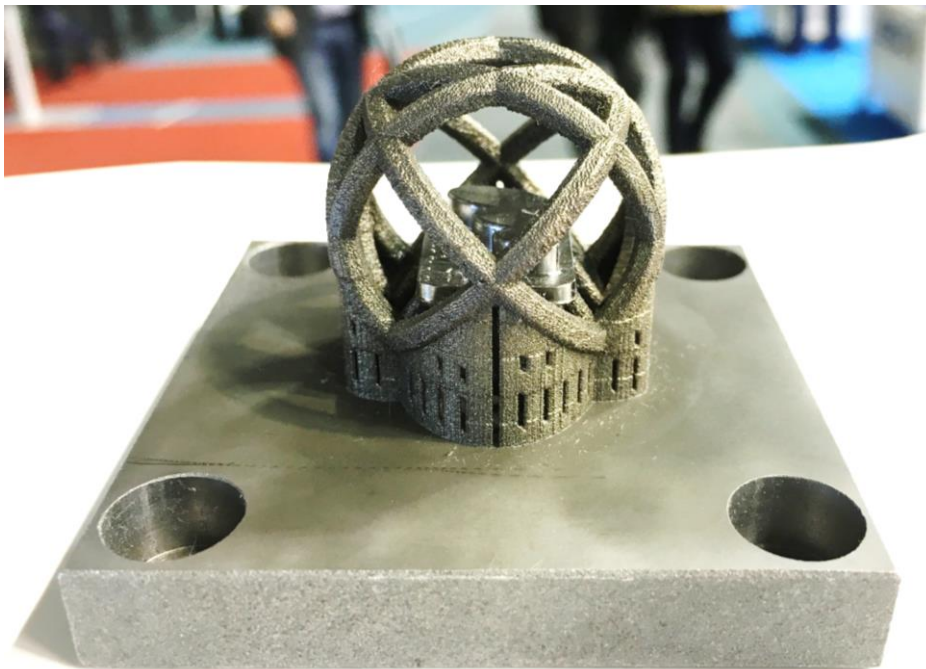
Tässä opinnäytetyössä ei syvennyttä kappaleiden suunnitteluun, sillä aiheesta on saatavilla laajahko tietopaketti laitevalmistajilta ja esimerkiksi VTT:ltä. Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process -teoksen ovat luoneet Kokkonen, P., Salonen, L., Virta, J., Hemming, B., Laukkanen, P., Savolainen, M., Komi, E., Junttila, J., Ruusuvuori, K., Varjus, S., Vaajoki, A., Kivi, S. & Welling J. 2016. Ohjeistuksen lisäksi on suotavaa varmistaa oman CAD-mallin tulostettavuus ja tukimateriaaleihin liittyvät kysymykset käytettävän laitteiston operaattorilta. (Kokkonen, Salonen, Virta, Hemming, Laukkanen, Savolainen, Komi, Junttila, Ruusuvuori, Varjus, Vaajoki, Kivi & Welling, 2016)

Valmistettavat kappaleet optimoidaan yhdelle valmistustekniikalle ja mahdollisesti jopa yhdelle materiaalille. Tämä tarkoittaa usein suunnittelijan ja laitteen pääkäyttäjän tiivistä yhteistyötä laadukkaan lopputuloksen aikaansaamiseksi.

5 KAPPALEEN JÄLKITYÖSTÖ

Kappaleen valmistusprosessin jälkeen on aina vähintään kolmivaiheinen kappaleen jälkityöstö. Ensimmäisenä kappaleen ympäriltä tulee poistaa ylimääräinen metallijauhe. Seuraavaksi irrotetaan kappale alustasta ja poistetaan tukirakenteet kappaleen ympäriltä. Viimeisenä viimeistellään pinnat tarpeen mukaisiksi esimerkiksi mittatarkoiksi koneistamalla tai puhaltamalla pinnat puhtaiksi. (Stratasys 2017, 5-6)

Koneistus voidaan suorittaa myös tietyillä laitteilla tulostusprosessin aikana. Eräs tällainen kappale on esitetty kuvassa 6.



KUVA 6. Kappaleen tukirakenne (Kuva: Surma-aho 2015)

Valmistustekniikkaa ei voi täysin automatisoida, mikä tarkoittaa vähintään yhtä operaattoria, joka huolehtii laitteiston toiminnasta. Jälkityöstömenetelmiä suunniteltaessa tulee huomioida sarjakoot, mahdolliset tulevat investoinnit ja paikalliset palvelun tarjoajat. Ulkoistamalla työvaiheita valmistustilasta saadaan optimoidumpi ja lähialueelle hankittujen laitteistojen käyttöastetta voidaan parantaa.

5.1 Jauheen poisto

Kovettamatta jäänyt metallijauhe poistetaan kappaleen ympäriltä käyttötarkoitukseen kehitetyllä imurilla, joka voi olla sijoitettu myös laitteen sisälle. Eri materiaaleille on suositeltava käyttää omia, käyttötarkoitukseen soveltuvia imureita. Hankalissa geometrioissa jauheen poisto voi vaatia erikoistyövälineitä, kuten ultraäänipesuria tai alipainevärinäkammiota.

5.2 Kappaleen irrotus alustasta

Useissa laitteissa on irrotettava tulostusalusta. Irrotukseen voi tarvita työkaluja, jotka ovat laitekohtaisesti määritettyjä. Kun tulostusalusta on saatu irti laitteesta, sitä on helpompi käsitellä. Tällöin kappaleesta saa tukevan otteen ja mahdollisten lisävarusteiden liittäminen on helppoa.

Kappaleen irrottaminen alustasta vaatii mekaanista työstöä, joka on usein toteutettu vannesahalla tai lankasahalla. Molemmilla menetelmillä on hyvä puolensa. Ideaalinen lopputulos riippuu paljon käytettävästä geometriasta.

5.2.1 Vannesaha

Yksinkertaisimmillaan kappaleen irrotuksessa pääsee vannesahalla. Sahassa olisi hyvä olla säädettävä teräpaine- ja leikkausnopeus, mikäli sillä leikataan useita eri materiaaleja. Vannesahan tulee olla kita-aukeamaltaan riittävän suuri valmistusalustaan nähden.

Vannesahaan kannattaa tehdä säädettävä takavaste helpottamaan alustan kohdistamista puristimeen. Lisäksi vannesahaa tulisi puhdistaa aktiivisesti, erityisesti reaktiivisten kappaleiden tukimateriaalin poiston yhteydessä.

5.2.2 Lankasaha

Lankasahan hyöty paremman turvallisuuden lisäksi on tarkempi leikkausjälki. Tarkkuuden parantuessa kappaletta ei tarvitse nostaa tukirakenteilla yhtä korkealle kuin muilla menetelmillä, jolloin valmistusajat lyhenevät.

Lankasahan hankinta ja käyttökustannukset ovat huomattavasti kalliimmat kuin vanne-sahan. Lisäksi täytyy olla henkilö, joka osaa ohjelmoida parametrit oikeanlaisiksi. (Moylan, Slotwinski, Cooke, Jurrens & Donmer, 2017, 29)

5.2.3 Kiekkojyrsin

Pieneltä tulostusalustalta kappaleet ovat mahdollista poistaa ohuella kiekkojyrsimellä. Tällöin tarvitaan työstökone, johon kyseinen terä saadaan kiinni. Kiekkojyrsinnän etu tulee esille olemassa olevan laitteiston hyödyntämisestä. Tällöin voidaan välttyä lisähankinnoilta ja säästetään oheislaitteistojen vaatimaa lattiapinta-alaa.

5.2.4 Käsityökalut

Pienet kappaleet voidaan irrottaa myös käsikäyttöisillä suorakarahiomakoneella, esimerkiksi Dremelin kiekkoterällä, rautasahalla, sivuleikkureilla tai taltalla ja vasaralla. Tämä vaatii usein suurempaa työskentelytilaa tulostusalustan ja kappaleen väliin.

5.3 Tukirakenteen poisto

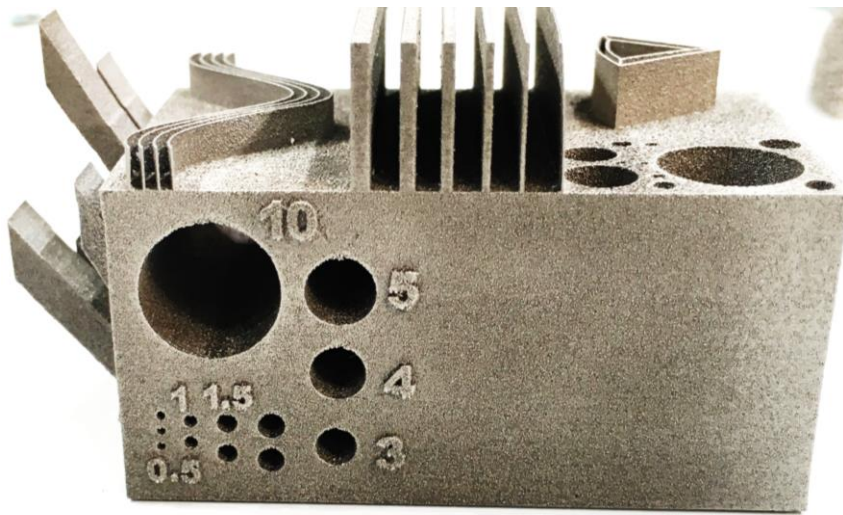
Kappaleen irrottamisen jälkeen usein seuraavaksi halutaan poistaa kappaleessa kiinni olevat tukirakenteet. Tukirakenteet ovat geometriakohtaisia, jolloin yksiselitteistä, kaikille geometrioille toimivaa tukirakenteen poistomenetelmää ei voida määrittää. Rakenteet voi poistaa mekaanisesti esimerkiksi pihdeillä tai taltalla ja vasaralla. Kaarevien pintojen työstöön voi soveltaa ainetta poistavia menetelmiä, esimerkiksi nauhahiomakonetta tai työstökeskusta. Työstöä varten suositellaan pehmeäpintaista työtasoa, ja ruuvipenkkiä, johon on erilaisia pehmeitä tartuntaleukoja.

Erilaisia geometrioita varten tulisi olla laaja työkaluvalikoima työkaluja ja vaihtoehtoisia irrotusmenetelmiä. Käytännössä tämä tarkoittaa useita erilaisia nauhahiomakoneita ja suurta määrää käsityökaluja.

5.3.1 Ohuet reiät ja ontelot

Kappaleet kannattaa suunnitella ja pyrkiä orientoimaan niin, että haastavat muodot saadaan valmistettua mahdollisimman vähällä tuennalla. Tällöin tukirakenteen poisto helpottuu ja jälkityöstö nopeutuu. Syvistä tasapohjaisista rei'istä materiaalin poisto onnistuu teräväkärkisillä pihdeillä tai oikean kokoisella jyrsintapilla.

Suuret reiät voivat alkaa valumaan yläreunasta, kuten kuvasta 7 on nähtävissä. Pienet reiät kannattaa viimeistellä poraamalla. Joskus on tuotantotehokkaampaa unohtaa pienet yksityiskohdat ja valmistaa ne ainetta poistavilla menetelmillä. Tällöin voidaan tarvita vähintään pylväsporakonetta tai työstökeskusta ja oikean kokoisia poria.



KUVA 7. Testikappale (Kuva: Surma-aho 2014)

Suora- ja monikulmaisien onteloiden tarkka viimeistely voi vaatia uppokipinäkonetta. Karkeampaan työstöön soveltuu suuri määrä käsiviiloja. Kierrosnopeudeltaan säädettävä suorakarahiomakone nopeuttaa työskentelyä huomattavasti.

5.3.2 Roikkuvat pinnat

Tukirakenteet valmistuvat kappaleen negatiivisille pinnoille. Tällöin helpointa on mekaaninen poisto. Rakenteen poistamisessa voi käyttää talttaa ja vasaraa tai suuria pihtejä. Suuret tasaiset pinnat kannattaa koneistaa, mikäli käytössä on siihen soveltuvat välineet.

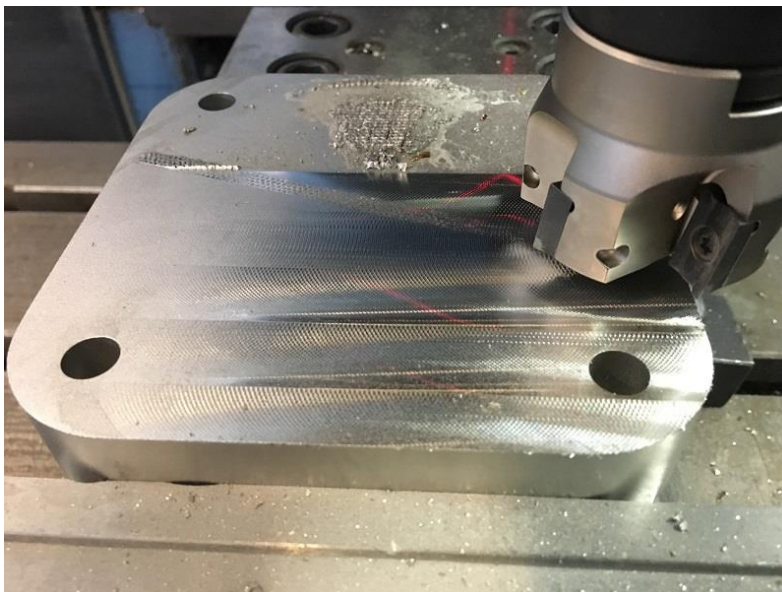
5.3.3 Alustan puhdistus

Tulostusalustan voi jäädä tukirakenteiden poiston jälkeen epätasaisuuksia. Epätasaisuudet pitää poistaa ennen seuraavan prosessin aloittamista. Kuvassa 8 on erään kappaleen irrottamisen jälkeiset tukirakenteet, jotka pitää poistaa, jotta jauheenlevitys onnistuu virheettömästi.



Kuva 8. Alusta kappaleen irrottamisen jälkeen (Kuva: Surma-aho 2015)

Käytännössä alustan puhdistaminen tarkoittaa pinnan koneistamista ja suoruuden mittamista mikrometrillä. Alustasta ei ole välttämätöntä poistaa alustan perusmateriaalia, joten myös pinnan hiominen pyörötasohiomakoneella voi olla vaihtoehto koneistamisen ohelle. Kuvassa 9 on esimerkki alustan puhdistamisesta työstökeskuksella.



Kuva 9. SLM alustan jyrsintä (Kuva: Surma-aho 2017)

Pinnan tasoittamisen jälkeen alusta voidaan karhentaa hiekkapuhaltamalla alustan yläpinta puhalluskaapissa. Tällä pyritään parantamaan ensimmäisen kerroksen materiaalin tarttuvuutta alustaan. Onnistunut jauheenlevitys edellyttää että alusta on tasapaksu ja säädetty yhdensuuntaiseksi jauheen levittimen kanssa.

5.4 Kappaleen työstäminen

Valmistettuja kappaleita voidaan työstää perinteisillä ainetta poistavilla menetelmillä. Näin saadaan aikaiseksi kappaleiden mittatarkkuus ja viimeistellyt pinnat. Koneistamalla voidaan myös lisätä kappaleeseen yksityiskohtia, jotka ovat muuten haasteellisia toteuttaa tulostamalla. Tällaisia ovat esimerkiksi pienet reiät tai paikat minne vaaditaan mittatarkkaa kierrettä.

Valmistettuja kappaleista voi poistaa materiaalia sorvaamalla ja jyrsimällä. Jotkut työvaiheet voivat helpottua, mikäli kaikkia tukirakenteita ei poisteta kerralla. Tasopintojen teko on helpointa manuaalikoneilla. Haasteellisimmille pyöreille muodoille suositellaan nol-lapistetarttujalla olevaa NC-konetta ja kunnollista CAM-ohjelmistoa.

Kiilaurien teko mittatarkasti onnistuu avartimella, kierteiden teko kierretapilla. Meistämäinen onnistuu myös, mutta kirjaimet suositellaan tehtäväksi tulostuksen aikana, mikäli laitteen mittatarkkuus siihen riittää. Pienet fontit kannattavat laseroida myöhemmin kappaleen pintaan.

Kappaleita on mahdollista hitsata. Hybridinä valmistettuja jauhepetimenetelmän kappaleita voidaan liittää yhteen perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettujen kappaleiden kanssa ja saavuttaa haasteellisia metallisia muotoja. Kyseistä tekniikkaa hyödyntää esimerkiksi Ruotsalainen urheiluautovalmistaja Koenigsegg. (Koenigsegg 2014)

5.5 Pintojen viimeistely

Tukirakenteen poiston jälkeen kappaleen pinnat voivat olla rosoiset. Kappaleen uskottavan ilmeen takaamiseksi tuetut ja tukemattomat pinnat olisi hyvä viimeistellä samanlaisiksi. Lisäksi mahdolliset lämpötilasta johtuvat pinnan värjäytymät pyritään poistamaan.

Tämä tarkoittaa kappaleen koneistamista, ympäripuhaltamista, kiillottamista tai pinnoittamista.

Raepuhallusmenetelmiä on useita. Kappaleen pintaan puhalletaan suurella nopeudella hioma-aineena toimivia rakeita. Rakeen törmätessä käsiteltävän kappaleen pintaan törmäys aiheuttaa abrasiivisen reaktion, jossa kappaleen pinnasta poistuu materiaalia. (TTL, 2007, 1-2)

Erilaisia raepuhallusmateriaaleja on useita, joista tähän käyttötarkoitukseen soveltuvimmat ovat muun muassa kvartsihiekkä-, lasikuula- ja pähkinänkuoripuhallus. Puhallusaineen raekokoa muuttamalla voidaan abrasiivista viimeistelyn nopeutta muuttaa.

Tulostettu kappale voidaan viimeistellä ensin esimerkiksi hiovalla alumiinioksidilla, jolloin kappaleen väri muuttuu yhtenäiseksi ja pinnan suuret epätasaisuudet poistuvat. Karkeampaan viimeistelyyn soveltuu hiekkapuhallus, joka sisältää paljon hiovaa materiaalia. Tämän jälkeen kappale voidaan lasikuulapuhaltaa, jolloin kappaleesta tulee mattapintainen. Usein ohuet käytävät ja kulman takana vaikeasti saavutettavissa olevat muodot eivät tule täysin viimeistellyiksi. (Stratasys 2017, 5-6)

Kappaleen ulkopinnat voi myös tarvittaessa kiillottaa. Tämä vaatii paljon kärsivällisyyttä ja käsin tehtäviä välivaiheita. Materiaalia poistaessa kappaleen mittatarkkuus pienenee. Käsin kiillottaessa terävät kulmat, syvät muodot ja ohuet seinämät voivat olla haasteellisia kiillottaa. Laajojen pintojen kiillotus onnistuu monitoimikoneilla, joissa on vaihdettava työkalu eri työvaiheisiin. Kiillotetut pinnat voi käsitellä oksidoitumisen ehkäisemiseksi. (Stratasys 2017, 6)

5.6 Muut menetelmät

Markkinoilla on useita erilaisia apuvälineitä erilaisiin käyttötarkoituksiin. Esimerkiksi pienet kanavat on haasteellista saada työstettyä hyväpintaisiksi. Apuna voi käyttää kanaavaan sijoitettua jauhetta, jonka liikettä pulssitetaan edestakaisin, kunnes haluttu pinnanlaatu on saavutettu.

Ultraäänipesurilla tai korkeapainepesurilla voidaan myös pyrkiä poistamaan kovettamatonta jauhetta kappaleen sisältä ja pinnoilta, joihin ei muilla menetelmillä päästä käsiksi.

5.7 Lämpökäsittely

Materiaalien ominaisuuksia voidaan parantaa lämpökäsittelmällä valmistetut kappaleet. Erilaiset lämpökäsittelyvaiheet voivat olla edellytys valmistajien ilmoittamien materiaaliarvojen saavuttamiseksi.

Valmistusprosessin aikana kappaleen sisälle muodostuu lämpölaajenemisesta johtuvia jännityksiä ja mikrohalkeamia. Kappaleen sisäisistä jännityksistä pyritään eroon lämpökäsittelmällä kappaleet. Prosessia voidaan tehostaa paineistuksella, jolloin käytetään termiä HIP eli Hot Isostatic Pressing. Hippauksen tärkein tehtävä on puristaa metallipulveri suuressa lämpötilassa yhtenäiseksi kappaleeksi.

Uunitus on helpointa tehdä elektronisesti kontrolloidussa uunissa, jossa voidaan säätää uunin lämpötila ja lämmityksen kesto. Myös nousu- ja laskurampin muotoa ja pituutta olisi hyvä pystyä säätämään. (Moylan, Slotwinski, Cooke, Jurrens & Donmer, 2017, 24)

Lämpökäsittelyn aikana kappaleelle tapahtuu mittamuutoksia. Tyypillisesti lämpöjännityksien tasaantuminen aiheuttaa kappaleen vetelyä ja geometrian mittavihreitä. Syntyvien muutosten suuruus riippuu erityisesti kappaleen koosta, geometriasta sekä kuumennus- ja jäähtymisnopeuksista. Suuren muuttujamäärän vuoksi muodonmuutokset ovat usein vaikeasti ennustettavissa. (Raaka-ainekäsikirja, 308–314)

Pehmeäksi hehkuttamalla pyritään parantamaan koneistuksen kannalta oleellista asiaa, lastuttavuutta. Perlitointi on isoterminen käsittely, jossa kappaletta pidetään ensin korkeassa lämpötilassa tunnista kahteen, jonka jälkeen kappale siirretään viileämpään uuniin pidemmäksi aikaa ja siitä ilmaan jäähtymään. (Niemi 2010)

Valmistetuille kappaleille suositellaan vahvasti jännityksien poistamista, myöstämistä. Uunituksen kesto ja lämpötila riippuvat käytettävästä materiaalista ja kappaleen geometriasta. Myöstämisessä materiaalin lämpötilaa nostamalla alennetaan myötörajaa niin että aine pysyy muodonmuutoksen avulla laukaisemaan sisäiset jännitykset. (Additive Manufacturing, 431)

Materiaalien valmistaja voi edellyttää joissain tapauksissa kappaleiden karkaisua vaaditun kovuuden ja lujuuden saavuttamiseksi. Karkaisussa synnytetään kova martensiittinen mikrorakenne, jonka sitkeyttä parannetaan päästökäsittelyllä. Päästökäsittelyssä pyritään poistamaan myös kappaleen sisäiset jännitykset. Lämpötilaa ja vaikutusaikaa muuttamalla voidaan vaikuttaa materiaalin ominaisuuksiin. (Raaka-ainekäsikirja 93–96)

Muita mahdollisia lämpökäsittelyjä ovat esimerkiksi liuotushehkutus, vanhentaminen, erkautuskarkaisu, perlitointi ja austenitointi (Niemi 2010).

5.8 Pintakäsittely

Valmistetut kappaleet voidaan pintakäsitellä esimerkiksi maalaamalla tai pinnoittamalla toisella metallilla tyhjiöhöyrystyksessä. Pintakäsittelyllä voidaan vaikuttaa kappaleen visuaaliseen ilmeeseen sekä saavuttaa esimerkiksi parempaa kulumissuojaa, korroosiosuojaa tai sähköä johtava pintakerros.

Kappaleen pintaa voidaan viimeistellä mekaanisesti esimerkiksi hiomalla, harjaamalla, kiillottamalla, rummuttamalla tai puhaltamalla. Lopullinen viimeistelymenetelmä voi luoda erityisiä tarpeita pinnanlaadun ja mittatarkkuuden suhteen. (Carlholt 2006, 13)

Kappaleet voi olla tarpeellista käsitellä kemiallisesti. Tällaisia menetelmiä ovat esimerkiksi rasvanpoisto, reaktiopinnoitukset, etsaus ja kiiltopeittäus. Sähkökemiallisia menetelmiä ovat anodisointi, kova-anodisointi, kovakromaus ja kiiltoanodisointi. Myös erilaisia värjäysmenetelmiä on olemassa. (Carlholt 2006, 16)

Muita pintakäsittelymenetelmiä on esimerkiksi maalaus, lakkaus, pinnoittaminen muovilla, emalointi tai metallointi. Pelkkiä maalausmenetelmiä on useita riippuen halutusta lopputuloksesta. Tyypillisesti käytettyjä maalausmuotoja ovat nauhamaalaus, jauhemaalaus, pulverimaalaus ja käsin maalaus.

6 LAADUN VARMISTUS

Materiaalin teknillisiä ominaisuuksia voi tutkia erilaisilla mittauksilla ja kokeilla. Perinteisten laadunvarmistusmenetelmiä ovat erilaiset mittaukset ja valmistetun kappaleen silmäääräinen tarkastelu, joilla todetaan kappaleen täyttävän sille annetut ulkomuodolliset määritteet.

Materiaalien teknillisiä ominaisuuksia tarkastellaan usein materiaalia rikkovilla tai rikkomattomilla menetelmillä. Yleisimmin käytettyjä materiaalia rikkovia kokeita ovat dynaamisen (iskumaisen kuormituksen), väsymisen, virumisen, kulumisen, korroosion, tai kovuuden mittaukset. (TTY 2017)

Metallin käyttäytymisen tunteminen on erittäin tärkeää mahdollisten virhetilanteiden ongelmien ratkaisemiseksi. Tähän opinnäytetyöhön on mahdotonta liittää kaikkia mahdollisia virheitä, jotka johtuvat laitteistosta, käytettävän materiaalin ominaisuuksista, lämmönhallinnasta, suojakaasuista tai kappaleen sisäisistä jännitteistä. Tämän takia on suositeltavaa tutustua metallien hajoamiseen vaurio-tilanteissa. Eräs suositeltava teos on Donald J. Wulpin teos *Understanding How Components Fail*, ASM International 2000 printing c 1999, Kyseisessä teoksessa on käsitelty esimerkiksi lämmön aiheuttamaa muodonmuutosta, joka on erittäin tärkeä prosessin kannalta. Liiallinen lämpö aiheuttaa jännityksiä, jonka seurauksena valmistettavat kappaleet voivat irrota kesken valmistusprosessin.

Ainetta rikkomaton (engl. nondestructive testing) laadunvarmistusmenetelmä on silmäääräinen tarkastelu, jossa tutkitaan säröjä, halkeamia, sulkeumia, pintavirheitä tai poikkeamia. Yleisesti teollisuudessa käytetyt NDT menetelmät ovat olleet magneettijauhe-, radiografinen-, ultraääni- ja tunkeumanestetarkastukset. NDT-tarkastuksia tekeville henkilöille on oma pätevänti ja sertifiointijärjestelmä. Särötarkasteluja varten voi käyttää myös fluoresoivaa magneettijauhetta, jota kutsutaan IES tarkastukseksi. Valmistusprosessin laadun seuraamiseksi kaikista vaivattomin tapa on valmistaa tulostustyön aikana testikappaleet kriittisistä asioista.

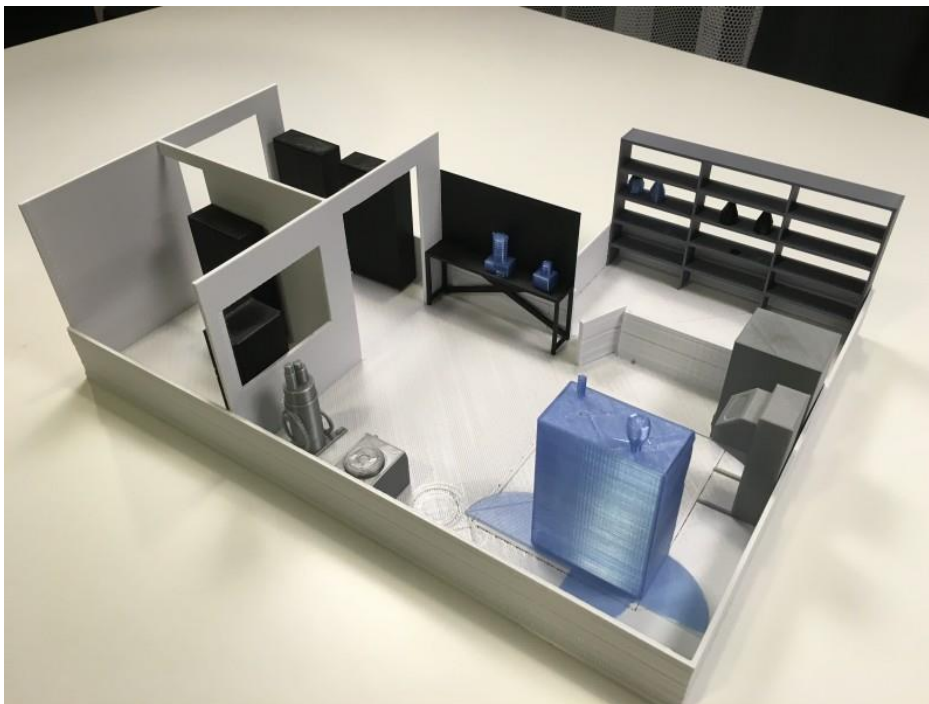
Laadun varmistamiseksi tulostuksen ohella tehdään tietynlaisia testikappaleita, joiden perusteella määritellään materiaalin vastaavuus valmistajan ilmoittamiin arvoihin erikseen suoritettavien testien perusteella.

7 TILAN SUUNNITTELU

Laitteisto on sijoitettu SASKYn opetustiloihin Vammalan ammattikoululle, Ratakadulle Sastamalaan. Laitteisto sijaitsee kone- ja metallipuolen työsalissa sitä varten valmistetussa tilassa. (3D-pirkanmaa 2017b)

7.1 Pienoismalli

Huoneen layoutia varten valmistettiin LPH Conuksella muovista pursotustekniikalla reilu puolimetrisen pienoismalli tilasta, joka on esitetty kuvassa 10. Tilaan sovitettiin eri laitevalmistajien laitteita ja oheislaitteita. Kokonaisuuden hahmottaminen nopeutui tällöin huomattavasti.



KUVA 10. Pienoismalli tilasta (Kuva: Surma-aho 2016)

Ensimmäisellä pienoismallilla haettiin selvyyttä erityisesti vesi-, paineilma- ja sähköliitäntöjen sijoittamisesta ja laitteistojen sijoittamisesta kyseiseen tilaan. Pienoismallin perusteella tehtiin muutoksia tilaan ja laitesijoitteluun. Myös osa laitteistosta jätettiin pois tai korvattiin toisen tyyppisillä.

7.2 Seinät ja lattia

Lattia tulisi olla mahdollisimman tasainen ja värähtelyä hidastava. Riippuen laitteistosta neliöpaino tulee olla laitteistovalmistajan suosittama. 3D-systemsin PXL laitteen neliöpainoksi on ilmoitettu 3000kg/m^2 . Kaikki pinnat on suositeltavaa suunnitella helposti puhdistettavaksi metallijauheesta. Antistaattinen materiaali pinnoitteena voi olla tarpeellinen joillekin laitteille tai materiaaleille.

7.3 Vesipisteet

Laitteiston läheisyyteen on hyvä varata vesipiste. Vesipiste tulee olla riittävän tilava suodattimien pesua varten. Viemärointiin suositellaan erillistä, helposti puhdistettavaa suodatinta, jotta hienojakoinen pienmetallijauhe ei kulkeudu vesistöihin.

7.4 Sähkönsyöttö

Laitteisto suositellaan sijoitettavaksi omana yksikkönään sähkönsyöttöjärjestelmään. Mahdollisissa vikatilanteissa sähkönsyöttö katkaistaan vain tarvittavilta laitteilta. Erityisesti muut voimavirtaa käyttävät laitteet on suositeltavaa eristää samasta vaiheesta pois virta- ja jännitepiikkien eliminoimiseksi.

Sähkökatkoja ajatellen laitteistoille on hyödyllistä miettiä varavirtajärjestelmää, jos ympäristössä on mahdollisuus hetkittäisille sähkönsyöttöhäiriöille. Tällöin vaihtoehtoina on esimerkiksi UPS.

Tilaan on sijoitettava maadoitettuja sähköliitännöitä taulukon 4 mukaisesti. Huomioitavaa on, että Suomessa käytetään 50 Hz järjestelmää, jolloin osa laitetoimittajista saattaa toimittaa erillisen taajuuden muuntolaitteiston $60\text{ Hz} \rightarrow 50\text{ Hz}$.

7.5 Ethernet

Tilaan voi olla tarpeellista saada internet-yhteys laitteen etähallintaa, vikadiagnostiikkaa ja valmisosakirjastojen käyttöä varten. Yhteys on suositeltavaa muodostaa omana verkonaan. Tällöin laite pystyy raportoimaan mahdollisista vikatilanteista palomuurin yli ilman verkon muun toiminnan häiriintymistä.

7.6 Suojakaasut

Laitteiston tarvitseman suojakaasun syöttöön on kaksi suosittua vaihtoehtoa. Nämä ovat erillinen generaattori, joka ottaa tarvittavan kaasun ympäröivästä ilmasta ja erillinen suo-
kaasusäiliö. Kaasun käyttö on kohtuullisen runsasta, joten usein säiliöt muodostuvat kaa-
supullo patteristosta. Kaasun sijoituksessa pitää ottaa huomioon paikalliset turvamääri-
tykset, jotka voi tarkistaa pelastusviranomaisilta.

7.7 Paineilma

Laitteistokokonaisuus voi tarvita paineilmaa jauheen puhdistukseen, tulostusprosessiin ja
jälkityöstöön. On huomioitavaa, että samaan paineilmajärjestelmään ei kytkettäisi muita
suuren tilavuusvirran laitteistoja. Tällä pyritään minimoimaan painevaihtelut järjestel-
mässä. Vaihtelua voidaan minimoida myös lisäämällä laitteen läheisyyteen erillinen pai-
nesäiliö.

Paineilmassa erityisen huomioitavia asioita ovat paineistetun ilman kuivaus ja öljyn ero-
tus. Huomioitavaa on, että laitteistovalmistajien määrittelemät vaatimukset paineilman ja
suojaakaasujen laadusta tulee olla mitattu paineilmajärjestelmän päästä. Laittevalmistaja
voi myös edellyttää erillistä puhdistusyksikköä laitteiston lähettyville.

7.8 Ilmanvaihto

Laitteiston maksimi käyttölämpötila on laitekohtainen. Tyypillisesti käyttölämpötila tu-
lee olla 16-23°C. Mahdollisen reaktiivisen materiaalin käyttäminen laitteessa saattaa ai-
heuttaa omat vaatimuksensa ilmastoinnille.

Valmistusprosessin aikana lämpötilaa ympäristön lämpötilaa on suotavaa seurata. Tarvit-
taessa laitteen yläpuolelle joudutaan valmistamaan erillinen lämpimän ilman keräin, jolla
lämmin ilma ohjataan pois laitteen ympäriltä. Ennen ilman ulospuhallusta pitää huomi-
oida myös pienpartikkelien pitoisuudet ja asentaa tarvittava suodatin.

7.9 Muut määritteet

Laitteympäristön siivouksen helpottamiseksi, tila jossa materiaalia käsitellään, voi olla hyödyllistä jakaa yhteen tai useampaan erilliseen huoneeseen. Tällöin hienojakoisen pölyn leviäminen on helpommin hallittavissa.

Laitteen läheisyyteen sijoitetaan usein tulelta suojaava materiaalien säilytyskaappi, pieni työtaso ja siivöintiyksikkö. Lisäksi erillisessä kaapissa voi olla laitteistossa käytettävät materiaalin syöttöputkistot ja tyhjät materiaaliastiat. Tilan ympäristö tulee olla mahdollisimman vakioitu materiaalin tasalaatuisuuden varmistamiseksi.

Laitteen operointi suositellaan usein tapahtuvaksi erillisestä tilasta. Tällöin valmistettavan 3D-mallin esikäsittelyvaiheessa ei välttämättä tarvitse pitää yllä henkilökohtaisia suojaimia.

Jälkityöstövälineitä voidaan joissain tapauksissa sijoittaa samaan tilaan laitteen kanssa, mutta usein ne suositellaan sijoitettavaksi erilliseen tilaan valmistusprosessia haittaavien ulkoisten ärsykkeiden välttämiseksi. Useissa jälkityöstömenetelmissä voi aiheutua staatista sähköä pintoja kiillottaessa, lämpötilan vaihtelua sähkömoottoreiden aiheuttaman käytön seurauksena tai hitsauksesta johtuvaa kipinöintiä.

7.10 Toteutunut tilaratkaisu

Jauhepetilaitteiston sijoittelua tullaan käsittelemään tarkemmin Miika Kestin (2016) YAMK opinnäytetyössä Laitteympäristön rakentaminen 3D-metallitulostimelle. SLM 125 HL -laite sijoitettiin Vammalan ammattikoulun metalliosaston yhteyteen. Laitteen läheisyyteen sijoitetaan suurin osa jälkityöstövälineistä, mikä on edellytys toimivan oppimisympäristön luomisessa. Työ on luettavissa Theseuksessa. (Kesti 2016)

8 APULAITTEET

Metallitulostin itsessään ei useimmissa tapauksissa riitä. Laitteen läheisyyteen tarvitaan huomattava määrä oheislaitteistoa, joilla halutut kappaleet saadaan viimeistelyä ja suoritettua päälaitteen vaatimat huolto- ja ylläpitotoimenpiteet.

8.1 Jäähdytin

Useat laitteistot käyttävät jauhepetiteknikassa laseria. Laseryksikkö tuottaa huomattavasti lämpöä. Riippuen laitteistosta jota käytetään, on mahdollista, että laitevalmistaja tarjoaa erillisiä jäähdytysyksiköjä, kuten vesi-vesi tai vesi-ilma prosessiin perustuvia jäähdyttimiä. Valittu laite, arvioitu käyttöaste ja käytössä oleva tila määrittää jäähdyttimen tarpeen.

8.2 Jauheen käsittely

Metallijauheen laadun varmistus on prosessin onnistumisen kannalta tärkeä asia. Jauheen siivilöinnissä suodatetaan liian pienet ja liian suuret rakeet pois. Jauheen käsittely on mahdollista tehdä automatisoidusti tai manuaalisesti. Riippuen laitevalmistajasta, materiaalin jauhatukseen voi olla tarpeellista hankkia useita erikokoisia siivilöitä, suodattimia ja suodatinyksikön tarvikkeita työn nopeuttamiseksi.

Mikäli laitteistoa on suunniteltu käyttää vain yhdellä materiaalilla, automaattinen laitteen kylkeen sijoitettu jatkuvakiertoinen jauhenkierrätysjärjestelmä on tuotannon kannalta järkevä vaihtoehto.

Manuaalinen jauhenkäsittely-yksikkö on syytä hankkia, kun käytetään useampia materiaaleja. Tällöin siivilöiden erottelukykyä voidaan tarvittaessa muokata haluttujen ominaisuuksien mukaan.

Reaktiivisten materiaalien käsittelyssä on omat sääntönsä. Nämä tulee ottaa huomioon laite- ja materiaalitoimittajien toimittamien ohjeiden mukaisesti.

Käytetty materiaali voi imeä itseensä kosteutta. Materiaalin laadun seuraamiseksi on suositeltavaa hankkia tarvittavat mittavälineet, kuten lämpötila- ja kosteusmittari. Kosteuden kasvaessa kriittiselle tasolle on suositeltavaa että jauhe kuivatetaan tarkoitukseen soveltuvalla uunilla.

Käytetty jauhe voi sisältää myös ylisuuria partikkeleita. Satelliitit muodostuvat, kun yksittäiset partikkelit reagoivat tulostuskammiossa olevan hapen kanssa palamisprosessissa. Ylisuuret partikkelit voivat aiheuttaa ongelmia valmistusprosessissa.

Siivilöinnistä ylijäänyt, käyttökelvoton materiaali tulee varastoida turvallisesti paloluokiteltuun ympäristöön, jossa on metallijauheen varastointia varten hankittu paloluokiteltu kaappi. Laitteen hankkivan organisaation on suositeltavaa neuvotella paikallisten pelastusviranomaisien kanssa laitteen turvallisuudesta ja siihen liittyvistä riskeistä. Erityisesti huomioitavia asioita ovat suuren jauheen varastointi, sammutusjärjestelmät, kaasuvaroitimet ja toiminta hätätilanteessa.

Materiaalin siivilöintiin liittyvät normit ovat määritetty standardissa ASTM-B214. Testissä käytetään koneistettua seulaa, jonka silmäkoko tiedetään. Testauksen jälkeen jauheet punnitaan ja tulokset ilmoitetaan massaprosenteina. Testissä käytettävät materiaalit tulee olla kuivia ja partikkelikooltaan 45-850 μ m. (Westermoreland Mechanical testing & Research 2017)

8.3 Imuri

Laitteen ohelle tarvitaan imuri, jolla pystytään poistamaan hienojakoista metallijauhetta. Yleensä imurit ovat EX-luokiteltuja märkäimureita. Valmistusprosessissa ylimääräinen poisimetty jauhe imetään nestesäiliöön. Reaktiivisille materiaaleille suositellaan erillistä yksikköä.

8.4 Varaosat

Laitteen läheisyyteen on suotavaa sijoittaa pölyltä suojattu kaappi, johon laitteen varaosat on sijoitettu. Kaappiin sijoitetaan jauheen käsittelyssä tarvittavat tiivisteet, suodattimet, jauheenlevityskelkan osat ja muut välttämättömät tarvikkeet työkaluineen.

9 TURVALLISUUS

Raepuhallukset tulisi suorittaa suljetussa kaapissa, jotta pölyltä vältyttäisiin. Erityisesti kvartsihiekassa olevaan pölyyn tulee suhtautua vakavasti, sillä kyseinen materiaali voi aiheuttaa silikoosia, joka on vakava pysyvästi invalidisoiva keuhkosairaus. (TTL 2007)

Muutenkin henkilökohtaisten suojaimien ylläpito tulee ottaa huomioon. Esimerkiksi pintoja viimeisteltäessä puhalluksen aikana tulee käyttää suojaimia, jotka riippuvat käytettävästä laitteistosta. Tyypillisesti käyttäjä tulee pukea suojavaatetukseen, turvakenkiin, silmä- ja hengityssuojaimiin, kuulosuojaimiin ja suojahanskoihin. Tämän lisäksi jauhetta käsiteltäessä tulee huomioida materiaalin vaatimukset, joita voivat olla antistaattisuus ja erillinen maadoitus jauheen käsittelijälle.

Henkilökohtaiset suojaimet on suositeltavaa sijoittaa erilliseen tilaan niin, ettei hienojakoinen jauhe pääse leviämään tilasta suojaimien väärälle puolelle ihoa koskettaviin osiin. Tilan siivoukseen on syytä kiinnittää huomiota oman turvallisuuden ja pölyräjähdysten vuoksi. Antistaattisia alustoja ja erillistä maadoitusta suositellaan käytettäväksi jauheen käsittelyssä. Tällöin staattisuudesta johtuva kipinäräjähdysten riski voidaan minimoida (VTT, 2003 10-14, 21-78)

Reaktiivisia materiaaleja käsiteltäessä tulee huomioida laite- ja materiaalivalmistajan ohjeet turvallisesta käytöstä. Metallijauheen käsittelystä on tietoa esimerkiksi European Powder Metallurgy Associationin eli EPMA:n sivustolla. (EPMA 2014b)

Laiteympäristöön tulee sijoittaa riittävä määrä D-luokan metallipaloihin soveltuvia sammuttimia. Henkilökuntaa tulee ohjeistaa laitteen turvalliseen käyttöön, ja paikallisten kanssa on suotavaa käydä läpi turvallisuussuunnitelma pelastusviranomaisten ollessa paikalla sekä tehdä pelastusharjoituksia.

10 TOTEUTUNUT LAITEYMPÄRISTÖ

Laitteisto sijaitsee Vammalan ammattikoululla, jossa on hyvät peruslaitteistot metallin työstöön. Laitteisto on sijoitettu omaan tilakokonaisuuteen, johon kuuluu pukuhuone, operaattorin huone, 3D-metallitulostimen käyttöympäristö ja raaka-aineiden käsittelyhuone. Laiteympäristö on jaettu neljään erilliseen tilaan, joiden yhteenlaskettu pinta-ala on 54 neliometriä. Oheislaitteistot on sijoitettu kolmeen konesaliin, joita yhdistää yhteinen käytävä. Tarvittaessa osa jälkityöstöistä voidaan tehdä oppilaitoksen ulkopuolella loppu asiakkaan niin vaatiessa.

Tilassa on riittävästi voimavirta- ja valovirtapistokkeita käyttötarkoitukset huomioiden. Tilakokonaisuus ei ole ATEX-luokiteltu, mutta turvallisuuteen on kiinnitetty huomiota valitsemalla tulpatut pistorasiat, tilaan soveltuvat valaisimet ja riittävä D-luokan alkusammutuskalusto.

10.1 Pukuhuone

Pukuhuoneeseen hankittiin jokaiselle laitteen pääkäyttäjälle oma kaappi, johon on mahdollista sijoittaa henkilökohtaiset suojaimet, työasut ja turvakengät. Tila on kompakti ja toteutettu olemassa olevan tilan äärimittojen mukaan.

10.2 Operaattorin huone

Operaattorin huoneeseen hankittiin tehokas pöytätietokone internetyhteydellä. Tietokoneeseen asennettiin laitevalmistajan tilauksen yhteydessä toimittamat Materialise Magics RP ja SLM Build Processor -ohjelmistot. Magics ohjelmistoon sisältyi lisäosana Support Generator +. Tarvittavat suunnittelu ja simulointiohjelmistot hankittiin itse. Tietokone on kytketty koulun lähiverkkoon ja internettiin.

Tilakokonaisuus on videovalvonnan alaisena. Tarvittaessa valvonta voidaan keskeyttää operaattorin toimesta esimerkiksi yritystöiden valmistamisen ajaksi.

10.3 Metallitulostimen käyttöympäristö

Isoimmassa huoneessa sijaitsee SLM125 HL -metallitulostin. Tulostin on sijoitettu huoneen keskiosaan niin, että kaikki huoltoluukut mahtuvat aukeamaan. Laitteen pohja on erillisvalua ja värinäeristetty ulkoisilta ärsykkeiltä kuten rautatien, räjäytystyömaan, moottoritien tai suuren työstökeskuksen aiheuttamalta mekaaniselta värinältä.

Laiteympäristön lämpötilaa ja kosteutta seurataan. Saatujen mittausten perusteella voidaan havaita mahdolliset ympäristöolosuhteiden vaikutukset tulostuslaatuun, jolloin niihin puuttuminen on helpompaa. Tarvittaessa tilaan voidaan ottaa käyttöön erillinen ilmankuivain tai jäähdytin. Laiteympäristön lämpötilan tulee pysyä valmistajan antamissa arvoissa 18-30°C suhteellisen ilmankosteuden ollessa maksimissaan 60%.

Sähkösyötön tulee täyttää laitevalmistajan määrittelemät vaatimukset. Nämä ovat määritetty EG-direktiivissä 2006/42/EG, 2006/95/EG ja 2004/108/EG. Tämän lisäksi tulee täyttää DIN EN ISO standardit, 12100:2011, 13849, 13850, 13857, 14119 ja DIN EN standardit 349, 60204-1, 61000-6-2 part 6-2, 61000 part 6-4. SLM 125 HL-laite tarvitsee yhden 32 A voimavirtapistokkeen.

Laite on esitetty toimintaympäristössään kuvassa 11.



KUVA 11. SLM 125 HL metallitulostin toimintavalmiina. (Kuva: Surma-aho 2016)

Laitteeseen tulee argon- ja typpisuoja-kaasut käyttöön rakennettua omaa linjastoa pitkin. Kaasuvarasto on 12 pullon pattereissa erillisessä tilassa. Kaasun laatu täyttyy linjaston päässä. Kaasun määrää tarkkaillaan, ja tarvittaessa varapullo kytkeytyy järjestelmään. Kaasun laatu täyttää laitevalmistajan DIN EN ISO14175 Group 1 Class 4.6 -vaatimuksen putkiston päässä. Argon linjaan on asennettu erillinen suodatin. Kaasun kulutus on maksimissaan 100 litraa minuutissa 6 baarin paineella.

Paineilma syötetään linjastoa pitkin olemassa olleelta laitteelta. Kompressori sijaitsee vierisessä hallissa. Paineen luomisesta vastaa kuvassa 22 oleva Atlas Copcon GA22FF. Laitteen tuotto on 3.6 m^3 :ä maksimipaineen ollessa 8.3 Bar. Laitteen vieressä on erillinen 0.2 m^3 :n painesäiliö tasaamassa painevaihteluita.



KUVA 12. Paineilmakompressori. (Kuva: Surma-aho 2016)

Laadun varmistamiseksi linjaston päähän jouduttiin hankkimaan erillinen suodatusyksikkö ja ilmankuivain, jolla saavutetaan valmistajan määrittelemä ISO 8573-1 1.4:1 puhtausluokitus linjan päästä mitattuna. Linjan käyttöpaineeksi vaaditaan vähintään 6 baaria. Laite kuluttaa paineilmaa enintään 360 litraa minuutissa, tyyppillisen ilman kulutuksen ollessa noin 15 litraa minuutissa. Ilmankuivain, joka on esitetty kuvassa 13, toimii 230V valovirralla.



KUVA 13. Kuivainyksikkö suodattimilla. (Kuva: Surma-aho 2016)

Tulostimen laseryksikön jäähdytin on vesi-ilma tyyppiä. Jäähdytin on sijoitettu konesaliin vievään käytävään. Käytävästä ilma pääsee vapaasti kulkemaan konesaliin. Kuivaimen tuottama äänentaso on 54 db. Jäähdytin toimii 16 A voimavirtapistokkeella.

Laitteen läheisyydessä on käyttötarkoitukseen soveltuva EX-luokiteltu AMC330 -imuri. Imettävä materiaali kulkeutuu laitteen pohjalla olevaan nestesäiliöön, josta se on puhdistettava säännöllisesti. Pyörillä liikutettava puolitoistametriä korkea ja 95 kg painava imuri toimii 16A voimavirralla. Laitteen äänentaso on maksimissaan 86 dbA. Laitetta käyttäessä suhteellinen ilmankosteus tulee olla alle 65% ja lämpötilan 5-40°C. Imuri on esitetty kuvassa 14.



KUVA 14. Imuri (Kuva: Surma-aho, 2016)

Suodattimien puhdistusta varten laitteen läheisyyteen tehtiin vesipiste. Lavuaarin vierelle hankittiin teline ja tarvittavat letkut suodattimien puhdistamista varten. Lavuaarin alle sijoitettiin erillinen sakkasihti, jonka tarkoitus on kerätä veden mukana viemärijärjestelmään päässeet pienpartikkelit. Vesipisteen läheisyyteen sijoitettiin työpöytä, jossa on tarvittavat työkalut helposti saatavilla. Pöydän yläpuolelle on sijoitettu helposti saataville käsipyyhepaperiteline. Työpiste on esitetty kuvassa 15.



KUVA 15. Työpöytä ja vesipiste, (Kuva: Surma-aho, 2016)

Laitteen toisella puolella on suljettu GWS:n hylly, jossa on työkaluja ja varaosia laitteistoon.

10.4 Raaka-aineiden käsittelyhuone

Jauheet käsitellään erillisessä huoneessa. Kyseisessä huoneessa on materiaalin säilytystä varten laitevalmistajan toimittama EN-14470-1 normin täyttävä palosuojattu kaappi Düperthal Typ90 Classic Line XL, joka voi sijaita samassa huoneessa metallitulostimen kanssa. Hyllyssä olevat materiaalityypit on esitetty kuvassa 16.



KUVA 16. Materiaalikaappi (Kuva: Surma-aho, 2016)

Jauheensiivilöintiyksikkö on manuaalitoiminen PSM 100, joka on esitetty kuvassa 17. Laitetta käyttäessä suhteellisen ilmankosteuden tulee olla alle 50 % ja lämpötilan 18-30°. Äänentaso on käytössä alle 70 dbA. Laite toimii 16A voimavirralla. Laitteeseen tarvitsee kytkeä suojakaasu. Laite voi sijaita samassa tilassa metallitulostimen kanssa.



KUVA 17. PSM 100 – jauheen puhdistuslaite (Kuva: Surma-aho, 2016)

Jauheen tarkkailuun on käytettävissä ilmankosteus- ja lämpötilamittarit, jotka hankittiin erikseen laitteen saavuttua.

Mikäli materiaali on liian kosteaa, materiaali voi paakkuuntua ja aiheuttaa valmistusteknillisiä laatuongelmia tulostusprosessissa. Materiaalin kuivatukseen käytetään VGO710 SR uunia. Uuni on sijoitettava tilaan joka huonekorkeus on korkeintaan 3000 millimetriä. Uuni kytketään sähköjärjestelmään 16A voimavirtapistokkeella. Laitteisto voi sijaita samassa huoneessa metallitulostimen kanssa. Kuivatusuuni on esitetty kuvassa 18.



KUVA 18. Jauheen kuivatus uuni (Kuva: Surma-aho, 2016)

Valmistusprosessissa käytettävä materiaali laitetaan astioihin tässä tilassa ja kuljetetaan suljettuna laitteen luokse. Tila ei ole räjähdyssuojattu, mutta lattialla on antistaattiset matot. Laitteen taakse on hankittu erillinen työskentelytaso helpottamaan laitteen yläosassa tapahtuvia työtoimenpiteitä.

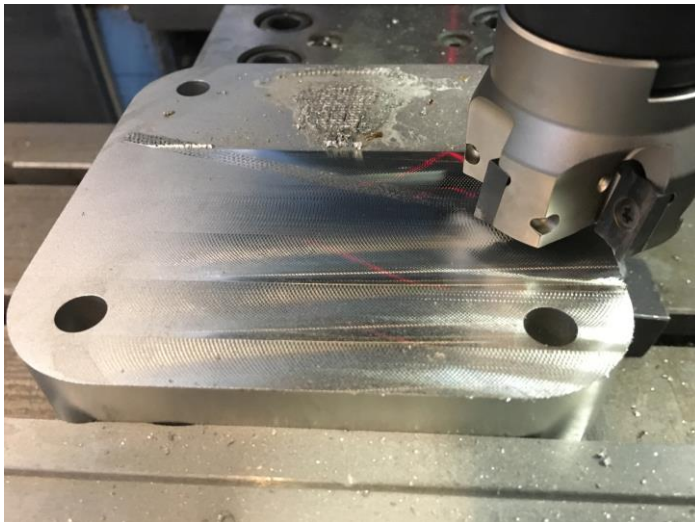
10.5 Muut tilat

Operaattoritilan ja pukutilan läheisyyteen hankittiin pöytä, johon sijoitettiin Optimum metallivannesaha kappaleiden irrottamiseen tulostusalustalta. Metallivannesaha on manuaalikäyttöinen ja sen kita-aukeama on riittävän suuri tulostusalustalle. Työtasolla oleva vannesaha on esitetty kuvassa 19.



KUVA 19. Työtasolla oleva vannesaha (Kuva: Surma-aho, 2016)

Tulostusalustan pinnat jyrsitään puhtaaksi isolla NC-ohjatulla työstökeskuksella, jossa on luotu kyseistä käyttötarkoitusta varten oma ohjelmansa. Puristin on vakioitu paikalleen, jolloin ainoastaan Z-offset tulee määrittää alustakohtaisesti. Tulostusalustan puhdistus jyrsimällä on esitetty kuvassa 20



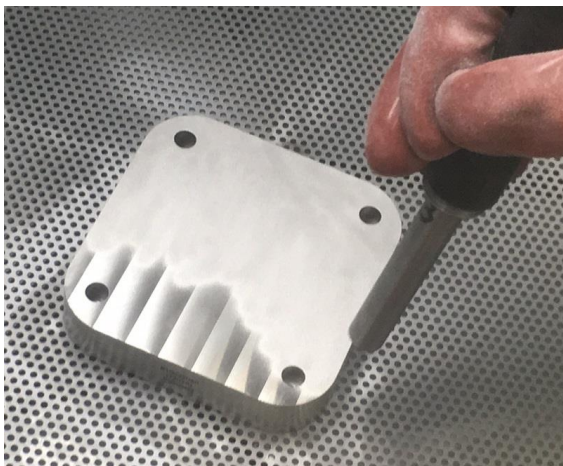
KUVA 20. Tulostusalustan puhdistaminen (Kuva: Surma-aho 2016)

Konesaliin on sijoitettu puhalluskaappi, jossa on sisäpuoleinen valaistus ja riittävän iso pyörityspöytä. Puhalluskaappi on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Puhalluskaappi (Kuva: Surma-aho 2016)

Kaikki tulostusalustat puhalletaan koneistuksen jälkeen riittävän pinnanlaadun saavuttamiseksi. Puhallusprosessia havainnollistetaan kuvalla 22.



KUVA 22. Tulostusalustan pinnan puhaltaminen (Kuva: Surma-aho 2016)

Laiteympäristön välittömässä läheisyydessä on mittaushuone, joka on esitetty kuvassa 23. Tilasta löytyy yleisimmät mittavälineet, kuten työntömitat, syvyys-, ulko- ja sisäpuoliset mikrometrit, kierre- ja rakotulkit reikäkellot ja pinnankarheuden mittapalat. Tilassa sijaitsee TESA Microhite 3D-koordinaatiomittakone, jolla voidaan tarkastella kappaleen haasteellisimpien muotojen mittatarkkuutta.



Kuva 23. Mittaushuone (Kuva: Surma-aho 2016)

Kauimmaisesta konesalista löytyy kymmenen manuaalisorvia sekä neljä manuaalijyrsin-konetta. Konesali on esitetty kuvassa 24.



KUVA 24. Manuaalikonesali (Kuva: Surma-aho, 2016)

Kauimmaisesta nurkasta löytyy Nabertherm N 41/H -lämpökäsittelyuuni, joka on esitetty kuvassa 25. Uunin lämpötilahallinta on sähköisesti ohjattu. Uunin maksimikäyttölämpötila on 1280 °C.



KUVA 25. Lämpökäsittelyuuni (Kuva: Surma-aho, 2016)

Kappalehiontaan konesalista löytyy IKH XBG752 nauhahiomakone ja pyöröhiomakone. Hiontakoneet on esitetty kuvassa 26.



KUVA 26. Pyöröhiomakone ja nauhahiomakone (Kuva: Surma-aho, 2016)

Konesalin varustukseen kuuluu myös tasohiomakoneet, kuten kuvassa 27 näkyvä Tos Hostivar BN 102 tasohiomakone.



KUVA 27. Tasohiomakone (Kuva: Surma-aho, 2016)

Keskimmäisessä konehallissa on NC-työstökoneita ja pylväsporakoneet. Kuvassa 28 oleva ERLO TCA-40 mahdollistaa suurienkin reikien poraamisen riittäväällä tarkkuudella. Taustalla on Serrmac yleisjyrsinkone.



KUVA 28. Porakone ja jyrsinkone (Kuva: Surma-aho, 2016)

Muualle saliin on sijoitettu NC ohjattuja työstökeskuksia ja sorveja

- Mori Seiki NXV5080
- Piancho Smart-turn 7
- Eagle 600
- Mori Seiki MT-253
- Puma TT 1800 SY
- Mazak Quick turn smart 200M

Konesalin viimeisimmässä osassa sijaitsee suuret automatisoidut työstökeskukset

- Mazac VTC-20B
- Dugard 660
- Eagle 660
- Ohnford Superturning SL-40L
- Nakamura-Tome TMC-15 tangonsyöttölaitteistolla



Kuva 29. Puma TT-1800 (Kuva: Surma-aho 2016)

10.6 Tilan jatkokehittäminen

Olemassa olevien jälkityöstölaitteiden lisäksi on ilmennyt muutamia puutteita, joilla voitaisiin työmäärää vähentää tai työskentelymukavuutta parantaa. Osaa esille tulleista oheislaitteista tarjottiin hankintaprosessissa optioina.

Kappaleen jälkikäsitteilyä helpottamaan olisi suotavaa hankkia imupöytä. Pöytää voi käyttää sekä tukirakenteen irrottamisen aikana kappaleista valuvan jauheen poistoon että kappaleen viimeistelyssä metallipölyn poistoon. Tällöin ympäröivän tilan puhtaanapito helpottuisi. SLM Solutionsin tehdasvierailun ohella pääsin tutustumassa saksalaiseen metallipajaan, jonka käytössä oli kuvan 30 mukainen imupöytä.



KUVA 30. Imupöytä (Kuva: Surma-aho 2016)

Kappaleen pintojen viimeistelyyn on hankittu pienoissuorakarahiomakone Dremel, jossa on joustava varsi helpottamaan työskentelyä. Laitteeseen on erilaisia työkaluja, joten kappaleiden pinnat saadaan viimeistelyä nopeammin.

Sarjatuotantoa varten tulostusalustoja olisi suotavaa olla enemmän kuin laitevalmistajan suosittelema minimi kolme kappaletta. Manuaaliseen työstöön olisi toivottavaa varata riittävä määrä käsityökaluja säilytyspaikkoineen. Mikäli laitteen käyttäjiä on useampia, jokaiselle tulisi varata omat henkilökohtaiset suojaimet laitteen turvalliseen käyttöön.

11 POHDINTA

Jauhepetitekniikka on tekniikkaa, johon tulee suhtautua arvostaen. Kappaleiden valmistus on suhteellisen arvokasta ja massatuotanto on hidasta, mutta saavutettavat edut ovat kiistattomat. Maailmalta löytyy yrityksiä, jotka tekevät PBF-tekniikalla jopa yli 25 000 kappaleen sarjoja.

Markkinoilta löytyy useita erilaisia laitteistoja, jotka on suunniteltu erilaisiin ympäristöihin. EOS:n ja GE:n laitteet soveltuvat tuotantokäyttöön, mutta vaativat oheis- ja lisälaitteistoja. Matsuuran laitteistossa kappaleen pinnat voidaan työstää HSM-menetelmällä, jolloin sen sovelluskohteet ovat erityisesti muottituotannossa. Formnextissä 2017 esitelty Adiran AddCreator on moduuleista rakentuva laitteistokokonaisuus, jossa on mahdollista suorittaa välttämättömät työvaiheet. Yleisestään voidaan siis todeta että laitteistot ovat hyvin erilaisia. Tämän vuoksi lukemasi työ tulee käsittää ohjeistavana esimerkkinä yhden oppilaitoksen näkökulmasta. Toistaiseksi laitteen materiaalina on käytetty pelkästään ruostumatonta terästä 1.4404 (316L). Mikäli kyseisellä laitteella tulostettaisiin useampaa materiaalia, olisi suotavaa hankkia erilliset putkistot jauheenkäsittelyn ja metallitulostimeen, jolloin materiaalin vaihtotyö sujuisi nopeammin. Reaktiivisia materiaaleja käyttäessä voi olla tarpeellista hankkia omat oheislaitteistot reaktiivisille ja reagoimattomille materiaaleille.

Yritykselle hankittavaan laitteistoon tulee keskittyä kunnolla, ja käydä tutustumassa laaja-alaisesti erilaisiin laitteilla valmistettaviin kappaleisiin, jotta geometriarajoitteet ja valmistustekniikan haasteet selkeytyvät ennen laitteiston hankintaa. Tällöin voidaan varmistua että hankittava laitteisto täyttää sille asetetut odotukset. Tuotantokäyttöä ajatellen on suotavaa pyrkiä minimoimaan käytettyjen henkilötyötuntien määrä.

Jokaisella yrityksellä on omat tarpeensa ja tuotteensa, joten yksiselitteistä listausta jokaisen yrityksen käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuvasta laitteistosta ja oheislaitteistoista ei pysty tekemään. Oheislaitteiston listausta pystyisi jatkamaan huomattavasti, mutta läheskään kaikkia työvaiheita ei suurin osa yrityksistä tule tarvitsemaan. Tämän vuoksi kyseinen työ on supistettu. Tarvittaessa annan mielelläni lisätietoja.

LÄHTEET

- 3DHubs. 2017. Metal printing support structures. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-over-view#metal-printing>
- 3D-pirkanmaa. 2017. Hanketietoa. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017. <http://3dpirkanmaa.fi/hanketietoa/>
- 3D Pirkanmaa. 2017. SLM 125 HL Metallitulostin. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://3dpirkanmaa.fi/toimintaymparisto/sasky/>
- 3D Systems. 2017. Metal Printers. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <https://www.3dsystems.com/3d-printers>
- Aamulehti. 2015. Luettu 20.5.2016 <https://www.aamulehti.fi/juttuar-kisto/?cid=1194979683417>
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker B. 2015 Additive Manufacturing Technologies 3.2 Business Media New York. (s.60–65)
- Alonen, A, Hietikko, E, Hoffren, M, Kesonen, M, ja Urpilainen, A. 2015. Kokemuksia metallikappaleiden ainetta lisäävästä valmistuksesta. Savonia ammattikorkeakoulu, DeadMan-tutkimushanke. Kuopio Sivut 18–35 http://portal.savonia.fi/amk/sites/default/files/pdf/tki_ja_palvelut/julkaisut/deadmanwebedition.pdf
- Arcam EBM 2017. Welcome to manufacturing unbound. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcamebm-corp-brochure-fnlv3.pdf>
- Bhavar. V., Kattire, P., Patil, V., Khot, S., Gujar, K. & Singh, R. n.d. A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing. Kalyani Centre for Technology and Innovation (KCTI). [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://amsi.org.in/images/pdf/Full%20papers/review%20on%20powder%20bed%20additive%20manufacturing.pdf>
- Carlholt. E. 2006. Alumiiniseokset, valujen puhdistus. [Opetusmateriaali]. 28.1.2015. Luettu 15.12.2017 http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/metals_aluminum_FI.pdf
- Consept Laser. 2017. Machines, [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <https://www.concept-laser.de/en/products/machines.html>
- Edu3d.fi, Sastamalan koulutuskuntayhtymä, [internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://edu3d.fi/oppilaitokset-p-v/sastamalan-koulutuskuntayhtyma/>
- EOS. 2017. Systems and equipment for metal manufacturing . [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 https://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment
- European Powder Metallurgy Association. 2014. KAMAT-tietokortti, Rae- ja hiekkapuhallus. [Internetsivu, turvallisuusohje]. 5.2014. Luettu 15.12.2017 <http://www.epma.com/23-ges-9-powder-metallurgy/file>

European Powder Metallurgy Association. 2017. Additive Manufacturing, A wide range of alloy possible. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://www.epma.com/additive-manufacturing>

Työ ja elinkeinoministeriö. n.d. Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) rahoittaman hankkeen kuvaus, 3D Boosti. [Raportti]. n.d. Luettu 15.12.2017. <https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projektikoodi=A70633>

Työ ja elinkeinoministeriö. n.d. Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) rahoittaman hankkeen kuvaus, 3D Invest. [Raportti]. n.d. Luettu 15.12.2017. <https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projektikoodi=A70676>

Työ ja elinkeinoministeriö. n.d. Euroopan sosiaalirahaston (ESR) rahoittaman hankkeen kuvaus, 3D InDesigner [Raportti]. n.d. Luettu 15.12.2017 <https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projektikoodi=S21032>

Hoffren, M. 2014. Ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen metallikappaleiden sisäisten kenno- ja ristikkorakenteiden vaikutus väsymiskestävyteen. Savonia ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2014120217940>

VTT. Jokinen, A. & Riipinen, T. 2016. Tutkimusraportti, 4.2.4 Veto- ja kovuuskokeet. [Tutkimusraportti]. kirjoitettu 27.9.2016. Luettu 15.12.2017 <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03997-16.pdf>

Kesti, M. 2016. Laiteympäristön rakentaminen 3D-metallitulostimelle. Kone ja tuotantotekniikka. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2016121219960>

Koenigsegg. 2014. 3D-printing for production vehicles. [Internetsivu] 10.5.2015. Luettu 15.12.2017. <https://hackaday.com/2014/05/10/koenigsegg-3d-printing-for-production-vehicles/>

VTT. Kokkonen, P., Salonen, L., Virta, J., Hemming, B., Laukkanen, P., Savolainen, M., Komi, E., Junntila, J., Ruusuvoori, K., Varjus, S., Vaajoki, A., Kivi, S. & Welling J. 2016. Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process. [Tutkimusraportti]. kirjoitettu 6.9.2016. Luettu 15.12.2017 <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03160-16.pdf>

Myllymäki, T. 2016. 3D-tulostusjärjestelmän hankinta ja järjestelmien käyttökohdeselvitys kaupallisessa tuotannossa. Automaatioteknologia Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201604084068>

Moylan, S. Slotwinski, J., Cooke, A., Jurrens K. & Donmez M. A., National Institute of Standards and Technology 2017. Lesson Learned in Establishing the NIST Metal Additive Manufacturing Laboratory. [NIST Technical Note 1801]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.1801.pdf>

Niemi, P. 2010. Lämpökäsittely. [Opetusmateriaali]. 28.3.2010. Luettu 15.12.2017 http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_jalkikasittely_I.pdf

Renishaw. 2017. Metal Additive Manufacturing (3D printing). [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://www.renishaw.com/en/metal-additive-manufacturing-3d-printing--15240>

Raaka-ainekäsikirja, Teknologiateollisuus RY. 2006. s.47, 93-96, 308-314,

Renishaw. 2011. The additive manufacturing. [Internet]. 26.6.2011.. Luettu 15.12.2017 <http://www.renishaw.com/en/the-new-name-in-additive-manufacturing--15508>

Renishaw. 2017. How much can you recycle metal additive manufacturing powder. [Blogiteksti internet]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://www.renishaw.com/en/blog-post-how-much-can-you-recycle-metal-additive-manufacturing-powder--38882>

Realizer. 2017. Realizer history. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 http://www.realizer.com/en/?page_id=1454

Realizer. 2017. Brochures. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 http://www.realizer.com/en/?page_id=1353

Renishaw. 2017. Metal additive manufacturing (3D printing) systems. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://www.renishaw.com/en/metal-additive-manufacturing-3d-printing-systems--37011>

Renishaw. 2017. Inert atmosphere generation. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://www.renishaw.com/en/inert-atmosphere-generation--31885>

Sisma. 2017. Metal Powders. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://rocking3dmetal.com/metal-powders/>

Rowema. 2017. Puhallusrakeet. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://www.rowema.fi/tuotteet/puhallusrakeet>

SASKY. n.d. Sastamalan koulutuskuntayhtymä kehittää 3d-osaamisen keskittymää Pirkanmaalle. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.2.2017 <https://www.sasky.fi/sasky/liitetiedot/tiedotepalsta/10753.pdf?checksum=9303b3d04a7538a2e444dc7b4c03f1f6>

SASKY. 2017. 3D Boosti. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 http://www.sasky.fi/sivu.tmpl?sivu_id=9316

Sculpteo. 2017. SLM: 3D Printing Metal. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <https://www.sculpteo.com/en/glossary/selective-laser-melting-definition/>

Sisma. 2017. Laser Metal Fusion [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://www.sisma.com/eng/industry/prodotti/additive-manufacturing/>

Stratasys direct. 2017. Post-processing for DMLS parts. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 https://www.stratasysdirect.com/content/white_papers/DMLS_White_Paper_201509_v3.pdf

Stratasys. 2017. Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Secondary service for finishing & polishing. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <https://www.stratasysdirect.com/resources/direct-metal-laser-sintering-dmls/>

Stratasys. 2017. Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Secondary service for finishing & polishing. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <https://www.stratasysdirect.com/resources/direct-metal-laser-sintering-dmls/>

Stratasys. 2017. Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Secondary service for finishing & polishing. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <https://www.stratasysdirect.com/resources/direct-metal-laser-sintering-dmls/>

SLM Solutions. 2017. Company history. [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 <https://slm-solutions.com/about-slm/company-history>

SLM Solutions. 2017. Machines. [Internetsivu, tuotekatalogi]. n.d. Luettu 15.12.2017 <https://slm-solutions.com/machines>

TAMK intratiedoite. 2014. Intratiedoite 12.8.2014. TAMK viestintä. Tampere

Tredea. 2014. 3D-pirkanmaa raportti v3. [Raportti]. n.d. Luettu 15.12.2017. http://www.avointampere.fi/site/assets/files/1002/3dpirkanmaa_raportti_v3.pdf

Tredea. 2014, 3D-pirkanmaa. [Internetsivu]. n.d. Luettu 20.5.2017. http://www.avointampere.fi/site/assets/files/1002/3dpirkanmaa_raportti_v3.pdf

Tredea 2014. 3D Pirkanmaa raportti v3. [Raportti]. n.d. Luettu 15.12.2017 http://www.tredea.fi/site/assets/files/5485/3dpirkanmaa_raportti-1.pdf

Työ ja terveyslaitos. 2017. KAMAT-tietokortti, Rae- ja hiekkapuhallus. [Internetsivu, turvallisuusohje]. 5.6.2007. Luettu 15.12.2017 <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2017/02/Raejahiekkapuhallus.pdf>

Työ ja terveyslaitos. 2017. KAMAT-tietokortti, Rae- ja hiekkapuhallus. [Internetsivu, turvallisuusohje]. 5.6.2007. Luettu 15.12.2017 <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2017/02/Raejahiekkapuhallus.pdf>

Tampereen teknillinen yliopisto, Materiaaliopin laitos. 2005. Materiaalien rasiustyyppit ja niistä aiheutuvat vaatimukset. [Internet opetusmateriaali]. n.d. Luettu 15.12.2017 http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_2_1_1.php

Trumpf 2017. Additive Manufacturing [Internetsivu]. n.d. Luettu 15.12.2017 https://www.trumpf.com/en_SE/applications/additive-manufacturing/

VTT, Työsuojelurahasto & Työturvallisuuskeskus. 2017. Koulutusaineisto, jauheiden varautuminen, staattisen sähköön vaarojen tunnistaminen ja hallinta prosessiteollisuudessa. 13.6.2003. Luettu 15.12.2017

Westmoreland Mechanical Testing & Research. 2017. Powder Sieve Analysis. [Internetsivusto]. n.d. Luettu 15.12.2017 <http://www.wmtr.co.uk/ASTM-B214.HTML>

Wohlers Associates, 2017. Manufacturers and Developers of Additive Systems and Materials. Internetsivu. n.d. [Internetsivu]. Luettu 15.12.2017 <https://wohlersassociates.com/manufacturers-and-developers.html>

LIITTEET

Liite 1. 3D Boosti ja 3D Invest laitteistot

Metallit:

- SLM 125HL (SASKY, Vammalan ammattikoulu, syksy 2016)
- DED Suorakerrostus ABB IRB4600-40/2.55 (robotti), ABB IRBP A-750 (pyöritys-pöytä), Fronius CMT Advanced 4000R (CMT), Corelase 3 kW (kuitulaser), FhG IWS COAXwire (lankapää), FhG COAX8 (jauhepää), Medicoat Duo laser (jauheensyöttö) (TTY, Konetalo, talvi 2016)

Polymeerit

- Polyjet: Stratasys 350V Connex 3 (TAMK, Konesiipi, talvi 2015)
- FDM: Stratasys Fortus 250 mc (SASKY, IKATA, kevät 2016)
- SLS: Sinterit Lisa (SASKY, IKATA, kevät 2017)
- SLA:
 - FormLabs Form 2 (SASKY, IKATA, 2016)
 - FormLabs Form 2 (TTY, Konetalo, 2017)
- FFF:
 - Prenta Duo XL, (SASKY, IKATA, 2016),
 - Ultimaker (SASKY, IKATA 2016)

Keraamit:

- Lithoz Cerafab 7500 (TTY, Konetalo, talvi 2016)

Skannerit:

- Creaform HandyScan 700 (TAMK, Konesiipi, syksy 2016)
- Artec Eva (SASKY, IKATA syksy, 2016)
- Gom Atos Core 200 (SAKSY, IKATA, kevät 2016)
- Rohmer Absolute Arm 7525E ja HPL-20.7 (TTY, Konetalo, talvi 2016)

Ohjelmistot

- SLM - Magics Support Generation moduulilla, Metal Build Processor
- Stratasys 350V- Objet Studio
- Statasys Fortus – Insight
- Ultimaker - Cura
- Prenta - Simplify3D / Repetier-Host
- Sinterit – Sinterit Studio
- Form Labs - PreForm
- Lithoz – Cerafab DP, CeraFab HC

- CAD – Autodesk Inventor, Dassault Systemes Catia, Dassault Systemes SolidWorks, Vertex G4, Autodesk AutoCAD, Blender, SpaceClaim