

Pekka Mansikka-aho

Materiaalia lisäävä valmistus

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinöörityö
Päivämäärä 1.6.2014

| | |
|---|--|
| Tekijä Otsikko | Pekka Matias Mansikka-aho Materiaalia lisäävä valmistus |
| Sivumäärä Aika | 37 sivua 1.6.2014 |
| Tutkinto | Insinööri (AMK) |
| Koulutusohjelma | Kone- ja tuotantotekniikka |
| Suuntautumisvaihtoehto | Tuotantotekniikka |
| Ohjaaja | Timo Junell |
| <p>Tämän insinööriyön tarkoituksena on esitellä erilaisia materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiä ja koneita sekä kartoittaa materiaalia lisäävän valmistuksen eri sovelluskohteita. Tässä työssä käsitellään ainoastaan metallikappaleiden materiaalia lisäävää valmistusta.</p> <p>Työssä havaittiin, että materiaalia lisääviä valmistusmenetelmiä on useita, mutta metallikappaleiden valmistamiseen soveltuu nykyisin käytännössä kaksi menetelmää, jauhepetimenetelmä ja suorakerrostusmenetelmä. Jauhepetimenetelmä on kuitenkin tällä hetkellä paras menetelmä metallikappaleiden valmistamiseen.</p> <p>Työn lopputuloksiksi saatiin, että DMLS- ja EBM-tekniikkaa hyödyntävät koneet ovat parhaita vaihtoehtoja hyvälaatuisten metallikappaleiden valmistamiseen. Tällä hetkellä lääketiede ja lentokoneteollisuus ovat suurimpia aloja, jotka hyödyntävät materiaalia lisäävää valmistusta metallikappaleille.</p> <p>Työssä havaittiin myös, että materiaalia lisäävä valmistus tulee olemaan tulevaisuudessa yksi tärkeä valmistusmenetelmä perinteisten valmistusmenetelmien ohella.</p> | |
| Avainsanat | Materiaalia lisäävä valmistus, pikavalmistus, 3D-tulostus |

| | |
|--|--|
| Author Title | Pekka Matias Mansikka-aho Additive Manufacturing |
| Number of Pages Date | 37 pages 1 May 2014 |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme | Mechanical Engineering |
| Specialisation option | Production Technology |
| Instructor | Timo Junell, Principal Lecturer |
| <p>The purpose of this Bachelor's thesis is to present different additive manufacturing processes and machines and also to examine different additive manufacturing applications. This thesis only deals with additive manufacturing with metal parts.</p> <p>In this thesis it was discovered that in additive manufacturing there are many different processes but only two main processes for metal parts, i.e. powder bed fusion and direct energy deposition. Powder bed fusion is however nowadays the best process for producing metal parts.</p> <p>As a result it was discovered that DMLS and EBM machines are the best options for producing good quality metal parts. Nowadays the main fields of science that use additive manufacturing for metal parts are medicine and aerospace industry.</p> <p>In this thesis it was found out also that additive manufacturing is going to be major production method in the future.</p> | |
| Keywords | Rapid manufacturing, Additive manufacturing, Rapid prototyping |

Sisällys

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Materiaalia lisäävä valmistus | 3 |
| 2.1 | Pikamallintaminen | 3 |
| 2.2 | Pikavalmistus | 4 |
| 2.3 | Materiaalia lisäävä valmistus verrattuna koneistukseen | 6 |
| 2.3.1 | Materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyt | 7 |
| 2.3.2 | Materiaalia lisäävän valmistuksen huonot puolet | 8 |
| 2.4 | Tulevaisuuden näkymät | 9 |
| 2.5 | Materiaalia lisäävän valmistuksen markkinat | 9 |
| 3 | Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät | 11 |
| 3.1 | Menetelmien luokittelua | 11 |
| 3.2 | Jauhepetimenetelmä (PBF) | 13 |
| 3.2.1 | Selective Laser Sintering (SLS) | 14 |
| 3.2.2 | Selective Laser Melting (SLM) | 15 |
| 3.2.3 | Direct Metal Laser Sintering (DMLS) | 15 |
| 3.2.4 | Electron Beam Melting (EBM) | 16 |
| 3.3 | Suorakerrostusmenetelmä (DED) | 18 |
| 3.3.1 | Laser Based Metal Deposition (LBMD) | 20 |
| 3.3.2 | Laser Engineered Net Shaping (LENS) | 20 |
| 3.4 | Menetelmissä käytettävät laserit | 21 |
| 3.5 | Jälkikäsittely | 22 |
| 3.6 | Materiaalit | 22 |
| 4 | Materiaalia lisäävien koneiden valmistajat | 24 |
| 4.1 | 3D Systems | 24 |
| 4.2 | EOS | 24 |
| 4.3 | SLM Solutions | 25 |
| 4.4 | Phenix Systems | 25 |
| 4.5 | Arcam | 25 |
| 4.6 | Optomec | 25 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5 | Materiaalia lisäävien koneiden vertailua | 27 |
| 5.1 | Menetelmien vertailu | 27 |
| 5.2 | Tekniikoiden vertailu | 27 |
| 5.3 | Hintavertailu | 28 |
| 5.4 | Ehdotuksia hankintaan | 29 |
| 6 | Sovelluskohteet ja käyttäjät | 30 |
| 6.1 | Käyttö Suomessa | 30 |
| 6.2 | Käyttö lääketieteessä | 30 |
| 6.3 | Käyttö lentokone- ja autoteollisuudessa | 31 |
| 6.4 | Muita sovelluskohteita | 33 |
| 7 | Päätelmät | 34 |
| | Lähteet | 35 |

Lyhenteet

| | |
|-------|--|
| AM | Additive Manufacturing - Materiaalia lisäävä valmistus |
| AMF | Additive Manufacturing File Format |
| CAD | Computer Aided Design - Tietokoneavusteinen suunnittelu |
| CNC | Computer Numerical Control – Tietokoneistettu numeerinen ohjaus |
| DED | Direct Energy Deposition - Suorakerrostusmenetelmä |
| DFM | Designed For Manufacturing – Suunniteltu valmistettavuuden kannalta |
| DMD | Direct Metal Deposition |
| DMLS | Direct Metal Laser Sintering – Metallin lasersintraus |
| EBM | Electron Beam Melting - Elektronisuihkusulatus |
| FDM | Fused Deposition Modeling |
| FIRPA | Finnish Rapid Prototyping Association – Suomen pikamallinnusyhdistys |
| LENS | Laser Engineered Net Shaping |
| PBF | Powder Bed Fusion - Jauhepetimenetelmä |
| SLA | Stereolithography - Stereolitografia |
| SLM | Selective Laser Melting - Lasersulatus |
| SLS | Selective Laser Sintering - Lasersintraus |
| STL | Yleisin tiedostomuoto materiaalia lisäävässä valmistuksessa |

1 Johdanto

Tämän työn tarkoitus on esitellä ja vertailla keskenään erilaisia materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiä ja koneita sekä perehtyä materiaalia lisäävän valmistuksen eri sovelluskohteisiin. Tässä työssä käsitellään ainoastaan metallikappaleiden materiaalia lisäävää valmistusta.

Materiaalia lisäävä valmistus on tulevaisuuden valmistusmenetelmä, jossa 3D-mallista valmistetaan muovisia, metallisia tai keraamisia kappaleita eri tekniikoiden avulla. Muutamia tärkeimpiä materiaalia lisäävän valmistuksen tekniikoita, jotka soveltuvat metallikappaleiden valmistamiseen ovat muun muassa DMLS, SLS, SLM, EBM, LENS ja DMD. Nämä erilaiset tekniikat esitellään tarkemmin myöhemmissä kappaleissa. Materiaalia lisääviä valmistustekniikoita on vielä muitakin, esimerkiksi FDM ja SLA, mutta nämä tekniikat soveltuvat ainoastaan muovikappaleiden valmistamiseen. Materiaalia lisäävä valmistus saa tulevaisuudessa yhä tärkeämmän roolin valmistusmenetelmänä, kun laitteiden rakennusnopeudet kasvavat ja materiaalin hintoja saadaan laskettua.

Vuonna 1986 Charles Hull patentoi stereolitografian, joka oli ensimmäinen kaupallisesti hyödynnetty pikavalmistustekniikka, jossa nestemäistä valo kovettuvaa hartsia kovetetaan kerroksittain altaassa laseria hyödyntäen. [2; 4, s. 5.] Aikaisemmin oli myös kehitelty melkein samantapaisia tekniikoita, mutta Charles Hullin patentin katsotaan yleisesti olevan suurin vaikuttaja tekniikan kehittymiseen. Pikavalmistustekniikan kehittytyksen rajoittava tekijä oli kuitenkin tietokoneiden huono suorituskyky. Nykyään tietokoneiden nopean kehityksen myötä voidaan hyödyntää tekniikoita, jotka olivat ennen vaikeita tai lähes mahdottomia hyödyntää. [1, s. 17 - 19, 34.]

Materiaalia lisäävän valmistuksen pohjana on 3D-malli, joka tehdään 3D-mallinnusohjelmalla. Tämän jälkeen CAD-tiedostosta muokataan STL-tiedosto, jonka materiaalia lisäävä valmistuskone ymmärtää ja osaa hyödyntää. Sen jälkeen STL-tiedosto siirretään materiaalia lisäävään valmistuskoneeseen ja tehdään koneeseen tarvittavat säädöt, minkä jälkeen voidaan aloittaa rakennusprosessi. Rakennusprosessin jälkeen kappale on valmis ja se poistetaan koneesta ja sille tehdään jälkikäsitteily.

Jälkikäsittelyn jälkeen kappale on valmis käytettäväksi sovelluskohteessa. Kaikki nämä kohdat ovat samanlaisia riippumatta käytetystä tekniikasta. [1, s. 2 – 5.]

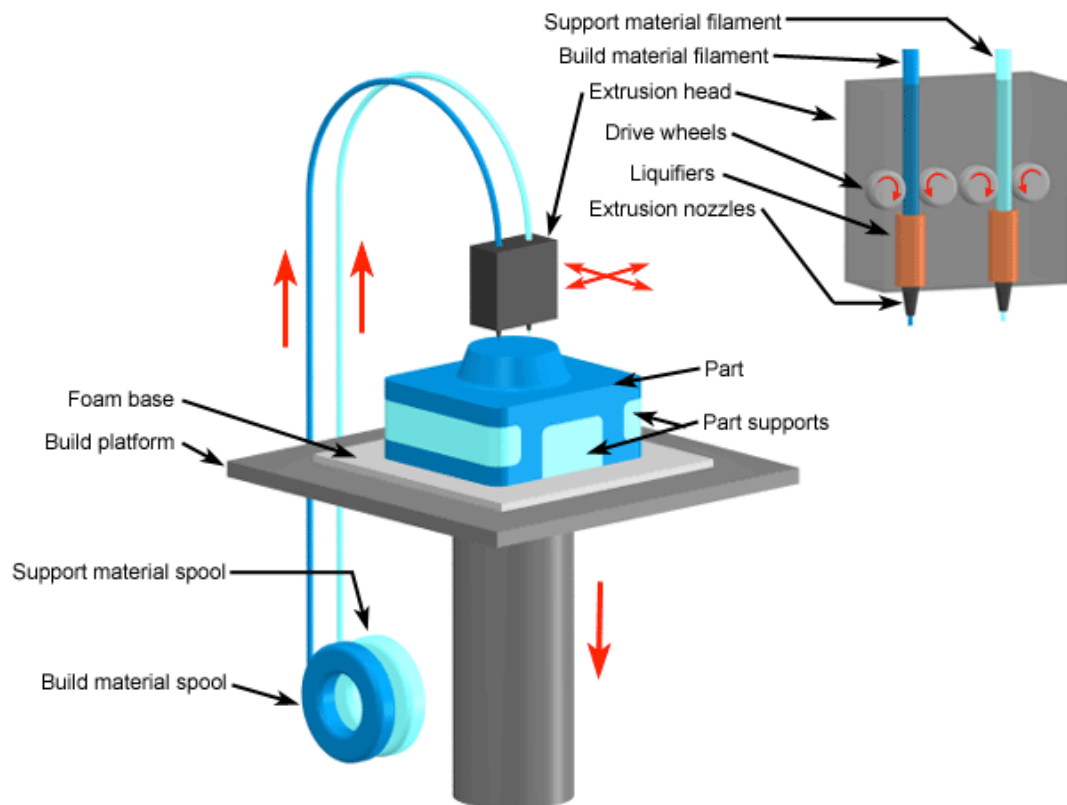
2 Materiaalia lisäävä valmistus

2.1 Pikamallintaminen

Pikamallintaminen on virtuaalisen 3D-mallin tekemistä fyysiseksi kappaleeksi materiaalia lisäävän valmistuskoneen avulla. Pikamallintamisesta on ollut suunnittelijoille suuri hyöty jo muutamia vuosia, koska suunnittelijat ovat pystyneet tarkastelemaan fyysistä kappaletta virtuaalisen 3D-mallin sijasta. Suunnitteluvaiheessa on pystytty huomaamaan, jos kappaleessa on joitakin heikkouksia, jotka eivät ole tulleet ilmi virtuaalisesta 3D-mallista. Esimerkiksi, jos tuote on ollut vääränmallinen tai sen valmistus olisi ollut vaikea toteuttaa. Näin ollen suunnittelijat ovat voineet välttää virheitä ennen kuin tuote on ehtinyt valmistusvaiheeseen. Tästä syystä suunnittelu- ja valmistuskustannuksissa on voitu säästää melko paljon rahaa ja aikaa. Pikamallintamista voidaan myös hyödyntää prototyyppien esittelyyn yleisölle tai asiakkaille, jos tuotetta ei ole vielä saatu valmiiksi, mutta asiakkaat haluaisivat nähdä jo valmiin tuotteen. [22.]

Pikamallinnustekniikoita on useita, mutta tällä hetkellä yleisimmät tekniikat ovat FDM, LOM ja SLA. Näistä tekniikoista FDM on menestynein tekniikka yksinkertaisuutensa ja laitteiden alhaisen hankintahinnan vuoksi. FDM on tekniikka, jossa muovilankaa tai -tankoa pursotetaan kerros kerrokselta lämmitetyn suuttimen läpi haluttuun kohtaan. Sulanut muovi jähmettyy nopeasti muodostaen kiinteän kappaleen. (Kuvio 1.) FDM-tekniikan kaupallisti Stratasys vuonna 1990. [1, s. 34.]

Pikamallintaminen on kovasti yleistymässä myös kuluttajakäytössä ja nykyään onkin saatavilla pikamallinnuskoneita jo alle 1 000 eurolla. [21.] Pikamallinnuskoneen voi myös itse rakentaa, esimerkiksi RepRap-koneesta on tarkat rakennusohjeet heidän internet-sivuillaan. [23.]



Kuvio 1. FDM-tekniikan toimintaperiaate [33]

2.2 Pikavalmistus

Pikavalmistus on samalla tavalla kuin pikamallintaminenkin virtuaalisen 3D-mallin tekemistä fyysiseksi kappaleeksi. Pikavalmistamisen ja pikamallintamisen ero on siinä, että pikavalmistamisessa tehdään prototyyppien sijasta valmiita kappaleita sovelluskoh-teisiin sopiviksi, esimerkiksi suoraan lentokoneen osiksi. Pikamallinnusta ja pikavalmis-tusta ei siis pidä sekoittaa toisiinsa tämän eroavaisuuden takia. Ennen menetelmästä käytettiin nimitystä pikavalmistus tai 3D-tulostus, mutta nykyään tästä menetelmästä FIRPA suosittelee käytettäväksi nimitystä materiaalia lisäävä valmistus (Additive Manu-facturing). Tässä työssä käytetään pikavalmistamisesta FIRPAN suositusten mukaisesti nimitystä materiaalia lisäävä valmistus. [13.]

Materiaalia lisäävää valmistamista on kuvailtu mullistavana teknologiana tuotteiden valmistamisessa ja kehittämisessä, koska sillä on todella monia etuja verrattuna perin-teisiin valmistusmenetelmiin. Materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä voidaan vä-

hentää valmistusprosessin vaiheita. Esimerkiksi materiaalia lisäävää valmistuskonetta käyttämällä valmistusprosessi voidaan suorittaa yhdessä vaiheessa, kun taas perinteisillä valmistusmenetelmillä voidaan joutua käyttämään useaa eri työstömenetelmää kuten esimerkiksi sorvausta, jyrsintää ja niin edelleen. Materiaalia lisäävällä valmistuksella on myös monia hyötyjä perinteisiin valmistusmenetelmiin nähden, esimerkiksi sillä voidaan tehdä todella monimutkaisia muotoja, jotka ovat vaikeita tai mahdottomia tehdä perinteisiä valmistusmenetelmiä käyttäen. Materiaalia lisäävällä valmistuksella voidaan myös vähentää kokoonpantavien osien määrää tai päästä kokoonpanosta kokonaan eroon. Tästä johtuen kappaleiden painoa saadaan pienennettyä, mikä on esimerkiksi lentokoneissa todella tärkeää. [1, s. 8 – 9.]

Tällä hetkellä materiaalia lisäävä valmistus on vielä melko harvinainen valmistusmenetelmä, koska kappaleiden rakennusnopeudet ovat melko alhaisia ja koneilla pystytään vasta valmistamaan melko pieniä kappaleita. Myös koneiden korkea hankintahinta on osasyynä materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän harvinaisuuteen. [20.]

Materiaalia lisäävää valmistusta käytetään kuitenkin jo jossain määrin lääketieteessä, lentokonetekniikassa ja taiteessa. Lääketieteen sovelluskohteita ovat erilaiset implantit, esimerkiksi polven pallonivel. Lentokoneteollisuudessa on taas alettu käyttämään materiaalia lisäävää valmistusta turbiinien valmistuksessa valamisen tai hitsaamisen sijasta, esimerkiksi General Electric on alkanut kehittämään seuraavan sukupolven energiatehokkaita suihkumoottoreita materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntäen. [28.]

Niin kuin aikaisemmin on kerrottu, tässä työssä käsitellään ainoastaan metallikappaleiden valmistamista materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä. Tärkeimpiä metallikappaleiden materiaalia lisääviä valmistustekniikoita ovat SLS, SLM, DMLS, EBM ja LENS. Neljä ensimmäistä tekniikkaa hyödyntävät jauhepetimenetelmää ja viimeinen suorakerrostusmenetelmää. [1, s. 32 – 34.] Näistä eri tekniikoista ja menetelmistä on kerrottu tarkemmin myöhemmissä kappaleissa.

Ensimmäinen kaupallinen materiaalia lisäävä valmistus kone, jolla pystyttiin valmistamaan metallia, esiteltiin vuonna 1995, mutta kone ei ollut kovin tarkka ja sillä kappaleista tuli huokoisia. [20.]

2.3 Materiaalia lisäävä valmistus verrattuna koneistukseen

Koneistus on nykyään vielä tärkein metallintyöstömenetelmä, mutta materiaalia lisäävä valmistus on tulossa sen rinnalle kovalla vauhdilla. Materiaalia lisäävä valmistus ja CNC-koneistus perustuvat molemmat tietokoneisiin. Niiden keskeisin ero on siinä, että materiaalia lisäävässä valmistuksessa, niin kuin sen nimikin kertoo, lisätään materiaalia, kun taas CNC-koneistuksessa poistetaan materiaalia. [1, s. 9.]

Materiaalia lisäävää valmistusta käyttäen kappaletta ei tarvitse enää suunnitella sen valmistettavuuden kannalta (DFM). Esimerkiksi kappaleen pieni muokkaus suunnitteluvaiheessa voi aiheuttaa sen valmistettavuuteen suuria ongelmia perinteisillä työstömenetelmillä, kun taas materiaalia lisäävässä valmistuksessa kappaleen monimutkaisuudella ei ole mitään merkitystä. Tästä johtuen mitä monimutkaisempi kappale on, sitä kannattavampaa se on valmistaa materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä. Materiaalia lisäävässä valmistuksessa työvaiheiden määrä myös usein vähentyy, koska ei tarvita enää mitään muuta valmistusmenetelmää tai suurta jälkikäsittelyä, vaan kappale on suoraan käytettävissä sen lopullisessa käyttökohteessa. [1, s. 9.]

CNC-koneella voidaan poistaa materiaalia huomattavasti nopeammin kuin materiaalia lisäävä valmistuskone voi rakentaa kappaleita, mutta jos otetaan huomioon koko valmistusprosessi alkaen suunnittelusta, materiaalia lisäävällä valmistamisella voidaan tehdä kappale paljon nopeammin, koska materiaalia lisäävä valmistusprosessi on yleensä yksivaiheinen, kun taas CNC-koneistus vaatii usein monia vaiheita, varsinkin jos tehdään geometrisesti vaikeita kappaleita. Perinteisillä työstömenetelmillä valmistetuilla kappaleilla syntyy melko paljon myös jätettä, koska työstettävän aihion täytyy olla suurempi kuin valmistettavan kappaleen, jolloin suuri osa materiaalista menee hukkaan. Hukkaan mennyt materiaali on kuitenkin suurilta osin kierrätettävissä, mutta se vaatii paljon ylimääräistä energiaa, koska metalli täytyy sulattaa, että se voidaan hyödyntää uudelleen käyttöön. Materiaalia lisäävällä valmistuksella syntyvä jäte on vähäistä tai sitä ei synny ollenkaan, koska ylimääräinen materiaali voidaan hyödyntää kokonaan tai suurimmaksi osaksi heti uusiokäyttöön. [1, s. 116.]

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa metallijauheet, joita käytetään kappaleiden valmistamiseen, vievät tuotteen hinnasta vain noin 5 %, kun loput kustannukset tulevat melkein kokonaan koneen pääomakustannuksista [15.].

CNC-koneen hyvistä puolista voidaan vielä mainita se, että kappaleet ovat täysin kiinteitä ja tasalaatuisia, kuten työstettävä aihio on. Materiaalia lisäävässä valmistuksessa kappaleiden tasalaatuisuutta on vaikea ennustaa, koska materiaalit muuttavat tässä valmistusmenetelmässä muotoaan, jolloin mikrorakenne voi muuttua. Helppojen kappaleiden ja suurien valmistuserien valmistaminen on myös melko nopeaa CNC-koneella verrattuna materiaalia lisäävään valmistamiseen. [1, s. 10.]

CNC-koneen hinta verrattuna materiaalia lisäävään valmistuskoneeseen on moninkertaisesti pienempi. Esimerkiksi 5-akselisen Kolibri-merkkisen CNC-työstökoneen, jossa on hieman suurempi työstöala kuin EOSINT M270 -koneen rakennuskammio, saa 50 000 - 100 000 euron hintaan varustetasosta riippuen. EOSINT M270 -kone taas maksaa noin 500 000 euroa (ks. taulukko 5.). Materiaalia lisäävän valmistamisen koneiden hinnalla ei kuitenkaan ole suurta merkitystä, koska niillä voidaan luoda kappaleille parempia ominaisuuksia ja säästää huomattavia määriä energiaa. [19; 15.]

2.3.1 Materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyt

Materiaalia lisäävällä valmistuksella on melko monia hyötyjä verrattuna perinteisiin materiaalintyöstömenetelmiin. Tässä muutamia tärkeimpiä hyötyjä: kappaleiden vaikeiden muotojen valmistus, massakustomointi, kappaleiden varastoinnin tarpeen väheneminen, kappaleiden optimoiminen, esimerkiksi painon vähentäminen ja työvaiheiden väheneminen. Materiaalia lisäävässä valmistuksessa ei tarvitse suunnitella kappaleita kokoonpantavuuden kannalta (DFM), vaan voidaan suunnitella esimerkiksi tuotteen osa juuri siihen tarpeeseen, mikä on järkevää eli optimoida kappale käyttötarkoitukseen sopivaksi. Tästä suunnittelutavasta onkin alettu käyttämään nimitystä DFAM, mikä tarkoittaa Design For Additive Manufacturing. [1, s. 53, 287.]

Materiaalia lisäävää valmistusta käytettäessä varastojen merkitys vähenee melkoisesti, koska ei tarvitse varastoida niin paljoa osia, vaan voidaan aina valmistaa nopeasti uusi osa, kun sitä tarvitaan. Varastoinnin vähentäminen on järkevää, koska varastoihin sitoutuu yleensä huomattava määrä rahaa ja varastointi on kallista. [5, s. 202.]

Materiaalia lisäävällä valmistuksella voidaan myös tehdä todella monimutkaisia muotoja, mitkä ovat mahdottomia tehdä perinteisillä työstömenetelmillä. Esimerkkinä voidaan ottaa vaikka kappaleen sisäiset onkalot, jotka on mahdotonta tehdä vaikkapa jyrsimellä. [1, s. 53.]

Boeing on alkanut valmistamaan F/A-18-hävittäjään osia hyödyntämällä materiaalia lisäävää valmistusta. Näin yritys on saanut sen lentokoneista painoa paljon pois. Lentokoneteollisuudessa on myös tärkeää, että varaosia on nopeasti saatavilla, jos jokin osa menee hajalle, koska lentokoneen pitäminen maassa lentokyvottomänä on todella kallista. Tästä johtuen lentokoneteollisuudella joutuu usein olemaan isot varastot melkein pä kaikkia lentokoneenosia. Varastointi ongelmasta voidaan päästä eroon tai ainakin pienentää sitä, koska STL-tiedostot, jotka sisältävät osan valmistustiedot voidaan säilyttää tietokoneella ja tarpeen vaatiessa osa voidaan valmistaa nopeasti ja se saadaan heti käyttöön. Tämä sama periaate sopii toki kaikkiin muihinkin teollisuudenaloihin. [1, s. 286 – 287; 5, s. 204.]

Materiaalia lisäävää valmistusta ei kuitenkaan ole järkevää käyttää vielä kaikille kappaleille varsinkaan kappaleille, joissa on helppo geometria, koska todelliset hyödyt saavutetaan vasta monimutkaisissa kappaleissa. [1, s. 10 - 11.]

2.3.2 Materiaalia lisäävän valmistuksen huonot puolet

Materiaalia lisäävällä valmistuksella on myös muutamia huonoja puolia, jotka rajoittavat laitteiden yleistymistä. Ensimmäiseksi voidaan mainita laitteiden suuri hankintahinta, joka on tällä hetkellä 500 000 eurosta yli 1 000 000 euroon. Useimmilla koneilla, joilla pystytään valmistamaan hyvälaatuisia kappaleita, ei ole vielä tällä hetkellä mahdollista valmistaa kovin suuria kappaleita, millä on yksi tärkeimmistä rajoittavista tekijöistä. Joitakin menetelmiä käyttämällä voidaan joutua käyttämään vielä jonkinlaista pinnankäsittelyä. [20.]

Huonoja puolia on myös se että, koneet vaativat lähes laboratoriomaiset tilat, koska kappaleisiin ei saa joutua mitään likaa tai ne voivat mennä pilalle. Koneet täytyy myös sijoittaa tilaan, jossa ei ole minkäänlaista tärinää. Tärinä voi heikentää merkittävästi kappaleiden tarkkuutta, koska laserit ovat herkkiä tärinälle. Henkilöstön täytyy olla

myös hyvin koulutettu, koska materiaalia lisäävä valmistus on ainakin vielä tällä hetkellä melko vaativa menetelmä ja koneiden käyttö vaatii paljon osaamista. Materiaalia lisäävällä valmistuksella on myös vaikea tehdä toleroituja reikiä, koska reiän muoto ei välttämättä pysy kovin hyvin oikean muotoisena. [1, s. 8 - 12.]

2.4 Tulevaisuuden näkymät

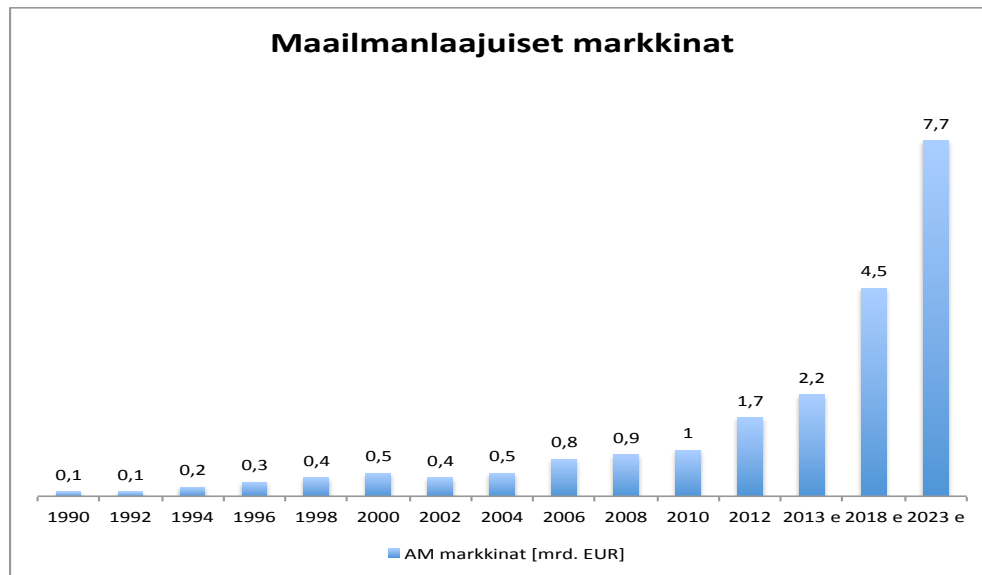
Tulevaisuudessa materiaalia lisäävä valmistus saavuttaa yhä tärkeämmän roolin valmistusmenetelmänä, kun menetelmiä saadaan kehitettyä ja koneiden rakennusnopeudet kasvavat. Materiaalia lisäävä valmistus voi jopa syrjäyttää perinteiset kappaleiden valmistusmenetelmät, koska materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyt tulevat olemaan yhä suurempia, kun menetelmiä opitaan hyödyntämään paremmin. Maailmalla ollaan kehittämässä sovelluskohteita materiaalia lisäävälle valmistusmenetelmälle ja monet maat ovat rahoittaneet näitä tutkimuksia. [15.]

Auto- ja lentokoneteollisuus ovat todella kiinnostuneita materiaalia lisäävistä valmistusmenetelmistä, koska painon keventäminen on molemmilla aloilla todella tärkeää energiatehokkuuden parantamiseksi. Näillä aloilla tullaan näkemään edistysaskelia materiaalia lisäävissä valmistusmenetelmissä, koska molemmat alat sijoittavat paljon rahaa kehitys- ja tutkimustyöhön. [6.]

2.5 Materiaalia lisäävän valmistuksen markkinat

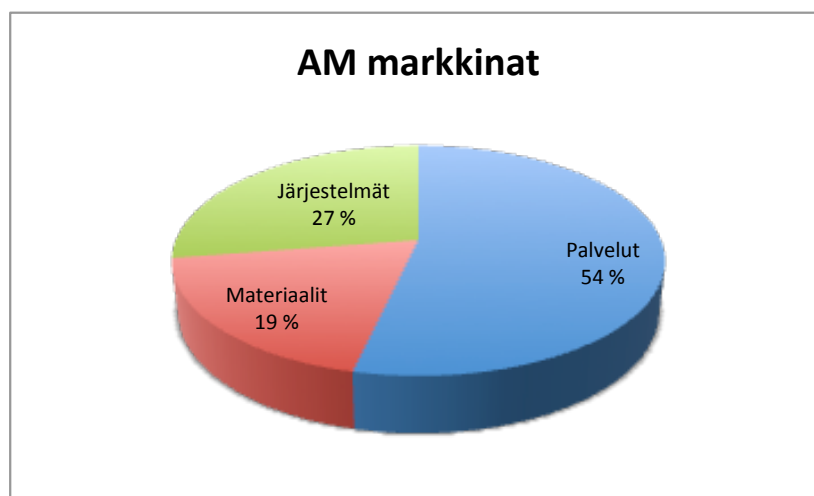
Materiaalia lisäävän valmistuksen markkinat ovat kehittyneet vähitellen jo kahdenkymmenen vuoden ajan. Wohlers associates ennustaa, että markkinat jatkavat nousua ja vuonna 2023 markkinat olisivat 7,7 miljardin euron arvoiset. Wohlers associate on konsultointi yritys, joka antaa teknistä ja strategista konsultointia materiaalia lisäävän valmistuksen kehityksestä ja suunnasta [37.]. Vuonna 2012 materiaalia lisäävän valmistuksen markkinat olivat 1,7 miljardia euroa, kun koko metallintyöstö markkinat olivat 66,3 miljardia euroa. (Kuvio 2.) Tällä hetkellä metallikappaleiden materiaalia lisäävä valmistus on vain noin 10 % koko markkinaosuudesta. Vuonna 2010 materiaalia lisäävän valmistuksen markkinat ylittivät miljardin euron rajan. [20.] Vaikka materiaalia lisäävä valmistus tulee kehittymään jatkuvasti ja saamaan suuremman markkinaosu-

den niin ennusteet ovat todella positiivisia ja ne tuskin toteutuvat täysin ottaen huomioon nykyisen taloustilanteen.



Kuvio 2. Materiaalia lisäävän valmistuksen kehittyminen. e tarkoittaa ennustusta. Taulukko on vuodelta 2012 [20]

Vuonna 2012 materiaalia lisäävän valmistuksen markkinat jakautuivat siten, että palvelut olivat 54 % koko 1,7 mrd. euron markkinaosuudesta. Järjestelmien osuus oli 27 % ja loput 19 % oli materiaalien osuus (Kuvio 3.).



Kuvio 3. Materiaalia lisäävän valmistuksen markkinaosuudet

3 Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät







3.1 Menetelmien luokittelua

Materiaalia lisäävä valmistus voidaan jakaa yleisesti kahdeksaan eri vaiheeseen: 3D-mallin luomiseen, tiedoston kääntämiseen STL-tiedostoksi, tiedoston lähettämiseen valmistuskoneelle, prosessiparametrien määrittelemiseen, kappaleen valmistamiseen kerroksittain, kappaleen poistamiseen valmistuslaitteesta, viimeistelyyn ja käyttöönottoon. Nämä kaikki kahdeksan vaihetta ovat samanlaisia käytetystä menetelmästä riippumatta. Materiaalia lisääviä valmistusmenetelmiä on useita, mutta eri menetelmien tärkeimmät erot ovat miten kerrokset ovat valmistettu (laser, pursotus), mitä materiaalia menetelmällä voidaan käyttää (metalli, muovi, komposiitti) ja miten kerrokset ovat liitetty toisiinsa (sulatus, liimaus). [1, s. 2, 42 - 47.]

Kaksi tärkeintä valmistusmenetelmää, jotka sopivat metallikappaleille ovat jauhepetimenetelmä ja suorakerrostusmenetelmä (Taulukko 1). Menetelmien tärkeimmät erot ovat, että suorakerrostusmenetelmässä suihkutetaan metallijauhetta tai syötetään metallitankoa ja sulatetaan se laserin avulla, kun taas jauhepetimenetelmässä kappale valmistetaan rakennuskammiossa, jossa metallijauhetta tuodaan levittimellä valmistuspöydälle ja sulatetaan metallijauhe laserilla. Molemmissa menetelmissä on omat hyvät ja huonot puolensa, joista on kerrottu lisää tulevissa kappaleissa. Jauhepetimenetelmä on kuitenkin paljon yleisempi ja se sopii paremmin metallikappaleiden valmistamiseen kuin suorakerrostusmenetelmä ja tulee todennäköisesti olemaan yleisimmin käytetty menetelmä. [1, s. 103, 237.]

Taulukossa 1 on esitelty eri menetelmien soveltuvuus metallikappaleiden valmistamiseen. Taulukosta voidaan siis nähdä, että jauhepetimenetelmä sopii kaikista parhaiten metallikappaleiden valmistamiseen. Suorakerrostusmenetelmä soveltuu myös melko hyvin metallikappaleiden valmistamiseen. Näiden menetelmien soveltuvuuden takia tässä työssä on käsitelty näitä kahta erilaista menetelmää tarkemmin.

Taulukko 1. Menetelmien soveltuvuus metallikappaleiden valmistamiseen

| Menetelmä | Materiaalit | Tyypillinen käyttökohde | Soveltuvuus metalleille |
|--|------------------------------------|--|---|
| Jauhepetimenetelmä (Powder bed fusion) | Metallit, polymeerit | Prototyypit, valmiit kappaleet |  |
| Suorakerrostus (Directed energy deposition) | Metallit | Valmiit kappaleet, korjaus |  |
| Laminointi (Sheet lamination) | Metallit, paperi | Prototyypit, valmiit kappaleet |  |
| Sideaineruiskutus (Binder jetting) | Metallit, polymeerit, valimohiekka | Prototyypit, valmiit kappaleet, valumuotit |  |
| Materiaalisuihkutus (Material jetting) | Polymeerit, vahat | Prototyypit, valumallit |  |
| Materiaalin pursotus (Material extrusion) | Polymeerit | Prototyypit |  |
| Nesteen polymerisointi (Vat photopolymerization) | Valopolymeerit | Prototyypit |  |

Suurin osa materiaalia lisäävää valmistusta käyttävistä koneista käyttää STL-tiedostomuotoa, joka pilkkoo kolmiulotteisen kappaleen pieniksi kolmioiksi. AMF-tiedostomuoto on kuitenkin nousemassa sen haastajaksi älykkäämmän geometriansa ansiosta. [15] STL-tiedostomuodon uskotaan kuitenkin olevan vielä pitkään käytössä. [1, s. 44.]

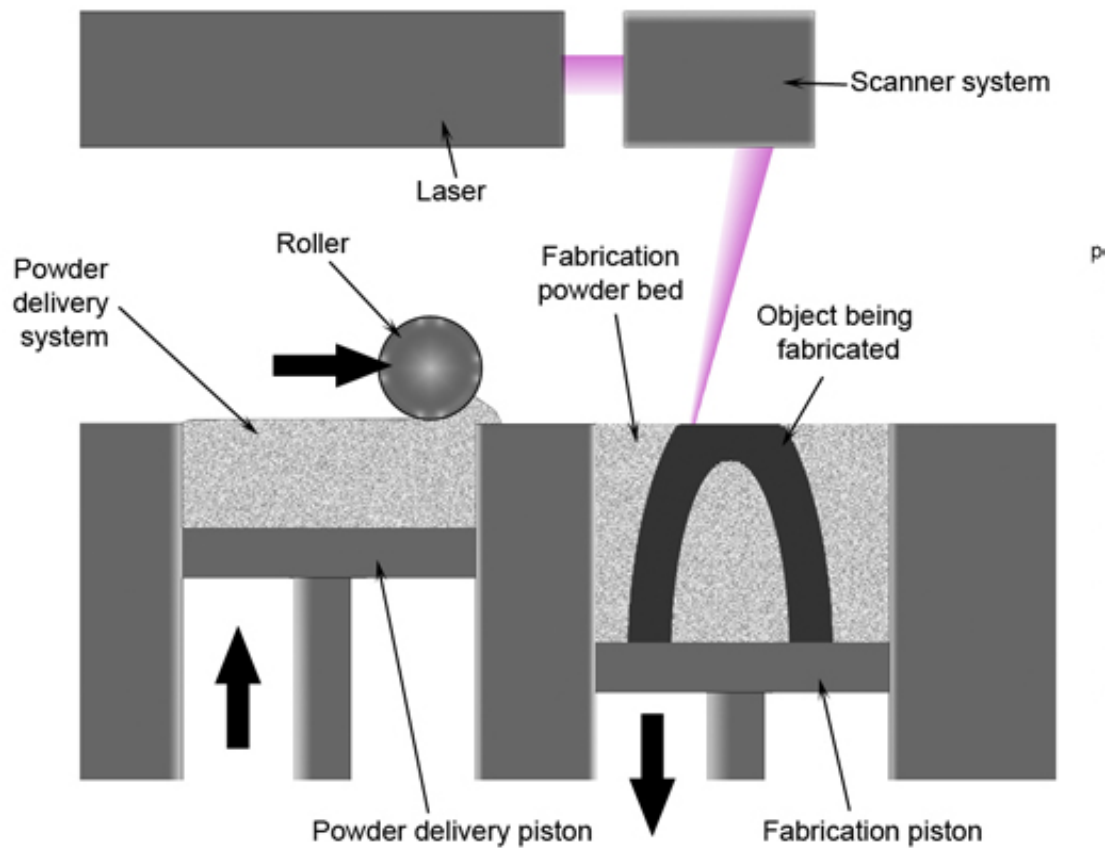
Melkein kaikki koneista hyödyntävät laseria metallijauheen sulattamiseen, mutta on myös muutamia tekniikoita, joissa käytetään elektronisuihkua jauheen sulattamiseen. Laseria hyödyntävät koneet maksavat paljon, koska yksin laserit ovat kalliita ja niiden käyttöikä on melko lyhyt (noin 4 000 h). Uudet kuitulaserit tosin kestävät paljon pitempään ja niiden ansiosta koneiden hintoja on saatu laskettua alaspäin ja koneiden tarkkuutta parannettua. [1, s. 52.]

Vaikka käytettäisiin samoja materiaaleja materiaalia lisäävässä valmistuksessa kuin perinteisissä työstömenetelmissä, kappaleen sisälle voi jäädä pieniä kuplia, jotka voivat aiheuttaa kappaleelle huonompia lujuusominaisuuksia. Koneet ja laitteet kuitenkin kehittyvät nopeaa vauhtia, joten jo nykyään kappaleiden lujuudet vastaavat taottuja materiaaleja tarkempien lasereiden ja pienempien kerrospaksuuksien ansiosta. [1, s. 47.]

3.2 Jauhepetimenetelmä (PBF)

Jauhepetitekniikka oli yksi ensimmäisistä kaupallisista materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmistä, jolla pystyttiin valmistamaan metallikappaleita. Menetelmässä jauhetta sulatetaan laserilla valmistuskammioon hyvin ohuina kerroksina, noin 0,05 mm riippuen halutusta tarkkuudesta ja valmistusnopeudesta. Jauhemateriaali voi olla metallia, keraamia, polymeeriä tai komposiittia. Jauhepetimenetelmässä, niin kuin kaikissa muissakin materiaalia lisäävissä valmistusmenetelmissä, materiaalia lisäävä valmistuskone muuttaa kolmiulotteisen mallin poikkileikatuiksi tasoiksi ja valmistaa kappaleen tasoista, jotka sulatetaan lämmönlähteen avulla, yleensä laserilla tai elektronisuihkulla. Pöydälle tuodaan lisää jauhemateriaalia aina kun yksi kerros on valmis. Jauhe levitetään telan avulla rakennuspöydälle tasaiseksi kerrokseksi, minkä jälkeen laser tai elektronisuihku sulattaa seuraavan kerroksen. Tätä prosessia toistetaan niin kauan, että kappale on valmis (Kuvio 4). Kun kappaleen rakennusprosessi on valmis, annetaan sen jäähtyä rakennuskammiossa, koska kappale kuumenee paljon rakennusvaiheessa ja se voi halkeilla tai kutistua liikaa, jäähtyessään liian nopeasti. Kun kappale on jäähtynyt tarpeeksi paljon otetaan se pois rakennuskammioista ja puhdistetaan ylimääräisestä jauheesta. [1, s. 103 - 105.]

Jauhepetimenetelmässä ei tarvita erillisiä tukirakenteita rakennusvaiheessa, koska ylimääräinen jauhe muodostaa tukirakenteen valmistettavan kappaleen ympärille. Tekniikassa, jossa käytetään laseria kappaleen rakennusnopeus riippuu siitä, miten nopeaa lasersäde saadaan kohdistettua oikeaan kohtaan ja kuinka suuri laserin teho on. Valmistusnopeudet käyttäen jauhepetimenetelmää ovat noin 10 - 100 cm^3 / h . [8] Tärkeimmät eroavaisuudet jauhepetimenetelmää hyödyntävien tekniikoiden välillä ovat lähinnä jauheen sulatus- tai sintraustekniikassa ja siinä mitä, materiaaleja tekniikalla voidaan valmistaa. [1, s. 48, 103.]



Kuvio 4. Jauhepetimenetelmän toimintaperiaate [32]

3.2.1 Selective Laser Sintering (SLS)

Aluksi SLS-tekniikka kehitettiin valmistamaan muovisia prototyyppijä, mutta sittemmin tekniikkaa on alettu käyttämään metallikappaleiden valmistamiseen. SLS-tekniikassa hyödynnetään jauhepetimenetelmää. SLS-tekniikassa laserilla kohdistetaan energiaa jauheeseen, minkä johdosta jauhepartikkelit sintraantuvat toisiinsa. SLS-tekniikalla voidaan, kappaleet sopivasti työtilaan asetellen, valmistaa kokoonpantuja ja liikkuvia toimivia kokonaisuuksia. (Kaikonen ym. 1999, 6) Laserina tekniikassa käytetään yleensä korkeatehoista laseria. Tavallinen kerrospaksuus SLS-tekniikassa on noin 0,05 mm – 0,1 mm. Mitä suurempi kerroksen paksuus on, sitä epätarkempi kappale on, mutta se on nopeampi valmistaa. [1, s. 103, 123.]

SLS-tekniikassa voidaan hyödyntää yli jäänyt metallijauhe uudelleen käyttöön, mutta kappaleita, jotka on valmistettu kierrätetystä metallijauheesta, täytyy tarkkailla, koska

metallijauheen ominaisuudet voivat muuttua merkittävästi, jolloin kappaleisiin voi tulla heikkolaatuisia kohtia. SLS-tekniikassa käytetään suljettua valmistuskammiota, joka on yleensä täytetty typellä tai argonilla, tämä metallijauheen hapettumisen estämiseksi. SLS-tekniikassa kappaleen huokoisuutta pystytään hallitsemaan toisin kuin SLM-tekniikassa, joka on esitelty seuraavassa kappaleessa, koska SLS-tekniikassa ei täysin sulateta metallijauhetta vaan se sintrataan. [17] SLS-tekniikassa käytetään yleensä jauheen esilämmitystä, jolloin pienempi laserenergia riittää, että metallijauhepartikkelit sintraantuvat toisiinsa kiinni. Sintraus tarkoittaa sitä, että metallipartikkeleita ei sulateta, vaan ne kylmähitsaantuvat toisiinsa diffuusion vaikutuksesta. [1, s. 49, 104.]

3.2.2 Selective Laser Melting (SLM)

SLM-tekniikka kehitettiin 90-luvun puolivälissä Saksassa. SLM on yksi jauhepetimene- telmää hyödyntävä tekniikka, joka on melkein samanlainen, kuin SLS-tekniikka. Ainoa ero näiden kahden tekniikan välillä on se, että SLM-tekniikassa metallijauhe sulatetaan täysin rakennuspöydälle, kun taas SLS-tekniikassa jauhetta ei täysin sulateta, vaan jauhepartikkelit sintraantuvat toisiinsa. Niin kuin SLS-tekniikassa, SLM-tekniikassa käytetään suojakaasuna rakennuskammiossa yleisimmin typpeä tai argonia. [16.]

SLM-tekniikalla saadaan valmistettua täysin kiinteitä ja kestäviä kappaleita, toisin kuin SLS-tekniikalla. [16] SLM-tekniikkaa käyttämällä ei voida käyttää ylijäänyttä metallijauhetta, koska lämpövaikutus ympäröivään metallijauheeseen on paljon suurempi kuin SLS-tekniikassa. SLM-tekniikkaa käytetään yleensä, jos halutaan saada vielä parempilaatuisia kappaleita, kuin SLS-tekniikalla. SLM-tekniikassa voidaan käyttää metalliseoksia tai homogeenisiä materiaaleja. [1, s. 113.]

3.2.3 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

DMLS ja SLS ovat hyvin samanlaisia tekniikoita, kumpikin on lasersintraustekniikka, mutta DMLS tarkoittaa, että se on ainoastaan tarkoitettu valmistamaan metallikappaleita, kun taas SLS-tekniikalla voidaan valmistaa myös muovisia kappaleita. DMLS on kehitetty SLS:n pohjalta ja se on päivitetty vastaamaan paremmin metallikappaleiden valmistusta muun muassa lasereita päivittämällä. Suurin haaste DMLS-tekniikassa on sen varsin hidas rakennusnopeus. EOS on suurin DMLS-tekniikkaa hyödyntävien konei-

den valmistaja ja se on myös kaupallistanut kyseisen tekniikan (Kuvio 5.). DMLS-tekniikkaa käytetään yleensä metalliseoksille ja se onkin tällä hetkellä laajimmin käytetty tekniikka erilaisille metalleille ja metalliseoksille. Yleisimpiä metalliseoksia ovat titaan, ruostumaton teräs ja kobolttikromi. [17.]



Kuvio 5. EOSINT M 270 kone [34]

3.2.4 Electron Beam Melting (EBM)

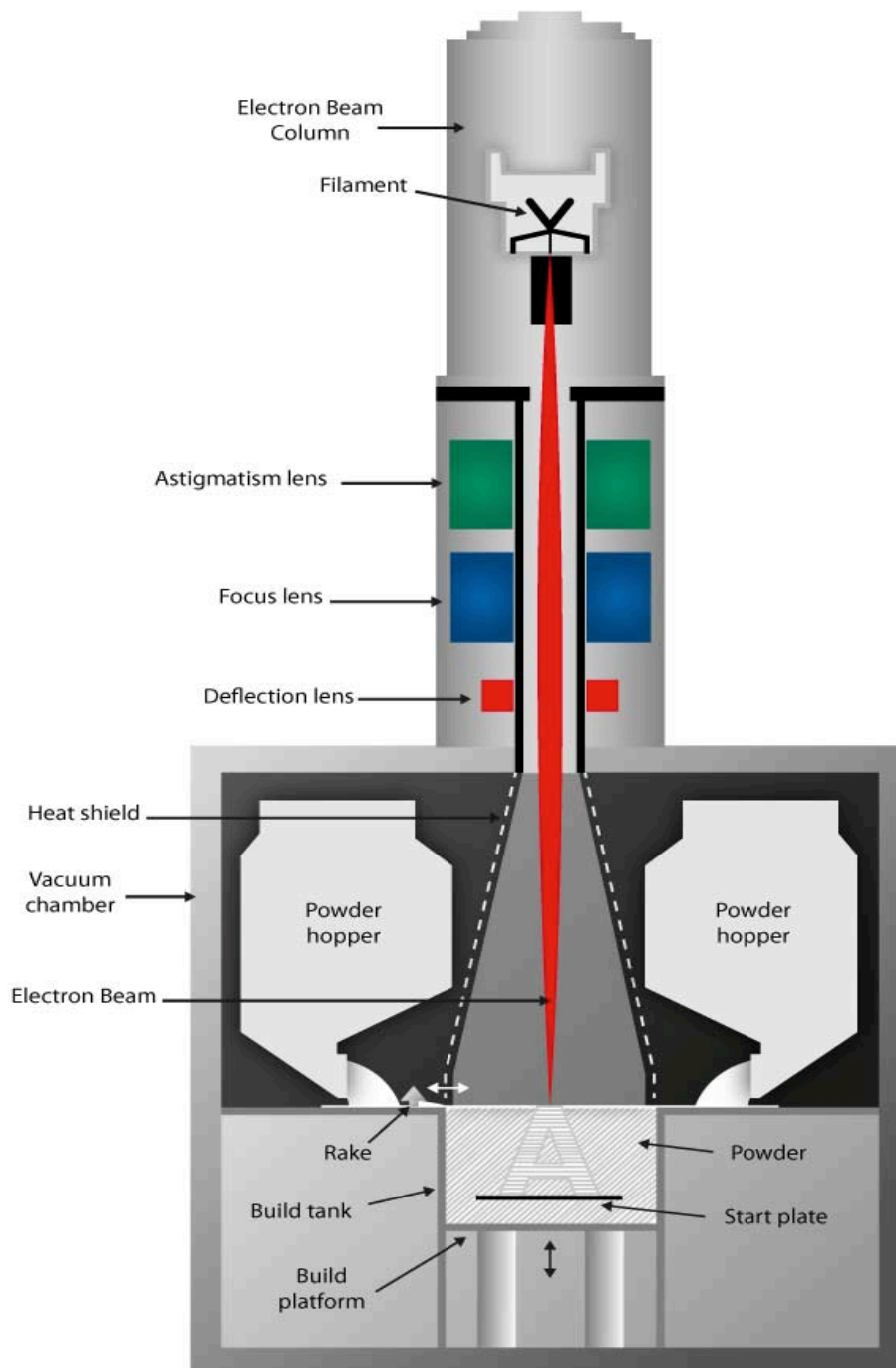
EBM on jauhepetimenetelmää hyödyntävä tekniikka, jonka kaupallisti Arcam AB. EBM- ja SLM-tekniikka ovat suurilta osin samanlaisia toimintaperiaatteiltaan. Taulukossa 2 on vertailtu EBM- ja SLM-tekniikoiden eroja. Suurin eroavaisuus SLM-tekniikkaan on se, että EBM:ssä käytetään elektronisuihkua lasereiden sijasta metallijauheen sulatukseen. Elektronisuihkua käytetään lasereiden sijasta, koska näin saadaan suurempi teho kohdistettua metallijauheeseen. Elektronisuihkulla saadaan myös sulatettua useampi kohta yhtäaikaaisesti, kun taas laserilla saadaan sulatettua vain yhtä kohtaa kerrallaan. Näin ollen EBM-tekniikassa rakennusnopeudet ovat jonkin verran suurempia. Elektronisuih-

kua ei tarvitse kohdistaa mekaanisesti peileillä niin kuin laseria. Tästä johtuen elektroni säde voidaan kohdistaa haluttuun kohtaan melkein valonnopeudella. Taulukossa 2 on esitetty EBM-tekniikan toimintaperiaate. [1, s. 126 - 128.]

EBM-tekniikalla saadaan valmistettua täysin kiinteitä ja erittäin kestäviä kappaleita. EBM-tekniikan hyötyjä ovat laser-tekniikoihin verrattuna esimerkiksi se, että elektronisäteen muodostaminen maksaa vähemmän, kuin yhtä tehokkaan laser-säteen muodostaminen. Suurin heikkous EBM-tekniikassa on se, että pinnanlaatu on huonompi kuin esimerkiksi SLM-tekniikkaa käytettäessä. Kappaleet rakennetaan EBM-tekniikassa tyhjiökammiossa toisin kuin monessa muussa tekniikassa. EBM-tekniikassa jauheen täytyy olla sähköjohtava eli toisin sanoen jauheen täytyy olla metallia. [1, s. 128.] EBM-tekniikan kehittyessä siitä voi tulla varteenotettava haastaja SLM-tekniikalle.

Taulukko 2. EBM ja SLM tekniikoiden erot [1, s. 127. Mukailtu taulukkoa 5.1]

| Tekniikka | Electron beam melting (EBM) | Selective laser melting (SLM) |
|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Lämmön lähde | Elektronisäde | Laser |
| Ilmakehä | Tyhjiö | Suojakaasu |
| Skannaus | Poikkeutuskelat | Galvanometri |
| Energian absorponti | Sähköjohtavuus rajoitteinen | Absorptiivisuus rajoitteinen |
| Jauheen esilämmitys | Elektronisäde | Infrapunalämmitin |
| Skannausnopeus | Todella nopea, magneettisesti ohjattu | Rajoitettu galvanometrin inertiasta |
| Energian kustannukset | Kohtalainen | Korkea |
| Pinnanlaatu | Kohtalaisesta huonoon | Erinomaisesta kohtalaiseen |
| Resoluutio | Kohtalainen | Erinomainen |
| Materiaalit | Metallit (sähköä johtavat) | Polymeerit, metallit ja keraamit |



Kuvio 6. EBM-tekniikan toimintaperiaate [30]

3.3 Suorakerrostusmenetelmä (DED)

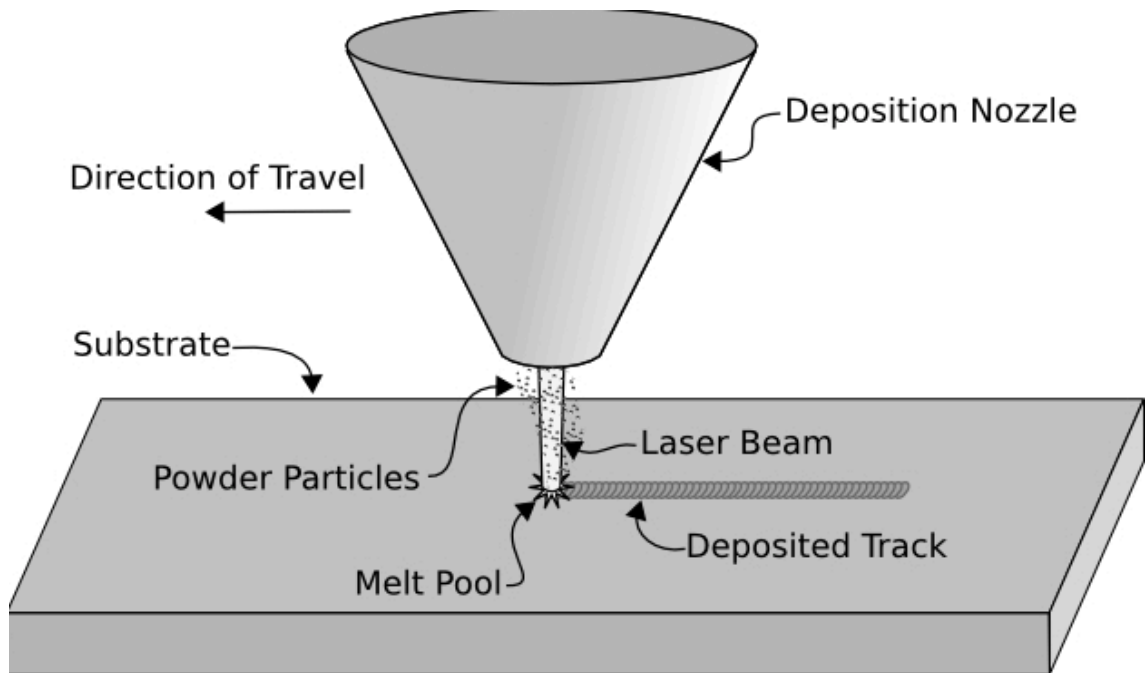
Suorakerrostus on materiaalia lisäävä valmistus menetelmä, jossa kappale muodostetaan sulattamalla ja suihkuttamalla tai syöttämällä materiaalia haluttuun kohtaan. Suorakerrostusmenetelmässä on erilaisia tekniikoita, esimerkiksi LENS-tekniikka on varsin yleinen nykyisin. Erilaisten tekniikoiden erot ovat lähinnä materiaalin syötössä (dynaaminen jauheen syöttö, dynaaminen langan syöttö), suojakaasussa ja lasereissa. Jauhemaisten metallin suihkuttaminen on kuitenkin yleisin materiaalin syöttötapa suoraker-

rostusmenetelmässä. Useimmissa kaupallisissa suorakerrostusmenetelmää hyödyntävissä tekniikoissa metallijauhe sulatetaan täysin rakennuskammioon. Suorakerrostusmenetelmä on suunniteltu valmistamaan ainoastaan kappaleita metallista. [1, s. 239, 248.]

Suorakerrostuksen toimintaperiaate on lähes sama kuin hitsausrobotilla. Ero hitsausrobottiin on se, että hitsausrobotilla liitetään yleensä kappaleita toisiinsa kun, taas suorakerrostusmenetelmässä lisätään materiaalia haluttuun kohtaan ja sulatetaan se laserilla, elektronisuihkulla tai plasmakaarella kerros kerrokselta ja näin saadaan käyttövalmis kappale. (Kuvio 6.) Suorakerrostusmenetelmä on paljon epätarkempi kuin jauhepetimenetelmä, koska suorakerrostusmenetelmässä kerrospaksuudet ovat suuruusluokkaa 0,25 – 0,5 mm. kun taas jauhepetimenetelmissä kerrospaksuudet ovat 0,02 – 0,05 mm luokkaa. Suorakerrostusmenetelmässä jauheen raekoko on yleensä 0,02 – 0,15 mm. Suorakerrostusmenetelmää hyödyntämällä rakennusnopeudet ovat todella alhaisia (25 – 40 g/h), jos halutaan valmistaa korkealaatuisia kappaleita, koska parempaan laatuun tarvitaan pieni sädekoko ja pieni jauheen suihkutusnopeus. [1, s. 239, 256.]

Suorakerrostusmenetelmässä kappaleet valmistetaan kammiossa, joka on täytetty suo- jakaasulla, yleensä argon- tai typpikaasulla. Suurin heikkous suorakerrostusmenetelmässä on huono pinnanlaatu, joka johtuu melko suuresta kerrospaksuudesta. Tästä johtuen menetelmää käytetään yleensä arvokkaiden kappaleiden korjaamiseen, kuten esimerkiksi turbiinin lapojen. Toinen heikkous on, että suorakerrostusmenetelmällä ei pystytä valmistamaan niin monimutkaisia kappaleita kuin jauhepetimenetelmällä. Tämä johtuu siitä, että monimutkaisille kappaleille tarvitaan kannatinrakenteita ja metallijauheen suihkutus ei välttämättä onnistu jokaisesta suunnasta suihkutussuuttimen esteettömän pääsyn takia. [1, s. 256 - 258.]

Hyviä puolia suorakerrostusmenetelmässä ovat muun muassa kappaleiden suuri tiheys. Suorakerrostusta voidaan käyttää lisäämään esimerkiksi valettujen kappaleiden käyttöikää lisäämällä kulutusta kestäviä metalliseoksia sellaisiin paikkoihin, mitkä kuluvat paljon. Suorakerrostusmenetelmässä kappaleiden mikrorakenne on samanlainen kuin jauhepetimenetelmässä. [1, s. 256 - 258.]



Kuvio 7. Suorakerrostusmenetelmän toimintaperiaate [31]

3.3.1 Laser Based Metal Deposition (LBMD)

Yleisin suorakerrostusmenetelmää hyödyntävä tekniikka on LBMD. LBMD-tekniikassa metallijauhetta suihkutetaan suuttimen läpi ja sulatetaan laserilla niin kuin kaikissa suorakerrostusmenetelmissä. LBMD-tekniikassa laserin täytyy olla tarpeeksi tehokas, että pystyttäisiin luomaan hitsisula. LBMD-tekniikassa kaikki suihkutettu jauhe ei sula, koska laser ei pysty sulattamaan kaikkea suihkutettua metallijauhetta, joten ylimääräinen metallijauhe täytyy ottaa talteen, jos sitä halutaan käyttää jatkossa. LBMD-tekniikassa luodaan laserilla hitsisula tyypillisesti noin 0,25 - 1 mm halkaisijaltaan ja 0,1 - 0,5 mm syvyydeltään. Jauhe suihkutetaan hitsisulaan, jolloin jauhe sulaa alustaan ja kovettuu, kun lasersäde siirretään pois kohdasta. Kerrokset muodostetaan limittäisistä kerroksista, jotka ovat limittäin noin 25 %. Tyypillinen kerrostenpaksuus on noin 0,25 - 0,5 mm. [1, s. 239 - 240.]

3.3.2 Laser Engineered Net Shaping (LENS)

Yksi ensimmäisistä suorakerrostusmenetelmää hyödyntävistä tekniikoista oli LENS, jonka kehitti Sandia National Laboratories. Optomec Design Company kaupallisti sen vuonna 1997. Vuonna 1997 Optomec julkaisi ensimmäisen LENS-tekniikkakoneen, joka

oli LENS 750. Aluksi koneissa käytettiin Nd-YAG-lasereita, mutta nykyään koneissa käytetään kuitenkin kuitulasereita niiden energiatehokkuuden ja paremman kestävyysden takia. LENS koneen materiaaleja käsitellään suljetussa suojakaasu kammiossa. Suojakaasu on tyypillisesti argonia. Aluksi LENS koneet olivat kolme akselisia, mutta nykyään LENS koneet ovat viisi tai kuusi akselisia, jolloin pystytään lisäämään materiaalia melkein mistä suunnasta tahansa. [1, s. 244.]

3.4 Menetelmissä käytettävät laserit

Lasereilla on hyvin suuri merkitys materiaalia lisäävässä valmistuksessa, koska se määrittelee energiatehokkuuden, laitteiden tarkkuuden ja rakennusnopeuden. Lasersintraus tekniikoissa voidaan käyttää hiilidioksidi-laseria, neodyymillä kyllästettyä yttriym-alumiini-laseria tai kuitulaseria. Aluksi lasereina käytettiin yleisesti hiilidioksidi-laseria varsinkin SLS-tekniikassa, mutta SLM-tekniikan tullessa markkinoille alettiin siinä käyttämään Nd-YAG-lasereita. Nd-YAG-laseria alettiin käyttämään siksi, että sillä saatiin paljon parempi metallijauheen absorbointikyky. Nd-YAG-laser sopi siis paljon paremmin käytettäväksi metallilaitteistoissa. Nd-YAG-laseria käytettiin yleisesti silloin, kuin metallikappaleiden valmistustekniikat olivat uusia, mutta nykyään ollaan siirtymässä täysin kuitulasereihin, jotka tulivat markkinoille 2000-luvulla. [1, s. 125 - 125.]

Kuitulasereihin siirtyminen johtuu niiden pitkästä käyttöiästä ja niiden huollon tarpeen vähyydestä. [1, s. 124.] Kuitulaserit ovat pieniä ja energiatehokkaita lasereita, jotka lähettävät suuritehoisia pulsseja. Kuitulaserit ovat jopa 50 kertaa pienempiä, kuin yleisesti aiemmin käytetyt titaani-safiirilaserit ja painoa kuitulaserilla on noin 100 g. Nd-YAG -asereiden aallonpituus on 1064 nm ja kuitulasereiden aallonpituus on yleensä 1070 nm. Lasereiden kehittymisen myötä materiaalia lisäävien valmistus koneiden hinnoja on saatu laskettua. [18.]

Laseria käyttävissä tekniikoissa lasersäde ohjataan peilien avulla kohtaan, joka halutaan sulattaa. Suorakerrostusmenetelmää käyttävissä koneissa lasereiden teho voi olla jopa 5 kW. Jauhepetiteknikassa laserin teho on korkeimmillaan vain 1 kW. [1, s. 23 - 24, 126.]

3.5 Jälkikäsitteily

Jauhemenetelmää käyttämällä joudutaan aina poistamaan ylimääräinen irtonainen metallijauhe kappaleen ympäriltä. Kappale täytyy kuitenkin säilyttää jauheen ympäröimänä, kun se jäähtyy, koska muuten kappale voi halkeilla tai kutistua liikaa. Jäähdytysaika riippuu pitkälti kappaleen rakennusmateriaalista ja sen koosta. Jauheen poistamiseen käytetään yleensä perinteisiä menetelmiä kuten harjaa tai paineilmaa. Automaattista jauheenpoistoa käytetään myös jossain määrin ja uusimmissa teollisuuskäyttöön tarkoitetuissa koneissa sellainen on melkein kaikissa. Sen toiminta perustuu tärinään, jossa ylimääräinen jauhe varisee pois kappaleen ympäriltä ja rakennuskammion pohjalla on imuri, joka imee ylimääräisen jauheen pois. [1, s. 402.]

Suorakerrostusmenetelmää käyttämällä jälkikäsitteilynä tarvitaan usein koneistusta, riippuen tietysti kappaleen käyttökohteesta. Koneistuksen tarve johtuu suorakerrostusmenetelmän huonosta pinnanlaadusta. Suorakerrostusmenetelmässä tarvitaan usein myös tukirakenteiden poistamista, koska tässä menetelmässä tarvitaan monesti tukirakenteita, jotta kappaleita pystytään valmistamaan. [1, s. 257.]

Jos halutaan parantaa kappaleen ominaisuuksia suorakerrostus- tai jauhepetimenetelmissä, voidaan käyttää lämpökäsittelyä. Lämpökäsittelyllä voidaan muodostaa haluttu mikrorakenne tai poistaa jäännösjännityksiä kappaleesta. [1, s. 417.]

3.6 Materiaalit

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa voidaan käyttää useita erilaisia materiaaleja, esimerkiksi muovia, metalleja ja keraameja, kuten jo aikaisemminkin on mainittu. Tässä työssä kuitenkin keskitytään metalleihin. Materiaalit ovat yleensä jauhemuodossa, mutta joissakin menetelmissä voidaan myös käyttää tankoa tai lankaa. Yleisimpiä metallisia materiaaleja ovat työkaluteräs, ruostumaton teräs, alumiiniseokset, titaaniseokset ja koboltti-kromiseos. [1, s. 25; 29.]

Aluksi materiaalia lisäävässä valmistuksessa käytettiin materiaaleja, jotka oli kehitelty muihin menetelmiin soveltuviksi. Koska materiaalia lisäävä valmistus on niin erilainen kuin perinteiset valmistusmenetelmät, materiaalit eivät soveltuneet tähän käyttöön

kovin hyvin. Valmistetut kappaleet olivat siis aluksi huonolaatuisia materiaalin soveltumattomuuden takia. Uusia materiaaleja kehitellään jatkuvasti soveltuvaksi materiaalia lisäävään valmistukseen, jotta saataisiin esimerkiksi mahdollisimman hyviä kestävyysominaisuuksia kappaleille. Nykyään on kuitenkin materiaaleista saatu niin hyviä, että ne vastaavat ominaisuuksiltaan perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettuja kappaleita. Tulevaisuudessa pystytään valmistamaan materiaaleja, jotka ovat jopa parempia kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistetut. Tutkimuksia on myös menossa sellaisille materiaaleille, jossa esimerkiksi kappaleen lujuusominaisuudet ovat eri kohdissa kappaletta erilaisia. [1, s. 25.]

Suorakerrostusmenetelmässä kappaleeseen voidaan lisätä kappaleen kuluvaan kohtaan sellaisia materiaaleja, jotka kestävät paremmin kulutusta, näin saadaan kappaleen tai osan käyttöikää nostettua huomattavasti. [1, s. 256.]

Nyrkkisääntönä voidaan sanoa, että kaikki materiaalit, jotka voidaan sulattaa ja kovettaa uudelleen, voidaan hyödyntää materiaalia lisäävässä valmistamisessa. [1, s. 138 - 140.]

4 Materiaalia lisäävien koneiden valmistajat

Tässä työssä on jaettu metallikappaleita valmistavat koneet kahteen pääryhmään jauhepetimenetelmään ja suorakerrostusmenetelmään menetelmien eroavaisuuksien takia. Seuraavassa kappaleessa on esitelty suurimpia materiaalia lisäävän valmistuksen valmistajia ja heidän valmistamiaan koneita.

Niin kuin aikaisemmin on jo todettu jauhemenetelmää hyödyntävät koneet ovat paljon yleisempiä kuin suorakerrostusmenetelmää hyödyntävät koneet, koska jauhepetimenetelmää hyödyntävillä koneilla pystytään valmistamaan parempi laatuksia kappaleita. Ne ovat myös monikäyttöisempiä kuin suorakerrostuskoneet. Suorakerrostuskoneita käytetään lähinnä kappaleiden korjaukseen, mutta niillä voi toki valmistaa valmiitakin kappaleita. Koneiden hinnoissa on myös melko paljon eroja. Halvimmat koneet ovat hinnaltaan noin 100 000 euroa ja kalleimmat yli 1 000 000 euroa (Ks. taulukko 5).

4.1 3D Systems

3D Systems on yhdysvaltalainen yritys, joka valmistaa jauhemenetelmää hyödyntäviä koneita. 3D Systems valmistaa koneita teollisuuden tarpeisiin sekä kuluttajille suunniteltuja koneita. 3D Systemsin koneet pystyvät tulostamaan muovia, metallia ja keraamia. 3D Systems on perustettu vuonna 1986 ja sen pääkonttori on Rock Hillissä Etelä-Carolinassa. 3D Systemsillä on töissä yli tuhat työntekijää. [7.]

3D Systemsin tärkeimmät koneet, joilla pystytään valmistamaan metallikappaleita ovat ProX-sarjan koneet. 3D Systemsin koneet ovat tekniikaltansa SLS- ja DMLS-tyyppisiä. 3D Systemsin metallikappaleita valmistavien koneiden erot ovat lähinnä rakennuskammion koossa ja kappaleiden rakennusnopeudessa. [25.]

4.2 EOS

EOS on yksi vanhimmista yrityksistä, joka valmistaa materiaalia lisääviä koneita. Se on perustettu vuonna 1989 Saksassa. Ensimmäinen kaupallinen DMLS-tekniikkaa hyödyntävä kone oli EOSINT M 250 Xtended, joka tuli markkinoille 1998. Lopputuote oli huokoinen eikä näin ollen ollut käyttökelpoinen sellaisenaan, vaan se vaati jälkikäsittelyä.

Vuonna 2004 EOS esitteli maailman menestyneimmän DMLS-tekniikkaa hyödyntävän koneen M270. EOS on kuluttanut paljon aikaa säätäessään koneitaan tietyille metallijauheille, joita he myyvät asiakkailleen. EOSin uusimmat koneet ovat M 280 ja M 400. [1, s. 122 – 124; 14.]

4.3 SLM Solutions

SLM Solutions on yhdysvaltalainen yritys, joka valmistaa jauhepetimenetelmää hyödyntäviä koneita. SLM Solutionsin koneet ovat tekniikaltansa SLM-tyyppiä. SLM Solutions on perustettu jo vuonna 1863 - 1865, mutta materiaalia lisääviä valmistuslaitteistoja se alkoi valmistamaan vuonna 2000. Yritys oli ensimmäinen, joka pystyi valmistamaan SLM-tyyppisillä koneilla alumiini- ja titaanikappaleita. [27.]

4.4 Phenix Systems

Phenix Systems on yksi materiaalia lisäävistä valmistus yrityksistä, joka käyttää jauhepetimenetelmää. Se on perustettu vuonna 2000 Ranskassa. Phenix Systemsin koneet hyödyntävät SLM-tekniikkaa. Tärkeimmät koneet ovat PXL, PXM ja PXS. PXL-koneella pystytään valmistamaan yrityksen valmistamista koneista suurimpia kappaleita ja PXS-koneella taas rakennuskammion koko ja laserin teho ovat pienempiä. [12.]

4.5 Arcam

Arcam on ruotsalainen yritys, joka valmistaa materiaalia lisääviä koneita. Se kaupallisti ensimmäisenä EBM tekniikkaa käyttävän koneen. Arcamin kaikki koneet hyödyntävät jauhepetimenetelmää ja EBM-tekniikkaa. Arcam on perustettu vuonna 1997. Sen ydinalue on tarjota koneita ortopedisiä implantteja valmistaville yrityksille ja lentokoneteollisuudelle. Arcamin uusimmat koneet ovat Q10 ja Q20, ja ne on kehitetty lentokoneteollisuuden avustuksella. [24.]

4.6 Optomec

Optomec yhdysvaltalainen yritys, joka on yksi johtavista suorakerrostusmenetelmää hyödyntävien koneiden valmistajista. Optomecin koneet ovat tekniikaltansa LENS-

koneita. Ensimmäinen kone julkaistiin vuonna 1997, joka oli LENS 750. Optomecin koneet käyttivät alunperin Nd-YAG-laseria, mutta sittemmin on siirrytty käyttämään kuitulasereita, kuten MR-7-koneessa. Optomec:in tärkeimmät koneet ovat MR-7 ja LENS 850-R (Kuvio 8.). Optomec julkaisi vuonna 2013 LENS 450 koneen, joka maksaa vain 220 000 euroa. Kone on tarkoitettu oppilaitoskäyttöön ja pienien kappaleiden valmistamiseen ja korjaamiseen. [1, s. 244 – 245; 26.]



Kuvio 8. Optomec LENS 850-R kone [40]

5 Materiaalia lisäävien koneiden vertailua

Tässä kappaleessa vertaillaan materiaalia lisäävän valmistuksen koneita ja niiden ominaisuuksia. Koneita vertaillessa tulee ottaa huomioon, minkälaisia ominaisuuksia pidetään tärkeinä. Materiaalia lisäävän valmistuksen koneet soveltuvat kaikki eri käyttökohteisiin, niin että niitä on vaikea vertailla keskenään. Vertailen koneita kuitenkin sillä oletuksella, että hyvä pinnalaatu ja suuri rakennusnopeus ovat tärkeimpiä asioita.

5.1 Menetelmien vertailu

Aluksi vertaillaan jauhepetimenetelmää ja suorakerrostusmenetelmää keskenään (Taulukko 3.). Suorakerrostusmenetelmässä rakennusnopeus on huomattavasti suurempi kuin jauhepetimenetelmässä, mutta rakennusnopeuden ollessa suuri tarkkuus ja pinnanlaatu kärsivät todella paljon. Suorakerrostusmenetelmällä voidaan kuitenkin valmistaa paljon suurempia kappaleita kuin jauhepetimenetelmällä, mikä on suorakerrostusmenetelmän tärkein etu. Suorakerrostusmenetelmän koneet ovat jonkin verran jauhepetimenetelmän koneita kalliimpia.

Taulukko 3. Eri menetelmien erot

| Menetelmä | Jauhepetimenetelmä | Suorakerrostusmenetelmä |
|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Rakennusnopeus | 5-20 cm ³ /h | 70 cm ³ /h |
| Tarkkuus | ± 0,02-0,05mm/25 mm | ± 0,125-0,25 mm/25 mm |
| Yksityiskohtien tarkkuus | 0,04-0,2 mm | 0,5-1,0 mm |
| Pinnanlaatu | Ra 4-10 μm | Ra 7-20 μm |
| Kappaleen koko (max) | 500 x 280 x 325 mm | 2000 x 1500 x 750 mm |
| Keskimääräinen hinta | 450 000 - 600 000 EUR | 500 000 - 800 000 EUR |
| Käyttökohteet | Prototyypit Valmiit osat | Korjaus Valmiit osat |

5.2 Tekniikoiden vertailu

Menetelmien vertailun jälkeen voidaan siirtyä eri tekniikoiden vertailuun. Tässä työssä on valittu vertailun kohteeksi DMLS-tekniikan ja EBM-tekniikan, koska nämä tekniikat ovat tällä hetkellä suosituimpia ja tulevat saavuttamaan todennäköisesti yhä tärkeemmän roolin. Taulukosta 4 voidaan huomata, että DMLS-tekniikalla ja EBM-tekniikalla on melko pienet erot keskenään. Kuitenkin DMLS-tekniikkaa käytettäessä pinnanlaatu on

kuitenkin hieman parempi ja kerrospaksuus on pienempi, mikä on tärkein asia. EBM-tekniikan suurin etu on sen suuremmissa rakennusnopeudessa, mikä on myös tärkeää esimerkiksi kustannusten kannalta.

Taulukko 4. Vertailutaulukko DMLS-tekniikasta ja EBM-tekniikasta

| Tekniikka | DMLS M270 | EBM | Etu |
|--|---|--|-----------|
| Lämmönlähde | Laser | Elektronisäde | Tasatulos |
| Suurin teho jauhepetiin | 200W | 3,500W | EBM |
| Säteiden tehokas määrä | Yksi | Maksimissaan 50 | EBM |
| Kerrospaksuus | 20-40 µm | 50-70 µm | DMLS |
| Ilmakehä | Suojakaasu (argon, typpi) | Tyhjiö | Tasatulos |
| Rakennuskammio | 250 x 250 x 200 mm | 200 x 200 x 350 mm | Tasatulos |
| Jauheen jakelu | Jakelulaite rakennusalueen alapuolella | Syöttösuppilo rakennusalueen yläpuolella | EBM |
| Jauhe materiaali | Jäykkä (keraami tai teräs) | Joustava | Tasatulos |
| Hyväksytyt materiaalit | Ti64, Ti64ELI, CoCr, Inconel, 625 ja 718, AlSi10Mg, Alumiini 6061, Ms-1, Ruostumaton 17-4PH, Ruostumaton 316L | Ti64, Ti64ELI, CoCr | DMLS |
| Jäännösjännitys | Merkittävä | Pieni | EBM |
| Pinnanlaatu | Hyvä | Kohtuullinen | DMLS |
| Tarkkuus käytettäessä Ti64 materiaalia | 0,005mm | 0,10mm | DMLS |
| Vetolujuus käytettäessä Ti64 materiaalia | 1,215 MPa, 10% | 970 MPa, 16% | Tasatulos |

5.3 Hintavertailu

Koneiden hinnoissa eri tekniikoiden välillä on suuria eroja, kun SLS-tekniikkaa hyödyntävän koneen saa noin 300 000 eurolla ja SLM-tekniikkaa hyödyntävästä koneesta joutuu maksamaan 1 000 000 euroa. Hinnat perustuvat FIRPAN konematriisiin, jonka hintatiedot ovat vuosilta 2009 - 2013 (Taulukko 5). Kun katsotaan taulukkoa 5 huomataan, että LENS-tekniikkaa käyttävän koneen saa halvimmalla, jos halutaan valmistaa mahdollisimman suuria kappaleita. Niin kuin aikaisemminkin on tullut jo ilmi LENS-tekniikassa on kuitenkin omat huonot puolensa esimerkiksi sen huono pinnanlaatu. Jauhepetimenetelmää käyttävistä koneista SLS-koneen saa halvimmalla verrattuna sen rakennuskammion kokoon. SLS-tekniikka ei kuitenkaan sovellu kovin hyvin metallikapaleiden valmistamiseen.

Taulukko 5. Eri tekniikoiden hinnat [38]

| Tekniikka | Menetelmä | Laitteiden hinnat | Keskiarvo | Rakennuskammio (l x s x k)mm max. |
|-------------|----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------------|
| DMLS | Jauhepeti | 440 000 - 475 000 EUR | 457 000 EUR | 250x250x215 |
| EBM | Jauhepeti | 519 000 - 629 000 EUR | 574 000 EUR | 250x250x400 |
| LENS | Suorakerrostus | 407 000 - 796 000 EUR | 538 000 EUR | 1000x1500x1000 |
| SLM | Jauhepeti | 1 000 000 EUR | 1 000 000 EUR | 630x400x500 |
| SLS | Jauhepeti | 141 000 - 475 000 EUR | 297 000 EUR | 250x250x220 |

5.4 Ehdotuksia hankintaan

Tällä hetkellä paras valinta metallikappaleiden valmistamiseen on jauhepetimenetelmää hyödyntävä DMLS-kone, mutta EBM-tekniikkaa hyödyntävä kone ei ole kuitenkaan huono vaihtoehto, koska se on jonkin verran DMLS-konetta nopeampi, ja pinnanlaadussa ei ole suuria eroja. EBM-tekniikkaa käyttävä kone on hieman kalliimpi kuin DMLS-tekniikkaa käyttävä, mutta EBM-kone maksaa nopeasti itsensä takaisin sen suuremman rakennusnopeuden takia.

Tällä hetkellä, jos halutaan valmistaa pelkkiä metallikappaleita, valitsisin jauhepetimenetelmää hyödyntävän koneen. Tekniikkansa puolesta kone olisi DMLS tai EBM tyyppinen. Vaihtoehtoina voisi esimerkiksi olla Arcamin A2 kone tai EOSintin M 280 kone.

Jos koneen pääasiallinen käyttötarkoitus on vain korjata kappaleita, valitsisin koneeksi Optomecin LENS 850-R.

6 Sovelluskohteet ja käyttäjät

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa ei sovelluskohteilla ole rajoja, vaan sitä voidaan käyttää lähes kaikissa teollisuudenaloissa. Tässä kappaleessa on esitelty muutamia tärkeimpiä metallikappaleiden sovelluskohteita.

6.1 Käyttö Suomessa

Suomessa pikavalmistuslaitteistoja on melko vähän ja tuotannollisessa käytössä Suomessa ei ole yhtäkään metallitulostinta. Suomi tulee melko jäljessä muuta maailmaa. Muualla maailmassa mietitään jo tekniikoille sovelluskohteita, kun Suomessa taas ei tekniikka ole kovin hyvin tiedossa ja ei välttämättä tiedetä, että metallikappaleiden valmistaminen materiaalia lisäävää valmistusta käyttäen on edes mahdollista. [15.]

Suomessa materiaalia lisääviä valmistuskoneita on kuitenkin muutamia käytössä tutkimustyössä, ja jälleenmyyjällä on myös muutama kone varastossa. Suomessa ei ole yhtään suorakerrostusta hyödyntäviä koneita vaan kaikki ovat jauhepetimenetelmää hyödyntäviä. Jauhepetimenetelmää hyödyntäviä koneita löytyy Suomesta kaksi: Oulun yliopisto (EOSINT M 270) ja Lappeenrannan teknillinen yliopisto (EOSINT Development). Oulun yliopistolla olevalla koneella ei voida kuitenkaan valmistaa tällä hetkellä kuin muovikappaleita. Kummatkin koneet ovat DMLS-tekniikka käyttäviä koneita. [38.]

Suomen teollisuuden kannattaisi alkaa miettimään sovelluskohteita materiaalia lisääväälle valmistukselle, koska se tulee melko varmasti olemaan yksi tulevaisuuden valmistusmenetelmistä. Yrityksien täytyisi myös hankkia tietoa enemmän materiaalia lisäävästä valmistuksesta, koska kaikilla teollisuudessa työskentelevillä ei välttämättä ole edes tietoa, että metallikappaleita voidaan tulostaa.

6.2 Käyttö lääketieteessä

Lääketiede on yksi ensimmäisiä aloja, jossa on alettu miettimään materiaalia lisäävän valmistuksen sovelluskohteita. Lääketieteessä materiaalia lisäävästä valmistuksesta on todella paljon hyötyä. Otetaan esimerkkinä vaikka polven pallonivel. Kaikki ihmiset ovat

hieman eri muotoisia ja mallisia, joten tarvitaan täysin käyttökohteeseen räätälöity tuote. Aluksi otetaan CT-kuva potilaan polvesta ja tehdään sen perusteella 3D-malli tarvittavasta kappaleesta. Sen jälkeen voidaan polven pallonivel valmistaa materiaalia lisäävällä valmistuksella juuri sopivaksi ja halutunlaiseksi. Tämä säästää leikkausaikoja huomattavasti, koska nykyään kirurgi joutuu itse muotoilemaan sopivan kappaleen ja tekemään sen perusteella sopivan pallonivelen. Toinen esimerkki voidaan ottaa vaikka kuulolaitteesta, joka täytyy olla täysin sopiva käyttäjällensä. [1, s. 56 – 57.]

6.3 Käyttö lentokone- ja autoteollisuudessa

Lentokone- ja autoteollisuus ovat todella kiinnostuneita materiaalia lisäävästä valmistuksesta. Nämä teollisuudenalat ovat kiinnostuneita materiaalia lisäävästä valmistuksesta, koska nämä alat saisivat huomattavia säästöjä valmistuskustannuksissa ja parannuksia kulkuneuvojen polttoaineenkulutukseen painoa vähentämällä. Muutamia lentokoneen osia, jotka on jo valmistettu materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntäen, ovat esimerkiksi osia miehittämättömään lentokoneeseen, erikoistyökaluja kokoonpanoon, turbiinin lapoja ja polttoaineensuihkutussuutin kaasuturbiiniin. Esimerkiksi Airbusin A320 korvattaessa titaanista valettu moottorin sarana materiaalia lisäävällä valmistuksella voidaan säästää materiaalikulussa jopa 75 %. Tästä johtuen valmistuskustannukset pienenevät huomattavasti, materiaalin säästön ja energiankulutuksen pienentämisen takia. Lentokoneiteollisuudessa käytetään myös materiaalia lisäävää valmistusta arvokkaisten osien korjaukseen. [39.]

General Electric on yksi suurimmista lentokoneenmoottorien valmistajista. General Electric on investoinut paljon materiaalia lisäävään valmistukseen ja yritys koittaa keksiä keinoa valmistaa yli 85 000 polttoainesuutinta sen vuosittain valmistamiin lentokoneidenmoottorien sisälle (Kuvio 9.). General Electric väittää, että osat, jotka tehdään materiaalia lisäävää valmistusta käyttäen ovat paljon kevyempiä, kestävämpiä ja sietävät suurempia lämpötiloja kuin kokoonpanolinjalla kahdestakymmenestä osasta valmistettu vastaava. Ainoa ongelma General Electricillä on se, että materiaalia lisäävät valmistuskoneet eivät pysty vastaamaan heidän valmistustarpeeseensa. Greg Morris General Electriciltä sanoo: "Tämän päivän teknologialla tarvittaisiin liian monta konetta, jopa 60 tai 70, että saataisiin tehokkaasti valmistettua suuttimet." [28; 29; 36.]

Autoteollisuus on alkanut yhä enemmän kiinnostumaan materiaalia lisäävästä valmistuksesta, kun koneet ovat kehittyneet niin, että voidaan valmistaa suurempia kappaleita. Esimerkiksi Daimler Ag on hankkinut yhden koneen, jonka malli on LaserCUSING Xline 1000R, ja joka on kehitetty suurille toimiville metallikomponenteille. Kone vähentää huomattavasti kustannuksia ja läpimenoaikoja. Autoteollisuudessa materiaalia lisäävän valmistuksen hyötyjä ovat esimerkiksi kevyemmät osat, erityiset osat kilpa-autoihin ja superautoihin sekä asiakkaan toivomat erityisosat. [9; 20.]



Kuvio 9. Lentokoneen polttoainesuutin, joka on valmistettu materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä [36]

6.4 Muita sovelluskohteita

Yksi ehkä tällä hetkellä mielenkiintoisimmista materiaalia lisäävän materiaalin sovelluskohteista on Solid Conceptsin julkaisema maailman ensimmäinen ase, joka on valmistettu käyttäen DMLS-tekniikkaa (Kuvio 10.). Ase on kopio tunnetusta Colt 1911-pistoolista. Ase on täysin toimiva, ja sillä onkin ammuttu 50 laukausta, ja ase kesti sen loistavasti. Ase on valmistettu ruostumattomasta teräksestä ja inconelistä. Inconel on niin sanottu superseos, joka säilyttää mekaaniset ominaisuutensa korkeissakin lämpötiloissa. Ase osoittaa, että ainakin DMLS-tekniikalla valmistetut kappaleet ovat jo ainakin hyvin lähellä perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettuja kappaleita. Asetta ei ole koneistettu mitenkään valmistuksen jälkeen. Ase on kuitenkin kiillotettu. [10; 11.]



Kuvio 10. Colt 1911 aseesta kopio, joka on valmistettu materiaalia lisäävää valmistusta käyttäen [35]

7 Päätelmät

Työn perusteella voidaan todeta, että uusia koneita tulee koko ajan lisää ja tekniikka kehittyy huimaa vauhtia eteenpäin. Suurten yritysten tietoisuuden kasvaessa materiaalia lisäävästä valmistamisesta ja sen mahdollisuuksista, nähdään alalla suuria harppauksia. Uusia käyttökohteita keksitään myös kokoajan lisää.

Materiaalia lisäävää valmistuskonetta hankittaessa kannattaa keskittyä jauhepetimenehtelmän koneisiin, koska ne ovat parhaita metallikappaleiden valmistamiseen. Tekniikoista parhaita ovat DMLS ja EBM. SLM-tyyppisiä koneita kannattaa myös harkita, jos koneen hinnalla ei ole väliä. SLM-tyyppiset koneet ovat hyviä kappaleiden laadultaan, mutta koneet eivät ole hintansa puolesta kilpailukykyisiä DMLS- ja EBM-tekniikkaa käyttäville koneille.

Suorakerrostusmenetelmää hyödyntäviä koneita kannattaa hankkia, jos koneen pääasiallinen käyttö sijoittuu kappaleiden korjaamiseen. Suorakerrostusmenetelmää hyödyntävää konetta kannattaa myös harkita, jos halutaan valmistaa suuria kappaleita ja pinnanlaadulla ei ole niin suurta merkitystä.

Tulevaisuudessa metallijauheiden hinnat laskevat melko paljon, mikä laskee valmistettävien kappaleiden hintaa. Materiaalia lisäävän valmistamisen koneiden rakennusnopeudet tulevat myös kasvamaan paljon, mikä myös laskee valmistettävien kappaleiden hintaa. Tällä hetkellä jauhepetimenehtelmää käyttävien koneiden rakennusnopeudet ovat noin $10 \text{ cm}^3/h$, mutta ennustetaan, että koneiden rakennusnopeudet jopa nelinkertaistuvat vuoteen 2018 mennessä [20.].

Vaikka materiaalia lisäävä valmistus ei ole vielä lyönyt itseään läpi, uskon vahvasti, että siitä tulee muutamien vuosien päästä merkittävä valmistusmenetelmä. Koneiden kehittyttyä yhä nopeammiksi ja tarkemmiksi materiaalia lisäävä valmistus tulee lisääntymään teollisuudessa kovalla vauhdilla.

Lähteet

- 1 Gibson, I., Rosen, D. W. & Stucker, B. 2010. Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York, Springer Science+Business Media.
- 2 Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Verkkodokumentti. <http://www.google.com/patents/US4575330> [Viitattu 15.2.2014]
- 3 Selective Laser Sintering, Birth of an Industry. Verkkodokumentti. http://www.me.utexas.edu/news/2012/0712_sls_history.php. [Viitattu 20.2.2014]
- 4 Kaikonen, H., Koukka, H., Leskelä, T. & Tuomi, J. 1999. Pikavalmistus - Prototyyppivalmistuksen teknologiavalinta. Helsinki, Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
- 5 Lipson, H. & Kurman, M. 2013. Fabricated: The New World of 3D Printing. Indiana, John Wiley & Sons, Inc.
- 6 Wohlers Report 2013 Reveals Continued Growth in 3D Printing and Additive Manufacturing. Verkkodokumentti. <http://wohlersassociates.com/press59.html> [Viitattu 2.3.2014]
- 7 About 3D Systems. Verkkodokumentti. <http://www.3dsystems.com/about-us> [Viitattu 5.3.2014]
- 8 Materiaalia lisäävä valmistus (AM) ja 3D-tulostus. Verkkodokumentti. <http://eis.fi/wordpress/wp-content/uploads/2014/02/AM-Presentation-Puukko-2014-2-13.pdf> [Viitattu 10.3.2014]
- 9 Additive manufacturing with metals in automobiles. Verkkodokumentti. <http://www.engineerlive.com/content/additive-manufacturing-metals-automotives> [Viitattu 11.3.2014]
- 10 World`s First 3D Printed Metal Gun Manufactured by Solid Concepts. Verkkodokumentti. <http://www.solidconcepts.com/news-releases/worlds-first-3d-printed-metal-gun-manufactured-solid-concepts/> [Viitattu 12.3.2014]
- 11 World`s First 3D Printed Metal Gun. Verkkodokumentti. <http://blog.solidconcepts.com/industry-highlights/worlds-first-3d-printed-metal-gun/> [Viitattu 15.3.2014]
- 12 Phenix Systems. Verkkodokumentti. <http://www.phenix-systems.com/en/phenix-systems> [Viitattu 20.3.2014]
- 13 Materiaalia lisäävä valmistus: 3D-tulostus – AM-tekniikka – 3D Printing - Additive Manufacturing (AM). Verkkodokumentti. <http://www.firpa.fi/html/sanasto.html> [Viitattu 16.3.2014]

- 14 About EOS. History. Verkkodokumentti. http://www.eos.info/about_eos/history [Viitattu 6.4.2014]
- 15 Metalli lyö läpi 3d-tulostuksessa. Metallitekniikka 9/2013, s. 46 - 49.
- 16 How Selective Laser Melting (SLM) Works. Verkkodokumentti. <https://thre3d.com/how-it-works/powder-bed-fusion/selective-laser-melting-slm> [Viitattu 20.3.2014]
- 17 Whats the Difference Between. Verkkodokumentti. http://www.core77.com/blog/materials/production_methods_whats_the_difference_between [Viitattu 22.3.2014]
- 18 Kuitulaser valloittaa pian markkinoita. Verkkodokumentti. <http://www.aka.fi/fi/A/Suomen-Akatemia/Mediapalvelut/Tiedotteet/Tiedotteet-2003/Kuitulaser-valloittaa-pian-markkinoita/> [Viitattu 24.3.2014]
- 19 Gintec markkinoi Kolibreja globaalisti. Verkkodokumentti. <http://www.teollisuusnyt.fi/fi/artikkelit/gintec-markkinoi-kolibreja-globaalisti> [Viitattu 25.3.2014]
- 20 Additive manufacturing - A game changer for the manufacturing?. Verkkodokumentti. http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Additive_Manufacturing_20131129.pdf [Viitattu 28.3.2014]
- 21 List of 3D Printers Under \$1000 – Ready to Use. Verkkodokumentti. <http://3d.about.com/od/3d-Electronics/tp/List-Of-3d-Printers-Under-1000-Ready-To-Use.htm> [Viitattu 28.3.2014]
- 22 What is Rapid Prototyping?. Verkkodokumentti. <http://www.stratasys.com/resources/rapid-prototyping> [Viitattu 1.4.2014]
- 23 RepRap Wiki. Verkkodokumentti. <http://reprap.org/wiki/RepRap> [Viitattu 5.4.2014]
- 24 This is Arcam. Verkkodokumentti. <http://www.arcam.com/company/about-arcam/> [Viitattu 8.4.2014]
- 25 3D Systems. Verkkodokumentti. <http://www.3dsystems.com/> [Viitattu 5.4.2014]
- 26 Optomec. Verkkodokumentti. <http://www.optomec.com/> [Viitattu 8.4.2014]
- 27 Company history. Verkkodokumentti. http://stage.slm-solutions.com/index.php?history_en [Viitattu 7.4.2014]
- 28 10 Breakthrough Technologies 2013. Verkkodokumentti. <http://www.technologyreview.com/featuredstory/513716/additive-manufacturing/> [Viitattu 3.3.2014]
- 29 Materials Used In 3D Printing and Additive Manufacturing. Verkkodokumentti. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8132> [Viitattu 10.4.2014]

- 30 EBM Hardware. Verkkodokumentti. <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/> [Viitattu 5.3.2014]
- 31 Numerical Modeling of the Additive Manufacturing (AM) Processes of Titanium Alloy. Verkkodokumentti. <http://www.intechopen.com/books/titanium-alloys-towards-achieving-enhanced-properties-for-diversified-applications/numerical-modeling-of-the-additive-manufacturing-am-processes-of-titanium-alloys> [Viitattu 1.2.2014]
- 32 Jauhepetimenetelmä. Verkkodokumentti. http://img.bhs4.com/c5/c/c5cd9101690abdfb50b5b69e0891ffe773cba25a_large.jpg [Viitattu 3.3.2014]
- 33 Fused Deposition Modeling (FDM). Verkkodokumentti. <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling> [Viitattu 1.3.2014]
- 34 UK university sets up course of studies in additive manufacturing. Verkkodokumentti. http://www.eos.info/press/press_releases/2010_270810 [Viitattu 16.3.2014]
- 35 Just Printed: Solid Concepts 3D-Printer Metal 1911. Verkkodokumentti. <http://www.recoilweb.com/just-printed-solid-concepts-3d-printed-metal-1911-35037.html> [Viitattu 20.2.2014]
- 36 Additive manufacturing at GE Aviation. Verkkodokumentti. <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-6/features/additive-manufacturing-at-ge-aviation.html> [Viitattu 11.4.2014]
- 37 Wohlers Associates, Inc. Verkkodokumentti. <http://wohlersassociates.com/wa.html> [Viitattu 9.5.2014]
- 38 FIRPAn Konematriisi 2013. Verkkodokumentti. http://www.firpa.fi/AM_konematriisi2013_viimeisin.pdf [Viitattu 9.5.2014]
- 39 Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part. Verkkodokumentti. <http://www.altairhyperworks.co.uk/technology/Files/Papers/EADS.pdf> [Viitattu 9.5.2014]
- 40 Optomec LENS 850R. Verkkodokumentti. <http://www.maqcenter.com/en/products/fabricacion-aditiva-lens-optomec/optomec-lens-850r.html> [Viitattu 10.5.2014]

