LAPPEENRANNAN–LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT

School of Energy Systems

LUT Mechanical Engineering

Research Group of Laser Materials Processing

LUT Scientific and Expertise Publications

Raportit ja selvitykset – *Reports*

93

Heidi Piili, Antti Salminen, Markus Korpela, Niko Riikonen, Atte Heiskanen, Kalle Kohtanen, Sami Westman

Katsaus metallien 3D-tulostukseen: Tutkimuksen lähtökohdat
Overview to 3D printing of metals: Basis of research

LUT-yliopisto
Lasertyöstön laboratorio
Konetekniikan osasto
School of Energy Systems

Katsaus metallien 3D-tulostukseen: Tutkimuksen lähtökohdat

Raportit ja selvitykset – Reports
ISSN-L 2243-3384
ISSN 2243-3384
ISBN: 978-952-335-405-0

Koonnut: Dosentti Heidi Piili, TkT
Professori Antti Salminen, TkT
Nuorempi tutkija Markus Korpela, DI
Projektitutkija Niko Riikonen, DI
Tutkimusapulainen Atte Heiskanen, TkK
Tutkimusapulainen Kalle Kohtanen, TkK
Tutkimusapulainen Sami Westman, opiskelija

Kirjoitettu: 14.8.2019

Tiivistelmä

Metallien 3D-tulostuksen suosio on kasvanut viime vuosien aikana. Menetelmää ei enää käytetä pelkästään prototyyppien valmistukseen, vaan yhä useampi kansainvälinen yritys käyttää menetelmää niin lopputuotteiden kuin varaosienkin tuotannossa. Suomalaisella teollisuudella on yhä suurempi kiinnostus sarjavalmistusta kohtaan. Valmistava teollisuus on murrosvaiheessa, koska digitalisaatio, jota osa 3D-tulostus on, etenee ja tuo mukanaan suuria murroksia alalle.

Suomalaisen teollisuuden kilpailukyvyn kannalta on oleellista, että yrityksiin saadaan 3D-tulostusteknologioihin liittyvää tietotaitoa. Maailmalla teknologiaa hyödynnetään esimerkiksi optimoiduissa rakenteissa koko ajan enenevissä määrin ja on tärkeää, että nämä mahdollisuudet osataan tunnistaa Suomessakin. Tietämys teknologiasta mahdollistaa myös uusia innovaatioita. Panostamalla 3D-tulostuksen koulutukseen ja tutkimukseen voidaan saada aikaan merkittävää uutta liiketoimintaa.

Metallien 3D-tulostus on jo vakiintunut prototyyppien, varaosien ja lopputuotteiden valmistusmenetelmä. Se mahdollistaa uutta liiketoimintaa ja muuttaa arvoketjuja. Kyseessä on kuitenkin hyvin monimutkainen prosessi ja 3D-tulostamiseen liittyy useita, vielä ratkaisemattomia ongelmia. Ongelmat ovat kuitenkin ratkaistavissa laadukkaan tutkimuksen avulla.

Yhteys tutkimusmaailman ja valmistusteollisuuden välillä on aina ollut tärkeää. Yhteistyö on tänä päivänä kuuma aihe nopeasti kehittyneen liiketoimintaympäristön ja laajojen koulutusaluemuunnosten takia. Yhteistyön antamat yhteydet mahdollistavat yritysten pysymisen alansa huipulla, koska tutkimuslaitoksilta, kuten yliopistoilta, saa uusia näkökulmia monimutkaisiinkin ongelmiin. Yritykset voivat löytää tutkimusyhteistyön ja opiskelijoiden tuoman tuoreiden tietojen ja taitojen sekä markkinanäkemyksen ansiosta kautta sellaisia konsepteja, joita he eivät ole ennen ajatelleet. Samassa yhteydessä yritykset voivat päivittää omaa tietotaitoaan sekä saavat mahdollisuuden rekrytoida uutta tekniikkaa osaavaa työntekijä sukupolvea.

Abstract

Use of metal 3D printing has grown remarkably during last years. This technology is not anymore only for prototyping purposes but used by international companies for both manufacturing of final products and spare parts. Finnish industry has also shown interest towards serial production of metal 3D printing. Whole manufacturing industry is going through major change as digitalization (to which 3D printing also belongs) is more widely applied concept.

It is essential for competitiveness of Finnish industry, that more companies have knowledge about 3D printing technologies. 3D printing is globally utilized for example in optimized structures. It is also important that these benefits are recognized within domestic industry. Knowledge is key word so that these benefits can be identified. This is why education, training and research is in central role in order to develop new business.

Metal 3D printing has established its role in production of prototypes, spare parts and final products. 3D printing enables new business and changes value chain. This process is very complex and 3D printing still has several unsolved challenges. But these can be resolved with proper R&D.

Connection between research and manufacturing industry has always been important. Co-operation is more and more important because of rapidly developed business environment and large changes in field of education and training. Co-operation helps companies to reach top knowhow because research institutes, such as universities, can give new insights to complex problems. Companies can find via this kind of co-operation such concepts they have never thought as students bring fresh knowledge. This is how companies can update their own knowhow and get excellent possibility to recruit new employees who have knowledge of new technology.

Esipuhe

Tämä julkaisu on tehty osana Teollisuuden 3D tulostus (Me3DI)-hanketta, joka on saanut rahoituksen Euroopan aluekehitysrahastosta (EAKR). Mukana projektissa on LUT-yliopistolta lasertyöstön ja teräsrakenteiden tutkimusryhmä sekä yrityksiä. Hanke alkoi 1.9.2018 ja loppuu 31.12.2020.

Teollisuuden 3D-tulostus-hankkeessa (eng. Metal 3D Innovations, Me3DI) on tavoitteena muodostaa Etelä-Karjalan teollisuuden metallien 3D-tulostuskeskittymä, joka tehostaa metallien lisäävän valmistuksen (3D-tulostus) käyttöä. Keskittymä kokoaan yhteen maakunnan teollisen valmistuksen ja suunnittelun osaamisen hyödyntäen LUT-yliopiston tieteellisen tutkimuksen ja opetuksen resursseja. Hankkeessa selvitetään aluksi yritysten koulutustarpeet lisäävän valmistuksen ja 3D-tulostuksen osalta. Koulutuksen avulla voidaan ideointiprosessista poistaa perinteisiä valmistusteknisiä rajoitteita. Suunnittelutoimistoille koulutuksen hyöty näkyy geometristen rajoitusten tunnistamisessa ja lujuusteknisten kysymysten tuntemisessa.

Tämän artikkelin kirjoittajat kiittävät Teollisuuden 3D tulostus (Me3DI)-hanketta ja sen osallistujia tuesta sekä mahdollisuudesta tehdä tämä julkaisu.

14.8.2019, Lappeenrannassa

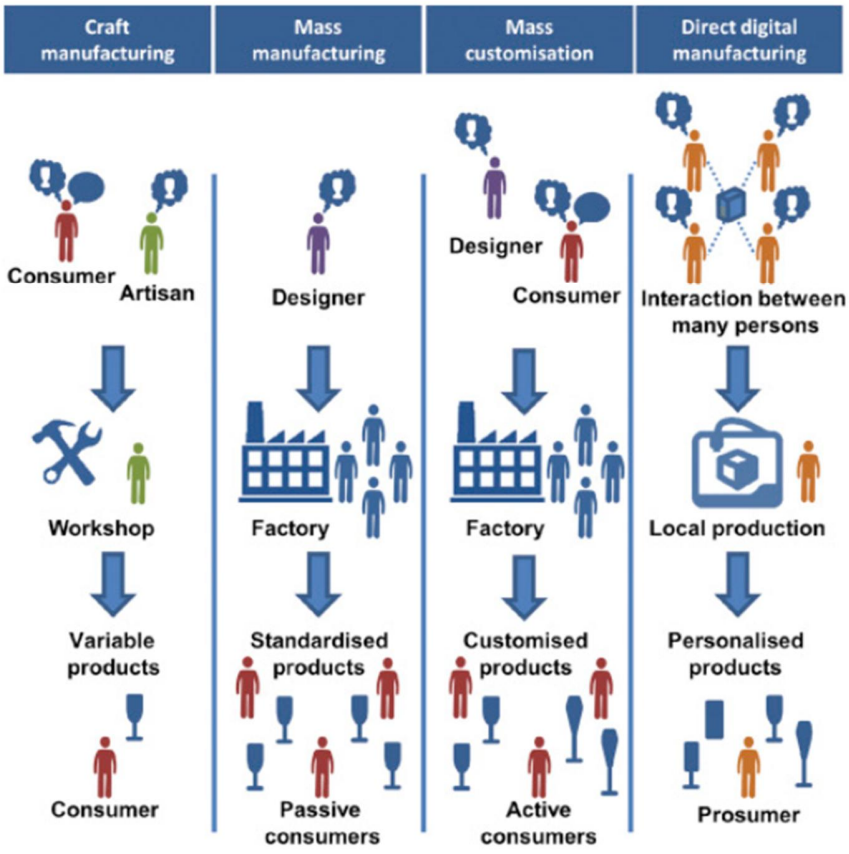
Heidi Piili, Antti Salminen, Markus Korpela, Niko Riikonen, Atte Heiskanen, Kalle Kohtanen, Sami Westman

Sisällysluettelo

Tiivistelmä ... 3
Abstract ... 4
Esipuhe ... 5
Sisällysluettelo ... 6
1 Johdanto ... 7
2 Taustaa metallien 3D-tulostuksesta ... 9
3 Metallien 3D-tulostuksen mahdollisuudet ja rajoitteet ... 11
4 Metallien 3D-tulostus maailmalla ... 13
5 3D-tulostus ja metallien 3D-tulostus Suomessa ... 17
6 Näkökohtia metallien 3D-tulostuksen tutkimukselle ... 20
6.1 Teknologialähtöiset perusteet ... 20
6.2 Teollisuuslähtöiset perusteet ... 21
6.3 Tutkimuslähtöiset perusteet ... 24
6.4 Koulutuslähtöiset perusteet ... 26
7 Yritysten ja tutkimuslaitosten välinen yhteistyö ... 27
8 Yhteenveto ... 28
9 Lähteet ... 30

1 Johdanto

3D-tulostus on osa digitaalista vallankumousta, joka muuttaa valmistavan teollisuuden toimintatapoja. Valmistava teollisuus on jo nyt muutoksessa: toimijoiden määrä kasvaa, arvoketjuihin tulee uuden tyyppisiä toimijoita ja ennestään tutut toimijat tarjoavat täysin uusia tuotteita, toimintoja ja palveluita. Ongelma usein on se, että roolit ja verkostot eivät tällaisessa tilassa ole vielä muodostuneet. Kuva 1 havainnollistaa tätä tilannetta.

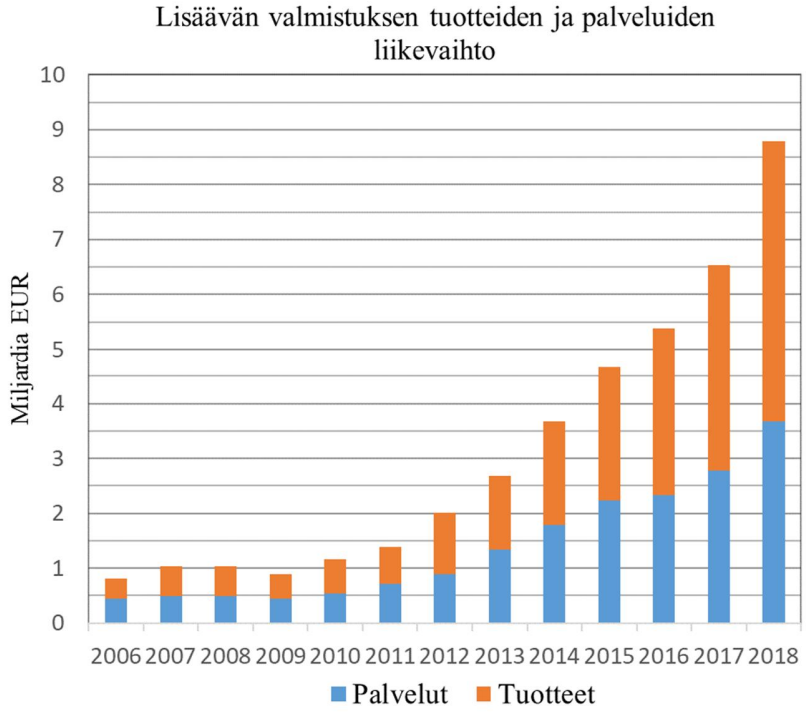


Kuva 1. Valmistavan teollisuuden muutokset digitalisaation myötä. (Chen et al., 2015)

Digitalisaatio mahdollistaa muutoksen keskitetystä tuotantoprosessista hajautettuun, älykkääseen tuotantoon, erityisesti paikalliseen tuotantoon. Tässä kehityksessä 3D-tulostuksella on jalansija. Tulevaisuuden digitalisaation työpaikat syntyvät lähellä asiakasta. Yritykset hakevat nyt kilpailuetua tekemällä tuotantoa ja logistiikkaa eri tavalla kuin muut. Erilaisten prosessien digitalisoinnilla ja automaatiolla yksikkökustannukset saadaan alas. Näin pitkälle jalostettuja, asiakkaalle räätälöityjä tuotevariaatioita pystytään tuottamaan järkevin kustannuksin lyhyellä toimitusajalla. Odotuksena on, että osa tuotannosta jatkuu kuten ennenkin, mutta osa tulee väistämättä muuttumaan huomattavasti jo lähivuosina. Suunnittelun merkitys tulee korostumaan, sillä suunta on kohti räätälöityjä ja personoituja tuotteita. Digitalisaation myötä valmistuksen odotetaan hajautuvan ja siirtyvän lähemmäksi markkinoita, ja

kysymys onkin, että miten verkostot tulevat rakentumaan ja kuinka materiaalien hankinta tullaan organisoimaan.

Kuva 2 esittää liikevaihdon kasvua vuosina 2006-2018 lisäävän valmistuksen tuotteille ja palveluille.



Kuva 2. Uusin tilasto myytyjen 3D-tulostuslaitteistojen määrästä maailmanlaajuisesti. (Wohlers et al., 2019, s. 164)

Kuvan 2 tuloksista voidaan nähdä, että lisäävän valmistuksen liikevaihdon kasvu on lisääntynyt vuosittain. Tuotteiden ja palveluiden liikevaihto kasvoi vuonna 2018 n. 34 % verrattuna edelliseen vuoteen. Vuonna 2017 ja 2016 vastaavat luvut olivat n. 22 % ja 15 %. Ala onkin kokenut huomattavaa kasvua tällä vuosikymmenellä, liikevaihdon kasvaessa n. 7,4 kertaiseksi viimeisen yhdeksän vuoden aikana.

Metallien lisäävä valmistus (engl. additive manufacturing, AM) eli ns. 3D-tulostus (engl. 3D printing) puhuttaa niin kansainvälisesti kuin kansallisestikin ja tekniikan nähdään tarjoavan useita uusia mahdollisuuksia mm. muodon ja geometrian vapauden puolesta, mutta silti tekniikan yksityiskohdat eivät ole laajemmalle yleisölle välttämättä selvillä, vaikka useita tutkimuksia on tehty kansallisestikin. Tekniikka on lupaava, mutta siinä on vielä sellaisia rajoituksia, jotka tulee ottaa huomioon ennen kuin tehdään pidemmälle meneviä johtopäätöksiä tekniikan mahdollisuuksista ja luotettavuudesta. Ongelma 3D-tulostuksessa ja varsinkin metallien 3D-tulostuksessa usein on se, että aiheen ympärillä pyörii osakseen virheellistä tietoa sekä liian optimistia odotuksia. Metallien 3D-tulostuksella on useita mahdollisuuksia Suomenkin mittakaavassa, mutta tekniikalla on kuitenkin rajoitteensa sekä raja-arvonsa kuten muillakin valmistustekniikoilla.

2 Taustaa metallien 3D-tulostuksesta

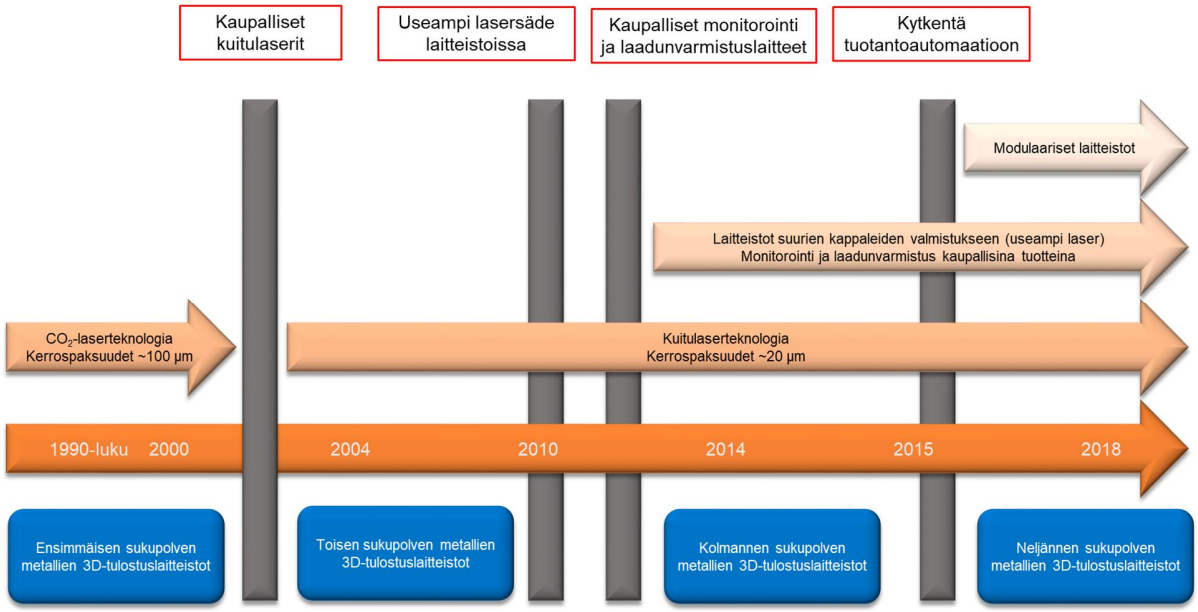
Suurelle yleisölle 3D-tulostus näyttäytyy lehtien otsikoissa ja artikkeleissa esiin pulpahtavana ”muotiaiheena”, vaikka itseasiassa muovien ja metallien 3D-tulostustekniikka on ollut olemassa maailmalla (ja myös Suomessa) 80-luvun puolivälistä alkaen. Muun muassa Yhdysvalloissa ja Saksassa tekniikkaa on käytetty jo vuosia valmistavassa teollisuudessa toiminnallisten osien tuotannossa. Esimerkiksi lentokoneen suihkumoottorien osia ja lääketieteellisiä välineitä tehdään metallijauheesta 3D-tulostuksen avulla. Itse asiassa eräs menetelmä metalliesineiden valmistamiseksi lasersäteen avulla keksittiin Suomessa 90-luvun alussa ja sitä myös edelleen kehitellään täällä, vaikka teollisuudenala lähtikin aikanaan nousuun Saksassa.

Teknologian kehittyessä metallien teollinen 3D-tulostus on ottamassa maailmalla isoja askeleita eteenpäin jopa sarjatuotantomenetelmänä. Komponenttien valmistus nopeutuu tehostettujen menetelmien avulla. Metalliosien 3D-tulostus onkin viime vuosina saavuttanut kehitysasteen, jossa sen teollinen hyödyntämien on mahdollista. Osa esillä olevasta julkisesta keskustelusta ja informaatiosta on valitettavaa hypetystä, mutta teknologian ytimessä on kovia teollisia sovelluksia, joissa tuote, toiminto ja ennen kaikkea soveltuvuus käyttökohteeseen on voitu nostaa aivan uudelle tasolle ja samalla tarjota asiakkaille kilpailuetuja. Metallien tulostamien on tuonut uudenlaisia mahdollisuuksia teollisuuden tarpeisiin. Laitekehitys etenee vauhdilla omaa polkuaan ja osittain rinnakkain syntyy uusia hyödyntämiskohteita, jotka edelleen luovat monialaisia tutkimustarpeita.

Metallien 3D-tulostus mahdollistaa tuotesuunnittelun uudenlaisella tavalla. Muun muassa pyöreät muodot eivät aiheuta lisäkustannuksia samalla tavalla kuin perinteisessä valmistuksessa, jossa on taloudellisesti kannattavampaa noudattaa ”Design for manufacturing” -periaatetta. 3D-tulostus mahdollistaa helpommin ”Manufacturing for design” -ajattelun. Kun tuotesuunnittelu voidaan tehdä tuotteen käyttökohteen asettamien rajoitusten mukaan, siis ei sen mukaan, että mikä on mahdollista tehdä ja mikä ei, voidaan joissain tilanteissa saavuttaa säästöjä tuotteen elinkaaren aikana, vaikka valmistus itsessään olisikin kalliimpaa. Säästetyt kustannukset voivat ilmetä esimerkiksi vähentyneenä polttoaineen, energian tai huollon tarpeena. 3D-tulostuksen mahdollistama tuotesuunnittelu voidaan nähdä ympäristömyönteisenä tuotesuunnitteluna. Ympäristömyönteisen tuotesuunnittelun pohjana on ominaisuuksien parantaminen ja ympäristölle haitallisten ominaisuuksien vähentäminen tuotteen koko elinkaaren aikana. Ympäristömyönteiset arvot saavutetaan, kun hyödynnetään materiaalit tehokkaasti, vähennetään energiankulutusta sekä pidennetään tuotteiden käyttöikää ja hyödynnettävyyttä.

Joustavana menetelmänä metallien 3D-tulostus antaa uuden mahdollisuuden koneenrakentajille ja tuotesuunnittelijoille suunnitella sellaisia sovelluskohteen mukaisia tuotteita, joilla energiaa voidaan säästää runsaasti verrattuna perinteisin menetelmin valmistettuihin osiin ja niiden käyttöön. Tämä energiansäästö voidaan saavuttaa esimerkiksi alentuneina pumppaustarpeina, kun putkiston ja kanaviston kriittiset kohdat on voitu optimoida virtaustilanteen mukaisesti. Energiansäästö voidaan myös saavuttaa valmistamalla kevennettyjä rakenteita, koska metallien 3D-tulostuksen avulla on mahdollista korvata umpimetalliset rakenteet verkko- tai kotelorakenteilla. Esimerkkinä voidaan ajatella suurnopeusmoottoria, jonka kriittisimmät osat voidaan keventää. Tällöin moottorin hyötysuhde paranee merkittävästi pyöritettävää massaa ollessa vähemmän, ja moottorin käyttö vaatii vähemmän energiaa. Energiansäästöä voidaan myös saavuttaa metallien 3D-tulostuksen avulla esimerkiksi valmistamalla lämpöä eristäviä alueita, joiden keskellä menee tarkoin suunnitellut ”lämmönjohtimet”. Tällöin komponentit, jotka käytössä kuumenevat voimakkaasti, voivat toimia paremmalla hyötysuhteella, koska niiden lämpenemistä voidaan hallita optimoidusti.

Metallien 3D-tulostuksen laitteistot voidaan jakaa teknisen kehityksen mukaan neljään eri sukupolveen (kuva 3). Laitteistot ovat vuosien varrella kehittyneet. Tärkein kehitys teknologian kannalta on ollut kuitulaserteknologian kehitys, joka mahdollisti entistä tarkemman ja tehokkaamman työstön. Lisäksi laitteisiin on lisätty useampia lasereita, monitorointijärjestelmiä sekä automaatiota. Tämä kehitys on mahdollistanut laitteistojen tehokkaamman hyödyntämisen teollisuudessa. Lisäävän valmistuksen laitteistot eivät enää ole ”yksinäisiä, eristäytyneitä teknologiasaarekkeita”, vaan ne voidaan kytkeä osaksi tehdasautomaatiota sekä sarjatuotantoa.

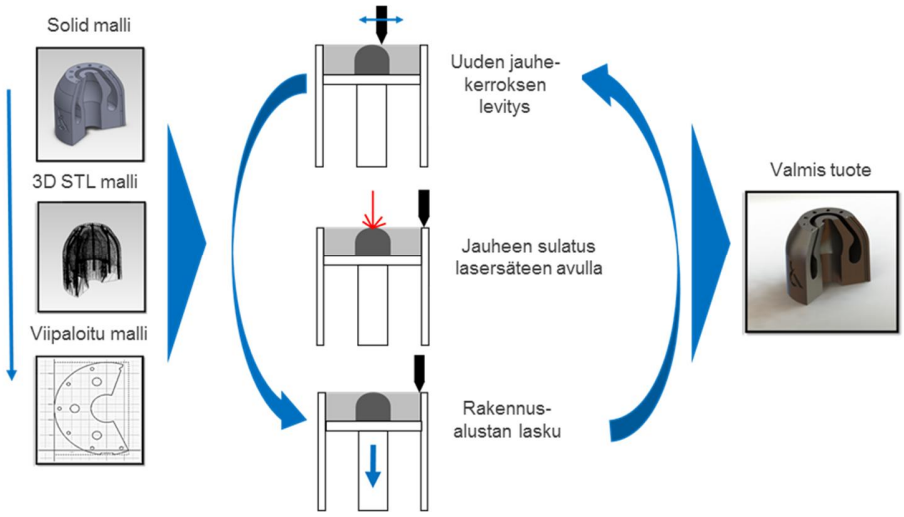


Kuva 3. Metallien 3D-tulostuksen laitteistojen kehitys

Laitteistojen kehityksestä huolimatta tulostusprosessi (jauhepetisulatus) on pysynyt perusperiaatteeltaan hyvin samanlaisena. Laitteistot sisältävät poikkeuksetta laserin, jauheen levittimen sekä rakennusalustan. Tyypillinen metallien 3D-tulostuksen (jauhepetisulatus) laitteisto ja sen perusperiaate on esitetty kuvassa 4.

Työn kulku alkaa tiedoston valmistelujen jälkeen, kun ensimmäinen jauhekerros levitetään jauheenlevittimellä tulostusalustalle. Tämän jälkeen jauhepedin päällä, rakennuskammion yläpuolella, oleva skanneri alkaa ohjata lasersädettä. Säde sulattaa metallipartikkelit toisiinsa käyttämällä materiaalin sulamispisteen yläpuolella. Ensimmäinen kerros sulatetaan kiinni rakennusalustaan.

Kun ensimmäinen kerros on kokonaan sulatettu, lasketaan rakennusalustaa kerrospaksuuden verran alaspäin ja nostetaan jauhesäiliötä sopivasti ylöspäin jolloin ”jauhekakku” nousee myös ylöspäin. Sen jälkeen jauheenlevitin ottaen mukaansa jauhetta ylös nostetusta ”jauhekakusta” ja levittää uuden kerroksen jauhetta edellisen kerroksen päälle. Lasersäde aloittaa työnsä uudestaan. Uusi kerros sulatetaan kiinni alempaan kerrokseen, ja näin kappale alkaa kerros kerrokselta muodostua. Levitystä ja sulatusta toistetaan niin pitkään, kunnes koko osa on saatu muodostettua. Ylimääräinen jauhe voidaan nyt valmistuksen jälkeen kerätä pois kappaleen ympäriltä. Suurin osa tästä jauheesta voidaan kierrättää ja käyttää uudelleen.



Kuva 4. Tyypillisen metallien 3D-tulostuksen laitteiston (jauhepetisulatus) perusperiaate (Scotti et al., 2014)

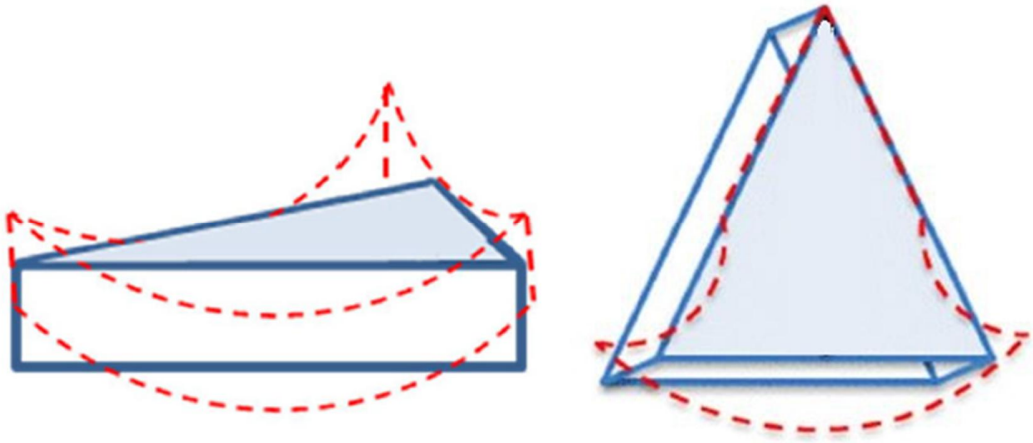
3 Metallien 3D-tulostuksen mahdollisuudet ja rajoitteet

Metallien 3D-tulostus tarjoaa mahdollisuuden valmistaa rakenteita, joiden kaltaisiin ei pystytä perinteisin valmistusmenetelmin. Erityisesti 3D-tulostustekniikat, joilla tehdään osia metallista, ovat teollisuudessa suuria kiinnostuksen kohteita, koska nämä tekniikat mahdollistavat korkean suorituskyvyn lopputuotteiden tuotannon. Metallien jauhepetisulatuksella pystytään valmistamaan vahvoja ja korkealaatuisia monimutkaisia kappaleita, joilla on korkean suorituskyky. Suurten mahdollisuuksien lisäksi metallien 3D-tulostus tekniikoilla on myös haasteita. (Wohlers et al., 2018, s. 149, s. 173–174)

Jauhepetisulatuksella on rajoitteensa. Jauhepetisulatuksessa lämpöä tuodaan sykleittäin valmistettavaan kappaleeseen, mikä aiheuttaa kappaleeseen suuria jännitystiloja. Syklinen lämmöntuonti saa aikaan kappaleen peräkkäisiä kuumenemisia ja jäähtymisiä, joiden myötä kappale pyrkii laajenemaan ja kutistumaan vuorotellen. Peräkkäiset kuumenemiset ja jäähtymiset muodostavat kappaleeseen jännitystiloja, jotka saattavat nousta suuremmiksi kuin materiaalin myötölujuus, mikä aiheuttaa kappaleessa muodonmuutoksia tai murtumia. (Yang et al., 2017, s. 599; Simson et al., 2017, s. 184–185). Mitä enemmän lämpöä tuodaan kappaleeseen, sitä enemmän kappaleeseen muodostuu jäännösjännityksiä. (Mercelis & Kruth, 2006, s. 259)

Jauhepetisulatuksessa lämpö tuodaan kappaleen yläpintaan, koska rakennus tapahtuu kerros kerrokselta. Kappaleen ylimpään kerrokseen tuotu lämpö siirtyy kappaletta ja sen tukirakenteita pitkin alaspäin rakennusalustaan. Kun lämpöä tuodaan jatkuvasti valmistettavaan kappaleeseen rakennuksen ajan, kappaleeseen kerääntyy lämpöä ja sen lämpötila nousee. (Yang & Wang, 2008, s. 1066). Kappaleen kohonnut lämpötila alentaa myötölujuutta, mikä herkistää kappaleen muodonmuutokselle. (Kruth et al., 2004, s. 617) Muodonmuutokset voivat tehdä kappaleen käyttökelvottomaksi kohteessaan.

Rakennuksen jälkeen kappaleessa on jäännösjännityksiä syklisen lämmöntuonnin takia. Kappaleen pintaan jää vetojäännösjännitys ja kappaleen sisäosaan puristusjäännösjännitys. (Yang et al., 2017, s. 611). Nämä jäännösjännitykset pyrkivät muodostamaan kappaleeseen muodonmuutoksen, jossa kappaleen reuna-alueet taipuvat ylöspäin rakennusalustasta. (Simson et al., 2017, s. 184–185). Tämän takia kappaleen asennolla rakennusalustalla on merkitystä kappaleeseen mahdollisesti kohdistuvan muodonmuutoksen suuruuteen ja sijaintiin kappaleessa. Kuva 5 havainnollistaa muodonmuutosta eräiden pysty- ja vaakatasossa rakennettujen kappaleiden kohdalla.



Kuva 5. Havainnollistettu vaaka- ja pystyasennossa valmistetun metallikappaleen muodonmuutos jauhepetisulatuksessa. (Wu et al., 2014, s. 6264)

Kuten kuvasta 5 nähdään, kappaleen rakennusasennolla on vaikutus siihen mahdollisesti muodostuvaan muodonmuutokseen. Kappaleen asentoa rakennusalustalla ei kuitenkaan kannata valita pelkästään muodonmuutosten riskin mukaan, sillä rakennusasennolla on moninaisia vaikutuksia. Kappaleilla on vaihtelevia mekaanisia ominaisuuksia niiden rakennusasennon mukaan, sillä kappaleet valmistetaan kerros kerrokselta. (Wohlers et al., 2018, s. 188–189). Kappaleiden rakennusasento vaikuttaa niiden vetolujuus ja pinnankarheus arvoihin. Vaakasuunnassa rakennetulla kappaleella on suurempi vetolujuus pituussuuntaan kuin pystysuunnassa rakennetulla. Kaarevilla pinnoilla on karheampi pinnanlaatu verrattuna suoriin pintoihin porrasefektin takia. (EOS, 2018, s. 3–4). Kappaleen rakennusasennolla on vaikutus myös rakennusaikaan ja tukirakenteiden tarpeeseen. Pystyasennossa rakennetut kappaleet tarvitsevat enemmän aikaa uusien jauhekerrosten levittämiseen, koska kerroksia on enemmän. Tukirakenteilla kiinnitetään kappale rakennusalustaan ja kappaleen ulokkeet tuetaan. Koska kappale voi eri asennoissa vaatia erilaisia kiinnitys- ja tukiratkaisuja, sen asennolla on vaikutus tukirakenteiden määrään ja sijaintiin. Myös rakennuksen kapasiteettiin voidaan vaikuttaa valitsemalla sellainen rakennusasento, joka mahdollistaa mahdollisimman monen kappaleen asettelun samalle rakennusalustalle.

Vaikka syklinen lämmöntuonti aiheuttaa suuria jännityksiä kappaleisiin jauhepetisulatuksessa, niistä johtuvia ongelmia voidaan lieventää erilaisin keinoin. Rakennusalustan esilämmityksellä voidaan pienentää jäännösjännitysten suuruutta, koska lämpötilavaihtelut kappaleessa jäävät pienemmiksi. (Mercelis & Kruth, 2006, s. 264). Myös tukirakenteilla on merkittävä rooli muodonmuutosten vastustamisessa. Suurempi tukirakenteiden määrällä saadaan suurempi tilavuus ja tehokkaampi lämmönsiirto pois itse kappaleesta ja se myös kiinnittää kappaleen vahvemmin rakennusalustaan. (Liu et al., 2016, s. 654). Tukirakenteet on

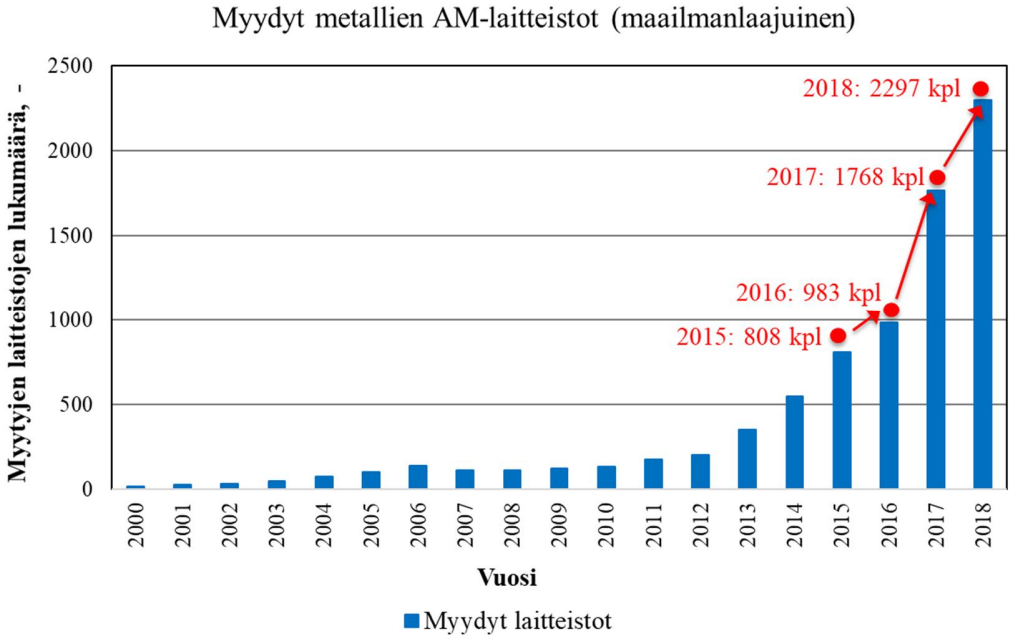
kuitenkin poistettava kappaleesta rakennuksen jälkeen, mikä voi olla hankalaa ja kallista toteuttaa, mikä puolestaan rajoittaa niiden liiallista käyttöä. Jäännösjännityksiä voidaan alentaa myös jännityksenpoistohehkutuksella, joka suoritetaan rakennuksen jälkeen, kun osat ovat vielä kiinni rakennusalustassa. (Wohlers et al., 2018, s. 190, s. 212)

4 Metallien 3D-tulostus maailmalla

Mielenkiinto metallien 3D-tulostusta kohtaan on kasvanut viimeisten viiden vuoden aikana. Yritykset maailmalla alkavat hiljalleen hahmottaa, mitä hyötyjä ja mahdollisuuksia 3D-tulostuksen menetelmät tarjoavat. 3D-tulostus ei ole enää teknologia, jota käyttävät vain tutkimusryhmät ja pieni rajattu määrä yrityksiä, vaan 3D-tulostus on kasvanut varteenotettavaksi valmistusteknologiaksi. Metallien 3D-tulostusta voidaan käyttää myös sarjatuotannossa. Esimerkiksi Ruotsissa, Siemensin tehtaalla Finspångissa, valmistetaan sarjatuotantona erästä kaasuturbiinin poltinta (kuva 6). Tämä osa on perinteisesti valmistettu useasta kymmenestä eri osasta ja sen valmistamiseen on kulunut eri työvaiheiden takia useita kuukausia. Lisäävän valmistuksen avulla tämän polttimen valmistus kestää vain kahdeksan päivää. Lisäksi uudelleensuunnittelulla poltin painaa vähemmän kuin aiemmin, ja sillä on parempi hyötysuhde, kun polttimen kriittisiin kohtiin on saatu sisäisiä jäähdytyskanavia. Tällaiset suhteellisen isot erikoiskomponentit saavat valtavasti huomioita maailmalla, mikä väistämättä on johtanut esimerkiksi ruotsalaisen AM-kysynnän ja -viennin kasvamiseen.

Kuva 6. 3D-tulostamalla valmistetut kaasuturbiinin polttimet. (Anon., 2016)

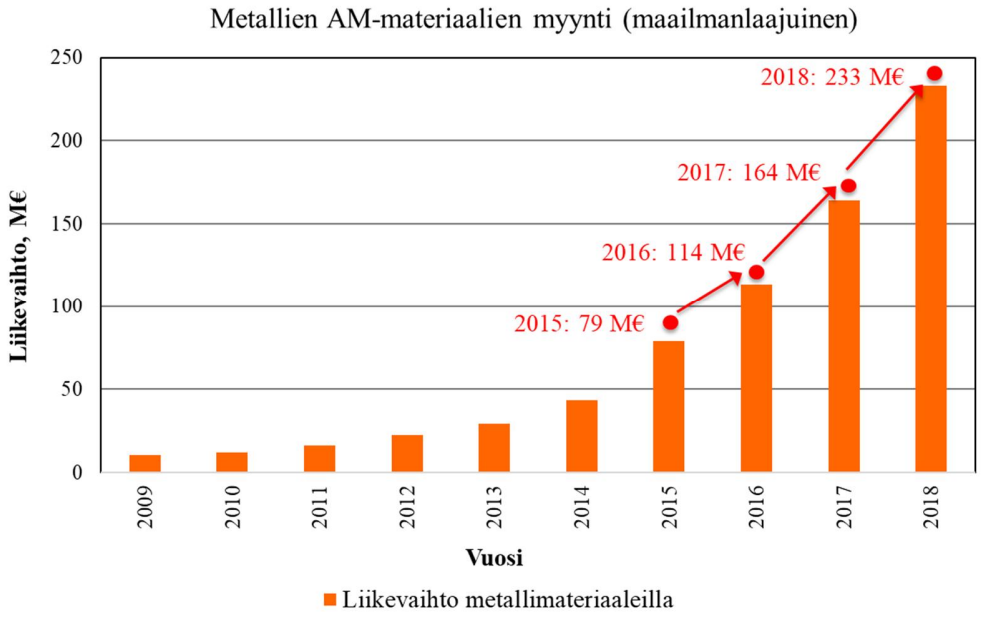
Metallien 3D-tulostukseen panostetaan maailmalla ja yhä useammilla teollisuuden aloilla sillä tekniikan nähdään tuovan merkittäviä etuja perinteiseen valmistukseen verrattuna. Metallien 3D-tulostuslaitteiden myynti kasvoi esimerkiksi 80 % vuonna 2017, mikä on suurin kasvuluku 3D-tulostuksen alalla sitten vuoden 2000. Lisäävän valmistuksen vuosittainen kasvu on esitelty kuvassa 7.



Kuva 7. Uusin tilasto myytyjen metallien 3D-tulostuslaitteistojen määrästä maailmanlaajuisesti. (Wohlers et al., 2019, s. 169)

Kuvasta 7 voidaan havaita myytyjen laitteistojen määrän kasvu, joka on johtanut laitteistojen määrän moninkertaistumiseen maailmalla tällä vuosikymmenellä. Vanhojen laitevalmistajien lisäksi markkinoille on tullut uusia toimijoita, jotka tarjoavat uudenlaisia laitteistoratkaisuja. Laitteistojen kehittyminen sekä uusien metallitulostustekniikoiden esiintulo ovat mahdollistaneet teknologian hyödyntämisen suuremmassa mittakaavassa.

Kuvassa 8 esitetään metallisten tulostusmateriaalien myyntiä. Materiaalien myynnin kasvu on linjassa palveluiden ja tuotteiden liikevaihdon, sekä laitteistomyynnin kasvujen kanssa.



Kuva 8. Uusin tilasto metallien 3D-tulostuksessa käytettyjen materiaalien myynnistä maailmanlaajuisesti. (Wohlers et al., 2019, s. 179)

Kuten kuvasta 8 voidaan havaita, myös metallisten tulostusmateriaalien myynti on maailmalla moninkertaistunut. Tämä kertoo siitä, että metallista 3D-tulostamalla valmistettuja osia hyödynnetään koko ajan enenevissä määrin ja tarve niille kasvaa vuosi vuodelta. Markkinoiden kasvaessa laitteistojen ja materiaalien myynti on kasvanut samoin, jotta lisääntyneeseen tarpeeseen on voitu vastata.

Metallien 3D-tulostus on globaalisti kasvava sekä kehittyvä ala. Suomen ongelmana on pitkään ollut se, että täällä tullaan globaalin 3D-tulostuksen kehityksen ja kasvun tahdista monta vuotta jäljessä. Tämä selittyy pääasiassa sillä, että 3D-tulostuksen ajava voima esimerkiksi Saksassa on ollut lentokone- ja autoteollisuus. 3D-tulostuksella valmistetaan tyypillisesti pieniä ja monimutkaisia kappaleita, joille on ollut kysyntää lentokone- sekä autoteollisuudessa. Suomalainen teollisuus taas on puolestaan keskittynyt perinteisesti suurien tuotteiden valmistamiseen, jossa tarve tällaisille pienehköille osille on pienempi. 3D-tulostustekniikat tosin kehittyvät jatkuvasti ja yhä isompia kappaleita voidaan valmistaa yhä nopeammin. 3D-tulostuksen tutkimus ja kehitys ovat myös voimakkaita, ja esimerkiksi erilaisia liitostekniikoita (kuten 3D-tulostettujen kappaleiden hitsattavuutta) tutkitaan koko ajan, mikä avaa mahdollisuuksia liittää pienehköjä kappaleita osaksi isompaa kokonaisuutta. Suomessa ollaan varsinkin vuosien 2018-2019 aikana varsin laajasti herätty tämän tekniikan mahdollisuuksiin, ja niin yritys- kuin tutkimuspuolellakin on tapahtunut tässä asiassa edistystä.

Yrityksiltä kuitenkin puuttuu globaalisti vielä tietoa menetelmistä, sekä niiden käytöstä ja hyödyntämisestä omiin tarpeisiin. Tämä tiedon puute rajoittaa mahdollisuuksia yhdistää 3D-tulostusta yritysten strategisiin visioihin. Suurimalla osaa yrityksistä on vain vähän tai ei ollenkaan kokemusta 3D-tulostuksesta, ja sen tarjoamia mahdollisuuksia vasta pohditaan. Suurimmat syyt kokemuksen puutteeseen ovat tiedon puute teknologioista sekä osaamisen puute. (Müller & Karevska, 2016, s. 4–6; s. 17–20)

EY:n (aiemmin Ernst & Young, konsulttiyhtiö) maailmanlaajuisessa selvityksessä tutkittiin 3D-tulostuksen tilannetta maailmalla haastattelemalla yli 900 yritystä kahdestatoista eri maasta. Tutkimuksen perusteella 24 % yrityksistä näkivät 3D-tulostuksen tärkeänä ja strategisena aiheena itselleen. Lisäksi 3D-tulostuksesta oli kokemusta noin neljänneksellä yrityksistä. Lisäksi 12 % yrityksistä oli ajatellut hyödyntävänsä sitä lähitulevaisuudessa. Eniten 3D-tulostusteknologioita hyödynnetään läntisessä Euroopassa, etenkin Saksassa. USA:ssa, Kiinassa ja Etelä-Koreassa teknologiaa hyödynnetään paljon. (Müller & Karevska, 2016, s. 6)

Suurelle osalle maailman yrityksistä 3D-tulostus on vieläkin prototyyppien valmistusmenetelmä. 3D-tulostuksen kasvupotentiaali liittyy kuitenkin valmiiden tuotteiden valmistukseen. Eniten 3D-tulostusta tähän tarkoitukseen käytetään auto-, lento- ja lääketeollisuudessa, joiden yrityksistä noin kolmannes hyödyntää 3D-tulostusta lopputuotteiden valmistamiseen. 3D-tulostuksella saavutettava osien keventyminen ja funktionaalisuus korostuvat juuri näillä aloilla. Lopputuotteiden valmistuksen uskotaan yrityksissä kasvavan huomattavasti lähitulevaisuudessa. Lisäksi 3D-tulostusta hyödynnetään työkalujen valmistamiseen, johon sitä käyttää noin 20 % yrityksistä. (Müller ja Karevska, 2018, s. 8–11)

Hyvänä esimerkkinä teknologian tärkeästä roolista autoteollisuudessa ja lopputuotteiden valmistamisessa toimii Volkswagen, joka avaa 3D-tulostuskeskuksen Saksan Wolfsburgiin. Keskuksessa (3100 m^2) käytetään viimeisintä 3D-tulostusteknologiaa. Keskuksessa Volkswagen selvittää mm. sideaineen ruiskutus -menetelmän mahdollisuuksia prototyyppien ja työkalujen, sekä myöhemmin lopputuotteiden valmistuksessa. Volkswagen odottaakin pystyvänsä hyödyntämään teknologiaa tuotteissaan seuraavan 2–3 vuoden kuluessa. Volkswagen on jo toinen saksalainen autovalmistaja, joka avaa oman 3D-tulostuskeskuksensa. BMW kertoi vastaavista suunnitelmistaan aikaisemmin vuonna 2018. Tämän lisäksi esimerkiksi Audi ja Porsche ovat jo hyödyntäneet 3D-tulostettuja osia tuotannossaan.

Maailmalla avaruusteollisuus on hyödyntänyt metallien 3D-tulostusta jo pitkään. Viime aikoina teknologia on mahdollistanut innovaatioita rakettimoottoreihin oikeastaan ensimmäistä kertaa niiden keksimisen jälkeen. 3D-tulostamalla rakettimoottoreista saadaan tehokkaampia, esimerkiksi tehostamalla polttokammion jäähdytystä ja vähentämällä sen painoa. Tästä syystä avaruusteollisuuden saralle on auennut aivan uudenlaisia liiketoimintamahdollisuuksia. Alalle on lähivuosina ilmaantunut runsaasti startup- -yrityksiä, joiden toiminta perustuu lähes täysin metallien 3D-tulostuken tarjoamiin mahdollisuuksiin. (Wright, 2019)

Eniten käytetty 3D-tulostuksen materiaaliryhmä maailmalla on polymeerit, joita käyttää reilu puolet yrityksistä. Toisena on metallit, joita käyttää hieman alle puolet yrityksistä. Alle 5 % yrityksistä käyttää muita materiaaleja, kuten keraameja. Yli puolet yrityksistä näkivät kuitenkin metallit mahdollisuutena hyödyntää 3D-tulostusta. (Müller ja Karevska, 2018, s. 13–14)

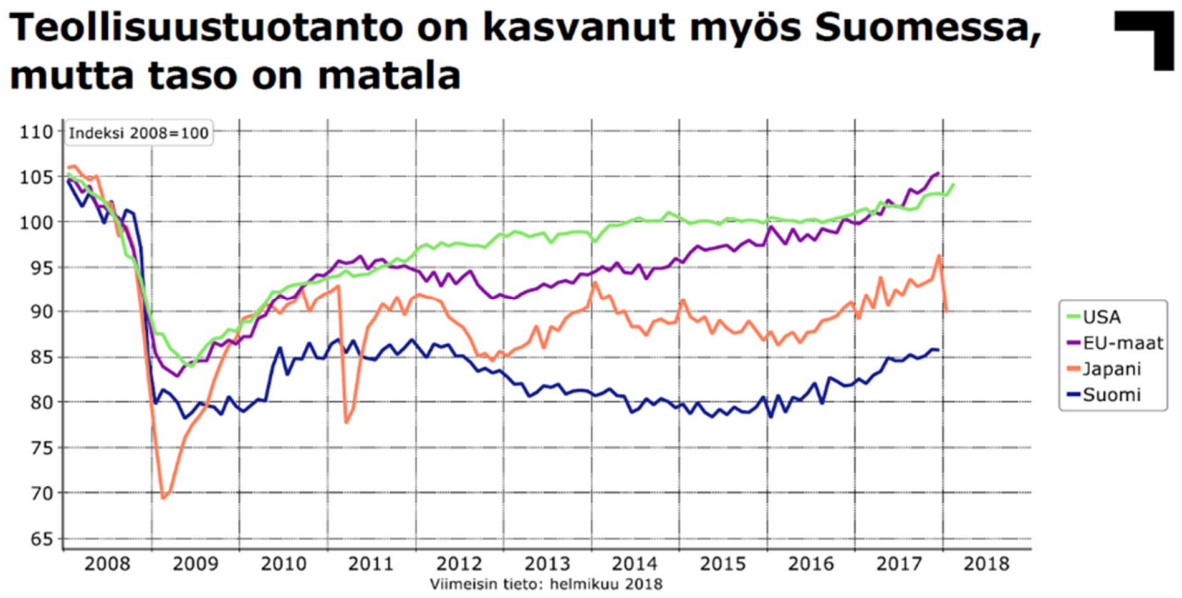
Samaisen tutkimuksen mukaan (Müller & Karevska, 2016) yli 50 % yrityksistä näki, että 3D-tulostuksesta tulee olemaan heille etua. Suurimpina etuina nähtiin tuotteiden laadun parantaminen, osien ja tuotteiden kustomointi sekä monimutkaisten osien ja tuotteiden valmistaminen. Näiden avulla yritykset uskoivat saavansa kilpailuetua, kehittävänsä uusia toimintamalleja ja parantavansa toimitusketjuaan. (Müller ja Karevska, 2018, s. 28–30)

3D-tulostuksen uusimpina trendeinä näkyvät selkeästi automaatio ja teollistuminen koneiden rakennuskammion ja -nopeuden kasvun myötä. Teollistumisen kannalta tärkeitä ominaisuuksia ovat muun muassa automatisoidut jauheenkäsittelyasemat ja jälkityöstöasemat. Automaation myötä myös koneiden käyttäjäystävällisyys lisääntyy. Lisäksi parannukset olemassa oleviin tulostustekniikoihin lisäävät

entisestään suunnittelun vapautta ja tulostetuista osista saatavia hyötyjä. Myös ohjelmistojen osalta kehitystä on tapahtunut huomattavasti. Esimerkiksi tietokoneella luotu prosessisimulaatio ennakoi tulostuksen onnistumisen ja auttaa osien suunnittelussa sekä niiden asettelussa rakennusalustalle. Tulostettavien osien laatua pystytään valvomaan käyttämällä prosessin monitorointiohjelmia, jotka tarkkailevat osan valmistuksen aikana mahdollisesti tapahtuvia virheitä tai poikkeuksia.

5 3D-tulostus ja metallien 3D-tulostus Suomessa

Teollisuustuotanto on myös kasvanut globaalisti lähes vuotta 2008 edeltäneelle tasolle (kuva 9). Suomen kasvu on kuitenkin ollut hyvin hidasta, eikä Suomen finanssikriisin jälkeinen kasvu ole ollut yhtä voimakasta, kuin muualla maailmassa. (Teknologiateollisuus, 2018)



Kuva 9. Teollisuustuotannon globaali ja kotimainen kasvu. (Teknologiateollisuus, 2018)

Keskeisimmät kilpailijamaat ovat ohittaneet Suomen tuottavuudessa. Suomen tuottavuus kohosi merkittävästi vuoteen 2007 asti, mutta tämän jälkeen tuottavuuskehitys on ollut heikkoa. Talouskasvua voidaan lisätä tuottavuutta kasvattamalla tai siirtämällä tuotantoa uusille ja paremmin kannattaville aloille. Teollisuuden tuottavuuden kasvu on ollut viime vuosina nopeampaa kuin muilla aloilla. (Elinkeinoelämän keskusliitto, 2017)

Chekurov (2014) selvitti yleisesti ottaen 3D-tulostuksen tarpeita ja käytäntöjä suomalaisessa teollisuudessa. Tutkimuksessa haastateltiin kahdeksaa yritystä eri teollisuuden aloilta. Näiden tulosten perusteella kartoitettiin 3D-tulostusteknologiaan liittyviä tarpeita Suomessa. Tutkimuksen tuloksena todettiin prototyyppien valmistamisen olevan selkeästi suurin 3D-tulostuksen käyttökohde. Myös muottien ja työkalujen sekä valmiiden kappaleiden valmistamiselle oli tarvetta. Osalla yrityksistä oli omaa 3D-tulostuslaitteistoa, tosin pääasiassa vain muoveille soveltuvaa. Tämä ei kuitenkaan poissulkenut tarvetta

alihankinnalle. Alihankinalle todettiin olevan tarvetta etenkin silloin kun omien laitteiden ominaisuudet eivät riitä tarvittavien ominaisuuksien tuottamiseen. Tärkeimpinä ominaisuuksina 3D-tulostukselle todettiin tutkimuksessa olevan valmistamisen nopeus ja tarkkuus. 3D-tulostukseen liittyvänä ongelmana koettiin erityisesti laadulliset tekijät, kuten pinnanlaatu. Laadun koettiin olevan rajoittava tekijä 3D-tulostuksen käytössä. (Chekurov, 2014, s. 36–65)

Korpela (2019) selvitti suomalaisten metalli- ja konepajateollisuuden materiaalitarpeita 3D-tulostuksen näkökulmasta. Tutkimus keskittyi teräksiin ja alumiineihin ja siinä haastateltiin 78 yritystä. Tutkimuksen mukaan 18 % vastatuista materiaaleista oli saatavilla jauhepetisulatuslaitteistojen laitevalmistajien materiaalivalikoimissa. Vastausten materiaalitarpeet jakautuivat seuraavasti: 78 % teräksiä, 16 % alumiiniseoksia ja loput muita metallimateriaaleja. Yrityksistä 82 % ei ollut koskaan kokeillut metallien 3D-tulostamista omalla laitteella tai alihankintana. Näistä 51 % ilmoitti syyksi, ettei ole ollut tarvetta ja 40 % ilmoitti tietotaidon olevan puutteellista. (Korpela, 2019, s. 59–61)

Pohjois-Savon LEKA-tutkimusprojektissa (2013) tutkittiin myös yleisesti 3D-tulostuksen vaikutusta ja tarvetta tällä alueella. Raportissa haastateltiin pohjoissavolaisia yrityksiä ja tutkittiin näiden näkemyksiä 3D-tulostuksen mahdollisuuksista. Tutkimuksen perusteella yrityksillä ei ole mahdollisuutta tai halua lähteä itsenäisesti kehittämään 3D-tulostusta omaan käyttöön. Teknologiasta oli kuitenkin kiinnostuttu ja alihankinta koettiin hyvänä vaihtoehtona. 3D-tulostukseen liittyviä tarpeita näillä yrityksillä oli muun muassa prototyyppien valmistukseen, ominaisuuksien optimointiin ja komponenttien räätälöintiin liittyvien ongelmien saralla. Lisäksi yrityksissä koettiin 3D-tulostuksen muuttavan suunnittelun lähestymistapoja, ja lisäävän uusien innovatiivisien ratkaisujen syntymistä. Tämän kaiken koettiin olevan mahdollisesti hyödyllistä yrityksen toiminnalle. Honkasen ja Kutvosen tutkimuksessa todettiin yritysten olevan huolissaan teknologian kustannustasosta ja valmistettujen tuotteiden ominaisuuksista. Erityisen haasteellisena koettiin valmistettujen komponenttien lujuusominaisuudet, pinnanlaatu ja vaadittu jälkikäsittely. (Honkanen & Kutvonen, 2013, s. 18)

Hanhelan tekemässä tutkimuksessa (2015) tutkittiin 3D-tulostuksen käyttöä pirkanmaalaisissa yrityksissä. Tutkimuksessa mukana oli muovi- ja metallitulostus. 3D-tulostettuja kappaleita yritykset käyttivät esimerkiksi esittely- ja mainosmalleina, sekä prototyyppeinä. Yritykset kokivat tulevaisuudessa tarpeelliseksi lopputuotteiden valmistamisen lisäävillä valmistusmenetelmillä. Yrityksillä oli tutkimuksen mukaan tarvetta myös 3D-tulostuksen osaamiselle ja koulutukselle. Suurimpina tarpeina koettiin laitteiden käyttöön liittyvä osaaminen, sekä suunnitteluosaaminen. Tulevaisuudessa yritykset kertoivat tarvitsevansa metallimateriaalien ja lopputuotteiden 3D-tulostamista. (Hanhela, 2015, s. 21–27)

Hämäläisen ja Ojalan tutkimuksessa (2015) haastateltiin kahdeksaa suomalaista yritystä. Tutkimuksessa todettiin, että suurin osa yrityksistä käyttää yleisesti ottaen 3D-tulostusta erityisesti prototyyppien valmistukseen, mutta myös lopputuotteiden valmistamiseen. Osalla yrityksistä ei ollut kokemusta 3D-tulostuksesta, mutta näilläkin yrityksillä oli mielenkiintoa ja mahdollista tarvetta teknologiaan liittyen. Yritykset kokivat mahdollisesti hyötyvänsä 3D-tulostuksesta uusien ja räätälöityjen osien, varaosien ja prototyyppien valmistuksessa. Myös uudet suunnittelumahdollisuudet ja ympäristöasiat koettiin hyödyllisiksi. (Hämäläinen & Ojala, 2015, s. 5–7)

PK-sektorin yrityksillä on yhä enemmän tarvetta muovien ja metallien 3D-tulostukselle suorassa tuotantokäytössä. Tähän vaaditaan kuitenkin laadukkaita 3D-tulostuslaitteita, sekä suunnitteluosaamista. Metallien 3D-tulostusta tarjoaville palveluntarjoajille on tarvetta. Suomessa on tällä hetkellä viisi tiedossa olevaa palveluntarjoajaa, jotka omistavat yhden tai useamman metallitulostimen ja tekevät puhtaasti

palveluntarjontaa. Näiden lisäksi muutama muu yritys tulostaa kappaleita omalla koneella, mutta pääosin omaa tuotantoaan varten. (Chekurov et al., 2017, s. 3, s. 24–27; Korpela, 2019, s. 24)

Turussa laitevalmistajan tutkimuskeskuksessa on yli 20 metallien 3D-tulostinta sekä n. 65 henkilöä töissä. Yritys keskittyy pääasiassa metallien 3D-tulostuksen materiaalien ja prosessien kehittämiseen, eikä tarjoa metallien 3D-tulostusta palveluliiketoimintana.

Suomalaisessa teollisuudessa käytetään sellaisia metallimateriaaleja, joita ei ole perinteisesti käytetty metallien 3D-tulostuksessa. Suomen teollisuus käyttää metalleista selvästi eniten niukkaseosteisia teräksiä. Kuparia käytetään terästen ja alumiinin jälkeen eniten. (Melanen et al., 2000, s. 19). Myös Hirvosen tutkimuksen perusteella osa yrityksistä valmistaa metallisia komponentteja niukkaseosteisista teräksistä, valuraudasta ja kuparista (Hirvonen, 2018, s. 22). Tällä hetkellä jauhepetisulatuksen materiaalivalikoimasta ei löydy näitä materiaaleja, joskin näitä materiaaleja voidaan tehdä esimerkiksi suorakerrostuksen (direct energy deposition) sekä sideaineen suihkutuksen (binder jetting) avulla. Näille metalleille on suomalaisessa teollisuudessa myös markkinoita.

Esimerkki suomalaisesta yrityksestä, joka käyttää metallien 3D-tulostusta jo nyt lopputuotteiden valmistuksessa on Metso. Tekniikka & Talous-lehti uutisoi hiljattain Metson toimittaneen metallien 3D-tulostuksella valmistettuja komponentteja asiakkailleen, koska valmistustekniikalla saavutetaan huomattavasti parempia muotoja komponenttien toiminnallisuuden kannalta.

Myös suomalainen Raute hyödyntää 3D-tulostusta tuotannossaan. Raute hyödyntää teknologiaa lopputuotteiden ja työkalujen valmistukseen ja tuotannossa onkin jo n. 40 3D-tulostettavaa osaa. Lisäksi yritys etsii aktiivisesti mahdollisia hyödyntämiskohteita ja panostaa omien suunnittelijoiden koulutukseen, jotta 3D-tulostuksen mahdollisuudet ja rajoitteet voidaan ymmärtää. (Kousa, 2019)

Suomalaisen teollisuuden tarpeisiin on 3D-tulostettavia osia suunnittelut muun muassa insinööritalo Etteplan. Esimerkki tästä on suomalaiselle yritykselle suunniteltu työkalu. Työkaluun kohdistuu käytössä suuria staattisia kuormia ja sen suunnittelussa on hyödynnetty topologiaoptimointia. Tästä syystä osa on muun muassa keveämpi kuin perinteisesti valmistettu. (Karjalainen, 2019)

Teknologiateollisuus käyttää Suomessa tuotannossa 5,4 miljardin euron arvosta terästuotteita, värimetalleja ja valuja (Anon., 2018a). Suomalainen teollisuus tuottaa selvästi eniten tuotteita teräksestä ja raudasta, mutta myös kuparista ja alumiinista. Tilastokeskuksen mukaan raudan ja teräksen, sekä niistä valmistettujen tarvikkeiden myydyn tuotannon arvo vuonna 2016 oli 11,1 miljardia euroa. Kuparin ja alumiinin vastaavat arvot olivat 1,4 ja 0,6 miljardia euroa. Teollisuus käytti vuonna 2016 noin 2835 milj. kg rautaa ja terästä, 174 milj. kg kuparia, 152 milj. kg alumiinia ja 280 milj. kg muita metalleja. (Anon., 2018b; Anon., 2018c)

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n teettämän tutkimuksen mukaan yleisesti 3D-tulostuksessa käytettäviä materiaaleja tulisi kehittää. Kaikki 3D-tulostuksessa nykyisin käytetyt materiaalit eivät täytä teollisuuden sovellutuksissa vaadittavia kriteerejä. Tutkimuksessa selvitettiin suomalaisen teollisuuden tällä hetkellä käyttämien metalliseosten soveltuvuutta 3D-tulostukseen ja tehtiin materiaalikehitystä parempien materiaalien käyttöönottamiseksi. (Jokinen & Riipinen, 2016, s. 4–29)

Yhteenvetona voidaan sanoa, että tällä hetkellä suurin osa Suomen 3D-tulostusta hyödyntävistä yrityksistä käyttää sitä prototyyppien valmistukseen. Suomalaisella teollisuudella on kartoitusten perusteella yhä enemmän tarvetta lopputuotteiden ja varaosien 3D-tulostukselle. Suurien osien ja optimoitujen osien 3D-tulostukselle on tarvetta. Erityistä tarvetta on metallien 3D-tulostukselle. Tähän vaaditaan laadukkaita 3D-

tulostuslaitteita, -materiaaleja ja -osaamista. Suomen teollisuudella on myös tarvetta 3D-tulostusteknologiaan liittyvälle osaamiselle ja koulutukselle, sekä 3D-tulostusta tarjoaville palveluntarjoajille, jotka pystyvät tuottamaan ominaisuuksiltaan tarpeeksi laadukkaita osia.

Suomalaisen teollisuuden tuntemus 3D-tulostuksesta on yleensä ottaen vähäistä, eikä teknologian mahdollisuuksia osata tämän takia nähdä. Tämä tilanne tosin on merkittävästi parantunut vuosien 2018-19 aikana, kun koulutusta aiheesta on tarjottu erilaisten instanssien järjestämänä.

Tällä hetkellä tuotteita suunnitellaan perinteisten valmistusmenetelmien rajoitukset huomioon ottaen. Jotta metallien 3D-tulotusta voidaan hyödyntää, tarvitaan suunnitteluosaamista. Yrityksillä on tarvetta asiantuntemukselle, jotta 3D-tulostuksen mahdollisuudet, sovellukset ja rajoitteet voidaan ymmärtää. Suurin osa suomalaisista teollisuusyrityksistä ei halua panostaa omaan 3D-tulostamiseen, joten mahdollisen palveluntarjoajan tulisi tarjota myös suunnittelua ja asiantuntemusta.

6 Näkökohtia metallien 3D-tulostuksen tutkimukselle

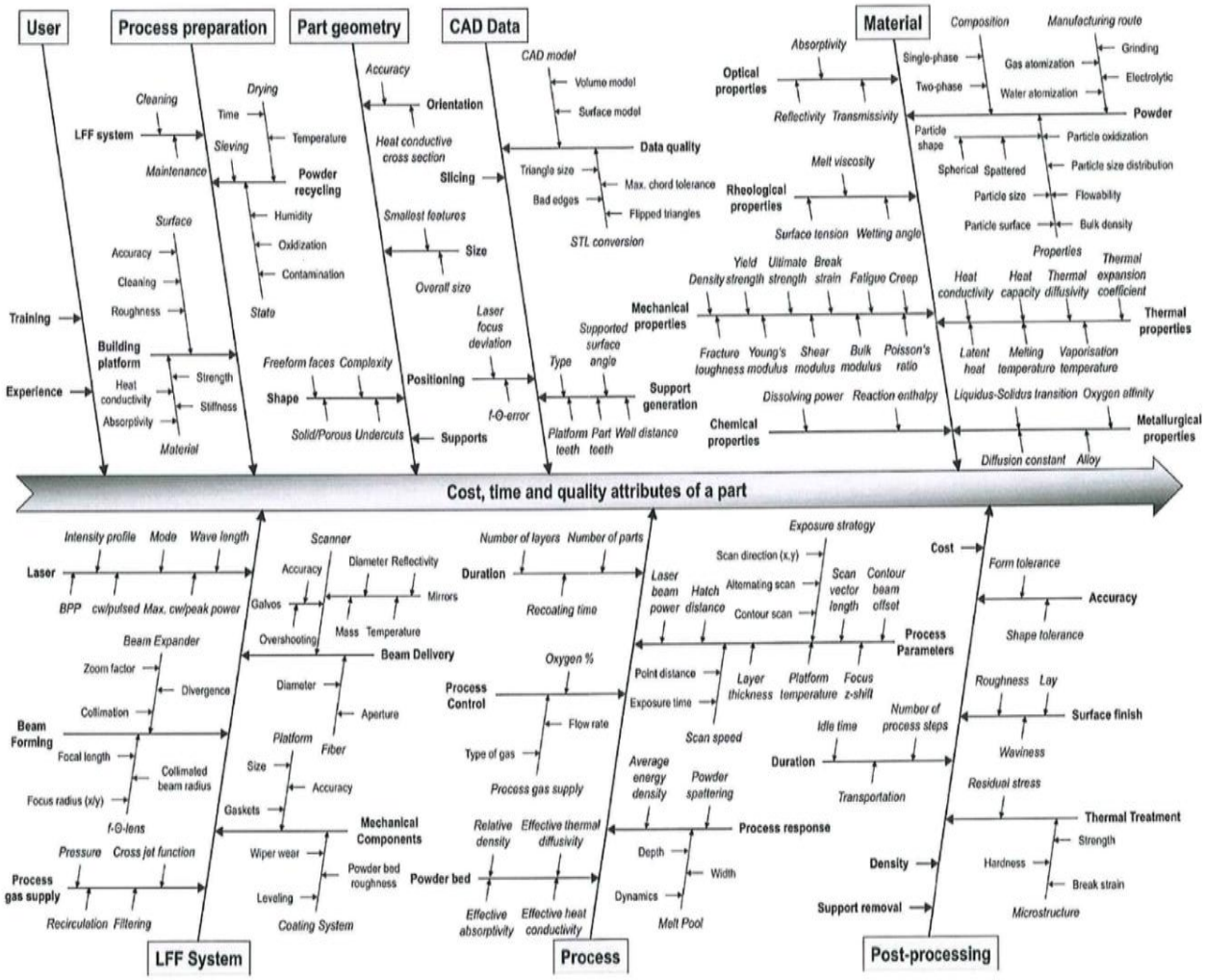
6.1 Teknologialähtöiset perusteet

Kuten kuvasta 7 voidaan nähdä, metallien 3D-tulostuksen kasvu on ollut kiihtyvässä vauhdissa viime vuosina. Kuvassa 7 esitetty myytyjen laitteistojen kasvu vuoden 2016 ja 2017 välillä oli 80 %, mikä ylitti kaikki ennusteet (45 %). (Burris, 2017) Hyvin tyypillistä 3D-tulostukselle onkin se, että ennusteet ovat olleet pienempiä kuin todellinen kasvu.

Metallien 3D-tulostus tunnetaan myös hyvin haastavana prosessina, jossa optimaaliset parametrien arvot ovat hyvin kapealla alueella. Tässä prosessissa on yli 100 muuttujaa, mikä tekee siitä äärimmäisen haastavan hallita ja ymmärtää perusteellisesti. Kuvassa 10 on havainnollistettu tätä asiaa. (Burris, 2017).

Kuten kuvasta 10 nähdään, metallien 3D-tulostus on huomattavan paljon monimutkaisempi valmistusmenetelmä kuin esimerkiksi perinteinen työstö. Prosessi vaatii laaja-alaista ymmärrystä materiaaleista, osan geometriasta, laitteistosta, lasertekniikasta, jälkityöstöstä jne. (Burris, 2017) Yksittäisetkin parametrit voivat vaikuttaa merkittävästi tulostettujen kappaleiden laatuun ja ominaisuuksiin. Esimerkiksi lämmöntuonnin vaikutus jauhepetisulatuksessa on suuri. Optimaalisen lämmöntuonnin skaala on hyvin kapea ja liian matala tai liian korkea lämmöntuonti aiheuttaa tulostetussa kappaleessa huokoisuutta ja tätä kautta myös esimerkiksi lujuus alenee. (Chen et al. 2018, s. 104; Feng et al. 2019, s. 485) Vaikka koko ala kasvaa huomattavan nopeasti, on tekniikassa ja sen soveltamisessa vielä erittäin paljon tutkittavaa.

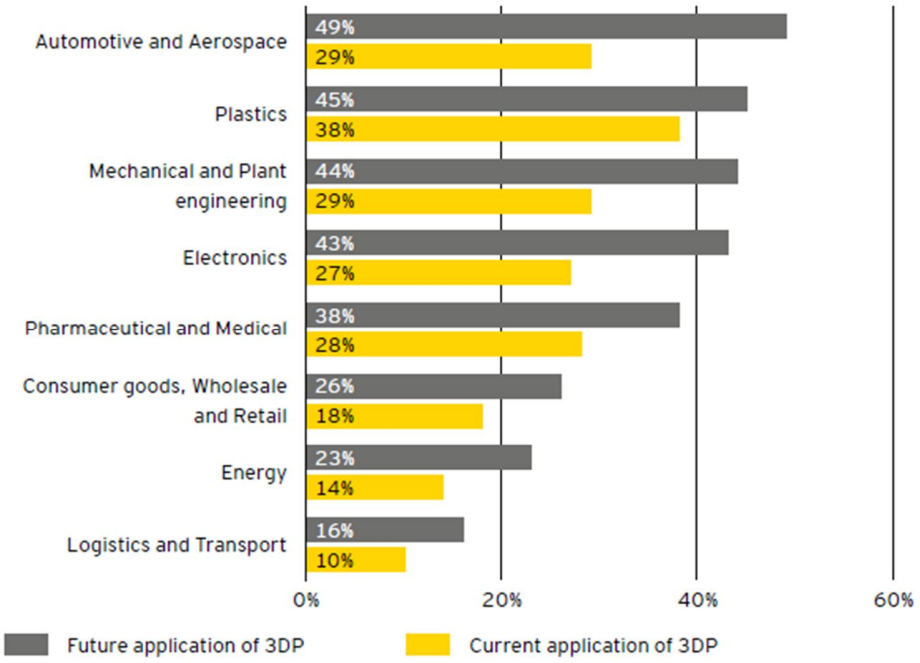
Metallien 3D-tulostuksen edut ja mahdollisuudet ovat täysin sellaisissa seikoissa, jotka eivät aukea vain verrattaessa eri valmistustekniikoita keskenään, vaan ennen kaikkea on ymmärrettävä tuotteen koko valmistus ja sen käyttö tuotteen eliniän aikana. Verrattaessa esimerkiksi valmistusvaiheen kustannuksia sorvatun kappaleen tai 3D-tulostuksen välillä, on selvää, että 3D-tulostus on tällä hetkellä useimmiten kalliimpaa. Mutta, jos kustannusvertailu ulotetaan koko tuotteen eliniän ja käyttöiän ajaksi, tilanne voi olla toinen. 3D-tulostuksella voidaan aikaansaada tuotteeseen sellaisia ominaisuuksia, jotka parantavat esim. sen hyötysuhdetta. Nämä rakenteet ovat sellaisia, joita ei voida perinteisellä valmistuksella tehdä.



Kuva 10. Metallien 3D-tulostuksessa on yli 100 siihen vaikuttavaa parametria. (Burris, 2017)

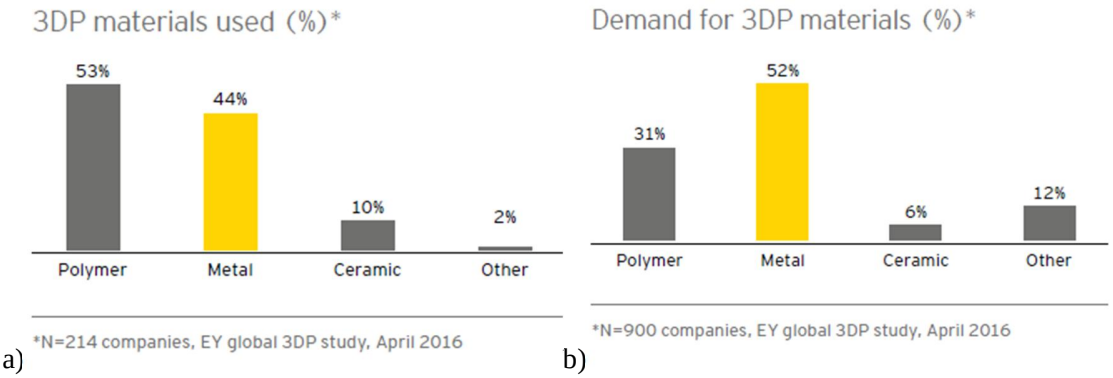
6.2 Teollisuuslähtöiset perusteet

Kuvassa 11 on esitetty globaalin teollisen 3D-tulostuksen käytön ja tämän tulevaisuuden tilannetta sovellusaloittain. (Müller et al., 2016)



Kuva 11. 3D-tulostuksen käytön tilanne sekä käytön tulevaisuus sovellusalueittain (Müller et al., 2016).

Kuvasta 11 nähdään, että auto-, ilmailu-, valmistus-, elektroniikka-, ja lääketeollisuudesta n. 30 % käyttää 3D-tulostusta maailmanlaajuisesti jo nyt, ja tulevaisuudessa 40–50 % suunnittelee ottavansa tekniikan käyttöönsä kyseisiltä aloilta. Määrä kasvaa koko ajan ja kiinnostus tekniikkaa kohtaan globaalisti on voimakasta. Kuvassa 12 on esitetty globaalisti 3D-tulostuksessa käytetyt materiaalit sekä ennuste näiden materiaalien käytölle. (Müller et al., 2016)

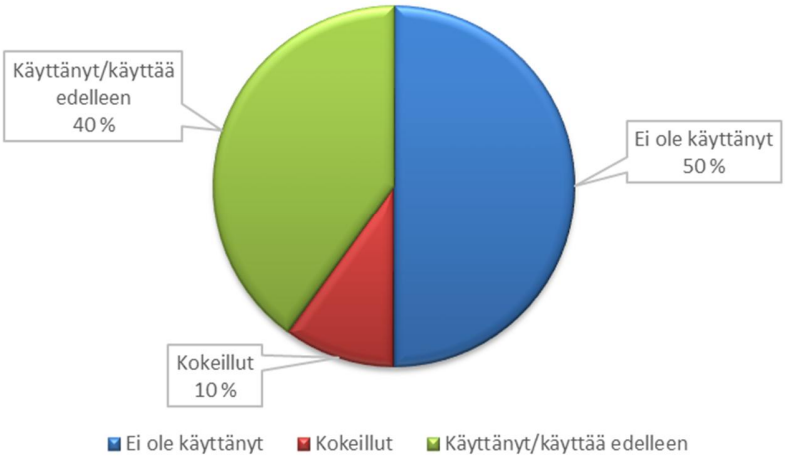


Kuva 12. 3D-tulostuksessa a) globaalisti käytetyt materiaalit ja b) materiaalitarve tulevaisuudessa. (Müller et al., 2016)

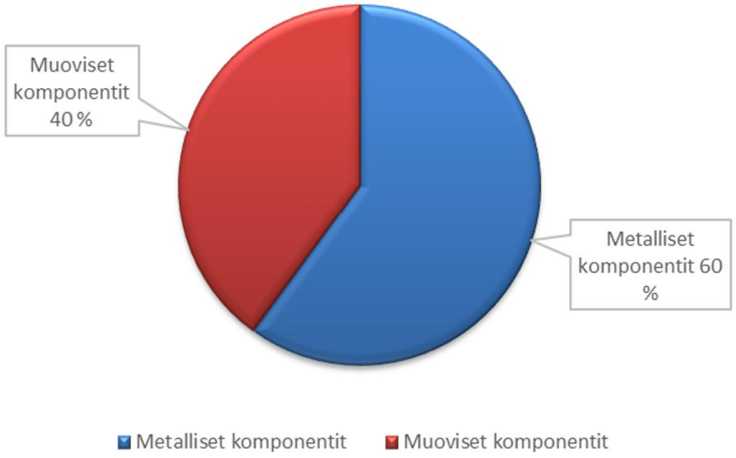
Kuvasta 12a voidaan havaita, että metalli on toiseksi käytetyin materiaali 44 % osuudellaan 3D-tulostuksessa ja tämän materiaalin tarve jatkaa kasvuaan tulevaisuudessa, kuten kuva 12b esittää. Globaalisti

voidaan siis sanoa metallien 3D-tulostuksen kiinnostavan teollisuutta ja sen osuus teollisesta 3D-tulostuksesta kasvaa koko ajan voimakkaasti. (Müller et al., 2016)

Kuvassa 13 on esitetty eteläkarjalaisten yritysten kiinnostus metallien 3D-tulostusta kohtaan. (Hirvonen, 2018)



a)



b)

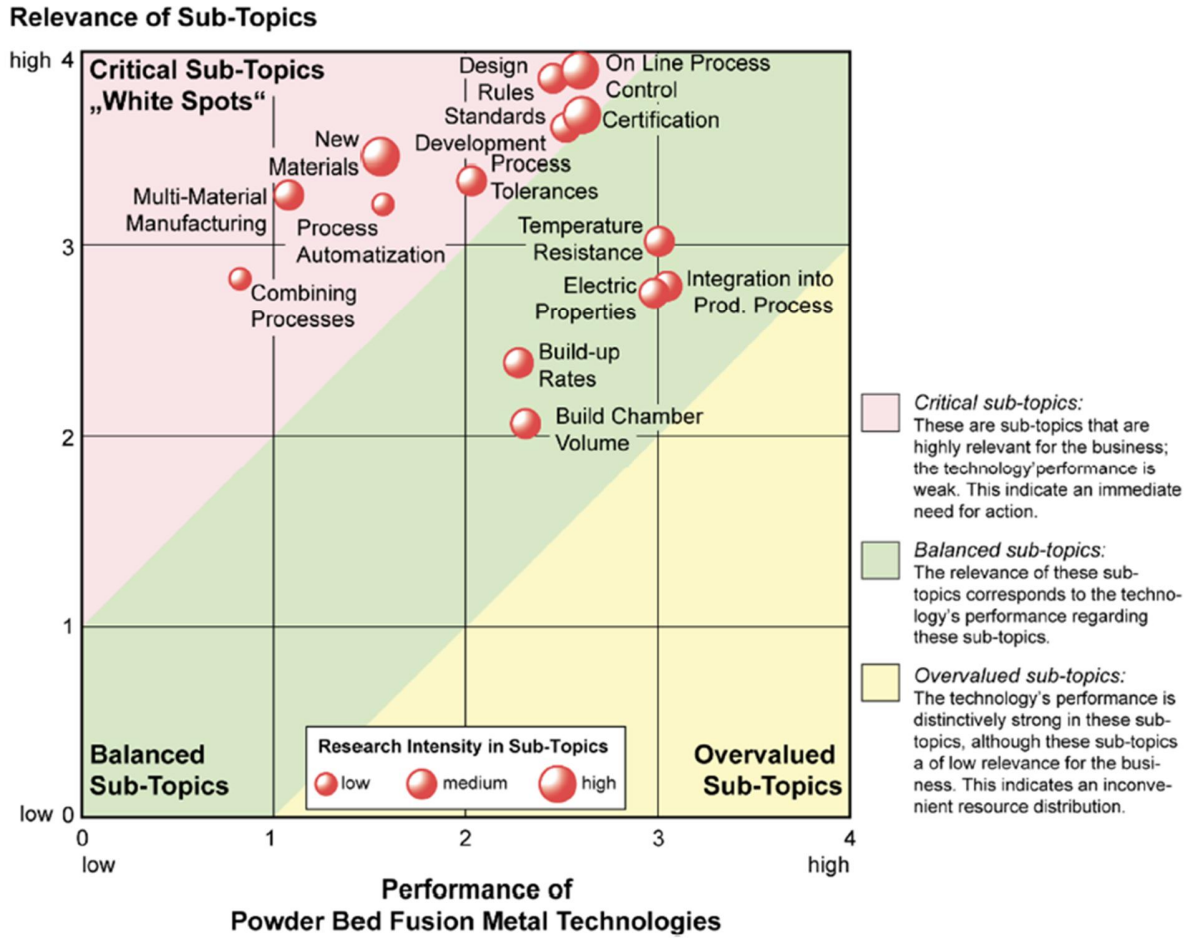
Kuva 13. Eteläkarjalaisten yritysten kiinnostus metallien 3D-tulostusta kohtaan, a) niiden yritysten määrä, joka on käyttänyt 3D-tulostusta sekä b) jaottelu komponenteittain, johon tulostusta on käytetty. (Hirvonen, 2018)

Kuten kuvasta 13a nähdään, yrityksistä puolet ei ollut käyttänyt metallien 3D-tulostusta, mutta niistä, jotka olivat käyttäneet, yli 60 % aikoi kasvattaa 3D-tulostuksen osuutta tuotannostaan tulevaisuudessa kartoittamalla yhä enemmän teknologialle sopivia komponentteja sekä pitämällä 3D-tulostuksen komponenttien valmistukselle yhä enemmän varteenotettavana vaihtoehtona. Lisäksi yritykset yleisellä

tasolla näkivät, että 60 % komponenteista, joita he haluaisivat tulostaa, olisivat metallisia (ks. kuva 13b). (Hirvonen, 2018)

6.3 Tutkimuslähtöiset perusteet

Kuvassa 14 on esitelty Gausemeierin (2013) tutkimuksessa identifioituja metallien 3D-tulostuksen tutkimusaiheita ja luokiteltu niitä relevanssin sekä vireillä olevan tutkimusintensiteetin mukaan. (Gausemeier et al., 2013)

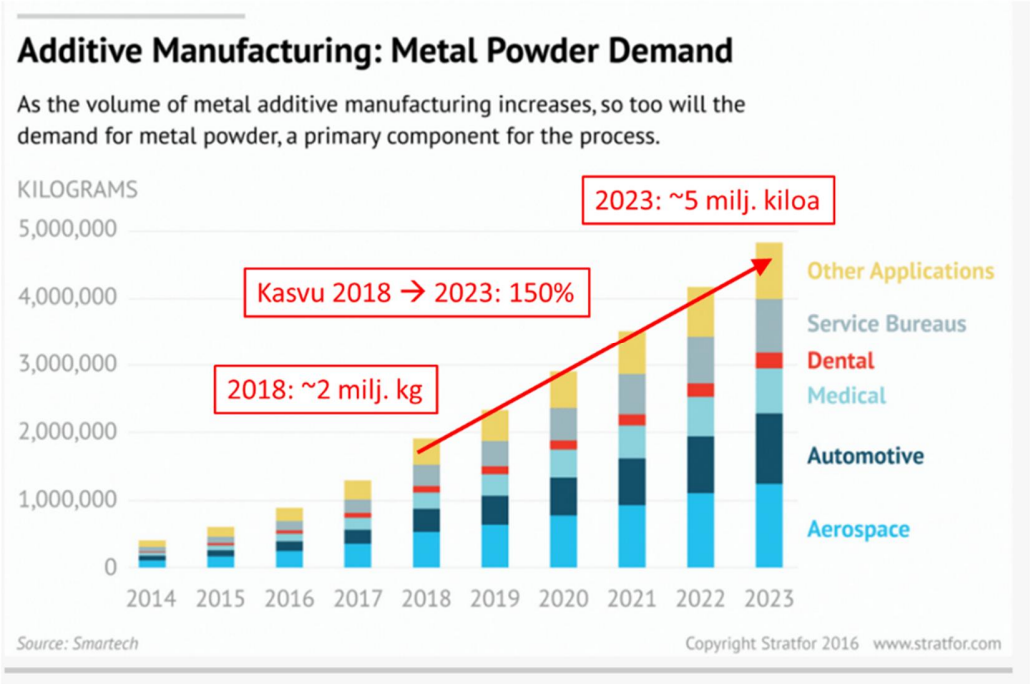


Kuva 14. Metallien 3D-tulostuksen tutkimusaiheita jaoteltuna relevanssin ja tutkimusintensiteetin mukaan. (Gausemeier et al., 2013)

Kuten kuvasta 14 voidaan havaita, tärkeimmät metallien 3D-tulostuksen tutkimusaiheet ovat:

1. Teknologialähtöiset
   a. Suurikokoisten kappaleiden valmistus
   b. Suuri tuotantonopeus
   c. On-line-prosessikontrolli (monitorointi)
   d. Valmistusprosessin luotettavuus ja tasalaatuisuus
   e. Prosessien yhdistäminen (hybridiprosessit)
   f. Prosessitoleranssit ja niiden määritys
   g. Prosessiautomaatio ja sen saatavuus
   h. Toiminnallisuuksien (kuten sähköiset piirit) lisääminen 3D-tulostettuihin kappaleisiin
2. Materiaalilähtöiset
   a. Monimateriaalivalmistus
   b. Uusien materiaalien valmistettavuus
   c. Uudet materiaaliominaisuudet
   d. Kierrätettävät materiaalit
3. Yleiset
   a. Suunnittelusääntöjen saatavuus
   b. Valmistuksen sertifiointi
   c. Standardien kehitys
   d. Tulostettujen materiaalien ominaisuudet ja näiden tietojen saatavuus

Yllä oleva kolmekohtainen jaottelu kuvaa hyvin metallien 3D-tulostuksen tutkimuksen painopistealueita ja tärkeyttä myös globaalisti. Kuvassa 15 on esitetty arvio metallien 3D-tulostuksen tulevaisuuden kehityksestä ajatellen metallijauheen tarvetta sovellusalueittain. (Stratfor, 2016).

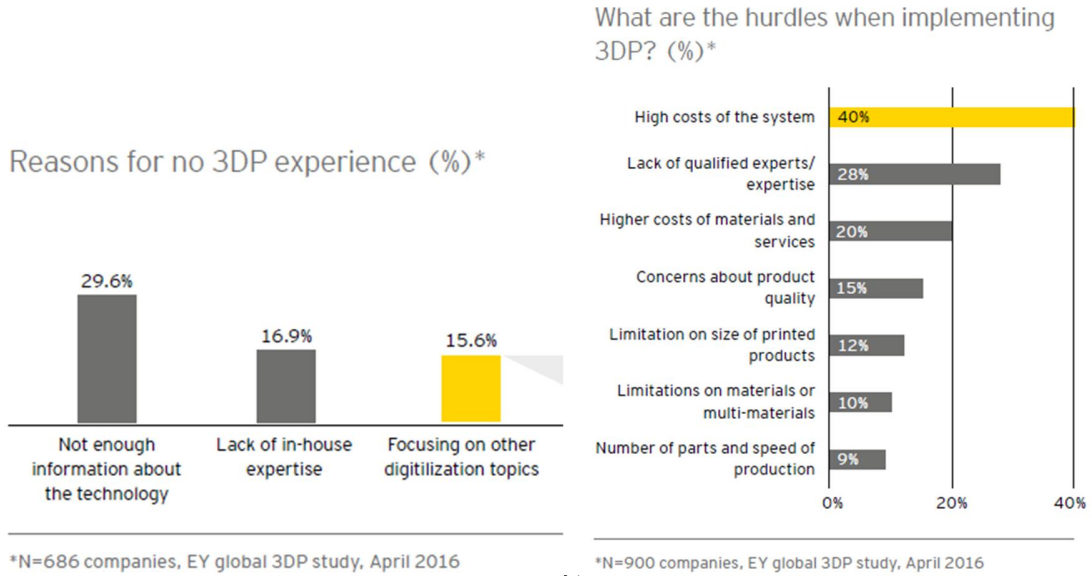


Kuva 15. Metallien 3D-tulostuksen tulevaisuuden kehitys metallijauheen tarpeen mukaan jaoteltuna sovellusalueittain. (Stratfor, 2016)

Kuten kuvasta 15 nähdään, metallijauheiden käytön ennustetaan kasvavan 150 % vuosina 2018–2023 (Stratfor, 2016). Tämä yksistään selittää painetta, joka kohdistuu materiaalitutkimukselle. Tutkittavia aiheita kotimaisen teollisuuden kannalta ovat mm. metallurgia, tutkimukset verrattuna perinteiseen ja 3D-tulostettuun kappaleeseen, sekä mahdollisuus tehdä objektiivisia tutkimuksia metallien 3D-tulostuksella tehtyjen kappaleiden metallurgisista ominaisuuksista.

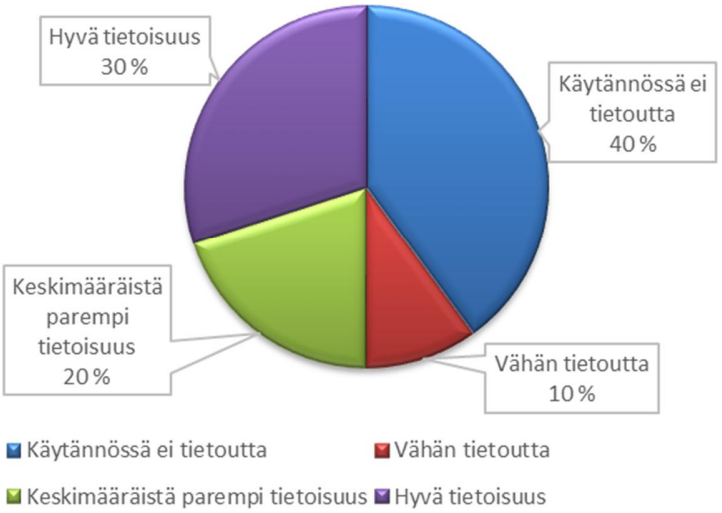
6.4 Koulutuslähtöiset perusteet

Ernst & Young teki vuonna 2016 tutkimuksen 3D-tulostuksen teollisesta implementoinnista haastattelemalla useita satoja yrityksiä. Tutkimuksessa ne yritykset, jotka eivät olleet kokeilleet 3D-tulostusta, kertoivat suurimmaksi syyksi tiedonpuutteen tekniikasta (kuva 16a). Kysyttäessä mikä estää yrityksiä kokeilemasta 3D-tulostusta tulevaisuudessa, yritykset kertoivat toiseksi tärkeimmäksi syyksi sen, että heillä ei ole riittävästi koulutettua henkilökuntaa (kuva 16b). (Müller et al., 2016)



Kuva 16. Koulutuksen tarve ja sen yhteys yritysten halukkuuteen käyttää 3D-tulostusta. (Müller et al., 2018)

Hirvonen sai samankaltaisia tuloksia koulutuksen tarpeellisuudesta tutkimuksessaan eteläkarjalaisten yritysten kiinnostuksesta 3D-tulostusta kohtaan (kuva 17): 40 % kyselyyn osallistuneista yrityksistä arvioi, että he eivät tiedä tekniikasta käytännössä riittävästi tai tietävät siitä vain vähän. (Hirvonen, 2018)



Kuva 17. Eteläkarjalaisten yritysten tietoisuus metallien 3D-tulostuksesta heidän oman arvion mukaan. (Hirvonen, 2018)

Opetuksen rooli tällaisen uuden teknologian implementoinnissa on äärettömän tärkeä: kun työelämään tuleva ikäryhmä ja siellä jo oleva sukupolvi ovat tietoisia tekniikasta, sen mahdollisuuksista ja rajoituksista, aletaan vähitellen osata ajatella myös tuotesuunnittelua uudella tavalla. Tuotesuunnittelun mahdollisuudet ovatkin tämän tekniikan käyttöön ajava voima.

Yritysten pitäisi kuitenkin pystyä ennakkoluulottomasti testaamaan, paitsi tuotteidensa soveltuvuutta 3D-tulostukseen, myös miten paljon parempia tuotteista voidaan tehdä suunnittelemalla ne täysin uudella tavalla, jotta uuden teknologian mahdollisuudet voidaan hyödyntää kaikin mahdollisin tavoin. Tässä kohtaa koulutuksen merkitys kohoaa keskeiseen rooliin; uusia työelämään saapuvia sukupolvia tulee kouluttaa tietämään tekniikasta, sen mahdollisuuksista ja raja-arvoista. Pitää myös kouluttaa olemassa olevaa teollisuutta, jotta tekniikan implementointi voisi edetä ennakkoluulottomasti Suomessa. Lisäksi koulutusta tarvitaan, jotta suomalainen teollisuus pysyisi kansainvälisessä kilpailussa mukana.

Koulutuksen voi nähdä olevan kolmella eri tasolla:

1. Peruskoulutus: tekniikan kandidaattien ja diplomi-insinöörien koulutus
2. Jatkotutkinnot: tohtoriopiskelijoiden koulutus
3. Teollisuuden koulutus: täydennyskoulutus ja räätälöidyt koulutuspaketit

7 Yritysten ja tutkimuslaitosten välinen yhteistyö

Burns (2018) listasi artikkelissaan neljä syytä tehdä yhteistyötä yritysten ja tutkimuslaitosten, kuten yliopistojen, kanssa:

1. Yhteistyö avaa mahdollisuuksia uusille innovaatioille
2. Yhteistyö ottaa ympäristön ja kestävän kehityksen huomioon
3. Yhteistyö vähentää osaamisvajetta
4. Yhteistyö inspiroi

Burnsin (2018) mukaan yhteys (akateemisen) tutkimusmaailman ja valmistusteollisuuden välillä on aina ollut tärkeää. Yhteistyö on tänä päivänä kuuma aihe nopeasti kehittyneen liiketoimintaympäristön ja laajojen koulutusaluemuunnosten takia. Burnsin mukaan neljäs teollisuusvallankumous on meneillään, eli valmistusala tarvitsee enemmän taitoa ja luovuutta kuin koskaan aikaisemmin. Sekä teollisuus, että paikalliset yliopistot hyötyvät uusista ideoista, näkemyksestä ja uusista ammattilaisista, joita syntyy yhteistyön tuloksena.

Burnsin (2018) mukaan myös valmistamisen uusi aikakausi tarvitsee oikeiden teknologien lisäksi myös oikeat ihmiset. Valitettavasti nykypäivän monet tärkeät alat, kuten rakennusala, kärsivät huomattavista osaamisvajeista. Kun työnantajat eivät löydä hyviä työntekijöitä, uudet keksinnöt ja ideat jäävät keksimättä. Valtuutamme seuraavan sukupolven ammattilaisia työharjoitteluilla insinööritiimeissämme. Annamme mahdollisuuksia heille taitojensa parantamiseen tosielämän tilanteissa. Valmistusalalla on paljon urapolkuja: suunnittelusta prosessien operoimiseen. Mitä enemmän kokemusta opiskelijat saavat oikeissa työympäristöissä, sitä helpompaa heidän on käyttää kykyjään ja taitojaan eri aloilla. Teollisuusyritykset, jotka työskentelevät yliopistojen kanssa tarjotakseen kokemusta valmistamisen parissa, tekevät oman osansa vähentääkseen osaamisvajeita eri teollisuusaloilla.

Burns (2018) mainitsee myös, että viime aikoina monet valmistuksen ammattilaiset ovat havainneet yhteistyöhankkeiden yleistyneen. Yhteistyön antamat yhteydet mahdollistavat yritysten pysymisen alansa huipulla, koska yliopistoilta saa uusia näkökulmia monimutkaisiinkin ongelmiin. Kun uusia digitaalisia teknologioita ja tuotantostrategioita syntyy, tietotaitoisia opiskelijoita tullaan tarvitsemaan teollisuudessa. Esimerkiksi vain n. 4.7 % Iso-Britannian yrityksistä tekee parhaillaan yhteistyötä yliopistojen kanssa. Burns (2018) uskoo kuitenkin teollisuuden ja akateemisen maailman yhteistyön hyötyjen peittoavan sen riskit. Yritykset tulevat löytämään konsepteja, joita he eivät ole ennen ajatelleetkaan opiskelijoiden tuoman tuoreiden tietojen ja taitojen sekä markkinanäkemyksen ansiosta. Yhteistyön monimuotoisuus johtaa kaikkia hyödyttäviin inspiraatioihin.

8 Yhteenveto

Teollisuus on tällä hetkellä murrosvaiheessa digitalisaation myötä, johon myös 3D-tulostus kuuluu. Digitalisaation ja etenkin 3D-tulostamisen myötä nykyiset arvoketjut voivat muuttua radikaalistikin. Metallien 3D-tulostus on jo vakiintunut valmistustapa prototyyppien valmistuksessa, ja on vakiintumassa myös lopputuotteiden valmistukseen. Teollisuuden eri aloilla vaaditaan jatkuvasti keveämpiä, energiatehokkaampia ja muilla tavoin optimoituja tuotteita ja rakenteita. 3D-tulostus on ainoita valmistusmenetelmiä, jolla näihin haasteisiin voidaan vastata. Ala onkin kasvanut valtavaa vauhtia viimeiset vuodet sekä räjähdysmäisesti viimeiset kaksi vuotta. Tämä kasvu tulee vauhdittumaan vielä entisestään alaan liittyvän tietotaitotason noustessa ja teknologian kehittyessä.

Suomalaisen teollisuuden kilpailukyvyn kannata on oleellista, että 3D-tulostusteknologioiden mahdollisuuksia tunnistetaan ja aletaan hyödyntää enenevissä määrin. Yritykset ovat erittäin kiinnostuneita aiheesta, mutta tietotaito ja osaaminen eivät ole riittävällä tasolla valmistusmenetelmän täyden potentiaalin hyödyntämiseen. Metallien 3D-tulostaminen vaatii laajaa asiantuntijuutta, jotta sen mahdollisuudet, hyödyt ja rajoitteet voidaan ymmärtää. Valmistavilla yrityksillä, etenkään pienillä ja keskisuurilla, ei ole resursseja tai halua panostaa omaan valmistukseen, joten asiantuntijuuden ja suunnitteluosaamisen vastuu jää palveluntarjoajille. Panostamalla 3D-tulostuksen koulutukseen ja tutkimukseen voidaan vastata suomalaisten yritysten tarpeisiin sekä luoda uutta liiketoimintaa. Maailmalla on jo lukuisia esimerkkejä yrityksistä, joiden koko toiminta on mahdollistunut 3D-tulostuksen ansiosta. Tällaisten toimijoiden lisäksi tullaan tarvitsemaan uusia palveluntarjoajia niin tulostuspalveluiden, kuin myös esimerkiksi jälkikäsittelyn ja suunnittelun saroilla. Teollisuudella on suurta tarvetta 3D-tulostusteknologiaan liittyvälle osaamiselle, joten laadukkaan koulutuksen jatko on turvattava myös tulevaisuudessa esimerkiksi laadukkaan tutkimuksen avulla.

9 Lähteet

Anon., 2018, Inert atmosphere generation, Renishaw, viitattu: 17.4.2018, saatavilla: http://www.renishaw.com/en/inert-atmosphere-generation--31885

Anon., 2018, Materials for Metal Additive Manufacturing, EOS, viitattu: 16.4.2018, saatavilla: https://www.eos.info/material-m

Anon., 2018, Quality Assurance for Direct Metal Laser Sintering (DMLS), EOS, viitattu: 16.4.2018, saatavilla: https://www.eos.info/quality-assurance

Anon., Adding New Layers to 3-D Printing, Stratfor, viitattu: 2.4.2018, saatavilla: https://worldview.stratfor.com/article/adding-new-layers-3-d-printing

Burns, N. 2018. 4 Reasons why collaboration between industries and universities is vital to the manufacturing sector, Croft Filters. Viitattu: 5.6.2019. Saatavilla: https://www.filters.co.uk/news/collaboration.php

Burris, M., Metal Additive Manufacturing, viitattu: 26.3.2018, saatavilla: https://www.slideshare.net/MatthewBurris/metal-additive-manufacturing-basics-zero-to-one-sept-2017-79484180

Chekurov, S., 2014, Additive manufacturing needs and practices in the Finnish industry, Aalto-yliopisto, viitattu: 22.3.2018, saatavilla: https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/13516

Chekurov, S., Eklund, P., Kujanpää, V., Pekkarinen, J., Syrjälä K., Vihinen, J., 2017, 3D-tulostuksen suunnittelu- ja päätöksenteko-opas yrityksille, DIMECC, viitattu: 22.3.2018, saatavilla: https://teknologiainfo.net/fi/content/3d-tulostuksen-suunnittelu-ja-p%C3%A4%C3%A4t%C3%B6ksenteko-opas-yrityksille

Chen, D., Steffen, H., Ibbotson, H., Salonitis, K., Steingrimsson, J., Thiede, S., Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications, 2015, Journal of Cleaner Production, Vol. 107, pp. 615-625

Chen H., Dai, D., Gu, D., Shi, Q., Xia, M. & Yu, G. 2018 Porosity evolution and its thermodynamic mechanism of randomly packed powder-bed during selective laser melting of Inconel 718 alloy. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture. Volume 116. Pp. 96–106.

EOS, 2018, Material data sheet, EOS StainlessSteel 316L, viitattu: 30.4.2019, saatavilla: https://cdn0.scrvt.com/eos/684f070e2e5e6323/47ee6cb0d51a/EOS_SS_316L_9011-0032_M400-4_Material_data_sheet_06-18_en.pdf

Feng, T., Feng, Y., Hu, Y., Kang, J., Wang, X., Wu, P. & Yi, J. 2019. Effect of laser energy density on the microstructure, mechanical properties, and deformation of Inconel 718 samples fabricated by selective laser melting. In: Journal of Alloys and Compounds, Volume 786. Pp. 481–488.

Gausemeier, J., Peter, S., Wall, M., 2013, Future-oriented Research Strategies for Additive Manufacturing, University of Paderborn, viitattu: 23.3.2018, saatavilla: https://www.google.fi/search?q=metal+additive+manufacturing+research+topics&client=firefox-b&dcr=0&source=lnms&sa=X&ved=0ahUKEwj5rZXxuILaAhXLGCwKHfH1AjAQ_AUICSgA&biw=1920&bih=971&dpr=1

Hanhela, J., 2015, Materiaalia lisäävän valmistuksen käyttö pirkanmaalaisissa yrityksissä, Tampereen ammattikorkeakoulu, viitattu: 22.3.2018, saatavilla: http://www.theseus.fi/handle/10024/93529

Hirvonen, A., 2018, Metallien teollisen lisäävän valmistuksen tarpeen kartoitus Kaakkois-Suomessa, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, viitattu 22.3.2018, saatavilla: http://www.doria.fi/handle/10024/149446

Honkanen, K., Kutvonen, R., Ainetta lisäävä valmistus Pohjois-Savossa – suunnitteluperiaatteet ja yritysten näkökulma, Leka-tutkimusraportti, viitattu: 22.3.2018, saatavilla: http://docplayer.fi/3208914-Ainetta-lisaava-valmistus-pohjois-savossa.html

Hämäläinen, M., Ojala, A., 2015, Additive manufacturing technology: Identifying value potential in additive manufacturing stakeholder groups and business networks, University of Jyväskylä, viitattu: 22.3.2018, saatavilla: https://jyx.jyu.fi/dspace/handle/123456789/46676

Jokinen, A., Riipinen, T., 2016, Lisäävän valmistuksen keskeiset materiaalit ja niiden ominaisuudet, VTT, viitattu: 22.3.2018, saatavilla: http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03997-16.pdf

Karjalainen, J., Mitä on AM-suunnittelu?, Lisäävän valmistuksen mahdollisuudet-tapahtuma, LAMK, 16.5.2019, Lahti, saatavilla: https://www.lamk.fi/sites/default/files/2019-05/Johannes%20Karjalainen%20Etteplan.pdf

Korpela, M., 2019, Material needs of finnish metal and mechanical engineering industry from the perspective of additive manufacturing, LUT-yliopisto, viitattu 10.6.2019, saatavilla: http://lutpub.lut.fi/handle/10024/159185

Kousa, J., 3D-tulosteet tuotantokäytössä – Case Raute, Lisäävän valmistuksen mahdollisuudet-tapahtuma, LAMK, 16.5.2019, Lahti

Kruth, J.P., Froyen, L., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P., Rombouts, M., Lauwers, B., 2004, Selective laser melting of iron-based powder, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, pp. 616-622

Kujanpää, V., 2015, 3D-tulostuksella lisäarvoa tuotteisiin, VTT, viitattu: 22.3.2018, saatavilla: http://docplayer.fi/5263275-3d-tulostuksella-lisaarvoa-tuotteisiin.html

Liu, Y., Yang, Y., Wang, D., 2016, A study on the residual stress during selective laser melting of metallic powder, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 87, pp. 647-656

Mercelis, P., Kruth, J.P., 2006, Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, Rapid Prototyping Journal, Vol 12:5, pp. 254-265

Müller, A., Karevska, S., Wienken, R. and Kilger, C., How will 3D printing make your company the strongest link in value chain? EY's Global 3D printing Report 2016, 2016, Ernst and Young, viitattu: 2.4.2018, saatavilla: http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report/$FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf

Scotti, G., Matilainen, V., Kanninen, P., Piili, H., Salminen, A., Kallio, T. & Franssila, S. Laser additive manufacturing of stainless steel micro fuel cells. Teoksessa: Journal of Power Sources, 272. 2014. S.356-361.

Simson, T., Emmel, A., Dwars, A., Böhm, J., 2017, Residual stress measurements on AISI 316L samples manufactured by selective laser melting, Additive Manufacturing, Vol 17, pp. 183-189

Wohlers, T., Campbell, I., Diegel, O., Kowen, J., Fidan, I., Bourell, D.L., 2018, Wohlers report 2018, 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report, pp. 342-369

Wright, I., 2019, 3D-Printed Rocket Engines & The Future of Spaceflight, engineering.com, viitattu: 10.6.2019, saatavilla: https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/19189/3D-Printed-Rocket-Engines-The-Future-of-Spaceflight.aspx

Wu, A.S., Brown, D.W., Kumar, M., Gallegos, G.F., King, W.E., 2014, An experimental investigation into additive manufacturing-induced residual stresses in 316L stainless steel, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol 45A, pp. 6260-6270

Yang, J., Wang, F., 2008, 3D finite element temperature field modelling for direct laser fabrication, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 43, pp. 1060-1068

Yang, Y.P., Jamshidinia, M., Boulware, P., Kelly, S.M., 2017, Prediction of microstructure, residual stress, and deformation in laser powder bed fusion process, Computational mechanics, Vol 61, pp. 599-615