

LUT-YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

METALLIEN 3D-TULOSTUSTA ALOITTAVA YRITYS: MIHIN TULISI
KIINNITTÄÄ HUOMIOTA?

COMPANY STARTING ADDITIVE MANUFACTURING OF METALS: WHAT
SHOULD BE TAKEN INTO ACCOUNT?

Lappeenrannassa 5.6.2019
Jomi Kotta
Tarkastaja Dosentti Heidi Piili
Ohjaaja Dosentti Heidi Piili

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Jomi Kotta

Metallien 3D-tulostusta aloittava yritys: mihin tulisi kiinnittää huomiota?

Kandidaatintyö

2019

52 sivua, 17 kuvaa, 5 taulukkoa

Tarkastaja: Dosentti Heidi Piili

Ohjaaja: Dosentti Heidi Piili

Hakusanat: Lisäävä valmistus, 3D-tulostus, jauhepetisulatus, metallit, aloittava yritys

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin, mitä asioita tulisi ottaa huomioon, kun yritys on aloittamassa metallien lisäävää valmistusta käyttäen jauhepetisulatusprosessia. Työn tavoitteena on antaa alustava kuva siitä, mitä metallien lisäävän valmistuksen aloittaminen tarkoittaisi yrityksen toiminnan kannalta ja miten toiminta eroaa verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Työ on kirjallisuuskatsaus, jonka sisältö on kerätty erilaisista tieteellisistä lähteistä.

Työssä kerrotaan metallien lisäävän valmistuksen perusteet, jonka jälkeen avataan lisäävän valmistuksen tuomia etuja ja haittoja valmistusmenetelmänä, joita yrityksen tulisi huomioida aloittaessaan metallin lisäävän valmistuksen. Tämän jälkeen työssä pohditaan lisäävän valmistuksen tuomia muutoksia yritystoimintaan ja miten lisäävän valmistuksen aloittaminen osana yritystoimintaa tapahtuu ja mitä siinä tulisi ottaa huomioon. Lopuksi työssä vertaillaan lisäävän valmistuksen ja perinteisten valmistusmenetelmien eroja.

Työssä käy ilmi, että jauhepetisulatusprosessi on jo sen verran kehittynyttä, että sitä voidaan hyödyntää muun muassa sarjatuotannossa, mikäli valmistettava kappale soveltuu siihen. Paras lopputulos yrityksen näkökulmasta saadaan silloin, kun hyödynnetään lisäävän valmistuksen edut kappaleen suunnittelussa, valmistamisessa ja yrityksen toiminnassa. Työssä viitattujen tutkimusten perusteella lisäävän valmistuksen käyttöönotto onnistuu parhaiten kappaleissa, jotka perinteisillä menetelmillä valmistettaisiin monesta eri osasta ja osat yhdistettäisiin esimerkiksi hitsaamalla.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Jomi Kotta

Company starting additive manufacturing of metals: what should be taken into account?

Bachelor's thesis

2019

52 pages, 17 figures and 5 tables

Examiner: Docent Heidi Piili

Supervisor: Docent Heidi Piili

Keywords: Additive manufacturing, 3D-printing, powder bed fusion, metals, starting company

The aim of this bachelor's thesis was to find out what a company starting additive manufacturing of metals should take into consideration. The goal was to give an introduction what starting additive manufacturing of metals means in perspective of company and how it differs from traditional manufacturing methods. This thesis is a literature review which content is gathered from different scientific sources.

This thesis begins by introducing the basics of additive manufacturing and then concentrates on advantages and disadvantages of this manufacturing method. After that the changes in business caused by additive manufacturing and what should be taken into account when starting additive manufacturing of metals are discussed. In the end of this thesis, additive manufacturing of metals and its costs are compared to traditional manufacturing methods.

The result of this thesis shows that additive manufacturing of metals is suitable for series production if the manufactured part is designed for additive manufacturing. Company will benefit from this technology when it utilizes the advantages of additive manufacturing in design, in manufacturing and in business. Based on studies introduced in this thesis, the introduction of additive manufacturing of metals is most successful when the manufactured parts geometry is complex, and it is manufactured using multiple different parts when using traditional manufacturing methods.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNE JA SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	7
	1.1 Tutkimuksen tavoitteet.....	7
	1.2 Rajaukset	8
2	TUTKIMUSMETODIT	9
3	LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN PERUSTEET	10
	3.1 Prosessit.....	11
	3.2 Jauhepetisulatus	12
4	LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN HYÖDYT JA HAASTEET	15
	4.1 Kokoonpanojen tulostus.....	17
	4.2 Topologinen optimointi.....	19
	4.3 Suunnittelun vapaus	20
	4.4 Ympäristöystävällisyys	22
5	METALLIEN 3D-TULOSTUKSEN ALOITTAMINEN YRITYSTOIMINTANA	
	23	
	5.1 Tuotannon aloittaminen	26
	5.2 Toimitusketju.....	29
	5.3 Laitteet.....	31
	5.4 Materiaalit	31
	5.5 Jälkikäsittely	33
	5.6 Tuotannon kulut.....	34
6	LISÄÄVÄ VALMISTUS VERRATTUNA PERINTEISIIN	
	VALMISTUSMENETELMIIN	37
	6.1 Lisäävän valmistuksen ja perinteisen valmistuksen erot	37
	6.2 Lisäävän valmistuksen kulut perinteiseen valmistusmenetelmään verrattuna	38
7	POHDINTA	42

8	YHTEENVETO.....	45
9	JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSIA.....	47
	LÄHTEET	48

LYHENNE JA SYMBOLILUETTELO

AM	Additive manufacturing
CAD	Computer-aided design
PBF	Powder bed fusion
$C_{Energia}$	Prosessin energiankulutus [€/h]
$C_{Epäsuorat}$	Epäsuorat kulut [€]
$C_{Jälkikäsittely}$	Jälkikäsittelyn hinta [€]
$C_{Operaattori}$	Operaattorin tuntipalkka [€/h]
$C_{Työkalut}$	Työskentelytilan ja työkalujen tuntihinta [€/h]
$C_{Valmistelu}$	Laitteen valmistelun ja valvomisen kulut [€]
$C_{Valmistus}$	Valmistuksen kulut [€]
G_i	Valmistettava geometria [-]
$P_{Materiaali}$	Materiaalin hinta [€/cm ³]
$T_{Jälkikäsittely}$	Jälkikäsittelyyn kuluva aika [h]
$T_{Valmistus}$	Koko valmistusprosessiin kuluva aika [h]
$V_{Valmistus}$	Valmistettavien kappaleiden kokonaistilavuus [cm ³]

1 JOHDANTO

Lisäävän valmistuksen (engl. additive manufacturing, AM), eli ns. 3D-tulostuksen, käyttö valmistusmenetelmänä on yleistynyt huomattavasti viime vuosien aikana. Tämä johtuu muun muassa patenttien raukeamisesta, jonka seurauksena laitteiden hinnat ovat laskeneet. Muovien lisäävää valmistusta on käytetty Suomessakin jo 1980-luvulla, mutta metallien kanssa ongelmana oli tuolloin materiaaliominaisuudet, laitteiden hinnat ja metallikappaleiden huokoisuus. Nämä ongelmat johtuivat pääasiassa tuolloin jauhepetisulatuslaitteistoissa käytössä olleesta CO₂-lasereista, joiden tuottaman säteen aallonpituus absorboituu huonosti metallimateriaaleihin. Kuitulaserien tulo jauhepetisulatuslaitteistoihin paransi laatua merkittävästi 2000-luvun alussa, sillä kuitulaserien aallonpituus absorboituu huomattavasti paremmin metallimateriaaleihin. (Chekurov et al. 2017, s. 4-7; Brandt 2017, s.4; Lee et al. 2017, s.3-4.)

Tänä päivänä lisäävää valmistusta pidetään neljäntenä teollisena vallankumouksena. Usein kuitenkin virheellisesti ajatellaan, että lisäävä valmistus korvaa perinteiset valmistusmenetelmät. Tämä ei kuitenkaan pidä täysin paikkaansa, sillä lisäävä valmistus on valmistusmenetelmä yksi muiden joukossa. Lisäävä valmistus sopii erinomaisesti esimerkiksi tapauksiin, jossa valmistettavan kappaleen rakenne on monimutkainen, sen painoa halutaan pienemmäksi tai jos kappaletta valmistetaan pieni erä. Näiden syiden takia lisäävää valmistusta käytetään muun muassa lääketieteessä, auto- ja lentokone-teollisuudessa. (Brandt 2017, s.11.) Koska lisäävässä valmistuksessa kappaleet valmistetaan kaksiulotteinen taso kerrallaan, valmistuksen rajoitukset vähenevät ja suunnittelusta tulee vapaampaa. Perinteisillä valmistustavoilla vaikeat tai jopa mahdottomat rakenteet ovat lisäävällä valmistuksella mahdollisia, joka antaa suunnittelijoille mahdollisuuden keksiä uusia ratkaisutapoja. (Brandt 2017, s.21, s. 259)

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tässä työssä pohditaan, mitä yrityksen tulee huomioida aloittaessaan metallien 3D-tulostus käyttäen jauhepetisulatusprosessia. Jotta huomioitavat asiat selkeytyisivät, lisäävää valmistusta on verrattu perinteisiin valmistusmenetelmiin. Tämän työn tarkoituksena avata

lyhyesti, mitä metallien lisäävä valmistus tarkoittaa ja keskittyä siihen, mihin yrityksen täytyy kiinnittää huomiota aloittaessaan metallien lisäävän valmistuksen.

Tutkimus tehdään, koska metallien lisäävä valmistus on sen verran kehittynyttä, että sitä voidaan käyttää muun muassa sarjatuotannossa. Oikein käytettynä metallien lisäävä valmistus yhdessä kappaleen uudelleensuunnittelun kanssa voi johtaa suuriin kustannussäästöihin. Kustannussäästöjä syntyy, kun kappaleen muotoja muokataan siten, että lisäävän valmistuksen etuja hyödynnetään mahdollisimman paljon. (Atzeni & Salmi 2011, s.1147.) Lisäksi aihe kiinnostaa monia, koska metallien lisäävä valmistus on nopeasti kehittyvä teknologia, joka tarjoaa mahdollisuuden uudenlaisten tuotteiden valmistukseen.

1.2 Rajaukset

Tutkimus on rajattu keskittymään Suomessa toimiviin yrityksiin. Lisäksi työssä on tutkittu vain jauhepetisulatusprosessia (engl. powder bed fusion, PBF), koska se on tällä hetkellä käytetyin ja nopeimmin kasvava metallien lisäävän valmistuksen prosessi. (Yang et al. 2017, s.63; Brandt 2017 s.11.) Työssä keskitytään vain jauhepetisulatuksen teolliseen käyttöön. Työ on kirjallisuuskatsaus, jonka tarkoituksena on koota muiden tutkimuksien ja kirjallisuuden tulokset yhteen ja tehdä johtopäätöksiä niiden perusteella.

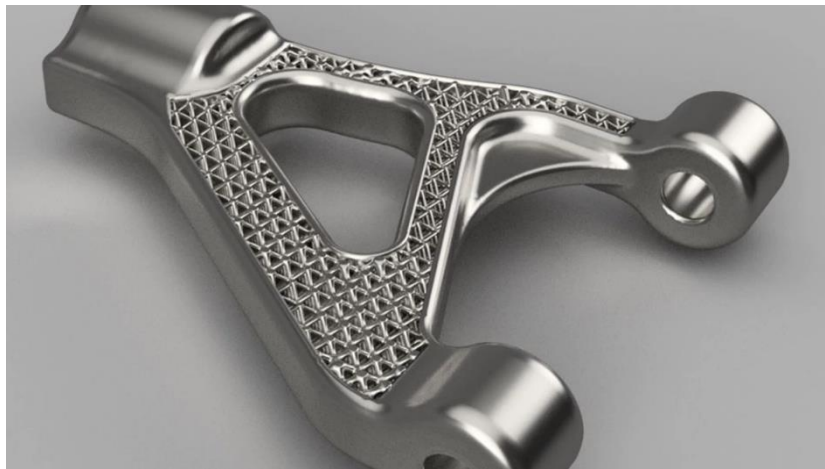
2 TUTKIMUSMETODIT

Tutkimuksessa tietoa on etsitty tieteellisistä julkaisuista, jotka ovat mahdollisimman uusia. Ongelmaksi muodostui se, että lähteissä oli ristiriitaisuuksia, koska lisäävän valmistuksen teknologia on kehittynyt nopeasti, joka on aiheuttanut sen, että tieto on vanhentunut nopeasti. Ongelmasta selvittiin vertailemalla useita mahdollisimman luotettavia lähteitä, sekä käyttämällä sitä tietotaitoa, jota LUT-yliopistossa on kertynyt, kun metallien lisäävää valmistusta on tutkittu 10 vuotta.

Scopus-palvelusta löytyy vuosilta 2009-2019 16 865 julkaisua hakusanalla ”additive manufacturing”. Lisättäessä hakusanoihin ”metals” määrä tippuu 4 219 ja kun tarkennetaan pelkästään jauhepetisulatukseen liittyviin julkaisuihin, määrä on 386. Tästä voidaan päätellä se, että metallien lisäävä valmistus on vielä suhteellisen uusi valmistusmenetelmä, jota kuitenkin tutkitaan koko ajan. Scopusesta ei suoraan löytynyt yhtäkään julkaisua, jossa käsiteltäisiin metallien lisäävää valmistusta aloittavaa yritystä, joten tämä työ on siltä kannalta tärkeä ja aihetta pitäisi tutkia enemmän.

3 LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN PERUSTEET

Lisävä valmistus on nimensä mukaisesti materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä. Valmistusmenetelmänä se on siis lähes vastakohta verrattuna perinteisiin menetelmiin, sillä ne perustuvat materiaalin poistamiseen. Lisävässä valmistuksessa työskentely alkaa tyhjältä alustalta ja materiaalia lisätään kerros kerrallaan, kunnes kappale on valmis. (Yang et al. 2017, s.63). Tämä mahdollistaa vaikeiden muotojen, jotka olisivat perinteisillä menetelmillä vaikeita tai mahdottomia, valmistuksen. Tällaisia rakenteita ovat muun muassa jäähdytyksessä käytettävät sisäiset rakenteet, kennorakenteet ja kuvassa 1 esitetty ristikkorakenne. Materiaalin lisääminen myös vähentää hukkamateriaalin määrää huomattavasti, sillä materiaalia lisätään vain sinne missä sitä tarvitaan (Ford & Despeisse 2016, s.1574).



Kuva 1. Kappaleen sisäinen ristikkorakenne massan vähentämiseksi (Autodesk 2019)

Valmistettava kappale suunnitellaan käyttäen jotakin tietokoneavusteista suunnitteluohjelmaa (engl. computer aided design, CAD). Kun kappale on suunniteltu, tiedosto muutetaan STL-formaattiin, jotta laite saa tulostettavan kappaleen tiedot. Tämän jälkeen generoidaan tarvittavat tukirakenteet, käsitellään digitaalista mallia sekä säädetään tulostimen rakennusparametrit halutuiksi. Kun kappaleen tiedot on syötetty, asetukset ovat oikeat ja esivalmistelut laitteella on tehty, tulostin aloittaa kappaleen rakentamisen. Tulostuksen loputtua kappale poistetaan työskentelyalustasta ja siitä poistetaan tulostuksessa

vaaditut tukirakenteet ja suoritetaan mahdollinen viimeistely sekä jälkikäsittelyt. (Gibson et al. 2015, s.4-6.)

3.1 Prosessit

Standardin SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 mukaan lisäävä valmistus voidaan jakaa seitsemään eri menetelmään, jotka voidaan jakaa yksi- ja monivaiheisiin prosesseihin (katso taulukko 1). Yksivaiheisessa prosessi kappale valmistetaan yhdessä vaiheessa siten, että kappale saa halutun geometrian ja materiaaliominaisuudet. Kappaleista voidaan joutua poistamaan tukirakenteita tai se täytyy puhdistaa, mutta standardin mukaan niitä ei pidetä erillisinä prosessivaiheina. Monivaiheinen prosessi koostuu useammasta vaiheesta, jossa yleensä ensimmäisessä vaiheessa valmistetaan geometria ja seuraavissa vaiheissa kappaletta jalostetaan, jotta saavutettaisiin halutut materiaaliominaisuudet.

Taulukko 1. Lisäävän valmistuksen menetelmäluokat (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017, s.7-8)

Menetelmäluokka	Kuvaus
Sideaineen suihkutus	Nestemäinen sideaine kohdistetaan valittuihin kohtiin jauheen liittämiseksi
Suorakerrostus	Kohdennettua lämpöenergiaa (laser, elektronisuihku tai plasma) käytetään sulattamaan ja liittämään materiaalia kohdennetusti
Materiaalin suihkutus	Raaka-ainepisarat kovetetaan kohdennetusti
Jauhepetisulatus	Lämpöenergia sulattaa jauhepedin kohdennettuja alueita
Pursotus	Materiaali annostellaan kohdennetusti suuttimen tai reiän läpi
Kerroslaminointi	Materiaalileikkeitä liitetään siten, että muodostuu kappale

Taulukko 1 jatkuu. Lisäävän valmistuksen menetelmäluokat (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017, s.7-8)

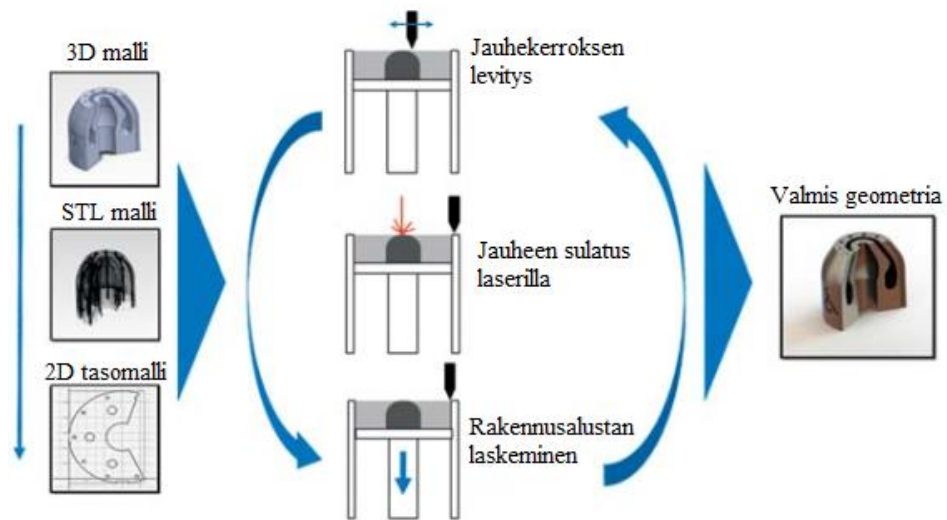
Menetelmäluokka	Kuvaus
Valokovetus altaassa	Nestemäinen muovi kovetetaan kohdennetusti käyttäen valoaktiivista polymerointia

Kuten taulukosta 1 nähdään lisäävällä valmistuksella on monia eri menetelmiä, joilla on omat vahvuutensa ja käyttökohteensa. Tämän työn kannalta kiinnostavimpia menetelmiä ovat suorakerrostus, jauhepetisulatus ja kerroslaminointi, koska ne soveltuvat metallien lisäävään valmistukseen. Työssä kuitenkin keskitytään jauhepetisulatukseen, koska se on käytetyin ja kehittynein prosessi metallien lisäävässä valmistuksessa (Yang et al. 2017, s.63; Milewski 2017, s. 37).

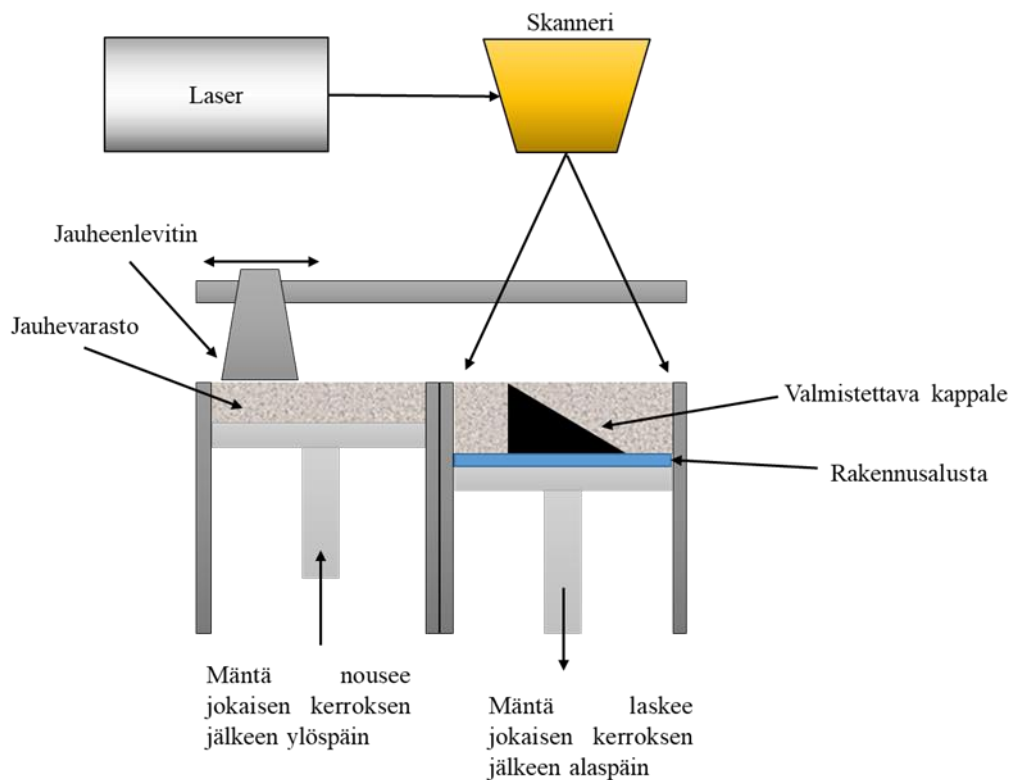
3.2 Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatus on menetelmä, jossa jauhe sulatetaan kohdennetun lämpöenergian avulla digitaalisesta mallista viipaloidun datan mukaisesti kerros kerrokselta (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017, s.7; Yang et al. 2017, s. 63).

Prosessi alkaa sillä, että metallijauhetta levitetään rakennusalustalle, jonka jälkeen lasersäde skannaa ja sulattaa jauhetta viipaloidun datan mukaisesti. Tämän jälkeen alusta laskeutuu asetetun kerrospaksuuden, yleensä 20-60 μm , verran alaspäin ja alustalle levitetään uusi kerros jauhetta. Tämä prosessi toistetaan, kunnes kappale on valmis. (Chekurov et al. 2017, s.9; Brandt 2017, s.260.) Kuvassa 2 on esitetty jauhepetisulatuksen yksinkertaistettu valmistusprosessi ja kuvassa 3 on kuvattu jauhepetisulatus tulostimen toimintaperiaate.



Kuva 2. Jauhepetisulatuksen prosessi (Mukaiillen Scotti et al. 2014, s.10)



Kuva 3. Jauhepetisulatus laitteen periaate (Mukaiillen Arptech, 2015)

Kun haluttu geometria on saavutettu, kappale poistetaan valmistusalustasta ja suoritetaan mahdollinen jälkikäsittely. Jälkikäsittelyyn kuuluu mahdolliset tukirakenteiden poistot, pinnankäsittelyt ja lämpökäsittelyt. (Gibson et al. 2015, s.329.)

Valmistuksen aikana valmistuskammio on täytetty inertillä kaasulla hapettumisen estämiseksi. Kaasu estää sulan hapettumisen ja auttaa poistamaan valmistuksessa syntyvän höyryn. (Brandt 2017, s. 12.)

4 LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN HYÖDYT JA HAASTEET

Lisäävä valmistus on tekniikka, joka mahdollistaa paljon uudenlaisia ratkaisuja, mutta se ei ole korvaamassa perinteisiä menetelmiä. AM on oikein käytettynä tehokas valmistusmenetelmä, jolla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, joista osa on listattuna taulukossa 2. Jotta yritys onnistuisi mahdollisimman hyvin metallien lisäävän valmistuksen aloittamisessa, yrityksen täytyy hyödyntää lisäävän valmistuksen etuja mahdollisimman paljon, mutta samalla myös huomioida sen aiheuttamat haasteet.

Taulukko 2. Lisäävän valmistuksen edut ja haasteet (Ford & Despeisse 2016, s. 1575).

Edut	Haasteet
Pienet erät asiakkaalle räätälöityjä tuotteita on edullisia valmistaa verrattuna perinteisiin menetelmiin	Tuotannon hinta ja nopeus
Suora valmistus CAD-tiedostosta tarkoittaa sitä, että ei tarvita erillisiä työkaluja tai muotteja	Suunnittelijoiden ajatusmaailman muuttaminen pois vanhoista tavoista ja saada heidät kokeilemaan lisäävää valmistusta
Kappaleiden suunnitelmat ovat digitaalisessa muodossa, joten niiden jakaminen ja muokkaaminen on helppoa	Poistaa ennakkoluulo, että AM on pelkästään nopeaa prototyyppointia
AM säästää materiaalia ja mahdollistaa jauheen uudelleenkäytön	Uusien materiaalien kehittäminen ja standardointi
Monimutkaisten kappaleiden valmistaminen mahdollista	Tuotannon automatisointi tuotannon tehokkuuden nostamiseksi
Valmiilla kappaleella todella matala huokoisuus	Jälkikäsittelyn tarve
Tilauksesta valmistaminen vähentää varastojen täyttymisen riskiä myymättömillä tuotteilla	Tukirakenteita ei voida kierrättää, joten niiden määrä mahdollisimman alas hyvällä suunnittelulla

Taulukko 2 jatkuu. Lisäävän valmistuksen edut ja haasteet (Ford & Despeisse 2016, s. 1575).

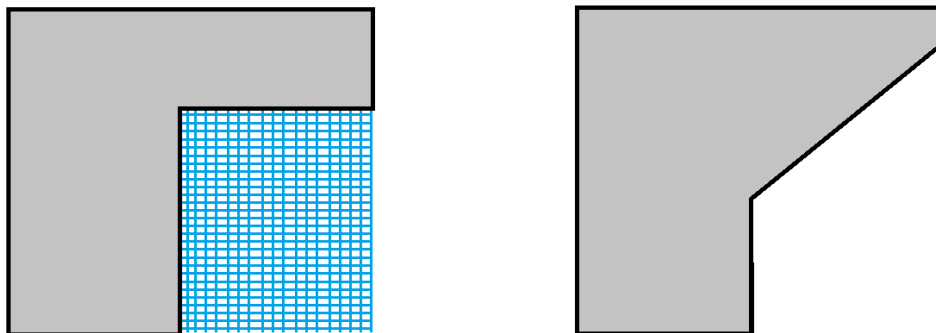
Edut	Haasteet
Tuotannon hajauttaminen mahdollistaa paikallisten asiakkaiden ja tuottajan välisen vuorovaikutuksen	Lisäävän valmistuksen asiantuntijoiden puute

Kuten taulukosta 2 nähdään, lisäävä valmistus on parhaimmillaan valmistettaessa pieniä eriä sekä monimutkaisia tuotteita. Lisäksi tiedon ollessa digitaalisessa muodossa valmistettavan kappaleen geometriaa on helppo muokata asiakkaalle sopivaksi ja se myös mahdollistaa tuotannon hajauttamisen, sillä kappaleen tiedot voidaan lähettää internetin välityksellä toiselle tulostimelle, joka on lähempänä asiakasta. Monimutkaisten kappaleiden tulostaminen tilauksesta on myös mahdollista, sillä se on nopeampaa kuin perinteisillä menetelmillä, sillä kappale valmistetaan yhdellä kerralla. Lisäävällä valmistuksella on kuitenkin heikkoutensa, kuten yleensä ottaen tiedon puute teollisuudessa. Tiedon puute johtaa ajattelutapaan, että lisäävä valmistus soveltuisi vain prototypointiin, eivätkä suunnittelijat tällöin osaa hyödyntää lisäävää valmistusta oikein. Lisäävän valmistuksen tuotanto saattaa myös olla kallista ja hidasta, mutta näitä huonoja puolia voidaan kompensoida valmistamalla monimutkaisia ja arvokkaita tuotteita. (Ford & Despeisse 2016, s.1574-1576.)

Laitteiden, materiaalien, prosessien ja logistiikan standardointi ja sertifiointi on tärkeätä sille, että tuotannosta tulisi mahdollisimman tasalaatuista (Niaki & Nonino 2018, s.125). Koska lisäävä valmistus on vielä suhteellisen uusi ja kehittyvä valmistustekniikka, sen standardointi on vielä puutteellista, mutta standardoinnin parissa työskennellään jatkuvasti (Schnabel et al. 2017, s.25).

Kappaleen kerrospaksuus vaikuttaa kappaleen laatuun ja valmistusaikaan. Valittaessa suurempi kerrospaksuus, valmistusaika vähenee, mutta kappaleesta tulee epätarkempi. Koska kappale valmistetaan kerros kerrokselta, syntyy ns. ”porrasefekti”. Tämä efekti näkyy kaarevissa reunoissa varsinkin suurella kerrospaksuudella. Tämän seurauksena täytyy päättää, haluaako parempilaatuisen kappaleen korkeammalla hinnalla, vai huonomman tuloksen halvemmillä kustannuksilla. (Brandt 2017, s.260.)

Jauhepetisulatuksessa ei voida rakentaa ”tyhjän päälle”. Kun ylitetään kriittinen kulma, valmistuksessa joudutaan käyttämään tukirakenteita. Yleisesti tällä kulmalla tarkoitetaan noin 45 ± 10 astetta, mutta tämä vaihtelee riippuen materiaalista ja laitteesta. (Brandt 2017, s.261.) Tukirakenteiden täytyy kestää rakennusvaiheen jännitykset sekä johtaa valmistettavasta kappaleesta lämpöä pois, mutta samalla niiden täytyy olla myös sellaisia, että niiden poistaminen olisi helppoa. Tästä seuraa se, että tukirakenteiden suunnittelu tapahtuu niin sanotusti kokeilun ja erehdyksen avulla. (Milewski 2017, s.199.) Koska tukirakenteet täytyy poistaa kappaleen valmistuksen jälkeen, ne nostavat valmistuskustannuksia. Tämän takia olisi järkevää suunnitella kappale niin, että siinä käytettäisiin mahdollisimman vähän tukirakenteita, jolloin jälkikäsitteily ja materiaalin käyttö pysyy minimissään. Kuvassa 4 on esitetty, kuinka tukirakenteiden käytöltä vältytään muokkaamalla alkuperäinen 90 asteen kulma pienemmäksi.



Kuva 4. Tukirakenteiden poisto muokkaamalla kappaleen geometriaa (Mukaiillen Brandt 2017, s.262)

4.1 Kokoonpanojen tulostus

Lisäävässä valmistuksessa kappale valmistetaan yhdessä työvaiheessa kertatulosteena, jonka ansiosta muun muassa valmistusaika lyhenee tuotteissa, jotka koostuvat monesta osasta. Koska monimutkaisen komponentin jokaista pientä osaa ei tarvitse valmistaa erikseen ja yhdistää niitä jälkikäteen, yritykselle voi syntyä huomattavia säästöjä kuluissa, jonka takia tämä lisäävän valmistuksen etu on yrittäjälle tärkeä. Esimerkiksi Morris Technologies valmisti kuvan 5 polttoainejärjestelmän ruiskutuslaitteen käyttäen lisäävää valmistusta.



Kuva 5. Morris Technologiesin valmistama polttoainejärjestelmän ruiskutussuutin (GE 2017)

Perinteisillä menetelmillä valmistettuna kuvan 5 suutin koostui 20 eri osasta, jonka seurauksena se oli altis heikoille kohdille ja säröille. Uudella valmistustavalla nämä uhkat vältettiin ja tuotteen odotetaan kestävän viisi kertaa pidempään kuin aiemmin. Lisäksi rakennetta saatiin 25% kevyemmäksi ja samalla valmistuskustannukset saatiin alhaisemmiksi. Suunnittelun avulla suuttimen hiilikertymää vähennettiin, jolloin suuttimesta saatiin tehokkaampi. (Gibson et al. 2015, s.470.)

Myös Siemens on ottanut lisäävän valmistuksen osaksi kaasuturbiinin polttimen tuotantoa (katso kuva 6).

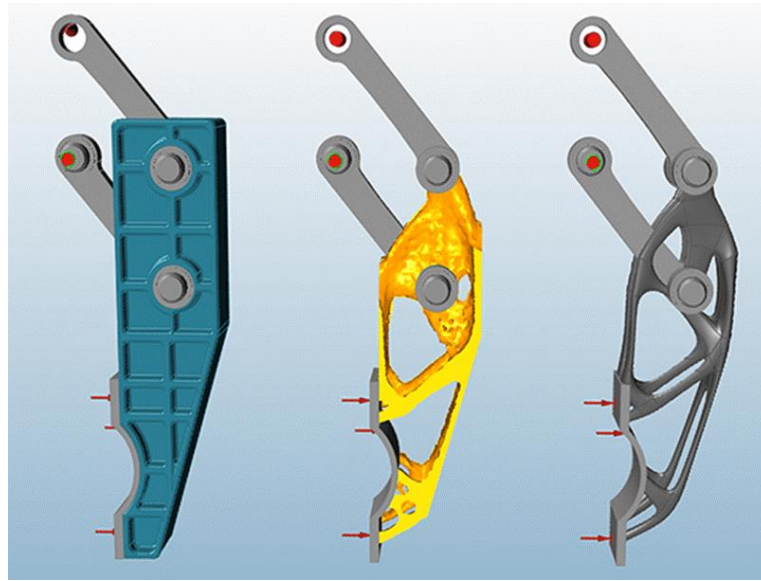


Kuva 6. Siemensin valmistama polttin SGT-700 kaasuturbiiniin (Siemens 2018)

Aiemmin kuvan 6 polttimen pää valmistettiin 13 eri osasta ja vaati 18 hitsiä. Lisäävällä valmistuksella kappale saadaan valmistettua kerralla, joka vähentää liitoskohtien heikkouksien riskiä. Kappaleen uudelleensuunnittelun myötä polttimen massa laski 25%:lla ja käyttölämpötilat saatiin alhaisemmiksi, jonka ansiosta myös polttimen ja koko kaasuturbiinin käyttöikä pidemmäksi. (Siemens 2018.)

4.2 Topologinen optimointi

Topologinen optimointi on matemaattinen työkalu, jota käytetään apuna kappaleen suunnittelussa. Sitä käytetään, kun kappaleen massaa halutaan kevyemmäksi ilman, että se menettäisi haluttuja materiaaliominaisuuksia. (Yang et al. 2017, s.122.) Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että materiaalia sijoitetaan vain sinne missä sitä tarvitaan (ks. kuva 7).



Kuva 7. Robotin tartuntakynnen topologinen optimointi (Altair 2019)

Kuten kuvasta 7 nähdään, topologisella optimoinnilla kappaleen massaa ja valmistamiseen käytettävää materiaalia saadaan huomattavasti matalammaksi. Kuvassa 7 vasemmalla on alkuperäinen kappale, keskellä optimointiohjelman tulos ja oikealla optimoinnin perusteella CAD:ssa uudelleensuunniteltu kappale.

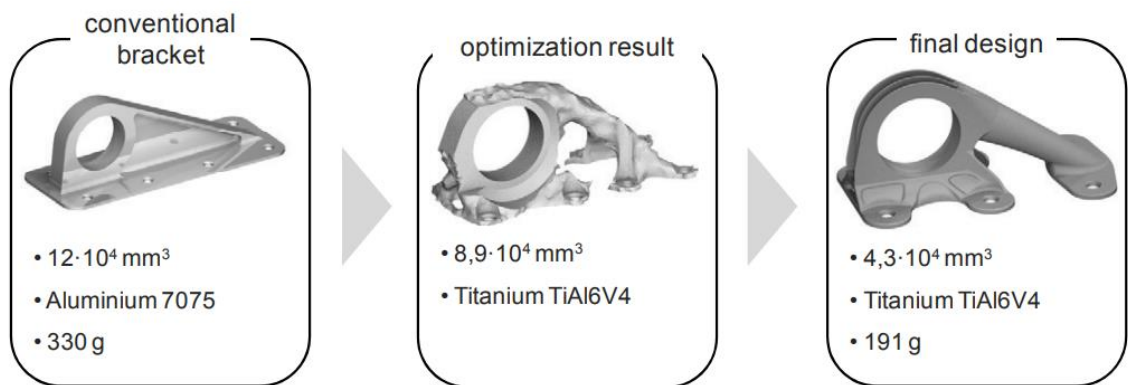
Topologisella optimoinnilla saavutetaan seuraavat asiat: minimisoitu paino, pienemmät maksimijännitykset, homogeeninen jännitysjakautuma ja tuotantojätteen vähentyminen (Brandt 2017, s.273). Tämän lisäksi kappaleen tulostaminen on nopeampaa, koska tulostamista on vähemmän, jonka seurauksena tulostuskustannuksetkin voivat laskea. Yrittäjän näkökulmasta topologinen optimointi on työkalu, jolla mahdollisesti nostetaan tuotteen arvoa, sillä muun muassa lentokone- ja autoiluteollisuudessa pienelläkin massan vähentämisellä voidaan saada suuria säästöjä polttoainekustannuksissa.

4.3 Suunnittelun vapaus

Lisävä valmistus tarjoaa korkean vapauden kustomoinnin suhteen ilman suurta vaikutusta valmistuksen vaikeuteen ja hintaan (Yang et al. 2017, s.5). Toisin kuin perinteisissä menetelmissä valmistettavan kappaleen hinta johtuu sen koosta, eikä geometrian monimutkaisuudesta (Brandt 2017, s.259). Lisävä valmistus mahdollistaa kappaleen eri versioiden samanaikaisen testauksen minimaalisilla lisäkustannuksilla, joka helpottaa innovaatioiden ja uusien mallien luomista (Gu 2015, s 7).

Perinteisissä valmistusmenetelmissä joudutaan myös miettimään tuotteen kokoonpanoa ja valmistusta. Näitä varten tuotesuunnittelussa käytetään ”Design for Manufacturing ja Design for Assembly”-periaatteita, jotka rajoittavat tuotteen suunnittelua. Lisäävässä valmistuksessa taas käytetään ”Design for Additive Manufacturing”-periaatetta, joka ei rajoita suunnittelua vaan auttaa hyödyntämään lisäävän valmistuksen etuja. (Niaki & Nonino 2018, s.136.) Lisäävän valmistuksen suunnitteluprosessissa täytyy kuitenkin huomioida seuraavat asiat: tukirakenteiden suunnittelu ja niiden poisto, valmistustarkkuus, toleranssit, minimi seinämäpaksuus, saatavilla olevat materiaalit ja niiden ominaisuudet, tulostussuunnan vaikutus kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin ja tulostimen asettamat kokorajoitukset. (Atzeni & Salmi 2011, s.1149.)

Käytännön esimerkkinä Emmelmann et al. (2011) tutkimuksessa uudelleensuunniteltiin Airbus A380 lentokoneen sarana, koska sarana haluttiin kevytrakenteiseksi (ks. kuva 4) (Emmelmann et al. 2011, s.367).



Kuva 8. Airbus A380 lentokoneen sarana uudelleensuunniteltuna (Emmelmann et al. 2011, s. 367).

Kuten kuvasta 8 nähdään, suunnittelun vapauden ja materiaalin vaihdon, alumiinista titaaniin, seurauksena saranan massa saatiin alkuperäisestä 330 grammasta 191 grammaan. Polttoainekustannuksien lisäksi myös valmistuksessa syntyvä tuotantojäte laskevat uudelleensuunnittelun seurauksena. (Emmelmann et al. 2011, s.367.)

4.4 Ympäristöystävällisyys

Lisäävässä valmistuksessa hukkamateriaalin määrä on huomattavasti alhaisempi kuin perinteisissä menetelmissä, johtuen siitä, että materiaalia lisätään vain sinne missä sitä tarvitaan. Tämän ansiosta myöskin energiaa menee vähemmän hukkaan verrattuna perinteisiin menetelmiin. (Gu 2015, s. 7.) Ympäristöystävällisyyttä edistää myöskin se, että jauhepetisulatuksessa käyttämättä jääneet jauhot voidaan käyttää uudestaan siivilöinnin jälkeen (Brandt 2017, s.264). Lisäksi myös lisäävä valmistus mahdollistaa tuotannon siirtämisen lähemmäksi asiakasta, joka vähentää logistiikan kuluja lisäksi myös päästöjä (Yang et al. 2017, s.165). Yrittäjän näkökulmasta ympäristöystävällisyys on tärkeä aihe, koska sitä pidetään osana vastuullista yrittäjyyttä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2009, s.5).

5 METALLIEN 3D-TULOSTUKSEN ALOITTAMINEN YRITYSTOIMINTANA

Ennen kuin aloittaa miettimään valmistettävien kappaleiden valmistuskustannuksia, täytyy pohtia onko lisäävän valmistuksen käyttö hyödyllistä kyseisessä tapauksessa. Tätä varten yrityksille on luotu erilaisia kysymystaulukoita, jotka antavat alustavan kuvan siitä, että kannattaako yrityksen aloittaa lisäävää valmistusta. Taulukossa 3 on esitetty kysymyksiä, jotka kertovat yritykselle onko lisäävän valmistuksen aloittaminen kannattavaa yritystoiminnan näkökulmasta. Yrityksen vastatessa kyllä suurimaan osaan taulukon kysymyksistä, lisäävän valmistuksen aloittaminen on todennäköisesti kannattavaa. (Brandt 2017, s.282.)

Taulukko 3. Kysymyksiä lisäävän valmistuksen kannattavuudesta (Brandt 2017, s.282)

Tuotteen luonne:	Valmistanko monimutkaisia tuotteita?
	Hyödynkö tuotteen kevennyksestä?
	Voinko käyttää rahaa tuotteiden lisäominaisuuksiin?
Toimitusketju:	Onko minulla paljon työkaluja varaosia varten?
	Hyödynkö tuotannon hajauttamisesta?
	Täytyykö minun valmistaa varaosia kauan?
Tuotteen varastaminen:	Voidaanko tuotteitani kopioida?
	Pitääkö tuotteiden aitous merkata?
	Onko merkkauksesta hyötyä?
Time to market:	Onko tuotteeni kriittisellä polulla?
	Onko minulla tuotteita, jotka on uudistettu monta kertaa?
	Hyödynkö nopeista loppupään prototyypeistä?
Business case:	Hyödynkö yksittäisistä tuotteista tai pienistä eristä?

Taulukko 3 jatkuu. Kysymyksiä lisäävän valmistuksen kannattavuudesta (Brandt 2017, s.282)

Business case:	Haluanko olla teknologian johtajan asemassa?
	Hyötyykö liiketoiminta asiakkaille mukautetusta suunnittelusta?
Materiaalit	Onko haluamani materiaalit alan kehittyneintä?
	Onko materiaalia saatavilla?
	Tiedätkö materiaalin ominaisuudet ja muut tiedot?

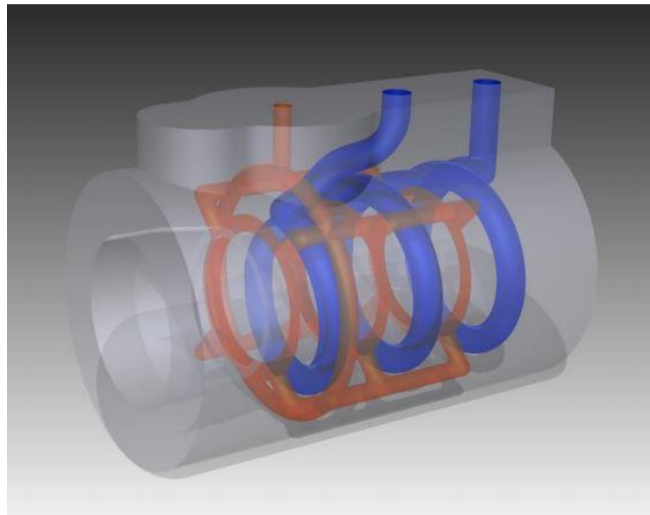
Kuten taulukosta 3 nähdään, lisäävän valmistuksen aloittaminen ei ole vain sitä, että ostetaan tulostin ja aloitetaan kappaleiden tulostaminen. Taulukossa tuodaan ilmi se, että lisäävän valmistuksen järkevä käyttö edellyttää, että sen etuja hyödynnetään mahdollisimman paljon. Tämä tarkoittaa yleensä sitä, että valmistettava kappale täytyy uudelleen suunnitella lisäävää valmistusta varten, jotta AM:n etuja voidaan hyödyntää (ks. kuva 7 & 8) (Atzeni & Salmi 2011, s.1148). Yrittäjän täytyy myös huomioida tulostimen lisäksi siivilöinnin, jauheen käsittelyn, kaasuverkon, paineilman, lämpökäsittelyn, pintakäsittelyn, mittauksen, koneistuksen, vanne- ja lankasahan tarve (Kastell 2019, s.13).

Taulukon 3 ensimmäinen sarake viittaa lisäävän valmistuksen luultavasti tunnetuimpiin etuihin, eli monimutkaisten rakenteiden valmistamiseen, kappaleen massan vähentämiseen ja lisäominaisuuksien mahdollisuuteen. Tästä hyvänä esimerkkinä voidaan pitää kuvassa 6 esitettyä Siemensin poltinta. Eli valmistettavan kappaleen kannattaisi olla rakenteeltaan mahdollisimman monimutkainen, kevytrakenteisuudesta ja lisäominaisuuksista hyötyvä, jotta lisäävän valmistuksen etuja saadaan hyödynnettyä mahdollisimman paljon. (Brandt 2017, s.282.)

Toimitusketjun kysymyksissä tuodaan ilmi se, että lisäävässä valmistuksessa ei tarvita eri työkaluja eri kappaleiden valmistukseen vaan kaikki valmistetaan kappaleet valmistetaan samalla periaatteella. Lisäksi lisäävän valmistus mahdollistaa tuotannon hajauttamisen,

koska tulostin valmistaa kappaleen itsenäisesti jälkikäsitteilyä lukuun ottamatta. (Brandt 2017, s.282.)

Nykyään piratismien määrä on kasvussa ja sen takia se on otettu huomioon taulukossa 3. Tuoteväärännöksiä ei ainakaan vähennä se, että lisäävässä valmistuksessa tulostin tekee suurimman osan työstä, eikä kappaleiden valmistukseen tarvitse erikoistyökaluja. Mutta toisaalta AM vaatii kalliin laitteen ja paljon erikoisosaamista, joten se ei ole helppoa. Tämän takia tuotteen varastaminen on mukana taulukon 3 kysymyksissä. Tuotteiden väärentämistä voidaan vähentää esimerkiksi funktioiden integroimisella, eli yhdistämällä tuotteen ominaisuuksia, jotta rakenteesta tulisi mahdollisimman monimutkainen ja sen uudelleenpiirtäminen CAD:lla olisi hankalaa. Kuvassa 9 on esitetty muovin ja metallijauhon pursotusprosessin kalibrointityökalu, jonka rakenteeseen on integroitu jäähdytiskanavat. Jäähdytiskanavat integroitiin rakenteeseen, sillä aiemmin jatkuvassa pursotuksessa raaka-aine jouduttiin jäähdyttämään pursotuksen jälkeen, jotta se säilyttäisi halutun muodon. (Schnabel et al. 2017, s.51.)



Kuva 9. Pursotusprosessin kalibrointityökalun imukanavat (punainen) ja jäähdytiskanavat (sininen) (Schnabel et al. 2017, s.52)

Kuten kuvasta 9 nähdään, lisäävä valmistus mahdollistaa funktioiden integroinnin myös pieniin tiloihin. Kuvan kappaleessa jäähdytys- ja imukanavien pienin etäisyys on noin 1mm ja jäähdytiskanavat sijaitsevat lähellä työkalun sisäpintaa. Tämän kaltaiset geometriat eivät myöskään ole mahdollisia valamisella. (Schnabel et al. 2017, s.51-53.) Kuvan 9 tapauksessa

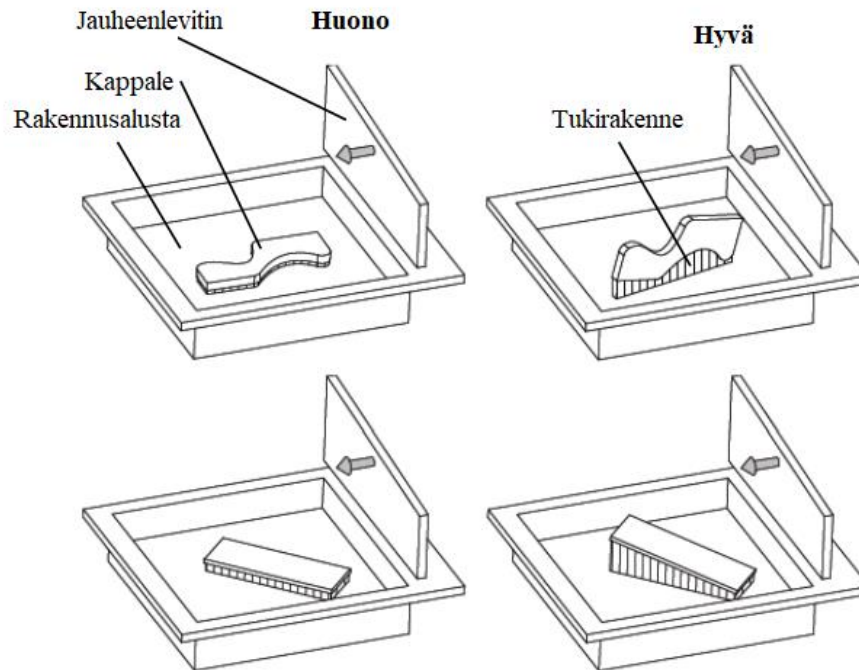
funktioiden integroinnilla ei ole tarkoitus vaikeuttaa kopiointia, vaan antaa esimerkki miten vanhaan tuotteeseen voidaan lisätä uusia ominaisuuksia lisäävällä valmistuksella.

Lisäksi kopiointia voidaan vaikeuttaa niin sanotulla ”black box”-menetelmällä eli piilotetaan tuotteen tärkeimmät osat, etteivät ne näy kappaleen ulkopuolelle. (Brandt 2017, s.302.)

Taulukon 3 ”Time to market” sarakkeella varmistetaan se, että hyödynnetään lisäävän valmistuksen luomaa mahdollisuutta nopeisiin muutoksiin kappaleissa. Tämä on varsinkin hyödyllistä, jos tuotteita uudistetaan tiuhaan tahtiin tai mikäli asiakkaille lähetetään kustomoidut mallit. Taulukossa kriittisellä polulla tarkoitetaan sitä, että kuuluuko valmistettava kappale johonkin suurempaan kokonaisuuteen, jonka onnistuminen riippuu siitä, että valmistuuko kappale aikataulun mukaisesti. (Brandt 2017, s.282.)

5.1 Tuotannon aloittaminen

Normaalisti tuotteen valmistaminen alkaa CAD-suunnittelulla, kuten perinteisissäkin menetelmissä, paitsi kun valmistetaan asiakkaalle yksilöity tuote. Tällöin data saadaan esimerkiksi 3D-skannaamalla. 3D-skannaamisen ongelmaksi muodostuu kuitenkin se, että skannaamalla saadaan vain kappaleen ulkoiset muodot, eikä sisäisiä. Lisäävässä valmistuksessa täytyy kuitenkin normaalin suunnittelun lisäksi miettiä kappaleen tukirakenteita ja sijoitusta rakennuskammiossa, sillä valmistettavia kappaleita voi olla monta samaan aikaan tai kappale voi vaatia vähemmän tukirakenteita, kun se tulostetaan tietyssä asennossa. Tukirakenteiden ja valmistettavan kappaleen täytyy olla oikeassa asennossa, jotta valmistusprosessi syntyvä lämpö jakautuisi tasan, eikä aiheuttaisi muodonmuutoksia kappaleessa (ks. kuva 10). Tähän prosessiin kuluva aika ja raha riippuu valmistettavan kappaleen monimutkaisuudesta. (Brandt 2017, s.289; Schnabel et al. 2017, s.17.)



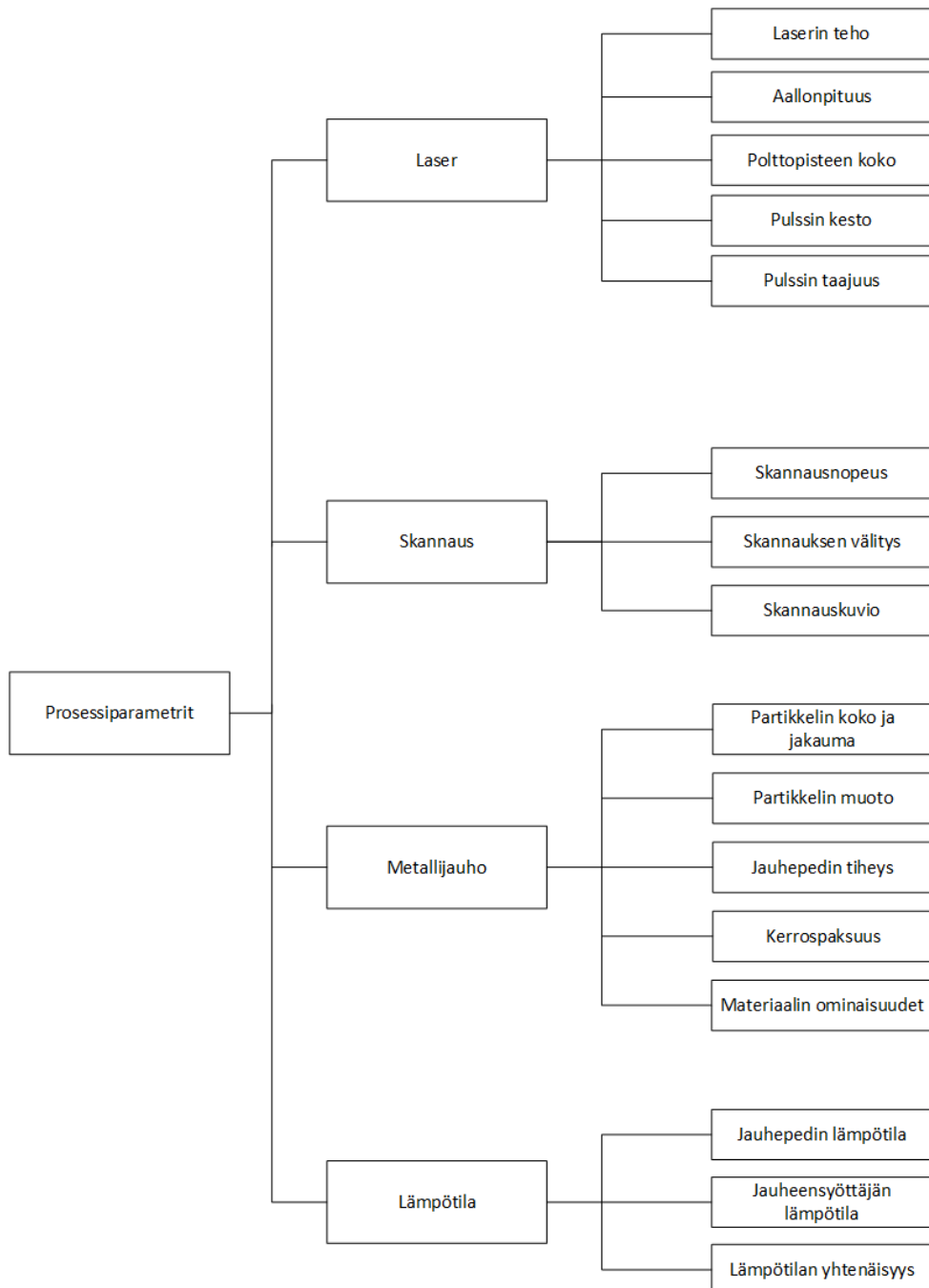
Kuva 10. Esimerkit hyvästä ja huonosta kappaleen asettelusta muodonmuutoksien välttämiseksi (Mukaillen VDI 3405 Osa 3, 2015)

Kuten kuvasta 10 nähdään, tukirakenteiden asettelu ei ole vain sitä, että ne laitetaan kohtisuoraan kappaleen alapuolelle, vaan myös kappaleen valmistuskulmaa täytyy miettiä. Tukirakenteiden suunnittelu ja kappaleen valmistussuunta korostuu varsinkin ontoissa rakenteissa, koska ontoissa rakenteissa tukirakenteiden käytöltä voidaan välttyä, mikäli valmistussuunta on valittu oikein (Schnabel et al. 2017, s.21).

Hyvällä suunnittelulla ja oikeilla parametreilla saadaan aikaiseksi suuri vaikutus tuotannon myöhemmissä vaiheissa, joten suunnittelussa vaaditaan metallien lisäävän valmistuksen asiantuntemusta. (Brandt 2017, s.289; Schnabel et al. 2017, s.17.)

Useimmat metallien lisäävän valmistuksen tutkimukset ovat keskittyneet uusien materiaalien ja prosessien kehitykseen, ja suuri osa nykyisestä tiedosta perustuu kokemusperäisiin tuloksiin ja kokeellisiin havaintoihin, jonka seurauksena lisäävän valmistuksen suunnitteluohjeet ovat laite- tai materiaalikohtaisia. Esimerkiksi vanhemmalla tulostinmallilla testatut parametrit eivät välttämättä tuota haluttua tulosta uudemmalla mallilla, koska esimerkiksi suojakaasun virtaus on muuttunut. Tämän lisäksi kaikkia

parametreja ei välttämättä edes ole määritelty ohjeissa. (Yang et al. 2017, s.82.) Kuvassa 11 on esitetty yleisesti tärkeimpiä tulostimen parametrejä, mutta nämä saattavat vaihdella laitteen mukaan.



Kuva 11. PBF-laitteen tärkeimmät parametrit (Mukaiillen Brandt 2017, s.56)

Kuten kuvasta 11 nähdään, PBF-laitteissa on paljon säädettäviä parametrejä, jotka voivat vaikuttaa valmistettavan kappaleen lopputulokseen. Yrityksen siis kannattaa olla varautunut käyttämään aikaa parametrien optimointiin ennen tuotannon aloittamista, jotta saavutettaisiin haluttu lopputulos. Parametrien säädettävyys vaihtelee laitevalmistajittain, joillain laitevalmistajilla on hyvin valmiita, suljettuja systeemejä, kun taas toisilla avoimia systeemejä, jotka vaativat parametrien säätämistä.

5.2 Toimitusketju

Lisäävän valmistuksen etuna on se, että tuotanto voidaan tuoda lähemmäksi asiakasta, jolloin toimitusajat lyhenevät ja logistiikan kustannukset laskevat (Yang et al. 2017, s.165). Lisäksi tuotantoa voidaan hajauttaa eri sijanteihin, jolloin tuote ei ole riippuvainen vain yhdestä lähteestä ja tällöin myös voidaan päästä lähemmäksi asiakasta (Niaki & Nonino 2018, s.72). Tuotannon hajauttamista helpottaa se, että kappaleen tiedot voidaan lähettää tulostimelle internetin avulla, joka mahdollisesti vähentää kuljetuksen kuluja (Gu 2015, s.7). Luultavasti tulevaisuudessa metallien lisäävää valmistusta voidaan käyttää rikkiäisten toimitusketjujen korjaukseen. Esimerkiksi armeijat kärsivät pitkistä ja rikkiäisistä toimitusketjuista, ja ne voitaisiin korjata asentamalla AM-laitteita isoihin lentotukialuksiin. Samaa periaatetta voitaisiin myös käyttää normaalissa teollisessa käytössä. (Yang et al. 2017, s.166.)

Perinteinen toimitusketjun malli koostuu suurista tuotantomääristä ja matalista hinnoista, joka sopii esimerkiksi autoteollisuuteen, muttei lentokoneiteollisuuteen. Lisäävän valmistuksen kanssa voitaisiin käyttää menetelmää, että tuotteita valmistetaan tilauksen mukaan, joka voisi sopia yrityksille, jotka tuottavat pieniä määriä monimutkaisia tuotteita. Tätä käytettäessä yritys ei tarvitse suurta varastoa ja tuotanto voisi sijoittua mihin tahansa, sillä tarvittavat raaka-aineet ovat saatavilla ympäri maailmaa. Koska lisäävä valmistus on pitkälti itsenäistä, työvoiman hinta ei vaikuta tuotantoon suuresti, paitsi tilanteissa, joissa jälkityöstön osuus on suuri. (Yang et al. 2017, s.165.) Taulukossa 4 on esitetty lisäävän valmistuksen etuja ja niiden synnyttämiä positiivisia vaikutuksia toimitusketjuun.

Taulukko 4. Lisäävän valmistuksen vaikutus toimitusketjuun (Attaran 2017, s. 684).

Lisäävän valmistuksen hyöty	Vaikutus toimitusketjuun
Massaräätälöinti	Lyhyempi valmistuksen läpimenoaika
Valmistus tilauksesta	Pienempi inventaario

Taulukko 4 jatkuu. Lisäävän valmistuksen vaikutus toimitusketjuun (Attaran 2017, s. 684).

Tuotannon hajautus	Pienempi erä koko
Kyky valmistaa tuote yhdellä kerralla	Nopea vastaus asiakkaan pyyntöön
Laadun parantuminen	Vähentynyt tuotantojäte
	Parantunut kestävyys

Kuten taulukosta 4 nähdään valmistus tilauksesta aiheuttaa pienemmän inventaarion. Tällä menetelmällä saadaan merkittävät aikaiseksi merkittävät kustannussäästöt, sillä ainoa varastoitava asia on raaka-aineet (Atzeni & Salmi 2011, s.1). Esimerkiksi suuret lentokoneet koostuvat monesta miljoonasta eri osasta. Varaosia tarvitaan epäsäännöllisesti, mutta niitä joudutaan varastoimaan, jotta nopea toimitus olisi mahdollista. Lisäävällä valmistuksella kappaleiden valmistus tilauksesta voisi vähentää varastoitavien kappaleiden määrää. (Huang et al. 2012, s.1197.)

Taulukossa 4 on listattu lisäävän valmistuksen etuja, joiden avulla voidaan päästä eroon teollisuuden rajoitteista ja saada uusia mahdollisuuksia tuotantoketjuun. Lisäävä valmistus mahdollistaa massaräätälöinnin halvemmalla ja nopeammin kuin perinteiset valmistusmenetelmät, sillä jokaista asiakkaalle kustomoitua tuotetta ei tarvitse valmistaa erikseen, vaan ne voidaan valmistaa samanaikaisesti muuttamalla CAD-tiedostoa asiakkaan toivomusten mukaisesti. (Attaran 2017, s.681.)

Tuotannon hajauttaminen lisäävässä valmistuksessa on helpompaa kuin perinteisissä valmistusmenetelmissä, sillä tiedostot voidaan siirtää digitaalisesti. Tuomalla tuotantoa lähemmäs asiakasta, lasketaan logistiikan kuluja ja vaikutusta luontoon. Samalla tuote saadaan myytyä nopeammin. Lisäävä valmistus myöskin sallii tuotteen valmistuksen yhdellä kerralla, jonka tuomat edut korostuvat monimutkaisissa tuotteissa, jotka valmistetaan perinteisillä valmistusmenetelmillä monissa eri työvaiheissa. Tästä hyvänä esimerkkinä voidaan pitää kuvan 6 poltinta. Joissain tapauksissa lisäävällä valmistuksella saadaan myös laadultaan parempia tuotteita kuin perinteisillä menetelmillä, jolloin tuotteet kestävät pidempään ja tuotantojätteen määrä vähenee. (Attaran 2017, s.681-683.)

5.3 Laitteet

Ideaalissa valmistusmenetelmässä kappale pystytään valmistamaan sen koosta riippumatta (Niaki & Nonino 2018, s.121). Tämänhetkissä jauhepetisulatuslaitteissa on suhteellisen pieni rakennuskammio, yleisimmät kaupalliset laitteet väliltä 50 x 50 x 50 – 950 x 810 x 300 mm, joka rajoittaa yhdellä kerralla valmistettavien tuotteiden kokoa (SLM Solutions 2019; EOS 2019; GE 2019). Kuitenkin suuremmat kappaleet voidaan rakentaa useassa erässä ja yhdistää jälkikäsittelyn yhteydessä, mutta tämä voi estää AM:n etujen hyödyntämistä. Mikäli valmistetaan suurempaa kappaletta, niin koko kokonaisuutta ei välttämättä kannata tulostaa, vaan etsiä kokonaisuuden kriittisin komponenttia ja tulostaa se. (Brandt 2017, s. 264, s.282.)

Jotta yritys voisi tuottaa korkealaatuisia metallikappaleita kannattavalla tuotantonopeudella, heidän täytyy sijoittaa pelkästään laitteeseen puolesta miljoonasta muutamaan miljoonaan euroa (Yang et al. 2017, s.19). Tästä voidaan päätellä, että pienten yritysten kynnys siirtyä tähän valmistusmenetelmään on suuri, koska metallien lisäävän valmistuksen aloittaminen vaatii suuren alkusijoituksen.

Suomessa metallitulostimien määrä on vielä alhainen, mutta kasvussa. Vuonna 2016 laitteita myytiin yhteensä noin 980, joista 1 Suomeen. 2017 myytiin noin 1800, joista 2 Suomeen ja vuonna 2018 noin 7000 ja 4 niistä Suomeen. (Kastell 2019, s.6.) Korpelan (2018) tutkimuksen mukaan Suomessa on tällä hetkellä yli 30 metallien AM-laitetta. (Korpela 2018, s.59.) Tulostimista noin 20 on kuitenkin Turussa EOS Finlandin tutkimuskeskuksessa tutkimuskäytössä eli ne eivät ole kaupallisessa käytössä.

5.4 Materiaalit

Jauhepetisulatuksessa materiaaleina tällä hetkellä maailmalla on käytössä muun muassa alumiiniseoksia, työkaluteräksiä, ruostumattomia teräksiä, nikkelpohjaisia seoksia, titaaniseoksia, kobolttikromiseoksia, kupariseoksia, pronssi, kulta ja platina (Milewski 2017, s. 69-71). Periaatteessa metallit, joita voi hitsata, soveltuvat käytettäväksi metallijauheena (Gibson et al. 2015, s.110).

Korpelan (2018) tutkimuksen mukaan Suomessa yleisesti teollisuudessa käytetyimpiä metalleja ovat teräkset ja alumiiniseokset. Tutkimuksen kyselyyn vastanneista yrityksistä

suurin osa kertoi käyttävänsä rakenne- tai ruostumattomia teräksiä. Kyselyn yrityksiä käyttämistä teräksistä 18% oli kaupallisesti saatavilla lisäävää valmistusta varten jauheena yhdeltä tai useammalta jauhevalmistajalta. Kyselyssä 316L oli käytetyin teräs, joka on saatavilla jauheena. (Korpela 2018, s.53-54.)

Rakenneteräksistä käytetyimpiä olivat yleisesti S355 ja S235, mutta PBF-jauhevalmistajat eivät tarjoa rakenneteräksiä jauhemuodossa. Tutkimuksen mukaan kuitenkin 316L:n mekaaniset ominaisuudet ovat parempia, kuin kyseisillä rakenneteräksillä, joten materiaaliominaisuudet eivät periaatteessa rajoittaisi metallien lisäävän valmistuksen aloittamista. Ruostumattomista teräksistä käytetyimpiä olivat yleisesti 304 tai 304L ja 316 ja 316L, joista 316L on saatavilla Suomesta jauheena. 16% vastanneista kertoi käyttävänsä alumiinia tai alumiiniseoksia, joista kaikki oli saatavilla jauheena jauhevalmistajilta. (Korpela 2018, s.54-56.) Tutkimuksen tulosten perusteella metallien lisäävän valmistuksen vähäisyys Suomessa ei ainakaan johdu materiaalien vähäisyydestä.

AM-jauheille yleisesti asetettavia vaatimuksia: koostumuksen oltava oikea eli käyttötarkoitukseen ja menetelmään sopiva, jauheen oltava puhdasta eli säilytyksessä otettava huomioon hapettumattomuus, kuivuus ja muut epäpuhtaudet, jauheen juoksevuus ja pakkaantuvuus, että jauhe levittyy oikein rakennusalustalle. (Laberbom 2017, s.7.) Lisäksi jauheen laadun täytyy olla korkeaa, jotta saavutettaisiin halutut mekaaniset ominaisuudet, valmistamisen toistettavuus onnistuisi samalla laitteella, laitteiden väliset erot vähentyisivät, sekä myös raaka-aineista johtuvat virheet vähentyisivät. (Laberbom 2017, s.8.)

Jauheita tulisi säilyttää kuivassa suljetussa astiassa ja samalla välttää liian pitkät varastointiajat, jotta jauheen laatu pysyisi korkeana. Jokaiselle jauheelle tulisi suorittaa laadunvarmistustesti, koska tällöin varmistutaan, että jauheen laatu on sellaista, kun sen pitääkin olla ja käyttäytyä valmistuksessa oikein. (Laberbom 2017, s.15.)

Jauhepetisulatuksessa käyttämättä jääneet jauhot voidaan käyttää uudestaan siivilöinnin jälkeen (Brandt 2017, s.264). Jauheet kierrätetään seulomalla toisiinsa tarttuneet partikkelit pois ja tällöin uudelleen käytettävän jauheen juoksevuus voi jopa olla parempi kuin alkuperäisessä. Tukirakenteita ei kuitenkaan voi suoraan uudelleen käyttää, vaan ne viedään

romukierrätykseen sulatettavaksi yhdessä epäonnistuneiden kappaleiden kanssa. (Laberbom 2017, s.16.)

5.5 Jälkikäsitteily

Ideaalitilanteessa tulostettu kappale on valmis käytettäväksi suoraan tulostimesta, mutta metallien lisäävässä valmistuksessa prosessiin kuuluu aina kappaleen jälkikäsitteily (Gibson et al. 2015, s.48). Jälkikäsitteilyyn kuuluu tehtävät, jotka tehdään, että kappale saadaan irti rakennusaluksista ja saavutetaan haluttu pinnanlaatu. Näitä ovat esimerkiksi kappaleen tukirakenteiden poisto, pintojen hiekkapuhallus ja reikien poraaminen. Jälkikäsitteilyn kustannukset voivat olla suuria, mutta niihin voidaan vaikuttaa suunnitteluvaiheessa, joten myös tässäkin kohdassa hyvän suunnittelun tärkeys korostuu. Koska kappaleiden funktiot ja käyttökohteet vaihtelevat asiakkaiden tilausten mukaan, myös jälkikäsitteilyn kulut vaihtelevat. Rickenbacher, Spierings & Wegenerin (2012) tutkimuksen mukaan jälkikäsitteilyn kulut voidaan laskea yhtälöllä 1 (Rickenbacher, Spierings & Wegener 2012, s.211):

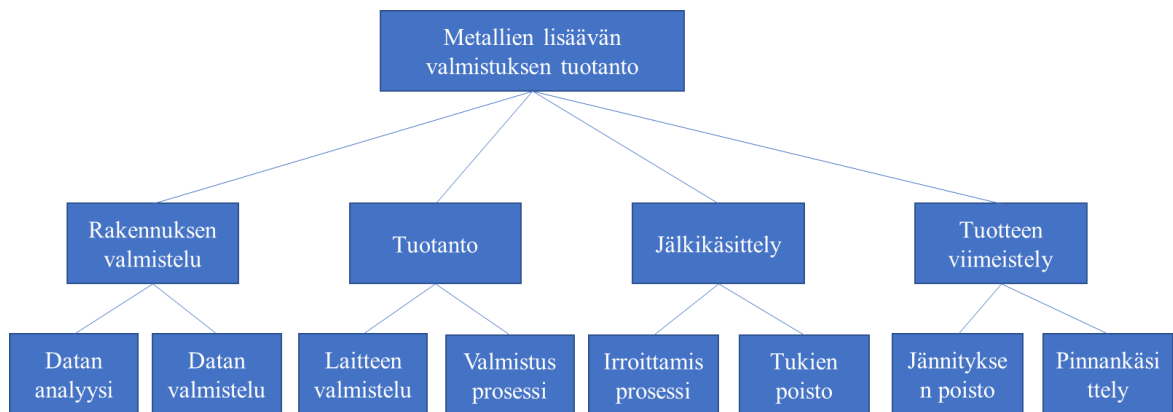
$$C_{\text{Jälkikäsitteily}} = T_{\text{Jälkikäsitteily}}(G_i) * (C_{\text{Operaattori}} + C_{\text{Työkalut}}) \quad (1)$$

Kaavassa 1 $C_{\text{Jälkikäsitteily}}$ on Jälkikäsitteilyn hinta, $T_{\text{Jälkikäsitteily}}$ on jälkikäsitteilyyn kuluva aika, G_i on valmistettava geometria, $C_{\text{Operaattori}}$ on operaattorin tuntipalkka ja $C_{\text{Työkalut}}$ on työskentelytilan ja työkalujen tuntihinta.

Jälkikäsitteilyyn kuuluu myös kappaleen mekaanisten ominaisuuksien parantaminen esimerkiksi lämpökäsitteilyllä (Brandt 2017, s.294). Jauhepetisulatus vaatii lämpökäsitteilyä, jotta valmistettavan kappaleen sisäiset jännitykset saataisiin poistettua. Metallikappaleet voivat vaatia jännityksenpoistohehkutusta, jos kappaleella on paksuja muotoja, kappale on iso tai jos kappaleella on mittatarkkuusvaatimuksia. (Chekurov et al. 2017, s. 18.) Epähomogeeninen lämpöjakauma PBF-prosessin aikana voi johtaa kappaleen muodonmuutoksiin. Lämpöjakaumaa voi parantaa hyvällä tukirakenteiden käytöllä (ks. kuva 10), mutta lämpöjakauman haitoista ei päästä täysin eroon tukirakenteiden avulla. Tämän takia kappaleen lämpökäsitteily on usein tarpeellista. (Schnabel et al. 2017, s.103.)

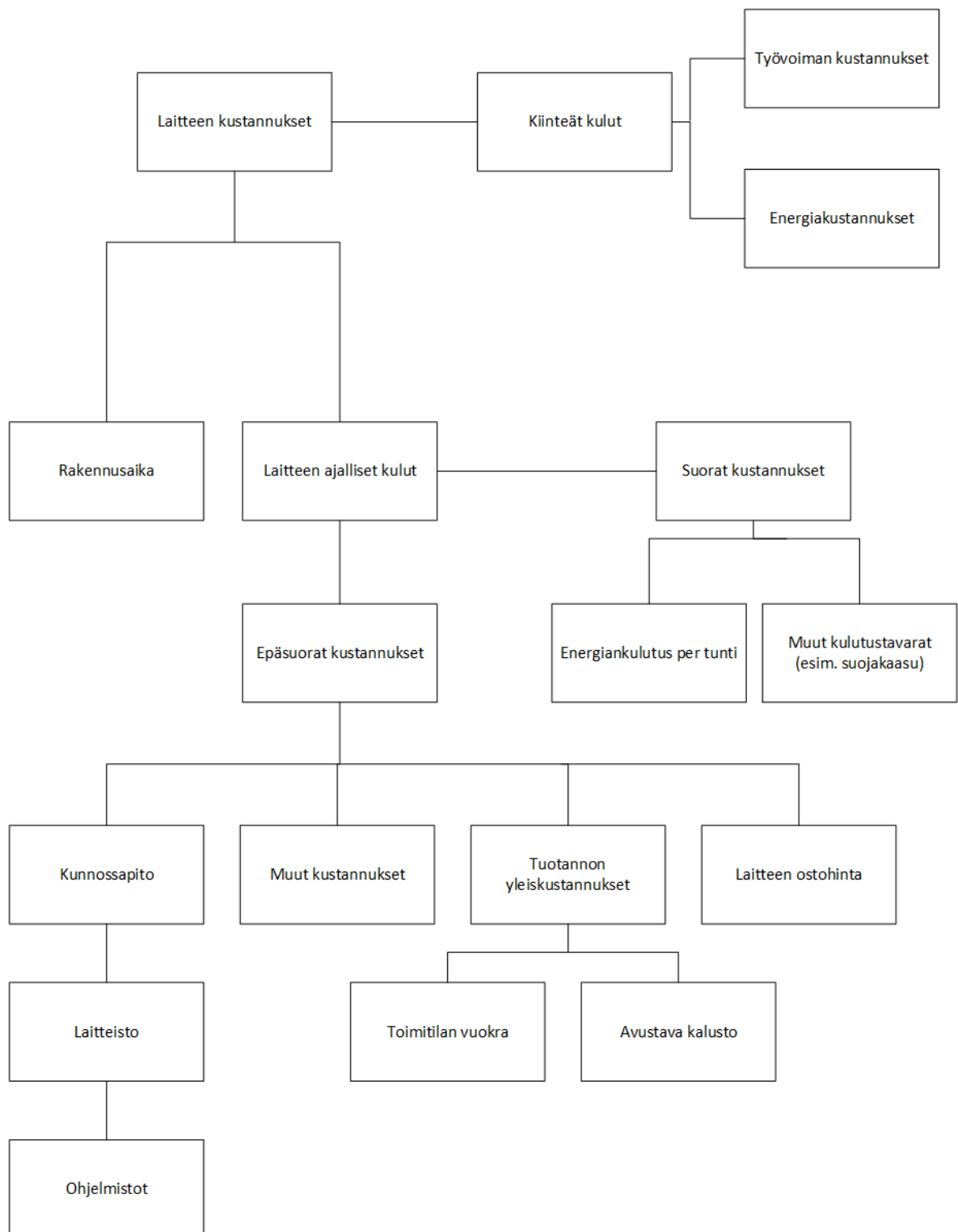
5.6 Tuotannon kulut

Vertailemalla useiden lisäävän valmistuksen asiantuntijoiden tekemiä kustannusmalleja huomataan, että mallit ovat lähellä toisiaan ja kulut voidaan jakaa neljään suurempaan kategoriaan. Brandt (2017) on tehnyt mallin muiden asiantuntijoiden mallien perusteella ja hän on jakanut kulut valmisteluun, tuotantoon, jälkikäsittelyyn ja tuotteen viimeistelyyn. Tämä malli on esitetty kuvassa 12. (Brandt 2017, s.288-289.)



Kuva 12. Lisäävän valmistuksen eri vaiheet tuotannossa (Mukaiillen Brandt 2017, s.288)

Kuvassa 13 on esitetty tarkemmin, mistä lisäävän valmistuksen kustannukset koostuvat.



Kuva 13. Lisäävän valmistuksen kustannusrakenne (Mukaiillen Brandt 2017, s.291)

Kuten kuvasta 13 nähdään, Brandtin mallissa kulut lasketaan ajankäytön ja tehdyn työn perusteella. Jokaiseen prosessiin kulunut aika kerrotaan ennalta määrätyllä kustannuksen tuntihinnalla. Lopuksi prosessien hinnat summataan yhteen, jolloin saadaan koko prosessin hinta, jota voidaan verrata muiden valmistustapojen kustannuksiin. (Brandt 2017, s.288-289.)

Baumers et al. (2016) tutkimuksen mukaan lisäävän valmistuksen kulut koostuvat epäsuorista, työvoiman, materiaalin ja riskeihin liittyvistä kuluista. Suurimmat kulut syntyvät epäsuorista kuluista, jotka koostuvat laitteen kunnossapidosta ja muista yleiskustannuksista. Riski rakennusvirheestä aiheuttaa seuraavaksi suurimmat kulut, joka johtuu prosessin epävakaudesta. Kolmanneksi suurimmat kulut aiheutuvat työvoimasta, joka koostuu laitteiston valmistelusta, prosessin valvomisesta ja jälkikäsitteystä. Kuitenkin noin 90% työvoiman kustannuksista johtuu jälkikäsitteystä. Lisäävän valmistuksen yksinkertainen kustannusmalli voidaan laskea yhtälön 2 mukaan. (Baumers et al. 2016, s.8-9.)

$$C_{\text{valmistus}} = P_{\text{Materiaali}}V_{\text{valmistus}} + C_{\text{valmistelu}} + (C_{\text{Epäsuorat}} + C_{\text{Energia}})T_{\text{valmistus}} \quad (2)$$

Kaavassa 2 $P_{\text{Materiaali}}$ on materiaalin hinta per kuutiosenttimetri, $V_{\text{valmistus}}$ on valmistettävien kappaleiden kokonaistilavuus, $C_{\text{valmistelu}}$ on laitteen valmistelun ja valvomisen kulut, $C_{\text{Epäsuorat}}$ on epäsuorat kulut, C_{Energia} on prosessin energiankulutus ja $T_{\text{valmistus}}$ on koko valmistusprosessiin kuluva aika, joka sisältää tukirakenteiden poiston, jälkikäsitteelyn ja tarkastuksen.

6 LISÄÄVÄ VALMISTUS VERRATTUNA PERINTEISIIN VALMISTUSMENETELMIIN

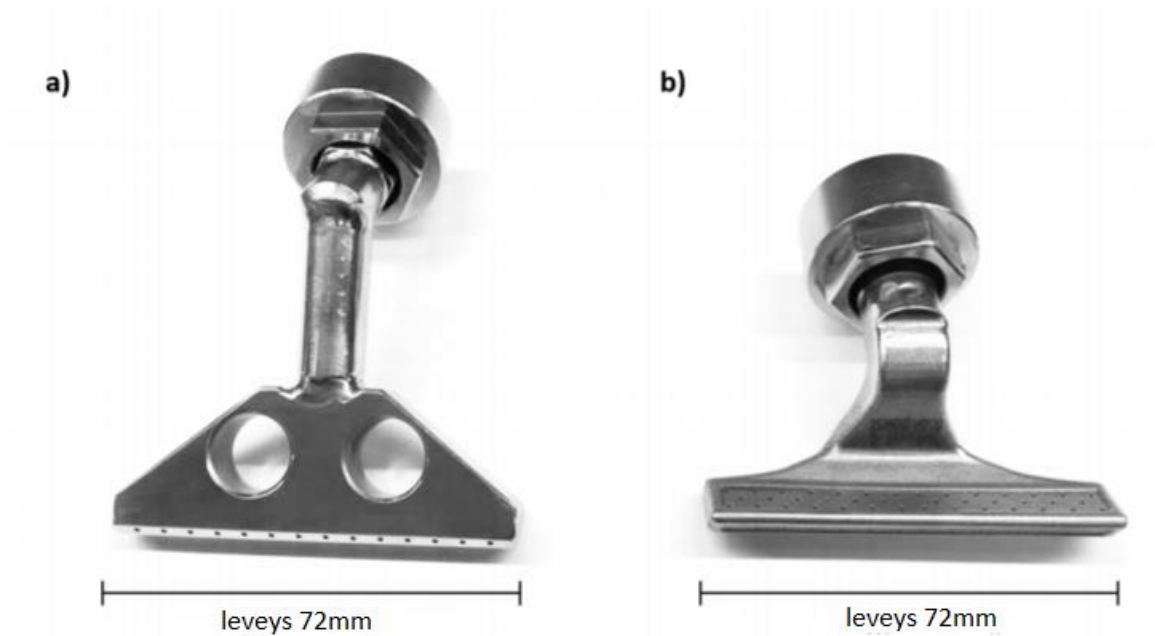
Perinteisiin menetelmiin verrattuna lisäävä valmistus tarjoaa uusia mahdollisuuksia ja vapauden suunnittelussa, joka mahdollistaa tuotteiden yksilöllistämisen. Kerros kerrokselta valmistaminen ilman koneistamista tai valamista mahdollistaa todella monimutkaisten rakenteiden, kuten ristikkorakenteet valmistamisen. Lisäävä valmistus poistaa myös monet perinteisten menetelmien rajoitteet ja topologisen optimoinnin avulla kappaleen geometria voidaan muokata käyttökohteeseen sopivaksi. (Schnabel et al. 2017, s.11.)

6.1 Lisäävän valmistuksen ja perinteisen valmistuksen erot

Lisäävällä valmistuksella ja perinteisillä menetelmillä on omat käyttökohteensa. Tällä hetkellä yleinen käsitys on se, että lisäävää valmistusta kannattaa käyttää, kun valmistetaan pieniä eriä muodoltaan monimutkaisia kappaleita ja perinteisiä menetelmiä yksinkertaisten tuotteiden massatuotantoon. Lisäävä valmistus kuitenkin soveltuu joidenkin kappaleiden massatuotantoon. Tästä hyvänä esimerkkinä toimii kuvan 5 suutin. Kyseisiä suuttimia on valmistettu jo yli 30 000 ja niitä valmistetaan 40 eri tulostimella. (Niaki & Nonino 2018, s.198; GE 2018.) Tämä johtuu siitä, että lisäävässä valmistuksessa valmistuskustannukset määräytyvät valmistettavien kappaleiden määrän mukaan, kun taas perinteisissä menetelmissä pääasiassa kappaleen monimutkaisuuden mukaan (Brandt 2017, s.271). Myöhemmin teknologian kehittyessä ja hintojen laskiessa voidaan miettiä yksinkertaisempienkin kappaleiden 3D-tulostamista, mutta tällä hetkellä se ei ole kannattavaa.

Perinteisillä menetelmillä valmistetut kappaleet koostuvat yleensä monen eri toimittajan osista. Usean eri toimittajan seurauksena syntyy ylimääräisiä kuluja, koska osia joudutaan testaamaan ja hyväksymään, dokumentoimaan sekä säilyttämään varastoissa. Lisäävällä valmistuksella nämä kulut saataisiin matalammaksi, koska tuotteet saadaan kerralla valmistettua. (Yang et al. 2017, s.162.) Tämä etu korostuu tuotteissa, joissa lopullinen tuote koostuu monesta eri osasta. Hyvänä esimerkkinä toimii jo aiemmin työssä mainittu Morris Technologiesin valmistama polttoainesuutin, jossa kustannussäästöiksi saatiin 50 %. (kuva 5).

6.2 Lisäävän valmistuksen kulut perinteiseen valmistusmenetelmään verrattuna Baumers et al. (2016) tutkimuksessa vertailtiin lisäävän valmistuksen ja perinteisten valmistusmenetelmien kustannuksien eroja. Tutkimuksessa vertaillaan ruostumattomasta teräksestä valmistettua kuumailmapuhaltimen osaa, joka on olennainen osa ruoan pakkauskoneessa. Perinteisesti osa on valmistettu käyttäen CNC-koneistusta, sorvausta ja TIG-hitsausta (kuva 14 a). Sitä verrataan uudelleensuunniteltuun osaan, joka valmistetaan lisäävällä valmistuksella (kuva 14 b). (Baumers et al. 2016, s. 4-5.)



Kuva 14. Kuumailmapuhallin a) perinteisillä menetelmillä ja b) lisäävällä valmistuksella valmistettuna (Mukaillen Baumer et al 2016, s.5)

Kuten kuvasta 14 nähdään, puhaltimen geometriaa on hieman muokattu, mutta toimintaperiaate ja leveys on pysynyt samana. Kuvasta nähdään myös, että lisäävän valmistuksen kappaleessa ei ole hitsaussaumoja, joka johtuu siitä, että kappale valmistetaan kerralla, toisin kuin perinteisellä valmistusmenetelmällä.

Tutkimuksessa saatiin selville, että perinteisillä menetelmillä tuotteen hinta on erittäin riippuvainen valmistettavasta määrästä. Pienessä 20 tuotteen erässä kappaleen hinnaksi muodostuu 105 euroa ja suuremassa 60 tuotteen erässä 90.97 euroa. Taulukosta 5 nähdään

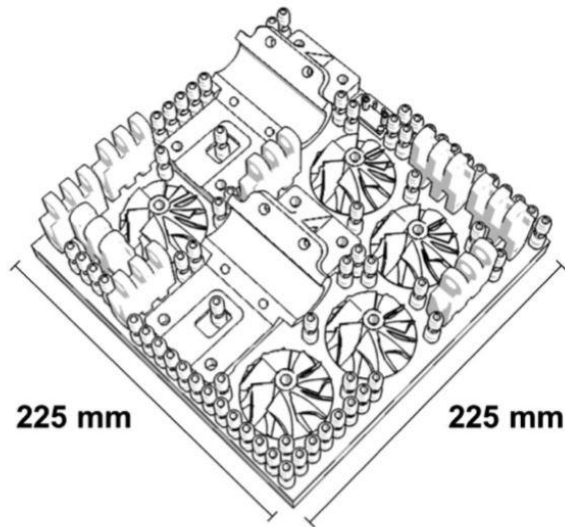
mistä kulut syntyvät ja kuinka ne eroavat pienellä ja suurella valmistuserällä. (Baumers et al. 2016, s.7.)

Taulukko 5. Puhaltimen perinteisen valmistusmenetelmän kulujen arviointi (Baumers et al. 2016, s. 7-8)

Kustannus	Materiaali/Prosessi	Pienen valmistuserän kustannuksen osuus hinnasta per kpl (%)	Suuren valmistuserän kustannuksien osuus hinnasta per kpl (%)
Raaka-aine	Ruostumaton teräs 304L	4,76	5,50
Putken valmistus	Sorvaus	4,76	4,40
Puhaltimen pään koneistus	4-akselinen CNC-koneistus	80,95	82,41
Kappaleiden yhdistys	TIG-hitsaus	9,52	7,69

Kuten taulukosta 5 nähdään, että suurimmat kulut syntyvät CNC-koneistuksen seurauksena. Tämä johtuu siitä, että puhaltimen päätä varten joudutaan valmistamaan CNC-koneistamalla kolme eri osaa, jotka myöhemmin yhdistetään TIG-hitsaamalla.

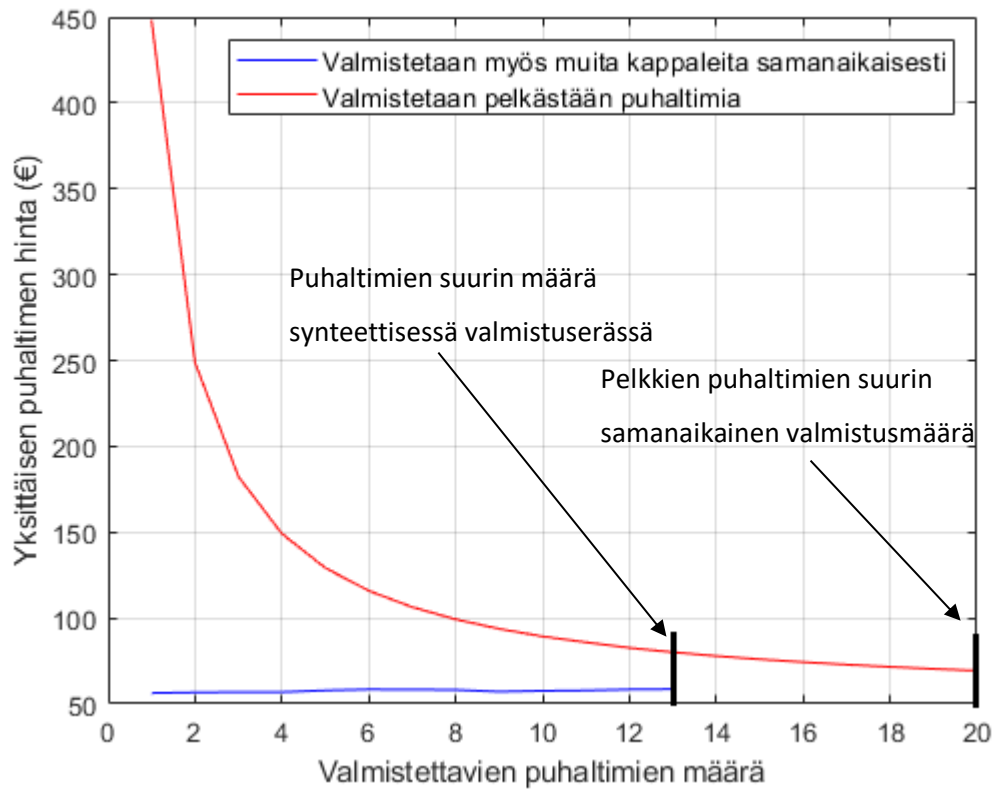
Lisäävässä valmistuksessa rakennuskammion tehokas käyttö auttaa kustannuksien laskemisessa. Tehokkaalla käytöllä tarkoitetaan sitä, että tulostimella valmistetaan mahdollisimman monta kappaletta samanaikaisesti ja, että jauhepedillä olisi mahdollisimman vähän tyhjää tilaa. Tehokasta käyttöä voidaan toteuttaa esimerkiksi valmistamalla samanaikaisesti erilaisia kappaleita, mikäli tällöin saadaan hyödynnettyä mahdollisimman paljon valmistuskammion kapasiteetista (ks. kuva 15). (Baumers et al. 2016, s.9-10.)



Kuva 15. Erilaisia kappaleita valmistettu samanaikaisesti (Baumers et al. 2014, s.4)

Kuten kuvasta 15 nähdään, lisäävän valmistuksen rakennusalustat ovat melko pieniä, joten ne kannattaa käyttää mahdollisimman tehokkaasti. Lisäksi kuvasta 15 huomataan, että kaikki valmistettavat geometriat eivät ole samanlaisia, vaan valmistettavien pääkomponenttien lisäksi alustalle on lisätty muita esimerkiksi eri tilausten komponentteja, jotta rakennusalusta saataisiin täytettyä mahdollisimman hyvin.

Baumers et al. (2016) tutkimuksessa tämä oli otettu huomioon simuloimalla kuluja, kun valmistetaan eri määrä pelkkiä puhaltimia ja muiden komponenttien kanssa (Baumers et al. 2016, s.9.). Yhtälöä 1 käyttäen alhaisin yksittäisen puhaltimen hinta saatiin, kun valmistettiin yksi puhallin muiden komponenttien kanssa, ja tällöin hinnaksi tuli 56.32€. Tapauksessa, jossa valmistettiin vain 20 puhallinta yksikköhinnaksi saatiin 69.33€. Kuvasta 16 nähdään kuinka puhaltimien kappalehinnat muuttuvat, kun puhaltimien määrää nostetaan. (Baumers et al. 2016, s.16-18.)

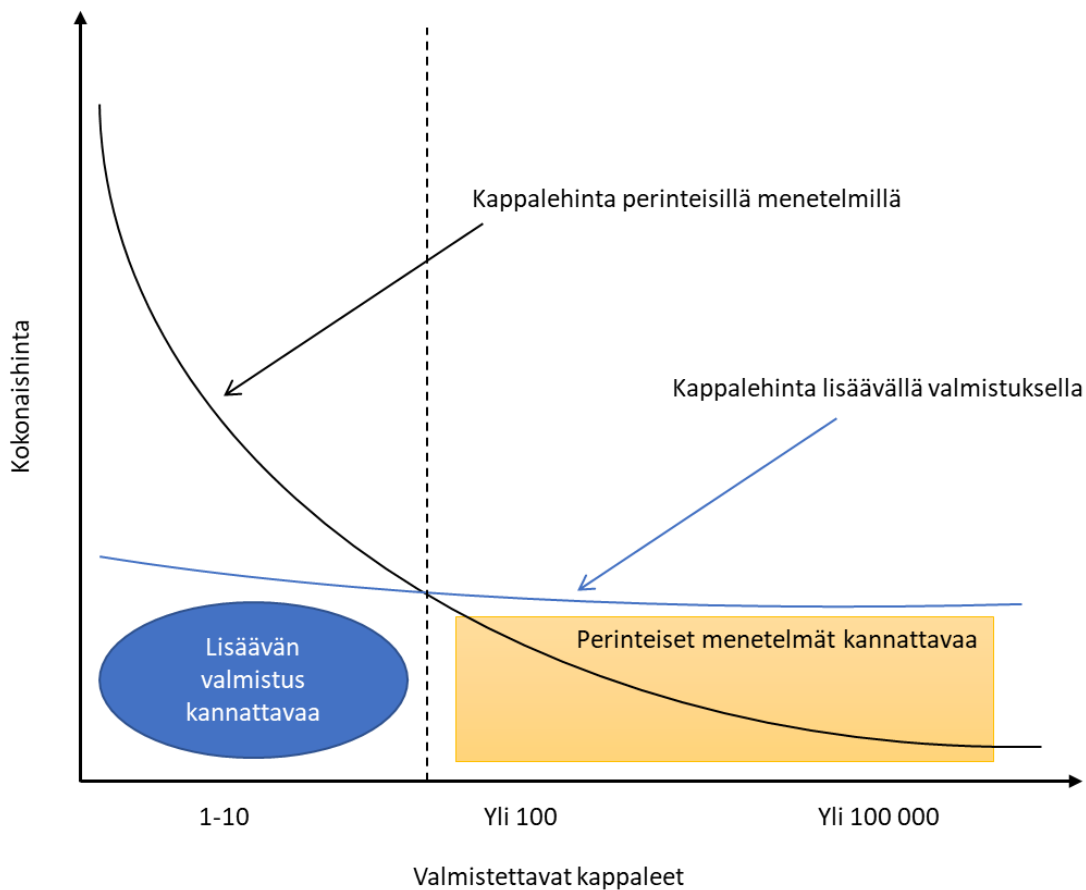


Kuva 16. Yksittäisen puhaltimen hinnan muutos valmistettavien puhaltimien määrän kasvaessa (Baumers et al. 2016, s.17)

Kuten kuva 16 osoittaa, synteettisessä valmistuserässä eli valmistettaessa puhaltimen lisäksi muita komponentteja, hinta pysyy suhteellisen vakiona noin 57 €:ssa. Valmistuserässä, jossa valmistetaan pelkästään puhaltimia, niitä voidaan valmistaa enemmän kerrallaan ja kappalehinnat lähestyvät synteettisen valmistuserän kappalehintoja. Alkupään korkeat hinnat johtuvat siitä, että tulostimessa valmistetaan pelkästään yksi puhallin, jonka takia tulostimen rakennuskammio on lähes tyhjiällä. (Baumers et al. 2016, s.9.)

7 POHDINTA

Useimmiten lisäävään valmistukseen siirtyminen tarkoittaa tuotannon hinnan nousemista, mutta samalla tuotteen arvo nousee. Ongelmaksi muodostuu se, että asiakas näkee vain tuotteen hinnan, eikä ajattele mistä hinta koostuu. (Brandt 2017, s.285.) Asiakas ei esimerkiksi välttämättä huomaa, jos kappaleen massa on laskenut tai se on saanut lisäominaisuuksia, kun valmistustapa on vaihdettu lisäävään valmistukseen. Kuitenkin hyvällä suunnittelulla ja laitteen tehokkaalla käytöllä kappaleiden kappalehinnat voidaan saada alhaisemmiksi kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä, kuten Baumers et al. (2016) tutkimuksessa nähtiin (Baumers et al. 2016 s.16-18). Koska lisäävällä valmistuksella ei välttämättä pystytä suoraan kilpailemaan ulkomailla suurella volyymillä ja pienillä hinnoilla valmistettuja tuotteita vastaan (ks. kuva 17), täytyy lisäävää valmistusta hyödyntää esimerkiksi valmistamalla uusia ja monimutkaisia asiakkaalle räätälöityjä tuotteita (Niaki & Nonino 2018, s.68).



Kuva 17. Tyypillinen sarjakoon vaikutus kappaleen hintaan (mukaillen Milewski 2017, s.207)

Kuten kuvasta 17 voidaan päätellä, yleisessä tilanteessa lisäävä valmistus on kannattavaa valmistettaessa pieniä eriä ja perinteiset valmistusmenetelmät suurissa erissä. Tämäkään ei kuitenkaan aina pidä paikkaansa, vaan metallien lisäävä valmistus voi olla kannattavampaa myös sarjatuotannossa, kuten kuvan 14 kuumailmapuhaltimen tapauksessa.

Yhä useammat yritykset tulevat lähitulevaisuudessa miettimään lisäävän valmistuksen aloittamista, koska laitteiden ominaisuudet kehittyvät jatkuvasti, jonka takia AM tulee kilpailemaan perinteisten valmistusmenetelmien kanssa. Laitteiden hinnat eivät kuitenkaan ole laskemassa, vaan niiden rakennuskammioiden koot kasvavat ja laserien tehokkuudet ja määrät kasvavat. (Chekurov et al. 2017, s 38.)

Kuten tässä työssä on jo aiemmin mainittu, että lisäävä valmistus ei tule koskaan korvaamaan perinteisiä menetelmiä, vaan se sopii käyttökohteisiin, joissa sen etuja hyödynnetään. Ennen metallien lisäävän valmistuksen aloittamista täytyy vastata kolmeen tärkeään kysymykseen: Mitkä osat voidaan valmistaa lisäävällä valmistuksella? Mitä osia voidaan valmistaa lisäävällä valmistuksella siten, että siitä saadaan rahallista hyötyä? Mitä osia voidaan käyttää lopputuotteina? (Brandt 2017, s.282.) Mikäli näihin kysymyksiin saadaan helposti vastaukset, voidaan siirtyä tarkempien kysymyksien ja suunnittelun pariin.

Vaikka metallien lisäävä valmistus on suhteellisen uusi ja nopeasti kehittyvä valmistusmenetelmä, se on otettu onnistuneesti käyttöön osaksi tuotantoa useissa eri yrityksissä. Luultavasti tunnetuin onnistunut AM:n käyttöönotto on kuvan 5 suuttimen valmistuksessa. Suuttimen valmistus aloitettiin vuonna 2015 ja lokakuussa 2018 GE Aviation ilmoitti juhlistavansa 30 000:n suuttimen valmistusta. Tällä hetkellä suuttimia valmistetaan yli 40:llä tulostimella ja 300 työntekijän voimin. (GE 2018.)

Siemens aloitti metallien lisäävän valmistuksen tutkimisen vuonna 2008 ja kehitti teknologian energian tuotantoa varten. Vuonna 2012 he asensivat EOS M280-tulostimen, jota käytettiin polttimien korjauksissa. 2013 valmistettiin ensimmäiset polttimen päät, jotka asennettiin kaupalliseen kaasuturbiiniin ja vuonna 2017 aloitettiin kokonaisten polttimien

valmistus lisäävällä valmistuksella. Vuonna 2018 Siemens ilmoitti, että 18 poltinta on ollut käytössä yli 8000 tuntia voimalaitoksen kaasuturbiinissa ilman yhtäkään ilmoitettua ongelmaa. (Siemens 2018) Tästä huomataan, että lisäävällä valmistuksella valmistetut kappaleet kestävät myös vaativia olosuhteita pitkiä aikoja, mikäli ne on valmistettu ja suunniteltu oikein.

Polttimien lisäksi Siemens valmistaa kaasuturbiinin teriä käyttäen lisäävää valmistusta. He myös tutkivat lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia muiden turbiinin osien valmistuksessa. Valmistusta varten he ovat sijoittaneet 20 miljoonaa euroa Ruotsissa sijaitsevaan lisäävän valmistuksen tehtaaseen ja heidän seuraava tavoitteensa on automatisoida tuotanto. (Anner 2016) Siemensin tapauksesta nähdään, että metallien lisäävä valmistus vaatii paljon perehtymistä ja suuria sijoituksia. Nämä kuitenkin korvautuvat kuitenkin sillä, että lisäävällä valmistus mahdollistaa uudet ja paremmat ratkaisut, jotka eivät ennen olleet mahdollisia.

Suomessa metallin lisäävän valmistuksen palveluntarjoajia on vain viisi (Kastell 2019, s.7). Korpelan (2018) tutkimuksen mukaan Suomessa on tällä hetkellä yli 30 metallien AM-laitetta, joista noin 20 laitetta on EOS Finlandin tutkimuskäytössä. Vuonna 2018 Suomessa oli ainakin kolme yritystä, jotka omistivat metallien AM-laitteen omaa tuotantoa varten ja kolme yritystä, jotka omistivat metallien AM-laitteen kaupallisia palveluita varten. Tutkimuksessa haastateltiin 76 yritystä, joista 82% ei ollut kokeillut metallien lisäävää valmistusta, mutta 28% heistä vastasi kokeilevansa metallien lisäävää valmistusta lähitulevaisuudessa. Mikään lisäävää valmistusta kokeilleista yrityksistä ei omistanut omaa laitetta, vaan kaikki olivat käyttäneet alihankkijaa. (Korpela 2018, s.56, s.59.) Tästä voidaan päätellä, että osalla yrityksistä on kiinnostusta metallien lisäävään valmistukseen Suomessa, mutta sille ei koeta vielä olevan käyttöä tai tietoa tekniikasta ei vielä ole riittävästi tai sen etuja ei osata hyödyntää tuotannossa.

8 YHTEENVETO

Tutkimuksessa etsittiin tietoa, mitä metallien lisäävän valmistuksen aloittamista miettivä yritys voisi tarvita. Työssä tutkittiin ensin lisäävää valmistusta valmistusmenetelmänä ja sen jälkeen, miten lisäävä valmistus vaikuttaa yrityksen toimintaa. Lisäävää valmistusta verrattiin perinteisiin valmistusmenetelmiin kirjallisuuden ja esimerkkitapauksien avulla.

Tutkimus oli kirjallisuuskatsaus eli tietoa etsittiin tieteellisistä julkaisuista ja artikkeleista käyttäen LUT:n Finna palvelua sekä Google Scholaria.

Metallien lisäävä valmistus jauhepetisulatustekniikalla on jo niin kehittynyttä, että sitä voidaan käyttää tuotannossa. Lisäävä valmistus ei ole korvaamassa perinteisiä valmistusmenetelmiä, vaan sille omat käyttökohteensa. Ennen lisäävän valmistuksen aloittamista täytyy miettiä mitä kappaleita tulostimella valmistetaan, voidaanko lisäävän valmistuksen etuja hyödyntää kappaleen valmistuksessa ja miten lisäävä valmistus vaikuttaa yrityksen toimintaan. Paras lopputulos yrityksen näkökulmasta saadaan silloin, kun hyödynnetään lisäävän valmistuksen edut kappaleen suunnittelussa, valmistamisessa ja yrityksen toiminnassa.

Tulevaisuudessa lisäävää valmistusta tullaan käyttämään kohteissa, joissa sen etuja voidaan hyödyntää mahdollisimman paljon. Luultavasti lisäävää valmistusta käytetään myös innovatiivisissa ja kustomoiduissa tuotteissa. Esimerkiksi Volkswagen ilmoitti vuonna 2018 olevansa valmiina autonosien massatuotantoon metallien lisäävällä valmistuksella. Volkswagen on ottamassa lisäävää valmistusta osaksi tuotantoa, koska sillä vältetään ylimääräisten työkalujen käytöltä ja lisäksi osat räätälöidään asiakkaiden toiveiden mukaisesti. (Volkswagen 2018.) Tulevaisuudessa voidaan siis odottaa ulkokuoreltaan kokonaan kustomoituja autoja suoraan tehtaalta.

Työssä esitetyiden esimerkkitapausten perusteella voitaisiin sanoa, että metallien lisäävää valmistusta tullaan tulevaisuudessa käyttämään monimutkaisten ja moniosaisen kappaleiden massatuotannossa. Parhaiten lisäävän valmistuksen potentiaalia voitaisiin käyttää esimerkiksi autoteollisuudessa, jossa kappaleiden massaa voitaisiin vähentää topologisella optimoinnilla ja samalla vähentää ylimääräisiä työvaiheita, koska lisäävällä

valmistuksella kappaleet voidaan valmistaa yhdellä kerralla ja tällöin pienten osien yhdistämisen tarve vähenee. Samalla voitaisiin myös toteuttaa autojen kustomointia, kuten Volkswagen suunnitteleeekin. Lisäksi lisäävä valmistus voisi mahdollistaa lähes automaattisen tuotannon.

9 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSIA

Tässä työssä tutkittiin metallien lisäävää valmistusta aloittavan yrityksen näkökulmasta. Kuitenkin työn kannalta tehtiin rajauksia, esimerkiksi työssä tutkittiin vain metallien lisäävää valmistusta ja jokaista aihealuetta ei tutkittu kovin laajasti. Lisäksi tämä työ oli vain kirjallisuuskatsaus, joten työn aihetta voitaisiin tutkia lisää esimerkiksi haastattelemalla yrityksiä, joissa lisäävä valmistus on otettu osaksi yrityksen toimintaa. Näiden osalta havaittiin, että mahdollisia jatkotutkimusaiheita liittyen lisäävään valmistukseen voisi olla:

- metallien lisäävän valmistuksen jälkikäsittelyn määrä ja sen kustannukset,
- lisäävän valmistuksen vaikutukset toimitusketjuun, esimerkiksi laajempaa tutkimusta miten lisäävän valmistuksen edut vaikuttavat toimitusketjuun,
- muovien lisäävä valmistus teollisuudessa, miten muovien lisäävä valmistus eroaa metallien lisäävästä valmistuksesta ja miten muovien lisäävä valmistus eroaa perinteisistä menetelmistä,
- yleisesti muidenkin kuin jauhepetisulatuksen mahdollisuuksista teollisessa käytössä.

LÄHTEET

Altair. Altair Inspire. 2019. [Altairin www-sivuilla]. [Viitattu 20.5.2019]. Saatavissa: <https://solidthinking.com/product/inspire/>

Anner, N. 2016. Additive manufacturing revolution for gas turbines. [verkkodokumentti] [Viitattu 12.5.2019]. Saatavissa: <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/energy/3w0000-additive-manufacturing.html>

Arptech. SLS. 2015. [Arptechin www-sivuilla]. [Viitattu 14.4.2019]. Saatavissa: www.arptech.com.au/slshelp.htm

Attaran, M. 2017. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. Teoksessa: Li, D. Business Horizons, 60: 5, S. 677-688.

Atzeni, E. & Salmi, A. 2011. Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. Teoksessa: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62: 9, S. 1147-1155.

Autodesk. Design optimization for additive manufacturing. 2019. [Autodeskin www-sivuilla]. [Viitattu 23.5.2019] Saatavissa: <https://www.autodesk.com/products/netfabb/features/netfabb>

Baumers, M., Beltrametti, L., Gasparre, A. & Hauge, R. 2016, Informing Additive Manufacturing technology adoption: total cost and impact of capacity utilization. Teoksessa: Dolgui, A. International Journal of Production Research, 55: 23, S. 6957-6970.

Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C. & Hague, R. 2014. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. Teoksessa: Technological Forecasting & Social Change, 12. 2016. S.193-201.

Brandt, M. 2017. Laser additive manufacturing: Materials, design, technologies, and applications. Amsterdam: Elsevier. 479 s.

Chekurov, S., Eklund, P., Kujanpää, V., Pekkarinen, J., Syrjälä, K. & Vihinen, J. 2017. 3D-tulostuksen suunnittelu- ja päätöksenteko-opas yrityksille. Tampere: DIMECC Oy. 40 s.

Emmelmann, C., Sander, P., Kranz, J. & Wycisk, E. 2011. Laser Additive Manufacturing and Bionics: Redefining Lightweight Design. Teoksessa: Schmidt, M., Zaeh, M., Graf, T. & Ostendorf, A. Physics Procedia, Painos 12, 2011. S. 364-368.

EOS. Systems and Equipment for Metal Manufacturing. 2019. [EOS:n www-sivuilla]. [Viitattu 18.5.2019]. Saatavissa: https://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment

Farinia Group. Additive manufacturing. 2019. [Farinia Groupin www-sivuilla]. [Viitattu 21.5.2019]. Saatavissa: <https://www.farinia.com/additive-manufacturing/3d-technique/metal-additive-manufacturing-production-systems>

Ford, S. & Despeisse, M. 2016, Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. Teoksessa: Huisingh, D. Journal of Cleaner Production, 137, S. 1573-1587.

Ge Additive. Direct Metal Laser Melting machines. 2019. [GE Additiven www-sivuilla]. [Viitattu 18.5.2019]. Saatavissa: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines>

GE. New manufacturing milestone: 30,000 additive fuel nozzles. 2018 [GEN www-sivuilla]. [Viitattu 10.5.2019]. Saatavissa: <https://www.ge.com/additive/blog/new-manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>

- Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. 2015. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2. painos. New York, NY: Springer New York. 498 s.
- Gu, D. 2015. Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 311 s.
- Huang, S., Liu, P. & Mokasdar, A. 2012. Additive manufacturing and its societal impact: A literal review. Teoksessa: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67: 5-8. 2013. S.1191-1203.
- Kastell, J. 2019. Metallin lisäävä valmistus Hämeessä, Lisäävän valmistuksen mahdollisuudet, LAMK Lahti, 16.5.2019. Saatavissa: <https://www.lamk.fi/sites/default/files/2019-05/Jarmo%20Kastell%20Delva.pdf>
- Kellner, T. 2017. Mind Meld: How GE And A 3D-Printing Visionary Joined Forces [verkkodokumentti] [Viitattu 20.5.2019]. Saatavissa: <https://www.ge.com/reports/mind-meld-ge-3d-printing-visionary-joined-forces/>
- Khorrani, N. & Nonino, F. 2018. The Management of Additive Manufacturing: Enhancing Business Value. Cham: Springer International Publishing. 220 s.
- Lee, H., Low, M., Tham, N. & Matham, M. 2017. Lasers in additive manufacturing: A review. Teoksessa: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 4: 3. S.307-322.
- Markus Korpela. 2018. Material needs of Finnish metal and mechanical engineering industry from the perspective of additive manufacturing. 76 s.
- Milewski, J. 2017. Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry. Cham: Springer International Publishing. 343 s.

Pempel, A. 2018. Siemens and E.ON reach milestone with 3D-printed burner for SGT-700 gas turbine. [verkkodokumentti] [Viitattu 12.5.2019]. Saatavissa: <https://www.siemens.com/press/PR2018090304PSEN>

Rickenbacher, L., Spierings, A. & Wegener, K. 2012. An integrated cost-model for selective laser melting (SLM). Teoksessa: Rapid Prototyping Journal, 19: 3. Bradford. 2013. S.208-214.

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.

SFS-EN ISO/ASTM 52900. 2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Helsinki: suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 23 s.

SLM Solutions. SLM Machines. 2019. [SLM:n www-sivuilla]. [Viitattu 18.5.2019]. Saatavissa: <https://www.slm-solutions.com/products/machines/selectivelasermeltingmachines/>

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2009. Vastuullinen yrittäjyys pk-yrityksissä [verkkodokumentti] 19 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <https://tem.fi/documents/1410877/2934378/Vastuullinen+yritt%C3%A4jyys+pk-yrityksiss%C3%A4%2C+k%C3%A4yt%C3%A4nn%C3%B6n+esimerkkej%C3%A4>

VDI 3405 Osa 3. 2015. Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - Design rules for part production using laser sintering and laser beam melting. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik. VDI-Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren 32 s. Saatavilla englanniksi ja saksaksi

Volkswagen. Ready for mass production: Volkswagen uses the latest 3D printing process for production. 2018. [Volkswagenin www-sivuilla] [Viitattu 31.5.2019] Saatavissa: https://www.volkswagenag.com/en/news/2018/09/volkswagen_3d_printing.html

Yang, L., Hsu, K., Baughman B., Godfrey D., Medina, F., Menon, M. & Wiener S. 2017. Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. Cham: Springer International Publishing. 168 s.