

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

METALLIEN LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN SUUNNITTELUN JA JÄLKITYÖSTÖN
VAIKUTUS KUSTANNUKSIIN

THE COSTS OF DESIGNING AND POST-PROCESSING IN METAL ADDITIVE
MANUFACTURING

Lappeenrannassa 11.2.2019

Eetu Härkönen

Tarkastaja Dosentti Heidi Piili, TkT

Ohjaaja Nuorempi tutkija Markus Korpela, DI

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Eetu Härkönen

Metallien lisäävän valmistuksen suunnittelun ja jälkityöstön vaikutus kustannuksiin

Kandidaatintyö

2019

31 sivua, 11 kuvaa ja 3 liitettä

Tarkastaja: TkT Heidi Piili

Ohjaaja: DI Markus Korpela

Hakusanat: AM, metallin lisäävä valmistus, lisäävä valmistus, jauhepetisulatus, L-PBF, PBF, kustannukset, kustannusrakenne, jälkityöstö, suunnittelu, 3D-tulostus.

Työn tavoite on selvittää suunnittelun ja jälkityöstön vaikutukset kokonaiskustannuksiin metallin lisäävässä valmistuksessa. Tutkimusmetodeina on kirjallisuuslähteiden tutkiminen ja yrityshaastattelut.

Kirjallisuuslähteistä selvisi mitä suunnittelussa ja jälkityöstössä tulee ottaa huomioon ja miten nämä kokonaisuudet vaikuttavat kustannuksiin. Tärkeimmät löydöt olivat erilaiset laskentatyökalut, joilla pystytään arvioimaan kustannuksia metallin lisäävässä valmistuksessa. Työkalujen avulla pystytään arvioimaan suunnittelusta ja jälkityöstöstä koituvia kustannuksia.

Kokeellisesta osasta eli yrityshaastatteluista tehdyt johtopäätökset olivat, että metallin lisäävässä valmistuksessa kustannusrakenne vaihtelee tapauskohtaisesti hyvin paljon, ja suunnittelun ja jälkityöstön osuus voi olla periaatteessa mitä tahansa. Kokeellisessa osassa saatiin myös selville, että suunnittelutyötä tekevät yritykset käyttävät erilaisia laskentatyökaluja arvioidessaan kustannuksia metallin lisäävässä valmistuksessa, ja kustannukset voidaan arvioida tarkasti. Pääjohtopäätöksenä suunnittelun ja jälkityöstön vaikutukset kustannuksiin vaihtelevat hyvin paljon, mutta niitä pystytään arvioimaan luotettavasti olemassa olevilla laskentatyökaluilla. Näiden työkalujen käyttäminen vaatii paljon tietotaitoa käytettävästä materiaalista, itse valmistusprosessista ja siihen liittyvistä rajoitteista.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Eetu Härkönen

The costs of designing and post-processing in metal additive manufacturing

Bachelor's thesis

2019

31 pages, 11 figures and 3 appendices

Examiner: Docent Heidi Piili, D. Sc. (Tech.)

Supervisor: Junior Research Scientist Markus Korpela, M. Sc. (Tech.)

Keywords: Additive manufacturing, AM, powder bed fusion, L-PBF, PBF, costs, costs of designing, post processing, costs of post processing, 3D-printing.

The goal of this thesis is to find out how designing and post-processing affects the total costs in metal additive manufacturing. Research methods include literature review and company interviews.

Different elements of designing and post processing and how these affect the cost structure could be found in the literature sources. The most important information found in the literature were the tools for estimating the costs in metal additive manufacturing. These tools could be used in estimating the effects of designing and post processing in metal additive manufacturing.

Conclusions made from the company interviews were that in metal additive manufacturing, each manufacturing process is unique in terms of cost structure, and the share of designing and post processing in the total costs can be almost anything. It was also found that companies are using tools for estimating the costs in metal additive manufacturing and they can be very accurate if used correctly. The main conclusions regarding the costs of designing and post processing in metal additive manufacturing are that these costs vary greatly, but they can be accurately estimated using existing calculating tools. However, using these tools requires knowledge of the material being used, of the manufacturing process and its limitations.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO	4
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO.....	5
1 JOHDANTO.....	6
2 METALLIEN JAUHEPETISULATUS.....	7
2.1 Metallin lisäävä valmistus	9
3 KUSTANNUSRAKENNE METALLIEN JAUHEPETISULATUKSESSA.....	11
3.1 Suunnittelu	14
3.2 Jälkityöstö	19
4 TUTKIMUSMETODIT	21
5 TULOKSET JA NIIDEN KÄSITTELY.....	23
6 YHTEENVETO	26
7 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET.....	28
LÄHTEET	29

LIITTEET

LIITE I: Kappaleen luomisen vaiheet lisäävässä valmistuksessa.

LIITE II: Lisäävän valmistuksen menetelmiä.

LIITE III: Kysymykset yrityksille.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

AM	Additive manufacturing
AMF	Additive manufacturing format
AM-laite	Laite, jolla kappaleita valmistetaan
CAD	Computer aided design
DED	Directed energy deposition
PBF	Powder bed fusion
$C_{build,job}$	Kokonaiskustannukset [€]
C_{lab}	Työvoimakustannukset, (labor costs) [€]
$C_{lab,h}$	Työstä johtuvat kulut tuntia kohden [€/h]
C_{mach}	Laitekohtaiset kustannukset, (machine costs) [€]
$C_{mach,h}$	AM-laitteesta johtuvat tuntikulut [€/h]
C_{mat}	Materiaalikustannukset, (material costs) [€]
$C_{mat,kg}$	Raaka-aine kustannukset [€/kg]
m_{build}	Valmistettavan kappaleen massa [m]
t_{lab}	Työtunnit [h]

1 JOHDANTO

Lisäävä valmistus (engl. additive manufacturing, AM) on yleinen nimitys menetelmille, joilla kappale valmistetaan 3D-mallin perusteella lisäävillä tekniikoilla (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017, s. 5). Lisäävällä valmistuksella on monia eri käyttötarkoituksia ja se käsittää useita valmistusmenetelmiä. Ominaista menetelmille on kappaleen valmistaminen kerros kerrokselta, viipaloidun 3D-mallin pohjalta.

Lisäävä valmistus, joka tunnetaan myös nimellä 3D-tulostus, on alana nopeasti kasvava, joka erilaisuutensa ansiosta avaa uusia mahdollisuuksia muun muassa ilmailu- ja avaruusteollisuuteen, biolääketieteeseen ja autoteollisuuteen. (Brandt 2017, s. 11)

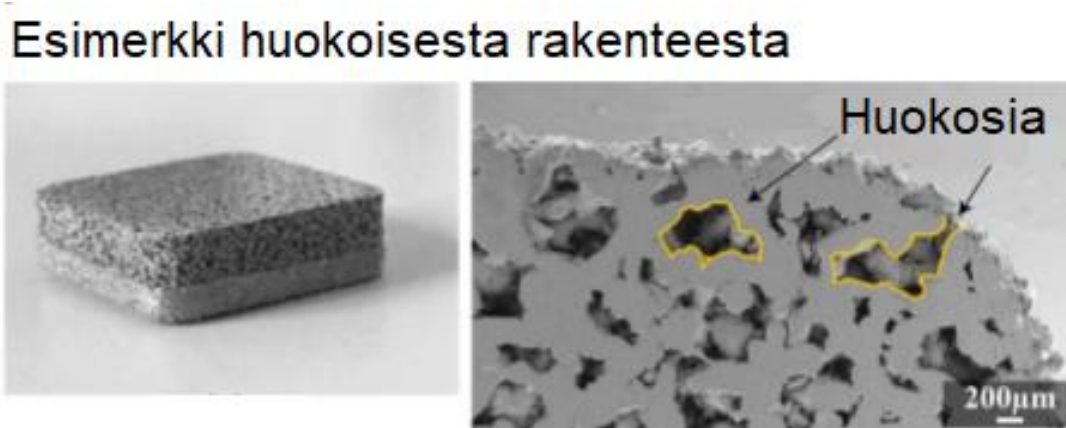
Lisäävä valmistus tunnettiin aikaisemmin nimellä rapid prototyping eli pikavalmistus. Pikavalmistus sai nimensä koska menetelmää käytettiin lähinnä prototyyppien valmistamiseen, minkä avulla pystyttiin kehittämään tuotetta pitemmälle (Gibson et al. 2015, s. 1). Lisäävässä valmistuksessa on useita menetelmiä, joiden ominaispiirteet ja valmistusperiaate ovat täysin erilaisia. Tyypilliset valmistuksen vaiheet kappaletta valmistettaessa lisättäen on eritelty liitteessä 1. Lisää tietoa eri lisäävän valmistuksen menetelmistä löytyy liitteessä 2. Lisäävän valmistuksen menetelmiä metallia varten alettiin kehittämään jo 1980-luvulla, ja teknologiat sekä menetelmät ovat kehittyneet jatkuvasti tähän päivään (Milewski 2017, s. 5).

Tämän työn tarkoitus on tarkastella suunnittelun ja jälkityöstön vaikutuksia kokonaiskustannuksiin metallin lisäävässä valmistuksessa. Työssä esitellään lisäävän valmistuksen menetelmä jauhepetisulatus, ja käydään lisäävän valmistuksen ominaispiirteitä sekä hyötyjä ja haittoja. Työssä tarkastellaan lisäävän valmistuksen kustannusrakennetta ja siihen vaikuttavia tekijöitä, erityisesti suunnittelun ja jälkityöstön vaikutuksista.

Työ on rajattu valmistusmenetelmän osalta jauhepetisulatukseen, sillä se on tällä hetkellä yleisin metallien lisäävän valmistuksen menetelmä (Brandt 2017 s.11; Gibson et al. 2015, s. 107). Jälkityöstön tarkastelu on rajoitettu tukirakenteiden poistamiseen, mutta muun muassa lämpökäsittelyjä käydään lyhyesti läpi.

2 METALLIEN JAUHEPETISULATUS

Jauhepetisulatus (powder bed fusion, PBF) on menetelmä, jossa käytetään joko kohdistettua lasersädettä tai elektronisuihkua raaka-aineen eli jauheen sulattamiseen. Jauheen yhdistämiseen käytettävistä metodeista puhutaan lasersulatuksena. Jauhepetisulatuskategoriaan kuuluu myös muovien jauhepetisulatus (tunnetaan myös nimellä lasersintraus), jossa raaka-aineena toimii polymeerijauhe. Muovien jauhepetisulatuksessa jauhe ei yleensä sula kokonaan, vaan yhdistyminen tapahtuu molekyylitasolla, jolloin lopputuloksena on huokoinen rakenne. (3DHubs 2019a; 3DHubs 2019b) Huokoisia rakenteita voidaan tehdä myös metallien jauhepetisulatuksessa. Kuvassa 1 on esimerkki huokoisesta rakenteesta (Calignano et al. 2018 s. 188).

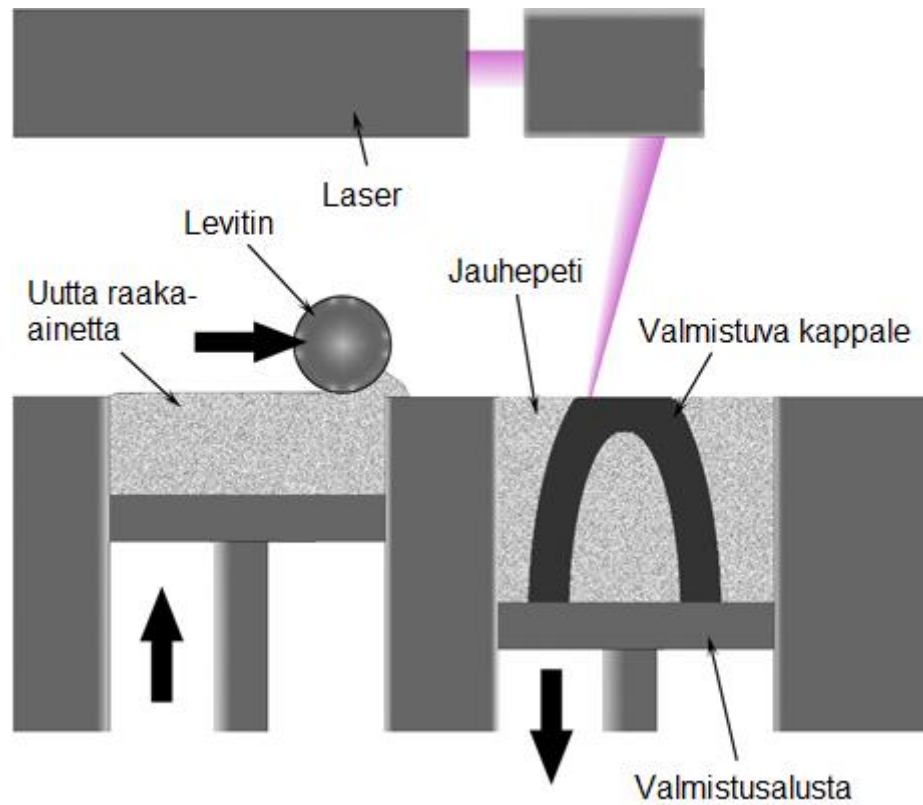


Kuva 1. Huokoinen rakenne metallien jauhepetisulatuksessa, materiaalina alumiini (AlSi10Mg) (Mukaillen Calignano et al. 2018 s. 188)

Kuvassa 1 nähdään kappale ja sen poikkileikkaus, jossa näkyy sisällä olevia huokosia.

Sintraus on terminä harhaanjohtava ja vanhentunut sillä siinäkin raaka-aine sulaa joko kokonaan tai osittain (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017, s. 13). Jauhepetisulatuksessa haluttu kappale siis muodostetaan raaka-aineesta sulattamalla jauhe täydellisesti kerros kerrokselta. Raaka-aine on metallijauhetta, ja AM-laite annostelee uuden jauhekerroksen aina kun valmis kerros on muodostettu. (Milewski 2017, s. 134 ja s. 157) Lasersädettä hyödyntävät jauhepetisulatus-laitteet ovat yleisimpiä metallin lisäävässä valmistuksessa (Brandt 2017

s.11; Gibson et al. 2015, s. 107). Jauhepetisulatus prosessi on kuvassa 2 (Milewski 2017, s. 135).



Kuva 2. Jauhepetisulatus prosessin periaate (Mukaiillen Milewski 2017, s. 135)

Kuvasta 2 nähdään jauhepetisulatus prosessin toiminta. Valmistusalusta laskeutuu aina kerroksen valmistuttua, ja levitin tuo uuden jauhekerroksen jauhepetiin.

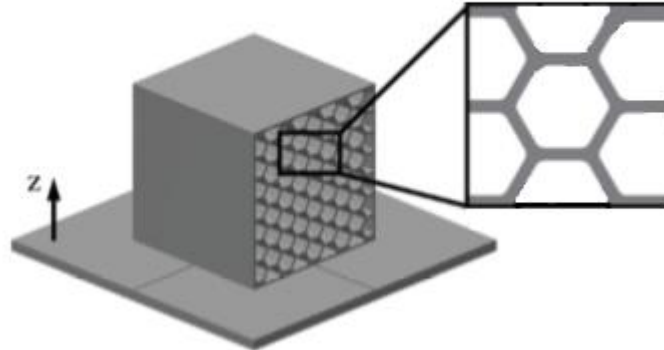
Jauhepetisulatuksen etuja muihin lisäävän valmistuksen menetelmiin on usean kappaleen samanaikainen valmistus sekä menetelmän tarkkuus. Menetelmän avulla prototyypin valmistaminen ja markkinoille tuominen on nopeaa, ja tuotteen ollessa valmis myös sarjatuotanto voidaan tehdä jauhepetisulatuksella. (Milewski 2017, s. 135–139). Jauhepetisulatuksessa on mahdollista käyttää useita materiaaleja kuten esimerkiksi muoveja, metalleja, keramiikkaa ja komposiitteja, tosin näitä materiaaleja ei voi valmistaa yhtä aikaa johtuen materiaalien sulamislämpötilan eroista. (Yang et al. 2017, s.22; Gibson et al. 2015 s. 143).

Metallin lisäävässä valmistuksessa yleisempiä menetelmiä ovat suorakerrostus (directed energy deposition, DED) ja jauhepetisulatus (powder bed fusion, PBF), jotka molemmat jaetaan vielä eri kategorioihin riippuen siitä, miten lämpöä tuodaan raaka-aineeseen. PBF-menetelmät ovat yleensä tarkempia, mutta niiden heikkous on valmistuskammion koko ja kuinka se suoraan rajoittaa kappaleen enimmäiskokoa. Toisaalta DED-tekniikoilla voidaan tehdä isoja kappaleita, mutta menetelmän heikkous on sen huono resoluutio, jolloin tulostettu tuote vaatii aina jälkityöstönä mittoihin koneistuksen. (Milewski 2017, s. 177) Tässä työssä tarkastellaan suunnittelun ja jälkityöstön vaikutuksia kustannuksiin jauhepetisulatusta käytettäessä. DED-valmistusmenetelmän periaate on selitetty liitteessä 2.

2.1 Metallin lisäävä valmistus

Metallin lisäävässä valmistuksessa raaka-aineeseen tuodaan aina lämpöä, yleensä joko lasersäteen tai elektronisäteen avulla. Metallisen raaka-aineen (jauhe) sulattaminen vaatii lämpötilan, jonka on oltava hiukan korkeampi kuin metallin sulamispiste. Jauheen sulattaminen vaatii energiaa ja valmistettavan kappaleen epätasainen lämpiäminen tai lämmön kumuloituminen voi aiheuttaa pahimmillaan säröjä tai muodonmuutoksia kappaleeseen. Kaikki säröt ja epä johdonmukaisuudet rakenteessa vaikuttavat kappaleen lujuuteen ja väsymiskestävyyteen. Prosessiin tuodun lämmön määrää täytyy säätää raaka-aineen lämmönjohtavuuskyvyn, sulamis- ja höyrystymislämpötilan mukaan, jotta kappaleeseen ei syntyisi jännityksiä. Metallin valmistusmenetelmistä johtuva lämmön kertyminen tulee ottaa huomioon ja valmistusparametrit täytyy valita siten että kappaleelta vaadittavat lujuusominaisuudet eivät kärsi. Lisäävässä valmistuksessa suunnitteluvapaus mahdollistaa joustavan valmistusprosessin ja parhaiden mahdollisten mekaanisten ominaisuuksien hyödyntämisen. (Milewski 2017, s. 54–56)

Lisäävässä valmistuksessa on mahdollista suunnitella kappaleen rakenne täysin uudelleen. Kappaleeseen pystytään muodostamaan monimutkaisia jäähdytyskanavia tai verkkorakenteita, joita ei olisi mahdollista tehdä perinteisillä keinoilla. Näistä rakenteista saatuja hyötyjä ovat pienempi raaka-aineen kulutus, kestävyuden parantaminen ja paremmat virtaus- ja jäähdytyskanavat. Näiden ominaisuuksien luominen on joissakin tapauksissa tärkeämpää kuin esimerkiksi kappaleelta vaadittava pinnanlaatu (Milewski 2017, s. 27, s. 137–138). Kuvassa 3 on esimerkki verkkorakenteesta (Lippert & Lachmayer 2018, s.16).



Kuva 3. Hunajakennon muotoinen tukirakenne. (Mukaiillen Lippert & Lachmayer 2018, s.16)

Kuvassa 3 on verkkorakenne, jonka tavoitteena on mahdollisimman suuri painon vähentäminen.

Lisäävässä valmistuksessa kappaleet on mahdollista suunnitella siten, että niissä ei ole materiaalia sellaisissa paikoissa, missä se ei ole välttämätöntä, ja näin voidaan karsia ylimääräistä painoa pois. Kappaleet, jotka pystyttiin ennen tekemään ainoastaan monesta komponentista kokoamalla, pystytään valmistamaan yhdellä kertaa lisäävällä valmistuksella. (Milewski 2017, s. 27, s. 138)

Lisäävän valmistuksen haasteina ovat menetelmien monimutkaisuus mikä tarvitsee tietotaitoa liittyen sekä valmistusprosessiin että kappaleen suunnitteluprosessiin. Haasteena ovat myös suuret prosessointikustannukset ja raaka-aine kustannukset. (Simons 2018 s. 748).

3 KUSTANNUSRAKENNE METALLIEN JAUHEPETISULATUKSESSA

Jauhepetisulatuksessa käytettävät laitteet ovat kalliita, ja kustannusrakennetta tarkasteltaessa alkuinvestointi on huomattava (Milewski, 2017, s. 134; Simons, 2018, s. 738). Kustannuksia arvioidessa tulee ottaa huomioon laitteisiin kohdistuvien kulujen lisäksi myös suunnitteluun, jälkityöstöön ja laitteen operointiin kohdistuvat kulut (Milewski 2017, s. 205). Monesti lisäävässä valmistuksessa kustannusrakenne jaotellaan karkeasti kolmeen kokonaisuuteen, jotka ovat laitekohtaiset valmistuskustannukset (machine cost), materiaalikustannukset (material cost) ja työvoimakustannukset (labor cost) (Baumers et al. 2015. s. 14; Loock & Lippert 2019; Simons 2018. s. 736).

Laitekohtaisiin valmistuskustannuksiin kuuluu AM-laitteen aiheuttamat kustannukset, ja prosessointiajasta johtuvat kustannukset (valmistusaika, esilämmitysaika jne.). Materiaalikustannuksiin kuuluu raaka-aine kustannukset kilogrammaa kohti, valmistettavan kappaleen massa ja hukkaan menevä materiaali. Työvoimakuluihin kuuluu kappaleen esikäsitteily ja uudelleensuunnittelu, AM-laitteen valmistelu ja jälkityöstö. Vaikka eri lähteet jakavat kustannusrakenteen hieman eri tavoilla omien näkökulmiensa mukaan, nämä tekijät on otettu kaikissa tavoissa huomioon ja mielestäni ne ovat hyviä mittareita arvioimaan ja mittaamaan kustannuksia lisäävässä valmistuksessa. (Loock & Lippert 2019)

Yhtälössä 1 on eritelty kustannusrakenne ja sen kolme kokonaisuutta. (Loock & Lippert 2019)

$$C_{build\ job} = C_{mach} + C_{mat} + C_{lab} \quad (1)$$

Yhtälössä 1 C_{mach} on machine cost eli laitekohtaiset valmistuskustannukset. C_{mat} Tarkoittaa materiaalikustannuksia ja C_{lab} tarkoittaa työvoimakustannuksia. (Loock & Lippert 2019)

Yhtälössä 2 on eritelty laitekohtaisiin valmistuskustannuksiin vaikuttavat tekijät. Yhtälössä 3 on tarkemmin eritelty $t_{process}$ eli käsittelyaika. (Loock & Lippert 2019)

$$C_{mach} = C_{mach,h} \cdot t_{process} \quad (2)$$

Yhtälössä 2 $C_{mach,h}$ on AM-laitteen tuntikulut, ja $t_{process}$ on käsittelykulut. Yhtälössä 3 käsittelykulut on avattu yksityiskohtaisemmin. (Loock & Lippert 2019)

$$C_{mach} = C_{mach,h} \cdot (t_{build} + t_{appl} + t_{set}) \quad (3)$$

Yhtälössä 3 t_{build} on valmistettavan kappaleen tilavuudesta ja valmistusnopeudesta riippuvat kulut. t_{appl} on korkeudesta, kerroksien määrästä ja kerroksien esilämmityksestä riippuvat kulut. t_{set} tarkoittaa valmisteluun menevää aikaa sekä jäähdytykseen ja esilämmitykseen kuluvaan aikaa. (Loock & Lippert 2019)

Yhtälössä 4 on eritelty materiaalikustannukset.

$$C_{mat} = C_{mat,kg} \cdot m_{build} \cdot \varepsilon \quad (4)$$

$C_{mat,kg}$ on raaka-aineen hinta kilogrammaa kohti. m_{build} on valmistettavan kappaleen massa. ε on kerroin, joka ottaa huomioon raaka-aineen uudelleen käytettävyyden ja hukkamateriaalin.

Yhtälössä 5 on eritelty työvoimakustannukset, ja yhtälössä 6 t_{lab} on eritelty eri työvaiheista koituvat kustannukset. (Loock & Lippert 2019)

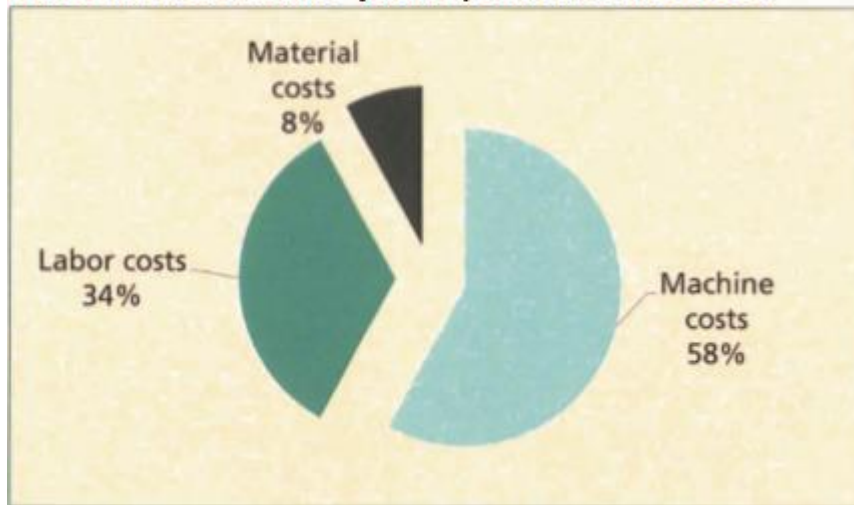
$$C_{lab} = C_{lab,h} \cdot t_{lab} \quad (5)$$

$$C_{lab} = C_{lab,h} \cdot (t_{lab,pre} + t_{lab,set} + t_{lab,post}) \quad (6)$$

Yhtälössä 6 $C_{lab,h}$ tarkoittaa työntekijöistä koituvia tuntikuluja. $t_{lab,pre}$ tarkoittaa esikäsittelyyn kuluvaan aikaa. $t_{lab,set}$ tarkoittaa AM-laitteen valmisteluun menevää aikaa. $t_{lab,post}$ tarkoittaa jälkityöstöön kuluvaan aikaa. (Loock & Lippert 2019)

Kuvassa 4 on jaoteltu kustannusrakenne metallin lisäävässä valmistuksessa, jossa on huomioitu materiaalikustannukset, työvoimakustannukset ja laitekohtaiset kustannukset (Loock & Lippert 2019).

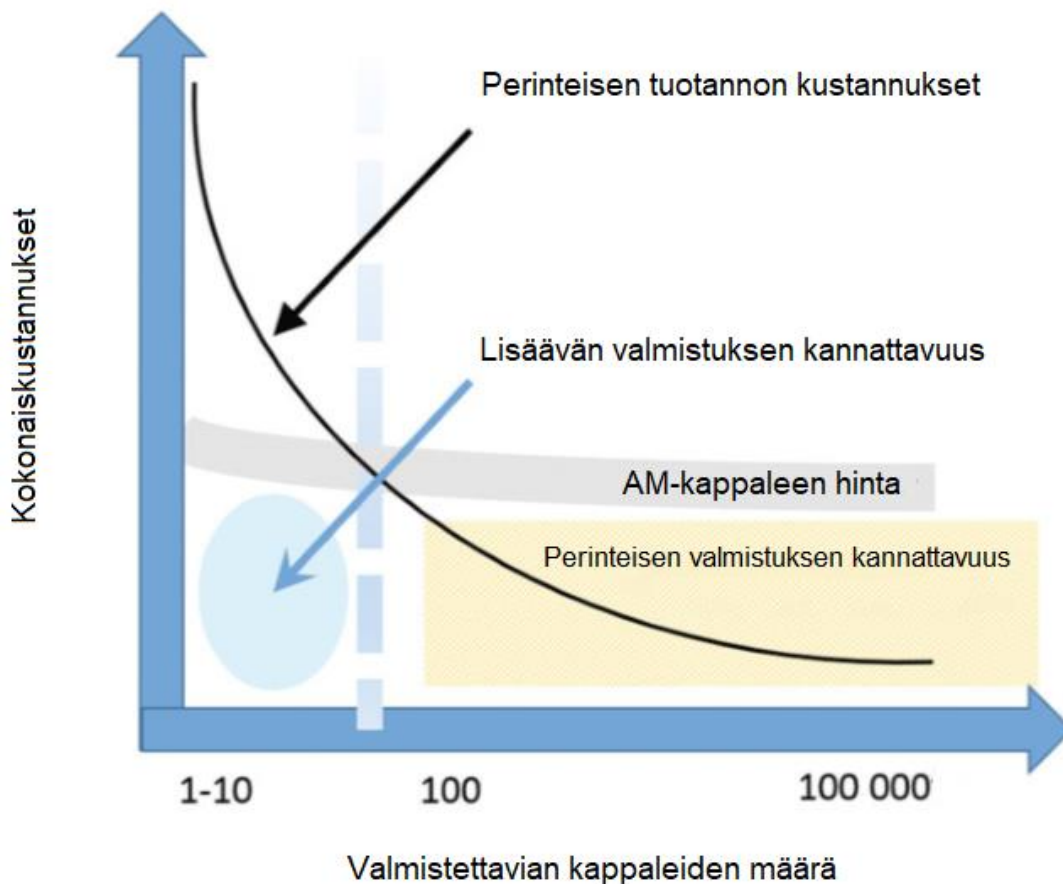
Pienen sarjatuotantokappaleen kustannusrakenne jauhepetisulatuksessa



Kuva 4. Lisäävän valmistuksen kustannusrakenne pienelle alumiinikappaleelle jauhepetisulatuksessa. (Mukaillen Loock & Lippert 2019)

Kuten kuvasta 4 nähdään, suurin osa kustannusrakennetta ovat laitekohtaiset valmistuskustannukset (58 %), ja toiseksi suurin osa on työvoimakulut (34 %). Tässä kuvassa kappaleen suunnittelua ei ole otettu huomioon, jälkityöstö kuuluu työvoimakustannuksiin, ja voidaan todeta, että sillä voi olla huomattava vaikutus kokonaiskustannuksiin, kun kyseessä on pieni sarjatuotantokappale (Loock & Lippert 2019). Mikäli kappaleen suunnittelun hinta otetaan huomioon kuvassa 4, se laskettaisiin todennäköisesti työvoimakustannuksiin, mikä tarkoittaa sitä, että työvoimakustannukset voivat kasvaa todella vielä suuremmiksi. Kun kappaleen valmistuksessa käytetään tukirakenteita, esi- ja jälkikäsitellyt kattavat jopa 70 % lisäävän valmistuksen kustannuksista, ja suuren osan jälkityöstökustannuksista olevan tukirakenteiden poistoa (Wohlers et al. 2019 s. 214).

Lisäävän valmistuksen etuna on monimutkaisten kappaleiden valmistus kustannustehokkaasti, ja tämä tekee siitä hyvän vaihtoehdon varsinkin pienille, jopa yhden kappaleen valmistuserille (Milewski 2017, s. 207; Baumers et al. 2015, s. 194; Baumers et al. 2017 s. 2). Kuva 4 esittää lisäävän valmistuksen kannattavuutta verrattuna perinteiseen valmistukseen ja eräkoon vaikutusta valmistuskustannuksiin (Milewski 2017, s. 207).



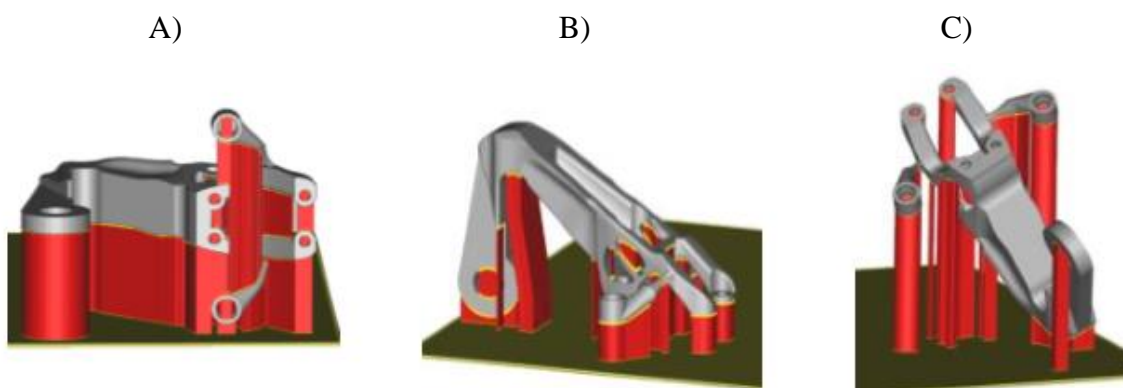
Kuva 5. Eräkoon vaikutus kannattavuuteen lisäävässä valmistuksessa. (Mukaiillen Milewski 2017, s. 207)

Kuvasta 5 nähdään että lisäävä valmistus on kannattavaa, kun eräkoot pysyvät pieninä. Esimerkiksi mittatilaustyönä tilatut osat, jotka ovat geometrialtaan monimutkaisia, hankalia tai kalliita valmistaa, kannattaa tehdä lisäävän valmistuksen menetelmillä.

3.1 Suunnittelu

Yksi lisäävän valmistuksen suurimpia etuja on suunnittelun vapaus (Westerweel et al. 2017 s. 582), mutta kappaleen uudelleen suunnittelu voi olla vaikea ja hintava prosessi, ja se tekee siitä olennaisen osan kustannusrakennetta. Suunnittelussa täytyy ottaa kappaleelta vaadittavien ominaisuuksien lisäksi tuotteen loppukäyttökohde sekä valmistusprosessi huomioon siten, että kappaleen valmistusajan, raaka-aineen kulutuksen ja jälkityöstön aiheuttamat kulut ovat kohtuullisia. Kappaleen suunnittelussa täytyy ottaa huomioon kappaleen tulostussuunta eli valmistusorientaatio, koska se vaikuttaa tukirakenteiden tarpeeseen eli jauhepetisulatuksessa raaka-aineen tarpeeseen. Tukirakenteiden tehtävänä on

myös toimia jäähdytyslementteinä valmistusprosessin aikana, sillä valmistuksesta aiheutuu lämpöä (Milewski 2017 s. 135). Kuvassa 6 nähdään, kuinka valmistusorientaatiota vaihtamalla pystyttiin vähentämään tukirakenteen osuutta valmistettavan kappaleen massasta. Tukirakenteet merkitty punaisella (Priarone et al. 2018, s.87).



Kuva 6. Eri variaatioita tukirakenteista, materiaalina alumiini (AlSi10Mg) (Priarone et al. 2018, s.87)

Kuten kuvasta 6 nähdään, tukirakenteiden osuus vaihtelee huomattavasti eri variaatioiden välillä. Itse komponentti painaa 105 grammaa, ja valmistusorientaatiota muuttamalla tukirakenteiden osuus kokonaismassasta saatiin tiputettua 65 %:sta (variaatio A) 21 %:iin (variaatio B), ja näin ollen valmistetun kappaleen paino tukirakenteet mukaan lukien tippui 382 grammasta 155 grammaan (Priarone et al. 2018, s. 87).

Tukirakenteiden poistaminen jättää kappaleeseen jälkiä, joten suunnitteluvaiheessa täytyy ottaa huomioon tukirakenteiden tarvittavan määrän lisäksi niiden poistamisen vaikutus pinnanlaatuun. (Gibson et al. 2015, s. 55–56)

Joskus kappaleen seinistä tehdään ontot ja niiden sisällä on monimutkaisia verkkorakenteita. Tämä tehdään yleensä kappaleen keventämiseksi, raaka-aineen säästämiseksi ja valmistusajan lyhentämiseksi. Kuvassa 7 on esimerkki verkkorakenteesta (Milewski 2017, s. 138). Tällaisissa tilanteissa kappaleen sisälle voi jäädä raaka-ainetta ja se saadaan pois jättämällä kappaleeseen suunnitteluvaiheessa tyhjennyskanavia, joiden kautta ylimääräinen

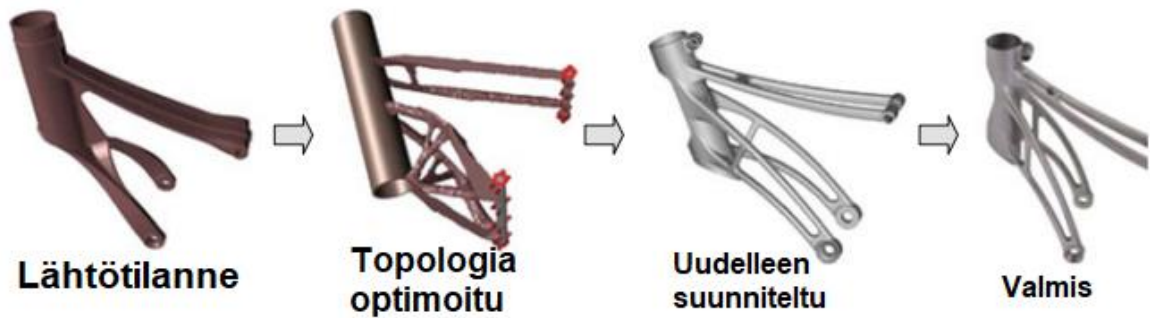
raaka-aine saadaan poistettua, tai suunnittelemalla kappale muuten siten että raaka-aine on mahdollista poistaa kappaleen valmistuksen jälkeen. (Gibson et al. 2015, s. 57)



Kuva 7. Jauhepetisulatuksella valmistettuja kappaleita ja sisällä oleva verkkorakenne (Milewski 2017, s. 138)

Kuvassa 7 näkyy jauhepetisulatuksella metallista valmistettuja työkaluja, joiden massa saatiin puolitettua käyttämällä kappaleen sisällä näkyvää verkkorakennetta (Milewski 2017, s. 137).

Lisäävän valmistuksen myötä kappaleiden topologian optimointi on helpottunut. Topologian optimointi tarkoittaa kappaleen keventämistä ilman rakenteellisen lujuuden kärsimistä. Topologian optimointi tehdään tietokoneella, siihen tarkoitukseen suunniteltujen ohjelmistojen avulla. (Yang et al. 2017, s. 122) Kuvassa 8 on polkupyörän istuin, joka on suunniteltu uudelleen topologian optimoinnin jälkeen (Yang et al. 2017, s. 126).



Kuva 8. Esimerkki topologian optimoinnin vaiheista. (Mukaiillen Yang et al. 2017, s. 126)

Yksi jauhepetisulatuksen rajoitteista on valmistuskammion koko, ja se vaikuttaa suoraan valmistettavan kappaleen enimmäiskokoon. Kappale täytyy joissakin tapauksissa valmistaa useassa pienemmässä osassa, jotka kootaan manuaalisesti yhdeksi kokonaisuudeksi, tai valmistetaan ainoastaan kokoonpanon kriittisin komponentti lisäävällä valmistuksella. Kuvassa 9 on polkupyörän rungon komponentit, jotka ovat valmistettu saman valmistuskierron aikana (Milewski 2017, s.12). Osien kokoonpano voidaan suorittaa esimerkiksi mekaanisella lukittautumisella tai erilaisten sideaineiden avustuksella. Suunnittelijan tehtävänä on suunnitella käytännöllinen ja järkevä tapa jakaa kappale osiin siten, että muun muassa kappaleelta vaadittavat kestävyysominaisuudet täyttyvät. Kappaleen jakaminen osiin voi olla kustannustehokas ratkaisu myös esimerkiksi silloin, kun se poistaa tarpeen tukirakenteille ja näin ollen säästää aikaa sekä raaka-ainetta. (Gibson et al. 2015, s. 55) Valmiiksi koottu polkupyörä on kuvassa 10 (Milewski 2017, s.12).



Kuva 9. Polkupyörän rungon komponentit valmistuskierron jälkeen, materiaalina titaani. (Milewski 2017, s.12)



Kuva 10. Polkupyörä valmiiksi koottuna. (Milewski 2017, s.12)

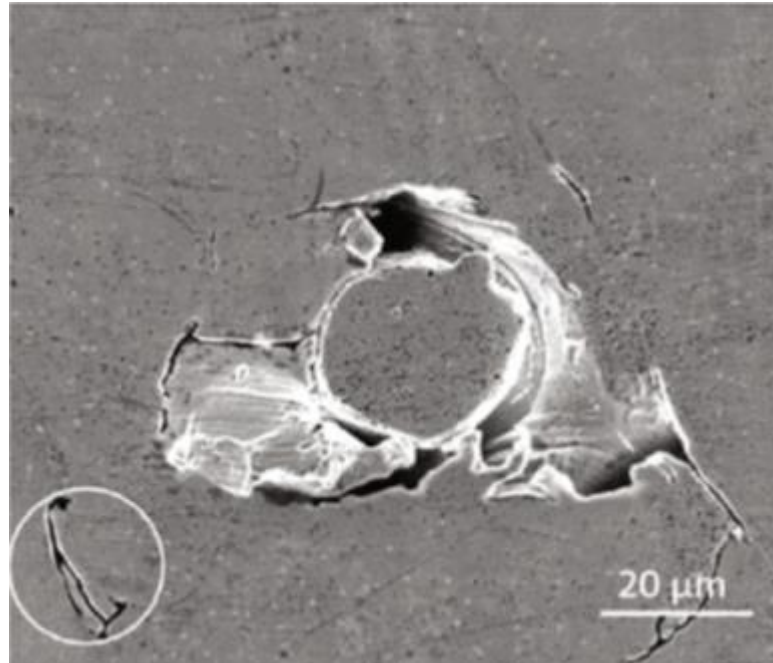
Kuvassa 10 näkyy valmis polkupyörä, jossa runko on koottu sekä renkaat ja muut varusteet on lisätty. Kuvasta 9 voidaan huomata, kuinka valmistuskammion koko on rajoittanut osien pituutta. Tästä huolimatta käytettävissä oleva tila on hyödynnetty tehokkaasti.

3.2 Jälkityöstö

Lisäävässä valmistuksessa on yleensä tarve jälkityöstölle, sillä kappaleeseen voi jäädä valmistuksen jälkeen tukirakenteita, lujuusominaisuudet eivät ole tarpeeksi hyvät, kappaleen sisälle on jäänyt raaka-ainetta tai pinnan laatu ei ole halutulla tasolla. Jälkityöstömenetelmiä ovat esimerkiksi lämpökäsittely, koneistus, kiillotus, hiominen. (Milewski 2017, s. 230–231) Jälkityöstön tarve riippuu kappaleen halutuista ominaisuuksista ja kappaleen suunnittelusta.

Jauhepetisulatuksessa jälkityöstö alkaa kappaleen ympärillä olevan raaka-aineen poistosta ja valmiin kappaleen irrottamisesta valmistusalustasta. Tämän jälkeen siirrytään tukirakenteiden poistoon, kappaleen sisään jääneen raaka-aineen poistamiseen, pintakäsittelyyn ja mekaanisten ominaisuuksien parantamiseen lämpökäsittelyllä. Jauhepetisulatusta käytettäessä kappaleessa täytyy yleensä olla tukirakenteita, jotka mahdollistavat kappaleen valmistamisen. Tukirakenteiden käsin irrottaminen ei ole metallin lisäävässä valmistuksessa yleensä mahdollista, ja siksi tähän tarvitaan muita työkaluja ja perinteisen koneistuksen menetelmiä (Gibson et al. 2015, s. 332).

Lämpökäsittelyssä kappale kuumennetaan ja sitä pidetään korkeassa lämpötilassa sulamispisteen alapuolella niin kauan, että siinä tapahtuu haluttuja metallurgisia muutoksia (Milewski 2017, s. 67). Lämpökäsittelyn tavoitteena on yleensä yhtenäisen mikrorakenteen saavuttaminen ja sisäisten jännitysten vähentäminen. (Gibson et al. 2015, s. 346; Wallis & Buchmayr 2018, s. 215). Yhtenäinen mikrorakenne tekee kappaleesta kestävämmän ja joskus kappaleen mekaaniset ominaisuudet kuten sitkeys, lujuus, ja väsymiskestävyys saadaan halutulle tasolle vasta lämpökäsittelyn jälkeen (Milewski 2017, s. 160, 233). Kappaleessa voi olla virheitä johtuen siitä, että jauhe ei syystä tai toisesta ole sulanut kunnolla. Lämpökäsittely yhdistää rakoja ja muita virheitä mitä kappaleeseen on jäänyt valmistusprosessin aikana. Kuvassa 11 näkyy kappaleen mikrorakenteessa oleva virhe (Milewski 2017, s. 236).



Kuva 11. Yksittäinen jauhepartikkeli, joka ei ole sulanut kunnolla, materiaalina ruostumaton teräs 17-4PH. (Milewski 2017, s. 236)

Kuvassa 11 näkyy jauhepartikkeli mikä ei ole valmistuksen aikana sulanut kunnolla, ja voi johtaa säröön ja sitä kautta halkeamaan. Tällaiset valmistusvirheet ovat usein liian pieniä nähtäväksi ilman mikroskooppia (Milewski 2017, s. 236)

Lämpökäsittelyt ovat olennainen osa metallien lisäävää valmistusta, mutta aihe on todella laaja ja sen takia siihen ei pureuduta syvemmin.

Riippuen kappaleesta ja halutusta laadusta, jälkityöstön vaikutukset kappaleen kustannusrakenteeseen vaihtelevat. Jälkityöstöä voidaan yrittää minimoida suunnitteluvaiheessa tekemällä tukirakenteet siten että ne ovat poistettavissa suhteellisen vaivattomasti esimerkiksi leikkaamalla tai sahamaalla. Tähän voidaan vaikuttaa myös valitsemalla valmistusorientaatio siten, että tukirakenteiden tarve minimoidaan. Jälkityöstön tarpeen vähentyessä luonnollisesti myös kustannukset asiakkaalle vähenevät.

4 TUTKIMUSMETODIT

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää suunnittelun ja jälkityöstön vaikutukset kustannuksiin metallin lisäävässä valmistuksessa (laserpohjainen jauhepetisulatus). Selvitys tapahtuu tutkimalla kirjallisuuslähteitä ja selvittämällä asiantuntijamielipiteitä suunnittelutyötä tekeviltä yrityksiltä. Tutkimuksen haasteena on nopeasti kehittyvä teknologia, mikä tarkoittaa sitä, että aihetta käsittelevä kirjallisuus vanhentuu nopeasti. Ajankohtaisen tiedon löytäminen ja lähdekritiikki ovat tärkeitä työssä esiteltävien tietojen paikkansapitävyyden kannalta. Aiheesta ei löydy kovin paljoa suomenkielistä materiaalia, joten käännöksiä täytyy olla johdonmukaisia. Tässä apuna toimii standardi (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017).

Asiantuntijamielipiteiden hankkiminen toteutettiin ottamalla yhteyttä suomalaisiin, metallien lisäävän valmistuksen suunnittelutyötä tekeviin yrityksiin. Yritykset joko osallistuivat lyhyeen Skype-haastatteluun tai vastasivat kyselyyn, joka löytyy liitteestä 3. Haastatteluissa pyrittiin etenemään kyselyssä olevien kysymysten pohjalta, mutta muitakin aiheita käytiin läpi. Haastatteluissa haluttiin selvittää mitä vaiheita tilauksen ja tuotteen valmistumisen välissä on, ja kuinka suuressa osassa suunnittelu ja jälkityöstö ovat kokonaiskustannuksissa. Haastatteluissa haluttiin myös selvittää millaisia haasteita suunnittelussa ja jälkityöstössä on.

Yrityksiltä kysyttiin millaista jälkityöstöä he yleensä tekevät metallien lisäävässä valmistuksessa, tekevätkö yritykset jälkityöstön itse vai alihankkijalla, ja miten tiivistä yhteydenpitoa alihankkijoiden kanssa käydään. Työssä haluttiin selvittää, kuinka paljon suunnittelua täytyy tehdä asiakkaalta tulevaan tilaukseen metallin lisäävässä valmistuksessa, tarvitseeko suunnittelu aloittaa nollassa, onko asiakkaalla yleensä jokin malli vai onko tuote ideatasolla. Lopuksi yrityksiltä kysyttiin heidän mielipidettään metallin lisäävän valmistuksen haastavuudesta perinteiseen valmistukseen verrattuna.

Yritykset pidetään tässä työssä nimettöminä. Skype haastatteluihin osallistui 4 yritystä ja kyselyyn vastasi yksi yritys. Yritysten tarjoamat palvelut vaihtelivat siinä määrin että jotkut tarjosivat perusteellisia suunnittelupalveluita mutta eivät itse tulostaneet kappaleita, jotkut

suunnittelivat kappaleet, tulostivat ja tekivät jälkityöstön itse ja yksi yritys teki topologian optimointia.

5 TULOKSET JA NIIDEN KÄSITTELY

Kirjallisuuslähteistä löytyy työkaluja kustannusten laskemiseen, ja myös suuntaa antavia arvioita kustannusrakenteesta tietyissä tilanteissa. (Loock & Lippert 2019)

Haastateltavilla yrityksillä oli omat keinonsa kustannusten arviointiin, joten metallien lisäävässä valmistuksessa pystytään ennakoimaan syntyviä kustannuksia käyttämällä erilaisia arvioita ja laskureita. Haastatteluissa ei käyty läpi tarkemmin, kuinka yritykset arvioivat kustannuksia, eivätkä kaikki yritykset halunneet/pystyneet kommentoimaan tilausprosessia yksityiskohtaisesti. Yritykset saattaisivat käyttää samankaltaista työkalua kuin mikä tässä työssä on esitelty kappaleessa kolme (Loock & Lippert 2019). Laskutustapa eri projektien välillä voi vaihdella tapauskohtaisesti, mikä myös vaikuttaa kustannusten arviointiin.

Yritykset olivat kaikki yksimielisiä siitä, että suunnittelun ja jälkityöstön osuus kustannusrakenteessa vaihtelee todella paljon johtuen siitä, että yksikään työ ei ole samanlainen. Tilausten erilaisuuden takia kustannusrakenne muuttuu radikaalisti riippuen työn haasteellisuudesta, tuotannon sarjakoosta ja osien koosta. Joskus asiakkaalta tulee valmis 3D-malli, johon ei tarvitse tehdä lainkaan muutoksia ja joskus ideointi ja suunnittelu aloitetaan täysin puhtaalta pöydältä. Suunnittelun tarve vaihtelee esimerkiksi asiakkaan osaamistason mukaan. Suunnittelusta koituviiin kustannuksiin vaikuttaa kappaleen lähtötaso, ja asiakkaan oma osaaminen. Valmiin 3D-mallin tullessa asiakkaalta niihin joudutaan välillä tekemään muutoksia esimerkiksi tukirakenteisiin, tai mikäli malli on luotu skannaamalla tai algoritmeja käyttämällä niissä saattaa olla epätarkkuuksia, joita täytyy korjata. Kaikki yritykset, joita haastateltiin ja jotka tekivät suunnittelutyötä, olivat samaa mieltä suunnittelun osuudesta kokonaiskustannuksissa: vaihtelee tosi paljon ja voi olla mitä tahansa 1 %:n ja 99 %:n välillä.

Jälkityöstöstä puhuttaessa tuli ensimmäisenä esille tukirakenteiden poisto ja lämpökäsittelyt. Myös kirjallisuuslähteissä todettiin, että metallien lisäävässä valmistuksessa usein tarvitaan lämpökäsittelyjä ja tukirakenteiden poisto on yleisin jälkityöstömenetelmä (Milewski 2017, s. 233; Gibson et al. 2015, s. 329). Jälkityöstön tarve vaihtelee erittäin paljon

tapauskohtaisesti, esimerkiksi tukirakenteiden poistossa pihdeillä tulee toimeen yksinkertaisissa tapauksissa, mutta joskus yritykset lähettävät kappaleet eteenpäin jälkityöstettäviksi. Jälkityöstöstä aiheutuvat kustannukset otetaan huomioon vaihtelevasti yrityksissä. Joissakin yrityksissä jälkityöstö tehdään itse ja joissakin yrityksissä kappaleet lähetetään muualle jälkityöstettäviksi, ja näin ollen jälkityöstöstä aiheutuvat kulut otetaan tarkasti huomioon suunnitteluvaiheessa. Lämpökäsittelyjä tehdään kappaleiden sisäisten jännitysten poistamiseen ja mikrorakenteen parantamiseen, mutta työn rajauksen takia lämpökäsittelyistä ei puhuttu haastatteluissa. Kirjallisuudesta löytyvät arviot jälkityöstön osuudesta kokonaiskustannuksiin olivat vaihtelevia. Kuvassa 4 työvoimakulut ovat 34 %, mutta työvoimakulut voivat olla jopa 70% metallin lisäävän valmistuksen kokonaiskuluista (Wohlers et al. 2019 s. 214). Yrityshaastatteluissa selvisi, että nämä osuudet voivat vaihdella erittäin paljon tapauskohtaisesti, ja kirjallisuuslähteiden vaihtelevat arviot tukevat tätä väitettä.

Kysyttäessä lisäävän valmistuksen haastavuudesta, suunnittelutyötä tekevät yritykset olivat sitä mieltä, että lisäävän valmistuksen menetelmät ovat haastavampia ja vaativat erilaista osaamista kuin perinteiset valmistusmenetelmät. Lisäävässä valmistuksessa ohjelmistoja käytetään paljon muodon mallinnukseen, valmistusprosessin simulaatioon ja materiaalin käyttäytymiseen. Metallin lisäävä valmistus vaatii paljon tietoa, ja se tieto on vaikeasti saatavissa.

Kaikki yritykset olivat lähestulkoon yksimielisiä vastauksissaan, ja jälkikäteen ajateltuna kysymykset olisi voinut muotoilla eri tavoin, tai ne olisivat voineet olla täysin erilaisia. Haastatteluissa olisi voitu keskittyä enemmän konkreettisiin lukuihin, mikäli yritykset olisivat pystyneet niitä tarjoamaan. Kirjallisuuslähteissä kustannusrakennetta arvioidessa oli esimerkkitapaukset rajattu tarkasti, esimerkiksi ”pienen alumiinikappaleen kustannusrakenne sarjatuotannossa” (ks. Kuva 4). Tämä kustannusrakenne kuvaa ainoastaan tämän kaltaista tapausta, eikä sitä voida soveltaa muihin tilanteisiin. Käytännössä valmistettavat kappaleet ja siihen liittyvä kokonaisuus ovat aina niin erilaisia, että yksittäinen arvio ei ole yleispätevä. Vaikka yleispätevää arviota kustannuksista on vaikea, ellei mahdoton tehdä, erilaisilla laskureilla pystytään arvioimaan kustannuksia metallin lisäävässä valmistuksessa. Yksi yrityksistä kommentoi, että kokonaiskustannusten arviointi on tarkkaa, ja harvoin tulee isoja yllätyksiä asiakkaalle.

Lisäävässä valmistuksessa myös pienet sarjakoot ovat kannattavia (Milewski 2017, s. 207), ja tällaisissa tapauksissa suunnittelun osuus kustannuksista voi luonnollisesti olla suuri verrattuna esimerkiksi materiaalikustannuksiin tai AM-laitteesta koituihin kustannuksiin. Kun kyseessä on suuremmat sarjakoot suunnittelun osuus jää pienemmäksi ja muut kulut nousevat. Sama pätee myös jälkityöstöön; kappaleelta vaaditut ominaisuudet, niiden edellyttämät jälkityöstöt ja haluttu laatu vaikuttavat jälkityöstön määrään, siihen kuluvaan aikaan ja sitä kautta koituihin kuluihin. Suunnittelun ja jälkityöstön osuus kokonaiskustannuksista vaihtelee tapauskohtaisesti hyvin paljon ja voi periaatteessa olla mitä vain.

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tarkastella suunnittelun ja jälkityöstön vaikutuksia metallin lisäävän valmistuksen kustannuksiin. Tarkoituksena selvittää suunnittelun ja jälkityöstön osuus kokonaiskustannuksista, ja mitkä asiat vaikuttavat näihin tekijöihin. Työhön kuuluu kirjallisuusosa ja kokeellinen osa. Kirjallisuusosuuteen kuuluu kirjallisuuslähteiden tutkiminen ja niiden vertailu toisiinsa, ja kokeellinen osa yrityshaastattelut. Yrityshaastattelut tehtiin ottamalla yhteyttä suomalaisiin, metallien lisäävän valmistuksen suunnittelutyötä tekeviin yrityksiin, ja pyytämällä heitä osallistumaan lyhyeen kyselyyn tai vaihtoehtoisesti lyhyeen Skype-haastatteluun.

Kirjallisuudesta löytyi tietoa liittyen suunnitteluun ja jälkityöistöön, ja miten ne vaikuttavat kustannuksiin metallin lisäävässä valmistuksessa. Kirjallisuusosan päälöydökset olivat laskentatyökalut (Loock & Lippert 2019; Baumers et al. 2015, s. 197), joilla kustannuksia metallin lisäävässä valmistuksessa pystytään arvioimaan. Kustannusten arvioimiseen oli useampia työkaluja, joista kaikissa oli samat pääelementit, mutta muuttujien lukumäärä ja yksityiskohdat vaihtelivat. Nämä työkalut ottavat huomioon useita eri seikkoja, ja kustannusten arviointi voi olla parhaillaan hyvinkin tarkkaa. Yleispätevää kustannusrakennetta, josta useat lähteet ovat samaa mieltä ei löytynyt.

Tämän työn kokeellisessa osassa kävi ilmi, että metallin lisäävässä valmistuksessa kappaleen valmistus on aina tapauskohtainen prosessi ja näin ollen kustannusrakenne vaihtelee todella paljon. Kokeellisessa osassa myös selvisi, että suunnittelutyötä tekevät yritykset käyttävät laskureita kustannusten arviointiin ja että nämä työkalut voivat olla oikeinkäytettynä luotettavia. Suunnittelun ja jälkityöstön osuus kokonaiskustannuksissa voi olla lähestulkoon mitä tahansa, riippuen esimerkiksi valmistettavan kappaleen monimutkaisuudesta, siltä vaadittavista ominaisuuksista ja massasta. Kun valmistettava kappale on monimutkainen ja sarjakoko on pieni, voi suunnittelusta koituvat kustannukset olla suuria suhteessa materiaalikustannuksiin ja laitekohtaisiin valmistuskustannuksiin. Kun taas sarjakoot kasvavat, suunnittelun osuus pienenee ja jälkityöstön, materiaalin ja koneajan osuus suurenee.

Kirjallisuusosan ja kokeellisen osan perusteella voidaan todeta, että metallin lisäävässä valmistuksessa suunnittelun ja jälkityöstön kustannukset ovat arvioitavissa etukäteen laskentatyökaluilla, mutta näiden kustannusten osuus kokonaiskustannuksissa vaihtelee todella paljon tapauskohtaisesti. Kustannusten arviointi vaatii tietotaitoa valmistusprosessista, materiaalin käyttäytymisestä sekä valmistustapaan liittyvistä rajoitteista.

7 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

Tässä työssä suunnittelua ja jälkityöstöä tutkittiin suhteellisen pinnallisesti, vaikka nämä ovat molemmat laajoja aiheita. Jatkossa olisi mahdollista tehdä yksityiskohtaisempaa analyysiä erilaisista jälkityöstömenetelmistä, esimerkiksi lämpökäsittelyistä ja niiden kustannuksista, koska lämpökäsittelyt ovat erittäin yleinen jälkityöstö metallin lisäävässä valmistuksessa eikä sitä tässä työssä käyty läpi. Suunnittelutyö lisäävässä valmistuksessa voi olla hyvin haastavaa, ja olisi mielenkiintoista tietää paljonko suunnitteluun menee aikaa ja resursseja, kun mallinnettava kappale tai kokonaisuus on erittäin monimutkainen tai vaikea toteuttaa. Työssä esiteltiin laskentatyökalu kustannusten arviointiin metallin lisäävässä valmistuksessa, mutta tätä ei testattu käytännössä tai teoriassa. Jatkotutkimusta voisi tehdä esimerkiksi näiden laskentatyökalujen tarkkuudesta käytännön esimerkeillä.

- Analyysi suunnitteluun käytettävistä resursseista metallin lisäävässä valmistuksessa, kun kappale tai valmistettava kokonaisuus on erittäin monimutkainen tai vaikea toteuttaa.
- Kustannuksien arviointiin käytettävien laskentatyökalujen tarkkuuden selvitys.
- Eri jälkityöstöjen, esimerkiksi lämpökäsittelyjen vaikutus kustannuksiin.

LÄHTEET

Baumers, M., Beltrametti, L., Gasparre, A. and Hague, R. 2017. Informing additive manufacturing technology adoption: total cost and the impact of capacity utilisation. *Teoksessa International Journal of Production Research*, Vol 55, s. 6957–6970.

DOI:10.1080/00207543.2017.1334978

Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C. & Hague, R. 2015. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. *Teoksessa Fred Phillips (toim.) Technological Forecasting & Social Change*, Vol 102, s. 193–201.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2015.02.015>

Brandt, M. 2017. *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications*. Elsevier. 479 s. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03891-9>

Calignano, F., Cattano, G., Iuliano, L. & Manfredi, D. 2018. Controlled Porosity Structures in Aluminum and Titanium Alloys by Selective Laser Melting. *Teoksessa Meboldt, Mirko., Klahn, Christoph. (toim.) Industrializing Additive Manufacturing — Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications — AMPA2017*. s. 181–190.

DOI 10.1007/978-3-319-66866-6

Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. 2015. *Additive manufacturing technologies*. Springer. 498 s. DOI 10.1007/978-1-4939-2113-3

Lippert, R. & Lachmayer, R. 2018. A Design Method for SLM-Parts Using Internal Structures in an Extended Design Space. *Teoksessa Meboldt, Mirko., Klahn, Christoph. (toim.) Industrializing Additive Manufacturing — Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications — AMPA2017*. s. 14–23.

DOI 10.1007/978-3-319-66866-6

Loock, J. & Lippert, M. *Trainers, Fraunhofer IAPT. Additive Manufacturing Training*. Turku: Koneteknologiakeskus 3.4.2019.

Milewski, J. 2017. Additive manufacturing of metals, From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry, Vol 358. 343 s. DOI 10.1007/978-3-319-58205-4

Priarone, P., Lunetto, V., Atzeni, E. & Salmi, A. 2018. Laser powder bed fusion (L-PBF) additive manufacturing: On the correlation between design choices and process sustainability. Elsevier. Procedia CIRP 78 (2018) s. 85–90.

Simons, M. 2018. Additive manufacturing — a revolution in progress? Insights from a multiple case study, Vol 96, s. 735–749. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1601-1>

SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry. 47 s. Vahvistettu 24.2.2017.

Westerweel, B., Basten, R. & van Houtum, G. 2018. Assessing Component Design Options through Lifecycle Cost Analysis. Teoksessa European Journal of Operational Research, Vol 270, s. 570–585

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.04.015>

Wallis, C. & Buchmayr, B. 2018. Effect of heat treatments on microstructure and properties of CuCrZr produced by laser-powder bed fusion. Teoksessa Materials Science and Engineering: A. s. 215–223.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.017>

Wohlers, T., Campbell, I., Diegel, O., Huff, R & Kowen, J. 2019. Wohlers Report 2019 – 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. 369 s.

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. 172 s.

3DHubs 2019a, Introduction to SLS 3D Printing [verkkosivu]. [viitattu 8.5.2019].

Saatavissa: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing>

3DHubs 2019b, Introduction to Metal 3D printing [verkkosivu]. [viitattu 8.6.2019].

Saatavissa: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing>

Lisäävässä valmistuksessa kappaleen luominen on prosessina kahdeksan vaiheinen (Gibson et al. 2015, s. 6).

1. Vaihe on kappaleen mallinnus, CAD (computer aided design) ohjelmistoa käyttäen. Tässä vaiheessa kappaleelle annetaan muoto joko suunnittelijan toimesta tai esimerkiksi valmiista kappaleesta skannaamalla.

2. Vaihe on tiedoston muuttaminen formaattiin, jota AM-laite osaa lukea ja sitä kautta pystyy valmistamaan kappaleen. Näitä ovat esimerkiksi STL-formaatti (stereolithography) ja AMF-formaatti (additive manufacturing file). STL-tiedosto tarkoittaa sitä, että kappale esitetään kolmiomuotojen avulla approksimoituna. STL-malli ei sisällä muuta tietoa kuin valmistusta varten tarvittavan geometrian, ja näin ollen kaikki CAD-mallin muut ominaisuudet eivät välity siihen. (Milewski 2017, s. 102) AMF-formaatti mahdollistaa esimerkiksi värien ja kaarevan geometrian käyttämisen mallissa. AMF-formaatti on myös yhteen toimiva STL-formaatin kanssa mikä tarkoittaa sitä, että STL-tiedostot voi suoraan muuttaa AMF-tiedostoiksi. Kuvassa 1 havainnollistettu CAD-mallin ja STL-mallin ero.



Kuva 1. Kappaleen CAD-malli muutettu STL-formaattiin (Gibson et al. 2015 s. 25)

3. Vaihe on STL-tiedoston siirtäminen AM-laitteeseen, ja samalla sen orientaation, sijainnin ja koon valitseminen.

4. Vaihe on AM-laitteen valmistelu. Lisäävän valmistuksen menetelmästä riippuen tähän voi liittyä esimerkiksi parametrien valitsemista tai raaka-aineen ja valmistuskammion esilämmitystä.

5. Vaihe on kappaleen valmistaminen. Tämä vaihe on suurimmaksi osaksi automatisoitu mutta

6. Vaihe on kappaleen poistaminen AM-laitteesta. Valmis kappale poistetaan laitteesta kun laite ei enää ole käynnissä, eivätkä valmistetut kappaleet ole kuumia.

7. Vaihe on jälkityöstö. Jälkityöstön tarve riippuu valmistustavasta ja kappaleelta vaadittavilta ominaisuuksilta. Jälkityöstö tarkoittaa esimerkiksi pintakäsittelyä, tukirakenteiden poistoa ja lämpökäsittelyä. (Gibson et al. 2015, s. 4–6)

8. Vaihe on kappaleen ottaminen käyttöön. Käyttöönotto saattaa vaatia vielä loppusilauksen jälkityöstön lisäksi, esimerkiksi värin lisäämistä. Valmis tuote voi koostua useasta erikseen valmistetusta kappaleesta ja tällaisessa tapauksessa ne pitää koota ennen käyttöönottoa.

Sideaineen suihkutus (binder jetting)

Menetelmät missä nestemäistä sideainetta kohdistetaan jauhemaisen raaka-aineen yhdistämiseksi. (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017, s. 7)

Suorakerrostus (directed energy deposition, DED)

Prosessi, missä raaka-aine syötetään suuttimen läpi ja sulatetaan samalla käyttäen joko laseria tai elektronisuihkua (Milewski 2017, s. 147). Menetelmä ei vaadi suurta määrää raaka-ainetta kuten esimerkiksi jauhepetisulatus (PBF) menetelmät. DED on monimutkaisuudeltaan samaa luokkaa PBF:n kanssa, ja tämä voi olla vahvuus tai heikkous riippuen esimerkiksi AM-laitteen käyttäjän osaamisesta. (Milewski 2017, s. 153–155)

Pursotus (material extrusion)

Lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa materiaalia pursotetaan suuttimen läpi paineen avulla (Gibson et al. 2015, s. 147; SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017, s. 8). Mikäli pursotusnopeus ja paine pysyvät vakiona, tuloksena on poikkileikkaukseltaan muuttumaton osa. (Gibson et al. 2015, s. 147)

Materiaalin suihkutus (material jetting)

Muistuttaa tulostimen toimintaa, ja siinä raaka-ainepisaroita suihkutetaan alustalle, jossa ne kovetetaan ultraviolettivalolla. Raaka-aineen viskositeetti tulee ottaa huomioon ja se on rajoittava tekijä. (Gibson et al. 2015, s. 175–177) Materiaalina voi toimia esimerkiksi tietyt vahat tai muovit, jotka ovat valokovettuvia (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017, s. 8).

Kerros laminointi (sheet lamination)

Lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa kappaleen raaka-aine on levy muodossa. Kappale muodostetaan asettamalla levyjä päällekkäin (Gibson et al. 2015, s. 35).

Valokovetus altaassa (vat photopolymerization)

Tarkoittaa menetelmää, joissa nestemäinen muovi kovetetaan kohdennetulla energialla. Energia tuodaan yleensä ultraviolettivalolla. (Gibson et al. 2015, s. 63)

Kysymykset:

1. Millä tavoin teidän yrityksenne laskuttaa metallien lisäävään valmistukseen liittyvästä suunnittelutyöstä (esim. tuntiveloitus/urakka)
2. Täytyykö suunnittelu aloittaa "nollasta" vai tuleeeko asiakkaalta valmiita suuntaviivoja yms.
3. Mikä on teidän arvionne suunnittelun ja jälkityöstön osuudesta lisäen valmistetun kappaleen kokonaiskustannuksiin?
4. Oletteko suunnitteluvaiheen aikana yhteydessä jälkityöstäjiin/koneistajiin, vai teettekö jälkityöstön itse? Mitkä asiat vaativat keskustelua jälkityöstäjien kanssa?
5. Kommentoikaa lisäävän valmistuksen suunnittelutyön haastavuuteen vaikuttavia tekijöitä. (esim. vaatiiko 3D-tulostettavan kappaleen suunnittelu huomattavasti enemmän aikaa kuin perinteisen? Kuinka tarkasti kappaleen jälkityöstöstä aiheutuvat kulut täytyy ottaa huomioon tukirakenteiden suunnittelussa, kuinka tiivistä yhteistyötä/yhteydenpitoa suunnittelu vaatii teidän ja asiakkaan välillä)