Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Informaatioverkostojen koulutusohjelma

Lisäävän valmistuksen kustannusarviointi

Niilo Lehtikuja

Kandidaatintutkielma
2025

Copyright ©2025 Niilo Lehtikuja

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Tekijä Niilo Lehtikuja

Työn nimi Lisäävän valmistuksen kustannusarviointi

Koulutusohjelma Teknillistieteellinen kandidaattiohjelma

Pääaine Informaatioverkostot

Valvoja Fabian Fagerholm

Työn ohjaaja(t) Jouko Karjalainen

Päivämäärä 14.12.2025 **Sivumäärä** 43 **Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Lisäävä valmistus (AM) on modernien valmistusteknologioiden joukko, jota määrittää digitaalisen mallin pohjalta tapahtuva kerroksittainen valmistus. AM on kehittynyt viimeisen neljän vuosikymmenen aikana täysin uudenlaisena valmistusmenetelmänä tuhansia vuosia käytössä olleiden muottipohjaisen valmistuksen ja ainetta poistavan valmistuksen ohelle. AM:n keskeisiä erityispiirteitä on sen mahdollistama monimutkaisten geometrioiden helppo valmistaminen ja sen vahva yhteys digitaalisiin pitkälle automatisoituihin valmistusympäristöihin. Sen ollessa verrattain uusi teknologia, on myös sen tuntemus alalla vähäistä. Tämä on yksi tärkeimmistä AM:n käyttöönottoa jarruttavista tekijöistä. AM:n tutkimus ja käyttö on kasvanut viimeisen 15 vuoden aikana eksponentiaalisesti, joten sen tuntemuksen merkitys tulevaisuudessa tulee vain kasvamaan entisestään.

Yksi AM:n uniikeista valmistuskustannuksiin vaikuttavista ominaisuuksista on sen luontainen valmistuslaitteen mukaan määräytyvä valmistustilavuus. Tämän tilavuuden optimaalinen hyödyksi käyttö on monissa AM-teknologioissa kriittistä. Tämän ja muiden teknisten erityisominaisuuksien lisäksi AM:n kustannukset poikkeavat merkittävästi perinteisistä teknologioista myös kaukana suorista valmistuskustannuksista, kuten elinkaari-, kuljetus- ja varastointikustannusten osalta. AM:n suunnittelukustannukset eroavat myös selvästi perinteisistä valmistusmenetelmistä, ja se mahdollistaa merkittävästi niitä suoraviivaisempien suunnitteluprosessien käyttöä, mikä nopeuttaa tuotteiden kehitystä ja markkinoille saamista. Yksi AM-teknologioiden käyttöönoton kannalta merkittävimmistä kustannuksista on laitekustannus, joka saattaa kohota miljoonaluokkaan. Laitekustannukset vaihtelevat kuitenkin valtavasti eri teknologioiden välillä.

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena on kirjallisuuskatsauksen avulla selventää lukijalle AM-teknologioiden yleisiä erityispiirteitä tekniseltä kannalta sekä niiden kustannusrakenteen osalta. Tutkielmassa keskitytään erityisesti AM:n vertailuun perinteisten valmistusmenetelmien kanssa, koska tämä antaa perinteisiä valmistusmenetelmiä tuntevalle lukijalle hyvän vertailukohdan AM:n ominaisuuksien merkityksen ymmärtämiseen.

Avainsanat Lisäävä valmistus, Kustannus, Kustannusrakenne, Kustannusarviointi, Kustannusarviointimalli

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Author Niilo Lehtikuja

Title of thesis Cost Estimation of Additive Manufacturing

Programme Bachelor of technology

Major Information Networks

Thesis supervisor Fabian Fagerholm

Thesis advisor(s) Jouko Karjalainen

Date 14.12.2025 **Number of pages** 43 **Language** Finnish

Abstract

Additive manufacturing (AM) is a group of modern manufacturing technologies that are defined by being layered manufacturing done directly from a digital model. In the last 40 years AM has emerged as a completely new way of manufacturing to accompany two thousand years old categories of manufacturing, subtractive manufacturing and form-based manufacturing. The main characteristics of AM are the easy manufacturing of complex geometries and its strong linkage to highly automatized digital manufacturing environments. Because of the relative recentness of AM, the accumulated knowledge about it in industry is relatively low. This is one of the key hindrances for wide-spread industrial AM usage. AM related research and its usage have increased exponentially in the last 15 years, which indicates that the need for knowledge of AM is going to increase in the future.

One of the unique characteristics of the costs of AM is the manufacturing volume that each AM machine has. From the cost perspective, the optimal usage of this volume is a critical factor in many AM technologies. In addition to this and other special technical characteristics that define the costs of AM, they might also differ greatly further away from direct manufacturing costs. Such cost drivers include lifecycle costs and logistics costs. Design costs of AM differ also from the equivalent costs of traditional manufacturing. AM enables a significantly stream-lined design process that leads to faster product development and faster time-to-market. One of the main aspects slowing down the adoption of AM in industry is the high equipment costs that can climb to millions. The equipment cost is however highly variable between different AM technologies.

The aim of this bachelor's thesis is to give the reader a clear image of the most important characteristics of AM from technical and cost perspective, in the form of a literature review. This thesis emphasizes the relative differences between AM and traditional manufacturing methods, because this will give a clear point of comparison for a reader that has prior knowledge of manufacturing.

Keywords Additive manufacturing, Cost, Cost estimate, Cost model, Cost estimation model

Sisällys

Esipuhe 7
Lyhenteet 8
1 Johdanto 9
1.1 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset 9
1.2 Tutkimuksen rajaus 10
1.3 Työn rakenne 10
1.4 Tutkimusmenetelmät 10
2 Lisäävä valmistus 12
2.1 Lisäävät valmistusteknologiat 12
2.1.1 Materiaalin pursotus (MEX) 14
2.1.2 Valokovetus altaassa (VPP) 15
2.1.3 Jauhepetisulatus (PBF) 16
2.2 Lisäävän valmistuksen materiaalin ominaisuudet 16
2.3 AM-teknologioiden uusimmat kehityssuunnat 17
2.4 Lisäävän valmistuksen käyttökohteet 18
2.5 Lisäävän valmistuksen strategiset edut ja haasteet 19
3 Lisäävän valmistuksen kustannusrakenne 22
3.1 Lisäävän valmistuksen suorat kustannukset 22
3.2 Kappaleen asettelun vaikutus kustannuksiin 25
3.3 Suunnittelukustannukset 26
3.4 Systeemitason kustannukset 28
3.5 Lisäävän valmistuksen kustannusten erot perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna 30
4 Lisäävän valmistuksen kustannusarviointimallit 32
4.1 Kustannusarvioinnin menetelmät 32
4.2 Erilaiset näkökulmat kustannusarviointiin 35
4.3 Kustannusarvioinnin teknisiä ratkaisuja 38
5 Yhteenveto ja johtopäätökset 40
5.1 Yhteenveto 40
5.2 Suositukset 41
5.3 Huomioita tämän tutkielman puutteista 42
Lähteet 44

Esipuhe

Haluan kiittää työni ohjaajaa vanhempaa yliopistonlehtori Jouko Karjalaista neuvoista ja ohjauksesta.

Lisäksi haluan kiittää kumppaniani ja muuta perhettäni heidän tuestaan. Kiitos myös työn läpi lukeneille ystäville ja sukulaisille korjausehdotuksista ja kommentoinnista.

Kiitos myös Aalto-Yliopistolle työn loppuun saattamisen mahdollistamisesta. Vielä viimeisenä kiitokset Athenelle työn valmistumista tukevasta kiltakulttuurista ja valtavasta määrästä kahvia, jonka työn valmiiksi saaminen on vaatinut.

Siuntiossa 14.12.2025
Niilo Lehtikuja

Lyhenteet

Lyhenne	Suomenkielinen termi/selitys	Englanninkielinen termi
AM	Lisäävä valmistus	Additive Manufacturing
BJT	Sideaineen ruiskutus	Binder Jetting
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu	Computer Aided Design
CAD/CAM	Digitaalinen valmistusympäristö	
CAM	Tietokoneavusteinen valmistaminen	Computer Aided Manufacturing
CM	Pilvipohjainen valmistaminen	Cloud Manufacturing
CNC	Tietokoneohjattu koneistaminen	Computer Numertic Control
DED	Suorakerrostus	Direct Energy Deposition
DLP	VPP-teknologia	Digital Light Processing
FDM	Materiaalinpursotusteknologia, jonka nimitystä käytetään yleisesti muovin pursotuksesta.	Fused Deposition Modeling
MEX	Materiaalin pursotus	Material Extrusion
MJT	Materiaalin suihkutus	Material Jetting
PBF	Jauhepetisulatus	Powder Bed Fusion
SFS	Suomen Standardisoimisliitto	
SHL	Kerroslaminointi	Sheet Lamination
SLA	Stereolitografia (VPP-teknologia)	Stereo Lithography
SLM	Selektiivinen lasersulatus	Selective Laser Melting
SLS	Selektiivinen lasersintraus	Selective Laser Sintering
VPP	Valokovetus altaassa	Vat Photopolymerizaion
WAAM	Valokaarivalmistus	Wire Arc Additive Manufacturing

Työhön sisältyy havainnollistavia laskukaavoja, joissa on lisää lyhenteitä ja symboleita. Niitä ei ole tässä erikseen listattuna, vaan ne esitellään niitä käytettäessä. Kyseiset laskukaavat eivät ole työn aiheen kannalta keskeisiä vaan havainnollistamassa esimerkinomaisesti.

1 Johdanto

Lisäävä valmistus (eng. Additive Manufacturing, AM) tarkoittaa joukkoa teknologioita, joilla valmistetaan automatisoidusti digitaalisen kolmiulotteisen mallin pohjalta kappaleita lisäämällä uutta materiaalia kerroksittain ilman kappaleesta riippuvia työkaluja (Gebhardt, ym. 2019, s. 2). Lisäävän valmistuksen englanninkielinen termi on additive manufacturing, jota suurin osa kirjallisuudesta käyttää. Tästä tulee myös suomeksi käytettävä lyhenne AM (SFS 52900:2021). AM-teknologioiden kehityksen alkuajoilta on jäänyt yleiseen käyttöön termi rapid prototyping, joka kuvasi aikanaan hyvin AM:n käyttökohteita, mutta on nykyään hieman harhaanjohtava, koska AM:n käyttökohteet ovat huomattavasti laajemmat kuin nopea prototyyppien valmistus, johon termillä viitataan (Kanishka & Acherjee, 2023). Arkikielessä AM:stä käytetään termiä 3D-tulostus (eng. 3D-printing), mutta siitä on varmasti monelle muodostunut mielleyhtymä halpoihin pöytämallisiin muovitulostimiin, joten termi saattaa rajoittaa ihmisten mielikuvaa AM:stä.

Kustannusarviointi on tärkeä osa tuotekehitysprosessin päätöksentekoa ja AM:n ollessa verrattain uusi teknologia, yleinen tietoisuus sen kustannuksista on heikompaa kuin perinteisten valmistusmenetelmien kustannuksista. Tuotekehityksen lisäksi myös organisaation päätöksentekoon ja investointipäätöksiin osallistuminen vaatii valmistusteknologioiden ymmärtämistä. Tuotekehitysprojektiin tai strategiseen päätöksentekoon osallistuvalle on hyödyllistä oppia ymmärtämään paremmin AM:n kustannuksia valistuneemman tuotantomenetelmän valinnan tekemiseksi.

1.1 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on antaa lukijalle yleiskäsitys lisäävistä valmistusmenetelmistä, niiden kustannusrakenteesta sekä niitä varten tehtävästä kustannusarvioinnista, jotta lukija voisi paremmin ottaa huomioon AM:n mahdollisuudet tuotekehitysprosesseissa ja tulevaisuuden tuotannossa. Lisäksi työn tarkoituksena on kiinnittää lukijan huomiota AM:n kustannusrakenteen erityispiirteisiin, jotta hän voisi paremmin verrata AM:n kustannuksia muiden valmistusmenetelmien kustannuksiin. Aihetta lähestytään kolmen tutkimuskysymyksen avulla:

Mitä lisäävän valmistuksen eritysominaisuuksia täytyy huomioida sen vertailussa perinteisiin valmistusteknologioihin?

Miten lisäävän valmistuksen erityisominaisuudet vaikuttavat tuotannon kustannusrakenteeseen?

Mitkä tekijät vaikuttavat lisäävän valmistuksen kustannusarviointimallien suunnitteluun?

Näihin kysymyksiin keskitytään erityisesti yhdessä luvussa per kysymys. Kysymysten järjestyksessä niitä käsittelevät luvut 2. lisäävä valmistus, 3. lisäävän valmistuksen kustannusrakenne ja 4. lisäävän valmistuksen kustannusarviointimallit.

1.2 Tutkimuksen rajaus

Tämä tutkimus toteutetaan kokonaisuudessaan kirjallisuustutkimuksena. Tutkimus ei sisällä empiiristä aineistoa. Tutkimuksessa ei esitellä tarkasti teknologisia ratkaisuja liittyen valmistukseen tai kustannusten arviointiin, vaan tarkoitus on tutkia aiheita yleisluontoisesti. Erilaiset tekoälypohjaiset ratkaisut jätetään tämän työn ulkopuolelle, koska niiden sisällyttäminen laajentaisi työtä liikaa. Tässä työssä esiteltyjen perinteisempien menetelmien ymmärtäminen auttaa kuitenkin tulevaisuudessa ymmärtämään paremmin myös tekoälypohjaisten mallien toimintaa.

Vaikka tämän työn pääteemana on AM:n kustannusarviointi, on tärkeää tarkastella AM-teknologioita hieman myös tekniseltä kannalta, jotta lukija ymmärtää mitä kustannukset tarkoittavat käytännössä. Tämä on tärkeää, koska AM:n kustannusten arviointi vaatii laajaa ymmärrystä valmistuksesta, sekä sen yhteydestä suunnitteluun ja tuotantoon (Kadir ym., 2020).

1.3 Työn rakenne

Tässä ensimmäisessä luvussa käsittelin työn taustoja ja tavoitteita, sekä asetin tutkimuskysymykset, joihin tämä tutkimus pyrkii vastaamaan. Lisäksi rajasin mahdollisimman selkeästi mitkä aiheet kuuluvat, ja eivät kuulu tähän työhön. Seuraavassa alaluvussa esittelen vielä työssä käytetyt tutkimusmenetelmät.

Toisessa luvussa esittelen tarkemmin AM:n käsitteen. Lisäksi kerron lyhyesti AM:n ominaisuuksista teknisestä näkökulmasta, ja pyrin antamaan yleiskäsityksen siitä mitä hyviä ja huonoja puolia eri AM-teknologioilla on verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Kolmannessa luvussa esittelen AM:n kustannusrakennetta, ja vertailen sen erityispiirteitä perinteisen valmistuksen kustannusrakenteeseen. Neljännessä luvussa kerron erilaisista AM:n kustannusarviointiin käytettävistä malleista. Viidennessä luvussa vedän yhteen työn käsittelemät aiheet ja esitän tärkeimmät johtopäätökset tutkimastani materiaalista.

1.4 Tutkimusmenetelmät

Tässä kappaleessa esittelen millä tavoin etsin ja valikoin lähteitä käytettäväksi tässä tutkimuksessa. Yleisenä periaatteena AM-teknologioihin liittyvien lähteiden arvioinnissa, arvotin lähteessä sen tuoreuden korkealle. Käsiteltävien aiheiden ja teknologioiden tuoreuden ja nopean kehitystahdin vuoksi muutamaa vuotta vanhemmat lähteet ovat suurella todennäköisyydellä nykytilanteeseen nähden vanhentuneita. En kuitenkaan asettanut mitään tiettyä ylärajaa lähteen iälle. Muille lähteille en nähnyt samanlaista tuoreuden mukaan arviointia yhtä tärkeäksi.

Toteutin aineistohaut englanniksi, koska sillä löytyy suurin määrä tutkimustietoa ja osaan sitä riittävän hyvin ymmärtääkseni teknisempiäkin tekstejä. Mahdollista olisi ollut etsiä myös muun kielisiä artikkeleita, mutta niiden määrä olisi rajallisempi sekä kielitaitoni saattaisi rajoittaa tehokasta ymmärrystä.

Tiedonhakuun käytin Science Direct ja Aalto Primo hakemistoja. Lisäksi käytin lähteiden valintaan ohjaajan esittelemää AM:n kustannusarviointia käsittelevää kokoavaa artikkelia (Kadir ym., 2020), sekä haussa löytynyttä AM:ä yleisesti käsittelevää kokoavaa artikkelia (Kanishka & Acherjee, 2023). Aiheeseen liittyviä standardeja hain Suomen Standardien (SFS) tietokannasta. Lisäksi käytin joitakin aiemmin löytämiäni mielenkiintoisia internetlähteitä, joita etsin omasta hakuhistoriastani.

Kaikki aiheeseen liittyvä kirjallisuus ei käytä samoja termejä, koska AM terminä on alkanut vakiintumaan vasta vuosien tutkimuksen jälkeen. Tästä syystä hain lähteitä käyttäen termejä ”Additive manufacturing”, ”Rapid prototyping” ja ”3D-printing”. Kustannusarviointiin liittyviä lähteitä etsin sanojen ”cost” ja ”estimate” eri muodoilla. Näillä hakusanoilla löytyvistä artikkeleista rajasin ensin artikkelin nimen perusteella potentiaalisia lähteitä. Tämän jälkeen luin artikkeleista lyhennelmiä, joiden perusteella rajasin pois todennäköisesti huonosti aiheeseeni sopivia artikkeleita.

2 Lisäävä valmistus

AM on joukko teknologioita, jotka perustuvat tietokoneohjattuun kerroksittaiseen aineen lisäämiseen uuden kappaleen valmistamiseksi. AM:ssä ei tarvita valmistettavasta osasta riippuvia työstövälineitä kuten poran- tai jyrsinteriä (Gebhardt, ym., 2019, s.2). Nämä teknologiat muodostavat kolmannen uuden kokonaisvalmistusprosessien alaluokan perinteisten ainetta poistavan valmistuksen ja muottipohjaisen valmistuksen ohella (Gebhardt, ym., 2019, s.2). Tässä luvussa esittelen AM-teknologioiden yhteisiä erityispiirteitä, verrattuna perinteisiin valmistusteknologioihin. Lisäksi esittelen hieman tarkemmin kolme yleistä AM-teknologiaa, jotka eroavat teknisesti selvästi toisistaan, havainnollistaakseni AM-teknologioiden keskinäisistä eroista johtuvia erilaisia käyttötarkoituksia.

Vaikka AM on teknologiana tunnettu jo 1980-luvulta alkaen, on sen kehitys lähtenyt toden teolla kasvuun 2010-luvulla (Kanishka & Acherjee, 2023). Vuodesta 2010 eteenpäin AM:n liittyvien tieteellisten julkaisujen määrä on kasvanut eksponentiaalisesti (Kanishka & Acherjee, 2023). AM-teknologioiden kehityttyä ja materiaalivalikoiman laajennuttua on auennut uusia kaupallisia käyttötarkoituksia, mitkä ovat vuorostaan lisänneet kiinnostusta aiheeseen liittyen ja lisänneet tehtävän tutkimuksen määrää. AM:n tutkimuksen määrän lisääntyminen kulkee käsi kädessä alan teollisuuden kasvun kanssa. Manufacturing Tomorrow (2022) arvioi AM:n alana vuonna 2021 kansainvälisesti 13,89 miljardin dollarin arvoiseksi ja sen arvioitiin kasvavan 76,20 miljardin dollarin arvoiseksi vuoteen 2030 mennessä 20,9% vuotuisella kasvulla vuosina 2022-2030.

2.1 Lisäävät valmistusteknologiat

Gebhardt ym. (2019, s.4) määritelmän mukaan AM-teknologiat sisältävät kaikki kaksi yhteistä tekijää, kappaleen valmistamisen digitaalisen 3D-mallin pohjalta ja sen että kappale valmistetaan liittämällä yhteen kerroksiksi kutsuttuja kyseisen 3D-mallin poikkileikkauksia. Eri AM-teknologiat eroavat siinä, mistä materiaalista ja miten kerrokset muodostetaan, ja miten ne liitetään kiinni muihin kerroksiin (Gebhardt, ym., 2019, s.5).

Kuten edellä esitetyssä perinteisessä määritelmässä, 3D-mallin pohjalta valmistaminen on edelleen AM:ä määrittävä tekijä, mutta kerrosten ei uusimmissa teknologioissa tarvitse välttämättä olla tasomaisia poikkileikkauksia. Tuotannossa käytettävissä menetelmissä kerrokset ovat edelleen lähes aina tasomuotoisia helpon laskennan ja mallintamisen sekä yksinkertaisen valmistusmekaniikan vuoksi, mutta esimerkiksi harrastepohjalta on kehitetty 4-akselisia ei-tasomaisia kerroksia hyödyntäviä FDM-menetelmiä (Fusion Deposition Modeling) kuten Birdin (2024) esittelemä menetelmä. Kerrosten tasomaisuuden poisto tuo kuitenkin hyötyjä vain joissain AM-

teknologioissa, eikä ole välttämättä alan kokonaisuuden kannalta merkittävä tulevaisuuden kehityssuunta, kuten vastaavasti tietokoneohjatussa jyrsimisessä. Hyvin ortogonaalisilla prosesseilla muodon kääntäminen ei vaikuta lopullisen kappaleen ominaisuuksiin. Tällöin uuden akselin lisääminen prosessiin ei tuo etua, eikä ole monessa teknologiassa edes mahdollista valuvan raaka-ainepedin vuoksi.

Kerroksittaisuus erottaa lisäävän valmistuksen valamisesta. Valaessa raaka-aine lisätään juoksevana kiinteän kappaleen muodostamiseksi, kuten AM:ssä, mutta kappale valmistetaan yhtenä muotona tasojen sijaan. Suurin osa AM-teknologioista on käytännössä digitaalisen 3D-mallin pohjalta osakokonaisuuksissa tehtävää valamista. Jotkin AM-teknologiat ovat valamisen sijaan laminointiin perustuvia ja perinteisestä laminoinnista ne erottaa valmistaminen digitaalisen mallin pohjalta. Aina erottelu AM:n ja muun valmistuksen välillä ei ole selkeää, eikä kaikki kerroksittainen valmistus ole AM:ää. Hiilikuitukankaasta osia käsin laminoitaessa, jos kankaanpalojen leikkaus tehdään automatisoidusti 3D-mallin pohjalta, on valmistusmenetelmä kerroksittainen ja osittain 3D-mallin pohjalta toimiva, mutta kappale ei valmistu suoraan mallista, joten se ei ole AM:ää.

Vielä jo mainittuja perinteisiä valmistusmenetelmiä selkeämmin AM eroaa ainetta poistavista valmistusmenetelmistä kuten jyrsimisestä, sorvaamisesta, laserleikkaamisesta tai kipinätyöstöstä. Näillä valmistusmenetelmillä ainetta leikataan pois lähtöaihiosta. Leikkaamiseen voidaan käyttää eri energiamuotoja kuten AM:ssä, mutta niillä irrotetaan materiaalia lisäämisen sijaan. Myös ainetta poistavia valmistusmenetelmiä käytetään nykyään usein digitaalisesti ohjattuna 3D-mallin pohjalta. Tietokoneohjatusta materiaalia poistavasta valmistuksesta puhuttaessa käytetään termiin tietokoneohjattu numeerinen ohjaus (Computer Numerical Control) pohjautuvaa lyhennettä CNC. Periaatteessa myös AM-teknologiat toimivat CNC-ohjauksella, mutta termiä käytetään yleensä puhuttaessa nimenomaan tietokoneohjatusta materiaalia poistavasta valmistuksesta. Kaikkea tietokoneohjattua valmistamista yhdistää termi Computer Assisted Manufacturing (CAM). CAM-teknologioilla valmistettavien kappaleiden 3D-mallien suunnittelua kutsutaan nimellä Computer Assisted Design (CAD) ja näitä hyödyntävästä digitaalisesta valmistusympäristöstä puhuttaessa käytetään lyhenteiden yhdistelmää CAD/CAM.

AM lasketaan yhdeksi niin sanotun neljännen tuotannon vallankumouksen (eng. Industry 4.0) teknologiaksi sen kanssa samanaikaisesta kehittyneiden muiden digitaalisten tuotannon teknologioiden kanssa. Näiden yhteisestä kehityskaaresta johtuen AM soveltuu erittäin hyvin käytettäväksi digitaalisessa valmistusympäristössä. Toisaalta AM:n vahvuudet saadaan mahdollisesti paremmin hyödynnettyä käytettäessä sitä yhdessä muiden neljännen teollisen vallankumouksen teknologioiden kanssa. Digitaalisesta valmistusympäristöstä riippuminen on nykytilanteessa myös yksi AM:n laajemman käyttöönoton haasteista, koska ala on puutteellisesti standardisoitu. CAD-

mallien käsittelyssä, valmistuksen suunnittelussa ja rakenteen optimoinnissa käytetään erillisiä ohjelmistoja ja monia eri tiedostomuotoja, mikä aiheuttaa haasteita prosessien yhtenäistämisessä (Kanishka & Acherjee, 2023).

Kansainvälinen standardisointijärjestö International Organization for Standardization (ISO), sekä sen jäsenenä Suomen Standardit (SFS), jakaa AM-teknologiat seitsemään pääkategoriaan raaka-aineen olomuodon ja syötettävän energian perusteella: materiaalin pursotus (eng. material extrusion, MEX), valokovetus altaassa (eng. vat photopolymerization, VPP), materiaalin suihkutus (eng. material jetting, MJT), kerroslaminointi (eng. sheet lamination, SHL), jauhepetisulatus (eng. powder bed fusion, PBF), suorakerrostus (eng. direct energy deposition, DED) ja sideaineen ruiskutus (eng. binder jetting, BJT) (SFS 52900:2021). Lisäksi on olemassa uusia teknologioita kuten kylmäruiskutus (eng. cold spraying) ja kitkakerrostusmenetelmät (eng. additive friction stir deposition), jotka eivät kuulu olemassa oleviin luokkiin (Kanishka & Acherjee, 2023). Teknologioiden nopean kehityksen vuoksi luokittelu voi olla joissain tapauksissa hankalaa, ja yksittäinen valmistusmenetelmä voi kuulua moneen luokkaan. Monia perinteisiä valmistusmenetelmiä tai pinnoitusmenetelmiä, joissa ainetta lisätään, voidaan muuttaa AM-teknologioiksi lisäämällä prosessiin tietokoneohjausta. Esimerkiksi valokaarivalmistus (eng. wire arc additive manufacturing, WAAM), toimii käytännössä kuten perinteinen valokaarella hitsaaminen, mutta kappaleiden liittämisen sijaan luodaan uusi kappale.

Vaikka tämän työn tarkoituksena ei olekaan esitellä AM-teknologioita itsessään, esittelen lyhyesti kolme eri teknologiaa, jotka ovat monilta ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia. Tämä lyhyt katsaus antaa kattavan esimerkin tarkemmin valmistusteknologiaan perehtymättömälle, siitä minkälaisia erilaisia vahvuuksia ja heikkouksia AM omaa, riippuen käytetystä teknologiasta. Eri teknologioiden perusteiden ymmärtäminen auttaa myös pitämään mielessä, että vaikka AM:sta puhutaan yhtenä konseptina, se on laaja teknologian haara, jonka sisällä on paljonkin toisistaan poikkeavia teknologioita. Kolme teknologiaa, jotka esittelen, materiaalin pursotus, valokovetus altaassa ja jauhepetisulatus, käyttävät kaikki erimuotoisia lähtömateriaaleja ja prosessit käyttävät erityyppistä energiaa. Näistä eroista johtuen kaikilla teknologioilla on myös omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Esittelen vielä lopuksi erillisessä kappaleessa AM-teknologioiden tämänhetkisiä kehityssuuntia ja uusia mahdollisuuksia.

2.1.1 Materiaalin pursotus (MEX)

Materiaalin pursotuksen teknologiat toimivat käyttäen liikkuvaa pursotuspäätä, josta materiaali annostellaan kohdennetusti reiän tai suuttimen läpi (SFS 52900:2021). MEX:n raaka-aineiden valikoima on hyvin laaja ulottuen monista eri polymeereistä aina suklaaseen ja betoniin. Monet rakentamiseen

kehitetyt AM-teknologiat pursottavat rakennuksen seiniä tarkkaan säädellystä betoniseoksesta, joka kovettuu nopeasti osaksi seinää. Metallin pursotuksessa (Metal MEX) raaka-aineena on polymeerin ja metallijauheen seos (Sæterbø ja Solvang, 2023). Tällainen pursotettu osa muutetaan kokonaan metalliseksi erillisellä sintrausvaiheella (Sæterbø ja Solvang, 2023). FDM on yksi ensimmäisistä ja yleisimmistä MEX-teknologioista. Siinä raaka-aineena on jokin kiinteä polymeeri, joka pursotetaan kuumaan tulostuspäähän, jota liikutetaan tulostusalustan päällä. Tulostuspäässä materiaali sulaa ja se lisätään kerroksittain kappaleen päälle, jossa se jähmettyy osaksi kappaletta. FDM on yleisin kotikäytössä olevista AM-teknologioista ja yleiskielessä se yhdistetään usein termiin 3D-tulostus.

2.1.2 Valokovetus altaassa (VPP)

Valokovetus altaassa on ensimmäinen kehitetty AM-menetelmä (Kanishka & Acherjee, 2023). Termin alle kuuluu hieman enemmän mekaanisesti toisistaan poikkeavia teknologioita kuin materiaalin pursotuksessa. Yhteistä näille teknologioille on nimenmukaisesti se, että lähtömateriaalina on nestemäinen valoaktiivinen polymeeri, joka kovetetaan kohdennetusti valolla (SFS 52900:2021). Käytetty valo on yleensä UV-alueella tai näkyvää valoa. Materiaalia sisältävässä altaassa valmistamisen yhtenä etuna verrattuna pursotukseen on se, että altaassa oleva materiaali tukee kappaletta joka suunnasta, jolloin painovoiman vaikutus ei rajoita yhtä paljon kappaleen geometrisia ominaisuuksia.

Ensimmäinen patentoitu ja kaupallistettu VPP-teknologia oli SLA (Stereo Lithography), jossa peileillä suunnatulla lasersäteellä polymeeri kovetetaan liikkuvaan alustaan, joka kerroksittain laskee kerroskorkeuden verran syvemmälle polymeeriastiaan, jolloin seuraava kerros kovetetaan (Kanishka & Acherjee, 2023). Digital light processing (DLP) on esimerkki toisella menetelmällä toimivasta VPP-teknologiasta, jossa polymeeri kovetetaan kerros kerrallaan käyttäen projektoria, liikkuvan lasersäteen sijaan (Kanishka & Acherjee, 2023). Tämä voi nopeuttaa prosessia merkittävästi, sillä koko kerros kovettuu kerralla, sen sijaan, että lasersäteen pitäisi käydä läpi kerros yksi piste kerrallaan. Kerralla kovetettavan kerroksen etuna on se, että osan koko ei vaikuta valmistusaikaan. Toisaalta suuremman tulostimen valmistus samalla pikselitiheydellä vaatii tarkempaa projektoria ja kalliimpaa laitteistoa. Samalla perusperiaatteella toimivissa teknologioissa voidaan käyttää erilaisia valonlähteitä, kuten näyttöjä, ja kappale voidaan myös tulostaa ylösalaisin nostamalla sitä polymeerinesteestä sinne upottamisen sijaan. Nostaminen helpottaa merkittävästi korkeamman tulostimen valmistamista, sillä astian syvyys ei vaikuta suoraan kappaleen maksimikokoon. VPP:n selkeitä huonoja puolia ovat useiden raaka-aineiden myrkyllisyys ja se, että kappaleet vaativat jälkikäsittelyvaiheen myrkyllisten jäämien poistamiseksi.

2.1.3 Jauhepetisulatus (PBF)

Jauhepetisulatuksessa jauhemainen lähtömateriaali sulatetaan tai sintrataan osaksi kappaletta kohdentamalla energiaa tietylle alueelle (SFS 52900:2021). Selektiivinen lasersintraus (SLS) on PBF-teknologia, jossa energia lisätään prosessiin lasersädettä käyttämällä. Vastaava metallin sulatukseen perustuva teknologia on selektiivinen lasersulatus (Selective Laser Melting, SLM). Se on teollisesti yksi keskeisimmistä AM-teknologioista, jota käytetään teknisesti monimutkaisissa käyttökohteissa, kuten lääketieteessä ja avaruusteknologiassa. SLM:llä voidaan valmistaa osia kalliista ja perinteisesti vaikeasti työstettävistä materiaaleista, kuten Inconelista. SLM:llä valmistetut kappaleet ovat usein materiaalin ominaisuuksiltaan sekä geometrialtaan mahdottomia tai paljon monimutkaisempia valmistaa muilla tavoilla, joten SLM:n kehitys ajaa osaltaan monen teknologian alan kehitystä eteenpäin.

2.2 Lisäävän valmistuksen materiaalin ominaisuudet

Kappaleen muodon ohella toinen sen kriittinen ulottuvuus on sen materiaalin ominaisuudet. Niissä on koko valmistusprosessin tasolla huomioitavia selkeitä eroja AM:n ja perinteisen valmistuksen välillä. Yleisesti valmistuksessa ja suunnittelussa oletetaan materiaalin ominaisuuksien olevan isotrooppisia, johtuen siitä, että perinteisillä valmistusteknologiolla se pitää yleensä paikkansa (Gebhardt, ym., 2019, s.169). Prosessin ortogonaalisuus tarkoittaa, että kappaletta voidaan kääntää vapaasti avaruudessa, muuttamatta sen ominaisuuksia. Tällainen prosessi tuottaa isotrooppisia kappaleita. Monet AM-teknologiat ovat epäortogonaalisia ja saattavat vaatia erillisiä käsittelyvaiheita prosessin ortogonaalisuuden parantamiseksi. Siksi kappaleen asennon vaikutus eri suuntaisiin ominaisuuksiin täytyy huomioida suunnittelussa (Gebhardt, ym., 2019, s.170).

Esimerkiksi FDM-prosessissa kappale rakentuu ilmaan, eikä ole automaattisesti tuettu painovoiman tai laitteiston liikkeen aiheuttamalta epävakaudelta. Monet FDM:ssä käytetyt materiaalit sulavat näiden epävakaustekijöiden takia vain osittain kiinni edelliseen kerrokseen, mikä huonontaa kerrosten välistä kestävyyttä. Tällöin kappale on vahvempi kerrosten suuntaisesti kuin kerrosten välisessä suunnassa. Laminointiin perustuvat AM-teknologiat ovat ilmiselvimmin epäisotrooppisia, koska niissä valmiit materiaalikerrokset liitetään toisiinsa erillisellä sidosaineella (Gebhardt, ym., 2019, s.170). DLP teknologioissa kappale muodostuu nestemäisen lähtömateriaalin sisällä, jolloin raaka-aine tukee kappaletta joka suunnasta. DLP:ssä kappaleen alusta ei myöskään liiku kuten joskus FDM:ssä. SLS on isotrooppisempia osia kuin FDM, mutta vähemmän isotrooppisia kuin DLP. Sintrattaessa materiaali ei sula täysin, mistä aiheutuva kappaleen huokoisuus on isotrooppisuuttakin suurempi ongelma (Gebhardt, ym., 2019, s.170). Vastaava

metallin teknologia SLM sulattaa raaka-aineen kokonaan, jolloin saavutetaan verrattain hyvä isotrooppisuus (Gebhardt, ym., 2019, s.171). Yleisesti nesteallasta tai jauheallasta käyttävissä prosesseissa on paremman vakauden takia mahdollista käyttää enemmän energiaa, jolloin kerrokset liittyvät paremmin toisiinsa ja kappaleet ovat paremmin isotrooppisia.

AM:n erilaisten raaka-aineiden valikoima on todella laaja ja kasvaa jatkuvasti kattamaan uusia materiaaleja (Gebhardt, ym., 2019, s.172). Se ei ole kuitenkaan lähelläkään perinteisten valmistusmenetelmien raaka-ainevalikoimaa, koska AM:ssä käytettävät raaka-aineet vaativat paljon testausta ja optimointia sen valmistusprosessiin sopivuuden varmistamiseksi (Gebhardt, ym., 2019, s.172). Monet raaka-aineiden ominaisuudet ovat hyvin tunnettuja kiinteässä olomuodossa, mutta AM-prosessin vaikutukset materiaalien ominaisuuksiin vaativat merkittävää lisätutkimusta (Gebhardt, ym., 2019, s.172). Raaka-aine voi olla teknologiasta riippuen nestemäinen, kiinteä tai jauhemainen, tai joidenkin näiden muotoisten materiaalien homo- tai heterogeeninen seos. Raaka-aineen rajoituksena on se, että prosessissa pitää käyttää ainakin yhtä sellaista raaka-ainetta, joka voidaan liittää valmistettavaan kappaleeseen syöttämällä kyseisessä teknologiassa käytettävää energiamuotoa.

Johtuen valmistuksen aikaisesta energian syöttämisestä, AM:ssä muoto ja materiaalin lopulliset ominaisuudet syntyvät samaan aikaan (Kanishka & Acherjee, 2023). Tämä eroaa materiaalia poistavasta valmistuksesta, jossa kappale säilyttää alkuaihion materiaalin ominaisuudet muuttumattomina. Tämä muodosta lisähaasteita AM:n käytössä, mutta avaa myös uusia mahdollisuuksia (Kanishka & Acherjee, 2023). AM:ään käytetyn energian määrä, syöttönopeus ja kappaleen prosessin aikainen jäähdyttäminen vaikuttavat materiaalin ominaisuuksiin. Tämä on helppo hahmottaa vertaamalla prosessia perinteiseen metallin lämpökäsittelyyn, jossa metallikappaleen ominaisuuksia voidaan muuttaa merkittävästi lämmittämällä ja jäähdyttämällä sitä tietyllä tavalla. AM:llä materiaalin ominaisuuksissa on myös kappalekohtaista vaihtelua, mikä on yksi merkittävimmistä haasteista AM:n hyödyntämisessä massavalmistukseen (Kanishka & Acherjee, 2023). Tämä aiheuttaa lisähaasteita laaduntarkkailun osalta.

2.3 AM-teknologioiden uusimmat kehityssuunnat

Uusia erilaisilla laitteistoilla, energian syöttötavoilla ja lähtömateriaaleilla toimivia AM-teknologioita kehitetään jatkuvasti. Uusien teknologioiden lisäksi AM-teknologioiden pariin pyritään tuomaan ja kehittämään uusia parempia materiaaleja. Näiden kehityssuuntien ohella tämän hetken suurimmat harppaukset AM:n kehityksessä tulevat täysin uusista tavoista yhdistää AM:ää muihin valmistusteknologioihin. Tällaisista uusista teknologioiden yhteiskäytön kehityksistä käytetään yleisesti termiä hybridivalmistaminen. Hybridivalmistamisessa AM-prosessin aikana kappaleeseen voidaan

esimerkiksi lisätä yleisiä ja halpoja massavalmistettavia komponentteja kuten muttereita ja magneetteja. Tällä tavoin voidaan hyödyntää valmiiden osien erilaisia hyviä ominaisuuksia. Perinteisin valmistusmenetelmin tehtävän valmistuksen yhteydessä näiden osien käyttö vaatii erillistä kokoonpanoa, mutta AM-prosessissa ne voidaan yhdistää osaksi normaalia valmistusprosessia. Esimerkki tällaisesta hybridivalmistamisen prosessista on kehitetyt betonirakentamisen AM-teknologiat. Niissä talon runko valmistetaan AM:llä pursottamalla se betoniseoksesta, ja prosessin osana rungon sisään voidaan upottaa valmiita osia kuten putkia ja johtoja, sekä valmiita kokonaisuuksia, kuten ovia ja ikkunaelementtejä.

Hybridivalmistuksessa AM:llä valmistettuja osia voidaan myös lisätä kappaleeseen osana toista AM-prosessia. Tällöin voidaan esimerkiksi nopeuttaa valmistusprosessia kokonaisuudessaan tai saada parannettua kappaleen valmistussuunnan aiheuttamia ominaisuuksia. Yksi kehityksen alainen hybridivalmistamisen muoto on lisätä kappaleen sisälle valmistuksen yhteydessä yhtenäisiä kuituja kuten hiilikuituja. Perinteiset kuitukomposiittien valmistustavat vaativat monimutkaisia, usein käsityönä tehtäviä prosesseja. Koska näiden kappaleiden halutut ominaisuudet riippuvat niiden sisältämien kuitujen jatkuvuudesta ja suunnasta, näiden materiaalien tietokoneohjattu valmistaminen materiaalia poistamalla homogeenisestä lähtömateriaalista ei ole mahdollista. AM:llä tällaisen komposiittikappaleen valmistaminen on mahdollista käyttämällä materiaalina komposiitin sidosainetta ja syöttämällä sen sisään jatkuvia kuituja.

AM-prosessin aikaisen kappaleiden lisäämisen lisäksi hybridivalmistuksesta puhutaan käytettäessä AM:llä valmistettuja kappaleita osana perinteisiä valmistusmenetelmiä. Tällöin AM:llä voidaan valmistaa esimerkiksi vain jokin monimutkainen osa kokonaisuutta, tai AM:llä voidaan valmistaa muotteja tai niiden osia käytettäväksi perinteisen muottiin perustuvan valmistamisen osana. Esimerkiksi suomalainen yritys Hetitec oy (2025) tarjoaa hybridivalmistamisen valmistusprosessia, jossa voidaan valmistaa alusta loppuun valettuja osia vain päivissä. Tämä on perinteisillä valmistusprosesseilla täysin saavuttamaton valmistuksen suunnittelun ja toteuttamisen aikataulu. Monien muottien valmistaminen on perinteisesti erittäin kallista, joten hybridivalmistamisella voidaan joissain käyttökohteissa mahdollistaa perinteisesti vain suurina sarjoina tehtävään valmistukseen käytettävien valmistusmenetelmien käyttöä pienemmillä valmistusmäärillä. Tulevaisuudessa hybridivalmistamisella voidaan varmasti monipuolistaa monia erilaisia perinteisiä valmistusmenetelmiä käyttämällä niiden osana AM:tä.

2.4 Lisäävän valmistuksen käyttökohteet

Ensimmäiset AM:n käyttökohteet rajoittuivat prototyyppien valmistukseen, teknologian silloisen rajallisuuden vuoksi (Kanishka & Acherjee, 2023). Materiaalivalikoima oli hyvin suppea, samoin kuin teknologian nopeus ja

luotettavuus. AM:n silloisesta rajallisuudesta kertoo myös sen ensimmäinen yleisesti käytetty nimi rapid prototyping. Prototyyppien valmistus on edelleen yksi keskeisistä AM:n käyttökohteista, mutta teknologian kypsyminen on avannut myös muita mahdollisuuksia. Nykyiset käyttökohteet ovat melkein yhtä laajoja, kuin perinteistenkin valmistustapojen, ja AM:n kehitys on mahdollistanut jopa täysin uusia käyttökohteita, kuten elävistä soluista tai soluihin kiinni kasvavista materiaaleista valmistettavat käyttökelpoiset ruumiinosat, joiden kaltaisia ei ole pystytty valmistamaan millään aiemmalla valmistusteknologialla.

Erilaisten uusien AM-materiaalien kehitys on lisännyt vuosien saatossa monia uusia aloja potentiaalisten käyttäjien joukkoon. Vuonna 2011 ensimmäinen AM:lla tehty synteettinen elin, henkitorvi, istutettiin onnistuneesti potilaalle (Kanishka & Acherjee, 2023). Tämän jälkeen elävän kudoksen, ja siihen yhteensopivien, kappaleiden kehitys on mahdollistanut AM:n lääketieteellisen käytön. AM:lla on pitkään valmistettu monimutkaisia ja ominaisuuksiltaan vaativia osia avaruus ja ilmailualojen käyttöön, ja tämä kehityskulku on johtanut myös tiukempien marginaalien autoteollisuuden sovelluksiin. Esimerkiksi BMW käyttää metallien AM:a osana avoautojen kattojen valmistusketjua (Kanishka & Acherjee, 2023). Tämä kertoo AM:n kustannusten kilpailukykyistymisestä, verrattuna perinteisiin valmistustapoihin.

Vaikka AM on edelleen loppukäyttöön tulevien osien osalta vahvasti keskittynyt kalliisiin ja sen erityisominaisuuksiin nojaaviin kappaleisiin, myös pienen valmistuserän halvemmat kappaleet olla enenevissä määrin mahdollinen käyttökohde. Tähän kehitykseen vaikuttavat AM:n laitteistojen ja materiaalien kustannusten nopea lasku. Yksi käyttökohde on edellisessä alaluvussa mainittu hybridivalmistamisen muoto, työkalujen valmistus muihin valmistusprosesseihin (eng. rapid tooling). Siinä AM:n avulla voidaan merkittävästi nopeuttaa jonkin lopputuotteen tuotannon kannalta edullisemman muun valmistusteknologian prosessia.

2.5 Lisäävän valmistuksen strategiset edut ja haasteet

AM:n vahvuudet teknologiana ovat vahvasti linkittyneet niin sanotun neljännen teollisen vallankumouksen kehityssuuntiin (Kanishka & Acherjee, 2023). Sen hyödyt korostuvat yhdistettäessä sen käyttö suunnittelu- ja valmisteluprosessin digitalisaatioon ja hyödynnettäessä sen potentiaalia pitkälle vietyyn automaatioon (Kanishka & Acherjee, 2023). Yksi merkittävä AM:n kanssa yhdessä toimivista digitaalisista valmistusprosesseista on pilvivalmistaminen (eng. cloud manufacturing, CM), joka avaa AM-teknologioiden laajan kirjon kenen tahansa käytettäväksi keskitetyn pilvipohjaisen valmistuksenvälittämisen palvelun kautta. Siirryttäessä enenevissä määrin verkkopohjaisiin prosesseihin, AM:n edut tulevat korostumaan tulevaisuudessa vielä enemmän kuin nykyhetken suora vertailu perinteisen valmistusmenetelmän kanssa antaisi ymmärtää.

Tärkeimmät AM:n kustannuksiin liittymättömät erityisominaisuudet liittyvät sen erilaisiin geometrisiin rajoitteisiin, perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Yksi merkittävä muutos verrattuna moniin perinteisiin valmistusmenetelmiin on se, että AM:llä kappaleen monimutkaisuus ei vaikuta juurikaan sen valmistuksen haastavuuteen tai nopeuteen (Kanishka & Acherjee, 2023). Gebhardt ym. (2019, s.1139-151) mukaan tätä voidaan hyödyntää monimutkaisten kappaleiden valmistuksessa tai integroimalla monen kappaleen kokoonpanoja yhteen kappaleeseen valmistuksen yksinkertaistamiseksi tai liikkuvien mekanismien kerralla valmistamisen muodossa. Lisäksi AM mahdollistaa monimateriaalisten kappaleiden valmistamisen ja materiaalin ominaisuuksien kappaleen sisäisen hienosäädön, joilla voidaan saavuttaa teknistä etumatkaa perinteiseen valmistukseen. Monilla perinteisillä valmistusmenetelmillä on erilaisia rajoitteita liittyen kappaleen monimutkaisuuteen. Nämä rajoitteet ovat kehittyneet osaksi suunnitteluprosesseja vuosisatojen aikana, kun kaikki suunnittelu on tehty perinteisiä valmistusmenetelmiä varten. Tämän takia riskinä on, että jo ideointivaiheessa suunnittelija rajoittaa luovuuttaan perinteisten rajoitteiden pohjalta. AM-teknologioiden puutteellinen tuntemus voi muuttaa esimerkiksi valmistusmenetelmän valinnan prosessia jo kauan ennen varsinaista kustannusten arviointia. Tästä esimerkkinä Yi ja kumppanien (2019) selvitys hyötyajoneuvojen alalta, jonka mukaan AM-teknologioiden tuntemuksen puute on yksi keskeisimmistä haasteista niiden käyttöönoton kannalta.

Liiketoiminnan strategisia päätöksiä tehtäessä, perinteinen mittakaavaedun tavoittelu saattaa rajoittaa AM:n käyttöönottoa. Mittakaavaetu on yksi hyvin keskeisistä tuotantotalouden konsepteista, ja sen vahva merkitys strategisella tasolla voi tukea perinteisiin valmistusmenetelmiin keskittymistä. Mittakaavaedun sijaan AM ja muut digitaaliset valmistusmenetelmät lisäävät tuotannon muokattavuutta ja joustavuutta, joita voitaisiin mahdollisesti hyödyntää liiketoimintastrategiassa mittakaavaedun tavoittelun ohella. Gebhardt ym. (2019, s.152-163) listaavat kustomoitavan massavalmistuksen mahdollisiksi hyödyntämistavoiksi personoinnin asiakkaan ruumiinrakenteen, toiveiden tai käyttötarkoituksen spesifien vaatimusten mukaan. Kun AM:ää käytetään tehokkaasti yhdessä standardiosien ja -materiaalimuotojen kanssa, voidaan näitä yhdistävillä ratkaisuilla saavuttaa mittakaavaetua standardisoiduista elementeistä ja joustavuutta AM-osista. Tämä vähentää perinteisen valmistuksen etumatkaa massavalmistuksen kustannustehokkuuden suhteen.

Strategisella tasolla voidaan myös ottaa huomioon AM-teknologioiden paremmasta ymmärtämisestä saatava organisaation informaatiopääoman kasvaminen, joka saattaa ilmeisten käyttökohteiden lisäksi ilmetä uusina ennalta vaikeasti nähtävinä mahdollisuuksina toiminnan kehittämisessä. Sama pätee kaikkiin uusiin teknologioihin jollain tasolla, mutta AM on niin suuri kehityssuunta alalla, että sen huomioimatta jättäminen saattaa tulla tulevaisuudessa hyvin kalliiksi. Mikäli organisaatiossa taas on enemmän tietoa

AM:stä kuin perinteisistä valmistusmenetelmistä, sama logiikka toimii myös toisin päin, sillä kaikkien vaihtoehtojen tunteminen auttaa tekemään tilannekohtaisesti parhaan päätöksen.

3 Lisäävän valmistuksen kustannusrakenne

Lisäävän valmistuksen kustannusrakenne voidaan hahmottaa monella eri tavalla, riippuen siitä kuinka paljon oheiskuluja halutaan ottaa huomioon. Periaatteen tasolla kaikki kulut, jotka vaihtelevat valmistusprosessista riippuen, on jollain tasolla mielekästä ottaa huomioon valmistuksen kustannuksia arvioitaessa. Toisin sanoen vain täysin valmistusmenetelmästä riippumattomia asioita ei kannata ottaa huomioon kustannusarvioinnissa. Kun AM:n kustannusarviointia on kehitetty 90-luvulta lähtien, yhä useamman tekijän on huomattu riippuvan valmistusprosessin valinnasta (Kadir ym., 2020). Tässä luvussa avaan AM:n kustannuksia suorista kuluista lähtien, kohti kauempana valmistusprosessista sijaitsevia oheiskustannuksia. Suorimpien valmistuskulujen esittelyn teen melko yleisluontoisesti, koska AM-teknologioiden välillä on suuria eroja. Tämän takia koko AM:n kustannusrakenteesta keskusteltaessa, on mielekkäämpää keskittyä suurempiin trendeihin ja AM:n yleisiin erityisominaisuuksiin.

AM soveltuu hyvin käytettäväksi moderneissa valmistuksen tilauspalveluissa, jonka takia organisaation valmistuksen kustannuksia laskettaessa täytyy ottaa huomioon kaksi hyvin erilaista kustannuslaskentaa. Tässä luvussa esittelemäni kustannustekijät vaikuttavat sekä sisäiseen että ulkoistettuun valmistukseen. Tilauspalveluilla on selkeitä etuja kulujen optimoinnissa hyvin nopeasti liikkuvassa AM:n teollisuuskentässä, joiden takia ne saattaavat olla hyvinkin kilpailukykyisiä kustannuksiltaan verrattuna omaan valmistukseen. En käsittele tilauspalveluita sen merkittävämmin enempää, mutta on hyvä tietää, että AM:n ollessa pitkälle automatisoitu, digitaalisesti ohjattu ja hajautettu teknologia, tilattavilla osilla ei ole hinnan lisäksi merkittäviä haittapuolia, kuten esimerkiksi kovin pitkää toimitusviivettä. AM:n aiheuttama tuotannon keskittyminen kompaktiin laitteistoon mahdollistaa myös verrattain helpon tuotannon fokuksen siirtämisen sisäisestä ulkoiseen valmistukseen tai toisinpäin.

3.1 Lisäävän valmistuksen suorat kustannukset

AM:n suorat kustannukset, kuten muunkin valmistuksen, muodostuvat kappaleen laitteen sisäisistä kustannuksista ja laitteen käytön suorista kustannuksista. Perinteisellä jaottelulla voidaan kustannustekijät jakaa materiaalikustannukseen, laitekustannukseen, energiakustannukseen ja henkilöstökustannukseen. Nämä kustannukset ovat yleisiä valmistamisen kustannuksia, mutta ne saatetaan laskea eri tavalla eri valmistusmenetelmillä. Seuraavissa alakappaleissa käsittelen tarkemmin AM:n kustannusten erityispiirteitä. Nykyiset analyyttiset mallit ottavat huomioon paljon tarkempiakin valmistuksen yksityiskohtia, mutta yksinkertainen laskentamalli auttaa ymmärtämään millä tavalla kustannusten analyyttista laskentaa tehdään. Käytän

näiden AM:n suorien kustannusten esittelyyn Yin ym. (2023) esimerkkinä käyttämää analyyttista mallia, jossa kokonaiskulut pyritään määrittämään jakamalla kustannukset loogisiin kustannustekijöihin, joiden arviointia voidaan tehdä erilaisilla yksinkertaisilla matemaattisilla yhtälöillä. Tällainen malli perustuu historialliseen tietoon pohjautuviin yksinkertaistuksiin. Yi ym. (2023) mallissa (Kaava 1) kokonaiskustannukset muodostuvat materiaali-, laite-, energia- ja henkilöstökustannuksista.

$$K_{kok} = K_{mat} + K_{lai} + K_{ene} + K_{hen} \quad (1)$$

Kukin näistä osakustannuksista lasketaan omalla laskukaavallaan. Materiaalikustannukset (Kaava 2) pohjautuvat kappaleeseen käytetyn materiaalin määrään (m_o) ja materiaalin hintaan (MH). Materiaalin määrä lasketaan kappaleen tilavuuden (V_o) ja materiaalin tiheyden (ρ_{mat}) pohjalta. Materiaalin määrään lisätään vielä lisämateriaalimuuttuja (α), joka muodostuu kappaleeseen kuulumattomasta kulutetusta materiaalista, kuten tukimateriaalista.

$$K_{mat} = (1 + \alpha) * V_o * \rho_{mat} * MH \quad (2)$$

Laitekustannukset (Kaava 3) lasketaan käyttämällä tunnettua arviota koneajan tuntikohtaisesta hinnasta (KTH). Kunkin tuotantolaitteen käytölle määritetään likimainen valmistusaikaan (t_o) perustuva hinta. KTH (Kaava 4) perustuu laitteen kustannuksiin, jotka ovat esimerkkitapauksessa arvonalenema (L_{aa}), huoltokustannukset (L_{hk}), korkokustannus (K_{kor}) ja huoneen kustannus (HK). Kustannukset jaetaan odotetulla vuotuisella käyttötuntien määrällä (VKT).

$$K_{lai} = t_o * KTH \quad (3)$$
$$KTH = (L_{aa} + L_{hk} + K_{kor} + HK) / VKT \quad (4)$$

Tuntikohtaisen hinnan osatekijät voidaan laskea yksinkertaisilla yleistyksillä. Arvonalenema saadaan laitteen ostohinnan ja oletetun eliniän perusteella. Laitekohtaisten huoltokustannusten laskemiseen voidaan käyttää arviota huoltokustannusten suhteesta laitteen ostohintaan. Korkokustannus saadaan korkotason ja laitehinnan tulosta. Huonekustannus voidaan laskea käyttämällä keskimääräistä tilan neliöhintaa ja laitteen vaatimaa neliömäärää.

Energiakustannukset (Kaava 5) lasketaan energian hinnasta (E_h) sekä valmistusajan (t_o) ja keskimääräisen tehon (P_{ka}) tulosta.

$$K_{ene} = E_h * t_o * P_{ka} \quad (5)$$

Henkilöstökustannukset (Kaava 6) lasketaan kyseiseen valmistusprosessiin osallistuvan henkilömäärän (k), työntekijän tuntihinnan (TTH) ja työntekijän tekemän työn ajan mukaan. Työntekijän työhön käyttämä aika voidaan arvioida likimain sen perusteella, kuinka paljon työtä yleensä tarvitaan suhteessa valmistusaikaan (t_o). Tätä suhdetta kuvaa muuttuja β.

$$K_{hen} = \beta * t_o * TTH * k \qquad (6)$$

Tällainen esitelty analyyttinen malli jakaa siis valmistuskustannukset laitteisto- ja valmistusprosessikohtaisiin vakio-osiin ja muutamiin aiemman tiedon pohjalta arvioituihin muuttujiin. Näiden lisäksi kustannusarvioon tarvitaan tarkat arviot kappaleen tilavuudesta V_o ja valmistusajasta t_o, jotka on helppo määrittää nykyisillä AM:n suunnitteluohjelmistoilla. Analyyttinen malli kuvaa reaalimaailman valmistusprosessia tarkimmin, mutta vastaava laskenta voidaan tarvittavan tarkkuuden ja nopeuden mukaan korvata erilaisilla metodeilla. Esitellyn kaltaiseen analyyttiseen malliin voidaan lisätä paljonkin erilaisia ominaisuuksia, mikäli mallia halutaan laajentaa kuvaamaan valmistusprosessin kokonaisuutta paremmin tai siinä halutaan pureutua teknisesti tarkemmin yksityiskohtiin.

Moniin metallin AM-teknologioihin liittyy esiteltyjen lisäksi merkittävänä kulueränä suojakaasun kustannukset. Suojakaasua käytetään prosesseissa, jotta prosessin aikana ei synny materiaalin ilman kanssa reagoidessa epäpuhtauksia. Gee ym. (2022) esittelemä malli pyrkii mallintamaan metallijauheen sulamisen reaalimaailman geometrisiä fyysisiä ominaisuuksia laser-PBF:n kustannusarvioinnin yhteydessä. Näin pitkälle valmistuksen fyysisiin ominaisuuksiin pureutuvan mallintamisen ilmeinen hyöty on se, että se ei ota huomioon minkään yksittäisen valmistuslaitteen ominaisuuksia, joten sitä voidaan käyttää myös tulevaisuudessa samaan fyysiseen ilmiöön perustuvan valmistuksen yhteydessä, vaikka teknologia ja laitteet kehittyvät. Mitä tarkemmalla tasolla valmistusta voidaan mallintaa, sen paremmin eri AM-teknologioiden kustannuksia voidaan arvioida samalla mallilla. Tämä helpottaa teknologioiden keskinäistä vertailua. Esimerkiksi tässä tapauksessa voidaan paremmin verrata eri laser-PBF-laitteita keskenään, mikä on hankalaa, jos kullekin laitteelle on omat laitekohtaiset arviointimallinsa.

Prosessista riippuen suoriin kuluihin kuuluu vielä lisää pakollisia lisävaiheita, kuten esivalmisteluvaiheita ja jälkikäsittelyä. Näiden osuus kokonaiskustannuksista saattaa olla hyvin merkittävä. Esimerkiksi Sæterbø ja Solvang (2023) metallin MEX prosessiin liittyvän tutkimuksen edullisimmassa AM-tapauksessa jälkikäsittelyn kustannusten osuus valmistuksen kokonaiskustannuksista oli 49%, ja ne veivät ajallisesti jopa 76% valmistusprosessista. Esitellyssä mallissa osa näistä kuluista oli yksinkertaistettu henkilöstökuluja kuvaavaan yksittäiseen muuttujaan, ja osa puutui kokonaan. Esikäsittelyn kustannuksia voi syntyä osien asettelun päättämisestä, laitteiston valmistelusta, kuten materiaalin lisäämisestä ja tulostusalustan käsittelystä.

Jälkikäsittelyn kustannuksia syntyy useissa AM-teknologioissa esimerkiksi erillisistä jälkikäsittelyprosesseista, laaduntarkkailusta, tukirakenteiden poistosta ja pinnanlaadun virheiden viimeistelystä. Esi- ja jälkikäsittelyvaiheet vaihtelevat suuresti eri AM-teknologioiden välillä. Esimerkiksi SLA:ssa tarvitaan usein kokonaan erillinen jälkikäsittelylaite, jossa kappaleen pinta kovetetaan ja myrkylliset ainejäämät poistetaan. Metallin MEX:ssä taas vaaditaan erillinen sintrausvaihe sidospolymeerin poistamiseksi ja varsinaisen metallikappaleen valmistamiseksi. Nykyiset MEX-teknologiat mahdollistavat tukirakenteen tekemisen toisesta kappaleeseen huonosti tarttuvasta materiaalista, mikä helpottaa tukirakenteiden poistamista ja vähentää tarvetta virheiden viimeistelylle. SLM:ssä taas tukirakenteet ovat tiukemmin kiinni, joten niiden poisto ja viimeistely vaatii enemmän työtä ja parempaa valmistuksen suunnittelua niiden minimoimiseksi.

3.2 Kappaleen asettelun vaikutus kustannuksiin

Edellisessä kappaleessa esitellyn kaltainen perinteinen kappalekohtainen malli ei huomio mitenkään kappaleen asennon ja valmistustilavuuden tehokkaan pakkaamisen vaikutuksia kustannuksiin. Barclift ym. (2017) antavat esimerkin tästä. Heidän esimerkkikappaleellaan pystysuuntaan aseteltu yksittäin valmistettava kappale maksaa 11280 USD, kun lappeellaan kaksi kerrallaan valmistettaessa kappalehinta on 5580 USD. Tässä laskelmassa ei ole huomioitu kappaleen sisäisten tukirakenteiden aiheuttamaa kyseisen valmistussuunnan sopimattomuutta. Selvästi halvempi hinta, mutta tukirakenteen jälkikäsittelyn mahdottomuus osoittavat, kuinka tekniset rajoitteet ja kustannusten laskenta täytyy molemmat huomioida valmistusta suunniteltaessa.

Barclift ym. (2017) esimerkissä huomataan, että yhden kappaleen kerralla valmistaminen nostaa raaka-aineena käytettävän metallijauheen kierrätettävyyden heikkenemisestä aiheutuvaa arvonalenemaa liki kaksinkertaiseksi itse osaan käytettävän materiaalin hintaan verrattuna. Metallijauhetta käyttävillä AM-teknologioilla kyseinen käytetyn jauheen arvonalenema aiheuttaa merkittäviä lisäkuluja, kun valmistustilavuutta ei täytetä optimaalisesti. Tarvittavan jauheen määrä riippuu valmistuserän korkeudesta, mutta kaikki osien ulkopuolinen tilavuus menettää arvoaan jauheen arvonalenemana. Tästä syystä mahdollisimman tiivis ja tasaisen korkuinen osien pakkaaminen aiheuttaa vähiten raaka-aineen arvonaleneman kustannuksia.

Oman lisähaasteensa kappaleiden asetteluun saattaa joissakin teknologioissa tuoda kerrosten suunnasta riippuvat mekaaniset erot, eli kappaleen epäortotrooppisuus. Joskus näitä mekaanisia haasteita voidaan minimoida erillisellä jälkikäsittelyvaiheella, jossa kappale kuumennetaan hallitusti. Tämä voi vähentää valmistuksen rajoitteita, mutta vastaavasti lisätä kustannuksia. Dareh Baghi ym. (2021) näyttävät, että SLM:llä valmistetuilla titaaniosilla vaaditaan pystysuunnassa valmistetun osan kohdalla erillinen

jälkikäsittelyvaihe, jotta saavutetaan maksimaalinen vetolujuus. Vaakatasossa valmistetut osat olivat taas lähes täysin lujia jo ennen jälkikäsittelyä. Hyvin epäortogonaalisella AM-teknologialla valmistettavaksi suunnitellun kappaleen asento on määritetty jo suunnitteluvaiheessa, koska se vaikuttaa kappaleen suuntakohtaisiin mekaanisiin ominaisuuksiin, sekä valmistuksen helppouteen. Mekaanisten ominaisuuksien lisäksi kappaleen asento avaruudessa vaikuttaa tukirakenteiden määrään ja niiden poistamisen helppouteen, kuten Barclift ym. (2017) esimerkki osoittaa. Mikäli kyseiset asiat on otettu huomioon jo osan suunnittelussa, voidaan saavuttaa paras tulostettavuus ja tukirakenteen minimointi. AM-teknologia ja siinä käytetty materiaali vaikuttavat merkittävästi prosessin ortogonaalisuuteen.

Monet perinteiset valmistusmenetelmät valmistavat aina yhden kappaleen tai ennalta määritellyn samanlaisen valmistuserän kerrallaan. AM-laitteilla on puolestaan laitteen koon ja liikkeen rajoittama valmistustilavuus, jonka optimaalinen täyttäminen vaikuttaa yhdessä valmistuserässä valmistettavien kappaleiden kustannuksiin. Tästä johtuen merkittävä pakollinen esikäsittelyvaihe AM:ssa on valmistettavien osien jaottelu valmistuseriin. Esimerkiksi Sæterbø ja Solvang (2023) näyttävät, että tämä ero voi olla ratkaiseva siinä onko AM vai CNC-koneistus edullisempi vaihtoehto. Heidän esimerkissään jo useamman osan samanaikainen valmistus käänsi asetelman AM:n eduksi, mutta valmistusta voitaisiin vielä entisestään tehostaa valmistamalla samaan aikaan tilan tehokkaammin täyttäviä erilaisia kappaleita.

Ilman usean kappaleen samanaikaisen valmistuksen huomiointia, ainoa tapa verrata AM:n kustannuksia realistisesti vakioerän tuottavan valmistusmenetelmän kanssa on laskea AM:n kustannukset kokonaiselle valmistuserälle, eikä yksittäiselle kappaleelle. Valmistustilavuudesta riippuva erän valmistus on AM:n kustannuksissa täysin keskeinen tekijä. Tässä luvussa esitellyissä esimerkkitapauksissa jo muutaman kappaleen samanaikainen valmistus saattoi puolittaa valmistuskustannukset, mutta pidemmälle viety pakkauksen optimointi voisi tästä pääteltynä laskea kustannuksia vielä alemmas. Tässäkin asiassa on kuitenkin tärkeää huomioida, että kaikki AM-teknologiat eivät käyttäydy samalla tavalla. Materiaalipetiin valmistavilla teknologioilla edellä tehdyt huomiot pätevät, mutta esimerkiksi FDM-valmistuksessa samat lainalaisuudet eivät toteudu. Siinä valmistuslaitteen täyttö ei muuta kustannuksia valmistusaineen heikkenemisen suhteen. Lisäksi valmistusaika skaalautuu jotakuinkin täytön mukaan, mutta korkeampi täyttöaste lisää riskiä epäonnistuneen valmistuksen suhteen, koska yksi virhe prosessissa voi pilata kerralla suuremman määrän kappaleita. Tämä osoittaa jälleen, miksi AM-teknologioille täytyy usein muodostaa omat kustannusarvioinnin mallinsa, eikä yhtä yleistä AM:n kustannusrakennetta ole helposti määritettävissä.

3.3 Suunnittelukustannukset

AM avaa mahdollisuuden siirtää suunnittelua pois valmistusprosessin optimoinnista, jolloin voidaan keskittyä enemmän osan käyttöön liittyvien teknisten ominaisuuksien optimointiin, ja saada samalla suunnittelun määrällä aikaan perinteistä verrokkia parempi osa, tai vastaavasti vähentää suunnittelun tarvetta. Suunnittelu on edelleen yhtä tärkeää valmistuksen tehokkuuden varmistamiseksi, mutta täysin uusi mahdollisuus on valmistaa kappale ilman tarkempaa suunnittelua, mikäli tehokkuus ei ole keskeinen tekijä. Perinteisesti tällaista vaihtoehtoa ei ole ollut, vaan jokainen valmistettava kappale on pitänyt suunnitella tarkkaan valmistusprosessia varten.

Uusimmilla menetelmillä kappaleita suunnitellessa koko ihmisvetoinen muodon suunnittelu ohitetaan. Sen sijaan kappaleelle suunnitellaan avaruudelliset rajoitteet ja siihen vaikuttavat ulkoiset voimat, joiden pohjalta voidaan topologiaoptimoinnilla luoda juuri kyseiseen tarpeeseen optimoitu kappale. Tällainen optimointi minimoi tarvittavan materiaalin määrän, ja sitä myöten myös nopeuttaa valmistusprosessia. Tätä menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi, kun halutaan korvata käytössä oleva perinteinen osa AM osalla, koska tällöin on jo tiedossa kappaleen kiinnityspisteet ja siihen vaikuttavat voimat. Uusia kokonaisuuksia suunniteltaessa vastaava optimointi ei ole välttämättä niin suoraviivaista, jos useampi uusi osa vaikuttaa toistensa optimointiin.

Vaikka AM:ssä suunnittelua vaikeuttavia geometrisiä rajoitteita on vähemmän, on kappaleelle järkevää etsiä jälkikäsittelyn kannalta paras ja valmistuksessa tehokas asettelu. Tämä vaatii prosessi- ja laitteistokohtaista kokemusta. Valmistusprosessin optimointi aiheuttaa lisäkustannuksia suunnittelussa, mutta saattaa säästää valmistamisen ja jälkikäsittelyn kustannuksissa. Paras valmistettavuus ja jälkikäsittelyn tarpeen minimointi saavutetaan suunnittelemalla erityisesti AM:ä varten, mutta AM soveltuu hyvin myös vain käyttötarkoitusta varten optimoitujen kappaleiden valmistukseen. Tällöin voidaan tarvita enemmän tukimateriaalia ja jälkikäsittelyä. Toisin sanoen AM:llä valmistusprosessi voidaan ottaa huomioon suunnittelussa tilanteeseen sopivissa määrin, mutta se ei usein rajoita valmistettavissa olevien kappaleiden muotoa. Mikäli AM:llä halutaan valmistaa kappaleita mahdollisimman kustannustehokkaasti, vaaditaan luonnollisesti älykästä kyseisen valmistusteknologian ominaisuudet huomioivaa suunnittelua. Yi ym. (2019) mukaan, tämän suunnitteluosaamisen puute on yksi keskeisimmistä syistä miksi AM ei ole yleistynyt hyötyajoneuvojen alalla. Sama haaste pätee todennäköisesti monella muulla sektorilla, ja saattaa aiheuttaa AM:lle korkeammat tuntikohtaiset suunnittelukustannukset.

AM:n geometrinen vapaus tuo suunnitteluun joustavuutta, mutta suunnittelu vaatii edelleen monessa tilanteessa asiantuntijuutta, mikä aiheuttaa kustannuksia. Mikäli halutaan korvata AM:llä perinteinen osa tai kokoonpano voidaan kuitenkin saavuttaa selkeitä säästöjä. Esimerkiksi tietokoneella tehtävä topologiaoptimointi ja usean kappaleen kokoonpanon

yhdistäminen yhteen kappaleeseen voivat säästää kokonaiskustannuksissa selvästi. Vaikka AM:llä on mahdollista säästää suunnittelukustannuksissa, yleisimmissä käyttökohteissa sen suunnitteluun käytetään resursseja, jotta voidaan säästää muilla toiminnan osa-alueilla. Harvassa tilanteessa kannattaa säästää suunnittelussa muiden ominaisuuksien kustannuksella.

3.4 Systeemitason kustannukset

Yksi AM:n ja muunkin kustannusarvioinnin merkittävimmistä kehityssuunnista on entistä laajempien systeemien huomiointi osana kustannusarviointia. Esimerkiksi säilytys- ja kuljetuskustannukset voivat selvästi erota eri valmistusmenetelmien välillä, joten ne ovat tärkeitä huomioida kustannusarvioinnissa. Valettava metalliosa vaatii paljon erikoistunutta infrastruktuuria, joka on keskittynyt tiettyihin halvemman työvoiman maihin. Kun otetaan huomioon tuotantoketjun kustannuksia ja riskejä, saattaa AM:n suhteellinen sijainnista riippumattomuus aiheuttaa kustannussäästöjä. Jos osan tarve on muualla, pitää osat kuljettaa ja ylläpitää paikallisia varastoja tarpeen täyttämiseksi. SLM-prosessilla valmistettava vastaava osa voidaan tehdä pienellä laitteistolla käyttökohteen lähellä, jolloin osien kuljetuksen ja varastoinnin kulut voidaan minimoida.

Varastointi- ja kuljetuskustannukset korostuvat esimerkiksi varaosien valmistuksessa, kun osille ei ole välitöntä tarvetta, vaan niitä tarvitaan vain ongelmatilanteessa. Perinteisillä valmistusmenetelmillä varaosia valmistettaessa, valmistajan täytyy tehdä optimointia viiveettömän saatavuuden sekä kuljetus- ja varastointikustannusten välillä. Varaosien valmistus AM:llä poistaa lähes kokonaan tarpeen varastoinnille, mutta pitää yllä nopeaa saatavuutta luoden säästöjä varaosaketjun kustannuksissa. Ekren ym. (2025) teknologioita vertailevan kustannusarviointimallin mukaan AM oli kustannustehokkaampi varaosien valmistuksessa. Heidän mukaansa merkittävin sen käyttöä estävä tekijä ei ollut kustannukset vaan valmistuskapasiteetin saatavuus. Varaosien kustannustehokkaasta valmistamisesta AM:llä on selkeää näyttöä harrastajapuolella. Jo vuosia autoharrastajat ovat valmistaneet muovisia varaosia ja parannuksia vanhoihin ajoneuvoihin, kun valmistat ovat jo lopettaneet varaosien tarjoamisen. Joissain tapauksissa varaosa voi olla saatavilla, mutta se saattaa korkeiden kuljetus- ja varastointikustannusten takia olla niin kallis, että käyttäjälle on järkevämpää valmistaa korvaava osa AM:llä. Ajoneuvojen varaosien harrastajavetoinen valmistus antaa käytännön näyttöä AM:n kustannustehokkuudesta matalan kysynnän varaosien valmistamisessa.

Elinkaarikustannukset ovat laajin kustannusarvioinnin osa-alue. Elinkaarikustannukset ottavat huomioon neljä kustannuksia aiheuttavaa vaihetta tuotteen elinkaaren ajalta: tutkimus ja kehitys (eng. research and development), tuotantoon sijoittaminen (eng. production investment), käyttö ja tuki (eng. operations and support) sekä hävittäminen (eng. disposal) (Mislick ja

Nussbaum, 2015, s.51). Elinkaarikustannusten huomioinnin merkitys on kasvanut yhteiskunnan ottaessa huomioon enenevissä määrin liiketoiminnan päästöjä ja ympäristövaikutuksia. Elinkaarikustannukset näkyvät nykyään entistä suoremmin kustannuksissa erilaisten ympäristöverojen ja maksujen muodossa, ja lisäksi ne vaikuttavat organisaation brändin ja potentiaalisten asiakkaiden vaatimusten muodossa. Näitä kustannuksia laskettaessa pitää ottaa huomioon aiemmin mainittujen kustannusten lisäksi esimerkiksi uudelleenvalmistuksen, valmistajan takuun ja toimitusketjun kustannuksia (Kadir ym., 2020). Elinkaarikustannuksia arvioitaessa tuotteen paremman laadun tai tehokkuuden merkitys pitää ottaa entistä selkeämmin huomioon, niiden vaikuttaessa pidemmällä tarkasteluvälillä kappaleen käytön kustannuksiin.

Aiemmissa luvuissa on korostettu AM:n suhteellisen huonoa mittakaavaetua. Tällä on ilmeisiä vaikutuksia tuotantokustannuksiin, mikäli tavoitteena on valmistaa jotakin kappaletta suuria määriä. Tavallaan saman ilmiön kääntöpuolena on kuitenkin AM:n kustannusten matala riippuvuus ajasta. Perinteisesti kustannuslaskennan yhtenä kriittisenä elementtinä on projektin tai tuotteen kannattavuuden arviointi vertaamalla projektin nettonykyarvoa vaihtoehtoisiin sijoituksiin (Mislick ja Nussbaum, 2015, s.276). Tämä on looginen lähestymistapa kustannuspäätösten tekemiseen, mutta pidemmän aikavälin tuloksen ennustaminen aiheuttaa merkittävää epävarmuutta kustannusten arviointiin. Mislickin ja Nussbaumin (2015, s.43) mukaan yksi hyvän kustannusarvion merkeistä on riskien ja epävarmuuksien huomiominen. AM mahdollistaa näiden minimoimisen, ja siten helpommin laadukkaamman kustannusarvion luomisen. Esimerkiksi viiden vuoden aikana kilpailuympäristö ja taloustilanne voivat muuttua valtavasti, joten vaikka projekti olisi selkeästi kannattava tällä aikaikkunalla, on arvio luonnostaan hyvin epävarma, vaikka se olisi kuinka hyvin toteutettu. Koska AM:llä valmistettavien tuotteiden vaihtaminen voi tapahtua käytännössä reaaliajassa ilman lisäkustannuksia, ei jonkin kappaleen valmistuspäätöksen tekemiseksi tarvita pidemmän aikavälin epävarmuuden arviointia. Tulot tasaantuvat valmistusmäärän mukaisiksi nopeammin ja valmistuksessa voidaan tehdä tarvittaessa nopeita suunnanmuutoksia kohti kannattavampia projekteja.

Sama sijoitusten suhteellinen aikavälistä riippumattomuus nopeuttaa myös teknologian kehitystä. Perinteisemmillä valmistusmenetelmillä jokaisen päivityksen kohdalla pitää verrata sen saavuttamia hyötyjä muutoksista aiheutuviin lisäkustannuksiin. AM:llä parempi kappale voidaan laittaa välittömästi tuotantoon, koska pienistä muutoksista ei aiheudu juuri minkäänlaisia valmistuskustannusten muutoksia. Tämä mahdollistaa nopeamman tuotekehityssyklin, joka ruokkii teknologian kehitystä. Nämä AM:n kustannusarviointia suoraviivaistavat tekijät laskevat myös suoraan tuotannon suunnittelun ja talouspuolen kustannuksia, koska vertailevaa kustannusanalyysiä tarvitaan vähemmän. Nämä erot kustannusrakenteessa pätevät nimenomaan osakohtaisesti, mutta laitteistokuluissa AM vaatii edelleen vertailevaa

kustannustehokkuuden analyysiä. AM-laitteen käyttöasteen optimointi ja laitekustannuksen riskien pienentäminen ovat kuitenkin kappaleen valmistuksesta erillisiä ongelmia, joita voidaan ratkaista AM:n mahdollistaman tuotannon joustavuuden avulla. Mahdollisia tapoja ovat esimerkiksi vähemmän kriittisen vaihtoehtoisen sisäisen tuotannon suunnittelu tai modernien valmistuksenohjauksen verkkoalustojen mahdollistama ylimääräisen tuotantokapasiteetin hyödyntäminen ulkoiseen valmistukseen.

3.5 Lisäävän valmistuksen kustannusten erot perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna

Koska AM on verrattain uusi valmistusmuoto, sen kustannusarviointi liittyy usein vertailuun vanhaan jo käytössä olevaan valmistustapaan. Tästä syystä on mielekästä tarkastella vielä erikseen AM:n ja sillä mahdollisesti korvattavien perinteisten teknologioiden kustannusrakenteiden yleisiä eroavaisuuksia.

AM:n tuotannon kustannusrakenne eroaa merkittävästi eri teknologioiden välillä. Olemassa olevan laitteiston vähyyden ja tekniikan uutuuden takia esimerkiksi metallin AM:n aloittamiskustannukset ovat usein korkeat. Korkeat laitteistokustannukset ovatkin yksi keskeisimmistä AM:n käyttöönottoa hidastavista tekijöistä (Yi ym., 2019). Tämäkään ei välttämättä päde kaikille AM-teknologioille samalla tavalla. FDM-teknologialla muoviosia valmistettaessa laitekustannukset voivat alkaa vain sadoista euroista, kun perinteinen ruiskupuristuslaitteisto ja yksittäisen kappaleen valumuotti maksavat jopa monta kertaluokkaa enemmän.

Kerroksittainen valmistaminen antaa AM:lle sen uniikin ominaisuuden, että AM:llä kappaleeseen voidaan tehdä ”ilmaiseksi” monimutkaisuutta (Kanishka & Acherjee, 2023). Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi yksinkertainen kuutio tai samankokoinen monimutkainen rakenne ovat yhtä helppoja valmistaa. Tämä tuo mahdollisesti valmistettavaksi uudenlaisia osia, jotka eivät ole edes mahdollisia valmistaa perinteisillä valmistusmenetelmillä. Kuitenkin jo vähemmän monimutkaisilla osilla esimerkiksi valamisprosessi saattaa hankaloitua ja kustannukset nousta, kun AM-laitteisto tekee osan yhtä helposti ja liki samalla kustannuksella kappaleen muodosta riippumatta.

CNC-koneistamisen ja vastaavissa tilanteissa käytettävän AM:n kustannusrakenteilla on paljon yhteisiä ominaisuuksia. Molemmissa teknologioissa suunnittelu ja valmistusprosessi toimii digitaalisessa ympäristössä, ja molemmilla on tähän liittyviä suunnittelun etuja. Molemmilla teknologioilla laitteisto on kalliimpia lähtömateriaaleja työstettäessä kallista. CNC-koneistamisen selkeänä etuna on materiaalin ominaisuuksien pysyvyys valmistuksessa, mikä vähentää ongelmia laaduntarkkailussa. Toisaalta koneistaminen vaatii kappalekohtaisia työkaluja kuten erilaisia poranteriä ja jyrsinteriä, ja mm. tämän takia se on vähemmän automatisoitavissa ja vaatii osaavaa

koneenkäyttäjää. CNC-koneistamisella on myös enemmän geometrisiä rajoitteita ja hukkamateriaalista syntyy korkeat kustannukset. Sæterbø ja Solvang (2023) vertasivat metallin ekstruusion (Metal MEX) kustannuksia CNC-koneistetun osan kustannuksiin. MEX:llä valmistettu osa oli 13,68% edullisempi, kun MEX-prosessi oli hyvin kyseisen osan valmistukseen optimoitu. Kun osa valmistettiin yksittäiskappaleena tai se valmistettiin läpi kiinteänä käyttämättä AM-optimoituja vähempimateriaalisia rakenteita, olivat kustannukset CNC-verrokkia korkeammat. Kyseinen tutkimus osoittaa, että oikein käytettynä AM voi olla CNC-koneistukseen verrattuna kustannustehokas yksinkertaisillakin metalliosilla.

4 Lisäävän valmistuksen kustannusarviointimallit

Kustannusarviointi on prosessi, jolla pyritään ennakoimaan jonkin potentiaalisen tulevan asian kustannuksia. Valmistamisen yhteydessä kustannusarvioinnilla tarkoitetaan suunniteltavan osan tai kokoonpanon valmistamisen kustannusten arviointia. Yleisiä tilanteita, joissa arviointia tarvitaan ovat tarjouksen antaminen mahdolliselle asiakkaalle sekä kannattavuusarvion tekeminen ennen tuotteen markkinoille tuomista (Lembersky, 2016). Kustannusarviointi on tärkeää myös monissa muissa yrityksen toiminnoissa kuten vaihtoehtoisten suunnitelmien vertailussa, valittaessa ostamisen ja valmistuksen välillä ja prosessien kehittämisen työkaluna (Lembersky, 2016).

Kustannusarviointia voidaan tehdä monella toisistaan suuresti poikkeavalla menetelmällä, joita voidaan käyttää erilaisilla teknisillä ratkaisuilla. Näitä erilaisia menetelmiä voidaan lisäksi käyttää erilaisilla näkökulmilla ja tarpeilla, riippuen kuka kustannusarviota tarvitsee ja mitä sillä pyritään saavuttamaan. Kustannusarviointimalleja vertailtaessa on tärkeää ottaa huomioon näitä lähtökohtien eroja, sillä erilaisilla lähtökohdilla samakin arviointimalli voi saavuttaa hyvin erilaisen vaikuttavuuden. Esimerkiksi suuryrityksen valmistusteknologiaan liittyvästä tutkimuksesta tai rahoituksesta päätettäessä, kappaleen kolmiulotteisella asennolla tuotantolaitteen sisällä ei ole mitään käytännön merkitystä, kun taas tilatun kappaleen valmistusta suunniteltaessa, se saattaa olla yksi merkittävimmistä kustannustekijöistä.

4.1 Kustannusarvioinnin menetelmät

Kadir ym. (2020) ryhmittelevät AM:n kustannusarviointiin kehitetyt menetelmät perinteisen metodipohjaisen jaottelun mukaan. Kvalitatiiviset menetelmät, intuitiivinen- ja analoginen menetelmä, perustuvat asiantuntemukseen. Intuitiivinen menetelmä perustuu kokemuspohjaiseen arviointiin, jossa kyseisen aiheen hyvin tunteva arvioija, tekee arvion oman aiemman kokemuksensa pohjalta. Analoginen menetelmä pohjautuu myös osittain aiempaan asiantuntemukseen, mutta siinä verrataan lisäksi nykytilannetta aiempaan samankaltaiseen dataan. Kvantitatiiviset menetelmät perustuvat olemassa olevan datan pohjalta tehtävään tilastolliseen analyysiin, ja ne jaetaan parametriseen- ja analyyttiseen menetelmään. Parametrinen menetelmä perustuu statistisesti tehtävään aiemman datan jäsentelyyn. Tämän datan ominaisuuksia pyritään mallintamaan kustannustekijöihin, joiden pohjalta voidaan tehdä kustannusarviointia. Analyyttinen menetelmä perustuu reaalimaailman tilannetta kuvaaviin malleihin, joissa lopputuote on jaettu pienempiin yksiköihin, operaatioihin ja toimintoihin, jotka liittyvät tuotteen valmistuksen vaiheisiin. Taulukko 1 esittää Kadir ym. (2020) esittämiä eri kustannusarvioinnin menetelmien hyviä ja huonoja puolia.

Kustannusarvioinnin menetelmä	Vahvuudet	Heikkoudet
Intuitiivinen (kvalitatiivinen)	Nopea. Toimiva ilman vahvistettua vertailudataa. Helppo vertailu aiempiin projekteihin. Voi ottaa huomioon uusien teknologioiden hyötyjä. Joustava.	Ei selkeää rakennetta. Haastava dokumentoida. Haastava todentaa. Henkilökohtainen vääristymä. Huonosti toistettavissa.
Analoginen (kvalitatiivinen)	Vaatii vähän lähtödataa. Helposti muokattava. Melko nopea. Soveltuu vertailevaan analyysiin.	Uudenlaiselle projektille kelpaamaton. Vaikea yhtenäistää vanhaan dataan. Olemassa olevan datan virheet tulevat mukana.
Parametrinen (kvantitatiivinen)	Voi tuottaa toistettavia arvioita. Kustannustekijät selkeästi nähtävissä. Sisältää reaalidatan vaikutuksia. Kaavan päivittäminen ja algoritmin hienosäätö helppoa.	Jotkin yksityiskohdat on vaikea kvantifioida. Ylläpitäminen vaatii taustalla olevan logiikan ymmärtämistä. Algoritmit saattavat olla yksityisomisteisia.
Analyyttinen (kvantitatiivinen)	Tarkka. Helposti päivitettävissä. Yksityiskohtaiset kustannustekijät selkeästi nähtävissä. Helposti todennettavissa.	Monimutkainen. Mallin taustalla saattaa olla piileviä logiikoita. Vaatii paljon lähtödataa. Vaatii paljon laskentakapasiteettia.

Taulukko 1, Kustannusarvioinnin menetelmien hyvät ja huonot puolet (Kadir, ym., 2020)

Analyyttinen malli muodostetaan oikeiden vahvistettujen kustannusrakenteiden pohjalta, joten sillä on mahdollista saada aikaiseksi tarkin ja luotettavin kustannusarvio. Toisaalta analyyttinen malli on monimutkainen kehittää, koska sen muodostamiseksi pitää hahmottaa reaalimaailman kulurakenne (Kadir ym., 2020). Analyyttisiä malleja, kuten mitä tahansa muitakin malleja, voidaan tehdä täysin eri tarkkuudella riippuen arvioinnin näkökulmasta. Esimerkiksi Gee ym. (2022) analyyttinen malli tarkastelee valmistusprosessin mikrotason sulamisen geometriaa fysiikkaan perustuvan mallin avulla, kun taas Kokare ym. (2023) malli tarkastelee WAAM-prosessin kustannuksia suunnittelusta kuljetuskustannuksiin, mutta hyvin yksinkertaistetuilla kaavoilla. Nämä mallit sijoittuvat tarkkuudeltaan ja tarkastelun

laajuudeltaan eri puolille edellisessä luvussa esiteltyä analyyttistä mallia. Mallin tarkkuutta ja arvioinnin näkökulmaa avataan lisää seuraavassa alaluvussa. Analyyttisen mallin käyttökohteita on valtavasti. Erityisesti monissa ohjelmistopohjaisissa arviointimalleissa käytetään analyyttistä mallia, koska sellainen on verrattain helppo ymmärtää ja koodata. Koska AM linkittyy suoraan digitaalisiin valmistusympäristöihin, hyvin monissa siihen liittyvissä toiminnoissa voidaan käyttää analyyttistä mallia.

Parametrinen malli voidaan muodostaa etsimällä statistisesti merkittävimmät kustannustekijät ja tehdä niiden pohjalta regressio, joka sopii mahdollisimman hyvin vahvistettuun dataan (Kadir ym., 2020). Tällöin tarvitaan kuitenkin analyyttinen malli, mikäli datan tarkkuutta halutaan arvioida. Tällaisen regressiomallin etuna on nopea ja yksinkertainen laskenta, joka saattaa tarkkuudeltaan olla lähellä analyyttistä mallia.

Esimerkiksi edellisessä luvussa esittelemäni analyyttisen mallin perusteella lasketut kustannukset voidaan tiivistää hyvin tarkasti pohjautumaan kappaleen tilavuuteen ja valmistusaikaan, kuten Yi ym. (2023) näyttävät tekemällä analyyttiseen malliin verrattuna lähes 95% tarkan yksinkertaisen regressiomallin pienen 81 kappaleen testierän pohjalta. Vaikka tämän mallin rajoittuukin yksittäiseen laitteeseen ja materiaaliin, se osoittaa hyvin, että yksinkertainen analyyttinen malli voidaan tehokkaasti tiivistää nopeampaan parametriseen malliin, koska AM:llä on muutamia selkeitä suuria kustannustekijöitä. Parametrisestä mallista ei voida toisaalta suoraan nähdä mihin laskenta perustuu, joten sen tehokkuus täytyy vahvistaa analyyttisesti kerätyn reaalidatan pohjalta. Parametrinen malli soveltuu hyvin erilaisiin ohjelmistoihin osaksi sisältyvään kustannusarviointiin. Esimerkiksi kuluttajakäytössä olevat CAM-ohjelmistot, joita käytetään myös laajasti teollisuudessa ainakin muovista valmistettaessa, sisältävät nopeaa vertailevaa kustannusarviointia mahdollistavan sisäisen arviointimallin. Tällainen ohjelmisto on jo muilta ominaisuuksiltaan varsin raskasta laskentaa vaativa, joten kustannusarviointia ei voida tehdä liian syvällisesti.

Kvalitatiiviset menetelmät pohjautuvat asiantuntijan kokemukseen, joka mahdollistaa nopean arvioinnin ja uudenlaisien ominaisuuksien huomioinnin (Kadir ym., 2020). Kvantitatiiviset mallit vaativat olemassa olevaa verrokkidataa, joten kvalitatiivisia menetelmiä tarvitaan erityisesti uudenlaisissa projekteissa, tai käytettäessä uutta teknologiaa, jolloin vertailukelpoista dataa ei ole saatavilla. Intuitiivinen menetelmä sopii erityisesti tuotekehitykseen, koska uutta tuotetta tai prosessia kehitettäessä verrokkidataa ei ole saatavilla (Kadir ym., 2020). Tuotekehityksessä tarkka hinnanmääritys ei ole tarpeen, koska valmistetaan vain yksittäisiä kappaleita. Toisaalta taas prototyypin vaadittavat tekniset ominaisuudet ovat kriittisiä, jotta sen tutkimisella saadaan selvitettyä haluttuja asioita tehokkaasti. Tällaista laaja-alaista eri valmistusmenetelmien teknisten etujen sopivuutta joustavasti kulloiseenkin tilanteeseen olisi hyvin vaikea mallintaa kvantitatiivisesti yhtä tehokkaasti ja nopeasti kuin asiantuntijan arviolla voidaan tehdä.

Analoginen malli sopii tilanteeseen, jossa käytössä on lähtödataa aiemmasta vertailukelpoisesta projektista (Kadir ym., 2020). Analogista menetelmää voidaan käyttää, vaikka datan määrä on rajallinen, eikä se ole suoraan vertailukelpoista. Asiantuntija voi löytää erot ja yhteydet vertailtavaan tapaukseen, joka vaatii joustavuutta, jota kvantitatiiviset menetelmät eivät voi tarjota. Kvalitatiivisilla menetelmillä on haastavaa kerätä lisää luotettavaa dataa, jolla voitaisiin tulevaisuudessa kehittää kustannusarviointia (Kadir ym., 2020). Niitä käytettäessä saatava kokemus voidaan käytännössä käyttää hyväksi vain käyttäjän asiantuntijuuden kehittymisessä. Analoginen malli sopii erinomaisesti pientuotantoa tekevien yritysten tuotannon suunnitteluun. Monissa pienissä yrityksissä on taustalla joku hyvin alaa tunteva asiantuntija, joka tekee tuotantoa johonkin erityistarpeeseen. Tällaisessa tilanteessa tuotevalikoima laajenee usein johonkin olemassa olevaa tuotantoa lähellä olevaan suuntaan, jolloin analoginen malli sopii hyvin uusien tuotteiden kehittämispäätöksen tekemiseen.

Lähtökohtaisesti kvalitatiiviset mallit ovat monelta osin epätarkempia kuin kvantitatiiviset mallit. Niiltä puuttuu usein monia Mislickin ja Nussbaumin (2015, s.43) listaamista hyvän kustannusarvioinnin määritelmistä, kuten hyvä toistettavuus ja mahdollisuus menetelmien tarkistamiseen. Niiden käyttö on järkevää, kun parempi arviointi ei ole teknisesti mahdollista tai se on liian hidasta.

4.2 Erilaiset näkökulmat kustannusarviointiin

Kustannusarviointia voidaan tehdä kapea-alaisemmin keskittyen esimerkiksi vain suoriin laite- ja materiaalikustannuksiin tai kokonaisvaltaisemmin tarkkaillen tuotteen koko käytön kustannuksia sisältäen esimerkiksi suunnittelun, esi- ja jälkikäsittelyn ja elinkaarikustannukset. Tilanteesta riippuen täytyy harkita miten laaja-alainen arviointi kannattaa. Yksi hyvän kustannusarvion merkeistä on se, että se on luotu jotain tarvetta varten (Mislick ja Nussbaum, 2015, s.43). Monimutkaisempi eri toimintoja sisältävä arvio vie enemmän aikaa ja resursseja, mutta on tarpeen ennen suuria päätöksiä. Tällaisen arvion tekeminen vaatii myös valtavasti dataa, jota ei välttämättä ole helposti saatavilla. Usein taas pienemmissä päätöksissä on kriittistä, että kustannusarvio saadaan nopeasti, jolloin laajempaa tarkkailua ei tarvita, vaan tehdään kapeampialainen kustannusarviointi. Kadir ym. (2020) tekemä AM:n kustannusarviointimallien luokittelututkimus tarkastelee alalla kehitettyjen mallien historiaa ja luokittelee olemassa olevat mallit erillisiin kategorioihin yleisimmin käytettyjen näkökulmien ja metodien mukaan. Käytän tätä jaottelua näkökulmien esittelyyn, koska se ottaa huomioon alan kokonaisuuden ja minkälaisia malleja ollaan käytännössä kehitetty, eikä pohjaudu vain teoreettisiin lähtökohtiin.

Kadir ym. (2020) jakaa itse valmistusprosessia tarkastelevat kustannusarviointimallit kahteen kategoriaan, suunnittelun ja valmistamisen

näkökulmasta asiaa tarkasteleviin malleihin. AM:n ollessa CAD/CAM ympäristöön sidottu teknologia, nämä näkökulmat on helpointa ymmärtää CAD ja CAM ohjelmistojen kautta. Perinteisesti AM-prosessissa on tarvittu kahta kriittistä ohjelmistoa: CAD-ohjelmistoa, jonka avulla suunnitellaan ja mallinnetaan valmistettavat kappaleet, sekä AM:n tapauksessa kerrostusohjelmaksi (eng. slicer) kutsuttua CAM-ohjelmistoa. CAM-ohjelmisto ottaa CAD-mallin ja laskee sen pohjalta valmistukseen vaadittavat liikeradat optimoiden ne käytettävää AM-teknologiaa, materiaalia ja valmistuslaitetta varten. Suunnittelun näkökulmasta tehtävä kustannusarviointi tarkoittaa siis sitä, että CAD-ohjelmistoa käyttävä taho käyttää arviointimallia kappaleen muotoa suunnitellessaan, ja pyrkii sen avulla luomaan mahdollisimman kustannustehokkaasti valmistettavan ratkaisun. Valmistuksen näkökulmasta toimivaa mallia taas hyödynnetään CAM-ohjelmistoa käytettäessä, ja pyritään näin löytämään valmistusprosessille mahdollisimman kustannustehokkaat asetukset ja kappaleiden asettelu. Esimerkiksi yleisesti kotikäytössä olevat avoimen lähdekoodin kerrostusohjelmat antavat valmistuserälle suoraan kustannusarvion, jolloin käyttäjä voi helposti vertailla asettelun ja asetusten vaikutusta kustannuksiin. Vaikka tässä valmistusprosessin kustannusarviointimallit on esitetty näiden kahden ohjelmistotyypin kautta, saattavat ne olla toteutettu teknisesti myös näiden ohjelmistojen ulkopuolella esimerkiksi erillisellä ohjelmistoratkaisulla.

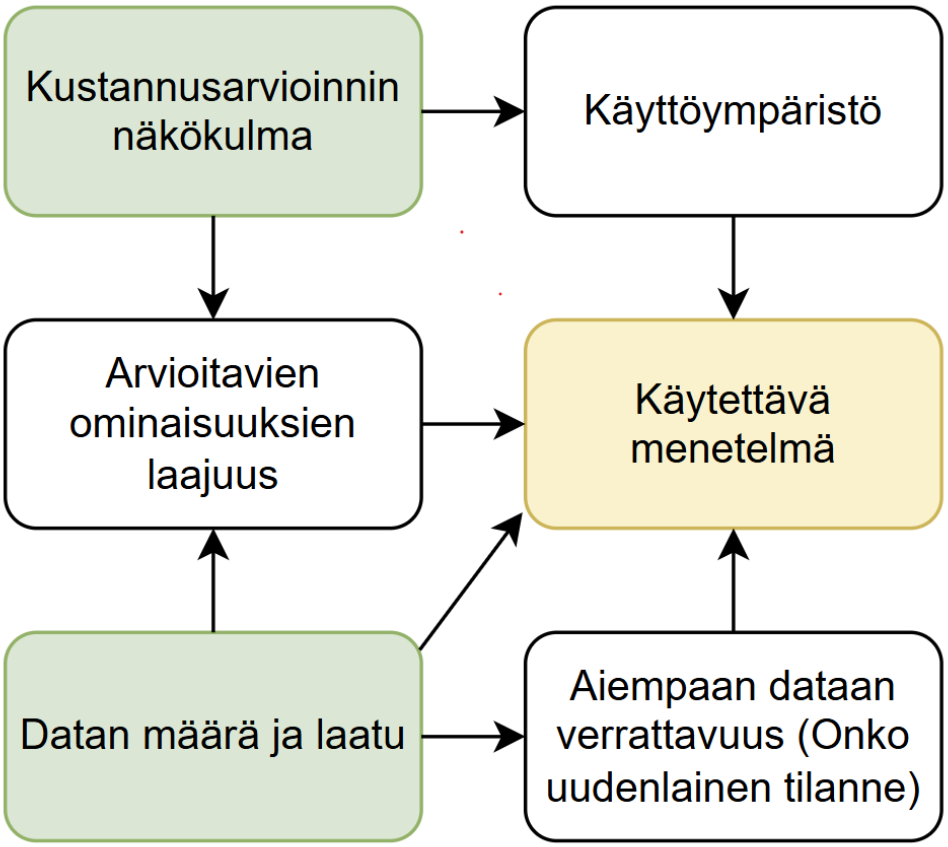
Toinen Kadir ym. (2020) löytämä kustannusarvioinnin yleinen näkökulma on taloustieteellinen näkökulma. Tästä näkökulmasta kustannusarviointia tehdään esimerkiksi, kun pyritään löytämään parhaan tuoton antava vaihtoehto useammasta mahdollisesta liiketoimintamallista. Yksi ilmeinen käyttötarkoitus on valmistusteknologian valinta. Tämä valintaprosessi on osana myös kappaleen suunnittelussa, mutta suunnittelijan käytössä olevat vaihtoehdot määräytyvät sen mukaan, mitkä teknologioita on taloudellisesti arvioitu mahdollisiksi. Toinen valmistusteknologian valintaan limittyvä taloustieteen näkökulmasta tehtävä valinta on sisäisen tuotannon ja sen ulkoistamisen välillä. Qian ym. (2019) esittelemä CM:n kustannusarviointimalli on esimerkki modernista mallista, joka mahdollistaa kenelle tahansa nopean ulkoisen valmistuksen kustannusarvion saamisen. Tällaisella logiikalla toimiva reaaliaikainen CM-palvelu mahdollistaa myös erilaisten materiaali- ja laatuvaatimusten kustannusvertailun ulkoistetun valmistuksen kontekstissa.

Kolmas Kadir ym. (2020) löytämä yleinen kustannusarvioinnin näkökulma on liikejohdon näkökulma. Siitä tarkasteltuna AM:n kustannusarviointi saattaa sisältää kaikista laaja-alaisimmin kustannuksia. Kadir ym. (2020) jakaa liikejohdon näkökulmasta tarkasteltavat mallit kahteen alakategoriaan niiden laaja-alaisuuden mukaan. Prosessitason mallit keskittyvät valmistuksen osaprosesseihin, kuten suoriin tuotantokustannuksiin, suunnittelukustannuksiin ja niihin liittyviin hallintokustannuksiin.

Systeemitason mallit taas ottavat huomioon vielä laajempia liiketoiminnan näkökulmia, kuten toimitusketjuja ja elinkaarikustannuksia.

Erilaisia kustannusarviointimalleja tarvitaan, koska mitä laajempi ja tarkempi malli yritetään tehdä, sitä kalliimmaksi ja vaikeammin ymmärrettäväksi se kasvaa. Keskeisimmät arviointimenetelmän valintaan vaikuttavat lähtökohdat ovat, mistä näkökulmasta sitä tehdään ja millaista dataa on saatavilla. Kuva 1 esittää näistä lähtökohdista tehtävän teoreettisen päätöksenteon prosessin, mikä ohjaa arviointimenetelmän valintaa.

Järkevän mallin etsiminen on mielekästä, koska mikäli mallin kehittäminen ja käyttäminen aiheuttaa enemmän kustannuksia, kuin arvioitavien vaihtoehtojen kustannusten erotus, kokonaiskustannukset ovat korkeammat kuin satunnaisen valinnan tekemällä. Mikäli malli taas on niin monimutkainen, että sitä käyttävä taho ei ymmärrä miten se toimii, on sen kehittäminen sekä sen luotettavuuden ja tarkkuuden arviointi hyvin vaikeaa. Toisaalta taas liian yksinkertainen malli ei anna päätöksenteon kannalta hyödyllistä lisäarvoa. Käytännössä, mitä laajempialainen malli on, sitä vähemmän se keskittyy yksityiskohtiin, jotta sen hahmotettavuus pysyy järkevällä tasolla. Monilla eri näkökulmilla tehdyillä malleilla, voidaan saada kulloiseenkin käyttötarkoitukseen hyvin sopiva malli, jonka käyttäjä ymmärtää ja jolla saadaan arvioitavaan tilanteeseen tarpeeksi hyvä kustannusarvio.



Kuva 1, Kustannusarvioinnin menetelmän valintaan vaikuttavat tekijät

4.3 Kustannusarvioinnin teknisiä ratkaisuja

Aiemmat alaluvut on kirjoitettu siitä näkökulmasta, että ihminen käyttää kustannusarviointimallia päätöksentekoon. Tämä ei kuitenkaan ole ainoa kustannusarviointimallien käyttötapa, vaan varmasti enenevissä määrin niitä tarvitaan ohjelmistokokonaisuuksien osana, jolloin ne voivat pyöriä täysin automaattisesti. Tavallaan automaattisesti toimivalla kustannusten optimoinnilla voidaan vähentää kustannusarvioinnin tarvetta, mutta se on hyvin läheinen konsepti kustannusarvioinnille. Esimerkkinä tästä on kappaleen topologinen optimointi, jolla kappaleen materiaalin määrä voidaan optimoida mahdollisimman pieneksi. Jos verrataan tilannetta ihmisen tekemään suunnittelutyöhön, on siinä tarve vastaavalle kustannusarvioinnille, jotta ihminen voi etsiä kustannustehokkaasti valmistettavan muodon kappaleelle. Kustannusarviointi siis tavallaan sulautuu suunnitteluprosessiin pidemmälle viedyn suunnittelun automaation ansiosta. Kustannusarvioinnin ohjelmistoratkaisuissa voidaan myös lähestyä aihetta toisesta suunnasta ja etsiä potentiaalisia kustannussäästöjen kohteita jostakin aineistosta (Lembersky, 2016, s.

80). Esimerkiksi voidaan etsiä CAD-mallien kirjastosta algoritmisesti ne mallit, joiden valmistusta voitaisiin jollain tavalla helpoiten tehostaa.

Kustannusarvioinnin tekniset toteutukset voidaan sijoittaa janalle, jossa toinen ääripää on kokonaan ihmisen aivojen sisällä tapahtuva arviointi ja toinen pää on täysin automaattinen ohjelmistopohjainen kustannusten arviointi. Esimerkki asiantuntija-arviota teknisemmästä ratkaisusta on vakioitu prosessi, jossa asiantuntija pyrkii vastaamaan tai etsimään ratkaisun ennalta määriteltyihin kysymyksiin. Muita mahdollisia teknisiä ratkaisuja voi olla erilaiset ohjelmistopohjaiset mallit ja pohjat, erillinen ohjelma erityisesti kustannusarviointia varten, kustannusarviointia varten kehitetty lisäosa muuhun käytettyyn ohjelmaan, kuten CAD/CAM-ohjelmaan, tai moderneimmissa tapauksissa CM-palvelun yhtenä kriittisimmistä osista. Näissä ratkaisuissa päästään aina vain parempaan kustannusarvioinnin integraatioon osaksi kunkin vaiheen päätöksentekoa. Ohjelmistoratkaisut tekevät kustannusarvioinnista tehokkaampaa ja vähentävät inhimillisten virheiden riskiä (Lembersky, 2016, s.78-80). Yksi tärkeä tekijä kustannusarvioinnin tehokkuuden kannalta on se, että tieto saadaan tehokkaasti oikeaan aikaan päätöksentekijälle. Mahdollisimman hyvin integroitu ratkaisu tekee kustannusarvioinnista prosesseihin sulautetun prosessin osan.

Kun kustannusarvioinnin tarkkuutta pyritään parantamaan, aiheuttaa se usein vaatimuksia suuremmalle määrälle parempaa lähtödataa, jolloin prosessin osia automatisoiva ohjelmistopohjainen ratkaisu on tulevaisuudessa enenevissä määrin tarpeen. Yksi keskeinen teknisesti kehittyneemmän ratkaisun toimivuutta määräävä tekijä on myös saatavissa olevan datan määrä ja laatu. Datan keruu onkin usein kustannusarvioinnin kallein ja vaikein osa (Mislick ja Nussbaum, 2015, s.95). Täten se määrittää pitkälti minkälaisia teknisiä ratkaisuja voidaan käyttää. AM:n kanssa hyvin yhteensopiva CM, on täydellinen esimerkki tästä kehityksestä. CM-palvelun keskeinen ominaisuus on kappaleen tilaajalle annettava nopea ja sitova hinta-arvio, joten laadukas kustannusarviointi on yksi tämän kasvavan alan mahdollistajista. Arvioinnista saadaan luotettavaa, koska CM-palveluun tilausten keskittäminen mahdollistaa valtavan datamäärän keräämisen toteutetuista tilauksista. Qian ym. (2019) esittelemä CM:n kustannusarviointimalli tiivistää monimutkaisen pilvipalvelun ominaisuudet asiakkaan kannalta tärkeimpiin tekijöihin, jotta asiakkaan on helppo vertailla käytössä olevien teknologioiden ja asetusten vaikutuksia kustannuksiin. Tässä mallissa asiakkaalle esitetyt muuttujat ovat tilauksen täyttämiseen kestävä aika, kokonaiskustannus sekä erilaiset laatuvaatimukset. Tilaaja voi tällöin vertailla tarvittavan laadun ja toimituksen nopeuden mukaista kustannusta, jonka CM-palveluntarjoaja laskee reaaliajassa.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän työn tavoitteena oli antaa lukijalle yleiskäsitys lisäävistä valmistusmenetelmistä, niiden kustannusrakenteesta sekä niitä varten tehtävästä kustannusarvioinnista. Aihetta lähestyttiin kolmen tutkimuskysymyksen avulla. Tutkimuskysymyksinä olivat ”Mitä lisäävän valmistuksen eritysominaisuuksia täytyy huomioida sen vertailussa perinteisiin valmistusteknologioihin?”, ”Mitä erityisominaisuuksia lisäävällä valmistuksella on kustannusrakenteen suhteen?” ja ”Miten tehdään lisäävän valmistuksen kustannusarviointia?”.

Vaikka esittelenkin tässä luvussa havaintojani AM:n ominaisuuksista ja eroista perinteisiin valmistusmenetelmiin, on kaikessa pohdinnassa tärkeää pitää mielessä AM-teknologioiden väliset suuret erot. Suurin osa huomioista koskee laajaa määrää eri AM-teknologioita, mutta ei välttämättä kaikkia.

5.1 Yhteenveto

Merkittävimpiä löydettyjä AM:n perinteisistä valmistusmenetelmistä erottavia teknisiä erityisominaisuuksia olivat AM-prosessin vaikutus kappaleen materiaalin ominaisuuksiin ja AM-kappaleen suunnittelun geometrinen vapaus. Prosessin aikainen materiaalin ominaisuuksien muodostuminen on yksi haastavimmista tekijöistä AM:n laaduntarkkailun kannalta. Se avaa uusia teknisiä mahdollisuuksia, mutta nämä potentiaaliset hyödyt ovat niin uusi konsepti, ettei niille ole vielä juurikaan käyttökohteita. Geometrian vapaus antaa valmistuksen suunnittelussa vapauksia, sekä mahdollisuuden ottaa valmistusteknologian ominaisuudet huomioon tilanteen vaatimalla tavalla. Ne voidaan joko sivuuttaa täysin ja valmistaa käyttöön optimoitu kappale, tai huomioida suunnittelussa ja parantaa tehokkuutta.

Perinteisten valmistusmenetelmien ja AM:n merkittävimpiä löydettyjä eroja kustannusrakenteen osalta olivat AM:n kustannusten suhteellinen riippumattomuus valmistuserän koosta ja AM:n kustannusten riippuvuus asettelusta ja valmistuserän optimoinnista. Valmistuserän optimoinnin vaikutus kustannuksiin on yksi tärkeimmistä asioista huomioida AM:n kustannusarviointia tehtäessä. Koko kustannusarvio on käytännössä arvoton, mikäli tätä ei oteta hyvin huomioon. Vaikka kustannusarvioinnin malleissa oli enimmäistä kertaa mukana usean eri kappaleen samanaikainen valmistus jo 2005 (Kadir ym., 2020), tässäkin tutkielmassa esitetyissä muutaman vuoden takaisissa tutkimuksissa käytettiin paljon yksinkertaisempaa menetelmää valmistustilavuuden täyttämiseen. Ei siis ole edelleenkään vakiokäytäntö huomioida asiaa kustannusarvioinnissa. Kun on saatu tehtyä hyvin optimoitu kustannusarvio, AM tarjoaa lähes vakio kappalehinnan, kun jonkin hyvin skaalautuvan perinteisen valmistusteknologian kustannusarvio riippuu vielä täysin valmistuksen mittakaavasta. Tämä ominaisuus poistaa suurilta osin

skaalautuvuuden, mutta vähentää markkinan arvioimisen epävarmuutta ja spekulaatiota valmistuksen päätöksenteosta.

AM:n ja perinteisten valmistusmenetelmien eroja voisi tiivistää siten, että AM:llä on mahdollista nopeuttaa melkein kaikkia kappaleen suunnittelun, kehityksen ja valmistuksen suunnittelun prosesseja, sekä saavuttaa usein teknisesti parempi lopputulos. Perinteisillä valmistusmenetelmillä on usein merkittävä mittakaavaetu valmistuskustannuksissa. Tällä hetkellä perinteisillä valmistusmenetelmillä on myös niiden perinteisestä asemasta aiheutuva etu, koska suunnittelijat osaavat hyödyntää sen parhaita puolia erittäin tehokkaasti, kun AM:n tuntemus on varsin kapeaa. AM-teknologian verrattain huono tuntemus laskee potentiaalisten käyttäjien mahdollisuuksia arvioida järkevästi sen kustannuksia verrattuna perinteiseen valmistukseen, mikä aiheuttaa epävarmuutta, joka vähentää AM:n käyttöönottoa.

AM:n kustannusarviointi ja sen vertaileva kustannusarviointi perinteisiin valmistusmenetelmiin on vielä varsin epäkypsä ja hajautunut ala. AM:n tehokkaampi hyödyksi käyttäminen vaatisi tulevaisuudessa yhtenäisempiä käytäntöjä kustannusarviointiin sekä AM:n sisällä, että vertailussa muiden teknologioiden kanssa ja AM-teknologioiden välillä. Haasteena on mm. nopeasti kehittyvä teknologia sekä uusien mallien kattamien ominaisuuksien laajentuminen, mistä johtuen niiden vertailu vanhempien mallien kanssa on haastavaa. Tulevaisuudessa AM:n kustannusarvioinnin tutkimuksessa olisikin mielestäni tärkeää pyrkiä keksimään tapoja standardisoida ja yhtenäistää alaa, jotta voidaan muodostaa kokonaisvaltaisempi kuva aiheesta yksittäisten parempien mallien lisäksi.

5.2 Suositukset

AM-teknologian kustannusarviointia tekevälle on kriittistä etsiä tilanteeseen hyvin sopiva AM-teknologia ja optimoida valmistus mahdollisimman pitkälle ennen valmistusmenetelmän valintaa. Tätä voi helpottaa teknisesti AM:n ominaisen valmistustilavuuden ja valmistuksen monipuolisuuden huomioivan kustannusarvioinnin mallin käyttäminen. Mikäli kustannusarviossa naiivisti verrataan yhden kappaleen valmistuksen kustannuksia AM:llä ja perinteisellä valmistusmenetelmällä, se on suunnilleen yhtä hyödyllistä kuin arvioida ruiskupuristuksen kustannuksia laskemalla, että yhdellä muotilla valmistetaan yksi kappale. Toki mittakaavaero todellisuuden ja arvion välillä on eri luokkaa, mutta vaikkapa 4 kertainen virhe AM:n kustannuksissa, muuttaisi arvioon perustuvaa päätöstä monessa tilanteessa samalla tavalla kuin 100 000 kertainen virhe muuttaisi ruiskupuristuksen kustannuksissa. Sopivan AM-teknologian valinta muuttaa tietysti myös laskentaa täysin. Kuten monessa kohdassa huomattiin, eri AM-teknologioiden kustannusrakenteet poikkeavat monesti paljon toisistaan, joten järkevän kokonaisarvion tekeminen edellyttää jo arvioinnin alkuvaiheessa hyvää ymmärrystä eri teknologioiden mahdollisuuksista.

Edellisen kappaleen suorien kustannusten lisäksi suuri kokonaiskustannusten virhe saattaa syntyä, mikäli systeemitason kustannuksia ei huomioida kustannusarviota tehdessä. Suunnittelun kustannukset ja jopa hyvin kaukana itse valmistusprosessista olevat organisaatiotason kustannukset saattavat muuttua merkittävästikin riippuen valitusta valmistusmenetelmästä. Kaikki mainitut seikat huomioiden voidaan todeta, että AM:n kustannusarviointi on hyvin monimutkainen ja alalla vielä melko huonosti tunnettu kokonaisuus. Vaikuttaa siltä, että AM:n kasvua jarruttaa kierre, jossa teknologian huono ymmärrys vaikeuttaa laadukkaan kustannusarvioinnin tekemistä, joka taas hidastaa teknologian käyttöönottoa. Tästä johtuen ilmeisin suositukseni valmistuspäätöksiä tekevälle, on yrittää kouluttautua ymmärtämään AM:n mahdollisuuksia ja ottaa AM mukaan valmistukseen jossain muodossa, jotta tulevaisuudessa kykenee vertaamaan kattavammin eri valmistusteknologioiden kustannuksia.

5.3 Huomioita tämän tutkielman puutteista

Kokonaisuudessaan tämän kandidaatintutkielman aiheen valinta oli liian laaja, jotta aihetta voisi käsitellä kokonaisvaltaisesti alan tutkimusta huomioiden. Aiheeseen liittyvää tutkimusta on viime vuosilta niin paljon, että työtä varten ei ollut mahdollista tutustua edes pinnallisesti kovin isoon osaan siitä. Aihe olisi varmaankin kannattanut rajata koskemaan esimerkiksi tiettyä valmistusteknologiaa, jotta siihen olisi voinut syventyä tarkemmin. Työn tarkoitus oli olla kattava kokonaiskuvaus aiheesta, mutta aiheen laajuus jättää vielä aika paljon kysymysmerkkejä siitä, kuvaako työ hyvin alan kokonaistilannetta. Tutkimusmenetelmän ja tiedonhaun kohdalla olisi pitänyt tajuta aiheen laajuus ja tehdä siinä vaiheessa sen rajausta.

Kokonaisuudessaan persoonallisuuteni sopii huonosti yhteen akateemisen tarkasti säännellyn ja järjestelmällisen tutkimusprosessin kanssa, mikä näkyy varmasti lopputuloksen täsmällisyydessä. Tämä työ sisältää varsin paljon omakohtaisen kokemuksen pohjalta tehtyjä huomioita, joiden tarkistaminen tekisi työstä paremmin akateemiseen viitekehykseen sopivan. Toisaalta alan yleisesti hyväksyttyjen akateemisten faktojen löytäminen olisi monessa tilanteessa mahdotonta, koska teknologia kehittyy niin nopeasti. Esimerkiksi vain muutamia vuosia vanhassa alan kirjallisuudessa on määritelmiä, jotka eivät välttämättä pidä enää paikkansa uusimpien teknologioiden kohdalla. Tämän takia omat huomiot saattavat auttaa antamaan paremman kuvauksen teknologia nykytilasta, vaikka ne eivät ole käyneet läpi kriittistä tieteellistä analyysiä.

Erityisesti AM:n kustannusrakennetta ja kustannusarviointimalleja käsittelevät luvut sisältävät paljon oman pohdinnan tuloksia, ja kaipaisivat lisää konkreettisia lähteitä. Yksi syy tähän on aiheesta tehdyn tutkimuksen teknologiariippuvuudesta johtuva hajautuneisuus. Yritin tässä työssä luoda yhteisen kokonaisuuden koko AM:n alalle, joten tiiviin lopputuloksen saaminen

vaati paljon hajanaisen tiedon yhdistelyä. Kustannusarviointia yleisesti ja valmistuksen näkökulmasta käsitteleviä lähteitä löytyy tietysti paljon, mutta niiden luotettavuus AM:n kustannusarviointia tehtäessä herättää kysymyksiä suurien kustannusrakenteiden erojen vuoksi.

Olen pyrkinyt käyttämään työssä SFS-standardi 52900:2021 mukaista alan teknistä termistöä, mutta mukaan on varmasti jäänyt myös arkikielisempiä ja vanhentuneita termejä. Tämä ei välttämättä vähennä työn ymmärrettävyyttä, mutta mikäli lukija jatkossa on tekemisissä AM:n kanssa on tärkeää pyrkiä käyttämään oikeita termejä epäselvyyksien välttämiseksi.

Lähteet

Dareh Baghi, A., Nafisi, S., Hashemi, R., Ebendorff-Heidepriem, H., Ghomashchi, R., & Ghomashchi, R. (2021). Experimental realisation of build orientation effects on the mechanical properties of truly as-built Ti-6Al-4V SLM parts. *Journal of Manufacturing Processes, 64*, 140–152. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.027

Barclift, M., Armstrong, A., Simpson, T. W., & Joshi, S. B. (2017, August 6–9). CAD-integrated cost estimation and build orientation optimization to support design for metal additive manufacturing. *In Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 2A: 43rd Design Automation Conference*, Paper No. V02AT03A035). ASME. https://doi.org/10.1115/DETC2017-68376

Bird, J. [Joshua Bird]. (2024). I Built a 4 Axis 3D Printer Unlike Anything You've Seen [Video]. YouTube. Viitattu 15.11.2025. https://www.youtube.com/watch?v=VEgwnhLHy3g

Ekren, B. Y., Perotti, S., & Finelli, M. (2025). Leveraging additive manufacturing for inventory optimization: A dual-sourcing model for cost and performance enhancement in retail supply chains. *IFAC-PapersOnLine, 59*(10), 268–273. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.047

Gebhardt, A., Kessler, J., & Thurn, L. (2019). *3D printing: Understanding additive manufacturing (2nd ed.)*. Hanser.

Gee, K., Kim, S. I., Quinlan, H., & Hart, A. J. (2023). A physics-based modeling framework to assess the cost scaling of additive manufacturing, with application to laser powder bed fusion. *Rapid Prototyping Journal, 29*(5), 980–1003. https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2022-0065

Hetitec Oy. (n.d.). Casting process. Viitattu 12.12.2025. https://hetitec.com/casting-process/

Kadir, A. Z. A., Yusof, Y., & Wahab, M. S. (2020). Additive manufacturing cost estimation models—A classification review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107*(9–10), 4033–4053. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05262-5

Kumar, K., & Acherjee, B. (2023). Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials,

developments, and challenges. *Journal of Manufacturing Processes, 107*, 574–619. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.024

Kokare, S., Oliveira, J. P., & Godina, R. (2023). Modelling of wire arc additive manufactured product cost. *Procedia Computer Science, 217*, 1513–1521. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.351

Lembersky, M. (2016). *Realistic cost estimating for manufacturing (3rd ed.)*. Society of Manufacturing Engineers.

ManufacturingTomorrow. (2022, November 3). Additive manufacturing industry growth prospects, trends and forecast up to 2030. https://www.manufacturingtomorrow.com/news/2022/11/03/additive-manufacturing-industry-growth-prospects-trends-and-forecast-up-to-2030/19614/

Mislick, G. K., & Nussbaum, D. A. (2015*). Cost estimation: Methods and tools*. Wiley.

Qian, C., Zhang, Y., Liu, Y., & Wang, Z. (2019). A cloud service platform integrating additive and subtractive manufacturing with high resource efficiency. *Journal of Cleaner Production, 241*, 118379. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118379

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2021). Lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Perusteet ja sanasto (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021).

Yi, L., Gläßner, C., & Aurich, J. C. (2019). How to integrate additive manufacturing technologies into manufacturing systems successfully: A perspective from the commercial vehicle industry. *Journal of Manufacturing Systems, 53*, 195–211. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.09.007

Yi, L., Werrel, M., Ehmsen, S., Glatt, M., & Aurich, J. C. (2023). A specific manufacturing cost model for fast cost estimation in additive manufacturing. *Procedia CIRP, 120*, 21–26. https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.005