

Sebastian Helala

# 3D-TULOSTUS OSANA TUOTANTOA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
09.04.2019

# TIIVISTELMÄ

Sebastian Helala: 3D-tulostus osana tuotantoa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Automaatiotekniikka  
Huhtikuu 2020

---

Tutkielman tavoitteena oli selvittää metallin 3D-tulostamisen ja tuotannon yhdistämistä. Tutkielma tuo esille AM-tekniologian eri metallin tulostusmenetelmiä, keskittyen PBF- ja DED-menetelmiin. Tutkielma perehtyy myös yleisimpiin 3D-tulostuksessa syntyviin kustannuksiin sekä niiden muodostumisen syihin. Tulostusmenetelmien sekä kustannuksien pohjalta tutkitaan 3D-tulostamisen käyttöä osana tuotantoa. Tutkielman lopuksi selvitetään AM-tekniologian tulevaisuuden mahdollisuuksia sekä näiden vaikutuksia tekniologian yleistymiseen.

Tutkielmassa havaittiin PBF- ja DED-tulostusmenetelmien välillä olevan eroja tulostustarkkuuksissa sekä tulostusnopeuksissa. Erot vaikuttavat tulostusmenetelmien sovelluskohteisiin. PBF-tulostusmenetelmä sopii tarkkuutta vaativiin kooltaan pieniin tulosteisiin. DED-menetelmän sopii suurien komponenttien tulostamiseen tai korjaamiseen.

AM-tekniologian kustannukset muodostuvat suurilta osin välillisistä kustannuksista, riskistä sekä työvoimakustannuksista. Välillisistä kustannuksista suurin osa muodostuu 3D-tulostimen alkuiinvestointikustannuksista. Riskistä syntyvät kustannukset muodostuvat tulostusvirheistä. 3D-tulostamisessa tulostuskerros epäonnistuu tietyllä todennäköisyydellä. AM-prosessissa virhe on otettava huomioon, sillä vaikutus kustannuksiin on huomattava. 3D-tulostukselle ominainen heikkous on jälkityöstön vaatimus. Tulostetut kappaleet vaativat usein jälkityöstöä, sillä tulostetun komponentin pinnanlaatu ei usein ole riittävä. Jälkityöstö tehdään usein manuaalisesti tai koneellisesti, joka kasvattaa työvoimakustannuksia. Pienempi osa kustannuksista muodostuu välittömistä kustannuksista, joihin lukeutuvat muun muassa materiaalikustannukset.

3D-tulostusta on käytetty usein prototyyppien valmistamiseen. Tutkielmassa havaittiin 3D-tulostuksen sopivan erityisesti suurilla variaatioilla vaativaan tuotantoon sekä erityisesti pieniin ja keski-suuriin erätuotantoihin. Suurissa eräkoissa ruiskuvalumenetelmä on AM-prosessia kustannustehokkaampi. Heikompi kannattavuus suurissa eräkoissa johtuu 3D-tulostimen rajallisesta tulostuspinta-alasta, joka rajoittaa samalla kertaa tulostettavien kappaleiden määrää. Täten mittakaava-etua ei pystytä hyödyntämään yhtä hyvin kuin perinteisessä massatuotannossa.

AM-tekniologia mahdollistaa suunnittelussa erityisiä vapauksia, jotka mahdollistavat kompleksimpien komponenttien valmistamisen. Yksinkertaiset suunnitteluvaatimukset mahdollistavat suunnittelijoiden nopeamman koulutuksen. Mahdolliset suunnitteluvirheet vähentyvät, sillä 3D-tulostamisessa ei tarvitse ottaa huomioon koneistamisen erityisvaatimuksia.

Mahdolliset tulevaisuuden kehitys saattaa kasvattaa AM-tekniologian kilpailukykyä suuremmissa eräkoissa. Tekniologian kypsyminen sekä patenttien raukeaminen johtaa 3D-tulostimien hintojen laskuun, jolla on suora vaikutus tulostettujen komponenttien hintaan. Tekniologian yleistyminen kiihdyttää erilaisten tulostusmateriaalien kehitystä sekä valmistusta, jolla on suora vaikutus materiaalin hintoihin sekä laatuun.

Avainsanat: jauhepetisulatus, kohdennettu sulatus, AM-tekniologia, AM-tekniologian kustannukset, PBF, DED, 3D-tulostus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Eriyiskiitokset kandityön ohjaajalle Veli-Pekka Pyrhöselle, jonka kanssa kommunikaatio niin kandidaatintyöstä kuin käytännön järjestelyistä onnistui erinomaisesti. Haluan esittää kiitokset myös Suvi Pelliselle, joka auttoi muun muassa kieliasun tarkistamisessa. Suuri kiitos kuuluu myös Tampereen Hervannan kampuksen kirjastolle, sekä heidän verkkomateriaaleilleen. Ilman lukuisia lisenssejä eri kirjallisuusmateriaaleihin olisi kandidaatintyön materiaalin löytäminen ollut vaikeaa.

Tampereella, 09.04.2020

Sebastian Helala

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. ADDITIVE MANUFACTURING .....	2
2.1 Tarkkuus .....	2
2.2 Murtumat .....	3
2.3 Jälkikäsittely .....	3
3. TULOSTUSMENETELMÄT .....	4
3.1 Jauhepetisulatus .....	4
3.1.1 Edut .....	5
3.1.2 Haasteet .....	6
3.1.3 Sovelluskohteet .....	7
3.2 Kohdennettu sulatus .....	7
3.2.1 Edut .....	8
3.2.2 Haasteet .....	9
3.2.3 Sovelluskohteet .....	9
4. KUSTANNUKSET .....	11
4.1 Välilliset ja välittömät kustannukset .....	12
4.2 Tulostusvirhe .....	13
4.3 Työvoimakustannukset .....	14
4.4 Tehokkuus .....	15
4.5 Asiakasarvon luonti .....	17
5. TULOSTAMINEN OSANA TUOTANTOA .....	19
5.1 Prototyypit sekä ajallinen hyöty .....	19
5.2 Sovelluskohteet .....	19
5.3 Variaatio .....	20
5.3.1 Eräkoon vaikutus .....	20
5.3.2 Rajoitteet .....	21
5.4 Suunnittelun vapaudet .....	22
5.4.1 Materiaalitehokkuus .....	22
5.4.2 Koulutus .....	23
6. TULEVAISUUDENNÄKYMÄT .....	24
6.1 Alkuinvestoinnit .....	25
6.2 Materiaalit .....	25
6.3 Teknologinen kehitys .....	26
7. YHTEENVETO .....	28
LÄHTEET .....	29

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM	Additive Manufacturing, 3D-tulostimia hyödyntävä tuotantomenetelmä.
BMW	Bayerische Motoren Werke. Saksalainen autojen ja moottoripyörien valmistaja.
CNC	Computer Numerical Control, työstömenetelmä, jota ohjataan tietokoneen avulla. Työstökone voi olla jyrsin, pora tai sorvi.
CoCrMo	Koboltti-kromi-molybdeeni-metalliseos, joka on sopiva esimerkiksi lääketieteellisiin tarpeisiin.
DED	Direct Energy Deposit, kohdennettu sulatus. Komponentin muodostetaan metallilankaa tai jauhetta sulattamalla.
EBF	Electron Beam Freeform Fabrication. Nasan kehittämä kohdennettun sulatuksen menetelmä, joka mahdollistaa 3D-tulostamisen avaruudessa.
EBM	Electron Beam Melting, jauhepetisulatuksen toinen menetelmä, jossa metallijauhe sulatetaan elektronisuihkun avulla.
HIP	Hot Isostatic Pressing, isostaattinen kuumapuristus. Hydrostaattisen painen alaisena kappale tiivistyy ”homogeenisesti”, kutistuen ilman vääristymiä.
LS	Laser Sintering, jauhepetisulatusmenetelmä, jossa metallijauhe sintrataan laserin avulla yhteen.
Myötölujuus	Myötölujuuden ylittyessä kappaleessa tapahtuu merkittävää plastista muodonmuutosta. Myötölujuutta alemmilla voimilla kappaleessa tapahtuu vain elastisia muodonmuutoksia.
Nasa	National Aeronautics and Space Administration. Yhdysvaltain avaruus- ja ilmailuhallintovirasto.
NPJ	NanoParticle Jetting. AM-menetelmä, jolla pystytään saavuttamaan korkeampia tulostustarkkuuksia.
PBF	Powder Bed Fusion, jauhepetisulatus. Komponentti muodostetaan metallijauhetta sulattamalla.
Plastinen SLM	Palauttamaton muutos materiaalin rakenteessa. Selective Laser Melting, jauhepetisulatuksen menetelmä, jossa käytetään laseria sulattamaan metallijauhetta.
TiAl	Titaani-alumiini-metalliseos. Seos on kevyt ja kestää hyvin lämpöä. Siksi siitä kehitellään AM-tekniikan tulevaisuuden materiaalia.
WC-Co	Volframikarbidi-koboltti-metalliseos. Kovuutensa vuoksi siitä kehitellään AM-tekniikan tulevaisuuden materiaalia.

# 1. JOHDANTO

Maailman monipuolistuessa, kuluttajat ja yritykset vaativat yhä räätälöidympiä tuotteita ja palveluja. Modernissa maailmassa massatuotanto on hallitsevassa asemassa tuotteiden valmistamisessa. Sen avulla saadaan valmistettua lukuisia samanlaisia tuotteita halvalla, tuotteiden variaation kustannuksella. Variaatiota haluavien kuluttajien on tarvinnut hakeutua käsityöläisten pariin. Verrattuna massatuotantoon, käsityönä tehdyt tuotteet ovat kalliita. 3D-tulostus tarjoaa kuluttajalle kolmannen vaihtoehdon näiden menetelmien väliltä.

AM-tekniikka (Additive Manufacturing) mahdollistaa massatuotantoa parempaa variaatiota sekä käsityötä halvemmän hinnan. AM-tekniikka mahdollistaa myös kappaleiden vapaamman suunnittelun, sillä koneistuksen rajoituksia ei tarvitse ottaa huomioon.

Tässä työssä keskitytään metallin 3D-tulostukseen ja sen etuihin ja haittoihin. Samalla esitellään kaksi useimmiten käytettyä metallin 3D-tulostusmenetelmää. Työn tavoitteena on tutkia, miten 3D-tulostuksen voisi yhdistää osaksi perinteistä teollista tuotantoa, millaiseen tuotantoon se sopii, ja minkälaiset kustannukset 3D-tulostuksesta syntyvät. Ongelmakohtia ovat tulostusmenetelmillä tulostettujen kappaleiden laadun vaihtelu, joka johtaa ennen aikaisiin murtumisiin. Ongelmana on myös heikko tietoisuus 3D-tulostuksen mahdollisuuksista.

Tutkielman alussa perehdytään AM-tekniikkaan sekä sen ominaisuuksiin. Ominaisuuksissa syvennytään 3D-tulostuksen tarkkuuteen, murtumien aiheuttamisperusteeseen sekä jälkikäsittelyyn. Luku kolme koostuu eri tulostusmenetelmien esittelystä. Molemmissa tulostusmenetelmissä perehdytään menetelmien hyviin ja huonoihin puoliin. Menetelmiin perehdytään pintapuoleisesti, mikä helpottaa tutkimuksen loppuvaiheen ymmärtämistä. Seuraavassa luvussa esitellään AM-tekniikan kustannuksia. Kustannuksissa ei oteta huomioon ulkoistamista tai toimitusketjuja. Luku keskittyy AM-tuotannossa esiintyviin keskeisiin kustannuksiin, jotka ovat merkittäviä teknologian laajemman käyttöönoton kannalta. Viidennessä luvussa tutkitaan 3D-tulostamisen liittämistä osaksi tuotantoa. Luvussa tarkastellaan AM-teknologian käyttökohteita ja mitä etuja kyseisellä teknologialla voidaan saavuttaa. Samalla luvussa tuodaan esille toimintaympäristöjä, joihin AM-menetelmät sopivat parhaiten. Kuudennessa luvussa käydään läpi AM-tekniikan tulevaisuutta ja sen kehityssuuntia. Luvussa arvioidaan teknologian kehityksen vaikutuksia tuotantoon. Viimeisessä luvussa kootaan yhteen tärkeimmät havainnot.

## 2. ADDITIVE MANUFACTURING

Additive manufacturing sai alkunsa 1980-luvulla Austinissa Texasissa, jolloin muovi- ja metallikerroksia sulatettiin yhteen. Vuosien saatossa teknologia kehittyi nykyiseen tilaansa. Terminä additive manufacturing tarkoittaa prosessia, jossa kappale luodaan kerros kerrokselta jauheesta, langasta tai levystä. [1] 3D-tulostimet ovat täten AM-prosessin keskiössä.

3D-tulostaminen mahdollistaa sellaisten kappaleiden tulostamisen, joita on ennen pidetty mahdottomana. Koska tulostaminen tapahtuu kerros kerrokselta, voi komponentin sisälle tehdä sellaisia muotoja, joita on mahdoton tehdä perinteisillä keinoilla. Komponentin suunnittelussa ei tarvitse myöskään ottaa huomioon perinteisen koneistamisen rajoitteita.

Tulostaminen vähentää merkittävästi hukkamateriaalin syntyä. Normaalisti haluttu komponentti työstetään isommasta palasta materiaalia. Palan työstämisestä syntyvät suuret määrät hukkamateriaalia. Mikäli kyseessä on arvokas raaka-aine, tulee hukkamateriaalille merkittävää arvoa. Tukimateriaaleja huomioimatta AM-prosessi eliminoi lähes täysin hukkamateriaalin synnyn.

### 2.1 Tarkkuus

Yleinen käsitys on, että 3D-tulostetut komponentit ovat epätarkkoja ja hauraita. Metallin tulostusmenetelmissä materiaali sulatetaan tai sintrataan yhteen, mikä tekee syntyvistä komponenteista kestäviä. Käsitys epätarkkuudesta ei enää pidä paikkansa, sillä uusien tulostusmenetelmien myötä tulostus tarkkuus on lisääntynyt. Nykyään tulostimet pystyvät tulostamaan ihmisen hiusta (75 µm) pienempiä kerroksia (taulukko 1).

**Taulukko 1.** Eri tulostusmenetelmien kerrospaksuus sekä minimipiirrekoot [1, s. 317].

Prosessi	Kerrospaksuus (µm)	Minimipiirrekoko / Säteen tarkkuus (µm)
PBF, SLM	10–50	75–100
PBF, EBM	50	100–200
DED, jauhesyöttö	250	380
DED, lankasyöttö	3 000	16 000

Taulukosta 1 havaitaan jauhepetisulatustekniikan (PBF, Power Bed Fusion) tarkkuuden olevan huomattavasti vastaavaa kohdennettua sulatusta (DED, Direct Energy Deposit) parempi. Täten jauhepetisulatuksella on mahdollista tulostaa pienempiä kerroskokoja. On syytä huomioida pienen kerroskoon lisäävän tulostusaikaa varsinkin suurilla komponenteilla. Taulukosta on huomattavissa eroja myös eri PBF-menetelmien piirrekoissa. Minimipiirrekoko tarkoittaa pienintä mahdollista piirrettä, jonka säde pystyy muodostamaan komponentin pintaan.

## 2.2 Murtumat

Tulostetuissa komponenteissa on vaarana esiintyä haurausmurtumaa, sillä niissä esiintyy sisäisiä jännityskeskittymiä [1]. Haurausmurtuma syntyy alkusäröstä sisäisten jännitysten sekä väsyttävän kuormituksen seurauksena. Murtuma kulkee nopeasti heikkoja mikrorakenteita (epäpuhtauksia) pitkin. Lopulta plastisen muodonmuutoksen takia särö ydintyy kiteisiin tai raerajoihin, joita pitkin se pääsee etenemään läpi materiaalin. Ydintyminen sekä särönkasvu johtavat materiaalin väsymiseen ja murtumaan. [2, s. 367–368]

Säröjä ja huokosia voidaan poistaa esimerkiksi HIP-menetelmällä (Hot Isostatic Pressing). PBF-menetelmässä elektronisuihkun tai lasersäteen sulatuskuvio vaikuttaa kapaleessa esiintyviin sisäisiin jännitteisiin sekä huokoisuuteen. Kuviota optimoimalla voidaan vähentää sisäisiä jännityksiä sekä huokoisuutta. [1]

## 2.3 Jälkikäsittely

Komponenttien jälkikäsittely vaatii paljon aikaa. Jälkikäsittelyyn kuuluvat muun muassa ylimääräisen jauheen poistaminen, tukirakenteiden poistaminen, komponentin irrottaminen, pinnan viimeistely sekä mahdollinen HIP-käsittely. [1] Pinnan viimeistely sekä lämpökäsittely ovat eniten aikaa vieviä prosesseja. Luvussa 4.3 havainnollistetaan jälkikäsittelystä aiheutuneita kustannuksia paremmin.

HIP-menetelmässä käytetään lämmitettyä korkeapaineista kammiota, johon tulostettu komponentti asetetaan. Kuuma kaasua puristaa komponenttia yhtäläisesti joka puolelta. Täten menetelmä poistaa tehokkaasti materiaalin huokoisuutta ja parantaa sen murtovenymää moninkertaisesti. Murtovenymän kasvu tosin johtaa myötö- ja murtolujuuden heikkenemiseen. [1], [3]



## 3. TULOSTUSMENETELMÄT

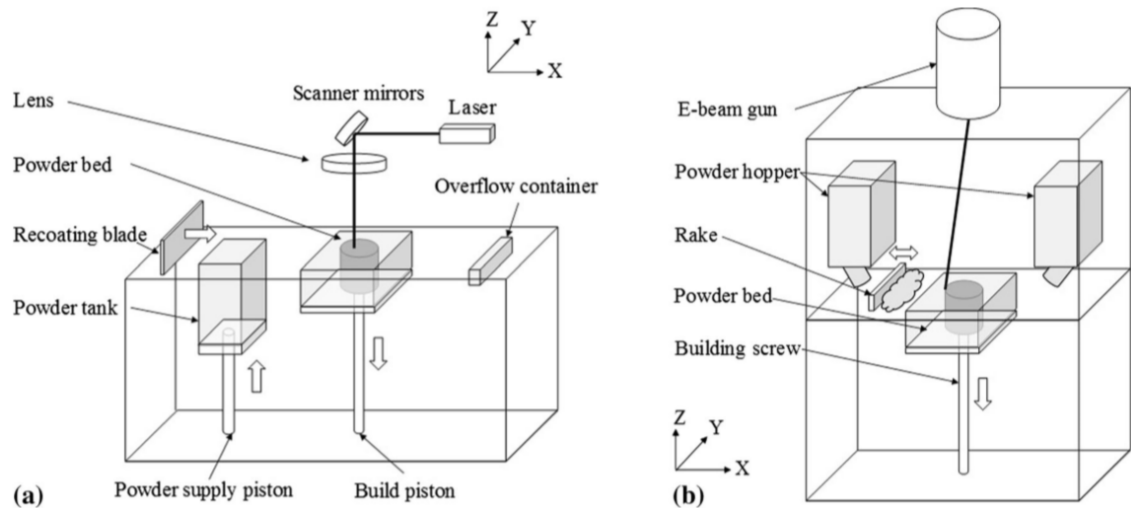
Metallien 3D-tulostamisessa on seitsemän erilaista menetelmää [4]. Tässä luvussa keskitytään niistä kahteen yleisimpään: jauhepetisulatukseen sekä kohdennettuun sulatukseen. Kyseiset menetelmät lähestyvät metallin 3D-tulostusta hyvin eri näkökulmasta ja saavuttavat siten toisistaan poikkeavia tuloksia.

### 3.1 Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatustekniikka mahdollistaa komponenttien tulostamisen, mitkä ovat rakenteellisesti kestävämpiä sekä kustannuksiltaan halvempia. Materiaaleina käytetään esiseostettua metallijauhetta. Käytetyimmät materiaalit ovat ruostumaton teräs, alumiinit, titaani ja teräs. [1] Yleensä kaikki materiaalit, joita voidaan hitsata ovat sopivia PBF-menetelmän materiaaliksi [4, s. 79]. Markkinoilla on kahdenlaista jauhepetisulatusmenetelmää: laseriin perustuvaa ja elektronisuihkuun perustuvaa.

Laseria käyttävä menetelmä sulattaa metallijauheen voimakkaan laserin avulla. Markkinoilla on tarjolla useamman laserin PBF-tulostimia. Useamman laserin hyötynä on tulostusaikojen lyhentyminen. [4, s. 348] Laserit voivat työstää työpöydällä useita eri kohtia samanaikaisesti lyhentäen tulostusaikaa. Laserien lisääminen nostaa tulostimien hintaa, sillä laserit ovat yksi tulostimien kalliimpia osia. Usean laserin lisääminen nostaa tulostimen tuottavuutta, jonka avulla korkeampi hinta on perusteltua.

Metallin sulattaminen parantaa komponentin kestävyyttä ja tekee siitä tiiviimmän verrattuna sintraukseen. SLM:llä (Selective Laser Melting) tulostetut komponentit eivät myöskään tarvitse lämpökäsittelyä tulostuksen jälkeen [4, s. 12]. EBM-menetelmä (Electron Beam Melting) muodostaa elektronisuihkun, joka sulattaa jauheen [1]. Molemmat menetelmät ovat nähtävissä kuvasta 1. SLM-menetelmä on kuvan a-kohta ja EBM-menetelmä kuvan b-kohta.



**Kuva 1.** Jauhepetisulatustekniikan kaksi eri menetelmää [3, s. 44].

Kuvan 1 a) SLM-jauhesulatustekniikka sulattaa ensimmäisen kerroksen jauhetta korkeaan energiseen lasersäteeseen avulla. Peilit (Scanner mirrors) ohjaavat lasersädeä halutun sulatuskuvion mukaisesti. Kerroksen synnyttyä pöytä (Powder bed) siirtyy kerroksen alaspäin, jolloin jauhevarasto (Powder tank) nousee kerroksella ylöspäin. Jauhevarastosta levitetään uusi jauhekerros pinnoitusterän avulla (Recoating blade). Levitetty jauhe sulatetaan vanhan kerroksen päälle. Ylimääräinen jauhe kerätään säiliöön (Overflow container) uudelleen käyttöä varten. [3]

EBM-prosessin periaate on samanlainen kuin SLM-prosessilla, mutta sulatus tapahtuu elektronisäteeseen avulla (E-beam gun). Verrattuna SLM-tekniikkaan EBM tarvitsee tyhjiön operoidakseen sekä lämmitettävän tulostuspöydän [4]. EBM käytetään yleensä SLM:ää paksumpaa tulostuskerrosta, jolla voidaan saavuttaa lyhyempiä tulostusaikoja pinnanlaadun kustannuksella [1]. Kuvasta 1 nähdään EBM-prosessissa olevan vain yksi taso (Powder bed), joka liikkuu kerrosten muodostuessa. Uutta kerrosta varten jauhe levitetään jauhevarastosta (Powder hopper) lastan (Rake) avulla. Molemmissa prosesseissa jauhe poistaa komponentista lämpöä, joka muuten muodostuisi ongelmaksi. [4]

### 3.1.1 Edut

Jauhepetisulatustekniikka mahdollistaa tarkempien kerrosten muodostamisen komponentteihin. Pienempien kerrosten avulla tarkkuus kasvaa. Jauhepetisulatustekniikan pienemmät piirrekoot mahdollistavat sellaisten komponenttien tulostamisen, jotka vaativat suurempaa tarkkuutta. Verrattuna muihin yleisimpiin metallin tulostusmenetelmiin PBF-prosessi pystyy tarkimpiin tuloksiin (Taulukko 1).

PBF-menetelmällä tulostetut kappaleet ovat murtolujuudeltaan ja kestävyydeltään parempia kuin perinteisillä menetelmillä tehdyt kappaleet. Pääosin tämä on materiaalina

käytetyn hienon jauheen ansiota. [3] Jauheen laatu vaikuttaa tulostetun materiaalin ominaisuuksiin [1]. Heikkolaatuinen jauhe johtaa huokoisuuteen, joka voi johtaa haurausmurtumiin.

Jauhepetisulatusmenetelmällä tulostetut komponentit vaativat vähemmän jälkityöstöä kuin esimerkiksi DED-menetelmällä muodostetut komponentit. Tosin PBF-tekniikassa on otettava huomioon metallijauheen poistot sekä tukirakenteiden poistot. Jälkityöstön väheneminen lyhentää myös komponentin läpimenoaikaa, joka lisää tuottavuutta.

Tuotannossa EBM avulla on mahdollista tulostaa komponentteja päällekkäin, sillä EBM-prosessissa jauhekerroksen ylin kerros sintrataan lievästi kiinni toisiinsa. Sintraus estää irtonaisen jauheen lentämisen muualle elektronisuihkeen sähköstaattisten voimien seurauksena. Sähköstaattiset voimat johtuvat elektronisuihkun mukana kulkevan sähkövarauksen takia. [1], [4, s. 80] SLM-prosessissa on mahdollista tulostaa vain horisontaalisesti, sillä jauhetta ei tarvitse sintrata. Tämä johtuu siitä, että SLM:ssä käytetään laseria, jonka kanssa ei esiinny sähköstaattisia voimia. Komponenttien tulostaminen toistensa päälle mahdollistaa tulostettavien komponenttien määrän kasvattamisen sekä samalla yksikköhinnan laskemisen. Kyseistä menetelmää kutsutaan sekoitetuksi tuotannoksi ja luvussa 4.4 havainnollistetaan sitä paremmin.

### 3.1.2 Haasteet

Jauhepetisulatuksen haasteena on sen tulostetun komponentin heikko pinnanlaatu, johtuen pinnankarkeuden epätasaisuudesta. Pinnankarkeuden heikko taso johtuu ylimääräisistä hiukkasista, jotka pääsevät tulostuskerroksien väliin. Tilanne ilmenee, kun kerrosväli on yhtä suuri kuin partikkelin halkaisija, jolloin partikkelit täyttävät kerrosten välit. Pinnan kaltevuuden kasvaessa ilmiö korostuu. [5] Muita komponentin valmistuksessa aiheutuneita ongelmia ovat murtumat ja paisumiset. Nämä johtuvat usein vääristä lämpötiloista prosessin aikana. [1]

PBF-prosessilla tehdyt komponentit ovat alttiita useille erilaisille ongelmille, johtuen heikoista kerroksien välisistä sidoksista. Korkeat lämpötilaerot johtavat sisäisiin jännitteisiin, jotka kertautuvat kerroksien kasvaessa. EBM-menetelmällä sisäisiä jännitteitä esiintyy vähemmän, sillä prosessissa tulostuspöytä lämmitetään [1]. Sisäiset jännitteet voivat aiheuttaa kappaleessa vääristymiä tai vääntymiä. Kerrosten irtoaminen sekä murtuminen voivat johtuvat heikoista sidoksista kerroksien välillä. [3]

SLM-menetelmässä tulostuskammio täytetään reagoimattomalla kaasulla. Kaasu estää tulostusprosessissa muodostuvia roiskeita sekä myrkyllisten hitsauskaasujen syntymisen. Kaasu suojaa samalla materiaalia hapettumiselta. Mikäli kaasua ei ole riittävästi voi

se aiheuttaa lasersäteen heikkenemistä tai heijastumista pölyn takia väärään paikkaan. [3], [6] Suojakaasun takia menetelmä vaatii kontrolloidun tilan. Täten sillä on hyvin kallista tulostaa suuria komponentteja, esimerkiksi teollisuuden tarpeisiin. Samalla sillä ei voi tulostaa jo olemassa olevaan tai kaarevaan metallipintaan, joka taas onnistuu DED-menetelmällä.

### 3.1.3 Sovelluskohteet

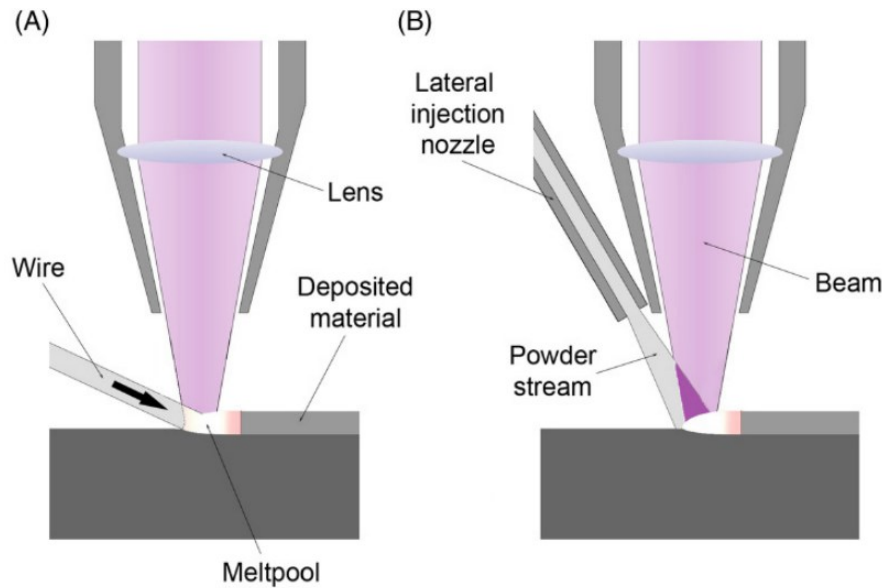
Korkean tarkkuuden takia jauhepetisulatus sopii erityisesti tarkkuutta vaativiin komponentteihin. Tarkkuudesta johtuva parempi pinnanlaatu tekee PBF-komponenteista sopivan esimerkiksi proteesien valmistukseen. PBF mahdollistaa myös erilaisten materiaalien käytön proteesien valmistuksessa.

Hammaspoteesien käytössä SLM-teknologia on laajassa käytössä, sillä proteesin geometria on monimutkainen. Proteesien valmistuksessa tuotantomäärät ovat pieniä ja jokaiselle yksilöllisesti valmistettuja. [7], [8] Kyseisten tekijöiden takia AM-menetelmä tuo merkittävää etua perinteisiin menetelmiin verrattuna.

SLM-menetelmä on mahdollistanut bioyhteensopivan CoCrMo-materiaalin (Koboltti-kromi-molybdeeni) laajemman käytön proteesien valmistuksessa [7]. Jauhepetisulatukseen ominaiset ominaisuudet kuten materiaalin korkea käyttöaste, suunnittelun vapaudet ja kustannussäästöt ovat tehneet SLM-menetelmästä kilpailukykyisen proteesien valmistuksessa. CoCrMo-materiaalin bioyhteensopivuus proteesien valmistuksessa on tehnyt siitä suositun materiaalin myös muissa lääketieteellisissä sovelluksissa [7].

## 3.2 Kohdennettu sulatus

Kohdennetun sulatuksen lähestymistapa on erilainen verrattuna jauhepetisulatukseen. PBF-menetelmän sijaan kohdennetussa sulatuksessa väliaine sulatetaan suoraan komponenttiin. Menetelmässä käytetään lankaa tai jauhetta, joka altistetaan lämmölle. Yleisin tapa on käyttää laseria tai elektronisuihkua lämmönlähteenä. Laser sulattaa jauheen tai langan halutulle pinnalle. Prosessia toistamalla syntyy lopulta haluttu komponentti.



**Kuva 2.** Kahden eri DED menetelmän tulostusprosessit [4, s. 11].

Kuvassa 2 tulostuspää kohdentaa metallilankaan tai jauheeseen lasersäteen erilaisten linssien kautta. Sulatettu lanka tai jauhe kovettuu takaisin metalliksi ja täten syntyy haluttu kerros. Sulatusaltaaseen (kuvassa meltpool) kohdistetaan suojakaasua, jonka on tarkoitus estää materiaalin hapettumisen [4]. DED-menetelmä muistuttaa läheisesti erilaisia hitsausmenetelmiä.

### 3.2.1 Edut

DED-menetelmä on yksi nopeimmista metallin 3D-tulostusmenetelmistä. Se on kustannuksiltaan esimerkiksi PBF-menetelmää halvempi, hukkamateriaalia syntyy vähän eikä menetelmä aseta rajoitteita komponentin koolle. [4] DED-menetelmää käyttäessä kappaleen tulostamiseen ei yleensä tarvita suojakaasua. Suojakaasu tulee kyseeseen, kun materiaalia halutaan suojata hapettumiselta [3]. Menetelmä ei vaadi erillistä kammiota, kuten esimerkiksi SLM-menetelmässä.

Suutin pystyy liikkumaan vapaasti sekä tulostamaan kallistuneille pinnoille. Se pystyy myös tulostamaan jo olemassa oleville metallipinnoille. [4, s. 11] PBF-menetelmässä tarvittaisiin kappaleen kokoa vastaava työpöytä. Kyseisistä syistä kohdennettua sulatusta käytetäänkin erilaisten komponenttien korjaamiseen sekä suurien kappaleiden tulostamiseen. Jotkin yritykset ovat suunnitelleet tulostavansa jopa kokonaisia lentokoneenrunkoja kyseisellä menetelmällä [4, s. 11].

DED-menetelmissä hukkamateriaalia syntyy vähän, sillä tarvittava määrä materiaalia syötetään suoraan kappaleelle. Nasan (National Aeronautics and Space Administration) kehittämässä [9] EBF-menetelmässä (Electron Beam Freeform Fabrication), langan

käyttöaste on lähes 100% ja energian kulutuksen hyötysuhde lähes 95%. Perinteisiin menetelmiin verrattuna EBF-prosessin hyötysuhde on korkea, joten se sopii hyvin Nasa:n toimintaympäristöön.

SLM:n tapaan DED-menetelmässä voidaan käyttää monia eri materiaaleja. Yleisimmät materiaalit ovat titaani, alumiinit ja erilaiset teräkset [10]. Nasan [9] EBF-menetelmässä syötettävän materiaalin pitää olla sähkönjohtavaa, sillä materiaali sulatetaan elektroni-suihkun avulla. Vaatimus asettaa rajoitteita EBF:n materiaaleille.

### 3.2.2 Haasteet

Komponenttien jälkikäsittelyt vievät huomattavan osuuden läpimenoajasta. Täten sen minimointi oleellisen tärkeää läpimenoajan nopeuttamiseksi. DED-menetelmällä valmistetut komponentit vaativat enemmän jälkikäsittelyä, jotta ne soveltuvat käyttökohteeseensa. Menetelmän suurempi kerrospaksuus (taulukko 1) johtaa suurempiin pinnan- karkeuden eroihin, kuin esimerkiksi PBF-komponenteilla.

DED-menetelmällä tulostetuissa komponenteissa ilmenee myös enemmän jäännösjännityksiä, sillä tulostus lämpötila ei ole korkea. Kyseistä ongelmaa ei ilmene EBM-prosessissa korkean tulostuslämpötilan takia [1]. Neutronidiffraktiota käyttävä jäännösjännityksen tutkimus osoittaa, että komponenteissa voi olla jäännösjännitettä 50–80 % [11]. Jännitteitä voidaan lievittää ympäristöä lämmittämällä. Jälkijännitteet voivat negatiivisesti vaikuttaa kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin sekä ne voivat johtaa muutoksiin komponentin kiderakenteessa [1].

### 3.2.3 Sovelluskohteet

Heikomman tarkkuuden takia DED-menetelmällä on vaikea tehdä tarkkuutta vaativia komponentteja tai piirteitä. Tämän takia menetelmää käytetään usein sellaisten komponenttien valmistamiseen, joissa nämä ominaisuudet eivät ole tärkeitä. Kohdennettua sulatusta käytetään kasvavassa määrin esimerkiksi korjaustoiminnassa.

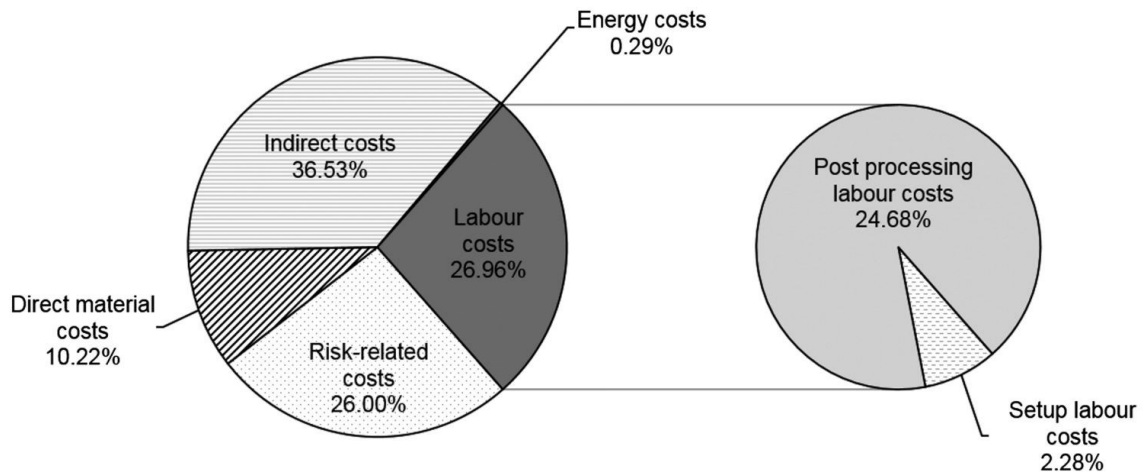
Ilmailussa DED-menetelmä on tullut osaksi suurien komponenttien ja polttoainetta säästävien komponenttien valmistuksessa. Esimerkiksi amerikkalainen lentokonevalmistaja valmistaa tulevan 777X-malliinsa siivet DED-menetelmää käyttäen. Siiven eri komponentit tulostetaan ja lämpökäsitellään ennen kokoamista. [12] Siiven suuren koon takia kohdennettu sulatus sopii hyvin niiden tulostamiseen.

Korjaustoiminnassa kohdennettua sulatusta käytetään muun muassa vioittuneiden turbiinikomponenttien korjaamiseen [13]. Käytettäessä kohdennettua sulatusta vioittuneesta komponentista saadaan lähes saman vahvuinen kuin alkuperäisestä. Joissain

tapauksissa korjattu komponentti jälkityöstetään ja lämpökäsitellään, jotta komponentti saavuttaa asetetut metallurgiset ominaisuutensa [13].

## 4. KUSTANNUKSET

AM-tuotannon erilaisuus verrattuna perinteisiin tuotantomenetelmiin vaikuttaa myös AM-tuotannon kustannusrakenteeseen. Kustannuksista suurin osa muodostuu välillisistä ja välittömistä kustannuksista. Työvoimakustannuksiin vaikuttaa myös 3D-tulostukselle ominainen jälkityöstön suuruus.



**Kuva 3.** AM-tuotannon kustannusrakenne PBF-menetelmille [15, s. 6965].

Kustannusrakenteessa on kolme pääkohtaa, jotka muodostavat suurimman osan AM-tuotannon kustannuksista. On huomioitava, että kaikille AM-prosesseille kuvan 3 tapainen kustannusrakenne ei ole samankaltainen. Esimerkiksi DED-menetelmän nopeampi tulostusaika (verrattuna PBF-menetelmään) pienentää välillisiä kustannuksia, mutta voi vaatia pidempää jälkityöstöä. Kuvasta 3 havaitaan kustannusten muodostuvan seuraavista tekijöistä:

1. välittömistä ja välillisistä kustannuksista,
2. riskistä muodostuvasta kustannuksesta, joka voi johtua esimerkiksi viallisen komponentin tulostumisesta ja
3. työvoimakustannuksista, jotka muodostuvat pääosin jälkikäsittelystä aiheutuneista kustannuksista.

AM-prosessi mahdollistaa erilaisen lähestymistavan kustannuksiin ja niiden kattamiseen. Verrattuna perinteisiin menetelmiin AM-prosessilla on mahdollista kattaa kustannuksia esimerkiksi toisilla komponenteilla. Kustannusten syntyyn ja kattamiseen voidaan vaikuttaa seuraavilla menetelmillä:



1. Osa 3D-tulostimista pystyy valmistamaan monta toisistaan riippumatonta komponenttia yhtä aikaa. Usean komponentin yhtäaikainen tulostus alentaa yksikkökustannuksia.
2. 3D-tulostetuilla komponenteilla voidaan tuottaa asiakkaalle sellaista lisäarvoa, jota on lähes mahdoton tehdä perinteisillä menetelmillä. Tällainen lisäarvo voi olla esimerkiksi öljykanavien suunnitteleminen hydraulilohkon sisälle ilman porauksia. Kyseisestä esimerkistä lisää alaluvussa 4.5. Asiakkaan kokeman lisäarvon perusteella voidaan vaatia korkeampaa hintaa.

## 4.1 Välilliset ja välittömät kustannukset

Suurin osa AM-tuotantokustannuksista syntyy etupainotteisesti, esimerkiksi 3D-tulostimen hankinnan myötä. Etupainotteiset kustannukset voidaan kattaa esimerkiksi tuotantomäärää nostamalla. Merkittävä välitön ja välillinen kustannus syntyy myös komponentin jälkityöstöstä.

Välilliset kustannukset koostuvat kaikista kustannuksista, joita ei voida suoraan kohdistaa tulostetulle tuotteelle. Niitä ovat muun muassa hallintokustannukset, työtunneista ja kunnossapidosta johtuvat kustannukset. Verrattuna perinteisiin menetelmiin, 3D-tulostamisessa ei synny suurta määrää koneistamiskustannuksia (tooling costs). Suurin välillisen kustannuksen tekijä on itse 3D-tulostimen investointikustannuksen kattaminen, sillä muut välilliset kustannukset, esimerkiksi suunnittelukustannukset, ovat tulostimen kustannuksiin verrattuna pieniä.

Patentit, jotka ovat aiemmin pitäneet 3D-tulostimien hintoja korkealla ovat nykyään rauenneet. Raukeaviin patentteihin on kuulunut useita metallien 3D-tulostuksen kannalta merkittäviä patenteja. Patenttien raukeaminen sekä kasvava kilpailu 3D-tulostinmarkkinoilla ovat laskeneet tulostimien hintoja merkittävästi. Tulostimien hinnat ovat laskeneet jopa 70 % alkuperäisistä hinnoista. Esimerkiksi SLS-tulostimien hinnat ovat olleet noin 150 000 \$ josta ne ovat laskeneet 10 000 \$. [16], [17]

Välittömiin kustannuksiin lukeutuu kaikki suoraan komponentille osoitettavissa olevat kustannukset, joita ovat esimerkiksi materiaalikustannukset. AM-tuotannossa materiaalihintoihin vaikuttaa mahdollisten standardoimattomien materiaalien käyttö. Standardoimattomien materiaalien käyttö johtuu rajoitetusta määrästä metalleja, joita voidaan käyttää AM-tuotannossa sekä teknologian uutuudesta [1].

Uusien materiaalien kehitystyön myötä materiaalikustannusten odotetaan laskevan, joka vaikuttaa myös yksittäisten komponenttien hintaan. Myös suuremmilla materiaaliostoilla voidaan saavuttaa alhaisempia materiaalikustannuksia. On tosin syytä huomioida, että

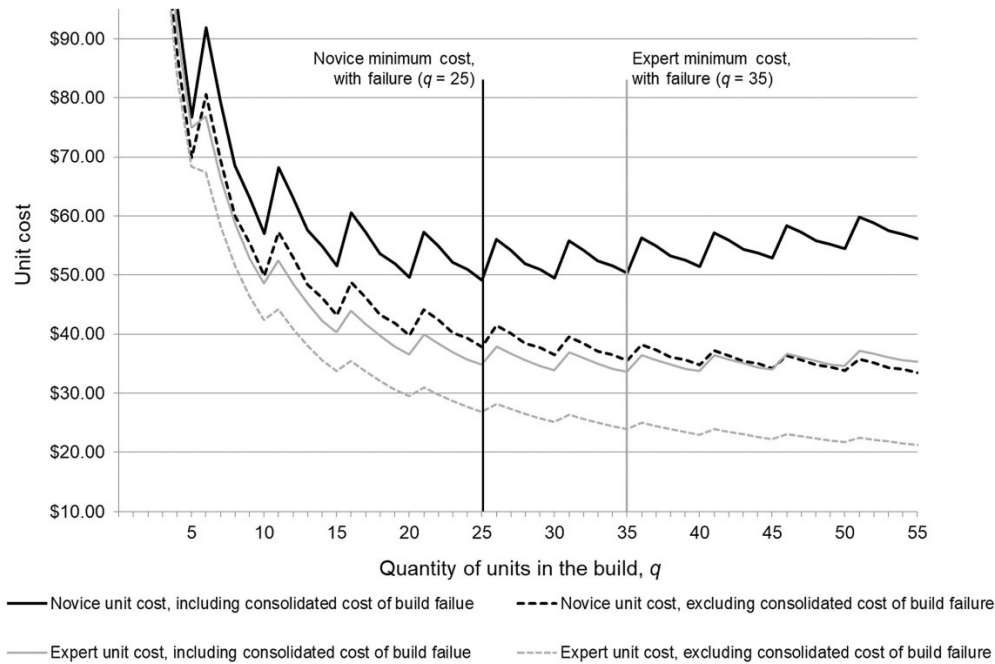
kokonaiskustannusrakenteeseen materiaalikustannuksilla ei ole merkittävää vaikutusta. Kuvasta 3 voidaan havaita materiaalikustannusten muodostavan vain noin 10 % kokonaiskustannuksista.

## 4.2 Tulostusvirhe

Tulostusvirheen merkittävyys kustannusrakenteessa on huomattavissa kuvasta 3. Kustannuksista epäonnistuneiden komponenttien tulostamiseen liittyvän riskin osuus on lähes 26 %. Täten riskin todennäköisyys on otettava huomioon kustannuslaskennassa sekä suunnitelmissa. Tulostusvirhettä käsitelläänkin AM-prosessissa todennäköisyyksien avulla. Todennäköisyys lasketaan ”virhe per kerros”-menetelmällä, jossa jokaiselle tulostetulle kerrokselle lasketaan todennäköisyys epäonnistua. [16] Virheen todennäköisyys lasketaan kerroksittain, sillä jokainen kerros on toisistaan riippumaton.

Baumerin et al. tekemässä tutkimuksessa [18] LS-prosessilla (Laser Sintering) kaksi kappaletta 14 kappaleesta tulostui virheellisenä. Tulosta ei voida yleistää suoraan kaikkiin AM-prosesseihin, mutta sen avulla voidaan arvioida syntyviä kustannuksia. Tutkimuksessa kerroksen virheellisyydelle laskettiin todennäköisyys 0.016 % [18]. Mikäli komponentin tulostamiseen vaaditaan monta kerrosta, kasvaa todennäköisyys tulostusvirheen syntymiselle.

Tulostusvirheen sattuessa korvaava komponentti voidaan joutua tulostamaan vajanaisesti täytetyllä tulostuspöydällä. Tällöin korvaavan komponentin hinta nousee, sillä korvaava komponentti kattaa koko tulostuspöydän kustannukset. Täten vaikutus koko kustannusrakenteeseen voi olla merkittävä. Erilaiset ongelmatilanteet sitovat myös työvoimakustannuksia, koska viallinen komponentti voidaan joissain tapauksissa korjata työstämällä. Viallinen komponentti voi vaatia myös lisäsuunnittelua, mikäli virhe johtuu suunnitteluvirheestä, esimerkiksi vähäisistä tukimateriaaleista.



**Kuva 4.** Tulostusvirheen vaikutus kustannuksiin [18, s. 804].

Kuvassa 4 kuvaajat vertailevat ammattilaisen ja aloittelijan eroja LS-prosessin käytössä. Ammattilaisen ja aloittelijan välillä on huomattavissa eroja yksikkökustannuksissa, mutta suurin ero on havaittavissa, kun virheelliset komponentit otetaan huomioon. Kuvasta nähdään epäonnistuneiden komponenttien vaikuttavan merkittävästi tuotteen kustannuksiin. Verrattuna onnistuneeseen tulostukseen kustannukset kasvavat noin 68 % [18].

On syytä huomioida, ettei tulostusvirheitä pystytä kokonaan poistamaan. Tulostusvirheen todennäköisyyttä voidaan vähentää esimerkiksi nostamalla uuden metallijauheen osuutta vanhan jauheen seassa. Alalla on tapana käyttää 10–50 % uutta jauhetta vanhan jauheen seassa [18]. Tulevaisuuden innovaatiot sekä kasvava tietämys AM-tekno- logioista voivat vähentää tai kokonaan poistaa tulostusvirheen mahdollisuutta.

### 4.3 Työvoimakustannukset

AM-tuotannolle oleellinen kustannuserä on asetuskustannukset sekä jälkityöstö. Asetus- kustannusten ja jälkityöstön kustannusten ero on nähtävissä kuvasta 3. Kuvasta voidaan havaita jälkityöstön muodostavan suurimman osan työvoimakustannuksista.

Riippuen käytettävästä AM-menetelmästä ja halutusta komponentin laadusta, jälkityös- tön määrässä on eroavaisuuksia. Mitä tarkempi tulostusmenetelmä on, sen vähemmän komponentin pinta tarvitsee koneistusta. Esimerkiksi DED-menetelmällä tulostetut kom- ponentit vaativat enemmän koneistusta verrattuna PBF-menetelmiin.

Jälkityöstöön lukeutuu myös luvussa 2.3 mainittu HIP-prosessi. Lämpökäsittelyprosessi vie aikaa, koska se voi kestää 2–8 tuntia riippuen komponentin materiaalista [1]. Lämpökäsittely kuluttaa myös työvoimaa, sillä tulostettu komponentti pitää siirtää tulostimesta uuniin lämpökäsittelyä varten. Käsittelyllä on myös suora vaikutus tuottavuuteen, sillä prosessi sitoo komponentin pitkäksi aikaa. Pitkät läpimenoajat sitovat tuotantoon kustannuksia. Prosessin lyhentäminen vaikuttaisi komponenttien läpimenoaikoihin ja täten myös tuottavuuteen.

Asetuskustannuksiin lukeutuvat kaikki toimet, joita suoritetaan ennen ja jälkeen tulostuksen. Näitä ovat esimerkiksi tulostuspöydän täyttö jauheella tai pöydän lämmitys. Tulostuksen jälkeen komponentista on poistettava erilaiset tukirakenteet ja joissain PBF-menetelmissä komponentti pitää koneellisesti irrottaa alustasta [1]. Prosessi riippuu tulostusprosessissa käytetystä materiaalista sekä tulostusmenetelmästä. EBM-menetelmällä tulostettaessa titaania tai ruostumatonta terästä komponentti irtoaa lämpöeron takia itsestään tai on irrotettavissa alustasta vähällä työllä [1]. On syytä huomioida, että irrotuspinta vaatii usein silti hiomista, jotta saavutetaan haluttu pinnanlaatu. Tulostamisen jälkeen PBF-menetelmillä on poistettava irtonainen jauhe sekä muut komponenttiin sintrautuneet partikkelit. Poisto voidaan suorittaa hiekkapuhalluksella tai kuulapuhalluksella. [4, s. 79]

#### 4.4 Tehokkuus

Välittömien kustannusten ollessa isoja (esimerkiksi tulostimen hinta), kasvaa tulostimen käyttöaste sekä tehokkuus merkittävään asemaan, mikäli tuotekohtaisia kustannuksia halutaan laskea. Erilaiset tutkimukset ovat todenneet 3D-tulostimen tehokkuuden olevan merkittävä tekijä kustannuksien alentamisessa [15], [21]. Jotta tulostin saadaan tehokkaaseen käyttöön, on sillä tulostettava jatkuvasti ja mahdollisimman monta komponenttia yhtä aikaa.

Ennen AM-prosessista syntyviä kustannuksia pyrittiin ennustamaan Hopkinson & Dickensin tutkimuksen pohjalta [19]. Tutkimus ei huomioinut mahdollisuutta tulostaa useaa komponenttia samanaikaisesti. Samalla se ennusti heikosti pienemmän eräkoon kustannuksia [20]. Täten AM-prosessin yksi tärkeimmistä ominaisuuksista (sekoitettu tuotanto) jäi huomioimatta ja syntyi väärä käsitys kustannuksista.

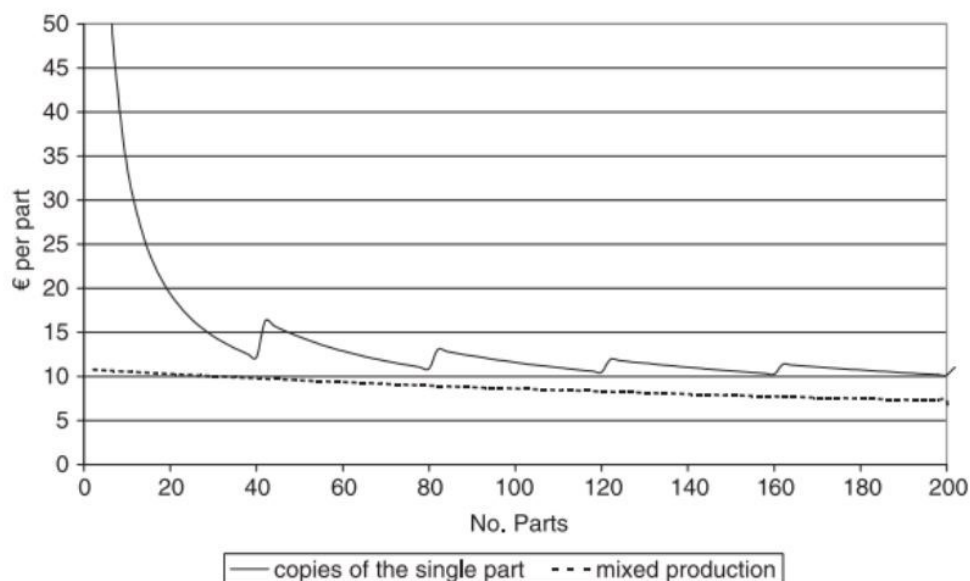
Sekoitetussa tuotannossa 3D-tulostimen tulostuspöydän tilavuus pyritään käyttämään mahdollisimman tehokkaasti hyödyksi tulostamalla useita eri komponentteja samanaikaisesti. Tulostamisessa syntyvät ”ylimääräiset” komponentit voidaan myydä jälkimarkkinoille tai käyttää muihin kokonaisuuksiin. Sekoitettua tuotantoa on mahdollista käyttää

PBF-prosesseilla [18], [20]. Menetelmää käyttäessä on ratkaistava kaksi oleellista kysymystä.

1. Kuinka tiheästi komponentit tulostetaan työpöydälle horisontaalisesti?
2. Kuinka suuri osa työpöydästä käytetään pystysuorassa (z-akselilla)?

Komponentteja lisättäessä horisontaalisesti ovat tulostusajat sekä kustannukset tehokkaimmin käytössä. Mitä tiheämmin komponentit pakataan, sitä vähemmän jauhetta menee hukkaan, sillä kaikkea ylimääräistä jauhetta ei voida käyttää uudelleen [21]. Tiheällä pakkaamisella komponentteja saadaan mahdutettua enemmän tulostuspöydälle. Täten materiaalikustannukset pienenevät sekä kustannukset jakautuvat suuremmalle osalle komponentteja. Komponenttien tiheästi pakkaaminen mahdollistaa nopeammat tulostusajat, verrattuna jokaisen komponentin erilliseen tulostamiseen.

Tulostuspöytä käyttäessä pystysuoraan (tulostettaessa uusia komponentteja vanhojen päälle) kappalekohtaiset kustannukset pienenevät. Lisättäessä komponentteja pystysuoraan ei saavuteta yhtä suurta hyötyä kuin komponenttien horisontaalisella pakkaamisella. Pystysuoraan lisääminen vähentää kuitenkin tuotekohtaisia kustannuksia, joten on kannattavaa täyttää koko pöydän tilavuus komponenteilla. [18] On huomioitava, että pystysuoraan tulostaminen kasvattaa tulostusaikoja, kuluttaa enemmän materiaalia sekä sähköä kuin pelkkä horisontaalisesti tulostaminen. Täten menetelmä ei sovi esimerkiksi nopeaan tulostamiseen.



**Kuva 5.** Kahden eri PBF-tuotannon kustannuserot. [20, s. 1590]

Kuvassa 5 sahalaitaiset kuviot johtuvat uusien kerroksien lisäämisestä z-akselin suuntaisesti. Yhteen komponenttikerrokseen mahtuu vain rajallinen määrä tulostettavia komponentteja, jolloin oleelliseksi tulee uuden kerroksen lisääminen vanhan päälle. Uuteen kerrokseen liittyy muuttuvia kustannuksia (esimerkiksi materiaali), jotka nostavat kokonaiskustannuksia. Uuden kerroksen täytyttyä kustannukset jakautuvat useammalle tuotteelle ja täten pienentävät kokonaiskustannuksia. Sahalaitainen kuvio jatkuu aina tulostimen maksimikapasiteettiin asti (200), jolloin tulostimen koko tilavuus on käytetty. Kuvasta 5 nähdään, että sekoitetun tuotannon (mixed production) avulla on mahdollista saavuttaa pienempi tuotekohtainen kustannus kuin samaa komponenttia tulostamalla.

Sekoitetussa tuotannossa on tärkeä huomioida eri komponenttien erilaiset tulostusajat ja niiden vaikutus kustannuksiin. Tulostusaikoihin voidaan vaikuttaa komponentteja kääntämällä siten, että ne ovat korkeudeltaan samassa tasossa. Täten pystytään maksimoimaan käytettävissä oleva tilavuus ilman tarvetta lisäkerroksille. Komponenttien valintaan ja sijoitteluun voidaan käyttää erilaisia algoritmeja, jotka täyttävät pöydän tehokkaimmalla mahdollisella tavalla ja antavat myös ennusteen kustannuksista [15].

Valittaessa komponentteja sekoitettuun tuotantoon on otettava huomioon komponenttien samanlaiset materiaalivaatimukset. Nykyisillä PBF-menetelmillä ei ole mahdollista tulostaa kuin samaa materiaalia kerrallaan [4, s. 350]. Eri materiaaleissa tämä voi olla rajoittava tekijä, mutta yleisimmissä materiaaleissa (ruostumaton teräs) rajoite ei aseta ongelmia sopivien komponenttien löytämiselle. Usean materiaalin PBF-prosessia tutkitaan, mutta sellaista ei vielä ole kaupallisesti saatavilla [22].

## 4.5 Asiakasarvon luonti

Asiakas on valmiimpi maksamaan korkeampaa hintaa tuotteesta, mikäli hän kokee tuotteen antavan enemmän arvoa. Parempaa arvoa on mahdollista tuottaa 3D-tulostuksen avulla, sillä 3D-tulostus vapauttaa rajoitteita suunnittelusta sekä mahdollistaa kompleksimpien kappaleiden tulostamisen.

Arvon luonnista sekä 3D-tulostuksen mahdollisuuksista hyvä esimerkki on hydraulilohkojen tulostaminen. Perinteisillä menetelmillä hydraulilohko valmistetaan poraamalla erilaisia kanavia. Kanavien päät tulpataan, jolloin jäljelle jää halutut hydraulikanavat. Kyseinen menetelmä on tehoton, sillä suunnitteluvaiheessa rajoittavana tekijänä ovat kanavien poraukset ja tulppaukset. Poran terä ei pysty tekemään mutkia vaan se kulkee aina suoraan. Täten pienen mutkan tekeminen kanavaan vaatii useamman porauksen tekemisen. Työstövaiheessa lohossa on paljon turhaa materiaalia, eivätkä usein toisiinsa nähden kohtisuorassa olevat kanavat ole virtauksien kannalta tehokkaita.

3D-tulostamisen avulla kyseiset kanavat voidaan suunnitella nesteen virtaus huomioon ottaen. Suunnittelussa ei tarvitse huomioida porauksia, sillä tulostusvaiheessa kanavat voidaan tulostaa suoraan komponenttiin. Samalla poistuu tarve kanavien tulppauksille. Kanavien suunnitteluun voidaan käyttää erilaisia algoritmeja, jotka suunnittelevat tehokaimman reitin kanaville, ottaen huomioon virtaukset. Renishawin mukaan [23] algoritmeilla suunniteltu optimaalinen virtausreitti parantaa myös koko hydraulilohkon tehokkuutta. Algoritmeja voidaan käyttää myös lohkon ulkomuodon suunnittelemiseen, joka poistaa lohkoista turhan materiaalin. Materiaalin poisto keventää lohkoa ja mahdollistaa sen koon pienentämisen. [23] 3D-tulostettu hydraulilohko vähentää myös tarvittavien komponenttien määrää (tulpat). AM-menetelmän avulla voidaan täten luoda merkittävää lisäarvoa asiakkaalle ja oikeuttaa hydraulilohkon korkeampi hinta. Korkeammalla hinnalla voidaan kattaa AM-tekniikan kalliimmat valmistuskustannukset.

## 5. TULOSTAMINEN OSANA TUOTANTOA

Ensikädessä AM-teknologia sopii kustannuksiltaan sellaisiin tuotantojärjestelmiin, joissa eräkoko jää ruiskuvaluprosessille optimaalisen eräkoon alle. Alan tutkimuksissa eräkoko vaihtelee valmistettavan tuotteen mukaan 9000–14 000 eräkoon välillä [19], [20]. Eräkoon vaikuttaa myös käytetty 3D-tulostusmenetelmä sekä kuinka tehokkaasti tulostuspöydän tilavuus on käytetty hyväksi. Teknologiaan liittyy myös muita merkittäviä etuja, joita voidaan käyttää hyväksi erilaisissa tuotantomalleissa.

### 5.1 Prototyypit sekä ajallinen hyöty

Ensisijaisesti 3D-tulostusta on käytetty prototyyppien valmistuksessa, mutta suuremmissa määrin myös erätuotannossa [1]. Prototyyppien avulla yritys pystyy analysoimaan komponentteja fyysisesti, ja korjaamaan niissä havaittuja ongelmia [4, s. 24]. Prototyyppien avulla yritys pystyy säästämään kehityskustannuksissa, sillä prototyyppijä voidaan testata ja kehittää huomattavasti koneistamalla tai käsintehtyä kappaletta halvemmalla.

AM-menetelmillä pystytään saavuttamaan merkittäviä kustannussäästöjä sekä ajallisia hyötyjä. Aiemmin mainitussa lentokoneensiiven valmistamisessa lentokoneenvalmistaja lyhensi komponentin valmistusaikaa merkittävästi. Perinteisillä keinoilla siiven valmistaminen kestäisi 3 kk. Tulostamalla siipi DED-menetelmää käyttäen se kestää 30 tuntia [4, s. 25]. Siipi pystyttiin myös suunnittelemaan aiempaa ohuemmaksi ja kevyemmäksi. Ohuempi ja kevyempi siipi parantaa lentokoneen aerodynaamisia ominaisuuksia, minkä takia siipi vaikuttaa myös lentokoneen polttoaineen kulutukseen. [12]

### 5.2 Sovelluskohteet

Uudet alat, joissa AM-teknologiaa on otettu laajemmin käyttöön ovat autoteollisuus sekä avaruusteollisuus. Avaruusteollisuudessa tulostuskomponentit vaihtelevat moottoreista aina kokonaisen raketin tulostamiseen. [4, s. 15–27] Autoteollisuudessa 3D-tulostusta on käytetty perinteisesti vaikeiden komponenttien tulostamiseen. Esimerkiksi BMW:n (Bayerische Motoren Werke) i8 mallin katonavausmekanismia ei olisi voinut toteuttaa ilman 3D-tulostustettua komponenttia [24]. Avaruusteollisuuden puolella 3D-tulostimia on käytetty muun muassa rakettimootoreiden sekä erilaisten raketinosien tulostamiseen. [14]



Ilmailun ja avaruussektorin motiivina käyttää AM-teknologiaa on mahdollisuus vähentää komponenttien lukumäärää sekä keventää niiden massaa. Kappaleen massalla on suuri merkitys ilmailussa sekä avaruusteknologiassa. Mitä pienempi on esimerkiksi raketin omamassa, sitä enemmän kapasiteettia jää hyötykuorman kuljettamiseen. Kasvava kapasiteetti merkitsee avaruusyhtiöille suoraa rahallista hyötyä. Pienentynyt komponenttimäärä tekee raketeista kestävämpiä, sillä täten raketissa on vähemmän komponentteja, jotka voivat vikaantua. Pienempi komponenttimäärä mahdollistaa myös raketin nopeamman kokoonpanon.

Molemmilla aloilla eräkkö ei myöskään ylitä AM-teknologialle kriittistä rajaa. Lentokoneiden ja raketin tuotanto ei ole samassa suuruusluokassa kuin autoteollisuuden tuotanto on. Täten AM-teknologia sopii kapasiteetiltaan hyvin ilmailu- sekä avaruusteollisuuden tarpeisiin.

### **5.3 Variaatio**

AM-teknologian yksi eduista on variaatioiden mahdollistaminen ilman merkittävää kustannusten nousua. Tulostuspöydällä on mahdollista tulostaa toisistaan eriäviä komponentteja, ilman kustannuksien nousua. On tosin huomioitava, että komponentteja lisätessä tulostuspöydälle tulostusaika kasvaa.

PBF-teknologian yhteydessä mainittu proteesien valmistus on erinomainen esimerkki variaation tarpeesta. Hammasproteesien valmistuksessa varioituminen on tarpeellista yksilöllisen käyttökohteen takia. Proteesien valmistus massatuotannolla on lähes mahdotonta, sillä jokainen käyttökohde eroaa toisistaan. Täten alalla AM-teknologian mahdollisuudet ovat suuret.

Hammaslääketieteessä AM-prosessi on korvannut aiemmin työläitä ja korkeankoulutuksen vaativia työvaiheita. Van Noort mainitsee artikkelissaan [8] AM-teknologian mahdollistavan usean kompleksisen komponentin samanaikaisen valmistamisen. Van Noortin mukaan [8] 50 hammaskruunun valmistamiseen perinteisillä menetelmillä (muoteilla) kuluisi merkittävästi aikaa. AM-teknologiaa hyödyntäen kyseiset kruunut pystytään valmistamaan päivässä. Tulostettujen kruunujen läpimenoajat ovat huomattavasti nopeampia verrattuna perinteisiin menetelmiin, jolla on suora vaikutus tuottavuuteen. Täten on mahdollista vähentää kustannuksia sekä nopeuttaa valmistusprosessia.

#### **5.3.1 Eräkoon vaikutus**

Perinteisessä ruiskuvaluprosessissa variaation lisääminen tarkoittaisi uusien muottien valmistamista, mikä kasvattaisi valmistamiseen sitoutuneita kustannuksia. Jotta tuotteen

variaatiolla olisi mahdollisuutta menestyä markkinoilla, pitäisi sitä valmistaa suuria määriä, sillä massatuotannosta tulee kannattavaa vasta jokaiselle tuotteelle ominaisen eräkoon jälkeen. Erilaisten variaatioiden valmistaminen on kannattavaa vasta kun markkinoilla on tarpeeksi suuri kysyntä variaatiolle. Tarpeeksi suuren eräkoon saavuttamisen jälkeen vaikuttaa massatuotannolle ominainen mittakaavaetu alentaen tuotekohtaisia kustannuksia.

AM-teknologiassa vaadittava erä koko on paljon pienempi. AM-teknologian kannattava erä koko riippuu muun muassa valitusta tulostusmenetelmästä tai materiaalista. Pienempi mahdollinen erä koko tekee AM-teknologiasta kustannustehokkaan erilaisia variaatioita valmistessa. Täten AM-prosessi sopii sellaiseen tuotantoon, joissa variaation määrä on suuri ja vaadittava erä koko on pieni tai keskisuuri.

Uusia variaatioita valmistettaessa muuttujina ovat materiaali, kappaleen geometria, kappaleen sijoitus tulostuspöydällä sekä tulostusaika. AM-prosessissa kyseisiä variaatioiden muuttujia voidaan muuttaa huomattavasti pienemmillä kustannuksilla kuin perinteisillä menetelmillä. Muotteja tai niistä syntyviä kiinteitä kustannuksia ei synny AM-prosessissa. Prosessin kiinteät kustannukset muodostuvat suurilta osin tulostimen hankinnan kustannuksista.

### 5.3.2 Rajoitteet

Rajoitteena variaatiolle AM-teknologiassa on käytössä oleva materiaali sekä tulostuspöydän tilavuus. Mikäli samalla tulostuspöydällä valmistetaan saman tuotteen eri variaatioita pitää niiden koostua samasta materiaalista. AM-menetelmissä metallijauheen laatu on suoraan verrannollinen tulostettavan komponentin kestävyteen ja lujuuteen. Heikompi laatuinen jauhe johtaa huokoisuuteen, joka heikentää komponentin rakenteellisia ominaisuuksia [1]. Täten eri variaatiota sisältävän tulosteen pitää olla materiaaliltaan homogeenisiä toistensa suhteen. Variaatioiden homogeenisuus asettaa tiettyjä esteitä variaatioiden mahdollisuuksille, esimerkiksi metalliseen komponenttiin ei voi tulostaa muovia. Muissa AM-teknologioissa, kuten DED-menetelmässä on mahdollista tulostaa esimerkiksi erilaisia metalleja samaan tulosteeseen [25]. On huomioitava, että PBF-prosessia käytettäessä eri materiaalia sisältäville komponenteille on oltava omat tulostimet tai vuorot tuotannossa.

Toinen variaatiota rajoittava tekijä on tulostuspöydän tilavuus. Tulostuspöydälle voidaan asettaa vain tilavuuden mahdollistama määrä komponentteja. Mikäli komponentista tehtävä variaatio ylittää pöydän tilavuuden ei sitä pystytä tulostamaan. Kyseinen tilanne voi

ilmetä esimerkiksi saman komponentin eri kokoisia variaatioita tulostaessa. DED-menetelmässä tulostuspöytää voidaan kasvattaa PBF-prosessia suuremmaksi, jolloin tulostuspöydän tilavuus ei aseta samanlaisia rajoitteita.

## 5.4 Suunnittelun vapaudet

Perinteisillä menetelmillä komponenttia suunniteltaessa pitää jälkityöstö ottaa huomioon. Huomioon otettavia asioita ovat muun muassa seinämänpaksuuksien suuruudet, hitausmerkinnät sekä komponenttien kokoonpano. AM-menetelmää käyttäessä kyseisiä seikkoja ei tarvitse ottaa huomioon. Komponentteja voidaan suunnitella lähes ilman rajoitteita. Rajoitteiden vapaus mahdollistaa suunnittelun ilman perinteisen koneistamisen rajoitteita.

Aiempi esimerkki hydraulilohkosta osoittaa suunnittelun vapauden mahdollisuudet. Hydraulilohkon esimerkissä AM-tekniikalla valmistettu hydraulilohko poisti tarpeen erilaisille tulpille ja porauksille. Täten AM-tekniikka mahdollistaa sellaisten komponenttien suunnittelun, joilla erilaisten komponenttien määrää saadaan pienennettyä kokoonpanosta. Pienempi määrä komponentteja nopeuttaa osien kokoonpanoa sekä tekee tuotteesta vähemmän vikaherkän. Pienentyneellä kokoonpanojalla on myös suora vaikutus kustannuksiin. Tosin suunnittelussa on silti otettava huomioon erilaiset huolto- ja kunnossapitotoimenpiteet. Esimerkiksi hydraulikanavia ei voi suunnitella sellaisiksi, ettei niistä voida poistaa mahdollisia tukoksia.

### 5.4.1 Materiaalitehokkuus

AM-prosessin mahdollistama suunnittelun vapaus sopii sellaisiin käyttökohteisiin, joissa käytössä on kalliita materiaaleja tai monimutkaisia geometrioita. AM-prosessissa materiaalin käyttöasteen ollessa korkea ei kallista hukkamateriaali synny merkittävästi. Monimutkaiset geometriat, jotka usein ovat johtuneet kokoonpanon tai koneistuksen vaatimuksesta, voidaan vähentää tai poistaa kokonaan.

Kalliista materiaaleista tuttu sota- ja ilmailuteollisuus hyötyvät AM-tekniikan mahdollisuuksista. Sektorilla eräkoot eivät usein ole suuria, jotta AM-tekniikkaa ei voitaisi käyttää. Ilmailuteollisuudessa käytettävä titaani on ominainen käyttökohteiden PBF-menetelmään. Kyseinen materiaali on keveytensä sekä kestäväytensä ansiosta lentoteollisuuden suosiossa. AM-tekniikan avulla voidaan suurin osa raakamateriaalista käyttää komponentin tekemiseen. Menetelmällä voidaan muodostaa myös monimutkaisempia muotoja, joita perinteisellä menetelmällä on vaikea muodostaa.

Suunnittelun vapausasteet mahdollistavat kevyempien komponenttien rakentamisen. Suunnitelmissa ei tarvitse ottaa huomioon erilaisia seinämänpaksuuden rajoitteita eikä koneistamista, joka lisää kompleksisuutta. Täten voidaan valmistaa paljon yksinkertaisempi komponentti samanlaisilla ominaisuuksilla.

### **5.4.2 Koulutus**

Tutkimusaineistoissa vähälle huomiolle jää suunnittelijoiden osaamisen vaatimukset. AM-tekniikan mukana tuleva suunnittelun vapaus mahdollistaa entistä nopeamman suunnittelijoiden koulutuksen. Suunnittelutyötä varten ei tarvitse opetella lukuisia erilaisia rajoitteita tai tarpeita, mitä perinteisillä menetelmillä on pakko hallita. Täten suunnittelijoita voidaan nopeammin kouluttaa AM-tekniikan tarpeisiin.

Suunnittelun yksinkertaistuksessa nopeutuu myös itse suunnitteluprosessi. Mikäli suunnitteluprosessiin liitetään osaksi erilaisia ohjelmia, jotka laskevat tehokkaan mahdollisen muodon komponentille, nopeuttaa se uusien mallien suunnittelua. Tosin ohjelmistoja voidaan käyttää myös perinteisillä menetelmillä, mutta AM-prosessissa niiden ominaisuuksia voidaan käyttää tehokkaammin hyväksi.

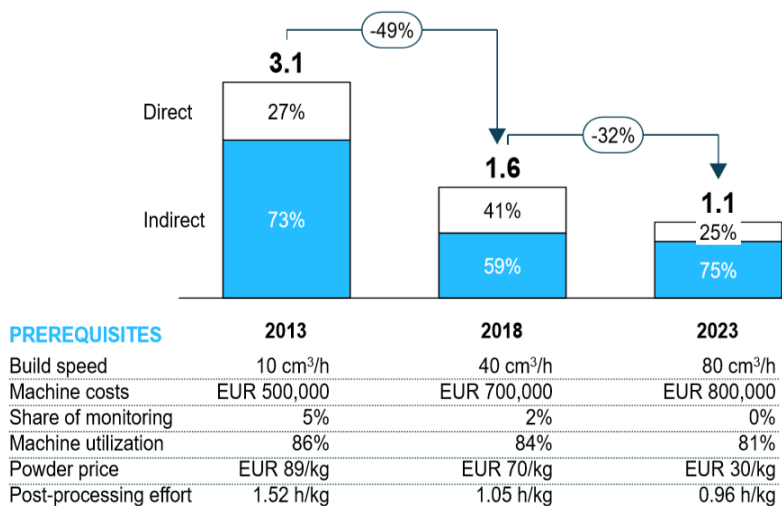
Rajoitteiden poistuminen vähentää uuden suunnittelijan tekemiä virheitä esimerkiksi piirustuksissa ja parantaa täten tuottavuutta. Mikäli virheellinen piirustus menisi tuotantoon, aiheutuisi sen korjaamisesta lisää suunnittelukustannuksia ja mahdollisesti viallisen tuotteen korjaamiskustannuksia. On syytä huomioida, että 3D-tulostamisessa suunnittelijan pitää myös hallita erilaisia 3D-tulostamiseen liittyviä rajoitteita, mutta niiden hallitseminen on perinteisiä menetelmiä yksinkertaisempaa.

## 6. TULEVAISUUDENNÄKYMÄT

Kasvava tietämys AM-tekniikan eri menetelmistä sekä esimerkiksi korrelaatiosta lasersäteen kuvion ja sisäisten jännityksien välillä auttavat ymmärtämään tulostusprosesseja paremmin. Ilmiöiden paremmalla ymmärtämisellä voidaan vähentää tulostusvirheiden esiintymisiä sekä tehostaa koko prosessia. Ymmärryksen laajentuminen vaatii AM-tekniikan laajempaa tutkimusta sekä käyttöä. Täten AM-tekniikkaa on mahdollista kehittää yhä houkuttelevammaksi teolliseen tuotantoon.

Tekniikan kypsyessä on odotettavissa AM-prosessin laajempaa käyttöönottoa teollisessa tuotannossa. Mikäli prosessin pullonkaulat alkuinvestointien, materiaalien sekä jälkityöstön osalta voidaan ratkaista, tekisivät edistysaskeleet AM-tekniikasta varteenotettavan vaihtoehdon esimerkiksi ruiskuvaluprosessille.

Forecast metal AM costs [EUR/cm<sup>3</sup>]



**Kuva 6.** Ennuste AM-tekniikan kustannusten kehittymiselle [26, s. 30].

Konsulttiyhtiön Roland Bergerin teettämässä tutkimuksessa [26] ennustetaan AM-tekniikkaa rajoittavien pullonkaulojen vähentyvän. Kuvasta 6 voidaan havaita tulostimien tulostusnopeuden kasvavan vuodesta 2013 vuoteen 2023 lähes kahdeksan kertaiseksi. Samalla on havaittavissa tulostimien hinnannousua. Hinnannousun voi selittää luvussa 3.1 mainittu useamman laserin lisääminen tulostimeen, jolla tuottavuutta saadaan nostettua. Toinen merkittävä havainto kuvasta 6 on materiaalijauheen hinnan lasku. Materiaalin kilohinnan ennustetaan laskevan yli puolella, jolla on suora vaikutus tulostettujen komponenttien kappalehintoihin.

## 6.1 Alkuinvestoinnit

3D-tulostimien hankkimiseen tarvittava alkuinvestointi on suuri, sillä useimmat teolliset 3D-tulostimet maksavat 25 000–1 000 000 dollaria käyttökohteesta ja materiaalista riippuen [17], [26], [27]. Alkuinvestointikustannus on suurimpia tekijöitä yksikköhinnan muodostumisessa. Investointikustannuksen alenemisella on suora vaikutus yksikkökustannuksiin ja täten myös koko AM-tekniikan kilpailukykyyn.

On syytä huomioida 3D-tulostimien hintojen korreloivan tulostimien ominaisuuksien kanssa. Usein parhaimmat ominaisuudet omaava tulostin on myös kallis. Näiden tulostimien hinta nousee, sillä asiakasarvoa tuovat ominaisuudet perustelevat kalliimman hinnan. Hintakehitys on nähtävissä kuvasta 6. Uusien tulostimien myötä yleensä vanhempien mallien hinnat laskevat. Mikäli uusien mallien ominaisuuksilla ei saavuteta ratkaisevaa tehostusta tuotantoon voi ominaisuuksiltaan vähäisempi tulostin olla riittävä esimerkiksi teolliseen tuotantoon. Kyseisten tulostimien hinnat tulevat todennäköisesti laskemaan tekniikan kypsyessä. Hintoihin vaikuttavat myös luvussa 4.1 mainittu 3D-tulostimien patenttien raukeaminen. Alkuinvestointien pienentyessä kasvaa AM-tekniikan taloudellinen eräkö. Täten AM-tuotanto kilpailee yhä enemmän massatuotannon ruiskupaluprosessin kanssa.

## 6.2 Materiaalit

3D-tulostimille kelvollisten metallisten materiaalien määrä on vähäinen verrattuna perinteisillä menetelmillä tarjolla oleviin materiaaleihin. [28, s. 439] Nykyisellä AM-tekniikalla on vaikea tuottaa hapetukselle alttiista materiaalista komponentteja, koska jauheen lisäys ja sekoitus pitäisi tapahtua hapettomassa tilassa. [4] Täten tulevaisuuden materiaalikehitys on tärkeää AM tekniikan yleistymisen kannalta, sillä hapettoman tilan poisto vähentäisi kustannuksia sekä yksinkertaistaisi tulostamisprosessia. Siksi materiaalikehitys on oleellisessa osassa AM-tekniikan laajemmassa käyttöönotossa. Monia uusia materiaaleja on kehitteillä kuten WC-Co (Volframikarbidi-koboltti), CoCrMo ja TiAl (Titaani-alumiini) [29], [30], [31].

Metallijauheen laadulla on suuri merkitys, sillä se vaikuttaa suoraan tulostetun kappaleen ominaisuuksiin sekä rakenteeseen [4]. Tuotannollisesta näkökulmasta jauheen tasaisella laadulla on suuri merkitys, sillä aiemmassa pääluvussa mainittu vialliset tulostukset muodostavat huomattavan osan tuotannon kustannuksista. Viallisten komponenttien vähentymisellä on vaikutusta tuotannon tehokkuuteen. Nykyisessä ympäristössä useat AM-prosessia käytettävät materiaalit eivät ole standardoituja. Materiaaleille puuttuu

standardoidut testausmenetelmät, joilla varmistetaan tasainen laatu. [28] Standardoimattomuus kasvattaa vaihtelua jauheen tai metallilangan laadussa. Se myös nostaa materiaalien hintoja varsinkin sellaisille materiaaleille, joiden kysyntä ei ole suurta.

### 6.3 Teknologinen kehitys

Teknologiset edistysaskeleet 2000-luvulla ovat tuoneet markkinoille ominaisuuksiltaan parempia 3D-tulostimia. Ominaisuudet vaihtelevat tarkkuuden parantamisesta tehokkuuden nostamiseen. Keskiössä on myös jälkityöstön nopeuttaminen. Teollisessa tuotannossa jälkityöstön osuus halutaan minimoida, joten edistysaskeleet parantavat AM-tekniikan houkuttelevuutta.

Kokonaan uudenlaista ratkaisua tulostamiseen on esitellyt XJet-yritys, joka on nimennyt oman AM-tekniikkinsä NPJ:ksi (NanoParticle Jetting). Kyseinen tulostin muodostaa tukirakenteita nesteestä, joka on mahdollista polttaa pois HIP-menetelmää käyttäen. [4] Täten AM-tekniikalle ominaista jälkityöstöä voidaan vähentää merkittävästi, joka vaikuttaa myös läpimenoaikoihin. Tukirakenteiden poistaminen mahdollistaa myös monimutkaisempien komponenttien tulostamisen, sillä tukirakenteet eivät ole tulostuksen tiellä. Menetelmä pystyy lähes 1 µm tulostustarkkuuteen, joka mahdollistaa 3D-tulostuksen käyttämisen erityistä tarkkuutta vaativissa ympäristöissä [4].

Jälkityöstön vähentämiseksi markkinoilla on erilaisia ratkaisuja 3D-tulostimen sekä koneistuksen yhdistämiselle. Hybridikoneiksi kutsuttujen tulostimien tarkoituksena on yhdistää 3D-tulostus- sekä koneistusosa. Täten voidaan lyhentää läpimenoaikoja, sillä molemmat tulostus sekä koneistus tapahtuvat yhdessä yksikössä. [32] Komponenttia ei myöskään tarvitse siirtää tulostimelta koneistukseen. Siirtämisen eliminointi pienentää tulostamisen työvoimakustannuksia. On syytä huomioida, että joissain metallin 3D-tulostusmenetelmissä tulostettu komponentti pitää silti koneellisesti irrottaa tulostuspöydästä. Irrotusprosessi vaatii usein manuaalisen työvaiheen, joka kasvattaa työvoimakustannuksia.

DED-hybridikoneissa yhdistetään pystykarainen työstökone tai erillinen CNC-työstöpää (Computer Numerical Control), joilla tulostettua komponenttia saadaan jyrskyttävä [1]. Kyseinen hybridikone soveltuu yksinkertaisiin työstöihin, sillä jyrskyttävä ei ole mahdollista tehdä komponenttiin joka suunnasta. Menetelmää käytetäänkin korjaustoiminnassa sekä ilmailuteollisuudessa [1].

PBF-menetelmässä hybridikoneita lähestytään DED-menetelmää poikkeavalla tavalla. Jauhepetisulatuksessa muutaman tulostetun kerroksen jälkeen 3D-tulostimeen integroitu kara koneistaa kyseiset kerrokset. Tulostusprosessi jatkuu ja kerroksia koneistetaan tietyin väliajoin. [33] Täten kappaletta koneistamalla tulostamisen yhteydessä on mahdollista saavuttaa tasaisempi tulostus, sillä jokainen kerros tulostuu tasaiselle pinnalle [34, s. 36]. PBF-hybridikone aiheuttaa rajoitteita komponentin suunnitteluprosessiin, sillä koneistava kara ei esimerkiksi pysty koneistamaan suorakulmaisia kulmia [1]. Täten AM-tekniikan yksi olennaisista hyödyistä (suunnittelun vapaus) rajoittuu. Koneistus rajoittaa tukirakenteiden rakentamista [34, s. 36]. Mahdollinen tulevaisuuden kehitys voi ratkaista kyseiset ongelman sekä laskea tulostimien hintoja, jolloin hybridikoneiden käyttöönotto voi yleistyä.



## 7. YHTEENVETO

AM-tekniikan avulla on mahdollista saavuttaa sellaisia hyötyjä ja etuja, joita on perinteisillä menetelmillä lähes mahdoton saavuttaa. AM-menetelmä kohtaa useita haasteita, mutta tekniikan kypsyessä sekä suosion kasvaessa tulostustekniikan haasteet vähentyvät.

Metallin 3D-tulostamiseen on olemassa monia erilaisia menetelmiä, mutta kaksi käytettyintä menetelmää ovat PBF ja DED. Kyseisillä tulostusmenetelmillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. DED-prosessi on hyvä suurien komponenttien tulostamiseen, mutta sen tarkkuus ei yllä PBF-menetelmän tasolle. PBF on tarkka tulostusmenetelmä ja soveltuu erinomaisesti pienemmille komponenteille, joita pystyy tulostamaan useita samalla tulostuspöydällä. Menetelmän heikkous on sen hitaus sekä ympäristön kontrolloitavuus.

3D-tulostus osana tuotantoa on varteenotettava vaihtoehto pienillä ja keskisuurilla eräkoilla. Erilaiset tuotannon variaatiot ovat AM-tekniikan vahvuuksia, sillä tulostimilla voidaan tulostaa eri variaatioita samasta kappaleesta ilman merkittäviä lisäkustannuksia. 3D-tulostimien tarkkuuden ollessa korkea on siitä tullut varteenotettava menetelmä tarkkuutta ja kompleksisia muotoja vaativissa ympäristöissä. Kyseisestä syystä 3D-tulostus on yleistynyt lentokonealaluudessa, jossa komponentin painolla sekä muodolla on merkitystä.

AM-tekniikan yleistymiseen varteenotettavana tuotantomenetelmänä on nykyisellä tekniikalla haasteita. Mikäli kyseiset haasteet, kuten alkuinvestoinnit, materiaalikustannukset sekä jälkityöstön kustannuksien vaikutusta kokonaiskustannuksiin voidaan vähentää, on sillä suora vaikutus AM-tekniikan houkuttelevuuteen. Monet 3D-tulostukselle yksilölliset ominaisuudet, kuten mahdollisuus tulostaa komponentteja päällekkäin ja täten maksimoida tilavuuden käyttö, pienentävät kokonaiskustannuksia merkittävästi. Sekoitetuksi tuotannoksi kutsuttu menetelmä tarjoaa mahdollisuuden tulostaa erilaisia komponentteja samanaikaisesti, jolloin tulostuspöydän asetuskustannukset jakautuvat suuremmalle kappalemäärälle.

Metallin AM-menetelmät eivät tule välttämättä kokonaan korvaamaan ruiskuvaluprosessia, mutta sillä on potentiaalia tulla yhdeksi varteenotettavaksi tuotantomenetelmäksi. Tekniikan kypsyessä tulostimien ja materiaalien hinnat laskevat. Samalla markkinoille tulee toisiaan parempia tulostimia, parantaen 3D-tulostimien ominaisuuksia ja AM-menetelmän kilpailukykyä.

# LÄHTEET

- [1] W. J. Sames *et al*, "The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing," *International Materials Reviews*, vol. 61, (5), pp. 315-360, 2016.
- [2] E. Pennala, *Lujuusopin perusteet*, Otatieto, 2002. s. 367–368.
- [3] Y. Zhang *et al*, *Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review*, Journal of Material Engineering and Performance, 2017.
- [4] J. Zhang and Y. Jung, *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications*. 2018.
- [5] G. Strano *et al*, "Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting," *Journal of Materials Processing Tech*, vol. 213, (4), pp. 589-597, 2013.
- [6] A. Ladewig *et al*, "Influence of the shielding gas flow on the removal of process by-products in the selective laser melting process," *Additive Manufacturing*, vol. 10, pp. 1-9, 2016.
- [7] Y. S. Hedberg *et al*, "In vitro biocompatibility of CoCrMo dental alloys fabricated by selective laser melting," *Dental Materials*, vol. 30, (5), pp. 525-534, 2014.
- [8] R. van Noort, "The future of dental devices is digital," *Dental Materials*, vol. 28, (1), pp. 3-12, 2011.
- [9] K. M. Taminger ja R. A. Hafley, "Electron Beam Freeform Fabrication for Cost Effective Near-Net Shape Manufacturing," *NATO/RTO AVT-139 Specialists' Meeting on Cost Effective Manufacture via Net Shape Processing*, Amsterdam, 2006. Saatavissa: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080013538.pdf>. Viitattu 06.03.2020
- [10] Y. Zhai, D. A. Lados and J. L. LaGoy, "Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation," *Jom*, vol. 66, (5), pp. 808-816, 2014.
- [11] P. Rangaswamy *et al*, "Residual stresses in components formed by the laser-engineered net shaping (LENS®) process," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 38, (6), pp. 519-527, 2003.
- [12] D. Gates, "Boeing shows off new 777X wing center," *Seattle Times*, 19.5.2016. Saatavissa: <https://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/boeing-shows-off-new-777x-wing-center/>. Viitattu 1.11.2019.
- [13] Anonymous "Rolls-Royce Corporation; "Repair of Gas Turbine Engine Components" in Patent Application Approval Process," *Politics & Government Week*, pp. 4618, 2014.
- [14] E. Berger, "Relativity Space reveals its ambitions with big NASA deal", *Arstechnica*, 21.3.2018. Saatavissa: <https://arstechnica.com/science/2018/03/relativity-space-reveals-its-ambitions-with-big-nasa-deal/#>. Viitattu 14.11.2019.

- [15] M. Baumers et al, "Informing additive manufacturing technology adoption: total cost and the impact of capacity utilisation," *International Journal of Production Research*, vol. 55, (23), pp. 6957-6970, 2017.
- [16] I. Gibson, D. Rosen and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. (2nd;2nd 2015; ed.) New York: Springer, 2015.
- [17] P. Waurzyniak, "All in with Additive," *Manufacturing Engineering*, vol. 159, (3), pp. 85-93, 2017.
- [18] M. Baumers and M. Holweg, "On the economics of additive manufacturing: Experimental findings," *Journal of Operations Management*, vol. 65, (8), pp. 794-809, 2019.
- [19] N. Hopkinson and P. Dicknes, "Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 217, (1), pp. 31-39, 2003.
- [20] M. Ruffo and R. Hague, "Cost estimation for rapid manufacturing' simultaneous production of mixed components using laser sintering," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 221, (11), pp. 1585-1591, 2007.
- [21] M. Baumers et al, "The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push," *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 102, pp. 193-201, 2016.
- [22] C. Anstaett et al, "Laser-based powder bed fusion of 3d-multi-material-parts of copper-chrome-zirconia and tool steel," in 2017.
- [23] R. plc, "Renishaw: Hydraulic block manifold redesign", *Renishaw*, 2020. [Online]. Saatavissa: <https://www.renishaw.com/en/hydraulic-block-manifold-re-design-for-additive-manufacturing--38949>. Viitattu 24.01.2019.
- [24] "From prototypes to Christmas decorations: with additive manufacturing, BMW perfects 3D.", *Bmw.com*, 2020. Saatavissa: <https://www.bmw.com/en/innovation/3d-print.html>. Viitattu 09.04.2020.
- [25] A. Genc et al, "Investigation of the performances of X-ku band 3D printing pyramidal horn antennas coated with the different metals," in 2017.
- [26] "Additive manufacturing A game changer for the manufacturing industry?", *Rolandberger.com*, 2020. Saatavissa: [https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/roland\\_berger\\_additive\\_manufacturing\\_1.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_additive_manufacturing_1.pdf). Viitattu 03.03.2020.
- [27] H. Geng, *Manufacturing Engineering Handbook*. 2015.
- [28] M. Seifi et al, "Progress Towards Metal Additive Manufacturing Standardization to Support Qualification and Certification," *Jom*, vol. 69, (3), pp. 439-455, 2017.
- [29] V. K. Balla, S. Bose and A. Bandyopadhyay, "Microstructure and wear properties of laser deposited WC–12%Co composites," *Materials Science & Engineering A*, vol. 527, (24), pp. 6677-6682, 2010.

- [30] M. K. Mallik, C. S. Rao and V. V. S. Kesava rao, "Effect of Heat Treatment on Hardness of Co-Cr-Mo Alloy Deposited With Laser Engineered Net Shaping," *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 1718-1723, 2014.
- [31] M. Terner et al, "Electron Beam Melting of High Niobium Containing TiAl Alloy: Feasibility Investigation," *Steel Research International*, vol. 83, (10), pp. 943-949, 2012.
- [32] S. Akula and K. P. Karunakaran, "Hybrid adaptive layer manufacturing: An Intelligent art of direct metal rapid tooling process," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 22, (2), pp. 113-123, 2006.
- [33] "WHAT'S LUMEX Series? | Hybrid Metal 3D Printer LUMEX Series", Hybrid Metal 3D Printer LUMEX Series, 2020. Saatavissa: <https://www.lumex-mat-suura.com/english/about>. Viitattu 03.03.2020.
- [34] I. Gibson, D. Rosen and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. (2nd;2nd 2015; ed.) New York: Springer, 2015.