



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

## **3D-Tulostusmenetelmät metallisille materiaaleille**

Lauri Kunnari

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2022

# TIIVISTELMÄ

## OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Konetekniikan koulutusohjelma		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Kunnari Lauri		Työn ohjaaja yliopistolla Salakka J, yliopisto-opettaja	
Työn nimi 3D-Tulostusmenetelmät metallisille materiaaleille			
Opintosuunta Koneensuunnittelu	Työn laji Kandidaatintyö	Aika Huhtikuu 2022	Sivumäärä 32 s.
<p><b>Tiivistelmä</b></p> <p>3d-tulostus on suhteellisen uusi valmistustekniikka. Varsinkin metallisten materiaalien tulostus on nopeasti kasvava ala ja tutkimustietoa eri menetelmistä ja materiaaleista on runsaasti saatavilla. Patenttien ja brändäyksien myötä alan termejä on muodostunut runsaasti ja alaan perehtymättömälle eri nimitykset voivat aiheuttaa sekaannusta. Tässä työssä on tarkoituksena kirjallisuuden avulla tutustua eri menetelmien toimintaperiaatteisiin ja termien merkityksiin. Suunnittelussa on tärkeää tietää saatavilla olevista valmistusmenetelmistä ja niiden asettamista rajoitteista. Työn avulla lukija saa yleisen käsityksen metallien 3d-tulostukseen käytettävien menetelmien toiminnasta.</p> <p>Asiasanat: 3d-tulostus, metallit, tietokoneavusteinen valmistus</p>			
Muita tietoja			

# ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Mechanical engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Kunnari Lauri		Thesis Supervisor Salakka J, university teacher	
Title of Thesis 3D-Printing methods for metallic materials			
Major Subject Machine design	Type of Thesis Bachelor's Thesis	Submission Date April 2022	Number of Pages 32 p.
<p>Abstract</p> <p>3D printing is a relatively new manufacturing technique. 3D printing of metallic materials especially, is a growing field industry and research data of different methods and materials is readily available. The number of terms related to the industry has grown significantly due to patenting and branding and the different terms may cause confusion to those who aren't familiar with the industry.</p> <p>The purpose of this thesis is to introduce the working principles of various printing methods and terms through literature sources. Knowledge of existing manufacturing methods and their restrictions is important in designing. Through this thesis, the reader will acquire a general understanding of the methods used for printing metallic materials.</p> <p>Keywords: 3d-printing, metals, digital manufacturing</p>			
Additional Information			

# SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	6
2 Ainetta lisäävä valmistus.....	7
2.1 Historia.....	7
2.2 3d-tulostuksen prosessin kulku .....	7
2.2.1 Suunnittelu.....	8
2.2.2 Muuntaminen STL formaattiin .....	8
2.2.3 Koodin muokkaus .....	8
2.2.4 Tulostimen valmistelu .....	9
2.2.5 Kappaleen valmistus .....	9
2.2.6 Irrotus ja puhdistus .....	9
2.2.7 Jälkikäsittely .....	10
2.2.8 Käyttö .....	10
2.3 3D-Tulostuksen markkinatilanne .....	11
3 Powder bed fusion.....	12
3.1 Lasertoimisen laitteen ominaisuuksia .....	13
3.2 Elektronisuihkuun perustuvan laitteen ominaisuuksia.....	14
3.3 Jauheen liitosmekanismit .....	15
3.3.1 Solid state sintering.....	15
3.3.2 Liquid phase sintering.....	16
3.3.3 Chemically induced binding.....	16
3.3.4 Full melting.....	16
4 Directed energy deposition .....	17
5 Sheet lamination.....	19
5.1 Liimaliitos .....	20
5.2 Lämpöliitos .....	20
5.3 Pulttiliitos .....	20
5.4 Ultraäänihitsaus.....	21
6 Binder jetting.....	22
6.1 Materiaalit .....	22
6.2 Jälkikäsittely.....	23
7 FDM-Tulostus .....	24
8 3d-tulostuksella saavutettavia etuja.....	26
9 Yhteenveto .....	28
10 Lähdeluettelo.....	29

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

AM	Materiaalia lisäävä valmistus (additive manufacturing)
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (computer aided design)
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
EBM	Elektronisuihkusulatus (electron beam melting)
FDM	Fused deposition modelling
PBF	Jauhepetifuusio (powder bed fusion)
SSS	Kiinteäfaasisintraus (solid state sintering)
STL	Vektorimuotoinen pintamalli (standard tessellation language)

## 1 JOHDANTO

Metallien 3d-tulostus on alati kehittyvä ja kasvava menetelmä tuotteiden valmistuksessa. Kiinnostus teknologiaa kohtaan on viime aikoina ollut suurta ja laitteiston hinnan laskun myötä yhä useamman tavoitettavissa. 3d-tulostamalla pystytään valmistamaan tarkasti ja nopeasti aikaisempaa monimutkaisempia ja kevyempiä kappaleita, mihin lastuavat menetelmät eivät välttämättä pysty. Valmistajien kiinnostus pienempää materiaalin käyttöä kohtaan ympäristösyistä on lisääntynyt huomattavasti.

Metallien 3d-tulostuksen termistö on melkoinen viidakko ja erityyppisiä laitteita on markkinoilla yhä enemmän. Käytännössä samaa menetelmää voidaan nimittää usealla eri nimellä laitevalmistajien omien brändäysten myötä. Työn tarkoituksena on perehtyä erityisesti metallien 3d-tulostukseen käytettäviin menetelmiin, eri laitteiden teknisiin ominaisuuksiin ja erityispiirteisiin.

## 2 AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

3d-tulostus on yleisesti käytetty synonyymi lisäävästä valmistusmenetelmästä. Toisin kuin perinteisillä lastuavilla valmistusmenetelmillä, 3d-tulostamalla kappale valmistetaan liittämällä lisää materiaalia kappaleeseen kerros kerrokselta. Menetelmällä voidaan tuottaa fyysisiä kappaleita suoraan tietokonemallin avulla. Tämä tuo valmistukseen ja prototyyppien luomiseen joustavuutta. Valmistettavan kappaleen kompleksisuus ei tuota ylimääräisiä kustannuksia ja tuotteen muotoilulle asetetut rajoitteet vähenevät huomattavasti. Tulostettavia materiaaleja ovat yleisimmät kestonuovit, keraamit, komposiitit ja metallit. Ainetta lisäävän valmistuksen termistö on standardoitu standardissa SFS-EN ISO/ASTM 52900:202. (Duda & Raghavan 2016)

### 2.1 Historia

3d-tulostuksen kehitystyö alkoi 1960-luvulla Ohiossa. Silloisen tutkimuksen tavoitteena oli luoda laite, joka polymerisoi hartsia käyttämällä kahta eri aallonpituudella toimivaa laservaloa. Myöhemmin 1980-luvulla Japanilainen Hideo Kodama kehitti automaattisen laitteen, jolla voidaan valmistaa kappaleita kovettamalla ohuita kerroksia valoherkkää hartsia ohjatulla ultraviolettivalolla, mutta epäonnistui saamaan menetelmälle patenttia. Ensimmäinen patentti teknologiasta myönnettiin vuonna 1984, kun yhdysvaltalainen kalusteseppä Charles Hull jatkokehitti ja patentoi Kodaman alun perin keksimän prosessin, jota kutsui stereolitografiaksi. Ensimmäinen tekniikkaa hyödyntävä laite tuli markkinoille vuonna 1987. Heti seuraavina vuosina laitevalmistajat Sony ja D-Mec toivat markkinoille omat stereolitografiaan perustuvat laitteensa. Tämän jälkeen 1990-luvulla kehitettiin useita stereolitografiasta poikkeavia tulostusmenetelmiä. 1990-luvulta alkaen markkinoille on tuotu jotain uutta vuosittain, ja laitevalmistajien määrä on kasvanut koko ajan. (Wohlers and Gornet 2016)

### 2.2 3d-tulostuksen prosessin kulku

3d-tulostuksessa työvaiheet aina kappaleen suunnittelusta valmiiseen tuotteeseen kulkevat saman kaavan mukaan riippumatta käytettävästä tulostusmetodista. Gibson et

al. (2015) jakaa tulostuksen vaiheet kahdeksaan osioon, jotka ovat: kappaleen suunnittelu, tiedoston muuttaminen STL-formaattiin, koodin muokkaus, tulostimen valmistelu, kappaleen valmistus, irrotus ja puhdistus, jälkikäsittely ja viimeisenä kappaleen käyttö. Tämä on vain yksi tapa jakaa vaiheet. Esimerkiksi suunnittelijan näkökulmasta vaiheiden jaossa suunnitteluosuus voisi jakautua useampaan osioon.(Gibson et al. 2015 s.43)

### **2.2.1 Suunnittelu**

3d-tulostettavan kappaleen suunnittelutyö aloitetaan kuten minkä tahansa muunkin tuotteen suunnittelu. Ainoa rajoittava tekijä on se, että lopullisen piirroksen tulee olla piirrettyä tietokoneavusteisella suunnitteluohjelmalla eli CADilla. Nykyaikainen 3d-tulostin on ollut mahdollista saada toimimaan vasta sen jälkeen, kun tietokoneella on pystynyt mallintamaan kiinteän, yhtenäisen kappaleen. (Gibson et al. 2015 s.44)

### **2.2.2 Muuntaminen STL formaattiin**

Toisena vaiheena on muuntaa valmistettavasta osasta tehty CAD-malli STL tiedostomuotoon. STL on kaikkien laitevalmistajien käyttämä vektorimuotoinen malli valmistettavan kappaleen pinnasta ja se ei sisällä tietoa kappaleen materiaalista, väristä ja muokkaushistoriasta. STL muotoinen malli on aina approksimaatio alkuperäisestä muodosta, sillä se koostuu pienistä vektorikolmioista. Mitä pienempiä kolmioita luodaan, sitä tarkemmin STL malli vastaa alkuperäistä muotoa. (Gibson et al. 2015 s.45–46)

### **2.2.3 Koodin muokkaus**

Kun suunniteltu kappale on saatu muunnettua STL formaattiin, täytyy sille tehdä tulostusohjelma. Laitteet toimivat yleensä koordinaatteja sisältävällä G-koodilla, kuten automaattijyrsimet ja -sorvit. Laitevalmistajat tarjoavat omille laitteilleen sopivia työkaluja tulostusohjelman luomiseksi. Tulostusohjelmaa tehdessä määrätään esimerkiksi mihin kohtaan tulostusalueella laite kappaleen valmistaa ja millaisia tukirakenteita mahdollisesti käytetään.(Gibson et al. 2015 s.47)



### 2.2.4 Tulostimen valmistelu

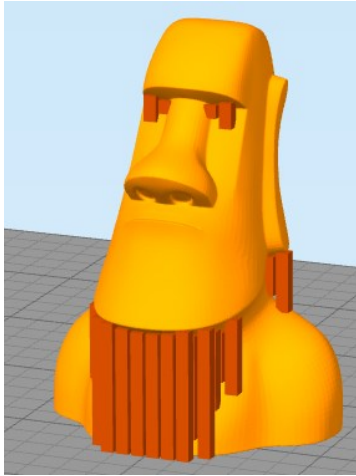
Tulostimen oikeaoppisella valmistelulla ja säätämällä tulostusta varten on huomattava vaikutus valmistettavan tuotteen laatuun. Yleensä yhdellä laitteella voi tulostaa useita materiaaleja, joten siirryttäessä uuteen materiaaliin tulee vanhan materiaalin jämät poistaa laitteesta. Erittäin tärkeä kohta ennen tulostusta on tulostusalustan suoruuden tarkistus. Jos alusta ei ole suorassa, tulee ensimmäisen kerroksen kanssa ongelmia, jotka heijastuvat koko loppu tulostukseen. Monia näistä kohdista pystytään automatisoimaan käyttäjävirheiden minimoimiseksi. (Gibson et al. 2015 s.47–48)

### 2.2.5 Kappaleen valmistus

Itse valmistusosuus on käytännössä täysin automatisoitua. Tulostuksen alkupuolella voidaan tarvita joitain manuaalisia korjausliikkeitä. Prosessia tulee pitää silmällä, sillä yksikin virhe jossain kohtaa tulostusta voi pilata kaikki ylemmät kerrokset. Jos virhe havaitaan ajoissa, tulostus keretään pysäyttää ja virhe korjata, tai aloittaa tulostus alusta. Jos virhettä ei havaita, voi laite esimerkiksi törmätä kappaleeseen ja kärsiä lieviä vaurioita. Vaikkei vaurioita syntyisi, kuluu turhaa materiaalia tulostettaessa viallinen tuote loppuun asti. (Gibson et al. 2015 s.48)

### 2.2.6 Irrotus ja puhdistus

Tulostuksen jälkeen valmis tuote tulee irrottaa tulostusalustasta ja mahdollinen ympäröivä materiaali poistaa. Kappaleen tulostuksessa on voitu myös tarvita kuvan 1 patsaan leukaa tukevien tolppien kaltaisia yli roikkuvia muotoja tukevia tukirakenteita. Näiden tukirakenteiden poisto on menetelmästä riippuen erittäin helppoa tai varsin työlästä. Joillain menetelmillä tulostettavat tukirakenteet muodostetaan helposti syöpyvästä materiaalista toisin kuin loppu kappale, jolloin tuet voidaan poistaa käyttämällä happoa tai liuotinta. Metallisten tulosteiden tukirakenteiden poisto voi vaatia käyttämään kovempia työkaluja kuten vannesahaa tai jyrshintä. (Gibson et al. 2015 s.48–49)



Kuva 1. Tukirakenteet tulosteessa. (Simplify3D 2022)

### 2.2.7 Jälkikäsittely

Valmis tuloste voi vaatia menetelmästä riippuen erilaisia jälkikäsittelyjä. Jälkikäsittelytapoja ovat esimerkiksi kiillotus ja hionta, erilaiset pinnoitteet tai maalaus. Joillain menetelmillä kappale tarvitsee jälkikäsittelyksi sintrauksen uunissa tai jopa osittaisen sulattamisen mekaanisten ominaisuuksien parantamiseksi. Erilaiset lastuavat toimenpiteet kuten CNC jyrsintä tai reikien poraus ja kierteitys ovat tarpeen erittäin mittatarkkoja ominaisuuksia vaadittaessa. (Gibson et al. 2015 s.49)

### 2.2.8 Käyttö

Viimeinen vaihe on valmiin kappaleen käyttöönotto. 3d-tulostamalla valmistettujen kappaleiden käytössä tulee huomioida niiden mahdollisesti eroavat mekaaniset ominaisuudet perinteisillä menetelmillä valmistettuihin kappaleisiin nähden. Lähes kaikissa tapauksissa tulostetun kappaleen mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat kuormitussuuntaan nähden. Yleisesti kerrosten välinen lujuus eroaa kerroksen suuntaisesta lujuudesta enemmän tai vähemmän. Metallisilla materiaaleilla nopea jäähtyminen tuo kappaleeseen ominaisuuksia, jotka voivat olla toivottuja tai haitallisia käyttökohteesta riippuen. Osaava suunnittelija ottaa valmistusprosessin tuomat ominaisuudet huomioon jo suunnittelussa. (Gibson et al. 2015 s.49)

## 2.3 3D-Tulostuksen markkinatilanne

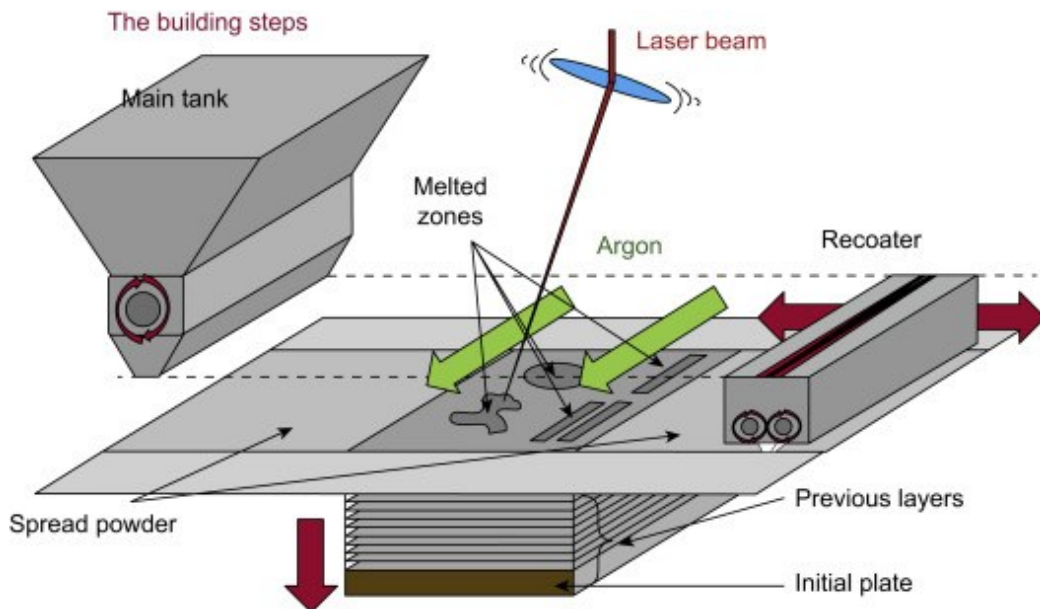
3d-tulostus on suhteellisen uusi markkinasegmentti, sillä ensimmäinen kaupallinen laite on tullut saataville vasta 1987 (Wohlers and Gornet 2016). Grand View Researchin (2022) raportista käy ilmi, että vuoden 2021 loppuun mennessä 3d-tulostuksen vuotuisten markkinoiden arvo nousi 13.84 miljardiin dollariin ja ennustetaan kasvavan 16.75 miljardiin dollariin vuoden 2022 loppuun mennessä. Kasvua arvioidaan tapahtuvan 20.8 % vuosittain aina vuoteen 2030 asti. Metallisten materiaalien tulostus kattaa hieman yli puolet koko maailman 3d-tulostusmarkkinoista.

Markkinoiden kilpailutilanne ei ole huolestuttava, mutta on havaittavissa muutamien suurimpien yritysten dominoivan alaa. Pienemmillä yrityksillä voi olla hankala päästä mukaan isojen laitevalmistajien joukkoon. Suuret yritykset harjoittavat aggressiivista patenttipolitiikkaa, joten monet käyttökelpoiset ideat voivat olla suojattuja jo kauan ennen markkinoille tuloa. Pienempien yritysten pääsy markkinoille voi tapahtua esimerkiksi palveluntarjonnalla, tai kehittämällä itsenäisiä lisävarusteita olemassa oleville laitteille. (Mordor intelligence 2022)

3d-tulostuksen käyttökohteet jakautuvat kolmeen segmenttiin: prototyypit, valmiit tuotteet ja työkalut. Vuonna 2021 prototyyppien ja mallikappaleiden valmistus oli johtavassa asemassa markkinoilla. Toiseksi suurin osuus markkinoista tällä hetkellä on valmiiden ja käyttöön kelpaavien osien valmistus ja työkalujen ja muottien osuus jää pienimmäksi. Ajoneuvoteollisuus on markkinajohtajana merkittävä tekijä tulevaisuuden tarpeiden määrittämisessä. Sähköautojen ja ajoneuvojen alati tiukentuvien vaatimusten myötä prototyypit ja etenkin valmiiden kappaleiden valmistus esittää suuren kasvun merkkejä alalla. Vastapainoksi lääketieteessä etenkin prototyyppien ja erilaisten testikappaleiden tarve on huomattava. Ennusteissa näiden kolmen segmentin oletetaan säilyttävän lähitulevaisuudessa valtasuhteensa. Pidemmällä aikavälillä valmiit osat voivat nousta kärkisijalle. (Grand View Research 2022; Marketsandmarkets 2021)

### 3 POWDER BED FUSION

Powder bed fusion, eli jauhepetifuusio, myöhemmin PBF, on yksi ensimmäisiä metallien 3d-tulostukseen käytettyjä tekniikoita. Kaikkien PBF- laitteiden perusrakenne on samanlainen ja suurimmat erot laitteiden välillä ovat mukautuksia eri materiaaleille tai eri valmistajien keinoja kiertää toisten patenteja. Laite koostuu pystysuunnassa liikkuvasta tulostusalustasta, jauhesäiliöstä, jauheenlevittimestä ja lämmönlähteestä. (Gibson et al. 2015). Laservaloa lämmönlähteenä käyttävän PBF- laitteen toiminta on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Lasertoimisen PBF laitteen perusrakenne (Rigo & Engel 2013)

Tulostus tapahtuu suljetussa tilassa yleensä kohotetussa lämpötilassa. Ensin jauheenlevitin levittää hyvin ohuen kerroksen hienojakoista jauhetta tulostusalustalle. Tämän jälkeen lämmönlähteenä toimiva laser tai elektronisuihku sulattaa jauheen halutulta alueelta saaden aikaan kiinteän kaksikulotteisen kerroksen, joka on poikkileikkaus valmistettavasta kappaleesta. Tulostusalustaa lasketaan alaspäin ja levitin tuo uuden kerroksen käyttämättömä jauhetta edellisen kerroksen päälle. Näitä kerroksia valmistetaan niin monta, kunnes kappale on kokonaan valmis ja se voidaan nostaa käyttämättömän jauheen seasta.

### 3.1 Lasertoimisen laitteen ominaisuuksia

Lasertoimisesta PBF- laitteesta käytetään useita eri nimityksiä, kuten selective laser melting, direct metal laser sintering, laser cusing, direct metal laser melting ja laser metal fusion. Kaikki nimitykset viittaavat samaan menetelmään ja ovat vain eri laitevalmistajien käyttämiä nimityksiä omille laitteilleen ja käyttävät eri liitosmekanismeja jauheen kovettamiseen. PBF-laitteessa, joka käyttää laservaloa, voidaan käyttää laajaa valikoimaa eri materiaaleja. Lähes mikä tahansa materiaali, joka voidaan sulattaa ja uudelleen kiinteyttää, toimii kyseisessä laitteessa. Käytettäviä materiaaleja ovat polymeerit, metallit, keraamit ja komposiitit.(Gibson et al. 2015; Yadroitsev et al. 2021)

Menetelmässä energia absorboituu laservalosta tulostettavaan materiaaliin ja muuttuu lämmöksi. Metallisille materiaaleille käytetään yleisimmin Yb- kuitulaseria, jonka aallonpituus on  $1070 \pm 10$  nm. Markkinoilla on laitteita, joiden laserien teho ylittää 1000W:n asti ja laitevalmistajilta on markkinoilla myös useammalla laserilla varustettuja laitteita entistä nopeampaan tuotantoon. (Yadroitsev et al. 2021 s.21–23)

Tulostettavat kerrospaksuudet laserilla ovat yleisesti 20–100 mikrometriä ja tulostuspinta-ala on jopa 400 x 800 mm. Koska esilämmityslämpötila on suhteellisen matala – noin 200°C, käyttämätön jauhe ei kovetu lämmön vaikutuksesta. Yli jäänyttä jauhetta voidaan käyttää uudelleen sekoittamalla joukkoon uutta jauhetta. Tulostetun nopeasti jäähtyvän metallin korkeiden sisäisten jännitysten takia yli roikkuvat ulokkeet täytyy kiinnittää tulostusalustaan tukirakenteilla vääntymien välttämiseksi. (Herzog et al. 2016; Rigo et al. 2013).

Laitteissa käytetään yleisesti inerttiä suojakaasua, esimerkiksi argonia tai typpeä, suojaamaan tulostusprosessia hapettumiselta. Virtaava kaasu vie mukanaan metallin sulaessa syntyvät höyryt ja vähentää valmistettavan kappaleen huokoisuutta huomattavasti. Huokoisuuden väheneminen johtaa suurempaan lujuuteen ja parempaan pinnanlaatuun. (Ferrari et al. 2012)

### 3.2 Elektronisuihkuun perustuvan laitteen ominaisuuksia

Electron beam melting, myöhemmin EBM, käyttää lämmönlähteenä korkeaenergistä elektronisuihkuja. Vaikka EBM-laitteen toimintaperiaate on melko samanlainen kuin lasertoimisen tulostimen, on niiden välillä isojakoin eroja. Laitteessa käytetään paljon kuumempaa esilämmitystä, kuin vastaavassa lasertoimisessa laitteessa ja tulostuskammio imetään tyhjiöksi. Loput erot johtuvat pitkälti käytettävän lämmönlähteen ominaisuuksista. Kun laser siirtää energiaa jauheeseen fotoneina, siirtyy energia EBM-laitteessa elektronien liike-energiana. Tästä johtuen jauhepartikkelit saavat negatiivisen varauksen, joka voi johtaa jauheen pölyämiseen magneettisten voimien vuoksi. Kyseisen ilmiön vuoksi EBM-laitteen jauheen täytyy olla hyvin sähköä johtavaa, joten tulostettavat materiaalit rajoittuvat käytännössä metalleihin. Elektronisuihku on hajanaisempi kuin laser, jotta liian negatiivisesti varautuneita pisteitä ei pääse syntymään. Tästä johtuen taas lämmön vaikutuksen alainen alue on EBM-menetelmässä suurempi, kuin laserilla. Samasta syystä myös jauheen raekoko, kerrospaksuus ja yksityiskohdat täytyvät olla suurempia. (Gibson et al. 2015 s.136–140)

EBM- laitteen esilämmitys hoidetaan hajauttamalla elektronisuihku koko tulostusalueen alueelle käyttämättä muita ulkoisia lämmönlähteitä. Korkea, jopa yli 800°C:n esilämmityslämpötila aiheuttaa käyttämättä jäävän jauheen kovettumisen ja vähentää kappaleeseen jääviä sisäisiä jännityksiä. Tämä ilmiö poistaa tarpeen käyttää erillisiä tukirakenteita vaakatasossa kulkeville rakenteille. Samasta syystä johtuen kappale ei ole suoraan valmis tulostuksen päätyttyä, vaan vaatii kovettuneen jauheen poiston kiinteän kappaleen pinnasta. Huomattava haittapuoli korkeassa esilämmityslämpötilassa on, ettei käyttämättä jäänyttä jauhetta voida suoraan uusiokäyttää, vaan siitä tulee metallijätettä. (Rigo & Engel 2013; Herzog et al. 2016)

Elektronisuihkuun muodostaminen on huomattavasti taloudellisempaa, kuin laservalon muodostus. Sähköenergia saadaan muuntumaan lähes kokonaan elektronisuihkuksi, kun perinteisten laserien hyötysuhde on 10–20 % välillä. Varsinkin suuremmilla tehoilla elektronisuihku on huomattavasti edullisempi ratkaisu kuin laser. Taloudellisempien kuitulasereiden kehittyessä elektronisuihkuun etumatka hupenee tältä osin.

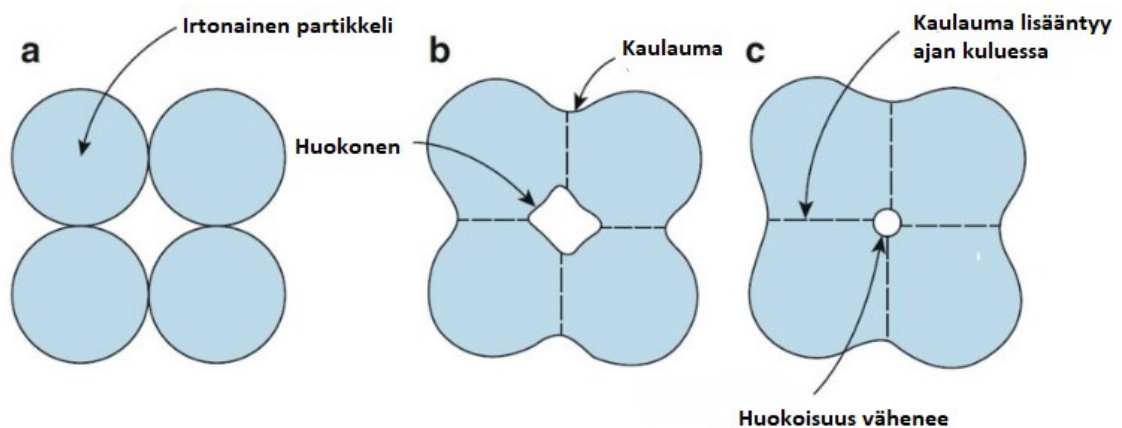
Elektronisuihkun erinomainen skannausnopeus on edelleen menetelmän suurimpia etuja laseriin nähden. (Gibson et al. 2015 s.136–140)

### 3.3 Jauheen liitosmekanismit

Jauhemaisen materiaalin yhteen liittämiseen on neljä erilaista mekanismia, joista osa voidaan jakaa vielä useaan alaluokkaan. Jauhepartikkelien yhteenliittymisen mekanismeista ovat SSS – solid state sintering, LPS – liquid phase sintering, full melting ja chemically induced binding. (Kruth et al. 2007; Gibson et al. 2015 s.112–120)

#### 3.3.1 Solid state sintering

SSS on enää harvemmin käytössä oleva materiaalin yhteenliittämismenetelmä 3d-tulostuksessa. Prosessi tapahtuu materiaalin sulamispisteen alapuolella. Jauhepartikkelien välinen diffuusio luo partikkeleiden välille kaulautumaa, joka kasvaa ajan kuluessa. Mitä suurempi on jauheen pinta-ala – tilavuussuhde, sitä nopeammin sintrautuminen tapahtuu. Vähäisen käytön syynä on diffuusion hitaus verrattuna laserin potentiaaliseen skannausnopeuteen, joten tuottavuus jää hyvin vaatimattomaksi. Kuvassa 3 näkyy jauhepartikkelien välille syntyvä kaulauma ja sen eteneminen ajan kuluessa. (Kurth et al. 2007; Gibson et al. 2015 s.112–120)



Kuva 3. Jauhepartikkelien väliin syntyvä kaula. (Mukaillen Gibson et al. 2015)

### 3.3.2 Liquid phase sintering

LPS tarkoittaa jauheen liittämismenetelmää, jossa osa materiaalista sulaa ja osa pysyy kiinteänä. Sulanut osa materiaalista leviää nopeasti kiinteiden partikkelien väliin kapillaari-ilmiön vaikutuksesta. Sulava osa materiaalista voi olla erillistä matalamman sulamislämpötilan omaavaa niin kutsuttua liitosainetta, tai lämmönlähde voidaan säätää sulattamaan vain tietty osuus jauheesta. Liitosainejauhe voidaan sekoittaa sulamattomaksi tarkoitetun jauheen sekaan. Myös jauheet, joissa partikkelit ovat kahden aineen sekoitusta tai partikkeli on päällystetty sulavalla materiaalilla, ovat mahdollisia. Tätä ilmiötä hyödynnetään myös perinteisessä jauhemetallurgiassa. Poranterien valmistuksessa kobolttia käytetään liitosaineena volframikarbidin seassa. (Kurth et al. 2007; Gibson et al. 2015 s.112–120)

### 3.3.3 Chemically induced binding

Chemically induced binding, eli kemiallisesti aiheutettu yhteenliittyminen on menetelmä, jossa lämmön vaikutuksella saadaan jauheessa aikaan kemiallinen reaktio, jonka reaktiotuote toimii materiaalin liitosaineena. Esimerkiksi tyyppikaasun läsnä ollessa laseroitu alumiini muodostaa alumiininitridiä, joka liittyy jäljelle jäävän alumiinijauheen kiinteäksi. Tällä menetelmällä valmistettuja kappaleita yhdistää niiden suuri huokoisuus. Unissa tapahtuva jälkikäsitteily on lähes välttämätöntä (Kurth et al. 2007; Gibson et al. 2015 s.112–120)

### 3.3.4 Full melting

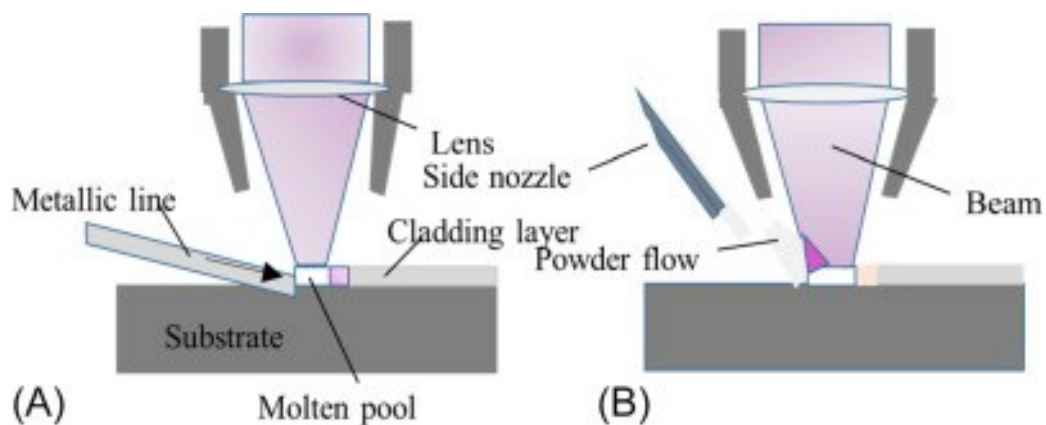
Full melting, eli täysi sulatus, on kaikkein yleisin menetelmä jauheen yhteen liittämiseen PBF- laitteessa metalliseoksia käytettäessä. Lämpöenergialle altistunut alue sulaa kokonaan ja yleensä lämpöenergia on riittävän suuri saaden sulan yltämään edeltävään kerrokseen asti. Tämä menetelmä on omiaan tuottamaan hyvin yhteen liittyneitä ja tiiviitä kappaleita. Valmistettavasta kappaleesta saadaan jopa 99.9 % tiivis, eikä jälkikäsitteilyä näin ollen tarvita. Suurin osa käytettävistä teknisistä metalleista tulostetaan täysin sulattamalla. Nopea materiaalin sulaminen ja jäähtyminen luo joissain tapauksissa metalliin halutumman kaltaisen rakenteen, kuin valetussa tai taotussa kappaleessa. (Kurth et al. 2007; Gibson et al. 2015 s.112–120)



## 4 DIRECTED ENERGY DEPOSITION

DED – directed energy deposition eli suomeksi suunnatulla energialla kerrostaminen on pääasiassa metallien 3d-tulostamiseen käytettävä prosessi. DED-prosessilla valmistetaan kappaleita sulattamalla alla olevaa kerrosta ja yhtäaikaisesti syötettävää uutta materiaalia. Toisin kuin jauhepölytuotuksessa, DED-prosessissa käytettävä materiaali ei ole valmiiksi tulostusalustalla, vaan käytettävää materiaalia syötetään sulatettavaan kohtaan. Laitteella voidaan valmistaa kokonaan uusia kappaleita tyhjälle alustalle tai korjata vanhoja kappaleita tulostamalla niiden päälle.

DED-laitteen lämmönlähteenä käytetään useimmiten laseria, mutta elektronisuihku, plasma ja sähköinen valokaari ovat myös mahdollisia. Sulatettavaan pisteeseen syötettävä materiaali voi olla jauheen tai langan muodossa. Laitteen lämmönlähde muodostaa parametreista riippuen 0,25–1 mm halkaisijaisen ja 0.1–0,5 mm syvän sulan lammen, johon uusi materiaali syötetään sekaan. Inertiä suojakaasua, kuten argonia tai heliumia, puhalletaan sulan ympärille suojaamaan prosessia. Kappaleeseen nähden liikkuva tulostuspää muodostaa syötettävästä metallista kapeita hieman päällekkäin meneviä viivoja. Ajamalla useita viivoja vierekkäin saadaan aikaan umpinainen kerros. Laitteesta ja kappaleen koosta riippuen laite liikuttaa tulostuspäätä valmistettavan kappaleen yllä tai itse kappaletta tulostuspään alla. (Gibson et al. 2015 s.245–248). Kuvassa 4 nähdään prosessin toimintaperiaate.



Kuva 4. DED prosessin toimintaperiaate langalla (A) ja jauheella (B). (Molitch-Hou 2018)

Laitteen ominaisuus syöttää materiaali suoraan sulatettavaan kohteeseen luo mahdollisuuden käyttää esimerkiksi 4- tai 5- akselista liikerataa ja robottikäsiä. Kääntyvä tulostuspää mahdollistaa tulostamisen myös kaareville pinnoille esimerkiksi jo valmiin kappaleen korjaamiseksi. Monet valmistajat tarjoavatkin jo DED-tulostuspäätä jälkiasennettavana työkaluna moniakselisiin työstökoneisiin. (Gibson et al. 2015) Se, ettei koko tulostusala tarvitse täyttää jauheella, asettaa myös vähemmän rajoitteita laitteen koolle. Tästä mainittakoon esimerkkinä Stargate 3D:n 5,5 metriä korkea robottikäsiä koostuva laserkäyttöinen ja lankasyöttöinen tulostin avaruusraketin osien valmistukseen. (Scott 2017)

Kuten aikaisemmin mainittiin, DED-laitteessa tulostusmateriaali voidaan syöttää joko jauheena tai kiinteänä lankana. Tulostettavan kappaleen suunnittelussa ja fyysisissä ominaisuuksissa on eroja jauheella ja langalla syötettävien laitteiden välillä. Jauhetta käyttävä laite on hyvin monipuolinen, sillä erittäin monet tulostusmateriaalit ovat saatavilla jauheena. Tulostuksessa kuitenkin osa jauheesta jää sulan alueen ulkopuolelle. Jos ylimääräistä jauhetta ei saada poistettua tehokkaasti, on vaarana, että materiaalia jää onttojen rakenteiden sisään. Talteen otetun jauheen tulisi pysyä mahdollisimman puhtaana, jotta se voidaan käyttää uudelleen. Materiaalinaan metallilankaa käyttävä laite sulattaa käytännössä 100 % syötetystä materiaalista ja lanka on huomattavasti halvempaa kuin jauhe. Yleisesti lankasyöttöisen laitteen tulostusnopeus on huomattavasti suurempi kuin jauhetta käyttävillä laitteilla ja kappaleista saadaan erittäin tiiviitä. Huonona puolena lankaa käyttävän laitteen mittatarkkuus ja kyky tulostaa pieniä yksityiskohtia ovat jauhekäyttöistä laitetta heikompia. Kappaletta suunnitellessa tuleekin jo päättää, haluaako valmistuksessa painottaa hyvää pinnanlaatua ja mittatarkkoja piirteitä vai halutaanko nopeammin valmistettava osa karkeammilla yksityiskohdilla. (Yi et al. 2004; Gibson et al. 2015)

## 5 SHEET LAMINATION

Sheet lamination eli suomeksi levyjen laminointi on yksi ensimmäisiä kaupallistettuja 3d-tulostusmenetelmiä. Yhdessä ensimmäisistä sheet lamination laitteissa käytettiin materiaalina liimapintaista paperia, joka saatiin tarttumaan aiempaan kerrokseen lämmitetyn rullan avulla. Kappaleen ääriviivojen leikkaukseen käytettiin tietokoneohjattua CO2-laseria. Prosessia on sittemmin kehitetty toimimaan uusilla materiaaleilla ja liittämismenetelmillä. Menetelmän perusidea on silti edelleen sama, eli prosessissa ohuita materiaaliarkkeja liitetään toisiinsa päällekkäin ja valmistettavan kappaleen muoto leikataan arkista. Arkit voidaan leikata muotoon ennen tai jälkeen liittämisen prosessin. Lähes mikä tahansa ohuena arkkina saatavilla oleva materiaali on käyttökelpoinen. Materiaaliarkkien liittämiseen on neljä eri mekanismia, jotka ovat; liimaaminen, lämpöliitos, puristaminen ja ultraäänihitsaus. Kuvassa 5 vuoden 1991 sheet lamination-laitteen toimintaperiaate. (Feygin and Hsieh 1991; Gibson et al. 2015 s.219)

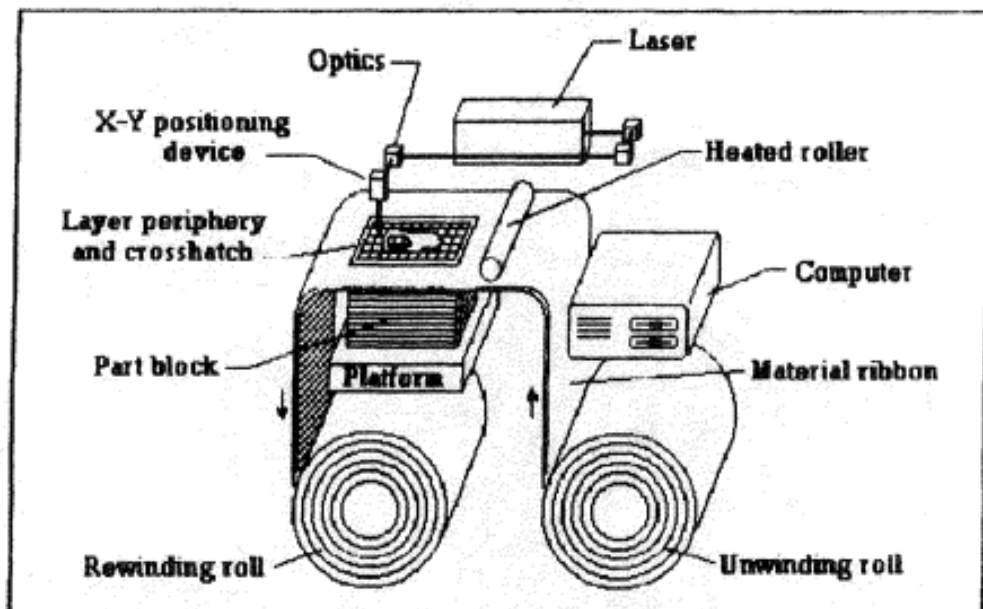


Figure 3: machine structure

Kuva 5. Sheet lamination-laitteen toiminta. (Feygin & Hsieh 1991)

## 5.1 Liimaliitos

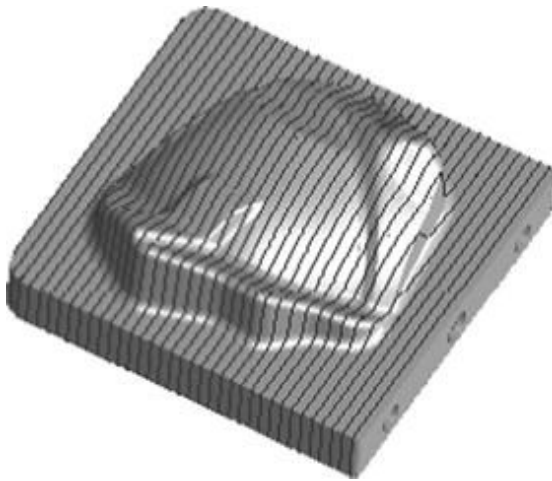
Ensimmäiset laitteet käyttivät materiaaliarkkien liittämiseen nopeasti kuivuvaa liimaa. Liimaamalla voidaan liittää lähes mitä tahansa saatavilla olevaa materiaalia. Eniten käytetty materiaali liimaavalla metodilla on paperi ja jotkin laitteet käyttävätkin materiaalina tavallista tulostuspaperia. Valmis tuote on rakenteeltaan vanerin tai liimapuulevyn kaltainen. Liimaliitosta käytävä laite on nopea, edullinen hankkia ja käyttää verrattuna muihin 3d-tulostusmenetelmiin.(Gibson et al. 2015; Feygin & Hsieh 1991)

## 5.2 Lämpöliitos

Ohutlevyjen liittäminen toisiinsa onnistuu myös lämmön avulla. Yi et al. 2004 tutkimuksessa 1 mm paksuja ruostumattomasta teräksestä valmistettuja muotoon leikattuja levyjä liitettiin toisiinsa lämmön avulla. Tuloksista käy ilmi, että levyihin saatiin erittäin hyvä liitos ilman katkeavuutta metallin mikrorakenteessa. Lämpöä liittämiseen käytävä sheet lamination ei ole kuitenkaan osoittanut suurta kaupallista kiinnostusta prosessin hankaluuden ja kalliiden kustannuksien vuoksi (Gibson et al. 2015).

## 5.3 Pulttiliitos

Yksinkertaisia muotoja valmistettaessa käytettävät levyt voidaan liittää toisiinsa pulttaamalla. Pulttiliitosta voidaan käyttää esimerkiksi kuidutusmuottien valmistuksessa. Metallilevyihin leikataan haluttu muoto yhdelle sivulle ja kolme muuta sivua jätetään suorakaiteen muotoiseksi. Menetelmän etuihin kuuluu helppo kasaus ja mahdollisuus purkaa valmistettu tuote profiilin muuttamista varten. Kuvassa 6 esimerkki pulttiliitoksella valmistettavasta muotista.(Gibson et al. 2015 s.227)



Kuva 6. Pulttiliitoksella valmistettava muotti. (Gibson et al. 2015 s.227)

#### 5.4 Ultraäänihitsaus

Ultraäänihitsaukseen perustuva menetelmä on uusimpia ja monipuolisimpia sheet laminationin kehityssuuntia. Menetelmällä voidaan 3d-tulostaa kiinteitä metallisia ja metallikomposiittisia kappaleita ilman sulatus – jäähditys sykliä. Tällä vältetään nopeiden lämpösykliä aiheuttamat virheet valmistettavassa kappaleessa. Valmistettava kappale rakennetaan tukevalle lämmitetylle alustalle kerroksittain ohuista vieriviereen liitettävistä nauhoista. Laite syöttää ohutta ja kapeaa metallinauhaa tulostettavaan kohtaan ja heti perässä kulkeva sonotrodi, eli ultraäänivärähtelyä tuottava hitsauskiekko, liittää nauhan värähtelyllä ja normaalivoiman luomalla paineella edelliseen kerrokseen. Samaan laitteeseen voi olla yhdistettynä CNC – jyrsin, jolla halutun geometrian yli menevä nauha jyrsitään pois. CNC – jyrsimen ansiosta menetelmällä saadaan valmistettua erittäin mittatarkkoja kappaleita ja materiaalin kerrospaksuudesta riippuva kaltevien pintojen porrasmaisuus saadaan poistettua. (Gibson et al. 2015 s.228–229)

Vaikka ultraäänihitsauksella saadaan valmistettua lähes täysin tiiviitä kappaleita ja suurimmat lujuudet yltävät vastaavan taotun kappaleen tasolle, jää kerrosten välinen veto- ja leikkauslujuus jopa vain yhteen viidesosaan kahteen muuhun suuntaan verrattuna. Käyttämällä erilaisia jälki- ja lämpökäsittelyitä kerrosten välinen lujuus saadaan kaksin- tai jopa kolminkertaistettua käsittelemättömään kappaleeseen nähden. (Levy et al. 2018; Zhang et al. 2018)

## 6 BINDER JETTING

Binder jetting on 3d-tulostusmenetelmä, joka kehitettiin Massachusetsissa vuonna 1993. Prosessissa nestemäistä liitosainetta ruiskutetaan tulostusalustalla olevaan jauhekerrokseen haluttuun geometriaan. Kun yksi kerros on tulostettu, jauhepetiä lasketaan alaspäin ja tilalle tuodaan uutta jauhetta. Laitteen rakenne on hyvin samankaltainen PBF-laitteen kanssa. Jauheen sulattavan laserin tai elektronisuihkupään tilalla on liitosainetta suihkuttava suutin. Liitosainetta ruiskuttava suutin on hyvin samanlainen kuin tutussa mustesuihkutulostimessa, joka mahdollistaa myös kuvan 7 kaltaisten värillisten kappaleiden valmistuksen. Kun tulostus on valmis, ylimääräinen jauhe poistetaan, jonka jälkeen kappale voidaan vielä lämpökäsitellä. Yli jäävä jauhe voidaan uusiokäyttää kokonaan seuraavassa tulostuksessa. Binder jetting menetelmällä tulostusnopeus on varsin suuri, koska vain pieni osa valmistettavasta kappaleesta täytyy syöttää suuttimen läpi ison osan materiaalista ollessa valmiiksi tulostusalustalla. Menetelmä on edullinen ja skaalattavissa helposti suurempaan kokoluokkaan suurentamalla petiä ja lisäämällä suuttimien lukumäärää. (Gibson et al. 2015 s.205–207; Ziaee & Crane 2019)



Kuva 7. Binder jetting menetelmällä valmistettu värillinen kappale.(3D Systems 2022)

### 6.1 Materiaalit

Alkujaan binder jetting laitteessa käytettiin materiaalina tärkkelyspohjaista jauhetta ja liitosaineena vesipohjaista liimaa. Nykyään menetelmällä voidaan tulostaa lähes

kaikkea jauhemaista materiaalia, jopa hiekkaa. Kaupallisesti eniten käytettyjä materiaaleja ovat kipsi, hiekka, keraamit, polymeerit ja metallit. Halpojen materiaalien ja laitteiden suuren tuotantokapasiteetin vuoksi binder jetting menetelmää käytetään paljon muottien valmistuksessa. Hiekasta valmistetaan perinteisiä valumuotteja ja laitevalmistaja Voxeljet tarjoaa tarkkuusvalumuottien valmistukseen kehittämänsä akryylipohjaista jauhetta vahamaisella liitosaineella (Voxeljet 2022). Markkinoilla on paljon jauhemetalleja, joista binder jetting menetelmälle sopivia ovat esimerkiksi 316 ja 420 ruostumattomat teräkset, pronssi, titaani ja nikkelpohjaiset superseokset Inconel 625 ja Inconel 718. Y(Ziaee and Crane 2019; ExOne 2020)

## 6.2 Jälkikäsittely

Kun kappale on saatu tulostettua binder jet laitteessa ja ylimääräinen jauhe poistettua, tehdään kappaleelle yleensä lämpökäsittely. Kaikki materiaalit hiekkaa ja joitain polymeerejä lukuun ottamatta vaativat tulostuksen jälkeisen lämpökäsittelyn, jossa liima kovettuu tai vaihtoehtoisesti palaa pois ja jauhepartikkelit sintrautuvat yhteen. Lämpökäsittelyn aikana voidaan kappaletta puristaa nopeuttamaan sintrautumista. Puristaminen on varsin epäkäytännöllistä yhtään monimutkaisemmille tai herkkiä yksityiskohtia sisältäville kappaleille. Kuten jauhepetifuusiossakin, pienempirakeinen jauhe sintrautuu helpommin. Jos kappaleesta halutaan täysin tiivis pelkällä sintrauksella, kutistuu kappale alkuperäisestä tiiviyydestä riippuen jopa 15–20 %. (Ziaee and Crane 2019)

On kuitenkin mahdollista säilyttää mittatarkkuus silti saavuttaen täysi tiiviys käyttämällä matalammassa lämmössä sulavaa metallia tunkeuma-aineena. Laitevalmistaja ExOnen yksi ensimmäisistä prosesseista käyttää materiaalinaan jauhemaista 316 tai 420 laatuista ruostumatonta terästä. Tulostuksen jälkeen kappaletta sintrataan uunissa kevyesti 175 asteessa, jonka jälkeen kappaleen päälle asetetaan pronssiharkko ja uunin lämpötila nostetaan pronssin sulamispisteen yläpuolelle. Sula pronssi täyttää kaikki huokokset ja kappaleesta tulee käytännössä täysin tiivis. (Doyle et al. 2015)

## 7 FDM-TULOSTUS

FDM on lyhenne sanoista fused deposition modelling. Virallista suomenkielistä termiä ei ole, mutta suora suomennus sanoille olisi sulatekerrostuman mallinnus. FDM-tulostin toimii samalla periaatteella kuin monelle askartelusta tuttu kuumaliimapistooli. Tulostettavaa materiaalia syötetään tulostuspäähän, jossa se kuumennetaan sulamispisteeseen ja pursotetaan suuttimen läpi tulostusalustalle. Tulostuspää liikkuu yhdessä tasossa ja pursottaa valmistettavasta kappaleesta kerroksen kerrallaan. Sen jälkeen tulostuspää nousee tai alusta laskee kerroksen verran ja seuraava kerros pursotetaan edellisen päälle. FDM-tulostimien hinta on laskenut huomattavasti menetelmää suojaaneen patentin vanhennuttua vuonna 2009. (Emmett 2020) Nykyään kotikäyttöön kuluttajille tarkoitettua tulostinta, kuten kuvassa 8, voi ostaa jo alle 200 euron hintaan (3D Jake 2022).



Kuva 8. Edullinen kuluttajaluokan FDM-tulostin. (3D Jake 2022)

Prosessin suurimpia etuja ovat laitteiston ja tulostettavien materiaalien edullinen hinta. Laitteen tulostusala voidaan helposti ja halvalla kasvattaa. Suurimpia haittapuolia FDM-prosessissa ovat tulostuksen hitaus ja tarkkuus. Jos tulostusnopeutta halutaan lisätä, täytyy enemmän materiaalia saada kulkemaan tulostuspään läpi. Tätä myötä tulostuspään massa kasvaa ja materiaalin suurempi syöttö vaatii joko suurempaa



liikenopeutta tai isompaa suutinta ja kerrospaksuutta. Suuremmalla nopeudella ja tulostuspään massalla laitteen epätarkkuus ja muotovirheet lisääntyvät. Suuremmalla suutinkoolla ja kerrospaksuudella taas pienimpien yksityiskohtien tulostaminen tulee mahdottomaksi. Kappaleen kulmat eivät myöskään ole koskaan täysin teräviä, vaan kulmissa on aina vähintään suuttimen reiän säteen mittainen pyöristys. Viimeinen merkittävä heikkous FDM-tulostuksessa on kerrosten välinen lujuus. Kerrosten yhteen liittyminen ei ole aivan täydellistä ja siksi kappaleet ovatkin heikoimmillaan kerrosten välisessä suunnassa. Tämän haitan vaikutusta voidaan vähentää ottamalla kerrosten suunta suunnittelussa huomioon. (Gibson et al. 2015; Emmett 2020)

FDM-tulostimessa materiaalina käytetään monia eri kestopuoveja, joista suosituimpia ovat PET eli polyetyleenitereftalaatti, ABS eli akryylinitriilibutadieenistyreeni ja PLA eli polylaktidi. Mahdollisia tulostusmateriaaleja on huomattavasti enemmän aina nailonista moniin elastomeereihin ja kuituvahvistettuihin muoveihin. Materiaali on yleisimmin joko 1,75 mm tai 2,85 mm paksua lankaa eli filamenttia. Syötettävä materiaali voi olla joissain tapauksissa myös esimerkiksi pelletteinä, mutta tällaiset laitteet ovat erittäin harvassa. (Stevensson 2015; von Übel 2021)

FDM-tulostimella on mahdollista tulostaa myös metallijauhetta sisältäviä filamentteja. Yleisesti metallia sisältävillä filamenteilla kappaleelle on tarkoitus luoda metallinen olemus ilman toivetta metallin mekaanisista ominaisuuksista. Itse asiassa metallijauheella kyllästetty kappale on pelkästä muovista valmistettua hauraampi. Kuluttajahintaluokassa metallin osuus filamentissa asettuu 10–35 tilavuusprosenttiin. Ammattikäyttöön on saatavissa filamentteja, joissa lopputuotteen metallipitoisuus on lämpökäsittelyn jälkeen 100 %. Saatavilla olevia materiaaleja ovat esimerkiksi ruostumattomat teräkset, titaani, inconel-seokset, alumiini ja pronssi. Lämpökäsittelyssä tulosteen muovi palaa pois ja metallijauhe sintrautuu kiinteäksi. Valmistuksen mittatarkkuus ei ole järjinkin hyvä kappaleiden kutistuessa jopa 20 % lämpökäsittelyn aikana. (O'Connell and Shrivastav 2021)

## 8 3D-TULOSTUKSEN ETUJA JA HAITTOJA

3d-tulostuksella on monia huomattavia etuja perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Tulostuksen suurimpia etuja on mahdollisuus valmistaa lukuisia eri tuotteita pelkästä tietokonemallista samalla laitteella. Valmistuksessa ei tarvita eri työkaluja, muotteja tai muita vain tiettyyn työhön sopivaa välineitä. Varsinkin esituotantovaiheessa tuotteeseen on helppo tehdä muutoksia. Toisin kuin valukappale, jonka muuttamiseen tarvitaan uusi muotti, voidaan tulostettava tuotetta muuttaa pelkän tietokonemallin avulla. Myös tuotannon joustavuus on omaa luokkaansa, sillä valmistettavan tuotteen eräkoolla ei ole 3d-tulostettaessa vaikutusta tuotantonopeuteen. Huonona puolena tulostuksessa on heikohko tuotantonopeus ja tuotantoa suuremmaksi skaalattaessa tuotteen hinta ei putoa kuten perinteisillä menetelmillä. Tämän vuoksi paljon kysytyjen osien massatuotannossa ei tulla näkemään 3d-tulostuksen käyttöä. (Weller et al. 2015)

### 8.1 Materiaalien ominaisuuksia

Varsinkin metallien 3d-tulostuksessa suunnittelussa tulee ottaa huomioon materiaalin mekaaniset ominaisuudet tulostuksen jälkeen. Tulostetun tuotteen mekaaniset ominaisuudet voivat poiketa huomattavasti samasta materiaalista perinteisillä menetelmillä valmistettuun tuotteeseen nähden. Esimerkiksi Levy et al. (2018) tutkimuksessa SAE 4130 teräksestä valmistettiin testikappaleita käyttäen ultraäänihitsaukseen perustuvaa menetelmää. Testikappaleissa havaittiin huomattavia epäjatkuvuuskohtia kerrosten välillä. Myös materiaalin kovuus muuttuu kappaleen pohjan läheisyydessä merkittävästi.

Toinen esimerkki on Natali et al. (2019) tutkimus, jossa käytettiin lasertoimista jauhepetilaitetta. Tulostusmateriaalina oli niin kutsuttu haponkestävä eli 316 laatuinen ruostumaton teräs. Tulostettuja testitankoja verrattiin normaaliin valssattuun peltiin. Tulosteiden myötölujuus oli noin kolmanneksen suurempi kuin valssatun vastaavan. Vaikka myötölujuus tulostettaessa kasvoi, ei murtolujuus noussut samaa rataa, vaan jäi

huomattavasti alhaisemmaksi kuin valssatulla. Huomionarvoisin seikka on tulostetun testikappaleen todella huono 20 % murtovenymä verrattuna valssatun 70 prosenttiin.

Materiaalin ominaisuudet eivät aina välttämättä heikkene, vaan joissain tapauksissa tulostamalla päästään parhaimpaan tulokseen. Yksi näistä materiaaleista on lääketieteessä ja ilmailualalla paljon käytetty laadun 5 titaani eli Ti6Al4V. Vetokokeen testisauvoja valmistettiin usealla eri PBF laitteella laseria ja elektronisuihkua käyttäen. Vertailukappale oli valmistettu perinteisesti takomalla. Kaikilla tulostimilla lujuusominaisuudet ovat joko taottua vastaavia tai parhaillaan jopa 10 % parempia. Titaaniseoksille 3d-tulostus on ylivoimainen valmistusmenetelmä, sillä titaanin lastuaminen on erittäin hankalaa ja kallista. (Zhang et al. 2018)

## 8.2 Erityisiä käyttökohteita

Metallien 3d-tulostuksella on mahdollista luoda asioita, joita ei pystytä perinteisin menetelmin valmistamaan. Autonvalmistaja Audi on onnistunut nopeuttamaan korin osien kuumamuovausta käyttämällä 3d-tulostettuja muotteja. Muottien jäähdytyskanavat voidaan tulostuksen ansiosta suunnitella paljon optimaalisemmiksi ja näin ollen muovattavat kappaleet jäähtyvät nopeammin ja tasaisemmin. (Jordan 2021) Myös avaruusteollisuudessa 3d-tulostuksen avulla on päästy tuloksiin, joihin perinteisin menetelmin ei kyetä. NASA ja startup avaruusyhtiö Relativity Space käyttävät 3d-tulostusta avaruusrakettien osien valmistukseen. Normaalisti raketin valmistukseen kuluu useita kuukausia ja käytettyjä osia on jopa 100000 kappaletta. Relativity Space on tulostuksen avulla puristanut valmistusajan yhteen kuukauteen ja tiputtanut osamäärän tuhanteen. NASA on onnistunut kehittämään entistä suurempaa kuumuutta sietävän metalliseoksen 3d-tulostusta hyväksikäyttäen. Uusi seos on nimeltään GRX-810 ja se kestää jopa 1090 celsiuksen lämpötiloja ja on jopa tuplasti lujempaa aikaisempiin seoksiin verrattuna. Lämmönkesto johtuu metallin sekaan sekoittuneista nanokokoisista oksidihiukkasista, jotka 3d-tulostuksessa voidaan tasaisesti sekoittaa materiaaliin. Materiaalia tullaan käyttämään raketimoottorin osien valmistuksessa. Osien valmistusaika on aikaisempaa nopeampi ja moottorin tehoa ja hyötysuhdetta saadaan parannettua. (Scott 2017; Brahambhatt 2022)

## 9 YHTEENVETO

Metallien 3d-tulostuksen historia on lyhyt, mutta kehitys on kulkenut hämmästyttävää vauhtia. Tulostusmenetelmiä löytyy moneen laatu- ja hintaluokkaan ja saatavilla on erittäin laaja valikoima materiaaleja. Tutkimustietoa on saatavilla hurjasti ja vanhimmatkin julkaisut ovat alan nuoruudesta johtuen melko tuoreita. Alan termistö on standardoinnista huolimatta hieman sekavaa laitevalmistajien käyttäessä prosesseista omia brändinimiään. Uskon, että tilanne helpottuu lähitulevaisuudessa laitteiden yhä yleistyessä ja termistön iskostuessa ihmisten mieliin.

3d-tulostus tuskin tulee suurissa määrin tulevaisuudessakaan korvaamaan perinteisiä valmistusmenetelmiä. Valtaosa maailmalla valmistettavista metallituotteista ovat niin yksinkertaisia muodoiltaan, suuria tuotantomääriltään, tai niiltä vaadittavat ominaisuudet painon ja optimoinnin suhteen sen verran vaatimattomia, että perinteisin menetelmin päästään taloudellisempaan tuotantoon. 3d-tulostus sopii hyvin hankalia geometrioita sisältäviin erityisosiin, joiden optimoinnilla voidaan saada aikaan suuria säästöjä. Esimerkiksi ilmailuteollisuudessa mahdollisuus osien massan pienentämiseen on kultaakin kalliimpaa entistä taloudellisempia lentokoneita suunnitellessa. Tulostettuja tuotteita tullaan käyttämään myös tehostamaan perinteisiä valmistusmenetelmiä esimerkiksi tuottamalla edistyneempiä työkaluja.

## 10 LÄHDELUETTELO

3D Jake, 2022. Creality Ender 2 Pro [verkkodokumentti]. 3D Jake. Saatavissa: <https://www.3djake.fi/creality-3d-tulostimet-ja-osat/ender-2-pro> [Vitattu 11.4.2022].

3D Systems, 2022. ProJet CJP 660Pro [verkkodokumentti]. 3D Systems. Saatavissa: <https://www.3dsystems.com/3d-printers/projet-cjp-660pro> [Vitattu 12.4.2022].

Brahambhatt, R., 2022. New NASA alloy is 1000 times more durable than what's currently used in spacecraft. [verkkodokumentti]. Bucharest: ZME Science. Saatavissa: <https://www.zmescience.com/science/news-science/nasa-alloy-spacecraft-19042022/> [viitattu 26.4.2022].

Doyle, M., Agarwal, K., Sealy, W. & Schull, K., 2015. Effect of Layer Thickness and Orientation on Mechanical Behavior of Binder Jet Stainless Steel 420 + Bronze Parts. *Procedia Manufacturing*, 1, s.251–262.

Emmett, G., 2020. What Is FDM 3D Printing? – Simply Explained [verkkodokumentti]. All3DP. Saatavissa: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/> [Vitattu 11 Apr 2022].

ExOne, 2020. ExOne Qualifies Inconel 718 for Binder Jet 3D Printing [verkkodokumentti]. ExOne. Saatavissa: <https://www.exone.com/en-US/Resources/news/ExOne-Qualifies-Inconel-718-for-Binder-Jet-3D-Prin> [Vitattu 5.4.2022].

Feygin, M. & Hsieh, B., 1991. Laminated object manufacturing (LOM): A simpler process. Teoksessa: University of Austin at Texas, ed. 1991 International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin: University of Texas at Austin, s.123–130.

Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B., 2015. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. New York: Springer, 498 s. ISBN 978-1-4939-2112-6

Grand View Research, 2022. Metal 3D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component (Hardware, Software, Services), By Technology, By Software, By Application, By Vertical, By Region, And Segment Forecasts 2022–2030. [verkkodokumentti]. San Francisco: Grand View Research. GVR-4-68038-811-4. Saatavissa: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/metal-3d-printing-market> [viitattu 10.4.2022]. 250 s.

Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. & Emmelmann, C., 2016. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392.

Jordan, C., 2021. EOS and Audi expand Range of Applications for Metal 3D Printing [verkkodokumentti]. *Krailling: EOS*. Saatavissa: <https://www.eos.info/en/presscenter/press-releases/cooperation-audi-tooling-2021> [Viitattu 14 Apr 2022].

Kruth, J.-P., Levy, G., Klocke, F. & Childs, T. H. C., 2007. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals*, 56 (2), s. 730–759.

Levy, A., Miriyev, A., Sridharan, N., Han, T., Tuval, E., Babu, S. S., Dapino, M. J. & Frage, N., 2018. Ultrasonic additive manufacturing of steel: Method, post-processing treatments and properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 256, s. 183–189.

MarketsAndMarkets 2021. 3D Printing Market with COVID-19 Impact Analysis by Offering (Printer, Material, Software, Service), Process (Binder Jetting, Direct Energy Deposition, Material Extrusion, Material Jetting, Powder Bed Fusion), Application, Vertical, Technology, and Geography - Global Forecast to 2026. [verkkodokumentti] Pune: MarketsAndMarkets. ASDR-587300. Saatavissa: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/3d-printing-market-1276.html> [viitattu 23.4.2022]. 302 s.

Molitch-Hou, M., 2018. Overview of additive manufacturing process. Teoksessa: Zhang, J., & Jung, Y. (toim.) *Additive Manufacturing*. Mississauga: Butterworth-Heinemann, s. 1–38. ISBN 978-0-12-812155-9

Mordor Intelligence, 2022. 3D PRINTING MARKET - GROWTH, TRENDS, COVID-19 IMPACT, AND FORECASTS (2022–2027). [verkkodokumentti] Gachibowli: Mordor Intelligence. Saatavissa: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/3d-printing-market>. [viitattu 23.4.2022].

Natali

O’Connell, J. & Shrivastav, A. K., 2021. The Best 3D Printer Metal Filaments of 2021 [verkkodokumentti]. All3DP. Saatavissa: <https://all3dp.com/2/3d-printer-metal-filament-basics-best-brands/> [Vitattu 12.4.2022].

Rigo, O. and Engel, C., 2013. Selective Laser Melting versus Electron Beam Melting [verkkodokumentti]. Toulouse: Sirris. Saatavissa: <https://www.slideshare.net/carstenengel/selective-laser-melting-versus-electron-beam-melting> [Vitattu 26.2.2022].

Scott, C., 2017. Relativity space takes inexpensive rockets to new level with giant stargate 3d printer. [verkkodokumentti]. New York: 3DPrint.com Saatavissa: <https://3dprint.com/191479/relativity-space-startup/> [Vitattu 3.3.2022].

Simplify3D, 2022. Adding and Modifying Support Structures [verkkodokumentti]. Cincinnati: Simplify3D Saatavissa: <https://www.simplify3d.com/support/articles/adding-and-modifying-support-structures/> [Vitattu 14 Apr 2022].

Stevensson, K., 2015. A Curious Thing About 3.00 vs 1.75mm 3D Printer Filament [verkkodokumentti]. Winnipeg: Fabbaloo. Saatavissa: <https://www.fabbaloo.com/2015/07/a-curious-thing-about-300-vs-175mm-3d-printer-filament> [Vitattu 12.4.2022].

Von Übel, M., 2021. 3D Printing Materials – The Ultimate Guide [verkkodokumentti]. Munich: All3DP. Saatavissa: <https://all3dp.com/1/3d-printing-materials-guide-3d-printer-material/> [Vitattu 12.4.2022].

Voxeljet, 2022. PMMA 3D Printing for Investment Casting [verkkodokumentti].  
Friedberg: Voxeljet. Saatavissa: <https://www.voxeljet.com/3d-printing-solution/investment-casting/> [Vitattu 5.4.2022].

Weller C., Kleer R. & Piller F., 2015. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. *International Journal of Production Economics*, 164, S. 43–56.

Wohlers, T. & Gornet, T., 2016. History of additive manufacturing [verkkodokumentti].  
Colorado: Wohlers associates. Saatavissa: <http://www.wohlersassociates.com/history2016.pdf> [Vitattu 13 Apr 2022].

Yadroitsev, I., Yadroitsava, I. & du Plessis, A., 2021. 2 - Basics of laser powder bed fusion. Teoksessa: Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., du Plessis, A., and MacDonald, E., (toim.) *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals*. Amsterdam: Elsevier, s. 15–38. ISBN 978-0-12-824090-8

Yi, S., Liu, F., Zhang, J. & Xiong, S., 2004. Study of the key technologies of LOM for functional metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 150 (1), s. 175–181.

Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y.-G., Lee, J.-H. & Zhang, J., 2018. Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27 (1), s. 1–13.

Ziaee, M. and Crane, N. B., 2019. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, s. 781–801.