

Matti Välimaa

# PROTOTYYPPIEN PIKAVALMISTUS TUOTEKEHITYKSESSÄ

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Diplomityö  
Maaliskuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Matti Välimaa: Prototyyppien pikavalmistus tuotekehityksessä  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Maaliskuu 2020

---

Prototyyppien valmistaminen on keskeinen osa tuotekehitysprosessia. Prototyyppien pikavalmistamisella pyritään nopeuttamaan ja luomaan joustavampi tuotekehitysprosessi. Nopealla tuotekehitysprosessilla pyritään saavuttamaan kilpailuetua.

Työssä selvitettiin kuinka prototyyppien pikavalmistus vaikuttaa tuotekehitysprosesseihin ja projekteihin. Lisäksi työssä kerättiin tietoa ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä, joita käytetään prototyyppien pikavalmistuksessa. Ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä kerättiin tietoa niiden peruseräiteestä, materiaaleista, tarkkuudesta ja mitä huomioitavaa kyseisessä tekniikassa on. Työhön valikoitui standardissa ISO/ASTM52900-15 määritetyistä seitsemän eri kategorian ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä neljä. Nämä neljä valikoitunutta tekniikkaa on fotopolymeerointi, jauhepetimenetelmät, materiaalin pursotus ja suorakerrostus. Valinnan kriteereinä oli tekniikan saatavuus ja sen mahdolliset erikoisominaisuudet.

Työssä luotiin tietoa, kuinka ainetta lisäävät valmistusmenetelmät vaikuttavat tuotekehitysprosesseihin, projekteihin ja niissä luotuihin tuotteisiin. Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät tekevät tuotekehitysprosesseista paljon iteratiivisempia ja nopeampia. Lisäksi ainetta lisäävät valmistusmenetelmät antavat mahdollisuuden luoda paljon innovatiivisempia ja optimoituja tuotteita. Työssä käytiin lävitse ainetta lisäävien valmistusmenetelmien ainutlaatuisista ominaisuuksista lävitse monimutkaiset muodot, hierarkkinen monimutkaisuus, toiminnallinen monimuotoisuus, materiaalien monimuotoisuus, tuotteiden asiakasräätälöinti ja tuotteiden optimointi menetelmät. Myös muottien ja työkalujen pikavalmistus käsiteltiin tässä työssä.

Lopuksi työssä pohdittiin työssä käytyjen asioiden nykytilaa ja niiden tulevaisuutta. Tulevaisuuden näkemyksissä huomioitiin tekniikoiden kehitys ja sen vaikutus uusien tuotteiden kehittämisen kannalta ja kuinka ainetta lisäävien valmistusmenetelmien markkinat tulevat muotoitumaan tulevaisuudessa ja kuinka se tulee vaikuttamaan prototyyppien pikavalmistukseen.

Avainsanat: Prototyyppien pikavalmistus, tuotekehitys, ainetta lisäävät valmistusmenetelmät, 3D-tulostus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Matti Välimaa: Rapid Prototyping in Product development  
Master of Science Thesis  
Tampere University  
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering  
March 2020

---

Prototyping is a key element of the product development process. Rapid production of prototypes aims to speed up and create a more flexible product development process. The rapid product development process aims to achieve a competitive advantage.

The thesis investigated how rapid prototype manufacturing influences product development processes and projects. In addition, the thesis collected information on additive manufacturing methods which are used for the rapid production of prototypes. Information collected on their basic principles, materials, precision and what is to be considered in these techniques. In this thesis from seven different additive manufacturing techniques which are define in standard ISO/ASTM52900-15 were selected four techniques. These four selected techniques are photopolymerization, powder bed methods, material extrusion, and direct energy deposition. The criteria for the selection were the availability of technology and its possible special features.

The thesis created information on how additive manufacturing techniques affect product development processes, projects and the products created in them. Additive manufacturing techniques makes product development processes much more iterative and faster. In addition, additive manufacturing techniques allow for create much more innovative and optimized products. The thesis went through the unique properties of additive manufacturing techniques through complex shapes, hierarchical complexity, functional complexity, material complexity, product customization, and product optimization techniques. For the rapid tooling was also discussed in this work.

Finally, the thesis focused on the current state of discussed subjects and their future. Future perspectives considered technological developments and their impact on the development of new products, and how the market for additive manufacturing methods will be shaped in the future and how it will affect the rapid production of prototypes.

Keywords: rapid prototyping, product development, additive manufacturing, 3D printing

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on kirjoitettu omasta mielenkiinnosta ainetta lisääviin valmistusmenetelmiin ja niiden hyödyntämisestä tuotekehityksessä. Työssä selvitetään ainetta lisäävien valmistusmenetelmien ainutlaatuisia ominaisuuksia ja niiden vaikutusta ja hyödyntämistä tuotekehitysprojekteissa.

Haluan kiittää diplomityöni ohjaajaa Asko Ellmania hyvästä ja kannustavasta ohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni opiskeluideni tukemisesta ja kannustamisesta.

Tampereella, 31.3.2020

Matti Välimaa

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	9
1.1 Tutkimuskysymys ja tutkimusmenetelmät .....	9
2. PIKAVALMISTUSMENETELMÄT JA NIIDEN OMINAISUUDET .....	11
2.1 Fotopolymerointi .....	13
2.1.1 Tekniikan perusperiaate .....	13
2.1.2 Materiaalit .....	15
2.1.3 Tarkkuus .....	18
2.1.4 Huomioitavaa .....	19
2.2 Jauhepetimenetelmät .....	20
2.2.1 Tekniikan perusperiaate .....	20
2.2.2 Materiaalit .....	24
2.2.3 Tarkkuus .....	28
2.2.4 Huomioitavaa .....	28
2.3 Materiaalin pursottaminen .....	29
2.3.1 Tekniikan perusperiaate .....	29
2.3.2 Materiaalit .....	32
2.3.3 Tarkkuus .....	34
2.3.4 Huomioitavaa .....	36
2.4 Suorakerrostus .....	37
2.4.1 Tekniikan perusperiaate .....	37
2.4.2 Materiaalit .....	40
2.4.3 Tarkkuus .....	40
2.4.4 Huomioitavaa .....	41
2.5 Ainetta lisäävän ja ainetta poistavan menetelmän vertailu .....	42
3. TUOTEKEHITYSPROSESSIT .....	45
4. PROTOTYYPPIEN HYÖDYNTÄMINEN TUOTEKEHITYKSESSÄ .....	51
4.1 Prototyyppien laatimisen periaatteet .....	55
4.2 Pienen tarkkuuden prototyypit .....	58
4.3 Keskisuuren tarkkuuden prototyypit .....	60
4.4 Suuren tarkkuuden prototyypit .....	63

5. PIKAVALMISTUKSEN MAHDOLLISTAMAT AINUTLAATUISET OMINAISUUDET TUOTTEISSA .....	66
5.1 Monimutkaiset muodot .....	66
5.2 Hierarkkinen monimutkaisuus .....	67
5.3 Toiminnallisuuden monimuotoisuus .....	69
5.4 Materiaalien monimuotoisuus.....	72
5.5 Tuotteiden asiakasräätälöinti.....	73
5.6 Optimointi menetelmät .....	76
6. PIKAVALMISTUKSEN MAHDOLLISUUDET MUOTTIEN JA TYÖKALUJEN VALMISTUKSESSA.....	83
6.1 Ruiskuvalaminen.....	85
6.2 Vahamallivalaminen .....	88
6.3 Muut tavat .....	89
7. POHDINNAT .....	93
8. YHTEENVETO.....	97
LÄHTEET .....	99

# KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>SL-laitteen alajärjestelmät. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 83) .....</i>	<i>14</i>
<b>Kuva 2.</b>	<i>Periaatekuvat eri fotopolymerointi tulostustekniikoiden lähestymistavoista. (Yao, Wang et al. 2018 s. 14).....</i>	<i>15</i>
<b>Kuva 3.</b>	<i>tekijät, jotka vaikuttavat tulostettavien kappaleiden pinnan karheuteen. (Upcraft, Fletcher 2003 s. 327) .....</i>	<i>19</i>
<b>Kuva 4.</b>	<i>Periaatekuva SLS, SLM, DMLS ja EBM prosesseista. (Dassault Systems 2020) .....</i>	<i>22</i>
<b>Kuva 5.</b>	<i>MJF:n periaatekuva. (FACFOX 2020) .....</i>	<i>23</i>
<b>Kuva 6.</b>	<i>Yhden tulostuskärjen laite. (Dassault Systems 2020).....</i>	<i>31</i>
<b>Kuva 7.</b>	<i>Kahden tulostuskärjen laite. (Additively 2020).....</i>	<i>31</i>
<b>Kuva 8.</b>	<i>Langalla tapahtuva EBEM-suorakerrostusprosessi. (Sciaky 2020).....</i>	<i>39</i>
<b>Kuva 9.</b>	<i>Jauheella tapahtuva laser-suorakerrostusprosessi. (TRUMPF 2020) .....</i>	<i>40</i>
<b>Kuva 10.</b>	<i>Ominaisuudet, jotka kuvaavat CNC koneistuksen ongelmia. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 13).....</i>	<i>44</i>
<b>Kuva 11.</b>	<i>Yleinen tuotekehitys prosessi. Kuuden eri vaiheen järjestys on kuvattu, sisällyttäen kunkin liiketoiminnan avaintoimintojen muutamia tyypillisimpiä tehtäviä ja vastuita kussakin vaiheessa. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 14).....</i>	<i>47</i>
<b>Kuva 12.</b>	<i>Spiraalinen tuotekehitysprosessi. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 22) .....</i>	<i>49</i>
<b>Kuva 13.</b>	<i>Monimutkaisten systeemien tuotekehitysprosessi. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 22).....</i>	<i>50</i>
<b>Kuva 14.</b>	<i>Prototyyppi voidaan luokitella sen mukaan, missä määrin ne ovat fyysisiä ja missä määrin ne toteuttavat kaikki tuotteen ominaisuudet. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 294).....</i>	<i>52</i>
<b>Kuva 15.</b>	<i>25-kN lentokoneen moottorin prototyyppi, joka on valmistettu SLS-menetelmällä. (Wimpenny, Pandey et al. 2017 s. 48).....</i>	<i>62</i>
<b>Kuva 16.</b>	<i>Robotin varsi jäykistettynä ristikkorakenteella. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 405) .....</i>	<i>67</i>
<b>Kuva 17.</b>	<i>60% CP-Ti, 40% TiC-komposiitti, joka on valmistettu LENS prosessilla. Sulamattomien karbidien (UMC) ja kiinteytyneiden karbidien (RSC) suhdetta TI-matriisissa hallitaan muuttamalla LENS-prosessiparametreja. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 406) .....</i>	<i>68</i>

<b>Kuva 18.</b>	<i>Hihnapyöräinen käärmemäinen robotti. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 407).....</i>	<i>70</i>
<b>Kuva 19.</b>	<i>Magneetti vuon valmistus käyttämällä fotopolymerointi ja suoraa kiroitusprosessia. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 409).....</i>	<i>71</i>
<b>Kuva 20.</b>	<i>3D-tulostettu signaalin vakiointipiiri. (Macdonald, Salas et al. 2014 s. 236).....</i>	<i>72</i>
<b>Kuva 21.</b>	<i>SMS-menetelmän tulokset UAV-rungon suunnitteluongelmaan. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 429).....</i>	<i>78</i>
<b>Kuva 22.</b>	<i>Wärtsilälän alkuperäinen hitsattu painotyökalu. (Etteplan 2020).....</i>	<i>80</i>
<b>Kuva 23.</b>	<i>Etteplanin suunnittelema optimoitu painotyökalu ja sen tekemiseen vaadittu prosessi. (Etteplan 2020).....</i>	<i>80</i>
<b>Kuva 24.</b>	<i>Alkuperäinen kappale, aikaisemmin optimoitu ja Etteplanin optimoima kappale. (Etteplan 2020).....</i>	<i>81</i>
<b>Kuva 25.</b>	<i>Optimoitu hydraulibloki. (3DStep 2020).....</i>	<i>81</i>
<b>Kuva 26.</b>	<i>(a) Alkuperäinen suunnittelu, (b) uudelleen suunniteltu ainetta lisääville valmistusmenetelmille. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 414)....</i>	<i>82</i>
<b>Kuva 27.</b>	<i>Kiinteä malli vedenjakoputkesta, joka on suunniteltu ainetta lisääville valmistusmenetelmille. Vasemmalla alkuperäinen malli ja oikealla uudelleen suunniteltu malli. (Thompson, Moroni et al. 2016 s. 741).....</i>	<i>82</i>
<b>Kuva 28.</b>	<i>Polymeeristä valmistetut insertit. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 441) .....</i>	<i>86</i>
<b>Kuva 29.</b>	<i>Jäähdytyskanavat ruiskuvalumuotin sisällä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 443).....</i>	<i>88</i>
<b>Kuva 30.</b>	<i>Vahamallivalun prosessikaavio. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 445).....</i>	<i>89</i>
<b>Kuva 31.</b>	<i>Materiaalin pursotusmenetelmällä tehdyt osat, joita käytetään muotteina hiilikomposiittien valmistamiseksi. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 447).....</i>	<i>91</i>
<b>Kuva 32.</b>	<i>Kiintolevykokoontalon asennus jiggi. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 448) .....</i>	<i>92</i>



## LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D	engl. 3 Dimensional, kolmiulotteinen
STL	engl. STereoLithography, stereolitografia
CNC	engl. Computer Numerical Control, työstökoneen numeerinen ohjaus
UV	engl. Ultraviolet, ultravioletti
LCD	engl. liquid crystal display, nestekidenäyttö
SLA	engl. Stereolithography, Stereolitografia
DLP	engl. Digital Light Process, digitaalinen valoprosessointi
CLIP	engl. Continuous liquid interface production, jatkuvan nesterajapinnan tuotanto
DPP	engl. Daylight Polymer Printing, näkyvän valon polymeeritulostus
AMF	engl. Additive Manufacturing File, ainetta lisäävän valmistuksen tiedostomuoto
h	kerrospaksuus
$\alpha$	pinnan rakennus kulma
PBF	engl. Powder Bed Fusion, jauhepetimenetelmät
SLS	engl. Selective Laser Sintering, selektiivinen lasersintraus
SLM	engl. Selective Laser Melting, selektiivinen lasersulatus
EBM	engl. Electron Beam Melting, elektronisuihkusulatus
MJF	engl. Multi Jet Fusion
FDM	engl. Fused Deposition Modeling
DED	engl. Direct Energy Deposition, Suorakerrostus
LENS	engl. Laser-engineered Net Shaping,
EBAM	engl. Electron Beam Additive Manufacturing
LDW	engl. Laser Deposition Welding
IoT	engl. Internet of Things, esineiden internet
LTE	engl. Long Term Evolution
NFC	engl. Near Field Communication
GPS	engl. global positioning system, maailmanlaajuinen paikannusjärjestelmä
Wifi	engl. Wireless Fidelity
WLAN	engl. Wireless Local Area Network, langaton lähiverkko
CAD	engl. Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
DMD	engl. Digital Metal Deposition
DFMA	engl. Design for additive manufacturing, ainetta lisäävän valmistuksen suunnittelu
DFM	engl. Design for Manufacturing, valmistuksen suunnittelu
FEA	engl. Finite Element Analysis
SIMP	engl. Solid Isotropic Material with Penalization
DDM	engl. Direct Digital Manufacturing, suora digitaalinen valmistus

# 1. JOHDANTO

Prototyypin valmistaminen on keskeinen osa tuotekehitysprosessia. Prototyyppien pikavalmistuksella pyritään nopeuttamaan ja luomaan joustavampi tuotekehitysprosessi ja samalla pyritään saavuttamaan kilpailuetua. Prototyyppien pikavalmistuksessa tärkeimpänä valmistusmenetelmänä on ainetta lisäävät valmistusmenetelmät, jotka myös tunnetaan nimellä 3D-tulostus. Tämän työn tarkoituksena on selvittää prototyyppien pikavalmistuksen vaikutusta tuotekehitysprosessiin ja projekteihin. Lisäksi kerätään tietoa itse prototyyppien pikavalmistuksesta ja siinä hyödynnettävistä ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä.

Ennen itse prototyyppien pikavalmistuksen hyödyntämistä tuotekehityksessä tarvitaan tietoa siinä käytetyistä ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä. Tähän työhön on valittu ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä yleisesti saatavat tekniikat. Näitä tekniikoita on fotopolymeerointi, materiaalinpursotus, jauhepetimenetelmät ja suorakerrostus. Tämän tiedon tulisi antaa suunnittelijoille käsityksen ainetta lisäävistä menetelmistä ja niiden erikoiskyvyistä verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin.

Tässä työssä prototyyppien pikavalmistus lisätään Ulrich ja Eppinger:n (2012) kirjassa esiteltyihin tuotekehitysprosessiin ja perinteisiin prototyyppimenetelmiin. Tällä lisäyksellä pyritään saavuttamaan tietoa ainetta lisäävien valmistusmenetelmien hyödyntämisestä tuotekehitysprosessissa ja prototyypeissä. Tässä työssä pyritään myös tuomaan uutta tietoa prototyyppien pikavalmistuksen hyödyntämisestä tuotekehityksessä.

Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien hyödyntäminen valmistettavissa tuotteissa on yleistymässä. Maailmalla ainetta lisäävien valmistusmenetelmien käyttäminen valmistettavissa tuotteissa ja tuotteiden kehittämisessä on paljon yleisempää kuin Suomessa. Tämän tutkimuksen perustana toimii kirjallisuusselvitys. Kirjallisuusselvityksessä käsitellään prototyyppien pikavalmistuksen vaikutuksia tuotekehitykseen. Kirjallisuuden lisäksi tässä työssä pyritään tuomaan esille omia päätelmiä kirjallisuuden perusteella selvinneiden asioiden pohjalta.

## 1.1 Tutkimuskysymys ja tutkimusmenetelmät

Tämän työn ensisijainen tutkimuskysymys on: miten ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä voidaan hyödyntää tuotekehityksessä ja miten ainetta lisääviä valmistusmenetelmät vaikuttavat tuotekehitysprosessiin? Työn toissijainen tutkimuskysymys on: minkälaisia uusia tuotteita voidaan kehittää ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä?

Tässä työssä tutkimusmenetelmänä käytetään kirjallisuustutkimusta. Kirjallisuus tutkimuksella selvitetään vastaukset edellä esitettyihin kysymyksiin. Kirjallisuuden tukena tutustutaan aiheeseen liittyviin jo toteutettuihin projekteihin ja niissä saatuihin tuloksiin.

## 2. PIKAVALMISTUSMENETELMÄT JA NIIDEN OMINAISUUDET

Prototyyppien pikavalmistus on termi, joka kehitettiin 1980-luvun puolivälissä kuvaamaan useita tekniikoita, jotka tekivät kirjaimellisesti tuotteiden prototyypit varhaisissa kehitysvaiheissa nopeasti ja automatisoidusti. Useat eri tekniikat yhdistävät olennaisesti tasomaiset materiaalikerrokset peräkkäin 3-ulotteisen kiinteän esineen muodostamiseksi. Termissä "prototyyppien pikavalmistus" ei kuitenkaan ole mitään, joka viittaa tähän yleiseen "kerrospohjaiseen" lähestymistapaan. Lisäksi on selvää, että tekniikan nykyinen käyttö ylittää paljon pelkästään prototyyppien valmistamisen. (Campbell, Bourell et al. 2012, Tuteski, Kocov et al. 2015 s. 55-56)

Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät, jotka myös tunnetaan nimellä 3D-tulostus tekniikat viittaavat prosesseihin missä luodaan kolmiulotteisia kappaleita kerrostamalla materiaalia. Prosessin kulkua ohjataan tietokoneohjatulla ohjelmalla. Kolmiulotteinen tiedostolähde viipaloidaan useaan kerrokseen, jokainen kerros sisältää joukon tietokoneohjattuja ohjeita. Ainetta lisäävissä valmistusmenetelmissä siis materiaalia lisätään aina kerros kerrokselta ja näin luodaan kolmiulotteisia kappaleita. Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät voidaan jakaa kahteen eri ryhmään: suoraan ja epäsuoraan. Suurin ero näissä on, että suorassa prosessissa malli valmistetaan suoraan käyttäen ainetta lisäävää tekniikkaa ja epäsuorassa prosessissa ainetta lisäävää tekniikkaa käytetään kappaleen luomisprosessissa.

Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistetut kappaleet voivat olla lähes minkä tahansa muotoisia. Kappaleet tuotetaan tyypillisesti käyttämällä 3D-mallin tai muun digitaalisen tietolähteen avulla, kuten STereoLithography (STL) -tiedoston. STL-tiedostot ovat yleisimpiä tiedostotyyppisiä, joita 3D-tulostimet voivat lukea.

Termi 3D-tulostus tarkoitti alun perin prosessia, jossa kerros kerrostettiin sideainetta jauhekerrokseen mustesuihkutulostimen päällä. Viime aikoina termiä 3D-tulostus käytetään suositussa kansankielessä kattamaan laajempi valikoima ainetta lisääviä valmistustekniikoita. Ammattilaisille ainetta lisäävä valmistusmenetelmän nimi on edelleen suosittu laajemman merkityksensä ja pidemmän olemassaolonsa vuoksi. Myös muita termejä käytetään, kuten työpöytävalmistus, nopea valmistus, suora digitaalinen valmistus ja prototyyppien pikavalmistus.

Standardissa ISO/ASTM52900-15 määritetään seitsemän eri kategorian ainetta lisääville valmistusmenetelmille: materiaalin pursotus, allasvalopolymerisaatio, jauhepetiteknikka, materiaalin ruiskutus, sideaineen ruiskutus, laminointi ja suorakerrostus.

3D-tulostamisen mahdollisuudet ovat rajattomat, ja ne kattavat useita teollisuuden aloja muovi- ja metalliteollisuudesta orgaanisiin materiaaleihin ja elintarvikkeisiin. 3D-tulostuksessa käytetään laajaa materiaalivalikoimaa. Jokainen niistä vastaa huolellisesti lopputuotteen teknisiä vaatimuksia mutta materiaalien käyttöä hieman rajoittaa ainetta lisäävien tekniikoiden omat rajoitukset materiaalien suhteen.

3D-tulostuksen valtavien mahdollisuuksien havainnollistamiseksi on välttämätöntä tietää perustiedot suosituimmista materiaaleista. Sintratut metallijauheet, joita käytetään perinteisessä valmistuksessa käytettyjen ruiskuvalumuotien valamiseen, tulostamiseen sekä ruiskuvaluun ja hiilikuitujen asetteluun. Ruostumaton teräs, pronssi, teräs, kulta, nikkeli-teräs, alumiini ja titaani ovat vain muutamia sopivista metalleista 3D-tulostukseen (Ngo, Kashani et al. 2018 s.175). Nämä metallit soveltuvat erityisen hyvin prototyyppien, korujen ja räätälöityjen esineiden valmistukseen.

Huomattavan laaja tarjonta eri muoveja tarjoaa laajat mahdollisuudet 3D-tulostukseen. Esimerkki muoveja, ovat akryylit, polyamidit, ABS-muovit, valikoidut polyuretaanit, epoksihartsit, nylon ja PEBA 2301. Nämä muovit mahdollistavat lukuisia ajateltavissa olevia tuotteita, kuten prototyyppejä, vaihejärjestelmiä, koristeita tai opetusmalleja. Lisäksi vahaa voidaan käyttää suunnittelun varmentamisessa, toiminnallisessa testauksessa ja hienojen ominaisuuksien yksityiskohdissa. Vahaa käytetään myös sileänä pintakäsittelynä ja muottien työstöä varten.

Hiilikuitu ja komposiitit ovat huippuluokan materiaaleja, jotka tarjoavat nopean tavan valmistaa tuotteen, joka on yhtä vahva tai vahvempi kuin metalli (Dassault Systems 2020). Niitä käytetään yleisimmin ilmailualalla. Grafeeni, hiilen allotrooppinen muoto, on kaikkien aikojen vahvin testattu materiaali. Sillä on potentiaalia luoda täysin uusia tekniikoita, osittain sen tehokkaan lämmön ja sähkönjohtavuuden sekä lähes läpinäkyvän ulkonäön ansiosta.

Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan lähemmin ainetta lisäävien tekniikoiden peruseriä, materiaaleja, tarkkuutta ja mitä huomioitavia asioita liittyy tiettyyn tekniikkaan. Tässä työssä tarkastellaan yleisimpiä tekniikoita, joita on laajalti saatavana ja niitä käytetään teollisuudessa eli fotopolymerointia, jauhepetisulatusta, materiaalin pursottamista ja suorakerrostusta. Lisäksi ainetta lisääviä valmistustekniikoita verrataan CNC-koneistukseen, joka kuuluu myös termin ”prototyyppien pikavalmistuksen” alle. Lopuksi vertailaan ainetta lisäävän ja ainetta poistavan valmistusmenetelmän hyviä ja huonoja puolia.

## 2.1 Fotopolymerointi

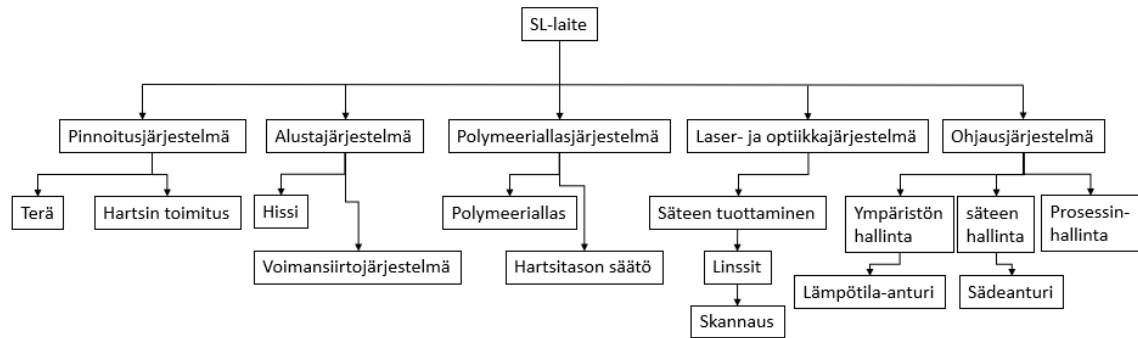
### 2.1.1 Tekniikan peruseriaate

Fotopolymerointi ainetta lisäävänä menetelmänä sisältää useita erilaisia prosesseja, jotka tukeutuvat samaan perusstrategiaan. Fotopolymerointiprosesseissa käytetään pääaineina nestemäisiä, valokovettuvia hartseja tai fotopolymeerejä. Useimmat fotopolymeerit reagoivat ultravioletin aallonpituusalueilla, mutta on myös järjestelmiä, joissa käytetään näkyvää valoa. Edellä mainitut materiaalit kovettuvat, kun valonsäteet osuvat niihin. Tätä reaktiota kutsutaan fotopolymeroinniksi ja se on tyypillisesti monimutkainen, ja siihen osallistuu monia kemiallisia osallistujia. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 63)

Fotopolymeeriprosesseja on monia erilaisia ja prosesseissa voidaan käyttää nestemäisen perusaineen kovettamiseen sekä gammasäteily, röntgensäteilyä, elektronisuihkua tai uv-valoa ja joissain tapauksessa näkyvää valoa. UV- ja näkyvävalo on kaikista yleisemmin käytettyjä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 64)

Laseriin perustuvan vanhimman tekniikan lisäksi on olemassa useita erityyppisiä koveutuslaitteita. Digitaaliset valoprosessoriprojektorit ja jopa LCD-näytöt ovat nyt suosittu tapa valo polymeroida materiaaleja, koska ne ovat halpoja ja niillä on erittäin korkea resoluutio. Yksi näiden kahden tekniikan eduista verrattuna lasereihin on niiden kyky kovettaa samanaikaisesti koko hartsikerros, kun taas laserin on valaistava asteittain koko pinta. Suosituimpia 3D-printtaustekniikoita fotopolymerointiprosesseissa on stereolitografia (SLA), digitaalinen valoprosessointi (DLP), jatkuva nesterajapinta tuotanto (CLIP) ja näkyvän valon polymeeritulostus (DPP).

Stereolitografia eli lyhennetyksi SLA tunnetaan myös nimillä SL, optinen valmistus tai hartsitulostus. SL-prosessi oli yksi ensimmäisistä prototyyppien pikavalmistus tekniikoista ja se on vielä nykyäänkin yksi suosituimmista tekniikoista (Lifton, Lifton et al. 2014 s. 407). SL-prosessissa vahva ultraviolettivalon- tai lasersäde keskitetään nestemäisellä fotopolymeerillä täytetyn astian pintaan. Keskitetty säde ”piirtää” tietokoneohjatusti tulostettavan kappaleen kerroksen. ”Piirtämisen” jälkeen tulostettavaa kappaletta liikutetaan kerrospaksuuden verran ja uusi kerros tulostetaan. (Prakash, Nancharaih et al. 2018 s. 3876) Kuvassa yksi on kuvattu SL-laitteen alijärjestelmähierarkia ja siitä voidaan nähdä mitä erilaisia systeemejä laitteet sisältävät.



**Kuva 1.** SL-laitteen alajärjestelmät. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 83)

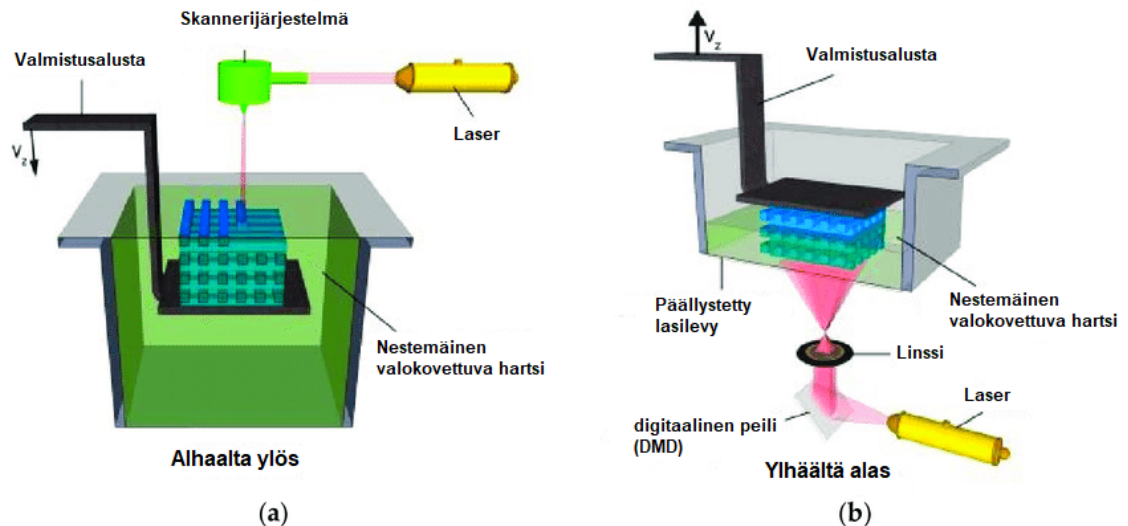
Digitaalinen valoprosessointi eli lyhennetyksi DLP on 3D-tulostusprosessi, jossa yksittäinen kerros valaistetaan digitaalisen näytön avulla. Digitaaliseen näyttöön piirtyy kerroksen muoto, joka valaistetaan käyttäen edellä mainittuja kovetuslähteitä. Kunkin kerroksen muoto koostuu neliömäisistä pisteistä, joka johtuu digitaalisesta näytöstä. DLP:n avulla saavutetaan nopeampia tulostusaikoja joillekin osille, koska DLP:ssä koko tulostettava kerros tulostuu samaan aikaan, toisin kuin SLA-tekniikassa.

Jatkuva nesteraipinta tuotanto eli lyhennetyksi CLIP. Osa polymeerialtaan pohjasta on amorfista fluoripolymeeri-ikkunaa (Tumbleston, Shirvanyants et al. 2015 s. 1349). Ultra-violettil valo läpäisee ikkunan ja valaisee tulostettavan kappaleen poikkileikkauksen. UV-valo saa aikaan fotopolymeroitumisen. Tulostettava kappale nousee tarpeeksi hitaasti, jotta hartsi voi virrata tulostettavan kappaleen alle ja näin pitää kosketuksen kohteen pohjaan. Hapen läpäisevä kalvo sijaitsee hartsin alla, mikä luo kuolleen alueen (Tumbleston, Shirvanyants et al. 2015 s. 1349). Tämä pysyvä nestemäinen rajapinta estää hartsin kiinnittymisen ikkunaan, mikä tarkoittaa, että fotopolymerointi estyy ikkunan ja polymeerijan välillä. Toisin kuin tavallinen SLA, CLIP-tulostusprosessi on jatkuva ja sillä voidaan saavuttaa useiden satojen millimetrien tulostusnopeus tunnissa (Tumbleston, Shirvanyants et al. 2015 s. 1349). Tulostusnopeudella viitataan kappaleen korkeussuuntaan.

Näkyvän valon polymeeritulostus eli lyhennetyksi DPP tekniikassa sen sijaan, että käytettäisiin laseria tai projektorin polymeerin kovettamiseen, DPP:n valmistusprosessissa käytetään LCD:tä (nestekidenäyttö). Tämä tekniikka kutsutaan myös LCD 3D-tulostukseksi. Tämä tekniikka käyttää modifioimattomia LCD-näyttöjä, jotka on erityisesti tarkoitettu tulostamaan polymeerejä näkyvällä valolla. (Dassault Systems 2020)

Fotopolymerointi 3D-tulostustekniikassa on kaksi erilaista lähestymistapaa, jotka kilpailevat keskenään. Kummatkin tekniikat rakentavat osat samalla tavalla. Ensimmäinen lähestymistapa on ylhäältä alas lähestymistapa, jossa lämmönlähde on asetettu polymeeri-

rialtaan alle. 3D-tulostusalustaa nostetaan asteittain ilmaan ja lopullinen osa rakennetaan ylösalaisin. Toinen lähestymistapa on alhaalta ylös lähestymistapa. Siinä lämmönlähde on asetettu polymeerialtaan yläpuolelle. Tässä tekniikassa tulostusalustaa laskeaan asteittain polymeerialtaaseen. Kuvassa kaksi on esitetty nämä kaksi eri lähestymistapaa.



**Kuva 2.** Periaatekuvat eri fotopolymeerointi tulostustekniikoiden lähestymistavoista. (Yao, Wang et al. 2018 s. 14)

## 2.1.2 Materiaalit

Suurin osa kaupallisissa ainetta lisäävissä järjestelmissä käytetyistä fotopolymeereistä on kovettuvia UV-alueella ja fotopolymeerointi on fotokemiallinen prosessi pienten monomeerien kytkemiseksi ketjumaisiksi polymeereiksi. Fotopolymeerit koostuvat pääasiassa monomeereistä / oligomeereistä, fotoinitiaattoreista, lisäaineista, kuten stabilisaattoreista, taipuisuuksista, reaktiivisista laimentimista ja liuottimista. (Lee, An et al. 2017 s. 124-125) Fotopolymeerihartseja on saatavana eri väreinä ja niillä on erilaiset fysikaaliset ominaisuudet, kukin vastaa tiettyä käyttöä. Hartsivalikoima sisältää kovia hartseja, vähäjäämäisiä hartseja (vahamallivaluja varten), läpinäkyviä hartseja ja taipuisia polyuretaani hartseja. Materiaalien valmistajia on todella paljon ja heillä kaikilla on omat nimitykset materiaaleilleen. Kuitenkin eri valmistajien materiaalien materiaaliominaisuudet ovat lähellä toisiaan. Taulukoissa 1-3 on lueteltu kolmen eri laitteen käytettävissä olevat materiaalit, niiden ominaisuudet ja käyttökohteet.



**Taulukko 1.** Tyypillisimmät materiaalit, joita käytetään DWS 029X SLA laitteessa. (Lee, An et al. 2017 s. 125)

Materiaali	Ominaisuudet	Käyttökohteet/teollisuudet
DC 100	Suuri tarkkuus ja pieni kutistuminen	Soveltuu korumallien suoraan valmistamiseen / sileäpintaisten ja tarkkamuotoisten kuvioiden valmistamiseen
DC 500	Vahamainen ja helppo polttaa	Soveltuu ohuille lankakuvioiduille koruille, joita on mahdotonta toistaa kuminmuokkaus menetelmällä
DL 350	Polypropeenin tapainen ja korkea taipuisuus	Soveltuu funktionaalisten osien yleiskäyttöön ja teolliseen suunnitteluun. DL 350:sta valmistetut kappaleet ovat vahvoja ja joustavia
DL 360	Läpinäkyvä ja vahva	Soveltuu funktionaalisiin osiin, joiden tarvitsee olla läpinäkyviä. Yleiseen käytön sovelluksiin ja teolliseen suunnitteluun
AB 001	ABS:n tapainen	Soveltuu funktionaalisiin osiin, joiden tarvitsee olla vahvoja ja sileitä
GM08	Kumimainen ja läpinäkyvä, suuri taipuisuus	Soveltuu funktionaalisiin osiin, joiden tarvitsee olla vahvoja, joustavia, kestäviä, sileitä ja heti käyttövalmiita. Manuaalista viimeistelyä ei tarvita
DM210	Keraamien tapainen ja suuri pinnanlaatu	<i>Sopii sekä ohuille että paksuille kumimallisille korumallien malleille, joissa on nestemäinen silikoni, ja ne voidaan helposti poistaa kumista</i>
DM 220	Nano täyttöinen keraami ja sileäpintainen	Soveltuu kumpaankin korumallien muotteihin, joissa on vulkanoitua kumia ja nestemäistä silikonia korkeassa lämpötilassa

**Taulukko 2.** Tyypillisimmät materiaalit, joita käytetään ASIGA PICO 2 DLP laitteessa. (Lee, An et al. 2017 s. 126)

Materiaali	Ominaisuudet	Käyttökohteet/teollisuudet
Plas <sup>TM</sup> range	Korkea resoluutio ja kemiallisesti kestävä	Soveltuu koteiloiden, jigeille, ja kiinnikkeille, mekaanisiin kokoonpanoihin ja konseptimalleille, joilla on suuri kestävyys ja hyvä pinnanlaatu
SuperCAST	Suoravalettu hartsivalikoima	Soveltuu tarkkojen valujen tekemiseen, kuten koru- ja hammasvalujen valamiseen
SuperWAX	Vahan tapainen materiaali, joka on helppo polttaa	Ensimmäinen 3D-tulostettava polymeeri, joka sulaa kuin vaha ja nesteytyy 50°C

**Taulukko 3.** Tyypillisimmät materiaalit, joita käytetään Carbon3D:n CLIP laitteessa. (Lee, An et al. 2017 s. 126)

Materiaali	Ominaisuudet	Käyttökohteet/teollisuudet
Jäykkä polyuretaani (RPU)	Kova, kulutusta kestävä ja jäykkä	Erinomainen mekaaninen lujuus, kovuus ja sitkeys. Hyödyllinen teollisuuskomponenteissa, autojen kulutuselektronikassa jne.
Joustava polyuretaani (FPU)	Joustava, iskunkestävä ja kohtalaisen jäykkyyden omaava materiaali	Hyvä tasapaino jäykkyyden ja joustavuuden välillä iskun, hankauksen ja väsymyksenkestävyyden välillä. Hyödyllinen sovelluksissa, joissa vaaditaan sitkeyttä kestämiin toistuvia rasituksia
Elastomeerinen Polyuretaani (EPU)	Erittäin elastinen ja joustava	Erinomainen elastinen käyttäytymisen rasitettuna. Hyödyllinen sovelluksissa, joissa tarvitaan kulutuskestävyyttä, iskunkestävyyttä ja suurta joustavuutta

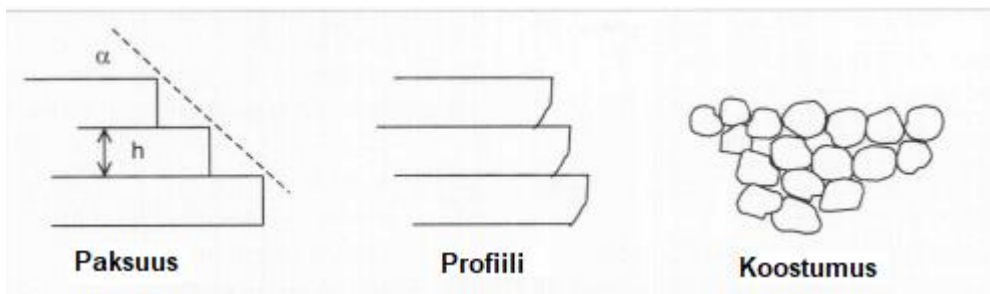
Syanaatti es- teri (CE)	Hyvät lämmönkestävyys ominaisuudet, vahva ja jäykkä	Suorituskykyinen materiaali, jolla on erinomainen lujuus, kovuus ja läm- mönkestävyys. Hyödyllinen sovelluk- sissa, kuten teollisuuskomponentit ja elektroniikka
Prototyping (PR)	Yleiseen käyttöön	SLA-hartsien tapaiset mekaaniset ominaisuudet. Nopeasti tulostettava, jolla on erinomainen resoluutio ja toi- mii riittävän hyvin kestääkseen koh- tuullisen toiminnallisen testauksen

### 2.1.3 Tarkkuus

Fotopolymeroimalla tehtyjen kappaleiden tarkkuuteen vaikuttaa moni asia. Suurimpana vaikuttavana tekijä voidaan kuitenkin pitää kappaleen tarkkuuteen itse laitetta ja sen ase-  
tuksia, jolla kappale tulostetaan. Muita vaikuttavia tekijöitä kappaleen mittatarkkuuteen ja pinnankarheuteen on kappaleen muodot, ohjelmat, joilla kappale suunnitellaan ja ma-  
teriaalista johtuvat mittatarkkuuteen vaikuttavat tekijät.

Kappaleen dimensioihin vaikuttavia parametrejä tai vaikuttavia tekijöitä on laitteen tark-  
kuus, tietokoneohjelmat, tiedostotyyppi, johon kappaleen geometria tallennetaan ja ma-  
teriaali, josta kappale tulostetaan. Laitteen tarkkuus vaikuttaa suoraan tulostettavan kap-  
paleen dimensioiden tarkkuuteen. Dimensioiden tarkkuuteen vaikuttaa kuinka pieniä yk-  
sityiskohtia laitteella voidaan valmistaa ja kuinka tarkasti laite pystyy seuraamaan suun-  
niteltua geometriaa. Tiedostomuodot vaikuttavat jonkin verran kappaleen dimensioiden  
tarkkuuteen. 3D-tulostuksessa yleisesti käytettyjä tiedostomuotoja on STL-tiedosto-  
muoto ja AMF-tiedostomuoto. STL-tiedostoissa suunnitellun kappaleen geometria tallen-  
netaan kolmiomaiseksi geometriaksi (Umaras, Tsuzuki 2017 s. 14943). Kolmioimaisella  
geometrialla on vaikutusta esimerkiksi kaarevien muotojen tulostuksessa. AMF-tiedos-  
tojen geometria tallennetaan myös kolmiomaiseksi geometriaksi. Mutta AMF-tiedos-  
toissa kolmiot ovat kuitenkin kaarevia ja perustuvat toisen asteen Hermite-käyriin, joka  
tekee AMF-tiedosto muodosta hieman tarkemman kuin STL-tiedostosta (Umaras, Tsu-  
zuki 2017 s. 14944). Tulostettava materiaali vaikuttaa kappaleen dimensioiden tarkkuu-  
teen siten, että tulostettaessa kappaletta materiaali jäähtyessään kutistuu. Jäähtyminen  
aiheuttaa materiaalin kutistumista ja kappaleen kiertymistä (Umaras, Tsuzuki 2017 s.  
14944).

Tulostettavan pinnankarheuteen vaikuttaa kolme asiaa; tulostettavan kappaleen kerrospaksuus ( $h$ ) yhdistettynä pinnan rakennus kulmaan ( $\alpha$ ), kappaleen kerroksen profiili ja kappaleen koostumus (Upcraft, Fletcher 2003 s. 327). Kerroksen paksuus yhdistettynä rakennuskulmaan muodostaa tulostettavan kappaleen pintaan niin sanotun porraskerros (Umaras, Tsuzuki 2017 s. 14943). Nämä kolme asiaa vaikuttava pinnankarheuteen, koska tulostettavat kappaleet rakentuvat kerros kerrokselta. Näiden kolmen eri komponentin yhteisvaikutusta kappaleen pinnan laatuun ei ole helppo ennustaa teoreettisesti (Upcraft, Fletcher 2003 s. 327).



**Kuva 3.** tekijät, jotka vaikuttavat tulostettavien kappaleiden pinnan karheuteen. (Upcraft, Fletcher 2003 s. 327)

Edellä mainittujen useiden eri tekijöiden perusteella ei voida antaa yksiselitteisiä tarkkuuksia fotopolymeerimalla tehdyille kappaleille. Taulukkoon 4 on listattu tyypillisimmät tarkkuudet mitä saavutetaan SLA-prosessilla.

**Taulukko 4.** SLA-prosessin tyypillisimmät tarkkuudet. (3ERP 2020, Additively 2020, Materialise 2020)

Tarkkuus	Kerrospaksuus	Pinnan karheus (Ra)	yksityiskohdan koko	seinämän paksuus
$\pm 0.5\%$ (Pöytämallit)	0.025–0.1 mm	1.0–10.16 $\mu\text{m}$	0.1 mm	1.0 mm
$\pm 0.15\%$ (teollisuuteen tarkoitetut laitteet)				

#### 2.1.4 Huomioitavaa

Prosessilla on kaksi pääetua muihin prosesseihin verrattuna. Ensimmäinen etu on kappaleiden mittatarkkuus ja toinen etu on kappaleiden pinnanlaatu. Etuihin voidaan myös lukea laaja materiaali skaala ja etuna voidaan lisätä läpinäkyvien materiaalien saataavuus. Prosessin huonoina puolina taas on laitteiden hinta ja tulostusvolyymit verrattuna

muihin prosesseihin. Lisäksi SLA-materiaaleilla ei yleensä ole korkealaatuisten ruiskuvaluttujen kestopolymerien iskulujuutta ja kestävyyttä. Lisäksi niiden ikääntyessä, niiden mekaaniset ominaisuudet heikentyvät. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 101) Nämä rajoitukset estävät fotopolymeerointi prosessin käytön monissa tuotantosovelluksissa. Fotopolymeerointi prosessilla tulostetut kappaleet tarvitsevat myös merkittävän jälkikäsittelyn, missä tulostetut kappaleet esimerkiksi suojataan pinnoittamalla parantaakseen kappaleiden käyttöikä.

Muita huomioita mitä tulee ottaa huomioon fotopolymeerointi prosessissa, tulostettava kappale voi tarvita tukirakenteita tulostuksen mahdollistamiseksi. Tukirakenteiden poistaminen on huomioitava, kun suunnitellaan tulostusta. Tukirakenteiden määrää ja poistettavuutta voidaan minimoida ja helpottaa orientoimalla tulostettava kappale optimaalimpaan tulostusasentoon. On myös huomioitava, että kun tukia poistetaan valmiista kappaleesta voi poistaminen heikentää paikallisesti kappaleen pinnan laatua.

Kun tulostetaan alhaalta ylöspäin kappaleita, joilla on onttoja kohtia tulostettavan kappaleen sisällä, niin pitää huomioida kappaleen rakenteen onttoihin kohtiin jäävä kovettumaton neste. Tulostusta suunniteltaessa pitää huomioida tämän kovettumattoman nesteen poistaminen. Tämä kannattaa myös pitää mielessä toiseenkin suuntaan tulostettaessa, sillä myös ylhäältä alaspäin tulostettaessa voi rakenteisiin jäädä kovettumatonta nestettä.

## **2.2 Jauhepetimenetelmät**

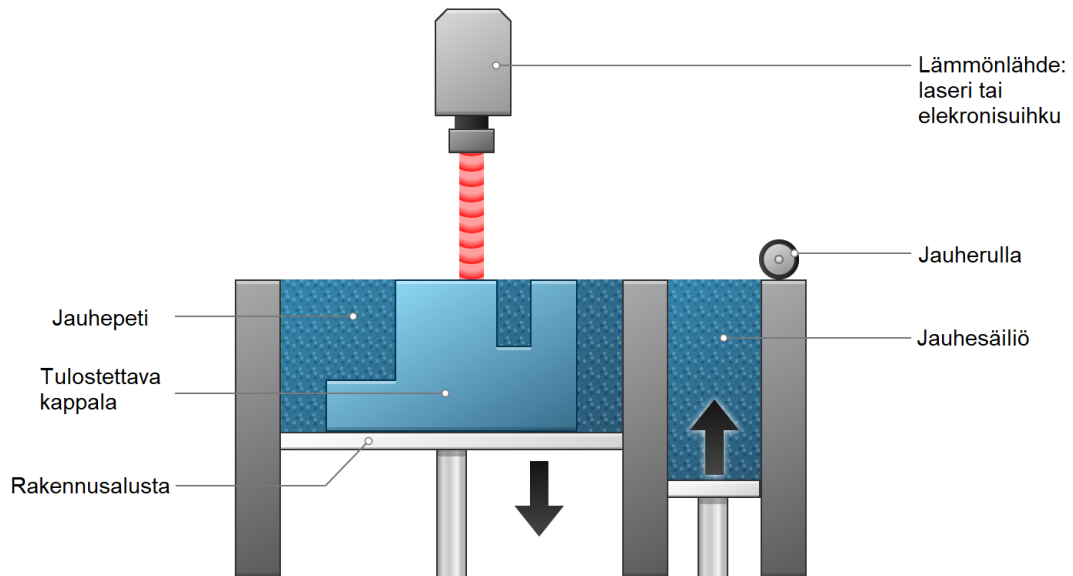
### **2.2.1 Tekniikan peruserä**

Jauhepetimenetelmät (PBF) oli ensimmäisiä kaupallisia ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 107). Jauhepetisulatus mahdollistaa laajan joukon geometrisesti monimutkaisten kappaleiden valmistamisen. Tarkka resoluutio ja korkea laatu ovat tämän tekniikan pääetuja (Ngo, Kashani et al. 2018 s. 174). Kappaleiden valmistaminen tapahtuu lämmönlähteen, pääasiassa laser- tai elektronisäteitä käyttäen tai sidosaineen avulla (Ngo, Kashani et al. 2018 s. 174). Lämmönlähteellä jauhehiukkaset sulatetaan kerros kerrallaan ja näin muodostetaan kiinteä kappale. Kappaleiden valmistajat, jotka hyödyntävät jauhepetisulatus kappaleiden valmistamiseksi voivat nauttia huomattavasta suunnitteluvapaudesta ottaen huomioon, että jauhepetisulatuksella on useita toteuttamiskelpoisia tekniikoita ja materiaaleja. Jauhepetisulatus prosessissa on neljä suosittua eri tekniikkaa. Nämä neljä eri tekniikka on selektiivinen lasersintraus (SLS), selektiivinen lasersulatus (SLM), elektronisuihkusulatus (EBM) ja HP:n kehittämä Multi Jet Fusion (MJF) tekniikka (Dassault Systems 2020).

Selektiivinen lasersintraus 3D-tulostustekniikka syntyi 1980-luvulla Austinissa, Teksasin yliopistossa. Tekniikan peruseräiteena on, että tulostusprosessin aikana laserilla sintrataan tai yhdistetään jauhemainen materiaalikerroks kerrallaan kiinteäksi kappaleeksi. Tulostuskammio lämmitetään lähelle materiaalin sulamispistettä (Prakash, Nancharai et al. 2018 s. 3876). Tulostusprosessin loputtua kiinteiden kappaleiden ympärillä on kovettumatonta jauhetta. Tulostetut kappaleet pitää poistaa kovettumattomasta jauheesta ja puhdistaa ne paineilmalla ja harjaamalla. Yleensä kovettumaton jauhe poistetaan tulostettujen kappaleiden ympäriltä kierrätystä varten. Tärkeimmät materiaalit, joita tässä prosessi käytetään, on polyamidi (nylonit), Alumide (seos harmaata alumiinijauhetta ja polyamidia) ja kumimaiset materiaalit. Nailonit ovat vahvoja ja kestäviä, mutta niissä on jonkin verran joustavuutta, mikä tekee niistä erinomaisia napsautussovituksiin, kiinnikkeisiin, pidikkeisiin ja jousitoimintoihin. (Dassault Systems 2020)

Selektiivinen lasersulatus, jota myös kutsutaan nimellä metallin suoraksi lasersintraukseksi (DMLS). Selektiivinen lasersulatus ja metallien suora lasersintraus käyttää samaa teknistä periaatetta mutta metallien suora lasersintrausta käytetään yksinomaan vain metallisten osien valmistamiseen. Selektiivisessä lasersulatuksessa saavutetaan jauheen täydellinen sulaminen. Tällä saavutetaan, että voidaan käyttää yksikomponenttisiä metalleja, kuten alumiinia. Näistä voidaan valmistaa kevyitä ja kestäviä varaosia ja prototyyppisiä. Metallien suorassa lasersintrauksessa jauhe sintrataan kiinteäksi kappaleeksi ja näin ollen se on rajoittunut vain metalliseoksiin, mukaan lukien titaanipohjaiset seokset. Nämä kaksi menetelmää tarvitsevat lisätukia korkean jäännösjännityksen kompensoimiseen ja vääristymisen rajoittamiseksi. Näiden kahden menetelmän sovelluksia on koru- ja hammasteollisuus, varaosat ja prototyyppien valmistaminen. (Dassault Systems 2020)

Elektronisuihkusulatus 3D-tulostustekniikka saavuttaa materiaalin fuusioitumisen korkealla energisellä elektronisäteellä. Tämä tekniikka tuottaa kappaleeseen vähemmän jäännösjännityksiä, mikä taas vähentää kappaleiden vääristymistä. Elektronisuihkusulatus on myös energiatehokkaampi kuin selektiivinen lasersulatus ja se pystyy myös tuottamaan kerroksia nopeammin kuin selektiivinen lasersulatus. Tämä menetelmä on hyödyllinen korkean arvon teollisuusaloilla, kuten esimerkiksi ilmailu-, puolustusteollisuudessa ja moottoriurheilussa.



2018 © Dassault Systèmes

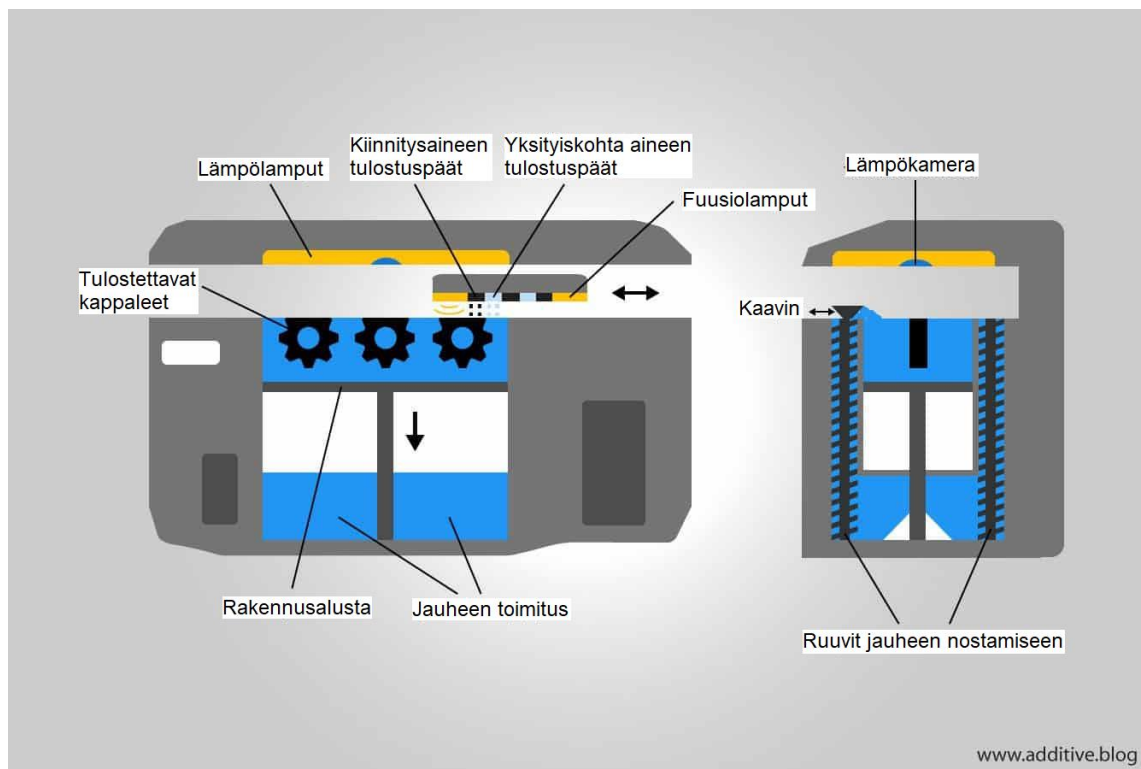
**Kuva 4.** Periaatekuva SLS, SLM, DMLS ja EBM prosesseista. (Dassault Systems 2020)

Kuvassa neljä on esitelty periaatekuva edellä mainituista prosesseista. Kuvan neljä avulla voidaan hieman avata miten edellä esitellyt prosessit toimivat. Jauhesäiliö syöttää kerrallaan aina yhden kerrospaksuuden vaatiman määrän jauhetta ja jauherullan avulla syötetty jauhe levitetään rakennusalustalle. Osan rakennusprosessi tapahtuu aina suljetussa kammiossa, joka on täytetty typpikaasulla, jauhemaisen materiaalin hapettumisen ja hajoamisen minimoimiseksi. Rakennusalustalla oleva jauhe pidetään korotetussa lämpötilassa juuri jauhemaisen materiaalin sulamispisteen ja / tai lasittumislämpötilan alapuolella. Infrapunälämmittimet sijoitetaan rakennusalustan yläpuolelle pitämään korotettu lämpötila muodostettavan osan ympärillä, samoin kuin syöttöpatruunoiden yläpuolella jauheen esilämmittämiseksi ennen levittämistä rakennusalueelle. Joissakin tapauksissa rakennusalusta lämmitetään myös resistiivisillä lämmittimillä rakennusalustan ympärillä. Tämä jauheen esilämmitys ja korotetun, yhtenäisen lämpötilan ylläpitäminen rakennusalustalla on välttämätöntä prosessin laservoiman tarpeiden minimoimiseksi (esilämmityksellä, fuusioon tarvitaan vähemmän laserenergiaa) ja estämään osan väännyminen valmistuksen aikana. Esilämmitys myös estää kappaleen epätasaisen lämpölaajanemisen mikä taas estää kappaleen käpristymisen kappaleen jäähtyessä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 108)

Kun sopiva jauhekerros on muodostettu ja esilämmitetty jauhekerrokseen kohdistetaan fokusoitu lasersäde. Lasersädettä siirretään galvanometreillä siten, että se sulauttaa tulostettavan kappaleen poikkileikkauksen yhtenäiseksi. Kappaleen ympärillä oleva ei-fuu-

sioitunut jauhe toimii seuraavien kerrosten tukena. Haluttujen poikkileikkausten suorittamisen jälkeen rakennusalustaa lasketaan yhden kerrospaksuuden verran ja uusi jauhe kerros levitetään. Tämä prosessi toistuu niin kauan, että haluttu kappale on kokonaan tulostettu. Tulostuksen jälkeen kappaletta ei poisteta välittömästi ympäröivästä jauheesta vaan niiden annetaan jäähtyä yhdessä hetken aikaa riittävän alhaiseen lämpötilaan, jotta niitä voidaan käsitellä ja altistaa ympäristön lämpötilaan ja ilmakehään. Liian aikainen altistaminen ympäristön lämpötilaan ja ilmakehään, voi johtaa jauheen hajoamiseen ja kappaleet voivat vääntyä epäsuoran termisin supistumisen takia. Jäähdytyksen jälkeen osat poistetaan ympäröivästä jauheesta, irtonainen jauhe puhdistetaan ja kappaleille mahdollisesti suoritetaan muita viimeistelytoimenpiteitä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 108-109)

HP:n kehittämä Multi Jet Fusion (MJF) 3D-tulostustekniikka eroaa edellä mainituista menetelmistä siten, että mustesuihkujärjestelmää käytetään jauheen yhdistämiseen ja yksityiskohtien lisäämiseen, jotka sitten fuusiolamppujen avulla kuumennetaan kiinteäksi kerrokseksi. Tässä tekniikassa ei siis käytetä laseri tai elektronisuihkua. Yksityiskohtaista ainetta suihkutetaan tulostettavan kappaleen muotojen ympärille kappaleen ja jauheen erottamisen helpottamiseksi. Kuvassa viisi on esitetty HP:n MJF:n periaatekuva. (Dassault Systems 2020)



**Kuva 5.** MJF:n periaatekuva. (FACFOX 2020)



## 2.2.2 Materiaalit

Jauhepetimenetelmän prosesseissa voidaan käyttää periaatteessa kaikkia materiaaleja, jotka voidaan sulattaa ja uudelleen jäähmettää (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 109). Seuraavaksi annetaan lyhyet katsaukset jauhepetimenetelmän prosesseissa käytettävistä polymeereistä, metalleista, keraameista ja niiden komposiiteista.

Termoplastiset materiaalit soveltuvat hyvin jauhekerrosprosessointiin suhteellisen alhaisten sulamislämpötilojen, alhaisen lämmönjohtavuuden ja alhaisen kasaantumiskykyisyyden takia. Polymeerit voidaan yleensä luokitella joko termoplastisiksi tai lämpökovettuviksi polymeereiksi. Lämpökovettuvia polymeerejä ei tyypillisesti prosessoida käyttämällä jauhepetimenetelmällä valmistettaviin osiin, koska jauhepetimenetelmä prosessi toimii tyypillisesti sulattamalla hiukkasia osien poikkileikkausten valmistamiseksi, mutta lämpökovettuvat hajoavat, mutta eivät sula, kun niiden lämpötila nousee. Kestomuovit voidaan luokitella edelleen niiden kiteisyyden perusteella. Amorfisilla polymeereillä on satunnainen molekyyli rakenne, jolloin polymeeriketjut ovat satunnaisesti kietoutuneet toisiinsa. Sitä vastoin kiteisillä polymeereillä on säännöllinen molekyyli rakenne, mutta tämä on harvinaista. Paljon yleisempiä ovat puolikiteiset polymeerit, joilla on säännöllisen rakenteen alueita, joita kutsutaan kristalloineiksi. Amorfiset polymeerit sulavat melko laajalla lämpötila-alueella. Kun polymeerin kiteisyys kasvaa, sen sulamisominaisuudet pyrkivät kuitenkin keskittymään paremmin määritellyn sulamispisteen ympärille. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 109)

Tällä hetkellä yleisin materiaali, jota käytetään jauhepetimenetelmissä, on polyamidi, termoplastinen polymeeri, joka tunnetaan yleisesti nailonina. Suurimmalla osalla polyamideja on melko korkea kiteisyys ja ne luokitellaan puolikiteisiksi materiaaleiksi. Niillä on selvät sulamispisteet, jotka mahdollistavat niiden luotettavan käsittelyn. Tietty määrä laserenergiaa sulattaa tietyn määrän jauhetta; sulatettu jauhe sulaa ja jäähtyy nopeasti muodostaen osan poikkileikkauksesta. Sitä vastoin amorfisilla polymeereillä on taipumus pehmentyä ja sulaa laajalla lämpötila-alueella eikä näin ollen muodostu tarkkaan määriteltäviä kiinteytyneitä ominaisuuksia. Polymeerien lasersintrauksessa amorfisilla polymeereillä on taipumus sintrata erittäin huokoisiin muotoihin, kun taas kiteisiä polymeerejä prosessoidaan tyypillisesti käyttämällä täydellistä sulamista, mikä johtaa suurempaan tiheyteen. Kiteiset polymeerit kuitenkin kutistuvat enemmän kuin amorfiset materiaalit ja ovat alttiimpia käyritykselle ja vääristymiselle ja vaativat siten yhdenmukaisempaa lämpötilan säätöä. Polyamidijauheista valmistettujen polymeerien lasersintrausosien mekaaniset ominaisuudet lähenevät ruiskuvalettuja kestomuovisia osia, mutta niiden venymä on huomattavasti pienempi ja niillä on ainutlaatuinen mikrorakenne. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 109-110)

Polystyreenipohjaiset materiaalit, joilla on alhainen jäännöstuhkapitoisuus, ovat erityisen sopivia vahamallivalujen suojarakenteiden tekemiseen polymeerien lasersintrausta käyttäen. Vahamallivalujen huokoisuus helpottaa vahamallin sulattamisen valumuotin luomisen jälkeen. Polystyreeniosat, jotka on tarkoitettu tarkkojen vahamallivalujen tekemiseen, tulisi tiivistää, jottei keraaminen materiaali pääse valumaan vahamallin sisään ja näin ollen voidaan saavuttaa valumuottiin sileä pinta. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 110)

Elastomeerisiä termoplastisia polymeerejä on saatavilla erittäin joustavien osien valmistamiseksi, joilla on kumimaiset ominaisuudet. Elastomeerit kestävät hyvin korkeissa lämpötiloissa eivätkä hajoa helposti ja ne kestävät hyvin kemikaaleja, kuten esim. bensiiniä ja autojen jäähdytysnesteitä. Elastomeerisiä materiaaleja voidaan käyttää tiivisteiden, teollisuustiivisteiden, kengänpohjien ja muiden komponenttien valmistukseen. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 110)

Muita kaupallisesti saatavissa olevia polymeerejä ovat palonestoaineinen polyamidi ja polyakryylieetteriketoni (tunnetaan nimellä PAEK tai PEEK). Jauhepetimenetelmän polymeereihin voidaan myös lisätä lisäaineita, jotka parantavat huomattavasti polymeerien mekaanisia ominaisuuksia, esimerkiksi jäykkyyttä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 110)

Jauhepetimenetelmillä on laaja valikoima eri metalleja ja metalliseoksia. Yleensä mitä tahansa metallia, jota voidaan hitsata, pidetään hyvänä ehdokkaana jauhepetimenetelmä-prosessointiin. Monia eri teräksiä, tyypillisesti ruostumattomia ja työkaluteräksiä, titaania ja sen seoksia, nikkelpohjaisia seoksia, joitain alumiiniseoksia ja kobolttikromia on käytetty, ja ne ovat kaupallisesti saatavana jossain muodossa. Lisäksi jotkut yritykset tarjoavat nyt jalometallien, kuten hopean ja kullan tulostamista Jauhepetimenetelmällä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 110)

Kuten mainittiin, titaaniseoksia, lukuisia terässeoksia, nikkelpohjaisia superseoksia, CoCrMo ja paljon muuta on saatavana laajasti useilta valmistajilta. On huomattava, että seokset, jotka halkeilevat korkeilla jähmettymisasteilla, eivät ole hyviä ehdokkaita metallien lasersintrauksella valmistettaviin osiin. Suurten kiinteytymisnopeuksien vuoksi metallien lasersintrauksessa syntyvät kiderakenteet ja mekaaniset ominaisuudet ovat erilaisia kuin muilla valmistusprosesseilla. Nämä rakenteet voivat olla metastabiileja, ja standardimikrorakenteiden tuottamiseksi tarvittavat lämpökäsittelyreseptit voivat olla erilaisia. Kun metallien lasersintraus- ja EBM-prosessit kehittyvät, yleisesti käytettävien metalliseosten lukumäärä kasvaa ja kehitetään uusia erityisesti jauhepetimenetelmä tuotantoon räätälöityjä seoksia. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 111)

Keraamisia materiaaleja kuvataan yleensä yhdisteinä, jotka koostuvat metallioksideaista, karbidista ja nitridistä ja niiden yhdistelmistä. Kaupallisesti on saatavana useita keraamisia materiaaleja, mukaan lukien alumiinioksidi ja titaanioksidi. Bioyhteensopivat materiaalit on kehitetty erityisiä sovelluksia varten. Esimerkiksi kalsiumhydroksiapatiitti, joka on hyvin samanlainen kuin ihmisen luu, on käsitelty käyttämällä polymeerien lasersintrausta lääketieteellisiin sovelluksiin. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 112)

Taulukoissa 5 ja 6 on listattu tyypillisimpiä SLM ja EBM menetelmissä käytettäviä metallijauheita. Taulukoissa on myös kerrottu hieman metallijauheiden ominaisuuksista ja niiden käyttökohteista tai teollisuuden aloja, joissa niitä käytetään.

**Taulukko 5.** *Tyypilliset SLM metallijauheet. (Lee, An et al. 2017 s. 124)*

Materiaali	Ominaisuudet	Käyttökohteet/teollisuudet
Titaani (Ti)	Korroosionkestävyys, biologisesti yhteensopiva, alhainen lämpölaajeneminen, suuri lujuus ja matala tiheys	Titaanikomponentteja voidaan soveltaa monella eri alalla, kuten lääketieteellisessä tekniikassa, ilmailu-, auto-, meriteollisuudessa. Siitä voidaan myös valmistaa koruja.
Ruostumaton teräs	karkeneva, korkea kulutuskestävyys, korroosionkestävyys, suuri kovuus ja korkea taipuisuus	Ruostumattoman teräksen komponenttien sovelluksia löytyy autoteollisuudesta, työkalujen valmistuksesta, merenkulusta, lääketieteellisestä tekniikasta ja konepajateollisuudesta
Alumiini (Al)	Hyvät seosainiominaisuudet, hyvä prosessoitavuus ja sähkönjohtavuus, matala materiaalityheys ja kevytmetallit	Alumiinikomponentit ovat optimaalisia käytettäväksi esimerkiksi ilmailu- ja avaruustekniikassa, autoteollisuudessa, prototyyppien rakentamisessa, etenkin ohut seinäisten komponenttien, joilla on monimutkaiset geometriat
Kobolttikromi	Bioyhteensopiva, erittäin korkea kovuus, korroosionkestävyys, korkea lujuus ja korkea taipuisuus	Koboltti-kromi-komponentteja voidaan käyttää lääketieteellisessä ja hammaslääketieteellisessä tekniikassa. Komponenteissa, jotka altistuvat korkeille lämpötiloille, kuten suihkumootoreissa.

Nikkelipohjaiset seokset	Erinomainen hitsattavuus, kovettuva, korroosionkestävyys, erinomainen mekaaninen lujuus	Nikkelipohjaisia komponentteja voidaan käyttää ilmailu- ja avaruustekniikassa, Komponenteissa, jotka altistuvat korkeille lämpötiloille ja työkalujen valmistuksessa
--------------------------	---	--

**Taulukko 6.** *Tyypilliset EBM metallijauheet. (Lee, An et al. 2017 s. 124)*

Materiaali	Ominaisuudet	Käyttökohteet/teollisuudet
Titaani	Erittäin luja, pieni paino, biologisesti yhteensopiva, korroosionkestävä	Moottoriturheilun, ilmailu-, meri-, ja kemianteollisuuden prototyyppien suoraan valmistukseen sekä ortopedisten implanttien ja proteesien suoraan valmistukseen
Kobolttikromi	Suuri lujuus, kulutuskestävyys, biologisesti yhteensopiva, lämpö ominaisuudet	Käytetään laajalti ortopediassa, ilmailuteollisuudessa, voimantuotannon ja hammaslääketieteen aloilla

### 2.2.3 Tarkkuus

Jauhepetimenetelmillä tehtyjen kappaleiden tarkkuuksiin vaikuttaa samat asiat kuin fotopolymeeroimalla tehtyihin. Eli suurimpana mittatarkkuuksiin vaikuttavana tekijänä on itse laite ja sen tulostusparametrit, kappaleen muodot, materiaali, josta kappale tulostetaan ja niin edelleen. Taulukossa seitsemän on annettu SLS, SLM ja EBM tekniikoiden tyypillisimmät tarkkuudet.

**Taulukko 7.** SLS, SLM ja EBM tekniikoiden tyypillisimmät tarkkuudet. (3ERP 2020, Additively 2020)

Tekniikka	Tarkkuus	Kerrospaksuus	Pinnan karheus (Ra)	yksityiskohdan koko
SLS	± 0.25 mm (± 0.3 %)	0.1-0.12 mm	-	0.15 mm
SLM	± 0.05-0.2 mm (± 0.1-0.2 %)	0.02-0.05 mm	4-10 µm	0.04-0.2 mm
EBM	± 0.2 mm	0.05 mm (minimi)	20.3 – 25.4 µm	0.1 mm

### 2.2.4 Huomioitavaa

Luonteensa vuoksi jauhepetimenetelmillä voi prosessoida hyvin monenlaisia materiaaleja, toisin kuin monet muut ainetta lisäävät prosessit. Osarakennuksen aikana löysä/vapaa jauhe on riittävä tukimateriaali polymeereille jauhepetimenetelmissä. Tämä säästää huomattavasti aikaa osien rakentamisen ja jälkikäsittelyn aikana, ja mahdollistaa edistyneet geometriat, joita on vaikea jälkikäsitellä, kun tuet ovat tarpeen. Seurauksena on, että sisäiset jäähdytyskanavat ja muut monimutkaiset ominaisuudet, joidenka koneistaminen on mahdotonta, ovat mahdollisia polymeeri-jauhepetimenetelmällä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 143)

Tukia tarvitaan kuitenkin useimmissa metallien jauhepetimenetelmän prosesseissa. Metallien prosessoinnissa koetut suuret jäännösjännitykset tarkoittavat, että tukiosat vaaditaan tyypillisesti pitämään osa paikoillaan ja ettei se pääse vääntymään. Tämä tarkoittaa, että metalliosien jälkikäsitely tulostuksen jälkeen voi olla kallista ja aikaa vievää. Pienet ominaisuudet (mukaan lukien sisäiset jäähdytyskanavat) voidaan yleensä muodostaa ilman tukia, mutta itse osa on yleensä kiinnitetty rakennusaluksen pohjassa olevaan

substraattiin, jotta se ei vääntyisi. Tämän seurauksena osan suunta ja tukien sijainti ovat avaintekijöitä rakennuksen asettamisessa. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 143)

Jauhepohjaisten ainetta lisäävien prosessien tarkkuus ja pinnanlaatu ovat tyypillisesti heikompia kuin nestepohjaisten prosessien. Tarkkuuteen ja pinnanlaatuun vaikuttavat kuitenkin voimakkaasti käyttöolosuhteet ja jauheen hiukkaskoko. Hienommat hiukkaskoot tuottavat tasaisempia ja tarkempia osia, mutta niitä on vaikea levittää ja käsitellä. Suuremmat hiukkaskoot helpottavat jauheen käsittelyä ja toimittamista entistä helpommin, mutta heikentävät pinnanlaatua, yksityiskohtien kokoa ja kerroksen vähimmäispaksuutta. Näissä prosesseissa käytetyt rakennusmateriaalit kutistuvat tyypillisesti 3–4%, mikä voi johtaa osien vääristymiseen. Materiaalit, joilla on alhainen lämmönjohtavuus, johtavat parempaan tarkkuuteen, koska sula-allas ja kiinteytyminen ovat paremmin hallittavissa ja osien kasvu minimoidaan, kun lämmönjohtavuus minimoidaan. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 143)

Jauhepeti prosesseissa rakennusaika voi olla pidempi kuin muilla ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä, koska mukana ovat esilämmitys- ja jäähdytysjaksot. Kuitenkin, kuten useampien uudempien laitemallien kohdalla, irrotettavat rakennusalustat mahdollistavat esilämmityksen ja jäähtymisen tapahtuvan ”offline-tilassa”, mikä mahdollistaa huomattavasti suuremman tuottavuuden. Lisäksi jauhepetimenetelmällä on kyky tulostaa sisäkkäisesti polymeeriosia kolmiulotteisesti, koska kappaleet eivät tarvitse tukia. Tämä tarkoittaa, että samanaikaisesti voidaan tulostaa monia osia rinnakkain/sisäkkäin, mikä parantaa dramaattisesti näiden prosessien tuottavuutta verrattuna prosesseihin, jotka vaativat tukia. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 143-144)

## **2.3 Materiaalin pursottaminen**

### **2.3.1 Tekniikan peruseriaate**

Materiaalien pursottaminen on 3D-tulostustekniikka, joka käyttää perusmateriaalinaan yhtenäistä filamenttia, joka on tehty kestopuovista (Ngo, Kashani et al. 2018 s. 174). Filamenttia syötetään kelalta kammioon, missä filamentti sulatetaan. Säiliössä oleva materiaali pakotetaan ulos suuttimen kautta paineen avulla. (Lee, An et al. 2017 s. 122) Jos paine pysyy vakiona, tuloksena on, että pursotettu materiaali (jota yleisesti kutsutaan filamentteiksi) virtaa vakionopeudella ja sen poikkileikkauksen halkaisija pysyy vakiona. Tämä halkaisija pysyy vakiona, jos myös suuttimen nopeus pysyy vakiona pintaan nähden, joka vastaa virtausnopeutta. Materiaalin pursotuksessa käytettävän materiaalin on oltava puolikiinteässä tilassa, kun se tulee ulos suuttimesta. Tämän materiaalin tulee

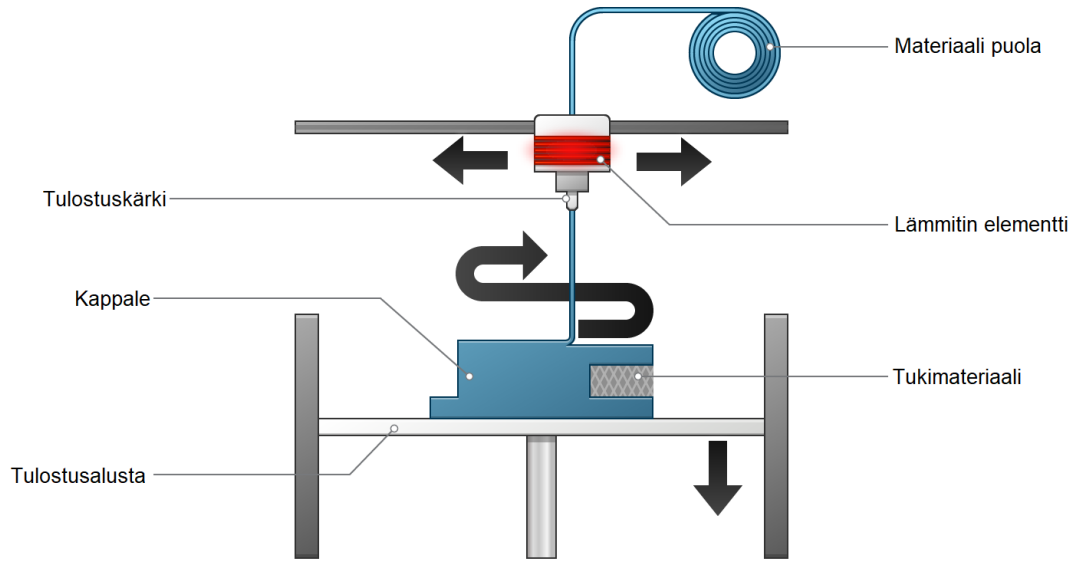
jähmettyä täysin, jotta se pysyy muodossaan. Lisäksi pursotettavan materiaalin pitää sitoutua jo pursotettuun materiaaliin, jotta saadaan aikaiseksi kiinteä rakennelma. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 147)

Koska materiaali pursotetaan tulostuskärjen läpi, tarvitsee tulostuskärjen pystyä liikkumaan vaakatasossa, sekä pysäyttämään, että käynnistämään materiaalin virtauksen kesken pursotuksen. Kun kerros on valmis, on joko tulostuskärjen liikuttava ylöspäin tulostettavan kerroksen paksuuden verran tai siirtää tulostettavaa osaa uuden kerroksen verran alaspäin, jotta voidaan pursottaa uusi kerros. Ensimmäinen kerros pursotetaan lämmitetylle rakennusaluustalle ja seuraavat kerrokset tulostetaan aina edellisen päälle. Jotta materiaalin pursottamisella voidaan tehdä kolmiulotteisia kappaleita, niin tarvitsee materiaalin pursotuslaitteissa olla vähintään kolme akseli, joita pitkin liikutetaan tulostuskärkeä ja/tai tulostusalueita. Liikuttelu tapahtuu tietokone ohjauksen avulla.

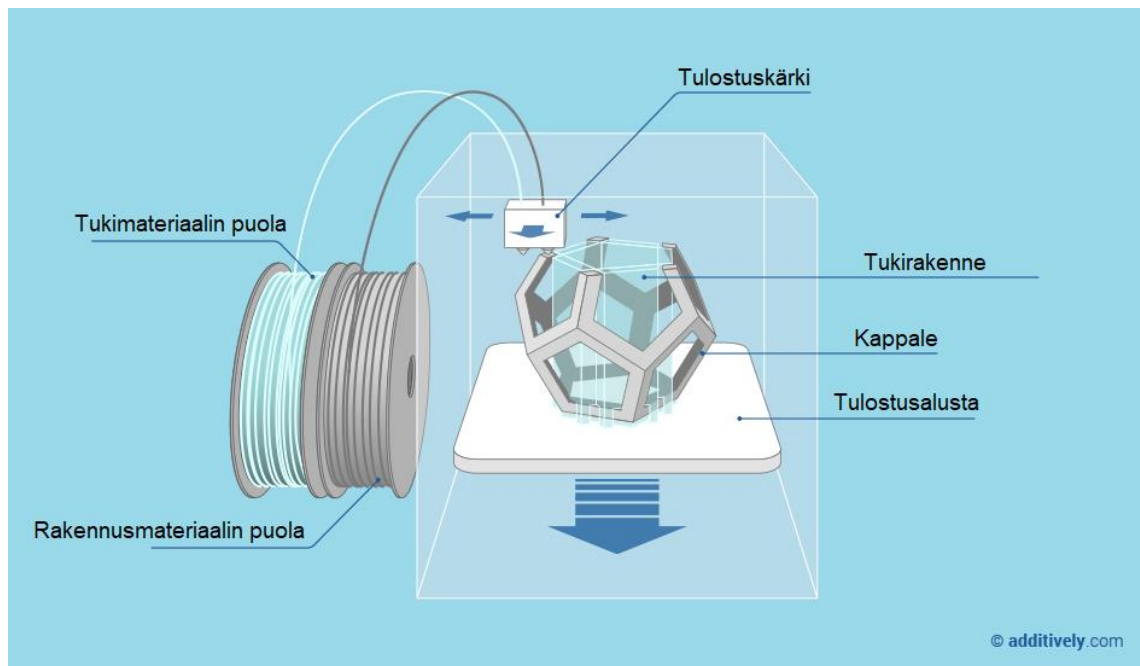
Materiaalien pursotus prosessia käytettäessä on kaksi ensisijaista lähestymistapaa. Yleisimmin käytetty tapa on lämmön avulla hallita materiaalin olomuotoa. Sulatettava materiaali nesteytetään tulostuskärjen säiliön sisällä niin, että se voi virrata suuttimen läpi, jotta se voi sitoutua jo pursotetun materiaalin kanssa ennen jähmettymistään. Tämä lähestymistapa on samanlainen kuin tavanomaiset polymeerien materiaalin pursotusprosessit, paitsi että tulostuskärki on asennettu pystysuoraan tulostusalueeseen nähdessänsä sijaan, että se pysyisi kiinteästi vaaka-asennossa.

Vaihtoehtoinen lähestymistapa on käyttää kemiallista muutosta kiinteytymisen aikaansaamiseksi. Tällaisissa tapauksissa kovetinaine ja jäännösluotin reagoi ilman kanssa tai yksinkertaisesti "märkä" materiaali kuivuu ja kovettuu. Siksi osat voivat kovettua tai kuivua täysin vakaiksi. Tätä lähestymistapaa voidaan hyödyntää tahnamateriaaleilla. Lisäksi sitä voidaan soveltaa paremmin biokemiallisiin sovelluksiin, joissa materiaalien on oltava biologisesti yhteensopivia elävien solujen kanssa ja siten materiaalin valinta on hyvin rajoitettua.

Materiaalien pursotuslaitteissa on yleisesti 1-2 tulostuskärkeä (yleensä vain yksi tulostuskärki) mutta on myös laitteita, joissa on enemmänkin tulostuskärkiä. Kärkien lukumäärällä voidaan nopeuttaa tulostamista ja useamman kärjen laitteilla on mahdollista tulostaa useampia materiaaleja saman aikaisesti. Useamman materiaalin pursottamisen mahdollisuus avaa kappaleiden valmistamisen komposiittimateriaaleista. Myös useamman materiaalin pursottaminen helpottaa kappaleen rakenteiden tukemista ja tukirakennelmien poistamista (Prakash, Nancharai et al. 2018 s. 3875). Kuvissa 6 ja 7 on esitelty periaatekuvat yhden ja kahden tulostuskärjen materiaalien pursotuslaitteista.



**Kuva 6.** Yhden tulostuskärjen laite. (Dassault Systems 2020)



**Kuva 7.** Kahden tulostuskärjen laite. (Additively 2020)



### 2.3.2 Materiaalit

Materiaalien pursotusmenetelmälle on todella paljon eri materiaaleja. Suosituimpia materiaaleja on kuitenkin kestopuovut, kuten ABS, PLA, HIPS, TPU ja Nylon. Viime vuosien aikana myös erittäin korkean suorituskyvyn muoveja, kuten PEEK tai PEI on tullut saataville. Lisäksi materiaalin pursotusmenetelmällä voidaan tulostaa keraameja ja betonia. (Dassault Systems 2020)

Kun materiaalin pursotus 3D-tulostimet tuli mahdollista varustaa useilla tulostuskärjillä, niin avasi tämä tulostettavien kappaleiden tulostamisen komposiittimateriaaleista. Tyyppillisesti komposiittien tulostamisessa 3D-tulostimessa on vähintään kaksi tulostuskärkeä. Tulostusprosessissa yksi suutin toimii normaalisti materiaalien pursotusprosessin mukaisesti, eli se pursottaa muovifilamenttia, joka muodostaa kappaleen ulkokuoren ja sisäisen matriisin. Toinen suutin pursottaa jatkuvan säikeen komposiittikuitua jokaiselle kerrokselle. Komposiittikuidut ovat perinteisesti hiilikuitua, lasikuitua tai kevlaria. Nämä jatkuvat komposiittikuitulangat 3D-tulostettujen osien sisällä lisäävät kappaleen lujuutta, joka on verrattavissa metallista valmistettuihin osiin. Komposiittimateriaalien käytön lisäksi kerrosten levitysstrategialla voi vaikuttaa osien lujuuteen. Levitysstrategia voidaan jakaa kahteen eri strategiaan; isotrooppiseen kuitutäyttöön tai samankeskiseen kuitutäyttöön. (Dassault Systems 2020)

On myös mahdollista tulostaa materiaalien pursotusmenetelmällä komposiittimateriaaleja laitteilla, joissa on vaan yksi tulostuskärki. Näiden laitteiden edellytyksenä on, että perusmateriaalia eli kestopuovia on riittävä määrä kerrosten kunnolliseen kiinnittymiseen. Kahden materiaalin sekoittaminen yhdessä filamentissa mahdollistaa puun 3D-tulostamisen. (puupartikkeleita on sekoitettuna PLA:han), metallitulostuksen (metallipartikkeleita sekoitettuna johonkin kestopuoviin) ja myös hiilikuitua voidaan upottaa kestopuoviin.

Taulukossa kahdeksan on esitelty perinteisiä kestopuoveja, joita käytetään materiaalien pursotusmenetelmässä. Lisäksi Taulukossa on kuvailtu materiaalien ominaisuuksia ja niiden käyttökohteita ja teollisuusaloja. (Dassault Systems 2020)

**Taulukko 8.** *Kestomuovien ominaisuudet ja niiden käyttö eri aloilla. (Lee, An et al. 2017 s. 123)*

Materiaali	Ominaisuudet	Käyttökohteet/teollisuudet
ABS	Kova ja vahva	autoteollisuus, ilmailuala ja lääketieteelliset laitteet
ASA	Mekaaninen lujuus ja UV-kestävyys	Toiminnalliset prototyypit kannattimista ja sähkölaitteiden koteloista autoteollisuuden prototyyppeihin. Ulkokäyttöön ja tuotannon käytännöllisiin osiin
Nylon 12	Hyvä kemiallinen kestävyys, korkea väsymiskestävyys ja korkea iskunkestävyys	Ihanteellinen materiaali sovelluksiin, jotka vaativat iskunkestäviä komponentteja ja suurta väsymiskestävyyttä, mukaan lukien antennin suojukset, mittatilaustyönä tehdyt työkalut, kitkasovitus insertit ja napsautussovitus auto- ja avaruusteollisuudessa
PC	Korkea vetolujuus ja taiputuslujuus	Toiminnalliset prototyypit, työkalut ja kiinnikkeet, puhallusmuovaus auto- ja avaruusteollisuudessa
PPSF/PPSU	Erinomainen kemiallinen- ja lämmönkestävyys sekä mekaaninen lujuus	PPSF / PPSU kestää erilaisia sterilointimenetelmiä, mukaan lukien eteenioksidi, autoklaavi ja säteily. Steriloitavat lääketieteelliset laitteet, autoteollisuuden prototyypit ja työkalut vaativiin sovelluksiin monilla eri aloilla
PEI tai ULTEM	Bioyhteensopiva, erinomainen mekaaninen, kemiallinen ja termien stabiilisuus	Korkea lujuus/painosuhte ja olemassa olevan sertifikaatin ansiosta ULTEM on ihanteellinen prototyyppien pikavalmistukseen ja edistyneisiin työkalusovelluksiin ilmailu-, auto-, lääketieteellisessä ja elintarviketeollisuudessa
PLA	Hyvä vetolujuus ja pinnan laatu	Ihanteellinen malleille ja prototyypeille, jotka vaativat esteettisiä yksityiskohtia ja ympäristöystävällisyyttä.

TPU	Erinomainen repäisy- ja kulutuskestävyys, korkea iskunkestävyys ja kovuus	Poikkeuksellinen joustavuus (ts. Murtovenymä) ja korroosionkestävyys monille yleisille teollisuuskemikaaleille ja öljyille. Erittäin monipuolinen materiaali, jolla on sekä kumin että muovin ominaisuudet moniin teollisiin sovelluksiin
-----	---	---

### 2.3.3 Tarkkuus

Materiaalien pursottamiseen vaikuttaa kaikki asiat mitä edellisten menetelmien vastavassa kohdissa on käyty lävitse. Jos verrataan materiaalin pursotus tekniikan tarkkuutta esimerkiksi SLA-prosessiin, niin materiaalin pursotuksessa saavutettavat tarkkuudet ovat huomontia kuin SLA-prosessilla valmistettujen osien tarkkuudet. Etenkin pinnanlaadun suhteen materiaalien pursotusprosessi on huomontia kuin SLA-prosessi. Materiaalin pursotusprosessin korostuu kuvassa kolme mainitut asiat.

Materiaalien pursottamisen tarkkuuden hallintaan vaikuttaa myös moni muu asia mitä edellisissä prosesseissa on kerrottu. Materiaalien pursotusprosessin tarkka hallittavuus on monimutkainen kompromissi, joka riippuu huomattavasta määrästä parametrejä (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 159). Nämä hallittavat parametrit ovat syöttöpaine, lämpötila, suuttimen halkaisija, pursotettavan materiaalin ominaisuudet, painovoima ja muut tekijät ja lämpötilan kohoaminen kappaleessa.

Syöttöpainetta vaihdetaan säännöllisesti rakennuksen aikana, koska se on tiiviisti kytkettynä muihin tulo-ohjausparametreihin. Syöttöpaineen (tai materiaaliin kohdistetun voiman) muuttaminen johtaa vastaavaan lähtövirtausnopeuden muutokseen. Useat muut parametrit vaikuttavat kuitenkin myös virtaukseen vähemmässä määrin. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 160)

Vakio lämpötilan ylläpitäminen kammion sisällä olisi ihanteellinen tilanne. Pienet vaihtelut ovat kuitenkin väistämättömiä ja aiheuttavat muutoksia virtausominaisuuksissa. Lämpötilan havaitseminen tulisi suorittaa kammiossa, jotta tämä löyhä parametri voidaan sisällyttää syöttöpaineen säätömalliin lämpövaihtelujen kompensoimiseksi. Lämpötilan noustessa paineen tulisi laskea hiukan saman virtausnopeuden ylläpitämiseksi. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 160)

Suuttimen halkaisija on vakio tietylle rakenteelle, mutta monet suulakepuristus pohjaiset järjestelmät sallivat vaihdettavat suuttimet, joita voidaan käyttää nopeuden kompensoimiseksi tarkkuutta vastaan. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 160)

Ihante tapauksessa laitteen ohjausmallien tulisi sisältää tiedot käytetyistä materiaaleista. Tähän sisältyy viskositeettitietoja, jotka auttavat ymmärtämään materiaalin virtausta suuttimen läpi. Koska viskoosia virtausta, virumista jne. on erittäin vaikea ennustaa ja virtauksen tarkka aloittaminen ja pysäyttäminen voi olla vaikeaa. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 160)

Painovoima ja muut tekijät vaikuttavat seuraavanlaisesti tulostuksen tarkkuuteen. Esimerkiksi, jos kammioon ei kohdisteta painetta, on mahdollista, että materiaali virtaa edelleen kammion sisällä olevan sulamateriaalin massan vuoksi, joka aiheuttaa hydrostaattisen paineen. Tätä voi pahentaa myös kaasumaisen paineen lisääntyminen kammion sisällä, jos se on suljettu. Sula- ja otsavastusvoimien pintajännitys suuttimen sisäpinoilla voi hidastaa tätä vaikutusta. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 160)

Lämpötilan kohoaminen ei yleensä ole hirveän suuri ongelma kappaleissa. Mutta Eri geometriat kuitenkin jäähtyvät eri nopeuksilla. Suuret, massiiviset rakenteet pitävät lämpöä pidempään kuin pienemmät, ohuimmat osat, koska pinnan ja tilavuuden suhde vaihtelee. Koska tällä voi olla vaikutusta ympäröivään ympäristöön, se voi myös vaikuttaa koneen hallintaan. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 160)

Edellä mainittujen ja muiden tekijöiden huomioon ottaminen voi auttaa paremmin hallitsemaan materiaalin virtausta suuttimesta ja lopullisen osan vastaamaan sille tarkoitettua tarkkuutta. Muut hallitsemattomat tai vähäisesti hallittavissa olevat tekijät voivat kuitenkin osoittautua ongelmallisiksi virtauksen tarkan säätämisen kannalta. Esimerkiksi materiaalin pursotuspohjaisten järjestelmien suuttimen/suuttimien puhdistaminen suuttimen kärkeen kiinnittyneen ylimääräisen materiaalin muodostumisen estämiseksi. Taulukossa yhdeksän on annettu tyypillisimmät tarkkuudet, jotka saavutetaan materiaalien pursotusprosessilla.

**Taulukko 9.** materiaalin pursotusprosessin tyypillisimmät tarkkuudet. (3ERP 2020, Additive 2020, Materialise 2020)

Tarkkuus	Kerrospaksuus	Pinnan karheus (Ra)	yksityiskohdan koko	seinämän paksuus
±0.5% (Pöytämallit)	0.18 – 0.40 mm	Viimeistelemättömillä osilla on tyypillisesti karkea pinta, mutta kaikenlaiset pintakäsittelyt ovat mahdollisia. Osat voidaan tasoittaa, maalata ja päällystää	Tarkimmillaan tarkkuus on 0.178 mm	1 mm
±0.15% (teollisuuden tarkoitetut laitteet)	Kerrospaksuus on myös riippuvainen valitusta materiaalista			

### 2.3.4 Huomioitavaa

FDM-koneet ovat erittäin menestyviä ja täyttävät monien teollisuuskäyttäjien vaatimukset. Tämä johtuu osittain materiaalien ominaisuuksista ja osittain koneiden alhaisista kustannuksista. Tätä tekniikkaa käytettäessä on kuitenkin haittoja, pääasiassa rakennusnopeuden, tarkkuuden ja materiaalihiheyden suhteen. Pienemmillä kerrospaksuuksilla saavutetaan tarkempia tuloksia mutta pienen kerrospaksuuden käyttäminen nostaa tulostusaikaa. Pitää myös huomioida, että kaikki suuttimet ovat pyöreitä ja siksi on mahdotonta piirtää teräviä ulkoisia kulmia; missä tahansa kulmassa tai reunassa on säde, joka vastaa suuttimen sädettä. Sisäiset kulmat ja reunat myös pyöristyvät. Todellinen tuotettu muoto riippuu suuttimesta, kiihtyvyyden- ja hidastuvuusominaisuuksista ja materiaalin visko elastisesta käytöstä sen jähmettyessä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 164)

Materiaalien pursotusmenetelmässä tarvitaan tukirakennelmia tukeakseen tukea itsenäisiä ja irrotettuja ominaisuuksia ja pitää osan kaikki ominaisuudet paikoillaan valmistusprosessin aikana. pursotuspohjaisissa järjestelmissä nämä ominaisuudet on pidettävä paikoillaan valmistamalla lisätukia. Materiaalin pursotuksessa on kahta tyyppiä rakentaa tukirakennelmat. Nämä vaihtoehdot ovat tulostaa tukirakennelma, joko samasta materiaalista kuin itse kappale tai eri materiaalista kuin itse tulostettava kappale. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 156)

Jos pursotuspohjainen järjestelmä rakennetaan yksinkertaisimmalla mahdollisella tavalla, jolloin siinä on vain yksi ekstruusiokammio. Jos kammioita on vain yksi, tuet on tehtävä samalla materiaalilla kuin osa. Tämä voi edellyttää osien ja tukien suunnittelua ja huolellista sijoittamista toisiinsa nähden, jotta ne voidaan erottaa myöhemmin. Kuten aikaisemmin mainittiin, kappalemateriaalin lämpötilan säätäminen viereiseen materiaaliin nähden voi johtaa murtumapinta-vaikutukseen. Tätä murtumapintaa voidaan käyttää keinona erottaa tuet kappalemateriaalista. Yksi mahdollinen tapa saavuttaa tämä voi olla kerrosten erotetäisyyden muuttaminen kerrostettaessa osan materiaalia tukimateriaalin päälle tai päinvastoin. Lisäetäisyys voi vaikuttaa energiansiirtoon riittävästi johtaakseen tähän murtumailmiöön. Vaihtoehtoisesti kammion tai suulakepuristuslämpötilan säätäminen tukien puristamiseksi voi olla tehokas strategia. Tukimateriaalia on kuitenkin kaikissa tapauksissa jokseenkin vaikea erottaa osasta. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 156)

Tehokkain tapa poistaa tuet osasta on valmistaa ne eri materiaalista. Materiaalien ominaisuuksien vaihtelua voidaan hyödyntää siten, että tuet ovat helposti erotettavissa osamateriaalista joko visuaalisesti (esim. käyttämällä eri värimateriaalia), mekaanisesti (esim. käyttämällä heikompaa materiaalia) tai kemiallisesti (esim. materiaali, joka voidaan poistaa liuottimella vaikuttamatta kappaleen materiaaliin). Tätä varten materiaalin pursotuspohjaisessa laitteessa tulisi olla toinen tulostuskärki. Tällä tavalla sekundaari-materiaali voidaan valmistaa oikeilla rakennusparametreilla ja pursottaa samanaikaisesti nykyisen rakennusmateriaalikerroksen kanssa. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 157)

## 2.4 Suorakerrostus

### 2.4.1 Tekniikan peruseräite

Suorakerrostus (Direct Energy Deposition) tekniikkaa voidaan hieman verrata materiaalin pursottamistekniikkaan. Suorakerrostamisessa kappaleita tuotetaan sulattamalla materiaalia ja materiaalia lasketaan/suihkutetaan rakennusalustalle tai edellisen kerroksen päälle. Kappaleet rakentuvat siis samaan tapaan kuin materiaalin pursotus menetelmässä. Tätä ainetta lisäävää valmistusmenetelmää käytetään pääsääntöisesti vain metallijauheille tai metallifilamenteille, vaikka tämä peruslähestymistapa voi toimia myös polymeereillä, keraameilla ja metallimatriisikomposiiteilla. Tämän johdosta tähän tekniikkaan voidaan jossain tapauksissa viitata ”metallien suorakerrostustekniikalla”.

Useimmat suorakerrostus 3D-tulostimet ovat teollisuuskoneita, joiden pinta-alan tarve on suuri ja joiden toiminta edellyttää suljettua ja hallittua ympäristöä. Tyypillisesti tulos-

tuskärki on asennettu moniakseliseen varteen, joka on suljetun laitteen sisällä. Tulostuskärjen avulla kappaleen pinnalle suihkutetaan materiaalia missä se jähmettyy. Niin kuin edelläkin jo mainittiin, suorakerrostus on verrattavissa materiaalien pursotustekniikkaan. Ainoa erona on, että suorakerrostus laitteet ovat, joko neljä tai viisi akselisia, kun taas materiaalien pursotuslaitteet ovat kolmeakselisia. (Dassault Systems 2020)

Suorakerrostus prosessissa prosessoidaan energiaa kapealle, fokusoidulle alueelle lämmittääkseen substraatin ja samalla sulattaen uutta materiaalia, joka suihkutetaan lämmitetyn substraatin sula-altaaseen. Eli siis suorakerrostusprosesseissa ei sulateta valmiiksi asetettua jauhepetiä niin kuin jauhepetimenetelmissä vaan suorakerrostuksessa suihkutetaan sulaa materiaalia uuden kerroksen luomiseksi. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 245)

Suorakerrostusprosesseissa käytetään lämmönlähteinä fokusoitua laseria tai elektroni-suihkua sulattamaan materiaali. Suorakerrostus termi kattaa kuitenkin useita erilaisia tekniikoita. tekniikat voidaan erottaa toisistaan, tavalla kuinka ne sulattavat materiaalin. Jokainen eri tapa sopii erilaisiin ja erityisiin tarkoituksiin. Suosituimmat tekniikat ovat LENS, aerosolisuihkutekniikka, EBAM ja LDW (Dassault Systems 2020).

LENS 3D-valmistusjärjestelmät käyttävät lasereita rakentamaan kohteita kerros kerrosittain jauhemaisista metalleista, seoksista, keraameista tai komposiiteista. Tämä tekniikka kehitettiin 1995 Sandian kansallisissa laboratorioissa (Gao, Zhang et al. 2015 s. 70). LENS-prosessin on tapahduttava ilmatiiviisti suljetussa kammiossa, joka on täytetty argonilla, niin että happi- ja kosteustasot pysyvät erittäin alhaisina. Tämä pitää tulostettavan osan puhtaana ja estää hapettumisen. Metallijauhemateriaali toimitetaan suoraan tulostuskärkeen. Kun yksi kerros on tulostettu, tulostuskärki siirtyy seuraavaan kerrokseen. Koko osa rakentuu peräkkäisistä kerroksista. Kun tulostus on valmis, komponentti poistetaan ja se voidaan lämpökäsitellä, isostaattisesti kuuma puristaa, koneistaa tai viimeistellä millä tahansa vaaditulla tavalla. (Dassault Systems 2020)

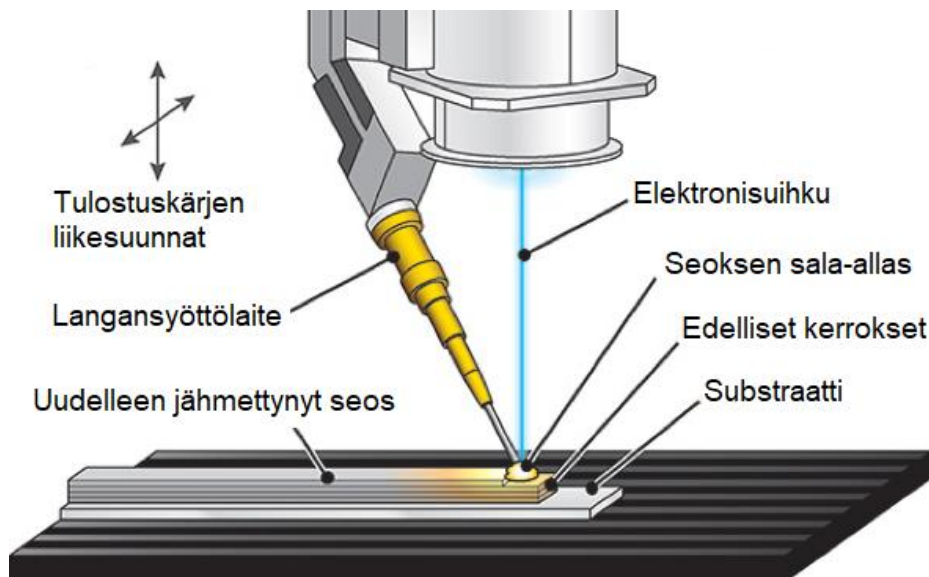
Aerosolisuihkutus 3D-tulostustekniikka tarjoaa kustannustehokkaan, skaalautuvan prosessin tulostaa toimivia antennoja ja antureita suoraan kuluttaja- ja teollisuuskomponenteille, mikä tekee niistä IoT-laitteita. Mahdollisia painettuja antennoja ovat LTE, NFC, GPS, Wifi, WLAN ja BT. Tämä tekniikka on lähempänä yksinkertaisia kerrostustekniikoita, mutta sopii monimutkaisille kaareville pinnoille. (Dassault Systems 2020) Aerosolisuihkutus järjestelmät ovat ihanteellisia kehittää, valmistaa, parantaa ja korjata kulutus-elektronikan, puolijohdepakkausten, näyttöjen, ilmailu-, puolustus-, auto- ja biotieteiden loppukäyttötuotteita koskevia tehokkaita elektronisia ja biologisia laitteita. Aerosolisuih-

kutus tekniikka toimii suurella määrällä materiaaleja mukaan lukien johtavien nanohiukkasmetallimusteiden, eristetahnojen, puolijohteiden ja muilla toiminnallisilla materiaaleilla. (Dassault Systems 2020)

EBAM on ainetta lisäävä valmistustekniikka, joka tuottaa laajamittaisia metallirakenteita. Tässä menetelmässä metalli lankaa kerrostetaan kerros kerrallaan suoraan tulostuskärjen kautta, kunnes osa on saavuttanut halutun muodon ja on valmis viimeistelyyn. Materiaalin kerrostumisnopeudet ovat 3 - 9 kg metallia tunnissa. Tekniikalle yhteensopivia metalleja ovat titaani, tantaali ja nikkeli. Tätä suorakerrostus tekniikkaa voidaan käyttää myös vaurioituneiden osien korjaamiseen. (Dassault Systems 2020)

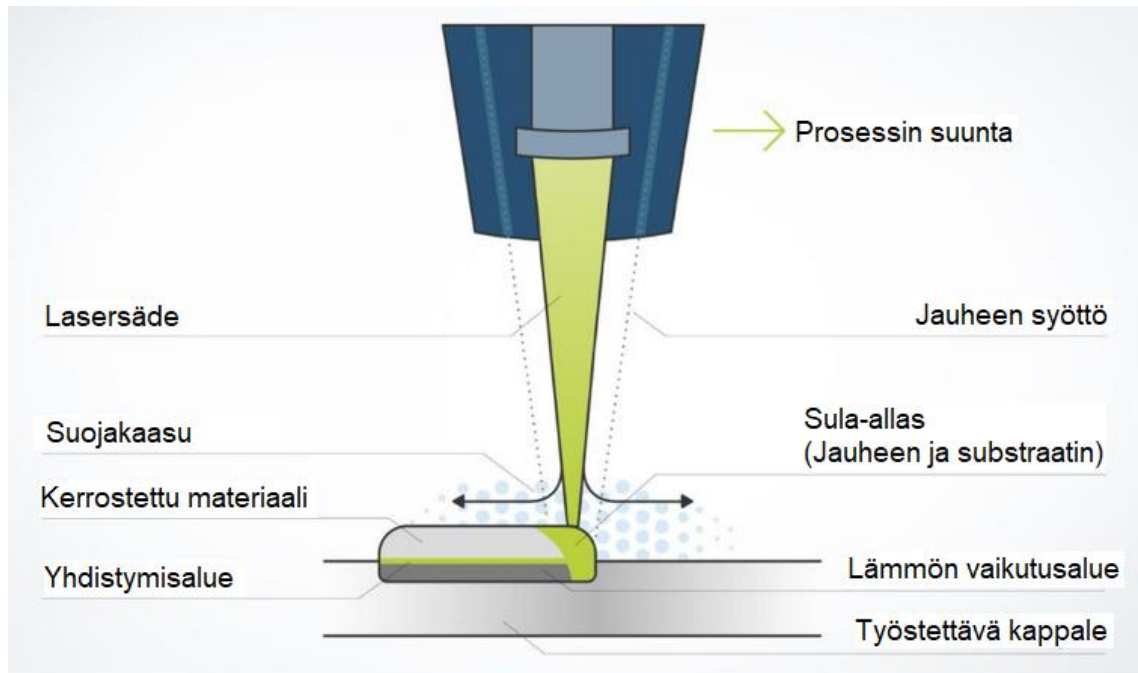
LDW ainetta lisäävässä valmistusmenetelmässä lisätään jauhesuuttimen avulla tapahtuvaa metallin kerrostamista, joka voi olla jopa 10 kertaa nopeampi kuin jauhepetiteknikat. Lisäksi DMG MORI -yhtiö on integroinut LDW-ainetta lisäävän valmistustekniikkansa 5-akseliseen jyrsinkoneeseen. Tämä innovatiivinen hybridiratkaisu yhdistää lasermetallin kerrostusprosessin joustavuuden koneistusprosessin tarkkuuteen ja näin ollen säästetään ainetta lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistetuille osille jyrsittyjen osien tarkkuus. Tämä yhdistelmä tekee mahdolliseksi valmistaa erikokoisia erittäin tarkkoja metalliosia. (Dassault Systems 2020)

Kuvissa kahdeksan ja yhdeksän on esiteltyä periaatekuvat suorakerrostusprosessista. Kuvassa kahdeksan on suorakerrostusprosessi langalla ja kuvassa yhdeksän on suorakerrostus jauheella.



**Kuva 8.** Langalla tapahtuva EBEM-suorakerrostusprosessi. (Sciaky 2020)





*Kuva 9. Jauheella tapahtuva laser-suorakerrostusprosessi. (TRUMPF 2020)*

## 2.4.2 Materiaalit

Suorakerrostus menetelmällä voidaan 3D-tulostaa laajalti eri metalleja. Tekniikalla on myös mahdollista 3D-tulostaa polymeerejä ja keraameja. Suorakerrostusmenetelmän metallimateriaaliksi soveltuu melkein kaikki metallit, jotka ovat hitsattavia. Näihin materiaaleihin sisältyy alumiini, kupari, titaani ja sen seokset, ruostumaton teräs, työkaluteräs, kupari-nikkeliseokset, inconel (Cr-seos), tantaali, volframi, molybdeeni ja niobium. Tyypillisesti lankamateriaalien halkaisijat ovat 1-3 mm ja jauhehiukkaskoko on samanlainen kuin jauhepetimenetelmissä käytetty eli 20-150  $\mu\text{m}$  (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 258).

## 2.4.3 Tarkkuus

Suorakerrostuksen tarkkuudet ja pinnanlaatu eivät ole yhtä hyviä kuin edellä käsitellyillä aineilla lisäävillä menetelmillä. Tarkkuuteen ja pinnanlaatuun voidaan vaikuttaa lämmönlähteen säteen pienemmällä koolla ja hitaammalla kerrostamisnopeudella (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 266). Hitaampi kerrostamisnopeus vaikuttaa suoraan tulostusaikaan lisäämällä sitä. Taulukossa 10 on taulukoitu tyypillisimmät suorakerrostusprosessin tarkkuudet.

**Taulukko 10.** Suorakerrostusprosessin tyypillisimmät tarkkuudet. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 248 ja 266) ja (3Diligent 2020)

Tarkkuus	Kerrospaksuus	Pinnan karheus (Ra)	yksityiskohdan koko
< 0.25 mm	0.25 – 0.5 mm	25 µm	0.25 mm

#### 2.4.4 Huomioitavaa

Suorakerrostus prosessit pystyvät tuottamaan täysin tiheitä osia, joilla on erittäin hallittavissa olevat mikrorakenteelliset ominaisuudet. Nämä prosessit voivat tuottaa toiminnallisesti luokiteltuja komponentteja, joiden koostumus vaihtelee X-, Y- ja Z-suunnissa. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 266)

Suorakerrostus prosessien päärajoitukset ovat huono resoluutio ja pinnanlaatu. Hietaampi rakennusnopeus on toinen rajoitus. Tulostusajat voivat olla erittäin pitkiä näille prosesseille. Parempien tarkkuuksien saavuttamiseksi vaaditaan pieniä lämmönlähteen säteen kokoja ja tulostus nopeuksia. Jotta saavutettaisiin nopeampia tulostusaikoja, kapaleen resoluutio ja pinnalaatu heikkenee. Laserin tehon ja tulostusnopeuden muutokset paremman tarkkuuden tai kerrostumisnopeuden saavuttamiseksi voivat myös vaikuttaa kerrostuneiden komponenttien mikrorakenteisiin, ja siten optimaalisen tulostusnopeuden löytäminen edellyttää kompromisseja rakennuksen nopeuden, tarkkuuden ja mikrorakenteen välillä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 266)

Suorakerrostus prosessilla on kuitenkin muutamia ainutlaatuisia ominaisuuksia verrattuna muihin ainetta lisääviin valmistusmenetelmiin. Suorakerrostus mahdollistaa ennennäkemättömään mikrorakenteen hallintaan. Mahdollisuus muuttaa materiaalin koostumusta ja jähmettymisastetta yksinkertaisesti muuttamalla jauhesyöttöseoksia ja prosessiparametreja antavat suunnittelijoille ja tutkijoille valtavan vapauden. Toinen ainutlaatuinen ominaisuus on, että suorakerrostuksella voidaan tuottaa tietynsuuntaisia ja yksikristallisia rakenteita. Yksi tärkeimmistä suorakerrostuksen ominaisuuksista on sen kyky viallisten ja käyttövaurioituneiden huipputekniikan komponenttien, kuten esimerkiksi turbiinin siipien, tehokkaaseen korjaamiseen ja kunnostamiseen. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 266)

Suorakerrostuksen rajoitukseni muihin ainetta lisääviin valmistusmenetelmiin on, että sillä ei voi tuottaa yhtä monimutkaisia rakenteita kuin jauhepetimenetelmillä. Tämä johtuu tarpeesta tiheään tukirakenteeseen monimutkaisille geometrioille ja siitä tosiasiaista, että suuremmat sulavarastot suorakerrostuksessa johtavat heikentyneeseen kykyyn tuottaa pienimuotoisia piirteitä, suurempaa pinnankarheutta ja pienempään tarkkuutta.

Suorakerrostuksella tehtyjen osien jälkikäsitteily sisältää tyypillisesti tukirakenteiden tai substraatin poistamisen, jos substraattia ei ole tarkoitettu olevan osa lopullista komponenttia. Viimeistelytyöt ovat yleensä tarpeen suhteellisen huonon osien tarkkuuden ja pinnanlaadun takia. Jännitysten poistamiseksi lämpökäsittely voidaan tarvita jäännösjännitysten lievittämiseksi. Lisäksi materiaalista riippuen lämpökäsittely voi olla tarpeen halutun mikrorakenteen aikaansaamiseksi. Esimerkiksi erkautuskarkenevista materiaaleista valmistetut osat vaativat joko suoran karkaisukäsittelyn tai liuoskäsittelyn, jota seuraa karkaisukäsittely lujitusvaiheiden saostumisen aikaansaamiseksi. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 267)

## **2.5 Ainetta lisäävän ja ainetta poistavan menetelmän vertailu**

Ainetta lisäävien ja ainetta poistavien menetelmien vertaileminen on perinteisin tapa verrata ainetta lisäävien tekniikoiden hyviä ja huonoja puolia ainetta poistaviin menetelmiin. Tässä osiossa verrataan edellä käsiteltyjä tekniikoita CNC-koneistukseen, joka edustaa ainetta poistavia menetelmiä. Vertailua suoritetaan eri osioissa, joita ovat materiaalit, nopeus, monimutkaisuus, tarkkuus, geometria ja ohjelmointi.

Ainetta lisäävät menetelmät kehitettiin ensin polymeerien, vahojen ja paperilaminaattien tulostamiseen. Mutta nykyään Tulostettavien materiaalien määrä on hyvin laaja. CNC-koneistusta voidaan hyödyntää lastulevyjen, koneistettavien vaahtojen, koneistettavien vahojen ja polymeerien koneistamiseen. Yleensä edellä mainittuja materiaaleja koneistetaan CNC:llä, kun niitä valmistellaan käytettäväksi monivaiheisissa prosesseissa, esim. valamisessa. CNC-koneistusta voidaan käyttää myös valmiin tuotteen valmistamiseen. Tällöin materiaalit ovat kovia ja suhteellisen hauraita kuten esimerkiksi metallit ja metalliseokset. Metalleista tehtävät kappaleet ovat korkean tarkkuuden omaavia kappaleita ja tarkasti määritellyillä ominaisuuksilla. Joillakin 3D-tulostettavilla kappaleilla voi sitä vastoin olla tyhjiöitä tai anisotropiaa, jotka riippuvat osan orientaatiosta, prosessiparametreista tai siitä, miten suunnitelma on syötetty koneeseen, kun taas CNC-koneistetut osat ovat yleensä homogeenisempia ja laadun kannalta paremmin ennustettavissa. Ainetta lisäävät menetelmät käyttävät materiaaleja tehokkaammin kuin ainetta poistavat menetelmät (Prakash, Nancharaih et al. 2018 s. 3878).

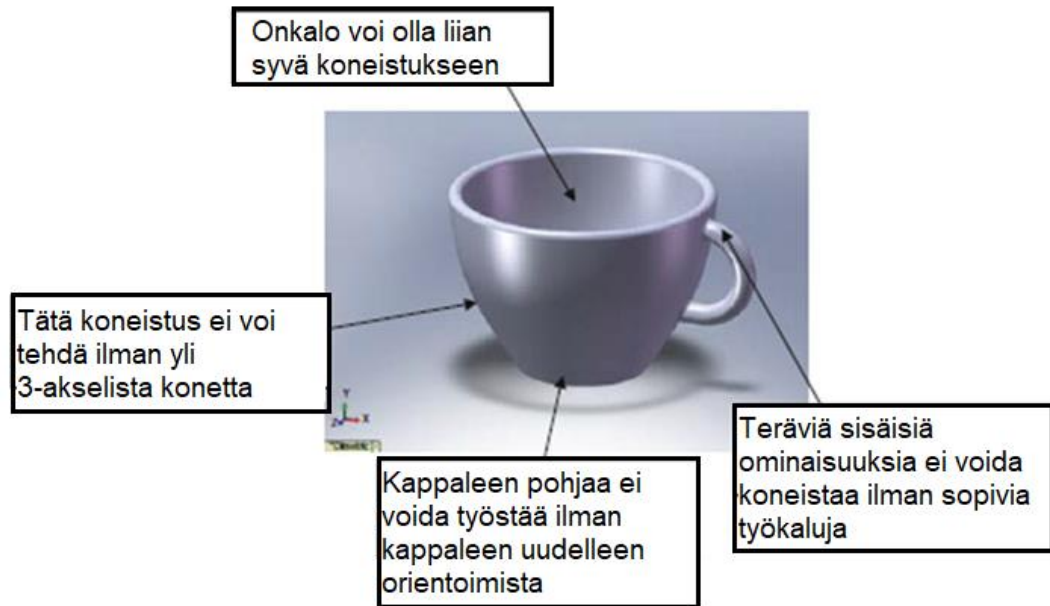
High-speed CNC-koneet voivat yleisesti poistaa materiaalia nopeammin kuin 3D-tulostamalla voidaan lisätä sama määrä materiaalia. Kuitenkin 3D-tulostamisella voidaan tuottaa kappale vain yhdellä prosessilla, kun taas CNC-koneella tehtävät kappaleet tarvitsevat huomattavan määrän koneelle tehtäviä asetuksia ja prosessisuunnittelua, erityisesti kun kappaleiden geometria monimutkaistuu. Joten kun vertaillaan laitteiden no-

peuksia pitää huomioida koko prosessiin kuluva aika eikä pelkästään fyysiseen suorittamiseen kuluva aika (printtaus, koneistus). (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 10-11) CNC on monivaiheinen valmistusprosessi, joka vaatii kappaleen uudelleen asettelemista tai kokonaan uudelleen paikannusta koneessa tai jopa useammassa koneessa. 3D-tulostamalla kappaleen tulostaminen kestää usein muutaman tunnin ja usein tulostetaan yhtä aikaa mahdollisesti useita erilaisia kappaleita kerrallaan. 3D-tulostettujen kappaleiden valmistus/viimeistely voi kestää muutaman päivän, jos vaatimuksena on korkea laatu (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 11). Sama prosessi CNC-koneella voi kestää viikkoja, vaikka käytettäisiin 5 akselista high-speed CNC-konetta (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 11). Tämän lisäksi CNC-konetta käytettäessä valmistusajan kestossa on paljon enemmän epävarmuutta kuin 3D-tulostimen.

3D-tulostamisen etu tulee selvemmin esille mitä monimutkaisempi geometria valmistettavalla kappaleella on, esimerkiksi jos CNC-koneella halutaan valmistaa kappale yhdestä kappaleesta, jolla on monimutkaisia geometrisia piirteitä, niin voi olla, että tätä ei voida edes valmistaa CNC-koneella (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 11). Hyvä esimerkki tästä voi olla pullo, jonka sisällä on laiva.

3D-tulostimen tarkkuus on yleensä muutama kymmenen mikrometriä. 3D-tulostimella on yleensä erilaiset tarkkuudet eri ortogonaalisilla akseleilla. Pystysuoralla akselilla on yleensä suurempi tarkkuus kuin vaakasuorilla akseleilla. Pystysuora akseli vastaa yleensä tulostettavan kappaleen kerrosten paksuudesta. Vaakasuorien akselien tarkkuuteen yleensä vaikuttaa tulostuskärkeä liikuttavat moottorit ja vaihteistot. CNC-koneen tarkkuuteen vaikuttaa samat asiat kuin 3D-tulostuksessa mutta myös CNC-koneissa käytettävien työkalujen geometria vaikuttaa tarkkuuteen, esimerkiksi sisäkulmien säde on riippuvainen työkalusta. Materiaalilla on vaikutusta kummankin valmistusmenetelmän tarkkuuteen.

3D-tulostimet purkavat monimutkaiset 3D-muodot yksinkertaisiksi 2D-poikkileikkauksiksi, näin ollen pintojen yhteys 3D:ssä poistetaan ja jatkuvuus määritetään sen perusteella, kuinka lähellä yhden poikkileikkauksen läheisyys viereisen kanssa on. Koska tätä ei voida helposti tehdä CNC:llä, pintojen työstö on yleensä tuotettava 3D-tilassa. Yksinkertaisilla geometrioilla, kuten sylintereillä, kuutioilla, kartiolla ja niin edelleen. Kuvassa 10 on hyvin huomioitu missä kohdin kappaleen koneistuksessa tulee ongelmia ilman kappaleen manipulointia eri vaiheissa.



**Kuva 10.** Ominaisuudet, jotka kuvaavat CNC koneistuksen ongelmia. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 13)

CNC-koneen ohjelmajärjestyksen määrittäminen voi olla erittäin tärkeää, mukaan lukien työkalun valinta, koneen nopeusasetukset, lähestymisasema ja kulma jne. Monilla 3D-tulostimilla on myös vaihtoehtoja, jotka on valittava, mutta niiden laajuus, monimutkaisuus ja valintojen vaikutukset on minimaalisia verrattuna CNC-koneen valintoihin. Pahinta, mitä todennäköisesti tapahtuu useimmissa 3D-tulostimissa, on, että osa ei tulostu oikein, jos ohjelmointia ei tehdä kunnolla. CNC-koneen väärä ohjelmointi voi johtaa koneen vakaviin vaurioihin ja voi jopa olla vaaraksi ihmisille. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 12)

### 3. TUOTEKEHITYSPROSESSIT

Kun lähetään puhumaan yleisesti ottaen tuotekehityksestä ja prosessista mikä vaaditaan uuden tai jo olemassa olevan tuotteen kehittämiseen, niin pitää kummassakin tapauksessa määritellä tiettyjä reunaehtoja ja tavoitteita. Tässä työssä keskitytään tuotekehitysprosessiin, jossa prototyyppien valmistaminen tapahtuu ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä mutta lopullinen kehitetty tuote voi olla valmistettu, joko perinteisillä menetelmillä, ainetta lisäävillä menetelmillä tai niiden yhdistelmällä. Se miksi prototyyppien pikavalmistus on tärkeätä tuotekehityksessä, niin arvioiden mukaan sillä pystytään säästämään aikaa ja rahaa noin 30-40% perinteiseen tuotekehitysprosessiin nähden, jossa ei käytetä ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä (Chung Wang, Lin et al. 2007 s. 304). Ennen kuin aletaan vertailemaan perinteisillä valmistusmenetelmillä tapahtuvaa tuotekehitysprosessia prosessiin, jossa käytetään hyväksi ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä, niin pitää meidän ensiksi määritellä tuotekehitysprosessi.

Kun lähetään kuvailemaan mitä tahansa prosessissa, niin prosessi on sarja askelia, jotka muuttavat joukon syötettyjä tietoja joukoksi lähtötietoja. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 12) ja (Cheng 2018 s. 35) Suurimmalle osalle fyysiset prosessit ovat tuttuja, esimerkiksi hyllyn kasaaminen. Tuotekehitysprosessi on askelien tai toimintojen sarja, joita yritys käyttää tuotteen suunnitteluun ja kaupallistamiseen (Ulrich, Eppinger 2012 s. 12). Monet näistä vaiheista ja toiminnoista ovat pikemminkin älyllisiä ja organisatorisia kuin fyysisiä. Jotkut organisaatiot määrittelevät ja seuraavat tarkkaa ja yksityiskohtaista kehitysprosessia, kun taas toiset yritykset eivät ehkä edes pysty kuvaamaan prosessiaan. Lisäksi jokaisessa organisaatiossa toteutettava prosessi on ainakin hieman erilainen kuin muissa organisaatioissa. Itse asiassa sama yritys voi seurata erilaisia prosesseja jokaiselle erityyppiselle kehityshankkeelle.

Tarkasti määritelty tuotekehitysprosessi on hyödyllinen monenkin asian näkökulmasta. Nämä näkökulmat ovat laadunvarmistus, koordinointi, suunnittelu, johtaminen ja kehittäminen. Tuotekehitysprosessissa laadunvarmistus helpottuu, kun kehitysprosessi kulkee määriteltyjen vaiheiden ja tarkastuspisteiden läpi. Kun nämä vaiheet ja tarkastuspisteet valitaan viisaasti, kehitysprosessin seuraaminen helpottuu ja näin ollen tämä on yksi tapa varmistaa kehitettävän tuotteen laatu. Koordinoinnin näkökulmasta selkeästi muotoiltu kehitysprosessi toimii yleissuunnitelmana, joka määrittelee kunkin tuotekehitysr ryhmän jäsenen roolit. Suunnitelma ilmoittaa ryhmän jäsenille, milloin heidän avustustaan tarvitaan ja kenen kanssa heidän on vaihdettava tietoja ja materiaaleja. Suunnittelun näkökulmasta kehitysprosessi sisältää välitappeja, jotka vastaavat jokaisen vaiheen loppuun

saattamista. Näiden välietappien ajoitukset prosessin aikana määrittelevät yleisesti koko tuotekehitys projektin aikataulun. Johtamisen näkökulmasta tuotekehitysprosessi on vertailukohta arvioitaessa jatkuvan kehitystyön tuloksia. Vertaamalla todellisia tapahtumia vakiintuneeseen prosessiin, johtaja voi tunnistaa mahdolliset ongelma-alueet. Kehittämisen näkökulmasta tarkasti määritelty tuotekehitysprosessi auttaa tunnistamaan mahdolliset parannuksen kohteet. Tunnistamisen mahdollistamiseksi tarvitaan kuitenkin huolellista dokumentointia ja organisaation tuotekehitysprosessin jatkuvaa tarkastelemista. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 12-13)

Yleinen tuotekehitysprosessi sisältää kuusi eri vaihetta. Tuotekehitysprosessi alkaa suunnitteluvaiheella, mikä on yhteyksissä tutkimus- ja teknologiakehitykseen. Suunnitteluvaiheen tuloksena on projektin tehtävän kuvaus, joka on tarvittava lähtötieto konseptin kehittämisen vaiheelle ja joka toimii tuotekehitysryhmän suunnan antajana. Tuotekehitysprosessin lopputuloksena on tuotteen lanseeraus, jolloin tuote tulee myytäväksi markkinoilla.

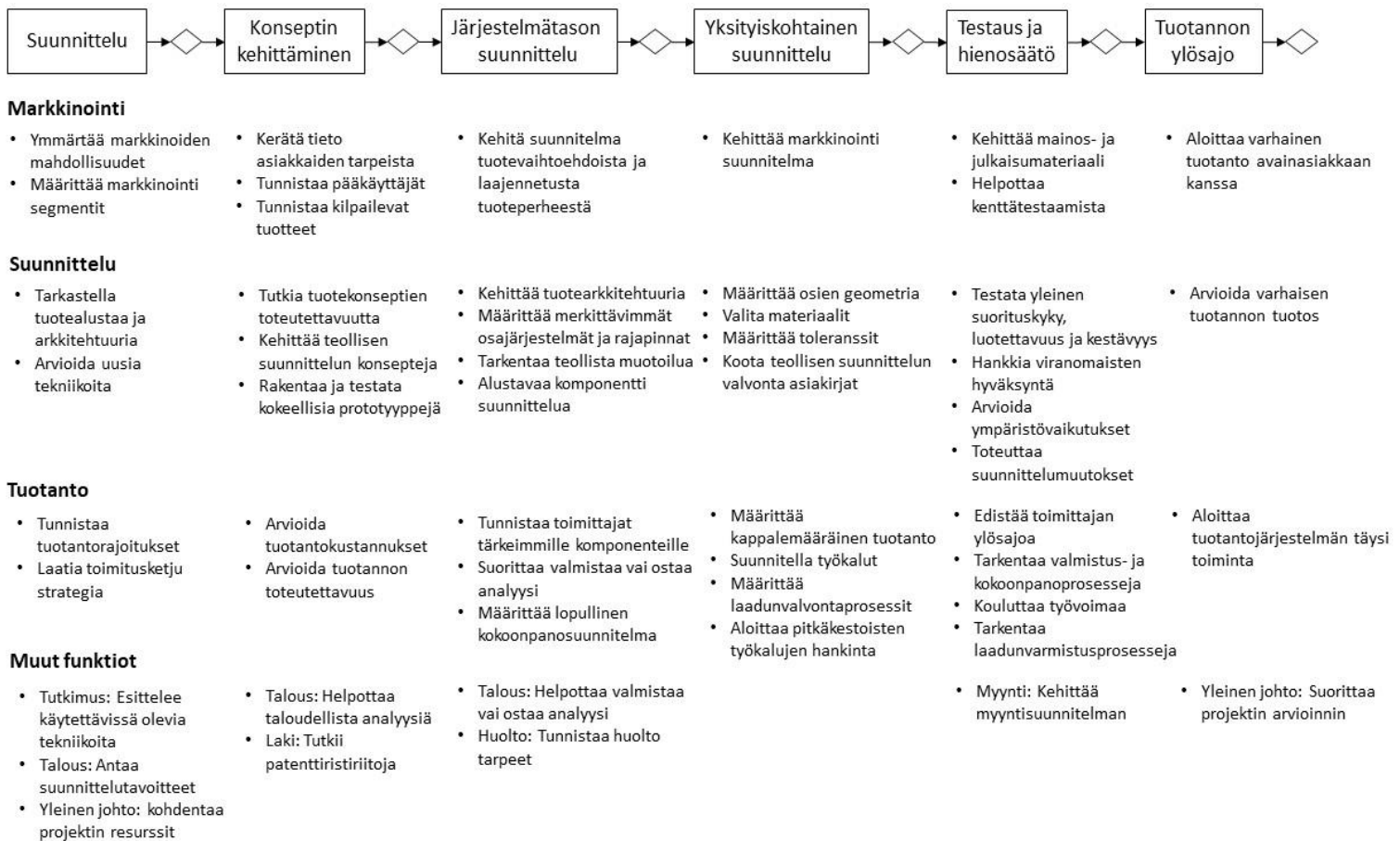
Yksi tapa miettiä tuotekehitysprosessia on laajan vaihtoehtoisen tuotekonseptin luominen aluksi ja sen jälkeen vaihtoehtojen kaventaminen ja tuotteen spesifikaatioiden lisääminen, kunnes tuote voidaan tuottaa luotettavasti ja toistettavasti tuotantojärjestelmällä. Pitää myös huomioida, että suurin osa kehitysvaiheista määritetään tuotteen tilan perusteella, vaikka tuotantoprosessit ja markkinointisuunnitelmat, kuten konkreettiset tuotokset, myös kehittyvät kehityksen edetessä. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 13)

Toinen tapa ajatella tuotekehitysprosessia on tietojenkäsittelyjärjestelmänä. Prosessi alkaa lähtötiedoilla, kuten yrityksen tavoitteet, strategiset mahdollisuudet, käytettävissä olevat tekniikat, tuotealustat ja tuotantojärjestelmät. Eri toiminnot käsittelevät kehitystietoja, laativat spesifikaatioita, konsepteja ja suunnittelutietoja. Prosessi päättyy, kun kaikki tuotannon ja myynnin tukemiseen tarvittavat tiedot on luotu ja toimitettu. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 13)

Kolmas tapa ajatella kehitysprosessia on riskienhallintajärjestelmänä. Tuotekehityksen varhaisessa vaiheessa tunnistetaan ja priorisoidaan erilaiset riskit. Prosessin edetessä riskit vähenevät, kun keskeiset epävarmuustekijät poistetaan ja tuotteen toiminnot validoidaan. Prosessin valmistuttua tuotekehitysryhmällä tulisi olla huomattava luottamus siihen, että tuote toimii oikein ja se otetaan markkinoilla hyvin vastaan. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 13)

Kuva 11 määrittelee organisaatioiden eri toimintojen avaintoiminnot ja vastuut kussakin kehitysvaiheessa. Koska nämä ovat jatkuvasti mukana tuoteprosessissa, kuvataan

markkinoinnin, suunnittelun ja valmistuksen roolit. Muiden toimintojen, kuten tutkimuksen, rahoituksen, projektinhallinnan, kenttäpalvelun ja myynnin edustajilla on myös avainrooli prosessin tietyissä kohdissa.



**Kuva 11.** Yleinen tuotekehitys prosessi. Kuuden eri vaiheen järjestys on kuvattu, sisällyttäen kunkin liiketoiminnan avaintoimintojen muutamia tyypillisimpiä tehtäviä ja vastuita kussakin vaiheessa. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 14)

Kuva 11 pohjalta voidaan lähteä määrittelemään tarkemmin kuuttua vaihetta yleisessä tuotekehitysprosessi. Vaiheista käydään läpi mitä kussakin vaiheessa tehdään ja mitä niissä tulisi saavuttaa, jotta voidaan siirtyä seuraavaan vaiheeseen.

Suunnitteluvaiheeseen viitataan usein "vaihe nollana", koska se edeltää projektin hyväksyntää ja varsinaisen tuotekehitysprosessin aloittamista. Tämä vaihe alkaa mahdollisuuksien tunnistamisella, jota ohjaa yritysstrategia ja se sisältää arvioinnin teknologian kehityksestä ja markkinoiden tavoitteista. Suunnitteluvaiheen tuotos on projektimissio, joka määrittelee tuotteen kohdemarkkinat, liiketoiminnan tavoitteen, keskeiset oletukset ja rajoitukset.

Konseptikehitysvaiheessa tunnistetaan kohdemarkkinoiden tarpeet, luodaan ja arvioidaan vaihtoehtoisia tuotekonsepteja ja valitaan yksi konsepti jatkokehitystä ja testausta



varten. Konsepti on kuvaus tuotteen muodosta, toiminnasta ja ominaisuuksista, ja siihen liittyy yleensä joukko spesifikaatioita, kilpailevien tuotteiden analysointia ja hankkeen taloudelliset perustelut.

Järjestelmätason suunnitteluvaihe sisältää tuotearkkitehtuurin määrittelyn, tuotteen haottamisen osajärjestelmiksi ja komponenteiksi sekä avainkomponenttien alustavan suunnittelun. Tuotantojärjestelmän ja lopullisen kokoonpanon alkuperäiset suunnitelmat määritellään yleensä myös tässä vaiheessa. Tämän vaiheen tuotos sisältää yleensä tuotteen geometrisen ulkoasun, kunkin tuotteen osajärjestelmän toiminnallisen eritelmän ja alustavan prosessivuokaavion lopulliseen kokoonpanoprosessiin.

Yksityiskohtainen suunnitteluvaihe sisältää tuotteen kaikkien yksittäisten osien geometrian, materiaalien ja toleranssien määrittelyn ja toimittajilta ostettavien kaikkien vakio osien tunnistamisen. Laaditaan prosessisuunnitelma, ja työkalut suunnitellaan jokaiselle tuotantojärjestelmässä valmistettavalle osalle. Tämän vaiheen tuloksena on tuotteen ohjausdokumentaatio - piirustukset tai tietokone tiedostot, jotka kuvaavat kunkin osan geometriaa ja sen valmistustyökaluja, ostettujen osien tekniset tiedot ja prosessisuunnitelmat tuotteen valmistamiseksi ja kokoamiseksi. Materiaalien valinta, tuotantokustannukset ja vankka suorituskyky ovat kolme kriittistä asiaa, jotka otetaan parhaiten huomioon koko tuotekehitysprosessissa, mutta viimeistellään yksityiskohtaisessa suunnitteluvaiheessa.

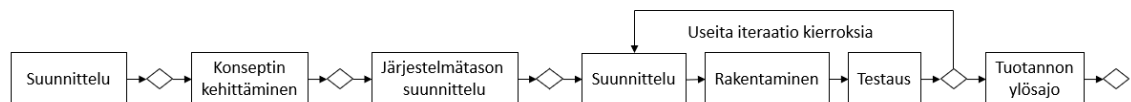
Testaus- ja jalostusvaiheeseen sisältyy tuotteen useiden esivalmisteluversioiden rakentamisen ja arvioiminen. Varhaiset (alfa) prototyypit rakennetaan yleensä tuotantomääräisillä osilla - osilla, joilla on samat geometria- ja materiaaliominaisuudet kuin tuotteen tuotantoversiolla tarkoitettut, mutta joita ei välttämättä valmisteta todellisissa tuotannossa käytettävissä prosesseissa. Alfa-prototyyppejä testataan sen selvittämiseksi, toimiiko tuote suunnitellulla tavalla ja tyydyttääkö tuote keskeisiä asiakastarpeita. Myöhemmät (beeta) prototyypit rakennetaan yleensä osista, jotka on valmistettu suunnitellulla tuotantoprosessilla, mutta niitä ei välttämättä koota aiotulla lopullisella kokoonpanoprosessilla. Beetaprototyyppejä arvioidaan laajasti sisäisesti, ja asiakas testaa ne tyypillisesti omassa käyttöympäristössään. Beetan tavoitteena on yleensä vastata suorituskykyä ja luotettavuutta koskeviin kysymyksiin, jotta lopputuotteeseen voidaan löytää tarvittavat tekniset muutokset.

Tuotannon ylösajo vaiheessa tuote valmistetaan aiottua tuotantojärjestelmää käyttämällä. Ylösajon tarkoituksena on kouluttaa työvoimaa ja selvittää tuotantoprosessissa jäljellä olevat ongelmat. Tuotannon ylösajon aikana tuotettu tuote toimitetaan joskus en-

sisijaisille asiakkaille ja arvioidaan huolellisesti jäljellä olevien puutteiden tunnistamiseksi. Siirtyminen tuotantosuunnituksesta jatkuvaan tuotantoon tapahtuu yleensä asteittain. Jossain vaiheessa tätä muutosta, tuote lanseerataan ja se tulee saataville laajalle asiakaakunnalle. Käynnistyksen jälkeinen projektikatsaus voi tapahtua pian käynnistyksen jälkeen. Tämä katsaus sisältää hankkeen arvioinnin sekä kaupalliselta että tekniseltä kannalta ja sen tarkoituksena on löytää tapoja parantaa tulevien hankkeiden kehitysprosesseja.

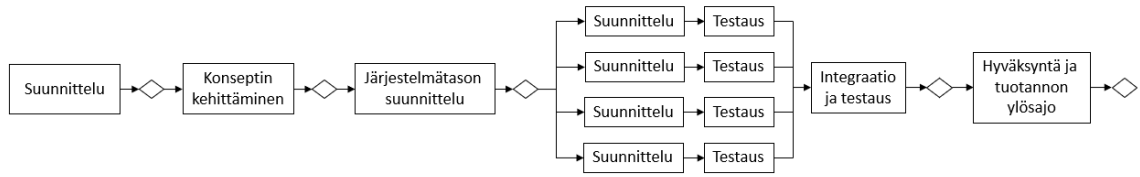
Yleisestä tuotekehitysprosessista on monia erilaisia variaatioita, jotka soveltuvat erilaisien tuotteiden kehittämiseen. Näitä erilaisia tuote variaatioita ovat markkinalähtöiset tuotteet, joille tyypillistä on vastata johonkin markkinoille ilmaantuvaan mahdollisuuteen. Teknologia-ähtöiset tuotteet, joille tyypillistä on uuteen teknologiaan perustuvan tuotteen kehittäminen ja sille oikeiden markkinoiden löytäminen. Kolmas tuotevariaatio on tuotealustaan perustuvien tuotteiden kehittäminen, jotka kehitetään jo olemassa olevien teknisten alajärjestelmien ympärille. Neljäs tuotevariaatio on prosessi-intensiiviset tuotteet, joita on esimerkiksi puolijohteet ja erilaiset kemikaalit. Näille tyypillistä on, että tuotanto prosessi rajoittaa näiden tuotteiden ominaisuuksia. Viidentenä tuotevariaationa on muunneltavat tuotteet, jotka ovat hieman muunneltu olemassa olevasta konfiguraatiosta. Kuudentena variaationa on suuren riskin tuotteet, joille tyypillistä on nimensä mukaisesti suuret riskit. Riskit kuuluvat, joko teknisiin riskeihin tai markkinariskeihin. Seitsemäs tuotevariaatio on nopeasti valmistettavat/kehittävät tuotteet, joille tyypillistä on nopea kehittäminen. Viimeisenä tuotevariaationa on monimutkaiset järjestelmät, jotka koostuvat useasta alijärjestelmästä ja komponentista. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 18-22)

Näille eri tuotevariaatioille sopii eri tuotekehitysprosessit. Yleiselle tuotekehitysprosessilla (Kuva 11) kehitettäviä tuotevariaatioita on markkinalähtöiset tuotteet, teknologia-ähtöiset tuotteet, tuotealustaan perustuvat tuotteet, prosessi-intensiiviset tuotteet, muunneltavat tuotteet ja suuren riskin tuotteet. Nopeasti kehitettävät tuotteet seuraavat spiraalista tuotekehitysprosessia, joka on esitetty Kuva 12. Spiraalisessa tuotekehitysprosessi yksityiskohtainen suunnittelu, prototyyppien valmistaminen ja testaus suoritetaan useita kertoja. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 22)



**Kuva 12.** Spiraalinen tuotekehitysprosessi. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 22)

Monimutkaisten järjestelmien kehittäminen seuraa monimutkaisten systeemien tuotekehitysprosessia, joka on esitetty Kuva 13.



**Kuva 13.** Monimutkaisten systeemien tuotekehitysprosessi. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 22)

Seuraavassa luvussa kerrotaan ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä tehtävien prototyyppien käyttämistä tuotekehitysprosessien eri vaiheissa. Prototyyppien tarkkuus on jaettu kolmeen eri tarkkuusalueeseen ja luvussa käydään läpi, miten näitä eri tarkkuusalueen prototyyppisiä sovelletaan tuotekehitysprosessien eri vaiheissa.

## 4. PROTOTYYPIEN HYÖDYNTÄMINEN TUOTEKEHITYKSESSÄ

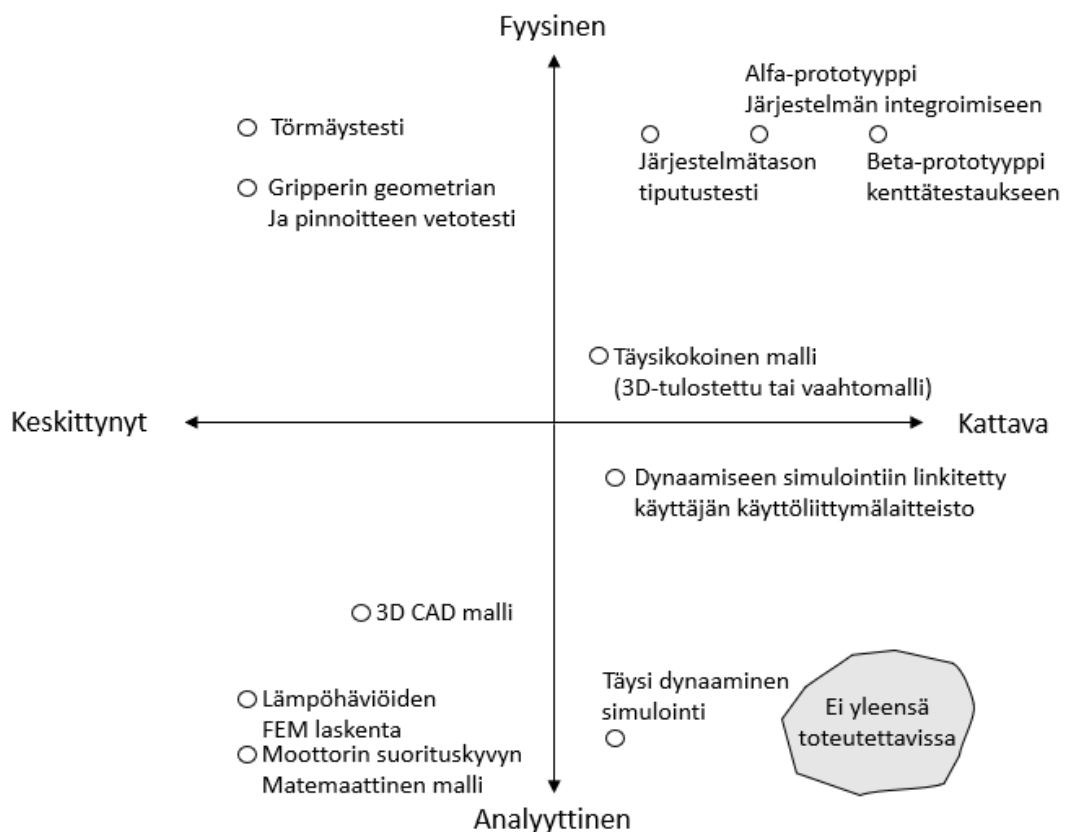
Ennen kuin lähdetään keskustelemaan prototyyppien tarkkuuksista, niiden kehittämisestä ja käyttämisestä tuotekehitysprosessi, niin meidän pitää määritellä mikä on prototyyppi. Ulrich ja Eppinger:n määritelmä prototyypille on seuraavanlainen: Prototyyppi on tuotteen approksimaatio yhtä tai useampaa kiinnostavaa ulottuvuutta kohti. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 291) Tämä määritelmä poikkeaa tavanomaisesta käytöstä siinä mielessä, että se sisältää niin monenlaisia prototyyppisiä kuin konseptien luonnokset, matemaattiset mallit, simulaatiot, testikomponentit ja täysin toiminnalliset tuotteen esituotantoversiot. Prototyypitys on prosessi, jolla kehitetään tällainen tuotteen approksimaatio. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 291)

Prototyypit voidaan luokitella kahteen ulottuvuuteen. Ensimmäisen ulottuvuuden aste on, jossa prototyyppi on fyysinen eikä analyyttinen. Fyysiset prototyypit ovat konkreettisia esineitä, jotka on luotu approksimoimaan tuotetta. Kehitysryhmää kiinnostavat tuotteet ovat tosiasiallisesti rakennettu esineeksi testausta ja kokeilua varten. Esimerkkejä fyysisistä prototyypeistä ovat mallit, jotka näyttävät ja tuntuvat tuotteelta, konsepti prototyypit, joita käytetään idean testaamiseen nopeasti, ja kokeelliset laitteistot, joita käytetään tuotteen toimivuuden tarkistamiseen. Analyyttiset prototyypit edustavat tuotetta aineettomasti, yleensä matemaattisella tai visuaalisella tavalla. Tuotteen mielenkiintoisia näkökohtia analysoidaan eikä rakenneta. Esimerkkejä analyyttisistä prototyypeistä ovat tietokone simuloinnit, laskentataulukossa koodatut yhtälöjärjestelmät ja kolmiulotteisen geometrian sisältävät tietokonemallit. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 291)

Toinen ulottuvuuden aste on, jossa prototyyppi on kattava eikä keskittynyt. Kattavat prototyypit toteuttavat suurimman osan, elleivät kaikki, tuotteen ominaisuuksista. Kattava prototyyppi vastaa tarkalleen sanan prototyypin jokapäiväistä käyttöä, koska se on tuotteen täysimittainen, täysin toimiva versio. Esimerkki kattavasta prototyypistä on, että asiakkaille annetaan kattava prototyyppi, jotta he voivat tunnistaa jäljellä olevat suunnitteluvirheet ennen tuotantoon sitoutumista. Toisin kuin kattavat prototyypit, keskittyneet prototyypit toteuttavat yhden tai muutamat tuotteen ominaisuuksista. Esimerkkejä keskittyneistä prototyypeistä ovat vaahtomallit tai 3D-tulostetut mallit tuotteen muodon tutkimiseksi ja käsin rakennetut piirilevyt tuotesuunnittelun sähköisen suorituskyvyn tutkimiseksi. Yleinen käytäntö on käyttää kahta tai useampaa keskittynyttä prototyyppiä yhdessä tuotteen kokonaissuorituskyvyn tutkimiseksi. yksi näistä prototyypeistä on usein

lopullista tuotetta ulkomuodollisesti vastaava prototyyppi, ja toinen on "toimiva" prototyyppi. Rakentamalla kaksi erillistä keskittyntä prototyyppiä tuotekehitysryhmä voi pysyä vastaamaan kysymyksiinsä paljon aikaisemmin kuin, jos sen olisi luotava yksi integroitu, kattava prototyyppi. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 291)

Kuva 14 on esitetty kuvaaja, jonka akselit vastaavat edellä esitettyjä dimensioita. Tässä kuvaajassa on esitetty useita erilaisia prototyyppejä. Huomaa, että fokusoidut prototyypit voivat olla, joko fyysisiä tai analyttisiä, mutta konkreettisten valmistettujen tuotteiden täysin kattavat prototyypit on yleensä oltava fyysisiä. Prototyypit sisältävät joskus yhdistelmän analyttisiä ja fyysisiä elementtejä. Esimerkiksi ohjauslaitteisto, joka sisältää käyttöliittymän ja se voitaisiin linkittää dynaamisen liikkeen ohjelmistosimulointiin. Joihenkin analyttisten prototyyppien voidaan katsoa olevan "fyysisempiä" kuin toisten. Esimerkiksi, videoanimaatio dynaamisesta tasapainosta, joka perustuu laitteen komponenttien fyysisten vuorovaikutusten simulointiin, on toisessa mielessä fyysisempi kuin yhtälöjoukko, joka approksimoi saman mekanismin kokonaistasapainoa. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 291-294)



**Kuva 14.** Prototyyppi voidaan luokitella sen mukaan, missä määrin ne ovat fyysisiä ja missä määrin ne toteuttavat kaikki tuotteen ominaisuudet. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 294)

Prototyyppejä käytetään tuotekehitys projekteissa neljästä eri syystä. Nämä syyt ovat oppiminen, kommunikointi, integrointi ja välisaavutukset.

Oppimisen kannalta prototyyppejä usein käytetään vastaamaan kahden tyyppisiin kysymyksiin. Nämä kysymykset ovat ”toimiiko se?” ja ”kuinka hyvin se vastaa asiakasvaatimuksia?”. Kun näihin kysymyksiin pyritään vastaamaan, niin toimii prototyypit oppimisvälineinä. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 294) Prototyypit, joita käytetään vastaamaan edellä mainittuihin kysymyksiin, sijoittuu kuvan 14 diagrammissa fyysisen ja keskittyneen lohkokoon. Tästä lohkokosta voidaan ottaa esimerkiksi törmäystesti. Törmäystestissä voidaan esimerkiksi tutkia kuinka hyvin jonkin osan geometria vaimentaa törmäyksestä aiheutuvaa energiaa ja kuinka luja geometria on. Kuitenkin ennen fyysistä törmäystestiä on hyvä ensiksi simuloida törmäystä matemaattisilla tietokone malleilla ja analysoida geometrian jäykkyyttä ja lujuutta. Simuloinnit ovat siinä mielessä tärkeitä kyseisessä testissä, koska testausprosessissa testattavat kappaleet voivat vaurioitua ja näin ollen niitä ei voida enää käyttää uudelleen. Simuloinnilla voidaan näin ollen säästää sekä aikaa, että rahaa toisin, jos vain lähdetäisiin hakemaan oikeaa geometriaa fyysisillä malleilla. Jonkun tietyn osan simulointimallit ovat esimerkki keskittyneistä analyyttisistä prototyypeistä, joita käytetään oppimisen työkaluna. Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä voidaan kuitenkin saavuttaa iteratiivisempi testausprosessi sen nopeuden ja muutoksien tekemisen helppouden takia. Näin ollen simuloiteja esimerkiksi edelle mainitusta törmäystestistä voidaan vähentää ja näin ollen voidaan nopeuttaa tuotekehitysprosessia. Lopez ja Wrightin (2002) tutkimuksessa myös todettiin, että fyysisten prototyyppien valmistaminen helpottaa fyysisten muotojen arviointi. Tutkimuksessa tutkittiin ergonomisia tekijöitä, jotka vaikuttavat käsin pideltävään pelilaitteeseen (Lopez, Wright 2002).

Kommunikoinnin kannalta prototyypit parantavat kommunikointia ylimmän johdon, myyjien, yhtiökumppanien, asiakkaiden ja investoijien kanssa. Tänä on erityisesti totta fyysisillä prototyypeillä. Visuaalinen, kosketeltavissa oleva, kolmiulotteinen esitys tuotteesta on paljon helpompi ymmärtää kuin sanallinen selitys tuotteesta tai pelkkä luonnos. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 295, Coutts, Wodehouse et al. 2019 s. 1316-1318) Kommunikointia parantavat prototyypit sijoittuvat kuvan 14 diagrammissa kattavan ja fyysisen lohkokoon. Hyvä esimerkki kommunikoinnissa käytettävästä prototyypistä on valmiin tuotteen näköismalli, joka sisältää lopullisen tuotteen oikean koon ja ulkomuodon. Toisena esimerkkinä voidaan antaa jonkin uuden, suuremman kokoluokan konseptista tehty pienoismalli. Pienoismallien tekeminen ainetta lisäävillä menetelmillä on nopeaa ja halpaa.

Komponenttien ja alijärjestelmien integroinnissa prototyyppejä yleensä käytetään varmistamaan, että nämä toimivat odotetusti ja rajapinnat ovat yhteensopivia. Kattavat fyy-

siset prototyypit ovat kaikista tehokkaimpia integroinnin työvälineitä tuotekehitysprojekteissa, koska ne vaativat kokoonpanoa ja fyysistä yhdistämistä komponenttien ja alijärjestelmien välillä, josta tuote valmistetaan (Ulrich, Eppinger 2012 s. 296). Samalla valmistettava prototyyppi pakottaa koordinoimaan tuotekehitysryhmän eri jäseniä. Jos minkä tahansa tuoterajapinnan komponenttien yhdistäminen vaikuttaa tuotteen yleiseen toimintaan, ongelma voidaan havaita fyysisen integroinnin avulla kattavassa prototyypissä. Näiden kattavien fyysisten prototyyppien yleisiä nimiä ovat testi-, alfa-, beeta- tai esituotannon prototyypit (Ulrich, Eppinger 2012 s. 296).

Prototyypit auttavat myös integroimaan tuotekehitysryhmän edustamien eri toimintojen näkökulmat. Tuotemuodon yksinkertaista fyysistä mallia voidaan käyttää välineenä, jonka kautta markkinointi-, suunnittelu- ja valmistustoiminnot sopivat perussuunnittelu päätöksestä. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 296)

Erityisesti myöhemmissä tuotekehitysvaiheissa prototyyppijä käytetään osoittamaan, että tuotteella on saavutettu toivottu toiminnallisuuden taso. Välitavoite prototyypit tarjoavat konkreettisia tavoitteita, osoittavat edistymistä ja palvelevat aikataulun noudattamista. Ylempi johto (ja joskus asiakkaat) vaatii usein prototyypin, joka osoittaa tietyt toiminnot ennen projektin etenemistä. Esimerkiksi monissa julkisissa hankinnoissa prototyypin on läpäistävä "pätevyystesti" ja myöhemmin "ensimmäisen artikkelin testi" ennen kuin toimittaja voi jatkaa tuotantoa (Ulrich, Eppinger 2012 s. 297).

Yhteenvetona oppimisen, kommunikoinnin, integraation ja välitavoitteiden näkökulmasta tuotekehitysprojekteissa voidaan sanoa, että vaikka kaikentyyppisiä prototyyppijä käytetään kaikkiin neljään näistä tarkoituksista, jotkut prototyypit ovat sopivampia kuin toiset tiettyyn tarkoitukseen. Taulukko 11 on yhteenveto erityyppisten prototyyppien suhteellisesta soveltuvuudesta erilaisiin tarkoituksiin. Huomioina pitää myös mainita, että kattavat analyttiset prototyypit ovat harvoin mahdollisia fyysisille tuotteille.

**Taulukko 11.** *Erityyppisten prototyyppien soveltuvuus erilaisiin tarkoituksiin. (● = Sopii paremmin, ○ = Sopii huonommin). (Ulrich, Eppinger 2012 s. 297)*

	Oppiminen	Kommunikointi	Integraatio	Välitavoite
Keskittynyt analyttinen	●	○	○	○
Keskittynyt fyysinen	●	●	○	○
Kattava fyysinen	●	●	●	●

## 4.1 Prototyyppien laatimisen periaatteet

Useat periaatteet ovat hyödyllisiä ohjattaessa prototyyppijä koskevia päätöksiä tuotekehityksen aikana. Nämä periaatteet antavat tietoja päätöksistä siitä, minkä tyyppinen prototyyppi rakennetaan ja miten prototyypit sisällytetään kehitysprojektisuunnitelmaan.

Analyttiset prototyypit ovat yleisesti ottaen paljon joustavampia prototyyppijä kuin fyysiset prototyypit, koska analyttiset prototyypit ovat matemaattisia approksimaatioita tuotteesta, jotka sisältävät helposti vaihdeltavia parametrejä. Useimmissa tapauksissa parametrien vaihtaminen on helpompaa kuin fyysisen prototyypin ominaisuuden vaihtaminen. Tämä on helposti nähtävissä perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettujen fyysisten prototyyppien kanssa. Toisin kuin ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistetut prototyypit ovat hyvin joustavia niiden ominaisuuksien muokkaamisen suhteen, koska ainetta lisäävillä valmistusmenetelmien kohdalla ei ole samanlaisia rajoitteita kuin perinteisillä menetelmillä valmistettujen. Ainetta lisäävillä menetelmillä tehdyt prototyypit valmistetaan suoraan 3D-CAD mallin perusteella, joka luokitellaan analyttiseksi prototyypiksi itsessään. Useimmissa tapauksissa analyttisten prototyyppien vaihtaminen on helpompaa kuin fyysisten prototyyppien, ja ne myös sallivat suurempien muutosten tekemisen kuin fyysiset prototyypit. Tästä syystä analyttinen prototyyppi edeltää usein fyysistä prototyyppiä. Analyttisiä prototyyppijä käytetään kaventamaan käytettävissä olevien parametrien laajuutta ja fyysisiä prototyyppijä käytetään hienosäätämään ja todentamaan suunnittelu (Ulrich, Eppinger 2012 s. 297).

Fyysisessä prototyypissä esiintyy usein odottamattomia ilmiöitä, jotka eivät ole täysin yhteydessä prototyypin alkuperäiseen tavoitteeseen. Yksi syy näihin yllätyksiin on, että kaikki fysiikan lait toimivat, kun fyysisiä prototyyppijä testaan. Fyysiset prototyypit, jotka on tarkoitettu tutkimaan puhtaasti geometrisiä kysymyksiä, niin prototyypeillä on myös lämpö- ja optisia ominaisuuksia. Jotkut fyysisten prototyyppien sattumanvaraisista ominaisuuksista eivät ole merkityksellisiä lopputuotteen suhteen ja toimivat vain häiritsevinä tekijöinä testin aikana. Jotkut näistä fysikaalisten prototyyppien satunnaisominaisuuksista ilmenevät kuitenkin myös lopputuotteessa. Näissä tapauksissa fyysinen prototyyppi voi toimia työkaluna havaitsemalla odottamattomia haitallisia ilmiöitä, joita voi syntyä lopputuotteessa. Analyttiset prototyypit eivät voi koskaan paljastaa ilmiöitä, jotka eivät ole osa analyttistä mallia, johon prototyyppi perustuu. Tästä syystä ainakin yksi fyysinen prototyyppi on melkein aina rakennettava tuotekehitystä varten. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 297-298)

Prototyypeille pyritään myös karsimaan riskejä ja kalliita iteraatio kierroksia. Iteraatio kierrokset varsinkin perinteisillä valmistusmenetelmillä ovat kalliita. Hyvänä esimerkkinä



voidaan antaa kappaleet, jotka valmistetaan valamalla. Valamiseen tarvittavat muotit ovat kalliita tehdä ja niiden muokkaaminen on hankalaa jälkikäteen. Tämän takia valamalla tarkoitettujen tuotteiden ensiksi järkevää todentaa prototyypeillä, jotka valmistetaan esimerkiksi ainetta lisäävillä menetelmillä. Näin voidaan säästää aikaa sekä rahaa. Toisaalta on myös mietittävä prototyyppien odotettavissa olevia hyötyjä riskien vähentämiseksi ja verrattava niitä prototyypin rakentamiseen ja arviointiin tarvittavan ajan ja rahan suhteen. Tämä on erityisen tärkeää kattaville prototyypeille. Tuotteet, joihin liittyy suuri riski tai epävarmuus kalliiden vikojen, uuden tekniikan tai tuotteen vallankumouksellisen luonteen takia, hyötyvät prototyypeistä (Ulrich, Eppinger 2012 s. 299). Toisaalta tuotteet, joiden vikakustannukset ovat alhaiset ja tekniikka on tuttua, niin eivät hyödy prototyyppien riskien vähentämisestä tuotekehityksessä niin paljon kuin edellä mainitut (Ulrich, Eppinger 2012 s. 299). Lopuksi voidaan todeta, että suurin osa tuotteista kuuluu näiden ääripäiden väliin.

Erityisesti tuotteet, jotka hyötyvät pikavalmistetuista prototyypeistä on tuotteita, jotka sisältävät jotakin täysin uutta tuotteen kehittäjille tai jokin tuotteen tärkeä ominaisuus pitää saada kehitettyä iteroimalla, esimerkiksi kehitettävän tuotteen jonkin alikokoonpanon sisäisen jäähdytyskanavan muoto ja reitti, niin että se toimii optimaalisimmalla tavalla. Myös kehitettävät tuotteet, jotka sisältävät paljon erilaisia muotoja tai piirteitä, joita on vaikeata tai kallista valmistaa perinteisillä valmistusmenetelmillä hyötyvät erityisesti prototyyppien pikavalmistamisesta tuotekehityksen aikana. Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä voidaan valmistaa prototyyppejä nopeasti ja tuotteen kompleksisuus ei ole rajoittavana tekijänä valmistuksessa. Yleisestikin pikavalmistetut prototyypit tekevät prototyyppien laatimisesta joustavampaa ja nopeampaa. Näin ollen tuotekehitykseen voidaan ottaa mukaan paremmin myös asiakkaita ja niiden toiveita. Asiakkaiden mukaan ottaminen tuotekehitykseen parantaa ja selkeyttää tuotteelta vaadittuja ominaisuuksia.

Joskus lyhyen prototyyppivaiheen lisääminen voi mahdollistaa seuraavan toiminnan loppuun saattamisen nopeammin kuin, jos prototyyppiä ei olisi valmistettu. Jos prototyyppivaiheelle vaadittava aika on vähemmän kuin seuraavan toiminnan keston säästö, tämä strategia on sopiva. Yksi yleisimmistä tilanteista tässä tilanteessa on muottisuunnittelu. Geometrisesti monimutkaisen osan fyysisen mallin olemassaolo antaa muottisuunnittelijalle mahdollisuuden visualisoida ja suunnitella muottityökalua nopeammin. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 300)

Kun tuotekehitysryhmä alkaa kehittelemään uutta tuotetta, niin suunnittelu vaiheessa pitää määrittää minkälaisilla prototyypeillä uutta tuotetta lähdetään todentamaan ja ”myymään” yrityksessä päättävälle henkilölle ja joissain tapauksissa mahdollisille tärkeimmille asiakkaille. Ilman kunnollista prototyyppien suunnittelu voi tuotekehitysprosessin aikana

tehdyt prototyypit olla hyödyttömiä. Tämä voidaan välttää huolellisella prototyyppien suunnittelulla, missä määritellään jokaisen tuotekehitysprosessin aikana valmistetun prototyypin tavoitteet ja mitä kyseisellä prototyypillä pitäisi saavuttaa. Ennen kuin lähdetään määrittelemään tuotekehitysohjelman välitavoite prototyyppejä, niin tarkastellaan mitä tuotekehitysohjelmassa toteutettavien prototyyppien suunnittelussa pitää huomioida.

Prototyyppien neljä tarkoitusta oli oppiminen, viestintä, integrointi ja välitavoitteet. Tuotekehitysohjelman määritellessä prototyypin tarkoitusta, tulee ryhmän listata kyseisen prototyypin tärkeimmät oppimisen ja viestinnän tavoitteet. Tuotekehitysohjelman tulee myös listata mahdolliset integrointi tarpeet ja sen, onko prototyypin tarkoitus olla tärkeimmistä virustanpöytästä koko tuotekehitysohjelmassa. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 303)

Prototyypin suunnittelu vaatii määritelmän siitä, missä määrin lopputuotetta on tarkoitus lähentää. Ryhmän tulisi pohtia onko fyysinen prototyyppi välttämätön vai vastaako analyttinen prototyyppi parhaiten sen tarpeita. Useimmissa tapauksissa paras prototyyppi on yksinkertaisin prototyyppi, joka palvelee äsken määriteltyjä tarkoituksia. Joissakin tapauksissa aikaisempi malli voi toimia testialustana ja sitä voidaan muokata prototyyppiä varten. Muissa tapauksissa voidaan käyttää olemassa olevaa prototyyppiä tai toiseen tarkoitukseen rakennettavaa prototyyppiä. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 304)

Useimmissa tapauksissa prototyypin käyttöä tuotekehityksessä voidaan ajatella kokeiluna. Hyvä kokeellinen käytäntö auttaa takaamaan maksimiarvon poimimisen prototyyppipyrkimyksistä. Koesuunnitelma sisältää kokeen muuttujien (jos sellaisia on) tunnistamisen, testiprotokollan, ilmoituksen mittauksista, jotka suoritetaan, ja suunnitelman tulosten analysoimiseksi. Kun monia muuttujia on tutkittava, tehokas koesuunnittelu helpottaa huomattavasti tätä prosessia. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 304)

Koska prototyypin rakentamista ja testaamista voidaan pitää osaprojektina kokonaiskehitysohjelmassa, tuotekehitysohmä hyötyy prototyyppitoiminnan aikataulutuksesta. Kolme päivämäärää ovat erityisen tärkeitä prototyyppipyrkimysten määrittelyssä. Ensinnäkin tuotekehitysohmä määrittelee, milloin osat ovat valmiita kokoonpanoon. Toiseksi tuotekehitysohmä määrittelee päivämäärän, jolloin prototyyppi testataan ensimmäisen kerran. Kolmanneksi tuotekehitysohmä määrittelee päivämäärän, jolloin se odottaa suorittavan testauksen ja milloin se saa analysoitua testauksessa saadun datan ja tehtyä datasta loppuraportin. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 304-305)

Kaikki edellä mainitut tavat suunnitella prototyyppejä pätee kaikkiin prototyyppeihin. Siitä huolimatta kokonaisvaltaiset prototyypit, joita tuotekehitysohmä käyttää kehityksen virustanpöytäinä, hyötyvät lisäsuunnittelusta. Tämä suunnittelutoiminta tapahtuu tyypillisesti

koko tuotekehityksen suunnittelutoiminnan kanssa konseptin kehitysvaiheen lopussa. Itse asiassa virstanpylväspäivien suunnittelu on olennainen osa yleisen tuotekehitysuunnitelman laatimista. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 305)

Ennen kuin siirrytään itse prototyyppeihin ja niiden tarkkuuksiin, niin voidaan hieman pohjustaa minkälaisissa tilanteissa tai tapauksissa tietyn tarkkuuden prototyypit ovat hyödyllisiä. Tiainen, Ellman et al. (2014) tutkimuksessa on yhteenveto tutkimuksista, joissa vertaillaan pienen ja suuren tarkkuuden prototyyppejä keskenään eri tilanteissa. Tutkimuksissa todettiin, että käytettävyyden testauksen näkökulmasta pienen ja suuren tarkkuuden prototyypit soveltuvat kummatkin yhtä hyvin. Tuotteen arvioimisen näkökulmasta tutkimuksissa todettiin, että pienen tarkkuuden prototyypit olivat parempia, koska pienen tarkkuuden prototyyppejä pystytään tekemään enemmän kuin suuremman tarkkuuden prototyyppejä. Näin ollen pystytään antamaan enemmän kriittistä palautetta ja tutkimuksissa todettiin myös, että suunnittelijat ottavat kritiikin positiivisemmin vastaan, kun arvioinnissa käytetään useampia pienen tarkkuuden prototyyppejä. Suunnittelu prosessin näkökulmasta tietyssä asiassa suuremman tarkkuuden prototyypit olivat parempia kuin pienemmän tarkkuuden ja päinvastoin. Suuren tarkkuuden fyysiset prototyypit vähentävät suunnittelijoiden jähmettymistä vain yhteen suunnitelmaan ja näin ollen suuren tarkkuuden prototyypit lisäävät suunnittelijoiden innovatiivista ajattelua. Toisaalta taas pienen tarkkuuden prototyypeillä voidaan suunnitteluprosessin aikana pilkkoa suuret tehtävät pienemmiksi tehtäviksi. (Tiainen, Ellman et al. 2014 s. 2-3) Suunnittelijoiden on hyvä pohtia tuotekehitysprosessin alussa, että minkälaisia prototyyppejä he tulevat käyttämään varmistaakseen ja oppiakseen uutta kehitettävästä tuotteesta.

Edellä on määritelty yleisiä asioita tuotekehitysprosessista ja prototyyppien suunnittelusta ja määrittelystä. Seuraavaksi siirrytään itse prototyyppeihin ja niiden tarkkuuksiin. Tässä tapauksessa käsitellään fyysisiä prototyyppejä ja niiden tarkkuuksia tuotekehityksessä. Luvuissa 4.2 – 4.4 määritellään prototyyppien tarkkuudet, missä tuotekehitysprosessin vaiheessa niitä käytetään, millä ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä prototyypit valmistetaan ja miten prototyypin tarkkuus vaikuttaa siihen, mitä prototyypillä pyritään saavuttamaan. Tarkkuudella tässä yhteydessä tarkoitetaan kuinka hyvin kyseinen prototyyppi vastaa lopullista tuotetta.

## **4.2 Pienen tarkkuuden prototyypit**

Perinteisesti pienen tarkkuuden prototyypit ovat nopeita ja helppoja luonnoksia paperista ja/tai pahvista. Toisin kun nykyään, ainetta lisäävät valmistusmenetelmät mahdollistavat meille tuotteiden pienoismallien nopean tuottamisen. Pienen tarkkuuden prototyyppejä voidaan joissain tilanteissa kutsua varhaisen vaiheen prototyypeiksi ja näitä varhaisen

vaiheen prototyyppejä kutsutaan joskus kokeellisiksi tai teknisiksi prototyypeiksi (Ulrich, Eppinger 2012 s. 306).

Pienen tarkkuuden prototyypit ovat nimensä mukaisesti vain hahmotelmia suunnitteilla olevasta tuotteesta. Nämä perinteiset pahvi ja paperi hahmotelmat alkavat väistymään fyysisten tuotteiden kehitysprosessista ja ainetta lisäävät valmistusmenetelmät tulevat yleistymään. Pienen tarkkuuden prototyypit voivat olla pienoismalleja jostain suuremmista tuotteista, kuten esimerkiksi paperikoneesta, merikonttiin integroiduista järjestelmästä, jostain isomman järjestelmän komponentista tai vaikka autosta. Se kuinka iso pienoismallista tehdään tai päätetään tehdä, riippuu saatavilla olevista ainetta lisäävän valmistusmenetelmän laitteista ja siitä kuinka iso halutaan tästä pienoismallista tehdä. Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä tehtyjen pienoismallien suuria hyötyjä on niiden esteettiset ominaisuudet verrattuna paperi tai pahvi hahmotelmiin. Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä tehdyt pienoismallit näyttävät täsmälleen kehitettävältä tuotteelta.

Pienen tarkkuuden prototyyppejä pääsääntöisesti käytetään tuotekehitysprosessin alussa. Tarkemmin ottaen suunnittelu ja konseptin kehittämissä vaiheissa, joissa aletaan hahmottelemaan kehitettävää tuotetta. Pienen tarkkuuden prototyyppejä voidaan myös käyttää muissa tuotekehitysprosessin vaiheissa. Näissä vaiheissa pienen tarkkuuden prototyyppejä voidaan käyttää erityisesti kommunikoinnin ja tuotteen ”myymisen” helpottamiseen mutta niitä voidaan myös käyttää oppimiseen tuotteesta. Pienen tarkkuuden prototyyppien avulla voidaan asiakkaita ottaa paremmin tuotekehitykseen mukaan. Pienen tarkkuuden prototyyppien avulla asiakastapaamisilla voidaan parantaa kommunikointia liittyen tuotteeseen. Tapaamisissa fyysisen mallin avulla on helpompi keskustella tuotteesta ja näin ollen parantaa tuotetta saatujen ideoiden perusteella. Tässä työssä on jo todettu, että fyysiset prototyypit antavat paremman ymmärryksen tuotteesta kuin virtuaaliset. Tosin joidenkin tutkimusten mukaan virtuaaliset prototyypit ovat hyödyllisempiä kuin fyysiset prototyypit, kun tuotekehitysprosessiin otetaan mukaan kuluttajia, joille ei ole teknistä osaamista kehitettävästä tuotteesta (Tiainen, Ellman et al. 2014). Virtuaaliset prototyypit myös synnyttivät enemmän kehitysideoita kuin fyysiset prototyypit kuluttajien keskuudessa (Tiainen, Ellman et al. 2014). Pienen tarkkuuden prototyyppejä voidaan myös hyödyntää oppimisen ja opettamisen työkaluina. Kehitettävän tuotteen kannalta suunnittelu ja konsepti vaiheessa voidaan pienoismallien avulla ottaa kehitysprosessiin mukaan tuotekehitysryhmän ulkopuolisia, kuten esimerkiksi myynnin ja markkinoinnin henkilöitä. Tuotteen ollessa jo lähes valmis tai kokonaan valmiina voidaan tuotekehitysprosessi käytettyjä pienoismalleja käyttää uusien myyjien koulutuksessa apuna tai myynti voi jopa käyttää niitä itse tuotteen myynnin helpottamisena.

Pienen tarkkuuden prototyyppien tulisi olla mahdollisimman helposti ja nopeasti saatavia sekä myös halpoja. Ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä helposti saatavia tekniikoita on fotopolymeerointi ja materiaalinpursotus. Se kumpaa halutaan käyttää pienen tarkkuuden prototyypin valmistamiseen, riippuu prototyypin pinnanlaadusta ja koosta. Fotopolymeeroinnilla voidaan valmistaa tuotteita joiden pinnanlaatu, on parempi kuin materiaalinpursotuksella tehtyjen, mutta materiaalin pursotuksella voidaan valmistaa isompia kappaleita. Pienen tarkkuuden prototyypit voidaan myös valmistaa näiden tekniikoiden yhdistelmällä.

### **4.3 Keskisuuren tarkkuuden prototyypit**

Keskisuuren tarkkuuden prototyypit sijoittuvat pienen tarkkuuden ja suuren tarkkuuden väliin. Se minkälaisia prototyyppisiä tähän luokkaan kuuluu, on laajempi kuin pienen ja suuren tarkkuuden prototyyppisiin. Keskisuuren tarkkuuden prototyypit vastaavat kooltansa täysin lopullista tuotetta, mutta keskisuuren tarkkuuden prototyypit voivat olla valmistettu samasta tai eri materiaalista kuin lopullinen tuote. Toisin sanottuna tähän määritelmään kuuluu Kuva 14 mukaan täysikokoiset mallit (3D-tulostetut) ja alfa prototyypit.

Täysikokoiset mallit vastaavat kooltaan ja geometrialtaan täysin lopullista tuotetta. Mallit eivät tosin ole valmistettu välttämättä samasta materiaalista kuin lopullinen tuote on valmistettu. Esimerkkinä täysikokoisesta mallista on muovista 3D-tulostettu metallivalun näköismalli. Muovisella mallilla voidaan, esimerkiksi varmistaa kappaleen sopivuus kokoonpanossa. Tämän täysikokoisen mallin pohjalta voidaan sitten valmistaa nopeammin ja tarkemmin lopullisen tuotteen valmistamiseen tarvittavat valumuotit. Tuotteet, jotka hyötyvät paljon keskisuurista prototyyppistä sisältävät joko paljon erilaisia piirteitä tai monimutkaisia muotoja tai valmiissa tuotteessa käytettävän osan materiaalia on kallista. Myös suuremman kokoluokan tuotteet, jotka koostuvat pienemmistä komponenteista tai alikokoonpanoista hyötyvät tuotteen kehitysvaiheessa keskisuuren tarkkuuden prototyyppistä. Keskisuuren tarkkuuden prototyyppien laadinnassa on kuitenkin hyvä muistaa ainetta lisäävien valmistusmenetelmien rajoitteisuus valmistettävien komponenttien suuruudessa. Se kuinka suuria ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä tehtyjä komponentteja pystytään hyödyntämään prototyyppissä, riippuu täysin saatavilla olevista palveluntarjoajista ja heidän laitteistoistaan.

Alfa-prototyyppisiä käytetään tyypillisesti arvioimaan, toimiiko tuote suunnitellulla tavalla. Alfa-prototyyppien osat ovat materiaaliiltaan ja geometrialtaan yleensä samanlaisia kuin osat, joita käytetään tuotteen tuotantoversiossa, mutta ne tehdään yleensä prototyyppien valmistusprosessien avulla. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 305) Esimerkiksi alfaprototyypin muovi- tai metalliosat voidaan 3D-tulostaa.

Keskisuuren tarkkuuden prototyyppejä käytetään tuotekehitysprosessin keskivaiheilla. Tarkemmin ottaen järjestelmätason suunnittelun, yksityiskohtaisen suunnittelun ja testauksen ja hienosäädön alkuvaiheilla tai jos tuotekehitysprosessina käytetään Kuva 12 mukaista spiraalista tuotekehitysprosessia, niin iteraatio kierrosten ensimmäisillä kierroksilla. Keskisuurten prototyyppien suurimpia tavoitteita on, oppiminen osasta tai tuotteesta ja osien integroiminen yhdeksi kokoonpanoksi. Alfa prototyypit voivat myös toimia tuotekehitysprojektissa yhtenä välitavoite prototyyppinä.

Esimerkkinä keskisuuren tarkkuuden prototyyppistä on Hindustan Aeronautics, Ltd. (HAL) tekemä ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettu täysikokoinen lentokoneen moottori. Moottorin eri osat valmistettiin Nylon muovista SLS-menetelmällä. Komponentit pystyttiin valmistamaan alle 20 päivässä. Kyseisessä projektissa ainetta lisäävät valmistusmenetelmät vähensivät huomattavasti prototyyppien kehittämisaikaa ja hintaa verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. (Wimpenny, Pandey et al. 2017 s. 47) Moottori ja sen osat on esitelty Kuva 15.



**Kuva 15.** 25-kN lentokoneen moottorin prototyyppi, joka on valmistettu SLS-menetelmällä. (Wimpenny, Pandey et al. 2017 s. 48)

Keskisuuren tarkkuuden prototyyppien valmistamiseen voidaan ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä fotopolymeerointi, materiaalin pursotusta ja jauhepetimenetelmää. Fotopolymeeroimalla voidaan tehdä pieniä osia, jotka vaativat hyvää pinnanlaatua mutta niihin ei esimerkiksi integroinnin aikana kohdistu suuria rasituksia tai voimia. Materiaalin pursotuksella ja jauhepetimenetelmällä voidaan valmistaa yksittäisiä osia, jotka integroidaan suurempiin kokoonpanoihin tai valmistaa suoraan valmiita pieniä kokoonpanoja, joihin on integroitu esimerkiksi vanhan tuotteen useampi osa. Keskisuurten prototyyppit

voidaan siis valmistaa laajasta materiaalivalikoimasta aina valokovettuvista polymeereistä kestopuoveihin tai komposiittimateriaaleista laajaan valikoimaan erilaisia metalleja tai niiden eri seoksia.

#### 4.4 Suuren tarkkuuden prototyypit

Suuren tarkkuuden prototyypit ovat jo hyvin lähellä lopullista tuotetta tai vastaavat jo täysin lopullista tuotetta. Suuren tarkkuuden prototyypit ovat siis valmistettu samasta materiaalista ja samoilla menetelmillä kuin lopullinen tuote. Prototyyppien pikavalmistamisen näkökulmasta tämä tarkoittaa, että lopullinen tuote valmistetaan ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä. Kuva 14 mukaan tähän määritelmään kuuluu beta prototyypit ja lisäksi vielä esituotannon prototyypit.

Beetaprototyyppijä käytetään tyypillisesti luotettavuuden arviointiin ja tuotteessa olevien jäljellä olevien virheiden tunnistamiseen. Nämä prototyypit annetaan asiakkaille usein testattavaksi niiden lopulliseen tarkoitettuun käyttöympäristöön. Beetaprototyyppien osat valmistetaan yleensä todellisilla tuotantoprosesseilla tai komponentit toimittavat suunnitellut komponenttitoimittajat, mutta tuotetta ei yleensä koota suunnitellulla lopullisella tuotantoprosessilla tai työkaluilla. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 305) Esimerkiksi beetaprototyypin muoviosat voidaan valmistaa ruiskupuristamalla tai 3D-tulostamalla riippuen siitä onko tuote massavalmisteinen vai onko tuote enemmän asiakasräätälöity tai vähän tuotettu. Lopullisen tuotteen todennäköisesti kokoaa prototyyppivalmistajan tekniikko kuin tuotantotyöntekijät tai automatisoidut laitteet (Ulrich, Eppinger 2012 s. 305).

Esituotannon prototyypit ovat ensimmäisiä tuotteita, joita koko tuotantoprosessi tuottaa. Tässä vaiheessa tuotantoprosessi ei vielä toimi täydellä kapasiteetilla, mutta se tuottaa rajoitettuja määriä tuotetta. (Ulrich, Eppinger 2012 s. 305) Tuotanto prosessi voidaan mahdollisesti aloittaa muottien ja työkalujen pikavalmistuksen ansiosta tai tuotanto prosessia testaan vielä. Muottien ja työkalujen pikavalmistuksesta tarkemmin kappaleessa 6. Näitä prototyyppijä käytetään todentamaan tuotantoprosessien suorituskyky, niille teetetään lisää testejä ja toimitetaan usein etusijalle asetetuille asiakkaille (Ulrich, Eppinger 2012 s. 305).

Suuren tarkkuuden prototyyppijä käytetään tuotekehitysprosessin lopussa todentamaan lopullista tuotetta. Tarkemmin ottaen testauksen ja hienosäädön ja tuotannon ylösajon vaiheissa. Jos tuotekehitysprosessi mukaillee Kuva 12 spiraalista tuotekehitysprosessia, niin suuren tarkkuuden prototyyppijä käytetään iteraatio kierrosten keski- ja loppuvaiheilla. Suuren tarkkuuden suurimpia tavoitteita on todentee lopullisen tuotteen toimivuutta ja näin ollen toimia välitavoite prototyyppinä tuotekehitysprojektissa.



Suuren tarkkuuden prototyypit voidaan valmistaa millä tahansa ainetta lisäävällä valmistusmenetelmällä, kunhan vain valmistusmenetelmällä tehtävät osat saavuttavat osalta vaaditut ominaisuudet. Niin kuin edellä jo todettiin, niin suuren tarkkuuden prototyypit valmistetaan samasta materiaalista ja samoilla valmistusmenetelmillä kuin lopullinen tuote. Tämä siis tarkoittaa tässä tapauksessa, että valmistettava osa tai kokoonpano valmistetaan jollain ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä.

Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettujen tuotteiden ainoina rajoituksena on komponenttien tai tuotteiden koko, saatavilla olevat tekniikat ja tuotteet eivät voi olla massa valmisteisia. Nämä ovat riippuvaisia saatavilla olevista laitteista ja niiden tulostustilavuuksista. Nämä asiat tulee huomioida, kun lähdetään suunnittelemaan tuotteita, jotka valmistetaan ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä. Niin kuin jo aiemmin tässä työssä on todettu, että ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä ei ole samanlaisia rajoitteita, kun perinteisillä valmistusmenetelmillä. Tämä tarkoittaa sitä, että pystytään suunnittelemaan ja valmistamaan todella monimutkaisia geometrioita ja kappaleessa olevien piirteiden lukumäärällä ei ole vaikutusta tuotteen valmistamiseen. Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien massatuotannon rajoitteisuus voidaan sivuuttaa sillä, että pystytään valmistamaan kustannustehokkaasti asiakasrätälöityjä tuotteita. Näin ollen asiakkaiden mukaan ottaminen tuotteiden suunnitteluun parantaa lopullista valmistettavaa tuotetta.

Kun lähdetään suunnittelemaan kokonaan uutta tuotetta tai parantamaan vanhaa tuotetta ja tuotteen valmistamiseen aiotaan käyttää ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä, niin on hyvä käyttää päätöksenteossa jotakin apuna. Päätöksen teon apuna voidaan käyttää Ahtiluoma, Ellman ja Coatanean (2019) esittelemää kaavaa, jolla voidaan arvioida ainetta lisäävän valmistusmenetelmän käyttämistä tuotteen valmistamisessa. Kaavassa huomioidaan tuotteen suorituskyky, tuotteen suunnitteluun ja valmistamiseen käytetty aika ja suunnittelun ja valmistamisen kustannukset. Edellä esitettyjä asioita painotetaan painokertoimien avulla, joidenka arvo on välillä 0-1. Kaava antaa toteuttamiskelpoisuus indeksin minkä avulla voidaan päättää, valmistetaanko tuote perinteisillä vai ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä. Mitä suurempi indeksin arvo on, niin sitä suositellumpaa on käyttää ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä tuotteen valmistamiseen.

$$I = k_1 \frac{P_{am}}{P_{cm}} + k_2 \frac{T_{dcm} + T_{cm}}{T_{dam} + T_{am}} + k_3 \frac{C_{dcm} + n_{cm}}{C_{dam} + n_{cam}} \quad (1)$$

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1$$

Kaavassa 1 parametrit tarkoittavat:

$k_1$  = painokerroin tuotteen suorituskyvyille [0-1]

$k_2$  = painokerroin tuotteen valmistusnopeudelle [0-1]

$k_3$  = painokerroin tuotteen kustannuksille [0-1]

$P_{AM}$  = Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistetun tuotteen suorituskyky

$P_{CM}$  = Perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistetun tuotteen suorituskyky

$T_{dAM}$  = Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettavan tuotteen suunnitteluun käytetty aika

$T_{AM}$  = Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettavan tuotteen valmistamiseen käytetty aika

$T_{dCM}$  = Perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettavan tuotteen suunnitteluun käytetty aika

$T_{CM}$  = Perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettavan tuotteen valmistamiseen käytetty aika

$C_{dCM}$  = Perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistetun tuotteen suunnittelukustannukset

$C_{dAM}$  = Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistetun tuotteen suunnittelukustannukset

$C_{CM}$  = yksittäisen perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistetun tuotteen valmistuskustannukset

$C_{AM}$  = yksittäisen ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistetun tuotteen valmistuskustannukset

$n$  = tuotteiden tuotantomäärä

Kaavan 1 joitakin parametrejä voi olla vaikeata arvioida, kuten esimerkiksi kappaleen suorituskykyä. Täysin uutta tuotetta suunnitellessa kaavan 1 parametrejä voidaan arvioida edellisten tuotekehitysprojektien pohjalta. (Ahtiluoto, Ellman et al. 2019) Kaavaa 1 voidaan myös soveltaa prototyypin valmistamiseen. Taulukossa 12 on esitelty toteuttamisindeksin tulkinta, kun valitaan valmistusmenetelmä.

**Taulukko 12.** Toteuttamisindeksin tulkitseminen. (Ahtiluoto, Ellman et al. 2019)

Yhteenveto	Toteuttamiskelpoisuus indeksi I
Ei sovellu valmistettavaksi ainetta lisäävät valmistusmenetelmät	< 1
Huomioidaan kummatkin valmistusmenetelmä tyypit	1 - 1.5
Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät tarjoavat hyötyä	1.5 – 2.5
Ei sovellu valmistettavaksi perinteiset valmistusmenetelmillä	> 2.5

## 5. PIKAVALMISTUKSEN MAHDOLLISTAMAT AINUTLAATUISET OMINAISUUDET TUOTTEISSA

Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien kerrospohjainen lähestymistapa johtaa ainutlaatuisiin ominaisuuksiin verrattuna useimpiin muihin valmistusprosesseihin. Näitä ainutlaatuisia ominaisuuksia on muotojen monimutkaisuus, hierarkian monimutkaisuus, toiminnallinen monimuotoisuus ja materiaalien monimuotoisuus.

### 5.1 Monimutkaiset muodot

Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä on kyky valmistaa yksittäisiä kerroksia, jotka eivät liity kappaleen muotoihin. Esimerkiksi Fotopolymerointi- ja jauhepetiprosessien prosesseissa laserit voivat saavuttaa minkä tahansa osan poikkileikkauksesta ja prosessoitavan materiaalin. Tämä johtaa siihen, että käytännöllisesti katsoen valmistettavan kappaleen monimutkaisuus on rajaton. Tämä on täysi vastakohta rajoituksille, joita on kahdessa yleisesti käytetyssä valmistusmenetelmässä. Nämä kaksi yleisesti käytettyä valmistusmenetelmää on koneistaminen ja ruiskuvalaminen. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 404-405) Koneistamisessa työkalujen saatavuus on suurin rajoittava tekijä kappaleiden muotojen valmistamisessa. Ruiskuvalussa tarve erottaa muottiosat ja erottaa osat pois muoteista rajoittavat huomattavasti osien monimutkaisuutta.

Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät mahdollistavat räätälöityjen geometrioiden valmistamisen. Ainetta lisäävässä tuotannossa ei ole väliä, onko jollakin osalla eri muoto kuin aiemmin valmistetulla. Lisäksi mitään kiinteitä työkaluja tai kiinnikkeitä ei tarvita, mikä tarkoittaa, että yhden erän koko voi olla taloudellisesti toteutettavissa. Tämä on uskottoman tehokas esimerkiksi lääketieteellisiin sovelluksiin. Osiin, joihin kohdistuu käytön aikana räsitystä ja joita tulee pystyä liikuttamaan, asettaa osalle vaatimuksen olla jäykkä ja kevyt. Tästä hyvä esimerkki on nopea liikkeisen robotin varsi. Ainetta lisäävällä menetelmällä on kyky lisätä materiaalia juuri sinne missä materiaali voidaan optimaalisimmin hyödyntää. Kuva 16 on esitetty kaupallisen Adept-robotin (Cobra 600) varsi. Varsi on jäykistetty räätälöidyllä ristikkorakenteella, joka vastaa varren muotoa. Varrelle tehdyissä alustavissa laskelmissa osoitettiin, että varren painosta 25% voidaan vähentää helposti tällä ristikkorakenteella ja että huomattavasti suuremmat parannukset ovat mahdollisia. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 405) Yleisemmin ainetta lisäävä valmistustekniikka vapauttaa suunnittelijoita rajoittumasta muotoihin, jotka voidaan valmistaa käyttämällä tavanomaisia valmistusmenetelmiä.



**Kuva 16.** Robotin varsi jäykistettynä ristikkorakenteella. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 405)

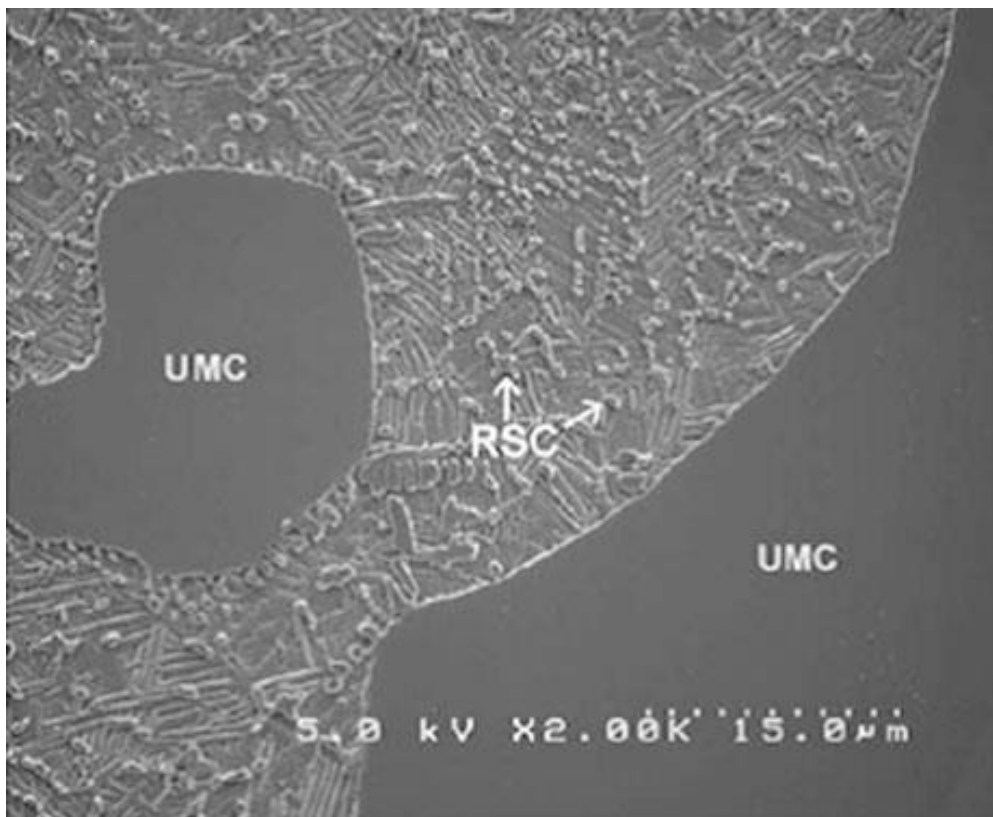
Toinen tekijä, joka mahdollistaa yhden kappaleen eräkoon ja muodon monimutkaisuuden, on kyky automatisoida prosessisuunnittelua. Yksinkertaiset geometriset toimenpiteet voidaan suorittaa AMF- tai STL-tiedostoilla (tai CAD-malleilla) osan mallin hajottamiseksi toiminnoiksi, joita ainetta lisäävä kone voi suorittaa. Vaikka CNC on parantunut huomattavasti, prosessisuunnittelussa ja konekoodin luomisessa CNC:lle käytetään tyypillisesti paljon enemmän manuaalisia vaiheita kuin ainetta lisääville menetelmille. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 405)

## 5.2 Hierarkkinen monimutkaisuus

Samoin kuin muodon monimutkaisuus, ainetta lisäävät valmistusmenetelmät mahdollistavat hierarkkisen monimutkaisuuden suunnittelun useilla suuruusluokilla ja pituusasteikolla. Tähän sisältyy nano / mikrorakenteet, mesostruktuurit ja osamittakaavan makrorakenteet. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 405-406)

Yksi prosessisarja, jota on tutkittu perusteellisesti hierarkkisen monimutkaisuuden suhteen, on suorakerrostus. Esimerkiksi LENS-järjestelmässä nano / mikrorakenne voidaan räätälöidä tietyssä paikassa hallitsemalla sula-altaan kokoa ja jäähdytysnopeutta. Seurauksena on, että esimerkiksi saostumien (nanomittakaava) ja sekundaaristen hiukkasten (mikromittakaava) kokoa ja jakautumista voidaan muuttaa muuttamalla paikallisesti laserin teholla ja tulostusnopeudella. Kuva 17 kuvaa mikrorakenteellisten piirteiden tyyppejä, jotka voidaan muodostaa, kun käytetään LENS:ä TiC seosten prosessointiin Ti-komposiittirakenteen muodostamiseksi. Mikrorakenteessa on useita piirteitä, joita voi-

daan hallita. Tapauksissa, joissa laserin energiatiheddet ovat pienemmät, mikrorakenteessa on suurempi osuus sulamattomia karbidipartikkeleita (UMC). Suuremmilla energiatihedksillä enemmän TiC-hiukkasia sulaa ja saostuu kiinteiksi karbideiksi (RSC). Lisäksi, koska RSC:llä on erilainen stoikiometria (TiC muuttuu  $TiC_{0.65}$ -ksi); annetulle TiC:n ja Ti:n alkuperäiselle seokselle, mitä enemmän RSC:tä on lopullisessa mikrorakenteessa, sitä vähemmän Ti-matriisimateriaalia on. Tuloksena olevilla mikrorakenteilla voi siten olla hyvin erilaiset materiaali- ja mekaaniset ominaisuudet. Jos saostuu riittävästi RSC:tä Ti-matriisimateriaalin kuluttamiseksi, rakenteesta tulee hyvin hauras. Sitä vastaan, kun suurin osa TiC:stä on läsnä UMC:nä, rakenne on taipuisampi, mutta kestää vähemmän hankaavaa kulutusta. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 406)



**Kuva 17.** 60% CP-Ti, 40% TiC-komposiitti, joka on valmistettu LENS prosessilla. Sulamattomien karbidien (UMC) ja kiinteytyneiden karbidien (RSC) suhdetta Ti-matriisissa hallitaan muuttamalla LENS-prosessiparametreja. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 406)

Yllä olevan nano- / mikrorakennekuvion lisäksi suorakerrostustekniikoiden on osoitettu kykenevän tuottamaan symmetrisesti-, pylväs-, suuntajähmettyneitä ja yksikiteisiä rae-rakenteita. Nämä erityyppiset nano / mikrorakenteet voidaan saavuttaa hallitsemalla huolellisesti tietyn materiaalin prosessiparametreja, ja niitä voidaan vaihdella pisteestä toiseen rakenteen sisällä. Monissa tapauksissa metallien laser- tai elektronisäteen jauhepetiprosesseissa nämä variaatiot ovat myös saavutettavissa. Samoin muuttamalla

joko prosessoitavia materiaaleja (kun käytetään monimateriaalista ainetta lisäävää järjestelmää) tai materiaalien prosessointia, tämän tyyppinen nano / mikrorakenteen hallinta on mahdollista myös materiaalin pursotuksessa ja fotopolymeroinnissa. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 407)

Kyky muuttaa osan mesostruktuuria liittyy tyypillisesti huokoisten rakenteiden, kuten hunajakkenojen, vaahtojen tai ristikkojen käyttämisestä tiettyjen geometria alueiden täyttämiseksi. Tämä tehdään usein osan lujuuden ja painosuhteen lisäämiseksi tai jäykkyyden ja painosuhteen lisäämiseksi. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 407)

Kun tarkastellaan yhdessä kykyä hallita samanaikaisesti osan nano- / mikrorakennetta, mesostruktuuria ja makrorakennetta yksinkertaisesti vain muuttamalla prosessiparametreja ja CAD-tietoja on tämä ainetta lisäävän valmistusmenetelmän ainutlaatuinen kyky, joka on ylivoimainen tavanomaisiin valmistusmenetelmiin nähden.

### **5.3 Toiminnallisuuden monimuotoisuus**

Kun valmistetaan osia ainetta lisäämällä, niin on mahdollista muokata kappaleen sisäisiä ominaisuuksia. Tämä mahdollistaa kaksi ominaisuutta. Ensinnäkin hallitsemalla huolellisesti kunkin kerroksen valmistusta, on mahdollista valmistaa toimintamekanismeja joissakin ainetta lisäävissä prosesseissa. Tässä tarvitsee vain varmistaa, että toimintamekanismien välillä on tarpeeksi välystä. Toiseksi komponentit on asetettu osiin, jotka valmistetaan fotopolymerointi-, materiaalia pursotus-, jauhepetilaitteilla tai muilla ainetta lisäävillä laitteilla, jotka mahdollistavat sisäkkäisten osien kokoonpanon.

Laaja valikoima kinemaattisia niveliä on valmistettu suoraan fotopolymerointi-, materiaalin pursotus- ja jauhepetitekniikoilla, mukaan lukien pystysuorat ja vaakasuorat prismaattiset, pyöreät, lieriömäiset, pallomaiset ja Hooken liitokset. Kuva 18 on esitetty yksi esimerkki hihnapyörämäinen käärmemäisestä robotista, jolla on monia pyöriä niveliä. Kappale valmistettiin Georgia Tech:ssä käyttäen SLA-3500 laitetta. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 407, Gao, Zhang et al. 2015 s. 71)



**Kuva 18.** Hihnapyöräinen käärmemäinen robotti. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 407)

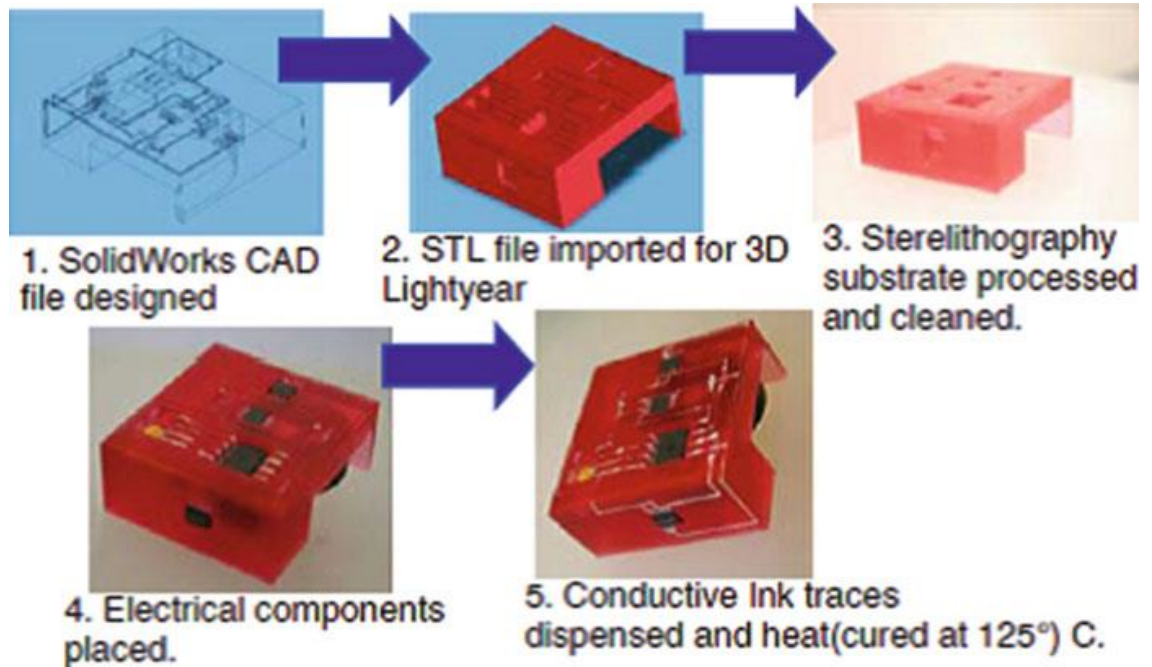
Kuva 18 tapaisia tutkimuksia on suoritettu käyttämällä materiaalin pursotusta ja jauhepetiprosesseja. Dr. Mavroidisin johtama Rutgersin yliopiston tutkimusryhmä osoitti, että sekä materiaalin pursotus- että jauhepetikoneet pystyivät valmistamaan samat liitosgeometriat ja että molemmissa konetyypeissä tarvittiin samanlaisia välyksiä. Jauhepetimenetelmissä irtomainen jauhe on poistettava nivelpaikoista suhteellisen nivelliikkeen mahdollistamiseksi. Materiaalin pursotuksessa liukoisen tukimateriaalin käyttö varmistaa, että liitokset voivat liikkua jälkikäsitteilyn jälkeen. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 407-408)

Toiminnallisten prototyyppien rakentamisessa on usein edullista sisällyttää komponentit valmistettavaan osaan, kun osa valmistetaan ainetta lisäävällä menetelmällä. Tämä välttää valmistuksen jälkeistä kokoonpanoa ja voi vähentää huomattavasti valmistettujen ja koottavien erillisten osien lukumäärää.

Muut tutkijat ovat myös osoittaneet kykynsä rakentaa toiminnallisia laitteita, mukaan lukien Mavroidisin ryhmä ja tohtori Cutkoskyn ryhmä Stanfordin yliopistossa (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 408). Laitteen monimutkaisuus helpottuu suuresti, kun kyky valmistaa kinemaattisia niveliä yhdistetään upotettuihin insertteihin. Koska toiminnalliset mekanismit voidaan valmistaa kokonaan fotopolymerointi laitteella, yksinkertaistaa se huomattavasti prototyyppi-prosessia.

Toiminnallinen monimutkaisuus voidaan myös saavuttaa ainutlaatuisesti yhdistämällä ainetta lisäävä tekniikka kolmiulotteisesti integroituun elektroniikkaan. 3D-innovaatioiden W.M. Keck Center:n tutkijat Teksasin yliopistosta ovat osoittaneet kykynsä tuottaa useita erilaisia toimivia laitteita uudella tavalla yhdistämällä fotopolymeroinnin tai materiaalin pursotuksen suoraan kirjoittamiseen. Kuva 19 kuvaa magneettivuo-anturin valmistusprosessia.

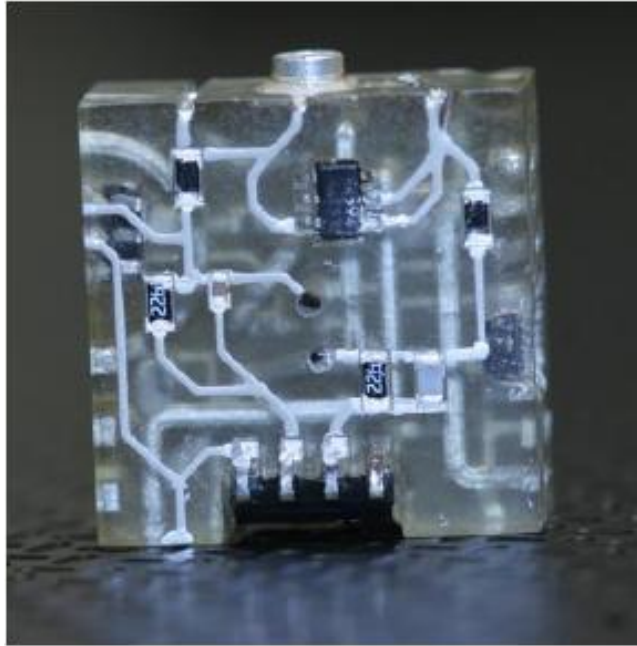
sia. Valmistusprosessissa käytettiin fotopolymerointia ja suutin tyyppistä suoraa kirjoitusprosessia. Tutkijat ovat myös osoittaneet samanlaisia mahdollisuuksia materiaalin pursotuksen, jauhepetimenetelmien ja muiden tekniikoiden kanssa. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 409)



**Kuva 19.** Magneetti vuon valmistus käyttämällä fotopolymerointi ja suoraa kirjoitusprosessia. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 409)

Kuva 19 tapaisia muitakin sovelluksia on pystytty valmistamaan. Kuva 20 on esitetty 3D-tulostettu signaalin vakiointipiiri. Tätä komponenttia käytettiin korkean tarkkuuden prototyyppinä, jolla varmistettiin, että ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä pystytään valmistamaan kyseinen komponentti (Macdonald, Salas et al. 2014 s. 236).





*Kuva 20. 3D-tulostettu signaalin vakiointipiiri. (Macdonald, Salas et al. 2014 s. 236)*

#### **5.4 Materiaalien monimuotoisuus**

Materiaalia prosessoidaan yksityiskohdasta yksityiskohtaan monissa ainetta lisäävissä tekniikoissa, jolloin on olemassa mahdollisuus prosessoida materiaalia eri kohdissa eri tavoin. Tämä johtaa erilaisiin materiaalin ominaisuuksiin osan eri alueilla. Lisäksi monet ainetta lisäävät tekniikat mahdollistavat materiaalikoostumuksen muuttamisen vähitellen tai äkillisesti rakennusprosessin aikana. Näitä ominaisuuksia hyödynnetään uusiin sovelluksiin.

Funktionaalisesti luokiteltujen materiaalien tai heterogeenisten materiaalien käsite on saanut huomattavaa huomiota, mutta hyödyllisten osien valmistus näistä materiaaleista on usein ollut ongelmallista. Tarkastellaan suihkumoottorin turbiinilapaa. Lavan ulkopinnan on oltava korkeiden lämpötilojen kestävä ja erittäin jäykkä, jotta lapa ei pidentyisi merkittävästi käytön aikana. Lavan juuren on oltava taipuisa ja sillä on oltava pitkä väsymisikä. Lavan sisätiloissa on oltava korkea lämmönjohtavuus, jotta terät voidaan jäähdyttää. Tämä on esimerkki osasta, jolla on monimutkainen muoto, joka vaatii erilaisia materiaaliominaisuuksia eri alueilla. Mikään yksittäinen materiaali ei ole ihanteellinen tälle ominaisuusalueelle. Siksi, jos olisi mahdollista valmistaa monimutkaisia osia, joiden materiaalikoostumus ja ominaisuudet vaihtelevat, niin voisivat turbiinin lavat ja vastaavat osat hyötyä valtavasti tästä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 409-410)

Suorakerrostusprosessit, kuten LENS- ja DMD-koneet, ovat osoittaneet kykynsä valmistaa valikoituja materiaali komposiitteja. Meneillään olevat työt tällä suunnalla ovat lupaavia. Valikoituja ja monimateriaalisia koostumuksia käytetään vaurioituneiden tai kuluneiden komponenttien korjaamiseen suorakerrostuskoneilla, ja uusien komponenttien suunnittelua ja valmistusta tutkitaan ympäri maailmaa. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 410)

Materiaalin pursotus laitteita useammalla tulostuskärjellä on ollut saatavilla monien vuosien ajan. Vaikka yhtä tai useampaa suutinta käytetään tyypillisesti tukimateriaalien pursottamiseen ja yhtä suutinta rakennusmateriaaleihin, monet tutkijat ja teollisuuden ammattilaiset ovat hyödyntäneet erilaisten raaka-aineiden pursotusta kahdesta eri tulostuskärjestä luomaan monimateriaalisia rakenteita. Kuten voidaan helposti kuvitella, olisi melko helppoa käsitteellisesti lisätä lisää tulostuskärkiä ja siten lisätä helposti materiaalien lukumäärää, jotka voidaan sijoittaa yhteen rakenteeseen. Itse asiassa monet tutkijat ovat hyödyntäneet tätä käsitettä omissa räätälöidyissä pursotuspohjaisissa koneissaan. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 410)

Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien mahdollinen materiaalien monimuotoisuuden omaksumista haittaa merkittävästi suunnittelu- ja CAD-työkalujen puute, jotka mahdollistaisivat useiden materiaalien samanaikaisen käyttämisen.

## 5.5 Tuotteiden asiakasräätälöinti

Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä on paljon ainutlaatuisia ominaisuuksia ja kun nämä otetaan huomioon, voidaan ilmaista DFAM-ydinkonsepteja ja tavoitteita. DFAM eroaa hieman perinteisestä DFM:sta siten, että DFAM:n tavoitteet ovat maksimoi tuotteen suorituskyky syntetisoimalla muotoja, kokoja, hierarkkisia rakenteita ja materiaali koostumuksia ainetta lisäävien tekniikoiden mahdollisuuksien mukaan. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 411) Jotta edelle määritettyihin tavoitteisiin päästäisiin, tulee suunnittelijalla olla mielessä muutamia asioita, kun lähdetään suunnittelemaan tuotetta:

1. Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät mahdollistavat monimutkaisen geometrian käytön suunnittelutavoitteiden saavuttamisessa aiheuttamatta aikaa tai kustannuksia koskevia seuraamuksia yksinkertaiseen geometriaan verrattuna. (Thompson, Moroni et al. 2016 s. 740, Gibson, Rosen et al. 2015 s. 411)
2. Ensimmäisen ohjeen seurauksena on usein mahdollista yhdistää osia integroimalla ominaisuudet monimutkaisempiin osiin ja välttämällä kokoonpanoon liittyviä tilanteita/asioita. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 411)

3. Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät mahdollistavat mukautetun geometrian ja osien tuottamisen käyttämällä suoraan 3D-tietoja.
4. Kaupallisten monimateriaalisten ainetta lisäävien koneiden myötä suunnittelijoiden tulisi pyrkiä tai edes tutkia mahdollisuuksia monitoimilaitteisiin, joissa yhdistyvät geometriset ja materiaalien monimutkaisuusominaisuudet. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 411)
5. Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät antavat suunnittelijoille mahdollisuuden jättää huomioimatta kaikki tavanomaisten valmistusprosessien asettamat rajoitukset (vaikka ainetta lisäävillä valmistusmenetelmille ominaisia rajoituksia saataan asettaa). (Thompson, Moroni et al. 2016 s. 740, Gibson, Rosen et al. 2015 s. 411)

Edellä on jo keskusteltu ainetta lisäävien menetelmien kyvyistä valmistaa osia monimutkaisella geometrialla. Kerros kerrokselta lähestymistapa tarkoittaa sitä, että osan poikkeileikkauksen muoto voi olla mielivaltaisen monimutkainen käytettävän laitteen resoluutioon saakka. Esimerkiksi fotopolymeerointi- ja jauhepetilaitteet voivat valmistaa melkein yhtä pieniä yksityiskohtia osaan kuin laitteiden laserin pistekoko. Joidenkin ainetta lisäävien prosessien välttämättömien tukirakenteiden poistaminen voi rajoittaa geometrista monimutkaisuutta ja / tai piirrekokoa. Jokaisella ainetta lisäävällä prosessilla on omat ominaisuutensa, ja niiden omaksuminen vie suunnittelijalta jonkin aikaa. Mutta yleensä ainetta lisäävien prosessien geometrinen monimutkaisuus ylittää huomattavasti perinteisten valmistusprosessien monimutkaisuuden.

Ainetta lisäävien prosessien mahdollisuus monimutkaiseen geometriaan mahdollistaa myös muita asioita. Useamman komponentin kokoonpano voidaan korvata yhdellä, monimutkaisemmalla osalla. Tämä on jopa silloin mahdollista, kun kahden tai useamman komponentin on voitava liikkua toistensa suhteen, kuten kuula- ja holkkiliitoksessa. Ainetta lisäävillä menetelmillä voidaan rakentaa nämä komponentit kokonaan valmiiksi koottuina. Nämä ominaisuudet mahdollistavat ominaisuuksien integroinnin useista osista, mikä mahdollisesti parantaa osan suorituskykyä. Lisäksi kokoonpanotoimintojen vähentämisellä voi olla valtava vaikutus tuotantokustannuksiin.

Kun tarkastellaan tavanomaisia DFM käytäntöjä, niin niistä käy ilmi kokoonpanotoimintojen helpottamiseksi tai poistamiseksi tarkoitetut suunnittelumuutokset voivat johtaa huomattavasti suurempiin tuotantokustannusten alenemisiin kuin muutokset, jotka helpottavat osien valmistusta (Boothroyd et al. 2014). Osittain tämä on totta sillä, mahdollisesti kokoonpanossa vaadittujen työkalujen poistaminen vähentää kokoonpano kustannuksia. Vaikka tavanomaiset DFM-ohjeet osien valmistuksesta eivät ole merkityksellisiä

ainetta lisääville menetelmille, kokoonpanosuunnitteluohjeet ovat edelleen merkityksellisiä ja ehkä vielä tärkeämpiä (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 412). Muita etuja osien yhdistämisessä on esimerkiksi osien määrän vähentäminen. Osien vähentäminen vähentää tuotteiden monimutkaisuuden hallintaa ja tuotannon hallintaa tuotannon näkökulmasta. Vähemmän osia on seurattavana, hankittavana, tarkastettavana jne. Varaosa- tai varaosien tarve vähenee. Lisäksi osien valmistamiseksi tarvittavaa varastointitilaa voidaan vähentää. Yhteenvedona voidaan todeta, että osien yhdistäminen voi johtaa merkittäviin säästöihin koko yrityksessä.

Yhdessä monimutkaisten geometrioiden kanssa ainetta lisäävillä prosesseilla voidaan valmistaa helposti asiakasräätälöityjä geometrioita. Kuten edellä on jo mainittu, pystytään tuotteiden geometrioita helposti muuttamaan CAD-/suunnitteluohjelmissa. Tämä ainetta lisäävien menetelmien kyky valmistaa nopeasti asiakasräätälöityjä tuotteita antaa sille etua perinteisiin valmistusmenetelmiin nähden. Perinteisesti asiakasvaatimuksiin on pyritty vastaamaan tuotteiden modulaarisuudella. Tuotteiden modulointi voi kuitenkin olla todella pitkä ja vaikea prosessi, jolla kuitenkin ei pystytä vastaamaan kaikkiin asiakasvaatimuksiin. Näkyisin, pystytään tuottamaan fotopolymerointi- ja jauhepetilaitteissa useita tuotteita saman aikaisesti, joilla on eri geometriat. Tämä johtaa siihen, että osan massatuotannon sijasta voidaan massamuokkaukset toteuttaa melko helposti. Massiiviseen mukauttamiseen tarkoitettujen yleisten ohjelmistotyökalujen puuttuminen laitteiston rajoitusten sijasta on keskeinen rajoitus harkittaessa ainetta lisäävän valmistusmenetelmän massamuokkauksen suhteen (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 412).

Kun puhutaan jonkin osan kohdalla monitoimiratkaisuista, niin sillä tarkoitetaan monitoimintoa, mikä on yksinkertaisesti useiden toimintojen tai tarkoituserien saavuttaminen yhdellä osalla. Tämä saavutetaan yleisesti suoritettaessa osien yhdistämistä, mutta materiaalin monimutkaisuus kykenee mahdollistamaan suunnittelumahdollisuuksien huomattavasti kunnianhimoisempia tutkimuksia. Muutama hyvä esimerkin voidaan esittää tästä. Ensimmäinen esimerkki on, jos osan on oltava jäykkä yhdessä sijainnissa, mutta joustava toisessa, voitaisiin käyttää useita ainetta lisääviä prosesseja tällaisen mallin valmistamiseksi yksinkertaisesti muuttamalla materiaalikoostumusta. Toinen esimerkki on lämmönvaihdin, jolla on myös rakenteellinen tarkoitus, joka voitaisiin valmistaa yhdistelemällä terästä ja kupariseoksia. Yhdistämällä geometrinen ja materiaalien monimutkaisuuden voidaan valmistaa erittäin suorituskykyisiä laitteita. Suunnittelijoiden on monissa tapauksissa kehitettävä uusia suunnittelukonsepteja ja tutkittava niitä, koska monista alueista puuttuu esimerkkejä aiemmin onnistuneista malleista. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 412-413)

## 5.6 Optimointi menetelmät

Aiemmin on jo keskusteltu ainetta lisäävien menetelmien kyvystä luoda monimutkaisia geometrioita ja kyvystä vaikuttaa osan sisäpuolisiin piirteisiin. Nämä kyvyt myös mahdollistavat osien optimoinnin niiden käyttötarkoitukseen. Yleisesti optimointimenetelmillä pyritään parantamaan esineen suunnittelua säätämällä suunnittelumuuttujien arvoja haluttujen, tyypillisesti rakenteelliseen suorituskykyyn tai painoon liittyvien tavoitteiden saavuttamiseksi, niin hyvin kuin mahdollista rikkomatta rajoituksia. (Gibson, Rosen et al. 2015s. 427). On kehitetty erilaisia optimointiongelma formulaatioita, jotka vaihtelevat tavoitteen tyyppin ja ongelman laajuuden mukaan. Kolme päätyyppiä optimointitehtävissä, joita on tutkittu DFAM:ssä, ovat monimutkaisuuden ja toimintavapauden lisääminen seuraavassa järjestyksessä: (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 427).

1. Koon optimointi – missä määritetään mittojen arvot
2. Muotojen optimointi – missä osien pintojen muotoa muutetaan
3. Topologian optimointi – missä tutkitaan materiaali jakaumia

Koon optimoinnissa määritetään valittujen mittojen arvot, jotka saavuttavat parhaiten tavoitteet ja täyttävät mahdolliset rajoitukset. Tyypillisissä rakenteen optimointisovelluksissa tavoitteisiin voisi kuulua maksimijännityksen, venymäenergian, taipuman tai osan tilavuuden tai painon minimointi. Yksi tai useampi näistä määristä voidaan myös mallintaa rajoituksina. Monien mekaanisten osien osalta pieni määrä kokomittoja tulee olemaan osa optimointiongelmaa. Sellaisissa solurakenteissa, kuten ristikkorakenteissa, suunnittelumuuttujien lukumäärä voi kuitenkin olla kymmenissä tai sadoissa tuhansissa. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 427)

Muodon optimointi on yleiskatsaus koon optimoinnista. Tyypillisesti reunustavien käyrien tai pintojen muoto optimoidaan samanlaisten tavoitteiden ja rajoitusten saavuttamiseksi. Sellaisena käyrien tai pintojen ohjauspisteiden sijainteja käytetään usein suunnittelumuuttujina. Muodon ja koon optimointi yhdistetään usein sellaisten rakenteiden optimoimiseksi, joilla on vapaamuotoiset muodot, samoin kuin vakiomuodot (esim. Sylinterit), joilla on mitat. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 428)

Topologian optimoinnissa määritetään yleinen muoto, muotoelementtien järjestys ja suunnittelualueen yhteys. Jälleen, osan tilavuus tai vaatimustenmukaisuus minimoidaan, riippuen esimerkiksi määristä, vaatimustenmukaisuudesta, rasituksesta, rasitusenergiasta ja mahdollisesti lisähuomioista. Ensisijaiset erot topologian optimoinnin ja muodon tai koon optimoinnin välillä ovat geometrisessa konfiguraatiossa ja muuttujien valin-

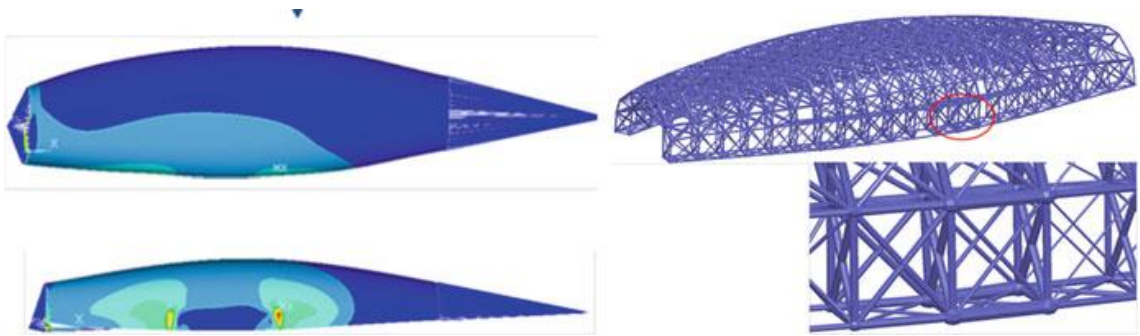
nassa, mikä voi johtaa erittäin merkittäviin parannuksiin rakenteellisessa suorituskyvyssä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 428) Kiinnostus topologia optimointia kohtaan on ollut kasvussa viime aikoina, varsinkin ainetta lisäävien valmistusmenetelmien kohdalla. Tämän johdosta topologia optimointia käsitellään hieman laajemmin tässä työssä kuin muita kahta optimointi menetelmää.

Topologian optimointimenetelmät määrittävät muotoelementtien yleisen konfiguraation suunnitteluongelmassa. Usein topologian optimointimenetelmän tuloksia käytetään syöteinä myöhempisiin koon tai muodon optimointiongelmiin. Rakenteellisina optimointimenetelminä äärellisten elementtien analyysit suoritetaan tyypillisesti optimointimenetelmän jokaisen toiston aikana, mikä tarkoittaa, että topologian optimointimenetelmä voi olla laskennallisesti vaativa. Lisäksi topologian optimointimenetelmän ratkaisujen tulisi johtaa rakenteisiin, jotka ovat lähes täysin jännittyneitä tai joilla on vakio venymäenergia koko rakenteen geometrian alueella määriteltyjen kuormitusolosuhteiden perusteella. Topologian optimointimenetelmän ongelmiin on kehitetty kaksi pääasiallista lähestymistapaa: ristikkopohjaiset ja tilavuuspohjaiset tiheysmenetelmät. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 428)

Ristikkopohjaisessa lähestymistavassa solmujoukon joukossa olevien tukien verkko määritetään kiinnostuksen kohteena olevassa tilavuudessa, jossa joskus verkko edustaa kokonaista kuvaajaa (esim. Maadoituskisko) ja joskus se perustuu yksikkösoluihin. Topologian optimointi etenee ongelman kannalta tärkeimpien tukien tunnistamiseksi, niiden koon (esimerkiksi halkaisijan) määrittämiseksi ja todella pienen halkaisijan omaavien tukien kokonaan poistamiseksi. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 428)

Ristikkopohjaisten menetelmien ensimmäisissä muunnelmissa perustusristikko määritettiin solmujen ruudukolla, jokaisen solmun ollessa kytkettynä jokaiseen muuhun solmuun ristikkoelementillä. Jokaisen elementin halkaisijaa käytettiin suunnittelumuuttujana. Optimoinnin edetessä elementit, joiden halkaisijat pienenevät, poistetaan suunnittelusta. Vaikka menetelmät toimivat hyvin, ne olivat yleensä laskennallisesti kalliita. Viime aikoina on kehitetty hienostuneempia menetelmiä, joissa hyödynnetään erilaista ongelmamuotoilua, mukaan lukien taustaverkot ja analyttiset johdannaiset herkkyiden laskemiseksi, ristikon optimointimenetelmiin. Hyviä tuloksia on saatu aikaan, kun sekä ristikkoelementin kokoa että sijaintia käytetään suunnittelumuuttujina. Näiden lähestymistapojen muunnelmat ovat osoittaneet kyvyn saavuttaa riskipohjaiset tai luotettavuuteen liittyvät tavoitteet. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 428-429)

Muut synteesisimenetelmät hyödyntävät heuristisia optimointimenetelmiä yrittäessä vähentää huomattavasti suunnittelumuuttujien lukumäärää optimointitehtävässä. Esimerkiksi, kokojen sovittaminen ja skaalaaminen (SMS) -menetelmä alkaa epämuodollisella hilarakenteella, mutta vaatii vain kaksi suunnittelumuuttujaa, vähimmäis- ja enimmäistuen halkaisijan rakenteen optimoimiseksi. Menetelmä toimii suorittamalla äärellisten elementtien analyysi (FEA) mallin kiinteälle rungolle. FEA-tulosten paikallisia venymä- tai jännitysarvoja käytetään hilarakenteen tukien skaalaamiseen, mikä johtaa joukkoon suhteellisia tukien koon arvoja. Koko optimointi suoritetaan hilarakenteelle vähimmäis- ja enimmäishalkaisijan arvojen määrittämiseksi hilarakenteen mallintamiseksi runkoelementeillä. SMS-menetelmän soveltaminen yksinkertaistettuun UAV-rungon suunnitteluongelmaan on esitetty Kuva 21. Huomaa, että korkean jännityksen alueet johtavat paksumiin tukiin. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 429)



**Kuva 21.** SMS-menetelmän tulokset UAV-rungon suunnitteluongelmaan. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 429)

Toinen päälähestymistapa perustuu sopivan materiaali tiheyden määrittämiseen tila-alueella käsittävissä tilavuusalkio joukossa. Tiheyspohjainen topologia optimointi menetelmä, jota käytetään yleisimmin kaupallisissa ohjelmistopaketeissa, tunnetaan nimellä SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization). Ongelman lähtögeometria on suoraviivainen lohko, joka koostuu joukosta tilavuusalkioita. Jokaisella tilavuusalkiolla on tiheysarvo, jota käytetään sen suunnittelumuuttujana. Tiheysarvo 1 osoittaa, että materiaali on täysin tiheää, kun taas arvo 0 osoittaa, että mitään materiaalia ei ole läsnä. Väliarvot osoittavat, että materiaalin ei tarvitse olla täysin kiinteää tukemaan paikallista rasiustilaa kyseisessä tilavuusalkiossa. Edullisia ovat ratkaisut, joissa on tilavuusalkioita, jotka ovat joko täysin tiheitä tai lähellä tiheyttä 0, koska tyypillisesti osittain tiheitä materiaaleja on vaikea valmistaa. Tiheysarvoja käytetään skaalaamaan tilavuusalkioiden jäykkyyssarvoja FEA-malleissa, joita käytetään topologia optimointi prosessin aikana. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 429)

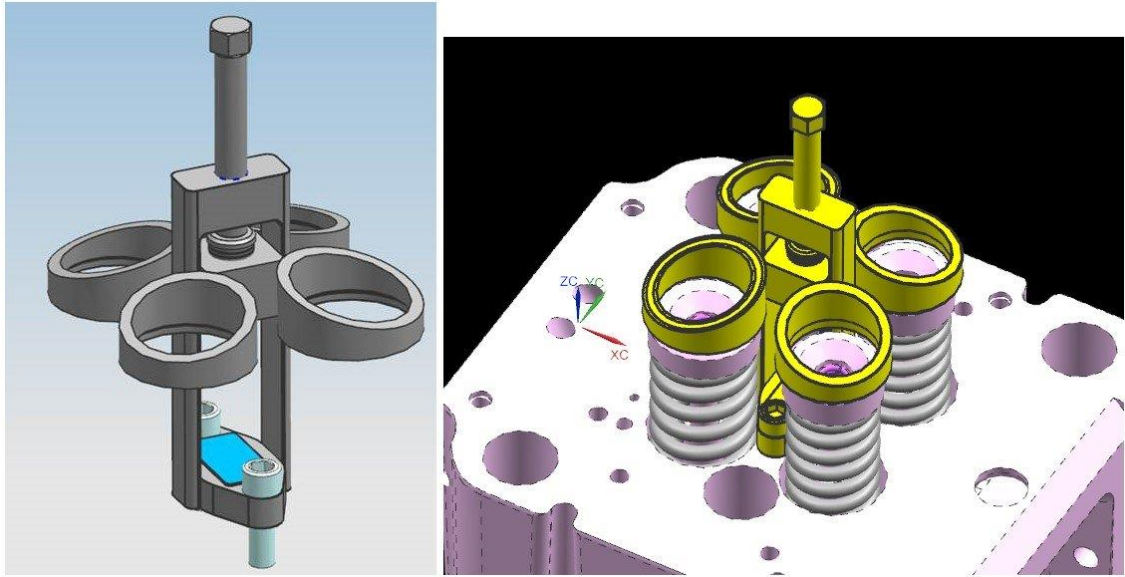
Ennen kunkin paketin kuvaamista yksityiskohtaisemmin, näiden kaupallisten topologia optimointi järjestelmien yleiset rajoitukset korostetaan. Ensimmäkin topologian optimointi

perustuu likimääräisiin mekaniikkamalleihin, jotka voivat poiketa olennaisesti osien tai materiaalien mekaniikasta. Lisäksi yksinkertaiset mekaaniset mallit eivät sovellu solumateriaaleihin, koska niiden mekaniikkaa ei voida arvioida isotrooppisella kiinteällä aineella. Oletetaan esimerkiksi, että elementin tiheys on 30% ja suunnittelija haluaa käyttää oktetti ristikon rakennetta kyseisen elementin alueella. Asetetun ristikko solun sijoittaminen 30-prosenttiseen kiinteään alueeseen johtaa täysin erilaiseen mekaaniseen käyttäytymiseen kuin topologia optimoinnin aikana oletettu käyttäytyminen. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 431)

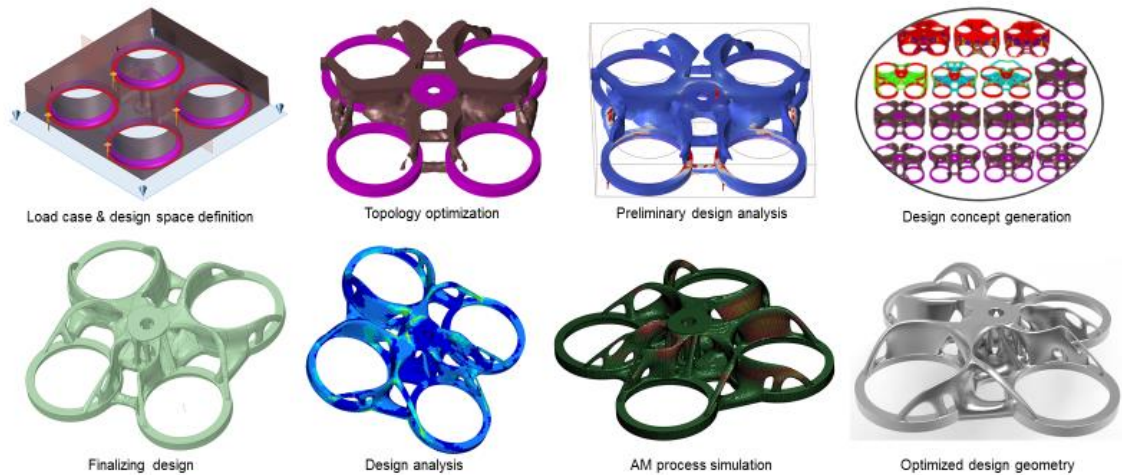
Topologia optimoinnin tulokset ovat harvoin valmistettavissa suoraan, jopa ainetta lisäävillä menetelmillä. Tyypillisesti mallit pitävät verkotetut pinnat siten, että ne ovat karkeampia (ja tesellatoituja) kuin olisi toivottu. Osa-alueista voi tulla hyvin ohuita paksujen osien välillä, aiheuttaen ei toivottuja rasiuspitoisuuksia. Jotkut topologian optimointijärjestelmät tekevät parempaa työtä sileämmällä pinnalla olevien mallien (esim. ABAQUS) tuottamiseksi, mutta silti käyttöoppaissa suositellaan yleensä, että topologian optimoinnin tuloksia käytetään ohjaamaan osan suunnittelua - ne tarjoavat käsitteellisiä ratkaisuja - sen sijaan, että niitä pidettäisiin, sopivina tuotantokäyttöön. Lisäksi topologian optimoinnilla tuotetut mallit eivät tyypillisesti sovellu tuontiin takaisin CAD-järjestelmään tarkentamiseksi, koska ne ovat viistehiottuja (alkuperäiset CAD-pinnat ovat kadonneet) eikä niissä ole geometrisiin muotoihin liittyviä parametreja. Sellaisenaan on erittäin vaikeaa modifioida tai tarkentaa topologian optimointimalleja CAD:ssä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 431)

Suomessa on myös jo ehditty tekemään tuotteen optimointia ja hyödyntämään optimoidun tuotteen valmistuksessa ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä. Etteplan optimoi Wärtsilälle painotyökalun hyväksikäyttäen optimointimenetelmiä ja ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä. Kuva 22 on alkuperäinen hitsattu painotyökalu ja Kuva 23 on Etteplanin suunnittelema optimoitu painotyökalu ja sen suunnitteluun vaadittu prosessi.



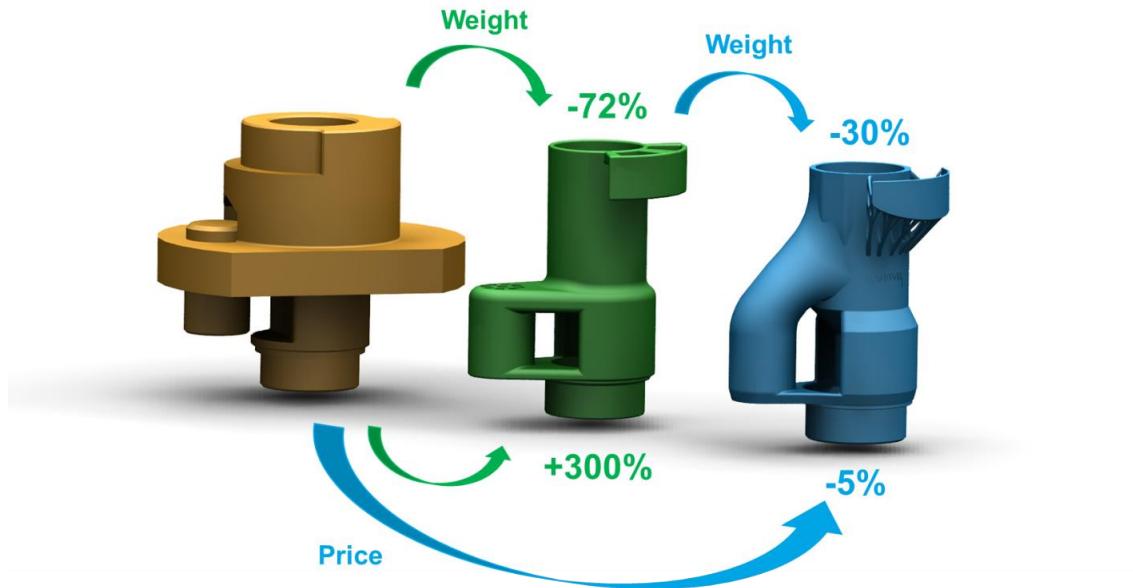


**Kuva 22.** Wärtsilälän alkuperäinen hitsattu painotyökalu. (Etteplan 2020)



**Kuva 23.** Etteplanin suunnittelema optimoitu painotyökalu ja sen tekemiseen vaadittu prosessi. (Etteplan 2020)

Toisessa Etteplanin projektissa optimoitiin ja uudelleen suunniteltiin Sandvikille uusi vetopyörä. Vetopyörää oli koitettu aikaisemmin optimoida mutta optimoidun valmistaminen perinteisillä valmistusmenetelmillä oli liian kallista. Kuva 24 on esitelty Vetopyörästä kolme eri variaatiota. Vasemmanpuoleinen on alkuperäinen kappale, keskimmäinen on optimoitu kappale, joka oli tarkoitus valmistaa perinteisillä valmistusmenetelmillä ja oikeanpuoleinen kappale on Etteplanin optimoima kappale, joka valmistetaan ainetta lisäävällä valmistusmenetelmällä.



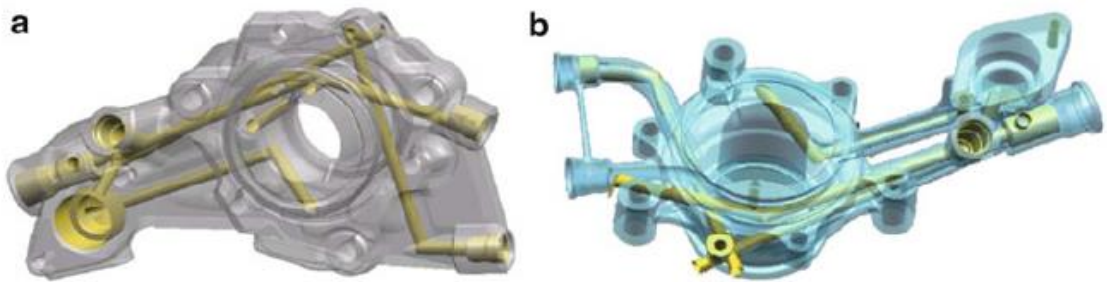
**Kuva 24.** Alkuperäinen kappale, aikaisemmin optimoitu ja Etteplanin optimoitu kappale. (Etteplan 2020)

Avant on myös optimoinut omia osiaan tuotteisiinsa. Yhtenä optimoituna osana oli hydraulibloki. Alkuperäisen osien paino oli 2910 g ja tämä kokoonpano sisälsi yhteensä 33 kpl osia. Optimoidussa osassa osat integroitiin ja lopullisen osan painoksi saatiin 175 g. Integroidun ja optimoidun muita hyötyjä oli optimoidut letkulähdöt, suodatin on tulostettu kappaleen sisälle ja osan tilan käyttö on minimoitu. Hydrauliblokin optimoinnin ideasta fyysiseksi tuotteeksi kesti kolme viikkoa. Kuva 25 on esitelty optimoitu hydraulibloki.

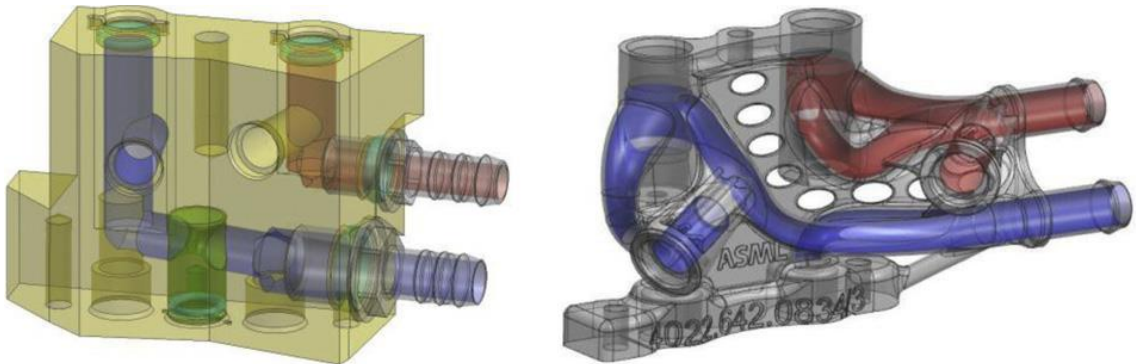


**Kuva 25.** Optimoitu hydraulibloki. (3DStep 2020)

Muita esimerkkejä, kun yhdistetään optimointimenetelmät ja ainetta lisäävät valmistusmenetelmät on esitetty Kuva 26 ja Kuva 27.



**Kuva 26.** (a) Alkuperäinen suunnittelu, (b) uudelleen suunniteltu ainetta lisääville valmistusmenetelmille. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 414)



**Kuva 27.** Kiinteä malli vedenjakoputkesta, joka on suunniteltu ainetta lisääville valmistusmenetelmille. Vasemmalla alkuperäinen malli ja oikealla uudelleen suunniteltu malli. (Thompson, Moroni et al. 2016 s. 741)

## 6. PIKAVALMISTUKSEN MAHDOLLISUUDET MUOTTIEN JA TYÖKALUJEN VALMISTUKSESSA

Ainetta lisääviä menetelmiä voidaan myös käyttää työkaluratkaisujen kehittämiseen. Tätä muottien ja työkalujen pikavalmistusta (engl. Rapid Tooling) voidaan pitää jokseenkin prototyyppien pikavalmistukseen kuuluvana. Sitä myös pidetään jokseenkin prototyyppien pikavalmistuksen toisena esille tulemisena (Radstok 1999). Vaikka ainetta lisäävät menetelmät eivät sovi hyvin suuren volyymin tuotantoon suorassa digitaalisessa tuotantotavassa, sillä on kuitenkin jonkin verran hyötyä volyymituotannon työkalujen valmistuksessa. Tämä voi olla ainetta lisäävien valmistusmenetelmien käyttämisen näkökulmasta luomalla malleja osille, joita vaaditaan, käyttämällä materiaaleja tai ominaisuuksia, joita ei tällä hetkellä ole saatavana ainetta lisääville valmistusmenetelmille, tai pidemmän aikavälin työkaluille, joissa ainetta lisäävät valmistusmenetelmät saattavat pystyä yksinkertaistamaan prosessiketjua.

Kuten aiemmin on jo tässä työssä puhuttu, ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä on ollut taipumus yrittää käyttää osien suoraan valmistamiseen. Suorasta valmistamisesta voidaan myös puhua suorana digitaalisena valmistamisena (engl. Direct Digital Manufacturing, DDM) (Holmström, Holweg et al. 2016 s. 1). On monia syitä, miksi tämä voi olla edullinen lähestymistapa tuotantoon. Prototyyppien pikavalmistus menetelmien on todistetusti olevan kustannustehokas ja ajallisesti tehokas tapa tuottaa muotteja ja työkaluja (Sahebrao Ingole, Madhusudan Kuthe et al. 2009). Työkalujen luomiseen suoran digitaalisen valmistuksen sijaan on kuitenkin edelleen useita syitä. Ensimmäinen syy on, että mitä suurempi määrä osia valmistetaan, sitä kustannustehokkaampaa voi olla tuotantotyökalun valmistaminen, mikäli tiedetään, kuinka monta osaa voidaan valmistaa sellaisella työkalulla. Toinen syy on, että valmiin osan materiaalivaatimukset voivat olla hyvin erityisiä, eikä niitä ole tällä hetkellä saatavana ainetta lisääville valmistusmenetelmien materiaalina, mutta se voi kuitenkin olla mahdollista työkalureitin kautta. Kolmas syy on, että tuotekehittäjä voi haluta ymmärtää työkaluprosessin ja käyttää siten ainetta lisäävää valmistusmenetelmää prototyyppityökalun luomiseen. Neljäntenä syynä on, että voi itse asiassa olla nopein ja tehokkain tapa luoda työkalu vaadittujen eritelmien mukaisesti. Tämä voi olla erityisen merkityksellinen silloin, kun lyhyet läpimenoajat ovat tärkeitä.

Työkalut usein jaetaan usein kahteen eri tyyppiin, joita kutsutaan lyhytkestoisiksi ja pitkäaikaisiksi työkaluiksi. Vaikka jako suoritetaan, niin kummallekaan näistä ei ole erityistä määritelmää. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 478)

Gibsonin (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 478) kirjassa lyhytkestoisille työkaluille annetaan seuraavanlainen määritelmä. Lyhytkestoista työkalua voidaan kutsua myös prototyypin työkaluksi tai pehmeäksi työkaluksi. Tavoitteena on käyttää tekniikoita, joilla saavutetaan työkalu nopeasti, edullisesti ja muutamilla prosessivaiheilla. Melko usein prosessissa on useita manuaalisia vaiheita. On selvää, että työkalulla voidaan tehdä vain muutama osa; mahdollisesti vain yksi tai kaksi osaa, mutta jossain tapauksissa voidaan saavuttaa noin 100 tai jopa useamman osan valmistus samalla työkalulla. Aina kun työkalua käytetään, se on tarkistettava vaurioiden ja käyttökelpoisuuden varalta. Voi jopa olla mahdollista (tai tarpeen) korjata työkalu ennen kuin sitä voidaan käyttää uudelleen. On huomattava, että jos työkaluratkaisua vaaditaan hyvin lyhyessä ajassa (esimerkiksi muutamassa päivässä), niin ainetta lisäävät valmistusmenetelmät voivat olla ainut vaihtoehto tehdä tämä lyhytkestoinen työkalu.

Gibsonin (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 478) kirjassa pitkäkestoisille työkaluille annetaan seuraavanlainen määritelmä. Pitkäkestoisissa työkaluissa painotetaan enemmän työkalujen käyttöä massatuotannossa. Jotkut ruiskuvalutyökalut voivat kestää vuosia ja miljoonia osia. Vaikka kulumista tapahtuu aina, kulumisaste on erittäin alhainen työkalun suhteellisen kovuuden takia verrattuna niillä valmistettaviin osiin. Ainetta lisäävän valmistusmenetelmän käyttäminen pitkäaikaisten työkalujen luomiseen tarvittavat prosessit valitaan silti niiden suhteellisten kustannusten ja läpimenoajan perusteella, mutta tässä tapauksessa ne ovat todennäköisemmin verrattavissa tavanomaisiin (vähentäviä) valmistusprosesseihin. Lähes jokainen ainetta lisäävällä valmistusmenetelmällä tehdyn pitkäaikainen työkaluratkaisu sisältää todennäköisesti metallinvalmistusprosessin.

Muottien ja työkalujen pikavalmistuksen hyödyt voi olla vaikea määrittää, mutta ne voivat olla valtavia. Hyvin harvoin tuote tuotetaan yhdellä työkalulla ja mitä monimutkaisempi tuote, sitä vaikeampi se on suunnitella. Mietitään esimerkiksi uuden massatuotetun auton markkinoille saattamisen ongelmaa. Jotkut osat ovat jo saatavana, jotkut olemassa olevat osat saattavat tarvita uudelleensuunnittelua, kun taas toiset vaativat suunnittelun alusta alkaen. Jotkut näistä uusista osista ovat suhteellisen yksinkertaisia, kun taas toisilla on merkittävät suorituskykyvaatimukset, joilla voi olla erittäin pitkä läpimenoaika. Kun mietitään, kuinka voidaan laatia suunnitelma koota nämä kaikki yhteen niin, että auto käynnistetään aikataulun mukaan. Jopa hyvin yksinkertaisen osan valmistus voi viivästyttää koko prosessia. Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettujen lyhytkestoisten ja pitkäaikaisten työkalujen käyttö voi olla erittäin hyödyllistä lyhyiden reaktioaikojen ja yksinkertaistettujen prosessiketjujen takia. Autonvalmistaja voi ehkä suunnitella helpommin ja reagoida prosessiketjun häiriöihin tehokkaammin. Jopa työkaluja, jotka eivät kestä kovin kauan, voidaan hyödyntää siten, että auton valmistusprosessi

saadaan aloitettua niillä ja näin ollen täyttää aukko ennen pitkäaikaisten työkalujen saantia, jotka on valmistettu perinteisillä menetelmillä. Autojen toimitusajat voidaan saavuttaa, vaikka koko massatuotantolaitos ei ole vielä valmis.

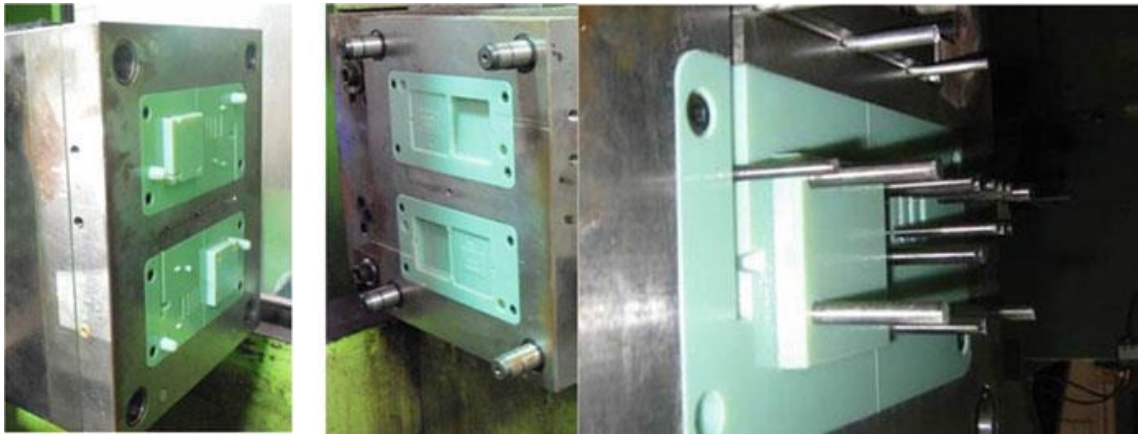
## 6.1 Ruiskuvalaminen

Suurin osa muottien ja työkalujen pikavalmistuksesta keskittyy ruiskuvalutyökalujen luomiseen. Tämä johtuu siitä, että on olemassa valtava määrä polymeereistä valmistettuja tuotteita, jotka käyttävät tätä lähestymistapaa. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 438-439) Yksinkertaisuudessa ruiskuvaluprosessi on hyvin suoraviivainen siinä mielessä, että sula polymeeri pakotetaan metallisen muotin sisään. Kun polymeeri on jäähtynyt ja jäähmettynyt muotti jakaantuu muutamaaan osaan ja valmis osa työnnetään muotista ulos ja prosessi toistetaan. Todellisuudessa kuitenkin ruiskuvaluprosessin tuotoksen optimointi ja maksimointi voi olla hyvin monimutkaista. Kun kysyntä suuremmalle suorituskyvyille, laadulle ja niin edelleen kasvaa, tarvitaan myös kustannustehokkaita ratkaisuja.

Kun lähetään suunnittelemaan ruiskuvalutuotetta ja sen muottien valmistamista suunnittelussa pitää huomioida muutamia asioita. Ensimmäinen huomioitava asia on, että yksinkertaisessa muotissa on onkalo, johon polymeeri injektoidaan. Muotin toiselle puolelle muodostuu ydin, joka poistetaan jäähdytysprosessin jälkeen, jotta osa voidaan työntää ulos. Mekanismina toimii yleensä sarja tappeja, jotka työntävät osan ulos ontelosta. Jotta tämä olisi tehokasta, ontelon seinämällä on yleensä pieni kaltevuus (kutsutaan ”syväyskulmaksi”), joka vähentää polymeerin ja muotin välisiä leikkausvoimia, jotka aiheuttaisivat osan tarttumisen. Toinen huomioitava asia on, että kaikkia muotteja ei voida helposti jakaa yksinkertaiseen ytimeen / onkaloon osan valmistamiseksi. Monimutkaisen geometrian osat voivat vaatia muottijoukkoja, jotka jakautuvat useampaan kuin kahteen segmenttiin. Osat saattavat vaatia erittäin huolellista suunnittelua niin, että muottikomponenttien määrä minimoidaan. Silti muottijoukot voivat olla hyvin monimutkaisia. Viimeinen huomioitava asia liittyy muotin täyttämiseen sulalla polymeerillä. Nimittäin muotin on oltava täysin täynnä ennen kuin se alkaa kiinteytyä, muuten muotin sisälle voi muodostua ilma onteloita. Osat, jotka sisältävät monia ominaisuuksia, kuten paksuja tai ohuita seinämiä, vahvistusripoja, pylväitä jne., on analysoitava huolellisesti, jotta muotti voidaan täyttää oikein. Erittäin monimutkaiset osat saattavat vaatia useita ruiskutus- ja ilmanpoistokohtia, jotta voidaan varmistaa muotin tehokas täyttö sekä lämpötilojen, paineiden ja sykli-toimintojen hienosäätö ruiskuvalukoneessa. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 439)

Ruiskuvaluprosessia voidaan mukauttaa tehokkaasti vaihdettavilla inserteillä. Tässä kohtaa ainetta lisäävät menetelmät voivat olla hyödyksi ja niillä voidaan helpottaa ratkaisun löytämistä inserttien valmistamiseen. Insertit voidaan joko valmistaa metallista tai

polymeeristä. Polymeeriset insertit ovat huomattavasti lyhyt kestoisempia mutta niiden valmistaminen on paljon nopeampaa ja halvempaa. Kuva 28 on esitelty ainetta lisäävällä menetelmällä tehdyt polymeeriset insertit. Kuvassa näkyy myös ulostyöntö tapit.



**Kuva 28.** Polymeeristä valmistetut insertit. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 441)

Inserttien tekemistä ja niiden toimivuutta on testattu monilla eri materiaaleilla, esimerkiksi polyamidista, ABS ja polyeteenistä. Testeissä on saavutettu jopa 100 ruiskuvalutuotteen valmistaminen polymeereistä valmistetuilla inserteillä, ennen kuin insertit tarvitsee korvata uusilla. Vaikka ruiskuvaluprosessi toimii ainetta lisäävien valmistusmenetelmien materiaalien taipumislämpötilan yläpuolella, on silti mahdollista saada hyväksytysti valuttuja osia. Tämä voidaan saavuttaa sillä, että ruiskuvalusykliä pidennetään, niin että osat voivat jäähtyä pidempään muotin sisällä ennen niiden erottelua muotista. Tämän tyyppisissä sovelluksissa kustannukset voivat olla noin puolet samanlaisista alumiini-muoteista, mikä vähentää merkittävästi läpimenoaikaa. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 440)

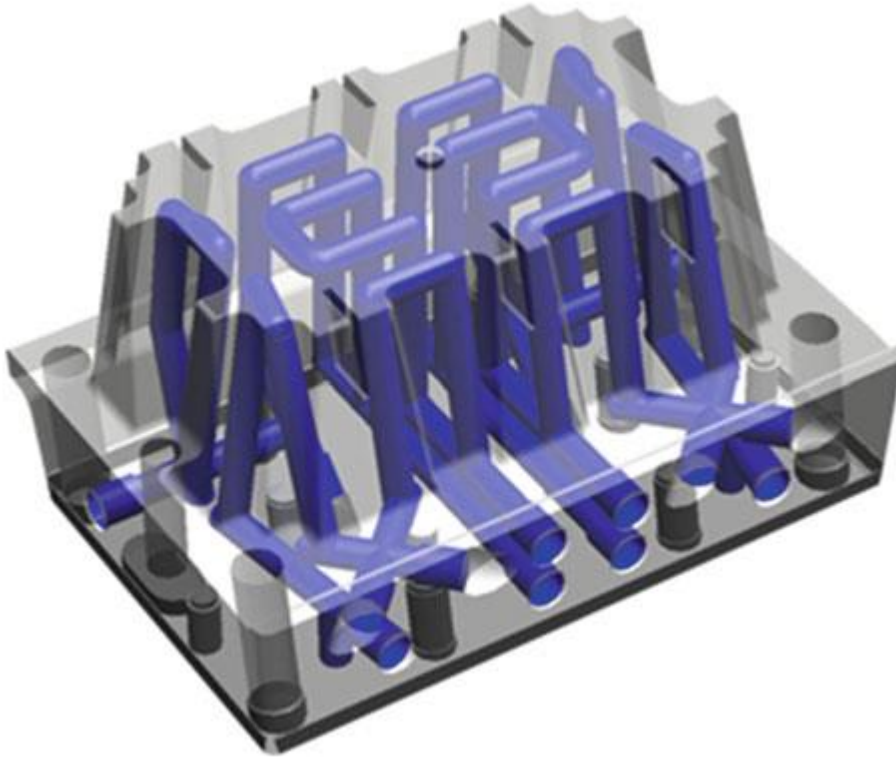
Ensisijaisia huolenaiheita valmistettaessa muotteja polymeeristä ovat taipumislämpötilat, kuluminen ja tarkkuus. Useimmat ainetta lisäävät prosessit voivat tarjota osittaisia ratkaisuja näihin ongelmiin, mutta yleensä tarkimmissa prosesseissa on alhaiset taipumislämpötilat ja korkeamman lämpötilan materiaalit löytyvät alhaisemman tarkkuuden prosesseista. On tehty useita yrityksiä kehittää materiaaleja ruiskuvalu inserteille polymeereistä ainetta lisäävillä prosesseilla. Yksi huomionarvoinen materiaali on kuparipolyamidimateriaali, joka kehitettiin polymeeri jauhepetiprosessille. Kuparitäyteaineen lisääminen polyamidimatriisimateriaaliin paransi lämmönsiirtoa pinnasta pois päin, kun ruiskuvalu koneessa käytetään muottia. Kupari tarjosi myös ylimääräisen kulutuskestävyyden, mikä pidentää muotin ikää. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 441) Tämä materiaali ei

ole laajalti käytetty, koska kuparipolyamidi ei ole kovin hyödyllinen monissa muissa sovelluksissa, joten se on sopiva vain silloin, kun tarvitaan suuri määrä näitä muotteja.

Ainetta lisäävillä menetelmillä tehdyt metalliset ruiskuvalumuottien insertit tehdään yleisesti metallijauheen sintraustekniikoilla. Yleisin metallimateriaali, jota käytetään muottien valmistuksessa, on H13-työkäkaluteräs. Sintraustekniikoilla saavutettava Ra-pinnankarkeus on luokkaa 12 – 20  $\mu\text{m}$ . (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 442) Tämä tarkkuus ei yleensä ole hyväksyttävä useimmissa sovelluksissa ja etenkin erotuspintojen työstö olisi tarpeen. Jos muotin pinta vaatii koneistusta viimeistelyyn, on kiinnitettävä erityistä varovaisuutta, että kaikki alkuperäiset muodot ovat koneistettavan pinnan ulkopuolella. Virheellinen reunus voi johtaa siihen, että joillakin alueilla ei ole riittävästi raaka-ainetta riittävän koneistettavan pinnan saavuttamiseksi. Tämä voidaan estää lisäämällä materiaali koneistettaville pinnoille.

Yksi merkittävä etu ainetta lisäävän valmistusmenetelmän käytölle ruiskuvalumuottivälineiden luomisessa on kyky luoda epämuodollisia jäähdytyskanavia. On normaalia, että jäähdytysnestettä johdetaan ruiskuvalu inserttien läpi, mikä helpottaa muoviosan jäähdytystä sulan polymeerin injektoinnin jälkeen. Tämä jäähdytysprosessi on hyvin riippuvainen muovattavan osan geometriasta, kun suuret tilavat segmentit jäähtyvät hitaammin kuin pienemmät, ohuemat osat. Suurempi jäähdytysnesteen virtaus lähellä suurempia segmenttejä voi mahdollistaa nopeamman ja säännöllisemmän jäähdytyksen, mikä voi myös parantaa osien laatua estämällä osien vääntymistä lämmön aiheuttaman rasituksen vuoksi. Ainetta lisäävien menetelmien ominainen geometrinen vapaus voi mahdollistaa erittäin monimutkaisten jäähdytyskanavien suunnittelun muotteihin. Kuva 29 on hyvä esimerkki monimutkaisista jäähdytyskanavista muotissa.





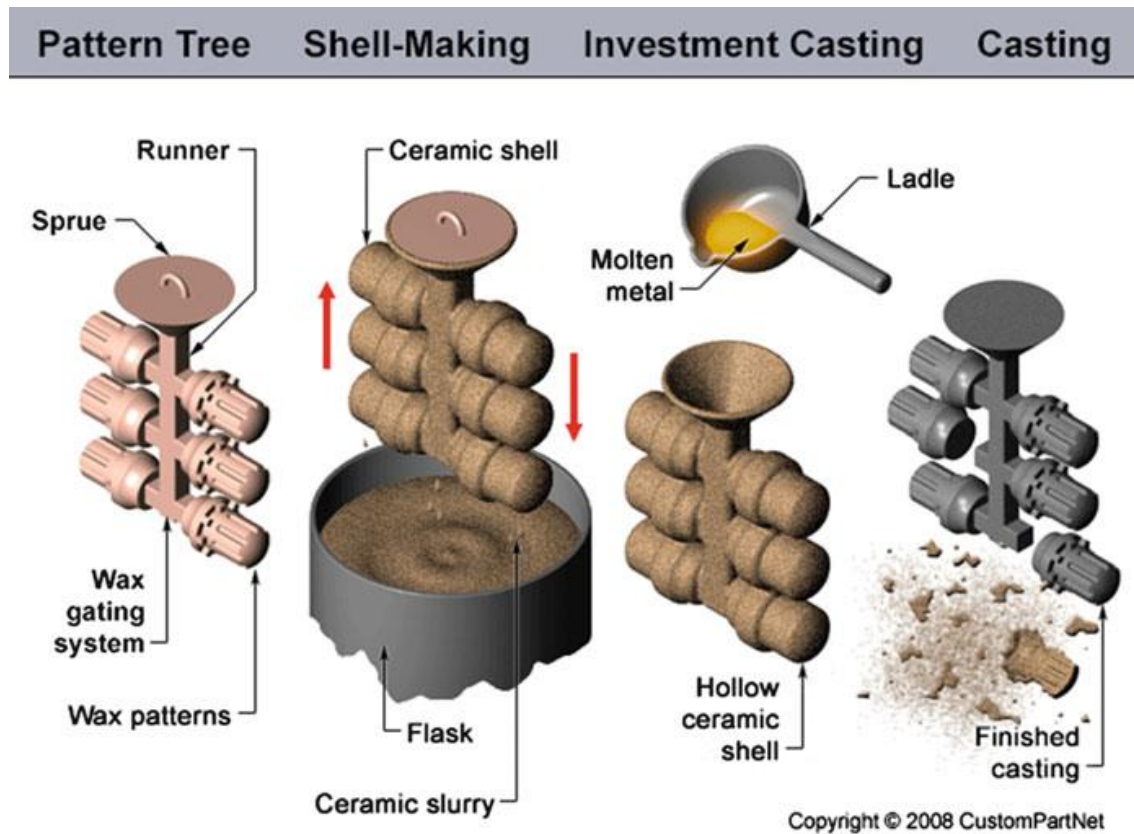
**Kuva 29.** Jäähdytyskanavat ruiskuvalumuotin sisällä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 443)

## 6.2 Vahamallivalaminen

Vahamallivalu on prosessi, jolla tuotetaan metalliosia ei-metallisesta kuviosta. Kuva 30 kuvaa tehokkaasti vahamallivalumenetelmää. Halutut kuviot on jollain tavalla koottu rakenteeksi, joka voidaan päällystää keraamilla kuoren tuottamiseksi. Keramiikka on lietteenä, johon vahamalli kastetaan tuottamaan tiiviisti muodostuva kuori. Kun tämä on kuivunut, sitä vahvistetaan lisäämällä lisää kerroksia, kunnes se on riittävän vahva kestämään valuprosessin. Ennen todellista valamista, tarvitsee kuvio poistaa polttamalla vahamateriaali. Tässä vaiheessa on huolehdittava siitä, että kaikki materiaali on palanut kuoresta jättämättä jäämiä. Keraaminen vaippa kestää sulan metallin korkean lämpötilan kaatamisprosessin aikana, joka voidaan sitten jättää jäähtymään ennen kuin kuori muretaan. Alkuperäisen kuvion metalliset jäljennökset leikataan rakenteen rungosta ennen jälkikäsittelyä.

Vahamallivalulla valmistettujen osien suurin etu on, että osat voidaan valmistaa laajasta materiaalivalikoimasta, sovellukseen parhaiten sopivimmalla materiaalilla. Vaikka jauhemetalliset aineita lisäävät valmistusjärjestelmät voivat tulostaa metallisia osia suoraan, niin niiden metallien valikoima on paljon rajoitetumpi. Lisäksi tämä on lähestymistapa, joka voi johtaa metalliosiin ei-metallisesta aineita lisäävästä tekniikasta. Useat aineita

lisäävät prosessit kykenevät suoraan valmistamaan osia vahasta, esimerkiksi materiaalien pursotus. On kuitenkin mahdollista myös tehdä vahamallivalumuotoja muista materiaaleista, mukaan lukien polykarbonaatista ja ABS:sta, joita on saatavana monille ainetta lisääville koneille. Tärkeintä on varmistaa, että materiaali ei laajene nopeasti polttamisprosessin aikana ennen metallin valamista.



*Kuva 30. Vahamallivalun prosessikaavio. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 445)*

### 6.3 Muut tavat

Tässä luvussa esitellään muita tapoja, joita ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä voidaan käyttää tehostamaan tuotantoprosesseja. Vaikka ainetta lisäävien valmistusmenetelmien käyttöä suoraan digitaaliseen valmistukseen tarvitaan, on edelleen monia tuotteita, jotka vaativat massatuotantoa, ja tästä voimme nähdä, että ainetta lisäävät valmistusmenetelmät voivat silti antaa panoksensa. Vaikka ruiskuvalu ja vahamallivalu ovat luultavasti eniten käytettyjä sovelluksia, on olemassa lukuisia muita lähestymistapoja, joita on harkittu. Alla on muutama esimerkki siitä, kuinka ainetta lisäävillä valmistusmenetelmiä voidaan käyttää apuna valmistusongelmien ratkaisemisessa.

Tyhjiömuotoilua käytetään yleisesti pakkauksissa, joissa muoviosat on muodostettu liitteestä levystä. Tyypillinen esimerkki on kirkas läpipainopakkaus, jota käytetään yleisesti kulutustavaroiden näyttämiseen. Myös paperimassan muovaustekniikoiden käyttäminen

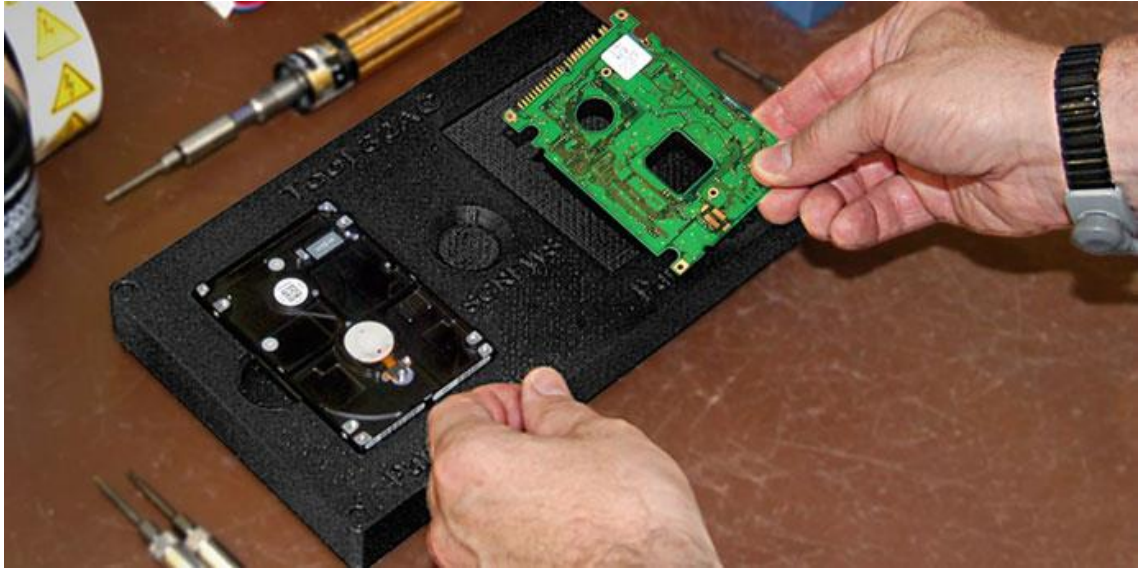
pakkausten luomiseen on tulossa melko suosituksi. Massa on valmistettu kierrätyspaperista ja siksi erittäin ympäristöystävällinen. Muotoiluprosessi on myös varsin kestävä, koska se ei vaadi paljon energiaa muotojen luomiseksi, koska ne luodaan ensisijaisesti puristamalla ylimääräinen vesi massasta. Jälleen, jos pakkaus on tarkoitettu pienimuotoiseen osien tuotantoon, ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä voidaan käyttää muovausvälineiden luomiseen. Työkalut voidaan luoda melko nopeasti käyttämällä hunajakennomaista sisärakennetta, jolla voidaan vähentää rakennusaikaa, painoa ja materiaalikustannuksia. Lisäksi ominaisuuksia voidaan sisällyttää ylimääräisen veden kanavoimien helpottamiseen. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 445-446)

Hiili- ja lasikuitukomposiitti on yhä suositumpi materiaali, jota käytetään korkean suorituskyvyn esineiden valmistukseen, jotka vaativat merkittävät lujuus-painosuhteet. Tämä on erityisen tärkeää ajoneuvoille, joissa painon aleneminen voi vähentää energiankulutusta sen liikuttamiseksi. Ainetta lisäävän menetelmän käyttö voi auttaa tässä prosessissa, etenkin kun kyseessä ovat monimutkaiset muodot. Hunajakennonmaisesta ytimen luominen ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä voi auttaa luomaan kevyitä rakenteita, joiden ympärille kuituvahvisteiset komposiitit voidaan kääriä. Vaihtoehtoisesti ainetta lisäävällä valmistusmenetelmällä tehdyt osat voivat toimia muotteina, joihin voidaan sijoittaa hiili- tai lasikuitulujitettuja polymeerejä (CFRP tai GFRP) joko esikyllästetyllä (esikövetetulla sidekerroksella) tai levittämällä hartsia myöhemmin. ainetta lisäävällä valmistusmenetelmällä tehdyt osat voidaan pitää komposiittiosan sisällä joissakin tapauksissa tai kuvio voidaan erottaa komposiitista hartsin kovetusvaiheen jälkeen. Se, että jotkut ainetta lisäävissä menetelmissä käytettävät materiaalit voidaan liuottaa pois, voisi olla hyödyllistä tässä vaiheessa. Kuva 31 esitetään osia, jotka on kehitetty korkean suorituskyvyn UAV: ien (miehittämättömien ilma-alusten) rakentamiseksi CFRP:tä käyttämällä. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 447)



**Kuva 31.** Materiaalin pursotusmenetelmällä tehdyt osat, joita käytetään muotteina hiilikomposiittien valmistamiseksi. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 447)

Suurin osa valmistetuista tuotteista on koottu jollakin tavalla useista komponenteista. Mikä tahansa tekniikka, joka voi yksinkertaistaa tai nopeuttaa kokoamisprosessia, voi olla erittäin hyödyllinen massatuottajalle. Jopa kokoonpanopohjaisessa valmistuksessa, jossa käytetään perinteisesti valmistettuja komponentteja, ainetta lisäävät valmistusmenetelmät voivat antaa jonkin verran etua. Jotkut kokoonpanoprosessit hyötyvät jigien käytöstä, jotka helpottavat tehtävien suorittamista pitämällä jotkut komponentit paikoillaan ja varmistamalla, että kaikki komponentit ovat läsnä, kuten Kuva 32 esitetyssä esimerkissä. Tämän lähestymistavan variaatio voidaan nähdä materialisaation tuottamassa metrologisessa kiinnitysjärjestelmässä sen varmistamiseksi, että itseliikkuvat ja vastaavat muotit pidetään paikoillaan metrologisen prosessin aikana laadunvarmistustarkoituksia varten.



**Kuva 32.** Kiintolevykokoonpanon asennus jigi. (Gibson, Rosen et al. 2015 s. 448)

Kuvan 32 tapaisia asennus jigejä on erittäin helppo ja halpa valmistaa ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä.

## 7. POHDINNAT

Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät, jotka myös tunnetaan nimellä 3D-tulostusmenetelmät tulevat yleistymään tulevaisuudessa teollisuudessa. Myös kuluttajien keskuudessa tietoisuus ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä tulee lisääntymään tulevaisuudessa. Kun itse tutustuin 3D-tulostukseen vuonna 2016 ei minulla tai tuntemilla henkilöillä juurikaan ollut mitään tietoa 3D-tulostamisesta. Nykyään ihmiset ovat tietoisempia 3D-tulostamisesta kuin vuonna 2016. Tosin suurin osa, joidenka kanssa olen jutellut 3D-tulostamisesta sekä työelämässä että vapaa-ajalla eivät tunnu tietävän juuri mitään 3D-tulostamisen kyvyistä ja sen luomista mahdollisuuksista. Osittain vuosien aikana käytyjen keskusteluiden aikana kypsyi ajatus 3D-tulostamiseen liittyvästä diplomityöstä. Seuraavaksi avaan omia näkemyksiä tässä työssä käsitellyistä asioista.

Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät ovat kehittyneet todella paljon viimeisen kymmenen vuoden aikana, joista viimeiset neljä vuotta olen itse vaihtelevalla intensiteetillä seurannut kehitystä. Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien tulostusalueet ovat kasvaneet merkittävästi ja tekniikoiden tarkkuus on parantunut. Tulostettavien materiaalien laajuus on kasvanut huomattavasti ja koko aika kehitellään uusia materiaaleja, jotka soveltuvat paremmin tulostettavaksi ja vastaamaan paremmin materiaaliominaisuuksiltaan sekä teollisuuden että kuluttajatuotteiden tarpeita. Erialaisia ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä on nykyään saatavilla myös todella helposti. Se millä perusteella itse valitsin tässä työssä esiteltävät ainetta lisäävät valmistusmenetelmät olivat niiden saatavuuden yleisyys ja niillä valmistettavien kappaleiden ominaisuudet. Tässä työssä esitellyistä ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä yleisesti saatavia ja tunnettuja menetelmiä on fotopolymeerointi, jauhepetimenetelmät ja materiaalin pursotus. Suorakerrostus ei ole niin yleisesti saatavilla kuin edellä mainitut mutta sillä on metallien tulostamiseen liittyviä erikoisominaisuuksia, joista yksi on vaurioituneiden metallisten osien korjaaminen. Standardissa ISO/ASTM52900-15 esitetyistä tekniikoista tässä työssä karsiutui materiaalien suihkutusta, sideaineen ruiskutus ja laminointi sillä perusteella, koska niiden yleinen saatavuus on heikko. Materiaalin ruiskutus ja sideaineen ruiskutus tulee kyllä tulevaisuudessa yleistymään, kun niiden tekniikka kehittää ja saatavuus paranee. Erityisesti näen materiaalin ruiskutuksen tulevan yleiseksi tuotekehitysprosessin alkuvaiheiden prototyyppien valmistamisessa. Perustan väitteeni siihen, että sillä saadaan luotua värikkäitä ja suhteellisen isoja kappaleita.

Tässä työssä esiteltyjen ainetta lisäävien tekniikoiden nykytilasta ja tulevaisuudesta voidaan sanoa muutama sana. Nykyään fotopolymeroimalla pystytään tekemään vain suhteellisen pieniä kappaleita ja niiden tulostaminen on jokseenkin hidasta mielestäni. Tämän takia ne soveltuvatkin nykyään lähinnä pienten kappaleiden tulostamiseen ja tuotekehitysprojekteissa alkupään prototyyppien valmistamiseen, kuten työssä aiemmin mainittuihin pienoismallien tekemiseen isommista laitekokonaisuuksista. Se mikä tulee olemaan fotopolymeroinnin tulevaisuus, riippuu siitä, kuinka hyvin CLIP-tekniikan kehitys etenee ja saadaanko markkinoille laitteita, joilla on suuri tulostuspinta-ala ja ne tulostavat nopeasti CLIP-tekniikalla. Toinen mikä vaikuttaa fotopolymeroinnin tulevaisuuteen on materiaalien kehittyminen. Minkälaisilla materiaaliominaisuuksilla varustettuja materiaaleja tulee saataville tulevaisuudessa. Onko näillä uusilla materiaaleilla esimerkiksi riittävän hyvät mekaaniset materiaaliominaisuudet, jotta niistä voitaisiin valmistaa kulutusta ja räsitusta kestäviä erittäin yksityiskohtaisia ja tarkkoja kappaleita tai integroitua kokoonpanoja.

Nykyään jauhepetimenetelmiä käytetään yleisesti metallisten kappaleiden tulostamiseen. Jauhepetimenetelmillä on kanssa vähän samanlainen tilanne kuin fotopolymeroinnilla. Jauhepetimenetelmiä hyödyntävien laitteiden tulostuspinta-alat ovat suhteellisen pieniä ja tulostusajat pitkiä. Tulevaisuudessa markkinoille tullaan saamaan laitteita, joiden tulostuspinta-ala tulee olemaan suurempi ja tulostusnopeus tulee väijäämättä kasvamaan. Tämä tulee luomaan aina suurempien optimoitujen kappaleiden tai integroitujen kokoonpanojen tulostamisen laajemmasta valikoimasta metallimateriaaleja. Tässä näen tulevaisuuden mahdollisuudet, jotka tulevat mullistamaan uusien tuotteiden kehittämisen ja valmistamisen.

Materiaalien pursottaminen on kaiketi kaikista tekniikoista kaikista yleisin ja tunnetuin menetelmä sekä teollisuudessa, että kuluttajien keskuudessa. Tällä hetkellä tämä tekniikka on jo todella hyödyllinen sekä tuotekehitysprojekteissa prototyyppien valmistamisessa ja itse kappaleiden valmistamisessa. Tällä tekniikalle on todella paljon erilaisia materiaaliaja saatavilla ja erityisesti komposiittimateriaalien yleistymisen ja halpeneminen luo erittäin kevyiden ja optimoitujen kappaleiden valmistamisen, jotka myös kestävät todella hyvin räsitusta ja kulutusta. Tälle tekniikalle on nyt jo saatavilla laitteita, joiden tulostuspinta-alat ovat suuria. Tulevaisuudessa laitteiden koko sekä tarkkuus tulee varmasti kasvamaan ja saatavien materiaalien laajuus tulee kasvamaan. Tämän tekniikan kohdalla näen, että tulevaisuudessa tämän tekniikan kohdalla tullaan käyttämään kolmiulotteisen tulostamisen todellista merkitystä eli selvemmin sanottuna kerros kerrokselta tulostus tulee muuttumaan siihen, että tulostuskärki liikkuu jokaisen koordinaattiakselin

suuntaisesti saman aikaisesti. Tämä luo parempia pinnanlaatuja esimerkiksi korkeussuunnassa kaareutuville pinnoille. Tätä tekniikka on jo nykyään integroitu useampi akselisiin robottivarsiin, mutta ne eivät ole kovin yleisiä. Tulevaisuudessa näiden lisääntyessä ja tekniikan parannuttua voidaan luoda todella monimutkaisia geometrioita optimoiduilla tulostussuunnilla.

Suorakerrostusta nykyään käytetään pienten kappaleiden tekemiseen ja metallisten kalliiden komponenttien vaurioiden korjaamiseen. Suorakerrostuksella on vielä nykyään heikko pinnanlaatu mutta uskon tämänkin parantuvan tulevaisuudessa. Pinnanlaadun parannutta tällä tekniikalla voidaan valmistaa suoraan monimutkaisia metallisia kappaleita, jotka eivät vaadi enää koneistusta.

Mitä tulee prototyyppeihin ja ainetta lisääviin valmistusmenetelmiin, niin prototyyppien valmistaminen tulee lisääntymään tulevaisuudessa huomattavasti. Tämä tulee johtumaan ainetta lisäävien valmistusmenetelmien yleistymisestä ja ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettujen komponenttien yleistymisestä. Se miten ainetta lisäävät valmistusmenetelmät tulevat vaikuttamaan teollisten tuotteiden kehitysprosessiin, niin näen että tuotekehitysproesseista tulee paljon iteratiivisempia mitä nykyiset tuotekehitysprosessit ovat. Tämä johtuu siitä, että ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä on halvempi ja nopeampi tuottaa yksittäisiä komponentteja.

Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien kyky tuottaa ainutlaatuisia ominaisuuksia verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin tulee muuttamaan tuotekehitystä merkittävästi. Kun tietoisuus ainutlaatuisista ominaisuuksista kasvaa suunnittelijoilla, niin tulee se vaikuttamaan siihen, että suunnittelijat suunnittelevat paljon innovatiivisempia tuotteita, joiden suorituskyky on paljon parempi kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettujen tuotteiden. Vielä kun ainetta lisäävien valmistusmenetelmien kyky tuottaa paremmin hierarkkista monimutkaisuutta avaa täysin uudenlaisten komponenttien tai integroitujen kokoonpanojen valmistamista. Nykyään jo pystytään hyödyntämään topologia optimointia aivan eri tavalla kuin ennen. Perinteisillä valmistusmenetelmillä ei pystytä tuottamaan optimoituja geometrioita komponenteissa kuin ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä. Myös tämän tietoisuuden lisääntyessä suunnittelijoilla, lisää se entisestään innovatiivisten tuotteiden suunnittelua ja valmistamista.

Tulevaisuudessa muottien ja työkalujen valmistaminen ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä tulee lisääntymään. Ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä tullaan tulevaisuudessa hyödyntämään muottien valmistamisessa entistä kokonaisvaltaisemmin. Valamalla valmistettavien tuotteiden prototyypit tullaan valmistamaan ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä ja itse valamiseen käytettävät muotit tullaan valmistamaan ainetta



lisäävillä valmistusmenetelmillä. Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien ansioista valmistusprosessista tulee paljon joustavampia, joka vaikuttaa siihen, että esimerkiksi ruis-kupuristettujen tuotteiden valmistusmäärät voivat olla alhaiset mutta silti kustannustehokkaita ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettujen inserttien ansiosta.

Mitä edellä esitettyjen näkemysten ja pohdintojen lisäksi tulee ainetta lisäävien valmistusmenetelmien tulevaisuuteen, niin ainetta lisäävät valmistusmenetelmät eivät tule suinkaan syrjäyttämään perinteisiä valmistusmenetelmiä. Esimerkkeinä voidaan antaa ohutlevyistä valmistetut suuret tuotteet ja suuret palkkirakennelmat. Tulevaisuudessa tarvitaan myös koneistettuja pintoja. Toinen tulevaisuuden asia tulee olemaan minkälaiseksi ainetta lisäävien valmistusmenetelmien markkinat tulevat muotoutumaan. Tällä tarkoitan, että kuka valmistaa näitä 3D-tulostettavia komponentteja. Muotoutuuko markkinat samanlaisiksi kuin perinteisten valmistusmenetelmien markkinat vai tuleeko yritykset satsaamaan enemmän laitehankintoihin ainetta lisäävien valmistusmenetelmien suhteen. Tulevaisuus tulee näyttämään osuiko pohdintani oikeiksi.

## 8. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli selvittää prototyyppien pikavalmistuksen vaikutusta tuotekehitysprosessiin ja projekteihin. Lisäksi tavoitteena oli kerätä tietoa itse prototyyppien pikavalmistamisesta ja pikavalmistamisessa hyödynnettävistä ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä. Tämän työn tiedonlähteenä toimi kirjallisuusselvitys. Kirjallisuusselvityksessä selvinneihin tietoihin yhdistettiin kirjoittajan omia näkemyksiä ja oivalluksia. Tämän työn avulla suunnittelijat saavat tietoa, miten ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä ja prototyyppien pikavalmistusta voidaan hyödyntää tuotekehityksessä.

Työ aloitettiin kirjallisuusselvityksellä ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä. Kirjallisuusselvityksen pohjalta työhön valikoitui neljä ainetta lisäävää valmistusmenetelmää sillä perustein, kuinka hyvin tekniikka on saatavilla ja onko sillä mahdollisia erikoiskykyjä toisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Työhön valikoidut tekniikat olivat fotopolymeerointi, jauhepetimenetelmät, materiaalinpursotus ja suorakerrostus.

Työssä selvitettiin valikoiduista tekniikoista niiden peruseräaatteet, saatavilla olevat materiaalit ja materiaalien ominaisuuksia, tekniikan tarkkuus ja mitä huomioitavaa tekniikassa on. Tekniikoiden perustietojen avulla suunnittelijat saavat paremman käsityksen mitä tulee huomioida, kun prototyyppijä tai valmiita tuotteita valmistetaan tietyllä ainetta lisäävällä valmistusmenetelmällä. Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien perustietojen selvityksen jälkeen vertailtiin niitä ainetta poistaviin valmistusmenetelmiin. Ainetta poistavia valmistusmenetelmiä tässä työssä edusti CNC-koneistus, joka on lähimpänä prototyyppien pikavalmistus menetelmiä.

Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien jälkeen työssä siirryttiin työn varsinaiseen osioon. Työssä prototyyppien pikavalmistus ja sen merkitystä tuotekehitysprosessiin ja projekteihin tutkittiin. Tässä työssä prototyyppien pikavalmistus lisättiin Ulrich ja Eppinger:n (2012) kirjassa esiteltyihin tuotekehitysprosesseihin ja perinteisiin prototyyppimenetelmiin. Tällä lisäyksellä tässä työssä pyrittiin lisäämään tietoisuutta, kuinka prototyyppien pikavalmistus vaikuttaa tuotekehitykseen. Tietoisuudella pyritään laajentamaan suunnittelijan näkökulmia prototyyppien pikavalmistuksen mahdollisuuksista tuotekehitysprojek-teissa.

Tässä työssä tuotiin esille, minkälaisia ainutlaatuisia ominaisuuksia ainetta lisäävillä menetelmillä on ja kuinka niitä voidaan hyödyntää uusien entistä innovatiivisten tuotteiden suunnittelussa. Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien ainutlaatuisista ominaisuuksista

käytiin lävitse monimutkaiset muodot, hierarkkinen monimutkaisuus, toiminnallinen monimutkaisuus, materiaalien monimuotoisuus, tuotteiden asiakasräätälöinti mahdollisuudet ja optimointimenetelmät. Näitä edellä mainittujen asioiden johdosta ja niitä yhdistelemällä voivat suunnittelijat luoda enemmän asiakasoptimoituja ja innovatiivisempia tuotteita.

Tässä työssä käytiin myös lävitse muottien ja työkalujen pikavalmistusta ja niiden merkitystä valamalla tuotettuihin tuotteisiin ja työkalujen nopeasti saatavuuden merkitystä uuden tuotteen tuotantoprosessin käynnistämiseen. Myös huomioitiin kuinka ainetta lisäävät menetelmät vaikuttavat muottien valmistamiseen.

Lopuksi tässä työssä kirjoittaja pohti työssä käytyjä asioita. Pohdinnoissa keskityttiin työssä käytyjen asioiden nykytilaan ja mitä mahdollisuuksia tulevaisuudessa tulee. Pohdinnoissa tuli ilmi mitä ainetta lisäävien valmistusmenetelmien tekniikoiden kehittyminen merkitsee ja kuinka se tulee vaikuttamaan uusien tuotteiden kehittämiseen. Pohdinnoissa mietittiin myös, kuinka ainetta lisäävien valmistusmenetelmien markkinat tulevat muotoitumaan tulevaisuudessa. Tuleeko markkinoista saman tapaiset kuin perinteisten valmistusmenetelmien vai muotoutuuko markkinat jotenkin toisin.

# LÄHTEET

- AHTILUOTO, M., ELLMAN, A.U. and COATANEA, E., 2019. Model for Evaluating Additive Manufacturing Feasibility in End-Use Production. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, **1**(1), pp. 799-808.
- CAMPBELL, I., BOURELL, D. and GIBSON, I., 2012. Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. *Rapid Prototyping Journal*, **18**(4), pp. 255-258.
- CHUNG WANG, C., LIN, T. and HU, S., 2007. Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the Gray relational analysis. *Rapid Prototyping Journal*, **13**(5), pp. 304-315.
- COUTTS, E.R., WODEHOUSE, A. and ROBERTSON, J., 2019. A Comparison of Contemporary Prototyping Methods. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, **1**(1), pp. 1313-1322.
- GAO, W., ZHANG, Y., RAMANUJAN, D., RAMANI, K., CHEN, Y., WILLIAMS, C.B., WANG, C.C.L., SHIN, Y.C., ZHANG, S. and ZAVATTIERI, P.D., 2015. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, **69**, pp. 65-89.
- GIBSON, I., ROSEN, D. and STUCKER, B., 2015. *Additive manufacturing technologies ; 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. 2nd ed edn. New York: Springer.
- HOLMSTRÖM, J., HOLWEG, M., KHAJAVI, S. and PARTANEN, J., 2016. The direct digital manufacturing (r)evolution: definition of a research agenda. *Operations Management Research; Advancing Practice through Theory*, **9**(1-2), pp. 1-10.
- LEE, J., AN, J. and CHUA, C.K., 2017. *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*.
- LIFTON, V., LIFTON, G. and SIMON, S., 2014. Options for additive rapid prototyping methods (3D printing) in MEMS technology. *Rapid Prototyping Journal*, **20**(5), pp. 403-412.
- LOPEZ, S.M. and WRIGHT, P.K., 2002. The role of rapid prototyping in the product development process: A case study on the ergonomic factors of handheld video games. *Rapid Prototyping Journal*, **8**(2), pp. 116-125.
- MACDONALD, E., SALAS, R., ESPALIN, D., PEREZ, M., AGUILERA, E., MUSE, D. and WICKER, R.B., 2014. 3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics. *IEEE Access*, **2**, pp. 234-242.
- NGO, T.D., KASHANI, A., IMBALZANO, G., NGUYEN, K.T.Q. and HUI, D., 2018. *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*.
- PRAKASH, K.S., NANCHARAIH, T. and RAO, V.V.S., 2018. Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview. *Materials Today: Proceedings*, **5**(2), pp. 3873-3882.
- RADSTOK, E., 1999. Rapid tooling. *Rapid Prototyping Journal*, **5**(4), pp. 164-169.
- SAHEBRAO INGOLE, D., MADHUSUDAN KUTHE, A., THAKARE, S.B. and TALANKAR, A.S., 2009. Rapid prototyping - a technology transfer approach for development of rapid tooling. *Rapid Prototyping Journal*, **15**(4), pp. 280-290.

THOMPSON, M.K., MORONI, G., VANEKER, T., FADEL, G., CAMPBELL, R.I., GIBSON, I., BERNARD, A., SCHULZ, J., GRAF, P., AHUJA, B. and MARTINA, F., 2016. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **65**(2), pp. 737-760.

TIAINEN, T., ELLMAN, A. and KAAPU, T., 2014. Virtual prototypes reveal more development ideas: comparison between customers' evaluation of virtual and physical prototypes. *Virtual and Physical Prototyping*, **9**(3), pp. 169-180.

TUMBLESTON, J.R., SHIRVANYANTS, D., ERMOSHKIN, N., JANUSZIEWICZ, R., JOHNSON, A.R., KELLY, D., CHEN, K., PINSCHMIDT, R., ROLLAND, J.P., ERMOSHKIN, A., SAMULSKI, E.T. and DESIMONE, J.M., 2015. Additive manufacturing. Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science (New York, N.Y.)*, **347**(6228), pp. 1349-1352.

TUTESKI, O., KOCOV, A., RIZOV, T. and TUTESKI, O., 2015. NEW PRODUCT DESIGN DEVELOPMENT BASED ON ADDITIVE MANUFACTURING & RAPID PROTOTYPING METHODOLOGY. *Journal for Technology of Plasticity*, **40**(2), pp. 55-64.

ULRICH, K.T. and EPPINGER, S.D., 2012. *Product design and development*. 5 edn. New York, NY: McGraw-Hill Irwin.

UMARAS, E. and TSUZUKI, M.S.G., 2017. *Additive Manufacturing - Considerations on Geometric Accuracy and Factors of Influence*.

UPCRAFT, S. and FLETCHER, R., 2003. The rapid prototyping technologies. *Assembly Automation*, **23**(4), pp. 318-330.

WIMPENNY, D.I., PANDEY, P.M. and KUMAR, L.J., 2017. *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. 1 edn. Singapore: Springer Singapore.

YAO, H., WANG, J. and MI, S., 2018. Photo Processing for Biomedical Hydrogels Design and Functionality: A Review. *Polymers; Polymers*, **10**(1),.

Dassault Systems 2020. 3D Printing – Additive. Viitattu 6.3.2020. Saatavilla: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing>

FACFOX 2020. Overview: How MJF 3D printing works? Viitattu 6.3.2020. Saatavilla: <https://facfox.com/service/mjf-3d-printing-service>

Additively 2020. Fused Deposition Modeling (FDM). Viitattu 17.1.2020. Saatavilla: <https://www.additively.com/en/learn-about/fused-deposition-modeling>

Sciaky 2020. Benefits of Wire vs. Powder Metal 3D Printing. Viitattu 6.3.2020. Saatavilla: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder>

TRUMPF 2020. Laser metal deposition (LMD). Viitattu 6.3.2020. Saatavilla: [https://www.trumpf.com/en\\_US/applications/additive-manufacturing/laser-metal-deposition-lmd/](https://www.trumpf.com/en_US/applications/additive-manufacturing/laser-metal-deposition-lmd/)

Etteplan 2020. Additive Manufacturing Design for Wärtsilä. Viitattu 6.3.2020. Saatavilla: <https://www.etteplan.com/references/additive-manufacturing-design-wartsila>

Etteplan 2020. Cost competitive 3D printed metal component. Viitattu 6.3.2020. Saatavilla: <https://www.etteplan.com/references/cost-competitive-3d-printed-metal-component>

3DStep 2020. Avant hydraulibloki - tuotteen yksinkertaistaminen. Viitattu 6.3.2020. Saatavilla: <https://www.3dstep.fi/hydraulibloki/>

Cheng, Jinxia. 2018. Product Design Process and Methods. 10.5772/intechopen.80821.

3ERP 2020. Additive Manufacturing - Industrial 3D Printing. Viitattu 7.3.2020. Saatavilla: <https://www.3erp.com/services/3d-printing/>

Additively 2020. Stereolithography (SL). Viitattu 17.1.2020. Saatavilla: <https://www.additively.com/en/learn-about/stereolithography>

Materialise 2020. Why choose Stereolithography? Viitattu 7.3.2020. Saatavilla: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/stereolithography>

Additively 2020. Laser Sintering (LS). Viitattu 17.1.2020. Saatavilla: <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-sintering>

Additively 2020. Laser Melting (LM). Viitattu 17.1.2020. Saatavilla: <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-melting>

Additively 2020. Electron Beam Melting (EBM). Viitattu 17.1.2020. Saatavilla: <https://www.additively.com/en/learn-about/electron-beam-melting>

Materialise 2020. Why choose FDM? Viitattu 7.3.2020. Saatavilla: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/fused-deposition-modeling>

3Diligent 2020. Directed Energy Deposition. Viitattu 7.3.2020. Saatavilla: <https://www.3diligent.com/3d-printing-service/directed-energy-deposition/>