

**Kartoitus materiaalia lisäävän
valmistuksen hyödyntämisestä
teollisuusyrityksen
työkalutuotannossa**

Pekka Matikainen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2019
Tekniikan ala
Insinööri (AMK), Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Matikainen, Pekka	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2019
	Sivumäärä 82	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: Kyllä
Työn nimi Kartoitus materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämisestä teollisuusyrityksen työkalutuotannossa		
Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikka		
Työn ohjaaja(t) Jaaranen, Kalevi & Jääskeläinen, Vesa		
Toimeksiantaja(t) RD Velho Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön aiheena oli kartoittaa materiaalia lisäävän valmistuksen hyödynnettävyyttä Valmet Technologies Oy:n Rautpohjan yksikön työkalutuotannossa. Tavoitteena oli löytää potentiaalisia käyttökohteita, joissa voitiin hyödyntää materiaalia lisäävää valmistusta (AM), sekä valita näiden työkalujen joukosta sopivat kohteet, joita kehittää sekä valmistaa AM menetelmien avulla. Tavoitteena oli myös opinnäytetyön avulla lisätä kaikkien osapuolien ymmärrystä materiaalia lisäävästä valmistuksesta sekä sen mahdollistamista hyödyistä.</p> <p>Käyttökohteiden kartoitus aloitettiin perehtymällä materiaalia lisäävään valmistukseen, sekä keräämällä aineistoa teoriataustaa varten. Riittävän taustatiedon keräämisen jälkeen järjestettiin Valmetin henkilökunnalle esityksiä materiaalia lisäävästä valmistuksesta. Esityksien tavoitteena oli lisätä Valmetin henkilökunnan ymmärrystä AM valmistuksesta, jotta esityksien jälkeen järjestettävissä ryhmähaastatteluisa pystyttiin ideoida sopivia käyttökohteita. Lisäksi käyttökohteita kartoitettiin havainnoimalla Valmetin tuotantoympäristössä.</p> <p>Kartoituksen aikana löytyneet käyttökohteet listattiin sekä arvioitiin käyttökohteiden arviointia varten luotujen arvosteluperusteiden mukaisesti. Parhaiten sijoittuneiden käyttökohteiden joukosta valittiin kaksi työkalua, jotka suunniteltiin uudelleen AM valmistettaviksi. Uudelleen suunnittelun tavoitteena oli todistaa AM hyödyt valmistusmenetelmänä.</p> <p>Tuloksena saatiin kaksi työkalua, joiden valmistus AM menetelmien avulla olisi tuottanut hyötyjä verrattuna perinteiseen valmistukseen. Lisäksi tuloksena saatiin lista potentiaalisista käyttökohteista sekä yleispätevä suunnitteluohjeistus sekä suunnitteluprosessin kuvaus AM valmistettavien kappaleiden suunnitteluun.</p>		
<p>Avainsanat (asiasanat)</p> <p>Materiaalia lisäävä valmistus, 3D-tulostus, AM, Työkalutuotanto, 3D-tulostus menetelmät, DFAM, Generatiivinen suunnittelu,</p>		
<p>Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)</p> <p>Opinnäytetyön liitteet 2, 3, 4, 5, 6, 7 ja 8 ovat salassa pidettäviä ja piilotettu julkisesta versiosta. Salassapidon perusteena on Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 17, mukainen yrityksen liike- tai ammattisalaisuus. Salassapitoaika viisi (5) vuotta.</p>		

Author(s) Matikainen, Pekka	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2019 Language of publication: Finnish
	Number of pages 82	Permission for web publication: Yes
Title of publication Survey on the Possibilities of Utilizing Additive manufacturing in Tooling at an Industrial Company		
Degree programme Mechanical engineering		
Supervisor(s) Jaaranen, Kalevi & Jääskeläinen, Vesa		
Assigned by RD Velho Oy		
Abstract <p>The topic was to survey the possibilities of utilizing additive manufacturing in tooling at Valmet Technologies Ltds Rautpohja. The goal was to find potential applications where the manufacturing by additive methods could be beneficial and choose different applications to develop and manufacture with additive manufacturing (AM). The goal was also to increase the understanding of AM and its possibilities for all involved parties.</p> <p>Surveying the applications started by studying additive manufacturing and creating the theoretical background. Based on the theoretical background, presentations for Valmet's personnel were held. The purpose for the presentations was to give a basic understanding of AM for all involved, so that group interviewing of applications could be possible. Applications were also surveyed by observing Valmet's production environment.</p> <p>The applications found were listed and evaluated by criteria created specifically for evaluating AM parts. Two different tools were chosen from the list of potentials and were redesigned for additive manufacturing. The purpose of the redesigning was to prove the benefits of AM as a manufacturing method.</p> <p>The result included two tools that benefitted from the manufacturing by AM compared to traditional manufacturing. Also, a list of potential applications was created and a general designing instruction and a design process description for designing AM parts was created.</p>		
Keywords/tags (subjects) Additive manufacturing, 3D-printing, Tooling, AM, 3D-printing technologies, DFAM, Generative design		
Miscellaneous (Confidential information) Appendices 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 and 8 are confidential and they have been removed from the public thesis. Grounds for secrecy: Publicity law 621/1999 24§, 17, Business or professional secret. The period of secrecy is five years and it ends 30.5.2024		

Sisältö

1	Johdanto	5
1.1	Toimeksiantaja	6
1.2	Aihe.....	7
1.3	Työn tavoite.....	7
1.4	Aiempia tutkimuksia.....	8
2	Tutkimusmenetelmät	9
2.1	Kehittämistutkimus	10
2.2	Aineistonkeruu	11
3	Materiaalia lisäävä valmistus	12
3.1	Esimerkkejä käyttökohteista teollisuudessa	13
3.2	Menetelmäluokat	14
3.2.1	Jauhepetisulatus.....	15
3.2.2	Pursotus.....	18
3.2.3	Sideaineen suihkutusp.....	20
3.2.4	Materiaalin suihkutusp.....	22
3.3	Jälkikäsittely.....	24
3.4	Kustannukset.....	25
3.5	Ympäristöystävällisyys.....	25
4	Suunnittelu materiaalia lisääville menetelmille	27
4.1	Kerroskorkeus.....	27
4.2	Muodonmuutokset	28
4.3	Tukimateriaalit	30
4.4	Pyöritykset	31
4.5	Metodiikka.....	31
4.6	Suunnittelun CAD työkalut	36
4.7	Työkalusuunnittelu	40
5	Käyttökohteiden kartoitus työkalutuotannosta.....	43
5.1	Haastattelut.....	43
5.2	Kohderyhmät.....	44

	2
5.3 Ideoiden arviointi	44
6 Kehitystutkimus	46
6.1 Telan mittalaite	46
6.1.1 Suunnitteluprosessi: Telan mittalaite.....	47
6.1.2 Prototyypin valmistus.....	51
6.2 Vetolaite	52
6.2.1 Suunnitteluprosessi: Vetolaite	53
6.2.2 Konsepti 1	53
6.2.3 Konsepti 2	57
7 Tulokset	59
7.1 Johtopäätökset	62
7.2 Jatkotutkimusaiheet	63
8 Pohdinta.....	64
Lähteet	67
Liitteet.....	71
Liite 1. Potentialisten käyttökohteiden arviointitaulukko (Salassa pidettävä) ...	71
Liite 2. Telan mittalaite (Salassa pidettävä)	73
Liite 3. Vaatimuslista: Telan mittalaite (mukaillen Pahl & Beitz, 1990, 68) (Salassa pidettävä).....	74
Liite 4. Generatiivisen suunnittelun raja-arvot (Salassa pidettävä).....	75
Liite 5. Mittalaitteen runko jalkojen kanssa (Salassa pidettävä)	76
Liite 6. Prototyyppi telan mittalaitteesta (Salassa pidettävä).....	77
Liite 7. Vaatimuslista: Vetolaite (mukaillen Pahl & Beitz, 1990, 68) (Salassa pidettävä).....	78
Liite 8. Vetolaite (Salassa pidettävä)	79

Kuviot

Kuvio 1. CoroMill® 390: 3D tulostettu jyrsin (Jyrsimen varsi ei ole 3D-tulostettu) (Design the unseen optimize performance. N.d.).....	13
Kuvio 2. Vanha sekä uusi mittatyökalu (Raukola 2019)	14
Kuvio 3. Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät	15
Kuvio 4. Jauhepetisulatusmenetelmällä tuotettuja kappaleita. (Getting the most out of metal 3D printing N.d.)	16
Kuvio 5. Jauhepetimenetelmän toimintaperiaate (SLM) (Marc 2017.)	17
Kuvio 6. Pursotusmenetelmän toimintaperiaate (FDM) (Fused Deposition Modeling N.d.).....	19
Kuvio 7. Kappale valmistumassa pursotusmenetelmällä (Redwood N.d.)	20
Kuvio 8. Sideaineen suihkutuksen menetelmän toimintaperiaate (Marc 2017.).....	21
Kuvio 9. Sideaineen suihkutuksen menetelmällä tuotettu kappale (Varotsis N.d.)	22
Kuvio 10. Materiaalin suihkutuksen menetelmän toimintaperiaate (Marc 2017.)	23
Kuvio 11. Materiaalin suihkutuksella tuotettuja prototyyppisiä (3D Printing. N.d.)....	24
Kuvio 12. Eri kerroskorkeuksia (Grames 2018)	28
Kuvio 13. AM metallitulosteen tukimateriaalit (Varotsis N.d.).....	30
Kuvio 14. DfAM Metodiikan vaiheet (Orquera, Campocasso & Millet 2017, 3.)	33
Kuvio 15. Jakoavaimelle suoritettu FEA (Finite Element Mesh Refinement 2016.)	37
Kuvio 16. Topologia optimointi prosessi (Gebisa & Lemu 2017.)	38
Kuvio 17. Generatiivisen suunnittelun avulla tuotettuja erilaisia iteraatioita (GM and Autodesk are using generative design for vehicles of future 2018.)	40
Kuvio 18. Mittalaitteen runko ilman jalvoja.....	49
Kuvio 19. Vetolaite: Konsepti 1	54
Kuvio 20. Konsepti 1 leikkauskuva	55
Kuvio 21 Konsepti 1 leuat lukittuna	55
Kuvio 22 Konsepti 1 Leukojen rakenne	56
Kuvio 23 Konsepti 2 Epäkeskeinen kappale	57
Kuvio 24 Konsepti 2 Terään kiinnittyminen	58

Taulukot

No table of figures entries found.

1 Johdanto

Ensimmäinen 3D tulostin on kehitetty jo vuonna 1987 amerikkalaisen Chuck Hull:in toimesta. Voidaan siis todeta, että kyseessä ei ole mikään uusi teknologia, mutta ala on kehittynyt huomattavasti viimeisten kymmenien vuosien aikana. Materiaalia lisäävä valmistus tuli kuluttajien tietoisuuteen hyvin nopeasti ja odotukset mahdollisuuksista valmistusmenetelmänä paisuivat melko mahdottomiksi. Vuonna 2013 materiaalia lisäävän valmistuksen alalla työskentelevien yritysten osakkeiden arvo nousi kaikkien aikojen huippulukemiin. Kuluttajien kiinnostus materiaalia lisäävää valmistusta kohtaan kuitenkin laski nopeasti, kun tulostuksen tekniset rajoitteet alkoivat tulla suurempaan tietoisuuteen. Kuitenkin suurimman hehkutuksen laskeuduttua, on materiaalia lisäävä valmistus edelleen, etenkin teollisuuden parissa, lisääntynyt jatkuvasti. Tänä päivänä materiaalia lisäävä valmistus onkin löytänyt oman paikkansa muiden valmistusmenetelmien joukossa. (Pizzirani 2015, 2-4.)

Kokonaismarkkinat materiaalia lisäävillä menetelmillä tuotetuilla työkaluilla olivat arviolta 1,2 miljardia dollaria vuonna 2012. Vaikka työkalujen valmistus perinteisillä menetelmillä on edelleen suositumpaa kuin tulostamalla, on materiaalia lisäävien valmistus teknologioiden kehittyminen laskenut tulostuksen hintaa, sekä avannut mahdollisuuksia uusille käyttökohteille. Kuitenkin suurin este materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien hyödyntämiselle on ymmärryksen puute sekä tottumus perinteisiin valmistusmenetelmiin. (Cotteleer, Neier & Crane 2014, 2-4.)

Työkalujen valmistuserät ovat yleensä melko pieniä, mutta geometriat voivat olla hyvinkin monimutkaisia. Tästä syystä materiaalia lisäävä valmistus on alkanut kiinnostaa työkalutuotannon valmistusmenetelmänä entistä enemmän teollisuudessa. Käyttökohteita materiaalia lisäävälle valmistukselle työkalutuotannossa on useita. Esimerkiksi hitsaus-, kokoonpano- sekä koneistusjigit, sekä lääketieteessä käytettävät räätälöidyt erikoistyökalut voidaan valmistaa materiaalia lisäävällä valmistuksella. Koska käyttökohteita on huomattavasti, on materiaalia lisäävä valmistus otettu käyttöön

työkalutuotannossa monilla eri aloilla, kuten auto- ja lentoteollisuus sekä lääketiede. (Cotteleer ym. 2014, 4-6.)

1.1 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii RD Velho Oy, mutta työn aihe tuli RD Velhon asiakkaalta Valmet Technologies Oy:ltä.

RD Velho on älykkään liiketoiminnan kehittäjä sekä tuotekehityksen ja ohjelmistokehityksen ammattilainen. RD Velho on täysin kotimaisessa omistuksessa oleva konsultointi- ja suunnittelutoimisto, joka on syntynyt fuusion pohjalta vuoden 2010 lopussa. Tällä hetkellä RD Velho työllistää yli 300 henkeä ja liikevaihtoa vuonna 2018 oli noin 20 miljoonaa euroa. RD Velho tekee yhteistyötä vuosittain yli 200 yrityksen kanssa ja on kasvanut kannattavasti jo yhdeksälle paikkakunnalle. RD Velhon tavoitteena on jatkaa vahvaa kasvua, sekä kehittyä asiakkaiden mielestä toimialan merkittävimmäksi toimijaksi ja tunnustetusti hyväksi työnantajaksi. (RD Velho yritysestrategia 2019.)

Valmet on maailman johtava teknologian, automaation ja palveluiden toimittaja ja kehittäjä sellu-, paperi- ja energiateollisuudelle. Liiketoiminta on jaettu neljään liiketoimintalinjaan, jotka ovat palvelut, sellu ja energia, paperit sekä automaatio. Valmetilla on yli 200 vuoden teollisuushistoria ja se työllistää noin 12 000 henkeä maailmanlaajuisesti yli 30 maassa. Liikevaihto kasvoi vuoden 2017 3,1 miljardista eurosta 3,3 miljardiin euroon vuonna 2018. (Vuosikatsaus 2018) Valmetin liiketoiminta edistää kestävästä kehityksestä ja visiona on tulla maailman parhaaksi asiakkaiden palvelussa. (Valmet lyhyesti 2019.)

1.2 Aihe

Valmetin palvelu- ja tuotetarjonta koostuu tuottavuuden tehostamispalveluista, tehtaiden uudistuksista sekä uusista kustannustehokkaista teknologioista ja ratkaisuista energian ja raaka-ainekäytön optimoimiseksi asiakkaiden lopputuotteiden arvon nostamiseksi. (Valmetin Strategia 2019.)

Valmet pyrkiikin kehittämään toimintaansa jatkuvasti ja pitämään kärkiasemansa maailman johtavana sellu-, paperi- ja energiateollisuuden teknologia- ja palvelutoimittajana. Materiaalia lisäävän valmistuksen mahdollisuudet tukea näitä tavoitteita on huomattu Valmetilla ja teknologian parissa on alettu jo toimimaan. Ensimmäinen muovi 3D tulostin on hankittu jo vuonna 2005 ja vuodesta 2016 asti on Valmet Sundsvallin yksikössä käytetty metallin tulostusta kaupallisessa tuotannossa. (Kuikka 2018.) Kuitenkin syvällisempää, tuoretta tietotaitoa, sekä uusia käyttökohteita pyritään lisäämään jatkuvasti.

Mahdollinen tarve opinnäytetyölle tunnistettiin jo syksyllä 2018, kun Jasperi Kuikan (2018) opinnäytetyö ”Survey on the Possibilities of Utilizing Metal Additive Manufacturing at an Industrial Company” nosti esille mahdollisuuden materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämisestä työkalutuotannossa. Kyseinen opinnäytetyö ei kuitenkaan tutkinut aihetta sen enempää, mutta potentiaali materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyistä työkalutuotannossa tunnistettiin.

1.3 Työn tavoite

Opinnäytetyön tavoitteena oli lisätä kaikkien osapuolien ymmärrystä ainetta lisäävistä menetelmistä. Tavoitteena oli myös tunnistaa mahdollisuudet, joita materiaalia lisäävä valmistus nykyteknologioilla tuo työkalutuotantoon sekä löytää työkaluja Valmet Rautpohjan työkalutuotannosta, joiden valmistus materiaalia lisäävällä valmis-

tuksella hyödytti yritystä. Hyötyjä pyrittiin saamaan työkalujen valmistuskustannuksissa, käytettävyydessä sekä turvallisuudessa. Tavoitteena oli myös jatkokehittää, sekä valmistaa materiaalia lisäävillä menetelmillä prototyypit joistain esiin nousseista työkaluista. Prototyyppien avulla pystyttiin vertailemaan valmistusmenetelmiä konkreettisesti toisiinsa ja näin ollen todistamaan materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyt verrattuna aikaisempiin valmistusmenetelmiin.

Tärkeimmät tutkimuskysymykset, joihin opinnäytetyössä haetaan vastausta ovat:

- Miksi käyttää materiaalia lisäävää valmistusta työkalutuotannossa?
- Mitkä ovat Valmet Technologies:n kannalta merkittävimmät kohteet, joissa materiaalia lisäävää valmistusta olisi perusteltua käyttää?
- Millainen suunnitteluprosessi materiaalia lisäävällä valmistuksella tuotetulla kappaleella on?

Opinnäytetyössä tullaan perehtymään erilaisiin materiaalia lisääviin menetelmiin, sekä tutkimaan materiaalia lisäävää valmistusta suunnittelun kannalta. Erilaisista menetelmistä pyrittiin poimimaan ne, jotka tukevat parhaiten nimenomaan työkalutuotantoa, joten teoriatausta rajattiin koskemaan kyseisiä menetelmiä. Sama koskee materiaalia lisäävän valmistuksen suunnittelua. Erilaisia sääntöjä, sekä huomioitavia asioita on hyvin paljon, joten näistä pyrittiin valitsemaan vain pääasiat, sekä työkalusuunnittelussa huomioitavat seikat. Näin opinnäytetyön teoriatausta saadaan kohdennettua paremmin aiheen ympärille.

1.4 Aiempia tutkimuksia

Aikaisempia tutkimuksia materiaalia lisäävien menetelmien hyödynnettävyydestä erilaisissa käyttökohteissa alkaa löytyä lisääntyvissä määrin, kun yritykset alkavat käyt-

tää valmistusmenetelmää entistä enemmän. Tämänkin opinnäytetyön aihe on syntynyt aikaisemman tutkimuksen pohjalta. Kuikan (2018) Valmet Technologies:lle tekemässä opinnäytetyössä tutkittiin erilaisia mahdollisuuksia, joita metallin 3D tulostus tuo valmistusmenetelmänä Valmet Rautpohjan toimintaan. Kuikan tutkimuksen tavoitteena ei kuitenkaan ollut tutkia 3D tulostuksen hyötyjä spesifisesti missään tuotannon osassa, vaan tavoitteena oli tutkia, olisiko oman metallin 3D tulostimen hankkimisesta hyötyä yritykselle. Tämän työn aihe keskittyy nimenomaan työkalutuotantoon ja sieltä löytyviin erilaisiin kehityskohteisiin. Samankaltaisia, aiemmin tehtyjä, materiaalia lisäävän valmistuksen hyödynnettävyyttä tutkivia opinnäytetöitä:

- Moilanen, Tuomas 2018: 3D-tulostuksen hyödyntäminen työvälinevalmistuksessa
- Ryky, Joni 2018: Ainetta lisäävä valmistus: 3D-tulostetut osat ajoneuvoissa
- Pihkamäki, Antti 2019: 3D-tulostuksen käyttö teollisuuden varaosien valmistuksessa

2 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyö eteni seuraten kehittämistutkimuksen vaiheita. Työn rakenne voidaan kuitenkin jakaa neljään eri pääosuuteen. Ensimmäinen osuus, eli teoriaosuus pitää sisällään opinnäytetyössä huomioitavien materiaalia lisäävien menetelmien perusteet, materiaalia lisäävän valmistuksen suunnittelun sekä työn tutkimusmenetelmät. Teoriaosuuden tarkoituksena on antaa selkeä kuva työn aiheesta, sekä työn toteutus-tavoista. Seuraava osuus oli sopivien kehittämiskohteiden tunnistaminen työkalutuotannosta, jonka jälkeen seurasi interventio eli muutoksen tekeminen ja lopulta tuloksien arviointi.

2.1 Kehittämistutkimus

Opinnäytetyö sisältää osia laadullisesta sekä määrällisestä tutkimuksesta ja työn avulla pyritään parannukseen. Työtä ei pystynyt rajaamaan pelkästään kvalitatiiviseen tai kvantitatiiviseen tutkimukseen, joten tutkimusotteeksi valikoitui kehittämiss tutkimus. Työssä syvennyttiin materiaalia lisäävään valmistukseen ja pyrittiin tunnistamaan sen mahdollistamat hyödyt työkalutuotannossa. Opinnäytetyö vaati kvalitatiivista tutkimusta, sillä työn kannalta oli tärkeää, että ymmärrys materiaalia lisäävästä valmistuksesta oli riittävällä tasolla. Kvantitatiivinen osuus työssä oli ideoiden kartoitus ja aineiston keruu. Ideoita kerättiin mahdollisimman paljon ja ideoita arvioitiin numeraalisesti taulukoinnin avulla. Opinnäytetyö piti sisällään myös itse kehitystyön, jonka aikana pyrittiin kehittämään valittuja työkaluja materiaalia lisäävän valmistuksen avulla.

Kehittämistutkimus on joukko eri tutkimusmenetelmiä, joita käytetään tilanteen ja kehittämiskohteen mukaan. Kehittämistutkimus on monimenetelmäinen tutkimusote, joka yhdistää kvalitatiiviset sekä kvantitatiiviset tutkimusmenetelmät. Kehittäminen vaatii tutkimuksellista otetta, ja taustalla on aina teoria tai teorian, joihin kehittämisessä nojataan. (Kananen 2012, 19.)

Kvalitatiivisen, eli laadullisen tutkimuksen avulla pyritään ilmiön syvälliseen ymmärtämiseen. Toisin kuin määrällinen tutkimus, laadullinen tutkimus ei perustu lukuihin, eikä tutkimuksessa pyritä määrällisen tutkimuksen mukaisiin yleistyksiin. Kvalitatiivisen tutkimuksen prosessi on syklinen, eikä sillä ole kvantitatiivisen tutkimuksen tavoin tarkkaa menetelmällistä viitekehystä tai ohjeistusta. Laadullinen tutkimus nähdään myös esitutkimuksen roolissa. (Kananen 2012, 29-30.)

Kvantitatiivinen, eli määrällinen tutkimus edellyttää, että ilmiön ymmärrys on olemassa. Määrällisen tutkimuksen takana on siis jossain vaiheessa tehty laadullinen tutkimus, jonka tuloksena teoria on syntynyt. Kvantitatiivisen tutkimuksen tulokset

ovat konkreettisia lukuja, joille voidaan tehdä matemaattisia ja tilastotieteellisiä las-
kuoperaatioita. (Kananen 2012, 31-32.)

Kehittämistutkimuksella poistetaan jokin ongelma, tai kehitetään jotain paremmaksi.
Tavoitteena on löytää parempia vaihtoehtoja, sekä testata ja todeta vaihtoehtojen
toimivuus. Tulokset voivat olla luonteeltaan myös sellaisia, että niitä voidaan hyödyn-
tää laajemminkin. (Kananen 2012, 43-44.)

2.2 Aineistonkeruu

Opinnäytetyön kirjoittaminen alkoi kirjallisuuteen perehtymisellä ja aineiston kerää-
misellä. Aineistoa pyrittiin hakemaan uusimmista lähteistä sekä julkaisuista, jotta ke-
rätty tieto olisi mahdollisimman tuoretta. Oikeiden lähteiden ja tiedon löytäminen
auttaa ymmärtämään aihetta sekä helpottaa opinnäytetyönprosessin seuraavia vai-
heita. Lähteet pyrittiin valitsemaan tieteellisistä julkaisuista ja tutkimuksista. Kuiten-
kin tieteellisten julkaisujen vähäisen saatavuuden vuoksi lähteinä käytettiin myös
alan ammattilaisten kirjoittamia artikkeleita.

Kanasen (2012 88-89) mukaan kirjallista ainestoa käytetään osoittamaan sitä, mihin
aihealueen tutkimus on edistynyt tiedemaailmassa. Aineistosta saadaan opinnäyte-
työhön hyväksi koettuja ja testattuja työkaluja kuten mittareita ja käsitteitä. Kehittä-
mistutkimukseen liittyviä aineistoja on usein saatavilla niukasti ja tutkija joutuu teke-
mään itse valintoja eri aineistojen kesken. Vaikka materiaalia lisäävästä valmistuk-
sesta löytyvä aineisto on lisääntynyt huomattavasti, on se kuitenkin paljon vähäisem-
pää kuin perinteisistä valmistusmenetelmistä. Myös monet tutkimukset, sekä tutki-
mustulokset ovat piilotettu ulkopuolisten saatavista, sillä kilpailuetu ainetta lisäävien
menetelmien parissa halutaan säilyttää yrityksien sisällä. Tästä syystä aineiston löytä-
minen oli välillä haastavaa, ja uusien kehitteillä olevien teknologioiden tiedoista täy-
tyi osata valikoida luotettavaa tietoa valmistajien omien mainospuheiden sijaan.

Materiaalia lisäävälle valmistukselle sopivien työkalujen löytäminen työkalutuotannosta tapahtui esityksien ja haastattelujen sekä havainnoinnin avulla. Myös erilaisia esimerkkitapauksia etsittiin teollisuudesta, joiden avulla pystyttiin saamaan lisää ideoita sekä uusia käyttökohteita. Tietoa ja ymmärrystä pyrittiin keräämään myös yritysjä ja messuvierailuilla sekä RD Velhon yhteistyöverkostoa hyödyntämällä.

3 Materiaalia lisäävä valmistus

”Menetelmä tuottaa kappaleita 3D-mallitiedoston pohjalta materiaaleja yhteen liittämällä, tyypillisesti kerros kerrokselta -periaatteella, vastakohtana materiaalia poistaviin ja materiaalia muovaaviin menetelmiin.” (ISO/ASTM 52900:2017, 6)

Kaikki 3D tulostimet perustuvat samaan toimintaperiaatteeseen, jossa digitaalinen malli kappaleesta muutetaan fyysiseksi kappaleeksi lisäämällä materiaalia kerroksittain. Tästä syystä valmistusmenetelmää kutsutaankin materiaalia lisääväksi valmistukseksi. Usein puhuttaessa materiaalia lisäävästä valmistuksesta, käytetään lyhennettä AM, joka tulee valmistusmenetelmän englanninkielisestä nimestä Additive Manufacturing. Päinvastoin kuin perinteisillä menetelmillä, AM kappale luodaan ainetta lisäämällä eikä sitä poistamalla. Materiaalia lisäävä valmistus on pääasiassa automatisoitu operaatio, eikä siinä tarvita työkaluja, kuten teriä tai leikkureita, sillä kappale rakentuu suoraan haluttuun muotoonsa. Tulostuksen jälkeen kappale voi kuitenkin vaatia vielä jälkikäsittelyä tarvittavien vaatimusten saavuttamiseksi. Prosessi alkaa aina 3D mallista, jonka tulostimen ohjelma siivuttaa kerroksiksi ja muuttaa tiedon konekieleksi. Näiden toimien jälkeen, prosessin seuraavat vaiheet riippuvat käytettävästä tulostimesta sekä materiaalista. (Redwood, Schöffner & Garret 2018, 6-15.)

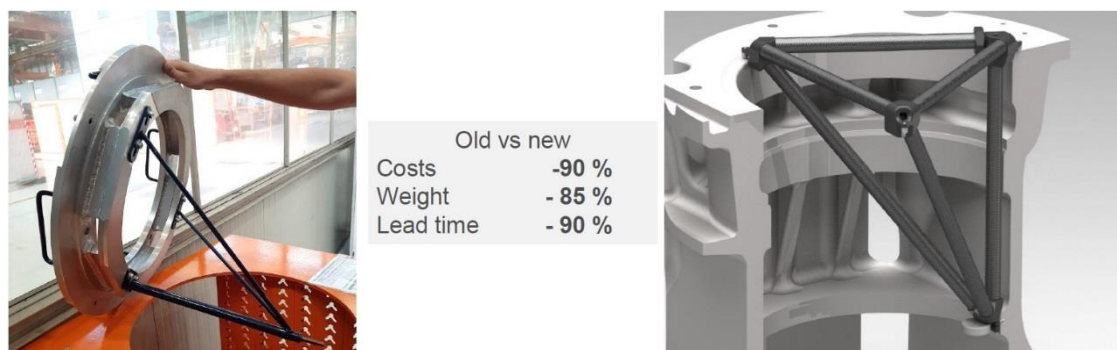
3.1 Esimerkkejä käyttökohteista teollisuudessa

Sandvik valmisti uudenlaisen jyrsimen (Kuvio1) materiaalia lisäävällä valmistuksella. CoroMill® 390 on teollisuus käyttöön tarkoitettu kulma- sekä tasojyrsin, jonka Sandvikin oma AM projektiryhmä päätti ottaa kehityskohteeksi. Jyrsimen massan vähentämiseksi jyrsimelle tehtiin sekä materiaalin, että topologian optimointia. Materiaaliksi valittiin titaani metalliseos, jota voitiin tulostaa hyödyntäen jauhepetisulatus menetelmää. Lopputuloksena jälkikäsittelyjen jälkeen jyrsimen terän runko-osan massaa saatiin pienennettyä yli 80 prosenttia ilman, että sen jäykkyys halutuissa suunnissa kärsii. Kevyempi jyrsin vähentää tärinää, joten jyrsintä on huomattavasti sulavampaa. Tästä syystä jyrsinnan tehokkuus kasvoi jopa 200 prosenttia. (Design the unseen optimize performance. N.d.)



Kuvio 1. CoroMill® 390: 3D tulostettu jyrsin (Jyrsimen varsi ei ole 3D-tulostettu) (Design the unseen optimize performance. N.d.)

Wärtsilä suunnitteli mittatyökalun uudelleen valmistettavaksi materiaalia lisäävällä valmistuksella. Työkalun tehtävänä oli mitata mittakellon avulla laivamoottorin sylinterin kohtisuoruutta sylinterilohkossa. Työkalu oli valmistettu metallista ja sen valmistusaika oli yhdestä kahteen kuukauteen. Koska työkalun valmistusmateriaali oli metalli, oli se hyvin painava ja epäkäytännöllinen. Tarkkojen koneistuksien ja useiden valmistusvaiheiden vuoksi oli työkalu myös kallis, lopullinen hinta oli noin 10 000 euroa. Kun työkalu suunniteltiin uudelleen valmistettavaksi AM menetelmillä, saatiin massaa vähennettyä 85%, valmistusaika lyhennettyä kuukausista muutamaan päivään ja valmistuksen lopullinen hinta pudotettua 1000 euroon. Tämä voitiin mahdollistaa suunnittelemalla työkalu niin, että pelkästään sylinterin kanssa kontaktissa olevat osat tulostettiin ja yhdistettiin hiilikuituputkien avulla. Alkuperäinen sekä uusi mittatyökalu näkyvät kuviossa 2. (Raukola 2019.)



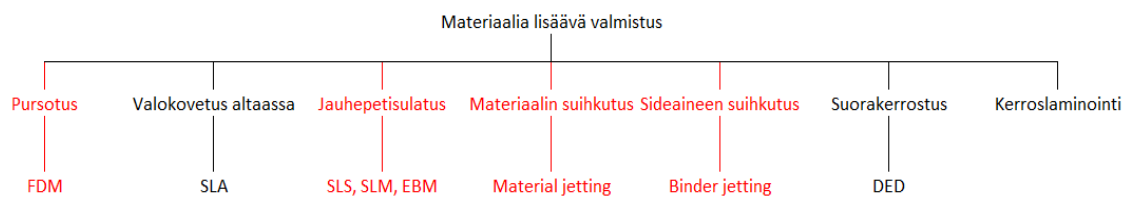
Kuvio 2. Vanha sekä uusi mittatyökalu (Raukola 2019)

3.2 Menetelmäluokat

Menetelmäluokkia on useita (Kuvio 3), ja tulostusmateriaalit voivat vaihdella eri muoveista metalleihin. Erilaisilla tulostusmenetelmillä on omat hyötynsä, mutta myös rajoitteensa. Sopivin menetelmä valitaan tarvittavien vaatimuksien pohjalta. Vaatimuksina voi olla esimerkiksi kappaleen geometria, mittatarkkuus, materiaali, pinnanlaatu tai jokin muu vaatimus useista eri vaihtoehdoista. Tämä työ on rajattu

työkalutuotannon kehittämiseen materiaalia lisäävän valmistuksen avulla, joten eri menetelmistä on valittu tätä kyseistä tavoitetta parhaiten tukevat vaihtoehdot, joiden avulla myös prototyypit valmistettiin. Kuviossa 3 näkyy eri menetelmät ja kuinka ne haarautuvat eri tulostusteknologioihin. Kuviossa on värjättyinä punaisella menetelmät, jotka työssä käydään läpi.

Menetelmistä on jätetty pois valokovetus altaassa, suorakerrostus sekä kerros laminointi. Valokovetus altaassa toimii vain fotopolymeerien, eli valon vaikutuksesta kovettuvien materiaalien kanssa, ja kerros laminoinnissa yleensä käytettävä materiaali on tällä hetkellä paperi. Suorakerrostus on yleisesti ottaen käytössä suurempien kappaleiden valmistuksessa, kuin tässä opinnäytetyössä käsiteltävät kohteet.



Kuvio 3. Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät

3.2.1 Jauhepetisulatus

”Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa lämpöenergia sulattaa jauhepeidin kohdennettuja alueita.” (ISO/ASTM 52900:2017, 7)

Jauhepetisulatus, tuottaa kiinteän kappaleen hyödyntämällä lämpöenergiaa (Kuvio 4). Lämmön avulla muovi- tai metallijauheen partikkelit fuusioituvat yhteen joko

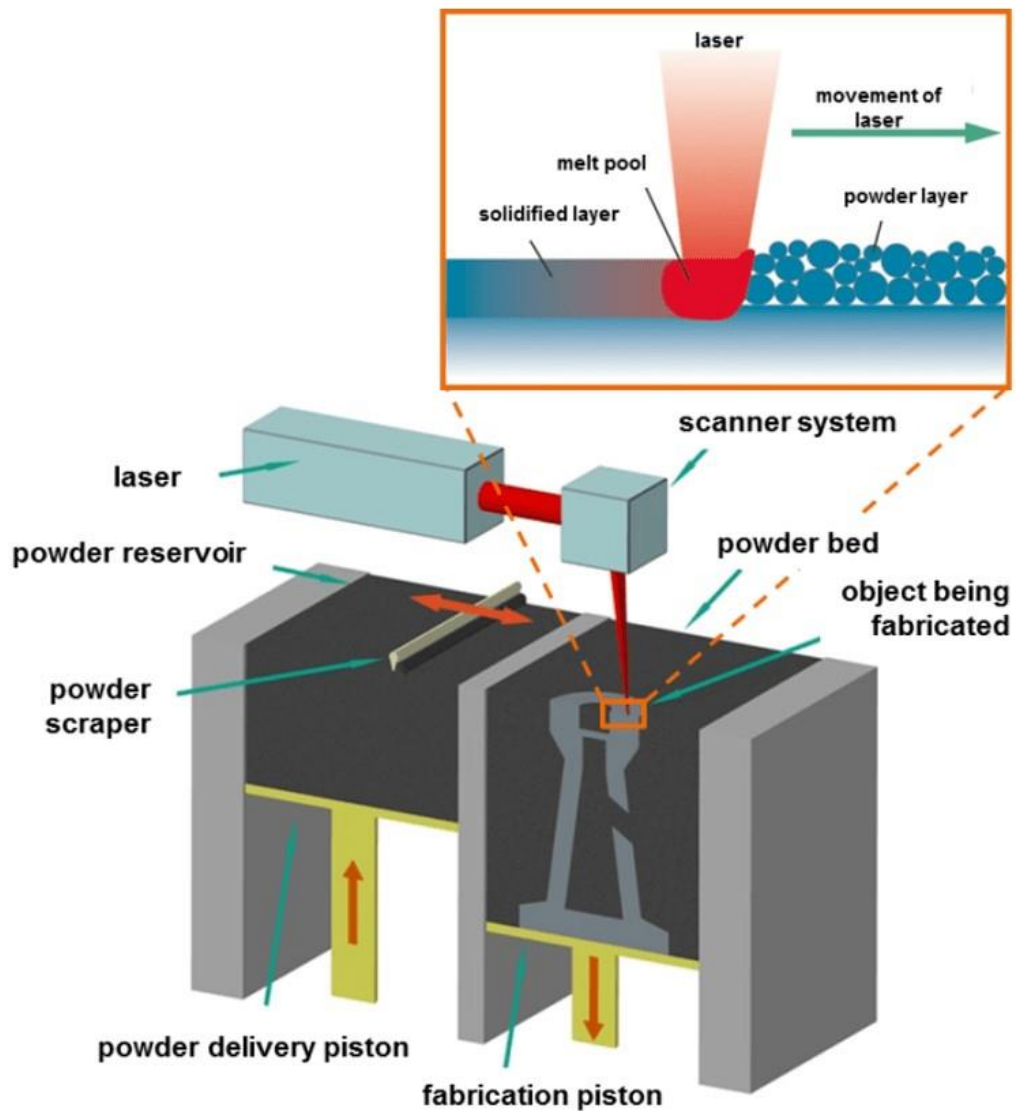
sintrautumalla tai sulamalla. Jauhepetisulatus menetelmässä tulostin levittää jauheen ohuina kerroksina päällekkäin, jolloin valmis kappale on upottautuneena jauheeseen viimeisten kerroksien valmistuttua. Suurimmat eroavaisuudet jauhepetisulatus teknologioiden välillä ovat eri energialähteet, kuten laser- tai elektronisäde, sekä käytettävät jauhemateriaalit. (Redwood N.d.)



Kuvio 4. Jauhepetisulatusmenetelmällä tuotettuja kappaleita. (Getting the most out of metal 3D printing N.d.)

Jauhepetisulatuksessa tulostin levittää ensimmäiseksi tasaisen, ohuen kerroksen jauhetta valmistusalustan päälle. Jauhekerros käydään selektiivisesti läpi joko laser- tai elektronisädeellä, joka tuottaa tarvittavan määrän lämpöä jauheeseen, että jauheen partikkelit joko sintrautuvat tai sulavat yhteen, sekä alempiin kerroksiin. Tämän jälkeen valmistusalusta laskeutuu ja jauhepeti nousee seuraavaa kerrosta varten, jotta tulostin voi syöttää uuden jauhekerroksen (Kuvio 5). Tämä prosessi toistuu niin kauan, että valmis kappale on saatu tuotettua. Jauhepetisulatuksen eri teknologioista kolme yleisintä ovat Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM) ja Electron Beam Melting (EBM). (Sibernagel 2018.)

Jauhepetisulatus on yleisin tulostusprosessi metalleille, mutta menetelmää käytetään myös hyvin yleisesti muovin tulostuksessa. Muovimateriaaleja käytettäessä tukimateriaaleja ei yleisesti tarvita, sillä jauhepeti toimii tukimateriaalina tulosteelle. Kuitenkin metallin tulostuksessa, jossa metallijauhe saavuttaa sulamispisteensä, vaaditaan tukimateriaalia kompensoimaan materiaalin muodostuvia sisäisiä jännityksiä. (Redwood N.d.)



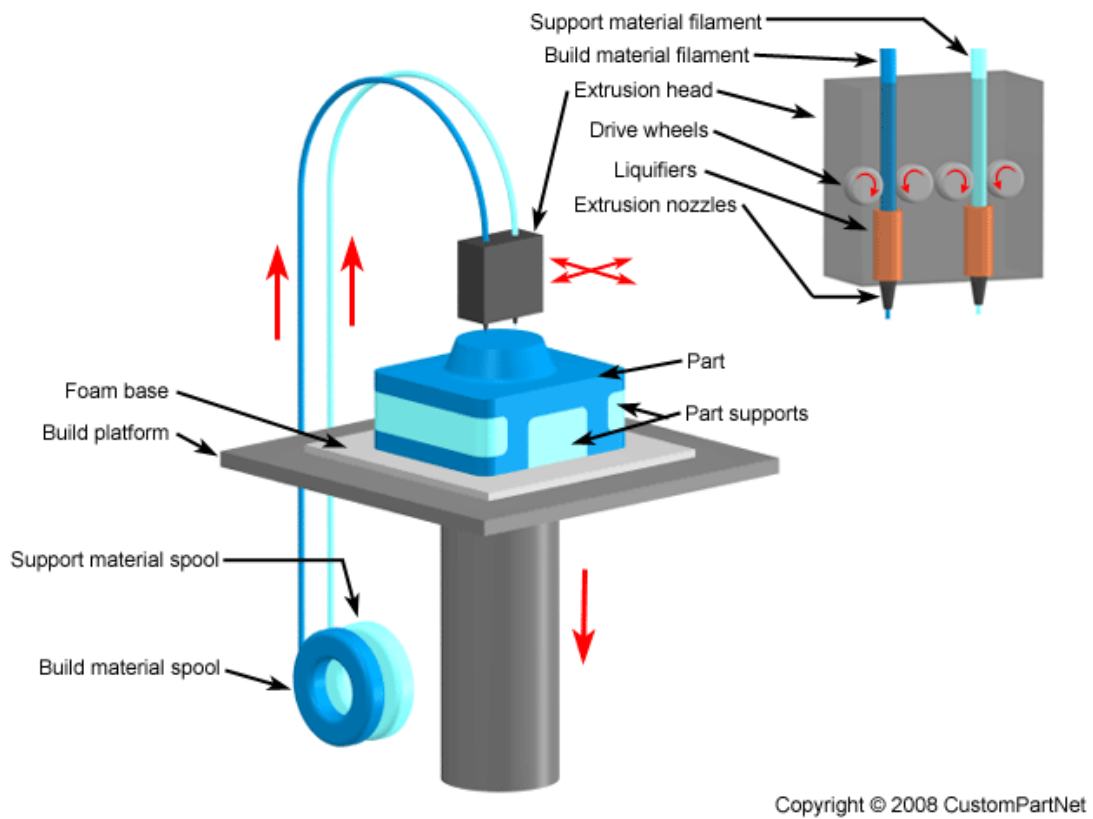
Kuvio 5. Jauhepetimenetelmän toimintaperiaate (SLM) (Marc 2017.)

3.2.2 Pursotus

”Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa materiaali annostellaan kohdennetusti suuttimen tai reiän läpi.” (ISO/ASTM 52900:2017, 7)

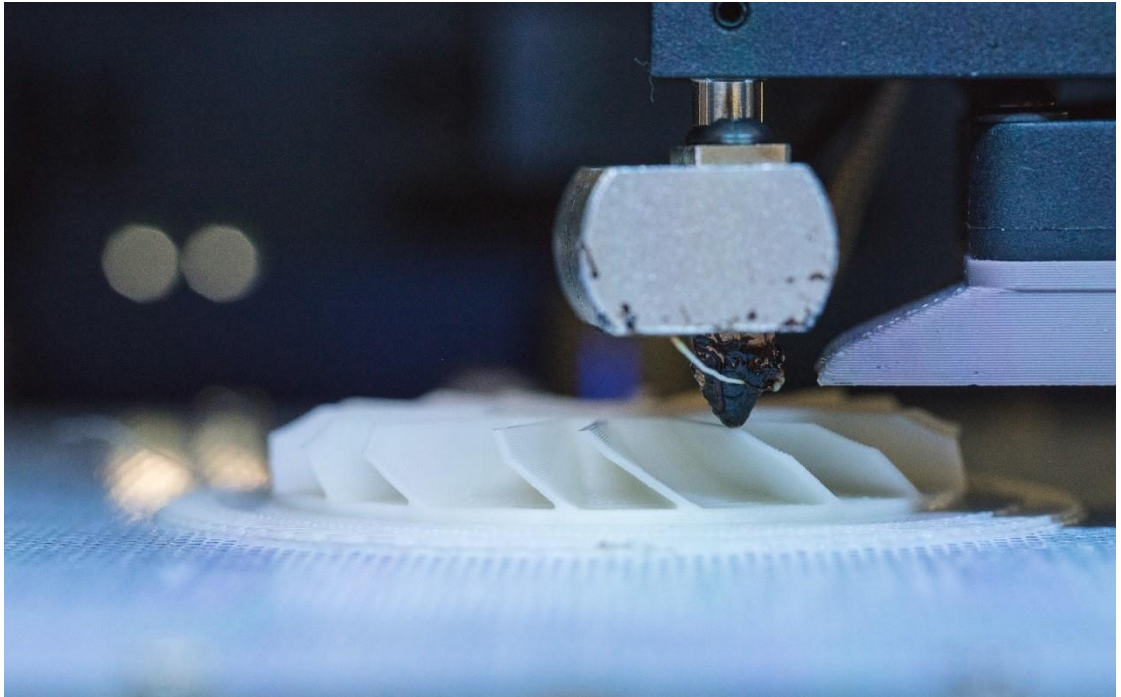
Pursotus, on menetelmä, jossa materiaalia pursotetaan lämmitetyn suuttimen läpi alustalle (Kuvio 6). Materiaalin tulee olla osittain kiinteässä muodossa pursottaessa ja sen tulee kiinteytyessään muotoonsa kiinnittyä myös aiempaan kerrokseen. Pursotettu materiaali voi olla myös tahnamainen, joka kovetetaan kemiallisen reaktion avulla, esimerkiksi kovetin- tai liuotinaineen kanssa.

Tulostusprosessissa tulostin piirtää jokaisen kerroksen yksitellen tulostusohjelman tekemien komentojen mukaisesti. Tulostettava kappale tarvitsee tukimateriaalia, jos kappaleessa on suuria tyhjän päällä olevia rakenteita. Tukimateriaalin avulla kappaleen materiaali saadaan kiinteytymään haluttuun muotoon, ilman kappaleen rakenteen kärsimistä. Tulostusohjelma generoi tukimateriaaleja automaattisesti, mutta tukimateriaalin voi lisätä kappaleeseen myös jo suunnitteluvaiheessa. Joissakin tulostimissa on kaksi suutinta, jolloin on mahdollista tulostaa kahta eri materiaalia. Tämä mahdollistaa tukimateriaalin tulostamisen esimerkiksi vesiliukoisesta materiaalista. (Materiaalin pursotus N.d.)



Kuvio 6. Pursotusmenetelmän toimintaperiaate (FDM) (Fused Deposition Modeling N.d.)

Yleisin materiaalin pursotusmenetelmän teknologia on Fused Deposition Modeling, yleisemmin tunnettu nimellä FDM, joka on kaikista tulostusteknologioista tällä hetkellä käytetyin. (Redwood. N.d.) Alla olevassa kuviossa 7 näkyy FDM teknologialla valmistuva kappale. Yleisesti materiaalin pursotusta on käytetty muovien ja polymeerien tulostuksessa, mutta nykypäivänä materiaalivaihtoehtoja on useita, kuten metalleja sekä erilaisia keraameja.



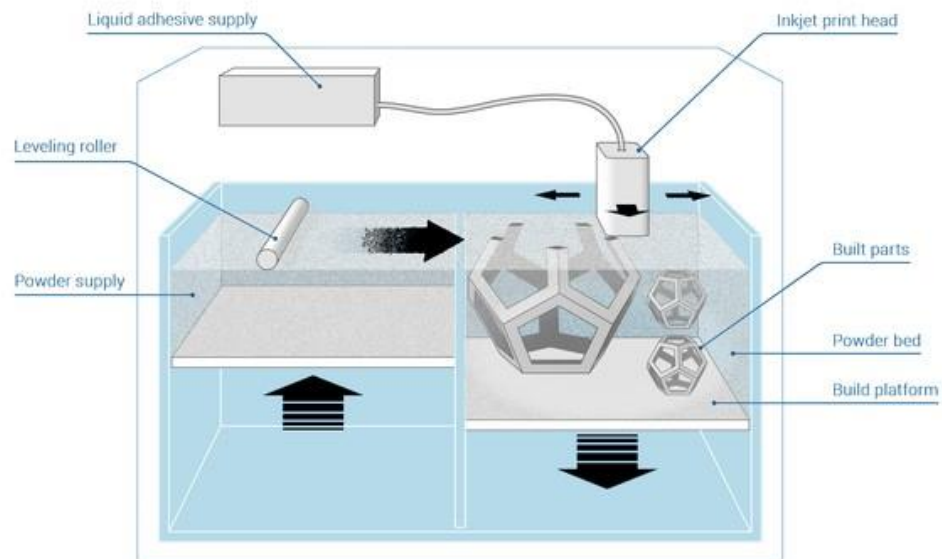
Kuvio 7. Kappale valmistumassa pursotusmenetelmällä (Redwood N.d.)

3.2.3 Sideaineen suihkutetus

”Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa nestemäinen sideaine kohdistetaan valittuihin kohtiin jauheen liittämiseksi.” (ISO/ASTM 52900:2017, 7)

Sideaineen suihkutetus on prosessi, jossa tulostin syöttää nestemäistä sideainetta haluttuihin kohtiin jauhepedillä. Materiaali sitoutuu sideaineen avulla ja alkaa muodostaa kiinteää kappaletta kerroksittain. Valmistusalusta laskeutuu ja mekaaninen levittäjä syöttää uuden jauhekerroksen. Jauhekerroksen levittämisen jälkeen syötetään uusi kerros sideainetta haluttuihin kohtiin jauheen päälle. Prosessi toistuu, kunnes valmis kappale on muodostunut jauheen sekaan (Kuvio 8).

Sideaineen suihkutus menetelmällä voidaan tulostaa useita eri materiaaleja, kuten muoveja, metalleja, hiekkaa sekä keramiikkaa. Materiaalista riippuen, tulosteet vaativat jälkikäsittelyä sideaineen kovetuksen, materiaalipartikkeleiden sintrauksen tai joskus toisen materiaalin imeytyksen kappaleeseen. Kuitenkin esimerkiksi hiekka on valmis käytettäväksi heti tulostuksen jälkeen.



Kuvio 8. Sideaineen suihkutus menetelmän toimintaperiaate (Marc 2017.)

Sideaineen suihkutus menetelmä ei vaadi tukimateriaaleja, sillä jauhepeti toimii tukena kappaleelle. Myöskään sisäisiä jänniteitä ei muodostu kappaleeseen, sillä menetelmä ei vaadi lämpöä tulostuksen aikana. Samasta syystä materiaalien mekaaniset ominaisuudet eivät yllä samalle tasolle kuin esimerkiksi jauhepetisulatuksessa, jossa materiaalin partikkelit sulavat yhteen. (What is Binder Jetting N.d.)

Alla olevassa kuviossa 9, näkyy sideaineen suihkutus menetelmällä ruostumattomasta teräksestä valmistettu kappale, johon on sideaineen poiston jälkeen imeytetty pronssia.



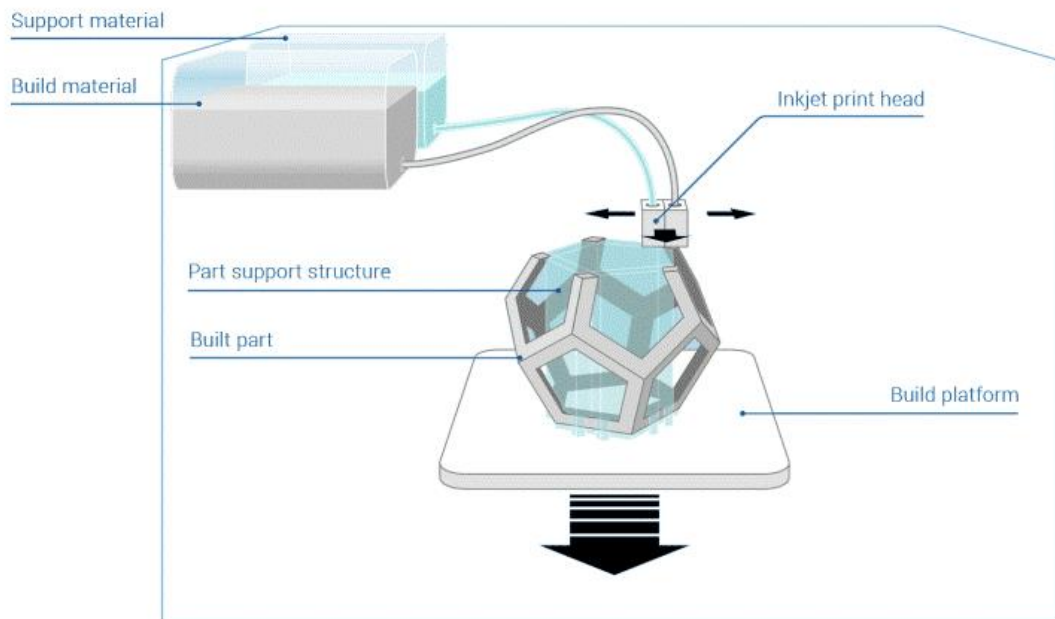
Kuvio 9. Sideaineen suihkutus menetelmällä tuotettu kappale (Varotsis N.d.)

3.2.4 Materiaalin suihkutus

”Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa raaka-ainepisarat kovetetaan kohdennetusti.” (ISO/ASTM 52900:2017, 7)

Materiaalin suihkutus on materiaalia lisäävä prosessi, jossa tulostuspää syöttää kerroksittain valoherkkää materiaalia, joka kovetetaan ultravioletin valon avulla (Kuvio 10). Materiaalit, joita käytetään materiaalin suihkutuksessa ovat siis yleisesti neste-mäisessä muodossa olevia akryylejä. Materiaalin suihkutus luo hyvin mittatarkkoja, sekä hyvän pinnanlaadun omaavia kappaleita. Tulostuksessa voidaan käyttää useita eri materiaaleja samaan aikaan ja materiaali vaihtoehtojen valikoima on laaja.

Useiden eri materiaalien käyttäminen samanaikaisesti mahdollistaa kappaleelle uusia ominaisuuksia, esimerkiksi kovamuovinen työkalu, jossa kädenosa on kumia vastaavaa materiaalia, voidaan helposti tulostaa materiaali suihkutuksen avulla. Tukimateriaaleja materiaalin suihkutuksessa tarvitaan aina, mutta tukimateriaalit voivat olla liukenevaa materiaalia, joka voidaan poistaa kappaleesta esimerkiksi veden avulla. Tästä syystä pinnanlaatu pysyy hyvänä, eikä tukimateriaalista jää suuria jälkiä kappaleeseen.



Kuvio 10. Materiaalin suihkutuksen toimintaperiaate (Marc 2017.)

Materiaalin suihkutuksen teknologia sopii hyvin visuaalisiin prototyyppisiin (Kuvio 11) sekä työkalujen valmistukseen. On kuitenkin huomioitava, että materiaalin suihkutuksen menetelmällä luodut kappaleet ovat melko hauraita, ja mekaaniset ominaisuudet heikkenevät ajan myötä valoherkkyyden vuoksi. (A Comprehensive Guide to Material Jetting 3D Printing. 2018.)



Kuvio 11. Materiaalin suihkutuksella tuotettuja prototyyppejä (3D Printing. N.d.)

3.3 Jälkikäsittely

Useassa tapauksessa materiaalia lisäävällä valmistuksella tuotettu kappale ei ole pinnanlaadultaan vielä riittävän hyvällä tasolla suoraan tulostuksen jälkeen. Tulostusmenetelmä määrää pitkälti tarpeellisen jälkikäsittelyn määrän. Muovimateriaaleja tulostettaessa voidaan päästä melko hyviin tarkkuuksiin sekä pinnanlaatuihin, joten kappale ei välttämättä vaadi paljoa jälkikäsittelyä. Yleisesti kappaleesta on kuitenkin poistettava tukimateriaalit sekä jauhepetisulatuksessa kappale on puhdistettava jauheesta.

Metallitulostus vaatii aina vähintään alustasta irrottamisen sekä useasti tukimateriaalin poistoa. Yleensä voidaan ajatella, että toiminnan kannalta tärkeät pinnat tulee koneistaa vielä tulostuksen jälkeen tarpeellisen tarkkuuden, tai pinnanlaadun saavuttamiseksi. Lämpötilan vaihtelut aiheuttavat myös sisäisiä jännityksiä, joita voidaan poistaa lämpökäsittelyjen avulla.

3.4 Kustannukset

Kustannukset muodostuvat materiaalia lisäävälle valmistukselle eri tavoin kuin perinteisille valmistusmenetelmille. Tarkan hinnan määrittäminen on kuitenkin hankalaa, sillä AM valmistuksen hinta on melkein aina tapauskohtainen ja kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä on useita. Materiaalia lisäävään valmistukseen erikoistunut yritys 3D Formtech (2018) kertoo artikkelissaan, että verrattaessa materiaalia lisäävää valmistusta perinteisiin valmistusmenetelmiin, AM:n edullisuus korostuu erityisesti yksittäisten kappaleiden valmistuksessa, sillä tulostusvalmiin 3D-mallin suunnittelu ja toteuttaminen on huomattavasti halvempaa ja nopeampaa kuin esimerkiksi muotin valmistaminen perinteisiä valmistusmenetelmiä varten.

Yleensä materiaalia lisäävällä valmistuksella tuotetun kappaleen hinta arvioidaan kappaleen materiaalilavuuden mukaan. Kustannuksiin vaikuttaa kuitenkin moni muukin seikka kuin pelkästään käytetyn tulostusmateriaalin määrä. Esimerkiksi jauhepetisulatuksessa käytettävät tulostimet ovat hyvin kalliita, joten ne nostavat tulostuksen tuntihintaa. Tulostaminen vaati aina myös jotain manuaalista työtä, jonka määrä riippuu etenkin kappaleen jälkikäsittelyyn käytetystä ajasta. Tulostuksen lopulliseen hintaan vaikuttaa edellä mainittujen asioiden lisäksi myös konetilavuus, joka tarkoittaa tulostimen koko tulostustilavuuden hyödyntämistä yhden tulostuksen aikana. Optimoimalla konetilavuus voidaan useita kappaleita tulostaa kerralla, jolloin tuntihintaa kappaletta kohti saadaan vähennettyä. Konetilavuuden tehokkaalla hyödyntämisellä myös pienet sarjatuotannot voivat olla kustannustehokkaita. (Klahn, Meboldt & Stark. 2018; Mistä 3D-tulostuksen hinta koostuu 2018.)

3.5 Ympäristöystävällisyys

Ympäristöystävällisyys ja kestävä kehitys ovat nostaneet asemaansa entistä enemmän viimeisten vuosien aikana ja monet teollisuuden toimijat ovat alkaneet kiinnittää huomiota oman tuotantonsa kehittämiseen ekologisempaan suuntaan. Myös

opinnäytetyön aiheen antajan, Valmetin, liiketoimintastrategiaan kuuluu vahvasti kestävä kehitys. Vuosiraportissaan (2018) Valmet kertoo, että keskeisiin teemoihin kestävä kehityksen parissa vuosille 2019-2021 kuuluu tutkia mahdollisuuksia valmistaa kestävä kehityksen mukaisia kulutusosia ja varaosia. Keskeisiä saavutuksia Valmetilla vuonna 2018 oli tukea kestävä kehityksen toteuttamista tutkimus- ja kehitystyössä. (Vuosikatsaus 2018, 27-29.)

”Kotimaasta peräisin olevien päästöjen vähentäminen tai edes nykyisen tason säilyttäminen vaatii uusia toimia tulevaisuudessa.” (Hoffren 2006.)

Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa kappaleen tuottamisen niin, että materiaalia käytetään vain kappaleen tilavuuden verran. On kuitenkin huomioitava, että vaikka jauhetta käytetään vain materiaalin tilavuuden verran, kärsii tulostettavan kappaleen läheisyydessä oleva jauhe prosessin aikana niin paljon, että sen uudelleenkäyttäminen ei ole mahdollista. Myöskin tukimateriaalit ovat hukkamateriaalia, jota syntyy etenkin metallitulostuksessa jokaisen tulostuksen aikana. Kuitenkin materiaalia lisäävä valmistus vähentää yleensä hukkamateriaalin määrää verrattuna perinteisiin materiaalia poistaviin menetelmiin. AM:n kustannustehokkuus ja ympäristöystävällisyys kulkee käsi kädessä, sillä kuten kustannukset kappaleessa kerrottiin, määrittelee kappaleen tilavuus ison osan kappaleen hinnasta. Tästä syystä tulosteiden materiaali optimoidaan niin, että ylimääräistä materiaalia tai hukkamateriaalia tulisi mahdollisimman vähän. (Huckstepp 2019.)

Ympäristöön vaikuttavia tekijöitä materiaalia lisääväälle valmistuksella on myös energiankulutus, joka etenkin laser käyttöisillä tulostimilla on melko suurta. Kuitenkin jälleen on huomioitava, että jos raakamateriaalia joutuu poistamaan paljon, tulee perinteisillä menetelmillä valmistus kuluttamaan kuitenkin enemmän energiaa kuin laser käyttöinen tulostus. Huckstepp (2019) on verrannut blogi kirjoituksessaan materiaalia lisäävää valmistusta ja CNC koneistusta lentoteollisuudessa käytetyn titaani osan valmistukseen. Kappaleen valmistus koneistamalla vaatii raakamateriaalia 17

kertaa oman painonsa verran, jolloin tulostus tuli huomattavasti ympäristöystävällisemmäksi vaihtoehdoksi, vaikka valmistusmenetelmänä käytettiin laser jauhepetisulatusta. Blogikirjoituksessa kuitenkin painotetaan, että vaikka AM menetelmien avulla voidaan vähentää huomattavasti hukkamateriaalin määrää verrattuna perinteisiin menetelmiin, vaatii AM menetelmien ympäristöpäästöt syvällisempää tutkimusta, joka ottaa huomioon myös AM valmistuksen piilopäästöt kuten sideaineen suihkutuksen menetelmän vaatima sideaineen polttaminen ja materiaali jauheen valmistuksen aiheuttamat ympäristöpäästöt. (Huckstepp 2019.)

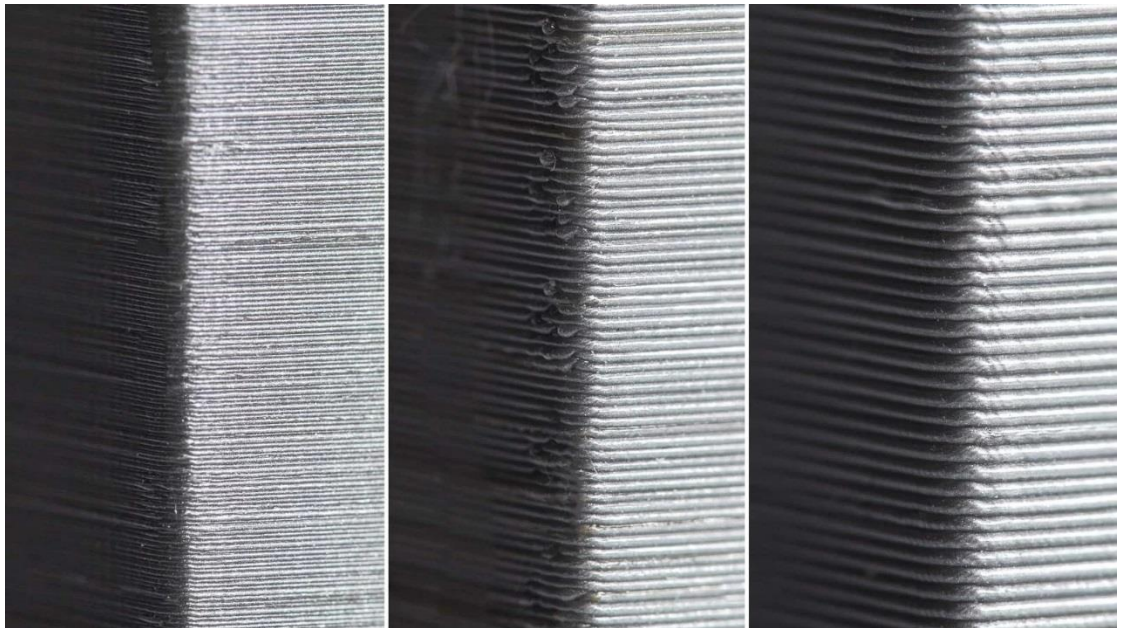
4 Suunnittelu materiaalia lisääville menetelmille

Materiaalia lisäävän valmistuksen vahvuuksiin kuuluu ehdottomasti suunnittelun vapaus. Kuitenkin on huomioitava, että vaikka suunnittelu on geometrian puolesta huomattavasti vapaampaa kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä, on materiaalia lisäävää valmistusta suunniteltaessa omat suunnittelusäännöt sekä -ohjeistukset. Perusohjeistus koskee pääsääntöisesti kaikkia eri AM menetelmiä, mutta jokaisella menetelmällä on kuitenkin vielä omat tulostusprosessi kohtaiset sääntönsä.

4.1 Kerroskorkeus

Kaikki materiaalia lisäävät menetelmät tuottavat kappaleen lisäämällä materiaalia kerroksittain. Kappaleen pinnanlaatuun ja tarkkuuteen vaikuttaa moni eri tekijä, mutta yksinkertaisin tapa vaikuttaa näihin molempiin on säätää kerroskorkeutta (Kuvio 12). Pienempi korkeus tuottaa tarkempia yksityiskohtia sekä paremman pinnanlaadun, mutta tulostusnopeus kärsii verrattuna korkeampaan kerrostukseen. Kerroskorkeus vaikuttaa lähes lineaarisesti tulostusnopeuteen, joten korkeuden kaksinkertaistuksessa myös tulostusnopeus kaksinkertaistuu.

Eri tulostusmenetelmien pinnanlaatua voidaan karkeasti arvioida menetelmän kerroskorkeuksien mukaan. Esimerkiksi materiaalin suihkutuksen avulla voidaan tulostaa 16 mikrometrin kerroskorkeutta, kun taas pursotuksella pienin kerroskorkeus on yleisesti noin 50 mikrometriä. Tulostusta suunniteltaessa on siis mietittävä mitkä ovat kappaleen vaatimukset. Karkean pinnanlaadun omaava prototyyppi valmistuu hyvin nopeasti käyttämällä suurta kerrospaksuutta. (Redwood, Schöffner & Garret 2018, 148.)



Kuvio 12. Eri kerroskorkeuksia (Grames 2018)

4.2 Muodonmuutokset

Yleisiä muodonmuutoksia AM tulosteissa on kappaleen kutistuminen sekä vääntyminen. Yleisimmät syyt muodonmuutoksilla ovat lämpötilavaihtelu ja kappaleen kovettuminen.

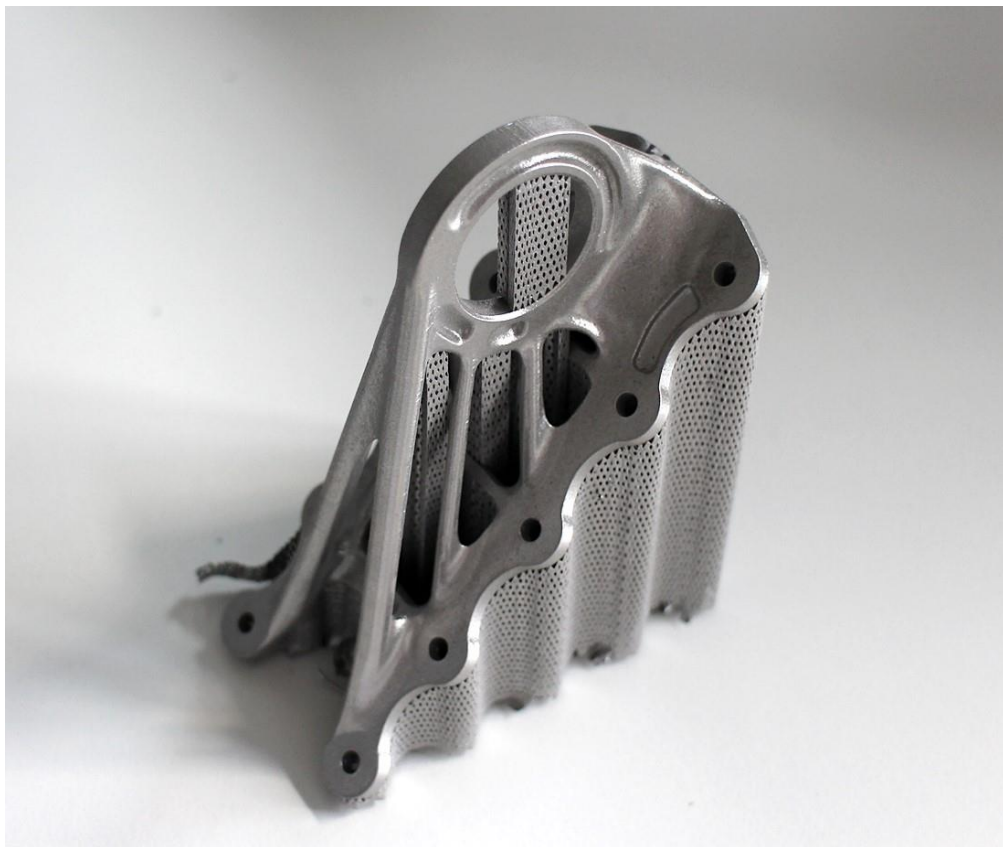
Osa AM teknologioista käyttää lämpöenergiaa kappaleiden tuottamiseen. Näissä teknologioissa lämpötilan aiheuttamat jäännösjännitykset ovat suurin syy kappaleen kutistumiselle sekä vääntymiselle. Jäännösjännityksiä syntyy kappaleeseen tulostuksen aikana, kappaleen jäähtyessä epätasaisesti. Kun osa kappaleesta alkaa jäähtymään, alkaa materiaali kutistumaan. Kutistuminen alkaa vedättää ympäröiviä alueita, jolloin kappaleen sisälle muodostuu sisäisiä jännityksiä. Jos sisäiset jännitykset kasvavat tarpeeksi suuriksi, alkavat ne aiheuttamaan kappaleen vääntymistä, ja pahimmassa tapauksessa jopa halkeamista.

Jotkin AM teknologiat eivät tarvitse korkeita lämpötiloja tulostamisen aikana. Yleisesti nämä teknologiat vaativat kuitenkin jonkin kovettamisprosessin, jonka avulla kappaleesta saadaan kiinteä. Esimerkiksi valokovetus altaassa menetelmällä valmistetut kappaleet vaativat UV-valolla tehtävän kovetuksen, jonka aikana kerroksien kovettuminen sekä kutistuminen alkaa vedättää seuraavaa kerrosta. Tästä syystä kappaleeseen muodostuu sisäisiä jännityksiä, jotka alkavat vääntämään kappaletta. Myös joillekin kappaleille tarvittava, jälkikäsitteilynä tehtävä sintraus aiheuttaa kutistumista sekä sisäisiä jännityksiä kappaleeseen.

Kutistumiseen ja vääntymiseen voi vaikuttaa suunnittelemalla kappale niin, että seinämänpaksuudet pysyisivät mahdollisimman tasaisena läpi kappaleen. Paksun alueen kiinnittymistä ohueen tulisi välttää, sillä ohuempi alue alkaa jäähtyä nopeammin, jolloin kutistuma voi vääntää kappaletta. Erityisen arkoja vääntymiselle ovat laajat, tasaiset pinnat ja niitä tulisikin pyrkiä välttämään. Tukimateriaalien avulla voidaan vääntymistä hallita ankkuroimalla vääntymiselle herkkiä alueita tulostusalustaan kiinni. Ymmärrys tukimateriaalin paikoituksesta sekä tarvittavan tukimateriaalin määrästä auttaa onnistuneen tulostuksen saavuttamisessa. Tulostusympäristön lämpötila vaikuttaa myös kutistuman ja vääntymisen hallintaan, ja useimmat teollisuustulostimet mahdollistavat lämpötilan säätämisen tulostukselle sopivaksi. (Redwood ym. 2018, 149-150.)

4.3 Tukimateriaalit

Useimmat 3D tulostus teknologiat vaativat tukimateriaalia tulostuksen onnistumiseksi sekä tarvittavan tarkkuuden saavuttamiseksi. Jos kappaleen oma rakenne ei tue seuraavaa kerrosta, voidaan tukimateriaalin avulla luoda alusta seuraavalle kerrokselle. Tukimateriaalit yleensä vaikuttavat haitallisesti kappaleen pinnanlaatuun, sillä tukimateriaali on poistettava jälkikäsittelyvaiheissa. Osalla teknologioista voidaan tukimateriaali tulostaa eri materiaalista ja poistaa liottamalla se esimerkiksi veteen. Jauhepetimenetelmät eivät yleisesti tarvitse tukimateriaalia sillä jauhe tukee rakennetta. Tämä ei päde kuitenkaan metallin kanssa, sillä tukimateriaaleja (Kuvio 13) vaaditaan jännityksien hallintaan sekä kappaleen kiinnittämiseen tulostusalustaan. (Redwood ym. 2018, 150.)



Kuvio 13. AM metallitulosteen tukimateriaalit (Varotsis N.d.)

4.4 Pyöritykset

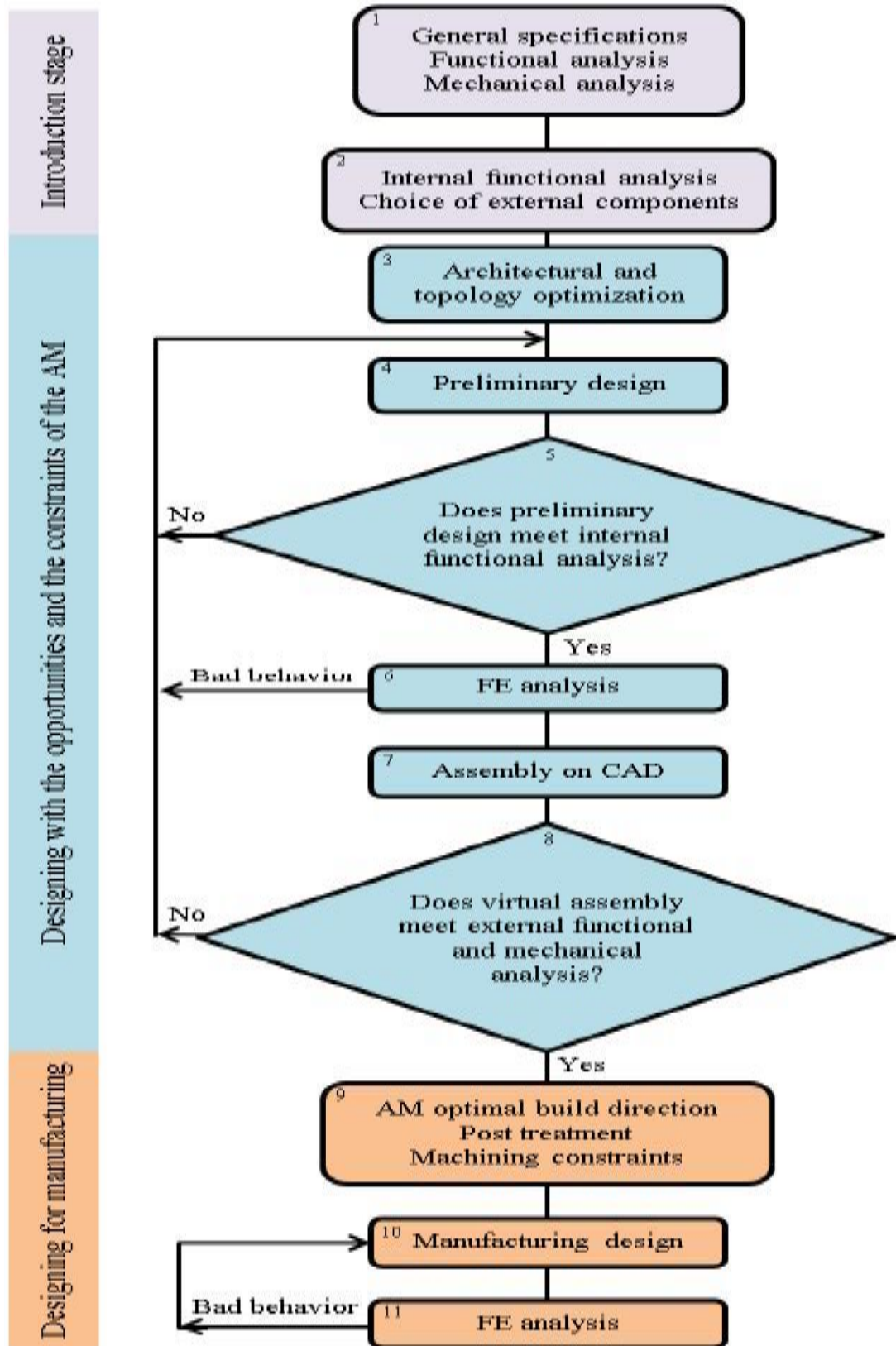
Pyörityksiä käytetään yleisesti kappaleissa valmistuksen helpottamiseksi vähentämällä jännityskeskittymiä kappaleen reunoissa ja kulmissa. Pyörityksien avulla myös kappaleen irrottaminen tulostusalustasta helpottuu. Suurin osa AM teknologioista tekee luonnostaan pyörityksen kaikkiin reunoihin ja kulmiin. Esimerkiksi pursotus menetelmällä tulostettaessa pyöritys muodostuu suuttimen säteen mukaan ja jauhepemisulatus menetelmällä laserin pisteen säteen mukaan. Suunniteltaessa kappaleita tulisi pyörityksiä käyttää aina kun mahdollista. Minimi pyörityksenä olisi hyvä pitää 2mm sädettä. Jos mahdollista, tulostusalustaan kiinnittyvät kappaleen ulkoreunat kannattaa kuitenkin vaihtaa pyörityksestä 45° viisteeseen, sillä viiste mahdollistaa itseään tukevan rakenteen, jolloin tukimateriaalia ei tarvita. (Redwood ym. 2018, 150.)

4.5 Metodiikka

Materiaalia lisäävää valmistusta varten on luotu oma suunnittelumetodiikka, joka kulkee nimellä Design for Additive Manufacturing, lyhennettynä DfAM. DfAM avulla suunnittelija pystyy paremmin suunnittelemaan tuotteen, jonka valmistus sopii erityisesti materiaalia lisäävälle valmistukselle. Ohjeistuksen tavoitteena on antaa suunnittelijalle mahdollisimman selkeät vaiheet, joita tulisi seurata materiaalia lisäävällä valmistuksella tuotetun kappaleen suunnittelussa. DfAM ottaa huomioon myös erilaiset tietokoneavusteiset suunnittelu (CAD) työkalut, joiden avulla suunnittelija voi optimoida kappaleen ja saada mahdollisimman paljon hyötyä irti materiaalia lisäävästä valmistuksesta.

Erilaisia ohjeistuksia sekä sovellutuksia löytyy useita, mutta tässä työssä käytettiin Orqueran, Campocasson sekä Milletin (2017) luomaa metodiikkaa, sillä sen vaiheet ovat selkeät sekä perustellut ja metodiikka käyttää CAD ohjelmia suunnittelun työvälineenä läpi koko suunnitteluprosessin (Kuvio 14). Metodiikka on kehitetty ottamaan

huomioon myös ulkopuoliset tekijät eikä pelkästään kappaleen omat sisäiset toiminnan kannalta tärkeät seikat. Esimerkiksi ulkopuolisten osien aiheuttamat tilarajoitukset sekä kiinnitykset otetaan huomioon suunnittelussa, joten metodiikka sopii myös kokoonpanojen suunnitteluun.



Kuvio 14. DfAM Metodiikan vaiheet (Orquera, Campocasso & Millet 2017, 3.)

Vaiheet on jaettu kolmeen eri pääosioon, jotka ovat perehdytys, suunnittelu huomioiden materiaalia lisäävän valmistuksen mahdollisuudet ja rajoitukset, sekä valmistuksen suunnittelu.

Perehdytysosio pitää sisällään kaksi vaihetta, sisäisten ja ulkoisten tekijöiden analysointia ja kuvaamista. Sisäisiä tekijöitä on kappaleen omat ominaisuudet mitä halutaan lähteä kehittämään. Erilaisia ominaisuuksia voi olla esimerkiksi virtauksen parantaminen tai kappaleen massan vähentäminen. Kaikki kehityskohteet tulisi listata, joiden pohjalta tarkempi suunnittelu voidaan aloittaa. Ulkoisia tekijöitä kappaleelle on esimerkiksi toiminnan kannalta tärkeiden pintojen sijainnit ja geometriat. Kiinnittyminen toiseen kappaleeseen voi tarvita ohjuria tai tietynlaista geometriaa kappaleessa. Myös käytettävyyttä voidaan miettiä ensimmäisen vaiheen aikana, esimerkiksi kädensija voidaan suunnitella suoraan käyttäjälle sopivaksi. (Orquera, Campocasso & Millet 2017, 2-3)

Metodiikka ei suoraan ohjeista suunnittelijaa vaatimuslistan tekemiseen, mutta mielestäni perehdytysosion tuloksena tulisi suunnittelijalla olla selkeä vaatimuslista, jonka avulla varmistetaan, että suunnittelun aikana otetaan kaikki tarvittavat vaatimukset sekä toivomukset huomioon.

Suunnitteluosio pitää sisällään kuusi vaihetta. Tässä osiossa suunnitellaan kappale sellaiseen muotoon kuin se olisi valmistuksen ja jälkikäsittelyjen jälkeen. Materiaalia lisäävä valmistusteknologia sekä materiaali tulisi myös olla valittuna tämän osion jälkeen. Kuten kuviosta 7 nähtiin, alkaa suunnittelu vaihe kappaleen optimoinnilla. Aluksi mietitään toiminnan kannalta parhaimpia muotoja sekä esimerkiksi kiinnityksien sijainteja. Kun tietyt raja-arvot geometrian suhteen on saatu, tehdään kappaleelle topologia optimointi, joka poistaa ylimääräisen materiaalin ja optimoi kappaleen geometrian raja-arvoja noudattaen. Optimointi vaiheen jälkeen tulisi olla valmiina ensimmäinen alustava malli kappaleesta. Optimoitu malli toimii runkona tarkemmalle suunnittelulle, ja runkoon aletaan lisäämään haluttuja ominaisuuksia, että

perehdytysosion kehitystavoitteet saavutetaan. Suunnitteluosiossa otetaan huomioon myös materiaalia lisäävän valmistuksen rajoitukset, kuten esimerkiksi riittävät seinämänvahvuudet, kappaleiden mahdollinen kutistuminen, riittävät välykset sekä reikien koot.

Kun malli on saatu valmiiksi, aletaan testaamaan sen toimivuutta. Mallista tarkistetaan täyttääkö se sille annetut tavoitteet kappaleen sisäisten ominaisuuksien osalta. Tavoitteiden täytyessä kappaleelle tehdään elementtimenetelmä analyysi, jonka avulla havaitaan, jos malli ei tule kestävänsä siihen kohdistuvia voimia. Jos malli ei läpäise jompaakumpaa näistä kahdesta analyysistä palataan aina optimoinnin jälkeeseen alustavaan malliin ja suunnittelu tehdään uudestaan. Jos kaikki analyysit kuitenkin suoritetaan onnistuneesti, malli lisätään kokoonpanoon, jossa voidaan analysoida toimivuutta ulkoisten tekijöiden kanssa. Tämä vaihe on tärkeä etenkin, jos suunnitteluun jotain tiettyä kokoonpanon osaa valmistettavaksi materiaalia lisäävällä valmistuksella. Jos tässä vaiheessa huomataan, että kokoonpanon kanssa on ongelmia, palataan jälleen alustavan mallin pariin ja tehdään malliin tarvittavia muutoksia. Jos malli läpäisee kaikki vaiheet, on tuloksena valmis malli kappaleesta. (Orquera ym. 2017, 3)

Valmistuksen suunnittelu tarkoittaa kappaleen asennon, tukimateriaalien ja sijainnin optimointia tulostusalustalla. Myös jälkikäsitteilyä vaativat pinnat on tunnistettava. Tässä vaiheessa otetaan siis huomioon edellisessä kappaleessa kerrotut materiaalia lisäävän valmistuksen perussäännöt. Malli voi muuttua vielä tässä osiossa, sillä kappaleeseen lisätään mahdollisesti jälkikäsitteilyä varten koneistusvaroja, pyöristyksiä tai muutetaan esimerkiksi ulokkeiden geometriaa tukimateriaalien vähentämiseksi. Koska kappaleeseen tehdään vielä muutoksia, on syytä tehdä vielä viimeinen elementtimenetelmä analyysi, jolla varmistetaan mallin kestävyys voimien vaikutuksen alla. Jos analyysi läpäistään, malli on valmis ja kappale voidaan valmistaa. (Orquera ym. 2017, 3-4)

4.6 Suunnittelun CAD työkalut

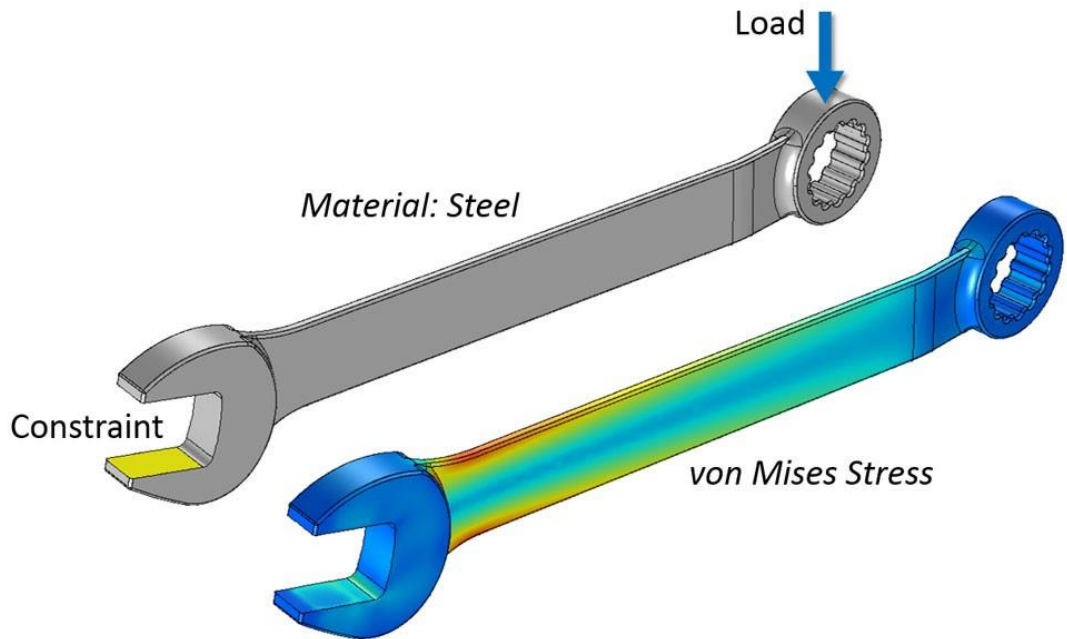
Kuten aikaisemmassa metodiikka kappaleessa kerrottiin, on CAD ohjelmistot mukana apuvälineenä suunnittelutyössä. Etenkin materiaalia lisäävällä valmistuksella tuotettu kappale vaatii CAD ohjelmistojen hyödyntämistä, jos kappale halutaan optimoida mahdollisimman tehokkaasti. Tässä kappaleessa käydään läpi tärkeimmät CAD työkalut, joita voidaan hyödyntää materiaalia lisäävän valmistuksen suunnittelussa.

Elementtimenetelmällä suoritettu laskenta, englanniksi Finite element analysis tai finite element method, (FEA, FEM) tarkoittaa laskentaa, jonka avulla voidaan simuloida, kuinka kappale tulee reagoimaan siihen vaikuttaviin voimiin. Analyysin avulla voidaan tutkia esimerkiksi mekaanisia voimia, väsymistä, värinää, lämpötilan vaikutuksia sekä nesteen virtausta. Analyysin avulla saadaan arvio siitä, että tuleeko kappale toimimaan niin kuin suunniteltu vai alkaako rakenne hajoamaan tai muuttamaan muotoaan voimien vaikutuksesta. Tulokset auttavat suunnitteluvaiheessa ennustamaan valmiin kappaleen toimintaa, jolloin suunnittelun aikana voidaan jo optimoida kappale toimimaan parhaimmalla tavalla todellisessa tilanteessa. (Introduction to Finite Element Analysis or Finite Element Method. N.d.)

DfAM metodiikan mukaan FEM analysointi tulee tehdä suunnitteluosiossa, jossa tarkastellaan alustavan mallin kestävyyttä, sekä viimeisenä vaiheena valmistuksensuunnitteluosiossa, jolloin tarkastellaan lopullisen mallin kestävyyttä.

Analyysi perustuu pienistä elementeistä koostuvaan verkkorakenteeseen, joka muodostaa koko tutkittavan kappaleen muodon. FEA ohjelma suorittaa laskennan jokaiselle yksittäiselle elementille ja yhdistää tulokset, jolloin saadaan lopullinen tulos koko kappaleesta. (What is FEA Finite Element Analysis? N.d.)

Kuviossa 15 on jakoavain, jolle on määritelty vapausasteet, sekä voima. Tuloksena on saatu malli, jossa näkyy värien avulla voimasta aiheutuvat jännitykset.



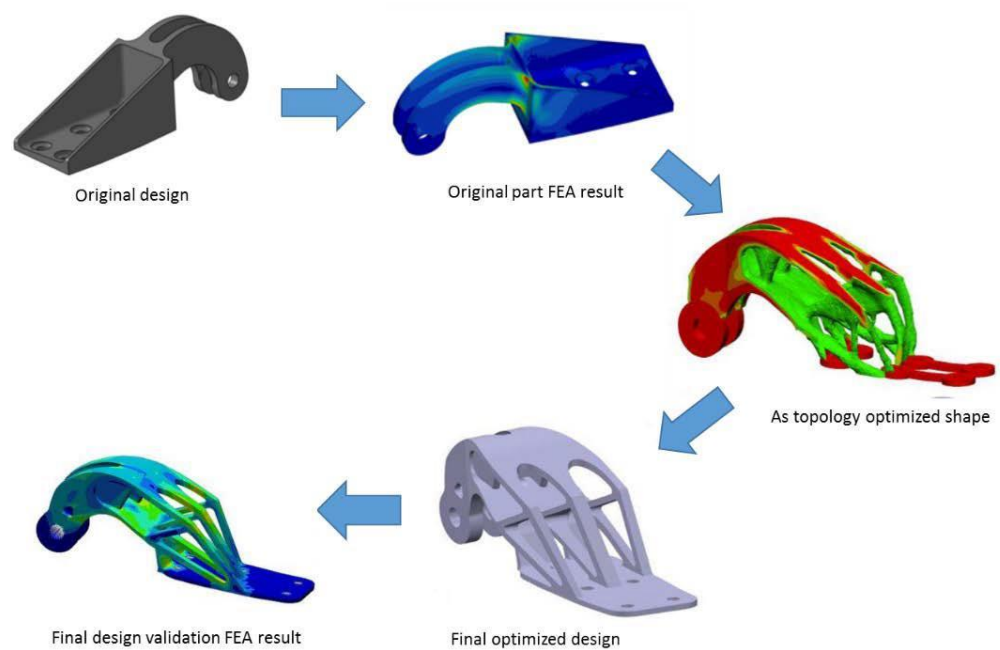
Kuvio 15. Jakoavaimelle suoritettu FEA (Finite Element Mesh Refinement 2016.)

Topologia optimointi on prosessi, jossa kappaleen materiaalin määrä optimoidaan sille annettujen raja-arvojen puitteissa. Topologia optimoinnissa kappaleelle määritetään jokin lähtötilavuus, toiminnan kannalta kriittiset geometriat sekä voimat, jotka kappaleeseen kohdistuu. Optimointi lähtee aikaisemmin mainitun elementtimenetelmän avulla analysoimaan kappaleen jännityksiä ja poistamaan materiaalia, joka ei ole jännityksien kannalta tarvittavaa. Lopputuloksena kappaleeseen jää vain tarvittava määrä materiaalia, mutta kappaleen geometria voi olla hyvinkin monimutkainen. (Abbey 2018.)

Topologia optimointi ei ota huomioon kappaleen ulkonäköä tai perinteisiä suunnittelu sääntöjä, joten kappaleen optimoidun geometrian vuoksi valmistettavuus perinteisillä menetelmillä on useasti haastavaa tai jopa mahdotonta. Tästä syystä topologia optimointi sopii erityisesti materiaalia lisäävän valmistuksen suunnittelun työväli-

neeksi. Topologia optimointi on mukana myös DfAM metodiikassa ja sen avulla luodaan metodiikassa alustava runko mallista, jota aletaan suunnittelemaan pidemmälle.

Kuviossa 16 näkyy, kuinka topologia optimointi prosessi etenee. Lopuksi topologia optimoidulle kappaleelle on vielä tehty oma FE analyysi, jolla kappaleen kestävyyttä on tarkasteltu.



Kuvio 16. Topologia optimointi prosessi (Gebisa & Lemu 2017.)

Generatiivinen suunnittelu, lyhennettynä GD englannin kielen termistä generative design, tarkoittaa iteratiivista suunnitteluprosessia, jossa hyödynnetään tietokoneohjelmistoa luomaan erilaisia vaihtoehtoja kappaleesta. Vaihtoehtojen tulee täyttää suunnittelijan ohjelmalle määrittämät reunaehdot sekä vaatimukset. Generatiivisen suunnittelun avulla kappaletta voidaan optimoida haluttuun suuntaan, sekä samalla minimoida kappaleen massa. (Mäkinen 2018)

Erona topologia optimointiin on siis, että generatiivinen suunnittelu lähtee liikkeelle pelkkien raja-arvojen ja vaatimuksien pohjalta, ja luo erilaisia vaihtoehtoja, jotka täyttävät nämä vaatimukset. Topologia optimointi optimoi pelkästään jo valmiin suunnittelun mallin massan, mutta ei kehitä erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja kappaleesta. GD:n tuottamista vaihtoehtoista parhaan valitseminen jää siis suunnittelijan tehtäväksi. Generatiivisen suunnittelun avulla voidaan säästää suunnittelu aikaa ja tuloksena voi olla malleja, joita perinteisen suunnittelun avulla ei olisi tullut mieleenkään. Kuitenkin aivan kuten topologia optimoinnillakin, tulokset ovat useasti hyvin monimutkaisia geometrialtaan, joten materiaalia lisäävä valmistus on sopiva valmistusmenetelmä myös GD:lle.

Generatiivinen suunnittelu on melko uusi suunnittelutyökalu, eikä sitä ole huomioitu DfAM metodiikan prosessin kuvaajassa. Generatiivinen suunnittelu tulisi mielestäni sijoittaa prosessissa heti vaatimuksien ja raja-arvojen määrittämisen jälkeen eli aivan suunnitteluosion alkuun. Tällä tavoin GD voisi tuottaa mahdollisesti hyviä vaihtoehtoja, joiden pohjalta aloittaa tarkempi suunnittelu.

Kuviossa 17 näkyy generatiivisen suunnittelun tuottamia erilaisia iteraatioita auton turvavyön kiinnityksen kannakkeesta.



Kuvio 17. Generatiivisen suunnittelun avulla tuotettuja erilaisia iteraatioita (GM and Autodesk are using generative design for vehicles of future 2018.)

4.7 Työkalusuunnittelu

Työkalusuunnittelu on suunnittelun erikoisala, jonka päätavoite on lisätä tuotannon tehokkuutta sekä samanaikaisesti säilyttää laatu- ja kustannustehokkuus. Työkalusuunnittelijalla tulee olla ymmärrys konepajaympäristön toiminnasta, työkalujen valmistustavoista, koneistustyökalujen suunnittelusta sekä valmistusmenetelmistä.

Suunnittelijalla on oltava myös hallussa suunnittelun perustaidot kuten työkuvioiden tekeminen sekä valmistuskustannuksien laskenta. (Society of Manufacturing Engineers 2003, 1.)

Päätavoitteen saavuttamiseksi on työkalujen suunnittelussa huomioitava seuraavat asiat:

- Työkalujen suunnittelu niin, että niiden avulla tuotteiden valmistus on mahdollisimman kustannustehokasta.
- Suunnitella työkaluja, joiden avulla tuotteiden valmistus nopeutuu.
- Suunnitella työkaluja, joiden avulla tuotteiden laatu saadaan pidettyä taiseisena.
- Vähentää erikoistyökalujen hintaa suunnittelemalla ne mahdollisimman kustannustehokkaasti.
- Suunnitella työkaluista turvallisia ja helposti käytettäviä.

Yleisesti työkalusuunnittelijan tehtävään kuuluu suunnitella työkaluja useisiin erilaisiin käyttötarkoituksiin. Erilaisia käyttötarkoituksia ovat esimerkiksi leikkaus- sekä koneistustyökalut, jiggit ja kannattimet, mittausapuvälineet, muotit ja meistit metallin muovaukseen sekä hitsauskannattimet ja mekaaniset kiinnikkeet. Erilaisia työkalukategorioita on siis useita, mutta niiden lisäksi voidaan tarvita myös erikoistyökaluja, jotka suunnitellaan aina erikseen tiettyä käyttötarkoitusta varten. (Society of Manufacturing Engineers 2003, 2-3.)

Työkalun suunnitteluprosessin voi jakaa yleisesti viiteen vaiheeseen:

1. Ongelman määrittäminen
2. Vaatimuksien määrittäminen
3. Alustavien ideoiden kehittäminen
4. Vaihtoehtoisten ideoiden kehittäminen
5. Valittujen ideoiden viimeistely

Ensimmäisessä vaiheessa määritetään ilman työkalua ilmenevä ongelma. Tärkeää on löytää ongelman juurisyy ja etsiä ratkaisu sen korjaamiseksi. Seuraavassa vaiheessa määritetään vaatimukset, joita työkalulle asetetaan. Tässä vaiheessa otetaan huomioon aikaisemmin mainitut suunnittelussa huomioitavat seikat. Kolmas vaihe on alustavien ideoiden kehittäminen, jonka aikana luodaan parametrit ja reunaehdot, joiden

avulla syntyneitä ratkaisumalleja arvioidaan. Neljäs vaihe, eli vaihtoehtoisten ideoiden kehittäminen alkaa, kun reunaehdot ja parametrit on määritetty. Tässä vaiheessa kaikki saadut ideat tulee huomioida. Viimeinen vaihe on valittujen ideoiden viimeistely, jossa pyritään valitsemaan paras ideavaihtoehto työkalulle. Harvoin yksi idea on selkeästi yli muiden, joten suunnittelijan tehtävänä on arvioida sekä vertailla ideoita niiden vahvuuksien ja heikkouksien perusteella. Esimerkiksi kustannuksiltaan halpa työkalu, joka ei ole kovin kestävä, voi olla kokonaiskustannuksiltaan parempi vaihtoehto, jos työkalun ei tarvitse kestää kuin muutamien käyttökertojen verran. (Society of Manufacturing Engineers 2003, 3-5.)

Työkalusuunnittelu etenkin perinteisillä valmistusmenetelmillä vaatii siis hyvin laajaa osaamista sekä kokemusta teollisuuden parista. Tässä työssä kuitenkin valmistusmenetelmä oli rajattu materiaalia lisäävään valmistukseen, joten aikaisemmin mainittuja ohjeistuksia sovellettiin. Työkalujen suunnittelu tulee aloittaa miettimällä, kuinka ongelma saadaan poistettua työkalun avulla, mutta työkalun valmistettavuutta ei tarvitse vielä ottaa huomioon. Koska valmistus tapahtuu materiaalia lisäävällä valmistuksella, voi työkalun geometria olla hyvinkin monimutkainen. Myös kustannuksien laskeminen tapahtuu eri tavalla kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä, joten kustannuksien laskeminen vaatii AM tietotaitoa. Työkalujen materiaaleja valittaessa tulee myös ottaa huomioon materiaaleja, jotka perinteisillä menetelmillä valmistettaessa eivät välttämättä olisi sopivia. Esimerkiksi titaani voi olla hyvinkin kilpailukykyinen kustannuksiltaan käytettäessä AM valmistusmenetelmiä.

Tässä opinnäytetyössä työkalujen ideoinnissa on myös vahvasti mukana työkalujen kanssa työskentelevät, sekä työkaluja suunnittelevat henkilöt, joten tietotaitoa konepajaympäristöstä sekä erilaisten työkalujen käyttökohteista tuli heiltä.

5 Käyttökohteiden kartoitus työkalutuotannosta

Sopivia työkaluja kartoitettiin Valmet Rautpohjan työkalutuotannosta järjestämällä esityksiä materiaalia lisäävästä valmistuksesta, sekä tämänhetkisistä käyttökohteista ja sen jälkeen haastattelumaisesti ryhmissä miettimällä sopivia käyttökohteita. Myös havainnointia tehtiin vierailemalla eri tuotannon osa-alueilla ja seuraamalla työvaiheita. Kuitenkin Valmetin Rautpohjan tuotannon suuren koon vuoksi havainnointiin olisi joutunut käyttämään huomattavan määrän aikaa, jos ideoita olisi halunnut kartoittaa koko tuotannon alueelta. Tästä syystä päätettiin, että paras tapa kerätä ideoita käyttökohteista oli nimenomaan vapaamuotoiset haastattelutilanteet eri tuotantoalueiden edustajien kanssa pienryhmissä.

5.1 Haastattelut

Ennen haastattelua, pidettävä esitys materiaalia lisäävästä valmistuksesta kattoi AM valmistuksen, sekä suunnittelun perusteet. Myös erilaisia esimerkkejä mahdollisista käyttökohteista esitettiin. Näitä esimerkkejä, sekä kuvia, etsittiin internetistä teollisuuden parista ympäri maailmaa, mutta myös Valmetin omia sisäisiä AM esimerkki tapauksia esitettiin osallistujille. Vaikka Valmetilla on jo useita omia AM esimerkki tapauksia, eivät suurin osa haastateltavista ollut näistä tietoisia. Esityksen tarkoituksena oli saada kaikille haastatteluryhmän henkilöille riittävä kuva materiaalia lisäävästä valmistuksesta, sekä esimerkkien avulla saada heidät miettimään potentiaalisia ideoita omilta tuotannonalueiltaan. Esitys räätälöitiin aina ryhmäkohtaisesti, sillä osa ryhmistä halusi tietää enemmän ja syventävämmiin materiaalia lisäävästä valmistuksesta, joten esityksille varattu aika vaihteli eri ryhmien välillä puolesta tunnista jopa kahteen tuntiin.

Haastattelu tapahtui esityksen jälkeen. Haastattelu tilanne pyrittiin pitämään vapaamuotoisena, eikä se noudattanut varsinaisesti runkoa, jonka mukaan edetä. Kuitenkin keskustelua ohjattiin oikeaan suuntaan, ja osallistujilta koitettiin saada kerättyä

mahdollisimman paljon erilaisia ideoita sopivista työkaluista, ilman että niitä arvioitiin vielä millään tavalla. Osallistujiin otettiin yhteyttä vielä vähän ajan kuluttua haastatteluista ja kartoitettiin mahdollisesti jälkikäteen esille nousseita lisäideoita.

5.2 Kohderyhmät

Jo opinnäytetyön suunnitelmassa oli mietittynä Valmet Rautpohjan eri tuotannonalueita, joista työkaluideoita voidaan kartoittaa. Ryhmät, joille esityksiä ja haastatteluja pidettiin, kasattiin näiden tuotannonalueiden edustajista niin, että ryhmissä olisi aina osallistujia keskimäärin viidestä kymmeneen henkeä. Ryhmät koostuivat tuotannon puolella työskentelevistä henkilöistä sekä suunnittelijoista. Ryhmien koko pidettiin tarkoituksella melko maltillisena, jotta esityksissä säilyy kontakti osallistujien kanssa ja haastattelu tilanteissa saataisiin paremmin vapaamuotoista keskustelua aikaan. Yhteensä esityksiä sekä haastatteluja pidettiin neljälle eri ryhmälle ja havainnointia tehtiin tuotannon puolella kolmen eri vierailukerran aikana eri tuotannonalueiden edustajien kanssa.

5.3 Ideoiden arviointi

Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää potentiaalisia ideoita käyttökohteista, sekä valita näistä sopivat kohteet, jotka suunniteltiin uudelleen hyödyntäen DfAM metodiikkaa sekä valmistettiin materiaalia lisäävällä valmistuksella. Ideoita löydettiin kartoituksen aikana useita, joten niiden karsimiseen sekä parhaiden ideoiden tunnistamiseen tarvittiin jonkinlaista arviointia.

Arviointia varten tuli kaikista löytyneistä ideoista kerätä riittävät lähtötiedot, että arviointi voidaan suorittaa. Jokaisesta ideasta tuli hankkia jonkinlainen kuva, päämitat, arvio nykyisestä hinnasta sekä yhteyshenkilö keneltä tarvittaessa saadaan lisätietoa. Kun nämä tiedot oli kerätty, kasattiin kaikki ideat taulukkoon ja luotiin kriteerit arviointia varten.

Arvioinnin kriteerejä tuli lopulta viisi, ja arviointi tehtiin pisteyttämällä jokainen idea kriteerien mukaan pisteillä 1-3 (Liite 1). Kriteereille luotiin myös oma painoarvonsa, jolloin eri kriteerit pystyivät olemaan merkittävämpiä lopputuloksen kannalta. Ensimmäinen vaihe taulukossa oli kuitenkin kysymys: Onko työkalu järkevä AM valmistukselle? Työkalun sopivuutta AM valmistukselle mietittiin sen koon, eräkoon sekä kustannushyötyjen avulla. Jos nämä kriteerit jo vaikuttivat epäsopivilta materiaalia lisävalmistukselle tuli vastaukseksi kysymykseen ei. Jos vastaus oli ei, karsittiin idea jo ennen pisteytystä. Näin pystyttiin nopeuttamaan ideoiden valinta prosessia, eikä turhiksi todettuihin ideoihin uhrattu sen enempää aikaa. Kriteerit suunniteltiin yhdessä Valmetin yhteyshenkilöiden kanssa ja kriteerit ottivat huomioon kappaleen valmistuksen, kustannukset sekä työkalun uudelleen suunnittelun mahdolliset hyödyt.

Lopulliset viisi kriteeriä sekä niiden painoarvot olivat seuraavat:

1. Työkalun koko AM valmistukselle	0,1
2. Työkalu turvallisuuden parantaminen	0,2
3. Työkalun käytettävyyden parantaminen	0,3
4. Mahdolliset kustannus säästöt	0,1
5. Kehittämismahdollisuus	0,3

Myös arvioinnin tulokset tarkasteltiin Valmetin yhteyshenkilöiden kanssa, ja ideoista valittiin kaksi vaihtoehtoa jatkokehitystä varten. Eniten pisteitä saivat kaapimenterän vetolaite, suuret erikoisvääntöavaimet sekä telan mittalaite. Kaapimenterän vetolaite sai suurimmat pisteet ja se valikoitui yhdeksi kehityskohteeksi. Vetolaitteen uudelleen suunnittelulla ja AM valmistuksella pystytään kehittämään työkalun käytettävyyttä ja turvallisuutta mahdollisesti ilman lisäkustannuksia, tai jopa kustannustehokkaammin. Toiseksi eniten pisteitä saivat suuret erikoisvääntöavaimet, joiden käyttäminen oli hankalaa. Koska arviointi taulukossa käytettävyyden parantaminen sekä työkalun kehittäminen ovat suurimmat painoarvoltaan, nousi erikoisvääntöavaimet pisteissä korkealle sijalle. Tätä ideaa ei kuitenkaan valittu, sillä se ei mielestämme tukenut haastavuudeltaan tämän opinnäytetyön tavoitteita. Toiseksi kehityskohteeksi

valikoituikin pistetuloksissa kolmanneksi tullut telan mittalaite, jota kehittämällä voidaan parantaa käytettävyyttä sekä turvallisuutta. Mittalaitteen koko oli myös optimaalinen materiaalia lisäävälle valmistukselle.

6 Kehitystutkimus

Kehitystutkimuksen tarkoituksena oli esimerkkitapauksien avulla todistaa, että AM on valmistusmenetelmänä hyödyllinen työkalujen valmistuksessa. Tavoitteena oli, että kahdesta valikoidusta kehityskohteesta saadaan luotua prototyypit, joiden avulla tuloksia voidaan verrata konkreettisesti perinteisten sekä AM valmistusmenetelmien välillä. Rajallisen aikataulun vuoksi kehitystyössä jouduttiin painottamaan enemmän toista valittua kehityskohdetta, sillä aika ei olisi riittänyt molempien työkalujen tarkempaan suunnitteluun.

Kehitystutkimus eteni vaiheittain ja tutkimus voidaan jakaa karkeasti viiteen eri vaiheeseen: tavoitteiden määrittäminen, vaatimuslistan määrittäminen, työkalujen suunnittelu soveltaen aiemmin läpi käytyä DFAM metodiikkaa sekä työkalusuunnitteluprosessia, prototyypin valmistus sekä lopulta tuloksien arviointi.

Vaatimuslista tehtiin yhdessä Valmetin yhteyshenkilöiden kanssa, jotka työskentelivät kyseisten työkalujen parissa. Koska AM mahdollistaa uudenlaisia geometrioita sekä rakenteita, vaatimuslistaan tuli paljon erilaisia vaatimuksia, jotka olivat enemmänkin tuotekehitystä kuin työkalun AM valmistuksen suunnittelua.

6.1 Telan mittalaite

Telan mittalaite sekä sen toiminta on salassa pidettävää tietoa, joten mittalaitteen toiminta sekä suunnitteluprosessi kuvaillaan hyvin yleisluontoisesti. Telan mittalaite

on manuaalisesti käytettävä mittalaite, jota käytetään telan mittaukseen. Tällä hetkellä mittalaite on melko painava ja rakenne on suunniteltu mahdollisimman yksinkertaisen sekä kustannustehokkaan valmistuksen mukaisesti. Mittalaitteen rakenne koostuu neljän eri osan kokoonpanosta, ja mittalaitteen kokoonpano vaatii erillisen työkalun. Mittalaitteen (Liite 2) osat ovat: runko, jalat sekä mittasauvanohjain. Rungon rakenne on alumiinia ja jalat ovat terästä. Kuviossa 16 näkyvä runkoon kiinnitetty pienempi käännettävä vesivaaka, sekä kierrereillä varustettu mittakeskiö sekä niiden kiinnityslevy olivat vaihdettavia osia, jotka täytyi pystyä kiinnittämään myös uuteen rakenteeseen.

Idea telan mittalaitteen valmistamisesta AM:n avulla nousi esille haastatteluissa ja tärkeimmät kehitettävät ominaisuudet olivat laitteen käytettävyys ja turvallisuus sekä uusien ominaisuuksien lisääminen. Käytettävyyden sekä turvallisuuden kehittäminen tapahtui etenkin mittalaitteen massan vähentämisen avulla ja uusia ominaisuuksia pystyttiin lisäämään suunnitteleamalla koko rakenne uudelleen. Telan mittalaite on ulospäin Valmetin asiakkaille näkyvä tuote, joten myös ulkonäöllisesti sen tuli näyttää nykyaikaiselta sekä tyylikkäältä.

Ideaalinen lopputulos olisi kevyempi mittalaite, jossa nimikkeitä on pystytty yhdistämään, mutta silti myös lisäämään uusia ominaisuuksia. Nämä kaikki vaatimukset tulisi täyttää myös niin, että kustannukset lopulliselle AM valmistettavalle mittalaitteelle eivät nousisi suuremmaksi kuin nykyisellä versiolla.

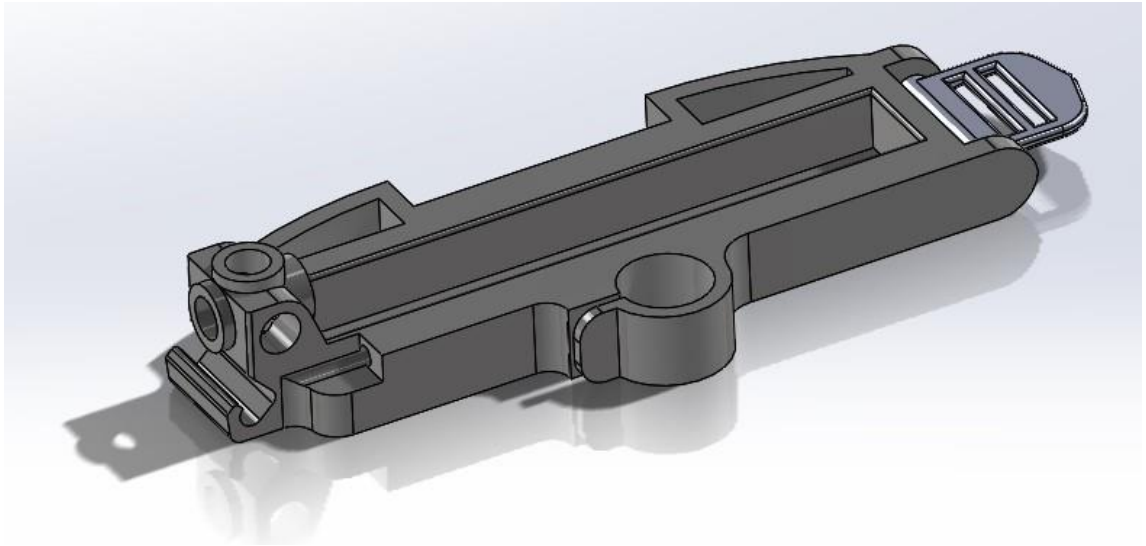
6.1.1 Suunnitteluprosessi: Telan mittalaite

Kuten aiemmin mainittiin, alkoi kehitystyö vaatimuslistan määrittämisellä. Vaatimuslista luotiin yhdessä Valmetin yhteyshenkilön kanssa mukaillen Pahl & Beitzinin (1990) luomaa vaatimuslistamallia. Listaan pyrittiin keräämään kaikki mahdolliset vaatimukset sekä toivomukset, joita telanmittalaitteelle asetettiin (Liite 3). Molemmissa, sekä DfAM metodiikassa, että työkalunsuunnitteluprosessissa, painotetaan lähtötietojen merkitystä suunnittelulle. Mielestäni vaatimuslista konkretisoi kerätyt

lähtötiedot ja kaikki suunnittelussa tarvittavat tiedot yhteen listaan, sekä varmistaa että tarvittavat asiat tulee kirjattua ylös myöhempää tarkastelua varten.

Mittalaitteen suunnittelussa lähdettiin liikkeelle luonnostelemalla kynällä ja paperilla vaatimuslistan mukaiset raja-arvot täyttävää rakennetta. Vaatimukset olivat runkoon asennettava vesivaaka ja kiristyshihna sekä rakenteen optimointi massan kannalta. Rungon rakennetta suunniteltaessa pyrittiin materiaalia käyttämään vain tarvittava määrä ja tekemään rakenteesta mahdollisimman kompakti. Telan pintaan tulevien mittalaitteen jalkojen suunnittelussa hyödynnettiin CAD ohjelmiston generatiivista suunnittelu työkalua. Generatiivisen suunnittelu ohjelman avulla jalkojen rakenne optimoitiin mittalaitteeseen kohdistuvien voimien mukaan.

Alla olevassa kuviossa 21 näkyy rakenne mallinnettuna SolidWorks CAD suunnitteluohjelmalla. Tässä vaiheessa rakenteessa ei ole vielä generatiivisen suunnittelun avulla lisättyjä jalkoja. Rakenteessa on massaa pyritty vähentämään lisäämällä kevennyksiä rakenteeseen ja sijoittelemalla vaatimuksien mukaiset geometriat lähelle toisiinsa. AM avulla myös sisäisten onteloiden tekeminen helppoa, joten vaatimuslistassa (Liite 3) toiveena ollut kuusiokoloavaimen paikka on voitu upottaa rakenteen sisälle. Kiristyshihnalle on tehty koukku johon hihnan voi kiinnittää ja toiseen päähän lisättiin solki hihnan kiristystä varten. Solki voidaan tulostaa suoraan rakenteeseen sisälle, joten se ei varsinaisesti lisää mittalaitteen nimikkeitä, vaikka onkin rungosta erillään oleva liikkuva osa. Aikaisemmin erillisenä osana ollut mittasauvanohjain on voitu myös yhdistää suoraan rakenteeseen, jolloin nimikkeiden määrää on vähennetty ja tarve manuaaliselle kiinnittämiselle on voitu poistaa.



Kuvio 18. Mittalaitteen runko ilman jalkoja

Jalkojen generatiivinen suunnittelu suoritettiin Autodeskin Fusion 360 ohjelmiston avulla. Aiemmin nähty rungon rakenne siirrettiin Fusion 360 ohjelmistolle ja generatiivinen suunnittelu aloitettiin asettamalla ohjelmistolle tarvittavat raja-arvot sekä voimat, joiden mukaisesti jalat tulee suunnitella. Jalat suunniteltiin niin että ne ovat telan pintaan tulevat tapit, joiden päälle voidaan kiinnittää kulutuskestävästä materiaalista valmistetut holkit tarvittaessa. GD ohjelmalle ei siis alkuvaiheessa annettu muuta tietoa kuin halutut geometriat, jotka halutaan säilyvän. Tässä tapauksessa nämä geometriat olivat siis runko sekä jalkojen tapit, näkyvät liitteessä 4 vihreällä. Lisäksi ohjelma tarvitsee geometriat joihin materiaalia ei saa lisätä. Mittalaitteessa materiaalin rajoitteena oli tela sekä hihnan kiinnityksen vaatima tila. Materiaalin tilarajoitteet näkyvät liitteessä 4 punaisella.

Tarvittavien geometria raja-arvojen lisäämisen jälkeen ohjelmisto vaatii kappaleeseen kohdistuvat voimat, laskennassa käytettävät materiaalit sekä haluttu varmuuskerroin. Tarkkoja arvoja mittalaitteeseen kohdistuvista voimista ei ollut, joten voimat olivat vain arvioita. Kuitenkin voimat pyrittiin arvioimaan suuremmaksi kuin todelli-

nessä tilanteessa vaikuttavat voimat, että rakenteesta tulisi tarpeeksi kestävä. Lisätyjä voimia oli esimerkiksi jalkoihin kohdistuva voima, jossa mittalaitetta painatetaan telaa vasten, sekä hihnan kiristämisen aiheuttama voima. Koska rakenteen tuli olla myös kiertojäykkää lisättiin voima, joka pyrki vääntämään kappaletta. Laskennassa käytetty varmuuskerroin oli kaksi ja materiaalit olivat: titaani, alumiini, ruostumaton teräs, ABS-muovi, sekä nylon. Näiden raja-arvojen mukaan GD ohjelma pystyi tuottamaan mittalaitteelle jalkojen rakenteen. Generatiivinen suunnittelu antaa tietokone-laskennan avulla useita eri iteraatioita mahdollisista vaihtoehdoista. Lopullisen valinnan halutusta rakenteesta tekee kuitenkin suunnittelija itse. Tässä tapauksessa valikoitunut rakenne oli ABS-muovilla kolmenkymmenen iteraatiokierroksen jälkeen saatu rakenne (Liite 5).

Tämä vaihe on DFAM metodiikan mukaan osana suunnittelu osiota. DFAM metodiikan mukaan ei tosin käytetä GD ohjelmistoa vaan topologiaoptimointia, mutta rakenteen optimointi on pääroolissa tässä osiossa ja GD valikoitui käytettäväksi topologiaoptimoinnin sijaan, sillä se on melko tuore teknologia, jota oli mielenkiintoista päästä hyödyntämään suunnittelussa. Generatiivinen suunnittelu sopii myös erityisesti AM valmistukselle, sillä sen tuottamat rakenteet eivät olisi muilla valmistusmenetelmillä mahdollisia valmistaa. Suunnitteluosio piti sisällään myös kokoonpanon tarkastelun, joten koko mittalaite kasattiin SolidWorks ohjelman avulla ja tarkasteltiin, että osat sopivat keskenään ja kokoonpano toimii halutulla tavalla. Myös materiaali sekä valmistusmenetelmä tulisi valita suunnitteluosiossa. Materiaaliksi valikoitui nylon ja valmistusmenetelmäksi jauhepetisulatus. Nylon valikoitui materiaaliksi sen kestävyden, keveyden sekä kustannustehokkaan valmistuksen ansiosta. Jauhepetisulatus valikoitui menetelmästä kustannuksien sekä riittävän tarkkuuden ansiosta. Jauhepetisulatus mahdollistaa myös tulostuksen ilman erillistä tukimateriaalia sillä jauhepeti toimii tukena tulostuksen aikana. Rakenne soveltuu myös hyvin jauhepetisulatukselle, sillä siinä ei ole umpinaisia sisäisiä rakenteita joihin materiaalijauhe jäisi sisälle. On huo-

mioitava myös, että kyse on prototyypistä, joten testausta varten metallista tulostaminen olisi ollut turhan kallis vaihtoehto, jos rakenteeseen tarvitsee tehdä vielä muutoksia.

6.1.2 Prototyypin valmistus

Prototyypin valmistus tapahtui jauhepetisulatusmenetelmän avulla, joten valmistuksessa tarvittiin ulkopuolista toimittajaa. Prototyypin valmisti Jyväskylässä toimiva 3D-Formtech Oy, joka on muovin sekä metallin 3D tulostukseen erikoistunut yritys.

Prototyyppi valmistettiin polyamidista (PA2200). Toinen vaihtoehto valmistukselle oli lasivahvistettu polyamidi (PA3200GF), jonka jäykkyysominaisuudet ja rasituksenkesto olisivat olleet paremmat kuin PA2200:lla. Kuitenkin kustannukset olisivat tässä tapauksessa nousseet melko korkeiksi, joten PA2200:n käyttö prototyypissä oli perustellumpi ratkaisu.

Vaikka 3D-tulostus tapahtuu suoraan tietokonemallin pohjalta, vaati malli vielä muutoksia ennen tulostusta. Liikkuvien osien välillä olevat välykset täytyi muokata niin, että ne olivat tulostuksen kannalta valmistettavissa. Tässä tapauksessa minimiväly oli 0,3 mm, joka muokattiin esimerkiksi hihnan kiristyssoljen sekä rungon väliin, jotta solki pystyy liikkumaan vapaasti, mutta ei ole liian löysä. Myös kierteiden valmistus tuli miettiä ennen tulostusta. Vaikka tulostamalla pystyisi tekemään M6 sekä siitä suurempia kierteitä, oli kierteiden kulumisen kannalta järkevämpää laittaa runkoon metalliset kierreinseritit.

Lopullinen polyamidista valmistettu prototyyppi (Liite 6) painoi noin 260 grammaa, ja valmistuskustannukset olivat puolet alkuperäisen mittalaitteen kustannuksista. Valmistusaika tilauksen lähettämisestä valmiin kappaleen saamiseen oli noin kolme työpäivää. Valmistamalla mittalaite lasivahvistetusta polyamidista, olisi lisäkustannuksia tullut noin 30%.

6.2 Vetolaite

Vetolaite on työkalu, jonka avulla paperikoneen kaapimenterä voidaan irrottaa tai asentaa paikalleen. Vetolaitteessa on noin kaksi metri pitkän varren päässä leuat, joilla tartutaan kiinni terään. Vetolaite vaatii pitkän varren, sillä useissa tapauksissa kaapimenterä joudutaan irrottamaan sekä asentamaan kaukana terästä, esimerkiksi hoitosillalta käsin. Tällä hetkellä leuat ovat melko painavat, minkä vuoksi käyttäminen voi olla haasteellista. Leukojen säätäminen tapahtuu kiertämällä varren päässä sijaitsevasta kahvasta, jolloin rungon sisällä kulkeva kierretanko kiristää tai löysää leukoja. Tämä aiheuttaa ongelmatilanteita, sillä useissa tapauksissa käyttäjä ei ole varren päässä, kun leukojen tarvitsee säätää. Rakenteeseen tulisi tehdä muutoksia, jotka mahdollistavat leukojen lukitsemisen lähempänä itse leukarakennetta. Vetolaitteen rakenne on ruostumatonta terästä ja leuoissa on hammastukset terään tarrautumista varten. Tämä hammastus vaurioittaa useissa tapauksissa uutta vaihdettavaa hiilikuituterää. Kuitenkin jokin tarrautumisen mahdollistava pinta leuoissa on oltava, sillä terä voi olla joissain tapauksissa hyvinkin tiukasti kiinni ja irrottaminen vaatii kovaa vetämistä.

Vetolaite nousi esille haastattelujen yhteydessä ja sille on Valmetilla jo tehty pieni-muotoista tuotekehitystä. Arviointitaulukossa vetolaite nousi korkeimmalle pistesijalle, joten työkalulla on selkeästi potentiaalia tuotekehitykselle. Tuotekehityksen päätavoitteena on kehittää vetolaitteen käytettävyyttä sekä turvallisuutta ja mahdollistaa asentaminen vaurioittamatta terää.

Ideaalinen lopputulos vetolaitteesta olisi kevyempirakenteinen versio, jonka leukojen säätö onnistuu helposti käyttäjäystävällisen etäisyyden päästä leuoista. Lisäksi leukojen materiaali tai rakenne tulisi suunnitella niin, että aikaisemmin aiheutuneita vaurioita ei enää muodostuisi uutta terää asennettaessa. Vetolaitteen valmistuskustannukset tulisi myös pitää samassa luokassa kuin nykyisellä versiolla.

6.2.1 Suunnitteluprosessi: Vetolaite

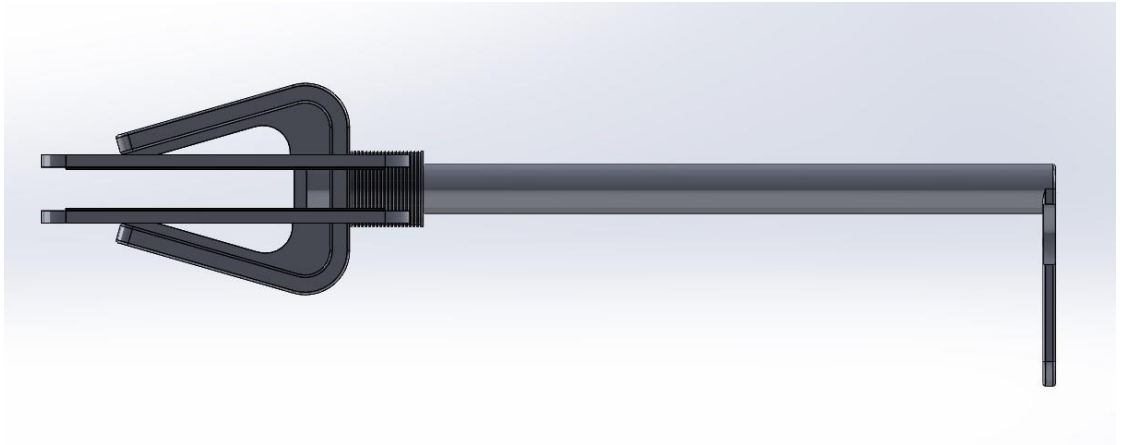
Suunnittelu aloitettiin vaatimuslistan (Liite 7) laatimisella yhdessä Valmetin yhteys henkilön kanssa. Suunnitteluprosessi seurasi jälleen DfAM metodiikan suunnittelu prosessin eri vaiheita, joten prosessi eteni hyvin samankaltaisesti kuin aiemmin läpi käyty telan mittalaitteen suunnitteluprosessi.

Vetolaitteelle (Liite 8) asetetut vaatimukset olivat leukojen helpompi lukitseminen ja näin ollen käytettävyyden parantaminen. Lukitukseen tulisi keksiä jokin helpompi tapa ja sen tulisi tapahtua lähempänä leukoja. Muita vaatimuksia oli, että leuat eivät saa vahingoittaa terää sitä asennettaessa. Terää ulos vedettäessä pieni vaurioituminen ei haittaa, sillä terä vaihdetaan uuteen. Kustannukset tuli pitää samassa luokassa kuin nykyisellä versiolla. Toivomuksena vetolaitteella oli myös, että vetolaitteen varressa olisi mahdollinen väistö hoitosiltoja varten.

Vaatimuksia täyttävää leukojen rakennetta hahmoteltiin aluksi kynällä ja paperilla. Varren suunnittelussa massaa olisi voinut optimoida valmistamalla varren esimerkiksi hiilikuituputkesta, joka yhdistetään tulostamalla valmistettuun mutkarakenteeseen hoitosillan väistämisen mahdollistamiseksi. Tämän mutkarakenteen suunnitteluun olisi voinut hyödyntää generatiivista suunnittelua, jonka avulla olisi saatu tarvittavat voimat kestävä, mutta massaltaan optimoitu rakenne luotua. Kuitenkin rajallisen aikataulun vuoksi varren tarkempi suunnittelu jätettiin työn ulkopuolelle ja tuotekehitykseen varattu aika käytettiin leukojen rakenteen suunnitteluun sekä lukitusmekanismin kehittämiseen.

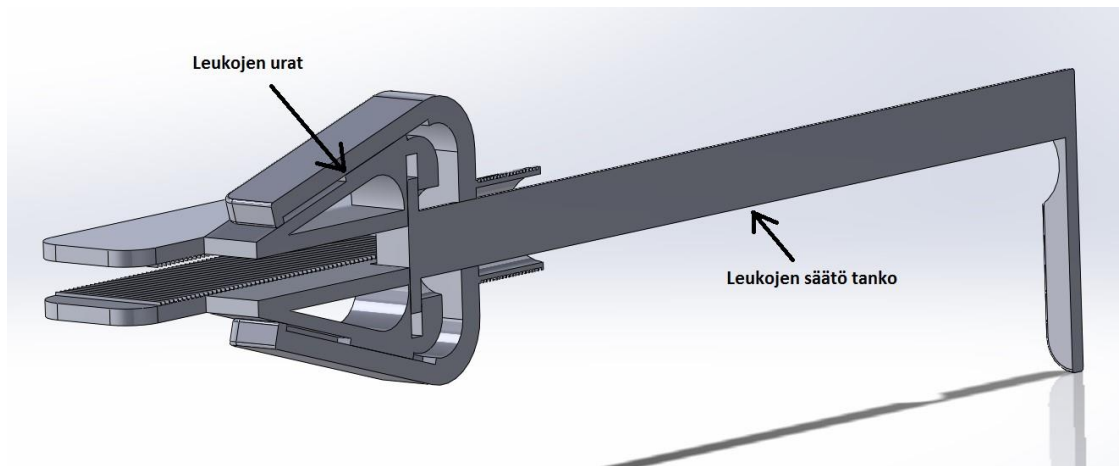
6.2.2 Konsepti 1

Konsepti 1 (Kuvio 19) oli itseään vedettäessä kiristävä kiilamallinen rakenne. Tämän rakenteen avulla voitiin varmistaa, että terää ulos vedettäessä terä ei pääse irtoamaan vetolaitteesta.



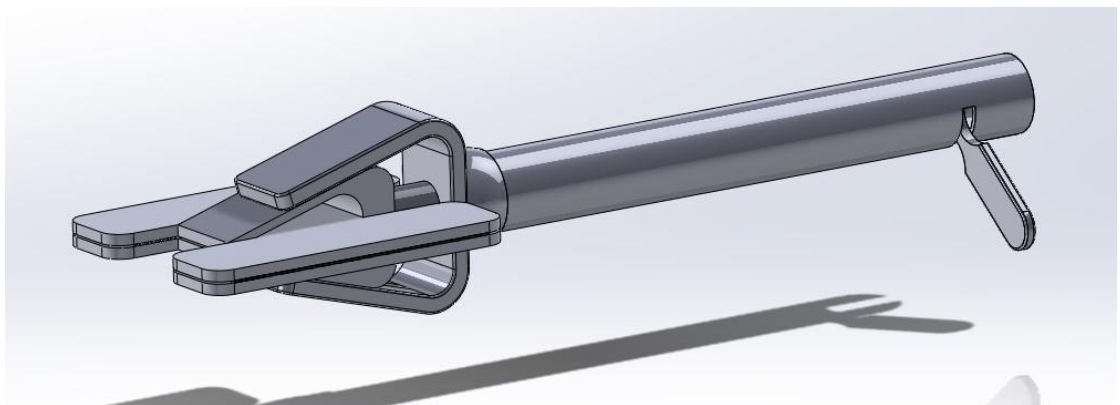
Kuvio 19. Vetolaite: Konsepti 1

Rakenteessa kulki sisällä tanko, jota työntämällä tai vetämällä leukojen asentoa voitiin säätää (Kuvio 20). Tangon pituuden avulla pystyttiin myös määrittämään millä etäisyydellä leukojen säätäminen tapahtuu. Kuviossa 27 näkyy myös rungossa sisällä olevat urat, joiden avulla kiilamaiset leuat ovat kiinnittyneinä runkorakenteeseen. Tanko on mallissa kiinteä osa rakennetta, mutta sen tulisi olla irtonainen, esimerkiksi kiertämällä kiinnitettävä osa. Tämä mahdollistaa leukojen valmistamisen AM:n avulla yhtenä kokonaisuutena, ja tangon valmistuksen perinteisillä menetelmillä. Tangon valmistaminen AM:n avulla ei olisi järkevää eikä kustannustehokasta verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin.



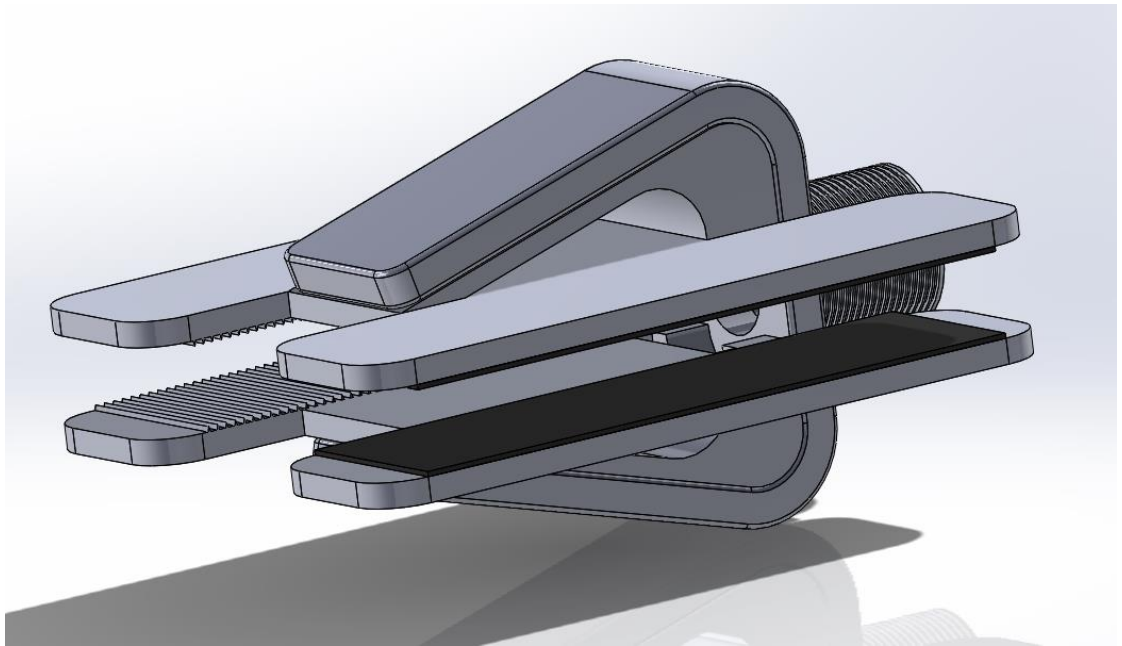
Kuvio 20. Konsepti 1 leikkauskuva

Ongelmaksi konsepti 1 rakenteessa muodostui terän asentaminen. Työnnettäessä vetolaitteella, leuat pyrkivät avautumaan kiilamaisen rakenteen vuoksi. Tähän ratkaisuksi vetolaitteen varteen tehtiin lovitus, jonka avulla leukojen säätötangon sai lukittua kiinni -asentoon (Kuvio 21). Tämä kuitenkin tarkoitti sitä, että leuat sai lukittua vain täysin kiinni -asentoon, jolloin tarkempaa hienosäätöä ei ollut mahdollista tehdä.



Kuvio 21 Konsepti 1 leuat lukittuna

Leukojen rakenne (Kuvio 22) oli kaksipuoleinen, jossa toinen puoli oli hammastettu terän ulos vetämistä varten. Toisella puolella oli tasainen pinta, johon pystyi kiinnittämään jonkin kumimaisen materiaalin estämään terän vaurioitumisen asennettaessa. Nyt työvaiheesta riippuen käyttäjä voi itse päättää kummalla puolella tarttuu terään. Vetolaitteen varren voi kiinnittää leukoihin kierteen avulla.



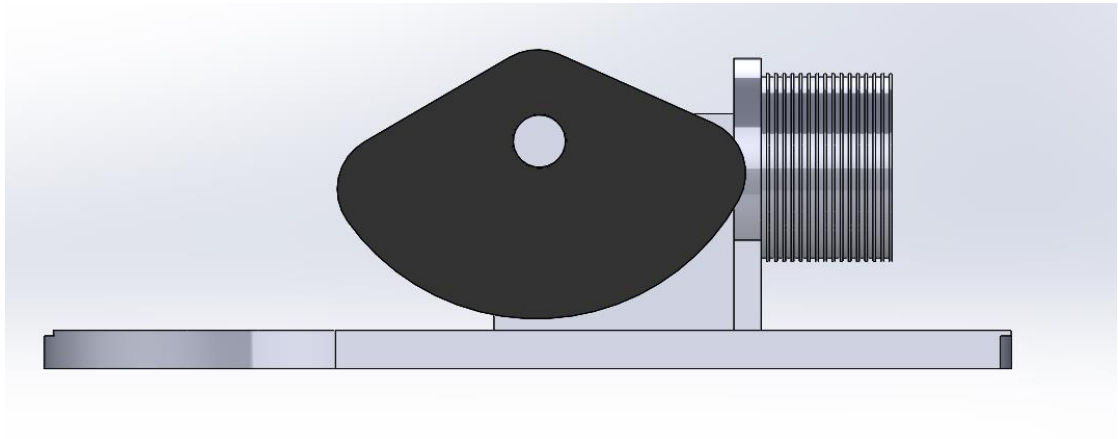
Kuvio 22 Konsepti 1 Leukojen rakenne

Materiaalia lisäävän valmistuksen avulla koko leukarakenteen voi valmistaa yhdellä tulostuksella. Koneistamalla hidas valmistein hammastus voidaan AM:n avulla tulostaa suoraan rakenteeseen. Jos materiaalin suihkutusta menetelmällä tuotettu leukarakente tulisi kestävämmän siihen vedettäessä kohdistuvat voimat, voisi AM:n avulla tulostaa molemmat puolet, hammastuksen sekä pehmeän kumimaisen rakenteen, saman tulostuksen aikana.

Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaisi myös esimerkiksi hiilikuituvahvisteisen muovin tulostuksen, jolloin leukojen rakenteesta saisi kestävä, mutta kevyen. Rakenteen tulisi vielä optimoida, jotta AM valmistuksesta saisi kaikista parhaimman hyödyn. Tämä kuitenkin jäi työssä tekemättä rajallisen aikataulun vuoksi.

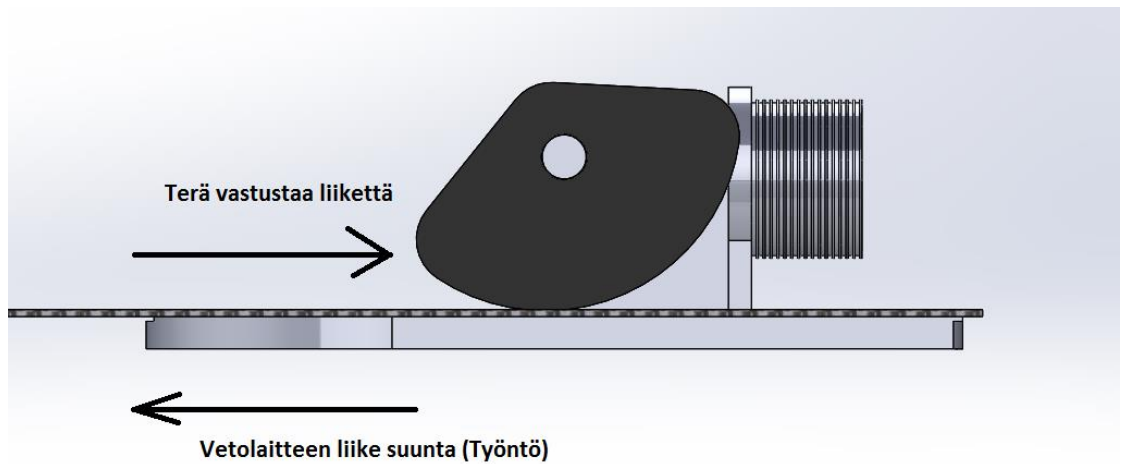
6.2.3 Konsepti 2

Toinen konsepti terään kiinnittymistä varten oli puoliympyrämainen epäkeskeinen kappale (Kuvio 23), joka tarttuu terään kiinni ja kiristyy terää vedettäessä sekä työnnettäessä.



Kuvio 23 Konsepti 2 Epäkeskeinen kappale

Kun vetolaite osuu terän pintaan, tarttuu vapaasti pyörivä kappale terän mukaan liikkeeseen. Epäkeskeisyyden ansiosta alkaa kappale kääntyessään kiristämään terää vasten alemmaa rakennetta (Kuvio 24). Kappaleen geometrian ansiosta kiristyminen tapahtuu kumpaankin suuntaan tahansa epäkeskeinen kappale alkaa pyörähtämään.



Kuvio 24 Konsepti 2 Terään kiinnittyminen

Koska kappale kiristää terän asennettaessa sekä ulos vedettäessä, ei olisi vetolaitteessa tarvetta kahdelle eri toiminta puolelle, kuten ensimmäisessä konseptissa. Ongelmaksi tulikin kappaleen materiaali, sillä kumimainen rakenne, joka painuisi hie-man kasaan puristuessa terään, tarttuisi paremmin terään kiinni. Kumi ei kuitenkaan välttämättä ole tarpeeksi kestävä materiaali terää ulos vedettäessä, jos terä on jumitunut paikalleen.

AM avulla olisi mahdollista tulostaa myös kumimaista materiaalia, jonka rakenteseen voisi tehdä sisäisiä onkaloita mahdollistamaan paremman kasaan puristumisen terään kiinnittyessä. Myöskin kahden eri materiaalin tulostus on muovista mahdollista, joten kappaleeseen voisi tehdä toiselle puolelle hammastusta paremman tarttumisen mahdollistamiseksi terää vedettäessä.

Konsepti 2 vaatisi prototyypin valmistamista ja testausta ennenkuin voi todeta rakenteen toimivuutta todellisessa tilanteessa.

7 Tulokset

Opinnäytetyön tavoitteena oli vastata työn alussa esitettyihin tutkimuskysymyksiin sekä tutkia AM:n hyödyllisyyttä Valmetin työkalutuotannon valmistusmenetelmänä. Pelkän tutkimustyön sekä tietoperustan tueksi työssä tuotettiin myös kaksi tapauskohtaista kehitystutkimusta Valmetin työkalutuotannosta valikoituneille työkaluille.

- Miksi käyttää materiaalia lisäävää valmistusta työkalutuotannossa?

Materiaalia lisäävä valmistus antaa yritykselle mahdollisuuden tarttua nopeasti tuotannossa havaittuihin puutoksiin tai ongelmiin. Entistä enemmän teollisuuden parissa, alasta riippumatta, yritykset investoivat omiin AM-laitteistoihin, joiden avulla ne voivat valmistaa omia työkaluja helpottamaan tai nopeuttamaan tuotantoansa. Työkalutuotanto on yksi ensimmäisiä askeleita kohti AM-valmistuksen suurempaa hyödyntämistä, esimerkiksi omien tuotteiden parissa, ja monissa tapauksissa työkalutuotanto hyötyy huomattavasti jo melko yksinkertaisten muovisten ohjureiden tai jigien valmistuksesta. Materiaalia lisäävän valmistuksen avulla voidaan valmistaa kevyempiä, käyttäjäystävällisempiä sekä räätälöityjä erikoistyökaluja, mikä edesauttaa työturvallisuutta sekä työhyvinvointia. AM-menetelmien avulla työkalujen valmistaminen myös nopeutuu huomattavasti, sillä valmistus voidaan parhaassa tapauksessa tehdä jopa yrityksen sisäisesti omalla AM-laitteistolla.

Tämän opinnäytetyön tuloksena saatiin kehitettyä kaksi työkalua, jotka hyötyivät AM-valmistuksesta. Telan mittalaitteen valmistuskustannukset putosivat puoleen alkuperäisestä, massaa saatiin vähennettyä ja lisäksi mittalaitteeseen pystyttiin lisäämään useita uusia ominaisuuksia. On kuitenkin otettava huomioon, että kyse on vielä prototyypistä, joten valmiin mittalaitteen kustannukset sekä massa tulevat muuttumaan. Jos nylonin rakenne ei esimerkiksi kestä käytössä ja mittalaite joudutaan tulostamaan alumiinista, nousevat kustannukset huomattavasti. Kuitenkin saman raken-

teen alumiinista tulostetun versionkin massa on huomattavasti vähemmän kuin alkuperäisellä mittalaitteella. Massan vähentäminen paransi myös mittalaitteen käytettävyyttä sekä työturvallisuutta.

Vaikka kaapimenterän vetolaitteen kehitys jäi konsepti tasolle, oli huomattavissa, että AM valmistukselle suunniteltaessa olisi rakenteesta voitu valmistaa kevyempi sekä käyttäjäystävällisempi. Kustannuksien vertailu vaatii vielä tarkempaa tutkimusta, mutta jos rakenne tulisi kestäväksi siihen kohdistuvat voimat hiilikuitu varrella sekä muovista tulostetulla leukamekanismilla, eivät kustannukset luultavasti tulisi ainakaan nousemaan entiseen verrattuna. Vetolaitetta tulisi jatkokehittää vielä pidemmälle sekä tehdä materiaalin sekä rakenteen optimointia, että parhaimmat mahdolliset hyödyt AM valmistuksesta saataisiin irti.

- Mitkä ovat Valmet Technologies:n kannalta merkittävimmät kohteet työkalutuotannossa, joissa materiaalia lisäävää valmistusta olisi perusteltua käyttää?

Työkalutuotannosta kartoitettiin sopivia käyttökohteita järjestämällä esityksiä sekä haastatteluja pienryhmissä. Yhteensä osallistuvia henkilöitä oli noin 30 ja haastattelujen avulla saatiin kerättyä 21 erilaista ideaa käyttökohteista. Parhaiten lopullisen arvioinnin perusteella sijoittuneet työkalut olivat erikoistyökaluja sekä mittalaitteita. Näissä kahdessa kategoriassa oli selkeästi useita potentiaalisia vaihtoehtoja, jotka hyötyisivät AM valmistuksesta.

Arvioinnissa kuusi korkeimmalle sijoittunutta käyttökohdetta olivat:

1. Vetolaite
2. Pakka-avaimet
3. Telan mittalaite
4. Laipoituspuristin
5. Mittalaite
6. Hiekkatulosteet valuprosessissa

Suurimpia hyötyjä, joita materiaalia lisäävä valmistus tuo työkalutuotantoon oli käytettävyyden sekä työturvallisuuden parantaminen. Merkittävimmät kohteet työkalutuotannossa olikin sellaiset työkalut, joita käytettiin manuaalisesti tai jouduttiin kuljettamaan mukana pidempiä aikoja. Useimmissa potentiaalisissa käyttökohteissa jo pelkän massan vähentäminen AM:n avulla olisi tuonut suuria hyötyjä käytettävyyden kannalta, mutta AM:n korkeiden kustannuksien vuoksi merkittävimmät kohteet käyttää materiaalia lisäävää valmistusta olivat sellaisia, joissa valmistusmenetelmä mahdollisti myös jonkinlaista tuotekehitystä.

- Millainen suunnitteluprosessi materiaalia lisäävällä valmistuksella tuotetulla kappaleella on?

Työssä esitettiin Design for Additive Manufacturing (DfAM) metodiikka, jonka vaiheita seuraamalla työssä kehitettävienkin työkalujen suunnitteluprosessit etenivät. AM valmistettavien kappaleiden suunnittelussa kannattaa ottaa CAD ohjelmistot mukaan suunnitteluun heti suunnittelun alkumetreiltä asti. Kun rakennetta aletaan optimoimaan heti ensimmäisten vaiheiden aikana, saadaan lopputuloksista mahdollisimman kevytrakenteiset sekä kustannustehokkaat valmistettavat.

AM valmistetun kappaleen suunnittelun tärkeimpiä vaiheita on tarkka lähtötietojen määrittäminen sekä asetettujen vaatimuksien ja toiveiden huomioiminen. Vaatimusta on hyvä työväline näiden kirjaamiseen. Lähtötiedot määrittävät mihin suuntaan suunnittelu alkaa ohjautua, ja esimerkiksi generatiivisen suunnittelun hyödyntäminen vaatii, että kaikki raja-arvot kappaleelle on tiedossa. Valmistuksen asettamiin rajoitteisiin ei tule kiinnittää ideointivaiheessa liikaa huomiota, sillä se voi haitata toiminnallisuuslähtöistä lähestymistapaa. Ideoinnin jälkeen suunnitteluvaiheessa tulee huomioida valmistustekniset rajoitteet ja pyrkiä välttämään niitä.

Myös kappaleeseen kohdistuvat voimat tulee olla määritettynä, sillä kaikki CAD optimointi työkalut perustuvat siihen, että kappaleeseen vaikuttavat voimat ovat tiedossa. Optimointi työkalut pyrkivät sijoittamaan materiaalia vain sinne, missä rakenne sitä voimien kestämissen vuoksi tarvitsee. Tästä syystä liiallinen optimointi, tai liian vähäiseksi arvioidut voimat, voivat olla haitallisia ja tuloksena voi syntyä rakenteita, jotka eivät kestä todellisessa tilanteessa

Työssä käytiin läpi myös yleisiä AM valmistukseen liittyviä suunnitteluohjeistuksia, joita noudattamalla saadaan suurin osa itse valmistukseen liittyvistä seikoista huomioitua jo suunnittelun aikana. Opinnäytetyössä kappaleessa neljä (4) läpikäytyä suunnittelu ohjeistukset ovat yleispäteviä, jotka pätevät melkein kaikilla AM valmistusmenetelmillä. Ottamalla nämä seikat huomioon suunnittelussa sekä seuraamalla DfAM ohjeistuksia voidaan suurimmat suunnittelu virheet välttää, sekä iso osa AM mahdollistamista hyödyistä hyödynnettyä kappaletta valmistettaessa.

7.1 Johtopäätökset

Materiaalia lisäävä valmistus on vain yksi valmistusmenetelmä muiden joukossa, eikä suinkaan ainut oikea tapa valmistaa kappaleita. AM avaa mahdollisuuksia monille uusille geometrioille sekä rakenteille, mutta valmistus vaatii aina suunnittelua sekä tuotekehitystä, etenkin jos halutaan saada kaikista suurin hyöty irti materiaalia lisäävästä valmistuksesta. Sopivien käyttökohteiden valitseminen sekä löytäminen itsesäänkin on jo aikaa vievää ja vaatii ymmärrystä materiaalia lisäävästä valmistuksesta.

Sopivien käyttökohteiden löytyessä AM voi kuitenkin antaa suuria hyötyjä, kuten työssä kehitetyissä työkaluissa voitiin huomata. Materiaalia lisäävän valmistuksen avulla on mahdollista tehdä tuotekehitystä, jonka avulla saadaan turvallisempia, ympäristöystävällisempiä sekä silti kustannustehokkaampia työkaluja. Käyttökohteita tulisi etsiä työkalutuotannossa lisää ja etenkin sellaisia, joissa työkalu voidaan suunnitella alusta asti AM valmistukselle sekä mahdollisesti räätälöidä käyttäjälle sopivaksi.

Tässä työssä käyttökohteita etsittiin valmiista työkaluista, joiden uudelleen suunnittelu AM valmistukselle tuotti hyötyjä, mutta ei pyritty luomaan uusia työkaluja tuotannon apuvälineiksi tai tuotannon tehostamiseksi. Näiden käyttökohteiden löytäminen vaatisi työkalun käyttäjiltä ymmärrystä AM valmistuksesta, jotta he löytäisivät sopivia käyttökohteita omasta työympäristöstään.

7.2 Jatkotutkimusaiheet

Käyttökohteita kartoittaessa esille nousi valumuotit, sekä niiden valmistus. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa myös hiekan tulostamisen, ja valumuottien 3D-tulostusta tehdään jo Suomessakin. Hiekkatulosteet valuprosessissa nousi myös opinäytetyössä löytyneiden potentiaalisten käyttökohteiden arvioinnissa kuudennelle sijalle. Tämän opinäytetyön aikataulu ei riittänyt valumuottien valmistuksen syvällisempään tarkasteluun, mutta niiden parissa huomattiin mahdollisia hyötyjä kustannussäästöissä sekä valmistusajan lyhentämisessä. Valumuottien valmistus AM avulla vaatii kuitenkin tarkempaa tutkimusta.

Myös AM:n ympäristöystävällisyyttä tulisi tutkia syvällisemmin. AM:n ympäristöystävällisyys verrattuna perinteiseen valmistukseen perustuu vähäisen hukkamateriaalin syntymiseen valmistuksen aikana, sekä valmistuksen välikäsien sekä ylimääräisen logistiikan vähenemiseen. Tutkimuksissa tulisi kuitenkin ottaa huomioon jo raakamateriaalien valmistus sekä tulostusprosessien energiankulutus. Jossain AM prosesseissa on myös havaittu ilmenevän terveydelle haitallisia päästöjä, joiden määrää ja haittavaikutuksia tulisi tutkia tarkemmin.

8 Pohdinta

Työssä suurimpia haasteita oli aikataulu, jonka syystä kehitystyö jäikin etenkin toisen valitun kehityskohteen osalta melko lyhyeksi. Toisaalta suuren osan työhön käy-
tystä ajasta vei käyttökohteiden kartoitus työkalutuotannosta, sillä erilaisia esityksiä
sekä haastattelutilaisuuksia täytyi järjestää useita monille eri ryhmille. Haasteita
käyttökohteiden löytämisessä aiheuttikin työkalujen käyttäjien vähäinen lähtötieto
materiaalia lisäävän valmistuksen parista, sillä saattoi olla, että osa esityksiin osallis-
tuvista henkilöistä ei ollut varsinaisesti ollenkaan tietoinen materiaalia lisäävästä val-
mistuksesta, tai sen mahdollistamista hyödyistä. Tästä syystä käyttökohteiden keksi-
minen heti pidettyjen AM esityksien jälkeen saattoi olla hieman haastavaa ja var-
masti useita potentiaalisia vaihtoehtoja jäi vielä huomioimatta työkalutuotannosta.
Työkalujen kartoittamiseen olisi täytynyt varata mielestäni enemmän aikaa ja tuotan-
non puolella havainnoimalla olisi varmastikin löytänyt käyttökohteita, etenkin erilai-
sia kannakkeita, ohjureita ja jigejä. Kuitenkin käyttökohteita löytyi kartoituksen avulla
useita ja työhön valikoituneet kehitettävät työkalut olivat hyviä esimerkkejä siitä,
että AM on valmistusmenetelmänä hyödyllinen työkalujen valmistuksessa.

Valmistusmenetelmien vertailussa toisiinsa oli haasteena se, että valikoituneet työ-
kalut suunniteltiin täysin uudelleen ja niihin lisättiin uusia ominaisuuksia sekä tehtiin
materiaali muutoksia. Tästä syystä esimerkiksi kustannuksien vertailu valmistusme-
netelmien välillä on vaikeaa. AM valmistettu tuote ei ole enää lainkaan sama tuote
kuin alkuperäinen perinteisillä valmistusmenetelmillä tuotettu. Esimerkiksi telanmit-
talaitteeseen lisättiin useita eri ominaisuuksia ja muutettiin rakennetta huomatta-
vasti. Voikin olla siis, että valmistuskustannukset lopullisella tuotteella nousevat ver-
rattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin, mutta AM avulla on voitu tehdä aivan uu-
denlaista tuotekehitystä, joka on parantanut esimerkiksi tuotteen käytettävyyttä.
Mielestäni siis valmistusmenetelmiä vertailtaessa tulisi huomioida mahdolliset AM
valmistuksen ja uudelleen suunnittelun hyödyt, eikä käyttää pelkkiä kustannuksia
mittarina päättämään eri valmistusmenetelmien välillä.

Opinnäytetyö oli tutkimuksellinen kehittämisprojekti, joka piti sisällään laadullista sekä määrällistä tutkimusta. Laadullisen tutkimusosuuden avulla luotiin syvälinen ymmärrys työssä tutkittavasta aiheesta, ja teoriataustan rakentamiseen panostettiin vahvasti työn alussa. Opinnäytetyön käyttökohteiden kartoitusvaihe piti sisällään esityksiä sekä haastattelutilanteita, jotka vaativat, että riittävän syvälinen ymmärrys käsiteltävästä aiheesta on saavutettu.

Lähteiden kriittinen arviointi oli tärkeää, sillä lähteiden saatavuus oli välillä haasteellista. Työssä käsiteltiin melko tuoreita eri teknologioita sekä suunnitteluohjelmistoja, joten lähteet olivat useasti erilaisia blogikirjoituksia sekä lehtien artikkeleita. Etenkin tällaisten lähteiden valitsemisessa täytyy perehtyä kirjoittajaan ja heidän taustaansa. Monesti lähteissä saattoi olla havaittavissa esimerkiksi kirjoittajan oman yrityksen tarjoaman ohjelmiston mainospuheita. Lähteet olivat myös lähtökohtaisesti aina ulkomaankielisiä, sillä Suomessa ei olla vielä AM:n parissa samalla tasolla kuin maailmalla.

Määrällinen tutkimusosuus koostui aineiston keräämisestä haastattelujen sekä havainnointien avulla. Vaikka vapaamuotoinen haastattelu poiki paljon potentiaalisia käyttökohteita työkaluista, oli se tutkimuksen toistettavuuden kannalta huono ratkaisu. Haastattelut eivät noudattaneet mitään selkeää rakennetta, jota jäljittelemällä tutkimuksen voisi toistaa uudelleen ja tarkastella olisiko saadut tulokset samankaltaisia. Haastattelut ohjautuivat pitkälti erilaisten henkilökemioiden sekä keskustelun mukaisesti, joten uudelleen järjestettävä haastattelutilanne tai eri henkilöiden osallistuminen, voisi muuttaa haastattelun avulla kerättyä aineistoa. Kuitenkin haastatteluisissa pidettiin aina pöytäkirjaa, johon kaikki osallistujat sekä haastatteluissa esille nousseet asiat on kirjattu muistiin.

Työn tavoitteena ollut prototyyppien valmistus jäi toisen valitun kohteen osalta tekemättä, ja toisen valikoituneen työkalun valmista prototyyppiä ei keretty aikataulun

puitteissa testaamaan todellisessa tilanteessa. Tästä syystä opinnäytetyössä saavutetut tulokset kärsivät. Eri valmistusmenetelmien vertailu oli haastavaa ilman toista prototyyppiä ja esimerkiksi turvallisuuden ja käytettävyyden parantumista voitiin arvioida pelkästään valmiin prototyypin massan vähentämisen pohjalta. Koska työkalujen toimintaa ei päästy testaamaan, ei myöskään uusien kehitettyjen ominaisuuksien tuomia hyötyjä voitu todentaa käytännössä.

Kuitenkin työn avulla lisättiin AM ymmärrystä kaikkien osapuolien keskuudessa, ja työlle asetettuihin tutkimuskysymyksiin saatiin vastaukset. Ymmärrys lisääntyi etenkin Valmetin henkilökunnan osalta, sillä järjestettävien esityksien osallistujista suurimmalla osalla ei ollut paljoa lähtötietoja AM:stä. Lisäksi Valmet sai listan potentiaalisia käyttökohteita sekä jatkotutkimusaiheita opinnäytetyön pohjalta. Vaikka prototyyppien valmistus jäi vaiheeseen, pystyttiin jo tämän työn aikana suoritetun kehitystyön avulla toteamaan, että kehityskohteiksi valikoituneet työkalut olisi ollut hyödyllistä valmistaa AM:n avulla.

Lähteet

A Comprehensive Guide to Material Jetting 3D Printing. 2018. Menetelmän kuvaus AMFG:n internetsivustolla. Viitattu 30.3.2019. <https://amfg.ai/2018/06/29/material-jetting-3d-printing-guide>

Abbey, T. 2018. What is Topology Optimization? A Primer for Design Engineers. Artikkelin PTC:n internetsivustolla. Viitattu 20.4.2019. <https://www.ptc.com/en/cad-software-blog/what-is-topology-optimization>

Cotteleer, M. Neier, M. Crane, J. 2014. 3D opportunity in tooling. Artikkelin Viitattu 15.3.2019. <https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-tooling/3D-opportunity-in-tooling1.pdf>

Design the unseen optimize performance. N.d. Artikkelin Sandvik Oy:n internetsivulla. Viitattu 20.3.2019 <https://www.additive.sandvik/en/the-additive-advantage/design-the-unseen-optimize-performance/>

Grames, E. 2018. 3D Printing Layer Height – How Much Does It Matter?. Artikkelin All3DP internetsivustolla. Viitattu 16.5.2019. <https://all3dp.com/2/3d-printer-layer-height-how-much-does-it-matter/>

Finite Element Mesh Refinement. 2016. Artikkelin Comsol:n internetsivustolla. Viitattu 20.4.2019. <https://www.comsol.com/multiphysics/mesh-refinement>

Fused Deposition Modeling. N.d. Menetelmän kuvaus Custompartnet internetsivustolla. Viitattu 26.3.2019. <https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>

Gebisa, A. & Lemu, H. 2017. A case study on topology optimized design for additive manufacturing. IOP Conf. Series: Material Science and Engineering 276. Viitattu 22.4.2019 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/276/1/012026/pdf>

Getting the most out of metal 3D printing N.d. Artikkelin Stratasys Ltd:n internetsivulla. Viitattu 29.3.2019. <https://www.stratasysdirect.com/resources/white-papers/metal-3d-printing-design-process-controls-dmls>

GM and Autodesk are using generative design for vehicles of future. 2018. Uutinen 3D Printing Progress internetsivustolla. Viitattu 28.4.2019. <https://www.3dprintingprogress.com/articles/14248/gm-and-autodesk-are-using-generative-design-for-vehicles-of-the-future>

Hoffren, J. 2006. Suomella on raskas ekologinen jalanjälki. Artikkelit Tilastokeskuksen internetsivustolla. Viitattu 10.4.2019 https://www.stat.fi/tup/tietotrendit/tt_10_06_ekologinen_jalanjalki.html

Huckstepp, A. 2019. Blogikirjoitus Digital Alloys:n internetsivustolla. Viitattu 10.4.2019. <https://www.digitalalloys.com/blog/energy-consumption-metal-additive-manufacturing/>

Introduction to Finite Element Analysis or Finite Element Method. N.d. Insinööriopintojen oppimateriaali Victorian yliopiston internetsivustolla. Viitattu 15.4.2019. https://www.engr.uvic.ca/~mech410/lectures/FEA_Theory.pdf

ISO/ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 24.2.2017. Viitattu 7.3.2019. <https://janet.finna.fi>, SFS Online.

Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas.

Klahn ,C., Meboldt, M. & Stark, A. 2018. Additive Manufacturing: Cost Factors and Cost Optimization. Artikkelit Spotlightmetal internetsivustolla. Viitattu 6.4.2019. <https://www.spotlightmetal.com/additive-manufacturing-cost-factors-and-cost-optimization-a-734518/>

Kuikka, J. 2017. Survey on the Possibilities of Utilizing Metal Additive Manufacturing at an Industrial Company. Opinnäytetyö, AMK. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, tekniikan ala, konetekniikan tutkinto-ohjelma. Viitattu 20.3.2019. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018060112041>

Materiaalin pursotus. N.d. Tietopankki Savonian internetsivustolla. Viitattu 26.3.2019. <http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/52-materiaalin-pursotus>

Marc. 2017. Binder Jetting. Viitattu 29.3.2019 <https://www.bintoa.com/binder-jetting/>

Marc. 2017. High Level Processes: Powder Bed Fusion. Artikkelin Bintoa nettisivustolla. Viitattu 21.3.2019. <https://www.bintoa.com/powder-bed-fusion/>

Marc. 2017. Material Jetting. Artikkelin Bintoa:n internetsivustolla. Viitattu 22.3.2019. <https://www.bintoa.com/material-jetting/>

Mistä 3D-tulostuksen hinta muodostuu? 2018. Blogikirjoitus 3D Formtechin internetsivustolla. Viitattu 4.4.2019. <https://3dformtech.fi/blogi/mista-3d-tulostuksen-hinta-muodostuu/>

Mäkinen, S. 2018. Generative design – suunnittelun uusi sukupolvi. Blogikirjoitus Savonian internetsivustolla. Viitattu 28.4.2019 <https://blogi.savonia.fi/3dtulos-tus/2018/12/05/generative-design-suunnittelun-uusi-sukupolvi/>

Orquera ,M., Campocasso ,S. & Millet ,D. 2017. Design for additive manufacturing method for a mechanical system downsizing. Procedia CIRP 60, 223-228. Viitattu 12.4.2019 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117301014>

Pahl, G. & Beitz, W. 1990. Koneensuunnitteluoppi. Metalliteollisuuden kustannus Oy.

Pizzirani, A. 2015. After the Hype: The Way Forward for 3D Printing. Artikkelin. Viitattu 15.3.2019. <https://careeradvancement.uchicago.edu/sites/default/files/ucib-journal/3d-printing-after-the-hype.pdf>

Raukola, J. 2019. Innovation Expert (AM). Wärtsilä. AM-seminaari 12.3.2019. https://www.merinoa.fi/wp-content/uploads/2018/10/Raukola-Juho_Vaasa-AM-seminaari.pdf

Redwood, B. N.d. Additive Manufacturing Technologies: An Overview. Viitattu 22.3.2019 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview#powder-bed-fusion>

Redwood, B., Schöffler ,F. & Garret ,B. 2018. The 3D Printing Handbook. Ensimmäinen painos, kolmas vedos. Amsterdam.

RD Velho yritysesittely. 2019. Yritysesittely RD Velhon internetsivulla. Viitattu 15.3.2019. <https://www.rdvelho.com/me-luomme-alykasta-maailmaa/>

Sibernagel, C. 2018. Additive Manufacturing 101-5: What is powder bed fusion? Artikkele Canada Makes internetsivustolla. Viitattu 20.3.2019. <http://canadamakes.ca/what-is-powder-bed-fusion/>

Society of Manufacturing Engineers. 2003. Fundamentals of Tool Design. Viides painos. Dearborn, Michigan.

Valmet lyhyesti. 2019. Yritysesittely Valmetin internetsivulla. Viitattu 15.3.2019. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/>

Valmetin strategia. 2019. Yrityksen strategian esittely Valmetin internetsivuilla. Viitattu 16.3.2019 <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/strategia/>

Varotsis, A. N.d. Introduction to Binder Jetting 3D printing. Artikkele 3DHubs:n internetsivustolla. Viitattu 22.3.2019. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing>

Varotsis, A. N.d. Introduction to Metal 3D printing. Artikkele 3DHubs:n internetsivustolla. Viitattu 16.5.2019. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing>

Vuosikatsaus. 2018. Valmetin vuosikatsaus vuodelle 2018 Valmetin internetsivustolla. Viitattu 7.4.2019 https://www.valmet.com/globalassets/investors/reports--presentations/annual-reports/2018/valmet_vsk_2018_fi_secured.pdf

What is Binder Jetting? N.d. Menetelmän kuvaus Exonen Internetsivustolla. Viitattu 27.3.2019 <https://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-is-Binder-Jetting>

What is FEA Finite Element Analysis?. N.d. Artikkele SimWiki:n internetsivustolla. Viitattu 20.4.2019. <https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/fea/whatis-fea.html>

3D Printing. N.d. Esittely erilaisista AM tuotteista Formulaprototypesin internetsivustolla. Viitattu 30.3.2019. http://formulaprototypes.com/?page_id=136

Liitteet

Liite 1. Potentialisten käyttökohteiden arviointitaulukko (Salassa pidettävä)

Poistettu julkisesta versiosta

Liite 2. Telan mittalaite (Salassa pidettävä)

Poistettu julkisesta versiosta

Liite 3. Vaatimuslista: Telan mittalaite (mukaillen Pahl & Beitz, 1990, 68) (Salassa pidettävä)

Poistettu julkisesta versiosta

Liite 4. Generatiivisen suunnittelun raja-arvot (Salassa pidettävä)

Poistettu julkisesta versiosta

Liite 5. Mittalaitteen runko jalkojen kanssa (Salassa pidettävä)

Poistettu julkisesta versiosta

Liite 6. Prototyyppi telan mittalaitteesta (Salassa pidettävä)

Poistettu julkisesta versiosta

Liite 7. Vaatimuslista: Vetolaite (mukaihen Pahl & Beitz, 1990, 68) (Salassa pidettävä)

Poistettu julkisesta versiosta

Liite 8. Vetolaite (Salassa pidettävä)

Poistettu julkisesta versiosta