



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Teemu Tuomaala

LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN
HYÖDYNTÄMINEN
SÄHKÖMOOTTORITUOTANNOSSA

Tekniikka
2018

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Teemu Tuomaala
Opinnäytetyön nimi	Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen sähkömoottorituotannossa
Vuosi	2018
Kieli	suomi
Sivumäärä	67 + 3 liitettä
Ohjaaja	Osku Hirvonen & Jouni Ikäheimo

Lisäävä valmistus on nopeasti kehittyvä sekä yleistyvä tuotantotekniikka, joka tarjoaa uusia mahdollisuuksia tuotteen suunnittelussa sekä valmistuksessa. Opinnäytetyön aiheena on tarkastella lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia ja hyödynnettävyyttä sähkömoottorituotannossa. Opinnäytetyö suoritettiin ABB Motors and Generators -yksikön tutkimus ja tuotekehitys -osastolle.

Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää mahdollisia lisäävillä menetelmillä tuotettavia osia, työkaluja tai muita käyttökohteita. Tavoitteena oli myös tuoda esille lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia ja huomioitavia asioita tuotteiden suunnittelussa sekä esitellä lisäävän valmistuksen teoriataustaa. Tavoitteet saavutettiin perehtymällä lisäävän valmistuksen tietolähteisiin ja arvioimalla tietojen pohjalta soveltuvia käyttökohteita sähkömoottorituotannossa.

Opinnäytetyössä esitellään sähkömoottorituotannon mahdollisia käyttökohteita, joissa lisäävää valmistusta voisi hyödyntää. Mahdollisista käyttökohteista valittiin sähkömoottorin terästuuletin syvempään tarkasteluun. Terästuuletin suunniteltiin uudelleen huomioiden valmistusmenetelmän mahdollisuudet sekä rajoitteet. Suunnittelussa pyrittiin parantamaan tuuletusominaisuuksia sekä vähentämään tuulettimen massaa. Lisäksi suunnitteluvaiheessa pohdittiin erilaisia tuulettimen kiinnitysvaihtoehtoja sekä testattiin tuulettimen ilmanohjainlevyn vaikutusta tuuletusominaisuuksiin. Uudelleen suunniteltu tuuletin valmistettiin kahdella eri lisäävän valmistuksen menetelmällä, jolloin mahdollistettiin eri menetelmien tarkkuuden ja laadun vertailu.

Valmistetut terästuulettimet osoittautuivat laadukkaiksi sekä mittatarkoiksi, mutta tarkasti toleroitujen pintojen valmistaminen ei lisäävillä valmistusmenetelmillä onnistunut. Terästuulettimen valmistaminen lisäävällä menetelmällä osoittautui kuitenkin kannattavaksi vaihtoehdoksi, sillä tuulettimen ominaisuuksia saatiin parannettua ja kustannukset pysyivät lähes samana. Kaiken kaikkiaan lisäävät valmistusmenetelmät tulee ottaa huomioon perinteisten valmistusmenetelmien rinnalla.

ABSTRACT

Author	Teemu Tuomaala
Title	Utilization of Additive Manufacturing in Electric Motor Production
Year	2018
Language	Finnish
Pages	67 + 3 Appendices
Name of Supervisor	Osku Hirvonen & Jouni Ikäheimo

Additive manufacturing is rapidly developing and growing manufacturing technology which provides new opportunities in the product design and in the production. The subject of this thesis is to investigate the opportunities and utilization of additive manufacturing in electric motor production. This thesis was made for ABB Motors and Generators R&D department.

The aim of this thesis was to find potential components, tools or other targets that can be produced by using additive manufacturing. The purpose was also to introduce the possibilities and the constrains in the product design as well as to provide an overview of additive manufacturing technologies. The aims were reached by studying additive manufacturing from various sources and using the information to evaluate suitable targets in electric motor production.

The thesis presents potential targets in electric motor production where additive manufacturing could be utilized. From potential targets the electric motor steel fan was examined more closely. The steel fan was redesigned considering the possibilities and the constrains of the manufacturing process. As a result of redesigning the ventilation was improved, and the mass was reduced. In the design process alternative fastening methods of the steel fan were considered as well as examined how the air guide plate of the steel fan affects the ventilation. The redesigned steel fan was manufactured by using two different additive manufacturing technologies. In this way it was possible to compare accuracy and quality of different technologies.

The quality and accuracy of the manufactured steel fans were high, but some tolerances were too tight for the additive manufacturing technologies. Manufacturing steel fans by using additive manufacturing technologies still proved to be a profitable option because the features of the fans were improved, and the manufacturing costs remained almost unchanged. All in all, additive manufacturing technologies should be considered in addition to the traditional manufacturing technologies.

Keywords Additive manufacturing, 3D-printing, electric motor and fan

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

LYHENTEET JA MERKINNÄT

1	JOHDANTO.....	10
1.1	Tavoitteet ja rajaus	11
1.2	Menetelmät ja aineisto	11
1.3	Työn tilaaja	12
1.3.1	ABB Suomessa	13
1.3.2	Motors and Generators	13
2	LISÄÄVÄ VALMISTUS.....	15
2.1	Edut.....	17
2.2	Haasteet.....	18
2.3	Lisäävän valmistuksen prosessi	18
2.4	Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät	19
2.4.1	Sideaineen suihkutaus	21
2.4.2	Suorakerrostus.....	22
2.4.3	Pursotus	23
2.4.4	Materiaalin suihkutaus	24
2.4.5	Jauhepetisulatus.....	25
2.4.6	Kerroslaminointi	26
2.4.7	Valokovetus altaassa	28
2.5	Materiaalit	29
2.5.1	Metallit	30
2.5.2	Muovit.....	31
2.5.3	Muut	32
2.6	Jälkikäsittely	32
3	SUUNNITTELUNÄKÖKULMAT.....	34
3.1.1	Suunnittelumahdollisuudet.....	35
3.1.2	Suunnittelurajoitteet	38

4	LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN HYÖDYNNETTÄVYYS	43
4.1	Sähkömoottori.....	44
4.2	Tuotekehitys.....	46
4.3	Työkalut	47
4.3.1	Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen valumenetelmissä.....	47
5	TERÄSTUULETTIMEN VALMISTAMINEN LISÄÄVILLÄ VALMISTUSMENETELMILLÄ	50
5.1	Lähtökohdat	51
5.2	Suunnittelu	52
5.2.1	Kiinnitystapa	53
5.2.2	Tuuletinsiivet	55
5.2.3	Ilmanohjainlevy.....	55
5.3	Tuulettimen tilaus	57
5.4	Tarkastelu.....	58
5.5	Yhteenveto	60
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	63
	LÄHTEET.....	65

LIITTEET

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Metallimateriaalia hyödyntävien lisäävän valmistuksen laitteiden vuosittaisen myynnin kasvu /1/.....	10
Kuvio 2. Vaasassa valmistettavia pienjännitemoottoreita vaativiin olosuhteisiin /7/.....	14
Kuvio 3. Lisäävän valmistuksen käyttökohteiden jakautuminen vuonna 2016 /1/.....	16
Kuvio 4. Sideaineen suihkutusta /16/.....	21
Kuvio 5. Suorakerrostusta /16/.....	22
Kuvio 6. Pursotusta /16/.....	23
Kuvio 7. Materiaalin suihkutusta /16/.....	24
Kuvio 8. Jauhepetisulatus /16/.....	26
Kuvio 9. Kerroslaminointi /16/.....	27
Kuvio 10. Valokovetus altaassa /16/.....	29
Kuvio 11. Palveluntarjoajien materiaali jakauma vuonna 2016 /1/.....	30
Kuvio 12. Hitsattu kappale sekä topologisesti optimoitu kappale, joka on valmistettu lisäävillä menetelmillä /19/.....	36
Kuvio 13. Erilaisia huokoisia rakenteita /20/.....	37
Kuvio 14. Tukirakenteen muodostuminen /18/.....	40
Kuvio 15. Tukimateriaalin muodostuminen kappaleen tukemattomille pinnoille.....	41
Kuvio 16. Oikosulkumoottorin rakenne, vasemmalla D-pää ja oikealla N-pää /24/.....	44
Kuvio 17. Oikosulkurenkaan muotin puolikas, jonka toisella puolella esilämmityskanava ja toisella puolella oikosulkurenkaan muotojen negatiivipinta.....	48
Kuvio 18. Oikosulkurenkaan muotin puolikas, joka mahdollistaa muotin kiinnityksen valukoneeseen.....	49
Kuvio 19. Terästuulettimen osat.....	51
Kuvio 20. Hitsatun terästuulettimen päämitat (Liite 1.).....	52
Kuvio 21. Integroitu normaalikiila sekä ahdistuskiila.....	54
Kuvio 22. Kartiosovite.....	55

Kuvio 23. Uuden tuulettimen poikkileikkaus.....	56
Kuvio 24. Koordinaattimittakone, tarkkuusvaaka sekä pinnankarheusmittari.....	58
Kuvio 25. Tuulettimesta tarkastetut halkaisijat.....	59
Kuvio 26. Terästuuletin valmistettuna kolmella eri menetelmällä.....	61
Kuvio 27. Terästuulettimet molemmilta puolilta kuvattuina.....	62
Taulukko 1. Kaupallisesti käytettyjä nimikkeitä yleisimmille lisäävän valmistuksen menetelmille /2, 10, 15/.	20
Taulukko 2. Yleisimmin käytetyt metallimateriaaliseokset /17/.	31
Taulukko 3. Yleisesti käytettyjä muovilaatuja lisäävässä valmistuksessa /11/. ...	31
Taulukko 4. Esimerkkejä suositeltavista materiaalin vähimmäisvahvuuksista /22/.	42
Taulukko 5. Valmistettavuuteen vaikuttavat tekijät /8/.	43
Taulukko 6. Tuotannolliset tekijät /8/.	43
Taulukko 7. Mittaustulokset.	59

LIITELUETTELO

LIITE 1. Hitsattu terästuuletin (M3BP 71 2P).

LIITE 2. Tuulettimen ilmanohjainlevyn kevennyksen vaikutus tuuletusominaisuuksiin sekä melutasoon.

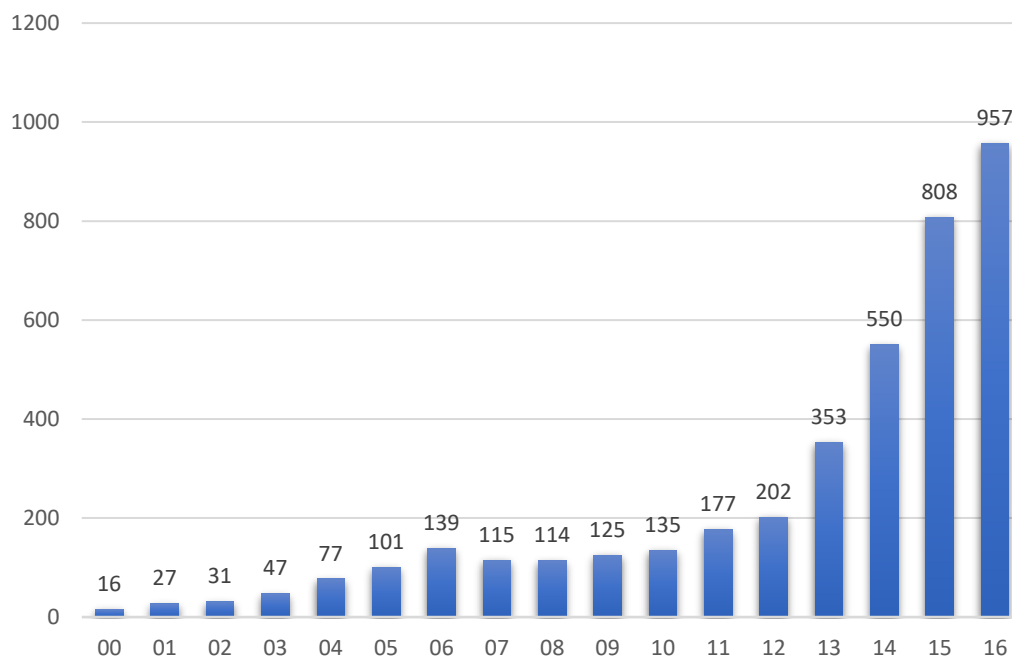
LIITE 3. Uudelleen suunniteltu lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettava terästuuletin.

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D	Kolmiulotteinen (Three Dimensional)
3MF	Tiedostoformaatti (3D Manufacturing Format)
ABB	Asea Brown Boveri
AMF	Tiedostoformaatti (Additive Manufacturing File Format)
ASEA	Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget
ASTM	Kansainvälinen standardisoimisjärjestö (American Society for Testing and Materials)
BBC	Brown, Boveri & Cie
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer-aided Design)
CAM	Tietokoneavusteinen valmistus (Computer-aided manufacturing)
CFD	Numeerinen virtausdynamiikka (Computational Fluid Dynamics)
DFAM	Lisäävän valmistuksen huomioiva suunnittelu (Design for Additive Manufacturing)
DFMA	Valmistuksen ja kokoonpantavuuden huomioiva suunnittelu (Design for Manufacture and Assembly)
HIP	Isostaattinen kuumapuristus (Hot isostatic pressing)
ISO	Kansainvälinen standardisoimisjärjestö (International Organization for Standardization)
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
STL	Tiedostoformaatti (Stereolithography File Format)
UV	Ultravioletti
VTT	Teknologian tutkimuskeskus (Valtion teknillinen tutkimuskeskus)
Ra	Pinnankarheus
Rp0.2	0,2 %:n venymisraja

1 JOHDANTO

Materiaalia lisäävä valmistus on erittäin nopeasti kehittyvä tuotantotekniikka (Kuvio 1), jonka odotetaan lisääntyvän runsaasti lähitulevaisuudessa /1/. Lisävilillä valmistusmenetelmillä on mahdollista valmistaa hyvin monimutkaisia muotoja sekä rakenteita, minkä vuoksi se on alkanut vähitellen syrjäyttämään perinteisiä valmistusmenetelmiä haastavissa sovelluksissa. Lisäävän valmistuksen teolliset käyttökohteet ovat alkaneet siirtyä tuotekehityksen prototyyppien sekä tuotannon työkalujen lisäksi kohti sarjatuotantoa /2/. Teollisessa kehityksessä mukana pysyminen vaatii yrityksiltä perehtymistä lisäävään valmistukseen sekä sen mahdollisuuksiin ja hyödynnettävyyteen yrityksen toiminnassa sekä tuotteissa. Lisävä valmistus on ollut esillä myös ABB Oy Motors and Generators -yksikön tutkimus ja tuotekehitys -osastolla, minkä vuoksi sen hyödynnettävyyteen perehdyttiin tarkemmin tämän opinnäytetyön muodossa.



Kuvio 1. Metallimateriaalia hyödyntävien lisäävän valmistuksen laitteiden vuosittaisen myynnin kasvu /1/.

1.1 Tavoitteet ja rajaus

Opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia sekä hyödynnettävyyttä sähkömoottorituotannossa. Tavoitteena on löytää mahdollisia lisäävillä menetelmillä tuotettavia osia, työkaluja tai muita käyttökohteita sekä tuoda esille lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia ja huomioitavia asioita kappaleiden suunnittelussa. Tavoitteena on myös tuoda tietoa lisäävän valmistuksen eduista sekä haasteista, lisäävistä valmistusmenetelmistä, valmistusprosessista, jälkikäsittelystä sekä käytettävissä olevista materiaaleista. Opinnäytetyössä keskitytään pääasiassa metallimateriaalien valmistukseen lisäävillä menetelmillä. Opinnäytetyössä ei tarkastella lisäävien valmistusmenetelmien laitevalmistajia tai valmistajakohtaisia laitteita.

1.2 Menetelmät ja aineisto

Opinnäytetyön aihe ratkaistaan syventymällä lisäävästä valmistuksesta kertovaan kirjallisuuteen, verkkojulkaisuihin, standardeihin sekä tehtyihin tutkimuksiin. Tietojen pohjalta pyritään saavuttamaan asetetut tavoitteet. Mahdollisista lisäävän valmistuksen käyttökohteista valitaan kohde, joka suunnitellaan tarpeen mukaan uudelleen ottaen huomioon valmistusmenetelmän mahdollisuudet sekä rajoitteet. Suunniteltu kohde valmistetaan lisäävillä valmistusmenetelmillä, jonka jälkeen kohteesta tarkastellaan menetelmän tarkkuus, laatu sekä soveltuvuus kyseisen kohteen valmistusmenetelmäksi.

1.3 Työn tilaaja

ABB-yhtymä muodostui, kun ruotsalainen ASEA ja sveitsiläinen BBC yhdistyivät vuonna 1988. ASEA perustettiin vuonna 1883 ja se oli merkittävästi osallisena Ruotsin sähköistyksessä. 1900-luvun puolivälissä ASEA laajeni sähköntuotantoon sekä kaivos- ja terästeollisuuteen. BBC perustettiin vuonna 1891 ja oli alkujaan erikoistunut sähköntuotantoon sekä turbiineihin, mutta laajensi huomattavasti liiketoimintaansa sähkötekniikan alalla 1900-luvun aikana. Nykyään ABB toimii yli 100 maassa ja työllistää noin 135000 henkilöä. ABB-yhtymän pääkonttori sijaitsee Zürichissä, Sveitsissä ja yhtymän toimitusjohtajana toimii Ulrich Spiesshofer. Vuonna 2016 ABB:n liikevaihto oli 33,8 miljardia dollaria. ABB:n Liiketoiminta on organisoitu neljään divisioonaan, jotka koostuvat eri teollisuuden aloihin ja tuoteryhmiin keskittyvistä liiketoimintayksiköistä /3/:

- Robotics and Motion
Energia- ja tuotantotehokkuutta lisäävät tuotteet, järjestelmät ja palvelut, kuten moottorit, generaattorit, taajuusmuuttajat, ohjelmoitavat logiikat, tehoelektroniikka ja robotit.
- Industrial Automation
Voimalaitosten ja teollisuuden tuotantoprosessien energiatehokkuutta ja tuottavuutta parantavat tuotteet ja järjestelmät öljy- ja kaasuteollisuuden, kaivos-, kemian-, ja lääketieteellisuuden sekä metsä-, metalli- ja meriteollisuuden tarpeisiin.
- Electrification Products
Pien- ja keskijännitete tuotteet sekä -ratkaisut, jotka yhdistävät, suojaavat, valvovat ja mittaavat kaikkien pääteollisuudenalojen sekä asuinrakentamisen erilaisia sähköjärjestelmiä.
- Power Grids
Sähkövoima- ja automaatiotuotteet, -järjestelmät ja -palveluratkaisut asiakkaille, jotka vastaavat sähkövoiman tuotannosta, siirrosta tai jakelusta.

1.3.1 ABB Suomessa

Vuonna 1889 Suomen ensimmäinen sähkötekniikan opettaja Gottfrid Strömberg perusti sähköliikkeen Helsingin Kamppiin. Yhtiöstä muodostui vuonna 1909 Ab Gottfr. Strömberg Oy, jonka nimi lyhennettiin vuonna 1939 muotoon Oy Strömberg Ab. Yhtiön liiketoiminta keskittyi aluksi tasavirtakoneisiin, asuin- ja liikekiinteistöjen valaistuskeskuksiin sekä asennuksiin. Myöhemmin liiketoiminta laajeni kojeiden, vaihtovirtakoneiden, muuntajien ja oikosulkumoottoreiden sekä useiden muiden sähkölaitteiden tuotantoon. Vuonna 1898 yhtiön laajenemisen myötä toiminta siirrettiin Sörnäisten teollisuusalueelle, josta myöhemmin Pitäjännäelle. Vaasaan toiminta laajeni toisen maailmansodan aikana, kun tuotannolle haettiin turvallisempaa sijaintia. 1940-luvulla yhtiö nousi Suomen kymmenen suurimman teollisuusyrityksen joukkoon. Vuonna 1983 Kymi-kymmenen ja Strömberg fuusioitui. Strömbergin osuus siirtyi Asealle vuonna 1986 ja kaksi vuotta myöhemmin Asea yhdistyi BBC:n kanssa ja näin Strömbergistä tuli sen suomalainen tytäryhtiö ABB Oy. /4/

Suomen ABB toimii 22 paikkakunnalla, joista suurimmat tehdaskeskittymät sijaitsevat Vaasassa, Helsingissä, Haminassa sekä Porvoossa. Vuonna 2016 Suomen ABB työllisti noin 5140 henkilöä ja sen liikevaihto oli noin 2,235 miljardia euroa. Tutkimukseen ja tuotekehitykseen investoitiin 129 miljoonaa euroa vuonna 2016. /5/

1.3.2 Motors and Generators

ABB Oy Motors and Generators -liiketoimintayksikkö kuuluu Robotics and Motion -divisioonaan ja työllistää noin 14000 henkeä 36 tehtaassa 11 maassa. Motors and generators -yksikkö kehittää sekä valmistaa moottoreita ja generaattoreita kaikille teollisuudenaloille ja sovelluksiin maailmanlaajuisesti. Suomessa yksikön tehtaot sijaitsevat Vaasassa ja Helsingissä, jotka työllistävät yhteensä 1520 henkilöä. Vaasan tehtaalla on maailmanlaajuinen vastuu pienjännitemoottoreiden valmistuksesta sekä tuotekehityksestä vaativiin olosuhteisiin (Kuvio 2). Helsingin tehtaalla kehitetään ja valmistetaan muun muassa dieselgeneraattoreita, korkeajännite- sekä kestopagneettimoottoreita. /6/



Kuvio 2. Vaasassa valmistettavia pienjännitemoottoreita vaativiin olosuhteisiin /7/.

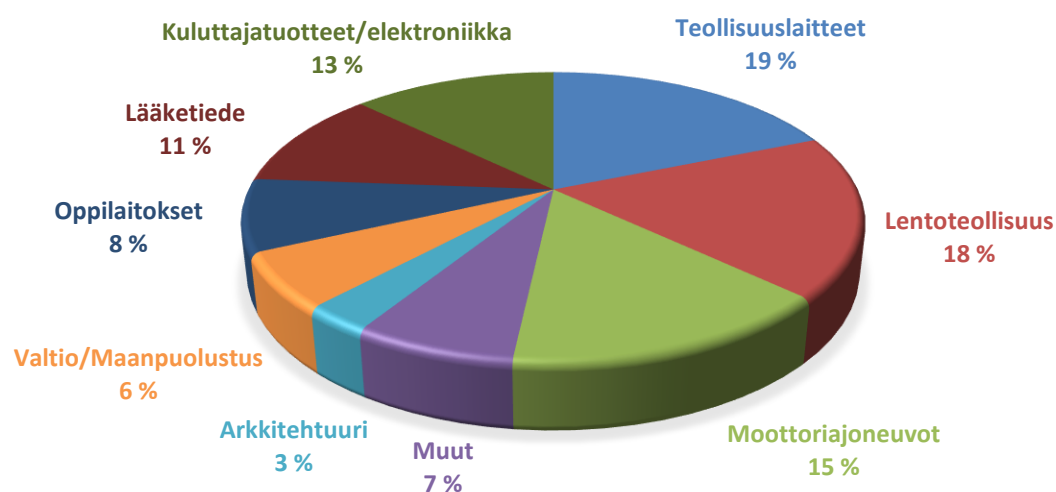
2 LISÄÄVÄ VALMISTUS

”Materiaalia lisäävä valmistus on yhteinen nimitys menetelmille, joilla fyysinen kappale valmistetaan geometriakuvauksen perusteella ainetta lisäävillä tekniikoilla.” /8, s.5/. Standardin SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 mukaan lisäävä valmistus (Additive manufacturing) on materiaalia lisäävien menetelmien virallinen termi. Menetelmiä kutsuttiin aikaisemmin nimellä pikavalmistus ja nykyään myös nimellä 3D-tulostus. Vaikka termejä käytetään usein toistensa synonyymeinä, termi lisäävä valmistus on vakiintunut menetelmien teollisessa käytössä, kun taas 3D-tulostus kuluttajapuolen käytössä. Termillä 3D-tulostus tarkoitetaan virallisesti kuitenkin kappaleen valmistusta kovettamalla materiaalia käyttäen kirjoituspäätä, suutinta tai muuta tulostusteknologiaa. /8/

Materiaalin lisäämisellä tarkoitetaan prosessia, jossa raaka-aineiden ainesosat tuodaan yhteen ja liitetään toisiinsa sulattamalla tai sidostamalla. Liittäminen tapahtuu kerros kerrokselta siivutetun kolmiulotteisen mallin poikkileikkauksien perusteella. Valmistettavan tuotteen perusominaisuuksiin vaikuttavat /8/:

- Materiaalityyppi
 - Muovi
 - Metall
 - Keramiikka
 - Hiekka
 - Komposiitti
- Raaka-aineen olomuoto
 - Neste
 - Jauhe
 - Liitosaine
 - Lanka
 - Levy
- Laittearkkitehtuuri
 - Materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä
 - Prosessiparametrit
- Sulattamis- tai liitosperiaate
 - Sulatus
 - Kovetus
 - Sintraus
- Valmistettava kappale
 - Muotoilu
 - Sijainti ja orientaatio

Ensimmäinen kaupallinen lisäävää valmistusta hyödyntävä järjestelmä julkaistiin vuonna 1987. Järjestelmän toiminta perustui nykyiseen valokovetus altaassa -menetelmään, mutta yritys käytti menetelmästä nimeä Stereolithography. Järjestelmän julkaisi ja patentoi yritys nimeltä 3D Systems. Lisäävän valmistusteknologian keksiminen mahdollisti ensimmäistä kertaa fyysisen kappaleen luomisen suoraan digitaalisesta mallista. Tämä oli merkittävä hetki teollisuudessa, koska teknologia mahdollisti huomattavat säästöt koneistuksen välttämällä, erityisesti monimutkaisissa ja vaikeasti valmistettavissa tuotteissa. 3D Systems -yrityksen kaupallistama menetelmä ei ollut ainoa, sillä myös useat muut yritykset kaupallistivat ja patentoivat omia lisäävän valmistuksen menetelmiään 1990-luvun aikana. Lisäävä valmistus oli nopeasti kasvava ala, mutta 2010-luvun alussa monien patenttien raukeaminen mahdollisti alan räjähdysmäisen kasvun ja kehityksen. Jatkuva alan kasvu on vaikuttanut eniten kuluttajapuolen laitteisiin, joiden hinta on alentunut merkittävästi. Myös teollisuudessa laitteiden määrä on kohonnut merkittävästi laitteiden jatkuvan kehityksen myötä. Lisäävän valmistuksen menetelmiä käytetään laajasti eri sovelluksissa teollisuudessa, yhteiskunnallisilla sektoreilla sekä kuluttajatasolla (Kuvio 3). /2/



Kuvio 3. Lisäävän valmistuksen käyttökohteiden jakautuminen vuonna 2016 /1/.

2.1 Edut

Perinteisistä materiaalia muokkaavista ja poistavista menetelmistä poiketen, lisäävässä valmistuksessa materiaalia lisätään pääosin vain kohtiin, jossa sitä tarvitaan. Tällöin valmistuksesta poistuvat perinteisten valmistusmenetelmien vaatimat geometriset rajoitteet. Geometrinen rajoitteiden poistuessa, kappale voidaan suunnitella siten, että materiaalia käytetään vain kohdissa, joka on kappaleen toiminnan ja kestävyuden kannalta tarpeen. Näin kappaleen jälkikäsitellyssä tapahtuva materiaalin poisto ja muokkaus saadaan minimoitua, jolloin kappaleen valmistuksessa muodostuva hukkamateriaalin määrä on erittäin vähäinen. Materiaalin käytön optimoinnin seurauksena myös kappaleen massa pienenee huomattavasti. Geometrinen rajoitteiden poistuessa voidaan myös yhdistää usean osan kokoonpanoja yhdeksi kappaleeksi tai integroida kappaleiden toiminnallisia piirteitä suoraan osaan. Integroidut kokoonpanot vähentävät tuotteiden valmistus- ja varastointikustannuksia. Kappaleiden vähentyessä, myös tuotteiden kokoonpano sekä tuotannonhallinta ja -suunnittelu helpottuvat. /9–12/

Lisäävän valmistuksen käytön kannattavuus korostuu erityisesti silloin, kun valmistettavat kappaleet ovat monimutkaisia ja tuotantomäärät pieniä. Kannattavuus korostuu myös kappaleissa, jotka ovat alttiita muutoksille, kuten prototyypit. Tällöin mahdolliset muutokset voidaan suorittaa vielä hyvin lähellä valmistuksen aloittamista. Nopeat muutokset mahdollistavat myös tuotevalikoiman muutokset lyhyellä aikavälillä. Lisäävällä valmistuksella tuotettujen kappaleiden toimitusajat ovat yleisesti huomattavasti lyhyemmät kuin perinteisillä menetelmillä tuotetuissa kappaleissa. Nopeaan toimitukseen erityisesti uusissa kappaleissa vaikuttaa se, että lisäävässä valmistuksessa ei tarvita erillisiä työkaluja, kuten muotteja tai kiinnittimiä. Tällöin koko valmistusprosessiin tarvittavien työkalujen määrä sekä niiden varastoinnin tarve vähenee. Lisäävällä valmistuksella on mahdollista myös hajauttaa tuotantoa lähelle asiakasta. Tällöin kappaleiden kuljetuskustannukset laskevat, kun kappaleiden 3D-mallit voidaan siirtää digitaalisesti ja valmistaa lähellä asiakasta. /10, 11, 13/

2.2 Haasteet

Lisäävien valmistusmenetelmien nopeasta kehityksestä huolimatta, menetelmiin liittyy vielä useita haasteita. Suurin haaste on lisäävien valmistusmenetelmien taloudellisuus. Lisäävällä valmistuksella tuotettujen kappaleiden hinnat rajoittavat menetelmien käytön usein vain kappaleisiin, joiden valmistaminen perinteisillä menetelmillä on haastavaa tai kappalemäärät pieniä. Taloudellisuus on erityisesti haasteena silloin, kun lisääviä valmistusmenetelmiä hyödynnetään metallisten kappaleiden valmistukseen. Lisäävät valmistusmenetelmät ovat vielä suhteellisen hitaita. Tällöin haasteita aiheuttavat valmistuksen prosessiajat, varsinkin kappalemäärien kasvaessa. /10, 11, 13/

Haasteita aiheuttaa myös lisäävien valmistusmenetelmien ja materiaaliominaisuuksien vaikutus valmistettavaan kappaleeseen. Esimerkiksi materiaalia sulattavissa menetelmissä korkeat valmistuslämpötilat ja kappaleiden jäähtymiset aiheuttavat kappaleeseen laajenemisia sekä kutistumisia, jotka voivat aiheuttaa kappaleeseen venymiä ja jäännösjännityksiä. Kappaleen valmistusaikaiseen käyttäytymiseen voidaan vaikuttaa jo suunnitteluvaiheessa. Tällöin suunnittelijoiden tulee ymmärtää ja olla tietoisia lisäävän valmistuksen vaatimuksista, kuten materiaalien ja tulostusmenetelmien vaikutuksesta valmistettavaan kappaleeseen. Suunniteltaviin kappaleisiin muodostetaan usein monimutkaisia muotoja ja kennorakenteita. Useissa CAD-ohjelmistoissa näiden piirteiden muodostaminen on vielä hyvin haastavaa. Haasteita aiheuttavat myös kappaleiden toistettavuus, luotettavuus, laatu sekä standardien vähäisyys. /10–13/

2.3 Lisäävän valmistuksen prosessi

Lisäävän valmistuksen prosessi alkaa valmistettavan kappaleen kolmiulotteisen digitaalisen mallin luomisesta. 3D-malli luodaan kappaleesta yleensä CAD-ohjelmistoilla, 3D-skannaamalla tai magneettikuvauksella. Luotu 3D-malli muutetaan tiedostomuotoon, jota lisäävien valmistusmenetelmien CAM-ohjelmat osaa-
vat lukea. Lisäävien valmistusmenetelmien käyttämäksi tiedostomuodoksi on vakiintunut STL-formaatti, jossa 3D-mallin pintageometria muutetaan pienten kolmioiden verkostoksi. Huolimatta STL-formaatin yleisyydestä, se ei täysin sovellu

lisäävän valmistuksen tiedostomuodoksi. STL-formaatin pintaverkossa esiintyy usein virheitä ja malli on pelkkä pintamalli. Tiedostomuotoja on useita muitakin STL-formaatin lisäksi, esimerkiksi AMF ja 3MF. Edellä mainitut tiedostomuodot ovat suunniteltu täysin lisäävään valmistukseen. Tiedostomuotoja voidaan esittää STL-formaatin sisältämän pintamallin lisäksi kolmiulotteisesti vokselitasolla. /10–12/

Muutettu tiedostomuoto siirretään lisäävän valmistuksen järjestelmään, jonka CAM-ohjelmistolla tarkistetaan mallin käyttökelpoisuus sekä määritetään valmistettavan kappaleen mittakaava, valmistussijainti ja -suunta. CAM-ohjelmistossa asetetaan myös valmistettavan kappaleen ominaisuuksiin vaikuttavat tulostusparametrit, kuten kerrospaksuus sekä lämpötilat. CAM-ohjelmisto paloittelee kappaleen 3D-mallin vaakatasoihin poikkileikkauksiin. Poikkileikkauksien paksuus määräytyy asetetun kerrospaksuuden mukaisesti. Kappaleen valmistus tapahtuu automaattisesti kerros kerrokselta. Valmistettavan kappaleen materiaalin sijoittamis- sekä yhdistämisperiaate riippuvat käytettävästä lisäävän valmistuksen menetelmästä. Kun kappale on valmistunut, se voidaan irrottaa tulostusalustasta. Irrotettu kappale puhdistetaan raaka-aineesta ja poistetaan mahdolliset tukimateriaalit. Valmiille kappaleelle suoritetaan mahdollinen jälkikäsittely. /10–12/

2.4 Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät

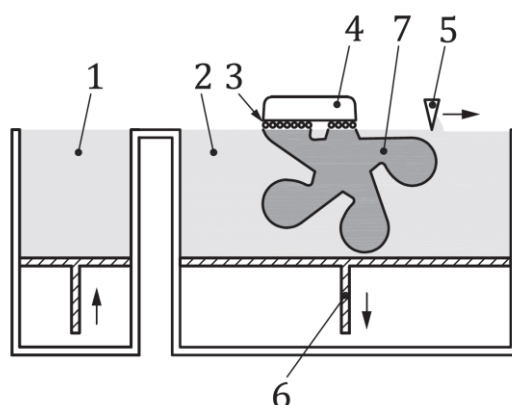
Materiaalia lisääviä valmistusmenetelmiä on useita ja ne eroavat toisistaan materiaaleiltaan sekä toteutuksiltaan. Lisäävät valmistusmenetelmät voidaan jakaa luokkiin monin eri tavoin, kuten käyttökohteen, raaka-aineen olomuodon, materiaalin syötön tai tulostusalustan mukaan. Yleisimmin menetelmät jaetaan standardin ISO/ASTM 52900 “Additive manufacturing. General principles. Terminology.” mukaan valmistusprosessittain seitsemään eri luokkaan /8/. Valmistusmenetelmien nopean kehityksen vuoksi, kaikki menetelmät eivät kuitenkaan sovi standardissa määriteltyihin luokkiin, tai vaihtoehtoisesti sopivat moneen standardin luokkaan. Useat laitevalmistajat käyttävät standardoitujen menetelmien nimien sijasta omia kaupallisia nimiä kehittämilleen valmistusmenetelmille, (Taulukko 1). /11, 14/

Taulukko 1. Kaupallisesti käytettyjä nimikkeitä yleisimmille lisäävän valmistuksen menetelmille /2, 10, 15/.

Lisäävän valmistuksen menetelmä	Kaupallisesti käytetty nimike	Materiaalin yhdistysmenetelmä	Raaka-aineen olomuoto	Yleisimminkin käytetty materiaali
Sideaineen suihkut	BJ - Binder Jetting	Sideaine	Jauhe	Hiekka Kipsi Metalli
Suorakerrostus	LENS - Laser Engineering Net Shape	Lasersulatus	Lanka Jauhe	Metalli
	EBAM - Electron Beam Additive Manufacturing	Elektronisuihku	Lanka Jauhe	Metalli
Pursotus	FDM - Fused Deposition Modeling	Suutin sulatus	Lanka	Komposiitti Muovi
Materiaalin suihkut	MJ - Material Jetting	UV-valokovetus	Neste	Muovi
	NPJ - NanoParticle Jetting	Lämpökovetus	Neste	Metalli
	DOD - Drop On Demand	Tasataan muotoon	Neste	Vaha
Jauhepetisulatus	MJF - Multi Jet Fusion	Sideaine ja energia	Jauhe	Muovi
	SLS - Selective Laser Sintering	Sulatus laserilla	Jauhe	Muovi
	DMLS/SLM - Direct Metal Laser Sintering/ Selective Laser Melting	Sulatus laserilla	Jauhe	Metalli
	EBM - Electron Beam Melting	Sulatus elektroni-suihkulla	Jauhe	Metalli
Kerros laminointi	LOM - Laminated Object Manufacturing	Liima	Levy	Paperi Komposiitti
Valokovetus altaassa	SLA - Stereolithography	Kovetus laserilla	Neste	Muovi
	DLP - Digital Light Processing	Kovetus valolla	Neste	Muovi
	CDLP - Continuous Digital Light Processing	Kovetus valolla ja hapella	Neste	Muovi

2.4.1 Sideaineen suihkutetus

Sideaineen suihkutetus (Binder jetting) on lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa nestemäistä sideainetta suihkutetaan jauhepedille jauhemateriaalin liittämiseksi /8/. Sideainetta suihkutetaan jauhepedille kappaleen poikkileikkauksen mukaisesti kohtiin, johon kappaleen halutaan muodostuvan. Jokaisen tulostuskerroksen jälkeen tulostuspeti laskee tulostuskerroksen verran alaspäin ja pinnalle levitetään uusi kerros jauhetta (Kuvio 4). Jotkut järjestelmät käyttävät menetelmässä mukana myös sideaineen kovetusta, esimerkiksi UV-kovettuvaa sideainetta. Osa järjestelmistä käyttää jauhemateriaalia, joka itsessään sisältää sideaineen, jolloin järjestelmä levittää jauhepedille vain sideaineen aktivoivan liuotinaineen. Sideaine poistetaan usein jälkikäsittelyssä ja korvataan paremmin kestäväällä materiaalilla, jolloin kappale saa paremmat mekaaniset ominaisuudet. /10, 11/



- | | | |
|-------------------|--|------------|
| 1. Jauheen syöttö | 4. Suutin yhdistettynä materiaalin syöttölaitteeseen | 7. Kappale |
| 2. Jauhepeti | 5. Jauheen tasaustela | |
| 3. Sideaine | 6. Tulostusalusta | |

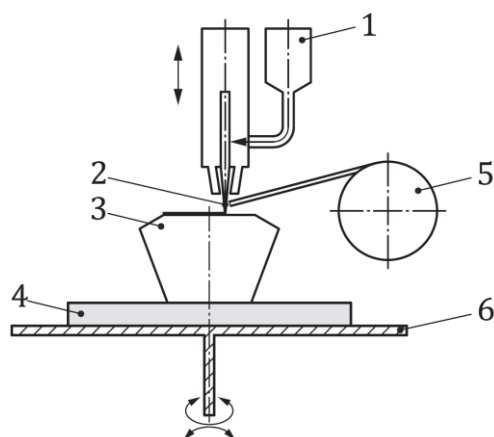
Kuvio 4. Sideaineen suihkutetus /16/.

Sideaineen suihkutetus -menetelmällä on mahdollista valmistaa osia myös värillisenä. Tämä on mahdollista järjestelmillä, jotka levittävät väriainetta sideaineen mukana tai sen jälkeen. Menetelmän jauhepeti toimii valmistuksessa tukirakenteena valmistetuille kappaleille. Tällöin valmistukseen ei tarvita erillistä tulostusalustaa

tai tukirakenteita. Valmistettaessa metallisia kappaleita jauheen kantokyky ei kuitenkaan riitä kannattelemaan roikkuvia muotoja, jolloin tukimateriaalin käyttö on tarpeen. Tulostusmateriaaleina voidaan käyttää useita eri materiaaleja, kuten hiekkaa, kipsiä, muovia, metallia tai keraamia. /10–12/

2.4.2 Suorakerrostus

Suorakerrostus (Directed energy deposition) on lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa kohdistettua lämpöenergiaa käytetään materiaalien yhdistämiseen, sulattamalla materiaalia samanaikaisesti sijoittamisen yhteydessä /8/. Materiaali sijoitetaan kerros kerrokselta jauheena tai lankana haluttuun kohtaan rakenteen pintaan (Kuvio 5). Materiaalina käytetään enimmäkseen metallia. Materiaalin sulattavana energianlähteenä käytetään laseria, elektronisädettä tai plasmakaarta. Jauhemateriaalin sijoittamisessa käytetään myös kaasua, joka mahdollistaa materiaalin lisäämisen myös muille kuin vaakasuorille pinnoille. Materiaalin sijoitus tarvitsee kuitenkin aina kohdepinnan, jolloin rakenteen monimutkaiset muodot ovat rajoitettuja. /10–12, 14/



1. Jauhesäiliö

2. Energianlähde

3. Kappale

4. Tulostusalusta

5. Raaka-aine

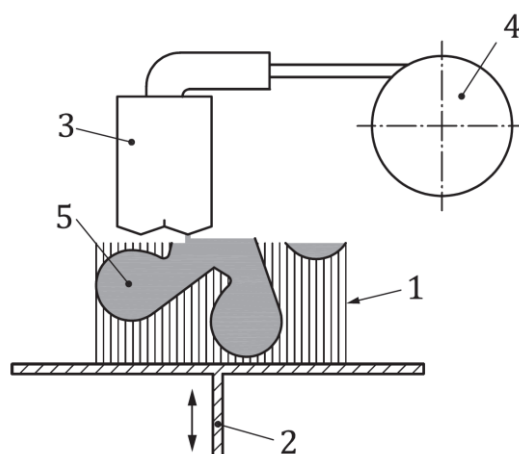
6. Tulostustaso

Kuvio 5. Suorakerrostus /16/.

Suorakerrostuksen etu sekä yleinen käyttökohde on se, että menetelmällä voidaan luoda muotoja sekä piirteitä jo olemassa olevan kappaleen päälle. Tämä mahdollistaa menetelmän käytön kuluneiden kappaleiden kunnossapidossa. Muita etuja ovat rakennusmateriaalin vaihto valmistuksen aikana sekä tulostusalueen suuruus. Suorakerrostuksessa materiaalin sijoittamiseen käytetään yleisesti robottia, jolloin tulostus alueen kokoa rajoittaa vain robotin liikealue. /10, 14/

2.4.3 Pursotus

Pursotus (Material extrusion) on lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa lämmitetyllä suuttimella sulatettu materiaali pursotetaan paineen avulla alustalle /8/. Materiaali pursotetaan kerros kerrokselta kappaleen poikkileikkauksen mukaisesti, jolloin sula materiaali sitoutuu edelliseen tulostuskerrokseen ja muodostaa halutun kappaleen (Kuvio 6). Lämpömuovattavan materiaalin lisäksi materiaalin kovettamiseen voidaan hyödyntää kovetin- tai liuotinainetta tai reaktiota ilman kanssa. Lämpömuovattava kestopuovi on yleisimmin käytetty tulostusmateriaali, mutta myös keraami- ja metallilankojen käyttö pursotusmenetelmällä on mahdollista. Pursotusmenetelmä on yleisin ja halvin lisäävän valmistuksen muoto, mutta sen heikkouksia ovat pinnanlaatu sekä tarkkuus. /10–12/



1. Tukimateriaali
2. Tulostusalusta

3. Suutin
4. Raaka-aine

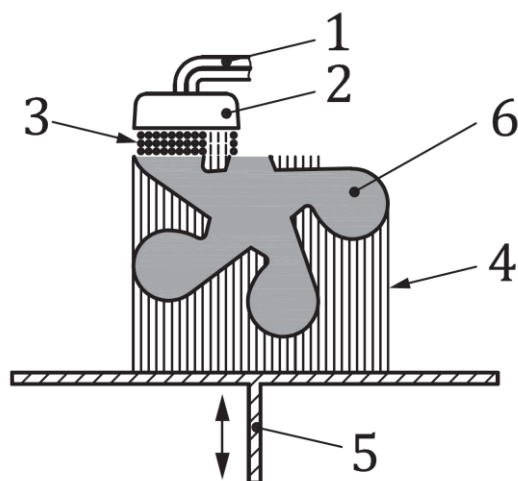
5. Kappale

Kuvio 6. Pursotus /16/.

Valmistettavissa kappaleissa on usein tyhjän päällä olevia rakenteita, joiden muodostukseen tarvitaan tukimateriaalia, että materiaali kovettuisi oikeaan muotoon. Tukimateriaaliin käytetään usein eri materiaalia kuin varsinaiseen kappaleeseen. Useissa pursotusjärjestelmissä on kaksi tulostussuutinta, jotka mahdollistavat useamman materiaalin tulostuksen samanaikaisesti. Tällöin tukimateriaali voidaan tulostaa samanaikaisesti esimerkiksi vesiliukoisesta materiaalista. Pursotusjärjestelmästä riippuen, pursotuksen tarttumista sekä valmiin kappaleen irrotusta alustasta voidaan helpottaa lämmitettävällä tai irrottavalla alustalla. /10–12/

2.4.4 Materiaalin suihkutus

Materiaalin suihkutus (Material jetting) on lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa suittimet suihkuttavat nestemäistä UV-valolla kovettavaa tulostusmateriaalia tulostusalustalle /8/. Materiaalia suihkutetaan ja kovetetaan UV-valolla ohuina kerroksina kappaleen poikkileikkauksen mukaisesti (Kuvio 7). Tulostusmateriaalina käytetään yleensä fotopolymeerejä tai vahamaisia materiaaleja, joita käytetään usein prototyypin sekä tarkkuusvalumallien valmistamiseen. /10, 14/



1. Materiaalin syöttölaite
2. Materiaalin kovetin

3. Materiaalisuihku
4. Tukimateriaali

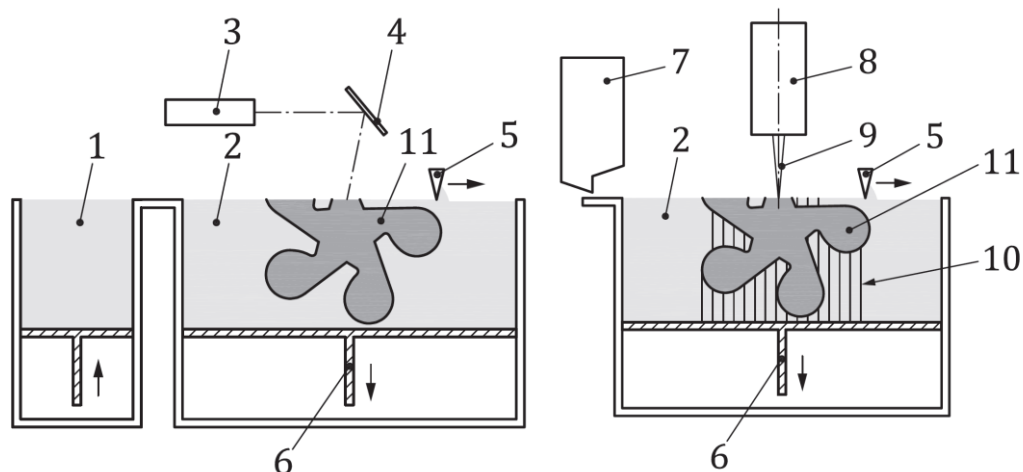
5. Tulostusalusta
6. Kappale

Kuvio 7. Materiaalin suihkutus /16/.

Materiaalin suihkutusjärjestelmissä käytetään usein monisuutin-tulostuspäitä, jotka mahdollistavat eri materiaalien samanaikaisen suihkutuksen. Tällöin voidaan valmistaa kappaleita, jotka muodostuvat eri materiaaleista ja niiden ominaisuuksista. Materiaalin suihkutusmenetelmällä ei ole mahdollista tulostaa tyhjän päälle, jolloin tulostuksessa käytetään apuna tukirakenteita, jotka poistetaan tulostuksen jälkeen. Tukirakenteet valmistetaan usein eri materiaalista. /10–12, 14/

2.4.5 Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatus (Powder bed fusion) on lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa jauhedille levitetty jauhemateriaali liitetään yhteen lämpöenergialla /8/. Jauhemateriaali levitetään ohuena kerroksena jauhedille, jonka jälkeen jauhe sulatetaan tai sintrataan kappaleen poikkileikkauksen mukaisesti lasersäteellä tai elektronisuihkulla. Jauhepetiä lasketaan kerrospaksuuden verran alaspäin, jonka jälkeen uusi levitetty jauhekerros sulatetaan tai sintrataan edelliseen kerrokseen. Työkiertoa jatketaan kerros kerrokselta, kunnes kappale on muodostettu (Kuvio 8). Ennen valmiin kappaleen poistoa, kaasulla täytetty tulostuskammio jäädytetään ja ylimääräinen jauhe kierrätetään. Jauhepetisulatusmenetelmällä on mahdollista tulostaa tyhjän päälle, mutta metallia tulostaessa kappaletta ympäröivä jauhe ei riitä tukirakenteeksi. Tällöin kappaleeseen tulee muodostaa tukirakenteita, jotka poistetaan, kun kappale on irrotettu tulostusalustasta. /10–12, 14/



a) Jauhepetisulatus laserilla

b) Jauhepetisulatus elektronisuihkulla

- | | | |
|-------------------------|--------------------------|--------------------|
| 1. Jauheen syöttö | 5. Jauheen tasaustela | 9. Elektronisuihku |
| 2. Jauhepeti | 6. Tulostusalusta | 10. Tukimateriaali |
| 3. Laser | 7. Jauhesäiliö | 11. Kappale |
| 4. Valon kohdistuspeili | 8. Elektronisuihkusuutin | |

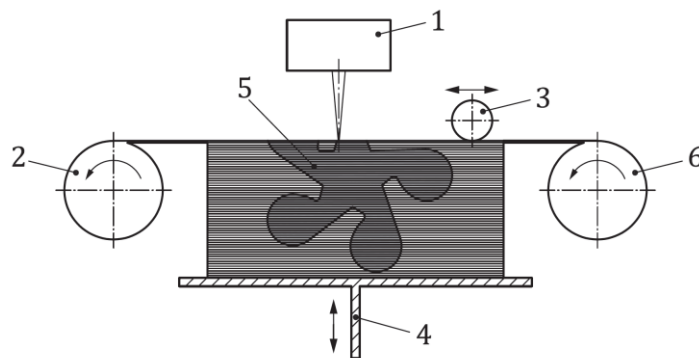
Kuvio 8. Jauhepetisulatus /16/.

Jauhepetisulatuksen jauhemateriaaleina voidaan käyttää metallia, keraamia, polymeeriä tai komposiittia. Jauhepartikkelit voidaan jauhepetisulatusjärjestelmästä riippuen joko sintrata tai sulattaa. Sintrausmenetelmässä jauhepartikkeleita ei sulateta kokonaan, vaan ne kiinnitetään toisiinsa molekyylitasolla. Tämä mahdollistaa huokoisuuden säätämisen lopputuotteessa. Sulatusmenetelmässä jauhepartikkelit sulatetaan toisiinsa täysin, jolloin valmiista kappaleesta voidaan muodostaa täysin kiinteä. Kappaleen muodostumiseen voidaan vaikuttaa järjestelmän parametrien avulla. Niitä ovat esimerkiksi jauhepartikkelin koko, kammion lämpötila, laserin teho, tuki ja lämpönielujen koko ja sijainti sekä sula-alueiden etäisyys toisistaan. Parametrit vaikuttavat valmiin kappaleen laatuun sekä onnistumiseen. /10–12, 14/

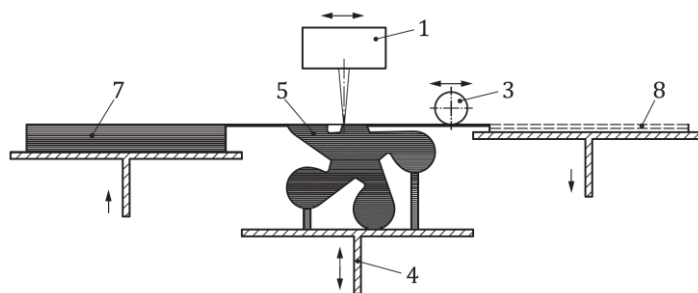
2.4.6 Kerroslaminointi

Kerroslaminointi (Sheet lamination) on lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa materiaalileikkeitä yhdistetään toisiinsa kappaleen muodostamiseksi /8/. Tulostus-

alustalle sijoitettava kalvomateriaali leikataan kappaleen poikkileikkauksen mukaisesti laserilla tai terällä. Kalvomateriaalista leikkautunut materiaalileike siirtyy materiaalin paksuuden verran alaspäin tulostusalustan mukana. Edellisen materiaalileikkeen päälle sijoitetaan kerros kerrokselta uusi kalvomateriaali, joka leikataan ja kiinnitetään edelliseen materiaalileikkeeseen yleensä liimalla, puristuksella, lämmöllä tai ultraäänihitsauksella (Kuvio 9). Prosessijärjestys materiaalin sijoittelun, leikkauksen ja kiinnittämisen välillä voi vaihdella eri kerros laminointijärjestelmissä. Kalvomateriaalina voidaan käyttää useita eri materiaaleja, kuten muoveja, paperia, komposiitteja ja metalleja. /10–12/



a) Kerros laminointi jatkuvalla materiaalin syötöllä



b) Kerros laminointi erillisillä materiaalilevyillä

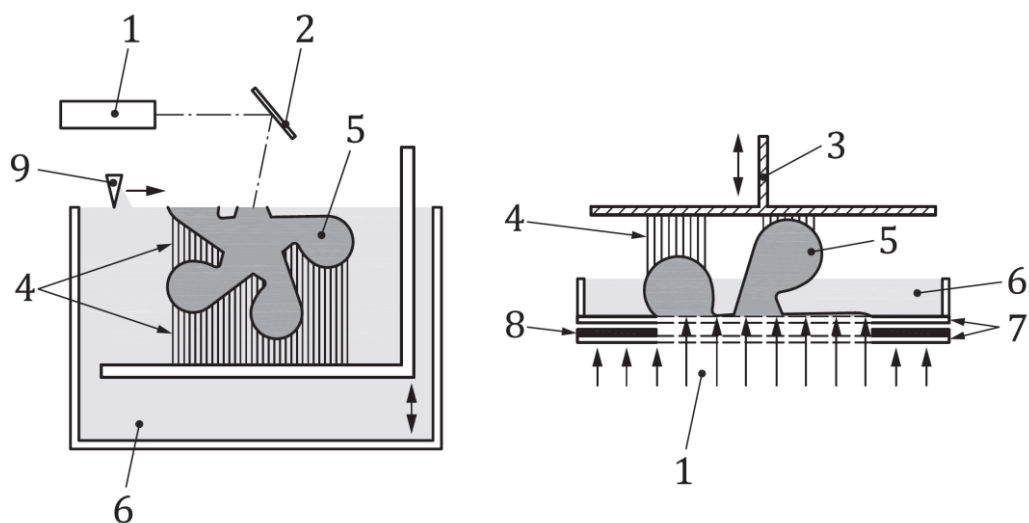
- | | | |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1. Materiaalin leikkauslaite | 4. Tulostusalusta | 7. Raaka-ainemateriaalipino |
| 2. Ylijäämämateriaalirulla | 5. Kappale | 8. Ylijäämämateriaalipino |
| 3. Laminointirulla | 6. Raaka-ainemateriaalirulla | |

Kuvio 9. Kerros laminointi /16/.

Metallin kerroslaminoinnissa käytetään yleensä materiaalileikkeiden kiinnitykseen ultraäänihitsausta. Ultraäänellä materiaalileikkeiden kiinnittäminen tapahtuu liikuttamalla ultraäänitaajuudella värähtelevää akselia materiaalileikkeiden päällä. Värähtelyt muuttuvat lämmöksi materiaalileikkeiden välissä, jolloin materiaali-
leikkeet hitsautuvat kiinni toisiinsa. /10, 11/

2.4.7 Valokovetus altaassa

Valokovetus altaassa (Vat photopolymerization) on lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa astiassa olevaa nestemäistä fotopolymeeriä kovetetaan kohdennetusti käyttäen valoaktiivista polymerointia /8/. Nestemäinen fotopolymeeri kovetetaan kohdentamalla valoa laserilla tai projektorilla astiassa olevan tulostusalustan pintaan kappaleen poikkileikkauksen mukaisesti. Kovetukseen käytetään yleisesti UV-valoa, mutta myös näkyvään valoon perustuvia menetelmiä on olemassa. Valokovetusjärjestelmästä riippuen kappale valmistetaan joko tulostusalustan päälle tai alapuolelle (Kuvio 10). Tulostusalustan päälle valmistettaessa alustaa lasketaan kerroksittain. Kerrosten välissä ennen kovetusta, nestepinta tasoitetaan kappaleen päälle alustan yli liikutettavalla lastalla. Tulostusalustan alapuolelle valmistettaessa alustaa nostetaan altaan pohjalta ylöspäin joko kerroksittain tai jatkuvalla syötöllä. Kovettava valo kohdennetaan altaan valoa läpäisevän pohjan läpi. /10, 11/



a) Valokovetus laserilla

b) Valokovetus projektorilla

- | | | |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 1. Energianlähde | 4. Tukimateriaali | 7. Läpinäkyvä levy |
| 2. Valon kohdistuspeili | 5. Kappale | 8. Valokuvamaski |
| 3. Tulostusalusta | 6. Nestemäinen fotopolymeeri | 9. Pinnan tasoituslaite |

Kuvio 10. Valokovetus altaassa /16/.

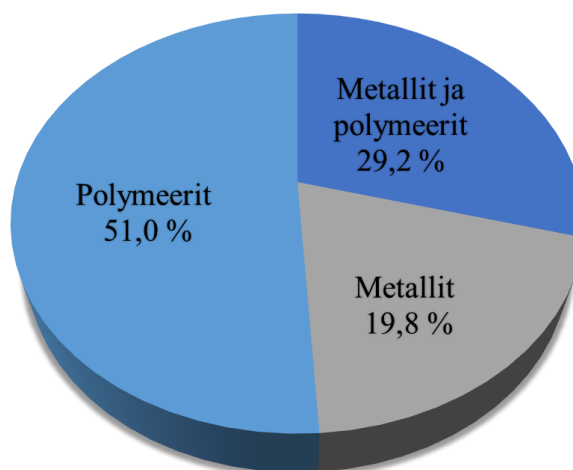
Kappaleen valmistaminen vaatii lähes poikkeuksetta tukimateriaalin käytön. Valmistettavaa kappaletta ei sijoiteta suoraan tulostusalustaan vaan se valmistetaan tukimateriaalin varaan siten, että ylimääräinen neste valuu kappaleen pinnalta mahdollisimman hyvin. Tämän vuoksi tukimateriaalia muodostuu enemmän kuin muissa menetelmissä. Menetelmän etuja ovat suhteellisen nopea tulostus sekä hyvä tarkkuus. /10, 11/

2.5 Materiaalit

Alun perin lisäävän valmistuksen menetelmissä hyödynnettiin materiaaleja, jotka olivat jo käytössä ja kehitetty muille valmistusmenetelmille. Lisäävän valmistuksen menetelmät eroavat kuitenkin muista valmistusmenetelmistä, jolloin perinteisissä menetelmissä käytetyt materiaalit eivät täysin soveltuneet lisäävään valmistukseen. Kun tietoisuus lisäävien valmistusmenetelmien toiminnasta kehittyi, alettiin myös materiaaleja kehittää siten, että ne soveltuisivat paremmin lisäävään valmistukseen. Materiaalien kehityksen myötä valmistettavat kappaleet ovat ny-

kyisin huomattavasti tarkempia sekä kestävämpiä. Materiaalin kehitys on parantanut myös valmistusprosessin suoritusnopeutta ja valmistusominaisuuksia. /10/

Lisäävässä valmistuksessa alun perin käytettyjä materiaaleja olivat muovit, vahat sekä paperikalvot. Myöhemmin menetelmien kehittyessä on otettu käyttöön myös metallit, komposiitit sekä keraamit. Muovit ovat edelleen yleisimmin käytettyjä materiaaleja lisäävässä valmistuksessa mutta metallien käyttö on vahvasti kasvussa. Vuonna 2016 jo lähes puolet lisäävän valmistuksen palveluntarjoajista käyttivät metallimateriaaleja (Kuvio 11). Lisäävästä valmistusmenetelmästä riippuen käytettävän raaka-ainemateriaalin olomuoto voi olla joko nesteenä, jauheena, lankana tai levynä. /10/



Kuvio 11. Palveluntarjoajien materiaali-jakauma vuonna 2016 /1/.

2.5.1 Metallit

Metallimateriaalit ovat nopeasti kehittyvä alue lisäävässä valmistuksessa. Etenkin jauhemateriaaleja on saatavilla jo useina eri seoksina (Taulukko 2). Jauhemateriaalin partikkelimuoto sekä koko saattavat myös vaihdella. Jauhemateriaalin lisäksi metallimateriaaleja käytetään myös lankoina sekä levyinä. /11/

Taulukko 2. Yleisimmin käytetyt metallimateriaaliseokset /17/.

Metalli	Seos	DIN	Metalli	Seos	DIN
Ruostumaton teräs	SS 304	1.4301	Alumiiniseokset	AlSi10Mg	3.2381
	SS 316 L	1.4404		AlSi7Mg	3.2371
	SS 410	1.4006		AlSi12	3.3581
	SS 440	1.4110	Nikkeliseokset	Inconel 718	2.4668
	15-5 PH	1.4540		Inconel 625	2.4856
	17-4 PH	1.4542		Inconel 713	2.4670
		Inconel 738		-	
Työkaluteräs	AISI 420	1.2083	Titaaniseokset	Hastelloy X	2.4665
	Marage 300	1.2709		Titanium Grade 2	3.7035
	H13	1.2344		Ti6Al4V	3.7165
	AISI D2	1.2379		Ti6Al4V ELI	3.7165 ELI
	AISI A2	1.2363	TiAl6Nb7	-	
	AISI S7	1.2357	Kupariseokset	CC 480 K	2.1050
Koboltiseokset	ASTM F75	2.4723			
	CoCrWC	-			

2.5.2 Muovit

Lisäävässä valmistuksessa voidaan hyödyntää laajasti tunnettuja muoveja (Taulukko 3), mutta usein käytettävät muovit ovat valmistajien kehittämiä muoviseoksia, joita myydään omilla tuotenimillä. Käytettävät muovit voidaan jakaa fotopolymeereihin ja teknisiin muoveihin. Fotopolymeerit ovat olomuodoiltaan nesteitä, jotka kovettuvat valon vaikutuksesta. Teknisten muovien raaka-aineolomuoto on yleensä jauhe tai lanka. /11/

Taulukko 3. Yleisesti käytettyjä muovilaatuja lisäävässä valmistuksessa /11/.

Muovilaatu									
ABS	HIPS	PA	PAEK	PC	PLA	PS	PU	PVA	TPE

2.5.3 Muut

Lisäävässä valmistuksessa käytetään muovien ja metallien lisäksi myös useita muita materiaaleja. Näitä ovat esimerkiksi keraami, hiekka, komposiitti, kangas, vaha, elintarvike- ja biomateriaalit. Edellä mainituista materiaaleista hiekka on yleisimmin käytetty materiaali, jota käytetään paljon hiekkamuottien valmistuksessa. /11/

2.6 Jälkikäsittely

Lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettu kappale täyttää harvoin kaikki kappaleelle suunnitellut vaatimukset. Tällöin kappaleelle tulee suorittaa jälkikäsittely. Jälkikäsittelyn määrä ja menetelmät riippuvat kappaleelle asetetuista vaatimuksista, joita ovat yleensä kappaleen huokoisuus, pinnanlaatu sekä toleranssit.

Useimmissa lisäävissä valmistusmenetelmissä kappale tulee valmistusprosessin jälkeen irrottaa tulostusalustasta. Irrotuksen haasteellisuus riippuu käytetystä valmistusmenetelmästä sekä materiaalista. Metalliset kappaleet sulavat yleensä tulostusalustaan, jolloin irrotus tapahtuu sahaamalla, kun taas muoviset kappaleet saadaan irrotettua lastalla tai käsin. Lisäävässä valmistuksessa käytetään usein tukimateriaalia, joka tulee poistaa kappaleen valmistusprosessin jälkeen. Metallisissa kappaleissa tukimateriaalin poisto hoidetaan yleensä leikkaamalla tai koneistamalla. Muovisissa kappaleissa tukimateriaalina käytetään usein eri materiaalia, kuin varsinaisessa kappaleessa, esimerkiksi vesiliukoista tai hyvin huokoista materiaalia. Tällöin tukirakenteen poisto tapahtuu yleensä vesisuihkulla, liuottimella tai leikkaamalla. Jauhepetimenetelmällä valmistetusta kappaleesta sekä kappaleen ympäriltä tulee poistaa myös käyttämätön jauhe yleensä paineilmalla tai imurilla. /11, 14/

Metalliset isot, paksut ja mittatarkat kappaleet vaativat usein jännityksenpoistoherkutuksen ennen kappaleen työstämistä. Jännityksenpoistoherkutuksella pyritään poistamaan kappaleesta valmistuksen aikana muodostuneita sisäisiä jännityksiä ja näin estämään kappaleeseen kohdistuvia muodonmuutoksia tai murtumia. Valmistetuille kappaleille voidaan tehdä myös pehmeäksi herkutus, joka muuttaa

kappaleen ominaisuuksia siten, että kappaleesta tulee kestävämpi ja pehmeämpi. Pehmeäksi hehkutuksen jälkeen kappale on paremmin työstettävissä. Kappaleet voidaan lämpökäsitellä myös muilla tavoilla, kuten karkaisemalla. Vaativiin olo-suhteisiin valmistetuille metallikappaleille suoritetaan usein isostaattinen kuuma-puristus (HIP). Tällöin kappaleelle saavutetaan korkeampi materiaali tiheys, jol-loin myös mahdolliset huokokset poistuvat. /11, 14/

Lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettujen metallisten kappaleiden tarkat sovitepinnat harvoin täyttävät sille asetetut pinnanlaatu- ja mittavaatimukset. Täl-löin kappaleelle tulee suorittaa mekaaninen jälkikäsitely, esimerkiksi koneistus. Yleisesti koneistettavia pintoja ovat toleranssipinnat, kierteet, laakeri- ja liuku-pinnat sekä reiät. Kappaleiden koneistettavuutta voidaan verrata saman materiaa-lin levytavaran koneistettavuuteen. Myös pinnat, joille on asetettu pinnanlaatuvaai-timuksia, tarvitsee usein jälkikäsitelyä. Kappaleen pinta voidaan käsitellä koneis-tuksen lisäksi esimerkiksi kuulapuhaltamalla tai kiillottamalla. Kappaleen pinnan-laadun parantamisen lisäksi pinnan ominaisuuksia, kuten korroosionkestävyyttä, halutaan usein muuttaa pinnoittamalla. Pinnoitus voidaan suorittaa useilla eri ta-voilla, joita ovat esimerkiksi maalaus, kromaus tai sinkitys. /11, 14/

3 SUUNNITTELUNÄKÖKULMAT

Perinteisessä suunnittelussa käytetään usein DFMA-menetelmää. Menetelmällä pyritään suunnittelemaan valmistettavat tuotteet siten, että ne ovat helposti valmistettavissa sekä kokoonpantavissa. Tällöin kappaleiden suunnittelussa pyritään käyttämään muotoja, joita on helppo valmistaa perinteisillä valmistusmenetelmillä, kuten suoraviivaisia muotoja, suorakulmia sekä ympyröitä. Myös suunnittelu-työkalut ovat kehitetty edellä mainittujen muotojen suunnitteluun, niiden helpomman toteutuksen ja mittauksen vuoksi. Perinteisesti suunnitellun kappaleen valmistaminen lisäävällä valmistuksella ei usein ole kannattavaa. Poikkeuksena ovat tilanteet, joissa hyväksytään kappaleelle muodostuva korkea hinta. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi prototyypit, kappaleen valmistaminen tarpeeseen lähellä asiakasta (varaosat), kiireelliset tilanteet tai tilanteet, joissa kappaletta ei voida muokata ja perinteiseen valmistukseen kohdistuisi merkittäviä lisäkustannuksia. /10, 14, 18/

Lisäävän valmistuksen hyödyt saadaan maksimoitua, kun valmistettavaa kappaletta suunniteltaessa hyödynnetään lisäävän valmistuksen tarjoamaa suunnitteluvapautta mahdollisimman paljon. Tämänkaltaista suunnittelua kutsutaan DFAM-suunnittelumenetelmäksi (Design for Additive Manufacturing) /10/. Menetelmän perusajatuksena on suunnitella kappaleet siten, että ne ovat valmistettavissa suoraan digitaalisen mallin perusteella, ilman työkaluja tai esivalmisteluja /12/. Lisäävän valmistuksen tarjoamia ominaisuuksia voidaan yhdistää perinteisesti suunniteltuun kappaleeseen, mutta suurimmat hyödyt saavutetaan, kun kappaleen suunnittelu aloitetaan täysin alusta. Vaikka suunnittelu lisäävässä valmistuksessa keskittyy usein optimaalisten kappaleiden suunnitteluun, se on vain yksi osa suunnitteluprosessia. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon koko tuotantoketju materiaalin hankinnasta kierrätykseen. Tuotantoketjun yhdessä osa-alueessa suunniteltu pieni asia saattaa vaikuttaa huomattavasti toiseen osa-alueeseen. Esimerkiksi optimoimalla kappaleen massa mahdollisimman pieneksi ja valmistamalla se lisäävällä valmistuksella, voi olla huomattavasti kalliimpi vaihtoehto kuin perinteisillä menetelmillä valmistettu painavampi kappale. Kuitenkin kappaleen pienempi

massa voi vaikuttaa kappaleen käyttökustannuksiin alentavasti ja näin saavuttaa koko elinkaaren aikana huomattavat säästöt.

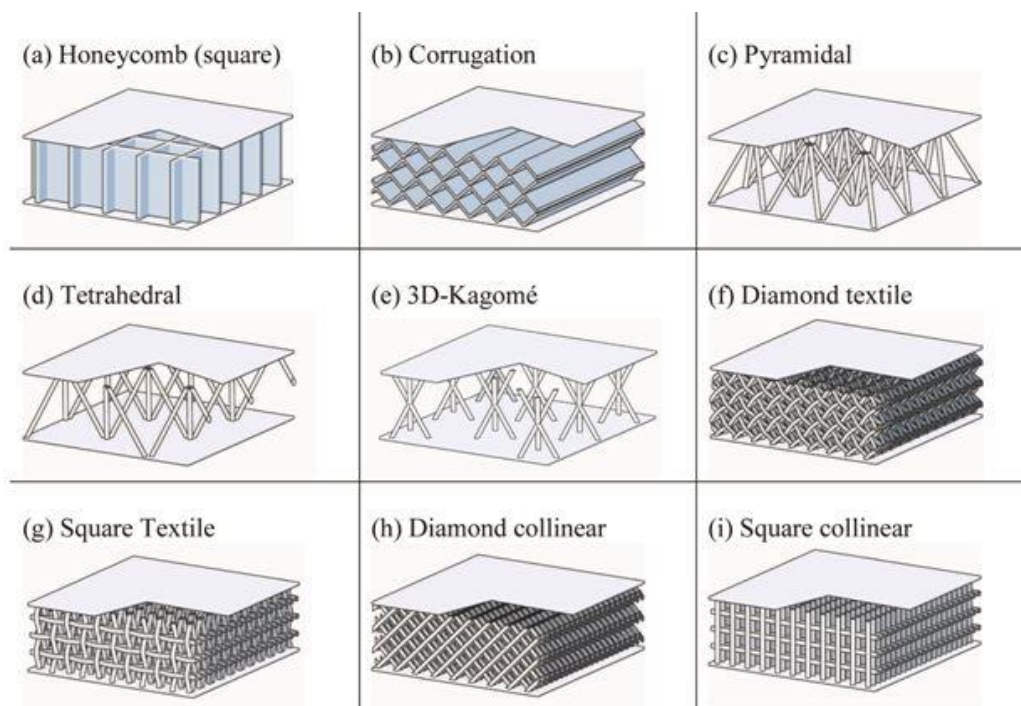
3.1.1 Suunnittelumahdollisuudet

Lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettavaa kappaletta suunniteltaessa on tiedostettava menetelmien tarjoamat mahdollisuudet. Merkittävä mahdollisuus on se, että kappaleelle voidaan suunnitella monimutkaisia geometrioita, jotka eivät ole rajoittuneet työstön tai valamisen aiheuttamiin rajoituksiin. Kuitenkaan kaikkia muotoja ei ole käytännössä mahdollista valmistaa, johtuen laitekohtaisista rajoitteista. Nämä rajoitteet ovat kuitenkin vähäisiä perinteisten valmistusrajoitteiden rinnalla. Vapaamman geometrian suunnittelu mahdollistaa materiaalin käytön vain siellä missä sitä tarvitaan. Tällöin kappaleen geometria voidaan optimoida siten, että saavutetaan halutut muodot tai mekaaniset ominaisuudet niin, että kappaleen massa on mahdollisimman pieni. Kappaleessa voidaan optimoida kokoa mittojen määrittelyllä sekä muotoa pisteiden, käyrien ja pintojen avulla. Kappaleelle voidaan suorittaa myös topologian optimointi, joka on matemaattinen rakenteen optimointimenetelmä. Topologian optimoinnissa kappaleelle haetaan sellaista rakennetta, jossa materiaalin määrä ja sijoittuminen suunnitteluavaruudessa on optimaalisinta (Kuvio 12). Lisäävä valmistus mahdollistaa kappaleen muotojen optimoinnissa myös entistä paremman bionisten muotojen hyödyntämisen. Optimoinnin lisäksi kappaleen geometria voidaan räätälöidä tuotekohtaisesti, joka mahdollistaa hyvin yksilöllisiä muotoja. /9, 10, 12, 18/



Kuvio 12. Hitsattu kappale sekä topologisesti optimoitu kappale, joka on valmistettu lisäävillä menetelmillä /19/.

Mahdollisuus valmistaa monimutkaisia geometrioita ei koske ainoastaan makro- ja mesotason rakenteita, vaan myös nano- ja mikrotason rakenteisiin voidaan vaikuttaa. Rakenteisiin on mahdollista vaikuttaa prosessiparametreilla, esimerkiksi muuttamalla materiaalia sulattavan laserin tehoa paikallisesti. Monimutkaista geometriaa voidaan hyödyntää kappaleessa myös sisäisesti valmistamalla kappaleeseen huokoisia rakenteita. Huukoisilla rakenteilla tarkoitetaan ristikko-, kenno- ja vaahtorakenteita (Kuvio 13). Näillä rakenteilla saavutetaan yleensä hyvät mekaaniset ominaisuudet suhteutettuna massaan. Huukoiset rakenteet vaimentavat myös hyvin värähtelyä ja ääntä sekä eristävät lämpöä. Kappaleen rakenteiden kerrosittainen sekä paikallinen valmistus mahdollistaa myös eri materiaalien käytön samassa kappaleessa. Tällöin kappaleen eri osat, jotka vaativat eri ominaisuuksia tai koostumusta voidaan valmistaa eri materiaalista. Esimerkiksi kappaleen pinta voidaan valmistaa kulutuskestävämmästä materiaalista kuin kappaleen sisusta. /9, 10, 12, 18/



Kuvio 13. Erilaisia huokoisia rakenteita /20/.

Perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistetut tuotteet muodostuvat usein useamman kappaleen kokoonpanoista. Tämä johtuu siitä, että valmis tuote on liian monimutkainen tai mahdoton valmistaa yhtenä kappaleena perinteisillä valmistusmenetelmillä. Lisävän valmistuksen sallima vapaampi geometria mahdollistaa monimutkaisempien kappaleiden valmistuksen, jolloin myös useamman kappaleen kokoonpanot voivat olla mahdollista valmistaa yhtenä kappaleena. Esimerkiksi tuote, joka sisältää sisäisiä muotoja tai kanavia, on hyvin hankala valmistaa perinteisillä valmistusmenetelmillä, mutta lisävällä valmistuksella se on mahdollista. Sisäisten kanavien muodot voidaan myös optimoida parhaan virtauksen saavuttamiseksi. Integroitujen kokoonpanojen lisäksi, kappaleen toiminnallisia piirteitä voi olla mahdollista valmistaa suoraan osaan. Tällaisia piirteitä ovat esimerkiksi saranamekanismit. /9, 10, 12, 18/

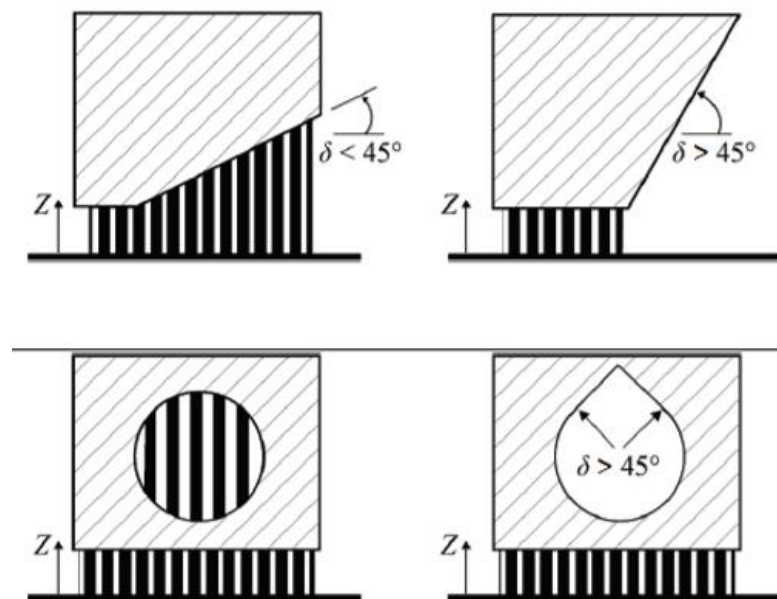
3.1.2 Suunnittelurajoitteet

Suunniteltaessa kappaletta valmistettavaksi lisäävillä valmistusmenetelmillä, on otettava huomioon mahdollisuuksien lisäksi myös valmistusta rajoittavat tekijät. Kappaleen muotoja sekä ominaisuuksia rajoittavat suurimmaksi osaksi käytettävä lisäävän valmistuksen menetelmä sekä materiaali. Eri lisäävän valmistuksen menetelmät asettavat kappaleen suunnittelulle omat rajoitteensa. Myös samalla menetelmällä toimivat eri valmistajien järjestelmät aiheuttavat suunnitteluun laitekohtaisia rajoitteita. Eri valmistusmenetelmät sekä järjestelmät mahdollistavat vain tiettyjen materiaalien valmistuksen. Tällöin kappaleen materiaalin valinta vaikuttaa myös valmistusmenetelmän valintaan ja sitä kautta myös käytettävän järjestelmän valintaan. Kappaletta suunniteltaessa tulee kuitenkin huomioida, että valmistettavien materiaalien määrä on vielä hyvin rajallinen. /10/

Lisäävässä valmistuksessa kappaleen muotoa huomattavasti rajoittava tekijä on valmistettavan kappaleen koko. Kappaleen koko rajoittuu laitekohtaisen tulostusalustan suuruuden mukaan, johon vaikuttaa olennaisesti käytettävä valmistusmenetelmä. Yleisesti tulostusalustat ovat vielä suhteellisen pieniä. Poikkeuksena suorakerrosmenetelmä, jossa ei käytetä valmistukseen tulostusalustaa, vaan kerrostus tapahtuu suoraan määritetyn kappaleen pintaan. Tällöin valmistusaluetta rajoittaa materiaalia sijoittavan laitteen varren pituus. Valmistusmenetelmät sekä järjestelmät rajoittavat myös mahdollisuutta valmistaa pieniä kappaleita (Taulukko 4). Kyky valmistaa pieniä muotoja riippuu laitekohtaisesta resoluutiosta, joka määrittää, kuinka ohuita kerroksia järjestelmä pystyy valmistamaan. Kappaleen ohuissa rakenteissa tulee huomioida myös niiden kestävyys. Järjestelmän resoluutio vaikuttaa myös valmistettavan kappaleen laatuun eli siihen, kuinka tarkasti kappale saadaan valmistettua vastaamaan suunniteltua kappaletta. Kappaleen suunnittelussa tulee erityisesti huomioida järjestelmän valmistustarkkuus, joka määrittää kuinka tarkasti kappaleen piirteet voidaan valmistaa kyseisellä järjestelmällä. Valmistettavan kappaleen laatuun vaikuttaa myös valmistuksessa kappaleelle muodostuva pinnanlaatu. Nämä kappaleen laatuun vaikuttavat tekijät tulee ottaa huomioon jo kappaleen suunnitteluvaiheessa, koska jos kappaleelle vaaditut piirteet ovat tarkempia kuin järjestelmällä on mahdollista valmistaa, tulee kappaleelle

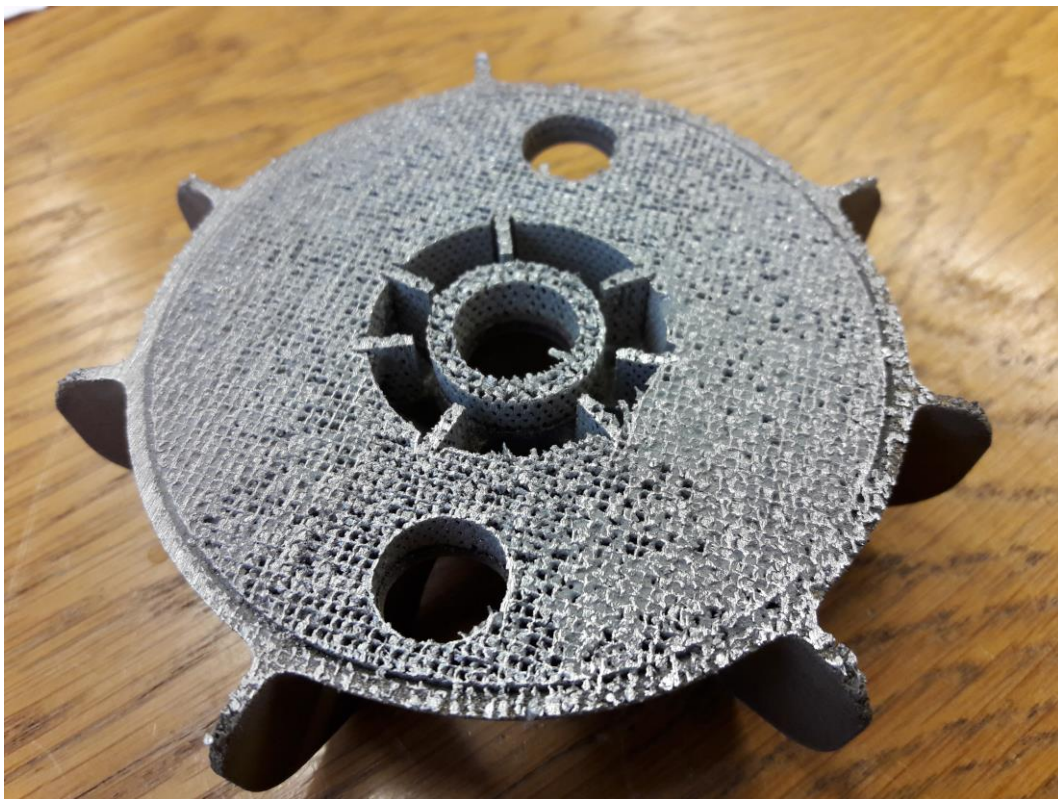
suorittaa jälkikäsitteily. Jälkikäsitteilyn vaatimat ominaisuudet kuten kiinnityskohdat on hyvä myös huomioida jo suunnitteluvaiheessa. Jauhepetimenetelmällä valmistettavissa kappaleissa tulee suunnitteluvaiheessa ottaa huomioon, kuinka ylimääräinen jauhe poistetaan kappaleesta. Jauheen poistaminen etenkin kappaleen sisäisistä rakenteista on usein haastavaa, jolloin kappaleen pintaan on muodostettava tyhjennysaukot. /9–12, 18/

Lisäävässä valmistuksessa on tärkeää huomioida jo suunnitteluvaiheessa, millä menetelmällä ja missä asennossa kappale valmistetaan. Kappaleen muoto ja valmistusasento määrittävät, kuinka paljon mahdollisia tukirakenteita on valmistuksessa käytettävä. Useimmilla lisäävän valmistuksen menetelmillä ei ole mahdollista sijoittaa materiaalia tyhjän päälle. Tällöin kappaletta valmistettaessa on käytettävä tukirakenteita pinnoille, jotka ovat tulostussuuntaan negatiivisia eli pinnoille, jotka niin sanotusti roikkuvat (Kuvio 14). Tukirakenteet ovat usein onttoja tai huokoisia rakenteita (Kuvio 15). Tukirakenteet lisäävät valmistusaikaa ja aiheuttavat kappaleelle ylimääräisiä valmistuskustannuksia käytetystä materiaalista sekä energiankulutuksesta. Tukirakenteiden poisto on usein työlästä ja aiheuttaa pinnanlaadun virheitä, jonka vuoksi myös kappaleen jälkikäsitteilykustannukset kasvavat. Tukirakenteiden poisto on erityisen hankalaa kappaleen sisäisistä rakenteista. Tämän vuoksi kappaletta suunniteltaessa tulee ottaa huomioon valmistusasento ja sijoittelu siten, että roikkuvia pintoja muodostuisi mahdollisimman vähän. Roikkuvia pintoja ei aina pysty estämään, jolloin kappaleen orientaatio tulisi suunnitella siten, että tukirakenteet muodostuisivat kappaleen pintoihin, jotka aiheuttavat kappaleelle vähiten haittaa. Tukirakenteiden sijoittamisessa tulee myös ottaa huomioon, miten tuet saadaan poistettua. Kappaleen orientaation lisäksi myös muotojen suunnittelulla voidaan vähentää tai välttyä kokonaan tukirakenteiden käytöltä. Yleisen säännön mukaan yli 45 asteen kulmassa nousevat pinnat tukevat itse itseään, jolloin tukirakenteita ei tarvita. Tällöin esimerkiksi vaakatasossa olevia ympyrämuotoja ei ole mahdollista valmistaa ilman tukirakennetta, jolloin sisäisten kanavien valmistus hankaloituu. Tilanteessa voidaan välttyä tukirakenteiden käytöltä korvaamalla vaakasuuntaiset ympyrämuodot esimerkiksi niin kutsutulla pisaramuodolla tai salmiakkimuodolla. /9, 10, 12, 18/



Kuvio 14. Tukirakenteen muodostuminen /18/.









Tukirakenteiden lisäksi kappaleen suunnittelussa sekä sijoittelussa tulee huomioida, kuinka kappale irrotetaan tulostusalustasta. Yleisesti muovimateriaaleista valmistetut kappaleet irtoavat tulostusalustasta suhteellisen helposti, toisin kuin metallimateriaalista valmistetut kappaleet. Metallisia kappaleita valmistettaessa materiaali sulaa kiinni tulostusalustaan, jolloin irrottaminen voi olla haasteellista. Kappaleen orientaatio vaikuttaa myös kappaleen pinnanlaatuun. Valmistuksessa parhain pinnanlaatu muodostuu kappaleen ylimpiin kerroksiin, jolloin kappale kannattaa suunnitella valmistettavaksi pinnanlaatuvaatimuksiltaan tarkin pinta ylöspäin. /9, 10, 18/



Kuvio 15. Tukimateriaalin muodostuminen kappaleen tukemattomille pinnoille.

Joitain materiaaleja käytettäessä kappaleen orientaatiolla voi olla myös vaikutusta kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin. Esimerkiksi VTT:n tutkimuksen Lisäävän valmistuksen keskeiset materiaalit ja niiden ominaisuudet 2016 mukaan AISI 316L -teräksellä havaittiin paremmat lujuusominaisuudet vaakatasossa sekä 45° kulmassa valmistettuna, kuin pystysuunnassa. Vaakatasossa valmistettuna myötölujuus $R_{p0.2}$ oli noin 513 MPa, kun taas pystysuunnassa valmistettuna oli noin 465 MPa. Ilmiötä ei kuitenkaan havaittu Inconel 625 ja H13 materiaalien kohdalla. Tutkimuksessa selvisi testattujen materiaalien lujuuksien vastaavan perinteisesti muokkaamalla valmistettujen vastaavien seoksien lujuuksia. Edellä mainittujen materiaalien suhteellisessa tiheydessä päästiin 99,7-99,98 % lukemiin. /21/

Taulukko 4. Esimerkkejä suositeltavista materiaalin vähimmäisvahvuuksista /22/.

Piirre	Lisätiedot	Materiaalin suositeltu vähimmäisvahvuus			
		Teräs	Alumiini	Muovi	Muovi
		Sidenaineen suihkutus	Jauhepeti- sulatus	Jauhepeti- sulatus	Pursotus
Seinämät 	< 76 mm	1,0 mm	1,6 mm	0,7 mm	1,0 mm
	76 mm – 152 mm	1,5 mm			
	152 mm – 202 mm	2,0 mm			
	202 mm <	3,0 mm			
Tukemattomat rakenteet 	< 76 m	1,0 mm	1,6 mm	0,7 mm	1,0 mm
	76 mm – 152 mm	1,5 mm			
	152 mm – 202 mm	2,0 mm			
	202 mm <	3,0 mm			
Pitkät ja ohuet tuetut rakenteet 	< 76 mm	1,0 mm	2,0 mm	0,9 mm	2,0 mm
	76 mm – 152 mm	1,5 mm			
	152 mm – 202 mm	2,0 mm			
	202 mm <	3,0 mm			
Pitkät ja ohuet tukemattomat rakenteet 	< 76 mm	1,0 mm	2,0 mm	1,0 mm	2,0 mm
	76 mm – 152 mm	1,5 mm			
	152 mm – 202 mm	2,0 mm			
	202 mm <	3,0 mm			
Kohotetut yksityiskohdat 	Leveys (Teksti)	1,0 mm	0,4 mm (0,8 mm)	0,2 mm (0,5 mm)	0,6 mm (3,0 mm)
	Korkeus (Teksti)	1,0 mm	0,4 mm (0,5 mm)	0,2 mm (0,5 mm)	0,6 mm (3,0 mm)
Urat 	Leveys (Teksti)	1,0 mm	0,4 mm (0,8 mm)	0,2 mm (0,5 mm)	0,6 mm (3,0 mm)
	Syvyys (Teksti)	1,0 mm	0,4 mm (0,5 mm)	0,2 mm (0,5 mm)	0,6 mm (3,0 mm)
Tyhjennysaukot 		2,0 mm	4,0 mm	4,0 mm	-
Välys 		3 mm	0,6 mm	0,5 mm	0,5 mm

4 LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN HYÖDYNNETTÄVYYS

Lisäävän valmistuksen hyödynnettävyyttä lähdettiin tarkastelemaan jakamalla kohteet valmistettaviin komponentteihin sekä valmistusta tukeviin työkaluihin. Arvioitaessa kohteiden valmistettavuutta lisäävillä valmistusmenetelmillä, pohdittiin taulukossa 5 esitettyjä kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Kohteiden valmistettavuuden lisäksi arvioitiin myös lisäävän valmistuksen tuomia etuja tuotannollisissa seikoissa (Taulukko 6). Jos useamman tekijän vastaus oli positiivinen, tuli lisäävää valmistusta harkita valmistusmenetelmäksi.

Taulukko 5. Valmistettavuuteen vaikuttavat tekijät /8/.

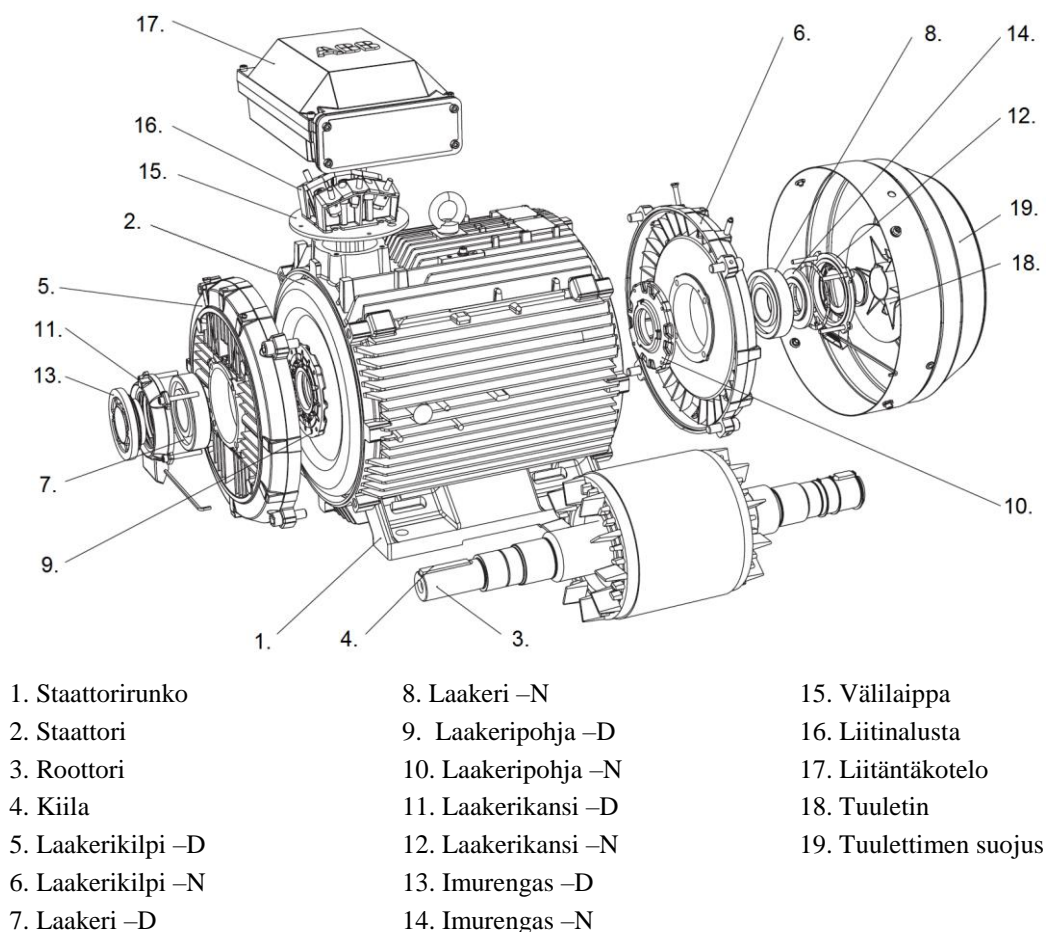
Monimutkaisuus	Onko kappale haasteellista valmistaa perinteisillä menetelmillä?
Koko	Riittääkö tulostusalueen koko? Riittääkö tulostusnopeus?
Räätälöintiaste	Ovatko kappaleet alttiita muutoksille? Sisältääkö kappale yksilöllisiä piirteitä?
Toiminnallisuus	Voidaanko kappaleeseen lisätä toiminnallisia piirteitä? Voiko kappaleen toiminnallisuutta parantaa?
Integraatio	Voiko useamman kappaleen kokoonpanon yhdistää?
Materiaali	Onko tarvittavaa materiaalia saatavilla?
Laatu	Kuinka paljon kappale vaatii jälkikäsittelyä vai kelpaako kappale sellaisenaan?

Taulukko 6. Tuotannolliset tekijät /8/.

Valmistuskustannukset	Valmistetaanko kappale usealla eri valmistusmenetelmällä? Muodostuuko valmistuksesta korkeat kiinteät kustannukset? Kuinka suuret kappalemäärät ovat?
Toimitusaika	Onko kappaleella liian pitkä toimitusaika?
Toimituskustannukset	Aiheutuuko toimittajan sijainnista korkeita toimituskustannuksia?
Toimittaja	Onko kappaleen toimitus yhden toimittajan varassa?
Varastointikustannukset	Aiheutuuko varastoinnista ylimääräisiä kustannuksia?

4.1 Sähkömoottori

Sähkömoottori on sähkökone, joka muuttaa syötetyn sähköenergian pyöriväksi mekaaniseksi energiaksi. Sähkömoottorit voidaan jakaa sähköisen toimintaperiaatteensa mukaan tasasähkökoneisiin sekä vaihtosähkökoneisiin, joista vaihtosähkökoneet jakautuvat vielä tahtikoneisiin sekä epätahtikoneisiin. Opinnäytetyössä keskityttiin pääasiassa epätahtikoneisiin kuuluvan oikosulkumoottorin komponenttien (Kuvio 16) tarkasteluun. Oikosulkumoottorin komponentit jakautuvat aktiiviosiin sekä passiiviosiin. Aktiiviosat staattori ja roottori ovat moottorin sähköisen toiminnan kannalta merkittävimmät osat. Moottorin mekaanisen toiminnan mahdollistaa passiiviosat, kuten staattorirunko, laakerikilvet ja laakerit. /23/



Kuvio 16. Oikosulkumoottorin rakenne, vasemmalla D-pää ja oikealla N-pää /24/.

Passiiviosat ovat suurimmaksi osaksi valmistettu valumenetelmillä, jolloin myös lisäävän valmistuksen hyödyntäminen kyseisissä osissa on yleensä mahdollista. Lisäävien valmistusmenetelmien hyödyntäminen sarjavalmistteisissa osissa ei kuitenkaan ole kannattavaa, koska kappalemäärät ovat suuria, jolloin osien valmistus valumenetelmillä on huomattavasti kustannustehokkaampaa. Lisäävän valmistuksen hyödyt ilmenevät sähkömoottorin osissa, joiden vuosivolyymit ovat pieniä tai erittäin vaihtelevia. Tällaisia osia ovat esimerkiksi erikoiset asiakaskohtaiset osat tai sähkömoottoriin lisävarusteena tilattavat osat. Tällöin osien perinteisessä valmistuksessa mahdollisesti ilmenevät kiinteät kustannukset saattavat olla tilattaviin kappalemääriin nähden liian korkeat tai itse kappaleen valmistuskustannukset saattavat olla liian korkeat. Esimerkkinä tämän kaltaisesta osasta on sähkömoottorin terästuuletin, joka valittiin opinnäytetyössä tarkasteltavaksi lisäävän valmistuksen kohteeksi. Terästuulettimen valmistettavuuteen lisäävillä menetelmillä syvennettiin luvussa 5.

Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen sähkömoottorin osien valmistuksessa voi olla kannattavaa myös, jos osan suunnittelussa tai valmistuksessa käytetään lisäävän valmistuksen ominaisuuksia, joihin perinteisillä menetelmillä ei päästä. Osan ominaisuuksien kehittämisellä tai useamman osan yhdistämisellä voidaan saavuttaa merkittäviä etuja tuotannossa tai lopputuotteessa. Tällöin kalliimpi valmistusmenetelmä saattaa vaikuttaa muihin kustannuksiin alentavasti, jolloin kokonaiskustannukset voivat jäädä edullisemmiksi.

Lisäävällä valmistuksella olisi mahdollista esimerkiksi vähentää moottorin massaa optimoimalla osien materiaalin käytön. Osien optimoinnissa voidaan hyödyntää topologian optimointia, jonka tuloksia olisi mahdollista hyödyntää maksimaalisesti lisäävillä valmistusmenetelmillä, koska optimoinnin tuloksia ei tarvitse muokata perinteisten valmistusrajoitteiden mukaan. Moottorin osien massaa voidaan vähentää huomattavasti myös hyödyntämällä osissa sisäisiä ristikko- tai kennorakenteita.

Moottorin jäähdystystä olisi mahdollista parantaa optimoimalla tuuletusjärjestelmän osia sekä staattorirungon jäähdystysripojen muotoa, rakennetta ja lukumäärää. Lisäävä valmistus mahdollistaisi myös vesijäähdytteisen moottorin jäähdystysvesikanavien muotoilun siten, että kanavien muodolla sekä sijainnilla saavutettaisiin tehokkaampi jäähdystys. Esimerkiksi sijoittamalla useita pieniä kanavistoja mahdollisimman lähelle lämpölähdettä, olisi mahdollista saavuttaa tehokkaampi lämmön johtuminen suoraan lämpölähteestä veteen.

Moottorin sähköisiin ominaisuuksiin olisi mahdollista vaikuttaa materiaalivalinnoilla, kuten magneettisilla ja ei-magneettisilla materiaaleilla sekä niiden yhdistelmillä. Eri materiaaleja voidaan hyödyntää myös esimerkiksi akselin pinnoituksessa. Suorakerrostusmenetelmällä olisi pinnoituksen lisäksi mahdollista valmistaa erilaisia muotoja suoraan akseliin, kuten hammasrattaita tai muita ulokkeita.

4.2 Tuotekehitys

Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen tuotekehityksen tukena on yksi sen merkittävimmistä käyttökohteista. Erityisesti tuotekehityksessä valmistettavat prototyypit ovat lisäävän valmistuksen vanhin ja yleisin käyttökohde. Lisäävää valmistusta voidaan soveltaa myös tuotekehitysprosessin muihin osa-alueisiin kuten markkinaselvityksiin, ideointiin, tuotekonseptin laadintaan, luonnosteluvaiheeseen, pilotointiin, tuotetestaukseen, tuotehyväksyntään sekä markkinointiin. /10/

Prototyyppien valmistus on tärkeä osa tuotekehitysprosessia. Prototyyppien avulla voidaan tarkastella tuotteen toiminnallisuutta sekä muotoilua käytännössä. Tällöin tuotteesta saadaan korjattua mahdolliset virheet ennen varsinaisen tuotannon aloittamista. Perinteisillä menetelmillä valmistettujen prototyyppien kustannukset saattavat usein kohota hyvin korkealle mahdollisten sivukulujen, kuten muottien, vuoksi. Lisäksi valmistus perinteisillä menetelmillä on usein hyvin hidasta. Valmistamalla prototyypit lisäävillä menetelmillä saadaan tuotekehitysprosessia nopeutettua huomattavasti, jolloin mahdollistetaan myös useampi iterointikierrös. Tällöin tuotetta voidaan testata edullisesti ilman sivukuluja, jolloin tuotteesta saadaan korjattua mahdolliset virheet ennen tuotteen siirtämistä lopulliseen tuotantomenetelmään.

4.3 Työkalut

Tuotannossa käytetään useita erilaisia apuvälineitä ja työkaluja valmistuksen sekä kokoonpanon apuna. Usein työkalut ovat tiettyyn tarkoitukseen valmistettuja erikoistyökaluja. Valmistuksessa käytettyjä työkaluja ovat esimerkiksi muotit, koneistuskiinnittimet, tuet, sapluunat sekä mittavälineet. Kokoonpanossa käytettyjä työkaluja ovat esimerkiksi asennus- ja erikoistyökalut sekä automaattista kokoonpanoa avustavat apuvälineet, kuten robottien tarttajat. Kyseisiä työkaluja käytetään tuotannon tehostamiseen sekä laadun parantamiseen.

Työkalut ovat usein hyvin monimutkaisia ja vaikeita valmistaa perinteisillä valmistusmenetelmillä, jolloin myös niiden valmistuskustannukset saattavat nousta hyvin korkealle. Lisäävällä valmistuksella työkalun monimutkaisuus ei lisää valmistuskustannuksia, jolloin työkalu voidaan valmistaa niin monimutkaisena kuin on tarve. Tällöin työkaluihin voidaan suunnitella täysin uusia ominaisuuksia tai optimoida ne vastaamaan käyttötarkoitustaan paremmin. Esimerkiksi kokoonpanossa käytetyt asennustyökalut voidaan suunnitella ja valmistaa kevyemmiksi sekä käyttäjäystävällisemmiksi.

4.3.1 Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen valumenetelmissä

Yleinen lisäävän valmistuksen käyttökohde on valmistaa tarkkuusvalumenetelmän malleja. Mallilla tarkoitetaan valmistettavan kappaleen kopiota, jolla haluttu muoto saadaan valumuottiin. Lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistetun mallin materiaali on usein vaha. Tarkkuusvalumenetelmän keraaminen valumuotti valmistetaan päällystämällä malli keraamilla, jonka kovetuttua vaha sulatetaan ulos muotista, jolloin muotin sisälle jää kappaleen muotoinen onkalo. Lisäävällä valmistuksella voidaan valmistaa mallien lisäksi myös erilaisia muotteja. Esimerkiksi hiekkamuottien valmistaminen on mahdollista sideaineen suihkutus -menetelmällä.

/10/

Muotteja voidaan valmistaa suoraan myös metallimateriaaleista. Tällöin yksi mahdollinen kohde lisäävän valmistuksen hyödyntämiselle voisi olla sähkömoottorituotannossa käytettävä roottorin oikosulkurenkään valumuotti. Oikosulkuren-

kaan kestopuottia käytetään valettaessa roottoriin alumiinihakkikäätymistä. Alumiinihakkikäätymyksellä tarkoitetaan alumiinitankoja, jotka muodostuvat painevalussa roottorin päällekkäin ladottujen dynamolevyjen uriin ja joita yhdistää roottoripaketin päihin muodostuvat oikosulkurenkaat. Oikosulkurenkaan valumuotti koostuu kahdesta muotin puolikkaasta sekä niiden väliin asetettavasta esilämmityskanavasta. Toiseen muotin puolikkaaseen on koneistettu oikosulkurenkaan muodot sekä ura esilämmityskanavalle (Kuvio 17) ja toiseen muodot, jotka mahdollistavat muotin kiinnityksen valukoneeseen (Kuvio 18).



Kuvio 17. Oikosulkurenkaan muotin puolikas, jonka toisella puolella esilämmityskanava ja toisella puolella oikosulkurenkaan muotojen negatiivipinta.



Kuvio 18. Oikosulkurenkaan muotin puolikas, joka mahdollistaa muotin kiinnityksen valukoneeseen.

Lisäävää valmistusta hyödyntämällä valumuottiin olisi mahdollista suunnitella täysin uudenlaisia piirteitä, jotka tehostaisivat valumuotin toimintaa. Valumuotin esilämmityskanava olisi mahdollista valmistaa integroidusti suoraan valumuotin sisälle, jolloin kanava olisi mahdollista korvata useammalla pienellä valumuottia kiertävällä kanavalla. Tällöin lämmityspinta-ala kasvaisi ja valumuotin lämpeneminen nopeutuisi. Esilämmityskanavan integrointi ja uudelleensuunnittelu mahdollistaisi valumuotin osien yhdistämisen yhdeksi osaksi. Valumuotissa olisi mahdollista hyödyntää myös sisäisiä kenno- tai ristikkorakenteita, jolloin valumuotin massa vähenisi mutta kestävyys säilyisi. Tällöin tulisi kuitenkin huomioida käytettävä seinämävahvuus siten, että seinämä kestäisi siihen kohdistuvat voimat. Valmistettaessa muotti lisäävillä valmistusmenetelmillä, välttyttäisiin haastavien muotojen koneistukselta, mutta tarkat sovitepinnat sekä kierteet tulisi kuitenkin koneistaa.

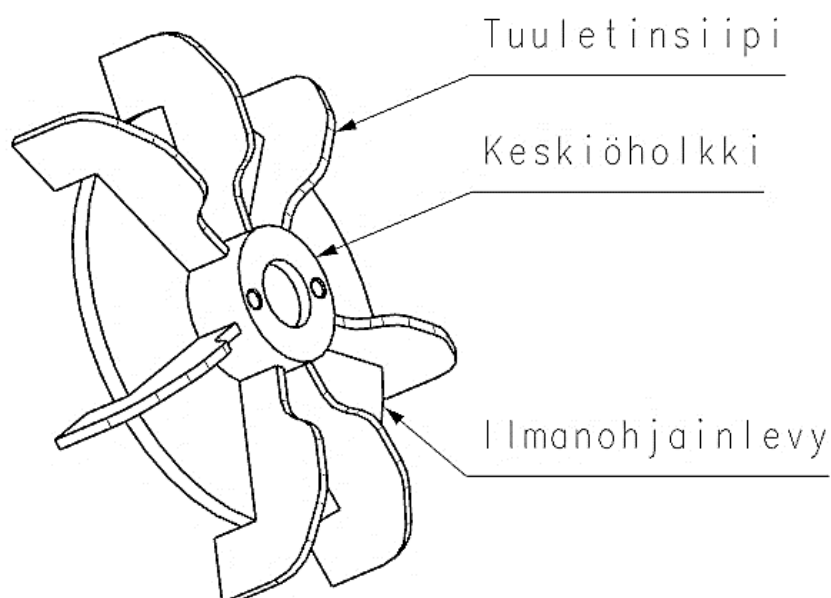
5 TERÄSTUULETTIMEN VALMISTAMINEN LISÄÄVILLÄ VALMISTUSMENETELMILLÄ

Teräksestä valmistettu tuuletin on sähkömoottorin lisävaruste, jonka asiakas voi ostaa muovisen vakiotuulettimen tilalle tilatessaan sähkömoottoria. Terästuulettimia käytetään yleensä vaativissa olosuhteissa, joissa tuulettimelta vaaditaan erityistä kestävyyttä. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi vaativat ympäristöolosuhteet sekä tilanteet, joissa tuulettimeen voi kohdistua ulkoista mekaanista rasitusta. Yleisin käyttökohde on kaivosteollisuus. Terästuulettimia on saatavilla Vaasassa valmistettävien pienjännitemoottoreiden kokoluokkiin 71–400.

Tällä hetkellä useimmat terästuulettimet koostuvat erillisistä tuuletinsiivistä sekä keskiöholkista (Kuvio 19), joka koostuu kiinnitysholkista sekä ilmanohjainlevystä. Tuuletinsiivet valmistetaan ohutlevystä, jotka hitsataan koneistettuun keskiöholkkiin. Valmistuksen jälkeen tuuletin tasapainotetaan sekä maalataan. Terästuulettimien valmistaminen edellä mainituilla menetelmillä on erittäin kallista. Terästuulettimen valmistuksen muuttamista valettavaksi on tutkittu osana Ossi Reinikaisen diplomityötä. Työssä verrattiin hitsattua terästuuletinta tarkkuusvalulla valmistettuun terästuulettimeen. Tarkkuusvalumenetelmä osoittautui työssä tehdyllä kustannuskyselyllä halvemmaksi valmistusmenetelmäksi, mutta se vaatisi työkaluinvestointeja /25/. Työkaluinvestoinneista johtuen tilattavat kappalemäärät tulisi olla huomattavasti suuremmat kuin nykyiset tilausmäärät. Tilausmäärät kasvaisi, jos käytettäisiin samaa tuuletinta erilaisissa moottoreissa /25/. Lisävarusteenä tilattavat terästuulettimet ovat kuitenkin usein hyvin asiakaskohtaisia ja näin voivat olla alttiita muutoksille.

Terästuuletin on ideaalinen käyttökohde lisäävän valmistuksen hyödyntämiselle. Tuulettimen monimutkaisen ja haasteellisen rakenteen vuoksi perinteisessä valmistuksessa joudutaan käyttämään useita eri valmistusmenetelmiä, jolloin tuulettimen valmistuskustannukset ovat korkeat. Tuulettimien tilausmäärät ovat vaihtelevia, jolloin valmistus olisi hyvä suorittaa piensarjoissa. Piensarjatuotanto on lisäävässä valmistuksessa kustannustehokkainta. Tällöin välttyttäisiin myös varastoinnilta ja pystyittäisiin pitämään tuulettimien toimitusajat lyhyinä. Valmistus li-

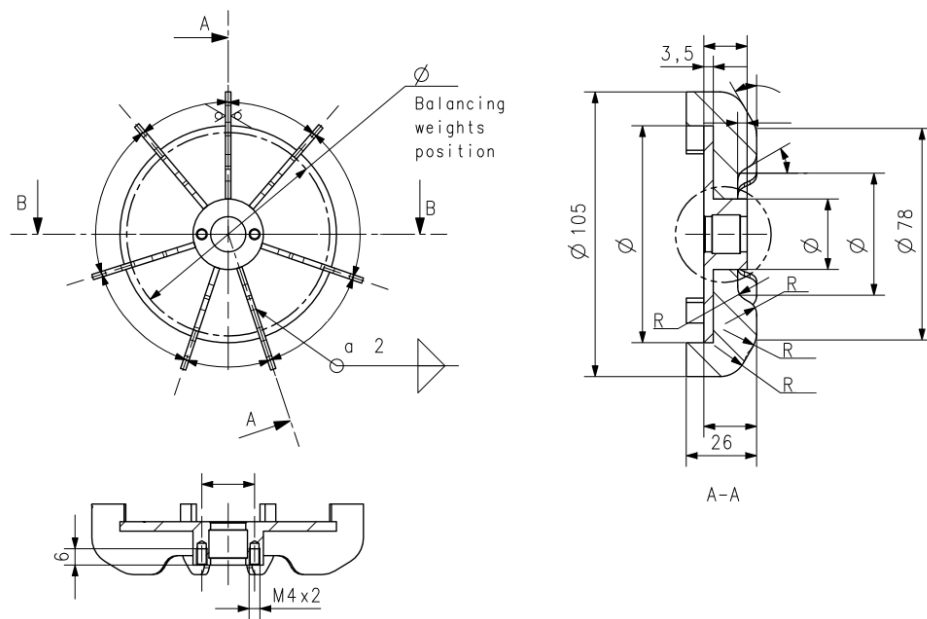
säävillä menetelmillä mahdollistaisi myös uusien piirteiden ja muotojen suunnittelun tuulettimeen, jolloin tuulettimen ominaisuuksia voisi parantaa.



Kuvio 19. Terästuulettimen osat.

5.1 Lähtökohdat

Lisäävillä menetelmillä valmistettavaksi tuulettimeksi valittiin 71 kokoluokan pienjännitemoottorin terästuuletin (Kuvio 20), koska se on pienin Vaasan tehtaalla käytetty terästuuletin. Tällä hetkellä kyseinen terästuuletin koostuu seitsemästä erillisestä tuuletinsiivestä, jotka valmistetaan 2mm paksusta ohutlevystä. Tuuletinsiivet hitsataan koneistettuun keskiöholkkiin, joka muodostuu keskiöstä ja ilmaa ohjaavasta päätylevystä. Tuulettimen kiinnitys akseliin tapahtuu kitkasovitteella. Sovitetta vahvistetaan akselin ja tuulettimen väliin asetettavalla toleranssirenkaalla. Tuulettimen ulosvetotapa on toteutettu kahdella kierrereiällä. Yhden terästuulettimen valmistus maksaa 133,9 €, joka on noin 25 % moottorin hinnasta.



Kuvio 20. Hitsatun terästuulettimen päämitat (Liite 1.).

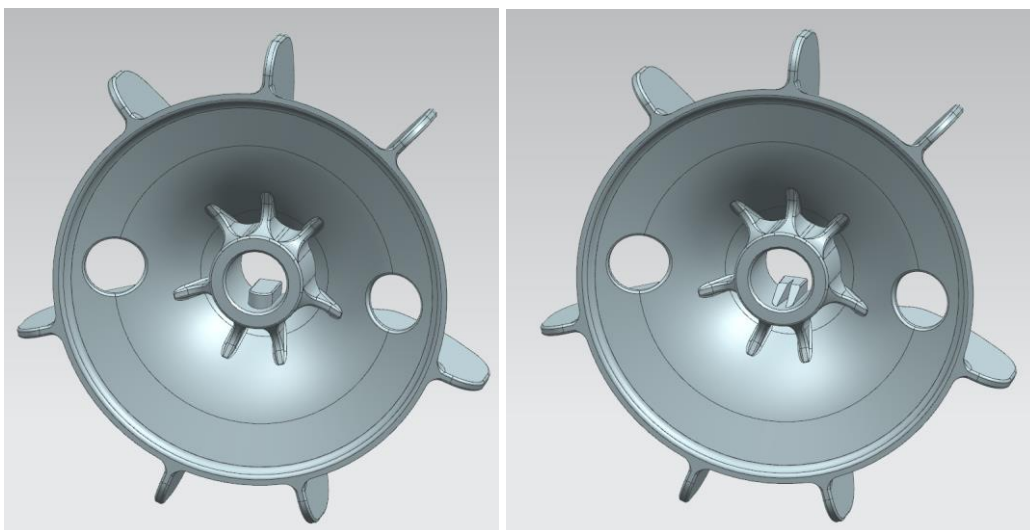
5.2 Suunnittelu

Uuden lisäävillä menetelmillä valmistettavan terästuulettimen suunnittelu aloitettiin keräämällä tietoa eri sovelluksissa sekä eri sähkömoottoreissa käytettävistä tuulettimista. Tarkasteltaessa sähkömoottorin eri kokoluokkien tuulettimia sekä eri materiaaleista valmistettuja tuulettimia ilmeni, että tuulettimien muodot sekä rakenteet poikkeavat toisistaan hyvin paljon. Poikkeavia muotoja sekä rakenteita ovat tuulettimen kiinnitystapa akseliin, tuuletinsiipien lukumäärä ja jako, siipien muoto, tuulettimen ilmanohjainlevyn muoto, jäykisterivat, ulosvetotapa sekä tuulettimen materiaali. Eri tuulettimista valikoitiin parhaat ominaisuudet, jonka pohjalta lähdettiin suunnittelemaan uuden tuulettimen rakennetta. Tuulettimen rakenteessa tuli huomioida, että tuulettimen ominaisuudet ovat yhtenevät molempiin suuntiin pyöriessä. Uuden tuulettimen suunnittelussa käytettiin myös Flowfield Oy – yrityksen suorittaman tutkimuksen tuloksia. Tutkimuksessa suoritettiin numeerinen virtausmallinnus (CFD), jolla pyrittiin etsimään virtausteknisesti parannettu muoto sähkömoottorin tuulettimelle, tuuletinsuojalle sekä staattorirungolle /26/. Tuulettimen suunnittelussa sekä mallintamisessa käytettiin NX 10 3D-suunnitteluohjelmistoa.

Uuden tuulettimen (Liite 3) suunnittelussa huomioitiin myös lisäävän valmistuksen asettamat rajoitteet sekä mahdollistamat hyödyt. Suunnittelussa hyödynnettiin muotoilun vapautta, mutta samalla huolehdittiin, että tukimateriaalin määrä pysyisi mahdollisimman pienenä. Tukimateriaalin käyttö minimoitiin suunnittelemalla tuuletin valmistettavaksi siten, että tuuletinsiivet ovat valmistussuuntaan nähden ylöspäin. Tällöin myös tuulettimen näkyvälle etupuolelle muodostuva pinnanlaatu on parempi. Tukimateriaalin tarvetta vähennettiin myös käyttämällä mahdollisuuksien mukaan alle 45° kulmassa nousevia pintoja, jolloin rakenne tukee itse itseään. Uuden tuulettimen tarkasti toleroidut muodot mallinnettiin toleranssin keskelle, jolloin valmiin tuulettimen tarkistuksessa pystyttiin arvioimaan, riittääkö valmistustarkkuus määrättyyn toleranssiin. Terästuulettimen uudelleen suunnitellulla massalla saatiin pudotettu yli 20 % alkuperäisestä, 0,24 kilogrammasta 0,19 kilogrammaan.

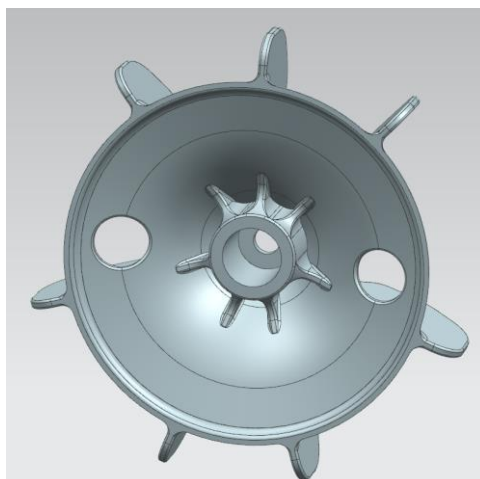
5.2.1 Kiinnitystapa

Tällä hetkellä tuulettimien kiinnityksessä on käytössä toleranssirengasavusteisen kitkasovitteen lisäksi kiilakiinnitys joko erillisellä tai integroidulla kiilalla. Kiilakiinnitys on todettu paremmaksi kiinnitysratkaisuksi, koska se estää varmimmin tuulettimen pyörittämisen akselin ympärillä. Lisäävällä valmistuksella valmistettavassa tuulettimessa olisi kannattavinta hyödyntää integroitua kiilaa (Kuvio 21), koska muodon valmistaminen ei lisäisi kustannuksia merkittävästi, mutta asennus helpottuisi huomattavasti. Haasteena kiilakiinnityksessä on kuitenkin kiilan leveyden tarkka toleranssi, johon lisäävillä menetelmillä ei välttämättä suoraan päästä. Tällöin kiilan muoto tulisi koneistaa, joka lisäisi valmistuskustannuksia huomattavasti. Kiilakiinnitys olisi mahdollista valmistaa myös siten, että integroidun kiilan leveys olisi kasvava (Kuvio 21), jolloin kiila toimisi ahdistussoviteena, kun tuuletin työnnetään akselin ympärille. Tällöin kiilaa ei tarvitsisi koneistaa tarkkaan toleranssiin. Haasteena kyseisessä kiinnitystavassa olisi kuitenkin se, muodostaisiko sovite tarpeeksi välyksettömän pinnan akselin ja tuulettimen välille.



Kuvio 21. Integroitu normaalikiila sekä ahdistuskiila.

Yhtenä vaihtoehtona tuulettimen kiinnitykselle olisi myös se, että akselin pääty sekä tuulettimen keskiöreikä valmistettaisiin kartioksi (Kuvio 22). Lisäksi tuulettimen reiän pääty suljettaisiin siten, että päätyyn jäisi kiinnitysruuville reikä. Tällöin tuulettimen kartioreikä toimisi ahdistussovitteena, kun tuuletin työnnetään akselin ympärille. Ahdistus tulisi kuitenkin varmistaa ruuvilla, joka kierrettäisiin tuulettimen päädyssä olevasta reiästä akseliin. Haasteena kiinnitystavassa olisi sama kuin ahdistuskiilasovitteessa ja se, että varmistaisiko kiinnitysruuvi ahdistuksen pysyvyyden. Tuulettimen kiinnitystavaksi valittiin vakio terästuulettimessa oleva toleranssirengasavusteinen ahdistusovite, koska tällä hetkellä kokoluokan 71 akseleita ei valmisteta kiilauralla ja tuuletin haluttiin valmistaa olemassa olevalla kiinnitysratkaisulla.



Kuvio 22. Kartiosovite.

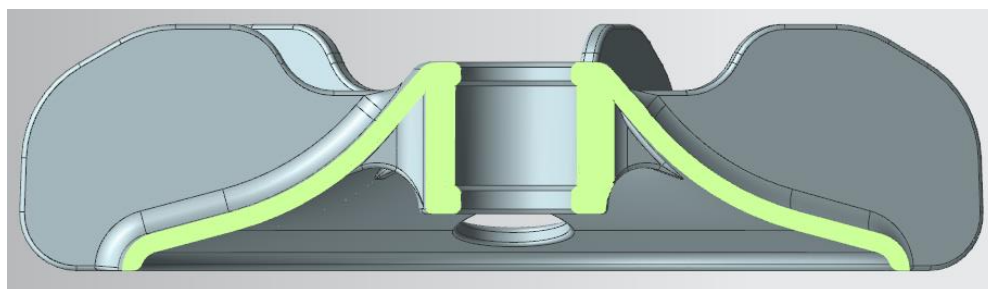
5.2.2 Tuuletinsiivet

Alkuperäisessä terästuulettimessa sekä vastaavassa muovituulettimessa käytetään seitsemää tuuletinsiipeä, jotka ovat jaoteltu tuulettimeen epätasaisesti siten, että jokaisen tuuletinsiiven välinen kulma on eri. Myös tuuletinsiipien muoto on yhtenevä sekä terästuulettimessa että muovituulettimessa. Koska alkuperäisten tuulettimien tuuletinsiipien lukumäärä sekä jako on todettu toimivaksi, käytettiin myös uudessa terästuulettimessa vastaavia ominaisuuksia. Tuuletinsiipien muoto pidettiin lähes samana, mutta pyöristyksiä hieman suurennettiin. Erityisesti alkuperäisessä tuuletinsiivessä laakerikilpeä vasten oleva terävä kulma pyöristettiin. Pyöristyksellä pyritään vähentämään tuulettimesta aiheutuvaa melua.

5.2.3 Ilmanohjainlevy

Alkuperäisessä terästuulettimessa ilmanohjainlevy koneistetaan kiinnitysholkin päätyyn kohtisuorasti nousevaksi olakkeeksi. Kiinnitysholkin ja ilmanohjainlevyn yhteyteen jäävä terävä kulma aiheuttaa ilmavirtaan haitallisia pyörteitä /26/. Laakerikilven kanssa yhdensuuntainen ilmanohjainlevy ei myöskään ohjaa ilmavirtaa optimaalisesti staattorirungon ympärille. Vastaavassa muovituulettimessa ilmanohjainlevy on laakerikilpeä vasten 15 asteen kulmassa, jolloin pyörteitä syntyy vähemmän ja ilma virtaa paremmin staattorirungon ympärille. Uudessa terästuu-

lettimesta ilmanohjainlevy muotoiltiin ilmavirtauksen kannalta mahdollisimman optimaaliseksi (Kuvio 23). Ilmanohjainlevy muodostettiin alkavaksi kiinnitysholkin etureunasta, jolloin välttyttiin ylimääräisiltä kulmilta. Ilmanohjainlevyn muotoa jatkettiin tasaisella kaarella kohti tuuletinsiipien ulkoreunaa. Kaarevalla muodolla mahdollistetaan ilman optimaalinen virtaus staattorirungon ympärille, jolloin välttyään myös haitallisilta pyörteiltä.



Kuvio 23. Uuden tuulettimen poikkileikkaus.

Ilmanohjainlevyn ja kiinnitysholkin väliin muodostettiin jäykisterivat, joilla vahvistettiin tuulettimen rakennetta. Alkuperäisessä terästuulettimessa olevat ulosvetokierretoriät korvattiin ilmanohjainlevyyn muodostettavilla pyöreillä ulosvetorei'illä, jolloin välttyttiin kierteiden koneistamiselta. Ilmanohjainlevyn uudella muotoilulla levyn ulkoreunat saatiin lähemmäksi laakerikilpeä kuin alkuperäisessä terästuulettimessa. Tällöin ilmanohjainlevy estää paremmin epäpuhtauksien kulkemisen tuulettimen taakse.

Suunniteltaessa ilmanohjainlevyn muotoa pohdittiin myös sen käytännön vaikutusta tuulettimen toimintaan. Työssä mietittiin muuttuisiko tuulettimen toiminta oleellisesti, jos ilmanohjainlevy poistettaisiin joko osaksi tai kokonaan ja tuuletinsiivet tuettaisiin jäykisterimoilla. Tällöin materiaalin tarve vähenisi, joka vaikuttaisi tuulettimen valmistuskustannuksiin sekä massaan, etenkin suuremman kokoluokan tuulettimissa. Ilmanohjainlevyn vaikutusta tarkasteltiin myös käytännön testillä (Liite 2). Testissä tarkasteltiin ilmanohjainlevyyn porattujen Ø5 millimet-

rin reikien vaikutusta tuuletusominaisuuksiin. Testi suoritettiin poraamalla eri määrä reikiä kolmen eri muovituulettimen ilmanohjainlevyyn. Muokatuista tuulettimista mitattiin ilmavirtaus moottorin sivulla sekä edessä, äänenvoimakkuus moottorin läheisyydessä sekä tuulettimien aiheuttamat kitkahäviöt. Mitattuja arvoja verrattiin muokkaamattoman tuulettimen arvoihin. Testin tulokset osoittivat, että poratuilla rei'illä ei ollut huomattavaa vaikutusta tuulettimen ominaisuuksiin, jolloin ilmanohjainlevyn kevennys olisi mahdollista. Suunniteltavassa uudessa kokoluokan 71 terästuulettimessa haluttiin kuitenkin säilyttää eheän ilmanohjainlevyn muut hyödyt, minkä vuoksi ilmanohjainlevyn rakenteesta ei poistettu materiaalia.

5.3 Tuulettimen tilaus

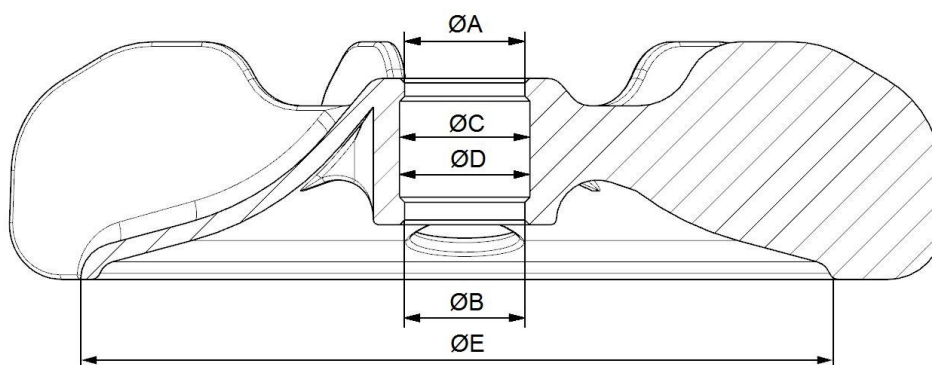
Uuden terästuulettimen 3D-malli muutettiin STL-tiedostoksi, jonka avulla tehtiin tarjouskyselyt seitsemään eri lisäävän valmistuksen yritykseen, joista kaksi yritystä toimii ulkomailla ja loput Suomessa. Kyseiset kaksi ulkomailla toimivaa yritystä käyttää metallin valmistusmenetelmänään sideaineen suihkutuksen menetelmää, ja Suomessa toimivat yritykset jauhepetisulatusmenetelmää. Tarjouskyselyssä tuulettimen materiaalina käytettiin ruostumatonta terästä, koska se on yksi yleisimmistä käytetyistä metallimateriaaleista lisäävässä valmistuksessa. Suomalaisista yrityksistä saadut tarjoukset olivat 380 € – 550 € välissä ja ulkomaisten yritysten tarjoukset olivat 111 € sekä 132,65 €. Tuuletin tilattiin ulkomaisesta Shapeways-yrityksestä (132,65 €) sekä suomalaisesta 3D-step-yrityksestä (410 €). Yritykset valikoituivat valmistusmenetelmän sekä nopean toimitusajan vuoksi. Tällöin mahdollistettiin kahdella eri valmistusmenetelmällä tuotetun tuulettimen vertailu. 3D-step-yritykseltä kysyttiin myös hinta-arvio useammalle kappalemäärälle. Useamman tuulettimen tilauksessa hinta olisi 350 €/kpl.

5.4 Tarkastelu

Saapuneille tuulettimille suoritettiin tarkastus (Kuvio 24), jossa mitattiin tuulettimien massa, pinnanlaatu, keskiöholkin kiinnitysreiän halkaisijat sekä ulkohalkaisija (Taulukko 7). Kiinnitysreiän halkaisijat mitattiin koordinaattimittakoneella kuvion 25 osoittamista kohdista. Koordinaattimittakoneella mitatut halkaisijat mitattiin kuudella pisteellä, jolloin saatiin tarkastettua myös halkaisijoiden ympyrä-mäisyys. Tuulettimien pinnanlaatu mitattiin neljästä pisteestä, joista laskettiin Ra-arvon keskiarvo. Tuulettimien massat mitattiin tarkkuusvaa'alla.



Kuvio 24. Koordinaattimittakone, tarkkuusvaaka sekä pinnankarheusmittari.



Kuvio 25. Tuulettimesta tarkastetut halkaisijat.

Taulukko 7. Mittaustulokset.

Halkaisijat [mm]		Tuuletin	
		Shapeways / Sideaineen suihkutus	3D-step / Jauhepetisulatus
ØA	Ero mallinnettuun halkaisijaan	-0,295	0,147
	Toleranssin ylitys	-0,245	0,097
	Ympyrämäisyyspoikkeama	0,033	0,028
ØB	Ero mallinnettuun halkaisijaan	-0,299	0,006
	Toleranssin ylitys	-0,249	0
	Ympyrämäisyyspoikkeama	0,037	0,065
ØC	Ero mallinnettuun halkaisijaan	-0,352	0,110
	Toleranssin ylitys	-0,331	0,089
	Ympyrämäisyyspoikkeama	0,065	0,047
ØD	Ero mallinnettuun halkaisijaan	-0,337	0,071
	Toleranssin ylitys	-0,316	0,050
	Ympyrämäisyyspoikkeama	0,074	0,076
ØE	Ero mallinnettuun halkaisijaan	-1,65 *	-0,8 *
Pinnanlaatu Ra-arvo [µm]			
	Piste 1	10,36	12,06
	Piste 2	12,44	17,36
	Piste 3	7,8	4,68
	Piste 4	9,02	9,67
	Keskiarvo	9,9	10,9
Massa [kg]			
	Mitattu	0,188	0,182
	Ero nimellisarvoon	-0,003	-0,009

*Halkaisija pienentynyt viimeistelyssä tehdyn pyöristyksen vuoksi.

5.5 Yhteenveto

Valmistetut tuulettimet (Kuvio 26 ja Kuvio 27) osoittautuivat laadultaan ja rakenteeltaan oletettua paremmiksi. Sideaineen suihkutus -menetelmällä valmistetun tuulettimen mitat olivat noin 0,3 mm pienemmät kuin 3D-mallissa. Jauhepetisulatusmenetelmällä valmistetun tuulettimen mitat olivat noin 0 mm – 0,15 mm suuremmat kuin 3D-mallissa. Tulokset osoittivat, että menetelmillä voidaan valmistaa tarkkoja piirteitä, mutta valmistustarkkuudet eivät kuitenkaan riitä tarkasti toleroitujen pintojen valmistukseen. Tällöin tuulettimen keskiöholkin reikä vaatii koneistuksen, jotta reiän halkaisija saadaan toleranssiin.

Valmistettujen tuulettimien pinnanlaadut osoittautuivat pääosin sovellukseen sopivaksi. Sideaineen suihkutus -menetelmällä valmistetun tuulettimen pinnanlaatu oli tasalaatuinen, Ra-arvo pysyi noin 10 mikrometrissä ympäri tuuletinta. Jauhepetisulatusmenetelmällä valmistetun tuulettimen pinnanlaatu vaihteli huomattavasti. Parhain pinnanlaatu sijaitsi tuuletinsiipien sivuilla. Ilmanohjainlevyn ulkopinnassa pinnanlaatu huononi selvästi. Ilmanohjainlevyn sisäpinnan pinnanlaatu oli todella huono, mikä johtui siitä, että tukimateriaalin poisto ei täysin onnistunut. Tämän vuoksi sisäpinnan pinnanlaatua ei huomioitu Ra-arvo mittauksissa. Kokonaisuudessaan sideaineen suihkutus -menetelmällä valmistettu tuuletin oli laadultaan parempi ja huomattavasti halvempi kuin jauhepetisulatusmenetelmällä valmistettu tuuletin.

Hitsattuun terästuulettimeen verrattuna lisäävillä menetelmillä valmistetut tuulettimet ovat huomattavasti tasalaatuisempia. Esimerkiksi tuuletinsiipien muoto sekä sijainti pysyvät muuttumattomina toisin kuin tuuletinsiivissä, jotka ovat leikattu sekä kiinnitetty hitsaamalla. Lisäävällä valmistuksella tuulettimen massa pysyy myös hyvin lähellä arvioitua. Hitsatuissa hitsisauman koko voi vaihdella, jolloin tuulettimen massa saattaa vaihdella. Lisäävillä menetelmillä valmistetun tuulettimen muodot ovat tuuletusominaisuuksiltaan huomattavasti paremmat kuin hitsatun terästuulettimen. Lisäävä valmistus mahdollistaa myös tuulettimen kiinnitykselle eri vaihtoehtoja.



Hitsaamalla
valmistettu
terästuuletin

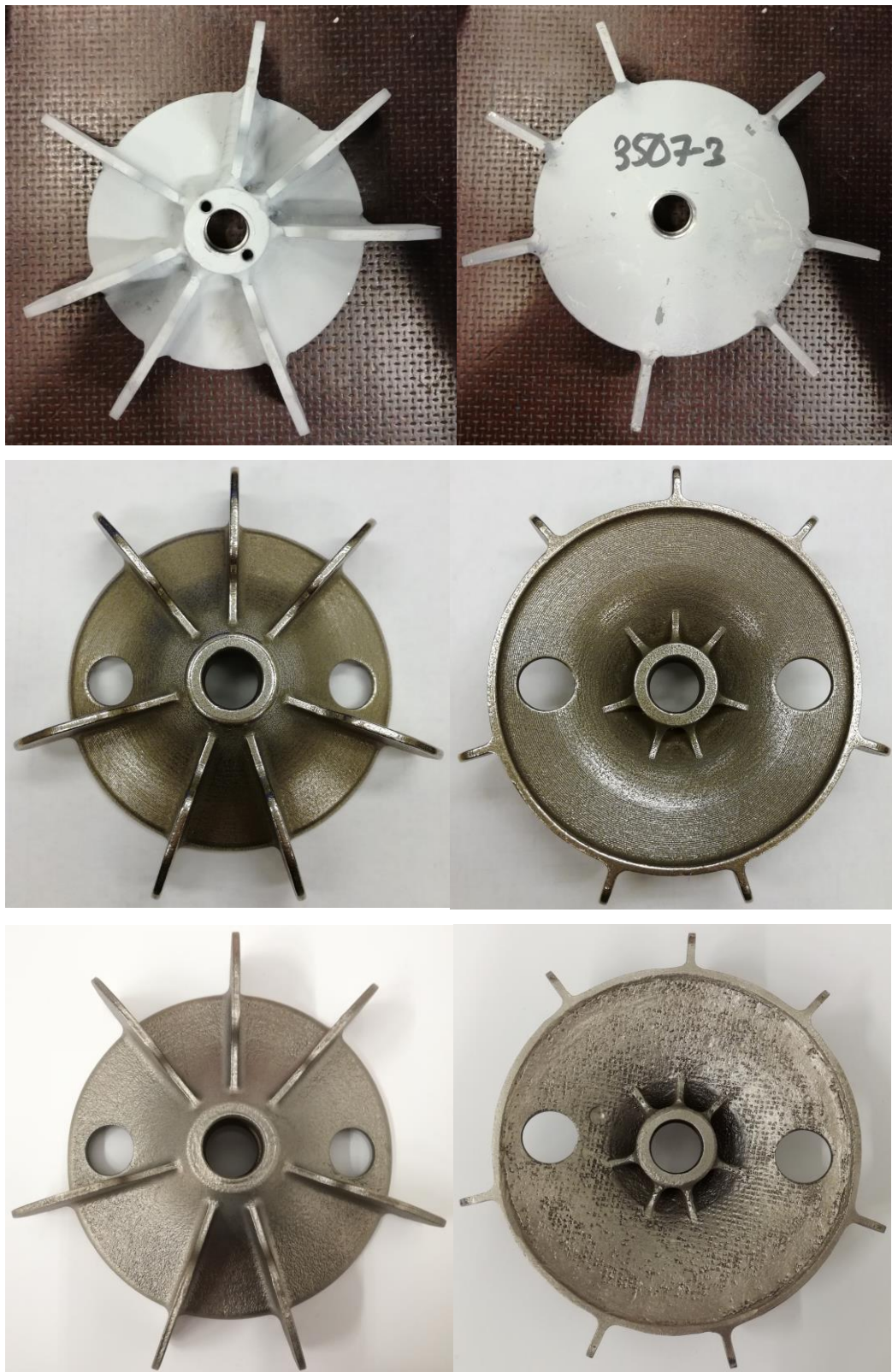


Sideaineen suihkutus-
menetelmällä
valmistettu
terästuuletin



Jauhepetisulatus-
menetelmällä
valmistettu
terästuuletin

Kuvio 26. Terästuuletin valmistettuna kolmella eri menetelmällä.



Kuvio 27. Terästuulettimet molemmilta puolilta kuvattuina.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyössä esiteltiin materiaalia lisäävää valmistusta siten, että lukija saisi kokonaisvaltaisen käsityksen valmistustekniikasta sekä sen käyttömahdollisuuksista. Opinnäytetyössä esiteltiin valmistusprosessia, seitsemää standardoitua lisäävää valmistusmenetelmää, yleisesti käytettyjä materiaaleja sekä mahdollisia jälkikäsittelytarpeita. Opinnäytetyössä tuotiin esille myös suunnittelussa huomioitavia mahdollisuuksia sekä rajoitteita. Esitelty teoriatausta toimii ohjeistuksena, kun harkitaan kappaletta valmistettavaksi lisäävillä menetelmillä.

Opinnäytetyössä tarkasteltuja lisäävän valmistuksen käyttökohteita olivat sähkömoottorin komponentit sekä tuotannon apuvälineet. Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen osoittautui kannattavaksi komponenteissa, joiden vuosivolyymit ovat pieniä tai, jos komponenttiin lisätään ominaisuuksia, joihin ei perinteisillä menetelmillä päästä. Sarjavalmistesteisten komponenttien valmistaminen lisäävillä menetelmillä ei tällä hetkellä ole kannattavaa. Tuotannon apuvälineissä sekä tuotekehityksessä lisäävillä menetelmillä voidaan saavuttaa merkittäviä etuja, kuten mahdollisuutta valmistaa monimutkaisia muotoja kasvattamatta valmistuskustannuksia. Tällöin valmistuskustannukset voivat olla pienemmät kuin perinteisillä menetelmillä valmistettuna. Lisäksi valmistusmenetelmän nopeus tuo merkittäviä etuja tuotekehityksessä.

Opinnäytetyössä valittiin syvemmin tarkasteltavaksi lisäävän valmistuksen kohteeksi sähkömoottorin terästuuletin. Terästuulettimen valmistaminen lisäävillä menetelmillä mahdollisti uusien ominaisuuksien lisäämisen tuulettimen rakenteeseen sekä massan kevennyksen. Lisäävillä menetelmillä valmistetut terästuulettimet osoittautuivat laadukkaiksi sekä mittatarkoiksi. Tarkkuus ei kuitenkaan riittänyt tuulettimen keskiöholkin reiän määrättyyn toleranssiin, jonka vuoksi reikä vaatii lisäksi koneistuksen. Koneistuksen voisi välttää vaihtamalla kiinnitystapaa tai tilaamalla tuulettimia lisää, jolloin selviäisi todellinen valmistustarkkuus. Jos tuulettimen reiän halkaisija todetaan pienentyvän tai suurentuvan valmistusmenetelmästä riippuen aina suunnilleen yhtä paljon, voidaan reiän koko huomioida jo

3D-mallissa siten, että halkaisija pysyisi toleranssissa. Koneistus olisi mahdollista välttää myös asentamalla tuuletin lämmittämällä.

Terästuulettimen valmistaminen lisäävillä menetelmillä osoittautui kannattavaksi vaihtoehdoksi. Kustannukset pysyivät lähes samana, mutta tuulettimen ominaisuuksia saatiin parannettua. Tuulettimen rakenteen lisäoptimoinnilla sekä massan kevennyksellä olisi mahdollista laskea tuulettimen valmistuskustannuksia ainakin viidesosalla.

Jatkotutkimuksissa tulisi tarkastella tuulettimien materiaaliominaisuuksia sekä kestävyyttä eri olosuhteissa. Tuulettimet tulisi tasapainottaa sekä tarkastella, voidaanko tasalaatuisella valmistuksella poistaa tasapainotustarve. Tuulettimen eri kiinnitysmahdollisuuksia tulisi testata, etenkin jos pienten moottorikokoluokkien akselit muutetaan kiilaurallisiksi. Tuulettimien massaa olisi mahdollista keventää, esimerkiksi pienentämällä ilmanohjainlevyä. Massan kevennyksellä kustannukset laskisivat, mutta tuuletusominaisuudet saattaisivat huonontua. Tällöin tulisi tarkastella, kummalla on suurempi merkitys: pienemmällä massalla sekä alemmilla valmistuskustannuksilla vai tuuletusominaisuuksilla. Tuulettimen toimintaa tulisi testata myös käytännön kokeella ja verrata tuloksia hitsattuun terästuulettimeen, jolloin toiminnalliset hyödyt ilmenisivät.

Opinnäytetyössä käytettiin tiedonlähteinä vain luotettavia tutkimuksia, standardeja, verkkojulkaisuja sekä alan kirjallisuutta. Lähteinä käytettiin vain uusia julkaisuja, joiden tiedot pyrittiin tarkistamaan useasta eri lähteestä. Luotettavien lähteiden löytäminen sekä tarkistaminen olivat aikaa vievää, mutta niihin perehtyminen hyvissä ajoin ennen opinnäyttyön aloittamista nopeutti työn suorittamista. Suunnitteluvaiheessa hyödynnettiin myös usean asiantuntijan kommentteja. Työssä tehdyt testit sekä tarkastukset suoritettiin kalibroiduilla mittavälineillä laatustandardien hyväksymissä tiloissa, jolloin mahdolliset mittavirheet saatiin minimoitua. Kahdella eri menetelmällä valmistetut tuulettimet mahdollistivat luotettavat tulokset, mutta tulosten luotettavuutta olisi mahdollista parantaa tilaamalla useampia sarjoja eri yrityksiltä. Kokonaisuudessaan opinnäytetyön tavoitteet saavutettiin.

LÄHTEET

/1/ Wohlers Associates. Wohlers Report 2017. Fort Collins. Wohlers Associates, Inc.

/2/ Chua, C.K., Leong, K.F. 2017. 3D Printing and Additive Manufacturing, Principles and Applications. Fifth Edition. Singapore. World Scientific.

/3/ Committed to unlocking value. Annual Report 2016. ABB.
<http://new.abb.com/docs/default-source/investor-center-docs/annual-report/annual-report-2016/abb-group-annual-report-2016-english.pdf>

/4/ Suomalaiset juuret. ABB. Viitattu 1.10.2017.
<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia/suomalaiset-juuret>

/5/ ABB Suomessa. ABB. Viitattu 2.10.2017.
<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa>

/6/ ABB oy, Motors and Generators. ABB. Viitattu 2.10.2017.
<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/yksikot/motors-and-generators>

/7/ ABB Image Bank. ABB. Sisäinen verkkosivu. Viitattu 2.10.2017.

/8/ SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 Materiaalia lisäävä valmistus. Yleinen periaate. Terminologia. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2017. 42 s.

/9/ European Powder Metallurgy Association. 2017. INTRODUCTION TO ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOG. A guide for Designers and Engineers. 2nd Edition.
<https://www.epma.com/epma-free-publications/640-introduction-to-additive-manufacturing-technology-brochure>

/10/ Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. 2015. Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Second Edition. New York. Springer.

/11/ Alonen A., Alonen L., Hietikko E. 2016. Lisäävän valmistuksen perusteet. Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja D5/4/2016. Kuopio. Savonia-ammattikorkeakoulu, ALVO-hanke.
<http://portal.savonia.fi/amk/fi/tutkimus-ja-kehittaminen/julkaisutoiminta/julkaisut-aloittain/tekniikka-ja-liikenne/lisaavan>

/12/ Bruun M., Hokkanen M. 2016. Materiaalia lisäävä valmistus. D: Vapaamuotoisia julkaisuja – Free-From Publications 84. Mikkeli. Mikkelin ammattikorkeakoulu.
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-588-578-4>

/13/ Piili, H., Hirvimäki, M., Väistö, T., Nyamekye, P., Pekkarinen, J., Salminen, A. 2014. Katsaus lisäävän valmistuksen (aka 3D-tulostus) mahdollisuuksiin ja kustannuksiin metallisten tuotteiden valmistuksessa. FAST COINS-projekti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-265-671-1>

/14/ Chekurov S., Eklund P., Kujanpää V., Pekkarinen J., Syrjälä K., Vihinen J. 2017. 3D-tulostuksen suunnittelu- ja päätöksenteko-opas yrityksille. DIMECC PUBLICATIONS SERIES NO. 12. Tampere. Dimecc Oy.
http://www.dimecc.com/wp-content/uploads/2017/02/DIMECC_3D_tulostuksen_suunnittelu_ja_paatöksenteko_opas_yrityksille.pdf

/15/ Technologies. 3D HUBS. Viitattu 2.12.2017.
<https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing#technologies>

/16/ SFS-EN ISO 17296-2:2016. Additive manufacturing. General principles. Part 2: Overview of process categories and feedstock. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2017. 14 s.

/17/ Metal powders – the raw materials. Metal AM. Viitattu 29.11.2017.
<http://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/metal-powders-the-raw-materials/>

/18/ Schnabel T., Oettel M., Mueller B. 2017. DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING, Guidelines and Case Studies for Metal Applications. Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology IWU.
http://canadamakes.ca/wp-content/uploads/2017/05/2017-05-15_Industry-Canada_Design4AM_141283.pdf

/19/ Galjaard S., Hofman, S., Ren S. 2014 New opportunities to optimize structural designs in metal by using additive manufacturing. Advances in Architectural Geometry 2014. New York. Springer.

/20/ Haydn, Wadley. 2005. Multifunctional periodic cellular metals. Department of Materials Science and Engineering, University of Virginia.
http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/Documents/Publications/Multifunctional_Periodic_Cellular_Metals.pdf

/21/ Jokinen A., Riipinen T. 2016. Lisäävän valmistuksen keskeiset materiaalit ja niiden ominaisuudet. VTT.
<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03997-16.pdf>

/22/ The Highest Quality 3D Printing Materials. Shapeways. Viitattu 5.12.2014.
<https://www.shapeways.com/materials>

/23/Hietalahti L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere. Tammertekniikka.

/24/ Low voltage Process performance motors. Catalog. 2016. ABB.
9AKK105944 EN 03-2016.

/25/ Reinikainen O. 2015. Staattorin rungon ja laakerikilven erilaiset valumene-
telmät 160-koon sähkömoottorissa. ABB. Tampereen teknillinen yliopisto.

/26/ Flowfield Oy. 2017. Jäähdytyspuhaltimen CFD-mallinnus.

LIITE 1. Hitsattu terästuuletin (M3BP 71 2P).

Liite on salattu.

LIITE 2. Tuulettimen ilmanohjainlevyn kevennyksen vaikutus tuuletusominaisuuksiin sekä melutasoon.

Liite on salattu.

LIITE 3. Uudelleen suunniteltu lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettava terästuuletin.

Liite on salattu.