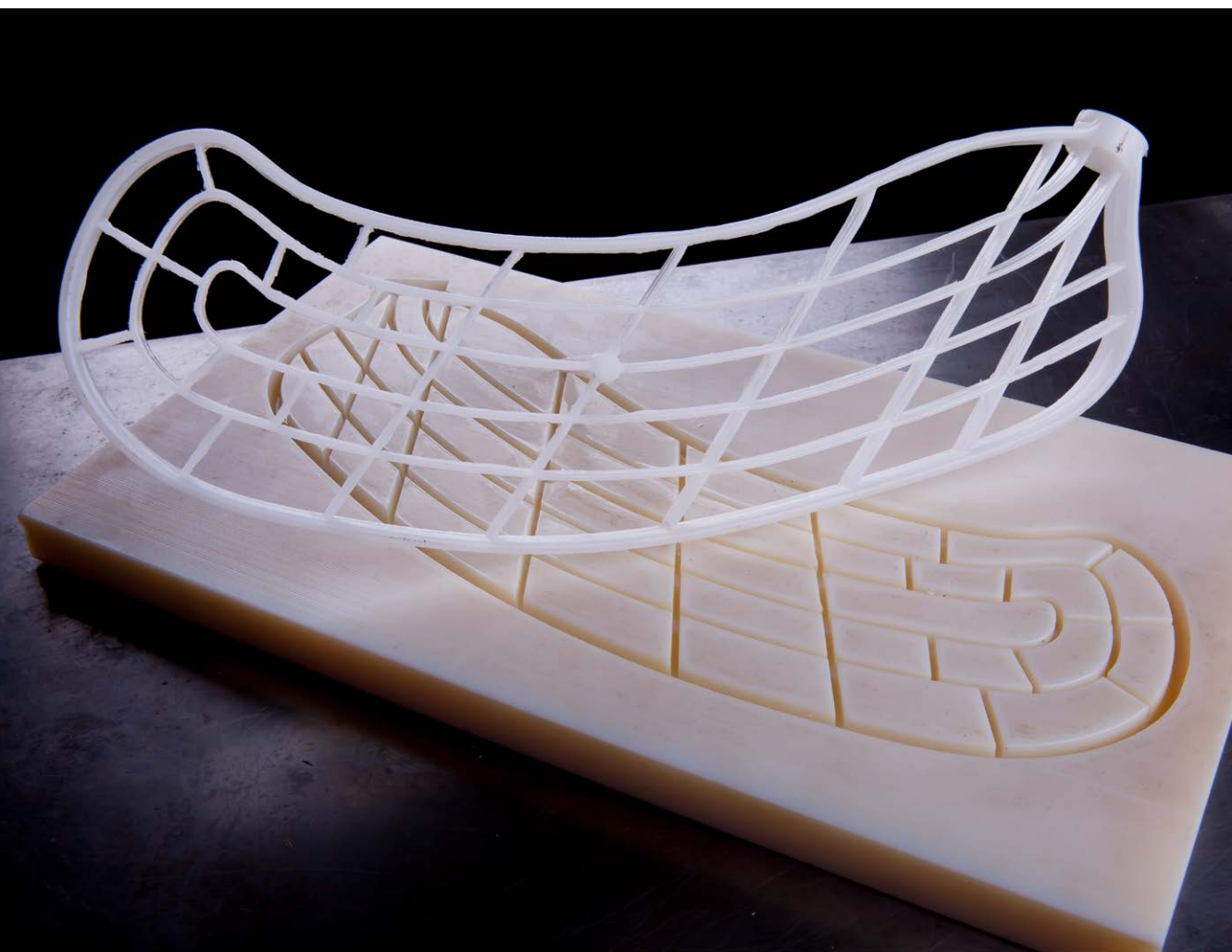


MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Markus Bruun ja Mikko Hokkanen



MAMK
University of Applied Sciences

MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS

MARKUS BRUUN, MIKKO HOKKANEN



ETELÄ-SAVON
MAAKUNTALIITTO

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasta

MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU
MIKKELI 2016

D: VAPAAMUOTOISIA JULKAISUJA – FREE-FORM PUBLICATIONS 84

© TEKIJÄ(T) JA MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU

KANNEN KUVA: MANU ELOAHO

TAITTO JA PAINO: GRANO OY

ISBN: 978-951-588-577-7 (NID.)

ISBN: 978-951-588-578-4 (PDF)

ISSN: 1458-7629 (NID.)

JULKAISUT(A)XAMK.FI

SISÄLTÖ

I	Johdanto	5
2	Teknologia	7
2.1	Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät	8
2.1.1	Allasvalopolymerisaatio	9
2.1.2	Jauhepetiteknikka	10
2.1.3	Materiaalin pursotus	11
2.1.4	Materiaalin ruiskutus	12
2.1.5	Sideaineen ruiskutus	13
2.1.6	Laminointi.....	14
2.1.7	Materiaalin ja lämmön kohdistus.....	15
2.2	Materiaalit	17
2.2.1	Polymeeri.....	18
2.2.2	Metallit.....	18
2.2.3	Keraamit.....	22
2.3	Työvaiheet.....	22
2.3.1	Työvaihe 1: CAD-mallin luominen	23
2.3.2	Työvaihe 2: Tiedoston muuntaminen STL-muotoon	23
2.3.3	Työvaihe 3: Tiedoston siirtäminen koneelle.....	23
2.3.4	Työvaihe 4: Valmistusasetuksien määrittäminen	24
2.3.5	Työvaihe 5: Valmistus.....	24
2.3.6	Työvaihe 6: Osan poistaminen koneesta.....	24
2.3.7	Työvaihe 7: Viimeistely	24
2.3.8	Työvaihe 8: Tuotteen tai osan käyttöönotto	24
2.4	Materiaalia lisäävän valmistuksen mahdollisuudet ja rajoitteet.....	24
3	Materiaalia lisäävän valmistuksen sovellukset	29
3.1	Prototyypin pikavalmistus	29
3.2	Muottien ja työvälineiden pikavalmistus	31
3.2.1	Lisäävä valmistus ruiskuvalumuottien valmistuksessa	31
3.2.2	Pikavalmistetut muotit lujitemuoviteollisuudessa.....	33
3.2.3	Pikavalmistetut jigit, kiinnikkeet ja aputyökalut.....	35
3.2.4	Silikoniosien valmistus 3D-tulostettujen muottien avulla.....	39
3.3	Suoravalmistus	40
4	Materiaalia lisäävän valmistuksen Suunnittelunäkökohdat	41
4.1	Mahdollisuudet	41
4.1.1	Vapaa geometria.....	42
4.1.2	Räätälöity geometria	43
4.1.3	Integroidut kokoonpanot.....	43
4.1.4	Materiaalia lisäävän valmistuksen standardit	44

4.2 Menetelmät ja työkalut	47
4.2.1 Topologinen optimointi	47
4.2.2 Huokoiset rakenteet	49
4.2.3 Virtauslaskenta	50
4.3 Suunnitteluperiaatteet	52
5 Johtopäätökset	54
LÄHTEET	55

I JOHDANTO

Materiaalia lisäävä valmistus antaa suunnittelijoille mahdollisuuden suunnitella tuote tarpeeseen ilman perinteisten menetelmien rajoituksia. Tulevaisuudessa materiaalia lisäävä valmistus tulee yleistymään huomattavasti, ja tämä pitää ottaa huomioon nykyisessä insinöörikoulutuksessa. Eri valmistusmenetelmien tuntemus on myös tärkeää.

Suunnittelijoiden tulee tiedostaa materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien tarjoamat mahdollisuudet ja osata valita perinteisten ja uusien menetelmien välillä.

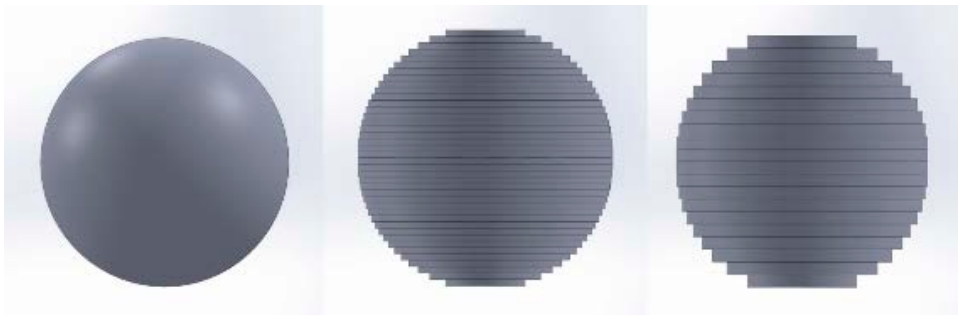
Toimitusketjut tulevat muuttumaan, kun perinteisestä valmistusmenetelmästä siirrytään materiaalia lisäävään valmistukseen. Kustannuksia laskettaessa on otettava huomioon tuotteen koko elinkaari, kuten varaosien tarve sekä käytön aikaiset ja käytöstä poiston kustannukset. Materiaalia lisäävän valmistuksen odotetaan kasvavan lähivuosina merkittävästi, koska sillä on monia etuja perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Suunnittelijat voivat toteuttaa esimerkiksi monimutkaisia onttoja rakenteita pienissä erissä, ja tuotteet voidaan optimoida tapauskohtaisesti kuormituksen mukaan.

Tämä julkaisu on kirjoitettu Etelä-Savon maakuntaliiton myöntämän Euroopan aluekehitysrahaston tuella ja on kirjoitettu osana Etelä-Savon uudistuva teollisuus -hanketta. Kehityshankkeen ovat yhteistyössä yritysten kanssa toteuttaneet Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy sekä Mikkelin ammattikorkeakoulu.

2 TEKNOLOGIA

Materiaalia lisäävällä valmistuksella tarkoitetaan valmistusta, jossa kappale valmistetaan suoraan 3D-mallin perusteella, yleensä kerros kerrokselta. Menetelmää voidaan pitää poistavan valmistuksen vastakohtana. (ASTM 2012.) Materiaalia lisäävän valmistuksen synonyymeja ovat muun muassa lisäävä valmistus, ainetta lisäävä valmistus, pikavalmistus ja 3D-tulostus (Lehtinen 2015).

Nykyiset materiaalia lisäävät laitteistot perustuvat kerroksittaiseen valmistukseen. Valmistuksen perusteena oleva 3D-malli jaetaan kerroksiin, ja valmistus tapahtuu yksi poikkileikkaus kerrallaan. Mitä ohuempi kerrospaksuus on, sitä tarkemmin valmistettu kappale kuvaa alkuperäistä mallia. Lisäviä valmistusmenetelmiä on useita, ja ne eroavat toisistaan lähtömateriaalin olomuodon, kerrosten valmistamistavan ja kerrosten toisiinsa liittämisen perusteella. Eroavaisuudet eri valmistusmenetelmien välillä johtavat siihen, että valmistettujen kappaleiden mittatarkkuus, materiaaliominaisuudet ja mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat suuresti. Eroavaisuudet vaikuttavat myös siihen, miten nopeaa valmistus on, kuinka paljon tarvitaan osien jälkikäsittelyä, kuinka suuria laitteistot ovat ja millaisia kustannuksia valmistuksesta ja laitteistosta syntyy. (Gibson 2010.) Kuva 1 on esimerkki kerrospaksuuden vaikutuksesta tulostustarkkuuteen.



Kuva 1. Kerrospaksuuden vaikutus tulostustarkkuuteen materiaalia lisäävässä valmistuksessa. (Kuva: Markus Bruun.)

Lisäävän valmistuksen ensimmäisenä sovelluskohteena olivat erilaiset prototyypit. Viimeisten 25 vuoden aikana menetelmät ja materiaalit ovat kehittyneet kuitenkin niin paljon, että prototyyppien valmistuksesta on siirrytty yhä enemmän lopputuotteiden valmistukseen. (Gibson 2015.)

2.1 Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät

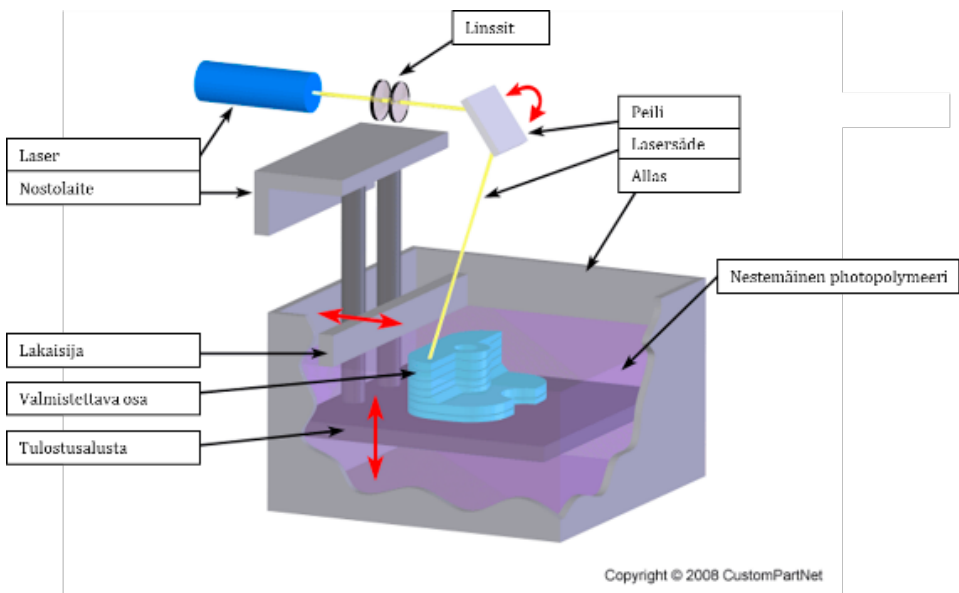
Materiaalia lisääviä valmistusmenetelmiä on useita, ja ne eroavat suuresti toisistaan. Menetelmiä voidaan jakaa eri luokkiin monin tavoin esimerkiksi tulostusmateriaalin olomuodon perusteella. Kansainvälisessä termistössä materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät voidaan jakaa seitsemään alaluokkaan (Lehtinen 2015):

- allasvalopolymerisaatio (Vat Photopolymerization)
- jauhepetitekniikka (Powder Bed Fusion)
- materiaalin pursotus (Material Extrusion)
- materiaalin ruiskutus (Material Jetting)
- sideaineen ruiskutus (Binder Jetting)
- laminointi (Sheet Lamination)
- materiaalin ja lämmön kohdistus (Directed Energy Deposition).

Laitevalmistajat ovat rekisteröineet omia laite- ja tuotantoprosessejaan omilla tuotemerkeillään, ja eri teknologioita ja termejä on runsaasti. Menetelmät, niihin liittyvät teknologiat, materiaalit ja keskeiset edut ja rajoitteet on esitetty taulukossa 1. (Hauge 2003.)

2.1.1 Allasvalopolymerisaatio

Allasvalopolymerisaatio on materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä, jossa nestemäinen valopolymeeri kovetetaan valon avulla. Useimmat käytössä olevat polymeerit kovettuvat UV-valon vaikutuksesta, mutta myös näkyvään valoon perustuvia menetelmiä on olemassa. Menetelmässä tulostusaltaaseen laitetaan halutun kerrospaksuuden verran valoherkkää hartsia, joka kovetetaan UV- tai näkyvällä valolla. Kovetuksen jälkeen tulostusalue siirtyy kerrospaksuuden verran alaspäin ja altaaseen lasketaan lisää hartsia, joka kovetetaan. Kuvassa 2 on esitelty allasvalopolymerisaation periaate. (Gibson 2010.)

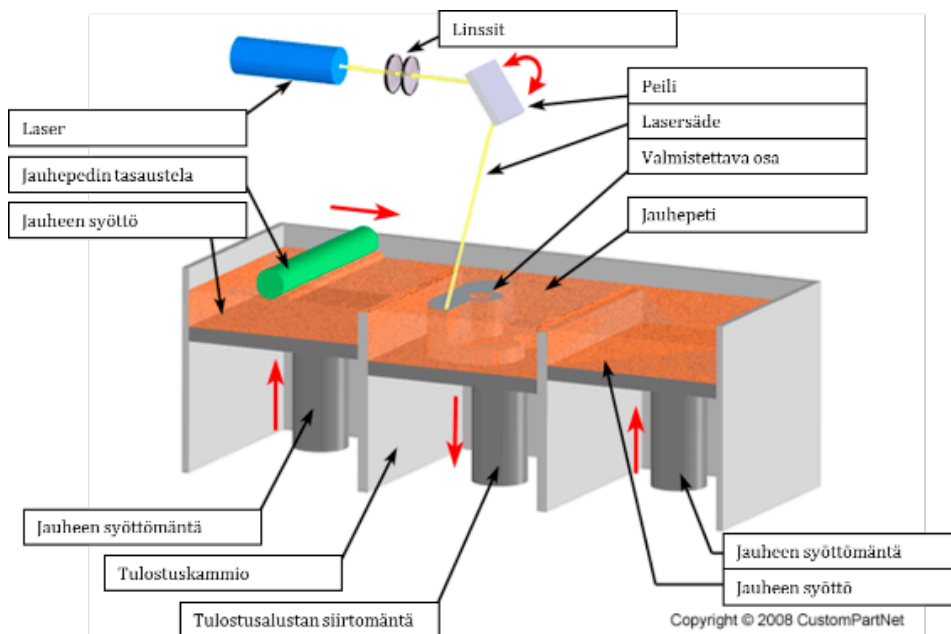


Kuva 2. Allasvalopolymerisaation periaate (Stereolithography [SLA] 2015).

Stereolitografia on yksi ensimmäisistä kaupallisista materiaalia lisäävistä teknologioista. UV-kovetteisten hartsiensa lisäksi menetelmällä on mahdollista valmistaa myös keraamisia osia. Tyypillisesti menetelmää sovelletaan prototyyppien ja valumallien valmistamiseen. (Gao 2015.) Menetelmän etuja ovat suhteellisen nopea tulostus ja hyvä tarkkuus. Menetelmän haasteita ovat valotuksen hallinta ja kalliit tulostusmateriaalit. (Hauge 2003.)

2.1.2 Jauhepetiteknikka

Jauhepetiteknikassa materiaali on jauhemaisessa muodossa, ja se muutetaan kiinteäksi joko sintraamalla tai sulattamalla materiaali kiinteäksi kerros kerrokselta. Yhden kerroksen valmistuttua jauhepeti siirtyy kerrospaksuuden verran alaspäin, ja sen päälle levitetään uusi kerros jauhetta. Uusi kerros kiinnittyy edelliseen sintrautuen tai sulamalla. Lämmönlähteenä käytetään yleensä laseria. Muovimateriaalit eivät tarvitse tukiaineita, vaan sulamaton jauhe tukee valmistettavaa kappaletta prosessin ajan. Jauhepetimenetelmän periaate on esitetty Kuva 3.

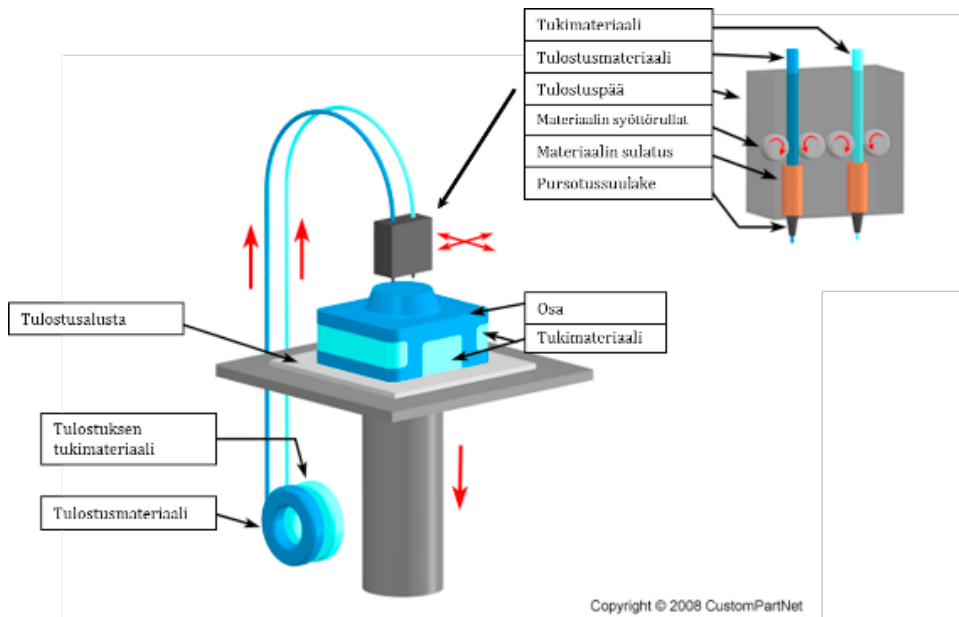


Kuva 3. Jauhepetimenetelmä (Selective Laser Sintering 2015).

Jauhepetimenetelmään perustuvia teknologioita on useita. Yleisimpiä teknologioita ovat Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DLMS), Selective Laser Melting (SLM) ja Electron Beam Melting (EBM). Jauhepetimenetelmät soveltuvat muovin, metallin ja keraamin tulostamiseen. Menetelmän etuina ovat tulostustarkkuus, tiiviit tulosteet ja hyvät mekaaniset ominaisuudet. Metalliosien valmistamisessa tukirakenteet aiheuttavat haasteita. Myös materiaalin käsittely ja kierrätys ovat haasteellisia. (Gao 2015.)

2.1.3 Materiaalin pursotus

Materiaalin pursotuksessa tulostusmateriaali syötetään suulakkeeseen, jossa se muuttuu nestemäiseksi. Nestemäinen tulostusmateriaali pursotetaan tulostusalustaan paineen avulla, ja materiaali sitoutuu edelliseen tulostuskerrokseen. Kappale tai suulake liikkuu x-, y- ja z-suunnassa rakentaen kappaletta kerros kerrokselta. Tulostuksessa voidaan käyttää erillistä tukimateriaalia tai tukirakennetta, joka koostuu tulostusmateriaalista. Materiaalin pursotuksen periaate on esitetty Kuva 4. (Gibson 2010.)

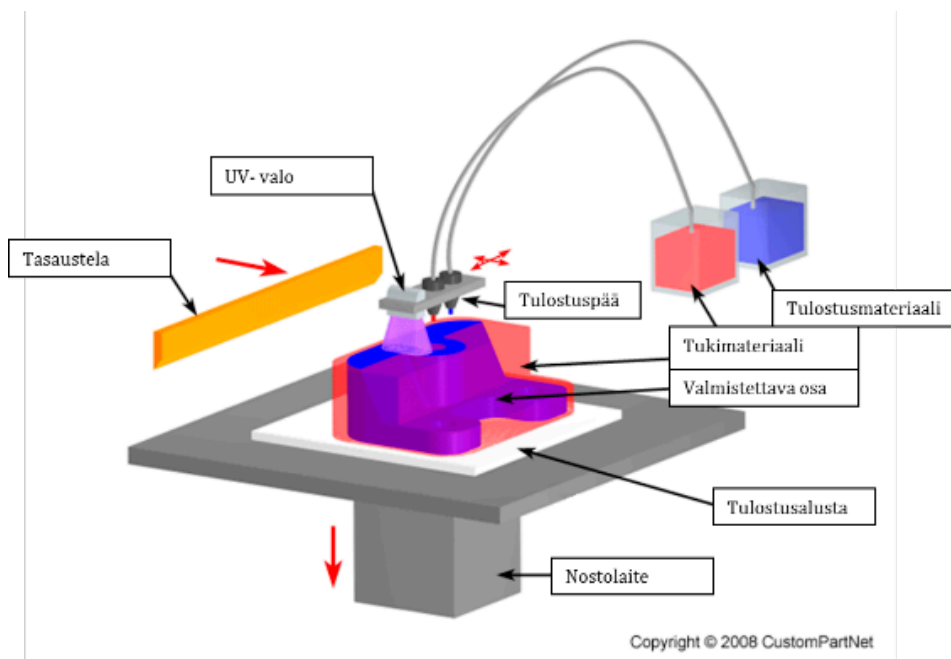


Kuva 4. Materiaalin pursotus (Fused Deposition Modeling 2015).

Materiaalin pursotukseen perustuvat laitteet ovat edullisia, minkä vuoksi niiden käyttö kuluttajakäyttöön suunnatuissa tulostimissa on hyvin yleistä. Monimateriaalitulostus on mahdollista. Yleisimmin tulostusmateriaalina käytetään kestumuoveja, mutta myös keraami- ja metallipastojen tulostaminen pursotusmenetelmällä on mahdollista. Menetelmän haasteina ovat huono tarkkuus ja pinnanlaatu. (Gao 2015.)

2.1.4 Materiaalin ruiskutus

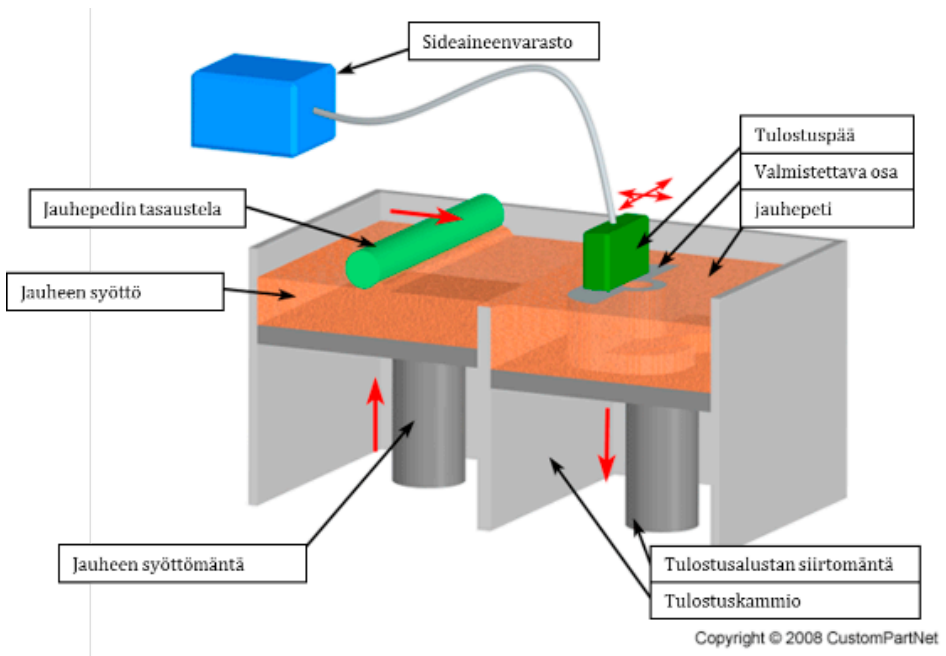
Materiaalin suihkutuksen menetelmä muistuttaa perinteisen mustesuihkutulostimen toimintaa. Tulostinpäässä on useita suuttimia, jotka ruiskuttavat nestemäistä UV-valolla kovetettavaa tulostusmateriaalia tulostusalustalle. Kappale rakentuu useista hyvin ohuista kerroksista, jotka kovetetaan yksi kerrallaan. Materiaalin ruiskutus tyhjän päälle ei onnistu, joten tulostamisessa käytetään apuna tukiaineita, jotka poistetaan tulostuksen jälkeen lämpöä tai vettä hyväksi käyttäen. Materiaalin ruiskutuksella voidaan valmistaa myös monimateriaalikappaleita, joissa kappaleen ominaisuudet voivat vaihdella sen eri osissa. Menetelmän periaate on esitetty Kuva 5. (Gibson 2010.)



Kuva 5. Materiaalin ruiskutusmenetelmä (Jetted Photopolymer 2015).

2.1.5 Sideaineen ruiskutus

Sideaineen ruiskutusmenetelmässä nestemäinen liima-aine ruiskutetaan suulakkeesta jauhepetiin. Jokaisen tulostuskerroksen jälkeen tulostuspeti laskee tulostuskerroksen verran alaspäin, ja pinnalle levitetään uusi kerros jauhetta. Menetelmä on hyvin samankaltainen kuin jauhepetimenetelmä, eivätkä tulostettavat kappaleet vaadi tukirakenteita. Tulostusmateriaalina voidaan käyttää muun muassa kipsiä, tärkkelystä, metalleja, polymeerejä tai hiekkaa. (Gibson 2010.) Menetelmän periaate on esitetty Kuva 6.

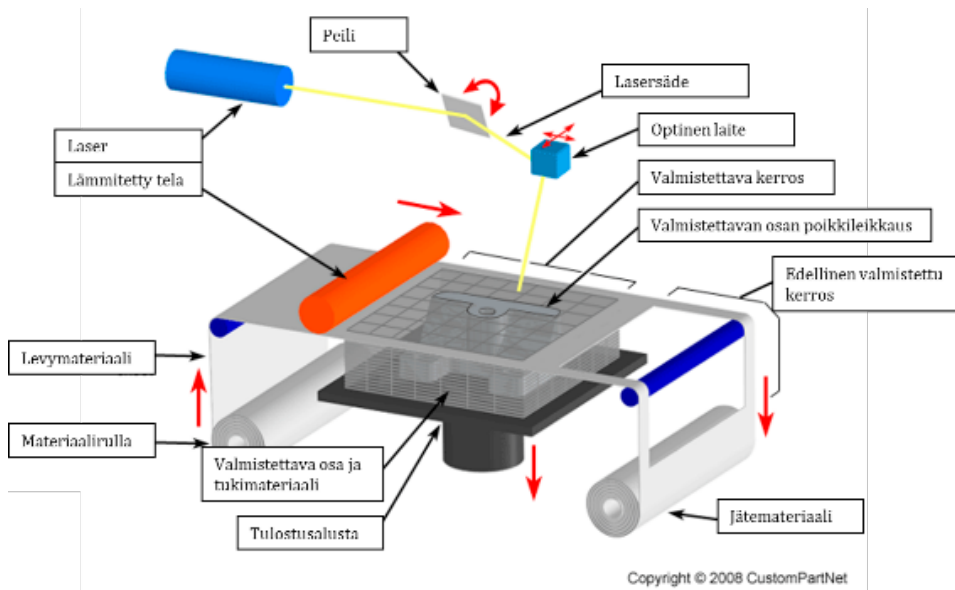


Kuva 6. Sideaineen ruiskutusmenetelmä (Three Dimensional Printing 2015).

Materiaalin ruiskutusmenetelmällä on mahdollista tulostaa monivärisiä kappaleita. Menetelmän etuna on laaja materiaalivalikoima. Valmistetut kappaleet ovat monesti huokoisia ja vaativat jälkikäsittelyjä. (Gao 2015.)

2.1.6 Laminointi

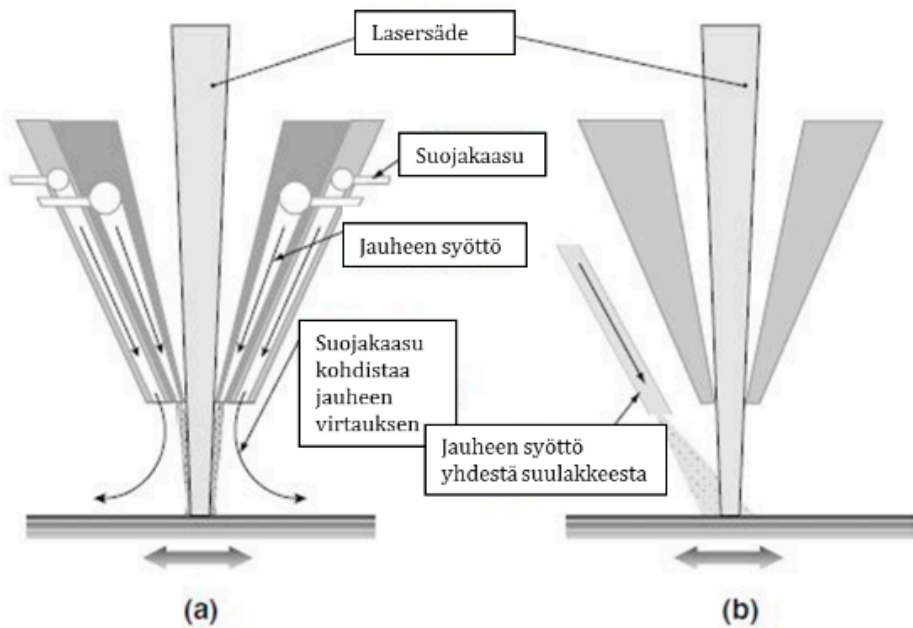
Laminointimenetelmässä valmistettava kappale muodostuu päällekkäin liitetyistä ohuista levyistä. Jokainen kerros liitetään edelliseen ja leikataan oikeaan muotoon joko laserilla tai tietokoneohjatulla terällä. Kerrosten liittämiseen on olemassa erilaisia tekniikoita, kuten liimaus, puristus, lämpö ja ultraäänihitsaus. Materiaalina voidaan käyttää muun muassa paperia, muovia tai metallia. Laminointi on yksi ensimmäisistä kaupallistetuista materiaalia lisäävistä menetelmistä. Menetelmän periaate on esitetty Kuva 7. (Gibson 2010.)



Kuva 7. Laminointimenetelmä (Laminated Object Manufacturing 2015).

2.1.7 Materiaalin ja lämmön kohdistus

Materiaalin ja lämmön kohdistusmenetelmässä materiaali syötetään rakenteen pintaan, jossa se sulatetaan kohdistetun lämpöenergian avulla. Sulatukseen voidaan käyttää laseria, elektronisuihkua tai plasmaa. (ASTM 2012.) Tulostusmateriaalina voidaan käyttää polymeerejä, keraameja tai metalleja, jotka ovat joko lankaa tai jauhetta. Yleisimmin käytettyjä materiaaleja ovat metallijauheet. Kuva 8 on esitetty jauheen syöttöperiaatteet. Kuvassa vasemmalla (a) jauhe syötetään aksiaalisesti lasersäteen ympäriltä ja oikealla (b) jauhe syötetään yksittäisestä suulakkeesta.



Kuva 8. Jauheen syöttömenetelmiä materiaalin ja lämmön kohdistusmenetelmällä (Gibson 2010).

Taulukko 1. Materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien luokittelu ASTM-standardin mukaan (Gao 2015).

MENE- TELMÄ	TEKNO- LOGIAT	TULOSTUS- MATE- RIAALI	VOIMAN- LÄHDE	VAHVUUDET/ HEIKKOUEDET
MATERIAALIN PURSOTUS	Fused Deposition Modelling (FDM)	kestomuovit, keraamiliete, metallitahna	lämpöenergia	edulliset laitteistot, monimateriaalitulostus
	Contour Crafting			rajoitettu tulostustarkkuus, huono pinnanlaatu
JAUHEPETI- MENETELMÄ	Selective Laser Sintering (SLS)	polyamidi/polymeeri, metallijauheet (17-4 PH, ruostumaton teräs, kobolttikromi, titaani Ti6Al-4V) keraamijauheet	lasersäde	hyvä tarkkuus, tiiviit kappaleet, korkea lujuus ja jäykkyys
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)			jauheaden käsittely ja kierrätys, tukirakenteet
	Selective Laser Melting (SLM)		elektronisuihku	
	Electro Beam Melting (EBM)			
ALLASVALO- POLYMERISAA- TIO	Stereolitografia (SLA)	valopolymeeri, keraamit (alumiinioksidi, Zirkoniumoksidi)	UV-laser	nopea tulostus, hyvä tarkkuus kalliit tulostusmateriaalit
MATERIAALIN RUISKUTUS	Polyjet/Inkjet Printing	valopolymeeri, vaha	lämpöenergia/valo	monimateriaalitulostus hyvä pinnanlaatu
				huono lujuus
SIDEAINEEN RUISKUTUS	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)	polymeerijauhe (kipsi, harts), keraamijauhe, metallijauhe	lämpöenergia	värikkäät tulosteet, laaja materiaalivalikoima kappaleiden huokoisuus
LAMINOINTI	Laminated Object Manufacturing (LOM)	muovikalvo, metallilevy, keraamiteippi	lasersäde	alhaiset materiaali-, laite- ja valmistuskustannukset huono pinnanlaatu
MATERIAALIN JA LÄMMÖN KOHDISTUS	Laser Engineered Net Shaping (LENS)	sula metallijauhe	elektronisuihku	rikkoutuneiden osien kunnostus mahdollista, toiminnallisten osien tulostus
	Electro Beam Welding (EBW)			vaatii jälkikäsittelyä

2.2 Materiaalit

Materiaalia lisäävän valmistuksen alkuaikoina käytettiin materiaaleja, jotka oli kehitetty muita sovelluksia varten. Lisäävä valmistus eroaa kuitenkin perinteisistä valmistusmenetelmistä, eivätkä perinteiset materiaalit sovellu täysin uusille valmistusmenetelmille. Esimerkiksi ensimmäiset käytetyt jauhemaiset materiaalit pilaantuivat helposti, ja valokovetteisista hartseista valmistetut kappaleet olivat hauraita ja heikkoja. Lisäävien valmistusmenetelmien kehittyessä myös materiaaleja on kehitetty paremmin uusille valmistusprosesseille sopiviksi. Nykyiset lisääville valmistusmenetelmille kehitetyt materiaalit mahdollistavat aikaisempaa tarkemman mittatarkkuuden, ja mekaaniset ominaisuudet ovat parantuneet. (Gibson 2010.)

Muovi oli ensimmäisiä materiaalia lisäävässä valmistuksessa käytettyjä materiaaleja. Ensimmäiset sovellukset olivat muovisia prototyyppisiä, mutta nykyisin lopputuotteiden valmistus on mahdollista myös muista materiaaleista, kuten metalleista, kerameista ja komposiiteista. Teknologiasta riippuen materiaalin olomuoto voi olla joko nestemäistä, jauhetta, tahnamaista tai levyä. Taulukko 2 on lueteltu lisäävässä valmistuksessa käytössä olevia materiaaleja ja niitä hyödyntäviä teknologioita. (Guo 2013.)

Taulukko 2. Lisäävässä valmistuksessa käytettäviä materiaaleja, teknologioita ja tyyppillisiä sovelluksia (Guo 2013 ja ASTM 2012).

Materiaalin alkuperäinen olomuoto	Teknologia	Menetelmä	Tyypilliset materiaalit	Sovellukset
neste	SLA	allasvalopolymerisaatio	UV-kovetteiset hartsit, keraamiset lietteet	prototyypit, valumallit, soft tooling
	MJM	materiaalin ruiskutus	UV-kovetteiset akryylimuovit, vaha	prototyypit, valumallit
	RFP	materiaalin ruiskutus	vesi	prototyypit, valumallit
tahna	FDM	materiaalin pursotus	kestomuovit, vahat	prototyypit, valumallit
	Robo-casting	materiaalin pursotus	keraamitahna	toiminnalliset osat
jauhe	SLS	jauhepetiteknikka	kestomuovit, vahat, metalli- ja keraamipulverit	prototyypit, valumallit, epäsuorat metallin lisäävät valmistusmenetelmät
	SLM	jauhepetiteknikka	metallit	työkalut, toiminnalliset osat
	EBM	jauhepetiteknikka	metallit	työkalut, toiminnalliset osat
	LMD	materiaalin ja lämmön kohdistus	metallit	työkalut, toiminnalliset osat, metallin korjaus
	3DP	sideaineen ruiskutus	polymeeri, metalli- ja keraamipulverit	prototyypit, valumuotit, työkalut
levy	LOM	laminointi	paperi, muovi, metalli	prototyypit, valumallit

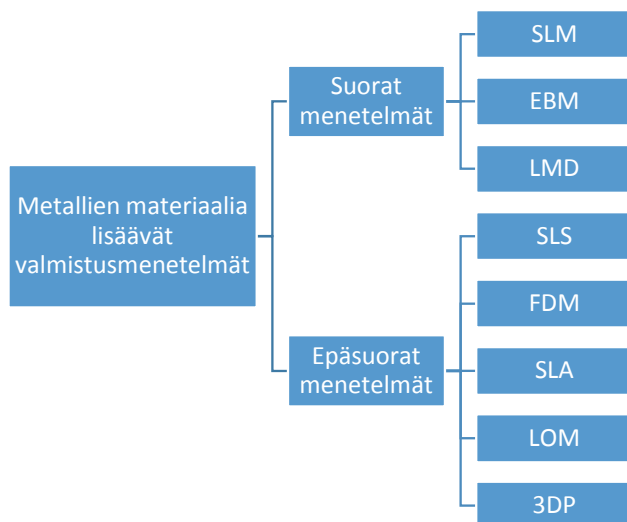
2.2.1 Polymeeri

Lisäävässä valmistuksessa käytettäviä polymeerimateriaaleja ovat muun muassa valokovetteiset hartsit, nailon, elastomeerit, ABS-muovi ja erilaiset vahat. Nailon eli polyamidi on yksi yleisimmistä SLS-menetelmässä käytetyistä polymeereistä. ABS-muovia käytetään yleisesti FDM-menetelmässä, ja SLA-menetelmässä hyödynnetään valokovetteisiä hartseja. Polymeeripohjaisia tuotteita voidaan valmistaa myös lisäävillä menetelmillä valmistettujen ruiskuvalumuottien avulla. (Guo 2013.)

2.2.2 Metallit

Metalliosia voidaan valmistaa monella eri lisäävällä valmistusmenetelmällä. Menetelmien toimintaperiaatteet sekä materiaalin olomuodot poikkeavat toisistaan. Laittevalmistajat käyttävät monesti itse rekisteröimiään laite- ja prosessinimiä, minkä vuoksi valmistusmenetelmillä on useita eri nimityksiä.

Metallien materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät voidaan jakaa myös periaatteen-
sa mukaisesti suoriin ja epäsuoriin menetelmiin. Suoralla menetelmällä tarkoitetaan
sitä, että metallipartikkelit sulatetaan toisiinsa kerros kerrokselta ja valmistettava kap-
pale muodostuu tämän tuloksena suoraan. Epäsuorassa menetelmässä lisäävä valmis-
tus on vain osa prosessia, jossa sitä käytetään metallipartikkelien liittämiseen toisiinsa;
varsinainen metalliosa muodostuu vasta jälkikäsittelyvaiheiden jälkeen. Metallien eri
lisäävät valmistusteknologiat on esitetty Kuva 9. Metalliosia voidaan valmistaa myös
lisäävällä valmistuksella valmistettujen muottien avulla. (Guo 2013.)



Kuva 9. Metallien lisäävien valmistusmenetelmien jako suoriin ja epäsuoriin menetelmiin (Guo 2013).

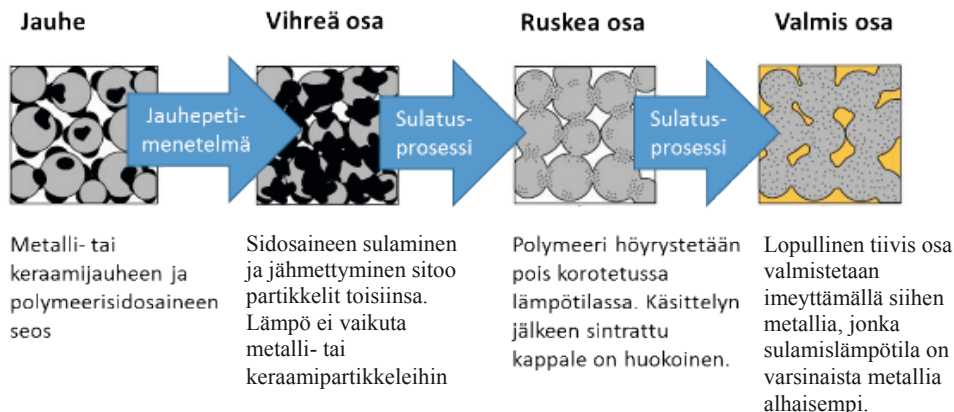
Suorat menetelmät

Suorissa menetelmissä jokainen valmistettava kerros sulaa täysin kiinni edelliseen ja valmistettava kappale muodostuu kerros kerrokselta. Lämmönlähteenä käytetään menetelmästä riippuen joko laseria tai elektronisuihkua. SLS- ja EBM-menetelmät perustuvat jauhepetimenetelmään, jossa metallijauhe sulatetaan joko laserilla tai elektronisuihkulla. LMD/LENS-menetelmässä metallipartikkeleja syötetään suulakkeilla. (Guo 2013.)

Epäsuorat menetelmät

Epäsuorissa menetelmissä metallipartikkelit liitetään toisiinsa sulattamalla ne osittain toisiinsa tai sulatetun sidosaineen avulla. Sidosaaineet voivat olla polymeerejä tai metalleja, joilla on alhainen sulamispiste. Epäsuorien menetelmien vaatimia jälkikäsittelyjä ovat muun muassa sidosaineen poisto ja sintraus. Valmistettavaan osaan voidaan myös imeyttää metallia, jonka sulamislämpötila on varsinaista metallia alhaisempi.

Kuvassa 10 esitetään epäsuoran lisäävän valmistusmenetelmän prosessi. Samalla tekniikalla voidaan valmistaa sekä metalli- että keraamiosia. (Guo 2013.)



Kuva 10. Metall- ja keraamiosien valmistus epäsuoralla lisäävällä valmistusmenetelmällä (muokattu lähteestä Gibson 2010).

Kuva 11 on sidosaineen ruiskutukseen perustuvalla lisäävällä valmistuksella valmistettuja ruoripotkurin osia. Materiaali on ruostumaton teräs 420 SS. Tulostuksen jälkeen kappaleesta on poistettu sidosaine, ja tilalle on imeytetty pronssia. Pronssin osuus kappaleen tilavuudesta on noin 40 %. Huomioitavaa on myös, että kappale kutistui valmistusprosessin aikana noin 2 prosenttia.



Kuva 11. Sidosaineen ruiskutuksella valmistettuja metalliosia. (Kuva: Markus Bruun.)

Tarkkuusvalu

Tarkkuusvalu on metallivalumenetelmä, jossa keraaminen valumuotti valmistetaan vahamalla päälle. Keraamimuotin kovettuttua vaha sulatetaan ulos muotista, ja muottiin jää vahaa muotoinen onkalo. Vahamalleja on mahdollista valmistaa lisäävällä valmistusmenetelmällä. Kuva 12 on Kalevala-korun Lumikukka-korun vahamalleja tulostuksen jälkeen. Jokainen vahamalli voi olla erilainen, ja menetelmä mahdollistaa yksilöllisen koruvalmistuksen.



Kuva 12. Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen Kalevala-korun tuotannossa (Kalevala-koru 2015).

Hiekkamuotit

Metallivaluun soveltuvien hiekkamuottien valmistaminen on mahdollista sideaineen ruiskutukseen perustuvalla menetelmällä. Kuvassa 13 on hiekkamuotteja ja puhdistamaton metallivalukappale.



Kuva 13. Lisäävällä menetelmällä valmistettu metallivalumuotti ja valettu kappale (Hetitec 2015).

2.2.3 Keraamit

Keraamit, esimerkiksi alumiinioksidi, piidioksidi ja zirkoniumoksidi, ovat epäorgaanisia kiinteitä materiaaleja. Keraameilla on yleensä hyvä kemialliset ominaisuudet ja hyvä lämmönkesto. Keraamiset materiaalit ovat kuitenkin kovia ja hauraita, mikä tekee niiden valmistamisesta hankalaa. Materiaalia lisäävällä valmistuksella on mahdollista valmistaa monimutkaisia keraamiosia, joiden valmistaminen perinteisillä menetelmillä ei ole mahdollista. Materiaalia lisäävien metallin valmistusmenetelmien lailla myös keraamiosien valmistus voidaan jakaa suoriin ja epäsuoriin menetelmiin. (Guo 2013.)

Suorat menetelmät

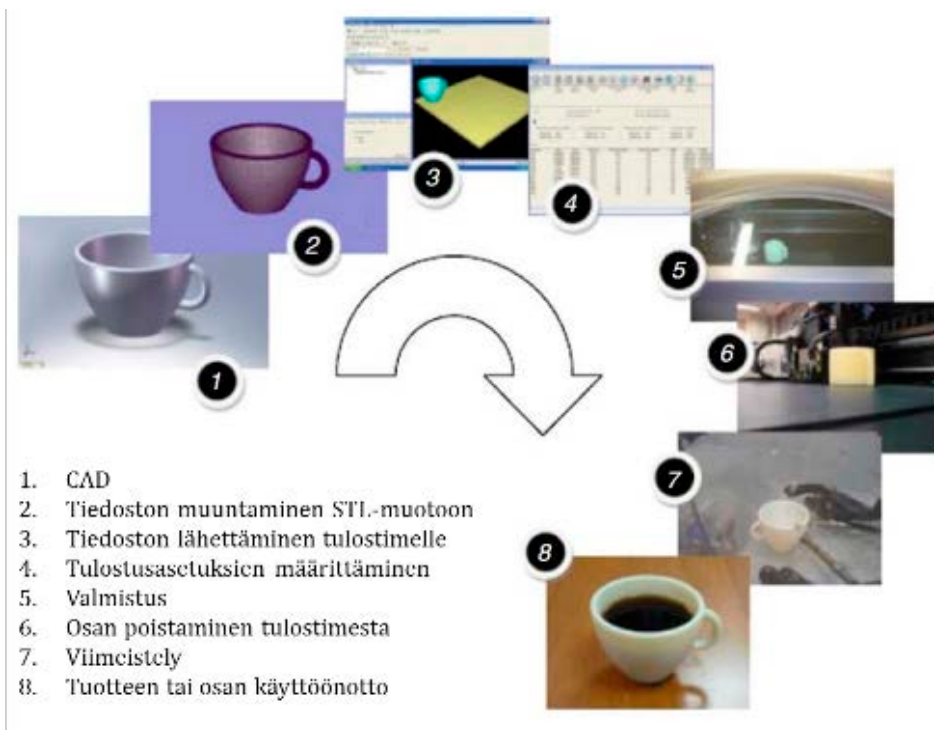
Keraamiosien suorat lisäävät valmistusmenetelmät ovat huomattavasti epäsuoria menetelmiä haastavampia. Keraamimateriaalin korkea sulamislämpötila vaikeuttaa valmistusprosessia. Esimerkiksi alumiinioksidi vaatii yli 2 000 °C:n lämpötilan. Kovista lämpötiloista johtuen kappaleisiin syntyy helposti muun muassa sisäisiä jäännösjännityksiä.

Epäsuorat menetelmät

Keraamiosien valmistaminen on mahdollista monella epäsuoralla materiaalia lisääväällä valmistusmenetelmällä. Materiaalin pursotukseen, jauhepetimenetelmään, sidosaineen ruiskutukseen ja materiaalin ruiskutukseen perustuvia teknologioita on kehitetty. Menetelmissä lisäävää valmistusta hyödynnetään ns. vihreän osan valmistamiseen (vrt. kuva 10).

2.3 Työvaiheet

Lisäävässä valmistuksessa fyysinen kappale valmistetaan virtuaalisen tietokonemallin pohjalta. Materiaalia lisäävän valmistuksen työvaiheet voidaan jakaa yleisellä tasolla kahdeksaan vaiheeseen. Eri menetelmien ja materiaalien välillä on pieniä eroavaisuuksia, mutta suurimmaksi osaksi samat työvaiheet pätevät kaikkiin menetelmiin. Työvaiheet on esitetty Kuva 14.



Kuva 14. Materiaalia lisäävän valmistuksen työvaiheet (muokattu lähteestä Gibson 2010).

2.3.1 Työvaihe 1: CAD-mallin luominen

Materiaalia lisäävän valmistuksen ensimmäinen vaihe on valmistettavan osan mallintaminen tietokoneavusteista suunnittelua käyttäen. Valmistettavan kappaleen ulkoinen geometria voidaan määrittää joko pinta- tai tilavuusmallina. Mallin valmistamiseen voidaan käyttää myös muita työkaluja, kuten 3D-skannausta.

2.3.2 Työvaihe 2: Tiedoston muuntaminen STL-muotoon

STL-tiedostomuodosta on muodostunut materiaalia lisäävän valmistuksen standarditiedostomuoto, jota lähes kaikki tulostuslaitteistot pystyvät lukemaan. Tiedosto kuvaa alkuperäisen CAD-mallin ulkoista geometriaa ja toimii perustana valmistuskerrosten määrittämisessä (nk. viipalointi) varsinaiselle valmistusohjelmalle.

2.3.3 Työvaihe 3: Tiedoston siirtäminen koneelle

Valmistettavan kappaleen muoto siirretään koneelle STL-muodossa. Tässä vaiheessa voidaan tehdä yleisiä valmistusasetuksia, kuten valmistettavan kappaleen paikan määrittäminen työstöalueella ja kappaleen koon sekä valmistusasennon määrittäminen. STL-muodon sijaan voidaan koneelle siirtää geometria- ja valmistustiedoista muodostettu valmistusohjelma (nc-ohjelma).

2.3.4 Työvaihe 4: Valmistusasetuksien määrittäminen

Valmistusasetukset tulee määrittää koneelle ennen valmistusta. Valmistusasetuksissa määritellään halutut valmistuksen parametrit, kuten materiaalirajoitukset, energianlähde, kerrospaksuus ja ajoitukset.

2.3.5 Työvaihe 5: Valmistus

Valmistusprosessi on pääasiassa automatisoitu, eikä se vaadi juurikaan valvontaa. Valmistuksen etenemistä voidaan seurata ulkoisesta monitorista, joka kertoo yleensä jäljellä olevan prosessiajan ja ilmoittaa valmistusprosessissa ilmenneistä ongelmista.

2.3.6 Työvaihe 6: Osan poistaminen koneesta

Valmistuksen jälkeen osa voidaan poistaa koneesta. Valmistuksen jälkeen tulee varmistaa, että kappaleen poistaminen koneesta on turvallista. Erityisesti tulee varmistua, että lämpötila on sopivan alhainen ja että koneen liikkeet ovat varmasti pysähtyneet.

2.3.7 Työvaihe 7: Viimeistely

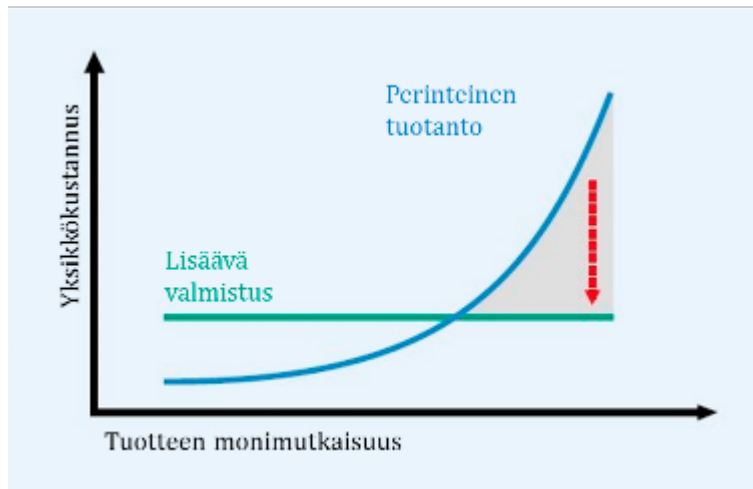
Valmistettu kappale saattaa vaatia viimeistelyä ennen varsinaista käyttöä. Valmistusprosessista riippuen kappaleista pitää poistaa mahdolliset tukirakenteet. Esim. materiaalia poistava viimeistely, kuten hionta, tehdään usein käsityönä. Viimeistely saattaa olla hyvin työlästä mikäli vaatimukset pinnanlaadulle ovat korkeat. Sisäpuolisten muotojen viimeistely on useimmiten mahdotonta.

2.3.8 Työvaihe 8: Tuotteen tai osan käyttöönotto

Viimeistelyn lisäksi joissain tapauksissa kappaleet vaativat muita jälkikäsittelyjä ennen käyttöönottoa. Kappaleet saattavat vaatia esimerkiksi lämpökäsittelyjä ja kokoonpanoa ennen lopullisen tuotteen käyttöönottoa.

2.4 Materiaalia lisäävän valmistuksen mahdollisuudet ja rajoitteet

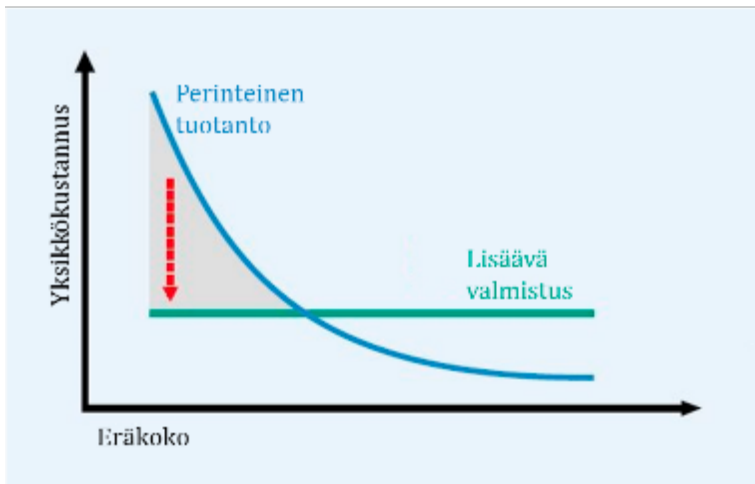
Yksi materiaalia lisäävän valmistuksen keskeisimmistä eduista on hyvin monimuotoisten kappaleiden valmistaminen ilman lisäkustannuksia. Teoriassa lisäävällä menetelmällä valmistettujen osien geometrialla ei ole rajoituksia. Perinteisillä valmistusmenetelmillä on tyypillisesti pyritty mahdollisimman yksinkertaiseen muotoon, jotta valmistuskustannukset eivät nousisi liian korkeiksi. Lisäävän valmistuksen kustannukset koostuvat yleensä pääasiassa koneajasta, eikä valmistettavan kappaleen muoto vaikuta juurikaan valmistusaikaan. (Hauge 2003.) Kuva 15 on vertailtu perinteisen ja lisäävän valmistuksen kustannuksia.



Kuva 15. Tuotteen monimutkaisuuden vaikutus kustannuksiin lisäävillä ja perinteisillä valmistusmenetelmillä (muokattu kohteesta Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT 2014).

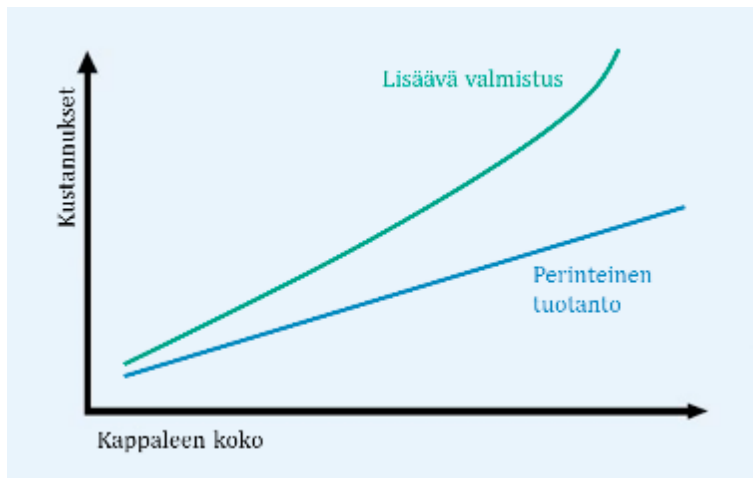
Valmistuksen tai kokoonpanon ehdoilla tapahtuvassa suunnittelussa on perinteisesti pyritty yksinkertaiseen valmistukseen ja valmistus-, kokoonpano- ja logististen kustannusten minimointiin (Gibson 2010). Kerros kerrokselta tapahtuva valmistus antaa suunnittelijoille aivan uusia mahdollisuuksia suunnitella uusia tuotteita. Valmistustapa ei rajoita tuotteen valmistusta, ja suunnitteluperiaatteita voidaan soveltaa kokonaan uudella tavalla. Lisäivällä valmistuksella valmistettavat tuotteet voidaan suunnitella aikaisempaa paremmin tarvelähtöisesti. Useat erilliset osat voidaan yhdistää yhdeksi, mikä vähentää kokonaisuusmäärää ja nopeuttaa kokoonpanoprosessia. Myös rakenteen tarkempi optimointi on lisäävillä valmistusmenetelmillä helpompaa kuin perinteisillä menetelmillä. (Becker 2005.)

Mikäli osan tai tuotteen valmistus on taloudellista perinteisillä menetelmillä, sitä tuskin kannattaa valmistaa lisäävällä valmistusmenetelmällä. Lisäivän valmistuksen edut tulevat esiin, kun kappale on geometrialtaan monimutkainen, tuotantomäärät ovat pieniä tai valmistetaan räätälöityjä tuotteita. (Rosen 2014.) Kuva 16 on vertailtu lisäävän ja perinteisen valmistuksen kustannuksia suhteessa eräkokoon.



Kuva 16. Eräkoon vaikutus kustannuksiin lisäävillä ja perinteisillä valmistusmenetelmillä (muokattu kohteesta Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT 2014).

Lisäävällä valmistuksella on kuitenkin omat rajoitteensa. Teoriassa valmistettava muoto ei rajoita valmistusta, mutta käytännössä kaikilla lisäävillä valmistusmenetelmillä on omat rajoituksensa. Kerros kerrokselta tapahtuvassa valmistuksessa valmistettaviin kappaleisiin tulee aina kerrospaksuudesta riippuvaa porrastusta, joka vaikuttaa pinnanlaatuun. Pinnanlaatu paranee, jos kerrospaksuutta ohennetaan, mutta samalla tulostusaika kasvaa. Materiaalien suhteen lisäävän valmistuksen haasteena ovat myös kalliit materiaalit ja rajoitettu materiaalivalikoima. Korkeat materiaalikustannukset johtuvat perinteisiä materiaaleja pienemmistä valmistusmääristä. Eri menetelmien yleistyessä materiaalien hinnat tulevat kuitenkin halpenemaan. (Hauge 2003.) Korkeat materiaalikustannukset, valmistusnopeus ja valmistettavien kappaleiden maksimikoko vaikuttavat suuresti siihen, minkä kokoisen kappaleen valmistaminen lisäävillä valmistusmenetelmillä on kannattavaa. Kuva 17 on esitetty kappaleen koon vaikutus valmistuskustannuksiin. Ensimmäisiä taloudellisesti kannattavia lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettuja tuotteita ovat yksilölliset kuulokojeet, joiden valmistus aloitettiin noin 15 vuotta sitten. Menetelmä- ja materiaalikehitys ovat mahdollistaneet yhä suurempien kappaleiden valmistamisen kannattavasti, ja marmorikuulan kokoisista kuulokojeista on päästy noin jalkapallon kokoisten tuotteiden kannattavaan tuotantoon. (Hauge 2003.)



Kuva 17. Kappaleen koon vaikutus kustannuksiin lisäävillä ja perinteisillä valmistusmenetelmillä (muokattu kohteesta Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT 2014).

Taulukko 3 on esitetty materiaalia lisäävän valmistuksen vahvuudet, heikkoudet, uhat ja mahdollisuudet SWOT-analyysin muodossa.

Taulukko 3. Materiaalia lisäävän valmistuksen SWOT (SASAM 2015).

Vahvuudet

- elektroniset toimitusketjut, paikallinen valmistus
- ainutlaatuiset topologisesti optimoidut tuotteet
- tehokas materiaalin käyttö
- monimateriaalirakenteet mahdollisia
- valmistus tarpeeseen, ei varastoja
- ympäristöä säästävä tuotanto
- tietotaitoa vaativa valmistusmenetelmä
- Euroopassa vahvaa osaamista materiaalia lisäävässä valmistuksessa

Heikkoudet

- uusi teknologia ilman riittävää standardisointia
- hitaat valmistusprosessit johtavat korkeisiin valmistuskustannuksiin
- valmistusprosessien vakaus ja toistettavuus on huono; vaatii lisää reaaliaikaista prosessin seuranta
- huono tarkkuus, vaatii monesti jälkikäsitelyä
- korkeat materiaalikustannukset
- ei-rikkovia testausmenetelmiä ei ole saatavilla
- materiaalia lisäävän valmistuksen suunnittelukoulutus riittämätöntä

Mahdollisuudet

- hybridiprosessit (lisäävän ja perinteisen valmistuksen yhdistäminen)
- lisäävän valmistuksen integrointi olemassa oleviin tuotantolinjoihin
- uusien työkalujen avulla valmistettavat räätälöidyt tuotteet
- monimateriaali- ja älykkäät tuotteet mahdollisia
- uudet paikalliseen kysyntään perustuvat liiketoimintamahdollisuudet
- mahdollisuudet korkean teknologian teollisuudelle ja toimittajille

Uhat

- Euroopassa ei ole monta alkuperäistä laitevalmistajaa
- materiaalia lisäävän valmistuksen tuntemus insinöörien keskuudessa
- Aasian kasvava osaaminen laitevalmistuksessa ja palvelun tuottamisessa
- Kehitys Aasiassa ja USA:ssa on nopeaa, ja siellä on parempi taloudellinen tuki

3 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN SOVELLUKSET

Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät ja materiaalit ovat kehittyneet paljon parin viime vuosikymmenen aikana. Ensimmäiset lisäävän valmistuksen sovellukset olivat erilaisia prototyyppejä, joita voitiin käyttää esimerkiksi tuotesuunnittelun tai markkinoinnin apuna. Menetelmien kehitys on mahdollistanut mekaanisilta ja visuaalisilta ominaisuuksiltaan yhä parempien osien valmistamisen, ja sovellusten painopiste on siirtymässä yhä enemmän prototyypeistä lopputuotteisiin. (Hauge 2003.) Yleisellä tasolla materiaalia lisäävän valmistuksen sovellukset voidaan jakaa kolmeen luokkaan:

- prototyyppien pikavalmistus (Rapid prototyping)
- muottien ja työvälineiden pikavalmistus (Rapid tooling)
- suoravalmistus (Rapid manufacturing).

3.1 Prototyyppien pikavalmistus

Prototyypit ovat olennainen osa tuotekehitystä. Tuotteen muodon, toimintojen ja sopivuuden arviointi on hyvin tärkeä suunnitteluprosessin osa, joka on tehtävä ennen työkalujen valmistamista ja tuotannon aloittamista. Perinteisesti prototyypit on valmistettu käsityönä, ja niiden valmistaminen on saattanut kestää viikkoja tai jopa kuukausia. Hidas prototyyppien valmistus on mahdollistanut ainoastaan muutaman suunnitteluiteraation testaamisen ennen tuotannon aloittamista. Tämä on saattanut johtaa kalliisiin virheisiin, jotka on huomattu vasta tuotannon aloittamisen jälkeen. Prototyyppien valmistus on koettu monimutkaisena ja kalliina prosessina, joka haittaa luovien ratkaisujen löytämistä. Materiaalia lisäävä valmistus on havaittu hyväksi menetelmäksi pikavalmistettujen prototyyppien valmistuksessa ja tuotekehityssyklin nopeuttamisessa. Lisäävässä valmistuksessa osat voidaan valmistaa suoraan CAD-mallin perusteella muutamissa tunneissa, ilman että käyttäjän tarvitsee osallistua valmistusprosessiin. Tämän ansiosta suunnittelijat voivat tuottaa enemmän prototyyppejä esimerkiksi kokoonpanon tai toiminnallisuuden testaamiseen, ja tuotannon ongelmia on pystytty vähentämään ja tuotekehitysaikoja nopeuttamaan. (Gibson 2010.)

Kuva 18 on materiaalin pursotukseen perustuvalla menetelmällä valmistettuja imurin suulakkeen prototyyppiä, joita voidaan käyttää tuotteen ergonomian ja toiminnallisuuden testaamiseen.



Kuva 18. 3D-tulostettuja imurin suulakkeen prototyyppiä. (Kuva: Markus Bruun.)

Nykyisin arkkitehdit käyttävät paljon tietokonesimulointeja suunnitelmien visualisointiin. Perinteisesti visualisoinnit on tehty käsityönä tehtyjen pienoismallien avulla. Lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistetuilla pienoismalleilla on mahdollista säästää sekä aikaa että kustannuksia käsin tehtyihin malleihin verrattuna. Kuva 19 on Polyjet-tekniikalla valmistettuja pienoismalleja (3D printer product 2015).



Kuva 19. Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen pienoismallien valmistuksessa (3D printer product 2015).

3.2 Muottien ja työvälineiden pikavalmistus

Lisäävän valmistuksen perusajatus on valmistaa tuotteita suoraan digitaalisen mallin perusteella, ilman työkaluja tai esivalmistettuja materiaaleja. Valmistettavat sovellukset voivat olla prototyyppisiä, lopputuotteita tai työkaluja. (Becker 2005.) Pika-valmistetut työkalut voivat olla muotteja, työkaluja, jigijä, kiinnikkeitä tai erilaisia mittavälineitä. Seuraavassa on esitelty lisäävän valmistuksen hyödyntämistä erilaisten työkalujen valmistuksessa.

3.2.1 Lisäävä valmistus ruiskuvalumuottien valmistuksessa

Lisäävällä valmistuksella on mahdollista valmistaa sekä muovisia että metallisia ruiskuvalumuotteja.

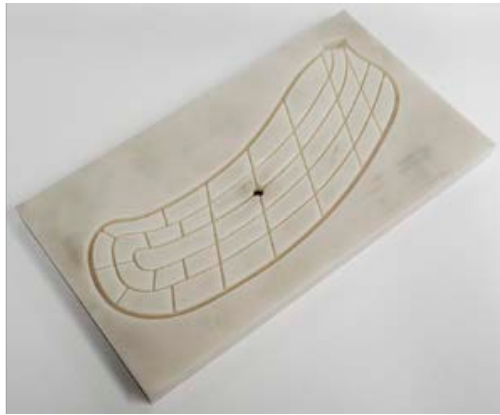
Muoviset ruiskuvalumuotit

Monesti prototyypeistä saadaan enemmän irti, kun ne on valmistettu samasta materiaalista kuin lopputuote. Ruiskuvalulla valmistettujen prototyyppien valmistaminen vaatii muotin, jonka valmistaminen on yleensä kallista ja valmistaminen vie aikaa.

Ruiskuvalumuottien valmistaminen on mahdollista materiaalin ruiskutukseen perustuvalla Stratasysin Polyjet-teknologialla. Digital ABS -tulostusmateriaali soveltuu muottimateriaaliksi, kun valmistettava tuotantoerä on noin 10–100 kappaletta. Tulostustarkkuus ja pinnanlaatu riittävät muottien valmistukseen ilman jälkikäsitteilyä. Polyjet-teknologialla valmistetut muotit eivät varsinaisesti sovellu tuotantoon, mutta muotteja voidaan käyttää esimerkiksi prototyyppi-osien toiminnallisuuden testaamiseen. Tulostetuilla muoteilla pystytään nopeuttamaan tuotekehitysprosessia. Polyjet-teknologialla valmistetuilla ruiskuvalumuoteilla saavutetaan etuja seuraavissa tapauksissa:

- Muotin muoto on vaikea valmistaa perinteisillä valmistusmenetelmillä.
- Tuotteen valmistuserä on pieni.
- Tuotteen muotoilu ei ole lopullinen.
- Tarvitaan prototyyppi, joka on valmistettu samasta materiaalista kuin varsinainen lopputuote.

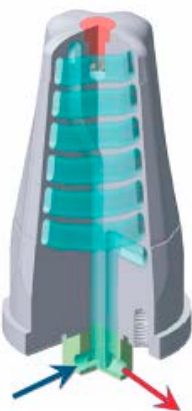
Kuva 20 on Stratasys Objet Eden 260 -tulostimella valmistettu sähkömailan muotti ja muotilla valmistettu tuote. Muotti kesti 10 kappaleen valmistuksen, jonka jälkeen se murtui todennäköisesti kohonneen lämpötilan johdosta. Lapa valmistettiin HDPE-muovista, jonka ruiskutuslämpötila oli noin 220 °C.



Kuva 20. Lisäväällä valmistuksella valmistettu sählymailan muotti ja muotilla valmistettu tuote. (Kuva: Markus Bruun.)

Metalliset ruiskuvalumuotit

Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa tehokkaan jäähdytyskanaviston valmistamisen ruiskuvalumuotin sisälle. Kanaviston muoto voidaan optimoida siten, että muotin lämpötila muuttuu ruiskutusprosessin eri vaiheissa halutulla tavalla. Nopeampi muotin jäähdytys mahdollistaa nopeamman sykliajan ja tuottavuus paranee. Ruiskuvalussa jäähdytys voi olla kestoaltaan jopa 70 % koko valmistusprosessin ajasta. Lisäväällä valmistuksella valmistetuilla ruiskuvalumuoteilla on päästy jopa 75 %:n parannukseen tuottavuudessa. Optimaalisen jäähdytyskanaviston ansiosta muotin pintalämpötila saadaan tasaiseksi, eikä muottiin muodostu erityisen kuumia pisteitä. Kuva 21 vasemmalla on lisäväällä valmistuksella valmistetun muotin jäähdytyskanavisto ja oikealla valmistettu muotti ja lopputuotteita. (3D printing content from Machine Design 2015.)



Kuva 21. Lisävään valmistuksen hyödyntäminen ruiskuvalumuotien valmistuksessa (muokattu lähteestä 3D printing content from Machine Design 2015).

3.2.2 Pikavalmistetut muotit lujitemuoviteollisuudessa

Lisäävää valmistusta voidaan hyödyntää lujitemuoviteollisuudessa erilaisten muottien valmistamiseen. Sekä kertakäyttöisten että useita irrotuksia kestävien muottien valmistus on mahdollista monella eri lisäävällä valmistusmenetelmällä.

Sideaineen ruiskutukseen perustuvalla valmistusmenetelmällä voidaan valmistaa hiekkamuotteja, jotka oikein pinnoitettuna soveltuvat lujitemuovituotteiden valmistukseen (Hetitec 2015). Kuva 22 on Hetitec Oy:n tulostama matkakaiuttimen muotti; vasemmanpuoleinen on käsittelemätön ja oikeanpuoleinen on käsitelty Finnesterin Durester CC -muottipinnoitteella.



Kuva 22. Hiekasta 3D-tulostettu lujitemuovimuotti. (Kuva: Markus Bruun.)

Savonia-ammattikorkeakoulussa on tutkittu sideaineen ruiskutukseen perustuvan Zprinter® 450 -tulostimen soveltuvuutta lujitemuovimuottien valmistukseen. Tulostusmateriaali koostuu pääasiassa kipsistä ja erilaisista lisäaineista. Kipsimuottien käyttö lujitemuoviosien valmistuksessa osoittautui mahdolliseksi, mutta muotit vaativat erilaisia esikäsittelyjä. Kipsituloste on sellaisenaan melko hauras ja rikkoutuu helposti. Muotit tulee lisäksi pinnoittaa siten, että ne kestävät laminoinnissa käytettäviä hartseja. (Turunen 2011.)

Lisäävää valmistusta voidaan hyödyntää onttojen komposiittiosien valmistuksessa. Muotti voidaan valmistaa liukenevasta materiaalista, joka poistetaan vedellä tai muulla liuottimella. Liukeneva muotti mahdollistaa hyvin monimuotoisten kappaleiden valmistamisen ilman että muottitekniikka rajoittaa valmistusta. Vapaa geometria antaa paljon mahdollisuuksia osien muodon optimointiin. Lujitemuoviosien kohdalla on mahdollista valmistaa esimerkiksi virtaukseltaan optimoituja tuotteita, kuten Kuva 23 oleva hiilikuituinen jarrun ilmanohjain. Vasemmalla on valmis osa ja oikealla kuva prepreg-laminoinnista.



Kuva 23. Liukenevat muotit lujitemuoviteollisuudessa (Caddedge 2015).

Monimateriaalitulostuksen ansiosta liukenevan muotin sisään voidaan tulostaa esimerkiksi ABS-muovisia inserttejä, jotka jäävät varsinaisen lujitemuovikappaleen sisään. Lujitemuovimuottien valmistaminen on mahdollista myös FDM-menetelmällä. Lisäväällä valmistusmenetelmällä tehty muotti ei vaadi niin paljoa käsityötä kuin perinteiset muotinvalmistusmenetelmät. Stratasysin ABS-M30-tulostusmateriaali kestää muottilämpötiloja aina 95 °C:seen asti. Kuva 24 on FDM-pursotusmenetelmällä valmistettu polkupyörän satulan muotti ja sillä valmistettu hiilikuituinen satula. Tulostimien tulostusalan koko rajoittaa muotin kokoa.



Kuva 24. Materiaalin pursotuksella valmistettu lujitemuovimuotti.

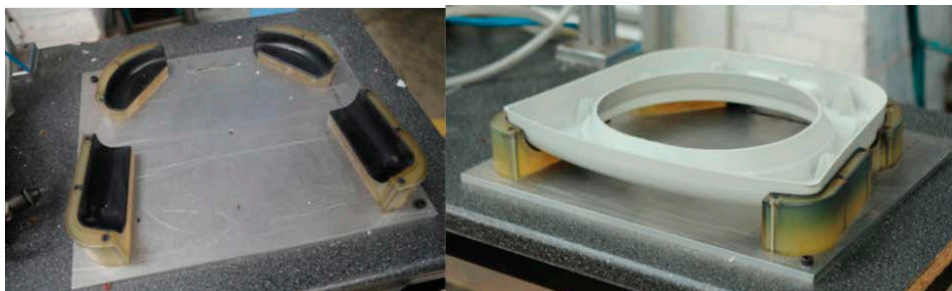
3.2.3 Pikavalmistetut jigat, kiinnikkeet ja aputyökalut

Valmistuksessa käytetään paljon erilaisia jigejä, tukia, kaavoja, sapluunoja ja mittatulkkeja laadun tarkastukseen ja tuotannon tehostamiseen. Osien ja kokoonpanojen suojaamiseen, organisointiin ja paikoittamiseen käytetään erikoistyökaluja monessa eri valmistusprosessin vaiheessa. Usein nämä aputyökalut ovat huomaamattomia ja mahdollistavat tehokkaan ja laadukkaan tuotannon. Aputyökalujen ja jigien valmistus on mahdollista monella eri lisäävällä valmistusmenetelmällä. (Stratasys 2015.) Kuva 25 on tulostettu erikoistyökalu, jolla on mahdollista tehdä tarkka alkusärö oikeaan kohtaan kumin särönkasvua tutkivassa koejärjestelyssä.



Kuva 25. 3D-tulostettu erikoistyökalu. (Kuva: Markus Bruun.)

Kuva 26 on ruiskuvalutuotteita valmistavan Rustland Plasticsin kokoonpanossa käytämä jigi, jonka tarkoitus on suojella valmistettavaa tuotetta naarmuilta.



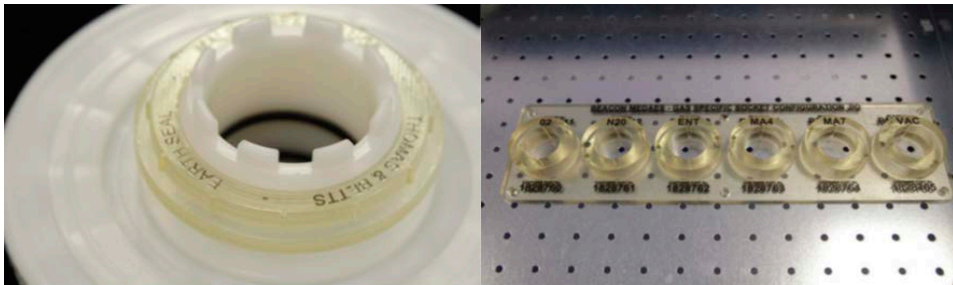
Kuva 26. Lisäävällä valmistuksella valmistettu kiinnike (etmm-online.com 2015).

Kuva 27 on Rusland Plasticsin Polyjet-tekniikalla valmistama porausjigi, joka mahdollistaa tarkan ja toistettavan porauksen.



Kuva 27. Lisäävällä valmistuksella valmistettu porausjigi (etmm-online.com 2015).

Kuva 28 on Rusland Plasticsin laadunvalvontaan tarkoitettuja lisäävällä valmistuksella valmistettuja tulkkeja. Vasemmalla olevaa työkalua käytetään kierteiden tarkastukseen ja oikealla olevaa sovitteosien hyväksymiseen.



Kuva 28. Lisäävällä valmistuksella valmistettuja laadunvalvonnan mittavälineitä (etmm-online.com 2015).

Aputyökalut kokoonpanon apuna autoteollisuudessa

Kuva 29 on BMW:n käyttämä jigi, joka on tarkoitettu auton mallitunnuksen kiinnittämiseen oikeaan paikkaan. Kuvassa yläpuolella on perinteinen ja alapuolella lisäävällä valmistuksella valmistettu jigi. Lisäävällä menetelmällä valmistetun jigin ergonomia on huomattavasti perinteistä parempi, ja se on 1,3 kg perinteistä konstruktiota kevyempi. Muovista tulostettu jigi on noin puolet edullisempi valmistaa kuin perinteisesti CNC-koneistettu versio. Jigin valmistus on myös huomattavasti perinteistä menetelmää nopeampaa.



Kuva 29. Perinteinen ja lisäävällä valmistuksella valmistettu jigi (Stratasys 2015).

Kuva 30 on Opel Adam Rocksin kokoonpanossa käytettäviä, muovista tulostettuja aputyökaluja. Auton kokoonpanossa käytetään 40:tä erilaista 3D-tulostettua jigiiä ja aputyökalua. Kyseisten työkalujen valmistaminen lisäävällä valmistuksella on noin 90 % edullisempaa kuin perinteisillä menetelmillä. Kokoonpanoa tekevien työntekijöiden toiveet ja mielipiteet voidaan ottaa helposti huomioon, koska työkalujen valmistaminen on edullista ja nopeaa. Oikeanlaisilla, käyttötarkoitukseen räätälöidyillä työkaluilla pystytään nostamaan tuottavuutta ja parantamaan laatua. (3dprintingindustry.com 2015.)



Kuva 30. Opel Adam Rocksin kokoonpanossa käytettäviä 3D-tulostettuja aputyökaluja (3dprintingindustry.com 2015).

3.2.4 Silikoniosien valmistus 3D-tulostettujen muottien avulla

Silikonikumit ovat yleisesti käytetty materiaali monipuolisuutensa ja ainutlaatuisten ominaisuuksiensa ansiosta. Ne ovat vakaita materiaaleja, jotka kestävät hyvin ääriolosuhteita ja korkeita lämpötiloja. Massatuotannossa silikoniosia valmistetaan ruiskuväluu muistuttavalla laitteistolla. Prototyyppien valmistaminen massatuotantoon tarkoitetuilla laitteistoilla on kallista, koska muottikustannukset ovat suuret. Prototyyppejä valmistetaan yleensä manuaalivaluna muotteihin, jotka on valmistettu esimerkiksi silikonista tai pehmeistä metalleista koneistamalla. Molemmat menetelmät ovat hitaita ja vaativat usein työntekijöitä erityistä osaamista. Muottien valmistaminen on mahdollista muun muassa materiaalin ruiskutukseen perustuvalla Polyjet-tekniologialla. Muotin tulostaminen on sekä nopeaa että edullista perinteisiin menetelmiin verrattuna. Muotit voidaan tulostaa yön aikana, ja ne ovat käyttövalmiita muutaman minuutin valmisteluilla. Kuva 31 on kuvasarja digitaalisen painemittarin silikonisen suojakuoren prototyyppin valmistuksesta 3D-tulostettujen muottien avulla.



Kuva 31. Silikoniosien valmistus hyödyntämällä materiaalia lisäävää valmistusta (Stratasys 2014).

3.3 Suoravalmistus

Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa aivan uudentyyppisten tuotteiden valmistamisen. Menetelmällä on sekä etuja että rajoitteita perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Yleisellä tasolla voidaan sanoa, että jos osan valmistus on taloudellista perinteisillä valmistusmenetelmillä, ei sitä kannata valmistaa lisäävillä valmistusmenetelmillä. Lisäävän valmistuksen edut nousevat esille, kun kappaleen geometria on monimutkainen, tuotantomäärät ovat pieniä tai kappaleen muodolta vaaditaan asiakaskohtaista räätälöintiä. (Rosen 2014.) Seuraavassa on esitelty muutamia esimerkkejä lopputuotteiden valmistamisesta lisäävillä valmistusmenetelmillä.

Lääketieteelliset sovellukset ovat yksi hyvä materiaalia lisäävän valmistuksen sovelluskohde. Nämä sovellukset ovat yleensä hyvin yksilöllisiä ja vaativat asiakaskohtaista räätälöintiä. Samoin valmistettavat tuotantomäärät ovat pieniä. Kuva 32 on lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettuja yksilöllisiä tukipohjallisia.



Kuva 32. 3D-tulostettuja tukipohjallisia. (Kuva: Markus Bruun.)

Kuva 33 on pikavalmistettu hampaiden oikomislaitte. Asiakkaan hampaat skannataan ja oikomishoito suunnitellaan digitaalisesti. Oikomishoidon aikana asiakkaan purentaa muutetaan vähitellen haluttuun suuntaan. Vuoden hoito koostuu noin 24:stä yksilöllisesti valmistetusta oikomislaitteesta, jotka muokkaavat asiakkaan purentaa portaittain oikeaan suuntaan. (aligntech.com 2015.)



Kuva 33. Pikavalmistettu hampaiden oikomislaitte (aligntech.com 2015).

4 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN SUUNNITTELUNÄKÖKOHDAT

Valmistuksen ja kokonpanon ehdoilla tapahtuvassa suunnittelussa on pyritty tyypillisesti helppoon valmistukseen sekä valmistuksen, kokonpanon ja logististen kustannusten minimointiin. Materiaalia lisäävällä valmistuksella on monia etuja perinteisiin menetelmiin verrattuna, ja perinteisiä suunnitteluperiaatteita voidaan hyödyntää uudella tavalla. (Gibson 2010.) Vallankumouksellista materiaalia lisäävässä valmistuksessa on se, että geometria ei ole enää valmistusta rajoittava tekijä. Tällä on suuri vaikutus suunnittelijan työhön sekä koko suunnitteluprosessiin ja periaatteisiin. (Hauge 2003.)

Lisäävän valmistuksen perusajatus on valmistaa tuotteita suoraan digitaalisen mallin perusteella, ilman työkaluja tai esivalmistettuja materiaaleja. Kerros kerrokselta tapahtuva valmistus mahdollistaa aivan uudentyypiset tuotteet. Suunnittelussa ei ole enää tarpeen seurata yhtä tarkkoja suunnitteluohjeita kuin aikaisemmin. Kappaleen seinämänvahvuus voi vaihdella, eikä päästökulmista tarvitse huolehtia samalla tavalla kuin esimerkiksi ruiskuvalussa. Valmistusmenetelmät mahdollistavat useiden toimintojen yhdistämisen samaan tuotteeseen vähentäen samalla osien lukumäärää ja helpottaen kokoonpanoprosessia. Osien rakenteet voidaan myös optimoida siten, että niiden mekaaniset ominaisuudet ovat tarkoituksenmukaiset. Jotta menetelmän kaikki edut voitaisiin hyödyntää, on suunnittelijoiden tiedostettava uusien valmistusmenetelmien mahdollisuudet ja rajoitteet. (Hauge 2003.)

4.1 Mahdollisuudet

Materiaalia lisäävän valmistuksen ainutlaatuisia mahdollisuuksia ovat esimerkiksi seuraavat (Gibson 2010):

- Muodon moninaisuus: teoriassa kaikki muodot ovat mahdollisia, geometria voidaan räätälöidä tuotekohtaisesti ja muodot voidaan optimoida tapauskohtaisesti.
- Materiaalin moninaisuus: kerroksittainen valmistus mahdollistaa monimateriaaliset tuotteet, joissa materiaalin koostumus ja ominaisuudet vaihtelevat halutulla tavalla saman kappaleen sisällä.

- Monitasoinen monimuotoisuus: tuotteen rakenne voi olla hyvin monimutkainen monella eri tasolla aina nano-/mikrorakenteesta suurempiin makrotason rakenteisiin.
- Toiminnallisuuden moninaisuus: toiminnallisia tuotteita voidaan valmistaa suoraan yhdessä valmistusvaiheessa.

4.1.1 Vapaa geometria

Materiaalia lisäävällä valmistuksella on mahdollista valmistaa geometrialtaan monimutkaisia osia. Kerros kerrokselta tapahtuva valmistus mahdollistaa sen, että jokainen kerros on erilainen. Valmistettavan kappaleen mittatarkkuus riippuu sekä kerrospaksuudesta että siitä, miten tarkasti jokaisen kerroksen muoto voidaan toteuttaa. Eri valmistusmenetelmien välillä on eroja. Yksityiskohdat voivat olla korkeussuunnassa periaatteessa kerrospaksuuden korkuisia, mutta käytännössä on parempi suunnitella yksityiskohdat usean kerroksen paksuisiksi. Valmistusmenetelmästä riippuen kappaleen valmistuksessa tulee käyttää tukirakenteita, jotka joissain tapauksissa rajoittavat vapaan geometrian monimutkaisuutta ja yksityiskohtien tarkkuutta. Jokaisella lisäävällä valmistusmenetelmällä on omat vaatimuksensa, jotka on otettava huomioon. Yleisesti ottaen lisäävillä valmistusmenetelmillä on mahdollista valmistaa huomattavasti normaalia valmistusta monimutkaisempia tuotteita. (Gibson 2010.) Kuva 34 on taitelija Bathsheba Grossmanin lisäävää valmistusta varten suunnittelema valaisin, joka hyödyntää valmistuksen vapaata geometriaa.



Kuva 34. Lisäävällä valmistuksella valmistettava valaisin (Bathsheba sculpture 2015).

Vapaa geometria tai kappaleen monimutkainen muoto eivät vaikuta valmistuskustannuksiin samoin kuin perinteisissä valmistusmenetelmissä. Valmistuskustannukset määrittyvät pääasiassa kappaleen tilavuuden ja valmistusajan perusteella. (Hauge 2003.)

4.1.2 Räätelöity geometria

Materiaalia lisäävällä valmistuksella on mahdollista valmistaa hyvin yksilöllisiä muotoja. Yksi esimerkki lisäävällä valmistuksella valmistetusta räätelöidystä tuotteesta on korvakäytävään tuleva kuulokoje. Jokaisen kuulokojeen ulkokuori voidaan valmistaa asiakkaan mittojen mukaan, ja samalla valmistuskerralla voidaan valmistaa useita erilaisia kuulokojeita yhtä aikaa. Menetelmä mahdollistaa massaräätelöinnin massavalmistuksen sijaan. Lisäivät valmistusmenetelmät mahdollistavat massaräätelöinnin ja yksilöllisten tuotteiden valmistuksen, mutta suurimmat rajoitteet ovat ohjelmistopuolella. (Gibson 2010.) Räätelöityä geometriaa voidaan hyödyntää erityisen hyvin erilaisissa lääketieteellisissä sovelluksissa. Kuva 35 on lisäävällä valmistuksella valmistettuja yksilöllisiä kuulokojeita.

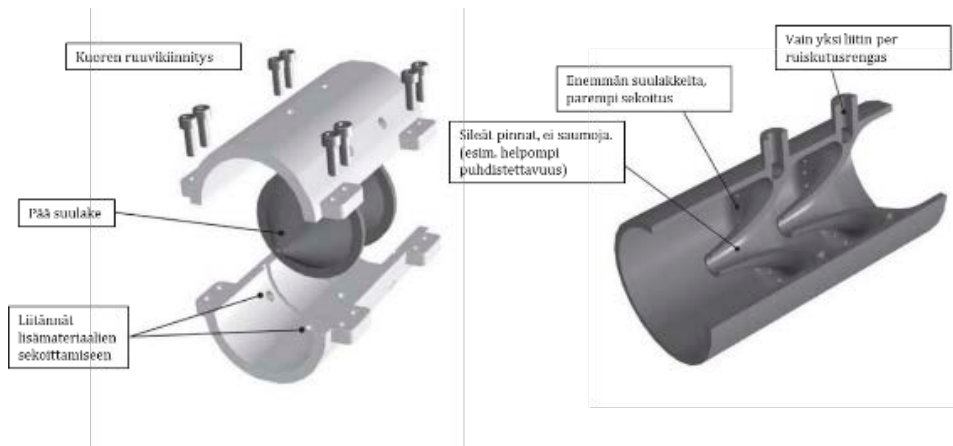


Kuva 35. Lisäävällä valmistuksella valmistettuja kuulokojeiden runkoja (3drp.co.uk 2015).

4.1.3 Integroidut kokoonpanot

Kappaleiden vapaa geometria mahdollistaa hyvin monimutkaisten kappaleiden valmistuksen. Aikaisemmin monesta eri osasta valmistettu tuote voidaan valmistaa yhdellä kerralla. Osien vähentyminen helpottaa kokoonpanotyötä tai joissain tapauksissa jopa poistaa koko kokoonpanovaiheen. Osien lukumäärän vähentyminen helpottaa myös tuotannonhallintaa ja -suunnittelua. Esimerkiksi osien hankinta, jäljittäminen ja tarkastus nopeutuvat, kun osia on vähemmän. Myös varastoitavien varaosien määrä samoin kuin tarvittavien työkalujen määrä vähenee, kun osat valmistetaan integroituina kokoonpanoina. (Gibson 2010.) Kuva 36 on esimerkki sekoitinlaitteesta, joka on suun-

niteltu uudelleen erityisesti lisäävää valmistusta ajatellen. Uusi osa voidaan valmistaa kokonaan lisäävällä valmistusmenetelmällä, ilman kokoonpanoa. Lisäksi sekoittimen toimintaa on voitu parantaa perinteiseen versioon verrattuna. (Becker 2005.)



Kuva 36. Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen sekoittimen uudelleensuunnittelussa (Becker 2005).

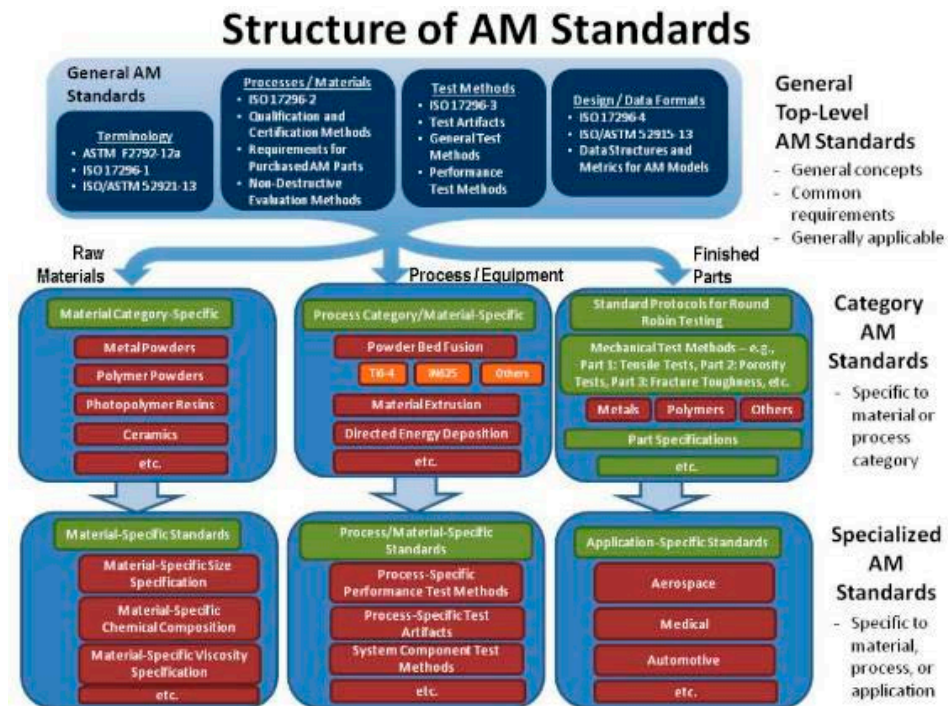
4.1.4 Materiaalia lisäävän valmistuksen standardit

Materiaalia lisäävä valmistus on kehittynyt paljon viimeisten 20 vuoden aikana. Valmistusprosessit ovat muuttuneet prototyyppivalmistuksesta työkalujen ja varsinaisten lopputuotteiden valmistukseen. (Guo 2013.) Vaikka materiaalia lisäävällä valmistuksella valmistetut tuotteet ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan riittäviä kaupalliseen toimintaan, kansainvälisten standardien puuttuminen jarruttaa menetelmien käyttöönottoa teollisuudessa. Lisäävään valmistukseen liittyy paljon muuttujia, jotka vaikuttavat lopputuotteen ominaisuuksiin. Valmistusparametrit ja materiaalit vaikuttavat lopputulokseen suuresti, ja laadunhallinta on vaikeaa. (SASAM 2015.)

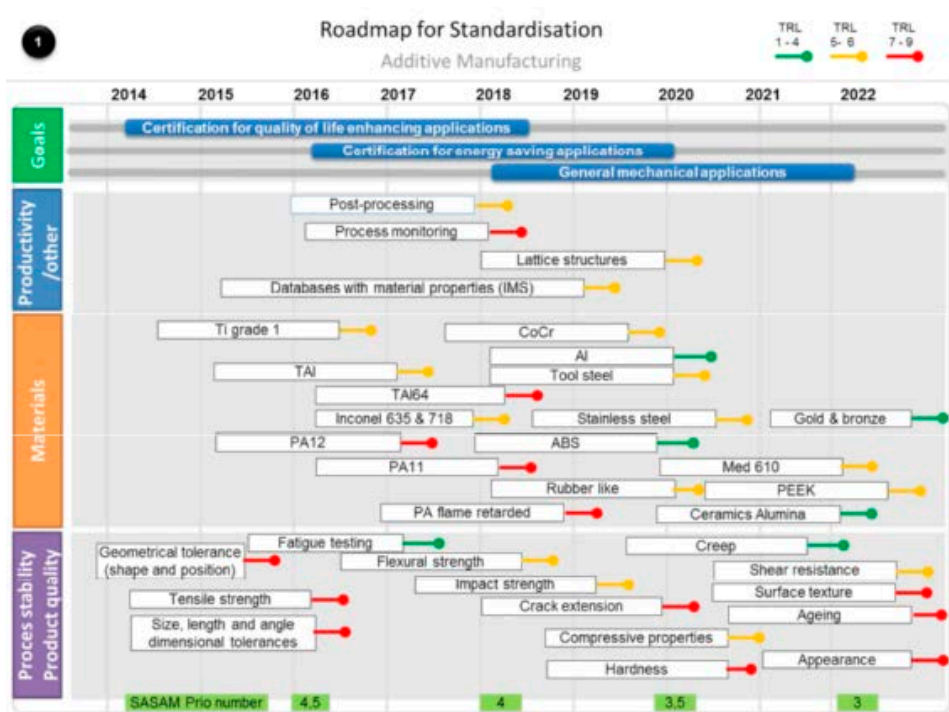
Kansainväliset standardiorganisaatiot ovat tiedostaneet puutteet materiaalia lisäävän valmistuksen standardisoinnissa, ja ne ovat lähteneet yhteistyöhön yhteisten standardien kehittämiseksi. ISO-, ASTM- ja CEN-standardiorganisaatiot ovat päässeet yhteisymmärrykseen lisäävän valmistuksen standardien rakenteesta, jossa on standardeja kolmella eri tasolla:

- Yleiset standardit: määrittävät yleiset periaatteet ja vaatimukset.
- Kategoriastandardit: määrittävät vaatimukset tietylle prosessille tai materiaalille.
- Erikoisstandardit: määrittävät vaatimukset tietylle materiaalille, prosessille tai sovellukselle.

Kuva 37 on ISO-, ASTM- ja CEN-standardiorganisaatioiden hyväksymä materiaalia lisäävän valmistuksen standardien rakenne. Kuva 38 on tiekartta materiaalia valmistavan valmistuksen standardeihin. Lisäävän valmistuksen laadun kannalta tärkeimpiä standardisoitavia asioita ovat muun muassa geometriset ja mittatoleranssit. Myös mekaanisiin ominaisuuksiin liittyvät standardit ovat etusijalla uusista standardeista sovittaessa.



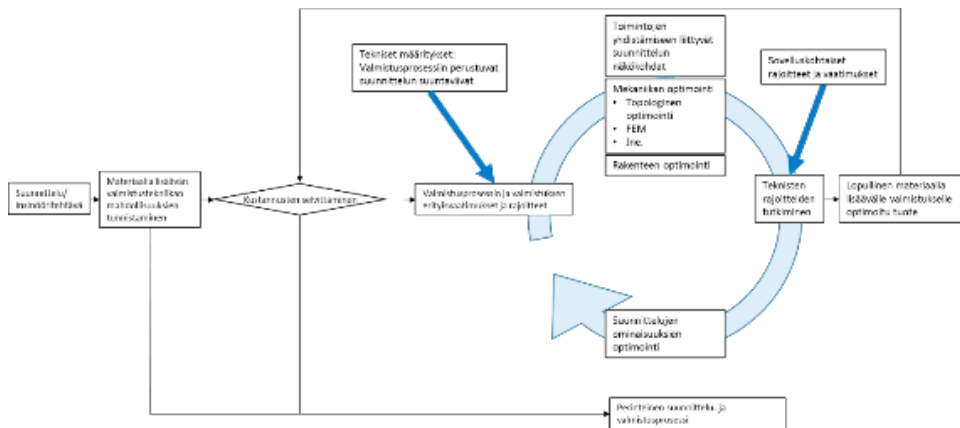
Kuva 37. Materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien standardien rakenne (SASAM 2015).



Kuva 38. Tiekartta materiaalia lisäävän valmistuksen standardeihin (SASAM 2015).

Materiaalia lisäävän valmistuksen suunnittelustandardit

Suunnitteilla on useita suunnittelustandardeja, mukaan lukien yleinen opas, jonka tavoitteena on käsitellä kattavasti lisäävän valmistuksen suunnitteluohjeita ottamatta kantaa varsinaisiin valmistusprosesseihin. Standardi käsittelee lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia ja haasteita, jotka suunnittelijan tulee ottaa huomioon, kun lisäävää valmistusta hyödynnetään osien valmistuksessa. Sisältö koostuu suunnittelunäkökohdista, jotka käsittelevät tuotekehitystä, käyttöä, liiketoimintaa, materiaaliominaisuuksia, menetelmää ja viestintänäkökulmia. Kuva 39 on SAMAM-projektin ehdotus suunnitteluprosessista vapaasti suomennettuna.



Kuva 39. Ehdotus materiaalia lisäävän valmistuksen suunnitteluprosessista (SASAM 2015).

4.2 Menetelmät ja työkalut

Lisäävän valmistuksen yhtenä tavoitteena on maksimoida tuotteen suorituskyky muodon, koon, rakenteen tai materiaalikoostumuksen avulla (Gibson 2010). Seuraavassa on esitelty työkaluja, joita voidaan hyödyntää suunniteltaessa lisäävällä valmistuksella valmistettavia tuotteita.

4.2.1 Topologinen optimointi

Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa hyvin monimutkaisten muotojen valmistuksen. Koska valmistusmenetelmä ei rajoita tuotteiden muotoa, voidaan niiden ominaisuudet ja muodot optimoida matemaattisia työkaluja käyttäen. Yleensä optimoinnissa pyritään tuotteiden massan pienentämiseen tai tiettyjen mekaanisten ominaisuuksien saavuttamiseen. (Rosen 2014.)

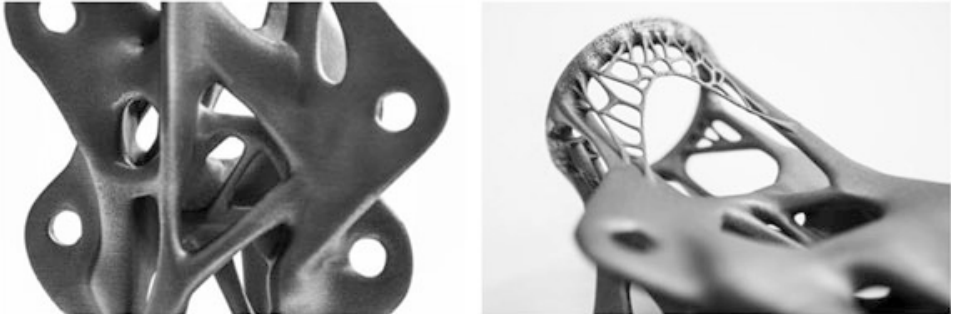
Materiaalia lisäävän valmistuksen kohdalla optimointia voidaan hyödyntää seuraavasti:

- koon optimointi – mittojen määrittely
- muodon optimointi – muotojen määrittely pisteiden, käyrien tai pintojen avulla
- topologinen optimointi – materiaalin määrän ja jakaantumisen määrittely.

Topologinen optimointi on matemaattinen rakenteen optimointimenetelmä, jossa muutetaan rakenneosien määrää, tyyppiä ja sijoittelua. Tyypillisesti optimoinnilla pyritään massan tai tilavuuden minimointiin rajoitteiden, kuten jännitysten, jännitysenergian, maksimaalisten siirtymien, vallitessa. Topologista optimointia voidaan tehdä sellaisilla kaupallisilla ohjelmistoilla kuin Abaqus tai Optistruct. Topologisen optimoinnin hyödyntämisestä materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien sovelluksissa tutkitaan laajalti. (Rosen 2014.) Kuva 40 vasemmalla on perinteisesti valmistettu ja oikealla topologisesti optimoitu liitososa. Kuva 41 on topologisesti optimoidun osan yksityiskohtia. (Galjaard 2014.)



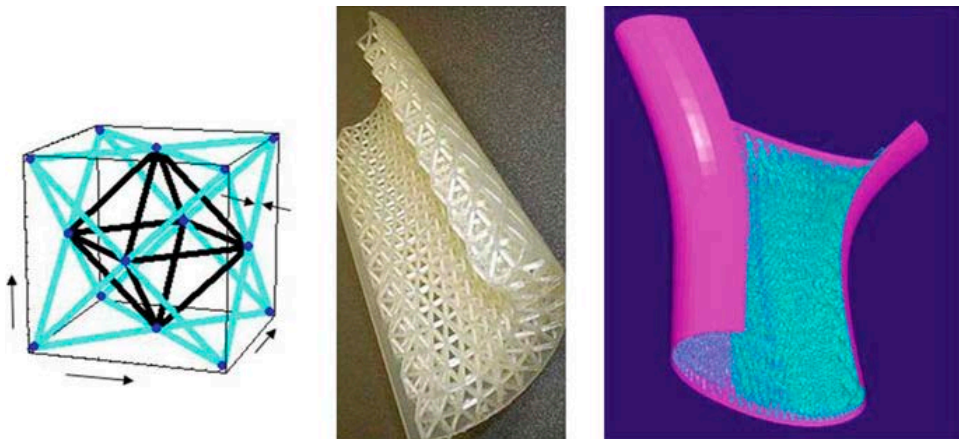
Kuva 40. Hitsaamalla ja lisäävällä valmistuksella valmistettu, topologisesti optimoitu liitososa (Galjaard 2014).



Kuva 41. Topologisesti optimoidun osan yksityiskohtia (Galjaard 2014).

4.2.2 Huokoiset rakenteet

Huokoisilla rakenteilla voidaan tarkoittoa vaahtoja sekä hunajakanno- ja ristikkorakenteita. Huokoisilla rakenteilla on usein painoon suhteutettuna hyvät mekaaniset ominaisuudet. Näiden materiaalien värähtelyn- ja äänenvaimennuskyky on yleensä hyvä, ja ne eristävät lämpöä. Materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmillä on mahdollista toteuttaa hyvin monimutkaisia geometrioita, joten myös huokoisten rakenteiden valmistaminen on mahdollista. Erityisesti ristikkorakenteiden hyödyntämistä lisäävällä valmistusmenetelmillä on tutkittu, koska ristikkorakenteet ovat vaahtoja vahvempia, jäykempiä ja kevyempiä materiaaleja. Yksi ristikkorakenteiden sovellusmenetelmä on CLS[®]-menetelmä, jossa ristikkorakenne on kappaleen ulkokuoren sisäpinnalla. Ristikon dimensiot ja suunta voidaan optimoida siten, että rakenne on samaan aikaan sekä hyvin kevyt että jäykkä. CLS:n algoritmi pystyy luomaan ristikkorakenteen lähes kaikenmuotoisille pinnoille. (Rosen 2014.) Kuva 42 on periaatekuva octet-ristikosta ja kaksi esimerkkirakennetta.



Kuva 42. Ristikkorakenteen hyödyntäminen materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä (Gibson 2015).

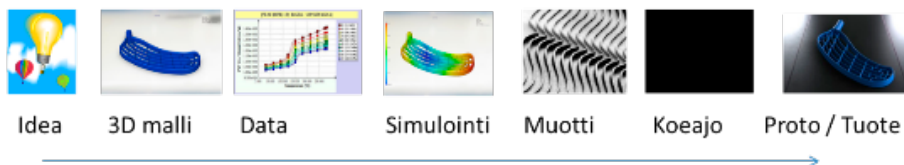
4.2.3 Virtauslaskenta

Virtauslaskenta tarkoittaa virtausilmiöiden kuvaamista laskennallisten menetelmien ja fysikaalisten yhtälöiden avulla. Analyysissä voidaan huomioida neste- ja kaasuvirtaukset tai näiden yhdistelmät. Myös kiinteiden partikkelien käyttäytymistä voidaan simuloida, ja kemialliset reaktiot voidaan ottaa huomioon analyysissä. Simuloinnin avulla voidaan laskea muun muassa ilmanvastus, lämmönsiirto, virtausten jakautuminen haaroituskappaleissa ja virtausnopeudet. Virtauksen kannalta optimaalinen muoto voi olla hyvin vaikea toteuttaa perinteisillä valmistusmenetelmillä. Lisäävän valmistuksen etuna on geometrialtaan hyvin monimutkaisten kappaleiden valmistus, ja virtauslaskenta antaa aivan uusia mahdollisuuksia suorituskyvyltään optimaalisten tuotteiden suunnitteluun. Seuraavassa on esitelty muutamia esimerkkejä virtauslaskennan ja lisäävän valmistuksen hyödyntämisestä.

Ruiskuvalun simulointi

Kuva 43 on esitetty sähkömailan prototyypin suunnitteluprosessi. Tuote sekä muotti suunniteltiin Solidworks-suunnitteluohjelmistolla. Muotin täyttymistä simuloitiin Solidworks Plastics -lisäohjelmalla. Ruiskuvalumuotti valmistettiin 3D-tulostamalla, ja muotilla tehtiin 10 kappaleen protosarja. Muotti ja ruiskuvalettu lopputuote on esitetty aikaisemmin Kuva 20.

Ensimmäisen prototyypin valmistus ruiskuvalamalla



Kuva 43. Simuloinnin hyödyntäminen prototyypin valmistuksessa. (Kuva: MAMK.)

Lämmönsiirrin

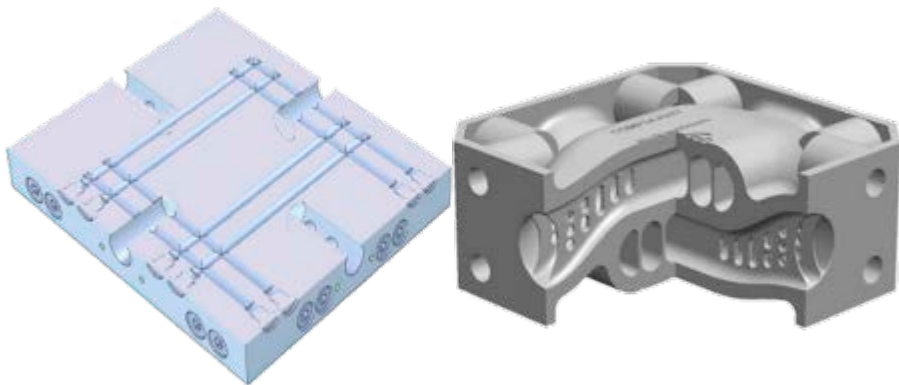
Kuva 44 on lisäävällä valmistuksella valmistettu alumiininen lämmönsiirrin. Lämmönvaihtimen ulkomuodot on suunniteltu siten, että valmistuksessa ei tarvitse käyttää tukirakenteita. Lämmönvaihtimen sisäpinta aiheuttaa virtaukseen pyönteitä, jotka parantavat lämmön siirtymistä nesteestä siirtimeen. Lämmönsiirtimen pinta-ala on suuri suhteessa siirtimen tilavuuteen – näin laitteesta saadaan samaan aikaan tehokas ja pienikokoinen. Lämmönsiirtimen elementtien lukumäärää ja kokoa voidaan skaalata käyttötarkoitukseen sopivaksi.



Kuva 44. Lisäävällä valmistuksella valmistettu lämmönsiirrin (Other Industrial Applications 2015).

Hydrauliikka

Kuvassa 45 on pieni hydrauliikkaosa, jonka sisällä kaksi hydrauliikkalinjaa ohittaa toisensa. Kuvassa oikealla on perinteisin menetelmin poraamalla ja tulppaamalla suunniteltu osa ja oikealla lisääviä valmistusmenetelmiä hyödyntävä osa. Perinteisesti valmistettavan osan koko on 23 x 23 x 5 cm ja paino 20 kg. Lisäävällä valmistuksella rakenne voidaan optimoida siten, että sama toiminto on mahdollista toteuttaa konstruktiolla, joka on vain 8 x 8 x 5 cm:n kokoinen ja painaa 1 kg. Virtauksen optimoinnilla on suuri vaikutus painehäviöön, ja lisäävälle valmistukselle suunnitellun osan häviöt ovat neljä kertaa pienemmät kuin perinteisin menetelmin valmistetun. (Case Stories 2015.)



Kuva 45. Virtauslaskennan hyödyntäminen hydrauliikkaosan suunnittelussa. (Case Stories 2015.)

Suodatus

Nesteen virratessa suodattimen läpi syntyy pyörteitä, jotka kasvattavat virtausvastusta. Lisääntyneet vastukset puolestaan kasvattavat pumppaukselta vaadittavaa energiaa. Virtausvastuksen pienentäminen vaatii suodattimelta mahdollisimman suurta avointa pinta-alaa, mutta samalla rakenteen tulee olla mekaanisesti riittävän kestävä. Ideaalisessa tilanteessa suodattimen reiät on muotoiltu siten, että ne eivät aiheuta pyörteitä virtaukseen eikä virtausvastus kasva. Optimaalisen rakenteen toteuttaminen perinteisin menetelmin on mahdotonta. Kuvassa 46 vasemmalla on perinteisesti valmistettu suodatin, oikealla lisäväällä valmistuksella valmistettu suodatin. Lisäväällä valmistuksella valmistetun suodattimen koko voidaan skaalata tapauskohtaisesti. (How 3D printing is revolutionizing the filtration industry 2014.)



Kuva 46. Perinteisesti ja lisäväällä valmistuksella valmistettu, rakenteeltaan optimoitu suodatin. (How 3D printing is revolutionizing the filtration industry 2014.)

4.3 Suunnitteluperiaatteet

Seuraavassa yhteenvetona muutamia suunnitteluohjeita lisäväällä valmistuksella valmistettävien tuotteiden suunnitteluun:

- Hyödynnä lisäävän valmistuksen tuomia etuja.
- Älä valmista perinteisille valmistusmenetelmille suunniteltuja osia lisäväällä valmistuksella sellaisenaan, vaan suunnittele kappaleet ja kokoonpanot kokonaan uudelleen.
- Älä ota huomioon perinteisiä koneenrakennuksen suunnitteluperiaatteita. Muun muassa materiaaliyhion kokoa, koordinaattijärjestelmää tai kappaleen symmetriaa ei tarvitse huomioida samalla tavoin kuin esimerkiksi koneistuksessa.

- Vähennä osien lukumäärää integroimalla toimintoja. Osien määrän vähentyminen nopeuttaa kokoonpanoa ja pienentää kokoonpanosta aiheutuvia kustannuksia.
- Hyödynnä mahdollisuutta valmistaa vapaamuotoisia osia.
- Optimoi tuotteesi. Pyri pieneen painoon ja suureen lujuuteen.
- Käytä mahdollisimman vähän materiaalia.
- Käytä onttoja rakenteita, jos niistä on apua.
- Älä käytä aikaa valmistettavuuden suunnitteluun.
- Selvitä tuotteeseen kohdistuvat kuormitukset ja optimoi tuotteen muoto. Laita materiaalia ainoastaan sellaisiin paikkoihin, missä sitä tarvitaan.
- Mene suoraan parhaimpaan ratkaisuun.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Materiaalia lisäävän valmistuksen käyttö perinteisillä teollisuusaloilla edellyttää menetelmien riittävää tuntemusta siten, että uusien valmistusmenetelmien tuomat mahdollisuudet voidaan huomioida tuotteita suunniteltaessa. Erilaisten menetelmien ja materiaalien mahdollistamat kombinaatiot sekä niistä aiheutuvat hyödyt ja rajoitteet tulee kartoittaa huolellisesti ennen lopullisen materiaalin valintaa myös esim. tuotteen käyttötapa ja -ympäristö huomioiden. Materiaalia lisäävän valmistuksen avulla voidaan toteuttaa täysin uuden tyyppisiä tuotteita, joita ei olisi mahdollista valmistaa perinteisillä menetelmillä, kuten poraamalla ja jyrsimällä. Sen avulla voidaan nopeuttaa erilaisia valmistusprosesseja (esim. valaminen) vaiheita yhdistämällä tai tekemällä niitä uusin tavoin. Se ei kuitenkaan korvaa kaikkea perinteistä valmistusta kerralla ja esim. kappaleiden suuri koko rajoittaa sen hyödyntämistä. Materiaalia lisäävä valmistus vaatii usein lisäksi erilaisia kappaleiden viimeistelyjä ja jälkikäsitteilyjä, kuten tukimateriaalin poistoa, lämpökäsittelyjä, hiontaa, maalausta ja kokoonpanoa. Myös nämä vaiheet on huomioitava valmistusketjun tehokkuutta arvioitaessa.

Digitaalinen tuotanto ja mallipohjaisuus ovat nykyaikaisen teollisuustuotannon perusta. Materiaalia lisäävien menetelmien käyttöönotto ei siten välttämättä vaadi erillisiä 3d tuotemalleja ja eri menetelmien tarvitsemat mallien viipaloinnit voidaan suorittaa erillisillä ohjelmilla. Tuotteiden suunnittelussa tulisi kuitenkin huomioida uusien menetelmien mahdollisuudet siten, että niitä voitaisiin täysin hyödyntää. Perinteisin valmistusmenetelmin valmistettavaksi suunnitellut kappaleet soveltuvat harvoin suoraan ainetta lisäävillä menetelmillä valmistettaviksi siten, että uudesta menetelmästä olisi ilmeistä hyötyä vanhaan verrattuna. Näin ollen esim. tuoterakenteet ja kokoonpanot tulee suunnitella uudelleen esim. topologian optimoinnin ja konstruktion moduulien yhdistämisen osalta.

Materiaalia lisäävän valmistuksen käyttö perinteisillä teollisuusaloilla on maailmanlaajuisesti kasvava trendi. Suomessa menetelmien soveltamisen lisääntyminen edellyttää koulutuksien kehittämisen ja tutkimuksellisten panostusten lisäksi alan palveluliiketoiminnan kasvua ja kehittymistä osaksi alihankintaverkostoa.

LÄHTEET

- 3D printed jigs and fixtures. Etmm-online.com 2015. Internet-sivusto. [viitattu 15.12.2015] <http://www.etmm-online.com/3d-printed-jigs-and-fixtures-a-507674/>
- 3D printer product. 2015. twa3d.com. Internet-sivusto [viitattu 15.12.2015] http://twa3d.com/product/sub_stratasy_detail/31
- 3D printing content from Machine design. 2015. machinedesign.com. Internet-sivusto. [viitattu 15.12.2015] <http://machinedesign.com/3d-printing/difference-between-machined-and-3d-printed-metal-injection-molds>
- 3D printing sacrificial cores for carbon fiber composite layups. Caddedge 2015. Internet-sivusto. [viitattu 15.12.2015] <http://www.caddedge.com/stratasy/3d-printing-blog/3d-printing-sacrificial-cores>
- Additive Fabrication. Custompart.net. Internet-sivusto. [viitattu 21.12.2015] <http://www.custompart.net.com/wu/additive-fabrication>
- Aligntech.com. Internet-sivusto. [viitattu 18.12.2015] <http://www.aligntech.com/>
- ASTM, “Standard F2792 – 12a “Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies”,” ASTM International, West Conshohocken, 2012.
- Bathsheba sculpture. Bathsheba.com. Internet-sivusto. [viitattu 18.12.2015] <https://www.bathsheba.com/gallery/mgx/quin/>
- Becker, R. Grzesiak, A. Henning, A. Rethink assembly design. Assembly Automation 2005, vol 25, no 4, 262-266, ISSN 0144-5154
- Carbon fiber lay-ups, stratasy.com, PDF-dokumentti, [viitattu 7.12.2015] <http://usglobalimages.stratasy.com/Main/Secure/Applications/Composites/Application%20guide%20-%20Carbon%20fiber.pdf?v=635533832788793865>
- Case Stories – (Im)possible crossing, compolight.dti.dk, Internet-sivusto, [viitattu 7.12.2015] <http://compolight.dti.dk/29519,2>
- E-Shell 200 Series, 3drp.co.uk, Internet-sivusto, [viitattu 12.12.2015] <http://www.3drp.co.uk/material/e-shell-200-series-m>

- Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT, Digital Photonic Production, Aachen 2014 [viitattu 18.12.2015] http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/product_and_services/B_Digital_Photonic_Production_2014.pdf
- Fused Deposition Modeling (FDM). Custompart.net. Internet-sivusto. [viitattu 21.12.2015] <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- Galjaard, S. Hofman, S. Ren, S. New opportunities to optimize structural designs in metal by using additive manufacturing. *Advances in Architectural Geometry* 2014, 79-93, Springer, New York, ISBN 978-3-319-11417-0
- Gao, W. & Zhang, Y. & Ramanujan, D. & Ramani, D. & Chen, Y. & Williams, C.B. & Wang, C.L. & Shin, Y.C. & Zhang, S. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 2015. Vol 69. S. 65-89. ISSN: 0010-4485
- Gibson, I. Rosen, D. W. & Stucker, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*, Second Edition, New York, USA: Springer Science + Business Media. 2015. 498 s. ISBN: 978-1-4939-2112-6
- Gibson, I. Rosen, D. W. & Stucker, B. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York, USA: Springer Science+Business Media. 2010. 459 s. ISBN: 978-1-4419-1119-3
- Guo, N. & Leu, M.C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2013. Vol 8:3. S.215-243. ISSN: 2095-0233
- Hauge, R. Mansour, S. & Saleh, N. Design opportunities with rapid manufacturing. *Assembly Automation*, 2003. Vol 23, No 4. S. 346-356. ISSN 0144-5154.
- Hetitecin 3D-tulostustyönäytteet. Hetitec.com. Internet-sivusto. [viitattu 18.12.2015] <http://hetitec.com/tyonaytteet/putki>
- How 3D printing is revolutionizing the filtration industry, 23.9.2014, 3dprinterworld.com, Internet-sivusto, [viitattu 8.12.2015] <http://www.3dprinterworld.com/article/how-3d-printing-revolutionizing-filtration-industry>
- Jetted Photopolymer. Custompart.net. Internet-sivusto. [viitattu 21.12.2015] <http://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>
- Laminated Object Manufacturing. Custompart.net. Internet-sivusto. [viitattu 21.12.2015] <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- Lehtinen, K. Materiaalia lisäävä valmistus vai 3D tulostus. Muuttuva termistö. Gradututkielma. Turun yliopisto, kieli- ja käännöstieteen laitos, Ranskan kielen kääntäminen ja tulkkaus. 105s. Turku, 2015.

- Other Industrial Applications – laser sintering systems for complex parts, eos.info, Internet-sivusto, [viitattu 12.12.2015] https://www.eos.info/industries_markets/industry/other_industrial_applications
- Rosen, D. W. Research supporting principles for design for additive manufacturing. Virtual and Physical Prototyping, 2014, Vol 9, No 4, 225-232
- SASAM. Standardization in Additive Manufacturing. Sasam standardization roadmap June 2015. [viitattu 15.12.2015] <http://www.sasam.eu/index.php/component/jdownloads/send/14-articles/162-sasam-standardisation-roadmap-open-june-2015.html>
- Selective Laser Sintering (SLS). Custompart.net. Internet-sivusto. [viitattu 21.12.2015] <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
- Stereolithography (SLA). Custompart.net. Internet-sivusto. [viitattu 21.12.2015] <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- Stratasys 2014, PolyJet Molds For Silicone Parts, Technical application guide. [viitattu 12.12.2015] http://www.stratasys.com/-/media/Main/Files/Technical-Application-Guides_TAG/TAG-PolyJet-SiliconeParts.ashx
- Stratasys 2015. Manufacturing Auto Jigs and Fixtures with 3D printing. Stratasys.com. Internet-sivusto. [viitattu 18.12.2015]. <http://www.stratasys.com/resources/case-studies/automotive/bmw>
- Three Dimensional Printing. Custompart.net. Internet-sivusto. [viitattu 21.12.2015] <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>
- Turunen, M. 3D-tulostimen käyttö komposiittimuottien valmistuksessa. Opinnäytetyö. Savonia-ammattikorkeakoulu 2011, <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201105106965>
- Using 3D printed tools to build their cars is just how Opel rolls. 3dprintingindustry.com 2015. Internet-sivusto. [viitattu 18.12.2015] <https://3dprintingindustry.com/news/using-3d-printed-tools-build-cars-just-opel-rolls-31892/>
- Valmistus. Kalevalakoru. Internet-sivusto. [viitattu 18.12.2015] <http://www.kalevalakoru.com/fi/tarinamme/valmistus>

