

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2018

Joni Ryky

AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

3D-tulostetut osat ajoneuvoissa

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2018 | 79 + 6 sivua

Joni Ryky

AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

3D-tulostetut osat ajoneuvoissa

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä yleisimpiin ainetta lisääviin valmistusmenetelmiin. Eri menetelmiin perehtymisen lisäksi pohdittiin ainetta lisäävän valmistustavan tarjoamia mahdollisuuksia sekä vertailtiin menetelmien kustannuksia perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Opinnäytetyössä pohdittiin myös ainetta lisäävän valmistustavan tarjoamia mahdollisuuksia Lean-ajatusmallin avulla.

Opinnäytetyö toteutettiin tutkimuksena, johon sisältyi ainetta lisäävällä valmistustavalla valmistettävien kappaleiden suunnittelua. Nämä kappaleet suunniteltiin Turun ammattikorkeakoulun eRallycross-projektin kilpa-autoon yhteistyössä 3DTech Oy:n kanssa. Kappaleet suunniteltiin SolidWorksin CAD-ohjelmistolla. Suunnittelun yhteydessä kappaleiden ominaisuuksia simuloitiin CAD-ohjelmasta löytyvän virtaussimulaatio-ohjelman avulla.

Opinnäytetyön lopputuloksena voidaan todeta, että ainetta lisäävällä valmistustavalla on todella paljon potentiaalia nousta vakavasti otettavaksi valmistusmenetelmäksi, ei pelkästään prototyyppien tuotannossa, mutta myös piensarjojen valmistuksessa. Menetelmän avulla voidaan saada aikaan huomattavia säästöjä esimerkiksi materiaalikustannuksissa sekä kappaleiden valmistusaikaa voidaan lyhentää merkittävästi.

ASIASANAT:

3D-tulostus, pikavalmistus, mallintaminen, prototyytit, tietokoneavusteinen suunnittelu.

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Automotive and Transportation Engineering

2018 | 79 + 6 pages

Joni Ryky

ADDITIVE MANUFACTURING

3D Printed parts in vehicles

The aim of this thesis was to become acquainted with the most commonly used additive manufacturing methods. In addition to exploring the different methods of additive manufacturing and the possibilities offered by additive manufacturing the costs were also compared to different traditional manufacturing methods. The thesis also looked at the possibilities offered by additive manufacturing by using the Lean concept model.

The thesis was carried out as a study, which also included the design of parts to be manufactured with additive manufacturing. These parts were designed for the eRallycross racing car project of Turku University of Applied Sciences in collaboration with 3DTech Oy. The parts were modeled with SolidWorks CAD software. During the design, the features of the parts were simulated using the flow simulation program found in SolidWorks.

The study shows that additive manufacturing has a lot of potential to become a serious manufacturing method, not only in the production of prototypes, but also in the production of small series. This method can make considerable savings, for example in material costs, as well as significantly shorten the length production time of the parts.

KEYWORDS:

3D printing, rapid prototyping, modeling, prototypes, computer-aided design

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	8
1 JOHDANTO	9
2 ERALLYCROSS-PROJEKTI	10
2.1 Super1600 -luokan määräykset	11
2.2 Mercedes-Benz W176	14
3 3DTECH OY	17
3.1 Historia	17
3.2 Tulevaisuus	18
4 AINETTA LISÄÄVÄT VALMISTUSMENETELMÄT	19
4.1 Materiaalin pursotus	19
4.2 Stereolitografia	27
4.3 Jauhepetimenetelmät	34
4.3.1 Selective Laser Melting	37
4.3.2 Selective Laser Sintering	38
4.3.3 Multi Jet Fusion -sidosaineenruiskutusmenetelmä	39
4.4 Materiaalin ruiskutus	42
4.5 Laminointi	45
5 AINETTA LISÄÄVÄN VALMISTUSTAVAN KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA	47
5.1 Ajoneuvoteollisuus	47
5.2 Muita teollisuuden käyttökohteita	48
5.3 Muita käyttökohteita	49
6 MENETELMIEN VERTAILU	51
6.1 Lean-ajatusmalli	52
6.2 Ainetta lisäävän valmistustavan tarjoamat mahdollisuudet	53
6.3 Kustannusten muodostuminen	54
6.4 Pikaruiskuvalun kustannusvertailu	58
7 3D-TULOSTETTAVAN KAPPALEEN SUUNNITTELU	64
7.1 Huomioon otettavia seikkoja	64

7.2 3D-tulostettavan mallin suunnittelu	65
7.2.1 CAD-ohjelman käyttö	65
7.2.2 Tiedoston muuntaminen STL-muotoon	67
7.2.3 Tulostusasetusten määrittäminen	70
7.2.4 Kappaleen asennon merkitys	71
8 3D-TULOSETUT OSAT KILPA-AUTOISSA	73
8.1 Case Study: Kilpa-auton peili	73
8.1.1 Sääntöjen asettamat määräykset	74
8.1.2 Suunnittelu	74
8.2 Case Study: Kilpa-auton katolle sijoitettu ilmanottoaukko	77
8.2.1 Sääntöjen asettamat määräykset	77
8.2.2 Suunnittelu	78
9 YHTEENVETO	81
LÄHTEET	82

KAAVAT

Kaava 1. Pienin mahdollinen kerroskorkeus FDM-menetelmällä.	21
Kaava 2. Suurin mahdollinen kerroskorkeus FDM-menetelmällä.	21
Kaava 3. Ainetta lisäävän valmistustavan valmistuserän kustannusarvion laskukaava.	56
Kaava 4. Break-even pisteen määrittäminen kappaleen yksikköhinnan perusteella.	57

KUVAT

Kuva 1. Hahmotelma eRallycross-auton ulkonäöstä.	10
Kuva 2. Havainnekuva turvakehikon hyväksytyistä perusrakenteista.	14
Kuva 3. Mercedes-Benz W176.	15
Kuva 4. Havainnekuva Mercedes-Benz W176:n mitoista.	15
Kuva 5. Havainnekuva Mercedes-Benz W176:n mitoista.	16
Kuva 6. Havainnekuva Mercedes-Benz W176:n mitoista.	16
Kuva 7. Havainnekuva eri valmistusmenetelmillä valmistettujen kappaleiden pinnanlaatueroista.	19
Kuva 8. Stratasys-yrityksen perustaja S. Scott Crumpin kehittämän materiaalipursotusmenetelmän patenttihakemuksen toimintahavainnekuva.	20
Kuva 9. FDM-menetelmän havainnekuva.	21
Kuva 10. Kotikäyttöön tarkoitettu XYZ Printing da Vinci Mini FDM-tulostin.	25

Kuva 11. Stratasys Dimension 1200es FDM-valmistusasema.	26
Kuva 12. Charles Hullin kehittämän stereolitografia-menetelmän patenttihakemuksen toimintahavainnekuva.	27
Kuva 13. SLA-menetelmän havainnekuva.	28
Kuva 14. SLA-menetelmällä valmistettu prototyyppi-kokoonpano.	29
Kuva 15. SLA-1, ensimmäinen 3D-tulostin.	30
Kuva 16. Wanhao Duplicator 7 kuluttajakäyttöön tarkoitettu DLP-tulostin.	31
Kuva 17. SLA-menetelmällä valmistettu ajoneuvon koripaneeli.	33
Kuva 18. Prodways ProMaker L6000 -valmistusasema.	34
Kuva 19. Jauhepetimenetelmän havainnekuva.	35
Kuva 20. SLM-menetelmällä valmistettu turbiinimoottorin polttoainesuutin.	37
Kuva 21. Carl Deckardin kehittämän SLS-menetelmän patenttihakemuksen toimintahavainnekuva.	38
Kuva 22. SLS-menetelmällä valmistettu suihkuturbiinin pienoismalli.	39
Kuva 23. MJF-menetelmän havainnekuva.	40
Kuva 24. HP MultiJet Fusion 3D 4200 MJF-tulostinasema.	40
Kuva 25. ReaLizer SLM 50 -valmistusasema.	41
Kuva 26. EOS M400 -valmistusasema.	42
Kuva 27. Ruiskutusmenetelmän havainnekuva.	43
Kuva 28. Stratasys Objet500 -valmistusasema.	44
Kuva 29. Ruiskutus-menetelmällä valmistettu ruiskuvalumuotti.	44
Kuva 30. Laminointimenetelmän havainnekuva.	45
Kuva 31. Mcor IRIS LOM-menetelmän valmistusasema.	46
Kuva 32. 3D-tulostettu koristelista Mini Cooper -autossa.	48
Kuva 33. Stratasys Objet260 Dental -valmistusasema.	49
Kuva 34. EnvisionTEC 3D-biotulostinasema.	50
Kuva 35. SolidWorks 2016 työtilänäkymä.	66
Kuva 36. Kappale muunnettuna STL-pintamalliksi SolidWorks 2016 -ohjelmassa	67
Kuva 37. Havainnekuva tasokolmioiden kulmapoikkeamasta.	68
Kuva 38. STL-tiedoston parametrien säätö SolidWorks 2016-ohjelmassa.	69
Kuva 39. Havainnekuva jännekorkeuden mittaamisesta.	69
Kuva 40. Havainne kuva kerroskorkeuden vaikutuksesta valmiin kappaleen pinnanlaatuun.	70
Kuva 41. Havainnekuva sisätäyttöprosentin vaikutuksesta.	71
Kuva 42. Havainnekuva eri akseleiden merkityksestä kappaleen vahvuuteen.	71
Kuva 43. Alkuperäinen peiliyksikkö avattuna.	73
Kuva 44. Peiliyksikön kiinnityspisteet.	74
Kuva 45. Peilikotelon hahmottelua SolidWorks 2016 -ohjelmassa.	75
Kuva 46. 3D-mallin virtaussimulaatio SolidWorks 2016 -ohjelmassa.	75
Kuva 47. Toyota Yaris WRC kilpa-auton aerodynaamisesti muotoillut peiliyksiköt.	76
Kuva 48. Havainnekuva S1600 -luokan rallycross auton katolla olevista ilmanottoaukoista.	77
Kuva 49. Ilmanottoaukon hahmottelua SolidWorks 2016 -ohjelmassa.	78
Kuva 50. Ilmanottoaukon virtaussimulaatio SolidWorks 2016 -ohjelmassa.	79
Kuva 51. Ilmanottoaukon eri variaatioiden hahmottelua SolidWorks 2016 -ohjelmassa.	79

KUVIOT

Kuvio 1. Ainetta lisäävän valmistustavan kustannusten muodostuminen.	55
--	----

Kuvio 2. PA12 SLS vs PA12 ruiskuvalu jännitys-venymäkuvaaja.	58
Kuvio 3. SLS-menetelmän sekä pikaruiskuvalumenetelmän kustannusvertailu.	59
Kuvio 4. Kappaleen kokonaistilavuuden vaikutus kappaleen yksikköhintaan SLS-menetelmää hyödyntävässä valmistuksessa.	61
Kuvio 5. Kappaleen kokonaistilavuuden vaikutus kappaleen yksikköhintaan verrattuna break-even valmistusmäärään.	62

TAULUKOT

Taulukko 1. FDM-menetelmää käyttävän laitteen kerroskorkeus-taulukko.	22
Taulukko 2. Markkinoilla olevia kuluttajakäyttöön tarkoitettuja FDM-laitteita.	24
Taulukko 3. Markkinoilla olevia kuluttajakäyttöön tarkoitettuja SLA/DLP-laitteita.	32

KÄYTETYT LYHENTEET

AM	<i>Additive manufacturing</i> , ainetta lisäävä valmistusmenetelmä
ABS	<i>Akryylinitriilibutadieenistyreeni</i> , pursotusmenetelmässä käytettävä muoviseos
CAD	<i>Computer-aided design</i> , tietokoneavusteinen suunnittelu
FDM	<i>Fused deposition modeling</i> , ainetta pursottava valmistustapa
FIA	<i>Fédération Internationale de l'Automobile</i> , kansainvälinen autourheiluliitto
Filament	Pursotusmenetelmän materiaalilanka
Gkoodi	Numeerisessa ohjauksessa käytetty ohjelmointikoodi
HIPS	<i>High impact polystyrene</i> , vahva polystyreeni, pursotusmenetelmässä käytettävä muoviseos
LOM	<i>Laminated object manufacturing</i> on valmistusmenetelmä, jossa kappale luodaan laminoimalla
MJF	<i>Multi jet fusion</i> on valmistusmenetelmä, jossa kappale luodaan materiaali-jauheesta kovettamalla
PETG	Amorfinen polyesteri, pursotusmenetelmässä käytettävä muoviseos
PLA	Polylaktidi, biohajoava polyesteri, pursotusmenetelmässä käytettävä muoviseos
SDL	<i>Selective deposition lamination</i> on valmistusmenetelmä, jossa materiaali-kerrokset leikataan muotoon ennen yhteen liittämistä
SLA	<i>Stereolithography</i> , stereolitografia on valmistusmenetelmä, jossa nestemäinen aine muutetaan uv-laserin avulla kiinteäksi
SLM	<i>Selective laser melting</i> on valmistusmenetelmä, jossa metallijauhe sulatetaan lasersäteellä
SLS	<i>Selective laser sintering</i> on valmistusmenetelmä, jossa materiaalijauhe sintrataan lasersäteellä
STL	3D-tulostuksessa yleisesti käytetty tiedostoformaatti
UAM	<i>Ultrasonic additive manufacturing</i> on valmistusmenetelmä, jossa ohutlevyt liitetään yhteen värähtelevän painorullan avulla
UV	Ultraviolettisäteily; sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on lyhyempi kuin näkyvän valon

1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoitus on esitellä ja vertailla yleisimpiä käytössä olevia ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä sekä koneita ja käytettäviä valmistusmateriaaleja. Työssä esitetään esimerkkitapauksia eri menetelmien käyttökohteista sekä perehdytään ainetta lisäävän valmistustavan kustannusten muodostumiseen.

Ainetta lisäävä valmistustapa on nopeasti yleistynyt valmistusmenetelmä, jossa 3D-pintamallista valmistetaan kappaleita, menetelmästä riippuen joko muovista tai metallista eri tekniikoiden avulla. Ainetta lisäävä valmistustapa on yleistynyt erittäin nopeasti, minkä ansiosta ainetta lisääviä valmistuslaitteita on saatavilla myös kuluttajakäyttöön. Yleisimmät kuluttajakäyttöön tarkoitetut laitteet hyödyntävät FDM-menetelmää. Toinen nopeasti yleistynyt menetelmä on SLA. Näillä menetelmillä voidaan valmistaa kappaleita nopeasti ja helposti. Nämä menetelmät soveltuvat vain muovikappaleiden valmistukseen.

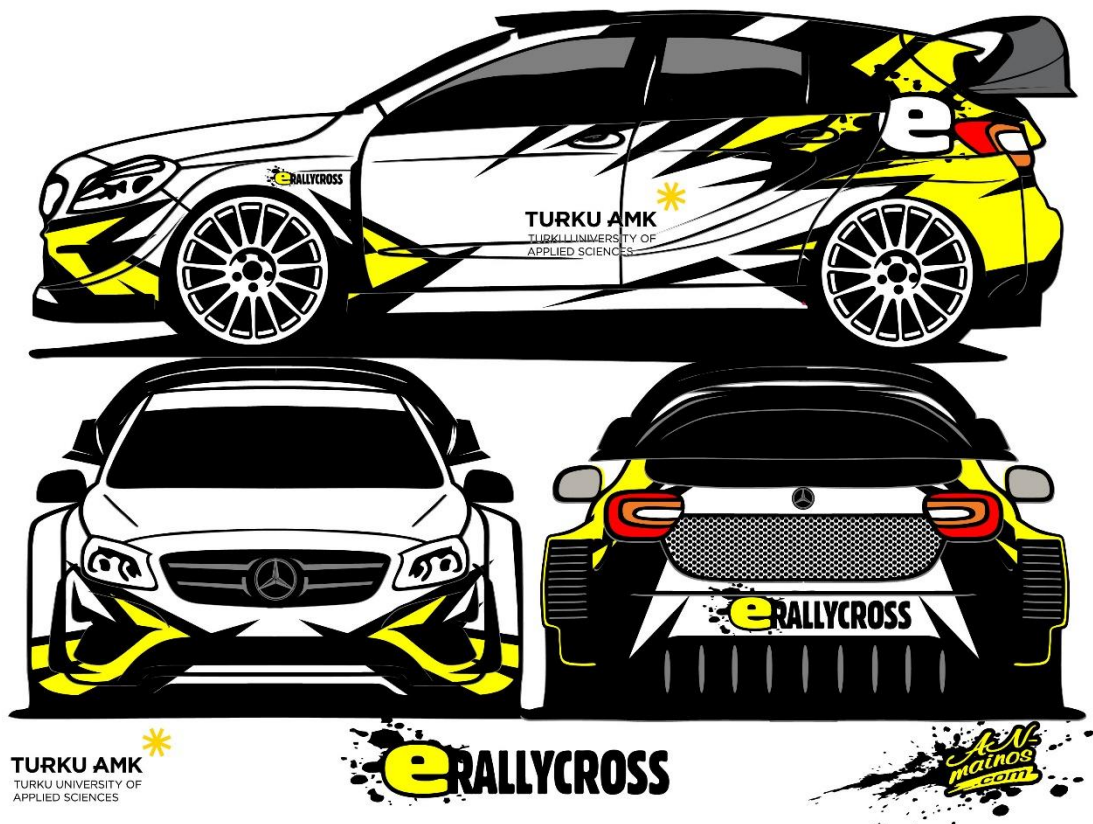
Edellä mainittujen menetelmien lisäksi teollisuudessa käytettäviä menetelmiä ovat SLS, SLM ja MJF. Näiden menetelmien avulla voidaan valmistaa kappaleita myös metallista. Näitä ja edellä mainittuja tekniikoita esitellään tarkemmin myöhemmissä luvuissa.

Ainetta lisäävän valmistustavan ensimmäiset kaupalliset sovellukset kehitettiin 1980-luvun puolivälin jälkeen. Ensimmäinen kaupallinen ratkaisu oli SLA, eli stereolitografia, joka patentoitiin vuonna 1986. Ensimmäinen SLA-menetelmää käyttävä valmistuslaite esiteltiin vuonna 1987.

Valmistusmenetelmästä riippumatta, valmistuksen pohjana käytetään CAD-ohjelmalla luotua 3D-mallia. Valmistettavasta 3D-mallista luodaan pintamalli, joka viedään valmistuslaitteen ohjelmistoon, minkä jälkeen kappale voidaan valmistaa. Menetelmästä riippuen kappale voi vaatia jälkikäsittelyä, esimerkiksi tukirakenteiden poistoa.

2 ERALLYCROSS-PROJEKTI

eRallycross-projekti on Turun ammattikorkeakoulun sekä Valmet Automotiven yhteistyönä toteutettava sähkötoiminen rallicross-auto. Perinteisen polttomoottorin sijaan autoa liikuttaa nykyaikainen sähkötoiminen voimalinja. Auto rakennetaan Super1600 -luokan kilpa-ajoneuvoa vastaavaksi. Kuvassa 1 esitetään hahmotelmaa auton tulevasta ulkonäöstä.



Kuva 1. Hahmotelma eRallycross-auton ulkonäöstä (Turun ammattikorkeakoulu 2018).

Projekti toteutetaan oppilaiden suunnittelemana sekä rakentamana. Projekti koostuu useista pienemmistä projekteista, jotka voivat kuulua esimerkiksi opiskelijoiden opinto-suunnitelmaan. Koska projekti on erittäin laaja, tarjoaa se useiden eri alojen opiskelijoille loistavan mahdollisuuden päästä osallistumaan ei pelkästään auton rakentamiseen, vaan myös yhteistyökumppaneiden hankkimiseen, projektin medianäkyvyydestä huolehtimiseen sekä lukuisiin muihin tehtäviin, joita kilpa-ajoneuvon rakentamiseen liittyy.

2.1 Super1600 -luokan määräykset

Moottori – FIA-sääntöliitteen 279 artiklan 2.1 mukaan Super1600 -luokan kilpa-auton vetotapa tulee olla etuvetoinen ja moottorin tulee olla vapaasti hengittävä. Sääntöliitteen 279 artiklassa 5.1.2 määritetään moottori 4-sylinteriksi, jossa voi olla yksi suutin sylinteriä kohden. Suurimmaksi iskuilavuudeksi määritetään 1 600 cm². Sylinteriryhmän tulee olla mallisarjaan kuuluvasta autosta. Moottori voi tuottaa 230 hevosvoiman huipputehon. Moottorin tulee sijaita ajoneuvon alkuperäisessä moottoritilassa. Kaasupolkimelta tulee olla mekaaninen yhteys kaasuvivustoon. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Voimansiirto – FIA-sääntöliitteen 279 artiklan 7 mukaan Super1600 -luokan kilpa-ajoneuvon voimansiirtoa koskee seuraavat määräykset. Vaihteisto on vapaavalintainen. Vaihteistokotelon materiaalin tulee olla alumiinia, jonka ainevahvuus on vähintään 5 mm. Kun käytetään alkuperäistä vaihteistokoteloä, sallitaan alkuperäisen vaihteistokotelon materiaali. Vaihteistossa voi olla 6 vaihdetta eteenpäin ja 1 peruutusvaihte. Vaihteisto voi olla tyypiltään sekventiaalinen, mutta sen käyttö tulee olla kuljettajan mekaanisesti kontrolloitava. Tasauspyörästö voidaan varustaa mekaanisella luistonrajoittimella. Elektronisesti ohjattuja tai viskokytkimellä varustettuja tasauspyörästön lukkoyksiköitä ei sallita. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Alustarakenteet – FIA-sääntöliitteen 279 artiklan 8 mukaan ajoneuvot tulee varustaa kierrejousin. Kierrejousen materiaali tulee olla metallia. Jousituksen rakenne ja suunnittelu ovat vapaita. Aktiiviset alustaratkaisut ovat kiellettyjä. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Etuakselilla ajoneuvon koriin saadaan seuraavia muutoksia:

- alkuperäisten kiinnityspisteiden vahvistaminen
- mahdollisten lisäkiinnityspisteiden valmistaminen
- muutokset rakenteissa, joilla on liikkuvien osien vaatima tila (Fédération Internationale de l'Automobile 2017).

Etuakselin iskunvaimennin holvin rakennetta voidaan muokata iskunvaimentimen kiinnityksen vahvistamiseksi. Etuakselin kiinnityspisteiden enimmäismäärä on 6 kappaletta. Apurungon tulee olla irrotettava esimerkiksi pultiliitoksella. Apurungon materiaalina

tulee käyttää terästä, poikkeuksena mikäli käytetään ajoneuvon alkuperäisestä apurungosta muokattua apurunkoa. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Taka-akselilla tulee käyttää alkuperäistä apurunkoa.

Alkuperäiseen taka-akselin apurunkoon voidaan tehdä seuraavat muutokset:

- apurunkoa voidaan vahvistaa alkuperäistä apurungon muotoa noudattaen
- apurunkoon voidaan lisätä kaksi vahviketankoa
- apurunkoa voidaan keventää poistamalla siitä tarpeettomia kiinnityspisteitä
- apurungon kiinnityspisteitä voidaan muokata geometrian parantamiseksi
- integroitu kallistuksenvaimennin voidaan lisätä (Fédération Internationale de l'Automobile 2017).

Heilahduksenvaimentimia saa olla yksi kappale pyörää kohden. Jokaisen vaimentimen tulee olla itsenäisesti toimivia. Inertiaan perustuvat heilahduksenvaimentimet ovat kiellettyjä. Heilahduksenvaimentimiin voidaan asentaa ulosjoustoja rajoittavat vaijerit, yksi vaijeri vaimenninta kohden. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Kallistuksenvakaimien tulee olla täysin mekaaniset. Kallistuksenvakaimen materiaalin tulee olla metallia. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Pyörät – FIA-sääntöliitteen 279 artiklan 9 mukaan S1600 -luokan kilpa-ajoneuvon pyöriä koskevat seuraavat määräykset:

Pyörän enimmäisleveys on 250 mm mitattuna pyörän uloimmista reunoista. Vanne koko on vapaa, mutta enimmäiskoko on kuitenkin 18". Pyörän ulkohalkaisija voi olla enintään 650 mm. Vanteiden materiaalina sallitaan alumiini sekä magnesium. Vanteet tulee olla valmistettu joko valamalla tai takomalla. Kokonaisen pyörän minimipaino on 6,5 kg. Varapyörä on kielletty. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Jarrut – FIA-sääntöliitteen 279 artiklan 9.3 mukaan Super1600 -luokan kilpa-ajoneuvossa jarrulevyn materiaalin tulee olla rautapohjaista metalliseosta. Jarrusatulat ja jarrulevyt ovat vapaasti sovitettavissa. Hydraulinen käsijarru voidaan asentaa. Käsijarrun tulee vaikuttaa joko kahteen etupyörään tai kahteen takapyörään. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Ohjausjärjestelmä – FIA-sääntöliitteen 279 artiklan 9.4 mukaan Super1600 -luokan kilpa-ajoneuvossa tulee olla mekaaninen kaksipyöräohjaus. Ohjausvaihteen tyyppi ja

asennus ovat vapaat. Ohjausakselissa tulee olla sarjatuotantomallissa käytetty kokoon painuva turvamekanismi. Ohjausakselin lukkomekanismi tulee poistaa käytöstä. Ohjauspyörä tulee varustaa pikakiinnitysmekanismeilla. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Korirakenteet – Super1600 -luokan kilpa-ajoneuvon sisustaan sallitaan muutoksia, joilla voidaan parantaa esimerkiksi näkyvyyttä ulospäin. Kojelaudan muotoja voidaan tasoittaa enimmillään 50 mm korkealta ja 400 mm leveältä alueelta. Kojelaudassa ei saa olla ulkonevia kulmia. Turvakehikon asennuksen vaatimat muutokset kojelautaan sallitaan. Mahdolliset kojelaudan koristelistat voidaan irrottaa. Kojelaudan alaosasta voidaan poistaa keskikonsolin ja kojelaudan yhdistävä kappale. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Ajoneuvon koripaneelien alkuperäinen muoto tulee säilyttää. Alkuperäiset somisteet sekä koristelistat voidaan poistaa. Tuulilasin tulee olla laminoitua lasia, polykarbonaattia tai PMMA-muovia, eli akryyliä. Polykarbonaattia tai akryylilasia käytettäessä tulee lasin vahvuus olla vähintään 4,75 mm. Tuulilasin ulkopinnalla voi olla enintään 6 kerrosta suojakalvoa. Tuulilasi tulee varustaa vähintään yhdellä tuulilasinpyyhkijällä sekä toimivalla pesujärjestelmällä. Sivulasit tulee korvata joko polykarbonaatti- tai PMMA-laseilla. Sivulasien vähimmäispaksuus tulee olla 4,5 mm. Sivulasit tulee olla poistettavissa ilman työkaluja. Kuljettajan sekä apukuljettajan sivulasit tulee varustaa liu'utettavilla avautumilla, joiden vähimmäismitat ovat 130 mm x 130 mm ja enimmäismitat 150 mm x 150 mm. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Koripaneelit, mukaan lukien konepelti sekä takaluukun kansi, voidaan valmistaa vapaasti valittavista materiaaleista. Koripaneeleihin voidaan tehdä aerodynaamisia ilmanohjaimia sekä jäähdytysaukkoja. Ovien materiaali on vapaa, pois lukien kuljettajan ovi. Ovien kahvat ja lukot voidaan vaihtaa. Ovien vaimennusmateriaalit voidaan poistaa. 4- ja 5-ovisissa autoissa takaovet voidaan hitsata kiinni. Takaovet voidaan myös korvata vastaavan muotoisilla paneeleilla. Ovipahvit tulee valmistaa vähintään 1 mm:n paksuisesta komposiittilevystä. Ovipahvien tulee peittää oven sisäpuoli kokonaisuudessaan. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Ajoneuvon puskureiden materiaali on vapaa. Etupuskuriin voidaan tehdä ilmanottoaukkoja, joiden kokonaispinta-ala voi olla enimmillään 2 500 cm². Nämä aukot eivät saa kuitenkaan vaikuttaa heikentävästi puskurin keston. Etupuskurin alkuperäiset kiinni-

tyspisteet sekä törmäysvaimentimet voidaan korvata vapaavalintaisilla kiinnikkeillä. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Takapuskurin kiinnitysjärjestelmä voidaan muuttaa vapaasti. Mahdolliset törmäysvaimentimet voidaan poistaa. Takapuskurin paksuuden tulee olla vähintään 1 mm ja enintään 5 mm. Takapuskuriin voidaan tehdä ylimääräisiä jäähdytsaukkoja, joiden yhteenlaskettu pinta-ala voi olla 500 cm². (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

Turvavarusteet – Super1600 -luokan kilpa-ajoneuvo tulee varustaa FIA-luokitellulla turvakehikolla, jonka hyväksytyt perusrakenteet käydään läpi kuvassa 2.



Kuva 2. Havainnekuva turvakehikon hyväksytyistä perusrakenteista (AKK-Motorsport ry 2015).

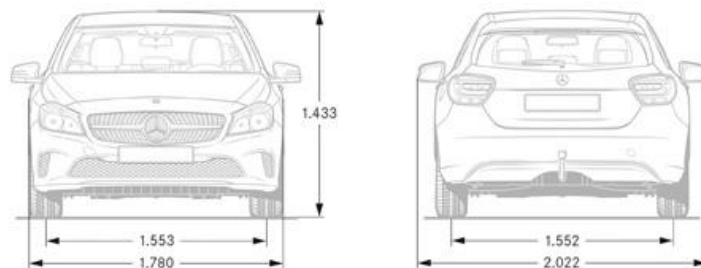
2.2 Mercedes-Benz W176

eRallycross-projektin lähtökohtana toimii Mercedes-Benz A 180 CDI -mallin ajoneuvo (kuva 3). Projektissa käytettävä kori on valmistettu vuonna 2014. Auton runkonumero on WDD1760121J311285. Alkuperäisen tuotantoversion moottoritunnus on OM607.951. Moottorin iskutilavuus on 1 461 cm³. Moottorin kehittämä huipputeho on 80 kW moottorin pyörintänopeudella 4000 r/min. Vääntömomenttia moottori tuottaa 260 Nm kierrosalueella 1750-2500 r/min.

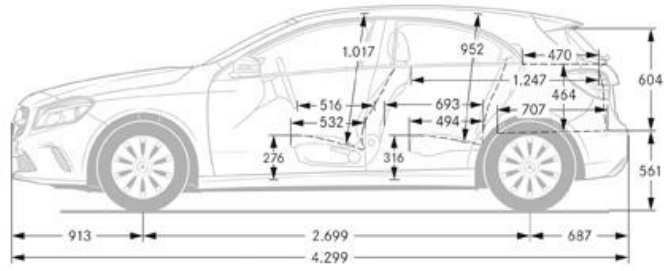


Kuva 3. Mercedes-Benz W176 (AutoWiki 2017).

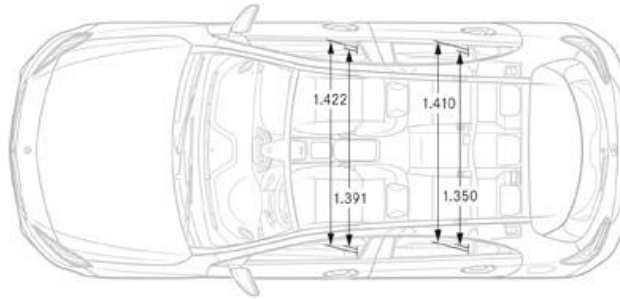
Mercedes-Benz W176 -korimalli esiteltiin maaliskuussa 2012 Geneven autonäyttelyssä. W176-korimallin tuotanto aloitettiin 16. heinäkuuta. W176-korimallia on saatavilla pelkästään viisiovisena hatchback-mallina. W176-korimalli hyödyntää modulaarista W176-pohjalevyä, jota käytetään myös Mercedes-Benz W246 B -sarjan pohjalevynä. W176-korimallin äärimitat havainnollistetaan kuvissa 4, 5 sekä 6. (AutoWiki 2017.)



Kuva 4. Havainnekuva Mercedes-Benz W176:n mitoista (Veho Oy Ab 2014).



Kuva 5. Havainnekuva Mercedes-Benz W176:n mitoista (Veho Oy Ab 2014).



Kuva 6. Havainnekuva Mercedes-Benz W176:n mitoista (Veho Oy Ab 2014).

3 3DTECH OY

3DTech Oy on Salossa sijaitseva suomalainen yritys, jonka päätoimialana on ainetta lisäävä valmistus sekä siihen oleellisesti liittyvät toiminnot, kuten 3D-skannaus, 3D-mallinnus ja 3D-tulostus. 3DTech Oy tarjoaa myös kattavan tuotevalikoiman 3D-laitteistoja sekä palveluita. Tuotevalikoimasta löytyy 3D-tulostimia sekä 3D-skannauslaitteita niin yrityksille kuin yksityisillekin. (3DTech 2013.)

3.1 Historia

3DTech Oy on perustettu vuonna 2013, vaikka ajatus yrityksen perustamisesta syntyi jo vuonna 2011. Kaksi yrityksen perustajäsentä olivat seuranneet 3D-tulostuksen kehittymistä jo 90-luvulta lähtien, josta varsinainen alkukipinä 3D-tulostustoimialan yrityksen perustamiselle syntyi. Vuonna 2011 nämä kaksi henkilöä päättivät hankkia 3D-tulostimen, jonka hankkimiseen liittyviä seikkoja tutkittiin vuonna 2013 valmistuneessa opinnäytetyössä. Tässä opinnäytetyössä tehdyt havainnot ja päätelmät auttoivat valitsemaan tarpeeseen parhaiten sopivimman laitteen. (3DTech 2013.)

Vuonna 2013 nämä kaksi henkilöä tapasivat kolmannen aiheesta kiinnostuneen henkilön, joka myös näki 3D-tulostuksen tarjoamat mahdollisuudet samoin kuin nämä kaksi henkilöä. Kolmikko tapasi useasti vuoden 2013 kevään aikana, jolloin myös viimeiset palaset osuivat kohdalleen, ja näin 3DTech Oy oli syntynyt. (3DTech 2013.)

3.2 Tulevaisuus

3DTech Oy:n tavoitteena on tulevaisuudessa olla Euroopan johtava 3D-palveluiden ja -laitteistojen toimittaja. Tavoitteena on kuulua globaalisti kymmenen tärkeimmän 3D-tulostuspalveluiden tuottajien joukkoon. 3DTech Oy:n tavoitteena on myös 3D-tulostuspalvelut kaikkien ulottuville, oli kyseessä yritys tai yksityishenkilö. Tavoitteena on tarjota palveluita myös oppilaitoksille sekä tutkimuskeskuksille. (3DTech 2013.)

3DTech Oy:n visio on, että kaikilla olisi mahdollisimman helppo ja vaivaton pääsy 3D-tulostuksen maailmaan ja sen tarjoamiin mahdollisuuksiin. Tavoitteena on, että laitteet ovat mahdollisimman käyttäjäystävällisiä ja helppokäyttöisiä ja että käytetyt materiaalit olisivat paikallisesti tuotettuja sekä kierrätys- ja biomateriaaleja. (3DTech 2013.)

4 AINETTA LISÄÄVÄT VALMISTUSMENETELMÄT

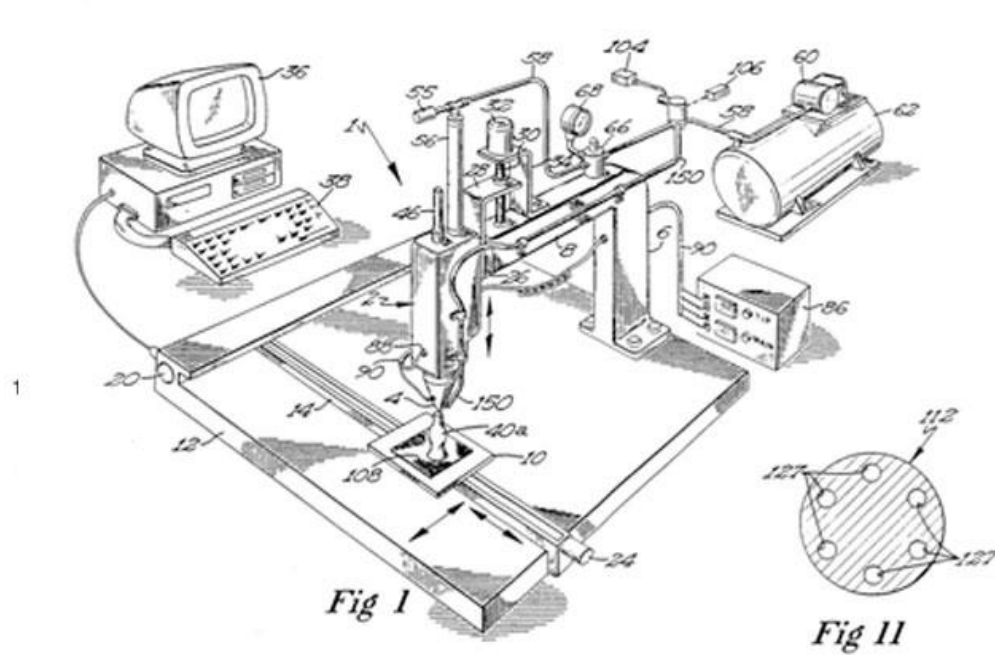
Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät voidaan jaotella karkeasti viiteen ryhmään. Käytössä olevat menetelmät ovat materiaalin pursotus, fotopolymerisointi, materiaalin ruisutus, jauhepetimenetelmät sekä laminointi. Kuvassa 7 esitetään eri valmistusmenetelmillä valmistettujen kappaleiden pinnanlaatueroavaisuuksia.



Kuva 7. Havainnekuva eri valmistusmenetelmillä valmistettujen kappaleiden pinnanlaatueroista (Formlabs 2018b).

4.1 Materiaalin pursotus

Tällä hetkellä yleisin valmistusmenetelmä kotikäyttöön tarkoitetuissa laitteissa on materiaalin pursottamiseen perustuva menetelmä. Menetelmän etuina on se varsin yksinkertainen toimintaperiaate sekä mahdollisuus tulostaa useita eri materiaaleja. Menetelmään perustuvilla laitteilla saadaan valmistettua kappaleita, joiden mittatarkkuus on yleisesti n. $\pm 0,2$ mm, jota voidaan pitää erittäin hyvänä. Materiaalia pursottavan valmistustavan kehitti yksi Stratasyksen perustajista, S. Scott Crump. Menetelmän patenttihakemuksessa käytetty havainnekuva esitetään kuvassa 8.



U.S. Patent

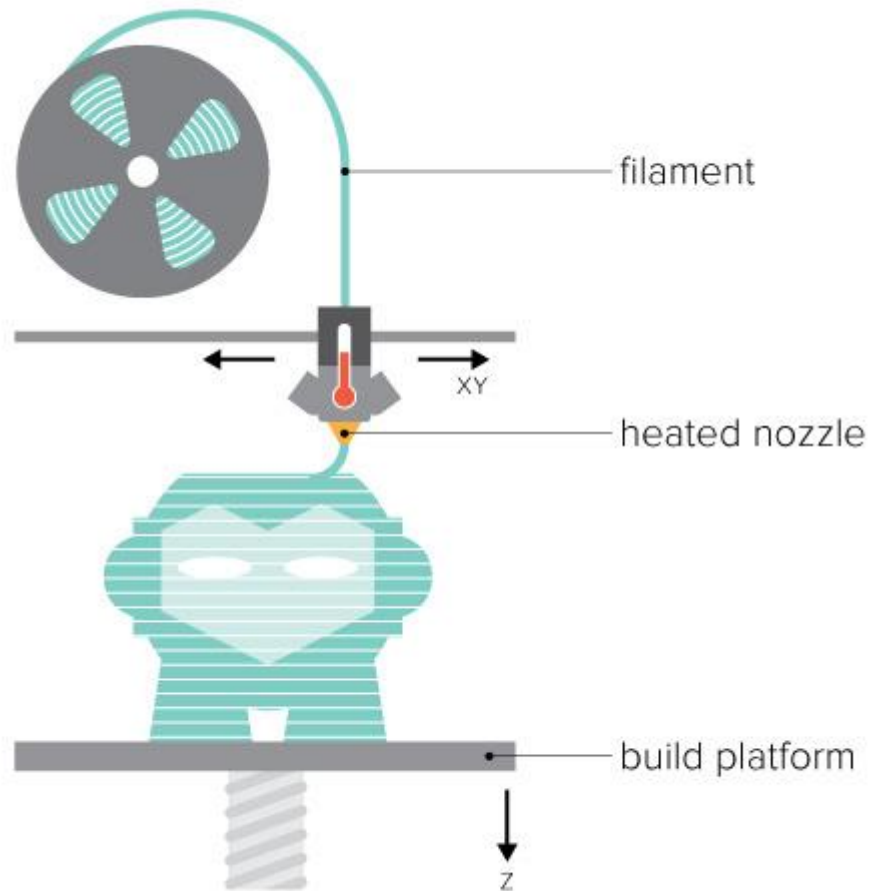
June 9, 1992

Sheet 1 of 3

5,121,329

Kuva 8. Stratasys-yrityksen perustaja S. Scott Crumpin kehittämän materiaalipursotusmenetelmän patenttihakemuksen toimintahavainnekuva (Pixel Practice 2016).

FDM-menetelmässä valmistusmateriaalina käytetään muoviseoslankaa. Yleisimmät materiaalilangan halkaisijat ovat 1,75 mm sekä 3,00 mm. Materiaalilankaa syötetään esilämmitettyyn tulostuspäähän, jossa materiaalilanka sulatetaan ja syötetään pursotussuuttimen läpi. Tulostuspäätä ohjataan X- sekä Y-akseleiden suuntaisesti haluttuun pisteeseen kerroksittain. Jokaisen valmiin kerroksen jälkeen tulostusalustaa lasketaan tai vaihtoehtoisesti tulostuspäätä nostetaan kerroskorkeuden verran. Tulostimesta sekä valmistusmateriaalista riippuen voidaan käyttää aktiivista kappaleen jäähdytystä. Menetelmän toiminta esitetään kuvassa 9.



Kuva 9. FDM-menetelmän havainnekuva (3D Hubs 2018c).

Pursottavalla menetelmällä valmistetun kappaleen laatuun vaikuttaa suuttimen koko sekä kerroskorkeus. Kerroskorkeus voidaan määrittää suuttimen halkaisijan perusteella seuraavien kaavojen 1 ja 2 avulla.

Pienin mahdollinen kerroskorkeus

$$1 \dots \dots \dots$$

Kaava 1. Pienin mahdollinen kerroskorkeus FDM-menetelmällä.

Suurin mahdollinen kerroskorkeus

$$1 \dots \dots \dots$$

Kaava 2. Suurin mahdollinen kerroskorkeus FDM-menetelmällä.

Näiden kaavojen avulla saadaan luotua taulukko 1 yleisimmille suutin ko'oilte.

Taulukko 1. FDM-menetelmää käyttävän laitteen kerroskorkeus-taulukko.

Suuttimen koko (mm)	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,6	0,8
Pienin kerroskorkeus (mm)	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	0,13	0,15	0,20
Suurin kerroskorkeus (mm)	0,10	0,13	0,15	0,18	0,20	0,25	0,30	0,40

FDM-menetelmän materiaalit

FDM-menetelmässä tulostusmateriaalina käytetään kiinteää muoviseoslankaa. Yleisesti käytettävien materiaalilankojen halkaisijat ovat 1,75 mm sekä 3,00 mm. Erikoisemmat materiaaliseoslangat voivat olla myös 2,85 mm.

PLA – Kaikista yleisin materiaali pursottaville tulostimille on PLA, eli polylaktidi. Polylaktidi on biohajoavaa termoplastista polyesterimuovia. PLA on erittäin suosittu materiaali sen todella hyvien lämpöominaisuuksien johdosta. PLA-muovista valmistetut kappaleet kestävät kohtuullista mekaanista rasitusta. PLA-muovista valmistetut kappaleet suositellaan jälkikäsiteltäviksi pinnoittamalla, mikäli niitä on tarkoitus käyttää ulkokäytössä. FDM-menetelmällä valmistetun PLA-kappaleen tyypillinen vetomurtolujuus on n. 50 MPa. (Prospector 2018).

ABS – Toiseksi yleisin pursottavassa menetelmässä käytetty materiaali on ABS, eli akryylinitriilibutadieenistyreeni. ABS on lämpöominaisuuksiltaan huomattavasti haastavampi tulostaa kuin PLA. ABS-muoviseokselle on erittäin tyypillistä epätasainen jäähtyminen, joka puolestaan aiheuttaa kappaleen muotoihin vääristymiä. Tästä johtuen kotikäyttöön tarkoitetut laitteet harvoin soveltuvat suoraan ABS-muovin tulostukseen. Teollisuuskäytössä ABS-muovi on erittäin yleistä, koska teollisuuslaitteiden lämmitystä tulostuskammioista, jolloin valmistusprosessin lämmönhallinta on erittäin tarkkaa,

eikä ABS-muoville tyypillisiä vääristymiä pääse syntymään epätasaisen jäähtymisen vuoksi.

PETG – PETG on nopeasti yleistynyt materiaali. Se on lämpöominaisuuksiltaan hieman tarkempi kuin PLA, mutta kuitenkin helpompi kuin ABS. PETG on mekaanisilta ominaisuuksiltaan erittäin hyvä. PETG-seosta tulostettaessa on käytettävä lämmitettävää tulostusalustaa, jolla varmistetaan kappaleen riittävä kiinnittyminen tulostusalustaan.

UPM Formi – Suomalainen metsäteollisuusyhtiö UPM:n kehittämä puupohjaisista granulaaiteista valmistettu biokomposiitti. Materiaali on 20–50% biopohjaista ja siitä valmistetut kappaleet voidaan jälkikäsitellä lähes puusta valmistetun kappaleen tavoin. FDM-menetelmään tarkoitettu valmistuslanka ei ole vielä julkaistu markkinoille. Julkaisu tapahtuu keväällä 2018. (UPM 2018.)

Joustavat muoviseokset – Markkinoilta löytyy useilta FDM-materiaalilangan valmistajilta kumimaisia muoviseoslankoja, joista voidaan valmistaa erittäin joustavia kappaleita. Joustavia muoviseoksia käytettäessä tulee käyttää erittäin alhaisia tulostusnopeuksia, koska materiaalilanka voi helposti puristua kasaan syöttökoneistossa.

Edellä mainittujen materiaalien lisäksi on olemassa myös erilaisia yhdisteitä, joissa muoviseokseen sekoitetaan eri komponentteja, joilla saadaan haluttuja ominaisuuksia materiaalille. Erilaiset seosmateriaalit asettavat tiettyjä vaatimuksia tulostuspäälle sekä tulostimen materiaalinsoittajärjestelmälle. Viime aikoina markkinoille on tullut seoslanka, jonka yhtenä seosaineena on hiilikuitu. Tällaisen materiaalin käyttö asettaa erittäin suuria vaatimuksia tulostuspään lämmitykselle sekä suuttimen kärjen materiaalille. (Filaments.ca 2015.)

Kuluttajalaitteet

Tällä hetkellä markkinoilta löytyy useita kotikäyttöön tarkoitettu FDM-menetelmää käyttäviä laitteita. Tarjolla on lähes käyttövalmiita koneita, joiden käyttöönotto ei vaadi kuin laitevalmistajan määrittämän kalibroitumisprosessin suorittamisen. Toisena äärivaihtoehtona markkinoilla on myös huomattava määrä rakennussarjoja, joiden ympärille onkin muodostunut erittäin laaja harrastajakunta. Molemmissa vaihtoehdoissa on omat hyvät sekä huonot puolensa. Rakennussarjaan perustuvan tulostimen käyttöönotto voi vaatia joskus huomattaviakin säätötoimia, jotta valmiiden kappaleiden laatu on markkinoilta löytyvien valmiiden tulostimien tasolla. Tehdasvalmisteisten laitteiden kanssa voidaan

luottaa siihen, että laite on valmiiksi kasattu ja testattu valmistajan toimesta. Tämä poistaa laitteen kasaamisen yhteydessä mahdollisesti tapahtuvat käyttäjälähtöiset toimintavirheet.

Taulukko 2. Markkinoilla olevia kuluttajakäyttöön tarkoitettuja FDM-laitteita (PCMag 2017).

	Anycubic i3 MEGA Ultrabase	Creality 3D CR-10	FlashForge Finder	MakerBot Replicator+	Original Prusa i3 MK2S	Tevo Tarantula (i3)	Ultimaker 2+	XYZ Da Vinci Mini
Laitteen mitat	-	61.50 x 60.00 x 49.00cm	50.05 x 50.00 x 54.50cm	41.15 x 53.00 x 44.10cm	42.00 x 42.00 x 38.00cm	43.00 x 44.00 x 40.00cm	58.60 x 50.50 x 34.00cm	36.00 x 39.00 x 33.50cm
Paino	-	13kg	15kg	18.3kg	6.5kg	7.5kg	10.9kg	11kg
Valmistusala	210 x 210 x 205mm	300 x 300 x 400mm	140 x 140 x 140mm	165 x 295 x 340mm	250 x 210 x 200mm	200 x 280 x 200mm	205 x 220 x 220mm	150 x 150 x 150mm
Tarkkuus	-	-	100 mikronia	100 mikronia	50 mikronia	-	20 mikronia	100 mikronia
Rakenne	Avoin	Avoin	Suljettu	Avoin	Avoin	Avoin	Suljettu	Avoin
Tulostusteknologia	FDM	FDM	FDM	FDM	FDM	FDM	FDM	FDM
Pursotussuuttimien lukumäärä	1	1	1	1	1	1	1	1
Liitännät	USB 2.0	USB 2.0	USB 2.0	USB 2.0	USB 2.0	USB 2.0	USB 2.0	USB 2.0
SD-kortilta tulostus	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei
WiFi	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei	Ei	Kyllä
Tuetut materiaalit	ABS / PLA / HIPS	ABS / PLA / TPU	PLA / PETG / TPU	ABS / PLA	ABS / PLA / PET / HIPS / FLEX	ABS / PLA / PETG	ABS / PLA	PLA
Hinta	495,95€ (e-ville)	n.335€ (Kiina)	499€ (ClasOhlson)	2499\$ (makerbot.com)	619€ (prusa3d.com)	212€ (tevo3dprinterstore.com)	1590€ (3d-tulostus.fi)	350€ (avtiimi.fi)

Kuten voidaan havaita Taulukko 2 tarkastelemalla, markkinoilla on erittäin laaja valikoima kuluttajille tarkoitettuja laitteita (taulukko 2). Tähän taulukkoon on kerätty tällä hetkellä suosituimpia laitteita, vaikka toki laitevalmistajia tulee koko ajan lisää markkinoille. Tästä taulukosta saadaan kuitenkin hyvä yleiskäsitys siitä, minkä kokoisia tulostusaloja laitteissa on, sekä laitteiden yleinen hintataso. Markkinoilta löytyy myös laitteita, jotka ovat selvästi suunnattuja esimerkiksi kouluille sekä kirjastoille. Näiden laitteiden hintataso on aavistuksen korkeampi verrattuna kuluttajalaitteisiin, mutta kuitenkin huomattavasti edullisempi verrattuna teollisuuskäyttöön tarkoitettuihin laitteisiin. Tällaisia laitevalmistajia ovat esimerkiksi kotimaiset MiniFactory sekä Prenta.

Yleisin laitekonfiguraatio kuluttajille kohdistetuissa laitteissa on yksisuuttiminen, lämmitetyllä tulostusalustalla varustettu yksikkö, joka on valmistajasta riippuen joko avoimessa tai suljetussa kotelarakenteessa. Suljetulla kotelarakenteella varustetut laitteet ovat yleisesti ottaen aavistuksen arvokkaampia kuin avoimella runkorakenteella varustetut. Markkinoilta löytyy myös kuluttajille tarkoitettuja laitteita, jotka ovat varustettuja useammalla kuin yhdellä tulostuspäällä, mikä mahdollistaa monimateriaalitulostuksen. Tällaisten laitteiden hintataso on luonnollisesti korkeampi kuin yhdellä tulostuspäällä varustettujen laitteiden.



Kuva 10. Kotikäyttöön tarkoitettu XYZ Printing da Vinci Mini FDM -tulostin (Aniwa 2018b).

Kuva 10 esittää erittäin yleisen kuluttajakäyttöön tarkoitetun FDM-tulostinrakenteen. Laitteessa on avoin runkorakenne, yksi suutin sekä varsin pienehkö tulostusalue, 150 x 150 x 150 mm.

Teollisuuslaitteet

FDM-menetelmää käyttävät teollisuuslaitteet ovat suurimmaksi osaksi suljetulla kotelorakenteella varustettuja valmistusyksiköitä. Tällaisen kotelorakenteen ansiosta voidaan valmistuskammion ilmanlaatua sekä lämpötilaa hallita riittävän tarkasti. Tästä on hyötyä varsinkin isoja kappaleita valmistettaessa, jolloin lämmönhallinta on kriittisessä roolissa valmistusprosessissa.



Kuva 11. Stratasys Dimension 1200es FDM -valmistusasema (3D Hubs 2017a).

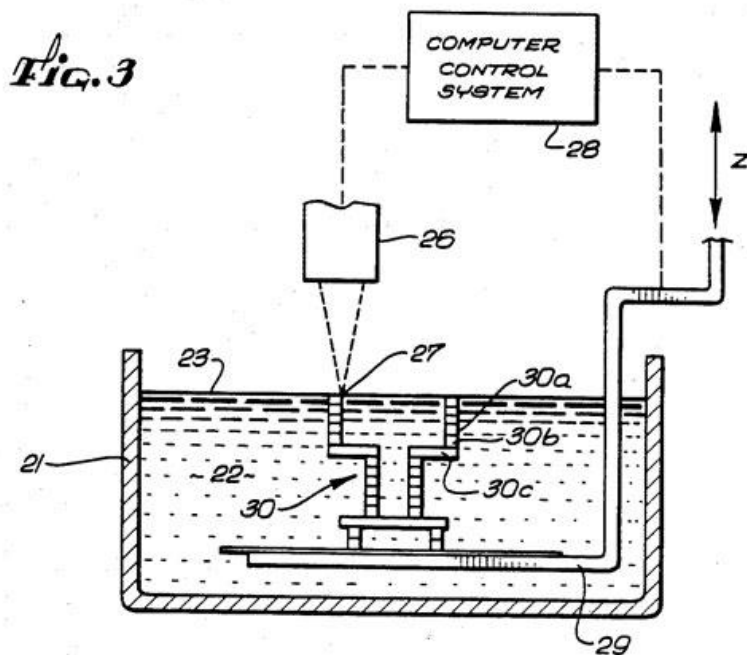
Teollisuuslaitteet ovat yleensä varustettuja monimateriaalivalmistus-valmiuksilla. Laitevalmistajasta riippuen monimateriaalivalmistus voidaan toteuttaa joko useammalla suuttimella tai yhdistelmäsuuttimella, jolla voidaan tulostaa useita materiaaleja saman valmistusprosessin aikana. Monimateriaalivalmistusta käytetään teollisuuslaitteissa usein tukirakenteiden tulostamiseen. Monet valmistajat käyttävätkin tukimateriaalina liuotettavia muoviseoksia, jolloin kappaleiden jälkikäsittely helpottuu huomattavasti. Tällä ratkaisulla saadaan myös valmiin kappaleen pinnasta laadukkaampi, kun tarvittavat tukimateriaalit voidaan liuottaa pois ilman mekaanista poistoa, mikä voi vahingoittaa kappaleen pintaa.

Kuva 11 näkyvä Stratasysin valmistama Dimension 1200es FDM -valmistusasema on loistava esimerkki siitä, millainen on teollisuuden käyttöön tarkoitettu FDM -

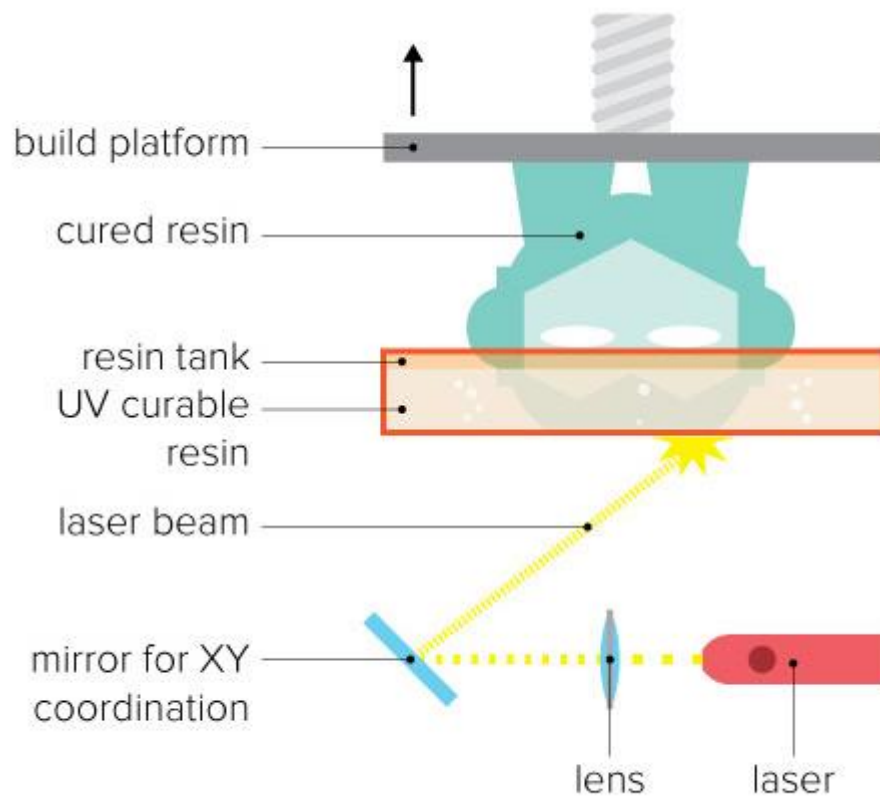
valmistusmenetelmää käyttävä valmistusasema. Valmistusasemaan kuuluu kuvassa pöydällä näkyvä tukirakenteiden liuottamiseen tarkoitettu jälkikäsitteilyasema. Kuvassa näkyy myös pikakiinnitteisiä valmistusalustoja. Koska itse tulostinyksikkö on varustettu suljetulla tulostuskammioilla, voidaan kammio lämmittää optimaaliseen lämpötilaan, minkä ansiosta ei lämmitettävää tulostusalustaa tarvita. Tämä mahdollistaa irrotettavien tulostusalustojen käytön. (3D Hubs 2017a.)

4.2 Stereolitografia

SLA, eli stereolitografia on toinen erittäin yleinen ainetta lisäävä valmistustapa. Stereolitografian avulla saadaan valmistettua erittäin pieniä ja mittatarkkoja kappaleita. Stereolitografia on yksi ensimmäisistä kaupallisista ainetta lisäävistä valmistustavoista. Valmistusmenetelmän patentoi Charles Hull vuonna 1986. Kuva 12 esittää patenttihakemuksessa käytetyn menetelmän toimintahavainnekuva. Ensimmäinen stereolitografiaa hyödyntävä 3D-tulostin valmistettiin jo vuonna 1987 (kuva 15). (Pixel Practice 2016.)



Kuva 12. Charles Hullin kehittämän stereolitografia-menetelmän patenttihakemuksen toimintahavainnekuva (Pixel Practice 2016).



Kuva 13. SLA-menetelmän havainnekuva (3D Hubs 2018c).

Stereolitografia käyttää erittäin pientä UV-lasersädettä, jolla seurataan kappaleen ääri-
viivoja. Lasersäde kovettaa nestemäisen polymeerihartsin kiinteäksi aineeksi. Jokaisen
kerroksen jälkeen kappaleen pinta tasataan pyyhkäisyterällä. Tämän jälkeen valmis-
tusalustaa lasketaan kerroskorkeuden verran, yleensä n .0,05–0,07 mm. Tätä prosessa
jatketaan siihen asti, että kappale on valmis. Prosessin toiminta esitetään kuvassa
13. Valmis kappale nostetaan nestesäiliöstä pois ja ylimääräinen hartsi huuhdellaan
kappaleesta liuottimella. Usein kappale voidaan vielä kovettaa viimeiseen lujuteensa
UV-valouunissa. Tämän jälkeen kappaleesta voidaan poistaa mahdolliset tukiraken-
teet. (custompart.net 2017.)

DLP

DLP, eli *digital light processing*, on stereolitografian kaltainen valmistusmenetelmä.
DLP-menetelmässä kappaleen muodot kovetetaan SLA-menetelmästä poiketen valo-

projektion avulla. DLP-menetelmä käyttää samoja valmistusnesteitä kuin SLA. (3D Hubs 2018c.)



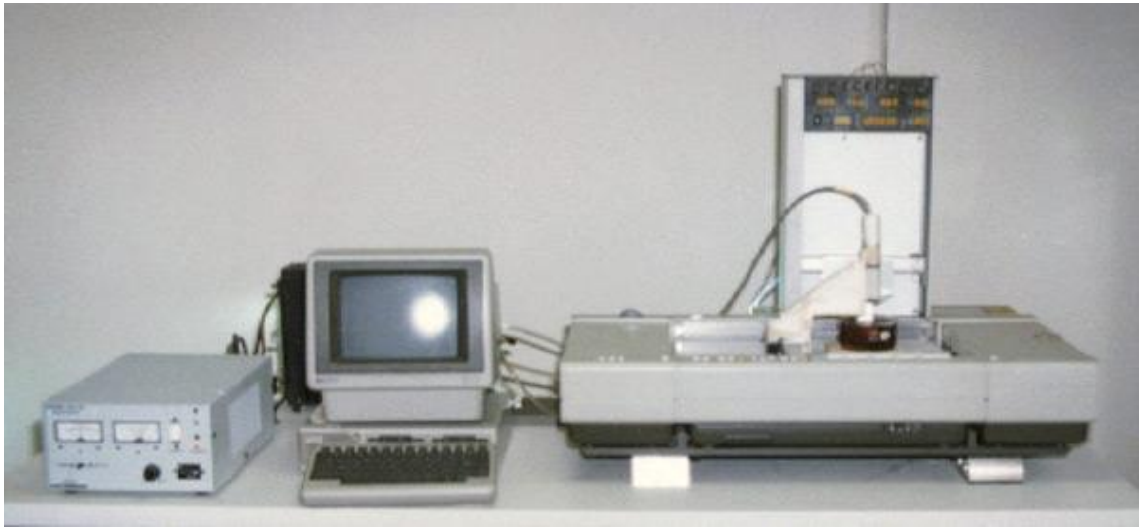
Kuva 14. SLA-menetelmällä valmistettu prototyypikokoonpano (3D Hubs 2018c).

SLA/DLP-menetelmän materiaalit

SLA-menetelmää hyödyntävät laitteet käyttävät tällä hetkellä fotopolymeeroitavaa seosnesteitä. Seosneste koostuu lyhyistä hiiliketjuista. Kun nesteeseen kohdistetaan UV-säde, seoksessa olevat hiiliketjut liittyvät toisiinsa ja muodostavat kiinteän kappaleen.

SLA-menetelmässä käytettävä materiaalinesteen koostumus voidaan jakaa kolmeen pääryhmään. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat mono- sekä oligomeerit. Monomeerit ovat pieniä molekyyliä, jotka voivat sitoutua kemiallisesti toisiin monomeereihin, muodostaen muun muassa oligomeerejä ja esimerkiksi polymeerejä. Nämä molekyylit ovat seosnesteen päärakennusaineita. Toiseen ryhmään kuuluvat fotoinitiaattorit. Fotoinitiaattorit ovat ultraviolettivalosta aktivoituvia molekyyliä, joiden avulla kappaleen monomeerit yhdistyvät toisiinsa. Kolmanteen ryhmään kuuluvat mahdolliset lisäaineistu-

set, joilla voidaan muokata materiaalinesteestä valmistetun kappaleen visuaalisia ominaisuuksia, kuten esimerkiksi väriä. (Formlabs 2018b.)



Kuva 15. SLA-1, ensimmäinen 3D-tulostin (3D Hubs 2018c).

Materiaalinesteitä voidaan valmistaa eri käyttötarkoituksia varten, jolloin voidaan korostaa materiaalissa haluttuja ominaisuuksia lisäaineita muuttamalla. Yleisin käytössä oleva materiaalineste on metakryylihapo-oligomeeri-pohjaista, jossa lisäaineena käytetään fosfiinioksidia. (Canorama 2018.)

Kuluttajalaitteet

Vasta viime vuosina markkinoille on tullut kuluttajille tarkoitettuja SLA-menetelmää käyttäviä laitteita. Tähän on varmasti osittain syynä FDM-menetelmän räjähdysmäinen yleistyminen ja samalla menetelmän antamat kasvot 3D-tulostamiselle. Nyt kuitenkin markkinoille on tullut SLA-menetelmää käyttäviä laitteita varsin kilpailukykyiseen hintaan verrattuna esimerkiksi FDM-menetelmän laitteisiin.

Kuluttajille tarkoitetut SLA-laitteet käyttävät yleensä käännettyä tulostusalustaa valmistuksessa, jolloin kappale valmistuvat tulostusalustalle väärinpäin. Tämän rakenteen ansiosta saadaan laitteen mekaniikkaan yksinkertaistettua ja samalla laitteen valmistuskustannuksia laskettua. (3D Hubs 2017b.)

Kuluttajakäyttöön suunnattujen SLA-tulostimien tulostusala on tällä hetkellä vielä varsin pieni verrattuna esimerkiksi FDM-menetelmän kuluttajalaitteisiin. Esimerkiksi markki-

noilta löytyvän Wanhao Duplicator D7 DLP-tulostimen (kuva 16) tulostusala on vain 120 × 68 × 200 mm, jolloin kokonaistilavuudeksi tulee 1 632 000 mm³, eli 1 632 cm³. (Aniwaan 2017a.)



Kuva 16. Wanhao Duplicator 7. kuluttajakäyttöön tarkoitettu DLP-tulostin (Aniwaan 2017a).

Taulukko 3. Markkinoilla olevia kuluttajakäyttöön tarkoitettuja SLA/DLP-laitteita (All3DP 2018b).

Merkki/Malli	FlashForge Hunter	Formlabs Form 2	Peopoly Moai	Phrozen Make	Shrobot Antares	Uniz Slash+	Wanhao Duplicator 7	ZYXPrinting Nobel 1.0A
Valmistusala	120 x 67.5 x 150mm	145 x 145 x 175mm	140 x 140 x 140mm	120 x 68 x 140mm	250 x 250 x 250mm	192 x 120 x 200mm	120 x 70 x 200mm	128 x 128 x 200mm
Tarkkuus	12.5 mikronia	25 mikronia	15 mikronia	10 mikronia	50 mikronia	10 mikronia	10 mikronia	25 mikronia
Tulostusteknologia	DLP	SLA	SLA	DLP	SLA	DLP	DLP	SLA
Hinta	4160€ (flashforge.eu)	3299€ (3d-tulostus.fi)	1295\$ (Matterhackers.com)	895€ (phrozen3dp.com)	-	3499\$ (uniz3d.com)	499\$ (3dprinters.onlinestore.com)	1999\$ (zyxeshop.com)

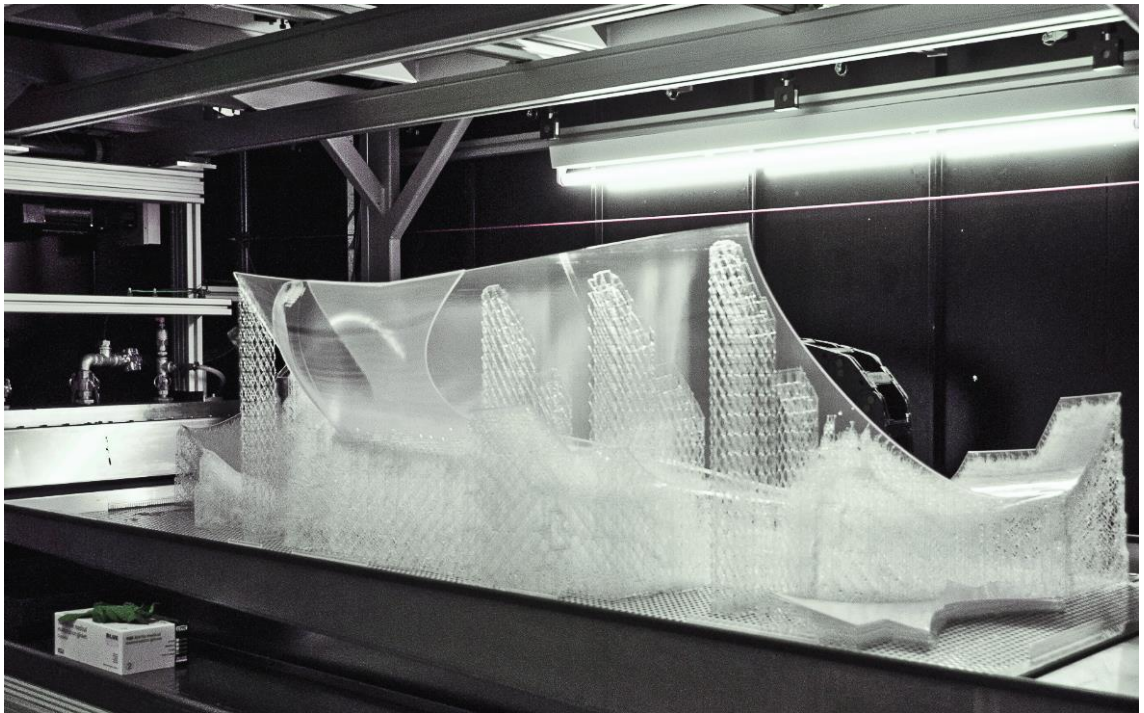
Yllä olevaan taulukkoon 3 on kerätty tällä hetkellä markkinoiden suosituimpia kuluttajakäyttöön tarkoitettu SLA/DLP-menetelmää käyttäviä 3D-tulostimia. Taulukkoa tutkiessa voidaan havaita, että tämän hetkiset kuluttajalaitteet ovat varsin pienellä valmistusalaalla varustettuja. DLP-menetelmää hyödyntävien laitteiden kanssa tämä on varsin yleistä, koska laite on varustettu fotoprojektorilla SLA-menetelmässä käytetyn ultraviolettiaserin sijaan. Suuri tulostusala vaatii myös suuren valmistusnestealtaan, jossa valmistuksessa käytettävä materiaalineste säilytetään.

SLA/DLP-menetelmää käyttävien kuluttajalaitteiden yleistymistä hidastaa vielä toistaiseksi varsin arvokkaat valmistusnesteet. Esimerkiksi tällä hetkellä Form 2 standard -materiaalineste maksaa 135,00 € / 1 l. Kun otetaan huomioon myös se, että tällä hetkellä ei kovettua valmistusmateriaalia voida kierrättää ainakaan kovin helposti, tulee kappalekohtainen materiaalikustannus vielä suhteellisen suureksi verrattuna FDM-menetelmän materiaalikustannuksiin. (MAKER3D Oy 2017.)

Teollisuuslaitteet

SLA- sekä DLP-menetelmää käyttäviä teollisuuslaitteita tarkastellessa huomataan, että FDM-menetelmään verrattuna laitteita löytyy myös varsin pienellä valmistusalaalla. Tämä selittyy osittain menetelmän erittäin hyvälaatuisilla kappaleilla. SLA-menetelmää käytetäänkin erittäin laajasti hammashoitoalalla proteesien valmistuksessa. Tällaisissa käyttökohteissa suurella valmistusalaalla ei saavuteta mitään konkreettista hyötyä.

Ajoneuvoteollisuudessa SLA-menetelmää voidaan käyttää kohteissa, joissa vaaditaan kappaleen pinnalta erittäin hyvää laatua. Esimerkkeinä käyttökohteista voidaan mainita ajoneuvon valaisinyksiköt ja sisustan osat, joissa vaaditaan erittäin pieniä yksityiskoh-
tia. SLA-menetelmällä voidaan valmistaa myös suurempia kappaleita erittäin tarkasti, tämä voidaan nähdä hyvin kuvassa 17. Menetelmän käyttöä suurten kappaleiden sarja-
tuotannossa kannattaa kuitenkin pohtia tarkkaan, koska kappaleet vaativat jälkikäsitte-
lyä.



Kuva 17. SLA-menetelmällä valmistettu ajoneuvon koripaneeli (3D Hubs 2017g).

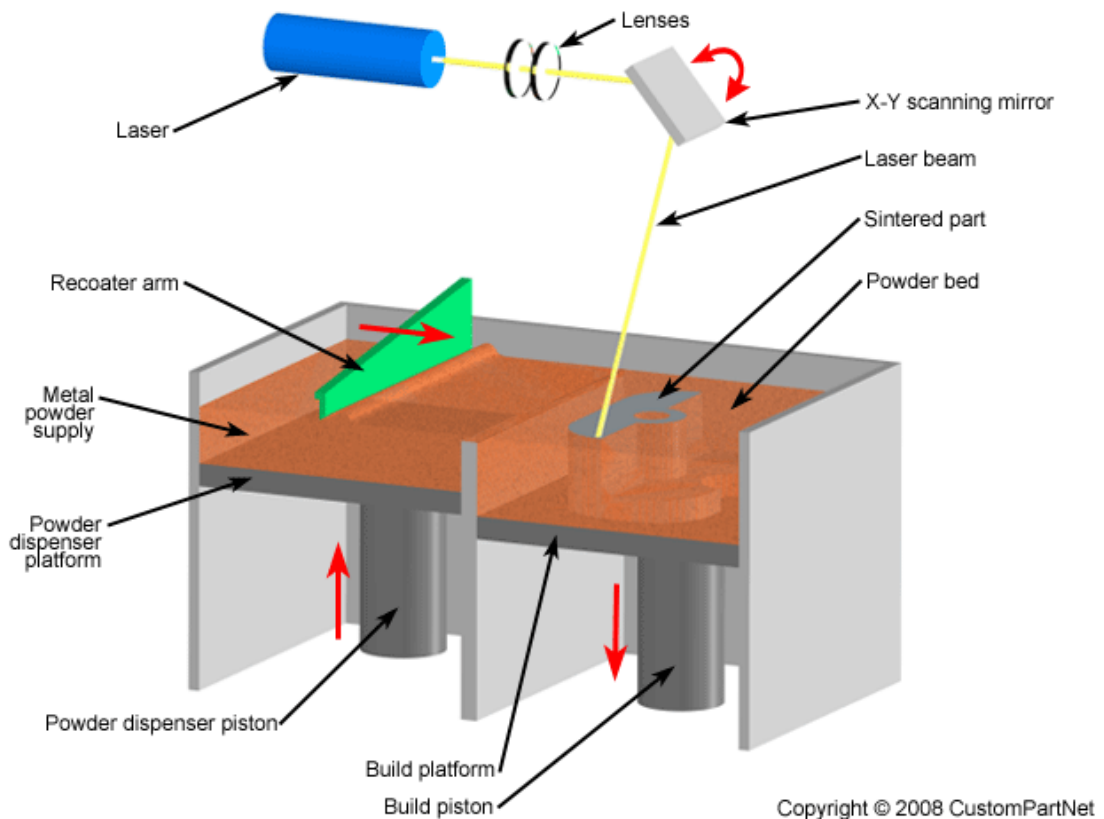
Kuten aiemmin mainittiin, markkinoilta löytyy SLA- sekä DLP-menetelmää hyödyntäviä teollisuuslaitteita, joissa on pieni valmistusala. Pienellä valmistusalalla varustettujen laitteiden lisäksi saatavilla on myös erittäin suurella valmistusalalla varustettuja valmis-
tusasemia. Ranskalaisen laitevalmistaja Prodwaysin tuotevalikoimasta löytyy ProMaker
L6000 -valmistusasema (kuva 18) jonka tehokas valmistusala on 800 × 330 × 400 mm.
(Aniwa 2018b.)



Kuva 18. Prodways ProMaker L6000 -valmistusasema (Aniwaa 2018b).

4.3 Jauhepetimenetelmät

Jauhepetimenetelmässä valmistusmateriaali on jauhemaisessa muodossa. Jauhe muutetaan kiinteään muotoon lasersäteellä tai elektronisuihkulla sulattamalla kerroksittain. Jokaisen kerroksen jälkeen valmistusalustaa lasketaan kerroskorkeuden verran, minkä jälkeen materiaalijauhetta lisätään valmistuskammioon. Valmistusmateriaaleina voidaan käyttää muovipohjaisia seosjauheita tai metallipohjaisia seosjauheita. Valmistusmenetelmän toimintaperiaate esitetään kuvassa 19.



Kuva 19. Jauhepetimenetelmän havainnekuva (custompart.net 2017).

Jauhepetimenetelmän materiaalit

Jauhepetimenetelmän materiaalit voidaan jakaa karkeasti kahteen pääryhmään, muovipohjaiset seosjauheet sekä metallipohjaiset seosjauheet.

PA 12 – Polyamidi 12 on tekninen muovi, jota käytetään yleisesti MJF- sekä SLS-menetelmien valmistusmateriaalina. Sillä on erittäin hyvät mekaaniset ominaisuudet, jonka ansiosta se soveltuu hyvin lopputuotteiden valmistusmateriaaliksi. Polyamidi 12 -jauhetta käytettäessä kappaleelle ei tarvitse valmistaa tukirakenteita, koska materiaali-jauhe pystyy tukemaan valmistuvaa kappaletta.

Alumiini-polyamidi seos – SLS-menetelmän materiaali, jossa polyamidijauheeseen on sekoitettu alumiinijauhetta. Alumiini-polyamidiseoksesta voidaan vahvistaa metallimaisia kappaleita, jotka ovat kuitenkin helposti jälkikäsiteltävissä.

Lasi-polyamidi seos – SLS-menetelmän materiaali, jossa polyamidijauheeseen on sekoitettu lasijauhetta. Lasi-polyamidi seoksesta voidaan valmistaa kappaleita, joilla on

erittäin hyvät mekaaniset ominaisuudet, mutta ne ovat kuitenkin kevyempiä kuin metallipohjaisista materiaaleista valmistetut kappaleet.

TPU 92A-1 – SLS-menetelmässä käytettävä termoplastinen polyuretaani. TPU 92A-1 -materiaalijauheesta voidaan valmistaa kumimaisia kappaleita, joilla on erittäin hyvät mekaaniset ominaisuudet.

PA 2241 – PA 2241 on SLS-menetelmässä käytettävä seosjauhe, jossa on tulipaloa hidastavia ominaisuuksia. Näiden ominaisuuksien johdosta materiaalia voidaan käyttää esimerkiksi ilmailutekniikassa.

Titaani – Titaanista voidaan valmistaa SLM-menetelmän avulla erittäin kestäviä sekä kevyitä kappaleita. Titaanista valmistetut kappaleet ovat erittäin lujia ja niillä on erittäin hyvät korroosion kesto-ominaisuudet. Tästä johtuen titaanista valmistettuja kappaleita voidaan käyttää erittäin monipuolisesti useilla eri aloilla. Titaani on bio-yhteensopiva materiaali, minkä ansiosta sitä voidaan käyttää proteesien materiaalina.

Teräkset – SLM-menetelmän yleisimmät teräslaadut ovat työkalu- sekä ruostumaton teräs ja näiden eri variaatiot. Teräksestä voidaan valmistaa erittäin kestäviä kappaleita, joilla on todella hyvät mekaaniset ominaisuudet. Valmistusmateriaalin ominaisuuksia voidaan helposti muokata toivotunlaisiksi.

Alumiinit – Alumiinista voidaan valmistaa SLM-menetelmän avulla erittäin kevyitä sekä kestäviä kappaleita. Koska puhdas alumiini on erittäin pehmeää, käytetään alumiinijauheissa seosaineita, joilla valmistusmateriaalin ominaisuuksia voidaan parantaa merkittävästi. Yleisimmät seosaineet ovat pii, magnesium, mangaani ja sinkki.

Koboltti-kromiseokset – CoCr-seoksista valmistetut kappaleet ovat erittäin vahvoja. Koboltti-kromiseoksista valmistetut kappaleet ovat bio-yhteensopiva, minkä ansiosta niitä voidaan käyttää myös lääketeollisuudessa. Yleisiä käyttökohteita onkin lääketeollisuus ja hammashoito.

Nikkelipohjaiset seokset – Nikkelipohjaisista seoksista voidaan puhua myös niin sanotuista *superseoksista*. Yleisimmät seosaineet näissä materiaaleissa ovat kromi, rauta, niobi sekä molybdeeni. Nikkelipohjaisista seoksista valmistetut kappaleet ovat erittäin kestäviä. Niillä on erittäin korkea lämmönkesto sekä ne kestävät korroosiota todella hyvin. Näistä seoksista valmistettuja kappaleita voidaan myös lämpökäsitellä, jolloin niiden mekaanisia ominaisuuksia voidaan parantaa entisestään. (Materialise 2017; SLM Solutions 2017.)

4.3.1 Selective Laser Melting

SLM (*Selective Laser Melting*) -menetelmässä valmistusmateriaali on jauhemaisessa muodossa. Materiaalijauhe sulatetaan kohdistetulla lasersäteellä kappaleen ääri viivoja seuraten. Materiaali voi olla muovipohjaista seosta tai metallipohjaista seosta. Jokaisen valmiin kerroksen jälkeen tulostustasoa lasketaan kerroskorkeuden verran alaspäin. Tämän jälkeen materiaalijauhetta lisätään tulostuskammioon. Materiaalijauhe tasoitetaan ennen uuden kerroksen sulattamista. SLM-menetelmällä voidaan valmistaa kappaleita metallista, joiden mekaaniset ominaisuudet vastaavat perinteisillä menetelmillä valmistettuja kappaleita. (Canorama 2018.)

Kun valmistetaan SLM-menetelmällä kappaleita, tulee tarpeen mukaan käyttää tukirakenteita. Tukirakenteiden avulla tuetaan kappaleen mahdollisia ulkonemia. Tukirakenteiden avulla mahdollistetaan myös kappaleen tasaisempi lämmön jakautuminen sekä jäähtyminen. SLM-menetelmää hyödyntävät laitteet ovat varustettuja tulostuskammion atmosfäärin hallintajärjestelmällä. Hallintajärjestelmällä voidaan tulostuskammion happipitoisuus laskea mahdollisemman alhaiseksi termisen jännityksen alentamiseksi. (3D Hubs 2018c.)



Kuva 20. SLM-menetelmällä valmistettu turbiinimoottorin polttoainesuutin (3D Hubs 2018c).

4.3.2 Selective Laser Sintering

SLS (*Selective Laser Sintering*) -menetelmässä valmistusmateriaali on SLM-menetelmän tapaan jauhemaisessa muodossa. Materiaalijauhe sintrataan kohdistetulla lasersäteellä kappaleen ääriviivoja seuraten kiinteäksi. Jokaisen valmiin kerroksen valmistuskammiota lasketaan kerroskorkeuden verran, minkä jälkeen kammioon lisätään materiaalijauhetta, joka tasoitetaan ennen uuden kerroksen sintrausta. Menetelmän kehitti Carl Deckard Texasin yliopistosta vuonna 1987. SLS-menetelmän prosessi esitetään kuvassa 21. (3D Hubs 2018c.)

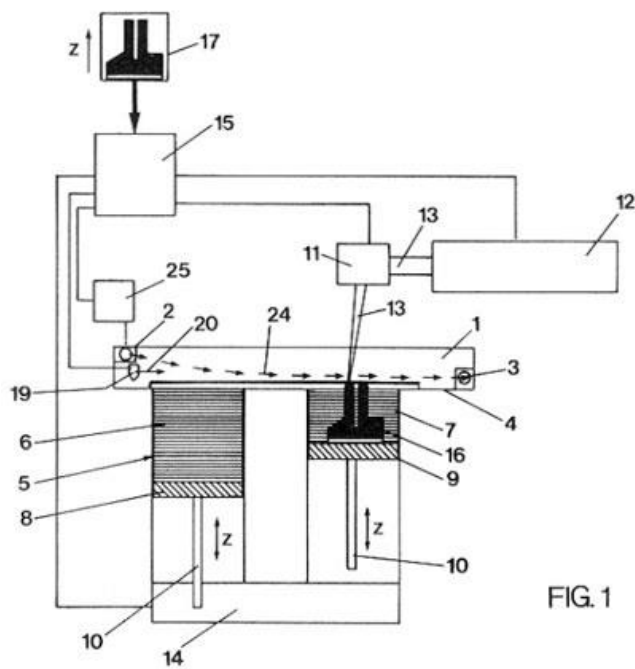


FIG. 1

Kuva 21. Carl Deckardin kehittämän SLS-menetelmän patenttihakemuksen toimintavainnekuva (Pixel Practice 2016).

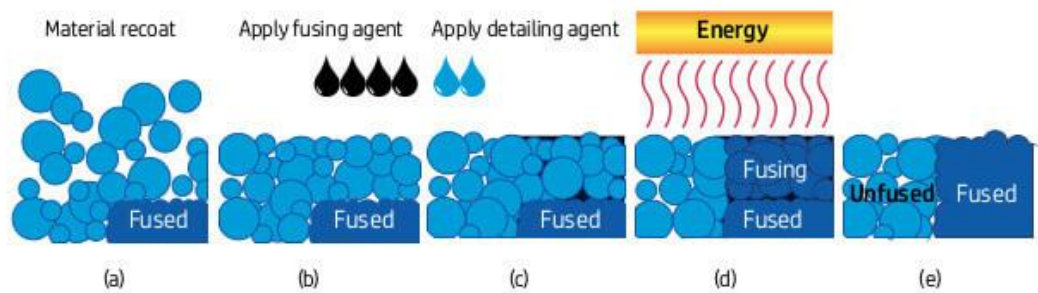


Kuva 22. SLS-menetelmällä valmistettu suihkuturbiinin pienoismalli (3D Hubs 2018c).

SLS-menetelmän materiaaleina käytetään pääasiassa muoviseoksia. Yleisimmät muoviseokset ovat nylon-pohjaiset seokset, polystyreeni sekä termoplastiset elastomeerit. SLS-menetelmän etuina ovat sen tarjoamat mahdollisuudet kappaleen muotojen osalta. SLS-menetelmällä valmistettu kappale ei tarvitse tukirakenteita, sillä sulamaton materiaalijauhe toimii riittävänä tukena kappaleelle. Näiden valmistusmenetelmän tarjoamien mahdollisuuksien johdosta menetelmällä voidaan valmistaa erittäin hyvälaatuisia osia, esimerkkinä kuvassa 22 esitettävä suihkuturbiinin pienoismalli. (3D Hubs 2018c.)

4.3.3 Multi Jet Fusion -sidosaineenruiskutusmenetelmä

Multi Jet Fusion eli MJF on Hewlett Packardin kehittämä jauhepetimenetelmä, jossa kappale valmistetaan materiaalijauheesta kovettamalla. SLM- ja SLS-menetelmistä eroten kappale kovetetaan erillisen liitosaineen avulla. Kappaleen yksityiskohdat viimeistellään viimeistelyaineen avulla. MJF-menetelmässä valmistusmateriaalit ladataan erilliseen valmistusyksikköön. Esivalmisteltu valmistusyksikkö asetetaan itse tulosyksikköön, jossa kappaleen valmistus tapahtuu. (HP 2018.)



Kuva 23. MJF-menetelmän havainnekuva (All3DP 2016a).

MJF-menetelmässä liitosainetta ruiskutetaan materiaalijauheeseen, minkä jälkeen materiaalijauheeseen ruiskutetaan vielä mahdollinen viimeistelyaine. Tämän prosessin jälkeen liitosaine kovetetaan infrapunavälillä. Prosessin vaiheet esitetään kuvassa 23. Valmiin kerroksen jälkeen tulostustasoa lasketaan kerroskorkeuden verran. Tämän jälkeen materiaalijauhetta lisätään tulostuskammioon ja materiaalijauheen pinta tasoitetaan ennen liitosaineen ruiskutusta. MJF-menetelmää käyttävä HP:n valmistusasema esitetään kuvassa 24. (All3DP 2016a.)



Kuva 24. HP MultiJet Fusion 3D 4200 MJF -tulostusasema (All3DP 2016a).

Muovipohjaisten jauhepetimenetelmien vertailu

Muovipohjaisten jauhepetimenetelmiä vertaillessa voidaan havaita näiden olevan erittäin samankaltaisia valmistuksen osalta. Molemmissa menetelmissä yleisin materiaali on PA12 -nailon. Menetelmien avulla valmistetut kappaleet eroavat kuitenkin mekaanisilta ominaisuuksiltaan. MJF-menetelmällä valmistetun kappaleen Z-akselin suuntainen vetolujuus on noin 12 % suurempi, kuin SLS-menetelmällä valmistetun kappaleen.

Kappaleen maksimaalinen venymä on myös huomattavasti suurempi, kun kappale on valmistettu MJF-menetelmällä SLS-menetelmän sijaan. (3D Hubs 2017e.)

Kun vertaillaan kappaleiden mittatarkkuuksia, voidaan todeta menetelmien olevan todella lähellä toisiaan. MJF-menetelmää käytettäessä voidaan kappaleen pieniä yksityiskohtia tuoda paremmin esiin pienemmän kerroskorkeuden sekä pienemmän seinä-mävahvuuden ansiosta. MJF- sekä SLS-menetelmällä valmistettujen kappaleiden pinnanlaadut ovat rakeisia, mutta erittäin helposti jälkikäsiteltäviä. (3D Hubs 2017e.)

Jauhepetimenetelmän laitteet

Kun tutkitaan jauhepetimenetelmää käyttäviä laitteita, voidaan todeta, että tällä hetkellä menetelmää käytetään pelkästään teollisuudessa. Laitteet ovat valmistusasemia, joihin kuuluu, valmistusaseman koosta riippuen, myös erillinen jälkikäsitely-yksikkö. Koska varsinkin metallipohjaisia materiaaleja käytettäessä on lämmön- sekä valmistuksessa syntyvien kaasujen hallinta oltava erittäin tarkkaa, on valmistusasemat varustettu itsenäisillä atmosfäärien hallintajärjestelmillä.



Kuva 25. Realizer SLM 50 -valmistusasema (Aniwa 2018b).

Valmistusasemien valmistusaloja tutkiessa huomataan, että tarjolla on verrattain pieniläkin valmistusaloilla varustettuja asemia. Esimerkkinä voidaan mainita saksalaisen ReaLizer -yrityksen valmistama SLM 50 -valmistusasema (kuva 25) jonka valmistusala on 70 × 70 × 80 mm.

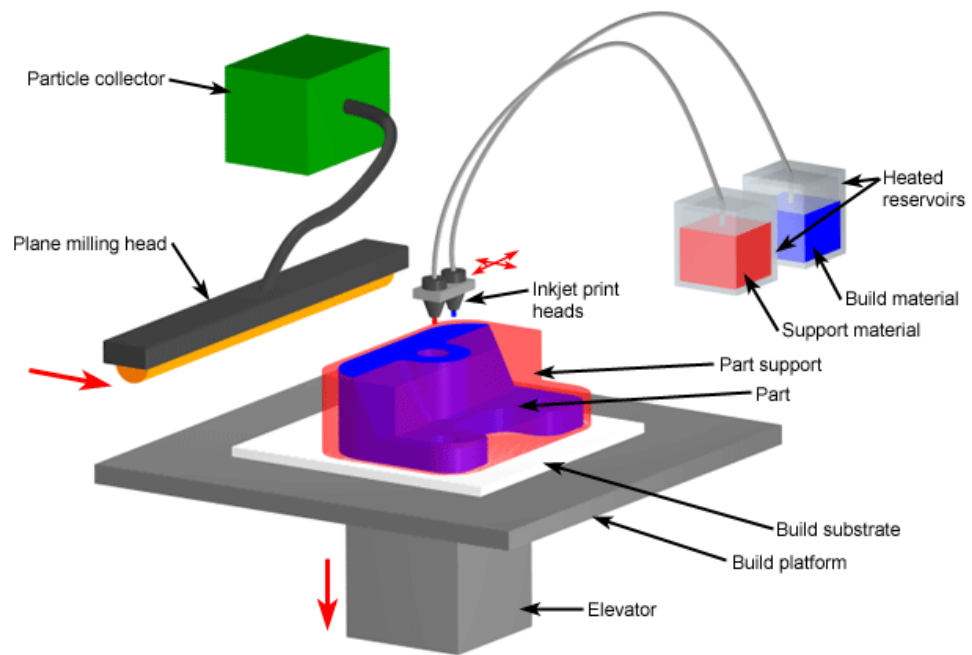


Kuva 26. EOS M400 -valmistusasema (Aniwa 2018b).

Suuret valmistusasemat, kuten esimerkiksi EOS M400 -variaatiot (kuva 26) ovat varustettuja 400 × 400 × 400 mm:n kokoisella valmistuskammioilla. Suuret asemat, kuten edellä mainittu M400, voivat olla varustettuja useammalla kuin yhdellä laser-yksiköllä. Kyseistä M400-asemaa onkin saatavilla joko yhdellä 1kW-laserilla tai neljällä 400W-laserilla. (EOS 2017a.)

4.4 Materiaalin ruiskutus

Materiaalia ruiskuttava menetelmä perustuu erittäin läheisesti perinteiseen mustesuihkutustekniikkaan. Menetelmässä esilämmitetty materiaalineste ruiskutetaan pieninä pisaroina toivottuun pisteeseen. Materiaalineste kovetetaan samanaikaisesti ultravioletin avulla. Valmistusprosessi esitetään kuvassa 27. Menetelmän avulla saadaan valmistettua erittäin hyvälaatuisia kappaleita. (3D Hubs 2017d.)



Copyright © 2008 CustomPartNet

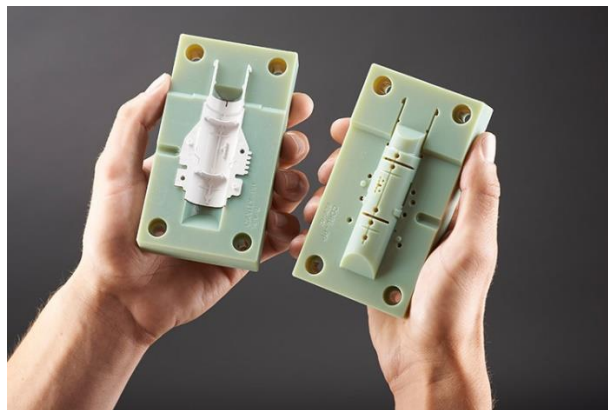
Kuva 27. Ruiskutusmenetelmän havainnekuva (custompart.net 2017).

Materiaali ruiskutuksen valmistusmateriaalina käytetään nestemäisiä fotopolymeerejä. Materiaalimesteiden ominaisuuksia voidaan muokata kappaleeseen haluttujen ominaisuuksien mukaisiksi. Materiaalia ruiskuttavalla menetelmällä valmistettu kappale voi kappaleen geometriasta riippuen tarvita tukirakenteita. Tukirakenteet voidaan valmistaa geelimäisestä materiaalista, jolloin kappaleen jälkikäsittely helpottuu merkittävästi. (custompart.net 2017.)



Kuva 28. Stratasys Objet500 -valmistusasema (All3DP 2017c).

Materiaalia ruiskuttavalla menetelmällä voidaan luoda kappaleita, joiden pinnan laatu on erittäin hyvä, jopa verrattavissa ruiskuvalumenetelmällä valmistettuihin kappaleisiin. Menetelmän avulla voidaan luoda erittäin mittatarkkoja kappaleita. Kappaleiden mekaaniset ominaisuudet ovat kuitenkin verrattain huonot, joten menetelmä ei välttämättä sovellu valmiiden kappaleiden sarjatuotantoon. (3D Hubs 2017d.)



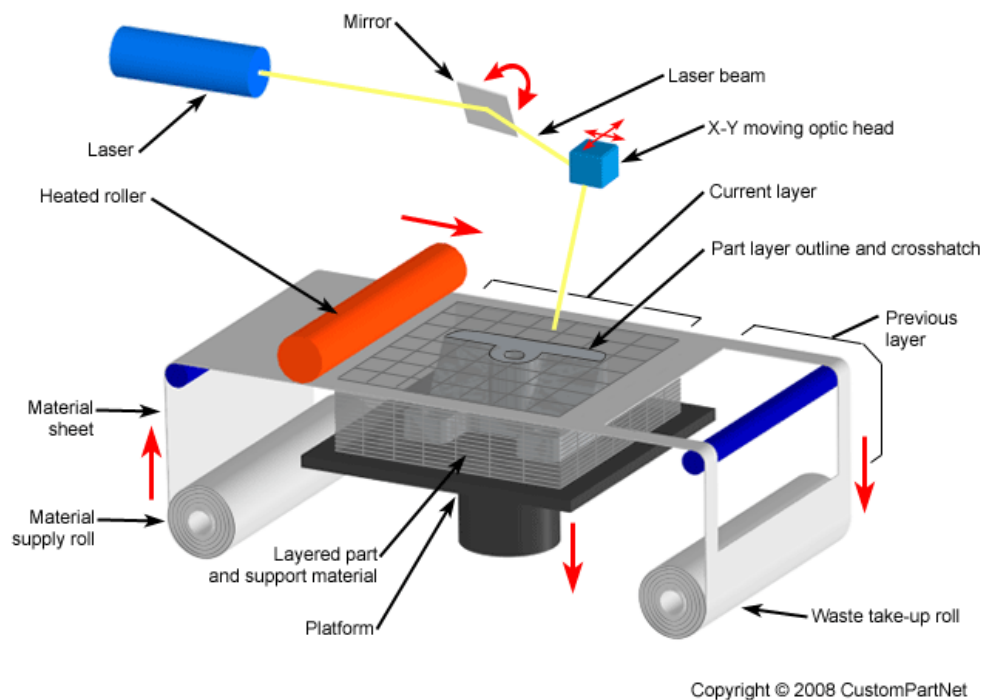
Kuva 29. Ruiskutusmenetelmällä valmistettu ruiskuvalumuotti (3D Hubs 2018c).

Materiaalia ruiskuttavalla menetelmän avulla voidaan luoda monimateriaalikappaleita. Käytännössä monimateriaalivalmistus tarkoittaa tällä menetelmällä eri värien käyttöä.

Tämän ansiosta menetelmällä voidaan luoda visuaalisesti erittäin hienoja kappaleita. Kappaleiden visuaalisten sekä mekaanisten ominaisuuksien vuoksi menetelmä soveltuu parhaiten prototyyppien sekä esittelykappaleiden tuotantoon. (3D Hubs 2017d.)

4.5 Laminointi

Laminointimenetelmässä kappale valmistetaan yhteen liitettyjen materiaalikalvojen avulla. Materiaalikalvot voidaan kiinnittää toisiinsa joko liimaamalla tai ultraäänen avulla. Materiaalikalvo leikataan kappaleen muotoon yleensä laserilla. Menetelmän toiminta esitetään kuvassa 30. (Savonia Ammattikorkeakoulu 2016.)



Kuva 30. Laminointimenetelmän havainnekuva (custompart.net 2017).

Laminointimenetelmän avulla voidaan valmistaa kappaleita myös alumiinista sekä kuparista. Materiaalikalvot liitetään tällöin yhteen värähtelevän paininrullan avulla. Alumiinista ja kuparista valmistetut kappaleet vaativat usein runsasta jälkikäsittelyä, jolloin kappaleen kokonaisvalmistusaika kasvaa huomattavasti. (custompart.net 2017.)



Kuva 31. Mcor IRIS LOM-menetelmän valmistusasema (3D Hubs 2018c).

5 AINETTA LISÄÄVÄN VALMISTUSTAVAN KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA

Ainetta lisäävällä valmistustavalla on useita etuja verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. 3D-tulostamalla voidaan valmistaa kappaleita todella nopeasti verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Ainetta lisäävällä valmistustavalla valmistetun kappaleen valmistuskustannukset voidaan karkeasti määrittää kiinteäksi, valmistusmäärästä riippumatta. Perinteiseen ruiskuvaluprosessiin verrattuna menetelmä on myös huomattavasti nopeampi ja joustavampi, jos tutkitaan kokonaisvalmistusaikaa kappaleen suunnittelusta aina valmiiseen kappaleeseen. Tämä tarjoaa monia mahdollisuuksia, varsinkin tuotekehitysvaiheessa, jolloin kappaleesta valmistetaan toimivia prototyyppijä ja piensarjoja. Mahdolliset muutokset kappaleen 3D-malliin voidaan tehdä nopeasti, jonka jälkeen päivitetty malli voidaan valmistaa 3D-tulostamalla.

5.1 Ajoneuvoteollisuus

Tällä hetkellä ajoneuvoteollisuudessa ollaan ottamassa ainetta lisäävät valmistusmenetelmät käyttöön kasvavassa määrin. Toistaiseksi kuitenkin yleisimmät valmistusmenetelmät ovat vielä perinteisiä, johtuen kappaleiden valmistusmäärästä. Hyvänä esimerkkinä kuitenkin voidaan mainita ruotsalainen superautovalmistaja Koenigsegg, joka valmistaa One -mallin autoon pakoputkiston ulostulopään 3D-tulostamalla. Materiaalina käytetään titaanipohjaista metallijauheseosta. Tällä ratkaisulla saadaan valmiin kappaleen massaa pienennettyä 400 grammaa. (Complex 2014.)

Myös muut ajoneuvovalmistajat ovat ottaneet ainetta lisäävän valmistustavan käyttöön. Ajoneuvovalmistaja Ford käyttää 3D-tulostusta uusien ajoneuvojen suunnitteluvaiheessa, jolloin prototyyppien valmistuskustannukset saadaan huomattavasti pienemmiksi. (Complex 2014.)



Kuva 32. 3D-tulostettu koristelista Mini Cooper -autossa (Car and Driver 2017).

Ajoneuvovalmistaja Mini on alkanut tarjoamaan palvelua, jossa Minin omistajat voivat tilata yksilöityjä koristelista ajoneuvon sisustaan sekä koripaneeliin. Kappaleet valmistetaan ajoneuvovalmistajan tehtailla 3D-tulostamalla. (Car and Driver 2017.)

5.2 Muita teollisuuden käyttökohteita

Ainetta lisäävää valmistustapaa käytetään myös laajalti muilla teollisuuden aloilla. Hyvänä esimerkkinä ilmailuteollisuudesta voidaan mainita lentokonevalmistaja Boeing, jonka 787 Dreamliner -lentokoneessa on yli 30 3D-tulostamalla valmistettua kappaletta. Boeing 787 Dreamliner -lentokoneessa käytetään huomattavan paljon titaania valmistettuja osia. Titaanin ominaisuuksien ansiosta koneesta saadaan kevyempi, kuin käyttämällä esimerkiksi alumiinista valmistettuja osia. Koska titaani on raaka-aineena kallis, voidaan 3D-tulostamalla optimoida kappaleen muotoa ja näin ollen vähentää tarvittavan valmistusmateriaalin määrää huomattavasti. Kappaleet toimittava Norsk Titanium ilmoittaa jopa 2-3 miljoonan dollarin säästön olevan mahdollista lentokonetta kohden, verrattuna perinteisillä menetelmillä valmistettuihin titaani-kappaleisiin. (Reuters 2017.)

5.3 Muita käyttökohteita

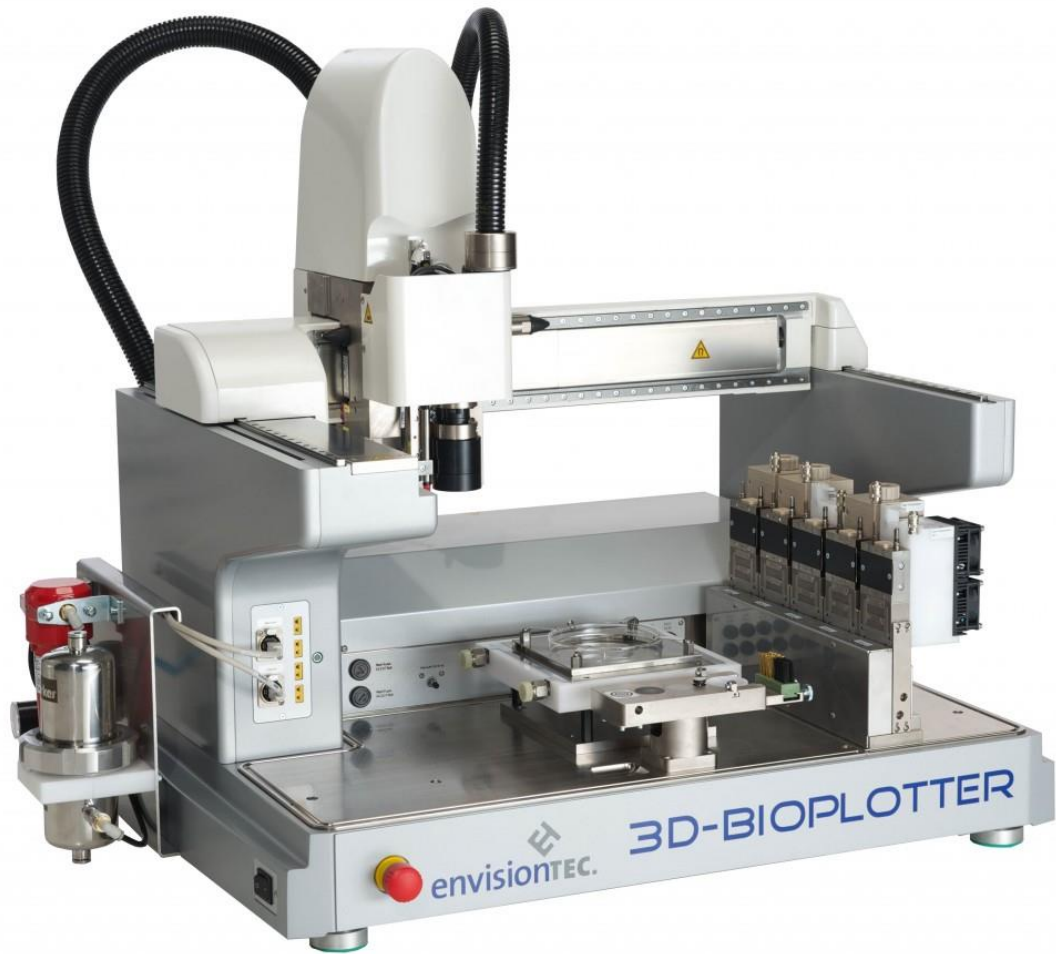
Muista 3D-tulostuksen käyttökohteista on hyvä mainita hammas- sekä terveydenhoito-ala. SLA-menetelmää hyödyntäviä 3D-tulostimia onkin alettu käyttää jatkuvasti lisääntyvissä määrin hammashoidon työkaluna. SLA-menetelmällä voidaan valmistaa erittäin hyvällä pinnanlaadulla valmistettuja proteeseja. Erittäin tarkkojen proteesien lisäksi, tutkijat ovat kehittäneet valmistusmateriaalia johon voidaan lisätä antibakteerisia ammoniumsuoloja, joilla on suun haitallisia bakteereja vähentävä vaikutus. Laboratoriokokeissa 3D-tulostettu hammas altistettiin suun eri bakteereille, joista se onnistui tuhoamaan jopa 99%, kuitenkin olematta haitallinen ihmisluille. (The Guardian 2015.)



Kuva 33. Stratasys Objet260 Dental -valmistusasema (Stratasys 2015).

Hammashoitomenetelmien lisäksi 3D-tulostuksen mahdollisuuksia tutkitaan myös orgaanisten solujen tulostamisessa. Tällä hetkellä on mahdollista tulostaa elävistä soluista elimiä, joiden solurakenne vastaa alkuperäisen elimen solurakennetta. Valmistusmateriaalina käytetään käyttötarkoituksen valittua biomustetta (engl. bio-ink). Biomuste

koostuu soluja sisältävästä hydrogeelistä sekä biohajoavista muovin kaltaisista materiaaleista. (International Society of Biofabrication 2016.)



Kuva 34. EnvisionTEC 3D-biotulostinasema (3D Printing Industry 2015).

6 MENETELMIEN VERTAILU

Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien kehittymisen myötä, voidaan alkaa pohtimaan valmistustavan hyödyntämistä myös sarjavalmistuksessa. Jatkuva materiaalien sekä prosessien kehitys avaa mahdollisuuksia suurempien sarjojen valmistukseen sekä nopeampaan tuotannon aloittamiseen. Tämän ansiosta saadaan valmiin tuotteen valmistuskustannuksia optimoitua huomattavasti. Jotta voidaan tarkastella ainetta lisäävän valmistustavan kustannuksia, on kustannusrakenteen ymmärtämisen helpottamiseksi luontevaa jakaa kulut kahteen pääryhmään, hyvin jäseneltäviin kuluihin sekä heikosti jäseneltäviin kuluihin. (National Institute of Standards and Technology 2014.)

Hyvin jäseneltyihin kuluihin voidaan laskea kaikki kulut, jotka voidaan hyvin ennakoida ja hallita. Tällaisiin kuluihin kuuluu henkilöstön palkkakulut, valmistusmateriaalit, laitteiston hankinta sekä ylläpitokulut. Toimitilakulut voidaan myös tietyissä määrin laskea näihin kuluihin, vaikka suurtuotannossa yleensä toimitilakulun osuus valmiin kappaleen hinnassa on erittäin pieni. (National Institute of Standards and Technology 2014)

Huonosti jäseneltävät kulut puolestaan ovat kuluja, joita ei voida ennakoida, tai jotka tulevat valmistajasta riippumattomista tekijöistä. Laitteiston mahdolliset yllättävät rikkoutumiset lasketaan näihin kuluihin. Tuotannossa tapahtuvat häiriöt, sekä näistä johtuvat virheellisten kappaleiden materiaalihävikki sekä työaikahävikki kuuluvat myös huonosti jäseneltäviin kuluihin. (National Institute of Standards and Technology 2014.)

Ainetta lisäävän valmistustavan tarjoamia valmistuskustannus säästöjä pohtiessa, voidaan pääosin keskittyä hyvin jäseneltäviin kuluihin ja niiden optimointiin. Jotta voidaan nähdä todellinen ainetta lisäävän valmistustavan potentiaali, voidaan tuotteen valmistusprosessin arvioinnissa käyttää Lean-ajattelun mallia. Tässä mallissa ajatusmallissa prosessi jaetaan seitsemään kategoriaan. (National Institute of Standards and Technology 2014.)

6.1 Lean-ajatusmalli

Lean on prosessijohtamisen ajatusmalli, jossa tarkastellaan yritystä ja sen toimintaketjuja yhtenä kokonaisuutena. Lean-filosofian keskeinen tavoite on tehostaa yrityksen toimintaa, luomalla siitä mahdollisimman mukautuvaa saatavilla olevien resurssien avulla. Lean konseptin historia alkaa Japanista, jossa Toyota Motor Company -tehtaan tuottavuutta haluttiin tehostaa käytössä olevien resurssien avulla. Toyotan päätuotantoinisööri Taiichi Ohno kehitti menetelmän tutustumalla maailmalla käytettäviin suurtuotantoprosesseihin ja näiden tietojen perusteella hän kehitti ajatusmallin, missä hyödynnetään käytettävät resurssit mahdollisimman tehokkaasti. (Six Sigma 2018.)

Ylituotanto

Ylituotanto tarkoittaa tilannetta, jolloin tuotetta tai asiaa tuotetaan enemmän kuin markkinoilla on kysyntää. Liian voimakkaalla reagoinnilla voidaan saada aikaan piiskavaikutus, jolloin kysyntä ja tarjonta ovat jatkuvassa epätasapainossa.

Kuljetus

Kuljetuksilla ei ole vaikutusta tuotteen ominaisuuksiin, jolloin turhia kuljetuksia tulee välttää, mikäli mahdollista. Tarpeettoman tuotteiden sekä asioiden kuljetuksen karsimisella voidaan optimoida valmiin tuotteen tai asian valmistuskustannuksia.

Virheet / Korjaukset

Virheiden huomioimatta jättämisestä aiheutuu ylimääräistä työtä jälkeenpäin, kun alun perin ohitetusta virheestä johtuvia epäkohtia joudutaan korjaamaan. Prosessin aikana tapahtuvalla nopealla virheisiin reagoinnilla voidaan vähentää myöhempien epäkohtien korjaamiseen kulutettavaa aikaa, jonka ansiosta saadaan valmistusprosessin laatua parannettua.

Yliprosessointi

Yliprosessointia tapahtuu silloin, kun tehdään työtä, joka ei tuota varsinaista arvoa prosessille. Ylimääräisten työvaiheiden poisto onkin yksi merkittävä tekijä, jolla voidaan parantaa tuotannon tehokkuutta.

Liike

Tarpeettomalla liikkeellä kulutetaan ylimääräistä aikaa sekä resursseja. Lähtökohtaisesti liikkeen tulisi olla prosessia edistävää liikkumista, tällöin kulutettava energia saadaan keskitettyä prosessia edistäväksi voimaksi.

Varastointi

Toimivalla varastoinnilla, sekä optimaalisilla varastomäärillä voidaan varaston käsittelyyn kuluvia resursseja optimoida.

Odotus

Jokainen hetki, jolloin työvoima ja laitteisto joutuvat odottamaan materiaalia tai osia, on menetettyä tuotantoaikaa. Tämä aika tulisi minimoida, jotta tuotannon tehokkuus saadaan pidettyä mahdollisimman korkeana. (Six Sigma ei pvm.)

6.2 Ainetta lisäävän valmistustavan tarjoamat mahdollisuudet

Vuonna 2011 arvioitiin, että valmistavan teollisuuden varastossa olevien tuotteiden arvo oli 10% koko vuoden liikevaihdosta. Kun otetaan huomioon näiden tuotteiden ja kappaleiden valmistukseen ja käsittelyyn käytetyt resurssit, voidaan puhua varsin huomattavasta työpanoksesta, minkä olisi voinut käyttää myös muihin tehtäviin. (National Institute of Standards and Technology 2014.)

Koska tuotteita usein valmistetaan kaukana loppukäyttäjästä, aiheutuu tuotteiden logistiikasta merkittävä lisäkulu tuotteen hintaan. Ainetta lisäävän valmistustavan avulla

tuote tai kappale voidaan valmistaa tarpeen mukaan, lähempänä loppukäyttäjää. Tällöin tuotteen kustannuksia saadaan optimoitua huomattavasti. Tavarantoimittajan ei tarvitse varastoida useita artikkeleita varastoon, usein myös sellaisia joiden kierto on hitaampaa kuin toisten tuotteiden. Tämä aiheuttaa haasteita useille tavarantoimittajille, koska hitaammin kiertäviä artikkeleita on myös pidettävä varastossa, koska tarpeen tullen asiakas haluaa tuotteen tai varaosan mahdollisimman nopeasti, ilman että hänen mahdollinen tuotanto pysähtyy.

Ainetta lisäävän valmistustavan avulla voidaan valmistaa erilaisia kappaleita nopeasti, ilman valmistuskoneen työkalurevolverin mukauttamista tai mahdollisten muottien hankkimista. Ainetta lisäävällä valmistustavalla valmistetun kappaleen hinta ei myöskään ole niin suuresti riippuvainen kappaleen valmistusmäärästä, kuin perinteisillä menetelmillä valmistettujen kappaleiden hinta.

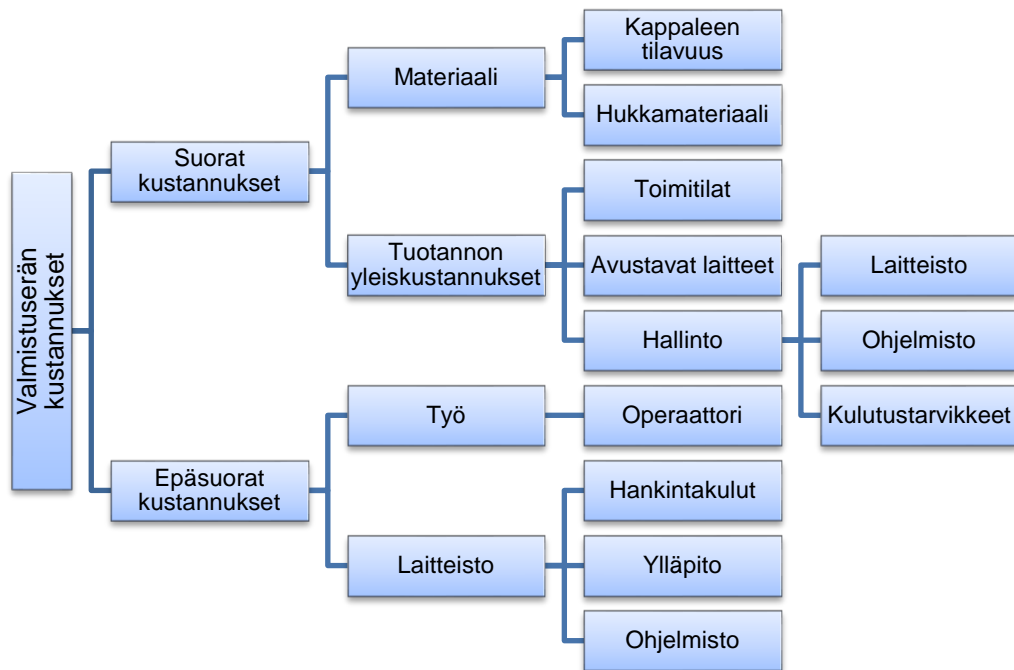
6.3 Kustannusten muodostuminen

Kun tutkitaan ainetta lisäävän valmistustavan kustannusrakennetta, voidaan todeta sen olevan huomattavasti yksinkertaisempi verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Ainetta lisäävät valmistuslaitteet eivät tarvitse erillisiä muotteja tai työkaluja, joilla kappaleita valmistetaan. Yleisten huoltotoimenpiteiden lisäksi ei ainetta lisäävä valmistuskone tarvitse muita valmistelevia toimenpiteitä kuin valmistusmateriaalin täyttämisen laitteen materiaaliyksikköön. Teollisuudessa käytettävät laitteet ovat usein varustettuja valmistusmateriaalin automaattisella esivalmistelutoiminnolla, jolloin laitteen käyttäjän ei tarvitse erikseen valmistella laitetta tai käytettäviä materiaaleja. Valmistuslaitteen käyttötekniikan päätehtävät ovatkin verrattuna perinteisiin menetelmiin varsin yksinkertaiset.

Kun ainetta lisäävää valmistustapaa vertaillaan ruiskuvaluun, on havaittavissa selkeä ero prosessien työvaiheiden määrässä. Tarkastellessa valmistusprosessin aloittamista, voidaan nähdä selkeä ero menetelmien nopeudessa. Ruiskuvalumenetelmällä valmistettavalle kappaleelle tulee ensin valmistaa valumuotti, jonka avulla itse kappale valmistetaan. Valumuottia valmistettaessa tulee miettiä, kuinka suuresta valmistuserästä on kyse. Tämän avulla voidaan määrittää valumuotissa käytettävä materiaali. Jos valmistetaan suuria kappalemääriä, tulee muotissa käyttää riittävän kestävästä materiaalia, mikä puolestaan lisää muotin valmistuskustannuksia. Piensarjoja valmistettaessa voi puolestaan muotin valmistuskustannukset nousta suhteessa muihin valmistuskuluihin

huomattavan suuriksi. Valmistettavan kappaleen geometrialla on myös suuri merkitys ruiskuvalumenetelmää käytettäessä.

National Institute of Standards and Technologyn julkaiseman raportin mukaan ainetta lisäävän valmistustavan kustannukset voidaan karkeasti jakaa seuraavan kuvion 1 mukaisesti.



Kuvio 1. Ainetta lisäävän valmistustavan kustannusten muodostuminen (National Institute of Standards and Technology 2014).

Kun ollaan tarkasteltu ainetta lisäävän valmistustavan valmistuskustannuksiin vaikuttavia tekijöitä, voidaan sen perusteella arvioida valmistuserän kustannuksia käyttäen National Institute of Standards and Technologyn kehittämää, yksinkertaistettua laskukaavaa. Yksittäisen kappaleen valmistuskustannukset saadaan, kun jaetaan valmistuserän kustannukset valmistettujen kappaleiden määrällä.

$$C_{am} = P_m * M + P_i * T, \text{ missä}$$

C_{am} = valmistuserän kokonaiskustannukset

P_m = valmistusmateriaalin kustannukset

M = valmistuserän kokonaismassa

P_i = epäsuorat kustannukset

T = valmistuserän valmistusaika.

Kaava 3. Ainetta lisäävän valmistustavan valmistuserän kustannusarvion laskukaava (National Institute of Standards and Technology 2014).

Ainetta lisäävän valmistustavan epäsuoria kustannuksia tutkiessa on hyvä ottaa huomioon, että ainetta lisäävällä menetelmällä valmistetut kappaleet saattavat vaatia enemmän jälkikäsittelyä kuin esimerkiksi ruiskuvalumenetelmällä valmistetut kappaleet. Mikäli kappale valmistetaan menetelmällä, jossa on käytettävä tukirakenteita, tulee ottaa huomioon näiden poistosta koitua ylimääräinen työmäärä, mikä voi korottaa epäsuoria valmistuskuluja huomattavasti. Valmistusmateriaalista riippuen tukimateriaaleista voi koitua myös ylimääräisiä materiaalikuluja, mikäli materiaalia ei voida kierrättää tuotantolaitoksessa tehokkaasti. Tästä johtuen suurempia sarjoja valmistettaessa on suositeltavaa käyttää ensisijaisesti menetelmää, jolla saadaan kappaleen pinnanlaatu riittävälle tasolle eikä menetelmä vaadi tukirakenteita. Tällaisia menetelmiä ovat SLS sekä sidosaineruiskutus.

Kustannusvertailua tehdessä, voidaan muodostaa yhtälö, jossa vertaillaan perinteisen valmistusmenetelmän kustannuksia ainetta lisäävän valmistustavan kustannuksiin. Vertailun tarkoituksena on hakea tuntemattomalle muuttujalle, tässä tapauksessa valmistettavan kappaleen määrälle arvo, jonka myötä yhtälön molemmat puolet ovat yhtä suuria, eli yhtälö on tosi. Kustannusvertailua tehdessä, tällaisesta tilanteesta voidaan puhua myös break-even pisteenä, milloin kustannukset ovat yhtä suuret kummallakin menetelmällä. National Institute of Standards and Technology käyttää omassa vertailussaan pelkistettyä kaavaa ruiskuvalumenetelmän kustannusten laskemiseen, mutta selkeyden vuoksi käytetään tässä työssä ainetta lisäävän valmistustavan kustannuksista johdettua kaavaa, jossa otetaan huomioon muiden kulujen lisäksi myös ruiskuvalu-muotista muodostuvat kulut.

$$\frac{P_{m,mi} * M_{mi} + P_{i,mi} * T_{mi} + P_{mo,mi}}{n} = P_{m,am} * M_{am} + P_{i,am} * T_{am} , \text{ missä}$$

$P_{m,mi}$ = ruiskuvalumenetelmän valmistusmateriaalin kustannukset

M_{mi} = ruiskuvalumenetelmän valmistuserän kokonaismassa

$P_{i,mi}$ = ruiskuvalumenetelmän operointikustannukset

T_{mi} = ruiskuvalumenetelmän kappaleen valmistusaika

$P_{mo,mi}$ = ruiskuvalumuotin kustannukset

$P_{m,am}$ = ainetta lisäävän valmistustavan valmistusmateriaalin kustannukset

M_{am} = ainetta lisäävän valmistustavan kappaleen kokonaismassa

$P_{i,am}$ = ainetta lisäävän valmistustavan epäsuorat kustannukset

T_{am} = ainetta lisäävän valmistustavan valmistusaika

n = valmistettavien kappaleiden lukumäärä.

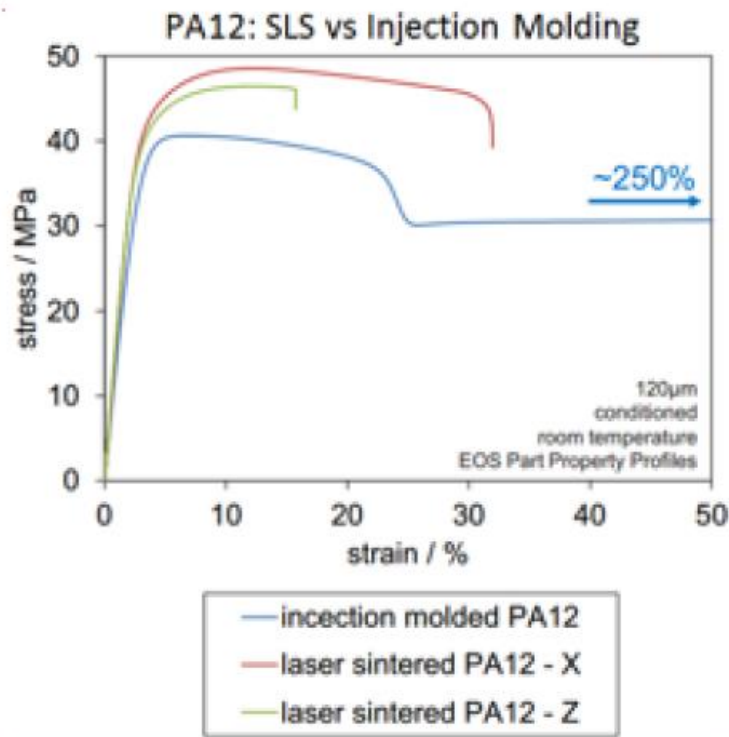
Kaava 4. Break-even pisteen määrittäminen kappaleen yksikköhinnan perusteella.

National Institute of Standards and Technologyn käyttämässä mallissa tutkitaan pelkästään yhden tietyn kappaleen valmistusta. Ainetta lisäävän valmistustavan etuina on se, että yhden valmistusprosessin aikana voidaan valmistaa useita erilaisia kappaleita samanaikaisesti. Useissa jauhepetimenetelmissä on mahdollista myös valmistaa kappaleita päällekkäin, jolloin koneen hyötysuhde paranee entisestään. Tämä mahdollistaa erittäin tehokkaan valmistusprosessin, jolloin on mahdollista valmistaa esimerkiksi useista kappaleista koostuvia tuotteita samalla laitteella, saman valmistusprosessin aikana.

6.4 Pikaruiskuvalun kustannusvertailu

Monikansallinen yhtiö Sculpteo on tehnyt erittäin havainnollistavan vertailun, milloin on järkevämpää valmistaa kappale ainetta lisäävän valmistustavan avulla ja milloin perinteinen ruiskuvalu on taloudellisempi ratkaisu. Tutkimuksessa käytettiin SLS-menetelmää ainetta lisäävänä valmistustapana. (Sculpteo 2016.)

Tutkimukseen valittiin viisi täysin erilaista kappaletta, joiden geometriat poikkesivat huomattavasti toisistaan. Tutkimuksen tarkoituksena oli etsiä kullekin tutkittavalle kappaleelle break-even piste. Tutkimus aloitettiin laatimalla tarjouslaskelmat kappaleille yrityksen oman hinnoittelun kautta. SLS-valmistusmenetelmän materiaaliksi valittiin Nylon 12 -muoviseos. Kerroskorkeudeksi määritettiin 100 mikrometriä, eli 0.10 millimetriä, näin valmiin kappaleen pinnanlaatu saatiin riittävän hyväksi ja näin ollen kappaleen pinnan jälkikäsittelyä ei tarvittu. (Sculpteo 2016.)

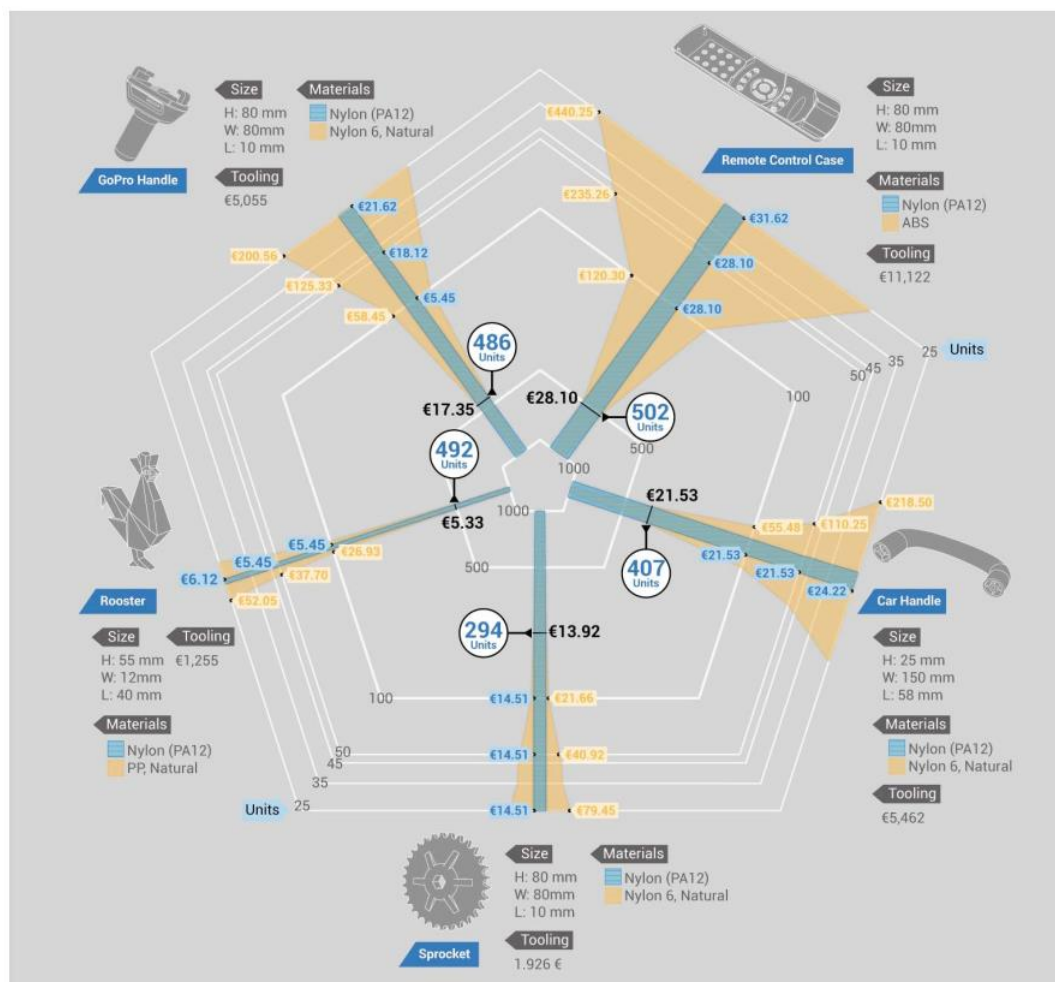


Kuvio 2. PA12 SLS vs PA12 ruiskuvalu jännitys-venymäkuvaaja (Sculpteo 2016).

Kuvio 1 tutkiessa voidaan havaita, että SLS-menetelmällä valmistetut kappaleet ovat jopa 20% vahvempia kuin ruiskuvalumenetelmällä valmistetut kappaleet. Tämä tarjoaa

mahdollisuuksia optimoida kappaleen rakennetta ja sitä kautta vähentää tarvittavan valmistusmateriaalin määrää. (Sculpteo 2016.)

SLS-menetelmän materiaalina käytettiin PA12-nylonia. Kappaleesta riippuen pikaruiskuvalumenetelmän materiaaleina käytettiin joko ABS-muovia, PP, eli polypropeenimuovia taikka Nylon 6 -muovia. Yhtenä vertailukappaleena käytettiin ajoneuvoon tarkoitettua ovenkahvaa, josta haluttiin tehdä ontto. Tämän kappaleen ruiskuvalumenetelmänä joudutaan käyttämään kaasuvusteista ruiskuvalua, missä muotin sisään johdetaan kaasua, jonka avulla kappaleeseen voidaan luoda monipuolisempia geometrioita tai, kuten tässä tapauksessa, kappaleesta voidaan tehdä ontto. (Sculpteo 2016.)

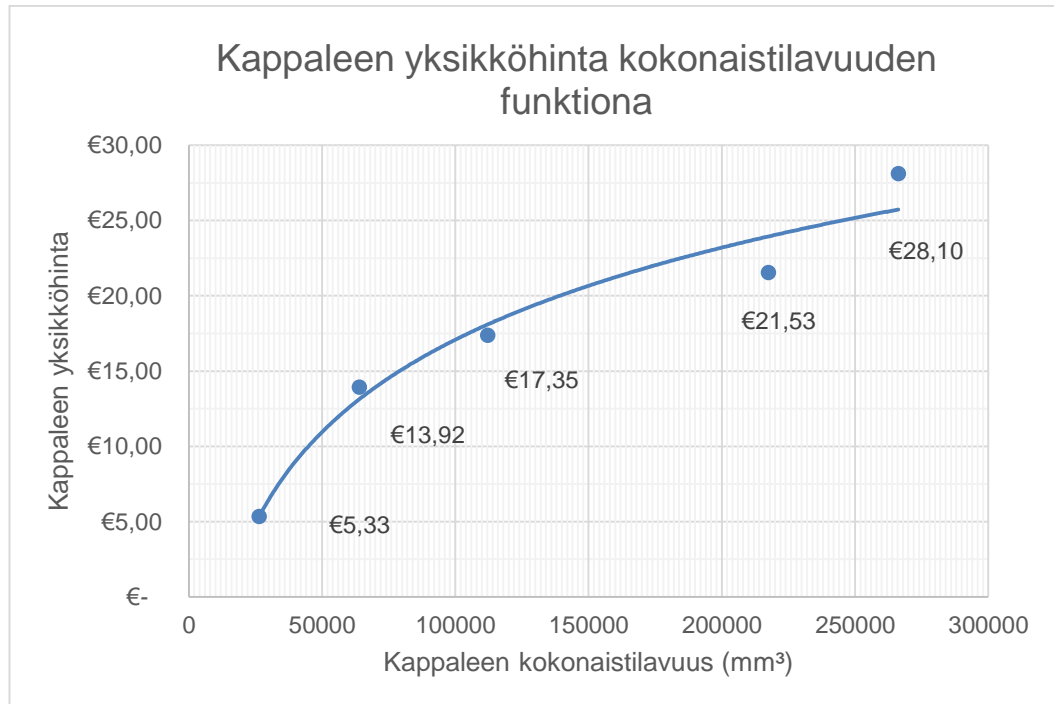


Kuvio 3. SLS-menetelmän sekä pikaruiskuvalumenetelmän kustannusvertailu (Sculpteo 2016).

Kun tutkitaan kustannusvertailusta luotua kuviota 3, voidaan havaita, että kappaleen ääriomilla on huomattava merkitys kappaleen valmistuskustannuksiin, käytettäessä

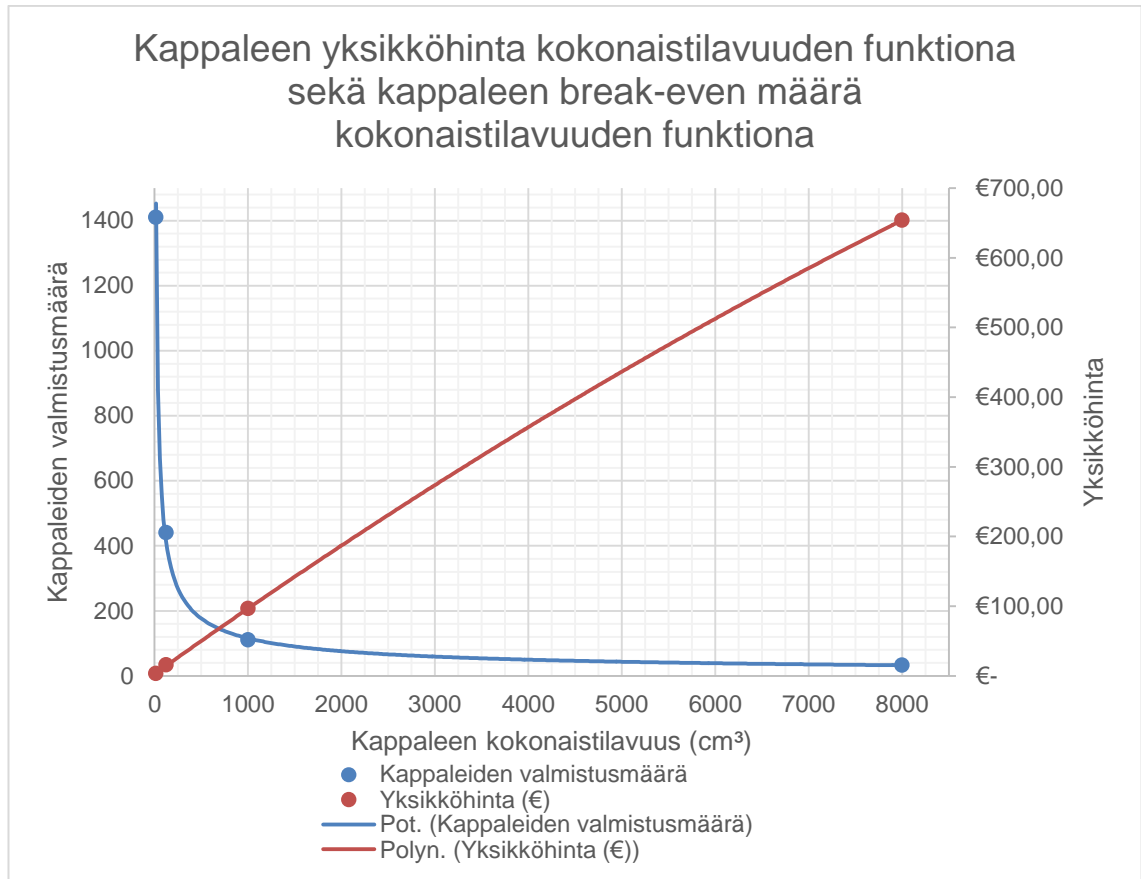
ainetta lisäävää valmistusmenetelmää. Äärimitoiltaan suurin kappale jota tutkittiin, oli kaukosäätimen ulkokuori. Tämän kappaleen äärimitat olivat $226 \times 62 \times 19$ mm, jolloin kappaleen vaatiman valmistusalan kokonaistilavuudeksi muodostuu $266\,228$ mm³. Kappaleen mitoista pituus oli huomattavan suuri, kun tutkitaan SLS-menetelmää hyödyntäviä valmistuslaitteita. Otetaan tutkittavaksi esimerkiksi EOS FORMIGA P 110 SLS-menetelmää hyödyntävä teollisuuskäyttöön tarkoitettu valmistusasema, jonka valmistuskammion mitat ovat $200 \times 250 \times 330$ mm, jolloin valmistuskammion kokonaistilavuudeksi saadaan $16\,500\,000$ mm³, eli $16,5$ dm³ tai $16,5$ litraa. Kuten huomataan, kappaleen äärimitat asettavat rajoitteita käytettäessä kyseistä laitetta. Kyseinen valmistuskammion tilavuus on erittäin yleinen teollisuudessa käytettävissä valmistusyksiköissä. Vertailussa pikaruiskuvaluun, huomataan että vaadittavien työkalujen ja muottien kustannukset ovat yli kaksinkertaiset verrattuna toiseksi suurimpaan kappaleeseen, joka on ajoneuvon ovenkahva. Tässä vertailussa on hyvä ottaa vielä huomioon, että ajoneuvon kahva valmistetaan kaasuvusteisella ruiskuvalulla, mikä lisää kustannuksia tämän kappaleen osalta. (Sculpteo 2016; EOS 2017b.)

Kuvio 3 tutkiessa voidaan huomata, että break-even pisteen saavuttamiseen näiden menetelmien välillä, tulee valmistusmäärien olla keskimäärin yli 430 kappaletta. Keskiarvon huomattavasti alittava kappale on hammaspyörä, jonka break-even saavutetaan jo 294 valmistetun kappaleen kohdalla. Tässä tapauksessa voidaan huomata, että kappaleen pikavalumenetelmän muotti- sekä työkaluista aiheutuvat kulut ovat suhteessa muiden kappaleiden kuluihin huomattavasti pienemmät. Ainoastaan kukko-kappaleen valmistukseen liittyvät kulut ovat hammaspyörää pienemmät. Tarkemmin näitä kahta kappaletta tutkiessa voidaan huomata, että hammaspyörän kokonaistilavuus on yli kaksinkertainen verrattuna kukko-kappaleeseen. Kukko-kappaleen kokonaistilavuuden ollessa $26\,400$ mm³, kun puolestaan hammaspyörän tilavuus oli $64\,000$ mm³. Tämä vaikuttaa suoraan kappaleen materiaalikuluihin, joista muodostuukin ainetta lisäävän valmistustavan suurin yksittäinen kustannus kappaleen kokonaisvalmistuskustannuksiin. (Sculpteo 2016.)



Kuvio 3. Kappaleen kokonaistilavuuden vaikutus kappaleen yksikköhintaan SLS-menetelmää hyödyntävässä valmistuksessa (Sculpteo 2016).

Kuviossa 3 esitetään kappaleen valmistuksessa vaatiman kokonaistilavuuden vaikutusta kappaleen yksikköhintaan. Kuvaajaa tutkimalla voidaan huomata, että kappaleen kokonaistilavuudella on selvä vaikutus kappaleen yksikköhintaan. Kyseinen kuvaaja on tehty SLS-valmistusmenetelmää hyödyntävän laitteen sekä materiaalien perusteella, mutta samaa mallia voidaan käyttää myös sidosaineruiskutusta hyödyntävän valmistusmenetelmän tuotantokustannuksia arvioidessa. Näin voidaan toimia, koska sekä SLS-menetelmällä, että sidosainemenetelmällä voidaan valmistaa kappaleita ilman ylimääräisiä tukirakenteita. Tämän lisäksi käyttämättä jäänyt materiaali jauhe voidaan uudelleen käyttää seuraavassa tuotantoerässä, jolloin hukkamateriaalia syntyy erittäin vähän tuotantoerää kohden.



Kuvio 4. Kappaleen kokonaistilavuuden vaikutus kappaleen yksikköhintaan verrattuna break-even valmistusmäärään (Sculpteo 2016).

Kuvio 4 on luotu Sculpteon tekemän kustannusvertailun perusteella, missä tutkittiin onton laatikon valmistuskustannuksia. Tutkimukseen oli valittu neljä, tasasivuista laatikkoa joiden sivujen mitat olivat $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ cm, $5,0 \times 5,0 \times 5,0$ cm, $10 \times 10 \times 10$ cm sekä $20 \times 20 \times 20$ cm. Näiden mittojen perusteella luotiin kustannusarviot kyseisten kappaleiden yksikköhinnoista käyttäen ainetta lisäävää valmistustapaa. Ainetta lisäävän valmistustavan yksikköhinta verrattiin ruiskuvalumenetelmällä valmistetun kappaleen tuotantokuluihin, jonka avulla voitiin määrittää jokaiselle kappaleelle oma break-even piste.

Kuvio sta 4 voidaan hyvin havaita, että pienten kappaleiden kohdalla break-even piste saavutettiin varsin suurilla tuotantoerillä. Tarkemmin tutkiessa kuvaajaa, voidaan havaita break-even määrän pienentyvän noin reilun kolmanneksen edellisestä tuotantomäärästä. Tämä voidaan selittää sillä, että suurempia kappaleita valmistettaessa ainetta lisäävällä menetelmällä, törmätään usein tilanteeseen, missä valmistuslaitteiston valmistuskammioon ei voida asettaa kuin muutamia kappaleita, useiden, jopa kymmenien sijaan. Tämä lisää epäsuoria kustannuksia näissä tuotantoerissä huomattavasti, mikä puolestaan korottaa kappaleen yksikköhintaa merkittävästi.

Yhteenvetona tutkimuksen tuloksista voidaan todeta, että ainetta lisäävän valmistustavan avulla voidaan valmistaa piensarjoja erittäin kustannustehokkaasti. Tämä tarjoaa mahdollisuuksia esimerkiksi pienyrityksille valmistaa pienempiä tuotantoeriä tuotteistaan, ilman huomattavaa taloudellista riskiä. Tuotanto on mahdollista aloittaa erittäin nopeasti, ilman muottien ja näihin liittyvien tarvikkeiden tilaamista, mahdollisesti toisesta yrityksestä. Tämä tarkoittaa myös tuotannon aloituksesta koituvien kustannuksien minimoimista.

7 3D-TULOSETTAVAN KAPPALEEN SUUNNITTELU

Suunniteltaessa kappaletta 3D-tulostettavaksi, tulee ottaa huomioon useita seikkoja kappaleen suunnittelussa. Hyvällä suunnittelulla, voidaan vaikuttaa kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin, valmiin kappaleen pinnanlaatuun sekä valmistusaikaan. Mikäli kappaleen suunnittelussa ei oteta huomioon valmistusmenetelmän mahdollisesti asettamia rajoitteita, voi kappale olla huomattavasti toivottua heikompi, tai kappale voi vaatia huomattavaa jälkikäsittelyä. Hyvällä suunnittelulla voidaan myös vähentää tarvittavan valmistusmateriaalin määrää merkittävästi. Kappaletta suunnittelussa tulisikin asettaa selkeät tavoitteet kappaleen mekaanisille ominaisuuksille sekä valmiin kappaleen toivotulle pinnanlaadulle.

7.1 Huomioon otettavia seikkoja

3D-tulostamalla valmistettavaa kappaletta suunnitellessa, tulee ensimmäiseksi miettiä valitun valmistustavan asettamat rajoitteet kappaleelle. Mikäli kappale valmistetaan tukirakenteita vaatimalla valmistusmenetelmällä, tulee mahdollisten tukirakenteiden vaatima tila ottaa huomioon kappaleen suunnittelussa. Tukimateriaalin määrää voidaan myös optimoida suunnittelemalla kappale mahdollisimman itsekantavaksi. Suuria kappaleita valmistettaessa mahdollisen tukimateriaalin määrä kasvaa, jolloin myös kappaleen valmistuskustannukset sekä valmistusaika kasvavat huomattavasti.

Hyvällä kappaleen suunnittelulla voidaan optimoida tarvittavan tukimateriaalin määrää ja näin ollen pienentää tarvittavan materiaalin määrää valmista kappaletta kohden. Laadukkaalla suunnittelulla voidaan kappaleen materiaalin määrää, heikentämättä kappaleen mekaanisia ominaisuuksia. 3D-tulostamalla valmistettu kappale voidaan usein muotoilla varsin vapaasti, jolloin perinteisillä menetelmillä vaikeaksi koetut muodot voidaan toteuttaa varsin helposti. Tämän vuoksi kappaleen materiaalikulut voidaan optimoida erittäin tarkasti.

7.2 3D-tulostettavan mallin suunnittelu

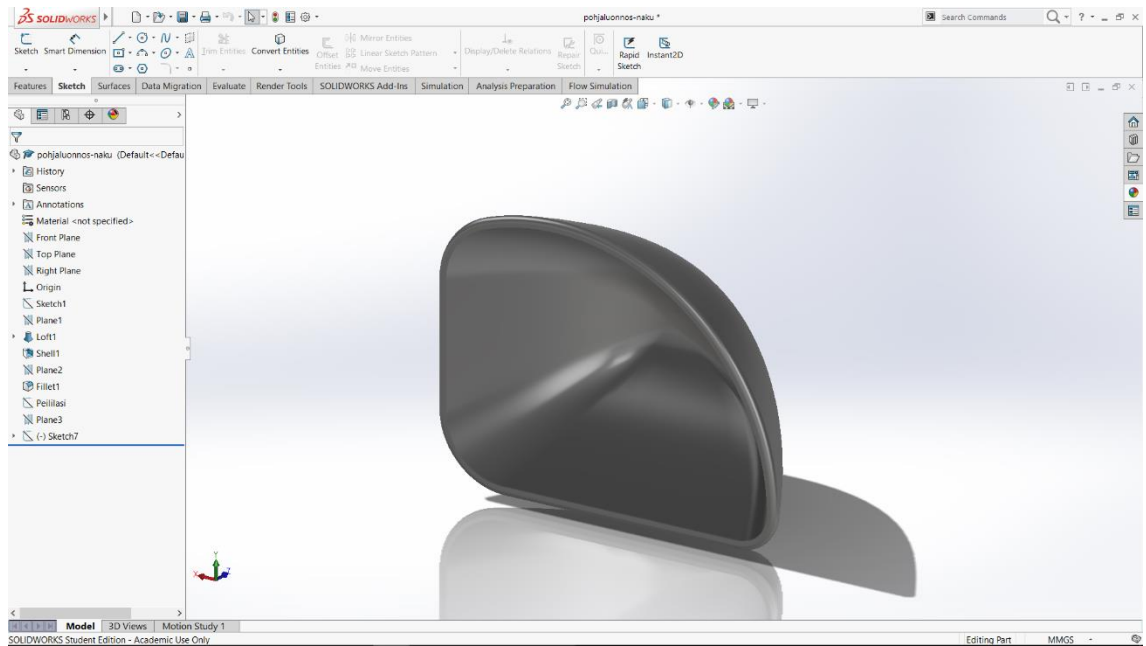
3D-tulostettavaa kappaletta suunniteltaessa tulee ottaa huomioon useita seikkoja, ennen varsinaista kappaleen suunnittelun aloittamista. Ensin tulee miettiä valmiin kappaleen mittoja, minkä perusteella voidaan valita valmistusmenetelmä. Suuria kappaleita ei välttämättä ole järkevää valmistaa menetelmällä, jonka seinämävahvuus ja kerroskorkeus ovat pieniä. Usein tällaisissa laitteissa myös valmistuskammio on pieni, mikä asettaa myös rajoitteita kappaleen koolle.

Kappaleen mittojen määrittämisen jälkeen tulee pohtia, minkälaiset vaatimukset valmiin kappaleen pinnanlaadulle asetetaan. Koska valmiin kappaleen pinnanlaatu on useimmissa valmistusmenetelmissä suoraan verrannollinen valmistusaikaan, on syytä pohtia miten suuren arvon määrittää valmiin kappaleen pinnanlaadulle. Suuria kappaleita valmistettaessa valmistusaika voi kasvaa huomattavasti menetelmästä riippuen, mikäli kappaleen pinta halutaan mahdollisimman laadukkaaksi, ilman jälkikäsitteilyä. Esimerkiksi pursotusmenetelmää käytettäessä kerroskorkeudella on oleellinen merkitys valmistusaikaa. Otetaan esimerkiksi 50mm korkea kappale, jolle valitaan kerroskorkeudeksi 0.10mm, tällöin kappale muodostuu 500 erillisestä kerroksesta, jolle materiaalia pursotetaan. Mikäli kerroskorkeudeksi valitaan 0.20mm, tulee erillisiä kerroksia vain 250. Kappaleen geometriasta riippuen, voi 0.10mm ero kerroskorkeudessa vaikuttaa erittäin merkittävästi valmiin kappaleen pinnan laatuun. Markkinoilta löytyy myös mallin viipalointiin tarkoitettuja ohjelmia, joissa on mahdollista käyttää mukautuvaa kappaleen viipalointia, jolloin ohjelma tunnistaa kappaleen geometrian vaihtelut, käyttäen suorissa pinnoissa suurempaa kerroskorkeutta, kuin kaarevissa pinnoissa. Mukautuvaa viipalointia tulee lähtökohtaisesti käyttää vain yhtä kappaletta, tai useaa samaa kappaletta valmistessa.

7.2.1 CAD-ohjelman käyttö

Valmistettavan kappaleen mallin luominen CAD-ohjelmalla on erittäin suuressa roolissa, kun halutaan valmistaa kappale 3D-tulostamalla. Kappaleen mallintajalla tulisi olla jonkin asteinen käsitys myös perinteisistä valmistusmenetelmistä, jolloin kappaleen suunnittelu olisi järjestelmällistä. Valmistettavan kappaleen suunnittelu voidaan aloittaa esimerkiksi samalla periaatteella, kuin jos kappale valmistettaisiin kiinteästi materiaali-

aihiosta, jolloin materiaalia poistetaan kappaleesta siihen pisteeseen asti, että kappale on saavuttanut lopullisen muotonsa.

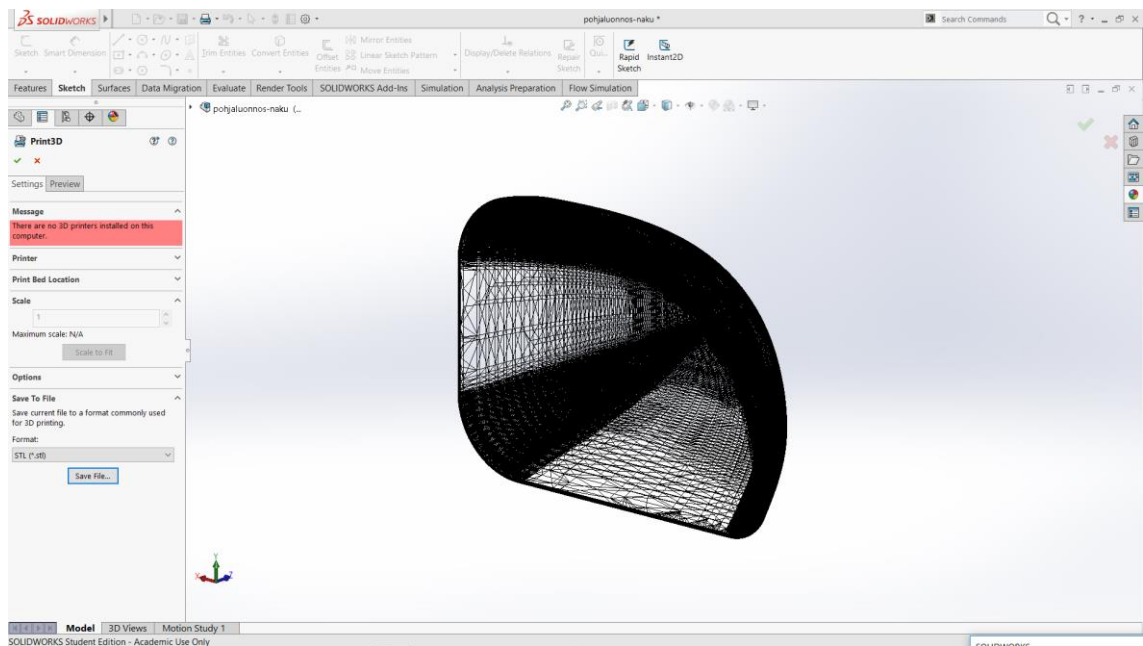


Kuva 35. SolidWorks 2016 työtilänäkymä.

Valmistettava kappale voidaan myös mallintaa samalla periaatteella, kuin jos valmistuisi 3D-tulostamalla, eli kappaleeseen lisätään materiaalia siihen pisteeseen asti, että kappale on saavuttanut lopullisen muotonsa. Näin suunnitteleamalla voidaan samalla pohtia mahdollisia muotoja, joiden avulla voidaan mahdollisesti vähentää mahdollisesti tarvittavan tukimateriaalin käyttöä.

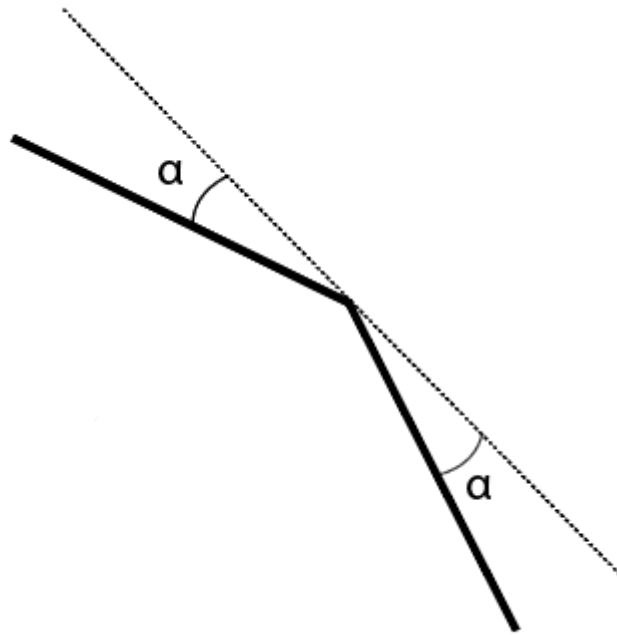
7.2.2 Tiedoston muuntaminen STL-muotoon

Kappaleesta luotu valmis 3D-tilavuusmalli tallennetaan ensin CAD-ohjelman käyttämään muotoon, esimerkiksi SLDPRT, joka on SolidWorks -ohjelmiston käyttämä tiedostomuoto. Kappale on näin helposti muokattavissa jälkikäteen. Jotta kappale voidaan valmistaa 3D-tulostamalla, tulee kappaleesta luoda STL-pintamalli. Pintamalli määrittää kappaleessa olevat ulkopinnat.



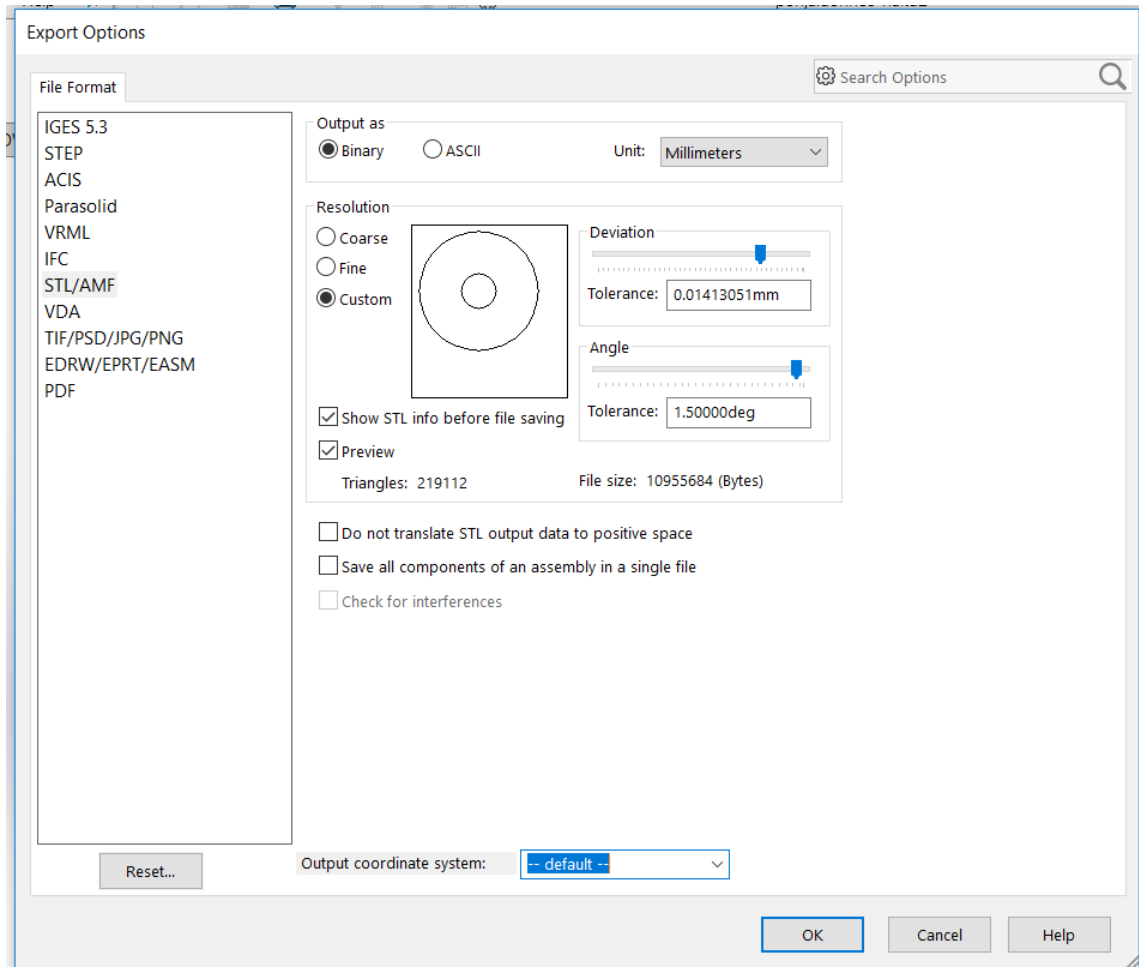
Kuva 36. Kappale muunnettuna STL-pintamalliksi SolidWorks 2016 -ohjelmassa

Kappaleen mallia muutettaessa STL-muotoon, voidaan kappaleen mallin tarkkuutta muokata. STL-muodossa kappaleen pinta muodostetaan tasokolmioista, joiden avulla kappaleen geometria muodostuu. Tasaisilla pinnoilla voidaan käyttää suuriakin tasokolmioita, kun puolestaan kaarevien pintojen luomiseen tulee tasokolmioiden kokoa pienentää huomattavasti, jotta kaarevalle pinnalle saadaan riittävä tarkkuus.

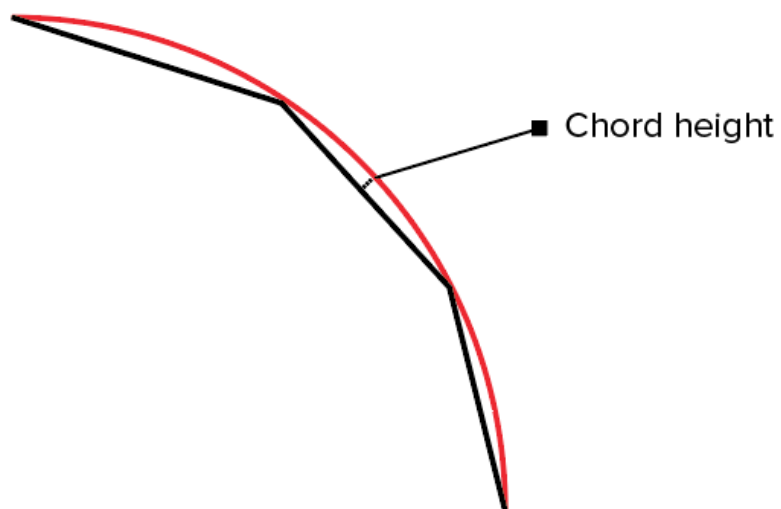


Kuva 37. Havainnekuva tasokolmioiden kulmapoikkeamasta (3D Hubs 2017b).

Yleisimmät CAD-ohjelmat tukevat suoraan STL-tiedostoksi tallentamista. CAD-ohjelmissa on mahdollista säätää sallittua poikkeamaa kolmion tasosta kaaren reunaan, eli niin sanottua jännekorkeutta. Yleinen ohje on, että jännekorkeus olisi 0,01 – 0,001 mm välillä. CAD-ohjelmasta riippuen on myös mahdollista säätää tasokolmioiden välistä kulmaa.



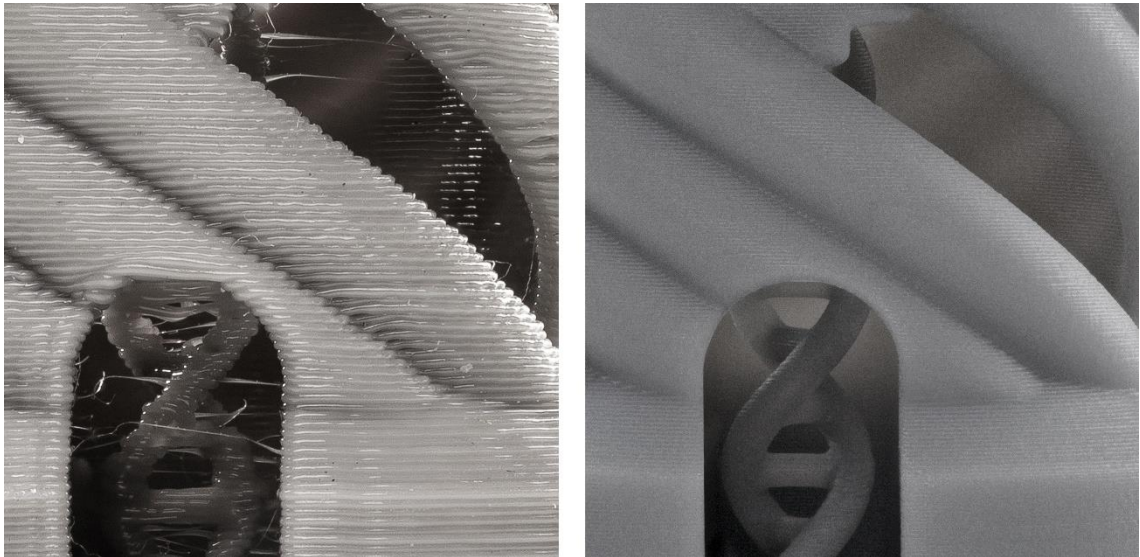
Kuva 38. STL-tiedoston parametrien säätö SolidWorks 2016-ohjelmassa.



Kuva 39. Havainnekuva jännekorkeuden mittaamisesta (3D Hubs 2017b).

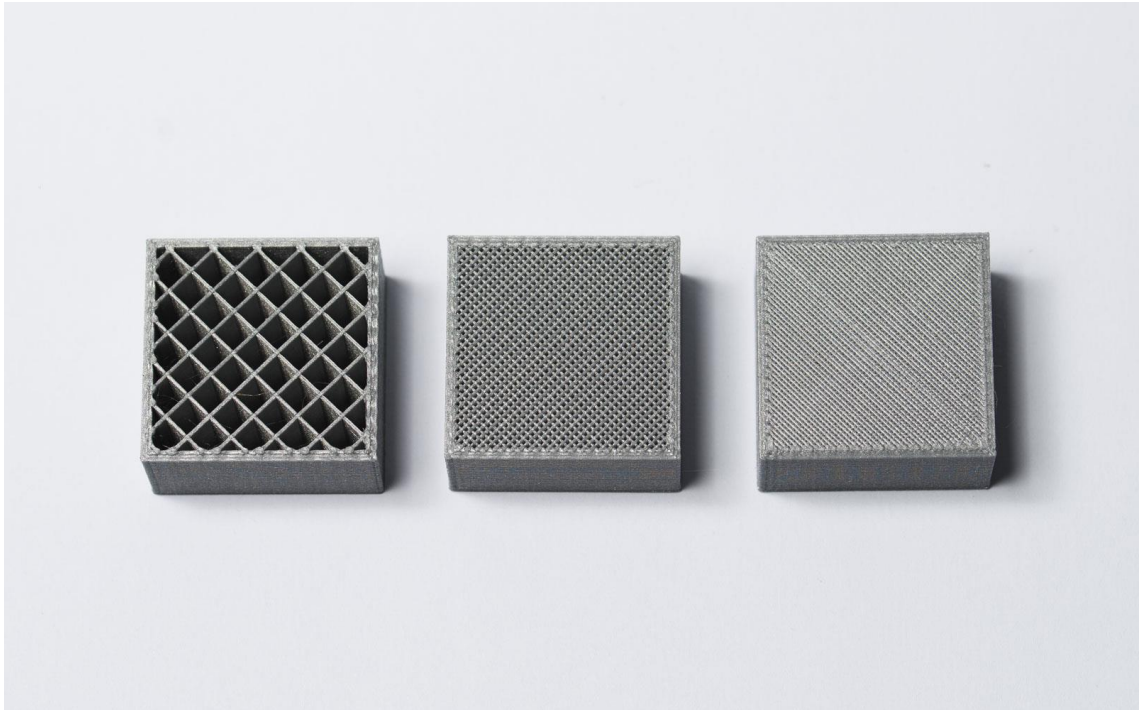
7.2.3 Tulostusasetusten määrittäminen

Kappaleen valmistusparametreja määritettäessä tulee ottaa huomioon useita seikkoja, joilla voidaan parantaa kappaleen pinnanlaatua ja mekaanisia ominaisuuksia. Valmistusmenetelmästä riippuen voidaan näiden parametrien avulla saada valmiin kappaleen ominaisuuksia muutettua huomattavasti. Valmiin kappaleen pinnanlaadun kannalta tärkein parametri on kerroskorkeus. Tätä parametria muuttamalla voidaan suoraan vaikuttaa valmiin kappaleen pinnanlaatuun. Kerroskorkeutta muuttamalla vaikutetaan myös kappaleen valmistusaikaan. Käytettäessä erittäin pientä kerroskorkeutta lisätään valmistuskoneen tekemää työtä, koska kone joutuu valmistamaan useamman kerroksen kappaleesta, kuin käytettäessä suurempaa kerroskorkeutta. Kerroskorkeuden vaikutusta kappaleen pinnanlaatuun esitetään kuvassa 40.



Kuva 40. Havainne kuva kerroskorkeuden vaikutuksesta valmiin kappaleen pinnanlaatuun (Formlabs 2018a).

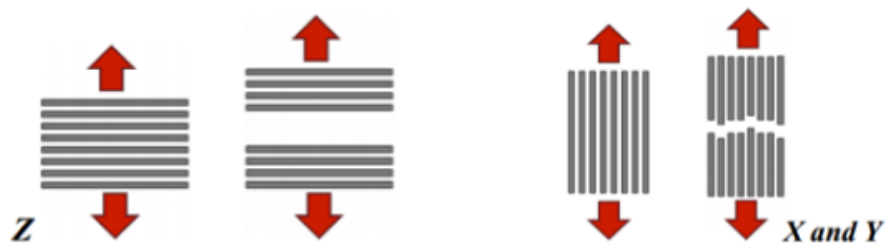
Valmistusmenetelmästä riippuen, voidaan kappaleen sisätäyttöä säätää, tästä termistä usein käytetään englanninkielistä nimitystä infill. Tällä parametrilla säädetään kappaleen sisään jäävän tilan täyttöä. Täyttöprosenttia säätämällä voidaan suoraan vaikuttaa valmiin kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin. Täyttöprosentin säädöllä vaikutetaan myös kappaleen valmistusaikaan sekä käytetyn valmistusmateriaalin määrään. Täyttöprosentin vaikutusta kappaleeseen esitetään kuvassa 41.



Kuva 41. Havainnekuva sisätäyttöprosentin vaikutuksesta (3D Hubs 2018c).

7.2.4 Kappaleen asennon merkitys

Jotta voidaan täysin ymmärtää kappaleen tulostusasetuksen merkitys valmiin kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin, on hyvä perehtyä kappaleen muodostumiseen ainetta lisäävällä valmistusmenetelmällä.



Kuva 42. Havainnekuva eri akseleiden merkityksestä kappaleen vahvuuteen (Sculpteo 2016).

Ainetta lisäävässä valmistustavassa kappale valmistuu aina kerroksittain. Jokaisen valmiin kerroksen jälkeen kappaleen tai tulostuspään asentoa muutetaan Z-akselin suuntaisesti, kerroskorkeuden verran. Käytännössä kappaletta, tai valmistuspetiä las-

ketaan tai nostetaan. Kun Z-akselin suuntainen muutos on tehty, aloitetaan uuden kerroksen valmistus. Tällainen valmistusmenetelmä asettaa omia haasteita kerroksien väliselle yhteenliittymiselle. Poikkeuksena voidaan mainita SLM-menetelmä, jossa kappale sulatetaan yhtenäiseksi kappaleeksi, jolloin varsinaisia kerrosten välisiä rajoja ei muodostu.

Jotta kappaleesta saadaan mahdollisimman kestävä, tulee suurin kuormitus kohdistua aina X- sekä Y-akselin suuntaisesti, jolloin kappaleen kerrosten välisiin liitoksiin ei kohdistu kuormitusta. Kappaleen hyvällä suunnittelulla voidaan myös optimoida mekaanisten rasitusten jakautumista kappaleessa, jolloin kappaleen valmistusasennon määrittäminenkin on helpompaa.

8 3D-TULOSTETUT OSAT KILPA-AUTOISSA

eRallycross-projektin tarkoituksena on luoda kilpa-ajoneuvo, jossa käytetään nykyaikaisinta tekniikkaa, sekä nykyaikaisia suunnittelu- sekä valmistusmenetelmiä. Onkin siis erittäin luontevaa käyttää ajoneuvon rakentamisessa myös 3D-tulostettuja osia. 3D-tulostusta käyttämällä voidaan kappaleisiin luoda juuri sellaisia ominaisuuksia kuin tarvitaan.

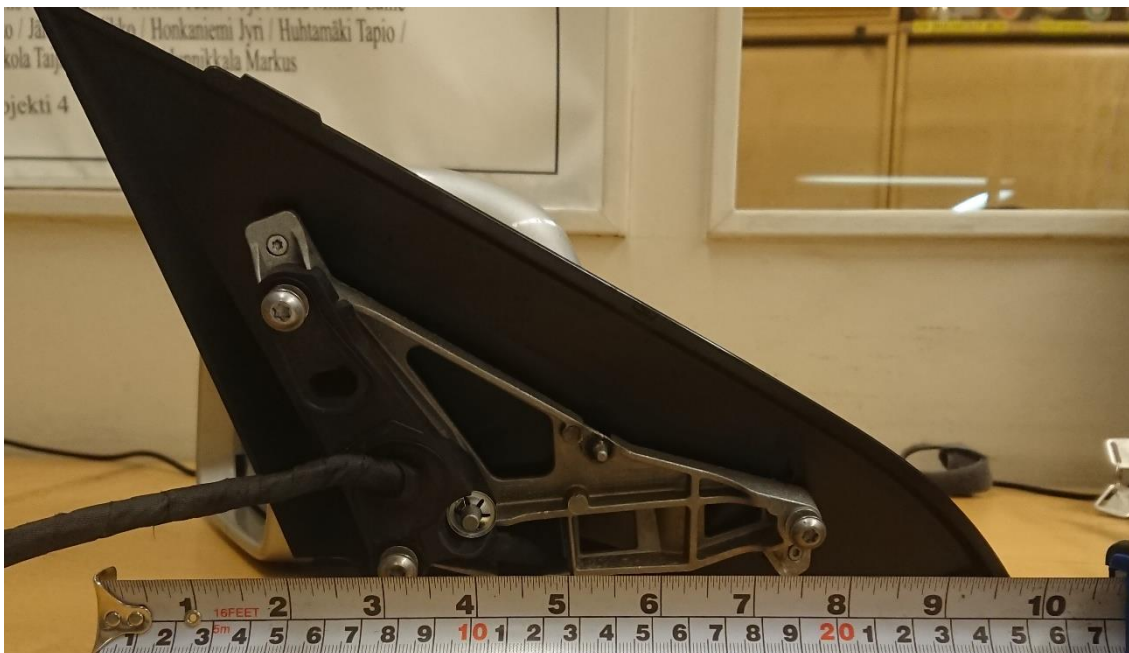
8.1 Case Study: Kilpa-auton peili

Tämän tutkielman tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa tulevaan kilpa-autoon peiliyksiköt. Suunnittelussa otettiin huomioon käyttötarkoitus sekä valmistusmenetelmän tarjoamat mahdollisuudet ja sen asettamat rajoitteet.



Kuva 43. Alkuperäinen peiliyksikkö avattuna.

Koska peiliyksikkö tuli kilpa-autoon, voitiin peiliyksikön rakennetta yksinkertaistaa huomattavasti alkuperäiseen verrattuna. Alkuperäinen peilikotelo on varustettu peilin asennon säätöyksiköllä, peililasin lämmityksellä sekä led-vilkkupaneelilla. Kokonaisuudessaan alkuperäisellä peilikotelolla kuorineen on 1310 grammaa.



Kuva 44. Peiliyksikön kiinnityspisteet.

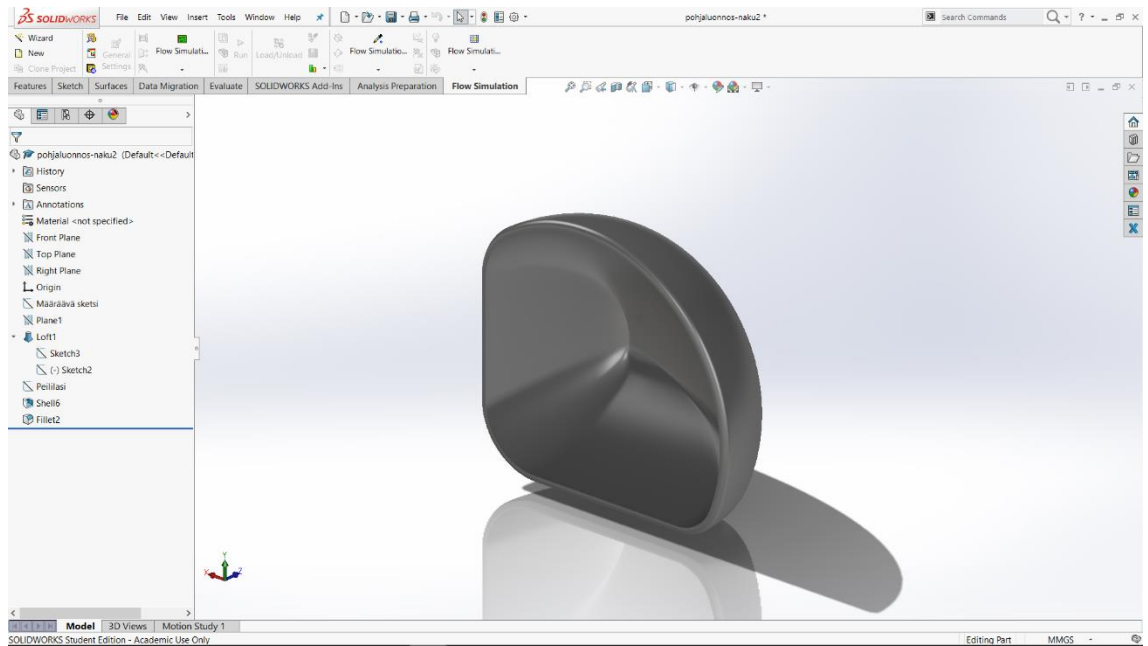
Peilikotelon maalattu kuori on valmistettu ABS-PC -muoviseoksesta. Peiliyksikön sisällä oleva tukirunko on valmistettu kevytmetallivalusta. Varsinainen peiliyksikön muovikuori on valmistettu ABS-muovin tapaisesta muovista.

8.1.1 Sääntöjen asettamat määräykset

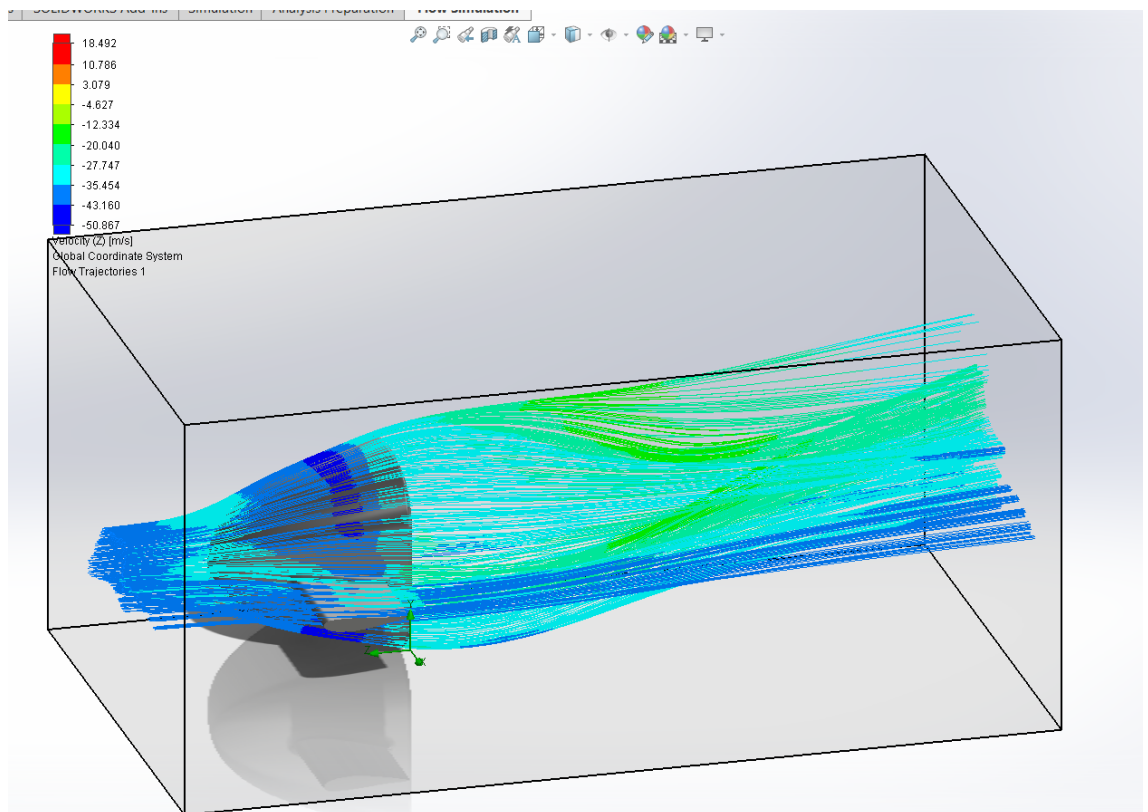
FIA-sääntöliitteen 279 artiklan 10.2.5 mukaan rallicross kilpa-autossa tulee olla kaksi kappaletta ulkopeilejä. Peilit sijoitetaan auton oikealle ja vasemmalle sivulle, 1 kappale per puoli. Peililasin pinta-alan tulee olla vähintään 90 cm^2 yhtä peiliä kohden. Peilikotelossa voi olla enintään 25 cm^2 kokoinen aukko ohjaamon tuuletusta varten. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

8.1.2 Suunnittelu

Peilikotelon suunnittelu aloitettiin määrittämällä peililasin vähimmäispinta-ala. FIA-määrittelee sääntöliitteessään erittäin tarkasti jokaisen kilpa-ajoneuvon yksityiskohdan, joten peililasin pinta-alan määrittämisessä voitiin käyttää FIA:n määrittämää pinta-alaa 90 cm^2 .



Kuva 45. Peilikotelon hahmottelua SolidWorks 2016 -ohjelmassa.



Kuva 46. 3D-mallin virtaussimulaatio SolidWorks 2016 -ohjelmassa.

Peilikotelon suunnittelussa lähdettiin hakemaan vaikutteita jo olemassa olevista kilpikäyttöön tarkoitetuista peiliyksiköistä. Näiden lisäksi inspiraatioita haettiin eri urheilumuotoissa olevista peilikotelo-rakenteista. Koska tarkoituksena oli suunnitella mahdollisimman aerodynaamiset sekä kuitenkin käyttökelpoiset peilikotelot, päädyttiin peilikotelon muodoksi valitsemaan varsin perinteinen, niin kutsuttu pisarapeili-malli. Tämän tyyllisissä peilikoteloissa peilikotelon muoto ottaa vaikutteita ilmassa tippuvasta vesipisarasta. Muoto on hyvin yleinen myös markkinoilla olevissa sarjavalmistetuissa autoissa.

Peilikotelon suunnittelussa käytettiin hyväksi SolidWorks 2016 -ohjelmasta löytyviä erittäin monipuolisia virtaussimulaatio-ominaisuuksia. Virtaussimulaatioista saatujen tulosten perusteella voitiin tehdä päätelmiä kappaleen muotojen vaikutuksesta ilmanvastukseen. Simulaatioissa keskityttiin tutkimaan ilmanvirran nopeuksia kappaleen pinnalla. Vaihtoehtoisesti tutkimuksessa olisi voitu tutkia ilmanpaineen muutoksia kappaleen ympärillä.



Kuva 47. Toyota Yaris WRC kilpa-auton aerodynaamisesti muotoillut peiliyksiköt (CAR Magazine 2017).

8.2 Case Study: Kilpa-auton katolle sijoitettu ilmanottoaukko

Tämän tutkielman tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa kilpa-auton katolle sijoitettava ohjaamon tuuletukseen tarkoitettu ilmanottoaukko. Koska yleisesti kilpaajoneuvoista puretaan alkuperäinen lämmitys- sekä jäähdytysjärjestelmä pois suodatusjärjestelmineen, tulee ohjaamon jäähdytys toteuttaa vaihtoehtoisella tavalla. Yleisin käytetty menetelmä on varustaa ajoneuvo katolle asennettavalla raitista ulkoilmaa ottavalla ilmanottoaukolla. Ajoviima ohjaa raitista ulkoilmaa sisälle auton ohjaamoon jäähdyttäen sitä. Sisään tulevalla ilmavirtauksella on myös paineistava vaikutus ohjaamon sisäilmaan pitäen mahdolliset pienhiukkaset poissa kuljettajan näkökentästä. FIA määrittelee tarkoin ilmanottoaukkoa koskevat rajaukset.



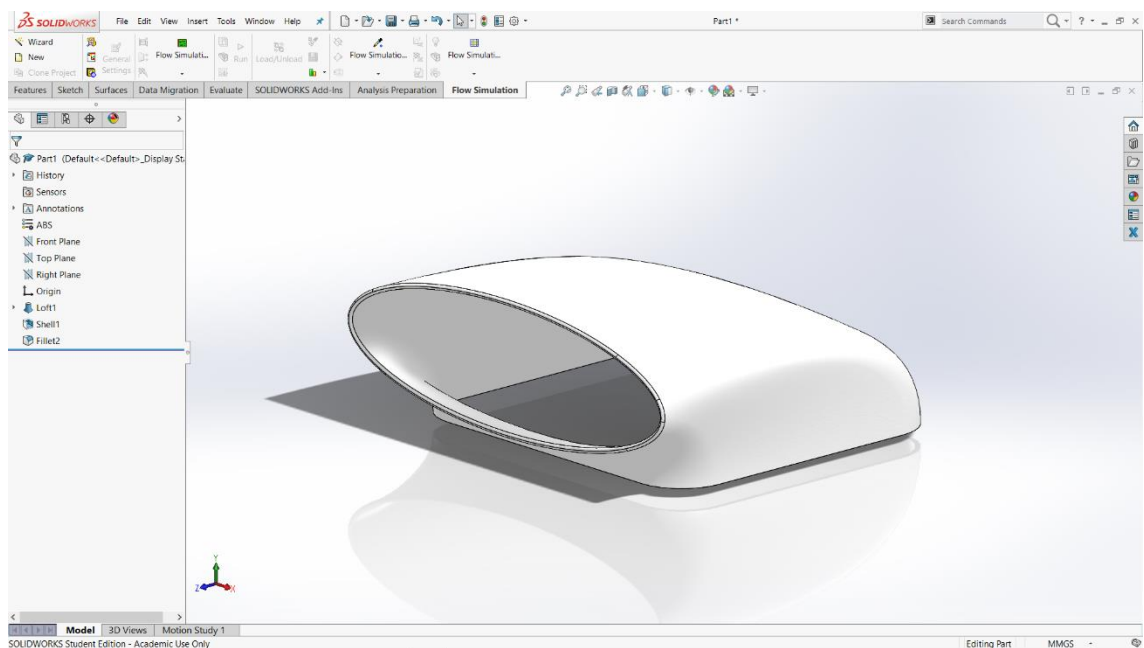
Kuva 48. Havainnekuva S1600 -luokan rallycross auton katolla olevista ilmanottoaukoista (Rally24 2016).

8.2.1 Sääntöjen asettamat määräykset

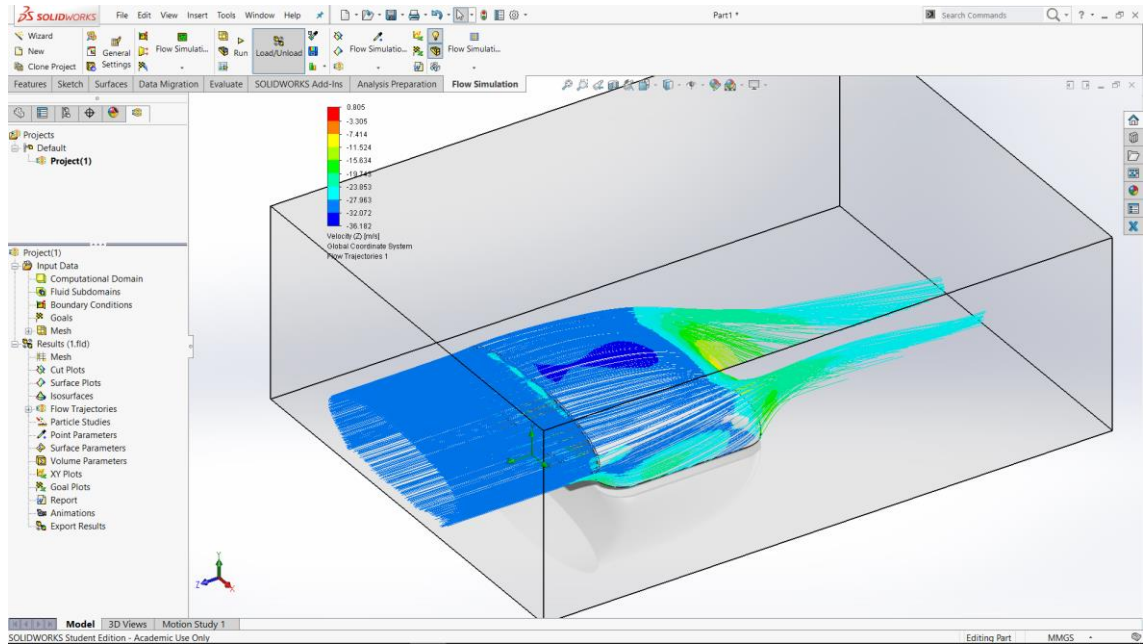
FIA-sääntöliitteen 279 artiklan 10.1.5 mukaan rallicross kilpa-autossa voi olla yksi- tai kaksiosainen ohjaamon jäähdytykseen tarkoitettu ilmanottoaukko. Ilmanottoaukon kokonaiskorkeus kattolinjasta mitattuna saa olla korkeintaan 100 mm. Ilmanottoaukon kokonaisleveys saa olla korkeintaan 500 mm. Ilmanottoaukko tulee sijaita ajoneuvon katon ensimmäisen kolmanneksen sisäpuolella. Tuulilasin etureunasta sallitaan 50 mm ylitys ajoneuvon keulan suuntaan. (Fédération Internationale de l'Automobile 2017.)

8.2.2 Suunnittelu

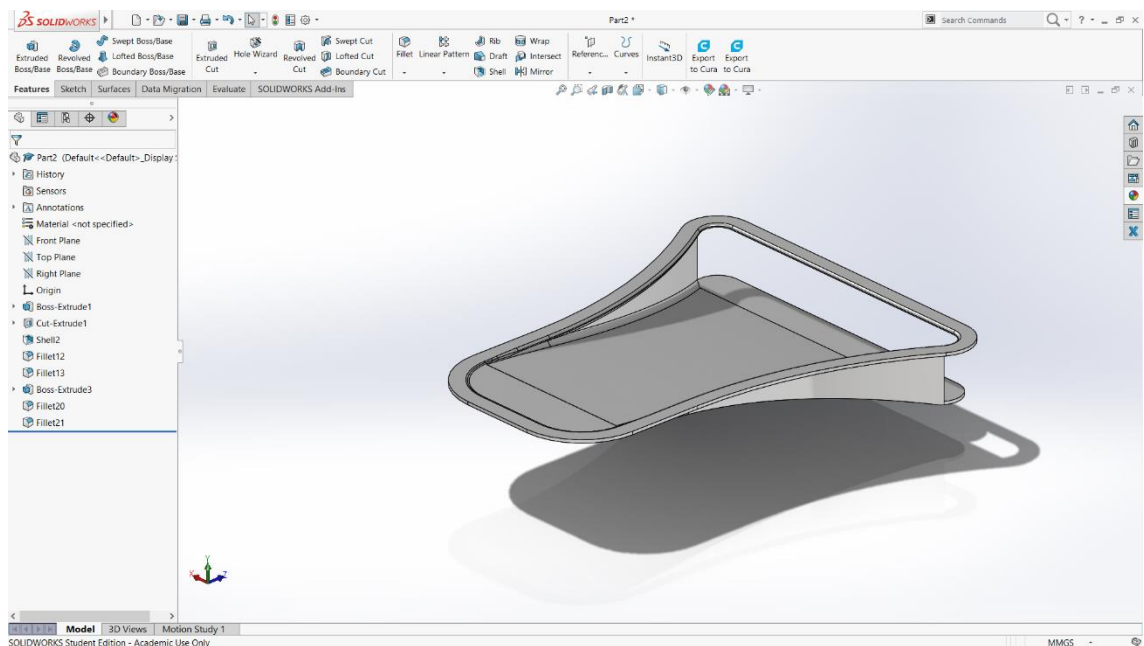
Suunnittelun alkuvaiheissa kartoitettiin tarkoin valmistusmenetelmän asettamia rajoitteita kappaleen koon suhteen. Vaihtoehtoina pohdittiin joko yksiosaista tai kaksiosaista kokonaisuutta. FIA:n asettamien rajoitusten mukaan kappaleen kokonaisleveys voi olla enimmillään 500 mm, tähän mittaan ei kuitenkaan käytössä olevien valmistuslaitteiden avulla päästä. Valmistuslaitteiden tarjoama enimmäisleveys on 380 mm, johon on syytä jättää myös pieni marginaali kappaleen sivuille. Näiden rajoitteiden johdosta kappaleen suunnittelussa kappaleen enimmäisleveydeksi päätettiin valita 360 mm.



Kuva 49. Ilmanottoaukon hahmottelua SolidWorks 2016 -ohjelmassa.



Kuva 50. Ilmanottoaukon virtaussimulaatio SolidWorks 2016 -ohjelmassa.



Kuva 51. Ilmanottoaukon eri variaatioiden hahmottelua SolidWorks 2016 -ohjelmassa.

Ilmanottoaukkoa suunnitellessa haluttiin kokeilla erilaisia variaatioita. Perinteisten ulko-
nevien ilmanottojen lisäksi haluttiin tutkia upotettavaksi tarkoitettun ilmanottoaukon toi-
mintaa sekä vaikutusta aerodynamiikkaan.

Kappaleiden valmistus

Ilmanottoaukkoa sekä peilikoteloja ei valmistettu tämän opinnäytetyön tekemisen aikana, koska kilpa-auton rakentaminen ei ollut vielä siinä vaiheessa, että koriin kiinnitettävät kappaleet olisivat olleet ajankohtaisia. Ilmanottoaukko sekä peilikotelot valmistetaan projektin edetessä siihen vaiheeseen, jolloin auton koriin aletaan kiinnittämään tarvittavia komponentteja.

Komponenteista luodut CAD-tiedostot ladataan projektin käytössä olevaan teamcenteriin, josta mallit ovat helposti ladattavissa, sekä tarpeen tullen muokattavissa.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda katsaus yleisimpiin ainetta lisääviin valmistusmenetelmiin, näiden menetelmien ominaisuuksiin, käytössä oleviin materiaaleihin sekä kustannusten muodostumiseen. Ainetta lisäävä valmistustapa on tällä hetkellä erittäin tiiviin tutkimuksen sekä kehityksen kohteena, jonka ansiosta aiheesta löytyi erittäin paljon varsin tuoretta informaatiota.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että ainetta lisäävä valmistustapa tarjoaa erittäin hyvän vaihtoehdon perinteisille valmistusmenetelmille. Ainetta lisäävän valmistustavan avulla voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä, sekä tietyissä tapauksissa lyhentää toimitusaikaa, menetelmän joustavuuden ansiosta.

Ainetta lisäävän valmistustavan kehittyneiden prosessien avulla voidaan valmistettavia kappaleita suunnitella entistä vapaammin, ilman valmistusmenetelmästä johtuvia rajoitteita. Tämä mahdollistaa kappaleelle lähes täysin vapaan muodon. Kun kappale voidaan suunnitella täysin uudella tavalla, voidaan kappaleeseen tarvittavan valmistusmateriaalin määrää pienentää huomattavasti, mikä puolestaan johtaa pienempään kappaleen yksikköhintaan.

Lean-ajatusmallia tutkimalla voidaan todeta, että ainetta lisäävä valmistustapa mahdollistaa huomattavasti tuotantoprosessien optimoimista ja turhien työvaiheiden poistamista. Tällä on selvä positiivinen vaikutus tuotantokustannuksiin.

Tarkastellessa suurempien tuotantomäärien kannattavuutta, voitiin todeta, että ainetta lisäävä valmistustapa ei vielä pysty kilpailemaan täysin perinteisten menetelmien kanssa. Tutkimuksesta saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että ainetta lisäävä valmistustapa on kannattava valmistusmenetelmä, kun valmistettavan kappaleen tuotantomäärät ovat alle 1000 kappaletta. Kappaleen koolla oli myös vaikutus tuotannon kannattavuuteen ainetta lisäävällä valmistustavalla. Mitä suurempi kappale oli kyseessä, sitä pienemmällä määrällä tuotettavia kappaleita, saavutettiin break-even piste verrattuna perinteiseen valmistusmenetelmään.

LÄHTEET

3D Hubs 2017a. Stratasys Dimension 1200es. Viitattu 09. helmikuuta 2018 <https://www.3dhubs.com/3d-printers/dimension-1200es>.

3D Hubs 2017b. 3D Printing STL files: A step-by-step guide. Viitattu 15. helmikuuta 2018 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-stl-files-step-step-guide>.

3D Hubs 2017d. Introduction to Material Jetting 3D Printing. Viitattu 16. maaliskuuta 2018 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing>.

3D Hubs 2017e. HP MJF vs. SLS: A 3D Printing Technology Comparison. Viitattu 16. maaliskuuta 2018 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison>.

3D Hubs 2017g. Industrial SLA/DLP vs. Desktop SLA/DLP. Viitattu 22. maaliskuuta 2018 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/industrial-slalpl-vs-desktop-slalpl>.

3D Hubs 2018c. What is 3D Printing? - The definitive guide to additive manufacturing. Viitattu 16. helmikuuta 2018 <https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing>.

3D Hubs 2018f. Automotive 3D Printing Applications. Viitattu 22. maaliskuuta 2018 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/automotive-3d-printing-applications>.

3D Printing Industry 2015. THE TOP 15 BIOPRINTERS. Viitattu 16. maaliskuuta 2018 <https://3dprintingindustry.com/news/top-10-bioprinters-55699/>.

3Dliligent ei pvm. Sheet Lamination (LOM, SDL, Electrosonic Welding). Viitattu 27. lokakuuta 2017 <http://www.3diligent.com/sheet-lamination/>.

3DTech 2013. About us. Viitattu 20. helmikuuta 2018 <http://3dtech.fi/fi/3dtech/about-us/>.

AKK-Motorsport ry 2015. Turvakehikko selkokielellä. AKK-Motorsport ry Viitattu 04. helmikuuta 2018 https://www.autourheilu.fi/site/assets/files/1395/turvakehikko_selkokielella_10_12_15.pdf.

All3DP 2016a. With Multi Jet Fusion, HP Challenges Injection Molding. Viitattu 08. helmikuuta 2018 <https://all3dp.com/multi-jet-fusion/>.

All3DP 2017c. Best Industrial 3D Printer 2017 – The 20 Most Advanced. Viitattu 16. maaliskuuta 2018 <https://all3dp.com/1/best-industrial-3d-printer-professional-commercial-3d-printers/>.

All3DP 2018b. 20 Best Resin (SLA/DLP) 3D Printers 2018. Viitattu 14. maaliskuuta 2018 <https://all3dp.com/1/best-resin-dlp-sla-3d-printer-kit-stereolithography/>.

Aniwaa 2017a. Wanhao Duplicator D7 DLP review. Viitattu 12. maaliskuuta 2018 <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/wanhao-duplicator-7-dlp/>.

Aniwaa 2018b. 3D printers comparison. Viitattu 22. maaliskuuta 2018 <https://www.aniwaa.com/comparison/3d-printers/>.

AutoWiki 2017. Mercedes-Benz W176. Viitattu 04. helmikuuta 2018 http://www.autowiki.fi/index.php/Mercedes-Benz_W176.

Canorama 2018. 3D-tulostustekniikat. Viitattu 01. helmikuuta 2018 <http://www.iitee.com/fi/3d-tulostimet/3d-tulostustekniikat>.

Car and Driver 2017. Mini Cooper Owners Can Design Custom 3D-Printed Parts. Viitattu 21. helmikuuta 2018 <https://blog.caranddriver.com/mini-cooper-owners-can-design-custom-3d-printed-parts/>.

CAR Magazine 2017. Toyota Yaris Gazoo hot hatch: 210bhp+ punch confirmed. Viitattu 19. maaliskuuta 2018.

Complex 2014. 10 Innovative cars that have 3D-printed parts. Viitattu 21. helmikuuta 2018 <http://www.complex.com/sports/2014/05/3d-printed-car-parts/>.

custompart.net 2017. Additive fabrication. Viitattu 26. tammikuuta 2018 <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>.

EOS 2017a. EOS M 400-4 – The Ultra-Fast Quad-Laser System with a Large Building Volume. Viitattu 09. helmikuuta 2018 https://www.eos.info/systems_solutions/eos-m-400-4.

EOS 2017b. FORMIGA P 110. Viitattu 07. maaliskuuta 2018 https://www.eos.info/systems_solutions/plastic/systems_equipment/formiga_p_110.

Fédération Internationale de l'Automobile 2017. Regulations. Viitattu 26. tammikuuta 2018 <https://www.fia.com/regulation/category/103>.

Filaments.ca 2015. Starter Temperatures & Printing Guide. Viitattu 03. lokakuuta 2017
<https://filaments.ca/pages/temperature-guide>.

Formlabs 2018a. When to Use Different Layer Heights. Viitattu 08. maaliskuuta 2018
<https://support.formlabs.com/hc/en-us/articles/115000015870-When-to-Use-Different-Layer-Heights>.

Formlabs 2018b. The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. Viitattu 12. maaliskuuta 2018
<https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>.

HP 2018. Koe 3D-tulostuksen vallankumous—esittelyssä HP:n vokseli. Viitattu 09. helmikuuta 2018
<http://www8.hp.com/fi/fi/printers/3d-printers.html>.

International Society of Biofabrication 2016. Bioink properties before, during and after 3D bioprinting. Viitattu 16. maaliskuuta 2018
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1758-5090/8/3/032002/meta>.

MAKER3D Oy 2017. Form 2 Standard tulostusmateriaalit. Viitattu 12. maaliskuuta 2018
https://www.3d-tulostus.fi/epages/3dtulostus.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/20131018-11092-264846-1/Products/frm-form-2-resin-standard.

Materialise 2017. Laser Sintering. Viitattu 20. helmikuuta 2018
<http://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/laser-sintering>.

National Institute of Standards and Technology 2014. Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing. National Institute of Standards and Technology Viitattu 22. helmikuuta 2018
<http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1176.pdf>.

PCMag 2017. The Best 3D Printers of 2017. Viitattu 12. maaliskuuta 2018
<http://uk.pcmag.com/printer-reviews/36506/guide/the-best-3d-printers-of-2017>.

pixel practice 2016. Brief History of 3D Printing Technology – A Timeline. Viitattu 16. maaliskuuta 2018
<https://pixelpractice.nyc/history-3d-printing/>.

Prospector 2018. Polylactic Acid (PLA) Typical Properties. Viitattu 26. tammikuuta 2018
<https://plastics.ulprospector.com/generics/34/c/t/polylactic-acid-pla-properties-processing>.

Rally24 2016. SUZUKI SWIFT S1600. Viitattu 20. helmikuuta 2018 <https://www.rally24.fr/rallycross-voitures/suzuki-swift-s-38577.html>.

Reuters 2017. Printed titanium parts expected to save millions in Boeing Dreamliner costs. Viitattu 21. helmikuuta 2018 <https://www.reuters.com/article/us-norsk-boeing/printed-titanium-parts-expected-to-save-millions-in-boeing-dreamliner-costs-idUSKBN17C264>.

Savonia Ammattikorkeakoulu 2016. ALVO - Ainetta lisäävän valmistuksen oppimisympäristö. Viitattu 20. helmikuuta 2018 <http://alvo.savonia.fi/>.

Sculpteo 2016. When is 3D Printing the best solution for production? Viitattu 23. helmikuuta 2018 <https://www.sculpteo.com/blog/2016/05/25/when-is-3d-printing-the-best-solution-for-production/>.

Six Sigma ei pvm. Lean ja johtaminen. Viitattu 22. 022 2018 <http://www.sixsigma.fi/fi/lean/yleinen/lean-ja-johtaminen/>.

SLM Solutions 2017. SLM METAL POWDER. Viitattu 20. helmikuuta 2018 <https://slm-solutions.com/products/accessories-and-consumables/slmr-metal-powder>.

Stratasys 2015. OBJET DENTAL 3D PRINTERS. Viitattu 16. maaliskuuta 2018 <http://www.stratasys.com/3d-printers/objet-260-500-dental-selection>.

The Guardian 2015. The latest advance in 3D printing: replacement teeth. Viitattu 16. maaliskuuta 2018 <https://www.theguardian.com/technology/2015/oct/31/3d-printing-plastic-replacement-teeth>.

Turun ammattikorkeakoulu 2018. eRallycross. Viitattu 24. maaliskuuta 2018 <https://erallycross.turkuamk.fi/>.

UPM 2018. Naturally perfect prints with UPM Formi 3D printing grades. Viitattu 22. maaliskuuta 2018 <https://www.upmformi.com/3D-printing/Pages/Default.aspx>.

Veho Oy Ab 2014. Mercedes-Benz A-sarjan mitat. Viitattu 04. helmikuuta 2018 https://www.mercedes-benz.fi/content/finland/mpc/mpc_finland_website/fi/home_mpc/passengercars/home/new_cars/models/a-class/w176/facts_/technicaldata/dimensions.html.