

**Materiaalia lisäävän valmistuksen
hyödyntäminen tarkkuusvalussa
3D-tulosteiden soveltuvuus vahamenetelmään**

Tommi Riihimäki

Opinnäytetyö

Toukokuu 2016

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), Kone- ja tuotantotekniikan tutkinto-ohjelma

Koneensuunnittelu

Tekijä Riihimäki, Tommi	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2016
	Sivumäärä 64 sivua ja liitteet 34 sivua	Julkaisun kieli Suomi
		Verkkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntäminen tarkkuusvalussa 3D-tulosteiden soveltuvuus vahamenetelmään		
Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikka		
Työn ohjaajat Salmela Janne, Heinonen Marko, Parviainen Miikka, Kivistö Hannu		
Toimeksiantaja Prosolve Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Prosolve Oy, joka on jyvaskyläläinen suunnittelutoimisto. Yritys suunnitteli uuden palvelun aloittamista, jossa asiakkaalla on mahdollisuus tilata 3D-tulosteesta valmistettu, tarkkuusvalettu kappale. Opinnäytetyössä tutkittiin, millä keinoin kyseinen palvelu oli mahdollista toteuttaa. Työ rajattiin käsittelemään tarkkuusvaluprosessin alkuosaa, eli valumallin valmistusta, sillä valukappaleen valmistuksesta valumalliin perustuen muodostui aihe toiseksi opinnäytetyöksi.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteina oli selvittää, toimeksiantajan materiaalia lisäävillä laitteilla valmistettujen, muovikappaleiden soveltuvuus tarkkuusvalumalleiksi ja suunnitella materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntävän tarkkuusvaluprosessin toteutus yrityksessä. Tavoitteiden saavuttamiseksi perehdyttiin ensin materiaalia lisäävän valmistuksen ja tarkkuusvalun teoriaan. Selvitettiin myös, oliko vastaavanlaisesta valmistusmenetelmien yhteiskäytöstä saatavilla prosessin suunnittelun kannalta hyödyllistä tietoa. Kerättyä tietoa hyödyntämällä määriteltiin valukappaleen valmistuksen työvaiheet, kartoitettiin yrityksen resurssit prosessia varten, suunniteltiin ja valmistettiin poltto- ja sulatusuuni, suunniteltiin testit, joiden perusteella valittiin valumallin materiaali ja optimoitiin yrityksen materiaalia lisäävien laitteiden valmistusasetukset. Valumallin valmistamisesta laadittiin myös työohje.</p> <p>Työn tuloksena oli prosessi valumallin valmistamiseksi yrityksen resursseilla ja työohje, jossa valumallin valmistus on opastettu kappaleen suunnittelusta alkaen. Yritykselle valmistettuja uuneja voitiin hyödyntää valukappaleiden valmistuksessa. Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin ja työssä määritellyn prosessin jatkokehittäminen aloitettiin yrityksessä. Työvaiheiden määrittäminen, prosessin testaus ja työohjeet loivat selkeän perustan prosessin jatkokehittämiselle varten.</p>		
Avainsanat (asiasanat) 3D-tulostus, materiaalia lisäävä valmistus, tarkkuusvalu, vahamenetelmä		
Muut tiedot		

Author Riihimäki, Tommi	Type of publication Bachelor's thesis Number of pages 64 p. and 34 p. appendices	Date May 2016 Language of publication: Finnish Permission for web publication: x
Title of publication Utilizing of additive manufacturing in precision casting Applicability of 3D-printed objects in the lost wax method		
Degree programme Mechanical and production engineering		
Supervisors Salmela Janne, Parviainen Miikka, Kivistö Hannu		
Assigned by Prosolve Oy		
Abstract <p>The thesis was assigned by Prosolve Oy, which is a design office located in Jyväskylä. The company had plans of starting a new service, where clients can order precision cast parts, made from 3D-prints. In the thesis, ways of making the new service possible were investigated. The investigation was limited to include only the beginning of the manufacturing process, the manufacturing of a casting model, because planning the process of manufacturing a casted part, based on the model, was assigned to another thesis.</p> <p>The goals of the thesis were to investigate the use of plastic parts, made with the company's additive manufacturing machines, in precision casting, and to plan a process for making precision casted parts, in which additive manufacturing would be utilized.</p> <p>To achieve these goals, theory of additive manufacturing and precision casting was examined and previous simultaneous use of these manufacturing methods was investigated. By applying the gathered knowledge, the steps of the new process were defined, the company's resources for the process were identified, furnaces needed were designed and built, tests were made to select the most suitable material for the casting models and the settings of the company's additive manufacturing machines were optimized. A work guide was also made for manufacturing casting models with the new process.</p> <p>The results of the thesis were, a process for making casting models, with the company's resources and a work guide, in which the designing and manufacturing of casting models with the new process is explained. The furnaces built will be used for making casted parts in the future. The goals set for the thesis were achieved and further development of the process was started in the company. The definition and testing of the new process and the work guide set a solid basis for further development of the process.</p>		
Keywords/tags (subjects) 3D-printing, additive manufacturing, precision casting, lost wax method		
Miscellaneous		

Sisältö

1	Termit ja lyhenteet.....	5
2	Johdanto.....	7
3	Työn toimeksiantaja.....	8
4	Opinnäytetyön aihe ja tavoitteet.....	9
	4.1 Aiheen määrittely.....	9
	4.2 Tavoitteiden määrittely.....	10
5	Materiaalia lisäävä valmistus.....	10
	5.1 Termien määrittely.....	10
	5.2 Periaatteen kuvaus.....	11
	5.2.1 STL-tiedostomuoto.....	12
	5.2.2 Viipaloitu malli.....	13
	5.3 Käyttösovellutukset.....	14
	5.4 Edut ja haasteet.....	15
6	Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät.....	17
	6.1 Menetelmien jaottelu.....	17
	6.2 Menetelmien toimintaperiaatteita.....	18
	6.2.1 SLA-menetelmä.....	18
	6.2.2 SLS-menetelmä.....	19
	6.2.3 FDM-menetelmä.....	21
	6.2.4 Polyjet-menetelmä.....	23
	6.2.5 CLIP-menetelmä.....	24
	6.3 Käytetyt materiaalit.....	25
	6.3.1 Käytetyt materiaalit FDM-menetelmässä.....	25
	6.3.2 PLA-materiaali.....	26
	6.3.3 ABS-materiaali.....	26
7	Tarkkuusvalu.....	27
	7.1 Tarkkuusvalumenetelmät.....	27

	2
7.1.1	Vahamenetelmä28
7.2	Valukappaleen kutistuma30
7.3	Valamisen edut valmistusmenetelmänä30
7.4	Tarkkuusvalumallien 3D-tulostamisen etuja ja haasteita30
8	Tarkkuusvaluprosessin suunnittelu toimeksiantajalle31
8.1	Aiempi tieto vastaavista prosesseista32
8.2	Prosessin määrittely32
9	Yrityksen resurssien kartoitus prosessia varten34
9.1	3D-skannerit35
9.1.1	Nextengine 3D-skanneri35
9.1.2	Faro-keilain36
9.2	Materiaalia lisäävät valmistuslaitteet36
9.2.1	Felix 3.037
9.2.2	Felix Pro138
9.3	Filamentit39
9.4	Ohjelmistot39
9.5	Valu-uunit40
9.5.1	Suunnittelu40
9.5.2	Rakentaminen42
9.6	Valmistustilat47
9.7	Yhteenveto resursseista47
10	Valumallin materiaalin valinta prosessille47
10.1	Valumallin materiaailta vaadittuja ominaisuuksia47
10.2	Alustava materiaalien rajaus48
10.3	Polttotesti49
10.3.1	Testin suunnittelu49
10.3.2	Testin toteutus49

10.3.3 Tulosten tarkastelu	49
11 Valmistuslaitteiden asetusten optimointi	50
11.1.1 Optimointitestin suunnittelu	51
11.1.2 Optimointitestin toteutus.....	52
11.1.3 Tulosten tarkastelu	53
12 Muottikuoren muodostustesti	54
12.1 Testin toteutus	54
12.2 Tulosten tarkastelu.....	55
13 Työohjeen laatiminen.....	55
14 Pohdinta	56
Lähteet.....	61
Liitteet	65
Liite 1. Polttouunin kustannusarvio	65
Liite 2. Valmistuslaitteiden optimointitestin tulokset.....	65
Liite 3. Valumallien valmistuksen työohje.....	65

Kuviot

Kuvio 1. Prosolve Oy:n organisaatorakenne	9
Kuvio 2. Työn kulku materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä	12
Kuvio 3. Erimuotoisia CAD-malleja ja niiden STL-muunnoksia	13
Kuvio 4. Viipaloitu malli kokonaisena ja halkaistuna	14
Kuvio 5. Stereolitografian toimintaperiaate	18
Kuvio 6. SLS-menetelmän toimintaperiaate	20
Kuvio 7. FDM-menetelmän toimintaperiaate	21
Kuvio 8. Polyjet-menetelmän toimintaperiaate.....	23
Kuvio 9. CLIP-menetelmän toimintaperiaate	25
Kuvio 10. Kuorimuottimenetelmän työvaiheet	28
Kuvio 11. Tarkkuusvalukappaleen valmistuksen prosessikaavio	33
Kuvio 12. Nextengine 3D-skanneri	35
Kuvio 13. Faro Focus 3D 120	36

Kuvio 14. Felix 3.0-3D-tulostin	37
Kuvio 15. Felix Pro1-3D-tulostin.....	38
Kuvio 16. Polttouunin 3D-malli	41
Kuvio 17. Tynnyrin ylimääräisen osan poisto.....	42
Kuvio 18. Tynnyrien vuoraus tulenkestävällä villalla	43
Kuvio 19. Kaasun syöttöaukko	43
Kuvio 20. Kaasun syöttöputken ja tulenkestävien tiilten paikoitus	44
Kuvio 21. Polttouunin muuraus	44
Kuvio 22. Polttouunin korotusosa	45
Kuvio 23. Polttouunin kansi.....	45
Kuvio 24. Polttouunin kokoonpano.....	46
Kuvio 25. Sulatusuunin kokoonpano.....	46
Kuvio 26. Filamenttilangat ennen polttoa ja palamistuotteet.....	50
Kuvio 27. Asetusten optimoinnissa käytetyn kappaleen 3D-malli.....	52
Kuvio 28. Testikappaleet järjestettynä kokonaispisteiden mukaan	53
Kuvio 29. Keraamikuoren muodostaminen valumallin pinnalle	55
Kuvio 30. Valukappaleiden valmistus.....	59

Taulukot

Taulukko 1. Materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien kategoriat	17
Taulukko 2. Tarkkuusvalumenetelmät	28
Taulukko 3. AM-laitteiden optimiasetukset PLA-filamentille	54

1 Termit ja lyhenteet

3D	Kolmiulotteinen, lyhenne sanoista three dimensional.
3D-skannaus	Kolmiulotteisen mittatiedon kerääminen fyysisen objektin geometriasta 3D-skannerilla.
3D-skanneri	Laite, joka tallentaa reaali maailman kohteesta koordinaattipisteitä, joiden avulla kappaleesta voidaan muodostaa digitaalinen malli.
3D-tuloste	Materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettu kappale.
3D-tulostin/AM-laite	Laite, joka tietokoneohjatusti valmistaa kappaleen ainetta lisäävällä menetelmällä.
3D-tulostus	Puhekielessä käytössä oleva nimitys materiaalia lisäävistä valmistusmenetelmistä.
ABS	Akryylnitriilibutadieenistyreeni, muovimateriaali, joka on yleisesti käytössä teollisuudessa ja yleisimpiä materiaalia lisäävässä valmistuksessa käytettyjä materiaaleja.
AM	Lyhenne sanoista Additive Manufacturing. Lyhenteellä viitataan materiaalia lisääviin valmistusmenetelmiin.
CAD	Lyhenne termistä Computer-aided Design, suomeksi tietokoneavusteinen suunnittelu. Esimerkiksi esineen mallintaminen mallinnusohjelmalla on tietokoneavusteista suunnittelua.
FDM	Lyhenne sanoista Fused Deposition Modeling. Materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä, jossa sulaa termoplastista materiaalia pursotetaan suuttimen läpi mallin luomiseksi.
Filamentti	FDM-menetelmässä kappaleen valmistukseen käytetty materiaalilanka.

Fotopolymeeri	Polymeeri, jonka ominaisuudet muuttuvat, kun se altistuu valolle. Monet materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät perustuvat materiaalin kovettamiseen UV-valolle altistamalla.
G-koodi	Yleisin numeerisesti ohjattujen laitteiden ohjelmointiin käytetty koodikieli. Myös AM-laitteilla kappaleen valmistus perustuu G-koodina kirjoitetuille liikekäskyille.
Lasiirtymälämpötila	Lämpötila, jonka yläpuolella materiaali muuttuu helposti muovattavaksi. Lasiirtymälämpötila on aina alhaisempi kuin materiaalin sulamislämpötila. Lasiirtymä ei ole olo- muodon muutos, vaikka materiaalin fyysisissä ominaisuuksissa tapahtuu muutoksia.
PLA	Lyhenne sanasta polylaktidi. Polylaktidi on biohajoava muovimateriaali, joka on yleisesti käytetty valmistusmateriaali FDM-menetelmässä.
STL	Lyhenne sanasta stereolitografia. STL-tiedosto sisältää vain kappaleen pintageometrian, ei väriä tai muita ominaisuuksia. Kappaleen geometria on STL-tiedostossa muodostettu kolmioista.
Termoplastinen	Lämmön ja paineen avulla uuteen muotoon muovattava. FDM-menetelmässä käytetyt muovimateriaalit ovat termoplastisia.
UV	Lyhenne sanasta ultravioletti. Ultraviolettisäteily on sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on lyhyempi kuin näkyvän valon.

2 Johdanto

Viime vuosina materiaalia lisäävä valmistus eli tunnetummalta nimeltään 3D-tulostus on ollut esillä enimmäkseen harrastajakäyttöön suunnattujen, työpöydälle mahtuvien laitteiden muodossa. Kuitenkin myös teollinen valmistus on alkanut hyödyntää yhä enemmän materiaalia lisäävää valmistusta. Perinteisesti menetelmää on käytetty prototyyppien tekoon. Maailmalla kuitenkin yhä useampi yritys hyödyntää menetelmää myös lopputuotteiden valmistukseen, esimerkiksi piensarjatuotannossa. Suomessa vasta muutama yritys hyödyntää kolmiulotteista tulostusta lopputuotteiden valmistuksessa. Esimerkiksi Kalevala Koru valmistaa korujen valumuottien valmistamiseen tarvittavat vahamallit materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä. Materiaalia lisäävän valmistuksen ja muiden tekniikoiden yhdistelmät lisäävätkin menetelmän kiinnostavuutta yritysten näkökulmasta. (Rantanen 2015.)

Materiaalia lisäävä valmistus on globaalisti kiinnostavimpia valmistustekniikan kehittämiskohteita. Sille on luotu suuret odotukset ja menetelmää on jo nyt sovellettu hyvin laajasti. Uuden teknologian käyttöönotto ei kuitenkaan Suomessa ole vielä pitkällä. Yritykset voivat potentiaalisesti hyötyä materiaalia lisäävästä valmistuksesta tutkimalla, onko tuotteista mahdollista tehdä parempia soveltamalla menetelmän uusia mahdollisuuksia. (Piili, Matilainen & Salminen 2016.)

Valaminen on vanhin metallien muotoilumenetelmä. Vanhin tunnettu valamalla valmistettu kappale on tehty jo yli 5000 vuotta sitten. Nykyään valimoteollisuus on perusteollisuutta, joka tuottaa esineitä kaikille elämän alueille laivanpotkureista ja paistinpannuista ihmiskehon titaanisiin implantteihin. Valaminen on lyhin reitti muodoltaan monimutkaisen kappaleen valmistamiseksi. Esineen valmistaminen valamalla vaatii valumallin, jonka muoto on valettavan esineen negatiivi, huomioiden kuitenkin valun mahdollistavat muodot, kuten päästöt ja helpotukset. Valumalleja valmistetaan puusta, muovista, vahasta tai metallista. Vanhimmat valumallit on valmistettu vahasta, ja vielä nykyisinkin tarkkuusvalua tehdään yleisesti vahamenetelmällä. Valumallin valmistaminen on tarkkuusvaluprosessin aikaa vievin ja haastavin osuus. Sen valmistuskustannukset ovat usein myös suurin valukappaleen hintaan vaikuttava tekijä. Suurin osa valumalleista tehdään koneistamalla, mutta

esimerkiksi taide-esineitä varten valumalleja valmistetaan yhä usein käsin. (Autere, Ingman & Tennilä 1982, 7; Pohjalainen 1997, 4-5.)

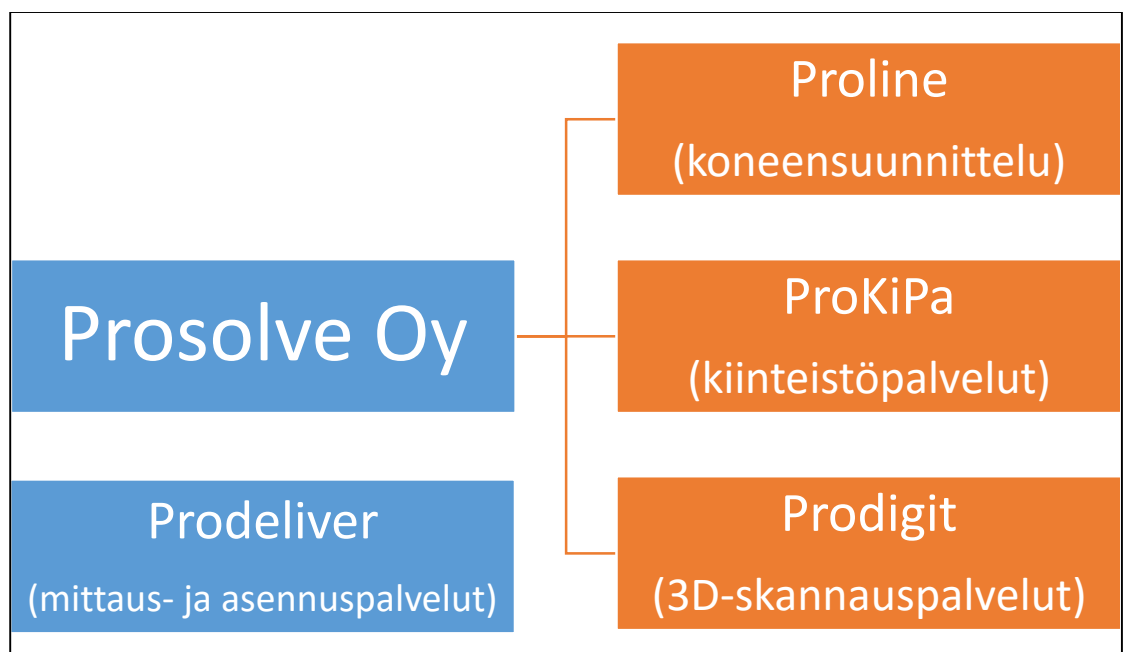
Yritysten kasvava kiinnostus materiaalia lisäävää valmistusta kohtaan vauhdittaa entisestään menetelmän nopeaa kehitystä. Hyödyntämällä menetelmää valumallien valmistuksessa, voidaan valmistaa muodoltaan sellaisia malleja, joiden valmistaminen muilla menetelmillä ei ole yhtä tehokasta, tai välttämättä edes mahdollista. Tästä esimerkkejä ovat monimutkaiset sisäiset tukirakenteet, jotka materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistuvat umpinaisen kappaleen sisälle samanaikaisesti kappaleen valmistuessa. Materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä valumalleja on myös mahdollista valmistaa edullisemmin ja nopeammin kuin muilla menetelmillä.

Valukappaleita valmistavilla yrityksillä on käytössä tähän tarkoitukseen soveltuvia AM-laitteita, jotka valmistavat joko valumalleja vahasta tai suoraan keraamisia valumuotteja. Tällaiset laitteet maksavat kuitenkin yhä kymmeniä tuhansia euroja, mikä on rajoittanut materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämistä valukappaleen valmistusprosessissa. Mikäli uusilla edullisilla AM-laitteilla valmistetut muovimallit soveltuvat laajalti vahamallien korvaajiksi, voi se alentaa yritysten kynnystä valmistaa yksittäiskappaleita ja piensarjoja valamalla omassa yrityksessä. Valukappaleita valmistavat yritykset voivat saavuttaa kustannussäästöjä korvaamalla perinteisesti valmistettuja valumalleja edullisilla muovimalleilla.

3 Työn toimeksiantaja

Prosolve Oy on kahden insinöörin vuonna 2004 perustama suunnittelutoimisto. Yritys tarjoaa teknistä suunnittelua, konsultointia, sekä laserkeilaus-, 3D-skannaus- ja 3D-tulostuspalveluita. Yritys on toiminut aikaisemmin nimellä Proline. Vuonna 2005 yritysmuoto vaihtui osakeyhtiöksi. Kahta vuotta myöhemmin yritys alkoi tarjota kiinteistöpuolen palveluita ja 3D-skannausta. Vuonna 2010 toimitilat olivat Jyväskylän energialaitoksen alakerrassa Onkapannussa. Yrityksellä oli käytössään työpaja, jossa tuotekehitysprojekteja toteutettiin myös konkreettisella tasolla. Vuonna 2011 yritys avasi Kotkassa sivutoimipisteen. Samana vuonna yrityksen nimi vaihdettiin Prolinesta Prosolveksi, ja koko organisaatiota selkeytettiin. Yrityksen toiminta jaettiin kolmeen

yksikköön: Proline (koneensuunnittelu), ProKiPa (kiinteistöpalvelut) ja Prodigit (3D-skannauspalvelut). Prosolve Oy:n rinnalla toimii myös sisaryritys ProDeliver, joka tarjoaa mittaus- ja asennuspalveluita. Yrityksen organisaatorakenne on esitetty kuviossa 1. Vuodesta 2014 Prosolve Oy on toiminut Jyväskylän Rautpohjassa Valmetin tehta-
 taan tiloissa ja Kotkassa yhteensä noin 20 työntekijän voimin. Prodeliver työllistää
 noin 16 henkilöä. Prosolven liikevaihto vuonna 2015 oli noin 2,1 miljoonaa euroa ja
 tulos noin 74 000 euroa. Prodeliverin liikevaihto vuonna 2015 oli noin 996 000 euroa
 ja tulos noin 53 000 euroa. (Prosolve Oy n.d.)



Kuvio 1. Prosolve Oy:n organisaatorakenne

4 Opinnäytetyön aihe ja tavoitteet

4.1 Aiheen määrittely

Prosolve Oy on hankkinut käyttöönsä kaksi kuluttajatason AM-laitetta viime vuosina. Yritys pyrkii jatkuvasti kehittämään uusia käyttökohteita laitteilleen ja keskustelemaan asiakkaidensa kanssa selvittääkseen onko heillä tarpeita, joiden täyttämässä materiaalia lisäävää valmistusta on mahdollista hyödyntää. Yrityksellä on jo pitkään

ollut kiinnostusta tutkia sitä, miten edullisilla AM-laitteilla valmistetut muovikappaleet soveltuvat valumalleiksi tarkkuusvaluprosessiin. Yrityksessä on herännyt kiinnostus kehittää palvelu, jossa suunnitellaan ja valmistetaan valukappaleet asiakkaalle alusta loppuun Prosolven omissa tiloissa. Tällä palvelulla yritys pyrkii vastaamaan asiakkaidensa tarpeisiin ja laajentamaan omaa osaamisaluettaan. Yritys pyrkii uuden palvelun avulla myös hankkimaan uusia asiakkaita ja lisää työtä yritykseen.

Aiheesta ”materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntäminen tarkkuusvalussa” tehdään kaksi opinnäytetyötä toimeksiantajayritykselle. Tämä opinnäytetyö käsittelee materiaalia lisäävän valmistuksen soveltuvuutta, vahamenetelmässä käytettävien, valumallien valmistukseen. Työ on rajattu käsittämään valukappaleen valmistusprosessin suunnittelu valumallin valmistumiseen saakka. Tämä työ ei sisällä valuprosessin suunnittelua tästä eteenpäin, eli valumuotin valmistusta ja metallin valamista ei käsitellä työssä tarkemmin.

4.2 Tavoitteiden määrittely

Tavoitteena on selvittää yrityksen materiaalia lisäävillä laitteilla valmistettujen muovikappaleiden soveltuvuus valumalleiksi vahamenetelmään ja suunnitella materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntävän tarkkuusvalukappaleen valmistusprosessin toteutus yrityksessä. Prosessin toteutuksen suunnittelemiseksi yrityksen resurssit prosessia varten kartoitetaan. Yrityksessä käytössä olevista filamenttimateriaaleista valitaan valumallien valmistusmateriaaliksi parhaiten soveltuva. Yrityksen AM-laitteiden asetukset optimoidaan valitun materiaalin valmistukselle. Valitusta materiaalista valmistetun kappaleen soveltuvuus muottikuoren muodostamiseen testataan. Valumallin suunnittelusta ja valmistamisesta AM-laitteilla laaditaan myös työohje yrityksen käyttöön.

5 Materiaalia lisäävä valmistus

5.1 Termien määrittely

Materiaalia lisäävä valmistus, joka tunnetaan yleisemmin nimellä 3D-tulostus, on termi, joka käsittää useita nopeasti kehittyviä nykyaikaisia valmistusteknologioita.

Suomen pikavalmistusyhdistys ry suosittelee näistä teknologioista käytettäväksi termiä ”materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät”. Englanninkielisessä kirjallisuudessa käyttöön on vakiintumassa termi ”Additive Manufacturing”, tai lyhennettynä AM. Termillä ”3D-printing” tarkoitetaan usein kahta materiaalia lisäävää valmistuksen alaryhmää; sideaineen suihkutusta (Binder Jetting) ja/tai materiaalin suihkutusta (Material Jetting). Tästä johtuen ”3D-tulostus”-termin käyttö voi aiheuttaa väärinkäsityksiä. (FIRPA ry n.d.)

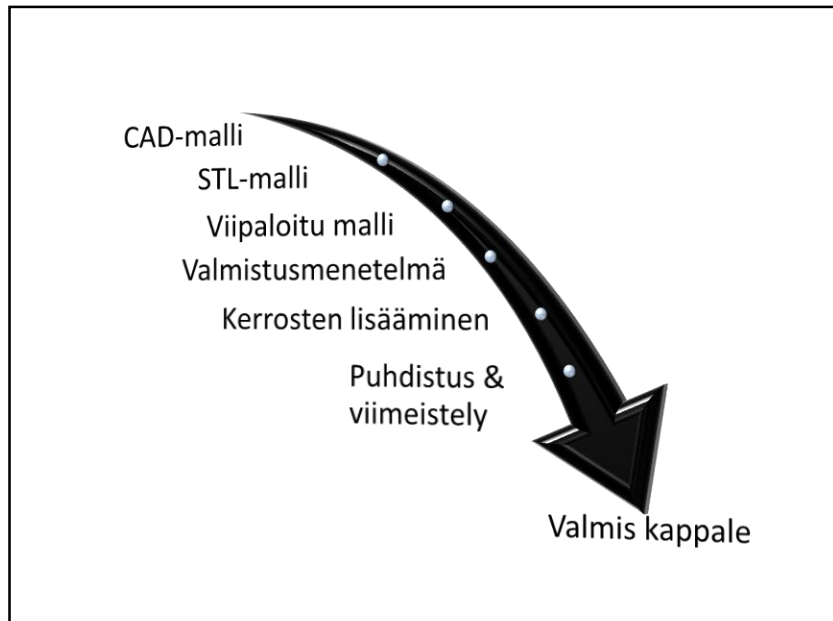
Laitteille, jotka valmistavat kappaleita materiaalia lisäämällä, ei suomeksi ole käytössä suositeltua nimitystä. Suomenkielisessä kirjallisuudessa käytössä on yleisesti termi ”3D-tulostin”, jota käytetään kaikista laitteista, jotka perustuvat materiaalia lisäävään valmistukseen. Suomen pikavalmistusyhdistys suosittelee tällaisista laitteista käytettäväksi termiä AM-laite. Nimitystä ”3D-tuloste” käytetään yleisesti kaikista materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistetuista kappaleista. Termille ei ole käytössä virallisempaa nimitystä. (FIRPA ry n.d.)

Tässä työssä termillä ”3D-tulostus” viitataan yleisesti materiaalia lisääviin valmistusmenetelmiin. ”3D-tulostin”-termiä käytetään työssä synonyyminä termille ”AM-laite”. Termillä ”3D-tuloste” tullaan viittaamaan materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettavaan kappaleeseen.

5.2 Periaatteen kuvaus

Materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä digitaalinen malli ”tulostetaan” fyysiseksi kappaleeksi. Valmistus tapahtuu materiaalia lisäämällä kerros kerrallaan. Perinteisiin ainetta poistaviin ja liittäviin valmistusmenetelmiin verrattuna materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä on mahdollista valmistaa hyvin erilaisia kappaleita. (Piili ym. 2016.)

Riippumatta AM-laitteen toimintaperiaatteesta kappaleen valmistus noudattaa samanlaista kaavaa. Kaikille materiaalia lisääville valmistusmenetelmille yhteinen työn kulku on esitetty kuviossa 2.



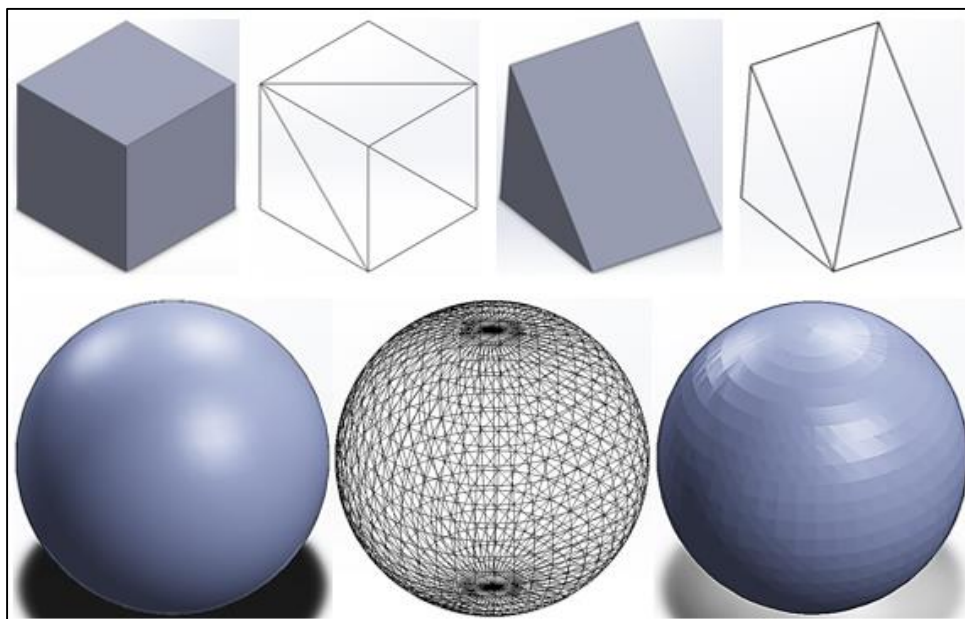
Kuvio 2. Työn kulku materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä (Lähteenmäki 2015, muokattu)

Lähtökohtana menetelmillä on valmistettavan kappaleen CAD-malli. Malli voi olla luotu jollakin mallinnusohjelmalla, tai se voi olla muodostettu 3D-skannaamalla olemassa oleva kappale. CAD-malli on seuraavaksi muunnettava kolmioituun STL-tiedostomuotoon. STL-tiedostosta viipalointiohjelmalla tehdään kappaleesta z-akselin suuntaisesti viipaloitu malli. Viipalointiohjelma muodostaa automaattisesti kappaleen valmistamiseen tarvittavan G-koodin, eli AM-laitteen numeeriset ohjauksen komennot, joita toteuttamalla laite valmistaa kappaleen kerros kerrallaan. Tapa, jolla kerrokset muodostetaan, riippuu käytetystä menetelmästä. Valmistusmenetelmästä riippumatta kappale tulee vielä lopuksi puhdistaa ja viimeistellä eri tavoin sen jälkeen, kun se on poistettu laitteesta. Viimeistelyä on esimerkiksi tukirakenteen poistaminen kappaleesta. (Lähteenmäki 2015.)

5.2.1 STL-tiedostomuoto

Kaikki ainetta lisäävät valmistusmenetelmät perustuvat digitaalisen CAD-mallin käyttämiseen. Jotta CAD-malli saadaan muutettua AM-laitteiden tukemaan tiedostomuotoon, se on ensin muunnettava STL-muotoon. STL-tiedostossa mallista on muodostettu kolmioverkko, jonka tarkkuus voidaan määrätä. Kolmioinnista johtuen, malli ei vastaa muodoiltaan täsmällisesti alkuperäistä mallia. Tarkkuus on kuitenkin riittävä,

sillä kolmiointi voidaan tehdä esimerkiksi 0,01 millimetrin poikkeamalla. Suuremmatkin tarkkuudet ovat mahdollisia, mutta tarkkuuden kasvaessa myös STL-tiedoston koko kasvaa. Suurempaan tarkkuuteen päästään lisäämällä kolmioiden määrää, mikä vaatii käytetyltä tietokoneelta lisää laskentatehoa tiedostoa käsiteltäessä. (Lähteenmäki 2015; Syrjälä 1995, 42.) Kuviossa 3 on esitetty erilaisia kolmioituja muotoja. Yksinkertaisia kulmikkaita muotoja on yksinkertaista esittää kolmioiden avulla, mutta kaarevien geometrioiden esittäminen suurella tarkkuudella vaatii suuren määrän pieniä kolmioita.



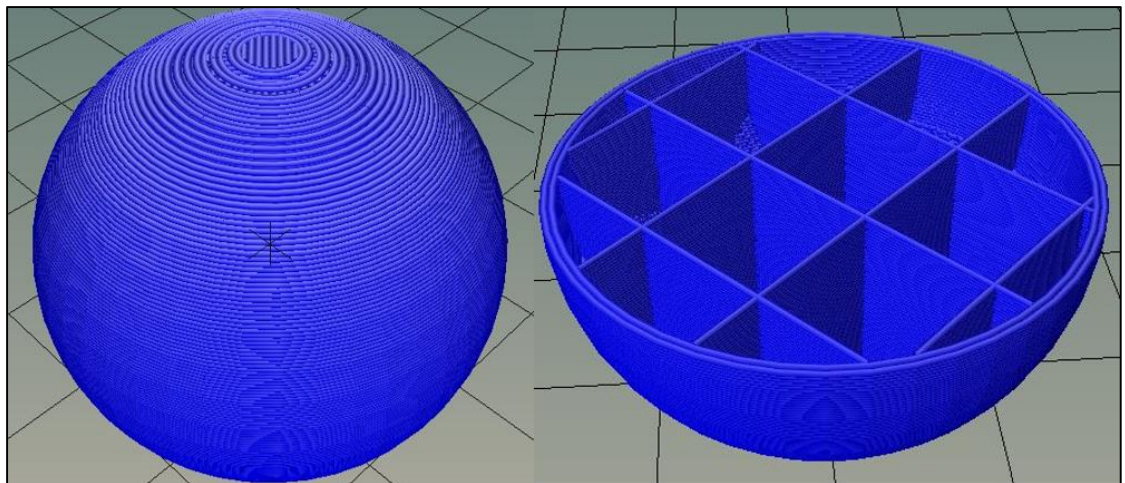
Kuvio 3. Erimuotoisia CAD-malleja ja niiden STL-muunnoksia

5.2.2 Viipaloitu malli

STL-tiedostomuodossa olevasta mallista on muodostettava viipaloitu malli jollakin viipalointiohjelmalla. Esimerkki yleisesti käytetystä viipalointiohjelmasta on ilmainen Repetier Host 1.6.1. Ohjelmasta on saatavilla sekä Windows, Mac että Linux käyttöjärjestelmille soveltuva versio. Ohjelma viipaloi kappaleen ohuiksi kerroksiksi käyttäjän määrittämien asetusten mukaan ja tekee kerroksista rakennetun mallitiedoston (ks. kuvio 4). Samalla viipalointiohjelma luo automaattisesti myös AM-laitteen ohjaukseen tarvittavan G-koodin. Laite toteuttaa G-koodin ohjauskäskyjä rakentaessaan

kappaletta kerros kerrokselta. Kerrosten paksuudet voivat olla minimissään muutamia millin sadasosia. Kerrosmallin kaarevista pinnoista tulee porrasmaisia, mikä vaikuttaa kappaleen tarkkuuteen. Silti tarkkuus on moniin sovelluksiin riittävä. (Lähteenmäki 2015; Syrjälä 1995, 42.)

Viipalointiohjelmassa on myös mahdollista asettaa kappaleelle täyttöaste. Täyttöaste määrää sen, kuinka tiheän tukirakenteen ohjelma muodostaa kappaleen muotojen sisälle. Asetettaessa täyttöasteeksi 0 % kappaleelle ei muodosteta sisäistä tukirakennetta, eli kappale on täysin ontto. 100 % täyttöasteella ohjelma täyttää kappaleen muodot sisältä kokonaan materiaalilla. Joillakin viipalointiohjelmilla tukirakenteen muoto on myös valittavissa, jolloin tukirakenne voidaan muodostaa esimerkiksi kuusikulmioista.



Kuvio 4. Viipaloitu malli kokonaisena ja halkaistuna (Kuvakaappaus Repetier Host-ohjelmasta)

5.3 Käyttösovellutukset

Usein materiaalia lisäävää valmistusta on hyödynnetty tapauksissa, joissa kappaleen suunnittelu on iteroivaa ja suunnittelukierrosten välissä kappaleesta on saatava nopeasti fyysinen prototyyppi tarkasteltavaksi (Turner & Gold 2015, 250). Menetelmää ei kuitenkaan enää hyödynnetä ainoastaan prototyyppien ja mallien tekemisessä, kuten aiemmin, vaan yhä enemmän myös yksittäiskappaleiden ja piensarjojen val-

mistuksessa. Nykyisin valmistus voidaan jaotella neljään eri kategoriaan, joita ovat periaatemallit, toiminnalliset mallit, jiggit ja tarttujat sekä tuotteet ja loppukäyttö. (Lähteenmäki 2015.)

Materiaalia lisäävää valmistusta hyödynnetään useilla eri aloilla. Menetelmälle on löydetty käyttökohteita ainakin ilmailu- ja puolustusteollisuudesta, arkkitehtuuri-suunnittelusta, autoteollisuudesta, hammashoidon alalta, koulutuksen apuna, terveydenhoitoalalla, viihdeteollisuuden parissa ja kuluttajahyödykkeiden valmistuksessa (Hausman & Horne 2013). Suomalainen Hetitec Oy valmistaa 3D-tulostamalla metallivalimoille valumuotteja ja keernoja (Lehtinen 2014). Menetelmä on yleisesti käytössä myös korujen ja lääketieteellisten komponenttien valmistuksessa. Rakennustekniikan alalla materiaalia lisäävälle valmistukselle tehdään vielä tuotekehittelyä, mutta 5-10 vuoden kuluessa tekniikan odotetaan kaupallistuvan. (Tervola 2015.)

5.4 Edut ja haasteet

Materiaalia lisäävän valmistuksen soveltuvuutta esineen valmistukseen on aina harkittava tapauskohtaisesti. Vaikka kappale voidaan valmistaa AM-laitteella, ei se välttämättä ole kannattavaa. Materiaalia lisäävä valmistus onkin täydentävä valmistusmenetelmä, joka soveltuu tietynlaisille kappaleille paremmin kuin perinteiset valmistusmenetelmät.

Periaatteessa mitä monimutkaisempi kappale on kyseessä, sitä merkittävämpää etua menetelmällä voidaan saavuttaa. Geometrialtaan yksinkertaisten kappaleiden valmistus on usein edullisempaa tehdä ainetta poistavilla menetelmillä. Geometrisesti monimutkaisille kappaleille ainetta lisäävä valmistus voi olla huomattavasti edullisempi, tai jopa ainoa mahdollinen valmistustapa. Usein 3D-tulostamalla valmistetut kappaleet vaativat jälkikäsittelyä, joka saattaa kestää yhtä pitkään kuin itse kappaleen valmistus. Valmistuksessa syntyvä tukimateriaali tulee poistaa, kappaleita voidaan joutua hiomaan, kiillottamaan tai pinnoittamaan. Lisäksi valmistettavat kappaleet on aina suunniteltava AM-laitteilla valmistettaviksi. (Tervola 2015; Lähteenmäki 2015.) Varsinkin edullisilla 3D-tulostimilla tukimateriaalin käyttäminen on suurin kappaleen laatua heikentävä tekijä. Tukimateriaali sulautuu osittain kiinni kappaleeseen ja sen poistaminen käsin on työlästä. Tukimateriaalin käyttämisestä jää kappaleeseen

leen pintaan aina virheitä. Myös vesiliukoisia tukimateriaaleja on kehitetty, mutta ne eivät sovellu AM-laitteille, joissa ei ole mahdollista käyttää samanaikaisesti useita materiaaleja.

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa edullisia valmistusmateriaaleja, kuten muovia käytettäessä yksittäisen valmistetun kappaleen hinta on alhainen. Metalleilla ja muilla arvokkaammilla materiaaleilla kustannukset kappaletta kohden ovat korkeammat sekä materiaalien että valmistuslaitteiden kustannuksista johtuen. Yleisesti valmistusmenetelmä on suhteellisen nopea, ja tarkkuus on useisiin tarkoituksiin riittävä. Kappaleet soveltuvat hyvin visuaalisiin tarkoituksiin. Heikkouksia kappaleilla ovat olleet huono pinnan laatu ja niiden soveltumattomuus mekaanisiin testeihin. (Lähtenmäki 2015.)

Materiaalia lisäävä valmistus on jo pitkään ollut käytössä prototyyppien pikavalmistuksessa. Viime vuosina laitteet ja materiaalit ovat kehittyneet nopeasti ja menetelmällä tehdään nykyisin myös sarjatuotantoa. Haasteita sarjatuotantoa ajatellen ovat olleet AM-laitteiden pieni kappaleen valmistusalue ja hidas valmistusnopeus. Valmistusalueen kokoa rajoittavat mekaaniset ongelmat kuten johteiden taipumat, jotka haittaavat valmistuksen mittatarkkuutta. Uusissa laitteissa näitä haittoja pyritään kuitenkin kompensoimaan, esimerkiksi lineaarimoottoreilla. Tulevaisuudessa menetelmällä onkin mahdollista valmistaa entistä suurempia kappaleita mittatarkasti. Jo nykyisin materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä on valmistettu kuusi metriä pitkiä lentokoneen osia. AM-laitteiden hintojen lasku puolestaan mahdollistaa valmistuksen hitauden kompensoinnin käyttämällä useita laitteita samanaikaisesti. (Lehtinen 2014.)

Useita pienempiä ja edullisempia AM-laitteita on tullut viime vuosina markkinoille. Edullisten laitteiden etuja ovat 3D-tulosteiden pienempi kappalehintaa ja tilansäästö. Edullisten AM-laitteiden heikkouksia kalliimpiin laitteisiin verrattuna ovat hitaampi valmistus, huonompi tarkkuus ja kappaleiden kieroutumisen mahdollisuus lämmityskammion puuttuessa. (Lähtenmäki 2015.)

6 Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät

6.1 Menetelmien jaottelu

Materiaalia lisäävä valmistus on termi, joka käsittää useita erilaisia valmistustekniikoita. ASTM Standardissa F2792-12A menetelmät on jaettu niiden toimintaperiaatteen perusteella seitsemään kategoriaan (ks. taulukko 1). Kategoriat käsittävät yhden tai useampia menetelmiä. Eroavaisuuksia yksittäisillä menetelmillä syntyy käytetyistä materiaaleista ja laitteiden toimintaperiaatteista. (About additive manufacturing n.d.) Suomenkieliset nimitykset kategorioille ovat vapaita suomennoksia.

Taulukko 1. Materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien kategoriat

Valokovetus altaassa (Vat Polymerisation)

- Valoherkkää nestemäistä polymeeriä kovetetaan kerros kerrokselta altaassa. Esimerkiksi SLA-menetelmä.

Pursotus (Material Extrusion)

- Materiaalia pursotetaan suuttimen läpi ja kovetetaan kerroksittain. Esimerkiksi FDM-menetelmä.

Suihkutus (Material Jetting)

- Materiaalia suihkutetaan pisaroina kerroksittain. Esimerkiksi Polyjet-menetelmä.

Liimaus kerroksittain sidosaineella (Binder Jetting)

- Sidosainetta suihkutetaan jauhemaiseen materiaaliin kerroksittain.

Jauheen sintraus (Powder Bed Fusion)

- Metall- tai polymeerihukkasia sulatetaan yhteen laser- tai elektronisäteellä kerroksittain. Esimerkiksi SLS-menetelmä.

Laminointi (Sheet Lamination)

- Ohuita kalvoja liitetään päällekkäin esimerkiksi liimaamalla tai ultraäänen avulla. Esimerkiksi LOM-menetelmä.

Suunnattu kerrostaminen (Directed-Energy Deposition)

- Kappaletta rakennetaan kerroksittain samanaikaisesti materiaalia ja energiaa yhteen pisteeseen tuomalla.

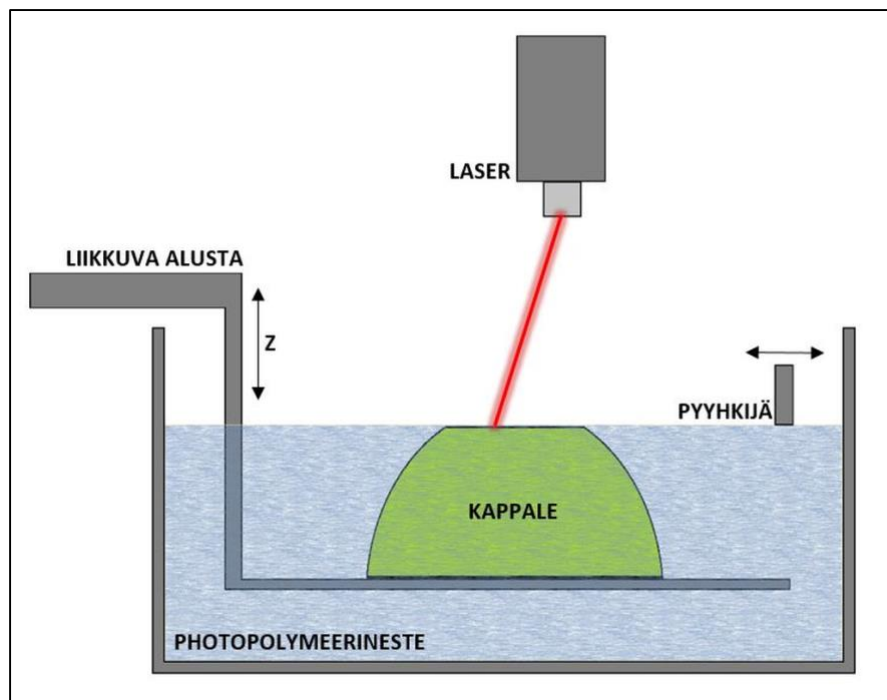
(Rantanen 2015; About Additive Manufacturing n.d.)

6.2 Menetelmien toimintaperiaatteita

Seuraavaksi käsitellään lyhyesti kolme yleisintä materiaalia lisäävää valmistusmenetelmää ja lisäksi kaksi viime vuosina kehitettyä uutta menetelmää.

6.2.1 SLA-menetelmä

SLA eli stereolitografia on tullut markkinoille jo 1980-luvun lopulla. Se on vanhin materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä. SLA-menetelmä kuuluu ”Valokovetus altaassa”-kategoriaan. Menetelmässä UV-laser kovettaa akryyli- tai epoksipohjaista valokovettuvaa nestemäistä fotopolymeeriä kerros kerrokselta. Säiliössä olevaan nesteeseen kohdistetaan UV-lasersäde, jota heijastetaan peilin avulla tietokoneohjatusti. Säteen vaikutuksesta neste kovettuu ja muodostaa ohuen kerroksen, joka kiinnittyy alla olevaan kerrokseen. Jokaisen kerroksen jälkeen tulostusalustaa lasketaan hie- man, jolloin kappaleen pinta painuu nesteen alle. Tällöin voidaan kovettaa jälleen uusi kerros. Kun kappale on valmistunut, se täytyy vielä kovettaa lämpökäsittelyn avulla uunissa. (Lähteenmäki 2015; Syrjälä 1995, 43.) Stereolitografian toimintaperiaate on esitetty kuviossa 5.



Kuvio 5. Stereolitografian toimintaperiaate (About Additive Manufacturing n.d., mukattu)

Menetelmän etuja

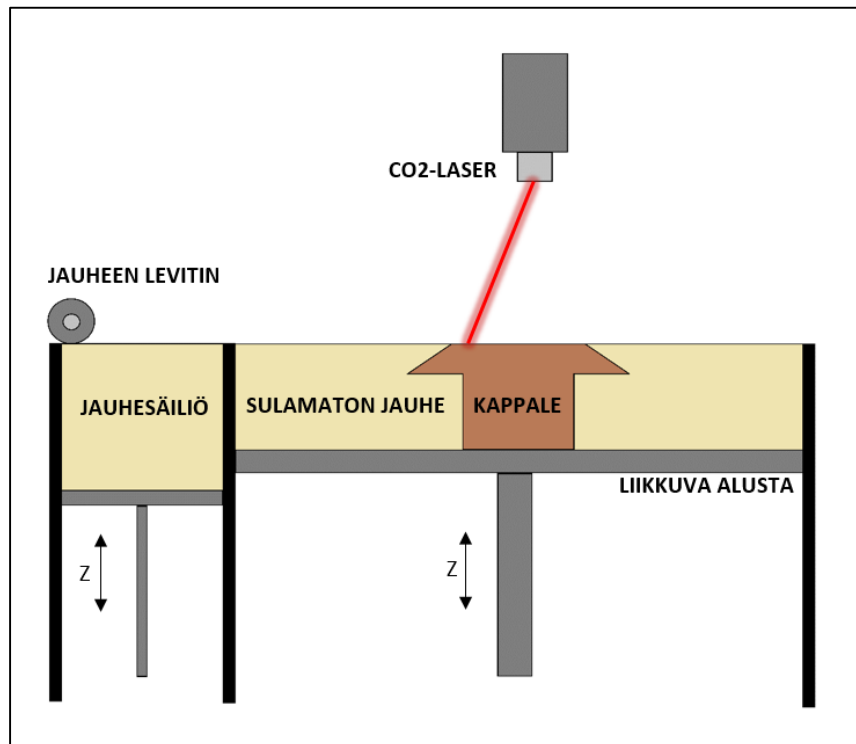
Stereolitografian käyttämiselle voidaan listata monia etuja. Menetelmällä valmistettävien kappaleiden pinnan laatu on parempi kuin muilla menetelmillä. Tarkkuus on sitä tasoa, että kappaleista ei paljain silmin erota erillisiä kerroksia. SLA-menetelmällä on myös mahdollista valmistaa läpinäkyviä kappaleita. Menetelmällä saavutetaan kappaleissa parhaimmillaan 0,01 millimetrin kerrospaksuus. Ohuet seinämäpaksuudet, jopa 0,35 mm ovat mahdollisia. Hukkamateriaalia ei menetelmällä juurikaan synny, eikä kappaleissa esiinny kieroutumia. Menetelmässä on mahdollista käyttää myös keraamia muistuttavaa materiaalia. (Lähteenmäki 2015; Micallef 2015.)

Menetelmän haasteita

SLA-menetelmän käyttö asettaa myös muutamia rajoituksia. Käyttöön soveltuvia erilaisia epoksilajikkeita on olemassa vain toistakymmentä. Useiden materiaalien käyttö samanaikaisesti ei ole SLA-menetelmässä mahdollista. Valmistuvat kappaleet ovat hauraita eivätkä tästä syystä sovellu testikäyttöön. Valmistuksen jälkeen kappaleen pinta tulee yleensä puhdistaa. Puhdistus lisää myös merkittävästi tällä menetelmällä valmistetun kappaleen hintaa. Tietynlaisten muotojen valmistaminen vaatii tukimateriaalia. Jotkut käytetyistä materiaaleista ovat herkkiä kosteudelle eivätkä kestä yli 50 °C käyttölämpötiloja. (Lähteenmäki 2015.)

6.2.2 SLS-menetelmä

SLS tulee sanoista Selective Laser Sintering. Se lukeutuu ”Jauheen sintraus”-kategoriaan. Menetelmässä CO₂-laser sulattaa ja sintraa yhteen pulverimaista raakaainetta. Laite levittää ensin pulveria alustalle ohuen kerroksen. Tämän jälkeen pulveri lämmitetään lähelle sulamispistettä. Lasersäde sulattaa pulverista noin 0,1 millimetrin paksuisen kerroksen, joka sulaessaan tarttuu kiinni edelliseen kerrokseen. Kun kerroksen sulatus on valmis, pöytää lasketaan 0,1 millimetriä ja pulveria levitetään edellisen kerroksen päälle uusi kerros. (Lähteenmäki 2015; Syrjälä 1995, 43) Kuviossa 6 on esitetty SLS-menetelmän toimintaperiaate.



Kuvio 6. SLS-menetelmän toimintaperiaate (About Additive Manufacturing n.d., muokattu)

Menetelmän etuja

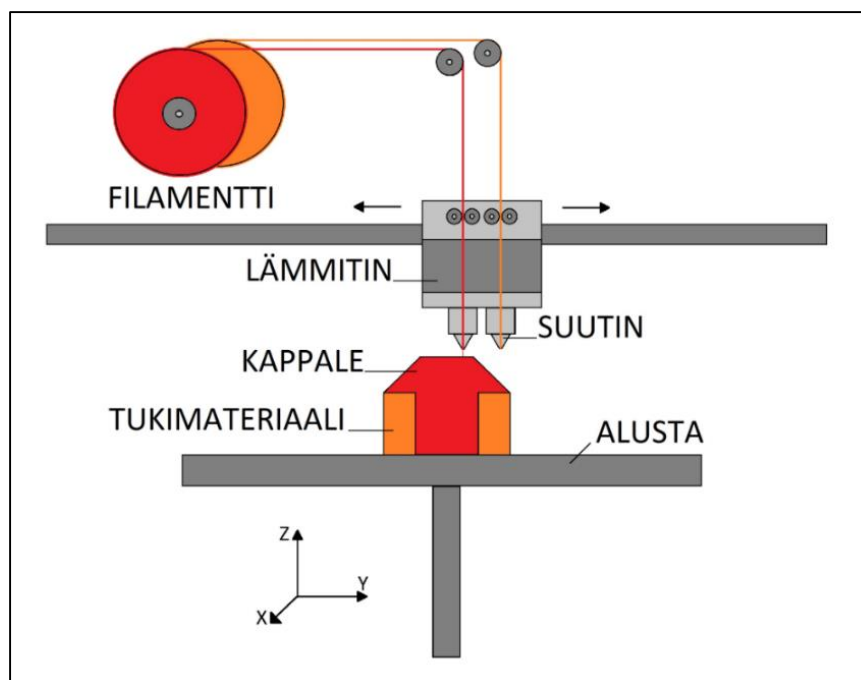
Toisin kuin muissa menetelmissä, SLS-menetelmässä ei monimutkaisille kappaleille tarvita muuta tukimateriaalia kuin sulamaton pulveri. Menetelmällä voidaan saavuttaa 0,2 millimetrin mittatarkkuus ja minimissään 0,5 millimetrin seinämepaksuus. Kappaleista saadaan tarvittaessa lämmönkestoltaan hyviä ja ne soveltuvat tuotteiden toimintojen testaamiseen. Käytettäviä materiaaleja on enemmän kuin SLA-menetelmässä. SLS-menetelmää voidaan soveltaa piensarjatuotannossa. (Lähtemäki 2015.)

Menetelmän haasteita

SLS-menetelmällä valmistettavien kappaleiden pinnanlaatu on heikompi kuin SLA-menetelmällä. Umpinaisia kappaleita suunniteltaessa on huomioitava, että sulamaton pulveri jää kappaleen sisään, jos sille ei suunnitella poisto-aukkoa. Kappaleisiin saattaa myös syntyä sisäisiä jännityksiä, jotka aiheuttavat kieroutumisia. Menetelmällä valmistettavat kappaleet on myös puhdistettava ennen maalausta. (Lähtemäki 2015.)

6.2.3 FDM-menetelmä

FDM on lyhenne sanoista Fused Deposition Modeling. FDM-menetelmä kuuluu ”Pursotus”-kategoriaan. Menetelmässä termoplastista muovilankaa lämmitetään suuttimen kammiossa sulaksi. Sulaa muovia pursotetaan suuttimesta ja suutinta liikutetaan tietokoneohjatusti vaakatasossa. Sula muovi jähmettyy hyvin nopeasti edellisen kerroksen päälle. Kun kerros on valmis, tulostuspöytä laskee tai suutin nousee yhden kerroksen paksuuden verran. Muovi tarttuu kiinni tulostusalustaan ja seuraava kerros pursotetaan edellisen päälle, jolloin se sulaa siihen kiinni. Laitteissa voi olla useita suuttimia, jolloin samassa kappaleessa voidaan käyttää useita eri materiaaleja. Tietynmuotoisten kappaleiden valmistus vaatii tukimateriaalia, jotta muovin pursotus ei tapahtuisi tyhjän päälle. Laite valmistaa samanaikaisesti tukirakenteen varsinaiseen malliin kiinni, jotta valmistus on mahdollista. Tukirakenne on poistettava lopuksi käsin. FDM-menetelmässä käytettävät materiaalit ovat amorfisia kestumuoveja. (Lähteenmäki 2015; Syrjälä 1995, 43.) FDM-menetelmän toimintaperiaate on kuvattu kuviossa 7.



Kuvio 7. FDM-menetelmän toimintaperiaate (About Additive Manufacturing n.d., muokattu)

Menetelmän tarkkuus

FDM-menetelmän tarkkuus määräytyy käytettyjen askelmoottorien, ohjauskoodin ja suuttimien perusteella. Suuttimien ja valmistusalustan liike toteutetaan tyypillisesti XY-tasossa kahden ja Z-akselin suuntaisesti yhden askelmoottorin avulla. Kaarevien pintojen valmistamisen tarkkuuteen vaikuttaa porrasmaisuus, joka aiheutuu askelmoottorin pienimmästä mahdollisesta liikkeestä. Tyypillisesti tarkkuus on luokkaa 0,1 millimetriä. Suurin mahdollinen tarkkuus määräytyy myös suuttimen reiän halkaisijan perusteella. Suuttimesta pursuavan sulan materiaalivanan halkaisija ei voi olla pienempi kuin 1,2-1,5-kertaa suuttimen reiän halkaisija. Tämä rajoitus on osittain seurausta siitä, että suuttimen kammiossa sula materiaali on puristuksissa paineen alaisena, jolloin se suuttimesta purkautuessaan, alhaisempaan paineeseen, turpoaa halkaisijan suuntaisesti. Suuttimen reiän koon pienentämisellä voidaan saavuttaa suurempia tarkkuuksia. Reiän pienentyessä materiaalin pursottaminen pienemmästä aukosta vaatii filamentin syöttämistä suuremmalla paineella, jolloin vaaditaan tehokkaampi syöttömoottori. Valmistuksen tarkkuuteen ja resoluutioon vaikuttaa olennaisesti myös suuttimesta poistuvan sulan materiaalin tilavuusvirran säätely. Jos tilavuusvirta pysyy koko ajan samana, ei valmistuksessa tällöin oteta huomioon suuttimen liikkeen kiihdytyksiä ja jarrutuksia. Pursotetun materiaalin määrä on liian vähäinen, kun suutin on kiihtyvässä liikkeessä, ja suuttimen liikkeen hidastuessa materiaalia pursotetaan liikaa. Kehittyneemmissä FDM-laitteissa nopeuden vaihtelut on huomioitu materiaalin syötön säätelyssä. Tarkkuuteen vaikuttaa myös materiaalin kutistuminen sen jähmettyessä. (Turner & Gold 2015, 252-255.)

Menetelmän etuja

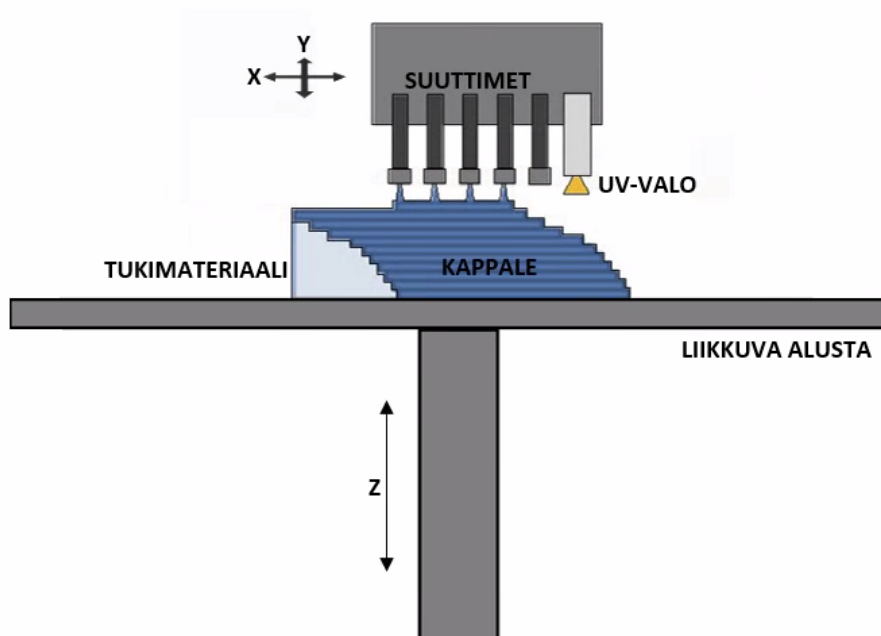
FDM-menetelmälle on saatavilla laaja valikoima amorfisia kestopuoveja. Näistä materiaaleista on mahdollista valmistaa kappaleita, joilla on korkea lujuus ja joiden pitkäaikaisominaisuudet ovat hyvät. Myös korkeita lämpötiloja kestäviä puoveja on mahdollista käyttää. Hyvin monimutkaisia muotoja omaavia ohutseinäisiä (minimissään 0,25 millimetriä) kappaleita voidaan valmistaa, eikä niihin synny jännityksiä, jos tulostusalueen lämpötilaa säädellään lämmityskammion avulla. FDM-menetelmää käyttämällä päästään hyvään toistettavuuteen, mikä mahdollistaa kappaleiden sarjatuotannon. (Lähteenmäki 2015.)

Menetelmän haasteita

FDM-menetelmän käyttöä rajoittaa huonompi pinnanlaatu verrattuna SLA-menetelmään. Myös mittatarkkuus pienten yksityiskohtien kohdalla on SLA-menetelmässä parempi. Joidenkin filamenttimateriaalien kuumentaminen vapauttaa terveydelle haitallisia kaasuja ja pienhiukkasia. Joissakin FDM-laitteissa näitä terveyshaittoja ehkäistään koteloidulla valmistusalueella. (Lähteenmäki 2015.)

6.2.4 Polyjet-menetelmä

Polyjet on yksi uusimpia materiaalia lisääviä valmistusmenetelmiä. Yritys nimeltä Objet Inc. kehitti menetelmän 2000-luvun alussa. Polyjet-menetelmä sisältyy ”Suihkutus”-kategoriaan. Menetelmässä akryylipohjaista nestemäistä fotopolymeeriä suihkutetaan pisaroina mustesuihkukirjoitinta muistuttavalla tulostuspäällä. UV-lamput kovettavat pisarat edellisen kerroksen päälle. Jos kappaleen valmistukseen tarvitaan tukimateriaalia, se on vesiliukoista, ja voidaan pestä pois, kun tulostus on valmis. (Lähteenmäki 2015.) Polyjet-menetelmän periaate on esitetty kuviossa 8.



Kuvio 8. Polyjet-menetelmän toimintaperiaate (About Additive Manufacturing n.d., muokattu)

Menetelmän etuja

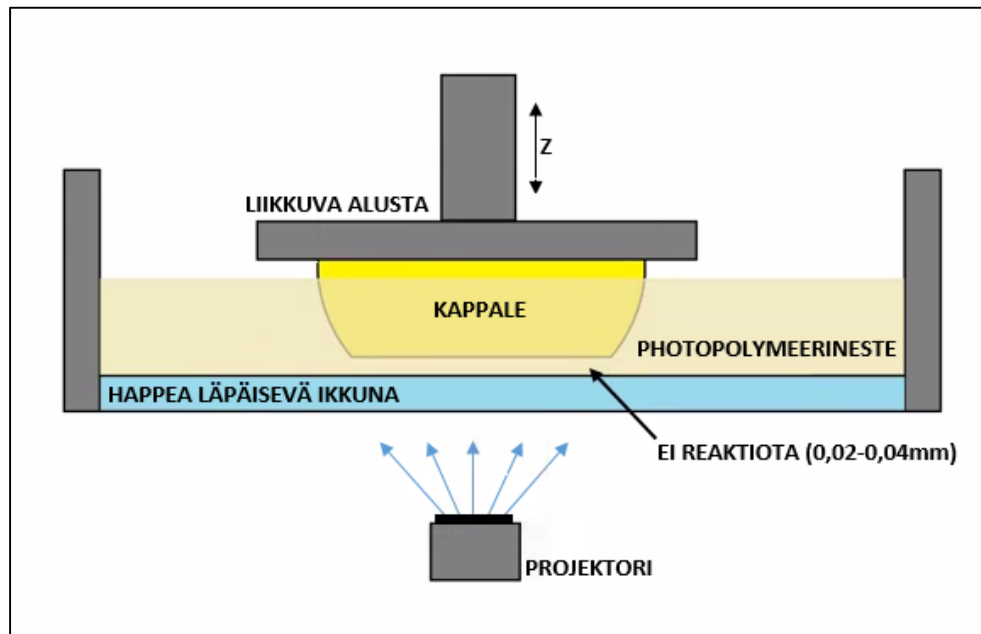
Etuja Polyjet-menetelmällä ovat nopeus ja tarkkuus. Minimissään 0,3 millimetrin seinämät ovat mahdollisia. Menetelmä soveltuu toimistoympäristöön. Kahta eri värin tai kovuuden omaavaa materiaalia voidaan yhdistellä noin 30 eri tavalla. (Lähteenmäki 2015.)

Menetelmän haasteita

Menetelmässä käytettäväksi valmistusmateriaaliksi soveltuu ainoastaan akryyli. Toimintomallit eivät ole tällaisesta materiaalista valmistetulle kappaleelle paras sovellutus. Kappaleiden pitkäaikaiskestosta ei ole saatavilla tietoja. Myös viruminen on raaka-aineelle ongelma. (Lähteenmäki 2015.)

6.2.5 CLIP-menetelmä

Continuous Liquid Interface Production on uusimpia ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä. Menetelmä kuuluu kategoriaan ”Valokovetus altaassa.” Menetelmässä ultraviolettivalolla kovetetaan hartsia sisältävää nestettä. Kovetus tapahtuu jatkuvassa liikkeessä olevalle alustalle, jolloin kappaleeseen ei muodostu erillisiä kerroksia. Kappale valmistetaan ylösalaisin olevalle alustalle, joka on nestealtaan päällä. Altaan pohjalla on projektori, joka heijastaa UV-valoa nesteeseen. Pohjan ikkuna läpäisee myös happea. Heti ikkunan yläpuolella on vähähappinen alue, jossa kovettumista ei tapahdu. Valmistus CLIP-menetelmällä on moninkertaisesti nopeampaa kuin muilla menetelmillä. (Rantanen 2015.) CLIP-menetelmän toimintaperiaate on esitetty kuviossa 9.



Kuvio 9. CLIP-menetelmän toimintaperiaate (Txchnologist n.d., muokattu)

6.3 Käytetyt materiaalit

Materiaalia lisäävissä valmistusmenetelmissä on mahdollista käyttää useita erilaisia materiaaleja riippuen AM-laitteen toimintaperiaatteesta. Erilaisia materiaaleja on saatavilla satoja ja niitä kehitetään jatkuvasti lisää. Materiaalia lisäävillä laitteilla on valmistettu kappaleita puusta, muovista, metallista, keraamista ja paperista. Myös biomateriaalien käyttöä tutkitaan. (Hausman & Horne 2013.) Muovimateriaaleja on käytössä useita erilaisia, kuten kovia, joustavia ja lämpödesinfektiota kestäviä. Muovikomposiittien lisäaineina on käytössä muun muassa hiilikuitua, lasikuitua ja kevlaria, mikä mahdollistaa kevyiden, mutta kestävien kappaleiden valmistuksen. Suomessa tutkitaan myös hammappohjaisten raaka-aineiden ja selluloosan valmistuksen sivutuotteena syntyvän puukuidun käyttöä valmistusmateriaaleina. (Valkosalo 2016.)

6.3.1 Käytetyt materiaalit FDM-menetelmässä

Suurin osa FDM-laitteista käyttää termoplastisia muoveja. Termoplastiset muovit pehmenevät, kun niitä lämmitetään lasisiirtymälämpötilan yläpuolelle ja vastaavasti kovettuvat, kun niitä jäähdytetään. Tällaiset muovit kestävät useita lämmityskertoja, mistä syystä niitä kutsutaan myös kestumuoveiksi. Materiaali toimitetaan halkaisijal-

taan 1,75 tai 3 millimetrin lankana. Tästä muovilangasta käytetään nimitystä filamentti. (Horvath 2014; Hausman & Horne 2013.) Tässä osiossa käsitellään vain kahta yleisimmin käytössä olevaa filamenttimateriaalia PLA ja ABS, sillä valumallin materiaalivalinta toimeksiantajalle tehtiin näiden väliltä.

6.3.2 PLA-materiaali

PLA (polylaktidi) eli polymaitohappo on synteettinen termoplastinen muovi, joka valmistetaan uusiutuvista raaka-ainesta, kuten maissitärkkelyksestä tai sokeriruosta. Materiaali on biohajoavaa. Sen hajoaminen kestää luonnossa puolesta vuodesta kahteen vuoteen, verrattuna perinteisesti käytettyihin muoveihin, esimerkiksi polystyreeniin ja polyetyleneeniin, joiden hajoaminen luonnossa kestää viidestäsadasta tuhanteen vuotta. Materiaalilla on muihin muoveihin nähden hyvä sitkeys ja jäykkyys. PLA:n lasisiirtymälämpötila on noin 60 °C ja sulamislämpötila noin 160 °C. Materiaalin käyttölämpötila on alle 50 °C, sillä se muuttuu pehmeäksi tätä korkeammissa lämpötiloissa. PLA liukenee useimpiin orgaanisiin liottimiin. Materiaali imee herkästi itseensä kosteutta, minkä vuoksi sitä on säilytettävä kosteudelta suojattuna. (Garlotta 2001, 1-2; Synteettiset biohajoavat materiaalit 2005, 1-2.)

6.3.3 ABS-materiaali

ABS eli akryylnitriilibutadieenistyreeni on akryylnitriilin, styreenin ja akryyliesterin kopolymeeri. Se on termoplastinen muovimateriaali, joka on yleisesti käytössä teollisuudessa. Muun muassa Lego-palikat valmistetaan ABS-muovista. Seostamaton ja pinnoittamaton ABS kestää heikosti UV-säteilyä ja soveltuu siksi ainoastaan sisäkäyttöön. Sen käyttölämpötila on -40 °C ja 85 °C välillä. Lasisiirtymä- ja sulamislämpötilaan vaikuttavat materiaalin lisäainepitoisuudet. Materiaalia lisäävässä valmistuksessa käytetyn ABS-filamentin sulamislämpötila on noin 210 °C ja lasisiirtymälämpötila noin 105 °C. Materiaali on säilytettävä kosteudelta suojattuna. Muoviin imeytynyt kosteus aiheuttaa virhettä valmistettaviin kappaleisiin. Nopeasti jäähtyessään ABS-materiaali pyrkii vetäytymään kasaan, mikä aiheuttaa valmistettaviin kappaleisiin kieroutumista. Kieroutumista voidaan ehkäistä säätelemällä valmistusalueen lämpötilaa. (Hausman 2013; Ashby 2005, 404) ABS-muovin on testeissä osoitettu soveltu-

van korvaamaan vaha materiaalina valumallin valmistuksessa (Turner & Gold 2015, 251).

7 Tarkkuusvalu

Kappale voidaan valaa useilla erilaisiin periaatteisiin perustuvilla menetelmillä, kuten hiekkavalulla, kokillivalulla tai painevalulla. Eräs pääperiaate on tarkkuusvalu, joka käsittää useita siihen perustuvia valumenetelmiä. Periaate on vanha ja laajalti käytössä monimutkaisten valukappaleiden valmistukseen.

Jo tuhansia vuosia sitten Kiinassa kehitetyllä vahamenetelmällä, joka on vanhin tarkkuusvalumenetelmä, on tehty valettuja kappaleita vahamalleja käyttämällä.

Ominaista tarkkuusvaletuille kappaleille on hyvä mittatarkkuus ja sileä pinta.

Tarkkuusvalamalla valmistetuilla kappaleilla onkin pyritty korvaamaan koneistettuja kappaleita. Menetelmällä saavutettava etu on, että kappaleen muotoilulle ei ole samoja rajoituksia kuin koneistuksella. (Autere, Ingman & Tennilä, 1986, 282.)

Tarkkuusvalu soveltuu erityisesti sellaisten kappaleiden valmistukseen, jotka on muotoiltu niin, että niiden työstäminen on hankalaa tai siitä aiheutuu suurta materiaalihukkaa. Sen sijaan yksinkertaisten kappaleiden kanssa menetelmä ei ole kilpailukykyinen. (Meskanen & Höök 2014, 1.)

7.1 Tarkkuusvalumenetelmät

Tarkkuusvalulla on alun perin tarkoitettu vain vahamenetelmää. Vahamenetelmän lisäksi on sittemmin kehitetty muita tarkkuusvalumenetelmiä. Menetelmät voidaan ryhmitellä sen mukaan, onko valumalli kertakäyttöinen vai kestromalli (ks. taulukko 2). (Autere ym. 1986, 282.) Tässä työssä myöhemmin käsiteltävässä valukappaleen valmistusprosessissa tarkkuusvalumenetelmänä käytettiin vahamenetelmää.

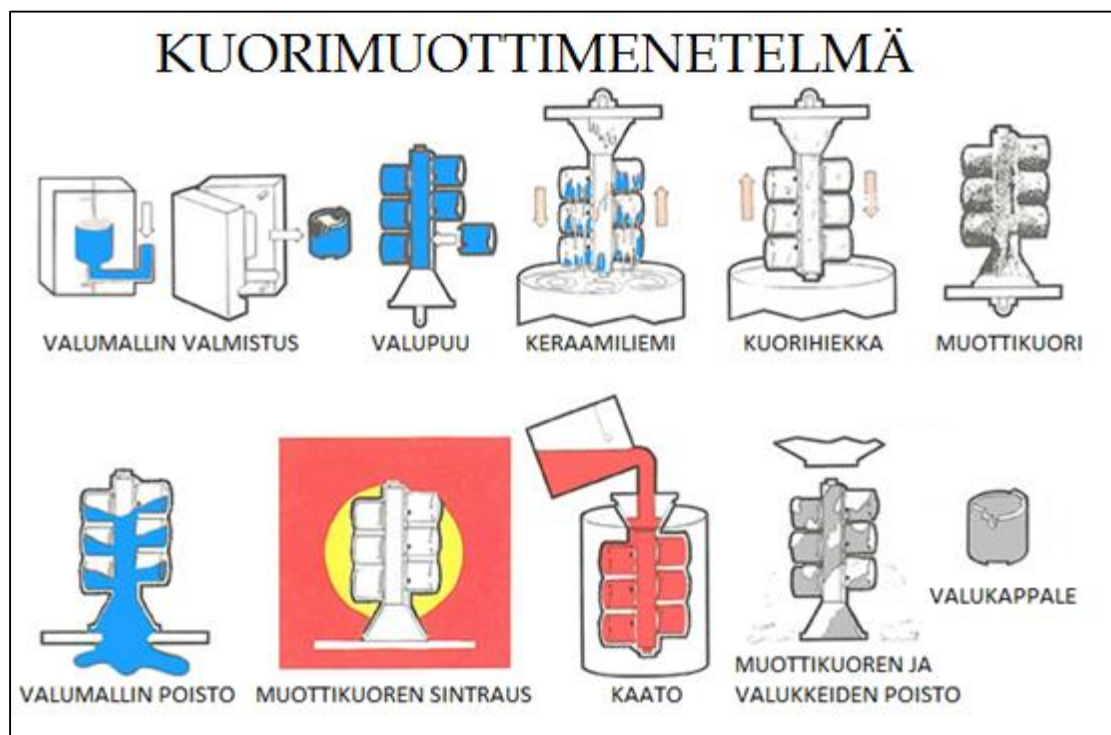
Taulukko 2. Tarkkuusvalumenetelmät

Kestomallimenetelmät	Kertamallimenetelmät
<ul style="list-style-type: none"> • Shaw-menetelmä • Unicast-menetelmä • Komposiitti-menetelmä • Schott-menetelmä • Ceramcast-menetelmä • Kipsimenetelmä 	<ul style="list-style-type: none"> • Vahamenetelmä • Polystyreenimenetelmä

7.1.1 Vahamenetelmä

Tarkkuusvalumuotin valmistamiseen vahamenetelmällä on kaksi tapaa, kuorimuottimenetelmä ja massiivimenetelmä (Meskanen & Höök 2014, 2).

Teoriaosuudessa käsitellään kuitenkin vain kuorimuottimenetelmää, sillä massiivimenetelmä ei ole yleisesti käytössä, eikä sitä sovelleta tässä opinnäytetyössä käsiteltävässä prosessissa. Kuorimuottimenetelmän työvaiheet on esitetty kuviossa 10.



Kuvio 10. Kuorimuottimenetelmän työvaiheet (Ruger n.d., muokattu)

Kuorimuottimenetelmässä valettavasta kappaleesta tehdään ensin vahamalli metallimuottiin, joka on tavallisimmin muottialumiiniseoksesta valmistettu. Muotissa voi olla yksi tai useampia vahakappaleita. Vahakappale tai -kappaleet kiinnitetään liimaamalla valupuuhun. (Meskanen & Höök 2014, 2.)

Perinteisen metallimuotin lisäksi vahamallin voi valmistaa myös AM-laitteella. AM-laitteen valmistusaluekaan ei välttämättä rajoita mallin kokoa, jos mallin osat voidaan liittää toisiinsa esimerkiksi liimaamalla. (Meskanen & Höök 2014, 5.) FDM- ja SLS-menetelmillä on mahdollista valmistaa malleja tarkkuusvaluvahasta. Hyödyntämällä näitä malleja valumuotin valmistukseen voidaan saavuttaa huomattavia ajallisia säästöjä perinteiseen mallin valmistukseen verrattuna. (Syrjälä 1995, 46.)

Kun valupuu on valmis, sen pinnalle muodostetaan keraamikuori kastamalla sitä keraamiliemeen ja sirottelemalla sen päälle molokiittia eli alumiinisilikaattia. Keraamiliemi sisältää hienojakoista tulenkestävää jauhetta, sideainetta, liuottimia ja lisäaineita. Valupuu on kastettava keraamiliemeen ja päällystettävä jauheella 5 – 8 kertaa, jotta siitä muodostuu riittävän paksu ja luja. Kuivumisaika jokaisen kerroksen kohdalla on pitkä. (Raaka-ainekäsikirja 5 2006, 212; Meskanen & Höök 2014, 2.)

Kun keraamikuori on riittävän paksu, muotti kuumennetaan nopeasti yli 500 °C lämpötilaan. Tällöin malli sulaa ja palaa pois valukanaviston kautta. Kuumennuksen tulee tapahtua nopeasti, sillä lämpölaajentuva malli voi muuten rikkoa muotin. Seuraavaksi muotti on sintrattava, jotta sen lujuus kasvaa kestäväksi sulan metallin painon ja lämpötilan. Sintrauksen yhteydessä viimeisetkin valumallin jäämät palavat pois. Jäljelle jää keraaminen muotti, joka vastaa valumallin muotoja. (Raaka-ainekäsikirja 5 2006, 212; Meskanen & Höök 2014, 2-3.)

Muotin valmistamisen jälkeen valettava metalli sulatetaan sulatusuunissa ja kaadetaan esikuumennettuun muottiin. Kun metalli on riittävästi jähmettynyt voidaan muotti rikkoa metallin ympäriltä. Keernat, kaatokanavat ja syöttökuvut poistetaan ja kappaleelle tehdään lopputarkastus. (Raaka-ainekäsikirja 5 2006, 212.)

7.2 Valukappaleen kutistuma

Valumallin valmistuksessa on otettava huomioon kaikille metalleille ominainen kutistuminen, joka tapahtuu metallin lämpötilan laskiessa jähmettymislämpötilasta huoneenlämpötilaan. Kutistuman suuruus vaihtelee metallista riippuen. Kutistumaprosentti riippuu myös kappaleen muodosta ja paksuudesta ja voi vaihdella samankin kappaleen eri osissa. Esimerkiksi alumiinin ohjeellinen valukutistuma on hiekkavalulla 1,7 ja 1,8 prosentin välillä. Valukutistuma voidaan kompensoida tekemällä valumalli mitoiltaan kutistuman verran suuremmaksi. Kappaleille, joilla on hyvin tarkat toleranssit, on tehtävä koevalu kutistuman selvittämiseksi. (Autere ym. 1986, 30.) Massakeskittymissä kutistuminen on voimakkainta, mikä voi aiheuttaa kappaleeseen painaumia, jos materiaalin syötöstä kyseisiin kohtiin ei huolehdi syöttökuvuilla (Honkanen 2014).

7.3 Valamisen edut valmistusmenetelmänä

Valamalla voidaan valmistaa metallisia kappaleita valmiiksi tai lähes valmiiksi nopeimmin ja vähiten energiaa käyttämällä. Valumenetelmiä on olemassa sekä yksittäis- että sarjatuotantoa varten. Erilaisiin mittatarkkuuksiin on myös olemassa omat valumenetelmänsä. Valaminen asettaa kappaleen koolle ja muotoilulle vain vähäisiä rajoituksia. Rakenteita voidaan siis muotoilla kestävästi paikallisesti suuria rasituksia. Kappaleet on helppo valmistaa muodoiltaan jouheviksi, jolloin saavutetaan hyvä värähtelyn vaimennuskyky. Tietyt valumetallit ovat tribologisilta ominaisuuksiltaan hyviä. Kaikki metallit ja metalliseokset soveltuvat valamiseen, kun taas esimerkiksi hitsattavuusominaisuudet materiaaleilla vaihtelevat. Valumetallit ovat myös hyvin kierrätettävissä. (Vuorinen 1995, 7.)

7.4 Tarkkuusvalumallien 3D-tulostamisen etuja ja haasteita

FDM-menetelmää käytetään yhä useammin tarkkuusvaluprosessissa valumallin valmistamiseen. Eräässä tutkimuksessa menetelmän avulla saavutettiin 50 % alhaisemmat valmistuskustannukset ja läpimenoajan lyheneminen yhdeksästä viikosta yhteen viikkoon, verrattuna valumallin perinteiseen valmistukseen metallimuotin avulla (Turner & Gold 2015, 251).

Kun valettavan kappaleen CAD-malli on saatu muodostettua, malliin voidaan mallin-
nusohjelmaa käyttämällä suunnitella kaatokanavat ja muut valujärjestelmän osat
suoraan kappaleeseen kiinni. On myös mahdollista suunnitella koko valupuu ja val-
mistaa se samanaikaisesti kappaleiden kanssa. Kun kappaleista on olemassa digitaalinen
malli, on yksinkertaista tehdä yksittäiskappaleesta kopioita ja muodostaa niistä
kokonainen valupuu. Tämä vähentää valmistuksen vaiheita ja tekee valupuun valmis-
tuksesta tarkasti toistettavissa olevan prosessin. (Hausman & Horne 2013.)

Valumallin sisäisellä rakenteella ei ole juurikaan vaikutusta sen soveltumiseen valu-
muotin valmistamiseksi. Soveltuvaksi valumallin rakenteeksi riittää yhtenäinen pinta,
joka kestää muottikuoren painon. Onttojen, tai vähäistä sisäistä tukimateriaalia sisäl-
tävien mallien valmistus on yksinkertaista toteuttaa materiaalia lisäävillä valmistus-
menetelmillä. Tällaisien mallien valmistus on nopeampaa ja vaatii vähemmän mate-
riaalia kuin umpinaisten, jolloin valmistuksessa voidaan säästää materiaalikustannuk-
sissa.

Jos valetussa kappaleessa tai valumallissa havaitaan virheitä, kuten pieniä yksityis-
kohtia, joiden valaminen ei onnistu, on CAD-malliin helppo tehdä muutoksia jälkikä-
teen, ja valmistaa uusi valumalli. 3D-tulostimilla valmistetut muovimallit ovat edulli-
sia, jolloin useiden testikierrosten teko optimaalisen mallin löytämiseksi ei kasvata
kustannuksia liian suuriksi. Myös skaalattavuus on yksi menetelmän eduista. Digitaaliset
mallit on helppo skaalata moninkertaisesti suuremmiksi tai pienemmiksi. Valu-
kutistumaa voidaan kompensoida skaalaamalla kappale kutistuman verran suurem-
maksi. Suurimpia haasteita menetelmälle asettavat valmistuksen mittatarkkuuden ja
nopeuden kasvattaminen, tukimateriaalin tarpeen vähentäminen ja luotettavan tut-
kimustiedon vähäinen saatavuus. (Hausman & Horne 2013.)

8 Tarkkuusvaluprosessin suunnittelu toimeksiantajalle

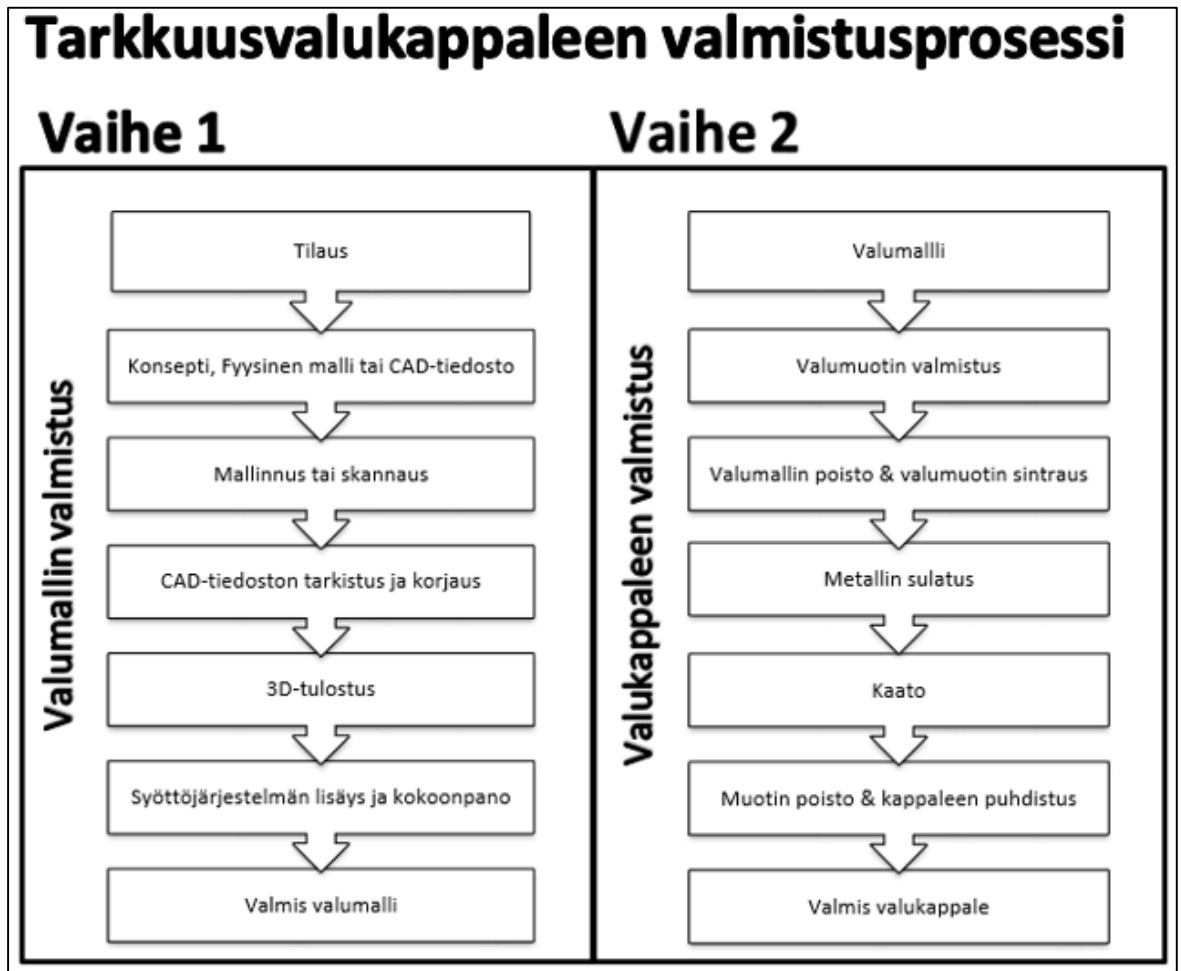
Työssä suunniteltiin tarkkuusvalukappaleen valmistuksesta prosessi, jossa materiaa-
lia lisäävää valmistusta hyödynnetään valumallin valmistuksessa. Prosessi voidaan
määritellä joukoksi toisiinsa liittyviä toistuvia toimintoja ja niiden toteuttamiseen
vaadittavia resursseja, jotka mahdollistavat syötteiden muuttamisen tuotteiksi. (Pro-
sessin käsite, n.d.).

8.1 Aiempi tieto vastaavista prosesseista

Yritykselle suunnitellun tarkkuusvalukappaleen valmistusprosessin määrittelemiseksi etsittiin tietoa samankaltaisista prosesseista. Tarkkuusvalukappaleen valmistuksesta tietoa oli saatavilla runsaasti, toisin kuin materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämisestä, valumallien valmistuksessa, kuorimuottimenetelmällä. 3D-tulostuksen hyödyntämisestä tarkkuusvalumallien valmistuksessa oli kyllä olemassa kokeiluja, mutta niitä esiteltiin vain sosiaalisessa mediassa, kuten Youtube-videoilla, ja suppeissa blogikirjoituksissa. Suurin osa näistä kokeiluista oli lisäksi tehty massiivimenetelmällä. Yhtään dokumentoitua kokeilua materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettujen muovimallien käytöstä kuorimuottimenetelmässä ei tiedonhaussa löydetty.

8.2 Prosessin määrittely

Tarkkuusvalettavan kappaleen valmistuksesta yrityksessä laadittiin prosessikaavio, jonka pohjalta aloitettiin prosessin toteutuksen tarkempi suunnittelu. Perinteinen tarkkuusvalumallin valmistus mukautettiin toteutettavaksi materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä.



Kuvio 11. Tarkkuusvalukappaleen valmistuksen prosessikaavio

Suunnitellun tarkkuusvalukappaleen valmistusprosessin työvaiheet on esitetty kuviossa 11. Prosessi on jaettu kahteen osaprosessiin, vaiheisiin 1 ja 2, joista ensimmäinen sisältää valumallin valmistuksen ja jälkimmäinen valukappaleen valmistuksen työvaiheet. Prosessin toista vaihetta ei tässä työssä käsitellä, sillä se sisältyy aiheesta valmisteilla olevaan toiseen opinnäytetyöhön. Ensimmäisen vaiheen käsittämä osaprosessi on sama kuin minkä tahansa kappaleen valmistus materiaalia lisäävillä menetelmillä, sillä erotuksella, että kappale on suunniteltava tarkkuusvalua silmällä pitäen.

Prosessissa valumallin valmistus alkaa tilauksesta. Asiakkaan kanssa määritellään, mistä lähtökohdista valettavan kappaleen valmistus aloitetaan. Lähtökohtana voi olla valmistettavan valukappaleen konsepti, olemassa oleva fyysinen malli tai kappaleen CAD-malli. Tilauksen muodosta riippuen kappaleesta täytyy luoda CAD-malli joko 3D-

skannaamalla fyysinen kappale tai mallintamalla se jollakin mallinnusohjelmalla. 3D-skannaamalla luodut CAD-mallit on skannauksen jälkeen tarkistettava manuaalisesti virheiden varalta. Kun CAD-malli on muodostettu, se täytyy vielä valmistella AM-laitteella valmistettavaksi. CAD-malli voidaan seuraavaksi 3D-tulostaa yrityksen AM-laitteilla, jonka jälkeen kappale voidaan tarvittaessa kokoonpanna ja siihen voidaan liittää sulan metallin syöttöjärjestelmä. Syöttöjärjestelmä on edullisinta valmistaa 3D-tulostamalla samanaikaisesti kappaleeseen kiinni, mutta se voidaan myös 3D-tulostaa omana kappaleenaan ja liittää valumalliin esimerkiksi liimaamalla. Yksinkertaisia syöttöjärjestelmiä voidaan myös valmistaa käsin.

Työvaiheiden suunnittelun jälkeen prosessin toteuttamiseen vaadittavat resurssit määriteltiin alustavasti.

Vaadittavia resursseja:

- 3D-skanneri
- Mallinnusohjelma
- AM-laite ja filamentti
- Muotin valmistusmateriaalit ja varusteet
- Valulaitteistot ja varusteet
- Valmistustilat

Vaiheen 1 tarkempaa suunnittelua varten yrityksessä käytössä olevat resurssit kartoitettiin. Vaiheen 2 vaatimista resursseista tarkasteltiin vain valu-uuneja. Valumallin valmistukseen valittiin soveltuvin materiaali testien perusteella. Yrityksen AM-laitteiden asetukset optimoitiin valitun materiaalin valmistusta varten. Muottikuoren valmistamista optimoiduilla asetuksilla valmistetun muovimallin pinnalle kokeiltiin. Selvityksen perusteella prosessille laadittiin lopuksi työohje yrityksen käyttöön. Edellä mainittuja toimenpiteitä käsitellään tarkemmin seuraavissa kappaleissa.

9 Yrityksen resurssien kartoitus prosessia varten

Jotta yritykselle voitiin suunnitella valumallin valmistusprosessi, selvitettiin mitä resursseja yrityksessä oli, joita prosessissa voidaan hyödyntää. Selvitetiin myös, oliko yrityksen resursseilla mahdollista toteuttaa suunniteltu prosessi, vai oliko lisähankinnoille tarvetta.

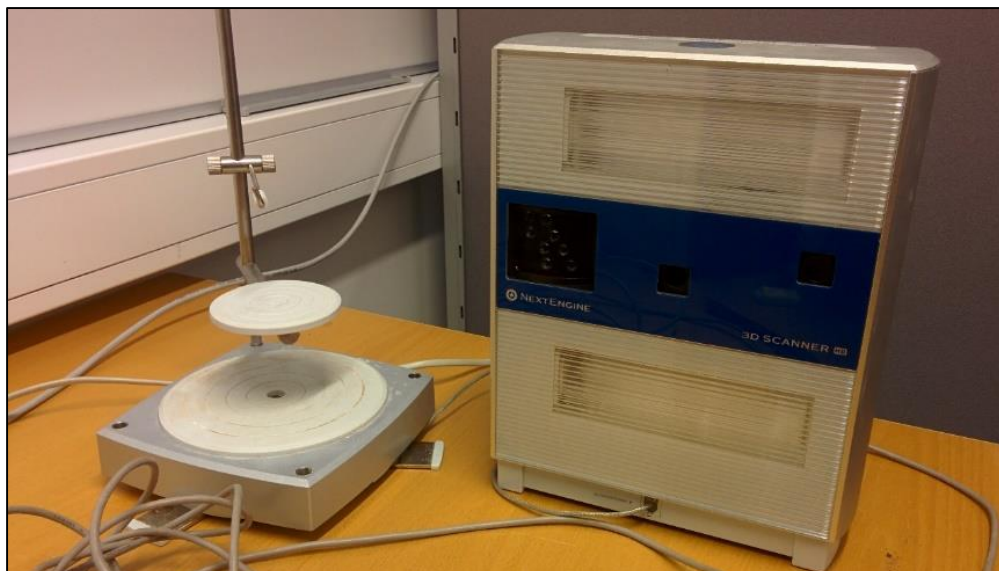
9.1 3D-skannerit

Valumallin valmistus voidaan tehdä olemassa olevaan kappaleeseen perustuen.

Skannaamalla kappale kolmiulotteisesti saadaan muodostettua mittatarkka digitaalinen malli, joka soveltuu usein pienin muutoksin materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä valmistettavaksi.

9.1.1 Nextengine 3D-skanneri

Nextengine model2020i-3D-skanneri on ollut yrityksessä käytössä työpöydälle mahduttavien pienikokoisten kappaleiden skannaamiseen. Laitteessa on skannausalusta, joka pyörii automaattisesti, jotta kaikki kappaleen muodot saadaan skannattua. Skanneri ei aseta rajoituksia skannattavan kappaleen koolle. Suurikokoiset kappaleet voidaan skannata osissa ja yhdistää tietokoneella. Laitteella voidaan skannata Macro- tai Wide-tilassa, jolloin skannattava alue on joko 13 cm x 9,7 cm tai 34,3 cm x 25,7 cm. Mittatarkkuus on 0,13 millimetriä Macro-tilassa ja 0,38 millimetriä Wide-tilassa. Kuviossa 12 on kuva yrityksessä käytössä olevasta laitteesta. (Nextengine-skannerin esite n.d.)



Kuvio 12. Nextengine 3D-skanneri

9.1.2 Faro-keilain

Yrityksessä on käytössä Faro Focus 3D 120-skanneri. Kuviossa 13 on kuva yrityksen laitteesta. Laitetta käytetään yrityksessä julkisivujen ja ulkotilojen skannaukseen. Asetuksia muuttamalla on myös mahdollista skannata suuria ja pieniä kappaleita ja koneita. Laitteessa on kamera, jonka ottamat kuvat yhdistyvät pistepilven pinnalle. Skannauksessa käytetään tähyjä, joiden avulla skannerin tallentamat eri pistepilvet yhdistyvät automaattisesti. Skannausalue on pienimmillään 0,6 metriä ja suurimmillaan 120 metriä. Mittatarkkuus on maksimissaan 2 millimetriä. Laitetta voidaan ohjata sen kyljessä olevasta kosketusnäytöstä, tai tietokoneella WLAN- tai kaapeliyhteydellä. (FARO Focus 3D 120 n.d.)



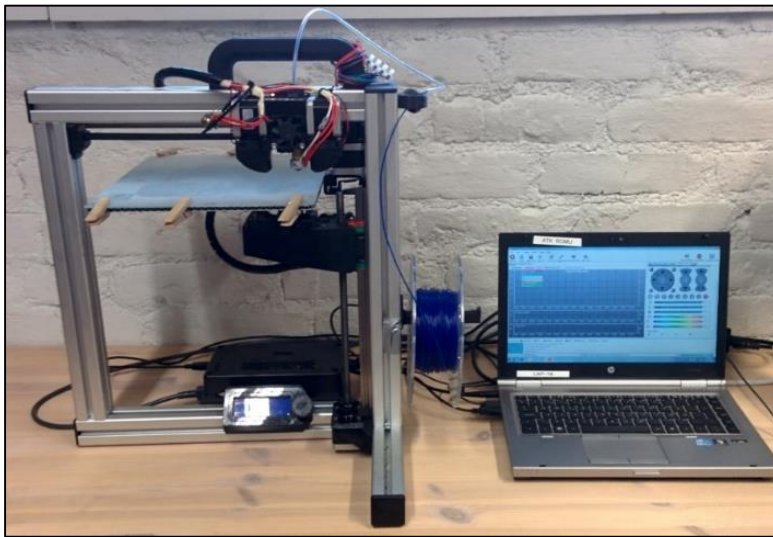
Kuvio 13. Faro Focus 3D 120

9.2 Materiaalia lisäävät valmistuslaitteet

Prosolve Oy oli hankkinut käyttöönsä kaksi kuluttajatason FDM-periaatteella toimivaa työpöytämallin AM-laitetta. Suunnitellussa prosessissa on tarkoitus valmistaa valumallit kyseisillä laitteilla.

9.2.1 Felix 3.0

Felix 3.0 on Felixusa nimisen yrityksen ensimmäisiä AM-laitteita. Laite tilattiin osina ja kokoonpanon suoritti Prosolven työntekijä. Felix 3.0 on erittäin pelkistetty laite, jolla on pyritty edulliseen, mutta moniin tarkoituksiin riittävän tarkkaan laitteeseen. Laite on yrityksen käytössä osoittautunut luotettavaksi ja tarkkuudeltaan riittäväksi moniin sovelluksiin. Kuviossa 14 on kuva Prosolven käyttöön hankitusta laitteesta.



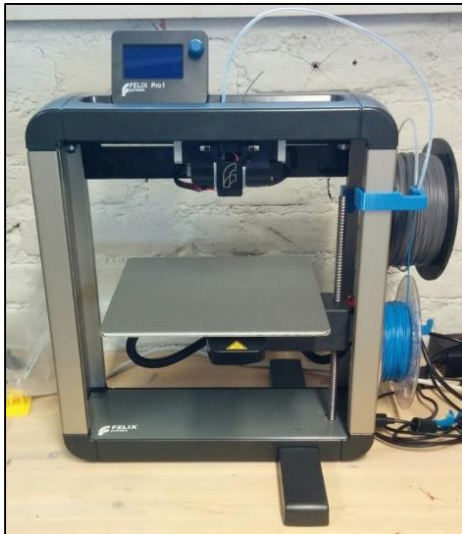
Kuvio 14. Felix 3.0-3D-tulostin

Laitteen tietoja:

- Menetelmä: FDM
 - Suuttimien lukumäärä: 2
 - Valmistusalue: 25,5 x 20,5 x 23,5 cm
 - Minimi kerrospaksuus: 50 mikrometriä
 - Maksimi kerrospaksuus: 300 mikrometriä
 - XY-tarkkuus: 50 mikrometriä
 - Laitteessa on lämmitettävä tulostusalue.
 - Filamentin halkaisija: 1.75 mm
 - Suuttimen maksimi lämpötila 275°C
- (Felix Printers, Felix 3.0 n.d.)

9.2.2 Felix Pro1

Felix Pro1 on Felixusa:n paranneltu versio Felix 3.0:sta. Laitteen ulkonäköön on panostettu, ja sillä on suurempi tarkkuus ja nopeus vanhaan versioon verrattuna. Valmistusalueen kalibrointi tapahtuu automaattisesti. Kuviossa 15 on kuva yrityksen käytössä olevasta laitteesta.



Kuvio 15. Felix Pro1-3D-tulostin

Laitteen tietoja:

- Menetelmä: FDM
- Suutinten lukumäärä: 2
- Valmistusalue: 25,5 x 24,5 x 22,5 cm
- Minimi kerrospaksuus: 50 mikrometriä
- Maksimi kerrospaksuus: 250 mikrometriä
- XY-tarkkuus: 50 mikrometriä
- Laitteessa on lämmitettävä tulostusalue.
- Filamentin halkaisija: 1.75 mm
- Suuttimen maksimi lämpötila 275°C
(FELIX Pro 1 - 3D Printer n.d.)

9.3 Filamentit

Yrityksessä oli käytössä usean valmistajan PLA- ja ABS-filamenttia, sekä Ninjatek-yrityksen Ninjaflex-filamenttia. Kaikkia kolmea filamenttia oli varastossa useita keloja eri väreissä.

9.4 Ohjelmistot

Yrityksessä oli käytössä seuraavia ohjelmia, joita voitiin käyttää 3D-tulostettavan valumallin CAD-mallin luomiseksi ja STL-muotoon muuntamiseksi.

ScanStudio HD

ScanStudio HD on Nextengine-skannerin valmistajan oma ohjelma. Ohjelmalla voidaan tarkastella skannerin luomaa skannattua tiedostoa ja tehdä tiedostoon yksinkertaisia muokkauksia.

Geomagic Studio

Geomagic Studio-ohjelmaa käytetään 3D-skannerin luomien pistepilvitiedostojen muokkaukseen ja viimeistelyyn. Ohjelmassa on monipuoliset toiminnot muokkausta varten. Ohjelma on yrityksessä käytössä sekä Nextengine- että Faro-skannerilla luotujen tiedostojen muokkaukseen.

Mallinnusohjelmat

Yrityksen käytössä on yleisimmät mallinnusohjelmat, Catia, Solidworks ja Autodesk, joilla voidaan luoda uusia CAD-malleja ja muokata skannerien tiedoista luotuja malleja. Ohjelmilla tiedostot voidaan muuttaa STL-muotoon, jolloin niitä voi tarkastella Repetier Host-ohjelmalla.

Repetier Host

Repetier Host on ilmaisohjelma, jolla STL-tiedostot voidaan viipaloida ohuiksi kerroksiksi. Ohjelma määrittää digitaalisen mallin perusteella automaattisesti valmistuslaitteelle numeeriset ohjauskomennot, eli G-koodin kappaleen valmistamiseksi. Ohjelmalla voidaan myös ohjata AM-laitteita manuaalisesti.

9.5 Valu-uunit

Tarkkuusvaluprosessia varten Prosolven käyttöön päätettiin hankkia poltto- ja sulatusuuni, sillä yrityksen käytössä ei ollut omaa valulaitteistoa. Uunien hankintaa suunniteltiin yhdessä yrityksen edustajan kanssa. Uunien oli sovelluttava alumiinin ja kuparin sulatukseen ja niillä tuli voida valmistaa ulkomitoiltaan enintään muutamien kymmenien senttimetrien kokoisia valukappaleita. Hankittavien uunien tuli myös olla mahdollisimman edullisia.

Päätettiin suunnitella ja rakentaa yrityksen tarvitsemat uunit itse. Näin toimimalla ne oli mahdollista suunnitella parhaiten yrityksen käyttötarkoituksiin soveltuviksi. Uunien suunnittelu ja rakentaminen toteutettiin yrityksessä työskentelevän konetekniikan insinööriopiskelijan kanssa parityönä.

9.5.1 Suunnittelu

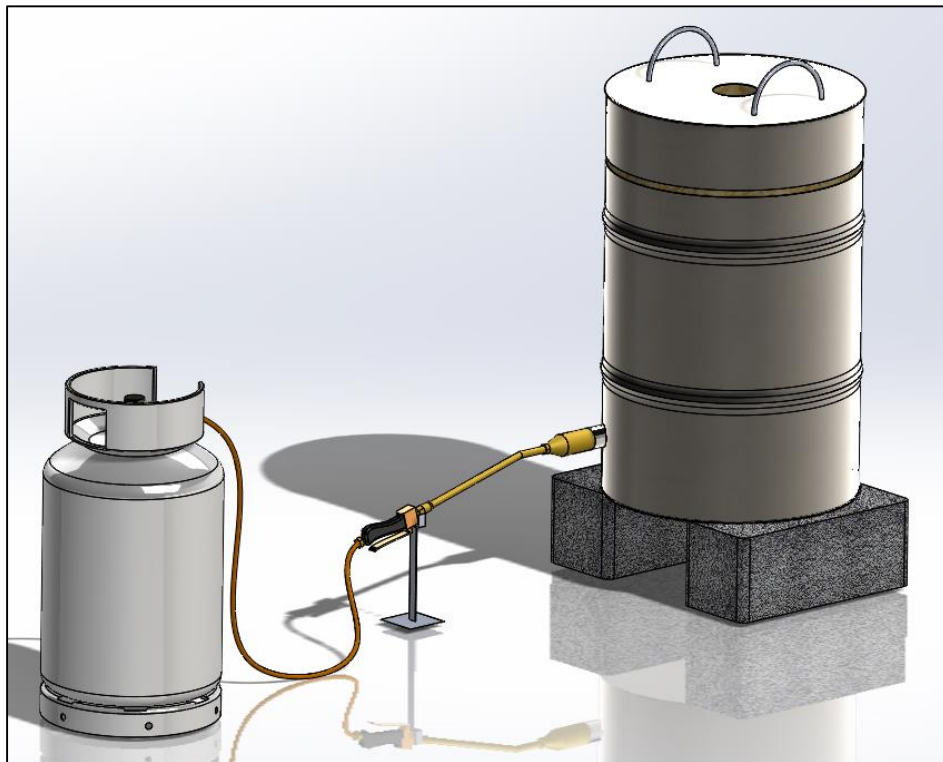
Ennen suunnittelun aloittamista selvitettiin, mitä muita vaatimuksia yrityksellä oli uuneille valukappaleiden koon, käytettävän valumetallin ja uunien kustannusten lisäksi. Selvisi, että uunien lämpötilaa tuli voida tarkastella. Niiden tuli myös saavuttaa tarvittava lämpötila riittävän nopeasti. Lisäksi uunien käyttökustannukset oli pyrittävä pitämään mahdollisimman alhaisina.

Suunnittelu aloitettiin perehtymällä tarkkuusvalutekniikkaa käsittelevään kirjallisuuteen ja tutkimalla Internetistä harrastajien valmistamia pienikokoisia valu-uuneja. Selvisi, että suurin osa tämän tyyppisistä uuneista on rakennettu sylinterinmuotoiseen teräsastiaan ja uunin lämmitys tapahtuu useimmiten joko kaasua tai öljyä polttamalla.

Hankittujen tietojen pohjalta polttouuni päätettiin rakentaa 200 litran peltitynnyristä. Sulatusuunin rakennusaihioksi valittiin 100 litran peltitynnyri. Uunin lämmityskammion eristämiseksi tynnyrin sisäpinta päätettiin eristää tulenkestävillä materiaaleilla. Uloimmaksi eristekerrokseksi valittiin tulenkestävä villa ja sisemmäksi eristekerrokseksi tulenkestävä valumassa. Tulenkestävän villan maksimi käyttölämpötila oli 1200 °C ja valumassan 1300 °C. Polttouunin korkein vaadittu lämpötila oli keraamimuottien sintrauksessa tarvittava 1000 °C. Sulatusuunilla oli tarkoitus sulattaa ainakin alumiinia ja kuparia, jolloin korkein tarvittava lämpötila oli kuparin sulamispiste,

1085 °C. Uunien lämmitysmenetelmäksi suunniteltiin palavan nestekaasun syöttäminen lämmityskammioon. Ratkaisua puolsi myös yrityksen aiemmat koevalut erään toisen yrityksen tiloissa, rakenteeltaan vastaavanlaisilla uuneilla.

Alustavan suunnitelman perusteella laadittiin Solidworks -ohjelmalla luonnos polttouunille todellisilla mitoilla havainnollistamistarkoitukseen ja materiaalitarpeen tarkastelua varten (ks. kuvio 16). Ennen uunien rakentamisen aloittamista suunnitelmasta pyydettiin palautetta myös eräältä Valmetin valusioihin perehtyneeltä henkilöltä.



Kuvio 16. Polttouunin 3D-malli

Polttouunille tehtiin alustava kustannusarvio (ks. Liite 1). Materiaalien kustannukset koottiin alan yritysten Internetsivuilta. Uunien rakentamisen itse todettiin huomattavasti edullisemmaksi, kuin jos ne olisi ostettu. Uunien rakentaminen ei vaatinut uusien työkalujen hankkimista, sillä yrityksessä oli jo rakentamiseen soveltuvat työkalut käytettävissä.

Suunnittelun edetessä alustavaan suunnitelmaan tehtiin muutoksia yrityksen toiveiden ja omien huomioiden perusteella. Uunien vaatimukseksi lisättiin, että niiden tuli olla helposti siirreltävässä. Uunien rakentamiseen päätettiin käyttää yrityksen kontaktien kautta hankittuja materiaaleja, sillä niiden kustannukset todettiin alhaisemmiksi kuin kustannusarviossa käytetyt materiaalit. Tästä syystä myös alkuperäisessä suunnitelmassa käytetty valumassa korvattiin tulenkestävillä tiilillä, jotka muurataan tulenkestävällä laastilla. Polttouunille suunniteltiin lisäosa, jotta suurempien muottien kuumentaminen on mahdollista. Polttouunin alaosa voidaan käyttää myös ilman lisäosaa, jolloin pienten muottien polttaminen on tehokkaampaa.

9.5.2 Rakentaminen

Uunien rakentamisen eri vaiheiden välissä keskusteltiin yrityksen edustajan kanssa valmistustyön etenemisestä ja valmistuksen turvallisuusnäkökohtien täyttymisestä. Uunit rakennettiin yrityksen tiloissa. Uunien rakentaminen aloitettiin tyhjiin öljytynnyreihin leikkaamalla ne korkeudeltaan sopiviksi (ks. kuvio 17).



Kuvio 17. Tynnyrin ylimääräisen osan poisto

Uunien pohjalle ja seinämälle mitattiin sopivat palat tulenkestävää villaa ja palat sovitettiin paikalleen (ks. kuvio 18).



Kuvio 18. Tynnyrien vuoraus tulenkestävällä villalla

Seuraavaksi uunin kylkeen porattiin kaasun syöttöputkelle aukko (ks. kuvio 19). Aukko mitoitettiin hieman putkea suuremmaksi, jotta se voitiin asentaa vinoon.



Kuvio 19. Kaasun syöttöaukko

Teräsputkea leikattiin sopivan mittainen pala kaasun syöttöputkeksi. Tulenkestävien tiilien ja putken paikoitus kokeiltiin ennen muurausta (ks. kuvio 20). Putki asetettiin niin, että kaasu kulkee uunin seinänviertä pitkin, jotta liekki lämmittää uunia, eikä polttaisi muottia.



Kuvio 20. Kaasun syöttöputken ja tulenkestävien tiilien paikoitus

Muurauslaasti sekoitettiin veteen laastin ohjeen mukaan ja uuni muurattiin (ks. kuvio 21). Valulaastista poistui kosteutta sen kuivuesssa, mikä ilmeni kuivuneessa laastissa materiaalivajauksina ja halkeamina. Laastin kuivuttua lisättiin uusi kerros laastia tarvittaviin kohtiin.



Kuvio 21. Polttouunin muuraus

Toisesta 200 litran tynnyristä rakennettiin polttouunille lisäosa, jotta uunin kokoa on mahdollista tarvittaessa kasvattaa. Lisäosan rakennuksen vaiheet on kuvattu kuviossa 22. Tynnyrin pohjasta muotoiltiin tiilille kannakerengas. Lisäosan muuraus toteutettiin samaan tapaan kuin perusosan muuraus.



Kuvio 22. Polttouunin korotusosa

Uunille rakennettiin kansi tynnyrin yläosasta. Keskelle levyä porattiin ilman poistoaukko ja kannen sisäpintaan kiinnitettiin tulenkestävää villaa. Villa kiinnitettiin poraamalla levyyn pieniä reikiä, joista pujotettiin villan läpi rautalankaa.



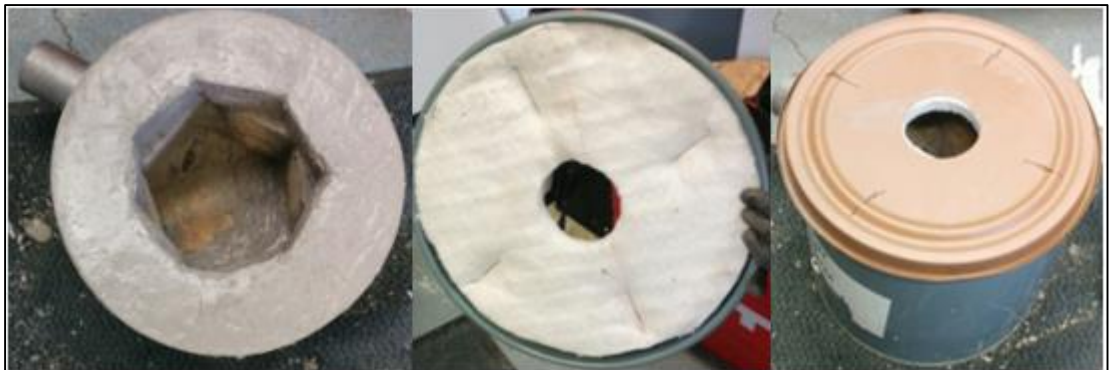
Kuvio 23. Polttouunin kansi

Korotusosan ja perusosan väliin muotoiltiin tulenkestävästä villasta myös tiivistysrenkas (ks. kuvio 24). Kuviossa on myös esitetty polttouuni koottuna lisäosan kanssa.



Kuvio 24. Polttouunin kokoonpano

100 litran tynnyristä valmistettu sulatusuuni on kuvattu kuviossa 25. Sulatusuunin valmistus toteutettiin samalla tapaa kuin polttouunin valmistus.



Kuvio 25. Sulatusuunin kokoonpano

Uunien rakentaminen eteni opinnäytetyön aikana siihen vaiheeseen, että niiden toimivuutta voitiin testata. Rakentaminen tulee jatkumaan vielä opinnäytetyön jälkeen. Uunien alle lisätään pyörät ja kansiin ja kylkiin kiinnitetään käsittelyä helpottavat kahvat.

9.6 Valmistustilat

Yrityksessä AM-laitteet sijaitsivat erillisessä varastotilassa melu- ja hajuhaittojen minimoimiseksi. Valu-uuneille järjestyi tila Valmetin tehdasalueen hallirakennuksesta. Tilalle tehtiin paloturvallisuustarkastus ja tulevat valut tullaan suorittamaan kyseisessä hallissa.

9.7 Yhteenveto resursseista

Kartoitettujen resurssien avulla oli mahdollista toteuttaa suunniteltu prosessi. Prosessissa kappaleiden 3D-skannaukseen käytettiin vain Nextengine-skanneria, sillä Faro-keilain oli varattu muihin työtehtäviin ja sen käyttäminen pienikokoisten kappaleiden skannaamiseen on monimutkaista. Kumpikin AM-laite soveltui prosessissa käytettäväksi. Yrityksessä olleiden filamenttien soveltuvuus valumallin valmistusmateriaaliksi testataan. Käytössä oli riittävät ohjelmat digitaalisen valumallin luomiseksi. Valu-uunit valmistettiin käyttötarkoitukseen soveltuviksi ja niille järjestettiin käyttöön sopivat tilat.

10 Valumallin materiaalin valinta prosessille

Materiaalin valintaa varten on ensin tunnistettava valmistettavan kappaleen toimintojen asettamat vaatimukset, kuten minimi murtolujuusarvo, sekä toimintaympäristön vaatimukset, kuten korroosionkestävyysvaatimus. Seuraavaksi nämä vaatimukset muutetaan materiaaliominaisuuksiksi. Ominaisuuksiltaan sopivia materiaaleja tarkastellessa on kiinnitettävä huomiota myös materiaalien hintaan, saatavuuteen ja valmistettavuuteen. Näitä tekijöitä vertailemalla valitaan parhaimmin soveltuva materiaali. (Honkavaara 2015.)

10.1 Valumallin materiaalilta vaadittuja ominaisuuksia

Valumalli poistetaan valumuotin sisältä kuumentamalla muottia. Valumuotin onnistuminen edellyttää, että valumalli on pinnanlaadultaan hyvä ja että malli sulaa ja palaa puhtaasti pois keraamimuotin sisältä. Malli ei myöskään saa turvota muotin

sisällä, sillä se aiheuttaa halkeamia muottiin. Erona tarkkuusvalussa perinteisesti käytettyihin vahamateriaaleihin on, että muovimateriaalit eivät sula kuten vaha. Osa muovista sulaa pois muotin sisältä ja palaa muotin ulkopuolella. Myös muottiin jäävä materiaali palaa, jättäen jälkeensä tuhkaa, jonka määrä on tyypillisesti 0,021 prosenttia muovimallista. Muottiin jäävät kiinteät palamistuotteet vaikuttavat heikentävästi muotilla valmistettavan valukappaleen laatuun, sillä kaikki muotin virheet toistuvat valukappaleessa. Tästä syystä on tärkeää, että palaminen on mahdollisimman puhdasta. Vähäisiä materiaali jäämiä on kuitenkin usein yksinkertaista poistaa muotista paineilman avulla. (Investment Casting n.d.)

Valumallin materiaalin valintaan voi vaikuttaa myös materiaalin hinta, saatavuus, kierrätettävyyden, ympäristötekijät ja työhygieeniset tekijät. Myös mittatarkkuuteen vaikuttavilla tekijöillä, eli materiaalin termisellä laajenemisella ja kutistumisella on merkitystä materiaalia valittaessa. (Investment Casting n.d.)

10.2 Alustava materiaalien rajaus

Tarkoituksena oli selvittää FDM-laitteissa käytettyjen materiaalien soveltuvuutta valumallimateriaaliksi. Yrityksessä oli käytössä kolme filamenttimateriaalia, PLA, ABS ja NinjaFlex®. NinjaFlex on polyuretaanimuovi, joka on joustava ja kumimainen materiaali. Se rajattiin pois tarkastelusta, sillä se ei heikon jäykkyyden vuoksi sovellu lainkaan kuorimuotin valmistukseen.

Tarkkuusvalumallit on perinteisesti valmistettu vahasta, jolloin voidaan olettaa, että vahankaltaiset materiaalit soveltuvat parhaimmin valumalleiksi. Filamenttia myyvien yritysten tuotevalikoimia tutkittiin ja löydettiin kaksi vahankaltaista filamenttia, tuotenimillä Moldlay ja Print2Cast. Koska PLA ja ABS ovat kuitenkin huomattavasti niitä edullisempia, ja yrityksellä oli niiden käytöstä kokemusta, päätettiin ensin testata PLA:n ja ABS:n soveltuvuutta prosessiin ennen muiden materiaalien hankintaa. Jatkossa yrityksessä on tarkoitus tehdä kokeiluja myös muilla filamenttimateriaaleilla.

10.3 Polttotesti

Jotta voitiin tarkastella PLA- ja ABS-materiaalin käyttäytymistä palaessa, suoritettiin yksinkertainen polttotesti. Polttotestillä selvitettiin, kumpi materiaali soveltuu palominaisuuksiltaan paremmin valumallin valmistusmateriaaliksi.

10.3.1 Testin suunnittelu

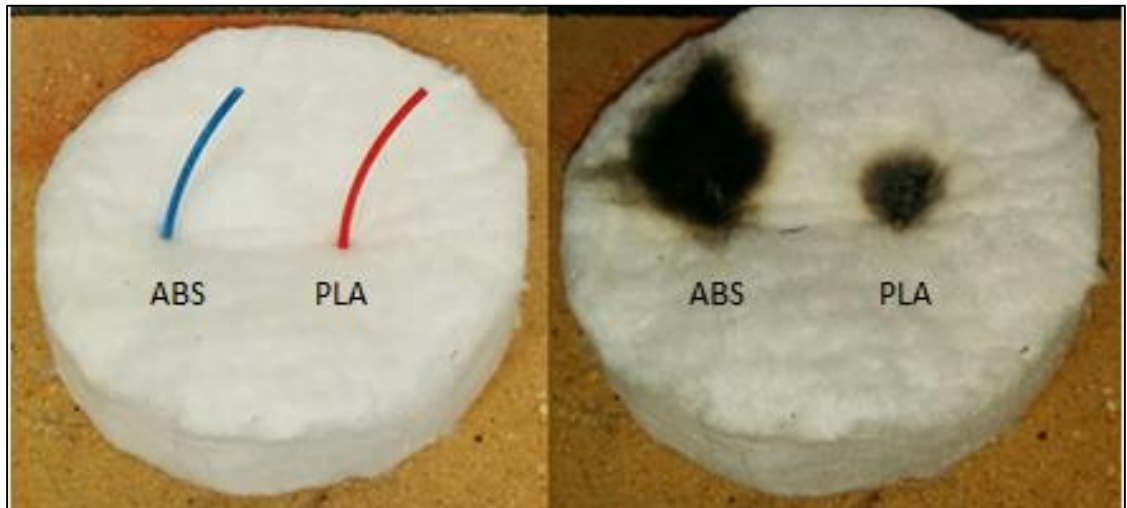
Testin aikana vertaillaan silmämääräisesti liekin savuamista ja materiaali jäämiä alustassa. Testiä varten perehdyttiin myös materiaalien käyttöturvallisuustiedotteisiin. Molempien materiaalien käyttöturvallisuustiedotteissa varoitetaan palamisesta syntyvistä terveydelle haitallisista kaasuista. Tämä huomioitiin suorittamalla testi ulkona, jotta välttyttiin hengittämästä terveydelle haitallisia kaasuja. Paloturvallisuus huomioitiin suorittamalla testaus paloturvallisella alustalla, poistamalla ympäristöstä herkästi syttyvä materiaali ja pitämällä jauhesammutin helposti saatavilla. Lisäksi materiaalia tullaan polttamaan vain pieni määrä, jolloin terveyshaittojen ja turvallisuusriskien vaara on vähäinen.

10.3.2 Testin toteutus

Kumpaakin filamenttia mitattiin kolme noin 5 cm palaa. Filamenttilangat asetettiin tulenkestävän villan päälle pystyasentoon. Lankoja kuumennettiin vapaasta päästä taskusytyttimellä, kunnes palamisreaktio käynnistyi. Filamenttien annettiin palaa loppuun asti. Materiaaleja tarkkailtiin palamisen aikana, ja palamistuotteita tarkasteltiin, kun kaikki materiaali oli palanut.

10.3.3 Tulosten tarkastelu

ABS-materiaali synnytti palaessaan runsaasti tummaa savua ja nokihiukkasia. PLA ei palaessaan synnyttänyt silmin havaittavaa savua. ABS-materiaalin poltosta jäi alustaan moninkertainen määrä materiaali jäämiä PLA-materiaaliin verrattuna (ks. kuvio 26). Kummankin filamentin kaikilla kolmella palalla polttotestin lopputulos oli samanlainen.



Kuvio 26. Filamenttilangat ennen polttoa ja palamistuotteet

Koska PLA -materiaalin palaminen synnytti vähemmän kiinteitä palamistuotteita kuin ABS, sitä pidettiin soveltuvampana tarkkuusvalumallin valmistamiseen. Testin perusteella valitaan alustavasti valumallien valmistusmateriaaliksi PLA-muovi. Lisätestaukselle on kuitenkin tarvetta, sillä materiaalin lämpölaajenemisesta ei ole saatavilla tietoa. Materiaalia tullaan käyttämään valumuottien valmistukseen koevaluissa, jotta varmistetaan sen soveltuvuudesta valumalliksi. Mikäli PLA:n todetaan jatkossa soveltuvan heikosti vahamenetelmälle, tullaan tarkastelemaan myös muita materiaalivaihtoehtoja.

11 Valmistuslaitteiden asetusten optimointi

Tarkkuusvalumallin pinnanlaatu ja virheet mallissa toistuvat suoraan valetussa kappaleessa. Tästä syystä mallin pinnanlaadun on oltava mahdollisimman hyvä. (Investment Casting n.d.) Valmistettavien kappaleiden hyvän pinnanlaadun varmistamiseksi suunniteltiin testit, joilla tarkasteltiin AM-laitteiden valmistusasetusten vaikutusta niillä valmistettavien 3D-tulosteiden pinnanlaatuun. Muiden ominaisuuksien, kuten kappaleiden lujuuden tarkastelua ei suoritettu, sillä niillä ei ole juurikaan vaikutusta valumallin soveltuvuudelle tarkkuusvaluprosessiin.

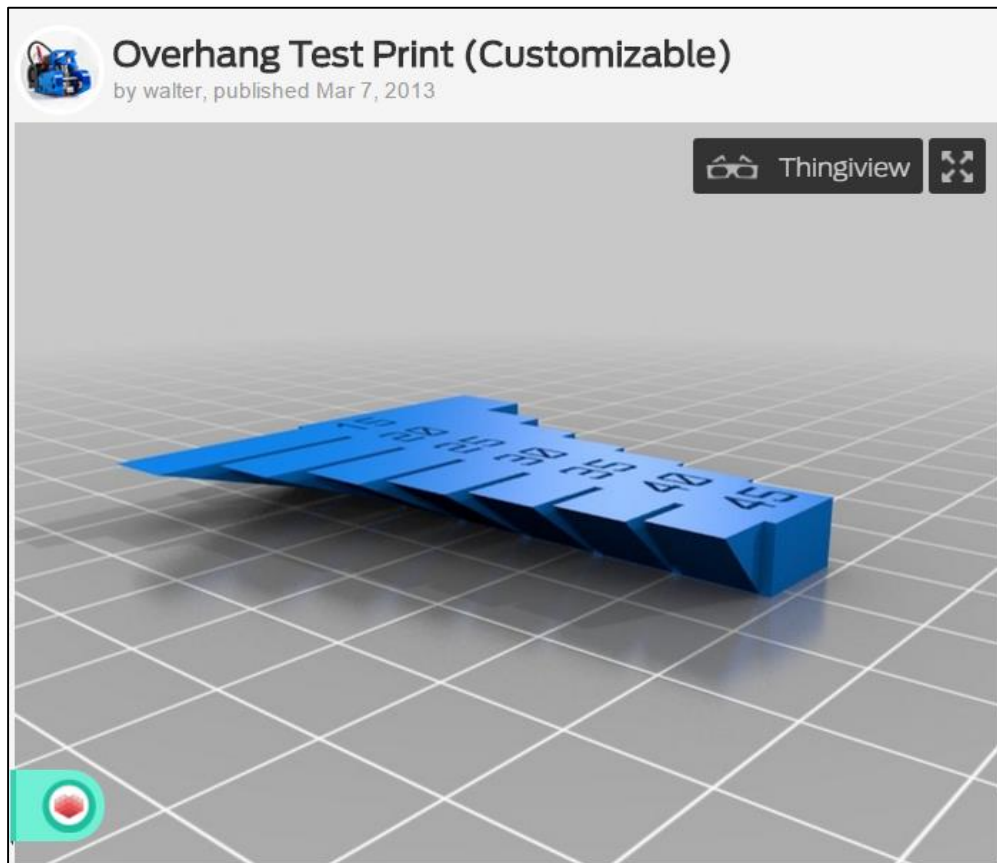
11.1.1 Optimointitestin suunnittelu

Filamenttimateriaalien valmistajat suosittelevat käytettäväksi materiaalikohtaisia asetusarvoja AM-laitteiden suuttimen ja tulostusalustan lämpötilalle, syöttönopeudelle ja muille asetusarvoille, mutta kokemuksen perusteella on havaittu, että ne eivät johda optimaaliseen kappaleen laatuun. Laitteiden välillä on eroja, ja parhaan mahdollisen valmistuslaadun saavuttamiseksi on kullekin materiaalille tehtävä jokaisella laitteella erikseen tarkastelu eri asetuksilla.

Testissä muutettavia asetuksia olivat kerrospaksuus, tulostusnopeus, suuttimen lämpötila, tuulettimen käyttö ja tulostusalustan lämpötila. Asetusten vaikutusten tarkastelu on kuitenkin hidasta, sillä kappaleen valmistus kestää kymmenistä minuuteista useisiin tunteihin. Jos jokaista asetusvariaatiota haluttaisiin tarkastella, tulisi testikappaleita valmistaa satoja. Tämän vuoksi kaikkia mahdollisia eri asetuskombinaatioita ei voitu tarkastella, vaan jokaisen kappaleen valmistumista seurattiin ja pyrittiin selvittämään samanaikaisesti useiden asetusten vaikutusta kappaleen pinnanlaatuun.

Ulkonemien valmistamisen ilman tukia on havaittu mittaavan hyvin AM-laitteen asetusten vaikutusta valmistettavan kappaleen laatuun. Testaamalla ulkonemien valmistumista voidaan havainnoida samanaikaisesti kerrosten yhteen sulautumista, pinnanlaatua ja kappaleen kieroutumista, joka on yksi yleisimpiä virhettä aiheuttavia tekijöitä FDM-menetelmällä valmistettaessa. Samalla on mahdollista selvittää, millaisia kappaleita on mahdollista valmistaa ilman tukirakenteita. Tukirakenteen käyttäminen vaikuttaa aina syntyvän kappaleen pinnanlaatuun heikentävästi. Kaikki tukimateriaali ei irtoa kappaleesta, vaan pieniä osia jää kiinni kappaleen pintaan, mistä seurauksena on rosoinen pinta.

Testikappaleeksi valittiin Thingiverse-internetsivustolta ladattavissa oleva Overhang Test Print (ks. kuvio 27). Testikappaleessa on seitsemän ulkonemaa, joiden kulmat tulostusalustan ja kappaleen välillä ovat 45, 40, 35, 30, 25, 20 ja 15 astetta, ja jotka on myös merkitty kappaleeseen. Valmistuneet kappaleet vertailtiin pisteyttämällä ulkonemat pinnanlaadun perusteella.



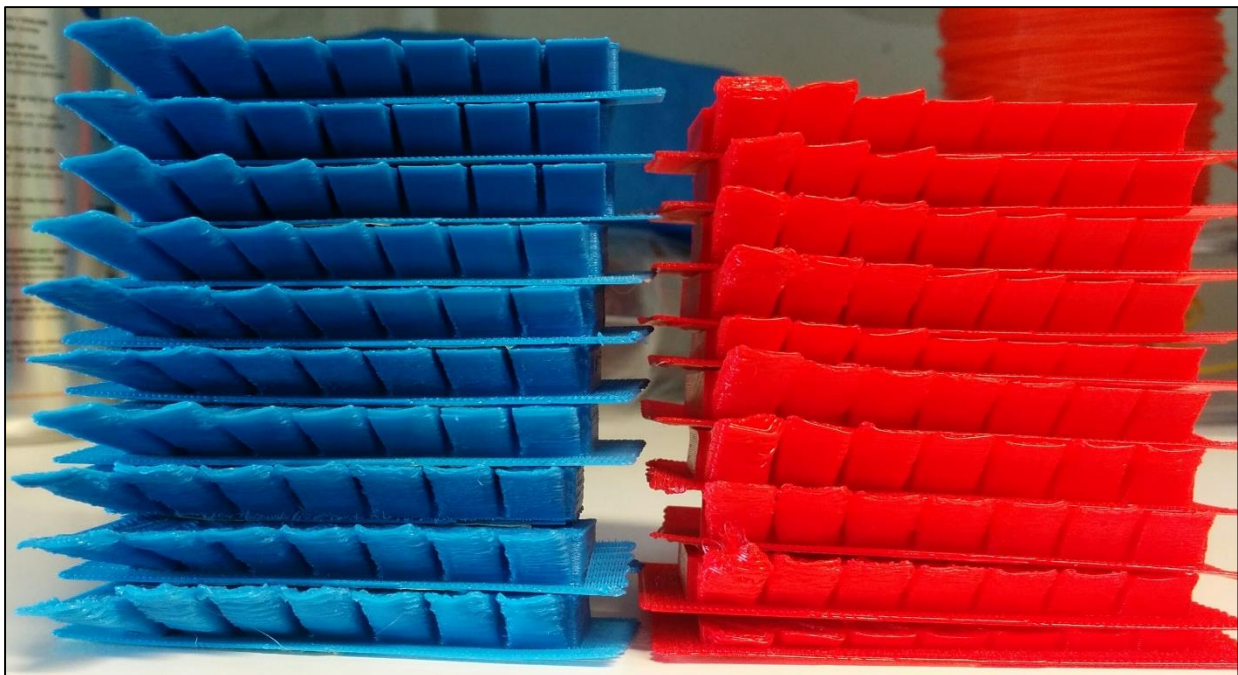
Kuvio 27. Asetusten optimoinnissa käytetyn kappaleen 3D-malli (kuvakaappaus Thingiverse-sivustolta)

11.1.2 Optimointitestin toteutus

Jokainen testikappaleen ulkonema tarkistettiin valmistuksen jälkeen ja tulokset kirjattiin Excel-taulukkoon (ks. Liite 2). Valmistuksen jälkeen kappaletta vertailtiin edellisiin testikappaleisiin ja seuraavan kappaleen valmistusasetuksia valittaessa pyrittiin päättämään, mikä asetus heikensi ja mikä paransi kappaleen laatua. Laatua heikentäviä asetuksia pyrittiin siis sulkemaan pois vaihtoehdoista. Esimerkiksi tulostusalustan lämmityksen pois päältä kytkemisen havaittiin vaikuttavan kappaleen laatuun positiivisesti, jolloin alustaa ei lämmitetty seuraavissa testeissä. Kappaleen valmistusta seurattiin alkuvaiheessa ja satunnaisin väliajoin, jotta mahdollisesti epäonnistunut valmistus voitiin keskeyttää mahdollisimman nopeasti, eikä aikaa ja materiaalia kuluisi turhaan. Jokainen ulkonema pisteytettiin erikseen ja näistä pisteistä muodostettiin kappaleen kokonaispisteet. Pisteitä annettiin yhdestä viiteen. Yksi piste merkitsi testissä käyttökelpotonta ulkonemaa ja viisi pistettä erinomaista ulkonemaa.

11.1.3 Tulosten tarkastelu

Testissä havaittiin, että AM-laitteen asetuksilla on valmistettavan kappaleen pinnanlaatuun huomattava vaikutus. Havaittiin myös, että 20 ja 15 asteen ulkonemien laatu ei millään asetuksilla ole riittävä. Kuviossa 28 testikappaleet on järjestetty niille annettujen pisteiden mukaan. Siniset kappaleet on valmistettu Felix Pro1:llä ja punaiset Felix 3.0:lla. Laitteiden välillä kappaleiden laadussa ei havaittu eroja. Optimaalisiksi havaitut asetukset laitteille olivat samat.



Kuvio 28. Testikappaleet järjestettyinä kokonaispisteiden mukaan

Testien perusteella voitiin määritellä PLA-materiaalilla valmistamiseen parhaat asetukset testatuilla laitteilla. Kyseisen filamentin valmistaja suosittelee suuttimen lämpötilaksi 210 °C ja valmistusalustan lämpötilaksi 55 °C. Tulostusnopeudeksi suositellaan 30-60 mm/s. Optimaalisiksi havaitut asetukset on esitetty taulukossa 3. Asetukset on arvioitu karkealla tarkkuudella, sillä testikappaleita oli mahdollista valmistaa vain rajallinen määrä. Tulosten perusteella valitut asetukset voidaan kuitenkin ottaa käyttöön laitteille PLA-materiaalilla, sillä niillä kappaleen pinnanlaatu on varmistettu laadukkaaksi.

Taulukko 3. AM-laitteiden optimiasetukset PLA-filamentille

**Optimiasetukset Felix 3.0 ja Felix Pro1-laitteille
PLA-materiaalilla**

- Suuttimen lämpötila: 189-190°C
- Kerrospaksuus 0,15 mm
- Tulostusnopeus: 20mm/s
- Tuuletin: 100%
- Valmistusalustan lämpötila: 0°C

Kappaleiden valmistamiseksi PLA-materiaalista, luotiin tulosten perusteella asetuspaketti, joka asettaa samalla kaikki laitteen asetukset vastaamaan testien perusteella saatuja asetuksia. Asetuspaketti voidaan valita listalta Repetier Host-viipalointiohjelmassa.

12 Muottikuoren muodostustesti

Valumuotti valmistetaan kuorimenetelmässä valumallin pinnalle. Yritykseen oli hankittu valumuotin valmistuksessa tarvittava keraamiliemi ja alumiinisilikaattijauheita, eli muottihiekkaa, eri karkeuksilla.

12.1 Testin toteutus

PLA-muovin soveltuvuutta valumalliksi testattiin kokeilemalla, miten materiaali reagoi, kun se joutuu kosketuksiin keraamiliemen kanssa, ja tarttuuko muottihiekka kiinni sen pintaan. Yrityksen AM-laitteella valmistettiin testikappale, joka kastettiin keraamiliemeen ja sen päälle siroteltiin hienojakoista alumiinisilikaattijauhetta. Kappaleen annettiin kuivua, jonka jälkeen se jälleen kastettiin keraamiliemeen ja sen päälle siroteltiin karkeampaa muottihiekkaa. Tätä toistettiin, kunnes kappaleen pinnalle oli muodostettu seitsemästä kerroksesta koostuva muottikuori (ks. kuvio 29).



Kuvio 29. Keraamikuoren muodostaminen valumallin pinnalle

12.2 Tulosten tarkastelu

Kuoren muodostamiskokeilussa havaittiin, että keraamiliemi kiinnittyi hyvin PLA-muovista valmistetun kappaleen pinnalle ja muottihiekka kiinnittyi puolestaan hyvin keraamiliemeen. Jatkossa on vielä tutkittava, miten valumalli ja keraamikuori käyttäytyvät, kun niitä kuumennetaan valumallin poistamisen aikana.

13 Työohjeen laatiminen

Kun yrityksen resurssit oli kartoitettu, valumallin materiaali oli valittu ja AM-laitteiden asetukset oli optimoitu, tarkkuusvalumallin valmistuksesta laadittiin yrityksen käyttöön työohje (ks. Liite 3). Ohjeen laatimisessa hyödynnettiin sekä alan kirjallisuutta, että opinnäytetyön aikana havaittuja ja testattuja seikkoja. Ohjeen laatiminen auttoi myös suunnitellun prosessin yksityiskohtien selkeyttämässä.

Ohjeessa perehdytetään ensin lukija yleisellä tasolla tarkkuusvalukappaleen valmistusprosessiin. Seuraavaksi ohjeessa on esitetty suunnittelussa huomioitavia asioita, kun kappaletta suunnitellaan valmistettavaksi tarkkuusvalamalla ja materiaalia lisävillä valmistusmenetelmillä. Huomioimalla suunnittelussa alusta alkaen kappaleelle

valittujen valmistusmenetelmien rajoitteet ja mahdollisuudet, voidaan vaikuttaa syntyvän tuotteen valmistuskustannuksiin ja laadukkuuteen.

Ohjeessa opastetaan seuraavaksi, kuinka muodostettu CAD-tiedosto valmistellaan yrityksen AM-laitteilla valmistettavaksi. Tiedoston muunto STL-muotoon on ohjeistettu vaiheittain. STL-tiedoston käsittely ja korjaus, sekä valmistusasetuksien valinta Repetier Host-viipalointiohjelmalla on myös käyty vaihe vaiheelta läpi. Ennen valmistuksen aloittamista suoritettavat esivalmistelut on ohjeistettu. Myös valmistuksen aloittaminen ja toiminta vikatilanteissa on käyty läpi ohjeessa. Lisäksi valmistuksen aikana tarkkailtavat seikat on tuotu esille ja valmistuneiden kappaleiden viimeistely ja osien kokoonpano on ohjeistettu.

Ohjeen avulla uuden työntekijän perehdytys valumallin suunnitteluun ja valmistukseen voidaan toteuttaa järjestelmällisesti. Ohjeesta on apua myös kokeneemmille työntekijöille prosessin yksittäisten seikkojen palauttamiseksi mieleen. Ohje tullaan asettamaan yrityksen sisäverkkoon työntekijöiden nähtäville ja sitä tullaan päivittämään tarpeen mukaan.

14 Pohdinta

Työssä suunniteltiin toimeksiantajalle prosessi, jossa FDM-menetelmällä toimivilla AM-laitteilla valmistettuja PLA-muovisia kappaleita käytetään valumalleina valukappaleiden valmistuksessa vahamenetelmällä. Vastaavanlaisista valukappaleen valmistusprosesseista löydettiin tiedonhaussa erittäin vähän materiaalia. Prosessin suunnittelussa sovellettiin materiaalia lisäävästä valmistuksesta ja vahamenetelmästä saatavilla ollutta tietoa uuden prosessin luomiseksi. Työssä oli siis mahdollisuus hyödyntää yhtä uusinta valmistusteknologiaa, vanhimpiin valmistusmenetelmiin kuuluvan, tarkkuusvalun, kehittämiseksi.

Resurssikartoituksessa tutkittiin yrityksen kykyä toteuttaa suunniteltu prosessi. Kartoituksessa ilmenneisiin puutteisiin pyrittiin löytämään ratkaisuja. Prosessissa tarvittavien valu-uunien puuttuminen ratkaistiin suunnittelemalla ja valmistamalla itse yritykselle poltto- ja sulatusuuni. Näin yritys sai käyttöönsä juuri tähän tarkoitukseen suunnitellut uunit. Uuneja tullaan kehittämään jatkossa, muun muassa tekemällä niistä helpommin liikuteltavat lisäämällä niihin pyörät ja valmistamalla kansiin sekä

korotuspalaan käsittelyä helpottavat kahvat. Tarvittavat upokkaat aiotaan valmistaa itse yrityksessä. Myös uunien lämpötilaa mittaavien lämpömittarien ja -anturien hankkimista suunnitellaan yrityksessä. Lisäksi myös muiden valuvälineiden, kuten upokaspihtien, hankintaa tutkitaan.

Yrityksen 3D-skannereista vain toista oli mahdollista käyttää prosessissa mallien luomiseen. Kyseinen 3D-skanneri on kuitenkin jo vanha, joten sen käyttäminen on melko hidasta ja monimutkaista. Lisäksi skannauksen onnistuminen riippuu suuresti kappaleen pinnasta. Heijastavia pintoja on käsiteltävä, jotta skannaus laitteella on mahdollista. Yritys suunnittelee uuden käsikäyttöisen 3D-skannerin hankintaa, joka on moninkertaisesti nopeampi ja yksinkertaisempi käyttää. Se tunnistaa myös heijastavia pintoja paremmin. Tällöin prosessin läpimenoaikaa voidaan saada lyhyemmäksi. Koska uusi 3D-skanneri on kuitenkin suuri investointi, halutaan ennen uuden laitteen hankintaa varmistaa, että uudelle palvelulle on riittävästi kysyntää.

Valumallien valmistuksen optimointi tuotti yritykselle hyödyllistä tietoa sen AM-laitteista. Testeissä selvisi laitteiden rajoitteet valmistaa kappaleita, joissa on ulkoneuvia muotoja, ilman tukirakennetta. Testeillä pystyttiin myös esittämään yritykselle, millainen on paras kappaleiden valmistuslaatu, joka yrityksen laitteilla on mahdollinen. Yritys voi hyödyntää syntynyttä tietoa jatkossa AM-laitteilla valmistettävien kappaleiden valmistuksessa. Optimoidut asetukset on otettu käyttöön yrityksessä 3D-tulosteiden valmistuksessa, ja niiden valinta on ohjeistettu myös työohjeessa.

Yrityksen AM-laitteille määritetyt asetukset soveltuvat vain PLA-materiaalilla valmistamiseen. Myös muille filamenttimateriaaleille voidaan suorittaa samanlainen optimointitesti kuin työssä toteutettiin, mutta sen suorittaminen vaatii melko paljon aikaa ja filamenttia. Jatkoa varten myös muita asetusten optimointitapoja on kannattavaa tutkia. Koska optimointitestissä voitiin valmistaa vain muutamia kappaleita, ei kaikkia eri asetuksia ollut mahdollista tutkia. Tästä syystä asetusarvojen valinnan tarkkuus on karkea. Useampia kappaleita valmistamalla olisi voitu määrittellä tarkemmat asetusarvot laitteille. Toisaalta suuttimen lämpötilan havaittiin muuttuvan valmistuksen aikana asetetusta arvosta jopa kolme astetta kumpaankin suuntaan, eli lämpötilaa ei ole mahdollista pitää tarkalleen vakiona kyseisillä laitteilla koko valmistuksen ajan.

Koska yrityksessä käytössä olleiden filamenttien soveltuvuudesta valumalleiksi ei ollut tietoa, etsittiin myös muita filamenttivaihtoehtoja. Selvityksessä löydettyjä vahan kaltaisia filamenttimateriaaleja aiotaan jatkossa testata yrityksen prosessissa, mikäli PLA-filamenttia ei pidetä riittävästi prosessiin soveltuvana. Koska valumalliksi soveltuva materiaali oli lopulta valittava yrityksessä olleista vaihtoehdoista, ei muita soveltuvia materiaaleja voitu testata. Materiaalien soveltuvuus käyttöön olisi voitu määrittää tarkemmin, mikäli olisi ollut mahdollista valmistaa useita valumalleja eri materiaaleista, valmistaa mallien pinnalle keraamimuotti, ja polttaa materiaali muotin sisältä polttouunissa. Tällöin olisi voitu tarkastella myös materiaalin lämpölaajenemista. Voimakas materiaalin laajeneminen muotin sisällä voi rikkoa muottikuoren niin, että sitä ei voida käyttää kappaleen valamiseen. Jatkossa yrityksessä onkin tarkoitus tarkastella materiaalin laajenemista koevaluissa.

Kappaleen valmistuksessa tarvittavan filamentin määrä saadaan selville viipalointiohjelmassa. Osittain käytetyissä filamenttikeloissa jäljellä olevan filamentin määrittämiseksi yrityksessä ei ole menetelmää. Jatkossa keloissa jäljellä olevan filamentin määrän selvittämiseksi tullaan hankkimaan tarkkuusvaaka, jolloin voidaan laskea painon perusteella, paljonko filamenttia on kelassa jäljellä. Kelojen säilytys aiotaan jatkossa järjestää paremmin. Filamenttimateriaaleilla on taipumus sitoa itseensä kosteutta, mikä aiheuttaa virhettä kappaleita valmistettaessa. Tästä syystä yrityksessä suunnitellaan säilytyskaapin hankkimista, jossa ilman kosteuden määrää voidaan säädellä.

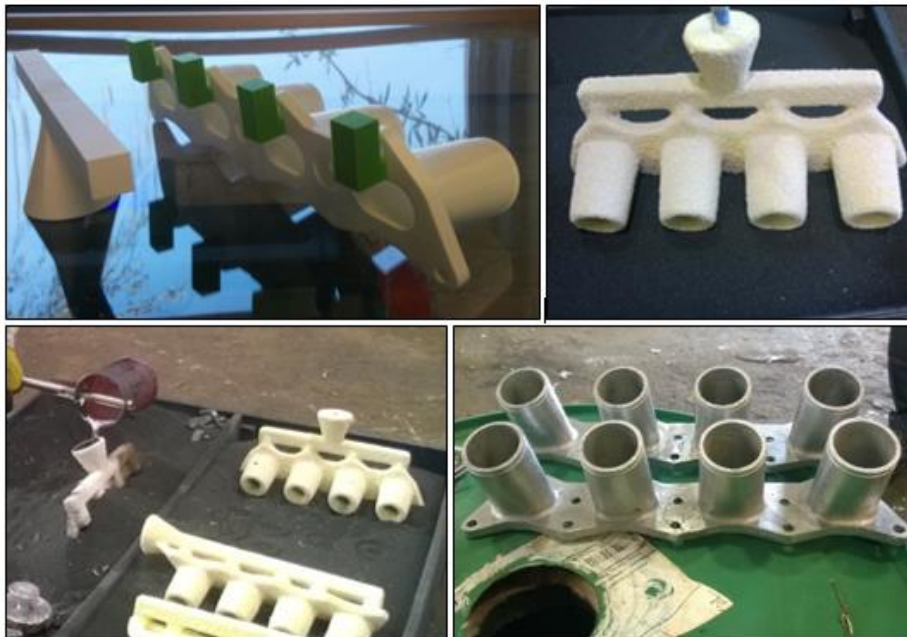
Valumallin valmistuksesta laaditun työohjeen laajuus oli toimeksiantajan mukaan riittävä. Työohje voidaan ottaa yrityksessä käyttöön uusien työntekijöiden perehdyttämiseen ja kokeneempien työntekijöiden avuksi. Mikäli työohjeesta olisi haluttu vielä kattavampi, siihen olisi voitu sisällyttää myös 3D-skannerien käytön ja skannerin luoman pistepilvitiedoston muokkauksen ohjeistus. Yrityksessä 3D-skannerien käyttöä voidaan kuitenkin harjoitella ohjekirjan avulla.

Työ valmistui aikataulussa ja sille asetetut tavoitteet saavutettiin. Uuden prosessin kehittäminen tulee jatkumaan opinnäytetyön jälkeen. Valmiiksi määritellyt työvaiheet selkeyttävät prosessin toteutuksen suunnittelua ja luovat hyvän perustan prosessin jatkokehittelylle yrityksessä. Valukappaleen valmistuksesta 3D-tulostetun valumallin pohjalta tullaan kirjoittamaan toinen opinnäytetyö yritykselle. Jatkossa prosessia

tullaan testaamaan käytännössä koevaluilla. Lisäksi valukappaleen valmistuksen yksityiskohtia tullaan tarkastelemaan ja kehittämään.

Monet yritykset ovat kiinnostuneita materiaalia lisäävän valmistuksen sovellutuksista. Valumallien 3D-tulostaminen ei ole uusi menetelmän sovellutus, mutta monelle yritykselle työssä suunnitellun prosessin edullisuus ja yksinkertaisuus tekevät siitä mielenkiintoisen. Toisin kuin monissa muissa vastaavanlaisissa sovellutuksissa, toimeksiantajalle kehitetyssä prosessissa alkuinvestoinnit ovat pienet. Opinnäytetyöstä on hyötyä myös materiaalia lisäävästä valmistuksesta kiinnostuneille tai tarkkuusvalusta ja vahamenetelmästä tietoa etsiville. AM-laitteiden asetusten optimointi tietyille materiaalille on työssä esitetty niin, että sen periaatetta voi tarvittaessa soveltaa muihin tapauksiin. Myös poltto- ja sulatusuunin rakentaminen on esitetty työssä sillä tavoin, että samanlaisten uunien valmistamista suunnitteleva henkilö voi käyttää työtä esimerkkinä omassa projektissa.

Tätä opinnäytetyötä viimeisteltäessä, uuden prosessin toimivuudesta oli jo ensimmäisillä kokeiluilla saatu vahvistusta. Ensimmäiset uudella prosessilla valmistetut kappaleet on myös toimitettu asiakkaalle. Kuviossa 30 on esitetty asiakkaalle toimitettujen valukappaleiden valmistus.



Kuvio 30. Valukappaleiden valmistus

Kuviossa on esitetty 3D-tulostettu valumalli, sen päälle muodostettu muottikuori, sulan alumiinin kaato ja valukappaleet kuoren poistamisen jälkeen. Kuviossa ei ole esitetty valumallin poistoa muotista.

Valukappaleiden valmistus noudatti suunniteltua prosessia ja onnistui lähes odotusten mukaisesti. Yhdessä viidestä valetusta kappaleesta esiintyi hylkäämiseen johtanut virhe. Prosessia edelleen kehittämällä yritykselle on mahdollista saada lisää asiakkaita ja tätä kautta myös lisää työtä. Uutta palvelua käyttävien asiakkaiden on mahdollista saada tilatut valukappaleet nopeammin ja edullisemmin kuin aiemmin on ollut mahdollista.

Lähteet

About Additive Manufacturing. N.d. Loughborough University. Viitattu 19.4.2016.

<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>

Ashby, M. 2005. Material Selection in Mechanical Design. (3. p.) Burlington: Butterworth-Heinemann.

[Http://www.jamk.fi/kirjasto, Nelli-portaali, Verkkokirjat, Ebrary.](Http://www.jamk.fi/kirjasto,Nelli-portaali,Verkkokirjat,Ebrary)

Autere, E., Ingman, Y. & Tennilä, P. 1982. Valimotekniikka 1. Helsinki: Insinööritieto.

Autere, E., Ingman, Y. & Tennilä, P. 1986. Valimotekniikka 2. Helsinki: Insinööritieto.

FARO Focus 3D 120. N.d. Laitteen tiedot Laserscanning Europe-sivustolla. Viitattu 3.5.2016.

<http://www.laserscanning-europe.com/en/glossary/faro-focus-3d-120>

Felix Printers, Felix 3.0. N.d. Laitteen arvostelu 3dhubs-sivustolla. Viitattu 12.4.2016.

<https://www.3dhubs.com/3d-printers/Felix-30>

Felix Pro1 - 3D printer. N.d. Laitteen tiedot valmistajan kotisivuilla. Viitattu 13.4.2016.

<http://www.felixprinters.com/products/3d-printers/felix-pro/pro-one>

Garlotta, D. 2001. A Literature Review of Poly(Lactic Acid). Journal of Polymers and the Environment, 9, 2. Viitattu 7.4.2016.

<http://naldc.nal.usda.gov/download/4048/PDF>

Hausman, K. & Horne, R. 2013. 3D Printing For Dummies. John Wiley & Sons. Viitattu 7.4.2016.

[http://www.jamk.fi/kirjasto, Nelli-portaali, Verkkokirjat, Books24/7.](http://www.jamk.fi/kirjasto,Nelli-portaali,Verkkokirjat,Books24/7)

Historia. Prosolve Oy. N.d. Artikkelin Prosolve Oy:n kotisivuilla. Viitattu 17.3.2016.

<http://www.prosolve.fi/prosolve/historia/>

Honkavaara, T. 2014. Valutuotteiden suunnitteluopas. Viitattu 27.4.2016.

http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/valutuotteiden_suunnitteluopas.pdf

Horvath, J. 2014. Mastering 3D Printing. Apress. Viitattu 7.4.2016.

[Http://www.jamk.fi/kirjasto, Nelli-portaali, Verkkokirjat, Books24/7.](Http://www.jamk.fi/kirjasto,Nelli-portaali,Verkkokirjat,Books24/7)

Investment Casting. N.d. Artikkelit Stratasys –yrityksen internetsivuilla. Viitattu 15.4.2016.

<http://www.stratasys.com/solutions/additive-manufacturing/tooling/investment-casting>

Lehtinen, L. 2014. 3D-tulostus kehittyy ripeästi. Muoviplast 3, 14-15.

Lähteenmäki, E. 2015. Hyvä tietää muovista, osa 21. Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät. Muoviplast, 5, 22-29.

Materiaalia lisäävä valmistus: 3D-tulostus - AM-tekniikka - 3D Printing - Additive Manufacturing (AM). N.d. Artikkelit Firpa ry:n sivustolla. Viitattu 18.4.2016.

<http://www.firpa.fi/html/sanasto.html>

Meskanen & Höök. 2014. Valimotekniikan perusteet. Kertamuottimenetelmät. Keraamimuotit. Viitattu 15.3.2016.

http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp_menet_keraamimuotit.pdf

Micallef, J. 2015. Beginning Design for 3D-Printing. Apress.

New 3D Printer Uses Light to Build Objects in Minutes. N.d. Artikkelit Txchnologist-sivustolla. Viitattu 3.5.2016.

<http://txchnologist.com/post/113873671015/new-3-d-printer-uses-light-to-build-objects-in>

Next engine 3D Scanner. N.d. Skannerin esite. Viitattu 13.4.2016.

http://fab.cba.mit.edu/content/tools/next_engine/scanner-techspecs.pdf

Piili, H., Matilainen, V. & Salminen, A. 2016. Lisäävän valmistuksen eli 3D-tulostuksen opetuksen ja koulutuksen haasteet ja mahdollisuudet. *Ohutlevy*, 1, 43-45.

Pohjalainen, K. 1997. *Valumallit*. Tampere: Tampereen ammattioppilaitos.

Prosessin käsite. N.d. Tampereen ammattikorkeakoulun VirtuaaliAMK. Viitattu 16.5.2016.

<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/0303012/1106227851022/1106577077518/1107020071174/1149232240773.html>

Raaka-ainekäsikirja 5, Alumiinit. 2006. 2. uud. p. Helsinki: Teknologiainfo Teknova Oy.

Rantanen, K. 2015. 3D-tulostimet tositoimiin. *Tekniikan Maailma*, 15, 48-53.

Ruger. N.d. Process, Investment casting-kuva. Viitattu 16.5.2016.

<http://www.ruger.com/casting/T-Process.html>

Synteettiset biohajoavat materiaalit. 2005. Helsingin yliopisto. Kemian laitos. Kemiaa kumpulassa -artikkeleita. Viitattu 7.4.2016.

<http://luma.fi/materiaalit/1272/kemiaa-kumpulassa-artikkeleita>

Syrjälä, S. 1995. Rapid Prototyping – Nopea valumallivarusteiden valmistus. Cadista componentiksi. Helsinki: Valimoteollisuus.

Tervola, J. 2015. Käytä 3D-tulostetta siellä missä siitä on hyötyä. *Metallitekniikka*, 6, 34-35.

Turner, B. & Gold, S. 2015. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. *Rapid Prototyping Journal*, 21. Viitattu 19.5.2016.

<http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-02-2013-0017>

Valkosalo, T. 2016. Kehittyvä 3D-tulostus. *Puhtausala*, 2, 19-21.

Vuorinen, J. 1995. Alkusanat. Cadista componentiksi. Helsinki: Valimoteollisuus.

Walter. 2013. Overhang Test Print (Customizable). Viitattu 29.4.2016.

<http://www.thingiverse.com/thing:58218>

Liitteet

- Liite 1. Polttouunin kustannusarvio
- Liite 2. Valmistuslaitteiden optimointitestin tulokset
- Liite 3. Valumallien valmistuksen työohje