



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# VALUMUOTTIEN VALMISTUS LISÄÄVÄLLÄ VALMISTUS- MENETELMÄLLÄ

TE -

Tommi Aartonen

KIJÄ/T:

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Tommi Aartonen			
Työn nimi Valumuottien valmistus lisäävällä valmistusmenetelmällä			
Päiväys	1. kesäkuuta 2017	Sivumäärä/Liitteet	43/0
Ohjaaja(t) yliopettaja Esa Hietikko, projekti-insinööri Lauri Alonen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu Oy, projektipäällikkö Antti Alonen			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia lisäävällä valmistuksella valmistettujen valumuottien soveltuvuutta valamiin sekä niiden sopivia käyttökohteita ja muottien valmistuksen vaatimuksia. Opinnäytetyö tehtiin Savonia-ammattikorkeakoululle, jossa oli käynnissä materiaalia lisäävään valmistukseen liittyvä LIVA-hanke. Työ liittyi hankkeessa tehtyyn tutkimukseen valumuottien valmistamisesta lisäävällä valmistuksella. Hankkeen tavoitteena on rakentaa ja käynnistää lisäävän valmistuksen toimintaympäristö Pohjois-Savossa. Työssä toteutettiin eri testejä käyttäen lisäävää valmistusta apuna valumenetelmissä, valmistamalla esimerkiksi muotteja tai valumalleja.</p> <p>Työ aloitettiin perehtymällä yleisimpiin käytössä oleviin valumenetelmiin, kuten ruisku- ja hiekkavaluun, sekä niiden ominaisuuksiin. Lisäksi tutkittiin jo olemassa olevia vastaavia materiaalia lisääviä menetelmiä sekä materiaaleja, joita käytetään valumuottien valmistuksessa. Koska aiheeseen liittyi muovisten muottien ja valumallien valmistus, tuli selvittää muovien soveltuvuus kyseisiin valuihin.</p> <p>Työn tuloksena saatiin erityyppisiä valukappaleita usean eri valumenetelmän tuloksena sekä tietoa lisäävän valmistuksen käytöstä valamisessa ja sen piirteistä ja sopivuudesta eri valumenetelmille.</p>			
Avainsanat lisäävä valmistus, 3D-tulostus, valu, valaminen			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Tommi Aartonen			
Title of Thesis Manufacturing of Casting Molds with Additive Manufacturing			
Date	1 June, 2017	Pages/Appendices	43/0
Supervisor(s) Mr. Esa Hietikko, Principal Lecturer; Mr. Lauri Alonen, Project Engineer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences, Antti Alonen, Project Manager			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this final year project was to study the use of additive manufacturing to produce molds for casting and requirements for manufacturing casting molds and to find appropriate objects where they could be used. The work was done for Savonia University of Applied Sciences which had a project called LIVA in progress. The aim of LIVA-project is to develop and launch an operating environment for additive manufacturing in Northern Savo. Several tests and castings were carried out, which utilized additive manufacturing in suitable ways for the casting method used.</p> <p>The work was started by investigating the most common casting techniques and their features. Additive manufacturing processes, which are currently used in mold-making, were also studied, as well as applicable materials. The suitability of different plastics for casting must be taken into account since the subject is related to molds and mold patterns made of plastic.</p> <p>As a result of this final year project there were different types of castings resulting from different casting methods. The project also produced information about using additive manufacturing and its suitability for different casting methods.</p>			
<p>Keywords additive manufacturing, 3D-printing, cast, casting</p>			

AM	Additive Manufacturing, materiaalia lisäävä valmistus
DMLS	Direct Metal Laser Sintering, jauhepetimenetelmän prosessi
EBM	Electron Beam Melting, jauhepetimenetelmän prosessi
FDM	Fused Deposition Modeling, AM-valmistuksen kerroksittain pursottava menetelmä
FFF	Fused Filament Fabrication, vastaava menetelmä kuin FDM
Filamentti	Muovia pursottavassa 3D-tulostuksessa käytetty materiaalilanka
G-koodi	3D-tulostimissa ja työstökoneissa käytettävä ohjelmointikieli
Jakopinta	Kahden muottiosan yhdistävä pinta muotissa
Keerna	Valumuottiin kuuluva osa, jolla muodostetaan valussa kappaleeseen ontto rakenne
Kertamuotti	Valumuotti, jota voidaan käyttää valamisessa vain kerran
Kestomuotti	Valumuotti, joka säilyy ehjänä useiden valukertojen ajan.
Lasiirtymälämpötila	Lämpötila-alue, jossa muovi alkaa pehmentyä ja muuttaa muotoaan
LOM	Laminated Object Manufacturing, kerroslaminoinnin prosessi
Muotinpuolisko	Valumuotin puolikas osa, sisältää osan kappaleesta negatiivina
Negatiivinen päästö	Muoto, joka on leveämpi alaosasta vaikeuttaen valukappaleen poistoa muotista
Päästö	Muotin tai mallin hieman viisto seinämä valun muotista irrottamisen helpottamiseksi
SHS	Selective Heat Sintering, jauhepetimenetelmän prosessi
SLA	Stereolitografia, AM-valmistuksen menetelmä
SLM	Selective Laser Melting, jauhepetimenetelmän prosessi
SLS	Selective Laser Sintering, jauhepetimenetelmän prosessi
STL-tiedosto	Tiedostomuoto, jossa kappaleesta on muodostettu pintamalli tasokolmioina
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing, kerroslaminoinnin prosessi
Valumalli	Alkuperäisen kappaleen kopio, jota käytetään valumuotin valmistamiseen
Valumuotti	Kappale tai astia, jonka sisäontelossa materiaali saa halutun muodon
Valupuu	Tarkkuusvalua varten tehty rakenne, johon on kiinnitetty useita valumalleja

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
2	LISÄÄVÄ VALMISTUS .....	7
3	PERINTEISIÄ VALUMENETELMIÄ .....	10
3.1	Ruiskunvaluu .....	10
3.2	Painevalu .....	11
3.3	Alipainemuovaus, tyhjiömuovaus .....	11
3.4	Hiekkamuottivaluu .....	12
3.5	Kuorimuottivaluu .....	12
3.6	Kipsimuotit .....	12
3.7	Laminointi .....	13
3.8	Tarkkuusvalu .....	13
3.9	Kokillivaluu .....	13
3.10	Matalapainevalu .....	14
3.11	Puhallusmuovaus .....	14
3.12	Keskipakovaluu .....	14
3.13	Puristusvalu .....	15
3.14	Jatkuvavaluu .....	15
3.15	Eri valumenetelmien ominaisuuksia .....	16
4	AM-MENETELMIEN OMINAISUUDET VALAMISESSA .....	18
5	AM-MENETELMIEN KÄYTTÖ VALAMISESSA .....	20
5.1	Valumuottien valmistus .....	20
5.2	Hiekkamuotin tulostaminen .....	21
5.3	Valumallien valmistus .....	23
5.4	Pinnanlaatu .....	24
6	TESTIKOhteet ja valut .....	25
6.1	Hiekkavaluu .....	25
6.2	Tarkkuusvalu .....	28
6.3	Silikonivaluu .....	34
7	Yhteenveto ja pohdinta .....	40
8	LÄHDELUETTELO .....	41

## 1 JOHDANTO

Valamisella tarkoitetaan esineiden tai kappaleiden valmistamista syöttämällä muottiin nestemäistä ainesta, joka säilyttää muotinmukaisen muodon jähmettyessään. Valaminen on eräs vanhimmista teollisista valmistusmenetelmistä; vanhin tunnettu valukappale on Mesopotamiasta löydetty kuparinen lampunjalka noin vuodelta 3200 eKr. Valaminen onkin lyhin tie raaka-aineesta lähes valmiiksi tai valmiiksi tuotteeksi. Valuosat muodostavat myös hyvin suuren osan koneiden valmistuskustannuksista.

Lisäävä valmistus ei vielä ole kovin laajalti käytössä teollisuudessa Suomessa. Aiemmin menetelmää on käytetty lähinnä prototyyppien valmistukseen ja testaukseen, mutta nykyään sitä käytetään myös valmiiden kappaleiden valmistuksessa. Lisäävällä valmistuksella voidaan valmistaa prototyyppisiä, valumuotteja tai -malleja, joilla voidaan suorittaa testauksia ja kokeita edullisesti esimerkiksi varsinaisen tuotannon aloittamista. Jos valmistettava kappale hyödyntää lisäävän valmistuksen tuomia hyötyjä, myös valmiin kappaleen valmistus voi tulla perinteistä valmistusta edullisemmaksi.

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia lisäävän valmistuksen hyötyjä ja haasteita eri valumenetelmillä sekä erilaisten muottien ja mallien valmistuksessa.

## 2 LISÄÄVÄ VALMISTUS

Lisäävä valmistus eli tavallisemmin 3D-tulostaminen mielletään ehkä helpoiten muovien pursottaviin pöytäkokoisiin laitteisiin, joita käytetään yleensä harrastelijatasolla. Tämän materiaalia pursottavan menetelmän yleistyminen ja laitteistojen hintojen lasku ovat saaneet madallettua laitteiston hankintakynnystä, ja 3D-tulostimet ovatkin jokaisen saatavilla. Vaikka valmistustekniikkana 3D-tulostaminen onkin melko varhaisessa kehitysvaiheessa, menetelmät kehittyvät jatkuvasti ja eri teollisuudenalat ovat alkaneet käyttää lisäävän valmistuksen eli AM-menetelmiä (engl. Additive Manufacturing) tuotannossaan.

**Materiaalin pursotus** on lisäävän valmistuksen ehkä tunnetuin ja yleisin menetelmä. Yleisesti laitteisto koostuu tulostimen rungosta, tulostuspäästä sekä tulostusalustasta, johon malli valmistuu. Filamenttia, eli materiaalilankaa syötetään moottorin avulla tulostuspäälle, jossa lämmitetty suutin pehmentää materiaalin virtaamaan suuttimen läpi. Samalla kun materiaalia pursotetaan suuttimesta, tulostuspäätä liikutetaan x/y suunnassa kerroksittain alustan päällä muodostaen näin halutun kappaleen muodot ja piirteet. Materiaali alkaa jäähtyä ja jähmettyä pursottamisen jälkeen, joten uusi kerros voidaan pursottaa edellisen kerroksen päälle. Kappaleet valmistuvat näin kerroksittain, alhaalta ylöspäin. (Savonia-ammattikorkeakoulu, "Materiaalin pursotus")

Valmistettavan kappaleen CAD-malli konvertoidaan STL-pintamalliksi, jossa kappaleen pinta koostuu muun muassa tasokolmioista, niiden kärkipisteistä, sekä tasojen normaalivektoreista. Tarkkuutta voidaan lisätä muuttamalla kolmioiden kokoa pienemmäksi, jolloin kaaren kulmikkaus pienenee, mutta samalla myös tiedostokoko kasvaa. (Levelup, 2016)

Materiaalia pursottavat 3D-tulostimet käyttävät useimmiten työstökoneissakin käytettävää G-koodia ohjauksessa, joka sisältää tulostimen suorittamat käskyt. Kun haluttu STL-tiedosto on käsillä, tulee siitä luoda tämä G-koodi sopivalla ohjelmistolla, jossa voidaan määritellä eri asetuksia tulostukselle. Valmiin G-koodin avulla tulostin voi valmistaa kappaleen, josta koodi luotiin.

Materiaalin pursotuksessa on omat rajoituksensa kappaleen suunnittelulle. Koska kappaleet valmistetaan alhaalta ylöspäin kerroksittain materiaalia syöttäen, on valmistettavaa kerrosta pystyttävä tukemaan jollain tavoin. Ongelmana ovat siis tyhjän päälle tulostettavat rakenteet, kuten esimerkiksi tulostettaessa H-kirjain. Keskimäinen viiva ei ole tuettuna alapuolelta mitenkään, jolloin sen tulostaminen hankaloituu huomattavasti. Tyhjän päälle tulostamisen kiertämiseksi voidaan tulostaa erityinen tukirakenne, joka joudutaan poistamaan myöhemmin. Kappaleesta riippuen tämä voi olla hankalaa tai jopa mahdotonta. Tukirakenteen tarvetta voidaan joissakin tapauksissa vähentää tai jopa eliminoida kokonaan huomioimalla kappaleen orientaatio tulostuksen aikana.

**Nesteen fotopolymerisointi** on menetelmä, jossa kappale valmistetaan nestemäisestä polymeeristä kovettamalla altaassa. Kyseiseen menetelmään kuuluvia ns. alalajeja, tai valmistajakohtaisia

menetelmiä ovat muun muassa SLA, eli stereolitografia sekä CLIP, Continuous Liquid Interface Production. (Savonia-ammattikorkeakoulu, "Nesteen fotopolymerisointi")

SLA, eli stereolitografia on menetelmä, jossa kiinteitä kappaleita valmistetaan kovettamalla ohuita kerroksia UV-kovettuvaa materiaalia toistensa päälle. Menetelmässä astia on täytetty nestemäisellä polymeerillä, jonka pintaan UV-säde piirtää kappaleen muotoja. Polymeerineste kovettuu UV-säteen osuessa siihen muodostaen näin halutun muotoisen kappaleen astiaan. UV-sädettä ohjaa tietokoneohjattu linssi, joka liikkuu astian yläpuolella (Photopolymer.com). Laitteiston rakenteesta riippuen kappale valmistuu joko astiassa olevan alustan ylä- tai alapuolelle. Kun kerros on kovetettu, siirtyy alusta yhden kerroksen verran alas- tai ylöspäin riippuen laitteesta, ja nesteen pinta tasataan kappaleen päälle. (Savonia-ammattikorkeakoulu, "Nesteen fotopolymerisointi")

**Materiaalin suihkutus** on lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa raaka-ainepisararat kovetetaan kohdennetusti. Suihkutettu materiaali kovetetaan UV-valolla ennen seuraavan materiaalikerroksen suihkuttamista. Menetelmälle sopivia materiaaleja ovat esimerkiksi erityyppiset valokovettuvat muovit ja vahat. Menetelmässä voidaan käyttää esimerkiksi mustesuihkuttavia tulostuspäitä, joista materiaalia suihkutetaan alustalle pisaroina tai jatkuvana virtana. (Nikhil A.)

**Sideaineen suihkutus** on lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa nestemäinen sideaine kohdistetaan valittuihin kohtiin jauheen liittämiseksi. Valikoivasti suihkutettu sideaine sitoo perusmateriaalin jauhepartikkelit toisiinsa muodostaen kappaleen. Menetelmän mukainen prosessi voi toimia esimerkiksi seuraavalla tavalla: laitteisto levittää jauhekerroksen valmistusalustan päälle, johon sideaine suihkutetaan kappaleen leikekuvan mukaisesti. Kun valmistettavan kappaleen leikekuvan mukainen kerros on suihkutettu, asetetaan taas uusi kerros jauhemateriaalia edellisen kerroksen päälle. Näin kappale valmistuu kerros kerrokselta. (Additively)

Erillistä tukimateriaalia ei tarvita, sillä sitomaton jauhe tukee kappaleen muotoja. Tämä antaa suuremmat vapaudet kappaleen suunnittelulle kuin esimerkiksi materiaalia pursottavalla menetelmällä. Sideaineen suihkutuksessa voidaan käyttää paljon erityyppisiä materiaaleja, kuten muovi-, metalli-, hiekka- tai keraamijauheita. (ExOne)

**Jauhepetisulatuksen** valmistajakohtaisia nimityksiä menetelmälle ovat muun muassa seuraavat lyhenteet:

- Selective Laser Sintering, SLS
- Direct Metal Laser Sintering, DMLS
- Selective Laser Melting, SLM
- Electron Beam Melting, EBM
- Selective Heat Sintering, SHS

Nämä termit ovat siis valmistajakohtaisia nimityksiä, eivätkä välttämättä eroa toisistaan kuin nimen perusteella. Jauhepetisulatuksen menetelmissä käytetään laser- tai elektronisädettä jauhemateriaalin



yhteensulatukseen tai -sintraukseen. EBM-menetelmä vaatii käytettävän tyhjiössä, mutta sillä voidaan valmistaa kappaleita metallijauheesta. Tyypillistä kaikille jauhepetisulatuksen menetelmille on jauheen levitys edellisten kerrosten päälle, josta käytettävästä sädetyypistä ja menetelmästä riippuen sulatetaan tai sintrataan kappaleen muodot edellisen kerroksen päälle. Jauhekerroksia levitetään esimerkiksi rullalla tai lastalla, joka liikkuu koko tulostusalueen yli tasaten ohuen jauhekerroksen alueen päälle. Tulostusalue siis täyttyy kokonaan jauheesta, johon sisältyy valmistettavat kappaleet. Tulostuksen valmistuttua valmiit kappaleet ovat irtonaisen jauheen peitossa, joka lopulta poistetaan ja kappaleet puhdistetaan. (Loughborough University, "Powder Bed Fusion")

**Kerros-laminointimenetelmässä** kappale valmistetaan laminoimalla ohuita materiaalikalvoja kerros kerrokselta päällekkäin. Materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi muoveja, paperia, komposiitteja tai metalleja (Savonia-ammattikorkeakoulu, "Laminointimenetelmä"). Menetelmässä materiaalikalvoja pinotaan valmistusalueelle ja kiinnitetään, jonka jälkeen ylimääräinen materiaali kappaleen ympäriltä leikataan pois laserilla tai terällä. Kalvojen liittämiseksi yhteen käytetään kalvon materiaalista riippuen erilaisia menetelmiä, kuten tartunta-ainetta paperille tai ultraääntä metalleille. Kerros-laminoinnista on käytössä eri valmistajakohtaisia nimityksiä: Laminated Object Manufacturing (LOM) ja Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM). LOM-prosessissa voidaan käyttää useita erityyppisiä levy-materiaaleja, pääasiassa kuitenkin paperia. (Loughborough University, "Sheet Lamination")

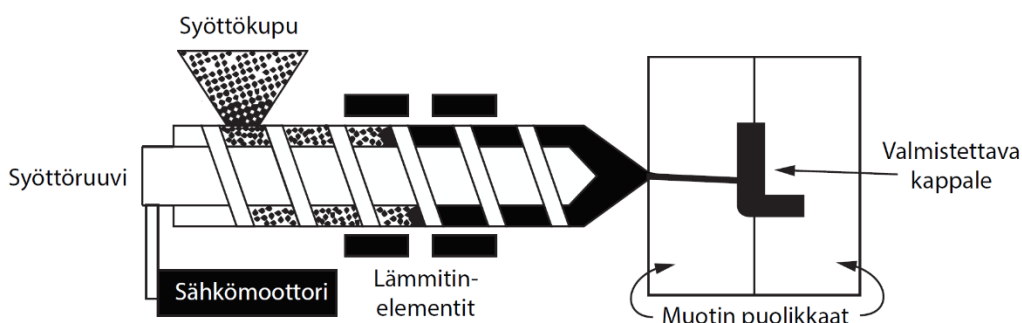
UAM-prosessi käyttää metalliarkkeja, jotka kiinnittyvät toisiinsa ultraäänellä tapahtuvan hitsauksen vaikutuksesta. Menetelmä ei vaadi korkeita lämpötiloja, sillä liittäminen tapahtuu ultraäänien ja paineen vaikutuksesta. Ei-halutun materiaalin poistaminen vaatii kappaleen koneistamisen, joko kerrosten välillä tai kappaleen valmistuttua. Käytettäviin materiaaleihin sisältyvät alumiini, kupari, ruostumaton teräs ja titaani. (Loughborough University, "Sheet Lamination")

### 3 PERINTEISIÄ VALUMENETELMIÄ

#### 3.1 Ruiskuvalu

Ruiskuvalaminen (engl. Injection molding) on hyvin yleinen muoviosien valmistukseen käytetty menetelmä. Se on menetelmänä melko nopea ja sitä käytetään valmistamaan suuria määriä samanlaisia muovikappaleita. Valmistuskohteet vaihtelevat hyvin laajasti puhelimien kuorista ja käsityökalujen rungoista roska-astioihin ja auton puskureihin. Pienempiä kappaleita, kuten pullonkorkkeja, voidaan valmistaa yhdellä prosessikierrolla useitakin. Ruiskuvalulla pystytään valmistamaan ohutseinäisiä kappaleita, jotka voivat olla käyttövalmiita välittömästi valun jälkeen muotista otettuna. (Nykänen & Höök, 2015) Ruiskuvalussa käytettävät muotit valmistetaan perinteisesti teräksestä tai alumiinista käyttäen lastuavia työstömenetelmiä. Valmistusmenetelmästä ja valmistettavan kappaleen monimutkaisuudesta johtuen ruiskuvalumuottien hinnat vaihtelevat muutamasta tuhannesta eurosta useisiin kymmeneen tuhansiin euroihin, jopa yli. (Engineering Resource Center) Tästä syystä valmistettavien sarjakokojen on oltava melko suuria, yleensä vähintään 1000 – 5000 kappaletta. (Meskanen & Höök, 2015)

Ruiskuvaluprosessissa muovigranulaattia syötetään suppilon kautta lämmitettyyn putkeen, jossa muovi sulaa lämmittimien ja syöttöruuvin kitkan avulla. Syöttöruuvi sen jälkeen työntää sulan muovin suuttimen läpi muottiin, jossa muovi muotoutuu muotin mukaisesti jäähtyessään. Kun muovi on jäähtynyt kiinteäksi, muotti avautuu ja valmis kappale irrotetaan muotista käyttäen ulostyöntötappeja. Tämän jälkeen muotti suljetaan ja ruiskuvalutapahtuma voidaan suorittaa uudelleen, jos muotti on jäähtynyt tarpeeksi. Ruiskuvalussa jaksonajalla tarkoitetaan aikaa, joka kuluu yhden prosessikierron läpäisemiseksi. (British Plastics Federation) Jaksonajan pituus onkin olennainen osa etenkin valmistettaessa suuria sarjakokoja. Jäähdytyksen optimointi on yksi merkittävä osa jaksonajan pienentämisessä. Kuvassa 1 on ruiskuvalukoneen periaatteen kuvaus.



KUVA 1. Ruiskuvalukoneen periaate. Lähde: LIVA/Anu Jääskeläinen

Perinteisesti ruiskuvalumuotit valmistetaan alumiinista tai teräksestä lastuavilla menetelmillä. Työvoista johtuen muottien valmistus on kallista ja hidasta, sekä materiaalia kuluu lastuna hukkaan. Ruiskuvalumuotille on useita eri vaatimuksia korkealaatuisten kappaleiden valmistamiseksi: oikea

mitoitus, muottipesien täyttäminen oikein, hyvä ilmanpoisto täytön aikana, hallittu ja tasainen jäähdytys sekä valmiin kappaleen ulostyöntö välttäen muovaamista. Muottiin tulee rakentaa ilmanpoistokanavia paikkoihin, joihin muuten ilma kerääntyisi täytettäessä sulalla, eli jäisi niin sanottuja ilmataskuja. Riittämätön ilmanpoisto voi aiheuttaa ongelmia täytön kanssa, sekä poistumaton kokoonpuristunut ilma voi aiheuttaa jälkiä kappaleen pintaan. (Muoviyhdistys)

Muotin valmistuksessa voidaan käyttää standardimitoitettuja muottirunkoja, joissa perusrakenne sisältää kiinnityslevyt, muottilevyt, tukilevyn, ulostyöntöpalkit ja ulostyöntölevyn. Lisäksi muotti vaatii ainakin suuttimen, ohjaustapit ja -holkit, kiinnitysruuvit, keskitysrenkaan, ulostyöntötapit ja peräta-pin. Karhumuovi/Kajak Sport Components Oy:n mukaan muotin valmistus kestää Karhumuovilla keskimäärin 6-10 viikkoa. (Karhumuovi Oy) Lasille, polymeereille ja metalliseoksille käytetään yleensä työkaluteräksistä valmistettua muottia. (Meskanen & Höök, 2015)

### 3.2 Painevalu

Painevalu muistuttaa ruiskuvalua menetelmältään ja laitteistoltaan, mutta valettavina materiaaleina käytetään metalleja. Molemmissa menetelmissä muotin nopea täyttäminen paineen avulla on olennainen osa prosessia. Painevalua käytetään tavallisesti noin 0,1 - 5 kg:n painoisten, ohutseinämäisten kappaleiden valmistukseen ei-rautametalleilla. Kappaleen minimiseinämävahvuudet vaihtelevat 0,5 - 1,5 mm välillä, riippuen seinämän pinta-alasta ja sijainnista muihin yksityiskohtiin. Samoin kuten ruiskuvalussa, muotin valmistuksen kustannuksista johtuen sarjakokojen on oltava suuria, usein vähintään 1000 - 5000 kappaletta. (Meskanen & Höök, 2015)

### 3.3 Alipainemuovaus, tyhjiömuovaus

Alipainemuovaus, toisin sanoen tyhjiömuovaus, on kestopuovien valamiseen tarkoitettu menetelmä. Aihioina käytetään levymäisiä muovikappaleita, jotka lämmön ja alipaineen avulla muotoillaan muotin muotojen mukaiseksi. Levyaiho esilämmitetään ja asetellaan muotin päälle, jonka jälkeen aihion ja muotin väliin muodostunut tila alipaineistetaan. Muovi muotoutuu tarkasti muotin pinnalle. Kappaleen jäähdytyä aihio irrotetaan muotista ja ylimääräiset levyn reunat leikataan pois. Menetelmällä voidaan valmistaa vaihtelevan kokoisia ohutseinämäisiä kappaleita, kuten tuotepakkausten kuoria, perävaunujen kuomuja ja kompostoreita. Alipainemuovaus on edullinen valmistusmenetelmä pienten muottikustannusten ansiosta. (Draft-Tech Oy)

Muottimateriaaliksi alipainemuovauksessa sopii muun muassa puu, alumiini, uretaanipohjainen hartsi, epoksi ja lasikuitu. Sarjakoko ja tuotteelta vaadittavat laatuun liittyvät ominaisuudet vaikuttavat muotin materiaalin valintaan. Alipainemuovauksessa käytettävät levyaihiot ovat yleensä 1-10 mm paksuja. (Draft-Tech Oy) Hetitec Oy:n mukaan lisäävällä valmistuksella voidaan valmistaa alipainemuovaukseen soveltuvia muotteja myös 3D-tulostamalla hiekasta sideainetta suihkuttavalla menetelmällä.

### 3.4 Hiekkamuottivalu

Hiekkamuottivalu on eräs perinteisimmistä metallin valamisen menetelmistä. Hiekkamuotti koostuu yleensä kahdesta muotinpuolikkaasta, joissa on valettavan kappaleen negatiivipinta. Negatiivi tehdään käyttämällä valumallia, joka on hyvin tarkka kopio valmistettavasta kappaleesta. Valumallilla siis painetaan muotinpuolikkaaseen kappaleen muoto. Muotit valmistetaan keernalaatikoihin yleensä kaavaamalla, mutta muotti voidaan valmistaa myös hiekkaa työstämällä tai 3D-tulostamalla. ("Valumenetelmät") Kun muotteihin on tehty tarvittavat keernat ja kanavat, voidaan muotinpuoliskojen jakopinnat yhdistää. Sula valuaines kaadetaan muottiin, joka metallin jähmetyttyä rikotaan valukappaleen ympäriltä, eli kyseessä on kertamuottimenetelmä. (Industrialmetalcastings.com)

Hiekkavalulla valmistetaan muun muassa moottorin lohkoja ja sylinterin kansia ajoneuvoteollisuudessa.

Hiekkavalussa käytettävä muottihiekka voi olla oliviinihiekkaa, kromihiekkaa tai zirkonihiekkaa, yleisimpänä kuitenkin käytetään kvartsihiekkaa. Eri hiekoilla on hieman erilaiset tulenkestävyyssominaisuudet, mutta yleisesti ottaen kaikki puhtaat hiekat sietävät valettavan materiaalin lämpökuormituksen. Epäpuhtaalla hiekkalla tulenkestävyys heikkenee. Hiekkojen tulenkestävyydet vaihtelevat noin 1200 – 2300 °C välillä, hiekkatyypistä riippuen. (Meskanen & Höök, 2015)

### 3.5 Kuorimuottivalu

Kuorimuottivalu on kertamuottimenetelmä, jossa muotti valmistetaan hartsatusta, lämmöllä kovettavasta hiekasta. Hiekan kovettamiseen vaadittavasta lämmöstä johtuen valumallin tulee olla metallista valmistettu. Hiekka annostellaan valumallin päälle, jossa lämpö kovettaa hiekan. Valumalli poistetaan hiekan kovettumisen jälkeen muotin sisältä. Kuorimuottiin valetuilla kappaleilla on parempi pinnanlaatu kuin kappaleilla, jotka on valettu tavalliseen kaavattuun hiekkamuottiin.

Kuorikeernat valmistetaan metalliseen avattavaan keernalaatikkoon. Lämmitetty keernalaatikko täytetään valmiiksi hartsatulla hiekkalla, jolloin keernan ulkopinnan hiekka kovettuu. Ylimääräinen kovettumaton hiekka poistetaan kääntämällä keernalaatikko ylösalaisin, jonka jälkeen keernalaatikko avataan ja saadaan valmis kuorikeerna, joka on sisäpuoleltaan ontto, eli nimensä mukaisesti keernassa on vain kuoret. (Meskanen & Höök, 2015)

### 3.6 Kipsimuotit

Kipsimuotin materiaalina on veteen sekoitettu kipsimassa, johon on lisätty tulenkestävää täyteainetta, kuitumaisia täyteaineita lujuuden lisäämiseksi sekä huokoisia täyteaineita tai seoskomponentteja parantamaan muotin läpäisevyyttä. Koska kipsimuotit hajoavat yli 1100 °C lämpötilassa, voidaan menetelmää käyttää vain materiaaleilla, joilla on alhainen sulamispiste, kuten alumiini-, magnesium-, sinkki- ja kuparipohjaisilla seoksilla.

Kipsimuotti valmistetaan kaavaamalla ja käyttämällä valumallia negatiivin luomisessa muottiin. Puusta valmistettu valumalli ei ole kovin pitkäikäinen, sillä puu imee kipsimuotista kosteutta itseensä. Kipsimuotin suunnittelulle pätee samat säännöt kuin hiekkamuotille, kipsimuotti kaavataan myös kaavauskehykseen. (Meskanen & Höök, 2015)

### 3.7 Laminointi

Laminointimenetelmässä valmistetaan aluksi lesti, jonka päälle valmistetaan muotti. Valmiiseen muottiin laminoidaan useita esimerkiksi hiili- tai lasikuitukerroksia, jotka lopulta irrotetaan muotista. Laminoinnissa käytettävä muotti on yleensä kestromuotti, mutta kertamuottejakin saatetaan käyttää, riippuen valmistettavan kappaleen geometriasta. Lesti on pinnanlaadultaan hyvä ja tarkka kopio valmistettavasta kappaleesta, sillä muotti toistaa jokaisen muodon ja piirteen. Lasikuidun laminoinnissa muotti pinnoitetaan, jotta valmiin muotin irrottaminen helpottuu lestistä. Kun muotti on valmisteltu, voidaan siihen levittää hartsia sekä palasia lasikuidusta muotin mukaisesti. Lasikuitukerroksia voidaan lisätä kunnes haluttu määrä on saavutettu. Lopulta kun laminointi on valmis ja kovettunut, irrotetaan kappale muotista. Irrottamisen jälkeen tapahtuu vielä viimeistely, eli ylimääräisten reunojen leikkaaminen ja kappaleen pinnan käsittely halutulla tavalla. (Nykänen, 2007)

### 3.8 Tarkkuusvalu

Tarkkuusvalu on yleensä metallisten kappaleiden valamiseen käytetty menetelmä. Tarkkuusvalussa käytetään valumallin materiaalina yleensä vahaa, josta valmistetaan täydellinen kopio valettavasta kappaleesta. Vahamalleja on yleensä useita, jotka kiinnitetään niin sanottuun valupuuhun. Valupuu kastetaan useita kertoja keraamiliemeen, jolloin vahamallien ympärille muodostuu kuorimuotti. Tarkkuusvalun muotti voidaan valmistaa myös kaatamalla kipsiä astiaan, johon valmis valupuu on asetettu. Valmiista muotista sulatetaan vahamalli pois esimerkiksi uunissa, jonka jälkeen muotti on valmis valamiseen. Valun jälkeen muotti rikotaan valukappaleen ympäriltä ja kappale viimeistellään poistamalla valun ylimääräiset osat, kuten kaatokanavat. Koska muotti joudutaan rikkomaan, on kyseessä kertamuottimenetelmä. Tyypillisesti tarkkuusvalussa valmistettavien kappaleiden koot vaihtelevat kymmenestä grammasta kymmeneen kilogrammaan. (GLOBAL SOURCING FINLAND OY)

### 3.9 Kokillivalu

Kokillivalu on kestromuottimenetelmä, jota käytetään pääasiassa alumiini-, sinkki- ja kupariseoksille. Kokillivalussa muotin täytyminen sulalla tapahtuu painovoiman vaikutuksesta, muotti täytetään joko käsin tai koneellisesti. Koska menetelmä on täysin painovoimainen, on muotti saatava täytettyä riittävän nopeasti. Tämä saattaa rajoittaa ohutseinämäisten kappaleiden valamisen kokillivalulla. Kestomuottien tapaan muotti avataan jakopinnalta, joten kappale tulee muotoilla niin että se saadaan irti muotista. Kappaleessa tulee olla riittävät päästöt, oikein asetettu jakopinta sekä sopivat sijainnit valukanaville ja syöttökuvulle. Kokillivalun laitteet ovat menetelmästä johtuen melko yksinkertaisia ja edullisia. (Meskanen & Höök, 2015)

### 3.10 Matalapainevalu

Matalapainevalu muistuttaa hieman kokillivalua, mutta tässä menetelmässä muotti täytetään alhaalta ylöspäin paineistetun ilman tai muun kaasun avulla. Sula metalli on ilmatiiviissä uunissa, josta johtaa putki muotin täyttökanaavaan. Kun tiiviiseen uuniin kohdistetaan kevyt ylipaine, nousee sula metalli putkea pitkin muottiin. Kappaleen jähmetyttyä paine poistetaan, jolloin ylimääräinen sula metalli kulkeutuu takaisin uuniin.

Kappaleen suunnitteluun liittyy samat perusasiat kuin kokillivalussa, eli päästöt, jakopinta ja kanavoinnit tulee olla oikein suunniteltu kappaleen irtoamiseksi muotista. Matalapainevalussa voidaan käyttää hiekasta valmistettuja keernoja, kuten kokillivalussa. Kappalekoot ovat yleisesti 1 – 20 kg, mutta 100 – 150 kg: painoiset kappaleet ovat mahdollisia. Matalapainevalun muotit ovat yleensä valurautaisia. Menetelmällä valetaan useimmiten kuparipohjaisia- ja alumiiniseoksia, mutta erikoistapauksissa voidaan valaa valurautoja ja teräksiä grafiittimuotteihin. (Meskanen & Höök, 2015)

### 3.11 Puhallusmuovaus

Puhallusmuovauksessa valmistetaan kappaleita pakottamalla aihiot paineilman avulla muotin mukaiseksi. Muovimateriaaleja voidaan muotoilla kahdella menetelmällä, joihin kuuluvat ruiskuvaletun aihion muovaaminen ja suulakepuristetun sulan muoviletkun pakottaminen muottiin. Lasikappaleita valmistettaessa jähmeä esimuotoiltu kappale pakotetaan muotin mukaiseksi paineilman avulla. (Meskanen & Höök, 2015)

Puhallusmuovauksessa aihioina on putkimainen muovikappale, joka esilämmitettynä asetetaan muotin puolikkaiden väliin. Muotti suljetaan ja aihion sisään puhalletaan paineilmaa, jolloin aihio pullistuu ja painautuu muotin negatiivipintoja vasten. Kun kappale on jäähtynyt, leikataan suuaukko ja muotti avataan. Puhallusmuovauksella voidaan valmistaa esimerkiksi erityyppisiä muoviastioita, kuten pulloja, muovikanistereita ja kastelukannuja. Menetelmä sopii niin piensarja- että massatuotantoon. (Draft-Tech Oy)

### 3.12 Keskipakovalu

Keskipakovalu perustuu nimensä mukaisesti keskipakovoimaan. Menetelmällä valetaan metallista putkimaisia, sylinterimäisiä tai kuppimaisia kappaleita. Sula kaadetaan pyörivään rumpuun tai muottiin, jossa keskipakovoiman vaikutuksesta materiaali muotoutuu tasaisesti rummun pintaa vasten. Rummun pyörimisnopeus on noin 150 - 200 kierrosta minuutissa.

Keskipakovalun menetelmiin kuuluvat myös keskipakopainevalu ja keskipakomuotovalu. Keskipakomuotovalua käytetään hiekasta tai metallista valmistettuja muotteja, joissa muoto voi olla monimutkainenkin. Keskipakomuotovalussa kappaleen keskelle ei muodostu tyhjää tilaa. Keskipakopainevalussa taas useat hiekka-, keraami- tai metallimuotit ovat symmetrisesti kaatokanavan ympärillä, jopa päällekkäin. Näin saadaan valettua useita kappaleita yhdellä kerralla. (Meskanen & Höök, 2015)

### 3.13 Puristusvalu

Puristusvalussa käytetään vaakatasossa jaettua muottia, jossa yläpuolisko puristetaan sulan alapuoliskoon asettamisen jälkeen 70 - 120 MPa:n paineella. Paineita pidetään muotissa sulan jähmettymiseen saakka. Puristusvalua käytetäänkin metalliseosten valamiseen. Puristusvalussa voidaan käyttää niin sanottua suoraa puristusta, tuurnapuristusta tai pursotuspuristusta. Suoralla puristuksella valmistetaan suurikokoisia kappaleita, tuurnapuristuksella onttoja ja pursotuspuristuksella laatta- tai levyjäisiä kappaleita. Puristusvalulla saadaan valmistettavalle kappaleelle hieno kiderakenne ja hyvät lujuusominaisuudet. Pääasialliset käyttökohteet puristusvalulla liittyvät ajoneuvo- ja hydrauliteollisuuden komponentteihin.

Muoville ja kumille puristusvalua vastaava menetelmä on ahtopuristus. Menetelmä on samantyylinen kuin metallin puristusvalussa, mutta materiaalia annostellaan hieman enemmän mitä kappale vaatii. Muotin puoliskojen puristuessa toisiinsa ylimääräinen materiaali poistuu muotissa sijaitseviin ylijuoksu-uriiin jakopinnan kautta. (Meskanen & Höök, 2015)

### 3.14 Jatkuvavalu

Jatkuvaa valua käytetään pääasiassa vakiomittaisten profiilien, kuten tankojen levyjen ja putkien valmistukseen, lähinnä metallien valmistusteollisuudessa. Profiilin haluttu muoto saadaan vesijähdytetyllä grafiitti- tai metallimuotilla. Menetelmässä sulaa metallia valuu muottiin, jonka läpi sitä vedetään jähmettyttyään. Vedetyn materiaalin tilalle valuu jatkuvasti uutta sulaa, jolloin valaminen tapahtuu jatkuvana virtana muotin läpi.

Alumiinia voidaan valmistaa jatkuvavalun lisäksi pursottavalla menetelmällä. Tässä menetelmässä paksua tankomaista alumiinaihiota ei sulateta vaan se esilämmitetään, jonka jälkeen se työnnetään suurella voimalla muotin läpi.

Pursottamalla voidaan valmistaa myös muovimateriaaleista esimerkiksi erityyppisiä profiileja, kalvoja, levyjä, putkia ja tankoja. Muoviraaka-aine työnnetään jäähdytetyn muotin läpi käyttämällä hieman ruiskuvalukoneen ruuvia muistuttavaa syöttöruuvia. Materiaali syötetään syöttökuvun kautta lämmitettyyn sylinteriin, josta ruuvi pursottaa muovin muotin läpi. (Meskanen & Höök, 2015)

## 3.15 Eri valumenetelmien ominaisuuksia

Taulukkoon 1 on taulukoitu valumenetelmät sekä niiden ominaisuudet ja vaatimukset valamisen suhteen. Taulukossa kerrotaan myös kuinka lisäävä valmistusta voidaan soveltaa kyseiseen valumenetelmään, kun lisäävän valmistuksen menetelmänä on muovipohjaisten materiaalien käyttö.

Taulukko 1. Eri valumenetelmien ominaisuuksia

<b>Menetelmä</b>	<b>Muotin materiaali</b>	<b>Valu- malli</b>	<b>Valettava materiaali</b>	<b>Muotin tyyppi</b>	<b>Soveltuvat sarjakoot</b>	<b>Muotin val- mistus</b>	<b>Muovin lisäävän valmistuksen käyttö</b>
Ruiskuvalu	Metalli	Ei	Muovit	Kestomuotti	Suuret sarjat	Lastuava työstö	Muottien ja insert- tien valmistus
Painevalu	Metalli	Ei	Metallit	Kestomuotti	Suuret sarjat	Lastuava työstö	
Alipainemu- vaus	Puu, alumiini, epoksi, lasikuitu	Ei	Kestomuovit	Kestomuotti	Suuret sarjat	Työstö, lami- nointi, riip- puen materi- aalista	Muottien ja insert- tien valmistus
Hiekkavalu	Valuhiekka	Kyllä	Metallit	Kertamuotti	Yksi kappale per muotti	Valumallin avulla hiek- kaan	Muottien, keerno- jen ja valumallien valmistus
Kuorimuotti	Lämmöllä kovetet- tava hiekka	Kyllä, metalli- nen	Metallit	Kertamuotti	Yksi kappale per muotti	Kuorimuotti- kone annoste- lee hiekan mallin päälle	
Kipsimuotti	Kipsi, sekä erityyppiset täyteaineet	Kyllä	Seokset, joilla alhai- nen sula- mispiste	Kertamuotti	Yksi kappale per muotti	Kaavauske- hyksen sisälle käyttäen valu- mallia	Valumallien valmis- tus
Tarkkuusvalu	Kipsi tai keraami	Kyllä	Muovit/me- tallit	Kertamuotti	Useita kappaleita valupuussa	Valumallin päälle	Valumallien valmis- tus
Laminointi	Muovi, metalli, puu, yms.	Yleensä tarvi- taan	Komposiitti	Kerta/kesto- muotti	Yksi kappale per muotti	Lestin avulla valmistetaan muotti	Muottien valmistus
Kokillivalu	Metalli	Ei	Tavallisesti sinkki-, ku- pari- tai alu- miiniseos	Kestomuotti	Suuret, yli 500 – 1000 kpl sarjat	Lastuava työstö	



Matalapaine- valu	Metalli	Ei	Yleisimmin alumiini- tai kupariseos	Kestomuotti	Suuret sarjat	Lastuava työstö	
Puhallusmuo- vaus	Metalli	Ei	Muovipoh- jaiset ja lasit	Kestomuotti	Pienet ja suu- ret sarjat	Lastuava työstö	Muottien valmistus
Keskipako- valu	Metalli	Ei	Metalliseok- set	Kestomuotti	Suuret sarjat	Lastuava työstö	
Puristusvalu	Metalli	Ei	Metalliseok- set	Kestomuotti	Suuret, 15000 - 100000 kpl sarjat	Lastuava työstö	
Jatkuvavalu	Grafiitti- tai metalli- muotti	Ei	Metallit	Kestomuotti	Suuret sarjat	Lastuava työstö	

#### 4 AM-MENETELMIEN OMINAISUUDET VALAMISESSA

Selkeä hyöty AM-menetelmillä valmistetuissa muoteissa tai malleissa ovat suunnitteluvaiheen sekä valmistusprosessin läpimenoajan nopeutuminen. Esimerkiksi ruiskuvalumuotin valmistukseen saattaa kulu perinteisillä valmistusmenetelmillä useita kuukausia, kun muovisen muotin valmistus kestää viikkoja, jopa ainoastaan muutamia päiviä. (Stratasys) Metallisen muotin hinta voi olla kymmeniä tuhansia euroja tai enemmänkin (Rex Plastics, 2013), kun AM-muotilla hinnat ovat yleensä muutamia tuhansia. Stratasyksen mukaan terveydenhuollon sovelluksia valmistava Worrel pystyy valmistamaan saman tuotteen lisäävällä valmistuksella valmistetulla muotilla, jonka hinta on 2600 \$. Perinteisin menetelmin saman muotin hinnaksi tulisi 11000 \$. (Bashor) Alhaisesta hinnasta ja nopeasta valmistusajasta johtuen on edullista ja helppoa tehdä useita suunnittelun iteraatioita prototyypivaiheessa. Jäähdytyskanavien suunnitteluun liittyvät rajoitukset pienenevät olennaisesti, koska AM-menetelmillä kanavoiden muodot pystytään optimoimaan hyvin tarkasti ja lähes ilman rajoituksia. Tarkalla jäähdytyksellä saadaan tasainen lämpötila muottiin ja näin parannettua laatua ja lyhennettyä jaksonaikaa. (Godberg, 2015)

AM-menetelmillä ei ole perinteisille valmistusmenetelmille ominaisia ongelmia, joten kappaleet voidaan suunnitella hieman vapaammin. Täysin rajoituksettomia AM-menetelmät eivät ole, vaan niille on omat rajoituksensa käytettävän materiaalin ja menetelmän mukaan. Kappaleet tuleekin suunnitella valitun valmistusmenetelmän mukaisesti, nämä rajoitukset ja mahdollisuudet tiedostaen. Esimerkiksi koruteollisuudessa on mahdollista valmistaa onttoja tai sisäkkäisiä rakenteita. (Mikkonen, 2014) Jos joudutaan käyttämään monimutkaisempia keernoja, valmistetaan keernat perinteisesti useasta palasesta, jotka kiinnitetään toisiinsa. Tulostamalla voidaan valmistaa sama keerna yhtenä kappaleena poistaen näin keernan kokoamiseen tarvittavan työvaiheen.

Esimerkiksi Unilever pystyi pienentämään prototyypiosien läpimenoaikaa 40 prosentilla otettuaan käyttöön Stratasyksen PolyJet 3D-tulostuslaitteiston. Muottien valmistus ja kappaleiden testaus voidaan suorittaa jopa saman päivän aikana käyttämällä 3D-tulostavia menetelmiä. Aiemmin prototyyppien valmistukseen saattoi kulu useita viikkoja ja jos iteraatioita tarvittiin, nousivat kustannuksetkin. 3D-tulostamisella suunnitteluiteraatioita voidaan tehdä muutamien tuntien kuluessa, jolloin prototyyppiosia voidaan valmistaa 40 % nopeammin kuin aiemmin, kertoo Stefano Cademartiri, R&D-, CAD- ja Prototyypiasiantuntija. (Fabbaloo)

Toisena esimerkkinä on Budapestin University of Technology and Economics. Kohteena oli yleiskäyttöisen puhaltimen suunnittelu, joka tuottaa tehokkaan jäähdytyksen ollen samalla merkittävästi hiljaisempi. Prototyypeissa tuli käyttää samaa materiaalia kuin lopullisessa tuotteessa. 3D-tulostamalla valmistettiin kolmen mahdollisesti käytettävän mallin ruiskuvalumuotit. Valmiit prototyypikappaleet saatiin käyttöön ja testeihin vain muutaman tunnin kuluttua valmistuksen aloittamisesta. Parhaiten toimineesta puhaltimesta valmistettiin kolmiosainen muotti seuraavien kahden päivän aikana, josta ruiskuvalukoneella valmistettiin useita kappaleita. (Stratasys)

Kuten muillakin valmistusmenetelmillä, myös lisäävällä valmistuksella on omat rajoitteensa ja pullonkaulansa. AM-menetelmillä valmistettaessa tulee huomioida kappaleiden suunnitteluun ja valmistukseen liittyvät mahdollisuudet ja rajoitukset, mutta oikealla tavalla ymmärrettynä ja hyödynnettynä menetelmä mahdollistaa hyvin laajat mahdollisuudet tuotteiden valmistukseen. On myös huomiotava, että yleensä perinteisin menetelmin valmistettua tuotetta ei kannata suoraan viedä lisäävään valmistukseen, vaan varsinainen tuote tulisi suunnitella alusta alkaen valitulla lisäävän valmistuksen menetelmällä valmistettavaksi.

Eräänä muotteihin liittyvänä rajoituksena on muovisen ruiskuvalumuotin kestoikä. Muovisella muotilla ei päästä samoihin kappalemääriin kuin teräksisellä tai alumiinisella ruiskuvalumuotilla, joilla voidaan valmistaa kymmeniä tai satoja tuhansia kappaleita. (Stratasys) AM-muotilla kappalemäärät rajoittuvat yleensä muutamiin satoihin soveltuen näin pienempiin sarjakokoihin ja prototyyppeihin. Toisaalta muovisten muottien halvempi hinta ja valmistuksen nopeus kompensoivat näitä rajoituksia, tapauksesta riippuen. Pursottavilla menetelmillä voi olla ongelmia erittäin hyvää mittatarkkuutta vaativissa kohteissa, jolloin menetelmän soveltuvuus tiettyyn kohteeseen voi kyseenalaistua. Muotin valmistuksen jälkeen saatetaan tarvita vielä koneistusta, etenkin jos pinnanlaatu ja mittatarkkuus ovat hyvin tärkeitä kappaleelle. Jälkityöstön tarve tuleekin ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Jos muottia ei tarvitse käsitellä tai työstää AM-menetelmällä valmistamisen jälkeen, on se erittäin suuri hyöty sekä työmäärän että valmistusajan kannalta.

## 5 AM-MENETELMIEN KÄYTTÖ VALAMISESSA

### 5.1 Valumuottien valmistus

Valumuotti koostuu yleensä kahdesta tai useammasta muotin osasta, joissa on valettavan kappaleen negatiivipinta. Muotti on valamisessa se osa johon sulaa materiaali valetaan, kun taas valumalli tarkoittaa kappaletta jolla valmistetaan valumuottiin kappaleen negatiivipinta. Kuvassa 2 on 3D-tulostettua valumallia apuna käyttäen valmistettu hiekkamuotti.



Kuva 2. Hiekkamuotit ja kappaleen negatiivipinnat kaavauskehyksissään (Aartonen, 2017)

Ruiskuvalua varten pystytään valmistamaan ruiskuvalumuotti 3D-tulostamalla esimerkiksi muovista. Tulostettuun muottiin voidaan optimoida esimerkiksi jäähdytyskanavat hyvinkin tarkasti verrattuna perinteisiin lastuavin menetelmin valmistettuun muottiin. Koneistamalla voidaan valmistaa vain suoria kanavia, jolloin jäähdytyskanavan etäisyys kappaleen pinnasta saattaa vaihdella kaarevissa kappaleissa, kun taas AM-menetelmällä kanavat ja niiden muodot voidaan suunnitella lähes ilman rajoituksia ja tasainen jäähdytys kappaleelle voidaan optimoida helpommin. Tarkalla jäähdytyksellä voidaan vaikuttaa jaksonaikojen pituuksiin, joka on suuremmissa sarjoissa merkittävä etu.

Joensuulainen Vesuto Oy valmistaa ruiskuvalumuotteja lisäävällä valmistuksella. Heillä käytössä on Objetin laite, joka käyttää Polyjet -menetelmää, eli materiaalin suihkutusta valmistuksessa. Näin valmistetut muotit soveltuvat lähinnä prototyyppi- ja testikäyttöön, sillä Vesuto Oy:n mukaan muottien kesto jää noin 10 – 20 kappaleen sarjoihin. Toisaalta muovinen muotti voidaan valmistaa yhdessä yössä seuraavaksi päiväksi, mistä voi olla suurikin hyöty ennen kalliimman teräksisen tai alumiinisen muotin hankkimista.

## 5.2 Hiekkamuotin tulostaminen

Hiekkavalua varten pystytään tulostamaan jo valmiita muotteja hiekan tulostukseen soveltuvalla laitteistolla. Perinteiseen hiekkamuotin valmistusmenetelmään verrattuna valmistusvaiheista jää pois kaavaukset, keernat ja kanavien valmistukset, sillä muotti valmistuu yhdellä kerralla sisältäen edellä mainitut piirteet. Näin erillisiä muottityökaluja ei tarvita, vaan muotti on lähes käyttövalmis valua varten suoraan tulostuksen jälkeen.

Muotti valmistuu tulostamalla hiekkaa kerroksittain valikoivasti ja kiinnittämällä partikkelit toisiinsa sideaineella, kyseessä oleva menetelmä on siis sideaineen suihkutetus, Binder Jetting. Hiekkamuotin tulostuksessa muotin geometria voidaan suunnitella vapaammin, sillä tulostamalla voidaan luoda monimutkaisiakin muotoja, jotka olisivat hankalia tai mahdottomia muulla tavoin valmistaa. Negatiivisia päästöjä ei tavallisesti valumallia käytettäessä voida valmistaa, mutta hiekkamuotin tulostuksella kyseiset geometriat ovat helposti toteutettavissa. Keernat, kaatokanavat ja ilmakanavat voidaan valmistaa tulostettaessa samalla, joten niille ei tarvita erillisiä työkaluja. Hiekan materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi silica- tai kvartsihiekkää. (Voxeljet)

Koska hiekkamuotin tulostaminen ei vaadi suuria lämpötiloja, voidaan valmistaa tarkkoja yksityiskoh-  
tia ilman riskiä jäähtymisessä syntyvien jännitysten aiheuttamista muodonmuutoksista. Hienosta hiekkasta ja sideaineesta johtuen muotit ovat lähes käyttövalmiita suoraan tulostimesta otettuna, ainostaan kevyt ylimääräisen hiekan puhdistus vaaditaan. (ExOne, 2015) Hiekkamuotti voidaan tulostaa tarpeen vaatiessa myös useammassa osassa, jotka liitetään yhteen liimaamalla. (ExOne, 2012) Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi sellaiset muotit, joihin yhtenä kappaleena tulostettaessa syntyisi irtonaisella hiekkalla täyttynyt umpinainen onkalo, joten useampiosainen hiekkamuotti voisi olla so-  
piva vaihtoehto.

Valkeakoskelainen Hetitec Oy valmistaakin hiekkatulosteita käyttäen Voxeljetin tulostinlaitteistoa. Hiekan tulostaminen tapahtuu levittämällä kerros hiekkää, johon suihkutetaan sideaineita hiekkapartikkelien kiinnittämiseen toisiinsa. Tulostuksen jälkeen valmis kappale on irtonaisen hiekan peitossa. Ylimääräinen hiekka poistetaan ja kappale puhdistetaan. Puhdistamisen jälkeen hiekkatulostettu kappale onkin valmis käytettäväksi jopa sellaisenaan. Menetelmällä voidaan valmistaa valmiita muotteja, keernoja, valumalleja tai jopa valmiita esineitä, esimerkiksi koristepatsaita, jotka voidaan maalata tai muilla tavoin pintakäsitellä. Kuvassa 5 onkin hiekkasta tulostettu ja pinnoitettu valumalli, jolla painetaan hiekkamuottiin negatiivipinta.



Kuva 3. Hetitec Oy:n valmistamia kappaleita (Aartonen, 2017)



Kuva 4. Hetitec Oy:n hiekasta tulostettuja kaiuttimen osia ja kotelo (Aartonen, 2017)



Kuva 5. Hiekasta tulostettu ja pinnoitettu valumalli (Aartonen, 2017)

### 5.3 Valumallien valmistus

Valumallilla tarkoitetaan kappaletta, jonka avulla muotti valmistetaan yleensä kertamuottimenetelmissä. Valumalli on tarkka kopio lopullisesta kappaleesta ulkomuotoa ja piirteitä myöten. Mittatarkkuutta vaativissa kappaleissa valumalli voidaan valmistaa hieman valmista kappaletta suuremmaksi, jotta voidaan kompensoida valettavan materiaalin kutistuminen jäähtymisen aikana, tätä kutistumaa kutsutaan kiinteäkutistumaksi. Esimerkiksi alumiinia valettaessa kiinteäkutistuma on 1.0 – 1,5 %. (Keskinen & Nieminen, 2010)

Tarkkuusvalussa käytetään keraami- tai kipsimuottia, jossa perinteiselle vahasta valmistetulle valumallille vaihtoehtona on muovista 3D-tulostettu valumalli. Muovinen valumalli poltetaan pois muotista samaan tapaan kuin vahasta tehty malli, eli muotti valumalleineen asetetaan uuniin jossa malli palaa pois muotin sisältä.

Hiekkavalussa samaa valumallia voidaan käyttää useita kertoja uusien muottien valmistuksessa, sillä valumalli poistetaan muotista ehjänä. Tämä rajoittaa hieman muotin ja mallin suunnittelua, sillä malli tulee pystyä poistamaan rikkomatta muottia. Negatiivisia päästöjä on siis mahdoton käyttää, toisin kuin tulostettaessa kokonainen hiekkamuotti. Hiekkavalua varten pätee siis samat ohjeistukset AM-mallilla kuin millä muulla valumallilla tahansa, sillä kyseessä on vain tavallinen kappale, jolla luodaan hiekkaan negatiivipinta.

## 5.4 Pinnanlaatu

Menetelmästä riippuen AM-menetelmillä kappaleen pinta voi vaatia tarkastelua, riippuen käyttökohteesta ja vaatimuksista. Esimerkiksi jauhepeti- sekä materiaalia pursottavilla menetelmillä pinta on hieman kerroksittainen, joka näkyy valmiissa kappaleessa, jos pintakäsittelyä ei suoriteta.

Koska materiaalia pursottavalla menetelmällä valmistettujen muottien pinta on hieman porrasmainen, käyttökohteesta riippuen saatetaan tarvita pinnanlaadun parantamista tulostamisen jälkeisillä toimenpiteillä. Asetonia voidaan käyttää ABS-muoville, kyseinen muovilaatu sulaa asetonin vaikutuksesta. Tässä asetonikäsittelyssä kappale asetetaan astiaan, jonka pohjalla on asetonia. Tätä astiaa aletaan lämmittää kevyesti, jolloin asetonin höyrystyy samalla hieman sulattaen ja tasoittaen ABS-tulosteen pintaa. Jos kappaleen mittatarkkuus on tärkeää, on oltava varma, ettei esimerkiksi reikien tarkkuus muutu, sillä asetonikäsittelyssä sulatetaan muovia kemiallisesti ja se vaikuttaa kappaleen mittatarkkuuteen.

Asetonikäsittely ei toimi kaikille muovimateriaaleille, esimerkiksi PLA-muoville, koska eri muoveilla on erilainen kemikaalien kestävyys. Tällöin PLA-muoville eräs mahdollinen keino voisi olla tulosteen pinnan sulatus kuumentamalla käyttämällä esimerkiksi kuumailmapuhallinta. Tässä ongelmana voi olla koko kappaleen lämpeneminen ja sitä kautta pehmentyminen ja muodonmuutos. Tärkeää olisi saada vain pintakerros kuumentamaan niin, ettei lämpö ulotu syvempiin kerroksiin.

Vaihtoehtona on myös kappaleiden pintojen hiominen. Hiominen on kappaleen muodoista riippuen työläs menetelmä, sillä se joudutaan suorittamaan käytännössä käsin ja se soveltuu vain yksinkertaisia muotoja omaaville kappaleille. Monimutkaisemmissa kappaleissa, kuten hammaspyörässä hiominen hidastuu merkittävästi tai muuttuu jopa mahdottomaksi. Rumpuhionta voisi tällöin olla soveltuva menetelmä monimutkaisempien muovikappaleiden hiomiseen. Rumpuhiontaa käytetään yleisesti metallisten valettujen kappaleiden purseenpoistoon, pinnan tasoitukseen ja puhdistukseen. Kappaleiden hioutuminen perustuu puhdistavien rakeiden ja kappaleiden väliseen hankaukseen. Laitteessa oleva rumpu pyörii yleensä vaaka-akselinsa ympäri, jossa kappaleet ja rakeet hankautuvat toisiaan vasten. Metallisia valukappaleita hiottaessa käytetään usein keraamisia tai valkoisesta valuraudasta valmistettuja hiomarakkeita. (Niemi, 2010) Muovisille kappaleille tulee ottaa huomioon eri hiomarakkeiden vaikutus. Metallia pehmeämpänä materiaalina saatetaan joutua käyttämään erityyppistä raetta, joka soveltuu paremmin muoville.

Kappale voidaan pinnoittaa tarvittaessa, mutta usein pinnoitukseen liittyy myös hiominen, joka vaikeutuu kappaleen geometrian monimutkaistuessa. Sopivia pinnoitteita voisivat olla erilaiset hiontavärit, jotka suihkutetaan kappaleen pinnalle. Kuivuttuaan maalattu pinta hiotaan tasaiseksi. Hiontaväri saattaisi olla kevyempi tasoittaa verrattuna PLA-tulosteen muovipintaan. 3D-tulosteille on myös markkinoilla XTC-3D -pinnoite, joka päälle siveltyinä on tarkoitettu tasoittamaan kappaleen pintaa tulostuksen jälkeen.



## 6 TESTIKOHTTEET JA VALUT

### 6.1 Hiekkavalu

Hiekkavalua varten valmistettiin valumallit materiaalia pursottavalla menetelmällä. Valettavana materiaalina käytettiin alumiinia, jonka tarkasta seoksesta ei kuitenkaan ollut tietoa. Voitiin vain olettaa sen olevan valualumiinia alkuperäisen käyttökohteen, eli rikkinäisen moottoripyörän moottorinlohkon perusteella.

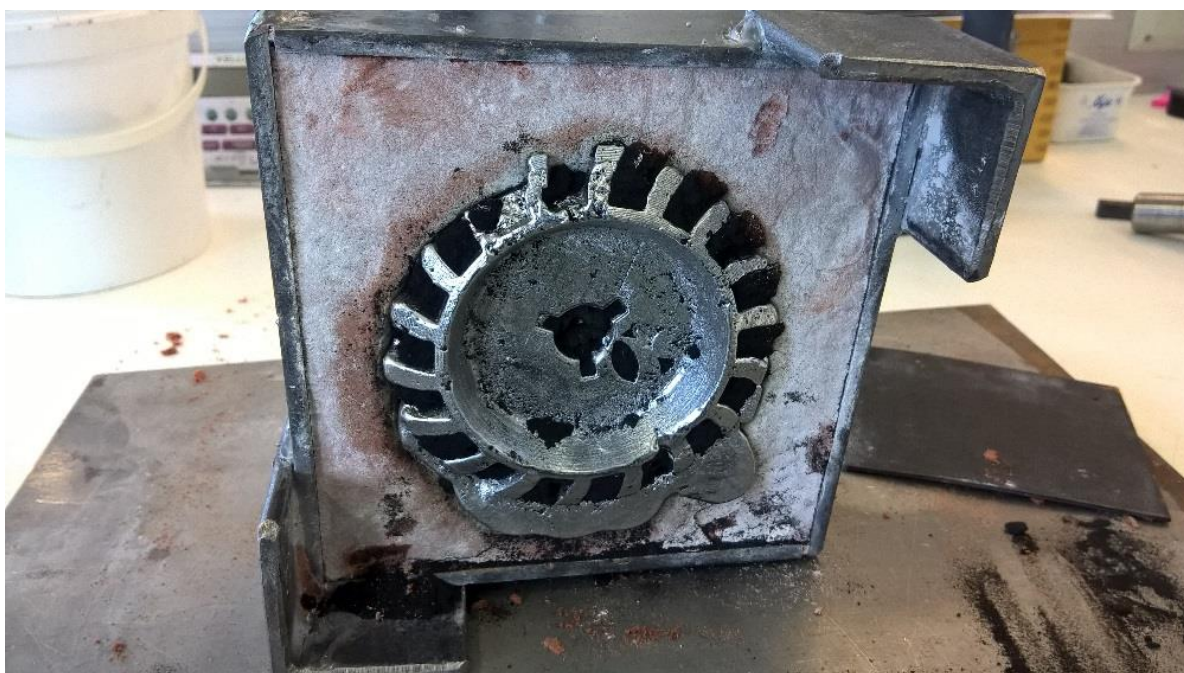
Hiekkavalun muotteja varten tulostettiin valumalleja PLA-muovista. Hiekan kaavaus suoritettiin käsin muotteihin, joihin sitten luotiin valumallia käyttäen kappaleen negatiivi. Tämän jälkeen tehtiin vielä reiät kaatokanavalle ja ilmanpoistokanavalle. Nyt muotinpuoliskot voitiin yhdistää ja muotti oli valmis valettavaksi.

Ensimmäiset testivalut onnistuivat heikosti, sillä jo muotin valmistuksessa ilmeni vaikeuksia. Valumallina käytettiin hammaspyörää, jonka liian tiheät hammastukset aiheuttivat ongelmia muotin teossa. Hiekka tarttui mallin hammaspintoihin kiinni ja muotti rikkoontui kun mallia nostettiin toisesta muotinpuolikkaasta irti. Muoteista tuli siis käyttökelvottomia, eikä valua suoritettu ollenkaan kyseisillä muoteilla.

Toista valukertaa varten muutettiin mallikappaleena olevan rattaan hammastusta ja hammasväliä harvemmaksi ajatuksena poistaa hiekan tarttuminen malliin. Tehtiin kaksi valua, joiden muotit onnistuivatkin huomattavasti aiempaa paremmin. Muutama hammaspinta jäi hieman rosoiseksi molemmissa muoteissa, mutta tulos oli paljon parempi verrattuna ensimmäiseen valukertaan. Itse valut onnistuivat myös melko hyvin, vaikka jouduttiin käyttämään kahta upokasta sulan kaatamiseen kappaleen koosta johtuen. Kuvassa 6 ja 7 on ensimmäinen onnistunut valu hiekkamuottiin. Kuvista nähdään kuinka sula on päässyt valumaan muotinpuoliskojen väliin jakopinnalle, vaikka muotit ovat olleet kiinni toisissaan. Myös hammaspinat onnistuivat melko huonosti, sillä hiekka pyrki tarttumaan edelleen hieman kiinni malliin muutoksista huolimatta. Muotissa oli siis useita virheitä.



Kuva 6. Sulan kaatoa muottiin (Aartonen, 2017)



Kuva 7. Valettu kappale vielä kiinni muotissa (Aartonen, 2017)



Kuva 8. Ensimmäinen hiekkavalettu kappale (Aartonen, 2017)

Toinen valu onnistui muotin ja mallin osalta hieman paremmin, sillä lähes kaikki hammaspinnat säilyivät ehjinä kappaleeseen asti. Tosin selkeitä valuvikoja syntyi tässäkin kappaleessa, todennäköisesti osittain johtuen materiaalissa olevien epäpuhtauksien ansiosta. Kuvassa 9 on nähtävillä toinen valettu kappale. Tasaisilla, hyvälaatuisilla pinnoilla on kuitenkin selvästi huomattavissa 3D-tulosteen pinnanmuodot, kuten kerrosten reunat ja pintojen viivamaisuus, joten menetelmällä pystytään oikeissa olosuhteissa valmistamaan erittäin tarkkoja ja laadukkaita valuja käyttäen tulostettuakin mallia.

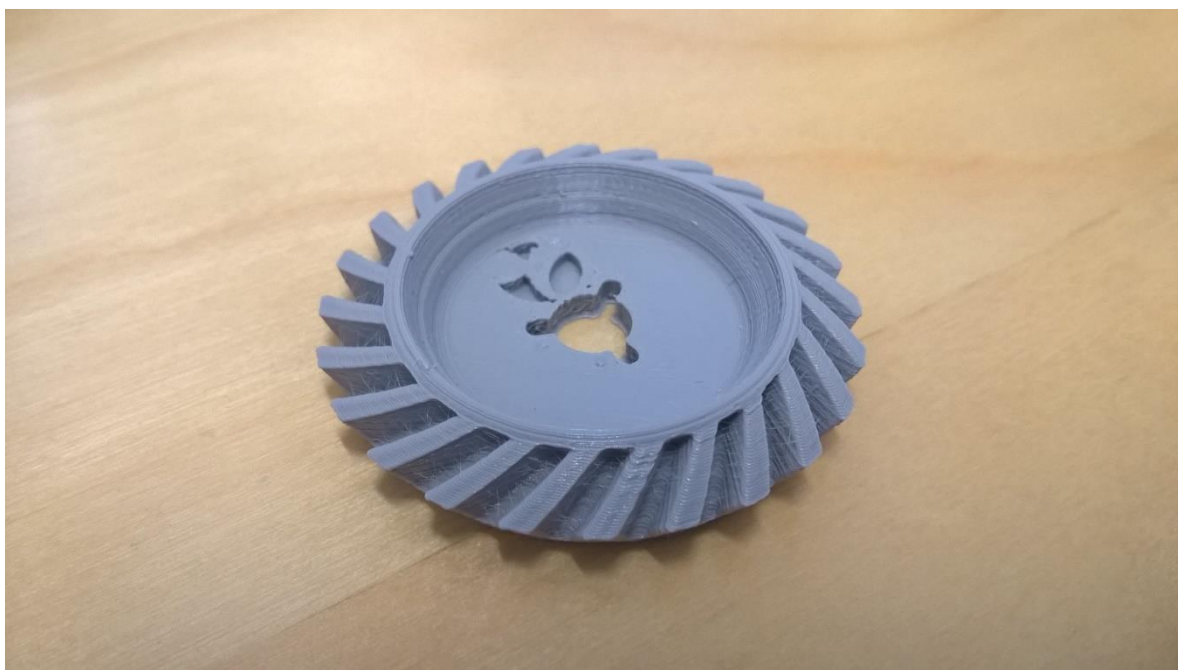


Kuva 9. Toinen hiekkavalettu kappale (Aartonen,2017)

Tulostetun mallin käyttö ei eroa mitenkään perinteisen puisen tai metallisen mallin käytöstä ja samat valumallin suunnitteluohjeet pätevät myös 3D-tulostetulle mallille, kuten pinnanlaadun tärkeys ja päästöjen oikea suunnittelu. 3D-tulostettu malli soveltuu siis hyvin hiekkavalussa käytettäväksi valumalliksi kuten mikä tahansa muukin esine, sillä kyseessä on vain kappale, jolla painetaan hiekka-muottiin negatiivipinta kappaleesta.

## 6.2 Tarkkuusvalu

Tarkkuusvalua varten valmistettiin valumalli muovista tulostamalla. Käytettiin sekä pursottavaa menetelmää, jossa materiaalina oli PLA-muovi, sekä jauhepetimenetelmään kuuluvaa lasersintrausta, materiaalina EOS PA2200, eli polyamidi-12. Mallin päälle luodaan muotti kipsistä, jonka jälkeen malli poltetaan muotin sisältä pois. Valettavina kappaleina käytettiin samoja hammaspyörän malleja kuin hiekkavalussa aiemmin, mutta kappaleiden koko skaalattiin puolet pienemmäksi johtuen käytettävissä olevan laitteiston kokoon liittyvistä rajoituksista. Kuvassa 10 on pursottavalla menetelmällä valmistettu valussa käytettävä kappale.



Kuva 10. Tarkkuusvalun valumalli. Kappaleen halkaisija on noin 52 mm (Aartonen, 2017)

Tarkkuusvalua varten valmistettiin toinenkin erityyppinen kappale PA2200-materiaalista. Kappale oli eräänlainen kiinnike, joka oli suunniteltu ja topologisesti optimoitu tietokoneavusteisesti. Kuvassa 11 voi nähdä kappaleen ja sen kerrosmaisuuuden. Monimutkaisempina kappaleena voidaan hieman tutkia tarkkuusvalun toimivuutta vaihtelevan muotoisille kappaleille.



Kuva 11. Topologisesti optimoitu kiinnike, jonka materiaalina oli PA12. Kappaleen pituus on noin 120 mm (Aartonen, 2017)

Kun kaikki valumallit oli saatu valmiiksi, tehtiin niistä valupuut, kuvat 12 ja 13. Hammaspyörien pienemmästä koosta johtuen saatiin samaan valupuuhun mahtumaan kuusi valumallia, jotka valetaan yhteen kipsimuottiin. Kiinnikkeitä oli kahta eri kokoa, alkuperäinen noin 120 mm pitkä ja toinen pienempi, noin 66 % alkuperäisestä koosta. Näitä kappaleita ei mahtunut yhteen muottiin kuin yksi, joten tehtiin molemmille kiinnikkeille oma muottinsa. Kipsimuotteja oli siis yhteensä kolme, yksi hammaspyörille ja yhdet erikokoisille kiinnikkeille.



Kuva 12. Kiinnike ennen kipsimuotin tekoa (Aartonen, 2017)



Kuva 13. Hammaspyöristä koottu valupuu (Aartonen, 2017)

Kipsimuotin valmistus tapahtui valupajan ohjeiden mukaisesti mittaamalla tarkasti kipsin ja sekoitettavan veden määrät. Veden lämpötilan tuli olla tarkalleen 19 °C kipsimassan laadun kannalta. Jokaiselle muotille mitattiin ja sekoitettiin kipsimassat erikseen. Kun kipsimassa oli sekoitettu kunnolla, asetettiin astia alipainekoneeseen tarkoituksena poistaa mahdolliset huokosia aiheuttavat ilmakuplat. Tämän vaiheen jälkeen kipsimassa kaadettiin valumallin päälle putkeen, joka asetettiin vielä kerran alipainekoneeseen. Toisen tyhjiöimun jälkeen kipsimuotit jätettiin kuivumaan ennen uunitusta. Uunitusvaihe kesti 17 tuntia, jossa lämmitykselle ja jäähtykselle ohjelmoitiin ohjeiden mukaiset ajat ja vaiheet. Kuvassa 14 näkyvät kaikki kolme muottia juuri ennen uunitusvaiheen alkua.



Kuva 14. Kaikki kolme muottia uunissa ennen lämmitysvaihetta (Aartonen, 2017)

Muottien uunituksen jälkeen aloitettiin varsinaiset valut. Valettavat materiaalit, eli alumiini ja pronssi, sulatettiin kaasuliekin avulla keraamisissa upokkaissa. Kun materiaali oli kokonaan sulaa, otettiin muotti ulos uunista. Uuni oli vielä noin 650 °C lämpötilassa jäähdytysvaiheessa uunista poiston aikana. Kipsimuotti asetettiin alipainevalukoneeseen, jossa sula kaadettiin muottiin. Alipaineen avulla saadaan poistettua mahdolliset ilmakuplat, sillä kova kipsimuotti on hieman huokoinen ja ilmaa läpäisevä. Näin ei tarvitse huolehtia muottiin jäävistä ilmataskuista. Pronssille alipaine pidettiin päällä hetken sulan kaatamisen jälkeen, kun taas alumiinin valussa alipaine sammutettiin heti kun muotti oli täyttynyt.

Kun kaikkiin muotteihin saatiin sula valettua, voitiin muotit asettaa pihtien avulla yksi kerrallaan vesisankoon jäähdytystä varten sekä kipsin irrottamisen helpottamiseksi. Ensimmäisen muotin kanssa ei ollut ongelmia, mutta toisen muotin sisällä oleva alumiini oli vielä osittain sulaa, jolloin alumiini kupli muotista ja kappaleet epäonnistuivat. Kolmas muotti jäähdytettiin rauhallisesti ilmaan, jolloin varmistettiin sulan kiinteytyminen, mutta samalla kipsin poisto hidastui hieman. Ensimmäisessä muotissa oli pienempi kiinnike joka valettiin pronssista, toinen epäonnistunut muotti sisälsi hammaspyörät ja kolmas muotti suuremman alumiiniin valetun kiinnikkeen.

Valmiit puhdistetut kappaleet olivat hyvin tarkkoja pinnanlaadultaan, sillä niissä on selvästi nähtävissä tulostuksessa muodostuvat kerrosten rajat. Pronssinen kappale onnistui lähes täydellisesti. Valusta jäi muutama pieni reikä joita sula ei täyttänyt, sekä ilmeisesti ilmakuplien aiheuttamia muotoja. Muilta osin kappale on melko hyvälaatuinen. Lasikuulapuhallettu pronssinen kappale on nähtävillä kuvassa 15.



Kuva 15. Pronssinen tarkkuusvalettu kappale valukanava paikoillaan (Aartonen, 2017)

Alumiiniin valettu suurempi kiinnike onnistui myös melko hyvin, mutta jostain syystä sula ei täyttänyt tässä kappaleessa kahden kiinnitysreiän ympäryksiä, vaan niistä jäi yli puolet vajaaksi. Muuten kappaleen pinnanlaatu on tarkka ja laatu hyvä, kuten pronssisellakin valukappaleella. Alumiininen kiinnike on kuvassa 16, jossa näkyy vajaiksi jääneet reikien ympärykset.



Kuva 16. Alumiininen kappale (Aartonen, 2017)

Hammaspyöristä tehtiin vielä uusi valu myöhemmin, jossa valumallien materiaalina olivat edelleen PLA ja Polyamidi-12. Nämä valut eivät onnistuneet yhtä hyvin kuin kiinnikkeet, sillä kappaleiden pinta jäi epätarkaksi eikä sula täyttänyt muottia täysin. Tarkkuus ja pinnanlaatu eivät siis olleet yhtä hyviä kuin kiinnikkeillä. Kuvassa 14 on tarkkuusvaletut hammaspyörät.





Kuva 17. Tarkkuusvaletut hammaspyörät kiinni valupuussa. Vasemmalla Polyamidi-12, oikealla PLA (Aartonen, 2017)

Yksi hammaspyörä valettiin vielä pronssista, jotta voitiin vertailla pronssisen ja alumiinisen hammaspyörän valettavuutta. Tämä pronssinen onnistuikin paremmin kuin aiemmat alumiiniset, tosin Savonian logo ei toistunut tässäkään mallissa, sekä pintaan jäi huokosia, kuten kuvasta 18 voi nähdä. Myös hammaspintojen väleihin muodostui pieniä kuplia. Muilta osin pronssinen kappale on hyvin tarkka kopio alkuperäisestä mallista, kerrosmaisuuDET erottuvat selkeästi ja pinta on hyvä.



Kuva 18. Pronssista valettu hammaspyörä (Aartonen, 2017)

Testivalujen perusteella lisäävällä valmistuksella valmistetut valumallit sopivat hyvin tarkkuusvalussa käytettäväksi, vaikka osa valuista epäonnistui. PLA-muovi paloi muotista oletettavasti pois kuten

tarkkuusvalussa käytettävä vahakin, josta valukanavat rakennettiin. Ongelmat todennäköisesti liittyvät sulan alumiinin juoksevuuteen muotin ahtaissa onkaloissa, mutta ei voitu olla täysin varmoja muovin palamisesta ja poistumisesta muotista kokonaan. Tätä varten olisi täytynyt valmistaa samanlainen muotti ja halkaista se uunissa polton jälkeen, jolloin oltaisi saatu tietää palaako muovi täysin vai muodostaako se esimerkiksi tuhkaa tai muuta palamisjätettä muotin pintaan. Kuitenkin onnistuneet valupinnat ovat hyvin tarkkoja kopioita käytetyistä valumalleista. Menetelmä on nimensä mukaisesti tarkka ja mallin piirteet hyvin toistava, sillä valetuissa kappaleissa on helposti nähtävillä tulosteen uurteet ja kerrosmaisuuDET. Sopivissa valuolosuhteissa lisäävällä valmistuksella valmistetuilla valumalleilla voidaankin valaa tarkkuusvalussa erittäin tarkkoja ja pinnanlaadultaan hyviä kappaleita.

### 6.3 Silikonivalu

Silikonია voidaan valaa ruiskuvalumuotteihin käyttämällä ruiskuvalulaitteistoa, jossa on erillinen annosteluyksikkö silikonია varten. Annosteluyskikössä on kaksi eri säiliötä, jotka sisältävät varsinaisen perusaineen sekä katalyytin. Aineet sekoitetaan keskenään, jonka jälkeen annosteluyskikö syöttää materiaalin ruiskuvalulaitteelle, jossa seos työnnetään lämmitettyyn muottiin. Aineiden sekoitusvaiheessa voidaan tarvittaessa lisätä seokseen väriaine. Silikonია valettaessa seosaine kiinteytetään lämmittämällä paineenalaisena, kun tavallisesti ruiskuvalussa muovikappaleet kovettuvat jäähtyesään. ("Liquid Silicone Rubber (LSR) Parts Molding | SIMTEC") Silikonია voidaan valaa myös painovoiman avulla kaatamalla nestemäinen silikonია muottiin, jossa sen annetaan jäähmettyä.

Silikonivalussa aiheena oli valaa muovista valmistettuun muottiin silikoninen kappale. Käytettävänä silikonina oli käytössä Kevra Oy:n RTV-2 1520 additioverkottuva muottisilikonია. Tälle silikonille luvattiin kuivumisajaksi 8 tuntia ja käsittelyajaksi 45 minuuttia. Muotit valmistettiin materiaalia pursottavalla menetelmällä käyttäen PLA-muovia materiaalina, sekä jauhepetimenetelmällä jossa materiaalina oli polyamidi-12. Valettava kohde oli eräänlainen ihmisen sydämen malli, jonka tarkoituksena silikonista valmistettuna on venyä ja palautua muotoonsa paineistettaessa sisäpuolelta. Näin mallilla, eli phantomilla voidaan jäljitellä sydämen pumppaavaa liikettä. Kuvassa 19 on eräs malli phantomista. Valettava phantom muistuttaa tätä mallia, ulomman kuoren yläosaa on ummessa ja silikoninen malli valmistetaan kahdesta osasta, sisempi ja ulompi osa erikseen.

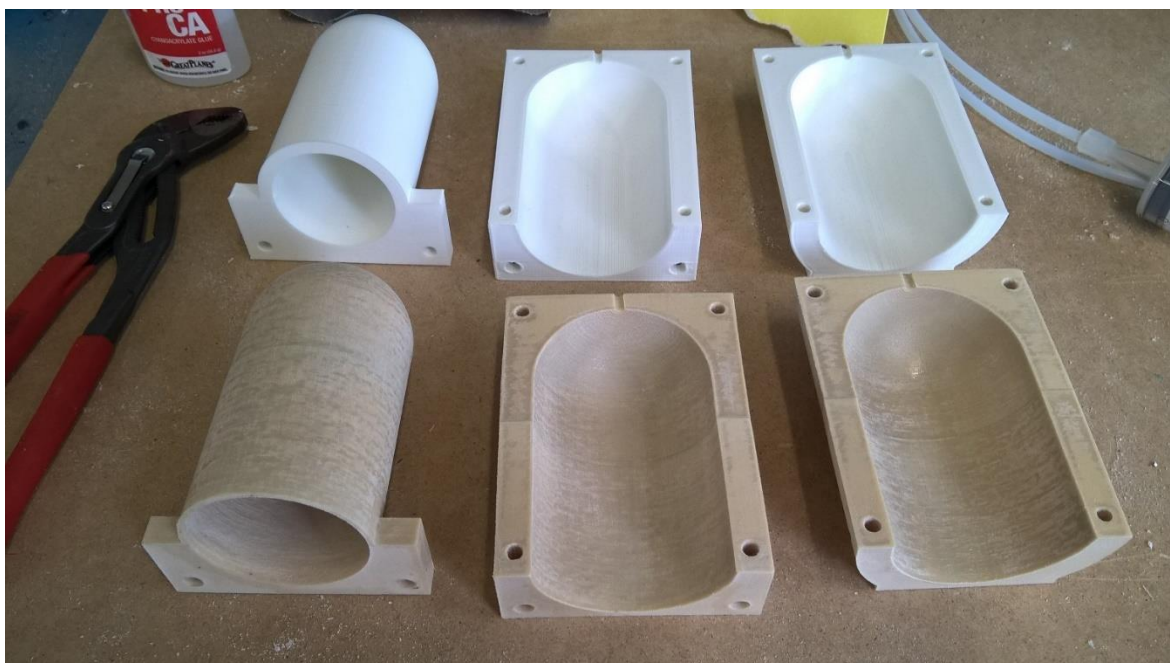


Kuva 19. Eräänlainen phantomin malli (Aartonen, 2017)

Muotti valmistettiin kolmesta osasta: ulkopuolelle tarvittiin kaksiosainen halkaistava muotti ja sisäpuolen muottiosa kiinnitettiin ulkopuolen kappaleisiin. Jauhepetimenetelmällä valmistetut muotit jouduttiin tulostamaan vielä kaksiosaisina tulostuksen kannalta. Osat liimattiin yhteen tulostuksen jälkeen käyttäen pikaliimaa. Muotin keskiosa kiinnittyy toiseen ulkopuolen osaan ruuvikiinnityksellä, jolloin keskiosaa voidaan hieman liikuttaa ja kohdistaa tarvittaessa. Ulkopuolen osat kohdistetaan toisiinsa kulmissa olevien reikien ja niihin asetettavien tappien avulla. Ulompien osien jakopinnat vielä hiottiin kevyesti tarkoituksena saada muotista mahdollisimman tiivis. Kun keskiosa oli kiinnitetty toiseen puoliskoon, puristettiin ulkopuolet kiinni toisiinsa ruuvipenkin ja puristimien avulla. Näin muotti oli valmis silikonia varten. Kuvissa 20 ja 21 on ulompien osien muotit 3D-malleina ja fyysisinä kappaleina.



Kuva 20. Ulomman kuoren muotin 3D-mallit (Aartonen, 2017)



Kuva 21. Silikonivalun muottien osat. Yläpuolella PLA ja alapuolella polyamidi-12 (Aartonen, 2017)

Muotin alaosassa on 4 mm:n halkaisijalla oleva reikä, johon kiinnitettiin letku. Letkun toisessa päässä oli käsikäyttöinen injektoriruisku, jolla silikonin työnnettiin muottiin. Kun silikonin pinta nousi muotin yläosan tasalle, suljettiin letku taittamalla ja jätettiin silikonin jähmettymään. Ensimmäisessä valussa käytettiin valkoista PLA-muovista valmistettua muottia, jonka pinta siveltiin kevyesti vaseliinilla helpottamaan jähmettymisen jälkeistä irrotusta. Tämä valu epäonnistui kokonaan, sillä silikonin

ei jähmettynyt ollenkaan vaan jäi nestemäiseksi vaseliinin vaikutuksesta. Toinen valu suoritettiin polyamidi-12:sta tehtyyn muottiin. Tässä valussa silikoni jähmettyi kuten pitikin, eikä muitakaan ongelmia ei ilmennyt. Irrottaminen onnistui hyvin, sillä muotti saatiin halkaistua ja purettua melko helposti. Varsinaista pintakäsittelyä muotille ei siis tarvittu, muotin pinnat hiottiin kevyesti ainoastaan tarkoituksena parantaa valukappaleen pinnanlaatua. Kuvassa 22 on onnistunut silikoninen valukappale muotteineen.



Kuva 22. Silikonista valettu kappale ja muotit (Aartonen, 2017)

Phantomin sisäosaa varten valmistettiin muotit PLA-muovista. Muotti on hyvin samankaltainen kuin ulkokuoren muotti, mutta mittasuhteet muuttuivat hieman. Tässä valussa muotin pintaa ei käsitelty ollenkaan, vaan jakopintojen hiomisen jälkeen muotti kasattiin ja silikoni valettiin muottiin. Valu onnistui hyvin, eikä kappaleen irrottamisessakaan ilmennyt hankaluuksia. Kuvassa 23 on molemmat silikonikappaleet ennen viimeistelyä.

Silikonikappaleiden kiinnittämistä varten tulostettiin PLA-muovista alusta, johon kappaleet on tarkoitettu kiinnitettävän sisäkkäin esimerkiksi nippusiteillä tai klemmareilla. Alustan tarkoituksena on mahdollistaa phantomin paineistaminen sisäpuolelta venyttäen silikonisia kappaleita. Alustassa on siis kaksi reikää paineilmailiittimien kiinnitystä varten, jolloin phantomin molempien kammioiden painetta voitaisiin muuttaa erikseen. Kuvassa 24 on phantomin osat alustassaan.



Kuva 23. Phantomin ulompi ja sisempi osa silikonista valettuna (Aartonen, 2017)



Kuva 24. Phantomin sisempi ja ulompi osa asetettuna alustaan (Aartonen, 2017)

Lopputuloksena valaminen onnistui hyvin sekä pursottavalla että jauhepetimenetelmällä valmistettuun muottiin. Pinnoitteita ei tarvittu, vaan voitiin valaa suoraan muotin pinnalle. Silikonin käsittely oli melko yksinkertaista, silikonin molempia komponentteja sekoitettiin 1:1 suhteessa toisiinsa, jonka jälkeen silikoni voitiin valaa muottiin ruiskun avulla. Vaadittaessa parempaa laatua kappaleelle, olisi sekoitettu nestemäinen silikoni vielä mahdollisesti alipaineistettava alipainelaitteessa, sillä valmiiseen silikonikappaleeseen oli jäänyt pieniä ilmakuplia joka puolelle. Sekoittaessa yritettiin välttää ilman joutumista mukaan, mutta pieniä kuplia näytti silikonissa olevan jo suoraan sekoitusastiaan kaadettuna. Ilmakuplat voitaisiin poistaa tai ainakin vähentää niiden määrää alipaineistamalla silikoni ennen valua.

Muotteja jouduttiin työstämään tulostamisen jälkeen jonkin verran. Jakopinnot olivat hieman karheita ja epätasaisia, eli ne jouduttiin hiomaan tasaisemmaksi, jotta muotista saatiin mahdollisimman tiivis. Samoin muutamia kulmia tuli hieman pyöristää muottien toisiinsa istuvuuden parantamiseksi. Lopuksi vielä paikoitustappien reiät jouduttiin poraamaan oikeaan mittaansa, koska tulostuksessa reiät eivät välttämättä muodostuneet täysin pyöreiksi tai mittatarkoiksi. Muotin osia jouduttiin siis vielä käsittelemään jonkin verran tulostamisen jälkeen. Muotit eivät siis ole täysin valmiita suoraan tulostimesta otettuina, vaan jälkityöstöä joudutaan tekemään enemmän tai vähemmän, riippuen kappaleesta.

## 7 YHTEENVETO JA POHDINTA

Vaikka AM-menetelmät eivät ole vielä yleistyneet laajemmin teollisessa käytössä ja valamisessa, on niillä mahdollista saavuttaa suuriakin hyötyjä sekä prototyyppi- ja testikäytön kustannusten ja valmistusajan kannalta. AM-menetelmillä voidaan valmistaa esimerkiksi monimutkaisempia valumalleja kohtuullisen helposti. Hiekkavalua varten pystytään jo tulostamaan valmiita hiekkamuotteja, jotka sopivat tulostuksen ja puhdistuksen jälkeen valuun sellaisenaan. Hiekkamuottien tulostamisen sijasta voidaan Hetitec Oy:n mukaan valmistaa myös valumalleja, keernoja tai jopa muita esineitä, jotka voidaan pinnoittaa esimerkiksi maalaamalla.

Jälkikäsitteilyn määrä tai tarve tulee kuitenkin ottaa huomioon, mahdollisesti ja mielellään jo suunnitteluvaiheessa. Muotin tulostaminen saattaa olla yksinkertainen työvaihe verrattuna sen jälkeiseen työstämiseen. Tämä kävi ilmi juuri silikonivalussa käytetyissä muoteissa. Kriittiset piirteet, kuten reiät, tasopinnat ja muut pinnanlaatua vaativat kohteet, joudutaan vielä käymään läpi joko hiomalla, koneistamalla tai muulla soveltuvalla menetelmällä.

Myöhemmin olisi vielä voinut tehdä muutamia asioita kokeilumielessä jokaiselle käytetylle valumenetelmälle. Hiekkavalun olisi vielä voinut suorittaa erilaista hieman yksinkertaisempaa valumallia käyttäen, jotta olisi saatu hyvälaatuinen ja ehjä muotti, jolla valukappale olisi onnistunut paremmin. Käytetty hammaspyörä oli hiekkamuotin valmistuksessa hieman haastava, sillä täysin ehjää ja hyväpintaista muottia ei onnistuttu valmistamaan. Näin valukappaleiden laatuakin oli puutteellinen. Tarkkuusvalun kipsimuotit olisi voinut halkaista uunissa polttamisen jälkeen, jotta olisi saatu varmaa tietoa muovin palamisesta muotissa. Nyt ei voitu olla varmoja valupuun palamisesta täysin puhtaasti pois muotista, vaan voitiin vain olettaa muotin olevan puhdas. Silikonivalussa taas olisi voinut käyttää nestemäisen silikonin alipainelaitteessa ennen valua ilmakuplien poistamista varten. Vaadittaessa parempilaatuisia silikonikappaleita lienee silikonin alipaineistaminen välttämätöntä.



## 8 LÄHDELUETTELO

A, N. (10. tammikuuta 2017). 3D Printing Processes - Material Jetting (Part 7/8). Haettu 11. helmikuuta 2017 osoitteesta EngineersGarage: <http://www.engineersgarage.com/articles/3d-printing-processes-material-jetting>

Additively. Binder Jetting. Haettu 12. helmikuuta 2017 osoitteesta Additively: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting>

Aikolon. Tyhjiömuovaus • Aikolon. Haettu 14. maaliskuuta 2017 osoitteesta Aikolon: <http://www.aikolon.fi/tyostopalvelut/tyhjiömuovaus>

Bashor, M. 3D printed injection molds. Haettu 3. huhtikuuta 2017 osoitteesta Stratasys: <http://www.moldmakingtechnology.com/cdn/cms/1%20stratasys.pdf>

British Plastics Federation. Injection Moulding. Haettu 9. helmikuuta 2017 osoitteesta British Plastics Federation: [http://www.bpf.co.uk/plastipedia/processes/injection\\_moulding.aspx](http://www.bpf.co.uk/plastipedia/processes/injection_moulding.aspx)

Draft-Tech Oy. Alipainemuovaus. Haettu 14. maaliskuuta 2017 osoitteesta Draft-Tech: <http://www.draft-tech.fi/alipainemuovaus.htm>

Draft-Tech Oy. Puhallusmuovaus. Haettu 15. maaliskuuta 2017 osoitteesta Draft-Tech: <http://www.draft-tech.fi/puhallusmuovaus.htm>

Engineering Resource Center. Injection Mold Pricing Guide. Haettu 9. helmikuuta 2017 osoitteesta Engineering Resource Center: [http://cdn2.hubspot.net/hubfs/386984/documents/ERC-Injection-Mold-Pricing-Guide.pdf?hsCtaTracking=62ed450a-de4d-47e6-a198-30fa950f6135%7C8a388092-bc6f-4bc6-b883-e79cb21bac67&\\_\\_hstc=119271894.2a5a15e4ecff0e91b156421d9b051e15.1486102571541.1486102571541.148](http://cdn2.hubspot.net/hubfs/386984/documents/ERC-Injection-Mold-Pricing-Guide.pdf?hsCtaTracking=62ed450a-de4d-47e6-a198-30fa950f6135%7C8a388092-bc6f-4bc6-b883-e79cb21bac67&__hstc=119271894.2a5a15e4ecff0e91b156421d9b051e15.1486102571541.1486102571541.148)

ExOne. (19. syyskuuta 2012). Sand Printing Process. Haettu 23. helmikuuta 2017 osoitteesta [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=1&v=LFGnjkoE\\_Dng](https://www.youtube.com/watch?time_continue=1&v=LFGnjkoE_Dng)

ExOne. (1. huhtikuuta 2015). S-Max Industrial Sand Casting 3D Printer by ExOne. Haettu 22. helmikuuta 2017 osoitteesta 3DPrinting.com: <https://3dprinting.com/3dprinters/s-max-industrial-sand-casting-3d-printer-by-exone/>

ExOne. What is Binder Jetting? Haettu 12. helmikuuta 2017 osoitteesta ExOne: <http://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-Is-Binder-Jetting>

Fabbaloo. Unilever Leverages 3D Printing to Slash Injection Molding Lead Times. Haettu 16. helmikuuta 2017 osoitteesta Fabbaloo: <http://www.fabbaloo.com/blog/2015/1/25/unilever-leverages-3d-printing-to-slash-injection-molding-lead-times>

GLOBAL SOURCING FINLAND OY. TARKKUUSVALU • GLOBAL SOURCING FINLAND OY. Haettu 9. helmikuuta 2017 osoitteesta GLOBAL SOURCING FINLAND OY: <http://globalsourcing.fi/tuotteet/tarkkuusvalu/>

Godberg, M. (25. kesäkuuta 2015). Additive manufacturing takes conformal cooling to new heights. Haettu 1. maaliskuuta 2017 osoitteesta PlasticsToday: <https://www.plasticstoday.com/injection-molding/additive-manufacturing-takes-conformal-cooling-new-heights/41829201522452>

Industrialmetalcastings.com. Sand Casting, Sand Casting Process and Applications, Sand Castings Manufacturers, Supplier, Exporters. Haettu 9. helmikuuta 2017 osoitteesta Industrialmetalcastings.com: [http://www.industrialmetalcastings.com/casting\\_sand\\_castings.html](http://www.industrialmetalcastings.com/casting_sand_castings.html)

Karhumuovi Oy. Muovimuotti ja muotinvalmistus. Haettu 17. helmikuuta 2017 osoitteesta Karhumuovi Oy: <http://www.karhumuovi.fi/muovimuotti.html>

- Keskinen, R. N. (30. maaliskuuta 2010). Valumallin valmistuksessa huomioon otettavia seikkoja. Haettu 28. helmikuuta 2017 osoitteesta Valuatlas: [http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN\\_muotinvalmistustekniikka\\_26\\_28.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_muotinvalmistustekniikka_26_28.pdf)
- Levelup. (2016). STL-formaatti. Haettu 9. helmikuuta 2017 osoitteesta Levelup: <http://aipworks.fi/3d-tulostus/tietoa/stl-formaatti/>
- Loughborough University. Powder Bed Fusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University. Haettu 13. helmikuuta 2017 osoitteesta Loughborough University: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>
- Loughborough University. Sheet Lamination | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University. Haettu 13. helmikuuta 2017 osoitteesta Loughborough University: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>
- Meskanen, S.;& Höök, T. (3. syyskuuta 2015). Valumenetelmät. Haettu 9. helmikuuta 2017 osoitteesta Valuatlas: [http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/perusopas\\_03.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/perusopas_03.pdf)
- Mikkonen, M. (13. toukokuuta 2014). Yleistyvä 3D-tulostus mullistaa teollisuudenaloja - alan huiput kokoontuvat Lappeenrannassa. Haettu 16. helmikuuta 2017 osoitteesta Yle.fi: <http://yle.fi/uutiset/3-7235940>
- Muoviyhdistys. Ruiskuvalumuotin rakenne. Haettu 28. helmikuuta 2017 osoitteesta Muoviyhdistys: <http://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/22/osa-18-ruiskuvalumuotin-rakenne/>
- Niemi, P. (18. maaliskuuta 2010). Jälkikäsitteily. Haettu 21. helmikuuta 2017 osoitteesta Valuatlas: [http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN\\_jalkikasittely\\_A.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_jalkikasittely_A.pdf)
- Nykänen. (2. elokuuta 2007). Laskuituisen kappaleen tekeminen muotista. Haettu 23. maaliskuuta 2017 osoitteesta Kanoottipurjehtijat.fi: <http://www.kanoottipurjehtijat.fi/rakentaminen/lasikuituisen-kappaleen-tekeminen-muotista>
- Nykänen, S.;& Höök, T. (18. maaliskuuta 2015). Ruiskuvaluprosessi. Haettu 23. tammikuuta 2017 osoitteesta Valuatlas: <http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/ruiskuvaluprosessi.pdf>
- Photopolymer.com. STEREO LITHOGRAPHY / 3D PRINTING / ADDITIVE FABRICATION. Haettu 10. helmikuuta 2017 osoitteesta Photopolymer.com: <http://www.photopolymer.com/stereolithography.htm>
- Proto Labs. 3D-Printed Molds vs. Aluminum Tooling | The official blog of Proto Labs. Haettu 17. helmikuuta 2017 osoitteesta Proto Labs: <https://www.protolabs.com/resources/blog/3d-printed-molds-vs-aluminum-tooling/>
- Rex Plastics. (15. heinäkuuta 2013). How Much Do Injection Molds Cost? Haettu 3. huhtikuuta 2017 osoitteesta Rex Plastics: <https://rexplastics.com/plastic-injection-molds/how-much-do-plastic-injection-molds-cost>
- Savonia-ammattikorkeakoulu. Laminointimenetelmä. Haettu 13. helmikuuta 2017 osoitteesta ALVO: <http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/50-laminointimenetelma>
- Savonia-ammattikorkeakoulu. Materiaalin pursotus. Haettu 9. helmikuuta 2017 osoitteesta ALVO: <http://alvo.savonia.fi/index.php/tietopankki/menetelmat/52-materiaalin-pursotus>
- Savonia-ammattikorkeakoulu. Nesteen fotopolymerisointi. Haettu 10. helmikuuta 2017 osoitteesta ALVO: <http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/51-nesteen-fotopolymerisointi>
- SIMTEC. Liquid Silicone Rubber (LSR) Injection Molding. Haettu 8. maaliskuuta 2017 osoitteesta SIMTEC: <https://www.simtec-silicone.com/capabilities/liquid-silicone-rubber/>

Stratasys. Educator Using 3D Printing for Injection Molding. Haettu 16. helmikuuta 2017 osoitteesta Stratasys: <http://www.stratasys.com/resources/case-studies/education/budapest-university-of-technology-and-economics>

Stratasys. Injection Molding. Haettu 19. helmikuuta 2017 osoitteesta Stratasys: <https://www.stratasysdirect.com/resources/injection-molding/>

Voxeljet. Sand | voxeljet sand casting. Haettu 15. helmikuuta 2017 osoitteesta Voxeljet: <http://www.voxeljet.de/en/materials/sand/>