

Markus Korpela

MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS – KUSTANNUKSET,  
HYÖDYT JA HAASTEET

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

2016

# MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS - KUSTANNUKSET, HYÖDYT JA HAASTEET

Korpela, Markus  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Toukokuu 2016  
Ohjaaja: Leino, Mirka  
Sivumäärä: 74  
Liitteitä: 2

Asiasanat: materiaalia lisäävä valmistus, ainetta lisäävä valmistus, 3D-tulostus, pika-valmistus, kustannukset

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä materiaalia lisäävään valmistukseen sekä sen tuomiin mahdollisuuksiin. Lisäksi tavoitteena oli saada tarkka selvitys siitä millaisia kustannuksia materiaalia lisäävään valmistukseen liittyy. Materiaalien osalta työssä keskityttiin yleisimmin alalla käytettyihin metalleihin ja muoveihin.

Kirjallisessa osuudessa käsiteltiin materiaalia lisäävää valmistusta yleisellä tasolla, sen nykyisiä käyttökohteita sekä kustannuksia. Kustannuksia esiteltiin myös case-esimerkkien avulla.

Opinnäytetyössä kerättiin kattava aineisto materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyistä ja kustannuksista, mitä voidaan hyödyntää myöhemmin työelämässä. Aineisto kerättiin käymällä läpi alan kirjallisuutta, vierailemalla kaksilla alan messuilla, osallistumalla Suomen Pikavalmistusyhdistys ry:n vuosiseminaariin sekä haastatteleamalla alan asiantuntijoita. Kirjallisuuden hyödyntäminen osoittautui haastavaksi, koska ala on kehittynyt nopeasti ja saatavissa ollut kirjallisuus painottui kuluttajaluokan laitteisiin. Käytetty kirjallisuus oli pääosin englanninkielistä. Opinnäytetyö toteutettiin täysipäiväisenä projektina, joka kesti kevään 2016.

Työssä havaittiin, että materiaalia lisäävä valmistus voi olla jo taloudellisesti kannattava valmistusmenetelmä jopa sarjavalmistuksessa. Sillä havaittiin myös olevan potentiaalia muuttaa radikaalistikin olemassa olevia toimintatapoja. Toisaalta työssä havaittiin myös suuria alan ongelmia, jotka ovat vielä ratkaisematta.

## ADDITIVE MANUFACTURING – COSTS, BENEFITS AND CHALLENGES

Korpela, Markus

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in mechanical and production engineering

May 2016

Supervisor: Leino, Mirka

Number of pages: 74

Appendices: 2

Keywords: additive manufacturing, rapid prototyping, 3D printing, AM, costs

---

The purpose of this thesis was to gather information and knowledge about additive manufacturing and its possibilities and costs. The thesis focuses on materials that are most commonly used in the field of additive manufacturing – both metals and plastics.

The basics and fundamentals of additive manufacturing are presented in the theory section of the thesis. The section also showcases some applications of additive manufacturing and its costs with case examples.

A relatively comprehensive data about the benefits and costs of additive manufacturing was collected during the thesis. This knowledge can later be used in working life. The data was collected by studying literature, visiting in two trade fairs, participating in Finnish Rapid Prototyping Association's annual seminar and by interviewing experts. Gathering the data was challenging because the technology has developed so fast and the available literature is relatively out-dated and focuses on consumer devices. The literature referred to in the thesis is primarily in English. The thesis was carried out during the spring of 2016 as a fulltime project.

By carefully studying the field of additive manufacturing it became clear that it could already be an efficient way to produce parts, even in serial production. It was found to have the potential to change current practices radically. On the other hand, there are still many unsolved problems and challenges in additive manufacturing.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
2	MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS.....	11
2.1	Historia.....	11
2.2	Markkinat.....	12
2.3	Laitteet.....	14
2.4	Valmistusmenetelmät.....	19
2.4.1	Allasvalopolymerisaatio.....	21
2.4.2	Materiaalin pursotus.....	24
2.4.3	Jauhepetitekniikka.....	30
2.4.4	Materiaalin ruiskutus.....	33
2.4.5	Sideaineen ruiskutus.....	34
2.4.6	Laminointi.....	36
2.4.7	Materiaalin ja lämmön kohdistus.....	37
2.5	Materiaalit.....	38
2.5.1	Muovit.....	38
2.5.2	Metallit.....	40
2.5.3	Muut.....	41
2.6	Käyttökohteita.....	41
2.6.1	Autoteollisuus.....	42
2.6.2	Avaruusteollisuus.....	43
2.6.3	Ilmailuteollisuus.....	43
2.6.4	Lääketiede.....	45
2.6.5	Julkiset tilat.....	46
2.6.6	Taide.....	46
2.6.7	Koruteollisuus.....	47
2.6.8	Rakennusteollisuus.....	47
3	KUSTANNUKSET.....	49
3.1	Vertailu perinteisiin valmistusmentelmiin.....	50
3.2	Kustannuslaskenta.....	53
3.3	Case-esimerkkejä.....	55
3.3.1	Pienen metallikappaleen sarjavalmistus.....	55
3.3.2	Hydrauliventtiililohko.....	59
4	HAASTEITA.....	62
4.1.1	Terveysvaikutukset.....	63
4.1.2	Immateriaalioikeusloukkaukset.....	63
4.1.3	Termistö.....	64



5 YHTEENVETO .....	65
6 POHDINTA.....	66
LÄHTEET .....	68
LIITTEET	

## LYHENTEET JA TERMIT

3D-tulostin	Puhekielen synonyymi materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntävälle laitteelle.
3D-tulostus	Puhekielen synonyymi materiaalia lisäävälle valmistukselle.
ABS	Akryylinitriilibutadieenistyreeni. Yksi eniten käytetyistä materiaaleista materiaalia lisäävässä valmistuksessa.
Ajo	Alan termi yhdelle valmistuskerralle.
AM	Additive Manufacturing. Additive Manufacturing on englanninkielinen, standardoitu termi materiaalia lisäävälle valmistukselle.
Amazon	Yritys, jonka verkkokauppa on maailman suurimpia.
AM-tekniikka	Puhekielen synonyymi materiaalia lisäävälle valmistukselle.
ASTM International	Kansainvälinen organisaatio, joka määrittelee ja julkaisee teollisten asiantuntijoiden yhdessä sopimia tuotekehitysstandardeja.
FDM	Fused Deposition Modeling. Stratasys-yrityksen patentoima termi eräälle materiaalin pursotus -menetelmälle.
FFF	Voi tarkoittaa alan kirjallisuudessa kolmea eri vaihtoehtoa: Fused Filament Fabrication (materiaalia pursottava menetelmä, jossa käytetään materiaalina termoplastisia muoveja), Freeform Fabrication (materiaalia lisäävä valmistus) tai Form, Fit and Function (periaate, jonka mukaan kappale on muodoltaan, yhteensopivuudeltaan ja toiminnoiltaan määriteltyjen parametrien sisällä).
FIRPA	Suomen Pikavalmistusyhdistys (Finnish Rapid Prototyping Association FIRPA ry).
ISO	International Organization for Standardization. Kansainvälinen standardoimisjärjestö.
Jauhepeti	Jauheella täytetty kammio tai astia, joka toimii rakennusalueena materiaalia lisäävässä valmistuksessa.

Kertamuovi	Kertamuovissa on vahva ristikkomainen molekyylirakenne, joka hajoaa mikäli sitä yritetään lämmittämällä pehmittää ja työstää. Kertamuoveja ovat esimerkiksi akryyli, akrylaatti ja epoksi (hartsit).
Lopputuote	Tuote, jota voidaan käyttää sen lopullisessa käyttötarkoituksessa.
PLA	Polyaktidi. Yksi alalla eniten käytetyistä materiaaleista.
Shapeways	Yritys, jonka verkkopalvelun kautta käyttäjä voi valmistuttaa materiaalia lisäävällä valmistuksella suunnittelemansa kappaleen. Yritys toimittaa kuukausittain yli 120 000 tällaista tuotetta maailmanlaajuisesti.

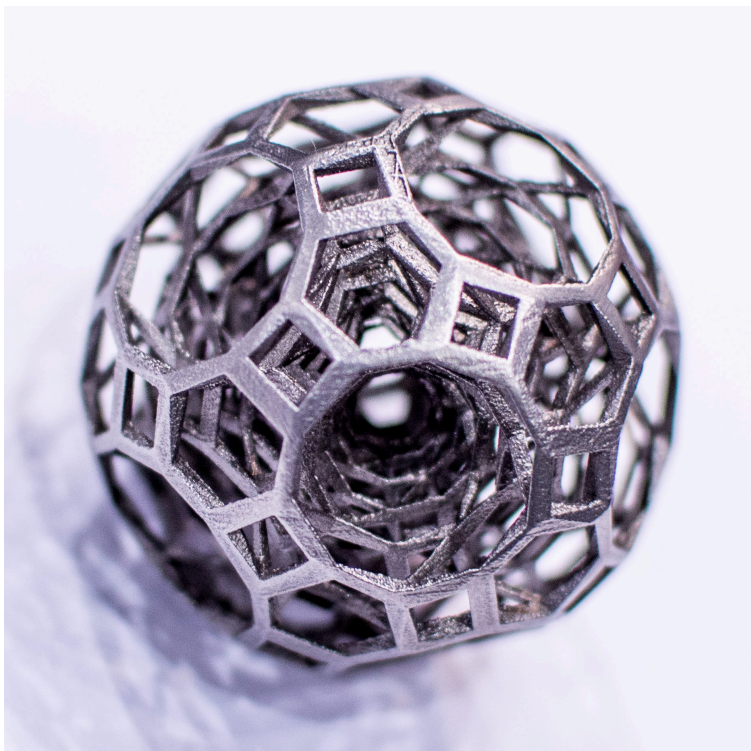
## 1 JOHDANTO

Materiaalia lisäävä valmistus on valmistusmenetelmä, jossa kappaleiden aikaansaamiseksi materiaaleja liitetään toisiinsa. Materiaalia lisätään – yleensä kerros kerrokselta (Kuva 1) – toisin kuin materiaalia poistavissa ja muovaavissa menetelmissä. (ISO/ASTM 52900:en 2015, 2)



Kuva 1. Muovikappale valmistumassa kerros kerrokselta.

Materiaalia lisäävällä valmistuksella on mahdollista tuottaa kappaleita, jotka ovat geometrisesti erittäin monimutkaisia, sisältävät liikkuvia osia, tarvitsevat vain vähän jälkikäsittelyä, eivätkä tuota lähes lainkaan hukkamateriaalia. Materiaalimahdollisuuksia on lukuisia, pitäen sisällään muun muassa muovit ja metallit. Materiaalia lisäävällä valmistuksella on myös mahdollista sarjavalmistaa kappaleita taloudellisesti kannattavasti, sekä valmistaa sellaisia kappaleita, joita ei pystyisi valmistamaan perinteisillä valmistusmenetelmillä (Kuva 2). (Atzeni ym. 2010; Thomas & Gilbert 2014, 1; Bikas, Stavropoulos & Chryssolouris 2015)



Kuva 2. Materiaalia lisäämällä valmistettu metallinen kappale, jonka halkaisija on noin 2 cm.

Alan markkinoiden koon on arvioitu olleen vuonna 2015 noin 5,2 miljardia dollaria. Viimeisten kahdenkymmenen seitsemän vuoden aikana alan on arvioitu kasvaneen vuosittain keskimäärin 26,1 %. 2010-luvulla ala on kasvanut vielä huomattavasti nopeammin etenkin edullisten (<5 000 USD) laitteiden osalta, joiden kappalemääräinen myynti noin kuusinkertaistui 2012–2015 välisenä aikana. Kasvua ovat edesauttaneet joukkorahoitussivustot, kuten Kickstarter ja IndieGoGo, jotka ovat helpottaneet uusien laitteiden ja teknologioiden tuloa markkinoille. Vuoden 2011 jälkeen sivustojen kautta on joukkorahoitettu useita kymmeniä laitteita, joista osa on vielä nykyäänkin saatavilla – myös Suomesta (Maker3D Oy:n www-sivut 2016). (Micallef 2015, 23; (Wohlers Associatesin www-sivut 2016)

Materiaalia lisäävän valmistuksen yleistymiseen on vaikuttanut olennaisten patenttien umpeutumisen lisäksi laitteiden hintojen laskeminen. Hinnat laskivat keskimäärin 51 % pelkästään vuosien 2001 ja 2011 välisenä aikana. Esimerkiksi vuonna 2002 julkaistu, silloin edullinen muovia pursottava laite maksoi noin 30 000 dollaria (Stratasyksen www-sivut 2016). Nykyisin voi ostaa valmiiksi kasatun, muovia pursotta-

van laitteen noin 150 dollarin hintaan (HobbyKingin www-sivut 2016). (Thomas & Gilbert 2014, 19; Chae ym. 2015)

Lähitulevaisuudessa saatamme nähdä suuria mullistuksia alalla, koska myös muutamat isot monikansalliset yritykset ovat nyt lähteneet mukaan alalle. Mukaan lähteneitä yrityksiä ovat muun muassa Apple, Microsoft, Canon, Hewlett-Packard ja Ricoh (Microsoftin www-sivut 2016; Applen www-sivut 2016). (Tuomi 2016a)

## 2 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS

### 2.1 Historia

Kappaleita on valmistettu materiaalia lisäämällä jo tuhansia vuosia, esimerkiksi savena, mutta nykyaikaisen materiaalia lisäävän valmistuksen ensimmäisinä hapanoina askelina voidaan pitää perinteisen mustesuihkutulostimen keksimistä 1950-luvulla (IBM:n www-sivut 2016). Varsinaiset askeleet otti kuitenkin Chuck Hull patentoituaan stereolitografia-menetelmän (SLA) vuonna 1984 (Micallef 2015, 397). Hull sai idean keksintöönsä kovetettuaan UV-valolla pöydän pinnoitteita (Ponsford & Glass 2014). Myöhemmin Hull perusti 3D Systems -yrityksen, joka on yksi maailman suurimmista ja vanhimmista alan yrityksistä (Lipson & Kurman 2013, 36).

Muutama vuosi myöhemmin, vuonna 1988, Scott Crump pursotti kuumaliimapistoolin avulla polyetyleenistä ja kynttilävahasta tyttarelleen sammakko-figuurin. Hän patentoi menetelmän (FDM) ja perusti Stratasys-yrityksen. Nykyisin näiden molempien menetelmien (FDM & SLA) olennaisimmat patentit ovat jo umpeutuneet, mutta Stratasys ja 3D Systems kuuluvat yhä alan suurimpien yritysten joukkoon (Chae ym. 2015). (Micallef 2015, 397)

Vuonna 1992 3D Systems toi markkinoille ensimmäisen kaupallisen laitteen (Micallef 2015, 397). Samana vuonna TkL Jukka Tuomi perusti Aalto-yliopistoon Suomen ensimmäinen 3D-mallinnuksen tutkimusryhmän. Tuomi oli juuri palannut vierailultaan Saksan Fraunhofer-instituutista, jossa heidän tutkimusryhmällään oli käytössä ensimmäisiä materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntäviä laitteita. Tuomi toimii nykyisin Aalto-yliopiston koneenrakennuksen laitoksella tutkimuspäällikkönä sekä Suomen Pikavalmistusyhdistyksen (FIRPA) puheenjohtajana. Mielestäni häntä voidaan pitää Suomen tämän hetken merkittävimpänä alan asiantuntijana. (Lassila & Tuomi 2016, 4–7)

Teknologian alkuvaiheissa materiaalia lisäävää valmistusta käytettiin vain mallien ja prototyyppien tekoon, mutta nykyisin menetelmä soveltuu joissain tilanteissa myös sarjatuotantoon (Lassila & Tuomi 2016, 4; Atzeni ym. 2010).

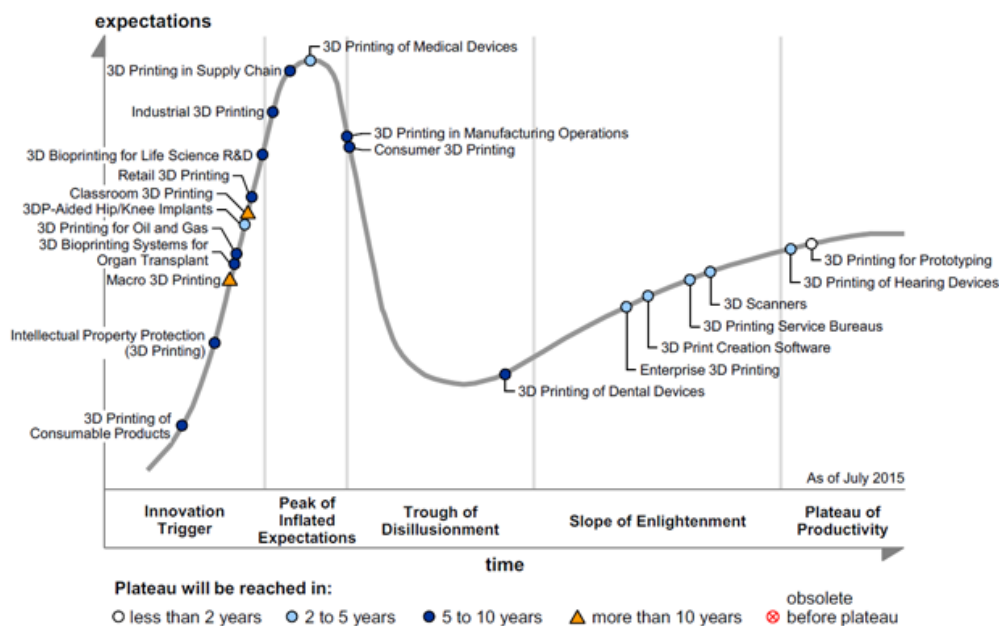
## 2.2 Markkinat

Materiaalia lisäävän valmistuksen markkinoiden todellista kokoa on mahdoton tietää, koska niin sanottuja näkymättömiä pientoimijoita on markkinoilla niin paljon. Lisähaastetta tuo myös Kiinan markkinat, joista on vaikea kerätä luotettavaa aineistoa. (Lipson & Kurman 2013, 34)

Yleisesti alalla viitataan vuosittaiseen Wohlers-raporttiin, joka käsittelee materiaalia lisäävän valmistuksen markkinoita. Sitä pidetään luotettavana lähteenä markkinoiden kokoa arvioitaessa. Vuoden 2016 Wohlers-raportti arvioi vuoden 2015 markkinoiden koon olleen noin 5,2 miljardia, joka tarkoittaa noin 26 % kasvua vuoteen 2014 verrattuna. Sitä edeltävinä kolmena vuotena kasvu oli keskimäärin 33,8 %. Uusin Wohlers-raportti kattoi 51 laitevalmistajaa, 98 palveluntarjoajaa, 15 materiaalivalmistajaa sekä useita pieniä laitevalmistajia. (Lipson & Kumar 2013, 34; Tuomi henkilökohtainen tiedonanto 15.4.2016; Wohlers Associatesin www-sivut 2016)

Sen jälkeen, kun ensimmäinen kaupallinen laite tuli markkinoille, on laitteita kokonaisuudessaan myyty jo yli 500 000 kappaletta maailmanlaajuisesti. Mikäli kasvu jatkuu odotetusti, menee miljoonan laitteen raja rikki vuoteen 2017 mennessä. Alan tulevaisuutta arvioitaessa voidaan käyttää apuna Gartnerin hypekäyrää (Kuva 3). Vuosittain julkaistu arvio on pitänyt hyvin paikkaansa, sekä alan asiantuntijat käyttävät sitä aktiivisesti. (Piili ym. 2014, 10; Tuomi henkilökohtainen tiedonanto 15.4.2016; Wohlers Associatesin www-sivut 2016)





Kuva 3. Vuoden 2015 Gartnerin hypekäyrä materiaalia lisäävälle valmistukselle. (Gartnerin www-sivut 2016)

Kuvasta 3 nähdään esimerkiksi, että odotukset kuluttajille suunnattujen laitteiden osalta ovat vielä suhteellisen korkealla ja ne arvioidaan erinomaisesti tuottaviksi 5–10 vuoden kuluttua. Teollisuuslaitteiden osalta arvio on 2–5 vuotta ja prototyyppien valmistuksen osalta tämä on jo tapahtunut. Materiaalia lisäävä valmistus sellaisenaan saavutti käyrän lakipisteen vasta vuonna 2012 (Piili ym. 2014, 10).

Materiaalia lisäävä valmistus voi olla suuri mahdollisuus Suomelle tulevaisuudessa. Suomessa on jo nyt alan huippuyrityksiä ja tutkimusryhmiä, sekä lisäksi yleisesti vahva teollinen perinne ja korkealuokkaista ICT-osaamista (Lehti, Rouvinen & Ylä-Anttila 2012, 36; Tuomi 2016a). Tämän mahdollisuuden hyödyntäminen ei kuitenkaan onnistu, mikäli korkeakoulut eivät kouluta alan asiantuntijoita. Tällä hetkellä Aalto-yliopisto ja muutamat kaupalliset kurssit tarjoavat alan systemaattista koulutusta, sekä muutamat keskiasteen oppilaitokset, ammattikorkeakoulut ja yliopistot sivuavat materiaalia lisäävää valmistusta kursseillaan. Metallien osalta alan tutkimus Suomessa on keskittynyt Lappeenrannan teknilliseen yliopistoon. Asiantuntijoiden lisäksi tulisi myös kouluttaa jo olemassa olevaa teollisuutta, jotta suomalainen teollisuus pysyisi kansainvälisessä kilpailussa mukana. Tätä onneksi toteutetaan jo erilaisien käynnissä olevien projektien osalta (Tuomi sähköposti 9.4.2016). (Piili ym. 2014, 10; Piili & Salminen 2016a, 22; Piili & Salminen 2016b, 9–10)

### 2.3 Laitteet

FIRPA ylläpitää verkkosivuillaan yli 500 laitteen matriisia, johon kerätään aktiivisesti tietoa alan laitteista (Tuomi henkilökohtainen tiedonanto 15.4.2016). Kerättyä tietoa tarkasteltaessa voidaan todeta laitteiden koko- ja hintahaitari suureksi: pienimpien laitteiden pisimmät sivut ovat kymmenien senttimetrien luokkaa, kun taas suurimpien laitteiden kohdalla puhutaan metreistä. Hintahaitari alkaa sadoista euroista nous- ten jopa kahteen miljoonaan. Rakennusalueiden koot vaihtelevat desilitroista jopa kuutiometreihin. (FIRPA:n www-sivut 2016)

Opinnäytetyön tässä osiossa esitetyt tiedot laitteista on tulkittu mainitun matriisin sekä Liitteen 1 tietojen perusteella. Liite 1 on FIRPA:n verkkosivuilta löytyvä dokumentti, jossa on yleispäteviä ohjeita materiaalia lisäävästä valmistuksesta. FIRPA on lisännyt matriisiin aktiivisesti tietoa, mutta siellä ei kuitenkaan ole mainintaa milloin yksittäistä tietoa on lisätty tai päivitetty, mikä tulee ottaa huomioon matriisia tulki- tessa. Asiasta huomautettuani Tuomi kertoi (henkilökohtainen tiedonanto 15.4.2016), että asiaan saattaa tulla muutos jatkossa.

Pääosin kuluttajille suunnattujen, edullisen hintaluokan laitteiden fyysinen koko on tyypillisesti noin suuren mikroaaltouunin luokkaa. Teollisuudessa käytettävien lait- teiden koko vaihtelee noin jääkaappi-pakastimen kokoisista aina valuteollisuuden käyttämiin huoneen tai kahden kokoisiin valtaviin laitekokonaisuuksiin. (Tuomi 2016a; FIRPA:n www-sivut)

Alan kehitystä on hidastanut valmistettävien kappaleiden suurin mahdollinen koko, joka on vielä suhteellisen pieni. Aikaisemmin oletettiin, että ainakin kehittyneimmät laitteet kykenisivät nykyään jo valmistamaan suurempia kappaleita. Lisäksi valmiste- tut kappaleet tarvitsevat lähes aina jälkikäsittelyä, minkä vuoksi laitteet harvoin so- veltuvat suoraan lopputuotteiden valmistamiseen. Tämän odotetaan kuitenkin muut- tuvan seuraavien parin vuoden aikana (Tuomi sähköposti 9.4.2016). (Tuomi 2016c)

Matriisia tarkasteltaessa voidaan todeta, että niin kuluttajien, kuin teollisuudenkin käyttämien laitteiden rakennusalueen koko vaihtelee tyypillisesti muutamasta desilit- rasta muutamaan kymmeneen litraan. Alalla on toki laitteita, joilla on mahdollista

valmistaa kuutiometrienkin kokoisia kappaleita, mutta siihen kykenevät laitteet ovat huomattavan kalliita. Kappaleiden käytännön koosta suuntaa antaa esimerkiksi Shapeways-verkkopalvelu, josta on tällä hetkellä mahdollista tilata suurimmillaan vain noin 700 mm korkeita, 400 mm leveitä ja 400 mm syviä muovisia tai metallisia kappaleita (Shapewaysin www-sivut 2016). (FIRPA:n www-sivut 2016)

Laitteiden tarkkuuksissa on eroja. Tarkkuuksia voidaan vertailla tarkastelemalla kuinka ohuen yksittäisen kerroksen, seinämän tai pienen yksityiskohtan laite kykenee valmistamaan. Karkeasti voidaan todeta, että kaikilla eri valmistusmenetelmillä kyetään yksityiskohtien osalta vähintään millimetrin kymmenesosien tarkkuuteen, sekä noin millimetrin seinämävahvuuksiin (Liite 1). Tarkimmilla yksittäisillä metallikappaleita valmistavilla laitteilla saadaan vielä erotettua kasvonpiirteet noin 2 senttimetrin kokoisesta figuurista (Kuva 4). Kokonaistarkkuuden kannalta tärkein ominaisuus on kuitenkin yksittäisen kerroksen paksuus: mitä ohuempi kerros on, sitä lähempänä valmis kappale on alkuperäistä malliaan. Ohuempi kerrospaksuus tarkoittaa myös pidempää ajoaikaa, mikä taas lisää kappaleen kokonaiskustannuksia. (Gibson, Rosen & Stucker 2010, 2)



Kuva 4. Materiaalia lisäämällä valmistettu metallinen figuuri, jonka korkeus on noin 2 cm.

Eri laitteet kykenevät valmistamaan kappaleita eri nopeuksilla. Tätä nopeutta mitataan usein aikaansaatusa tilavuutena aikayksikköä kohden. Poikkeuksena ovat muovia pursottavat laitteet, joiden valmistusnopeus ilmoitetaan lähes aina niin sanottuna pursotusnopeutena; millimetreinä sekunnissa. Tällaiset laitteet kykenevät tyypillisesti pursottamaan materiaalia kymmenien tai satojen millimetrien sekuntivauhtia. (Orban 2015)



Valmistusnopeus vaikuttaa usein suoraan kappaleen laatuun, tarkkuuteen ja valmistuskustannuksiin. Metallikappaleita pystytään valmistamaan tuhansienkin kuutiosenttimetrien tuntivauhdilla, mutta tällöin valmistettu kappale ei ole kovin tarkka. Tarkkoja kappaleita valmistettaessa nopeus on vielä suhteellisen alhainen – maksimissaan kymmeniä kuutiosenttimetrejä tunnissa. Sama pääperiaate nopeuden ja laadun osalta pätee myös yleisesti muihin materiaaleihin. (Thomas & Gilbert 2014, 1; Purtonen 2014)

Laitteilla pystytään valmistamaan myös värillisiä kappaleita (Kuva 5). Edullisemman hintaluokan laitteet kykenevät valmistamaan tyypillisesti vain yksi- tai kaksivärisiä kappaleita, koska ne ovat usein 1–2 suuttimella varustettuja materiaalin pursotus -menetelmää hyödyntäviä laitteita. (Grunewald 2015, Taulukko 1)



Kuva 5. Sandaalin muotoinen monivärinen kappale.

Taulukko 1. Amazon-verkkokaupan 20 myydyintä laitetta 11.5.2016 kategoriassa ”3D Printers”.

Nimi	Suuttimet (kpl)	Hinta (USD)	Menetelmä
MakerGear M2	1	1850	Materiaalin pursotus
Da Vinci 1.1 Plus	1	550	Materiaalin pursotus
HICTOP	1	450	Materiaalin pursotus
The Micro 3D	1	450	Materiaalin pursotus
ROBO 3D	1	800	Materiaalin pursotus
MOD-t	1	400	Materiaalin pursotus
LulzBot Mini	1	1250	Materiaalin pursotus
Printrbot Play 1505	1	400	Materiaalin pursotus
Da Vinci 1.0 Pro	1	650	Materiaalin pursotus
Da Vinci 1.9 Aio	1	550	Materiaalin pursotus
Lulzbot TAZ 5	1	2200	Materiaalin pursotus
Alunar Prusa i3	1	350	Materiaalin pursotus
Da Vinci 1.0	1	400	Materiaalin pursotus
Qiditech 1	2	700	Materiaalin pursotus
FlashForge Finder	1	500	Materiaalin pursotus
Da Vinci Jr.	1	300	Materiaalin pursotus
Monoprice 113860	1	350	Materiaalin pursotus
HICTOP Prusa i3	1	300	Materiaalin pursotus
FlashForge Creator Pro	2	1200	Materiaalin pursotus
Ultimaker 2 Extended	1	2350	Materiaalin pursotus

Teollisuuslaitteiden hinnat ovat laskeneet huomattavasti 2000-luvulla, mutta ne ovat silti edelleen suhteellisen korkealla – etenkin metalleja hyödyntävien laitteiden osalta. Esimerkiksi Suomessakin käytössä oleva, suurimmillaan vain 90 x 90 x 80 millimetrin kokoisia metallisia kappaleita valmistavan laitteen hankintahinta on noin 160 000 euroa. Investoinnin kokonaiskustannukset koostuvat laitteen lisäksi myös tarvittavista oheislaitteista ja ohjelmistoista, joten pelkän laitteen hinta antaa vain suuntaa koko hankintakustannuksista. Laitteita voidaan hankkia myös leasing-sopimuksilla. Suomessa on tällä hetkellä metallia hyödyntäviä laitteita noin 15 kappaletta, mutta

määrän uskotaan nousevan vuoden 2016 syksyyn mennessä kahteenkymmeneen (Tuomi sähköposti 9.4.2016). Vertailun vuoksi kerrottakoon, että eräs Euroopan suurimmista metallia hyödyntävien laitteiden valmistajista myi noin 100 laitetta vuonna 2015 (SLM Solutionsin www-sivut 2016). (Heikkinen 2016)

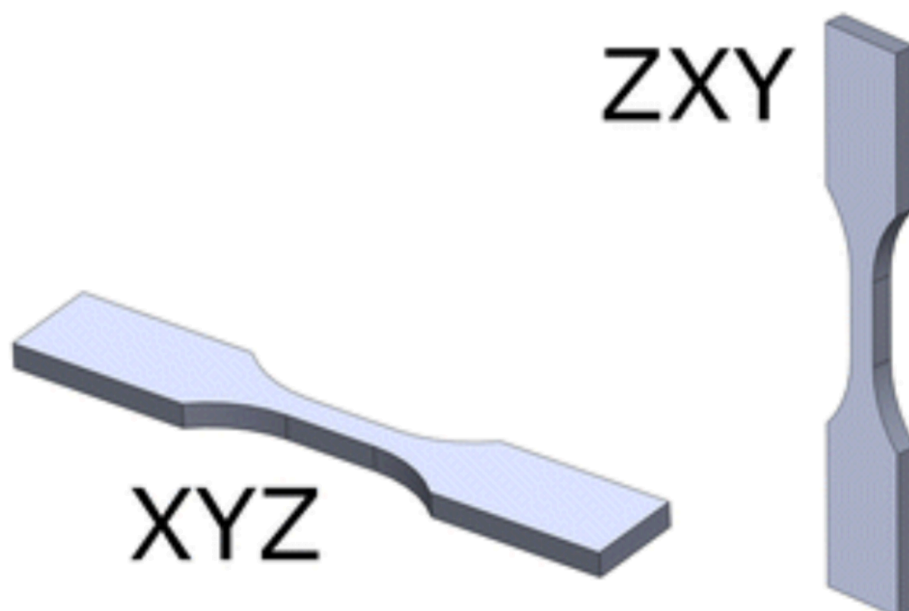
Muovia hyödyntävien laitteiden tarkkaa lukumäärää Suomessa tuskin tiedetään, mutta pidän todennäköisenä, että yksityishenkilöiden laitteet huomioituna kokonaismäärä nousee tuhansiin. Pelkästään toinen Suomen kahdesta laitevalmistajasta kertoo verkkosivuillaan toimittaneensa oppilaitoksiin ja yrityksiin yli 700 omaa laitettaan (FIRPA:n www-sivut 2016; Minifactoryn www-sivut 2016). Näiden lisäksi Suomessa on arvioitu olleen 100–200 laitetta tuotantokäytössä (Lassila & Tuomi 2016, 6).

FIRPA ylläpitää sivuillaan myös listaa Suomessa olevista laitteista, mutta epäilen FIRPA:n lopettaneen tämän aineiston aktiivisen ylläpitämisen silloin, kun laitteet alkoivat yleistymään Suomessa. Aineiston mukaan Suomessa olisi esimerkiksi vain muutamia kymmeniä laitteita, joista yksi hyödyntäisi PolyJet-tekniikkaa, kun suomalaisen myyntiedustajan mukaan niitä on noin 50 (Vestala sähköposti 28.4.2016). Alan suomalaisia julkaisuja (mm. Piili ym. 2014) lukiessa voi huomata, että Suomessa on viitattu jo vuosia FIRPA:n aineistoon ja kerrottu Suomessa olevan vain muutamia kymmeniä laitteita. (FIRPA:n www-sivut 2016)

## 2.4 Valmistusmenetelmät

Nykyisin erilaiset valmistusmenetelmät jaetaan kansainvälisessä termistössä seitsemään alaluokkaan (ISO/ASTM 52900:en 2015, 2). Jokaisen alaluokan sisällä on useita erilaisia, lähinnä yritysten patentoimia menetelmiä. Yritykset käyttävät näitä omia termejään tuotekuvauksissa ja julkaisuissa. Tämä aiheuttaa helposti sekaannusta varsinkin laitteiden vertailun osalta, koska on hankala sanoa, mitkä laitteet ovat keskenään vertailukelpoisia. Asiaa ei myöskään helpota se, että alan niin sanotussa tuoreessakin kirjallisuudessa (Lipson & Kurman 2013, 71–77; Hausman & Horne 2014, 25–37) eri valmistusmenetelmät kategorioidaan usein näiden termien avulla. Tämä johtunee siitä, että alan termejä on alettu standardoimaan vasta viime vuosina (ASTM F2792-12a). (FIRPA:n www-sivut)

Lähes kaikissa valmistusmenetelmissä kappale luodaan digitaalisen mallin perusteella, poikkeuksena ovat esimerkiksi kuumaliimapistoolin tapaiset niin sanotut tulostuskynät (3D Simon www-sivut 2016). Kappale valmistuu lähes aina kerros kerrokselta, minkä vuoksi kappaleen valmistussuunnalla on merkitystä (Kuva 6 & Taulukko 2). Mekaanisten ominaisuuksien lisäksi valmistussuunta vaikuttaa oleellisesti myös kustannuksiin, koska useilla menetelmillä uuden kerroksen valmistamiseen liittyvä materiaalin kaavaaminen vie suurimman osan rakennusajasta. Valmistusaika taas on oleellisimpia kustannustekijä. (Perez, Roberson & Wicker 2014; Piili ym. 2014, 16)



Kuva 6. Vetosauvan mekaaniset ominaisuudet ovat paremmat, kun se on valmistettu XYZ-suuntaisesti. (Perez, Roberson & Wicker 2014)



Taulukko 2. EOS-yrityksen 316L-materiaalin (RST) mekaaniset ominaisuudet huoneenlämmössä. Kappaleen valmistussuunta vaikuttaa mekaanisiin ominaisuuksiin. (EOS:n www-sivut 2016)

	Testikappale
Vetolujuus	
Horisontaalinen (XY)	640 ± 60 MPa
Vertikaalinen (Z)	540 ± 55 MPa
Myötölujuus (venymisraja max. 0,2 %)	
Horisontaalinen (XY)	530 ± 60 MPa
Vertikaalinen (Z)	470 ± 90 MPa
Kimmokerroin	
Horisontaalinen	185 GPa (tyypillisesti)
Vertikaalinen	180 GPa (tyypillisesti)
Murtovenymä	
Horisontaalinen	40 ± 15 %
Vertikaalinen	50 ± 20 %

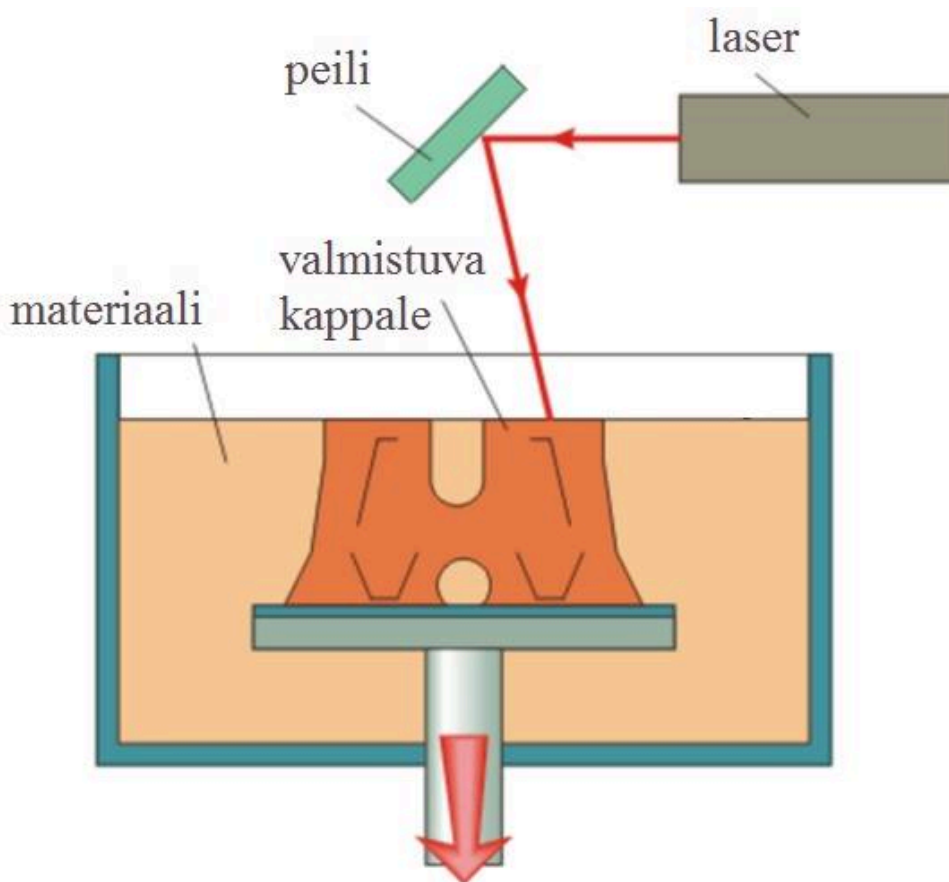
Jotta laite osaisi valmistaa kappaleen digitaalisen mallin perusteella, se pitää muuntaa, usein erillisellä viipalointiohjelmalla, laitteelle sopivaan tiedostomuotoon. Alan julkaisuissa puhutaan yleisesti vain STL-tiedostomuodosta, mutta se ei missään nimessä ole ainoa. STL on todella rajoittunut tiedostomuoto, joka kehitettiin jo 1980-luvulla – sen ajan tietokoneiden ja laitteiden rajoitukset huomioiden. Sen avulla ei esimerkiksi voi valmistaa värillisiä kappaleita. STL-lyhenteen alkuperä on englanninkielinen sana ”stereolithography”, mutta nykyisin sen kerrotaan olevan lyhenne sanoista Standard Tessellation Language. Muita käytössä olevia tiedostomuotoja ovat muun muassa AMF, PLY sekä OBJ. (Gibson, Rosen & Stucker 2010, 352; Lipson & Kurman 2013, 100; Hausman & Horne 2014, 97)

#### 2.4.1 Allasvalopolymerisaatio

Allasvalopolymerisaatio-menetelmässä (Vat Photopolymerization) polymeerialtaan rakennuspinnalle kohdistettu valo valokovettaa pyyhkäisemänsä kohdan (ISO/ASTM

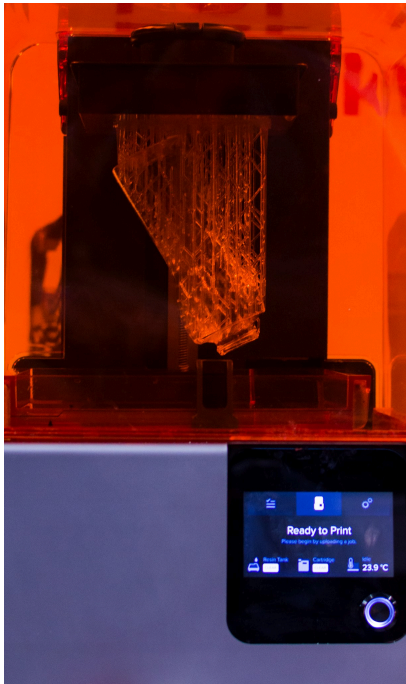
52900:en 2015, 2). Kaupallisia nimiä menetelmälle ovat mm. SLA (Stereolithography) ja DLP (Digital Light Processing) (Liite 1).

Kuvassa 7 on esitelty yksinkertaistetusti allasvalopolymerisaation perusperiaate. Altaassa on nestemäistä hartsia, johon lasersäde kohdistetaan peilin avulla kerros kerrokselta. Kappale rakentuu pedille, joka liikuttaa kappaletta ajon aikana. (FIRPA:n www-sivut 2016)



Kuva 7. Yksinkertaistettu esimerkki allasvalopolymerisaatio-menetelmästä.

Allasvalopolymerisaatiota hyödyntävät tyypillisesti teollisuuden käytössä olevat laitteet, mutta laitteita löytyy myös edullisemmasta hintaluokasta. Kuvassa 8 on Formlabs-yrityksen Form 2 -laite, joka kykenee valmistamaan suurimmillaan 145 x 145 x 170 millimetrin kokoisen kappaleen. Laitteen materiaalikustannukset ovat noin 135–275 euroa litraa kohden, mutta materiaaleilla voi valmistaa jopa hammaslääketieteen sovellutuksia. Itse laitteen hankintahinta on noin 3300 euroa. Kuvassa 9 näkyy laitteella valmistettu jälkikäsittelemätön kappale. (Formlabsin www-sivut 2016)



Kuva 8. Allasvalopolymerisaatiota hyödyntävä Formlabs-yrityksen Form 2 -laite.

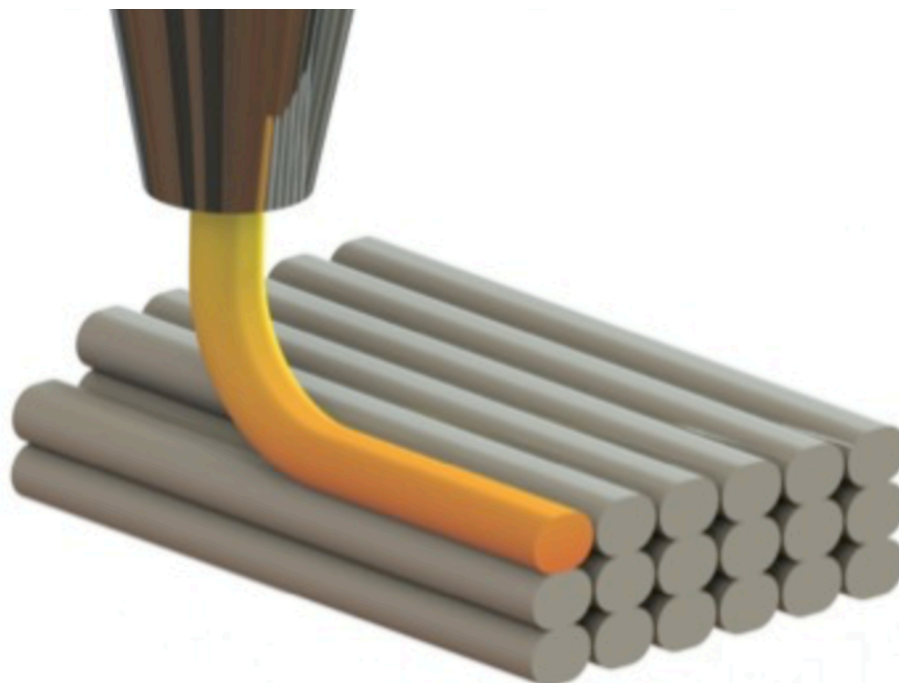


Kuva 9. Form 2 -laitteella muovista valmistettu jälkikäsittelemätön figuuri, jonka korkeus on noin 10 cm.

Allasvalopolymerisaatio-menetelmässä esimerkiksi älypuhelimien näyttö voi toimia valonlähteenä. Tällaista kaupallista sovellutusta ei ole vielä saatavilla, mutta tekniikkaa hyödyntävä Kickstarter-projekti on jo julkaistu. Kyseinen projekti on kuitenkin herättänyt joitain epäilyksiä harrastajien keskuudessa sen käytännön toimivuuden kannalta (Deveson 2016). Epäilyksistä huolimatta projekti sai kerättyä joukkorahoituksen avulla yli 2 miljoonaa dollaria. (OLO 3D:n www-sivut 2016; Kickstarterin www-sivut 2016)

#### 2.4.2 Materiaalin pursotus

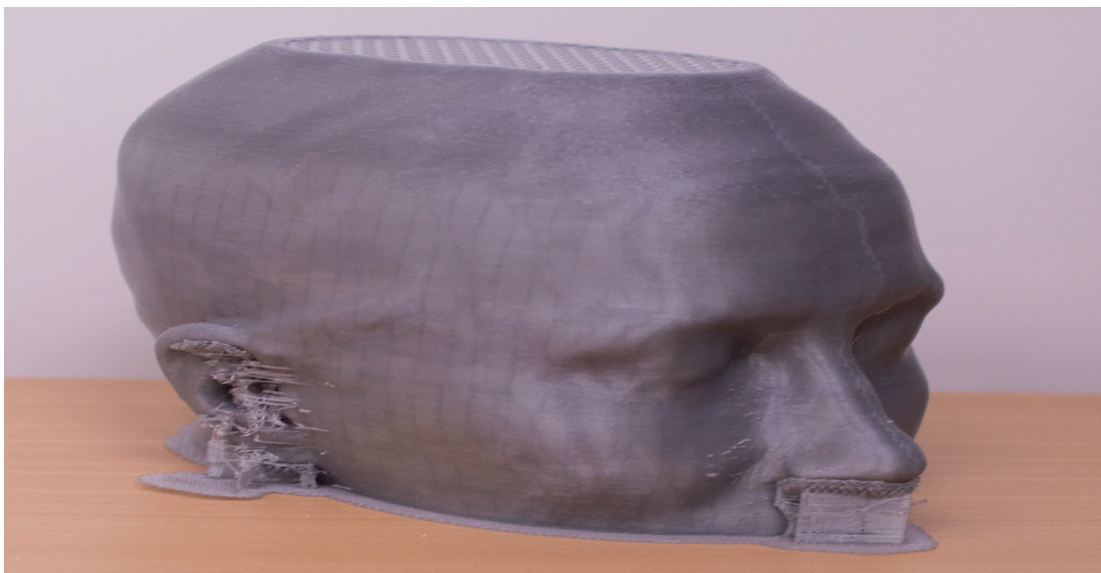
Materiaalin pursotus -menetelmässä (Material Extrusion) materiaalia syötetään suuttimen tai aukon läpi, esimerkiksi pursottaen muovia (ISO/ASTM 52900:en 2015, 2). Kaupallisista nimistä tunnetuin on FDM, joka on myös jossain määrin vakiintunut puhekielen termiksi puhuttaessa pienikokoisista, kuluttajille suunnatuista laitteista. Englanninkielisessä kirjallisuudessa voi törmätä myös lyhenteeseen FFF (Fused Filament Fabrication). (Hausman & Horne 2014, 33; FIRPA:n www-sivut 2016)



Kuva 10. Yksinkertaistettu esimerkki materiaalin pursotus -menetelmästä.

Materiaalin pursotus on yleisin menetelmä edullisemman hintaluokan laitteissa (Grunewald 2015). Menetelmässä voidaan käyttää lähes kaikkia raaka-aineita, jotka ovat pursotettavissa suuttimen läpi. PLA- ja ABS-muoveja käytetään eniten, mutta esimerkiksi juustoa, taikinaa, suklaata ja myös betonia on onnistuttu hyödyntämään. Betonia hyödyntävällä CC-menetelmällä (Contour Crafting) voidaan valmistaa kokonaisia rakennuksia (Contour Craftingin www-sivut 2016). (Lipson & Kurman 2013, 70)

Materiaalin pursotus -menetelmässä laite joutuu usein valmistamaan myös tukirakenteita kappaleelle (Kuva 11). Tukimateriaaleina voidaan käyttää samaa materiaalia kuin itse kappaleessa, tai esimerkiksi erityistä vesiliukoista materiaalia. (MiniFactoryn www-sivut 2016)



Kuva 11. Laite joutuu usein valmistamaan tukirakenteita kappaleen ulkonevien muotojen alle.

Edullisen hintaluokan laitteet ovat erittäin alttiita ympäristön vaikutuksille heppoisien rakenteiden vuoksi – mikä selittää myös laitteiden alhaista hintaa. Lämpötilojen vaihtelut valmistuksen aikana vaikuttavat laatuun negatiivisesti, koska ne vaikuttavat materiaalin jähmettymiseen. Lämpötilojen vaihtelun lisäksi myös kosteus vaikuttaa negatiivisesti kappaleiden laatuun, minkä vuoksi materiaaleja tulisi säilyttää ilmatiiviissä pussissa tai rasiassa. Edullisen hintaluokan laitteilla valmistettujen kappaleiden laatu voi olla ylipäättäänkin hyvin karkea (Kuva 12), mutta sitä voidaan parantaa jäl-



kikäsittelyn avulla (Wittbrodt ym. 2015). Vaikka laatu voi olla karkeaa, osa tällaisista laitteista kykenee kuitenkin valmistamaan suurimman osan omista osistaan (Hausman & Horne 2014, 169). (Evans 2012, 20–22)



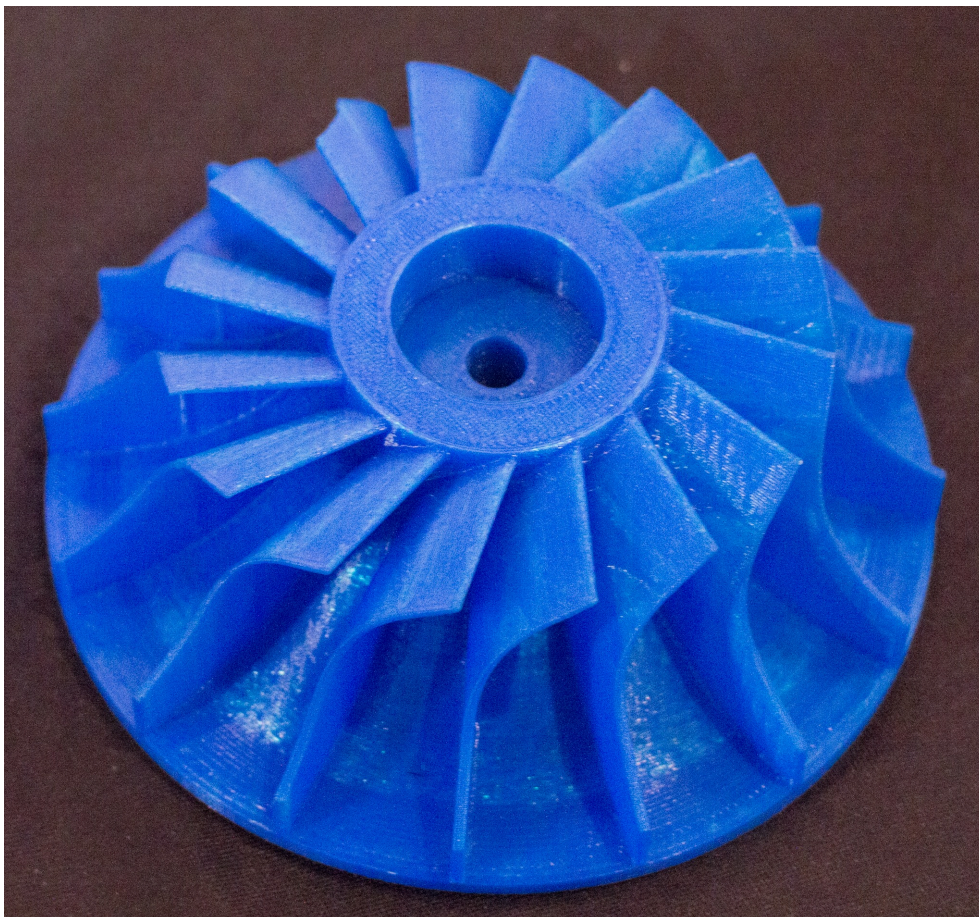
Kuva 12. Edullisen hintaluokan laitteella valmistettu sähkökitaran runko.

Kuvassa 13 näkyvä laite on tyypillinen edullisen hintaluokan muovia pursottava laite. Laite maksaa noin 1200 euroa, ja sen rakennusalueen koko on 120 x 120 x 115 mm. Tällainen laite kykenee ohuimmillaan noin 0,02 millimetrin kerrospaksuuteen sekä 30–300 mm/s valmistusnopeuteen. Laitteen suutin lämmittää ja pursottaa ulkopuolelta syötettyä materiaalia samalla, kun rakennusalue ja suutin liikkuvat x-, y- ja z-ulottuvuuksien suuntaisesti. Laite kykenee valmistamaan esimerkiksi Kuvassa 14 näkyvän kappaleen. (Ultimakerin www-sivut 2016)



Kuva 13. Kuluttajakäyttöön soveltuva muovia pursottava Ultimaker 2 Go -laite.

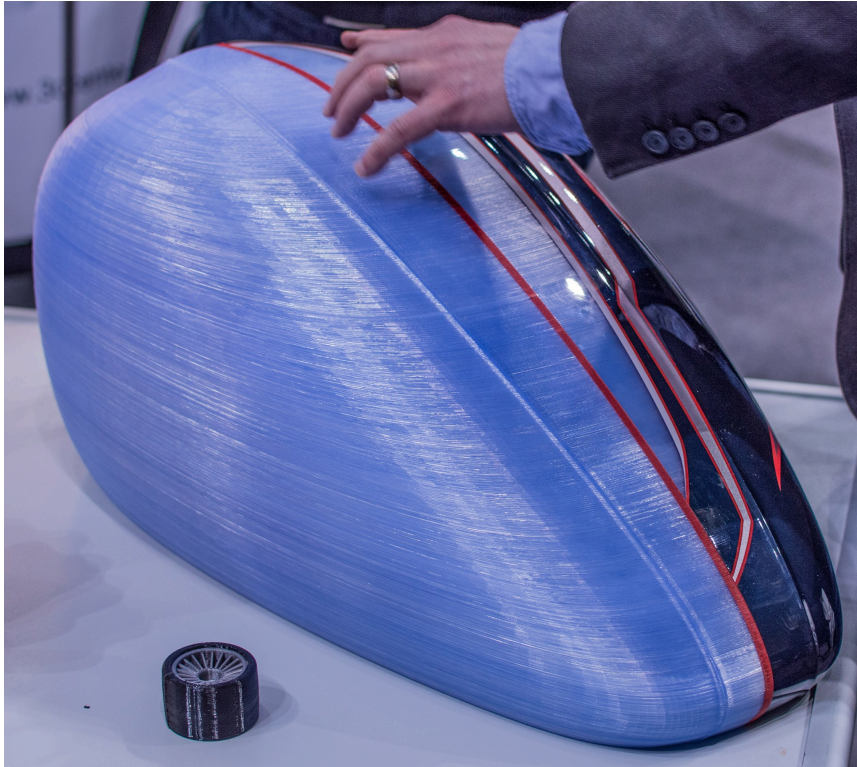




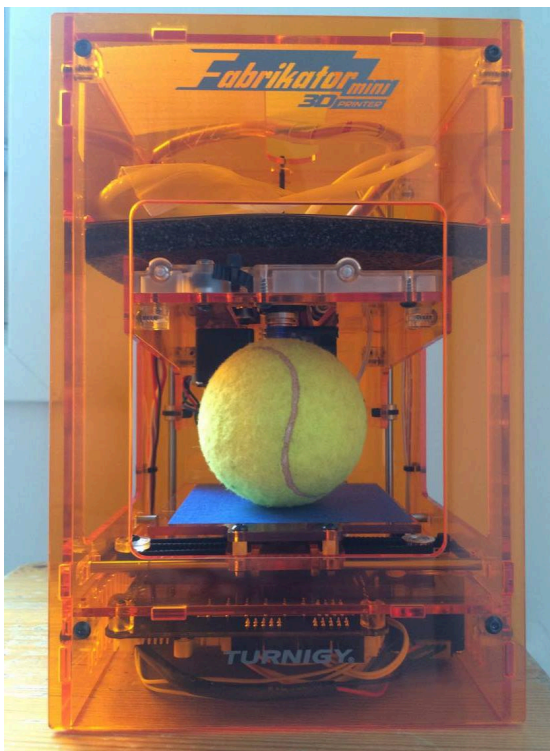
Kuva 14. Edullisella muovia pursottavalla laitteella valmistettu jälkikäsittelemätön kappale.

Rakennusalueen kasvaessa myös laitteen hinta kasvaa (FIRPA:n [www-sivut 2016](#)). Kuvassa 15 näkyvä kappale on valmistettu laitteella, jonka hinta oli Nordic 3D Expo -messuilla vuonna 2016 noin 30 000 euroa. Laitteen rakennusalueen koko on 1000 x 1000 x 500 millimetriä (3D Platformin [www-sivut 2016](#)). Kuvassa 16 näkyy eräs markkinoiden pienimmistä laitteista, jonka hinta on noin 150 dollaria. Sillä voi valmistaa suurimmillaan 80 x 80 x 80 millimetrin kokoisia kappaleita. (HobbyKingin [www-sivut 2016](#))





Kuva 15. Muovia pursottamalla valmistettu suurikokoinen kappale.



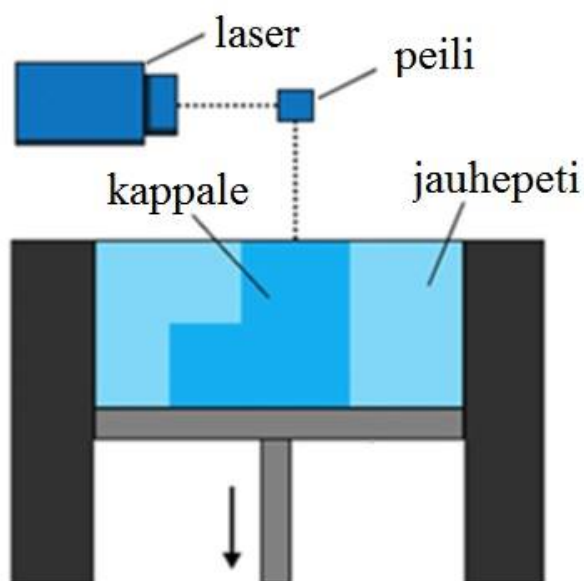
Kuva 16. Eräs markkinoiden pienimmistä laitteista. Sen rakennuspedille asetettu tennispallo havainnollistaa laitteen kokoa.

### 2.4.3 Jauhetiteknikka

Jauhetiteknikka (Powder Bed Fusion) on menetelmä, jossa lämpöenergiaa kohdistetaan halutuille alueille jauhedellä (ISO/ASTM 52900:en 2015, 2).

Esimerkiksi kerroksittain jauhedelle lisättyä jauhetta sulatetaan kohdistetusti lämmön avulla, ja aina kerrosten välissä pinta tasoitetaan. Sulamaton jauhe voi tukea kappaleita valmistuksen ajan, jolloin ei tarvita tukirakenteita. Kaupallisia termejä menetelmälle ovat muun muassa SLS (Selective Laser Sintering), DMLS (Direct Metal Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting), SHS (Selective Heat Sintering) ja EBM (Electron Beam Melting) (Liite 1; AMR Euroopan www-sivut 2016). (FIRPA:n www-sivut 2016)

Yksinkertaistettu esimerkki jauhetiteknikka-menetelmästä näkyy kuvassa (Kuva 17). Perusperiaate on hyvin samankaltainen, kuin allasvalopolymerisaatiomenetelmässä (Lipson & Kurman 2013, 75). Materiaalina käytetään jauhetta, jota muovataan lasersäteellä kohdistetusti peilin avulla. Tämä menetelmä on yksi yleisimmistä metallikappaleiden valmistuksessa, mutta menetelmällä voidaan myös valmistaa muovikappaleita. (Lassila & Tuomi 2016, 5; FIRPA:n www-sivut 2016)



Kuva 17. Yksinkertaistettu esimerkki jauhetiteknikka-menetelmästä.

Jauheita käyttämällä nesteen sijaan saavutetaan erilaisia hyötyjä. Jauheeseen valmistettu kappale vaatii usein vähemmän tukirakenteita, koska kappaletta ympäröivä käyttämätön jauhe voi tukea kappaletta valmistuksen aikana. Joissain tapauksissa käyttämätön jauhe voidaan käyttää uudestaan lähes kokonaan. Materiaalimahdollisuudet ovat myös laajemmat, koska useammat raaka-aineet voidaan muuntaa jauhemaiseen muotoon. Metallikappaleiden osalta menetelmä sopii esimerkiksi avaruusteollisuuden ja lääketieteen vaativiin sovellutuksiin (Liite 1). (Lipson & Kurman 2013, 75)

Muovikappaleiden (Kuva 19) valmistaminen tällä menetelmällä onnistuu esimerkiksi Blueprint M2 -laitteella (Kuva 18). Laitteen keskiosassa on rakennusalusta, jonka päälle kaavin kuljettaa ohuen kerroksen materiaalia. Tämä materiaali sulatetaan kiinteäksi halutuista kohdista, jonka jälkeen rakennusalusta laskeutuu alaspäin. Prosessia toistetaan kunnes kappale on valmis. Laitteesta on nykyisin saatavilla edistyneempi M3-malli, jonka hinta on noin 20 000 euroa. Laite kykenee parhaimmillaan 0,1 millimetrin kerrospaksuuteen. Suhteellisen korkeasta hinnasta huolimatta laite kykenee valmistamaan vain suurimmillaan 160 x 200 x 150 millimetrin kokoisia kappaleita. Laitteen suojattu rakenne kuitenkin tarjoaa erittäin stabiilit olosuhteet valmistuksen ajaksi, mikä mahdollistaa kappaleiden tasalaatuisuuden. (AMR European www-sivut 2016)



Kuva 18. Konepaja-messuilla esillä ollut Blueprinter M2 -laite.

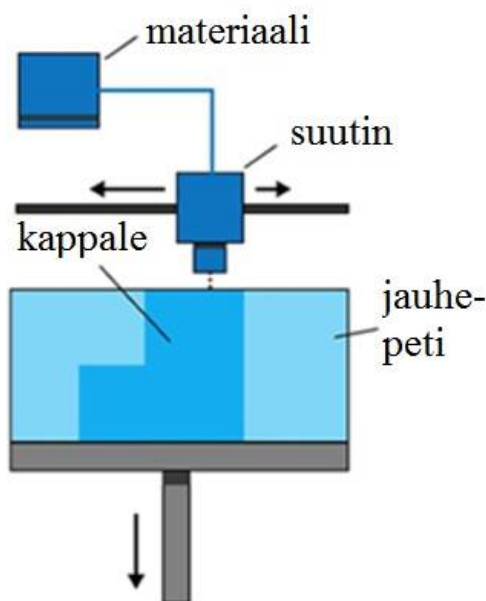


Kuva 19. Jauhetekniikka-menetelmällä valmistettuja muovisia kappaleita.



#### 2.4.4 Materiaalin ruiskutus

Materiaalin ruiskutus -menetelmässä (Material Jetting) materiaalipisaroita kerrosteetaan valikoidusti. Pisaroiden ruiskuttamiseen voidaan käyttää yhtä tai useampaa tuostuspäätä, jotka liikkuvat rakennusalustan yläpuolella. Kaupallisia termejä ovat muun muassa Polyjet, MJM (Multijet Modeling) ja MJP (MultiJet Printing) (Liite 1; 3D Systemsin www-sivut 2016). (ISO/ASTM 52900:en 2015, 2)



Kuva 20. Yksinkertaistettu esimerkki materiaalin ruiskutus -menetelmästä.

Materiaalina käytetään yleisimmin vahaa tai polymeeria, joka voidaan kovettaa valon avulla (FIRPA:n www-sivut 2016). Menetelmän avulla on mahdollista valmistaa monivärisiä kappaleita, jotka soveltuvat laadultaan jopa lopputuotteiksi (Liite 1). Esimerkiksi Stratasyksen PolyJet-tekniikkaa hyödyntävällä, vuonna 2016 markkinoille tulleella laitteella pystytään yhdessä ajossa käyttämään kuutta eri materiaalia, sekä ainakin teoreettisesti 360 000 eri värisävyä (Stratasyksen www-sivut 2016). Laitteen hinta on 275 000 euroa (Vestala sähköposti 28.2.2016).

Kaikki materiaalin ruiskutus -menetelmää hyödyntävät laitteet eivät kuitenkaan ole satojen tuhansien eurojen hintaisia. Kuvassa 21 näkyvä, yli 300 kilogrammaa painava laite maksaa FIRPA:n matriisin mukaan noin 70 000 euroa. Se pystyy valmistamaan erittäin tarkkoja muovikappaleita, mutta suurin mahdollinen kappalekoko on

vain 298 x 185 x 203 millimetriä. (3D Systemsin [www-sivut 2016](#); FIRPA:n [www-sivut 2016](#))



Kuva 21. Nordic 3D Expo -messuilla vuonna 2016 esillä ollut 3D Systems-yrityksen ProJet 3500 HD Max -laite, joka valmistaa kappaleita materiaalin ruiskutus -menetelmällä (Stratasyksen [www-sivut 2016](#)).

#### 2.4.5 Sideaineen ruiskutus

Menetelmässä ruiskutetaan jauhemaiseen perusmateriaaliin sen kanssa reagoivaa nestemäistä sideainetta (ISO/ASTM 52900:en 2015, 2). Yksinkertaistetusti sideaineen ruiskutus -menetelmä (Binder Jetting) toimii samankaltaisesti kuten materiaalin ruiskutus (Kuva 20). Kaupallisia nimiä menetelmälle ovat muun muassa 3DP (Three Dimensional Printing), voxeljet ja Digital Metal (Liite 1; Carlström henkilökohtainen tiedonanto 15.4.2016). (FIRPA:n [www-sivut 2016](#))

Menetelmää käytetään niin metallikappaleiden, värillisten muovikappaleiden, kuin myös suurten muottien ja keernojen valmistamiseen (Kuva 23) (Liite 1; Voxeljetin

www-sivut 2016). Esimerkiksi ruotsalaisen Höganäs-yrityksen Digital Metal -tekniikalla voidaan valmistaa ruostumattomasta teräksestä erittäin pieniä kappaleita (Kuva 22), joiden pinnanlaatu voidaan jälkikäsitellä alle mikrometrin tarkkuuteen (Höganäs www-sivut 2016). Yhdellä ajolla voidaan valmistaa esimerkiksi 12 000 kappaletta erittäin pieniä hammasrattaita (säde 1,5 mm, korkeus 0,6 mm). (Carlström 2016)



Kuva 22. Sideaineen ruiskutus -menetelmällä ruostumattomasta teräksestä valmistettu pieni onttorakenteinen kiinnike.

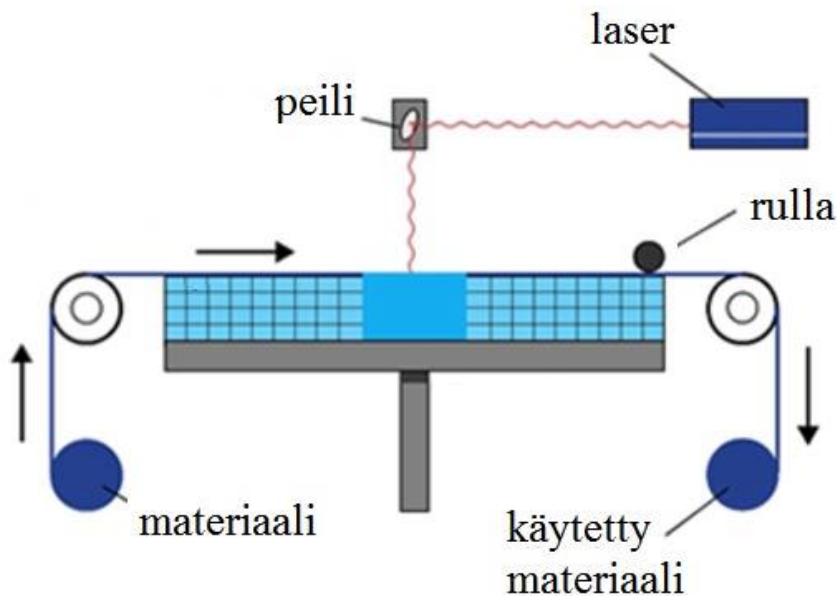


Kuva 23. Voxeljet-menetelmällä valmistettu kappale.

## 2.4.6 Laminointi

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa laminointi-menetelmä (engl. Sheet Lamination) pitää sisällään ne valmistustavat, joissa kappale muodostetaan liittämällä ohuita levymäisiä kerroksia päällekkäin (ISO/ASTM 52900:en 2015, 2). Cubic Technologiesin patentoima LOM (Laminated Object Manufacturing) oli ensimmäinen laminointia hyödyntävä menetelmä, mutta nykyisin se ei ole enää käytössä (FIRPA:n www-sivut 2016; Cubic Technologiesin www-sivut 2016).

Kuvassa 24 näkyy yksinkertainen esimerkki laminointi-menetelmästä. Vasemmalta syötetty materiaali, esimerkiksi paperi, leikataan haluttuun muotoon kohdistetulla lasersäteellä peiliä käyttäen, minkä jälkeen ylimääräinen materiaali jatkaa kulkuaan kuvassa oikealla näkyvään rullaan. Jokaisen kerroksen välissä materiaali esimerkiksi lämmitetään kuumennetun rullan avulla. (Loughboroughin yliopiston www-sivut 2016)



Kuva 24. Yksinkertaistettu esimerkki laminointi-menetelmästä.

Laminointi on menetelmänä hieman muita menetelmiä harvinaisempi (FIRPA:n www-sivut 2016). Sitä käyttää esimerkiksi yhdysvaltalainen Fabrisonic-yritys, jonka kehittämällä UAM-menetelmällä (Ultrasonic Additive Manufacturing) on mahdollista valmistaa metallisia kappaleita (Fabrisonicin www-sivut 2016).

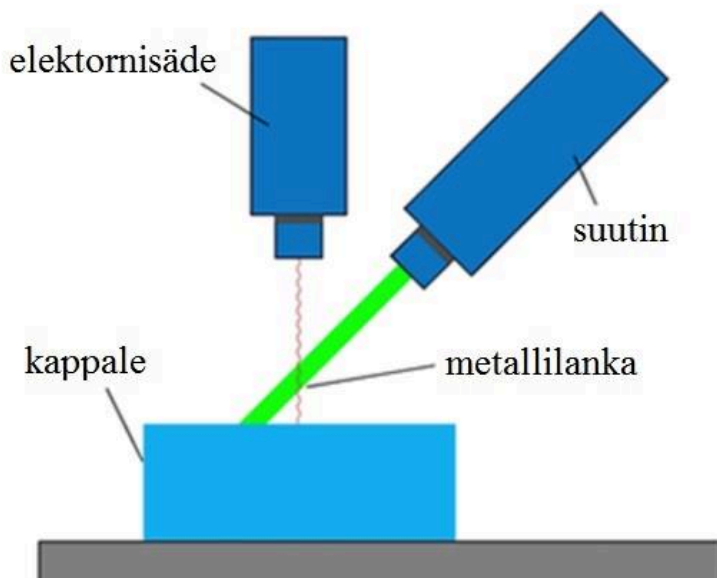


### 2.4.7 Materiaalin ja lämmön kohdistus

Materiaalin ja lämmön kohdistus -menetelmässä (Directed Energy Deposition) materiaaleja yhdistetään sulattamalla kohdistetun lämpöenergian avulla (ISO/ASTM 52900:en 2015, 2). Usein lämmönlähteenä on lasersäde ja materiaalina käytetään metallijauheita. Materiaalisuutin ja lämmönlähde voivat olla erillisiä tai integroituja. Useimmissa laitteissa on 4–5-akselinen ohjaus tai robottikäsi tulostuspään siirtämiseen, joten menetelmä ei rajoitu kerroksittaiseen rakenteeseen (Pekkarinen 2016, 25). (FIRPA:n www-sivut 2016)

Kaupallisia nimiä menetelmälle ovat muun muassa LMD (Laser Metal Deposition), DMD (Direct Metal Deposition), LENS (Laser Engineered Net Shaping), LDW (Laser Deposition Welding) ja LDT (Laser Deposition Technology). Puhekielessä menetelmää kutsutaan usein suorakerrostukseksi. (Pekkarinen 2016, 25)

Kuvassa 25 näkyy yksinkertaistetusti menetelmän toimintaperiaate. Kuvassa näkyvästä suuttimesta syötetään jauheen sijasta metallilankaa, joka sulatetaan uudeksi kerrokseksi kappaleen pinnalle. (Loughboroughin yliopiston www-sivut 2016)



Kuva 25. Yksinkertaistettu esimerkki materiaalin ja lämmön kohdistus -menetelmästä.

## 2.5 Materiaalit

Yksittäisiä erilaisia materiaaleja on nykyisin jo tuhansia, joista muovit ovat suosituimpia (Lipson & Kurman 2013, 82). Tässä työssä esitellään kuitenkin vain yleisimpiä tällä hetkellä käytettäviä materiaaleja. Materiaalien hinnat ovat vielä suhteellisen korkeita verrattuna muihin valmistusmenetelmiin, mutta niiden uskotaan laskevan tulevaisuudessa kysynnän kasvaessa (Thomas & Gilbert 2014, 17). Hintoja voi yleisesti tarkastella esimerkiksi Shapewaysin verkkopalvelusta (Tuomi henkilökohtainen tiedonanto 15.4.2016).

### 2.5.1 Muovit

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa käytettävät muovit on vakioitu, ja ne voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan: termoplastisiin muoveihin ja kertamuoveihin. Lisäksi käytetään esimerkiksi pehmeitä muoveja, kuten silikonina. Termoplastisia muovimateriaaleja kutsutaan yleisesti alalla filamenteiksi (Micallef 2015, 18). (Lipson & Kurman 2013, 82–83; Lassila & Tuomi 2016, 7)

Suosituimmat muovimateriaalit ovat ABS ja PLA. Näistä on saatavilla erilaisia värejä, sekä erilaisia sekoituksia sisältäen esimerkiksi puuta, kiveä, hiilikuitua ja eri metalleja. Sekoitusten avulla muoveista voidaan saada esimerkiksi joustavia, magneettisia tai sähköä johtavia. Filamenttia myydään kuluttajille esimerkiksi yhden kilogramman rullissa (Kuva 26) kilohinnan vaihdellessa 10–100 euron välillä. Teollisuuskäyttöön suunnattujen laitteiden materiaalit ovat usein kalliimpia (Xometryn www-sivut 2016). (Lipson & Kurman 2013, 83; Micallef 2015, 18)

Allasvalopolymerisaatiota käyttävien laitteiden nestemäiset materiaalit – kertamuovit – kuten hartsi, myydään usein litroittain. Litrahinnat vaihtelevat kymmenistä aina satoihin euroihin. Nestemäinen hartsi on haitallista iholle ja vaarallista nieltynä, mikä voi joissain tilanteissa osoittautua haastavaksi ominaisuudeksi. (Formlabsin www-sivut 2016; DWS LAB:n www-sivut 2016; Autodeskin www-sivut 2016)



Kuva 26. Filamenttirulla, joka on kiinni laitteen kyljessä.

ABS-muovi on hyvin kulutusta kestävä, vähän joustava muovi, jota käytetään esimerkiksi Lego-palikoissa. ABS-muovista valmistettuja kappaleita voi maalata, hioa hiekkapaperilla ja muokata pintaa asetonilla lopputuotteen aikaansaamiseksi. Materiaali myös reagoi sille tarkoitetuille liimoille toivotusti. ABS-muovin valmistamiseen käytetään uusiutumattomia luonnonvaroja. (Evans 2012, 20–21)

PLA-muovi on kova muovi, eikä se kestä yhtä suuria lämpötiloja kuin ABS-muovi. PLA-muovin suosio kuluttajille suunnattujen laitteiden osalta perustuu sen edulliseen hintaan sekä helppokäyttöisyyteen. PLA-muovin käyttö ei vaadi laitteelta yhtä vaativia ominaisuuksia kuin ABS-muovi. PLA-muovi on myös ympäristön kannalta parempi materiaali, koska sitä voidaan valmistaa monista uusiutuvista materiaaleista, kuten maissitärkkelyksestä. Sitä käytetään esimerkiksi ruokapakkauksissa ja kertakäyttövälineissä, sekä vähemmän kehittyneissä maissa jopa sadevesikerääjissä ja putkien sovitteissa. (Evans 2012, 21; Hausman & Horne 2014, 66)

## 2.5.2 Metallit

Metallista on mahdollista valmistaa kappaleita, jotka vastaavat mekaanisilta ominaisuuksiltaan lähes täysin muilla valmistusmenetelmillä valmistettuja kappaleita (Piili ym. 2014, 6; Vossi 2016). Vaikka materiaalia lisäävä valmistus on kasvanut hurjaa tahtia ja sitä käytetään valmistusmenetelmänä kriittisillekin sovellutuksille, sen kasvua hidastaa silti laadun määrittelyn ja sertifiointin puute (Seifi ym. 2016).

Metallikappaleiden valmistuksen yhteydessä voidaan valmistaa ajokohtaiset veto-sauvat, joista voidaan selvittää ajon laatu. Lisäksi tilaamisen yhteydessä voi pyytää standardin mukaisen ainestodistuksen. Materiaalina käytettävien metallien aineen-koetusstandardeja kehitellään parhaillaan. (Lassila & Tuomi 2016, 6–7)

Metallikappaleiden koko voi olla valtavakin, koska esimerkiksi materiaalin ja lämmön kohdistus -menetelmän joillakin tekniikoilla kappaleen kokoa rajoittaa vain käytettävän robotin työala. Valmistetut kappaleet ovat kuitenkin yleensä pienikokoisia, koska kappaleiden valmistamiseen käytetään usein jauhepetitekniikka-menetelmää, jossa laitteiden rakennuskammioiden tilavuudet ovat hyvinkin pieniä. (Pekkarinen 2016, 25)

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa metalleista eniten käytetään teräksiä, titaania, alumiinia, nikkeliä, koboltti-kromia, kultaa ja hopeaa. Näiden lisäksi käytetään myös vähissä määrin muita metalleja, kuten pronssia ja volframia. Kuluttajakäyttöön soveltuvilla laitteilla ei voida vielä hyödyntää juuri metalleja, muutoin kuin muoviseoksissa pieninä määrinä. (Lipson & Kurman 2013, 83; Seifi ym. 2016)

Jauhemateriaalien hinnat vaihtelevat materiaalitoimittajien ja karkeusasteiden mukaan. Esimerkiksi edullisimpia materiaaleja ovat ruostumattomat teräkset, työkaluteräkset ja alumiini, joiden kilohinta vaihtelee 30–100 euron välillä. Muiden materiaalien noin-hintoja on esitelty seuraavalla sivulla.

- koboltti-kromi-seokset: 100–500 €/kg
- pronssi: 120 €/kg
- nikkelseokset: 200 €/kg
- titaaniseokset: 300–800 €/kg
- hopea: 900 €/kg
- kulta: maailmanmarkkinahinta + 10 %. (Lassila & Tuomi 2016, 4–5; Heikkinen sähköposti 7.4.2016; Heikkinen 2016)

### 2.5.3 Muut

Keraamisia materiaaleja käytetään esimerkiksi muottien ja keernojen valmistamiseen. Etuna on, ettei tarvitse hankkia muottityökaluja kappaleita varten ja muotti voidaan valmistaa nopeastikin. Saksalainen Voxeljet-yritys on alan edelläkävijöitä valtavilla laitteillaan, joilla voi valmistaa jopa 4 000 x 2 000 x 1 000 millimetrin kokoisia kappaleita. (Lipson & Kurman 2013, 84; Voxeljetin www-sivut 2016)

Lasia käytetään alalla jonkun verran taiteen ja koruteollisuuden parissa. Lasi on ollut yksi vähiten hyödynnetyistä materiaaleista alalla sen ongelmallisten ominaisuuksien vuoksi, vaikka se muutoin onkin yksi ihmiskunnan eniten käyttämistä materiaaleista. (Lipson & Kurman 2013, 84)

Ruoka-aineita käytetään vasta vähissä määrin materiaaleina, mutta esimerkiksi suklaata ja sokeria on hyödynnetty menestyksekkäästi. Suomessakin on jo valmistettu prototyyppisiä tärkkelyksestä ja selluloosasta. Lihan valmistamisessa on joitain ensiaskeleita otettu, mutta tuskin tulemme vielä lähitulevaisuudessa näkemään kuluttajakäytössä siihen kykenevää laitetta. (Hausman & Horne 2014, 76; VTT:n www-sivut 2016)

## 2.6 Käyttökohteita

Materiaalia lisäävää valmistusta hyödynnetään jo nyt eri teollisuuden aloilla tavalla tai toisella. Prototyyppien valmistamisessa se on jo enemmän sääntö kuin poikkeus.

Lähitulevaisuudessa varaosat saattanevat olla seuraava suuri tuoteryhmä, johon materiaalia lisäävää valmistusta sovelletaan. Tähän liittyen on Suomessakin käynnistetty Tekesin rahoittama projekti, johon on ottanut osaa 13 suomalaista erikokoista yritystä. Projektissa selvitetään mahdollisuuksia varaosien valmistamiseen ja säilyttämiseen digitaalisessa muodossa, mikä toisi suoraan taloudellisia hyötyjä esimerkiksi varastoarvoon sidotun pääoman vähenemisen myötä. Valmistavassa teollisuudessa on arvioitu vuonna 2011 olleen keskimäärin 10 % vuosittaisen liikevaihdon määrästä sidottuna varastoarvoon. (Thomas & Gilbert 2014, 11–12; Tekesin www-sivut 2016).

Alla on esiteltyä eri alojen käyttökohteita, joissa materiaalia lisäävää valmistusta pystytään hyödyntämään muutoin kuin pelkästään prototyyppien osalta. Tässä opinäytetyössä esitellään tarkoituksenmukaisesti myös perinteisen teollisuuden ulkopuolisia käyttökohteita ja tulevaisuuden näkymiä, jotta lukijalle välittyy parempi kuva materiaalia lisäävän valmistuksen tuomista mahdollisuuksista.

### 2.6.1 Autoteollisuus

Autoteollisuus on hyödyntänyt materiaalia lisäävää valmistusta sen alkuaajoista saakka nopeuttamaan tuotekehitysprosessia. Autoteollisuus on yksi maailman suurimmista teollisuuden aloista, joten sen markkinaosuus saattaa kasvaa entisestään tulevaisuudessa. Markkinatutkimusyhtiö Gartner ennustaa (Gartnerin www-sivut 2016) esimerkiksi, että jopa 10 % autoteollisuuden tuotannon ulkopuolisista varaosista valmistettaisiin materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä vuoteen 2019 mennessä. Jo nyt internetin verkkopalveluista on ladattavissa malleja autojen varaosista, jotka kuluttaja voi itse valmistaa kotonaan (Thingiversen www-sivut 2016). Mediassakin esiteltyssä tapauksessa kuluttaja oli valmistanut sähköautonsa osan itse 0,3 euron materiaalikustannuksilla (Pehkonen 2016). (Puukko 2016, 14)

Yhtenä kappaleena valmistettu auton runko saattaa olla arkipäivää tulevaisuudessa. Yhdysvaltalainen Local Motors -yritys julkaisi jo vuonna 2015 videon (This drivable car...2015), jossa kokonainen, ajokelpoinen auton runko valmistettiin materiaalia lisäävällä valmistuksella vain 44 tunnissa. Samainen yritys aikoo tuoda markkinoille vuonna 2017 LMD3-auton, joka olisi valmistettu materiaalia lisäävillä valmistusme-

netelmillä 75 prosenttisesti, tulevaisuudessa jopa 90 prosenttisesti. (Local Motorsin www-sivut 2016).

### 2.6.2 Avaruusteollisuus

Materiaalia lisäävä valmistus on avannut myös avaruusteollisuudelle aivan uudenlaisia mahdollisuuksia. Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto NASA hyödyntää materiaalia lisäävää valmistusmenetelmää jo esimerkiksi Kansainvälisellä avaruusasemalla (ISS). NASA on valmistanut siellä muun muassa työkaluja ja lähettänyt niitä tutkittavaksi Maahan – ensimmäinen lähetys avattiin huhtikuussa 2016. NASA on julkaissut sivuillaan monia 3D-mallejaan vapaasti ladattavaksi. Sivuilta löytyy muun muassa ensimmäinen työkalu, joka suunniteltiin Maassa ja lähetettiin digitaalisesti avaruuteen valmistettavaksi. (NASA:n www-sivut 2016)

NASA etsii jatkuvasti keinoja hyödyntää materiaalia lisäävää valmistusta entistä enemmän. Tällä hetkellä selvitetään muun muassa mahdollisuutta valmistaa kokonainen pysyvä tukikohta Kuuhun tai Marsiin hyödyntäen planeetoilla esiintyviä materiaaleja, kuten kiviä. Jo nyt esimerkiksi NASA:n Mars Roverissa on Stratasyksen mukaan (Stratasyksen www-sivut 2016) noin 70 materiaalia pursottamalla valmistettua osaa. (Hausman & Horne 2014, 34)

### 2.6.3 Ilmailuteollisuus

Ilmailuteollisuudessa menetelmää on jo hyödynnetty paljon, esimerkiksi uudessa liikennelentokoneessa voi olla jopa 1000 materiaalia lisäävällä valmistuksella valmistettua osaa. (Lassila & Tuomi 2016, 5) Ilmailuteollisuus voi saavuttaa valtaviakin hyötyjä tulevaisuudessa materiaalia lisäävän valmistuksen avulla, koska yhdenkin kilogramman vähentäminen koneen painosta aiheuttaa merkittäviä kustannussäästöjä vuositasolla. (Seifi ym. 2016)

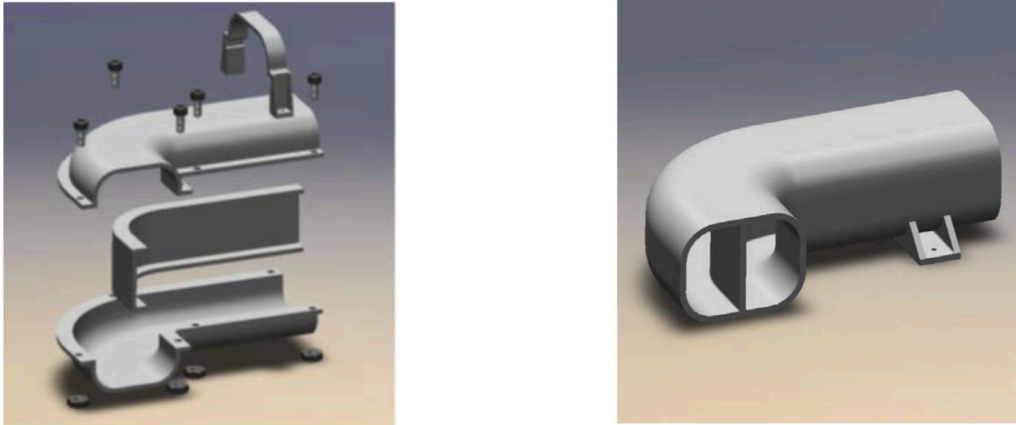
Lentomoottoreiden polttoainesuuttimet ovat tuotantomäärältään eräs suurimmista materiaalia lisäävän valmistuksen metallisista sovellutuksista. Suuttimissa saadaan suurta hyötyä, koska ne voidaan suunnitella täysin uudennlaisiksi ja kevyemmiksi.

Suuttimien monimuotoiset ja optimoidut kanavistot (Kuva 27) voidaan nyt valmistaa yhtenä kappaleena moniosaisen kokoonpanon sijaan (Kuva 28). Ilmailualan tiukoista vaatimuksista huolimatta esimerkiksi General Electric -yritys on saanut FAA:n (Federal Aviation Administration) hyväksynnän valmistukseen yli 100 000 kappaletta tällaisia suuttimia (Seifi ym. 2016). (Lassila & Tuomi 2016, 5)



Kuva 27. Materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistettu pieni, noin 300 euron hintainen metallinen suutin, jonka vieressä on niin sanotusti vain puoliksi valmistettu mallikappale. Kappaleet ovat AM Finland Oy:n valmistamia. (Heikkinen sähköposti 7.4.2016)





Kuva 28. Perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettu kappale vaatisi 16 osaa, kun taas materiaalia lisäävällä valmistuksella olisi mahdollista valmistaa kappale yksiosaisena. (Carlström 2016)

#### 2.6.4 Lääketiede

Sen jälkeen, kun vuonna 1999 kolmiulotteinen tukimateriaali yhdistettiin ensimmäistä kertaa ihmisen omiin soluihin, on lääketieteen sovellutukset kehittyneet valtavasti eteenpäin (Micallef 2015, 397). Nykyisin on jo onnistuttu valmistamaan kokonaisia kehonosia, joihin eläimen keho reagoi muun muassa kasvattamalla niihin rustoa sekä toimivia suonia (Kang ym. 2016). Eräitä uusimpia saavutuksia ovat muun muassa toimivat keinotekoiset munasarjat hiirelle, sekä ihmiselle onnistuneesti paikoilleen leikattu nikama (Bogle 2016; AAAS:n verkkosivut 2016). Yhtenä tulevaisuuden tavoitteista alalla pidetään, että ongelmat elinten luovutusten kanssa ratkeaisivat (Cooper-White 2015).

Lääketiede hyödyntää menetelmää esimerkiksi yksilöityjen implanttien parissa.. Materiaalia lisäävä valmistus helpottaa yksilöityjen proteesien valmistamista potilaalle. Mediassakin esillä olleessa tapauksessa lääkärit onnistuivat palauttamaan miehen kasvot lähes alkuperäiseen muotoonsa hyödyntäen materiaalia lisäävää valmistusta (Brittilääkärit tekivät miehelle... 2014). Arkipäiväisempi esimerkki lääketieteen sovellutuksista on kuulolaite, joita on jo vuosia ollut taloudellisesti kannattavaa valmistaa materiaalia lisäävällä valmistuksella (Sharma 2013). (Vierula 2013)

Suomessa Aalto-yliopisto tekee yhteistyötä muun muassa HYKS:n kanssa alaan liittyen, minkä johdosta muutamalla klinikalla hyödynnetään materiaalia lisäävää valmistusta jo rutiininomaisesti (Lassila & Tuomi 2016, 6). Esimerkiksi fyysinen kopio potilaan sydäimestä auttaa kirurgia hahmottamaan sydänleikkausta etukäteen (Lundvall 2016).

### 2.6.5 Julkiset tilat

Suomestakin löytyy jo useita julkisissa tiloissa olevia materiaalia pursottavia laitteita, esimerkiksi kirjastoista. Ne ovat usein edullisen hintaluokan helppokäyttöisiä laitteita, joihin voi varata ajoaikaa muutaman tunnin kerrallaan. (Espoon kaupungin www-sivut 2016; Turun kaupungin www-sivut 2016)

Suomen ensimmäinen kahvila, joka tarjoaa asiakkaidensa käyttöön materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntäviä laitteita, sijaitsee Tampereella. Yrityksellä on tällä hetkellä kolme – todennäköisesti materiaalin pursotus -menetelmää hyödyntävää – laitetta, jotka ovat asiakkaiden käytössä maksua vastaan. Hinta määräytyy materiaalin, aloitusmaksun sekä ajoajan mukaan. Tällä hetkellä esimerkiksi hinta PLA-muoville yhden tunnin ajoajalla on 7,4 €. (3D Crushin www-sivut)

### 2.6.6 Taide

Luovaan alaan materiaalia lisäävä valmistus luo aivan uudenlaiset reunaehdot, tai jopa poistaa ne kokonaan. Geometrisesti monimutkainen taideteos saattoi olla aikaisemmin mahdotonta toteuttaa perinteisillä valmistusmenetelmillä. Jo vuosikymmeniä taiteilijat ovat myyneet esimerkiksi maalauksistaan tulostettuja kopioita. Nyt sama periaate on myös kannattavaa – ja ylipäätään mahdollista – kolmiulotteisilla teoksilla. Taiteilijat voivat lisätä teoksiaan internetiin alan kauppasivustoille, joissa voi myydä suunnittelemaansa 3D-malleja muiden valmistettavaksi. Se mahdollistaa taiteilijoille erityisen kauppapaikan, koska teoksen saamiseksi markkinoille ei tarvitse nähdä juuri vaivaa. Maksettava korvaus 3D-mallien myymisestä on kuitenkin suhteellisen pieni. (Hausman & Horne 2014, 341; Thingiversen www-sivut 2016)

Maalauksia voidaan mallintaa kolmiulotteisiksi ja valmistaa ne fyysisiksi kappaleiksi, jolloin esimerkiksi sokeat henkilöt pääsevät nauttimaan niistä. Valokuvista voidaan tehdä litofaaneja, eli kohokuvioituja kappaleita, jopa kuluttajaluokan laitteilla (MiniFactoryn [www-sivut 2016](#)). (MonzaMakersin [www-sivut 2016](#))

Museot hyödyntävät jo nyt kokoelmissaan materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä tuotettuja kopioita alkuperäiskappaleista. Ajatuksena on niin sanotusti tuoda vitriinissä oleva esine käsinkosketeltavaksi kävijöille. Museoiden teetättämiä 3D-malleja on myös saatavilla ilmaiseksi, tai pientä korvausta vastaan internetin sivustoilta. (Urheilumuseon [www-sivut 2016](#); Sketchfabin [www-sivut 2016](#); Threadingin [www-sivut 2016](#))

### 2.6.7 Koruteollisuus

Koruteollisuus on hyödyntänyt materiaalia lisäävää valmistusta jo kauan. Suomessa alan mahdollisesti suurin yritys, Kalevala Koru, hankki ensimmäisen laitteensa prototyyppien valmistamiseen jo vuonna 1998. Vuonna 2011 yritys hankki tehokkaamman laitteen, joka on tuotekehityksen lisäksi myös tuotannollisessa käytössä. Laitteella tulostetaan muun muassa vaha-aihoita, joita käytetään koruaihioiden valmistukseen. Vuonna 2015 Kalevala Korun tuotteita sai myös tilattua muovisina versioina, niin sanotusti 3D-tulostettuina, mutta palvelua tarjonnut ulkopuolinen yritys on nykyisin lopettanut toimintansa. (Launzerin [www-sivut 2016](#); Kalevala Korun [www-sivut 2016](#))

Koruteollisuus hyödyntää jalometalleista enimmäkseen niin kutsuttua Sterlinghopeaa (92,5 % Ag), joka on myös materiaalia lisäävässä valmistuksessa käytettävissä oleva materiaali (Suomen Kultaseppien Liiton [www-sivut 2016](#)).

### 2.6.8 Rakennusteollisuus

Kiinalainen WinSun-yritys valmisti materiaalia lisäävällä valmistuksella kokonaisen seinän vuonna 2008. Sen jälkeen se on ollut useasti mediassa esillä erilaisilla saavutuksillaan. Yritys on muun muassa vuonna 2014 valmistanut 10 taloa yhdessä vuoro-

kaudessa materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntäen. Yritys ei kerro tarkkaa valmistusmenetelmäänsä, mutta sen on epäilty olevan kopio CC-menetelmästä. (Davison 2015; WinSunin www-sivut 2016)

Materiaalia lisäävä valmistus tuo taloudellisuuden lisäksi myös muita etuja rakennusteollisuudelle. Perinteiset suorakulmaiset rakenteet kestävät paljon vähemmän rasi-  
tusta pyöreisiin muotoihin verrattuna. Pyöreämmät rakennusratkaisut esimerkiksi alueilla, joissa on maanjäristyksiä, voivat säästää ihmishenkiä. Materiaalia lisäävässä valmistuksessa pyöreät muodot eivät lisää kustannuksia samalla tavalla, kuin perinteisissä valmistusmenetelmissä. (Khoshnevis 2012)

Kokonaisten rakennusten valmistaminen materiaalia lisäävällä valmistuksella ei ole vielä yleistä, mutta Euroopassakin voi vieraila sellaisessa esimerkiksi Amsterdamissa (3D Print Canal Housen www-sivut 2016). Tulevaisuudessa tällaisten rakennuksien kuitenkin arvioidaan lisääntyvän (Hausman & Horne 2014, 49–51). Jo nyt, kiinalainen WinSun kertoo saaneensa 20 000 talon tilauksen Egyptin hallinnolta (WinSunin www-sivut 2016). Lisäksi alan uutissivustojen mukaan Dubaissa pyritään tilanteeseen, jossa 25 % taloista olisi valmistettu materiaalia lisäävällä valmistuksella vuoteen 2030 mennessä – en löytänyt kuitenkaan virallista lähdettä väitteelle.

### 3 KUSTANNUKSET

Kustannukset voidaan yleisesti jakaa esimerkiksi kahteen ryhmään: suoriin ja epäsuoriin. Materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntämällä on mahdollista vähentää aiheutuvia kustannuksia molemmista näistä ryhmistä. (Thomas & Gilbert 2014, 11)

Suoriksi kustannuksiksi lasketaan mm. työvoima-, materiaali- ja laitekustannukset. Geometrisen vapauden ja hukkamateriaalin vähäisyyden vuoksi tuotteet on mahdollista suunnitella uudelleen, mikä vähentää materiaalitarvetta. Vaikka materiaalien hinnat ovat korkeampia kuin perinteisessä valmistuksessa, voidaan huomattavia säästöjä silti saavuttaa. (Thomas & Gilbert 2014, 11)

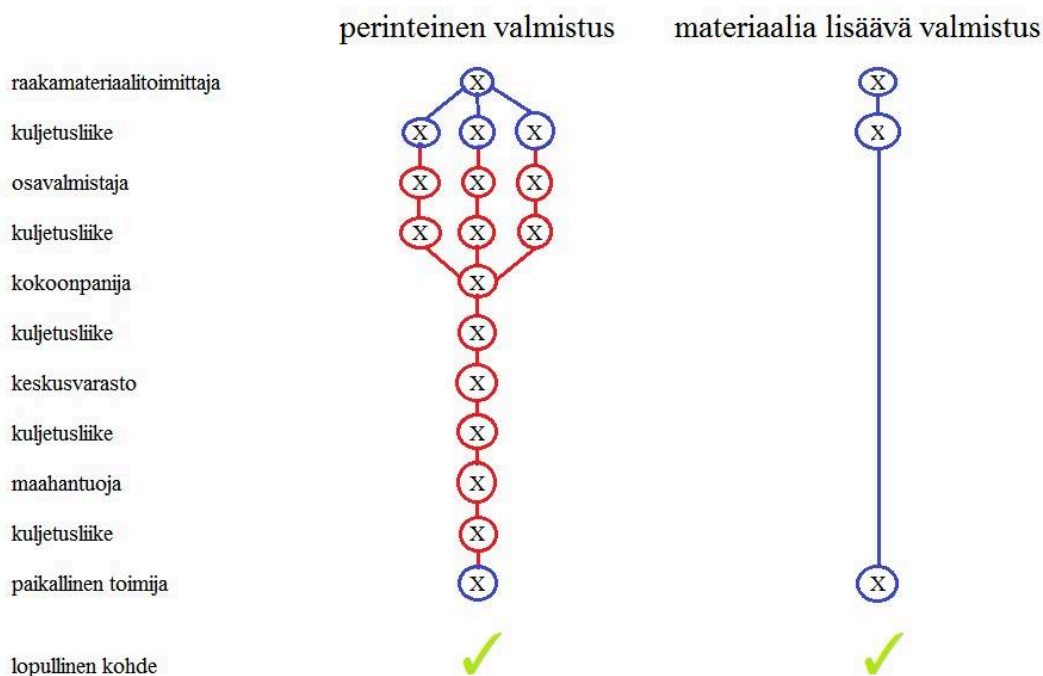
Epäsuoria kustannuksia ovat esimerkiksi vialliset tuotteet, varastoarvo, ylituotanto ja kuljetukset. Materiaalia lisäävä valmistus voi lyhentää huomattavasti esimerkiksi tilaus-toimitusketjua (Kuva 29), mikä aiheuttaa välittömiä säästöjä hallinnointikulujen osalta sekä vähentää koko ketjun haavoittuvuutta. (Thomas & Gilbert 2014, 11–15)

Varastoon sidotun pääoman määrää on mahdollista vähentää valmistamalla kappaleita suoraan kysynnän mukaan. Kriittisiä varaosia saatetaan tarvita esimerkiksi erittäin harvoin, mutta tarpeen tullessa niitä tarvittaisiin nopeasti. Tämä pakottaa varastoi-  
maan kappaleita, vaikka kysyntää ei välttämättä olisikaan. (Thomas & Gilbert 2014, 12)

Kuljetuksista aiheutuvia kustannuksia on mahdollista vähentää valmistamalla kappaleet mahdollisimman lähellä lopullista kohdetta. Yhdessä kokoonpanossa voi olla esimerkiksi kolme osaa, jotka kaikki kuljetetaan eri paikoista kokoonpanoa varten. Materiaalia lisäävällä valmistuksella voi olla mahdollista valmistaa nämä kaikki kappaleet yhdessä paikassa – jopa yhdellä ajolla. Valmistamalla kappaleita lähempänä loppukäyttäjää voidaan vähentää myös kuljetuksiin kuluva aikaa. (Thomas & Gilbert 2014, 11–13)

Materiaalia lisäävän valmistuksen vaikutus tilaus-toimitusketjuun (Kuva 29) voi olla valtava (Thomas & Gilbert 2014, 14–15). Musiikkikappaleiden tilaus-toimitusketjun

muuttuminen menneisyydessä on konkreettinen esimerkki tällaisesta muutoksesta. Vastaava radikaali muutos on teoreettisesti mahdollista tulevaisuudessa kaikkien fyysisten kappaleiden osalta. (Sellwood 2016)

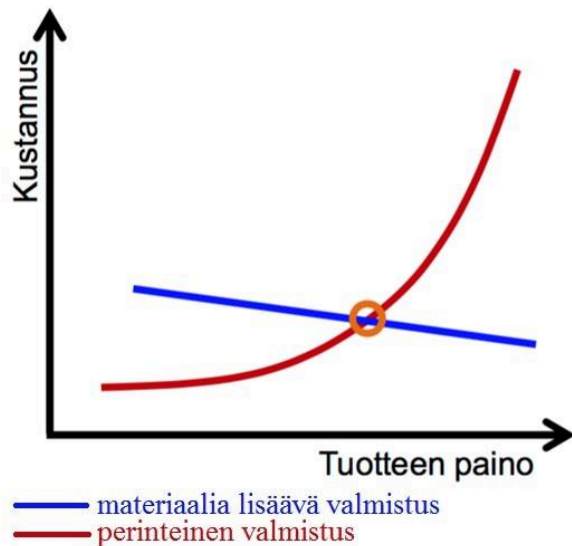


Kuva 29. Materiaalia lisäävän valmistuksen teoreettinen vaikutus kolmiosaisen kappaleen tilaus-toimitusketjuun.

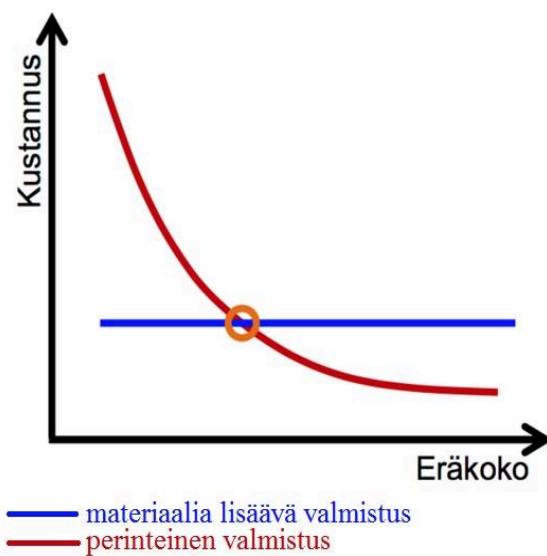
### 3.1 Vertailu perinteisiin valmistusmentelmiin

Kappalekustannusten erot perinteisten ja materiaalia lisäävän valmistuksen välillä ovat suuret. Perinteisillä valmistusmenetelmillä esimerkiksi olemassa olevan tuotteen rakenteiden keventäminen aiheuttaa lisäkustannuksia. Materiaalia lisäävällä valmistuksella tilanne on juuri päinvastoin (Kuva 30), koska tällöin esimerkiksi ajoaika ja materiaalin määrä vähenevät. Myös pieniä eräkokoja voi olla mahdollista valmistaa kannattavasti (Kuva 31), eikä tuotteen geometrian monimutkaistuminen välttämättä lisää kustannuksia (Kuva 32). (Piili ym. 2014, 14–15)





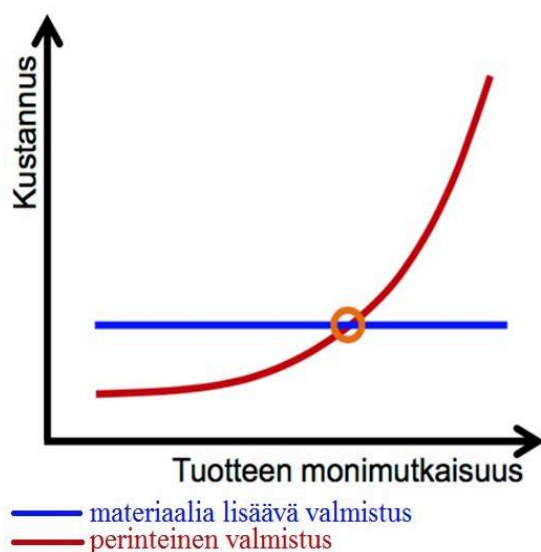
Kuva 30. Kustannuksien muuttuminen tuotteen painoa keventäessä. (Piili ym. 2014, 14)



Kuva 31. Kustannuksien muuttuminen eräkoon kasvaessa. (Piili ym. 2014, 15)

Ei ole olemassa yleisesti sovellettavissa olevaa tiettyä eräkköä, joka olisi taloudellisesti kannattavampi valmistaa materiaalia lisäävällä valmistuksella. Kannattavuuteen vaikuttaa erittäin moni asia, joten se on aina laskettava tapauskohtaisesti. Kuvassa 31 kustannukset eivät muutu eräkoon kasvaessa, mutta todellisuudessa kappaleen kokonaiskustannukset voivat laskea huomattavasti myös materiaalia lisäävän valmistuksen osalta. Yhden kappaleen valmistamisen kustannuksia on verrattu tilanteeseen, jossa hyödynnettiin laitteen koko rakennusalueen pinta-alaa valmistamiseksi 40 kappalet-

ta. Yhden kappaleen valmistamiseen kului noin 9 tuntia, kun taas 40 kappaleen yhtäaikaisen valmistuksen kappalekohtainen valmistusaika oli alle 2 tuntia. Kustannuslaskelmasta havaittiin, että yhden kappaleen kokonaiskustannukset olivat noin viisi kertaa pienemmät 40 kappaleen sarjavalmistuksessa, verrattuna vain yhden kappaleen valmistamiseen ajon aikana. Joillakin nykyisillä laitteilla voidaan valmistaa kappaleita myös päällekkäin, jolloin voidaan hyödyntää koko rakennusalueen tilavuutta pelkän pinta-alan sijaan. Yksittäisen ajon eräkoon kasvaessa voidaan mahdollisesti siis kasvattaa kustannuseroa vielä enemmänkin. (Piili ym. 2014, 14–19; Carlström 2016)



Kuva 32. Kustannuksien ero tuotteen monimutkaisuudessa. (Piili ym. 2014, 15)

Eräessä tutkimuksessa (Atzeni & Salmi 2012) materiaalia lisäävä valmistus havaittiin perinteistä valmistusmenetelmää kannattavammaksi, mikäli kappaleita valmistettaisiin alle 42. Tutkimuksen kustannuslaskelmassa käytetty alumiininen kappale valmistetaan perinteisesti korkeapainevalua hyödyntäen. (Piili ym. 2014, 19)

Toisessa tutkimuksessa havaittiin, että tällainen taloudellisesti kannattava kappalemäärä voi olla jopa 87 000. Kyseessä oli pieni muoviosa, jonka valmistuskustannukset materiaalia lisäävää valmistusta käyttäen olivat noin yhden euron. Vertailtu valmistusmenetelmä oli ruiskuvalu, jota käytetään yleisesti samankaltaisten kappaleiden valmistuksessa. (Atzeni ym. 2010)

### 3.2 Kustannuslaskenta

Kappaleen valmistuskustannukset voidaan laskea nopeastikin vain materiaalin kilohinnan mukaan, mutta tällöin saadaan aikaan vain suuntaa antava arvio. Yhden kappaleen tai eräkoon kokonaiskustannuksia voidaan laskea monella eri tavalla, sen mukaan mitä kaikkea halutaan ottaa huomioon. Seuraavaksi esiteltävän kustannuslaskennan kaava pohjautuu Baumers ym. tekemään tutkimukseen (2012), joka on esitelty mm. Lappeenrannan yliopiston FAST COINS -hankkeen katsauksessa. Kaavaa on avattu hyödyntäen Savonia-ammattikorkeakoulun DeAdMan-tutkimushankkeen loppuraportissa esiteltyjä kaavoja. Molemmissa julkaisuissa käsiteltiin materiaalia lisäävän valmistuksen kustannuksia. Esitelty kaava ei ota huomioon esimerkiksi kappaleiden jälkikäsitteilyn aiheuttamia kustannuksia. (Piili ym. 2014, 16–17; Alonen ym. 2015)

$$C_{\text{valmistuserä}} = C_{\text{sivu}} * T_{\text{valmistus}} + m * C_m + E_{\text{ve}} * C_E$$

missä

$C_{\text{valmistuserä}}$	valmistuksen kustannukset (€)
$C_{\text{sivu}}$	valmistuksen sivukustannukset (€/t)
$T_{\text{valmistus}}$	valmistusaika (t)
$m$	käytetty materiaali (kg)
$C_m$	materiaalin hinta: (€/kg)
$C_E$	valmistuksen aikana kulutettu energia (J)
$E_{\text{ve}}$	energian hinta (€/J)

Kaavan käytössä tulee kiinnittää erityistä huomiota käytetyn materiaalin määrään, koska se ei tarkoita lopullisen kappaleen painoa, vaan pitää sisällään myös mahdollisiin tukirakenteisiin kuluvaan materiaalin. (Piili ym. 2014, 16)

Merkittävin parametri etenkin metallikappaleiden valmistamisessa on  $C_{\text{sivu}}$ , eli valmistuksen sivukustannukset (Atzeni & Salmi, 2012; Lindemann ym. 2012). Sivukustannukset eivät tarkoita pelkästään työntekijöistä ja tiloista aiheutuvia kustannuksia, vaan ne pitävät sisällään myös laitteen hankintahinnasta johtuvat kustannukset. Laitteinvestoinnin aiheuttama vuosittainen kustannus voidaan laskea kaavasta:

$$A = C_{n/i} \times \left[ H - \frac{JA}{(1+i)^n} \right]$$

missä

$C_{n/i}$	annuiteettitekijä
$H$	hankintahinta
$i$	laskentakorkokanta
$n$	investoinnin pitoaika
$JA$	investoinnin jäännösarvo

Annuiteettitekijä saadaan kaavasta

$$C_{n/i} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Esimerkiksi 200 000 euron laiteinvestointi 2 vuoden pitoajalla, 5 % laskentakorkokannalla ja 50 000 euron jäännösarvolla aiheuttaisi vuosittaiseksi laitekustannukseksi 80 000 euroa. Laite voi valmistaa kappaleita varsinaisen työajan ulkopuolella mikä tulee ottaa huomioon tuntikustannuksia laskettaessa. Vuosittaisella 30 % tehollisella ajalla laitteen tuntikustannus olisi noin 35 euroa. Esimerkiksi 10 tunnin ajossa tämä tarkoittaa 350 euron laitekustannuksia.

Laitteiden hinnalla voidaan siis todeta olevan merkittävä vaikutus kappaleen kokonaiskustannukseen. Käytetyssä esimerkissä oli kyseessä 200 000 euron laiteinvestointi, joka vastaa aikaisemminkin työssä mainittua metallikappaleita valmistavan laitteen hintaa oheislaitteineen. Laitteen rakennusalueen koko on 90 x 90 x 80 millimetriä, joten se soveltuu vain pienien kappaleiden valmistamiseen. Hinta nousee suhteellisen paljon, mikäli halutaan valmistaa suurempia kappaleita jauhepetiteknikka-menetelmällä. Esimerkiksi Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:llä (ent. Valtion teknillinen tutkimuskeskus) käytössä oleva SLM 125 HL -laitteen hinta on noin 250–300 tuhatta euroa, ja sen rakennusalueen koko on 125 x 125 x 125 millimetriä. Saman laitevalmistajan seuraavan kokoluokan laite maksaa jo noin 600 tuhatta euroa, mutta sillä pystyy valmistamaan jo 280 x 280 x 365 millimetrin kokoisia kappaleita. (SLM Solutionsin [www-sivut](http://www.slm.com) 2016; VTT:n [www-sivut](http://www.vtt.fi); Vossi henkilökohtainen tiedonanto 29.4.2016).

Laitteiden osalta korkeampi hinta ei aina tarkoita parempaa lopputulosta, etenkin muovikappaleiden kohdalla. Laitehankintoja suunniteltaessa on tapana tilata yrityksiltä mallikappaleita tuotteista laitevertailua varten. Satakunnan ammattikorkeakoulun automaation tutkimusryhmässä tehdyllä vertailulla on todettu, että edullisen hintaluokan laitteella valmistettu kappale voi olla joskus yhtä hyvä laadultaan, kuin kymmenien tuhansien eurojen hintaisilla laitteilla valmistettu kappale. (Leino henkilökohtainen tiedonanto 27.4.2016)

### 3.3 Case-esimerkkejä

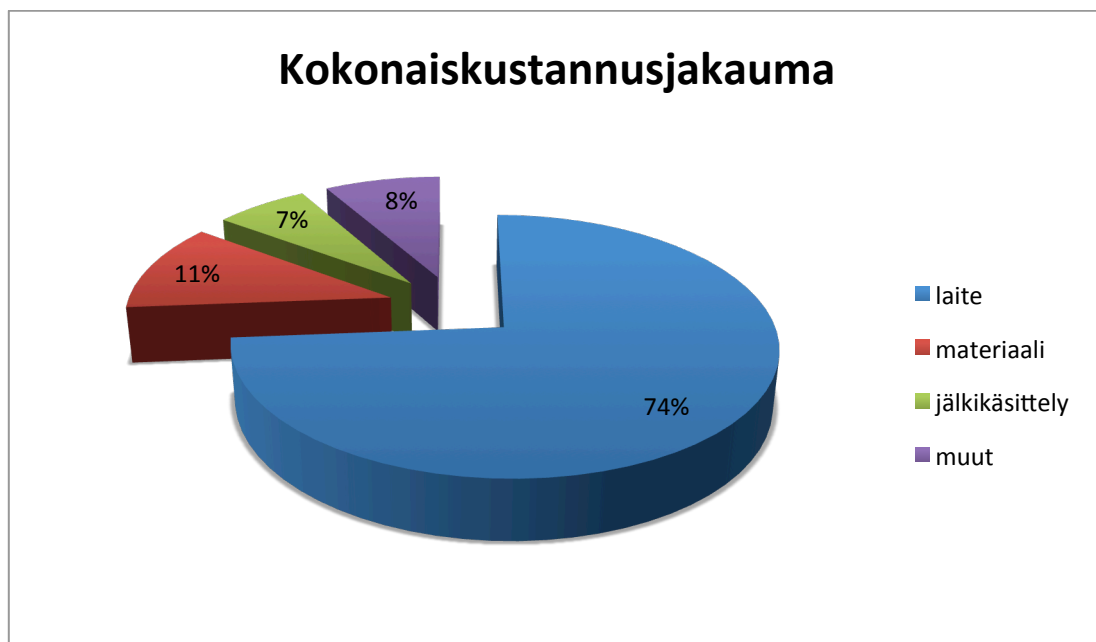
#### 3.3.1 Pienen metallikappaleen sarjavalmistus

Lindemann ym. julkaisussa (2012) tarkasteltiin erittäin pienen, autoteollisuudessa käytössä olevan metallikappaleen sarjavalmistusta. Lisäksi tarkasteltiin yksittäisten parametrien muutosten vaikutusta kappaleen prosentuaaliseen kokonaiskustannusjakaumaan. Määritellyt parametrit olivat:

- laitteen käyttöaika: 4500 t/v
- laitteen poistoaika: 5 v
- laiteinvestointikulut: 500 000 €
- huoltokustannukset: 21 666 €/v
- valmistusnopeus: 6,3 cm<sup>3</sup>/t
- materiaali: ruostumaton teräs (316L)
- materiaalin hinta: 89 €/kg
- kappaleen tilavuus: 1 cm<sup>3</sup>
- kerrospaksuus 0,3 µm.

Yhden ajon erä koko oli 190 kappaletta, minkä perusteella yksittäisen kappaleen hinnaksi laskettiin noin 7,5 euroa. Laskennassa käytetty prosessi alkoi tiedon keräämisestä, päättyen jälki- ja lämpökäsittelyyn kappaleeseen. Kuviossa 1 voidaan huomata laitekustannuksien olleen ylivoimaisesti suurin yksittäinen kustannustekijä. Samankaltaisiin prosenttilukemiin laitekustannuksien osalta on päädytty myös silloin, kun

materiaalina on ollut muovi, mutta tämän voidaan todeta pätevän vain kalliiden laitteiden kohdalla (Atzeni ym. 2010). (Lindemann ym. 2012)



Kuvio 1. Yhden ajon prosentuaalinen kokonaiskustannusjakauma. Lämpökäsittely sisältyy muut-osuuteen, koska se on jälkikäsittelyn jälkeinen erillinen prosessi. (Lindemann ym. 2012)

Kuviossa 2 on esitelty yksittäisten parametrien muuttumisen vaikutusta prosentuaaliseen kokonaiskustannusjakaumaan. Kuvioista nähdään, että laitteen aiheuttamat kustannukset pysyvät suurimpana tekijänä, ellei materiaalin kilohinta ole todella korkea. Kuviossa näkyy neljän eri parametrin muutokset: valmistusnopeuden, laitteen käyttäjän, materiaalin kilohinnan ja laitteen investointikustannuksen.



Kuvio 2. Yksittäisen parametrin muutoksen vaikutus prosentuaaliseen kokonaiskustannusjakaumaan (Lindemann ym. 2012).

Julkaisun mukaan 7,5 euron kappalehinta ei kuitenkaan olisi välttämättä realistinen, koska laitteen vuosittainen käyttöaika (4500 t) oli turhan optimistinen. Realistiseksi yksittäiskappaleen kustannukseksi oli laskettu noin 9,5 euroa. (Lindemann ym. 2012)

Julkaisussa tarkasteltiin myös yksittäiskappaleen hintaa mahdollisessa tulevaisuuden tilanteessa, jossa muun muassa laitteiden hinnat olisivat laskeneet valmistusnopeuksien kasvaessa. Taulukossa 2 vertailen näitä parametrejä keskenään VTT:ltä löytyvän SLM 125 HL -laitteen kanssa. Materiaalihintana on käytetty aikaisemmin työssä esiteltyä 30–90 euron hintahaarukkaa. (Lindemann ym. 2012)



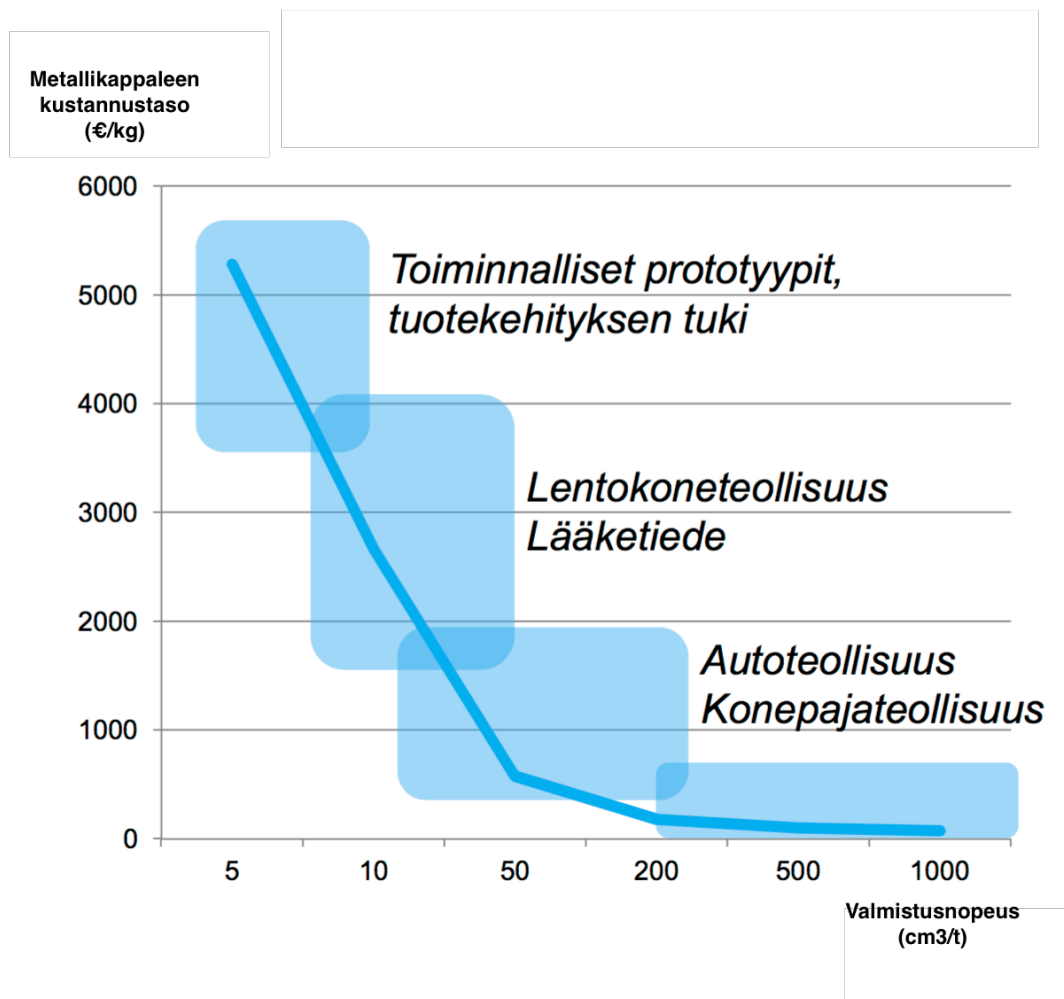
Taulukko 2. Vuonna 2012 julkaisussa (Lindemann ym.) käytetyt sekä nykypäivän tiedetyt parametrit.

	<b>Parametrit 2012</b>	<b>Tulevaisuuden arvio parametreistä</b>	<b>SLM 125 HL</b>
Valmistusnopeus	6,3 cm <sup>3</sup> /t	20 cm <sup>3</sup> /t	25 cm <sup>3</sup> /t
Laitteen käyttöaika	4500 t/v	7800 t/v	
Materiaali (RST)	89 €/kg	40 €/kg	30–90 €/kg
Laitteinvestointi	500 k€	320 k€	250–300 k€
Kappaleen hinta	n. 7,5 €	<4 €	

Taulukosta 2 voidaan parametrejä vertailemalla todeta, että nykyisillä laitteilla valmistaminen voisi mahdollisesti onnistua alle 4 euron kappalekustannuksilla. Teoreettisessa tilanteessa tällaisen yksittäisen kappaleen valmistuskustannukset olisivat siis tippuneet vain muutamassa vuodessa jopa 60 prosenttia.

VTT:llä on laskettu valmistusnopeuden muutoksen vaikuttavan vielä enemmän kappaleen kustannuksiin (Kuva 33), kun käytetään SLM-menetelmää, eli SLM 125 HL -laitteenkin käyttämää jauhepölyteknikka-menetelmää. Kuvasta 33 voidaan todeta, että kappaleen valmistusnopeuden kasvaminen 10:stä 50 kuutiosenttimetriin tunnissa laskisi kappaleen kustannuksia noin viidesosaan alkuperäisestä. (VTT:n [www-sivut](http://www.vtt.fi) 2016)

On arvioitu, että jo 2020-luvun alussa valmistusnopeudet olisivat moninkertaiset nykyisiin verrattuna (Roland Bergerin [www-sivut](http://www.rolandberger.com) 2013). Käytännössä tämä tarkoittaa, että nyt hankittu laite ei ole välttämättä kilpailukykyinen enää muutaman vuoden kulluttua. Laitteiden valmistusnopeuksien mahdollinen kasvaminen tulevaisuudessa tulee siis ottaa huomioon esimerkiksi investointien pitoaikoja laskiessa, koska laitteella ei välttämättä pysty valmistamaan kappaleita kilpailukykyisesti viiden vuoden kulluttua hankintahetkestä.



Kuva 33. Metallikappaleen kustannustason muutos valmistusnopeuden kasvaessa käytettäessä SLM-jauhepölyteknikka-menetelmää. (Simons 2015)

### 3.3.2 Hydrauliventtiililohko

VTT:n ja erään suomalaisen yrityksen yhteisessä, Tekesin rahoittamassa hankkeessa suunniteltiin ja valmistettiin uudelleen hydrauliventtiililohko (Kuva 34). Alkuperäinen, isosta teräskappaleesta poraamalla ja koneistamalla valmistettu kappale painoi noin 2,5 kilogrammaa. (Laakso ym. 2016, 18)

Kappale suunniteltiin uudelleen ilman aikaisempia rajoituksia geometriassa siten, että esimerkiksi nesteenvirtaus saatiin optimoitua. Jo alustavalla suunnittelulla kappaleen paino saatiin laskettua 1,4 kilogrammaan. Tämän jälkeen kappaleelle suorit-

tiin topologian optimointi, eli sen rakenne muutettiin tietokoneohjelman avulla mahdollisimman materiaalitehokkaaksi. (Laakso ym. 2016, 18)

Ennen topologian optimointia kappaleelle asetettiin seuraavia reunaehtoja:

- 420 baarin sisäinen paine
- 17,9 kN kuorma kiinnityspulttien esikiristyksestä
- 1000 kN sivusta tulevat kuormat
- myötörajan varmuuskerroin 1,8
- vetolujuuden varmuuskerroin 2,7
- hyvä korroosion kesto. (Laakso ym. 2016, 18)



Kuva 34. VTT:n ja suomalaisen yrityksen yhteisessä hankkeessa valmistettu noin 5 cm korkea hydrauliventtiililohko. (VTT:n www-sivut 2016)

Kappaleen painoksi saatiin topologian optimoinnin jälkeen noin 0,6 kilogrammaa, joka on noin neljäsosa alkuperäisen kappaleen painosta. Kappale valmistettiin HR13-

työkaluteräksestä, ja sen valmistusaika oli noin 21 tuntia. Tällainen kappale maksaisi alihankintana tilattuna, viimeisteltynä yksittäiskappaleena noin 950 €. Hinta voisi laskea esimerkiksi 25 % kymmenen kappaleen tilauksessa, sekä jopa yli 50 % sadan kappaleen tilauksessa. H13-työkaluteräksen jauhettu kilohinta on noin 90 euroa. (Laakso ym. 2016, 19–20)

Vaikka kappaleen valmistuskustannukset olisivat 10-kertaiset perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettuun kappaleeseen verrattuna, voidaan saavuttaa silti merkittäviä etuja, kuten juuri mainittu kappaleen painon huomattava laskeminen. Lisäksi on mahdollista saavuttaa esimerkiksi huoltovapaampia kappaleita, jotka voivat tuoda vuosien aikana merkittäviäkin taloudellisia säästöjä (Piili ym. 2014, 13).

Liitteessä 2 on laskettu suuntaa antavia hintaesimerkkejä tämän case-esimerkin kappaleelle, mikäli sellainen tilattaisiin jälkikäsittelemättömänä Shapewaysin verkkopalvelusta. Muovisen kappaleen hinta vaihtelisi valitun materiaalin ja värin mukaan 90–220 euron välillä, kun taas metallisen (60 % RST, 40 % pronssi) kappaleen hinta nousisi 490 euroon. PLA-muovista valmistettu kappale painaisi alle sata grammaa, joten kappaleen voisi teoriassa valmistaa niin sanotulla kulutajalaitteella alle 2 euron materiaalikustannuksilla.

Tämä VTT:n hanke on ollut merkittävä koko alalla. Siihen viitataan useissa ulkomaalaisissa julkaisuissa sekä se on ollut esillä myös eri medioissa. Kuva 34 on myös uusimman Wohlers-raportin kannessa (Wohlers Associatesin www-sivut 2016). Suomi on ylipäätään yksi maailman edelläkävijöistä alalla metallien osalta (Tuomi henkilökohtainen tiedonanto 15.4.2016). Eurooppalaisista maista vain Saksa panostaa enemmän materiaalia lisäävään valmistukseen, mutta jos panostusta tarkastellaan asukasta kohden, Suomi nousee ohi. (Kulmala 2015)

## 4 HAASTEITA

Jo aikaisemmin mainittujen ongelmien lisäksi materiaalia lisäävässä valmistuksessa on myös muita haasteita, joihin ei törmää etenkin tuotekuvauksia lukiessa.

Kuluttajahintaluokan laitteet vaativat kuluttajilta vielä suhteellisen paljon asiaan perehtymistä, jotta niillä pystyisi valmistamaan onnistuneita kappaleita. Vuonna 2012 julkaistussa pro gradu -tutkielmassa todettiin käyttäjien olevan pääasiassa korkeasti koulutettuja miehiä, joilla on teknisen alan kokemusta (Husa 2012, 74). Kuluttajalle saattaa tulla yllätyksenä, että laitteet eivät ole vielä niin sanotusti helppokäyttöisiä. Esimerkiksi materiaalin pursotus -menetelmää hyödyntävää laitetta tulee huoltaa jatkuvasti muun muassa suuttimien ja rakennusaluustojen osalta. Myös muita yllätyksiä saattaa tulla, mikäli asiaan ei ole perehtynyt huolellisesti. Suhteellisen pienenkin muovikappaleen valmistaminen saattaa kestää tunteja. Osa laitteista pitää käydessään myös kovaa ääntä, joten esimerkiksi lukeminen ei ole mielekästä samassa tilassa. Valmistaminen aiheuttaa lisäksi epämiellyttäviä hajuja, jotka saattavat olla terveydelle haitallisia. Kappaleiden epäonnistumisilta on myös vaikea välttyä, koska onnistuneen kappaleen valmistaminen vaatii kokemusta samantyyppisten kappaleiden valmistamisesta. Epäonnistuneissa kappaleissa materiaalia menee hukkaan, mikä ei ole toivottavaa ympäristön kannalta, etenkin ABS-muovin kohdalla. PLA-muovi on ympäristöystävällistä, mutta sen kierrättäminen ei ole helppoa kaikissa maissa. Alan harrastajat ovat yrittäneet uusiovalmistaa filamenttia hukkamateriaaleista, mutta ainakaan vielä riittävää laatua ei saavuteta niin sanotusti kotikonstein. Monet kuitenkin uskovat, että tulevaisuudessa voisi esimerkiksi maitopurkin kierrättää suoraan valmistusmateriaaliksi (Hausman & Horne 2014, 185). (Evans 2012, 20–21; Viitanen 2016; 3D Matterin www-sivut 2016)

Usein kappaleet tarvitsevat paljon jälkikäsitteilyä perinteisiä valmistusmenetelmiä hyödyntäen, eikä kovinkaan moni laite kykene vielä valmistamaan suoraan lopputuotteita. Suurien kappaleiden valmistaminen vie myös valtavasti aikaa, jolloin epäonnistuneen kappaleen takia kymmeniä tunteja saattaa mennä hukkaan. Joillain laitteilla on toki mahdollista seurata koko valmistusprosessia etänä kerros kerrokselta, jolloin mahdolliset virheet voidaan havaita heti (Puukko 2016, 15).

#### 4.1.1 Terveysvaikutukset

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa on mahdollista, että hengitysilmaan vapautuu epäpuhtauksia. Työterveyslaitos yhteistyössä Aalto-yliopiston ja Helsingin Yliopiston kanssa selvittävät tällä hetkellä näiden kaasu- ja hiukkaspäästöjen määriä eri työvaiheissa. Hanke päättyy vuoden 2016 lopussa, jonka jälkeen on tarkoitus ohjeistaa alan yrityksiä turvallisista työskentelytavoista ja laitteiden työturvallisuusnäkömät huomioivasta käytöstä. (Työsuojelurahaston www-sivut 2016)

Tähän mennessä hankkeessa suoritettujen kokeiden perusteella on havaittu, että sisäilmaan vapautuu huomattava määrä hiukkasia. Kokeessa käytettiin materiaalin pur-sotus -menetelmää ja materiaalina ABS-muovia. Päästöjen määrä ei kuitenkaan eronnut merkittävästi siitä määrästä, jolle ihmiset altistuvat muutoinkin esimerkiksi perinteisten tulostimien tai liikenteen aiheuttamien päästöjen vuoksi. Näille päästöille ei kuitenkaan tulisi tietoisesti altistua, koska niiden kaikkia terveydellisiä vaikutuksia ei vielä tiedetä. (Viitanen 2016)

PLA-muovia käytettäessä sisäilman hiukkaspitoisuus ei noussut merkittävästi, ellei valmistettaessa käytetty suositeltua suurempia lämpötiloja. Tällöinkin määrät olivat huomattavasti matalampia, kuin ABS-muovia käytettäessä. (Viitanen 2016)

#### 4.1.2 Immateriaalioikeusloukkaukset

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa käytettävien laitteiden tullessa yhä yleisimmiksi, myös immateriaalioikeusloukkaukset tulevat lisääntymään. Sen seurauksien epäil-lään olevan jopa suuremmat, kuin musiikkiteollisuudessa 2000-luvun alussa. Mark-kinatutkimusyhtiö Gartner arvioi vuonna 2013, että materiaalia lisäävä valmistus ai-heuttaisi globaalisti vähintään 100 miljardin menetykset immateriaaliloukkauksien vuoksi vuosittain (Gartnerin www-sivut 2016). Jo nyt näitä immateriaalioikeuslouk-kauksia tapahtuu jatkuvasti internetin kauppasivustoilla. Suurimpina ongelmina tule-vaisuudessa kuitenkin nähdään esimerkiksi aseiden, lääkkeiden ja kiellettyjen ainei-den hallitsematon valmistaminen (Lipson & Kurman 2013, 217–223). (Sellwood 2016)

Nykyiset immateriaalioikeuksia suojaavat menetelmät ovat vanhoja ja hitaita, eivätkä sen vuoksi pysy jatkuvasti kehittyvän teknologian perässä. Esimerkiksi patentin hakemiseen voi mennä vuosi, vaikka materiaalia lisäävän teknologian avulla valmis lopputuote voitaisiin saada markkinoille jo hyvin lyhyessäkin ajassa. (Sellwood 2016)

Patenttiongelmien toisessa päässä on taas tilanne, jossa Stratasys on onnistunut hankkimaan Yhdysvalloissa patentin materiaalia pursottavalle laitteelle, joka muun muassa ”rakentaa kappaleita lämmitetyssä rakennuskammiossa” (Pat. US6722872 B1). Ongelma muodostuu siitä, että esimerkiksi ABS-muovi on erittäin herkkä lämpötilavaihteluille valmistusvaiheessa. Jo pelkkä tuulenvire saattaa aiheuttaa kappaleen epäonnistumisen, joten lämmitetty ja suljettu rakennuskammio on lähes välttämättömyys. Euroopasta tällaisia muiden valmistajien laitteita voi kuitenkin ostaa – jopa Applen verkkokaupasta (Applen www-sivut 2016).

#### 4.1.3 Termistö

Alan termien kanssa tulee olla tarkkana, koska erityisesti yritykset käyttävät mielellään julkaisuissaan ja tuotekuvauksissaan omia termejään. Näistä osa on vakiintunut puhekieleenkin, kuten FDM. Esimerkiksi englanninkielisessä kirjallisuudessa termi ”3D Printing” viittaa usein vain kahteen alakategoriaan; materiaalin ruiskutukseen sekä sideaineen ruiskutukseen. Myös alan kirjallisuudessa (Lipson Kumar 2013, 71–77; Hausman & Horne 2014, 25–37) esitellään valmistusmenetelmiä yleisesti käyttäen yrityksien patentoimia termejä. Näitä termejä tulisi välttää tieteellisissä julkaisuissa esiteltäessä materiaalia lisäävää valmistusta yleisellä tasolla. (FIRPA:n www-sivut 2016)

FIRPA:n verkkosivuilla on alan sanasto suomeksi, ranskaksi ja englanniksi, mikä kylläkin perustuu jo vanhentuneeseen standardiin (ASTM F2792-12a; Lehtinen 2015; FIRPA:n www-sivut 2016). Joulukuussa 2015 julkaistun uuden standardin käännoistyö on käynnissä, ja se tulee olemaan valmis loppuvuodesta 2016 (ISO/ASTM 52900:en 2015; Tuomi henkilökohtainen tiedonanto 15.4.2016).



## 5 YHTEENVETO

Materiaalia lisäävä valmistus on erittäin mielenkiintoinen valmistustapa, jolla saattaa olla potentiaalia muuttaa radikaalistikin perinteisiä toimintatapoja. Jo nyt se voi olla perinteisiä valmistusmenetelmiä taloudellisempi menetelmä sarjavalmistuksessa, sekä joissain tapauksissa ainut mahdollinen menetelmä valmistaa jokin tuote.

Menetelmää hyödynnetään jo monella eri alalla. Se on vakiinnuttanut paikkansa prototyyppien valmistuksessa, sekä ottanut jalansijaa jo tuotantomenetelmänäkin. Mikäli kasvu jatkuu odotetulla tavalla, tulemme näkemään menetelmän erinomaisesti kannattavana teollisuuden tuotannossa 2–5 vuoden kuluttua. Kuluttajakäyttöön soveltuvien laitteiden kanssa samaan pisteeseen päästäneen hieman myöhemmin, 5–10 vuoden kuluttua.

Kappaleita pystytään valmistamaan jo lähes kaikista mahdollisista materiaaleista, mutta ongelmana on edelleen laitteiden hidas nopeus sekä rajoittunut kappaleiden suurin mahdollinen koko. Metallikappaleita valmistavien laitteiden yleistymistä hidastaa mainittujen ongelmien lisäksi suhteellisen korkea hinta sekä kalliit materiaalit.

Muovikappaleiden valmistamista voidaan pitää verrattain edullisena. Kuluttajahintaluokan laitteilla pystytään valmistamaan kappaleita, jotka voivat olla jälkikäsitellyn avulla riittävän laadukkaita jopa lopputuotteiksi. Kuluttajahintaluokan laitteiden käyttö ei ole kuitenkaan vielä tarpeeksi helppoa valtavan kysynnän saavuttamiseksi.

Materiaalia lisäävän valmistuksen kehittymistä edesauttaisi kysynnän kasvu, jota voitaisiin lisätä saamalla enemmän yrityksiä alalle mukaan. Vielä nykyäänkin on ongelmana, etteivät yritykset ole tietoisia materiaalia lisäävän valmistuksen tuomista mahdollisuuksista.

Menetelmään liittyy suuria tulevaisuuden haasteita, mutta samalla myös mahdollisuuksia. Rakennus- ja lääketeollisuudessa sen avulla voidaan mahdollisesti tulevaisuudessa säästää jopa ihmishenkiä. Toisaalta se saattaa myös uhata terveyttä, sekä tulee varmasti aiheuttamaan valtavasti immateriaalioikeusloukkauksia.

## 6 POHDINTA

Opinnäytetyötä varten ei ollut saatavissa juuri suomenkielistä kirjallisuutta, joten uutta englanninkielistä sanastoa joutui opettelemaan huomattavan paljon. Alalla käytetään useita kymmeniä erilaisia lyhenteitä, joiden ymmärtäminen on välttämätöntä kirjallisuutta lukiessa. Saatavilla ollut kirjallisuus oli melko vajavaista, koska se keskittyi pitkälti kuluttajahintaluokan laitteisiin ja materiaaleihin. Lisäksi ala on kehittynyt valtavasti parin viime vuodenkin aikana, joten osa kirjojen tiedoista ei enää pitänyt paikkaansa. Alan tuoreita tutkimuksia löytyi myös yllättävän vähän. Esimerkiksi Wohlers-raportti olisi ollut äärimmäisen hyödyllinen aineisto tätä opinnäytetyötä varten.

Muiden materiaalien lisäksi luin Theseuksesta yli 40 opinnäytetyötä, jotka oli kirjoitettu vuoden 2014 jälkeen ja liittyivät materiaalia lisäävään valmistukseen. Töistä huomasin selkeästi alaa vaivaavan kirjallisuuden puutteen. Suomeen todella kaivattaisiin kattavaa, asiantuntijan kirjoittamaa kirjaa aiheesta. Tällaista ei ole kuitenkaan kukaan kirjoittamassa ainakaan tällä hetkellä (Tuomi henkilökohtainen tiedonanto 15.4.2016). Alalta löytyy luettavaa kyllä paljon, mutta esimerkiksi alan englanninkieliset niin kutsutut uutissivustot eivät vaikuttaneet noudattavan hyvän journalismin periaatteita.

Työn tavoite oli perehtyä hyvin materiaalia lisäävään valmistukseen ja sen tuomiin mahdollisuuksiin, missä onnistuin haasteista huolimatta paremmin kuin olin odottanut. Teoreettinen tavoite oli myös päästä tilanteeseen, jossa jonkin tuotteen nähtyäni pystyisin materiaalia lisäävän valmistuksen kannalta hahmottamaan:

- voisiko tuotetta parantaa?
- paljonko se maksaisi tilattuna?
- paljonko maksaisi tuotteen valmistaminen itse?

Myös tämän tavoitteen kannalta onnistuin odotettua paremmin. Muutamia liiketoiminnallisia ajatuksia tuli mieleeni jo työn aikana, joista innostuneena hankin ensimmäisen oman laitteen.

Toteutin tämän opinnäytetyön täysipäiväisenä työskentelynä kevään 2016 aikana, mikä osoittautui huomattavasti haastavammaksi mitä olin sen kuvitellut. Luettuja sivuja tuli laskujeni mukaan yli 10 000, minkä lisäksi vierailin alan kaksilla messuilla sekä FIRPA:n vuosiseminaarissa. Haastattelin lisäksi alan asiantuntijoita henkilökohtaisesti mainituissa tapahtumissa sekä sähköpostin välityksellä. Keräämäni aineiston pohjalta kirjoitin yli 300 sivua muistiinpanoja.

FIRPA on verkkosivujensa ulkoasusta huolimatta julkaissut erittäin laadukasta ja arvokasta tietoa, jota kannattaa hyödyntää alaan tutustuessa. FIRPA on aktiivisesti esillä alan tapahtumissa, sekä osallistuu myös kansainvälisiin tapahtumiin. Yhdistykseen kuuluu Suomen huippuasiantuntijoita, jotka ovat myös kansainvälisesti tunnettuja henkilöitä alalla. Heidän vuosiseminaarissaan oli puhumassa alan asiantuntijoita myös Suomen ulkopuolelta, jopa Yhdysvalloista saakka. Haluaisinkin kiittää näin lopuksi FIRPA:n puheenjohtaja Jukka Tuomea hänen myöntämästään ”stipendistä”, jonka avulla minun oli mahdollista osallistua heidän vuosiseminaariinsa.

## LÄHTEET

- 3D Crushin www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.3dcrush.fi>
- 3D Matterin www-sivut. Viitattu 13.5.2016. <http://www.my3dmatter.com>
- 3D Platformin www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.3dplatform.com>
- 3D Print Canal Housen www-sivut. Viitattu 9.6.2016.  
<http://www.3dprintcanalhouse.com>
- 3D Systemsin www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.3dsystems.com>
- AAAS:n verkkosivut. Viitattu 9.5.2016. <http://www.eurekalert.org>
- Alonen, A., Hietikko, E., Hoffren, M., Kesonen, M. & Urpilainen, A. 2015. DEADMAN -tutkimushankkeen loppuraportti. Muu julkaisu. Savonia ammattikorkeakoulu. Viitattu 9.5.2016. <http://www.portal.savonia.fi>
- AMR Europen www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.amreurope.com>
- Applen www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.apple.com>
- ASTM F2792-12a. 2012. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (poistunut käytöstä 2015), West Conshohocken: ASTM International. <http://www.astm.org>
- Atzeni, E., Iuliano, L., Minetola, P. & Salmi, A. 2010. Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts. Rapid Prototyping Journal Vol 16 5, 308–317. Viitattu 7.5.2016. <http://www.emeraldinsight.com>
- Atzeni, E., Salmi, A. 2012. Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol 62, 1147–1155. Viitattu 9.5.2016.
- Autodeskin www-sivut. Viitattu 12.5.2016. <http://www.autodesk.com>
- Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E. & Hague, R., 2012. Combined Build–Time, Energy Consumption and Cost Estimation for Direct Metal Laser Sintering, Proceedings of the Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium. Teksasin yliopisto, Austin.
- Bikas, H., Stavropoulos, P. & Chyssolouris, G. 2015. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 1, 389–405. Viitattu 7.5.2016. <http://www.springer.com>
- Bogle, A. 2016. Man has 3D-printed vertebrae implanted in world-first surgery. Mashable 25.2.2016. Viitattu 9.5.2016. <http://www.mashable.com>

- Brittilääkärit tekivät miehelle uudet kasvot 3D-tulostuksella. 2014. Helsingin Sanomat 12.03.2014. Viitattu 9.5.2016. <http://www.hs.fi>
- Carlström, R. 2016. Digital Metal® - A technology for making small metal components. Esitys Nordic 3D Expo -messuilla 15.4.2016.
- Carlström, R. Höganäs Groupiin kuuluvan Digital Metal AB:n pääjohtaja. Henkilökohtainen tiedonanto 15.4.2016. Haastattelijana Markus Korpela. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.
- Chae, P., Rozen M., McMenamin G., Findlay, W., Spsychal, T. & Hunter-Smith, J. 2015. Emerging applications of bedside 3D printing in plastic surgery. *Front. Surg.* 2:25. Viitattu 7.5.2016. <http://dx.doi.org/10.3389/fsurg.2015.00025>
- Contour Craftingin www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.contourcrafting.com>
- Cooper-White, M. 2015. How 3D Printing Could End The Deadly Shortage Of Donor Organs. *Huffingtonpost* 1.3.2015. Viitattu 9.5.2016. <http://www.huffingtonpost.com>
- Davison, N. 2015. 3D-printed cities: is this the future? *The Guardian* 26.2.2015. Viitattu 9.5.2016. <http://www.theguardian.com>
- Deveson, A. 2016. A closer look at the OLO Smartphone 3D Printer Kickstarter Campaign. Viitattu 8.5.2016. <https://www.youtu.be/k9WhQ7cC2fg>
- DWS LAB:n www-sivut. Viitattu 12.5.2016. <http://www.dwslab.com>
- EOS:n www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.eos.info>
- Espoon kaupungin www-sivut. Viitattu 9.5.2016. <http://www.espoo.fi>
- Evans, B. 2012. *Practical 3D printers: The science and art of 3D printing*. New York: Apress.
- Fabrisonicin www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.fabrisonic.com>
- FIRPA:n www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.firpa.fi>
- Formlabsin www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.formlabs.com>
- Gartnerin www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.gartner.com>
- Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. 2010. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*. 2. painos. New York: Springer-Verlag. Viitattu 8.5.2016. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Grunewald, S. 2015. 3D printer sales are expected to double in 2016, reach 5,6 million units sold by 2019. *3Dprint* 2.10.2015. Viitattu 11.5.2016. <http://www.3dprint.com>
- Hausman, K. & Horne, R. 2014. *3D Printing For Dummies*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Heikkinen, S. 2016. RE: Muutama kysymys opinnäytetyötä varten. Vastaanottaja: markus.korpela@student.samk.fi. Lähetetty 7.4.2016 klo 8.56. Viitattu 8.5.2016.

Heikkinen, T. 2016. Investoinnit metallitulostimeen ja lupaavimmat sovellusalueet. Seminaariesitys Suomen Pikavalmistusyhdistyksen vuosiseminaarissa 14.4.2016

HobbyKingin www-sivut. Viitattu 7.5.2016. <http://www.hobbyking.com>

Husa, T. 2012. Kuluttajien näkemyksiä 3D-tulostimen käyttötavoista ja -motiveista – Hyödyllinen työkalu, kiehtova lelu vai ikkuna tulevaisuuteen?. Helsingin yliopisto. Maatalous- ja metsätieteellinen tiedekunta. Pro gradu -tutkielma. Viitattu 13.5.2016. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-201507212301>

Höganäsin www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.hoganas.com>

IBM:n www-sivut. Viitattu 15.5.2016. <http://www.ibm.com>

ISO/ASTM 52900:en 2015. Additive manufacturing. General principles. 2015. International Organization for Standardization. Geneve: ISO. Viitattu 7.5.2016. <http://www.iso.org>

Kalevala Korun www-sivut. Viitattu 9.5.2016. <http://www.kalevalakoru.fi>

Kang, H-W., Lee, S., Ko, I., Kengla, C., Yoo, J. & Atala, A. 2016. A 3D bioprinting system to produce human-scale constructs with structural integrity. Nature Biotechnology 34, 312–319. Viitattu 9.5.2016. <http://dx.doi.org/10.1038/nbt.3413>

Khoshnevis, B. 2012. Contour Crafting: Automated Construction: Behrokh Khoshnevis at TEDxOjai. Viitattu 9.5.2016. <https://www.youtu.be/JdbJP8Gxqog>

Kulmala, H. 3D Printing - Yhteenveto ja päätös - Harri Kulmala. Viitattu 9.5.2016. <https://www.youtu.be/tMTWHSQnufc>

Laakso, P., Komi, E., Puukko, P., Kokkonen, P., Ruusuvuori, K., Jokinen, A. & Savolainen, M. 2016. Suunnittelun avulla enemmän lisäarvoa 3D-tulostukseen - Case venttiililohko. Hitsaustekniikka 1, 18–20.

Lassila, J. & Tuomi, J. 2016. Neljännesvuosisata 3D-tulostusta. Hitsaustekniikka 1, 4–7.

Launzerin www-sivut. Viitattu 9.5.2016. <http://www.launzer.com>

Lehti, M., Rouvinen, P. & Ylä-Anttila, P. 2012. Suuri Hämmennys: Työ ja tuotanto digitaalisessa murroksessa. Helsinki: Taloustieto Oy. Viitattu 8.5.2016. <https://www.etla.fi/wp-content/uploads/2012/09/B254.pdf>

Lehtinen, K. 2015. Fabrication additive ou Impression 3D. Aperçus sur une variation terminographique. Pro gradu -tutkielma. Turun yliopisto: Humanistinen tiedekunta. Viitattu 9.5.2016. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201501211224>

Leino, M. 2016. Tutkimusryhmän vetäjä, SAMK Automaation tutkimusryhmä. Henkilökohtainen tiedonanto 27.4.2016. Haastattelijana Markus Korpela. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Lindemann, C., Jahnke, U., Moi, M. & Koch, R. Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing. Conference Paper: Solid Freeform Fabrication Symposium 2012, 177–188. Texas.

Lipson, H. & Kurman, M. 2013. Fabricated: The New World of 3D Printing. New York: John Wiley & Sons.

Local Motorsin www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.localmotors.com>

Loughboroughin yliopiston www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://http://www.lboro.ac.uk>

Lundvall, M. 2016. 3D-tulosteet sydänkirurgian apuna. Yle 7.3.2016. Viitattu 9.5.2016. <http://www.yle.fi>

Maker3D:n www-sivut 2016. Viitattu 7.5.2016. <http://www.maker3d.fi>

Micallef, J. 2015. Beginning design for 3D printing. New York: Apress.

Microsoftin www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.microsoft.com>

Minifactoryn www-sivut. Viitattu 8.6.2016. <http://www.minifactory.fi>

MonzaMakersin www-sivut. Viitattu 9.5.2016. <http://www.monzamakers.com>

NASA:n www-sivut 2016. Viitattu 8.5.2016. <http://www.nasa.gov>

Orban, C. 2015. Speed or quality? The correct 3D printing parameters for best result. 3Dprintingtech 20.7.2015. Viitattu 11.6.2016. <http://www.3dprintingtech.cc>

Pat. US6722872 B1. 2004. High temperature modeling apparatus. Stratasys, Inc. Swanson, W., Turley, P., Leavitt, P., Karwoski, P., LaBossiere, J. & Skubic, R. US 10/018,673, July 23, 2000. Publ. Apr 20, 2004. Viitattu 9.6.2016. <http://www.google.com/patents/US6722872>

Pehkonen, K. Suomalaisautoilija tyrmistyi 120 euron varaosasta - tulosti itse 0,30 eurolla. Iltalehti 1.2.2016. <http://www.iltalehti.fi>

Pekkarinen, J. 2016. Directed Energy Deposition (DED) – Suorakerrostus. Hitsaustekniikka 1, 25–27.

Perez, A., Roberson, D. & Wicker, R. 2014. Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials. Journal of Failure Analysis and Prevention Vol 14 3, 343–353. Viitattu 8.5.2016. <http://www.springer.com>

Piili, H. & Salminen, A. 2016. Lisäävän valmistuksen eli ns. 3D-tulostuksen opetuksesta ja koulutuksesta. Hitsaustekniikka 1, 21–24.



Piili, H. & Salminen, A. 2016. Näin opetan lisäävää valmistusta ja 3D-tulostusta: Pohdintoja uuden teknologian opetuksesta ja koulutuksesta. Muu julkaisu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Viitattu 8.5.2016. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201602125916>

Piili, H., Hirvimäki, M., Väistö, T., Nyamekye, P., Pekkarinen, J. & Salminen, A. 2014. Katsaus lisäävän valmistuksen (aka 3D-tulostus) mahdollisuuksiin ja kustannuksiin metallisten tuotteiden valmistuksessa: Case jauhepetitekniikka. Muu julkaisu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto & Lappeenrannan ammattikorkeakoulu. Viitattu 8.5.2016. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-265-671-1>

Ponsford, M. ja Glass, N. 2014. The night I invented 3d printing. CNN. Viitattu 8.5.2016. <http://www.cnn.com>

Purtonen, T. 2014. Lappeenrannan teknillisen yliopiston Tuomas Purtošen esitys metallien 3D-tulostuksesta Teollinen internet (IIoT) ja 3D-tulostusseminaarissa 16.6.2014. Viitattu 8.5.2016. [https://www.youtube.be/vRwR34\\_IFy0](https://www.youtube.be/vRwR34_IFy0)

Puukko, P. 2016. Minne menet, metallien 3D-tulostus? Hitsaustekniikka 1, 14–15.

Roland Bergerin www-sivut. 2013. Additive Manufacturing: A game changer for the manufacturing industry? Viitattu 12.5.2016. <http://www.rolandberger.com>

Seifi, M., Salem, A., Beuth, J., Harrysson, O. & Lewandowski, J. 2016. Overview of Materials Qualification Needs for Metal Additive Manufacturing. JOM Vol 68 3, 747–764. Viitattu 8.5.2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-015-1810-0>

Sellwood, S. 2016. Source3-yrityksen perustaja. New 3D printing business models - challenges and oppotunies in the consumer market. Seminaariesitys Suomen Pika-valmistusyhdistyksen vuosiseminaarissa 14.4.2016.

Sharma, R. 2013. The 3D Printing Revolution You Have Not Heard About. Forbes 8.6.2013. Viitattu 9.5.2016. <http://www.forbes.com>

Simons, M. 2015. Metallien 3D-tulostus – uudet liiketoimintamahdollisuudet. Viitattu 12.5.2015. <http://www.vtt.fi>

Sketchfabin www-sivut. Viitattu 9.5.2016. <http://www.sketchfab.com>

SLM Solutionsin www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.slm-solutions.com>

Stratasyksen www-sivut. Viitattu 7.5.2016. <http://www.stratasys.com>

Suomen Kultaseppien Liiton www-sivut. Viitattu 9.5.2016. <http://www.suomenkultaseppienliitto.fi>

Tekesin www-sivut. Viitattu 8.6.2016. <http://www.tekes.fi>

Thingiversen www-sivut. Viitattu 9.5.2016. <http://www.thingiverse.com>

This drivable car was 3D printed in 44 hours. 2015. Viitattu 8.5.2016. <https://www.youtube.com/watch?v=WwwwvNjQaQ>

Thomas, D. & Gilbert, S. 2014. Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing: A Literature Review and Discussion. NIST Special Publication 1176. U.S Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. Viitattu 7.5.2016. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>

Threedingin www-sivut. Viitattu 9.5.2016. <http://www.threeding.com>

Tuomi, J. 2016a. 3D-tulostaminen muuttaa maailmaa. Viitattu 7.5.2016. <http://www.arena.yle.fi/1-3405820>

Tuomi, J. 2016b. 3D-tulostusalan verkostot Suomessa. Esitys Nordic 3D Expo -messuilla 15.4.2016.

Tuomi, J. 2016c. Erikoislähetys Nordic 3D Expo -messuilta. Viitattu 7.5.2016. <http://arena.yle.fi/1-3370461>

Tuomi, J. 2016. Puheenjohtaja, Suomen Pikavalmistusyhdistys ry. Henkilökohtainen tiedonanto 15.4.2016. Haastattelijana Markus Korpela. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Tuomi, J. 2016. RE: Opinnäytetyö lisäävistä valmistusmenetelmistä. Vastaanottaja: markus.korpela@student.samk.fi. Lähetetty 9.4.2016 klo 14.16. Viitattu 8.5.2016.

Turun kaupungin www-sivut. Viitattu 9.5.2016. <http://www.turku.fi>

Urheilumuseon www-sivut. Viitattu 9.5.2016. <http://www.urheilumuseo.com>

Vestala, V. 2016. RE: Stratasys J750 moniväri-monimateriaali 3D-tulostin. Vastaanottaja: markus.korpela@student.samk.fi. Lähetetty 28.4.2016 klo 22.40. Viitattu 8.5.2016.

Vierula, H. 2013. 3D-tulostus tulossa lääkärin käyttöön. Lääkärilehti 14.6.2013. Viitattu 9.5.2016. <http://www.laakarilehti.fi>

Viitanen, A-K. 2016. Occupational Health aspects related to 3D printing. Seminaariesitys 14.4.2016 Suomen Pikavalmistusyhdistyksen vuosiseminaarissa.

Vossi, M. 2016. Erikoislähetys Nordic 3D Expo -messuilta. Viitattu 8.5.2016. <http://arena.yle.fi/1-3370461>

Vossi, M. Vossi Group Oy:n liiketoiminnan kehitysjohtaja. Puhelinhaastattelu 29.4.2016. Haastattelijana Markus Korpela. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Voxeljetin www-sivut. Viitattu 8.5.2016. <http://www.voxeljet.de>

WinSunin www-sivut. Viitattu 9.5.2016. <http://www.yhbm.com>

Wittbrodt, B., Laureto, J., Tymrak, B. & Pearce, J. 2015. Distributed manufacturing with 3-D printing: a case study of recreational vehicle solar photovoltaic mounting systems. Journal of Frugal Innovation 1:1. Viitattu 12.5.2016. <http://dx.doi.org/10.1186/s40669-014-0001-z>

Wohlers Associatesin www-sivut. Viitattu 7.5.2016.  
<http://www.wohlersassociates.com>

Xometryn www-sivut. Viitattu 12.5.2016. <http://www.xometry.com>

AM Standardized process category	Commercial definition	Recommended Min. Wall Thickness	Recommended Min. Details	Typical Max. Build Volume	Typical Material Capabilities	Typical Use	Comments		
<b>Binder Jetting</b>	Three Dimensional Printing (3DP)	1.5 to 2 mm	0.8 mm	340 x 240 x 200 mm	C (19) RP	Excellent for demonstration models with color printing.			
	Voxeljet (Sand Casting)	1 mm	0.8 to 1 mm	4000 x 2000 x 1000 mm	S (20) RT	Typical use for manufacturing of castings molds			
<b>Direct Energy Deposition</b>	Binding and sintering processes	1 mm	0.8 to 1 mm	762 x 393 x 393 mm	M (13, 14, 15, 16, 17, 18) RM	A process in which a powder bed is binded layer by layer and then sintered in a oven for end use applications			
	Laser-Engineered Net Shaping (LENS)	1 mm	0.5 mm	900 x 1500 x 900mm	M (13, 14, 15, 16, 17, 18) RT, RM	Production of tooling, hybrid manufacturing, reverse engineering and repair medical and aeronautic applications			
<b>Material Extrusion</b>	Fused Deposition Modeling (FDM)	1 mm	0.3 mm	400 x 355 x 400 mm	P (1, 2, 3, 4, 5, 6) RP, RM	Ideal for Conceptual models, Engineering models, and functional testing prototypes			
	Polyjet	1 mm	0.2 to 0.3 mm	500 x 400 x 200mm	P (7, 8, 9, 10, 11, 12) RP	Multimaterial printing possibilities (Conex series machines)			
<b>Powder Bed Fusion</b>	Multijet Modeling (MJM)	0.7 mm	0.2 mm	150 x 150 x 150 mm	P (2) RP, RM	Models with color printing, hardplastic or cast-friendly wax parts. Applications ranging from concept models to RM			
	Selective Laser Sintering (SLS)	0.7 to 1 mm	0.5 mm	400 x 400 x 400 mm	M (13, 14, 15, 16, 17, 18) RP, RM	Ideal for durable, functional parts, capable of producing snap fits and living hinges			
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	0.3 mm	0.127 mm	400 x 400 x 400 mm	M (13, 14, 15, 16, 17, 18) RM	Industrial demanding applications, for automotive, aeronautics, engineering, medical and dental engineering			
	Selective Laser Melting (SLM)	0.3 mm	0.180 mm	500 x 280 x 325 mm	M (13, 14, 15, 16, 17, 18) RM	Industrial demanding applications, for automotive, aeronautics, engineering, medical and dental engineering			
	Electron Beam Melting (EBM)	1 mm	0.3 mm	Ø350 x 380 mm	M (16, 17, 18) RM	Industrial demanding applications for orthopedic implants and aerospace applications			
<b>Sheet Lamination</b>	Selective Heat Sintering (SHS)	1 mm	N/A	200 x 157 x 140 mm	P (2) RP	Functional samples of prototypes for tests and use in practice, before putting the final product into production.			
	Laminated Object Manufacturing (LOM)	1 mm	0.205 mm	812 x 559 x 508 mm	SM (21) RP, RT	Form/fit testing, Less detailed parts an drilling patterns			
<b>Vat Photopolymerization</b>	Stereolithography (SLA)	1 mm	0.3 mm	2100 x 700 x 800 mm	P (7, 8, 9, 10, 11, 12) RP, RT, RM	Demo models, accurate models and models with limited functionality.			
	Digital Light Processing (DLP)	1 mm	0.5 mm	192 x 120 x 230 mm	P (7, 8, 9, 10, 11, 12) RP, RT	Demo models, accurate models and models with limited functionality			
<b>P - Plastics</b>	Thermoplastic materials	ABS		1					
		Polyamide		2					
		PLA		3					
		PC		4					
		Dulcem		5					
		Thermoplastic blends (PC-ABS, Bio-PLA, etc...)		6					
		High detail resin		7					
		Transparent resin		8					
		Coloured plastics		9					
		Rubber-like		10					
		ABS-like		11					
<b>M - Metals</b>	Ferrous materials	PP-like		12					
		Stainless steel		13					
		Marringing Steel (tool steels)		14					
		Aluminum Alloy		15					
		Titanium Alloys		16					
		CoCr Alloys		17					
		NiCo Alloys (Inconel)		18					
		aluminum oxides		19					
		<b>C - Ceramics</b>	Non-Ferrous materials	aluminum oxides		20			
				SiO2		21			
		<b>S - Sand casting</b>							
<b>SM - Sheet Materials</b>									

**Rapid Prototyping (RP):**  
AM of a design, often iterative, for form, fit, or functional testing, or combination thereof.

**Rapid Tooling (RT):**  
The use of AM to make tools, either directly by making parts that serve as the actual tools or tooling components, such as mold inserts. Or indirectly, by producing patterns that are used in a secondary process to produce the actual tools.

**Rapid Manufacturing (RM):**  
The use of AM for direct part production to be used in end applications.

LIITE 2

Materiaali	Vahamalli valamista varten	hiekkakivi – kaikki värit mahdollisia sekaisin	Keraminen "tulostus" + lasitus	Teräs (60 % 420 RST 40 % pronssi)	Pronssi (raw) "käsittelemätön"	Messinki (raw) vahamuottiin valaminen
Valmistusmenetelmä	MIM	Zcorp	Keramikoinen, kiiltävän valkoinen, hauras	Metallin "tulostaminen"	Vahamuottiin valaminen	kiiltävä, tasainen pinta
Laatu	korkea resoluutio, tasainen pinta	korkea pinta, hauras	hauras	Vahva, magneetti jää kiinni	tasainen pinta	0,3
Min yksityiskohta (mm)	0,1	0,4	2	2	1	0,3
Min tiheys (mm)	0,5	0,5	2	3	3	0,6
Max koko (mm)	75x75x50	250x380x200	340x240x170	762x393x393	90x90x100	89x89x100
Lämmönkesto (°C)	60	60	500	831	831	900
Käsitelyaika (USD)	10,00	3,00	6,00	6,00	6,00	10,00
USD / cm3	8,00	0,75	0,35	8,00	16,00	16,00
Esimerkkikappaleen (70 cm³) hinta (USD)	570,00	55,5	30,5	566,00	1130,00	1130,00
Hinta euroina (1 USD = 0,87 EUR)	495,90	48,29	26,54	492,42	983,10	983,10

Materiaali	muovi - kaikki värit mahdollisia sekaisin	elastomeeri	akryyliipolymeeri MIM (MultiJet Modeling)	akryyliipohjainen valopolymeeri – läpinäkyvä, valkoinen tai musta (Alumide®)	muovi – seassa metallia värjätty	muovi – kiillotettu tai	muovi – musta	muovi – valkoinen
Valmistusmenetelmä	Projekt	SLS	erittäin joustava, karkhea	Objekt	SLS	harmaa, metallinomainen, jähkä, hauras	kiiltävä	kiiltävä
Laatu	karkhea, rakeinen	erittäin joustava, karkhea	tasainen pinta, hauras	tasainen pinta, hauras	kiiltävä	tasainen pinta, vähän karkhea, kirkas	kiiltävä	kiiltävä
Min yksityiskohta (mm)	0,2	0,2	1	0,1	0,2	0,7	0,2	0,2
Min tiheys (mm)	0,7	0,7	0,8	0,3	1	0,8	0,7	0,7
Max koko (mm)	150x150x150	300x300x250	284x184x203	80 (pehmenee)	250x250x200	310x230x180	150x150x150	230x180x320
Lämmönkesto (°C)	57	90	1,95	5,00	48	78	80	80
Käsitelyaika (USD)	3,00	2,00	1,75	3,49	2,50	1,50	2,00	1,75
USD / cm3	2,00	1,43,00	1,24,45	2,49,30	2,99	1,99	1,50	1,75
Esimerkkikappaleen (70 cm³) hinta (USD)	143,00	124,45	124,45	249,30	211,80	140,80	107,00	124,25
Hinta euroina (1 USD = 0,87 EUR)	124,41	108,27	108,27	216,89	184,27	122,50	93,09	108,10

Materiaali	Sterling-hopea (raw)	platina	kulta (18 ka)	kulta (14 ka)
Valmistusmenetelmä	Vahamuottiin valaminen	Vahamuottiin valaminen	Vahamuottiin valaminen	Vahamuottiin valaminen
Laatu	kiiltävä, tasainen pinta	kiiltävä, tasainen pinta	kiiltävä, tasainen pinta	kiiltävä, tasainen pinta
Min yksityiskohta (mm)	0,3	0,4	0,4	0,4
Min tiheys (mm)	0,6	0,8	0,8	0,8
Max koko (mm)	89x89x100	89x89x100	89x89x100	89x89x100
Lämmönkesto (°C)	850	879	879	879
Käsitelyaika (USD)	30,00	100,00	100,00	50,00
USD / cm3	20,00	1750,00	800,00	600,00
Esimerkkikappaleen (70 cm³) hinta (USD)	1430,00	122600,00	56100,00	42050,00
Hinta euroina (1 USD = 0,87 EUR)	1244,10	106662,00	48807,00	36583,50