

Tuomas Teppola

## **MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS RAKENTAMISESSA**

# **MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS RAKENTAMISESSA**

Tuomas Teppola  
Opinnäytetyö  
Kevät 2019  
Rakennusarkkitehdin tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Rakennusarkkitehdin tutkinto-ohjelma

---

Tekijä(t): Tuomas Teppola

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Materiaalia lisäävä valmistus rakentamisessa

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Additive Manufacturing in Construction

Työn ohjaaja(t): Kimmo Illikainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2019

Sivumäärä: 67

---

Materiaalia lisäävä valmistus, joka tunnetaan myös 3D-tulostamisena, on menetelmä, jossa fyysinen objekti rakennetaan ainetta lisäävillä tekniikoilla. Materiaalia lisäävä valmistus tuo rakennusalalle monia etuja perinteisiin tekniikoihin verrattuna, ja jotta sitä voitaisiin täysin hyödyntää, tulee tulostusprosessi ymmärtää kokonaisuudessaan.

Opinnäytetyössä käsiteltiin materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiä, materiaaleja, käyttökohteita ja niiden sovelluksia rakennusalalla. Työn tavoitteena oli selvittää yleistietoa materiaalia lisäävän valmistuksen tämän hetkisestä kehityksestä, käyttökohteista ja potentiaalisista sovelluksista rakennusalalla.

Kirjallisuuskatsauksena suoritettu tutkimus käsitteli materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiä ja niissä käytettyjä materiaaleja yleisellä tasolla. Tarkempi tutkinta kohdistui materiaalia lisäävän valmistuksen tämän hetkiseen tilanteeseen rakennusalalla, sementtipohjaisten materiaalien lisäävän valmistuksen menetelmiin sekä materiaaliominaisuuksiin ja valmiisiin rakennusalan esimerkipilotteihin. Lisäksi työssä selvitettiin materiaalia lisäävän valmistuksen tulevaisuuden potentiaalia ja haasteita rakennusalalla.

Työssä ilmeni materiaalia lisäävän valmistuksen tuovan rakennusalalle monia etuja perinteisiin tekniikoihin verrattuna. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa pienemmän materiaalihävikin ja energiakulutuksen, kustannustehokkaamman rakentamisen sekä uudenlaisia valmistusmenetelmiä, rakenteita ja materiaaleja. Lisäksi selvisi, että digitaalisen valmistuksen, jota materiaalia lisäävä valmistus on osana, integroiminen osaksi perinteistä työmaatoimintaa ja rakentamista vaatii kuitenkin vielä kehitystä ja lisätutkintaa. Kehittymisen mahdollistamiseksi on rakennusalalla hyödynnettävä hybriditekniikoita, jotka yhdistävät materiaalia lisäävää, poistavaa ja muovaavaa valmistusmenetelmää kasvavassa määrin.

---

Asiasanat: materiaalia lisäävä valmistus, 3D-tulostus, rakentaminen, soveltaminen

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Construction Architecture

---

Author(s): Tuomas Teppola  
Title of thesis: Additive Manufacturing in Construction  
Supervisor(s): Kimmo Illikainen  
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2019  
Pages: 67

---

Additive manufacturing, which is also known as 3D printing, is a method in which a physical object is built by using substance adding techniques. Additive manufacturing brings many benefits to the construction industry over traditional techniques. For the additive manufacturing to be fully utilized, the printing process needs to be fully understood.

The thesis reviewed methods, materials and applications of additive manufacturing in the construction industry. The aim of this thesis was to provide general knowledge about the current development and potential applications of additive manufacturing in the construction industry.

The study was conducted as a literature review, focusing on methods and materials used in additive manufacturing on a general level. The more detailed research focused on the current state of additive manufacturing in the construction industry, the properties of cementitious materials and the methods for manufacturing with them. Finished construction pilots were also reviewed. In addition, the future potential and challenges of additive manufacturing in the construction industry were explored.

The review showed that additive manufacturing brings many benefits to the construction industry over traditional techniques. Additive manufacturing enables lower material spoilage and energy consumption, more cost-efficient construction, novel manufacturing methods, structures and materials. However, it was also found that the integration of digital manufacturing, of which additive manufacturing is a part of, as part of conventional on-site construction still requires further development and research. In order to enable technological advancement, the construction industry should make use of hybrid techniques which combine additive, subtractive and formative manufacturing processes, in an increasing amount.

---

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, construction, application

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
LYHENTEET JA SANASTO	7
1 JOHDANTO	9
2 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS JA 3D-TULOSTAMINEN	11
3 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN TULOSTUSTEKNIIKAT, MATERIAALIT JA KÄYTTÖKOHTEET YLEISESTI	15
3.1 Pursotus	15
3.2 Jauhepetisulatus	18
3.3 Valokovetus altaassa	20
3.4 Materiaalin suihkutus ja sideaineen suihkutus	23
3.5 Kerroslaminointi	24
3.6 Suorakerrostus	25
3.7 Lisäävän valmistuksen materiaalit	26
3.7.1 Keraamiset materiaalit	27
3.7.2 Raaka maa-aines	28
3.7.3 Metallit ja metalliseokset	28
3.7.4 Polymeerit	29
3.7.5 Polymeerikomposiitit	30
3.7.6 Sementtipohjaiset	30
3.7.7 Sementtipohjaiset komposiitit	32
4 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS RAKENTAMISESSA	33
4.1 Betoni- ja sementtipohjaisen rakenteen 3D-tulostaminen	35
4.1.1 Contour crafting	36
4.1.2 Partikkelipetitulosaminen	38
4.2 Rakennusten digitaalinen valmistus	41
4.3 Rakennusalan esimerkkipilotteja	42
5 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN POTENTIAALI RAKENTAMISESSA	48
5.1 Uudenlaisia muotoja	49

5.2 Muodon optimointi	50
5.3 Kustomoitavat rakenneosat	51
5.4 Hyödyntäminen korjaushankkeissa	52
5.5 Valmistus työmaalla ja sen ulkopuolella	54
5.6 Mittatoleranssiin sovittaminen	54
5.7 Valmistusmenetelmien yhdistäminen	55
5.8 Tulevaisuuden materiaalit	55
5.8.1 Usean materiaalin tulostaminen	56
5.8.2 Paikkasidonnaiset materiaalit	58
5.9 Rajoitteet	59
6 YHTEENVETO	60
LÄHTEET	61

## LYHENTEET JA SANASTO

3D-tulostaminen	Materiaalia lisäävä valmistus ei-teknisissä yhteyksissä
3DP	3D Printing
ABS	Akryylinitriilibutadieenistyreeni
AM	Additive Manufacturing eli materiaalia lisäävä valmistus
AMF	Additive Manufacturing File Format
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BJ	Binder Jetting
CAD	Computer-aided Design
CAM	Computer-aided Manufacturing
CC	Contour Crafting
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
DED	Direct Energy Deposition
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
LBM	Laser Beam Melting
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LMD	Laser Metal Deposition

MJ	Material Jetting
PBF	Powder Bed Fusion
PLA	Polylaktidi
Reologia	Oppi fluidin muodonmuutoksista ja virtauksista
Regoliitti	Kivipintaisen taivaankappaleen pinnassa olevaa hienojakoista pölyn kaltaista ainesta
SL	Sheet Lamination
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL-tiedosto	Tiedostomuoto, joka määrittää 3D-mallin geometrian tasokolmioiden avulla
Tiksotropia	Lepojähmeys
Topologia	Jonkin asian spatiaalinen muoto
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing



# 1 JOHDANTO

Materiaalia lisäävä valmistus (Additive Manufacturing, AM), joka tunnetaan myös ei-teknisissä yhteyksissä 3D-tulostamisena, on yhteinen nimitys menetelmille, jossa fyysinen kappale valmistetaan ainetta lisäävillä tekniikoilla geometriakuvauksen perusteella. Materiaalia lisäävän valmistuksen tekniikat ovat jo vakiintuneet maailmalla arkkitehtuurissa, kartografiassa, koulutuksessa, lääketieteessä sekä auto-, ilmailu-, lelu-, teknologia- ja viihdeteollisuudessa. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017.)

Materiaalia lisäävä valmistus on saanut paljon huomiota rakennusalalla. Useita kokeellisia ja konseptien toimivuuden todistavia hankkeita on jo toteutettu. Materiaalia lisäävällä valmistuksella on potentiaalia rakennusteollisuudessa, sillä se mahdollistaa pienemmän materiaalihävikin ja energiankulutuksen, arkkitehtonisesti vapaamman suunnittelun sekä kokonaisuudessaan alhaisemman resursien kulutuksen. (Camacho – Clayton – O’Brien – Seepersad – Juenger – Ferron – Salamone 2018; Ghaffar – Corker – Fan 2018.)

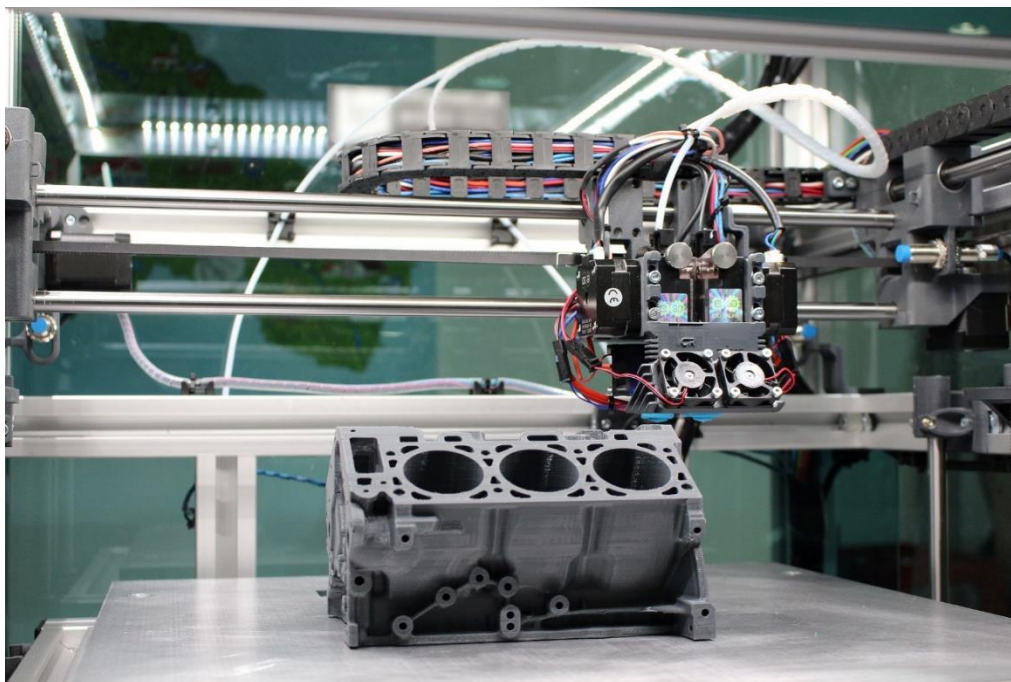
Työn tavoitteena on antaa yleistietoa materiaalia lisäävän valmistuksen tämän hetkisestä kehityksestä, käyttökohteista ja potentiaalisista sovelluksista rakennusalalla. Tarkempi tutkinta kohdistuu sementtipohjaisten materiaalien 3D-tulostamisen menetelmiin, materiaaliominaisuuksiin, tulevaisuuden potentiaaliin ja haasteisiin.

Työn alkuosassa käydään läpi materiaalia lisäävän valmistuksen prosessi, tekniikat, materiaalit ja näiden käyttökohteet yleisellä tasolla. Tämän jälkeen tarkastellaan materiaalia lisäävän valmistuksen tämän hetkistä tilannetta, käyttökohteita sekä käytännön sovelluksia rakentamisessa. Tarkastelun jälkeen käydään läpi yleisimmät sementtipohjaisilla materiaaleilla suoritettavat materiaalia lisäävän valmistuksen tekniikat ja käyttökohteet, joiden sovelluksia käsitellään myös osana rakennusalalla tapahtuvaa digitaalisen valmistuksen kehitystä. Digitaalisen valmistuksen tulevaisuuden potentiaalin jälkeen esitellään materiaalia lisää-

vän valmistuksen esimerkkipilotteja rakennusalalla. Työn lopussa käsitellään tarkemmin materiaalia lisäävän valmistuksen, erityisesti sementtipohjaisten materiaalien, potentiaalia ja haasteita rakennusalalla.

## 2 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS JA 3D-TULOSTAMINEN

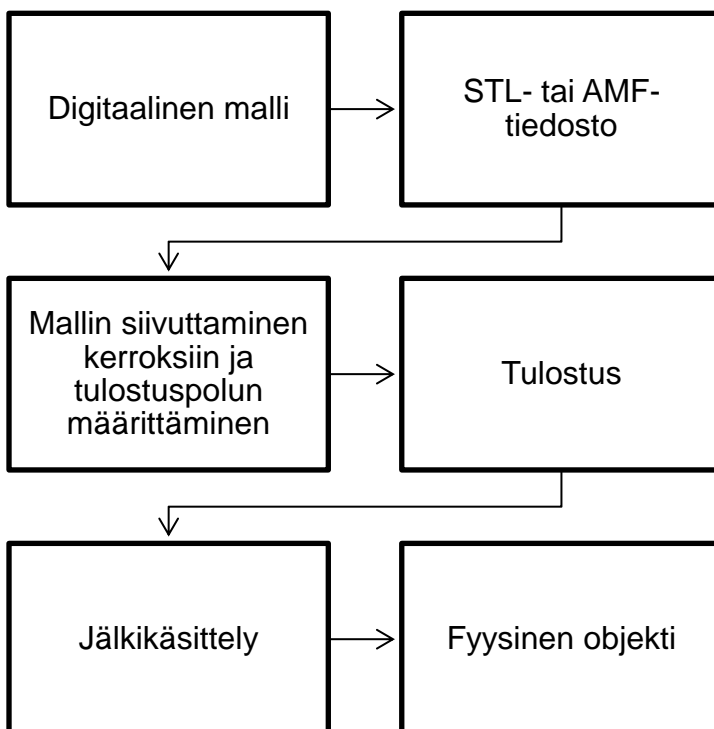
3D-tulostaminen on digitaalisen tiedoston mukaisen kolmiulotteisen mallin valmistusta materiaalia lisäämällä. Tämä tapahtuu kovettamalla materiaalia käyttäen kirjoituspäättä, suutinta tai muuta tulostusteknologiaa. Yleisesti 3D-tulostetun objektin luominen tapahtuu yhdistämällä tai lisäämällä raaka-ainetta kerros kerrollaan, kunnes haluttu objekti valmistuu (kuva 1). Tällaista menetelmää kutsutaan materiaalia lisääväksi valmistukseksi. Nämä erilliset rakennekerrokset ovat usein näkyvissä rakentuneen objektin pinnassa. Mitä alhaisempaa kerroskorkeutta valmistuksessa on käytetty, sitä huomaamattomampia kerrokset ovat ja tarkempi lopputulos. Käytettäviä materiaaleja ovat esimerkiksi erinäiset polymeerit, polymeerikomposiitit, metallit, sementtipohjaiset sekä keraamiset materiaalit. (Bikas – Stavropoulos – Ghryssolouris 2015; Eckel – Zhou – Martin – Jacobsen -Carter – Schaedler 2015; Ligon – Liska – Stampfl – Gurr – Mülhaupt 2017; Ngo – Kashani – Imbalzano – Nguyen – Hui 2018, 172-173; SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017, 6-8; Wong – Hernandez 2012.)



*KUVA 1. 3D-tulostettu objekti rakentuu kerros kerrokselta*

Materiaalia lisäävän valmistuksen vastakohta on materiaalia poistava valmistus (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017, 6), jossa objekti valmistetaan materiaalia poistamalla käyttäen esimerkiksi jyrsintä tai sorvia. 3D-tulostaminen ei ole materiaalia poistava menetelmä, mikä mahdollistaa pienemmän materiaalihävikin. (Bikas ym. 2015; Chua – Leong – Lim 2010, 25; Ligon ym. 2017.)

Tulostusprosessin aloittamiseksi vaaditaan digitaalinen malli tulostettavasta rakenteesta tai objektista. Malli on joko suunniteltava sekä mallinnettava tietokoneella itse tai vaihtoehtoisesti työn voi ulkoistaa, ja mallin voi hankkia ulkopuoliselta toimijalta. Viimeistely malli yhteensovitetään tulostimen kanssa käyttäen 3D-mallinnusohjelmaa tai -tulostusohjelmaa ja määritetään tulostuspolku, minkä jälkeen malli on valmis tulostettavaksi. Tulostusoperaation jälkeen objekti voi vaatia jonkinlaisen jälkikäsittelyn tai viimeistelyn käytetystä materiaalista ja tulostimesta riippuen. 3D-tulostamisen prosessi on esitetty yleisesti kuvassa 2. (Chua ym. 2010, 1-28; Hager – Golonka – Putanowicz 2016; Sakin – Kiroglu 2017, 703.)



*KUVA 2. 3D-tulostamisen prosessi yleisesti*

Tulostamisen lähtökohtana on objektin suunnittelu tai valmis kolmiulotteinen malli. Malli voidaan tehdä tietokoneella käyttäen jotain 3D-mallintamiseen tarkoitettua ohjelmistoa, kuten CAD-pohjaista ohjelmistoa. Vaihtoehtoisesti malli saadaan esimerkiksi 3D-skannaamalla olemassa oleva objekti. Tavoitteena on luoda tarkka ja laadukas kolmiulotteinen malli, joka ohjelmiston, laitteiston ja mallin yhteensovittamisen jälkeen voidaan materialisoida 3D-tulostimen avulla. (Chua ym. 2010, 11-13, 26-28; Hager ym. 2016; Sakin – Kiroglu 2017, 703; Vayre – Vignat – Villeneuve 2012.)

Kun mallintaminen tai 3D-skannatun mallin viimeistely on suoritettu, voidaan malli valmistella tulostettavaksi. Ennen kuin mallinnettu objekti voidaan tulostaa, on siitä luotava STL- tai AMF-tiedosto ja tiedosto on yhteensovitettava tulostimen kanssa. STL-tiedostonimi pohjautuu englanninkielen sanaan stereolithography, joka on myös yksi materiaalia lisäävän valmistuksen tekniikka (SLA). AMF-tiedosto tulee englanninkielen sanoista additive manufacturing file format, mikä tarkoittaa materiaalia lisäävän valmistuksen tiedostoformaattia. (Chua ym. 2010, 11-12, 27-29; Hager ym. 2016; Sakin – Kiroglu 2017, 707; SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017; Wong – Hernandez 2012.)

STL-muotoon muutettu tiedosto sisältää kappaleen muotoa ja kokoa mallintavan kolmioverkon kärkipisteet binääri- ja ASCII-muodoissa. AMF-tiedosto on samankaltainen, mutta siinä kolmioverkon kolmioiden pinnat voivat olla taivutettu. STL-tiedostomuoto käytetään yleisesti 3D-tulostamisessa. Mallin on noudatettava fyysisen lakeja, ja se voi tarvita ulkopuolisia tai tulostettavia tukirakenteita tulostustekniikan mukaan. (Chua ym. 2010, 11-12, 27-29; Hager ym. 2016; Sakin – Kiroglu 2017, 707; SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017; Wong – Hernandez 2012.)

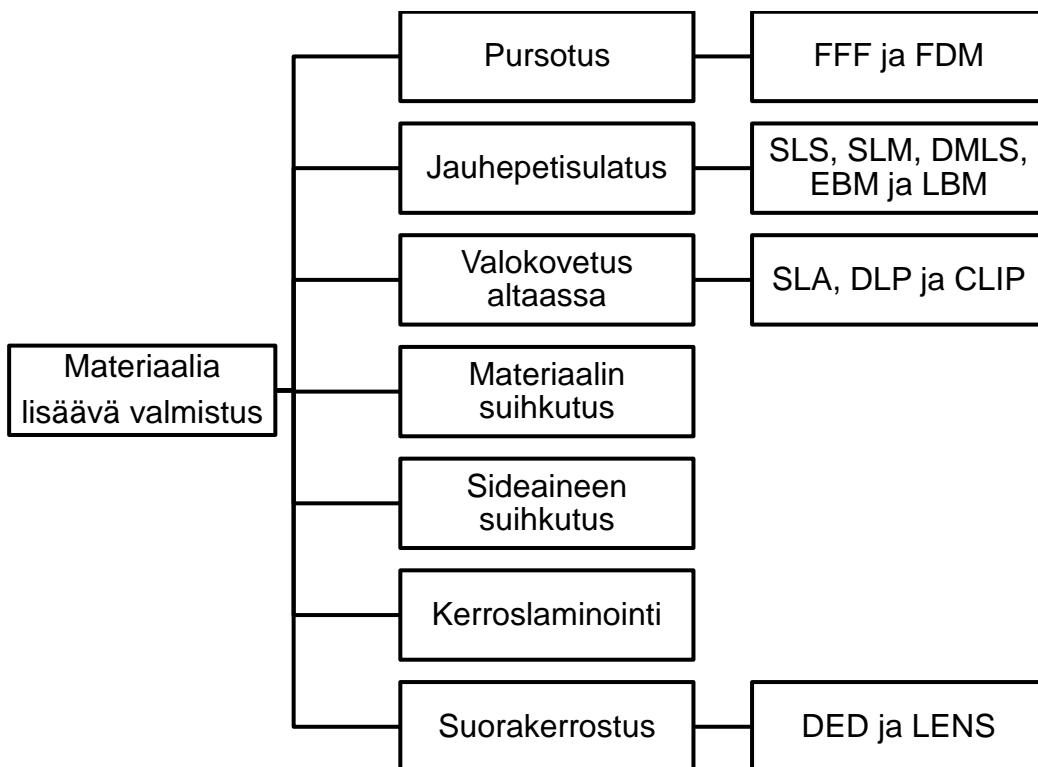
Eri tulostimilla on erilaiset toimintaperiaatteet, mutta yleisesti mallin tulostamisen edellytyksenä on mallin jakaminen satoihin tai tuhansiin horisontaalisiin kerroksiin. STL-tiedostopohjaisen mallin horisontaalisiin osiin jakaminen tehdään mallin siivuttamiseen erikoistuneella tietokoneohjelmistolla. Jotkin tulostinvalmistajat toimittavat tulostimen yhteydessä oman ohjelmiston tai ohjaavat loppukäyttäjän suosittlemalleen ohjelmistovalmistajalle. (Chua ym. 2010, 27-29; Hager ym. 2016; Sakin – Kiroglu 2017, 707-708.)

Siivujen tai kerrosten korkeus määritetään ennen tulostamista. Mitä alhaisempaa kerroskorkeutta käytetään, sitä tarkempi on lopputulos ja hitaampi tulostusprosessi. Kerrosten lukumäärä on yksi suurimpia tulostusnopeuteen vaikuttavia tekijöitä. Muita nopeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat tulostintekniikka, käytetty materiaali ja materiaalikohtainen kovettumisaika sekä objektin geometria. On myös mahdollista suorittaa siivuttaminen vaihtelevalla kerroskorkeudella, jolloin tulostusta voidaan nopeuttaa alueilla, joiden tarkkuudella ei ole suurta merkitystä. (Chua ym. 2010, 29-30; Sakin – Kiroglu 2017, 707-708; Wong – Hernandez 2012.)

Mallin tulostaminen on mahdollista, kun se on onnistuneesti jaettu tulostettaviin kerroksiin ja niiden korkeus on määritetty. Malli on valmis syötettäväksi tulostimeen, joka suorittaa tulostuksen sille annettujen määreiden mukaisesti. Tulostin tulostaa joko määritetyn tulostuspolun mukaisesti tai hyödyntäen CAM:ia (Computer-aided manufacturing). (Chua ym. 2010; Sakin – Kiroglu 2017.)

### 3 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN TULOUSTEKNIIKAT, MATERIAALIT JA KÄYTTÖKOHTEET YLEISESTI

Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiä on useita. Näistä yleisimmin 3D-tulostamisessa tunnetut tekniikat on esitetty kuvassa 3. Luvussa kolme käydään tarkemmin läpi yleisimpiä materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiä, materiaaleja ja niiden käyttökohteita.



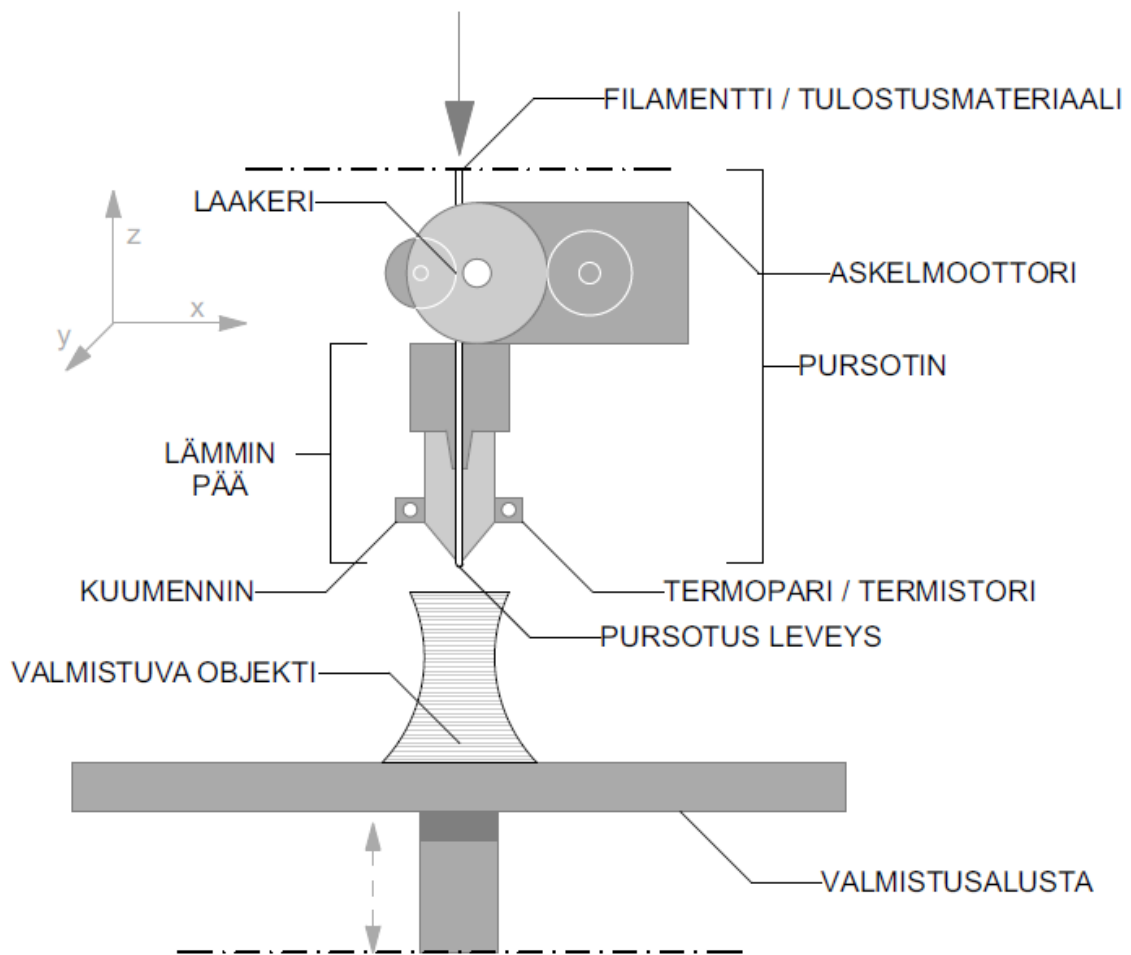
KUVA 3. 3D-tulostamisen yleisimmät tekniikat

#### 3.1 Pursotus

Materiaalin pursotus (Material Extrusion) on yleisesti käytetty materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa materiaali annostellaan kohdennetusti suuttimen tai reiän läpi (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017, 7). Tässä valmistus-

menetelmässä materiaali johdetaan suuttimen läpi, missä se yleisimmin kuumentetaan ja sen jälkeen pursotetaan valmistusalustalle kerros kerrokselta, kuten kuvassa 4 on esitetty. Materiaali yleensä kovettuu nopeasti pursotuksen jälkeen mahdollistaen kerroksittaisen kokoamisen. (Bikas ym. 2015; Ligon ym. 2017.)

Suutin liikkuu prosessissa vertikaalisesti ja horisontaalisesti käyttäen x-, y- ja z-akselistoa. On myös mahdollista, että valmistusalusta on vertikaalisesti liikkuva z-akselilla. (Ligon ym. 2017.)



*KUVA 4. Yksinkertaistettu esimerkki materiaalia pursottavasta lisäävän valmistuksen menetelmästä polymeerifilamenttia käyttämällä*



FFF (Fused Filament Fabrication) teknologia toimii siihen erikoistuneilla tulostimilla ja termoplastisilla sidosaineilla. FDM (Fused Deposition Modeling) on vastaava materiaalia pursottava menetelmä, mutta sen nimitys on Stratysys Incorporationin tavaramerkkitsemä. Tämä 3D-tulostamisen muoto on kuluttajien yleisimmin käyttämä tulostusmuoto, sillä siinä voidaan käyttää edullisia, myrkyttömiä, hajuttomia ja monivärisiä materiaaleja. (Bikas ym. 2015; Ligon ym. 2017; Ngo ym. 2018, 174.)

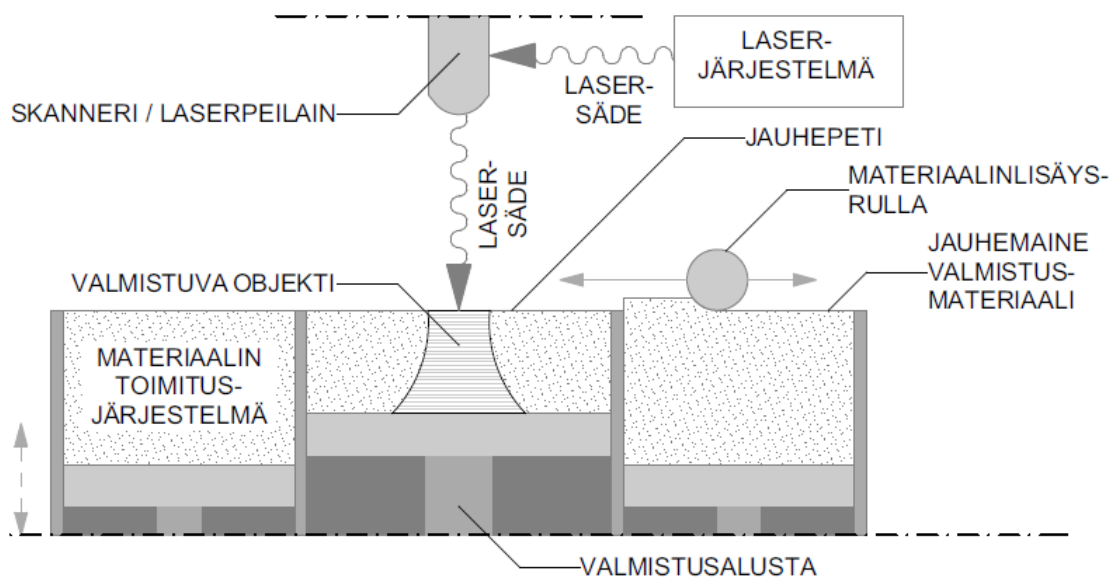
Yleisesti FFF-menetelmässä käytetään kelalle varastoitua termoplastista muovitai metallifilamenttia, joka johdetaan kuumennetun suuttimen läpi. Yleisiä muovimateriaaleja ovat kestumuoveihin kuuluva ABS (akrylinitriilibutadieenistyreeni) sekä uusiutuvista raaka-aineista valmistettu biohajoava termoplastinen alifaattinen polyesteri PLA (polylaktidi). (Bikas ym. 2015; Ligon ym. 2017; Ngo ym. 2018, 173-174; Wong – Hernandez 2012.)

Polymeerien rinnalle on valmistettu polymeerikomposiitteja paikkaamaan polymeeritulosteiden rakenteellisia heikkouksia, kuten kerrosten välistä vääristymää. Näillä kuituvahvistetuilla komposiiteilla on vahvistettu tulosteiden rakenteellista kestävyyttä, mutta ongelmaksi ovat muodostuneet kuitujen asemoituminen, kiinnittyminen ja niiden aiheuttamien tyhjiöiden määrä tulosteessa. Ohittaessaan suuttimen FFF-menetelmässä materiaali sulaa, minkä jälkeen se viilenee ja kovettuu valmistusalustalla. Suutinta yleensä ohjaa tulostimen sisältämä tietokoneavusteinen valmistusohjelma eli CAM (Computer-aided Manufacturing). (Bikas ym. 2015; Ligon ym. 2017; Ngo ym. 2018, 173-174; Wong – Hernandez 2012.)

FFF-menetelmän etuna on kemiallisen jälkikäsittelyn tarpeettomuus sekä koneiston ja tulostusmateriaalin edullisuus, mikä mahdollistaa kuluttajaystäväällisemmän kokonaisprosessin. Menetelmän haittapuolena on koneiston rajoituksista johtuva tulosteen epätarkkuus ja hidas tulostusnopeus. (Ngo ym. 2018, 174; Wong – Hernandez 2012.)

### 3.2 Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatus (Powder Bed Fusion, PBF) on materiaalia lisäävän valmistuksen muoto, jossa esimerkiksi laserin tai elektronisuihkun tuottaman lämpöenergian avulla kohdennetusti sulatetaan jauhemaista materiaalia yhteen. Hienoa jauhetta lisätään jauhepedillä kerroksittain ja pinta tasoitetaan tulostettujen kerrosten välillä lisäämällä jauhetta. Toimenpidettä toistetaan, kunnes haluttu objekti on muodostunut. Sulamaton jauhe toimii objektin kannattelijana prosessin aikana, ja prosessin jälkeen se poistetaan ja voidaan yleensä uusiokäyttää seuraavassa tulostuksessa. Jauhepetisulatuksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5. Kyseistä menetelmää käytetään niin polymeereille, komposiiteille, keramiikalle, sementtipohjaisille aineille kuin metalleille. (Bikas ym. 2015; Ligon ym. 2017; Ngo ym. 2018, 174; SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017, 7.)



KUVA 5. Jauhepetisulatuksen yksinkertaistettu toimintaperiaate

Jauhepedillä valmistetun objektin tarkkuuteen vaikuttavat jauheen hienojakoisuus, distribuutio sekä pakkautuneisuus. Mitä pienempää partikkelikokoa käytetään, sitä tarkempi tulostus on, ja mitä pakkautuneempaa jauhe on, sitä tiheämpi

tulostus. Turvallisuus ja prosessointi syiden takia partikkelikoolla on kuitenkin rajansa. (Ligon ym. 2017; Ngo ym. 2018, 174.)

SLS (Selective Laser Sintering) on samankaltainen menetelmä kuin tasossa suoritettava lasersintraus, jossa yhdellä tai useammalla laserilla kiinnitetään tai sulatetaan partikkeleita yhteen suljetussa kammiossa. Kolmiulotteiseen tulostamiseen tarkoitettussa SLS:ssä materiaalia lisätään ja rakennetaan jauhepedillä kerroksittain. Kerroksen jälkeen valmistusalusta laskee alaspäin tai laseria nostetaan samalla, kun materiaalijauhetta lisätään, jolloin edellisen kerroksen päälle on mahdollista yhdistää uusi. Menetelmää toistetaan, kunnes viimeinen kerros on valmis ja objekti on rakentunut. (Bikas ym. 2015; Ligon ym. 2017; SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017, 13.)

SLS:n tärkeimpänä etuna on suurempi termoplastisten materiaalien valikoima. Sintrauksessa voidaan käyttää korkealujuusmuoveja, komposiitteja, metalleja ja keramiikkaa. Materiaalien, joilla on hyvät tekniset ominaisuudet, käyttäminen mahdollistaa kuormituksen alaisten osien tulostamisen. (Ligon ym. 2017.)

SLM (Selective Laser Melting) on saman tapainen materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä kuin SLS. Molemmat toimivat samalla toimintaperiaatteella, mutta eroavat teknisissä yksityiskohdissa. SLM:ssä käytetään korkeampitehoista laseria, jotta metallia voidaan sulattaa. (Bikas ym. 2015; Deckers – Vleugels - Kruthl 2014.)

DMLS (Direct Metal Laser Sintering) on kuten toisetkin lasersintrausmenetelmät, mutta se on tarkoitettu vain metallijauheella toimivaksi. Menetelmää siis käytetään metallin sintraukseen. DMLS on EOS:n (Electro Optical Systems) kehittämä ja tavaramerkkitsemä materiaalia lisäävän valmistuksen muoto. (Bikas ym. 2015.)

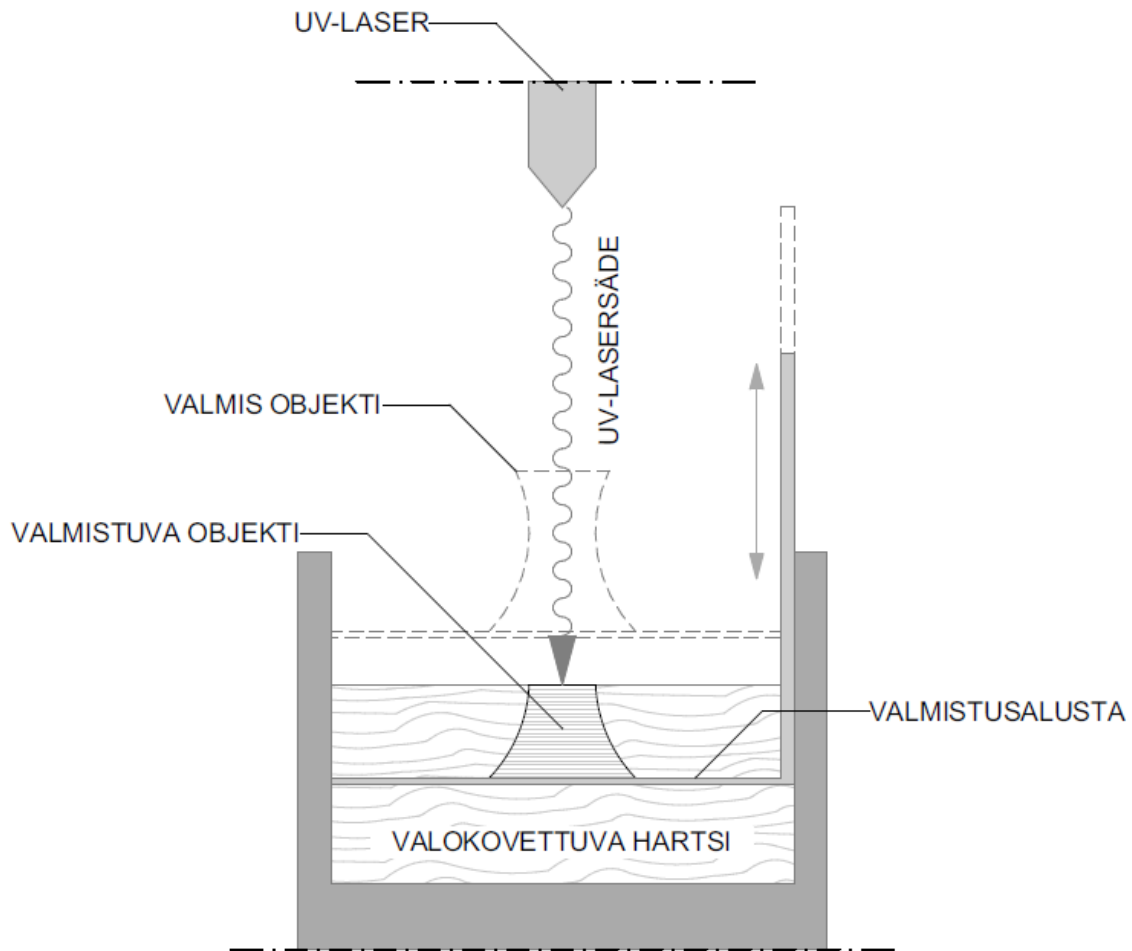
EBM (Electron Beam Melting) on samankaltainen kuin SLM- tai SLS-menetelmä, mutta laserin sijasta käytetään elektronisuihkua energian lähteenä. EBM on uusi, mutta nopeasti kasvava materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, vaikkakin sitä käytetään vain metallien sulattamiseen. Prosessi suoritetaan tyhjiössä, mikä estää jauhehiukkasia sähköistymästä ja parantaa lämmön johtumista sekä jäähtymistä. Lasersintraukseen verrattuna elektronisuihkusulatus on tehokkaampi ja

tuottaa tasaisemman lämpöjakauman, mutta tarkkuus ja tulostuksen jälki ovat heikommat. LBM (Laser Beam Melting) on vastaava kuin EBM, mutta sulatus tehdään laserilla kammiossa, jonne syötetään argonia ja typpeä, jotta käytetyt metallit eivät altistu hapettumiselle. (Bikas ym. 2015; Herzog – Seyda – Wycisk – Emmelmann 2016, 372-373.)

### **3.3 Valokovetus altaassa**

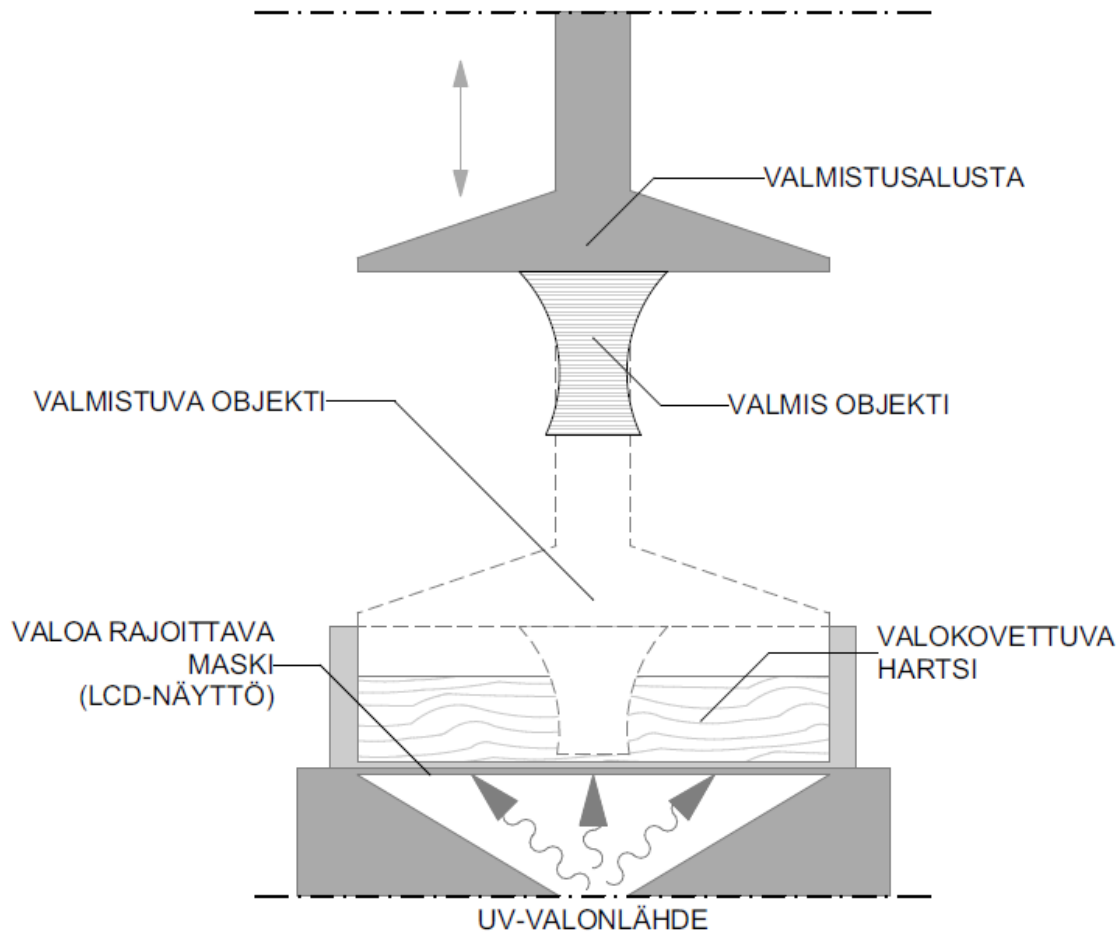
Valokovetus altaassa (Vat Photopolymerization) on materiaalia lisäävän valmistuksen muoto, jossa nestemäistä valopolymeeriä kovetetaan valikoidusti näkyvällä valolla tai UV-valolla. Menetelmää kutsutaan valoaktiiviseksi polymeroinniksi (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017, 8). Materiaalina käytetään yleisesti valokovettuvaa hartsia, jota kovetetaan kerros kerrokselta valoa käyttäen. Materiaali asetetaan astiaan, jossa se kovetetaan valikoidusti muodostaen tulostettavan objektin. (Deckers ym. 2014; MacDonald – Wicker 2016.)

SLA (Stereolithography) on 3D-tulostusmenetelmä, jossa kiinteä objekti rakentuu valikoidusti altistamalla valopolymeerejä valolle, käyttämällä laseria tai esimerkiksi x-y-akselistolla liikkuvaa optista kuitua. Kuvassa 6 on esitetty yksinkertaistettu esimerkki valokovettamisesta käyttämällä laseria. Objekti rakentuu kerros kerrokselta ja valon lähteenä käytetään yleensä jotain UV-säteiden taajuutta. SLA-tulostamisen etuna on suuri spatiaalinen resoluutio, minkä mahdollistaa esimerkiksi lasersäteiden tarkasti kohdistettu valopiste. Tässä menetelmässä yhden kerroksen valmistusnopeus on riippuvainen valon lähteen nopeudesta ja altistusajasta. (Bikas ym. 2015; Ligon ym. 2017.)



*KUVA 6. Yksinkertaistettu esimerkki valokovettamisesta altaassa käyttämällä laseria valonlähteenä*

DLP:n (Digital Light Processing) toimintatapa muistuttaa SLA:aa, sillä molemmat käyttävät valoa kovettaakseen valokovettuvaa hartsia kerros kerrokselta. DLP:ssä ei kuitenkaan käytetä pistekohtaista kovettamista vaan materiaalia altistetaan valolle valikoidulla maskeeraustekniikalla. Valonlähteenä voi olla esimerkiksi suuritehoinen UV-lamppu, jonka säteily maskeerataan vain halutuille kohdille kuvan muodossa. Menetelmä yksinkertaistettu variaatio on esitetty kuvassa 7. (Ligon ym. 2017.)



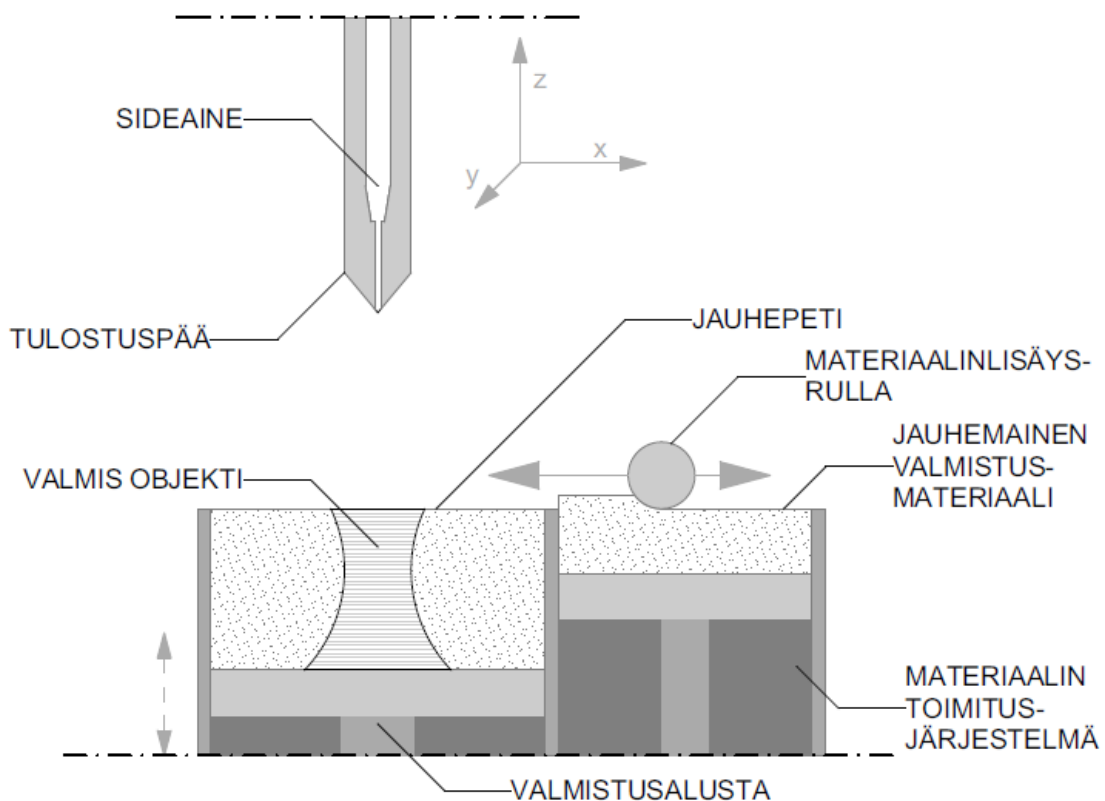
*KUVA 7. Esimerkki DLP menetelmästä, jossa objekti rakentuu valmistusaltaan yläpuolella sijaitsevaan valmistusalustaan*

CLIP (Continuous Liquid Interface Production) on Carbon3D Incorporationin luoma valokemiallinen prosessi, joka tarkasti tasapainottaa valon ja hapen muodostaakseen tulosteen nopeasti. Valo johdetaan prosessissa valokovettuvaan hartsiin happea läpäisevän lasin läpi. UV-valo projektoidaan kuvan muodossa, kuten DLP-tekniikoissa. CLIP-prosessissa muodostuu ohut kovettumattoman hartsin yhtymäkohta lasin ja tulostettavan objektin väliin. Valo läpäisee tämän katvealueen kovettaen hartsin sen yläpuolella ja muodostaen halutun objektin. Hartsin jatkaa virtaamista objektin alapuolella läpi tulostusprosessin ylläpitäen jatkuvaa nestemäistä yhtymäkohtaa. (Carbon3D, Process -> Two-stage approach; Ligon ym. 2017.)

### 3.4 Materiaalin suihkutetus ja sideaineen suihkutetus

Materiaalin suihkutetus (Material Jetting, MJ) on materiaalia lisäävän valmistuksen muoto, missä kapean suuttimen läpi suihkutetaan pisaroita esimerkiksi termoplastista materiaalia tai valopolymeeriä valikoidusti valmistusalustalle ja -pinnalle. Menetelmä tunnetaan myös nimellä Inkjet printing (Ngo ym. 2018, 174). Perinteiset mustesuihkutusta käyttävät tulostinkoneistot toimivat vastaavasti. (Bikas ym. 2015; Ligon ym. 2017; SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017, 7.)

Sideaineen suihkutetus (Binder Jetting, BJ) on samankaltainen prosessi kuin materiaalin suihkutetus, mutta siinä suihkutetaan nestemäistä sideainetta, jolla jauhe-  
mainen materiaali liitetään kiinteäksi objektiksi. Kuvassa 8 on esitetty sideaineen suihkutuksen yksinkertainen toimintaperiaate. Sideaineen suihkutuksessa käytetään samankaltaista jauhepetiä kuin jauhepetisulatuksessa. (Bikas ym. 2015; Ligon ym. 2017; SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017, 7.)



KUVA 8. Sideaineen suihkutuksen yksinkertaistettu toimintaperiaate

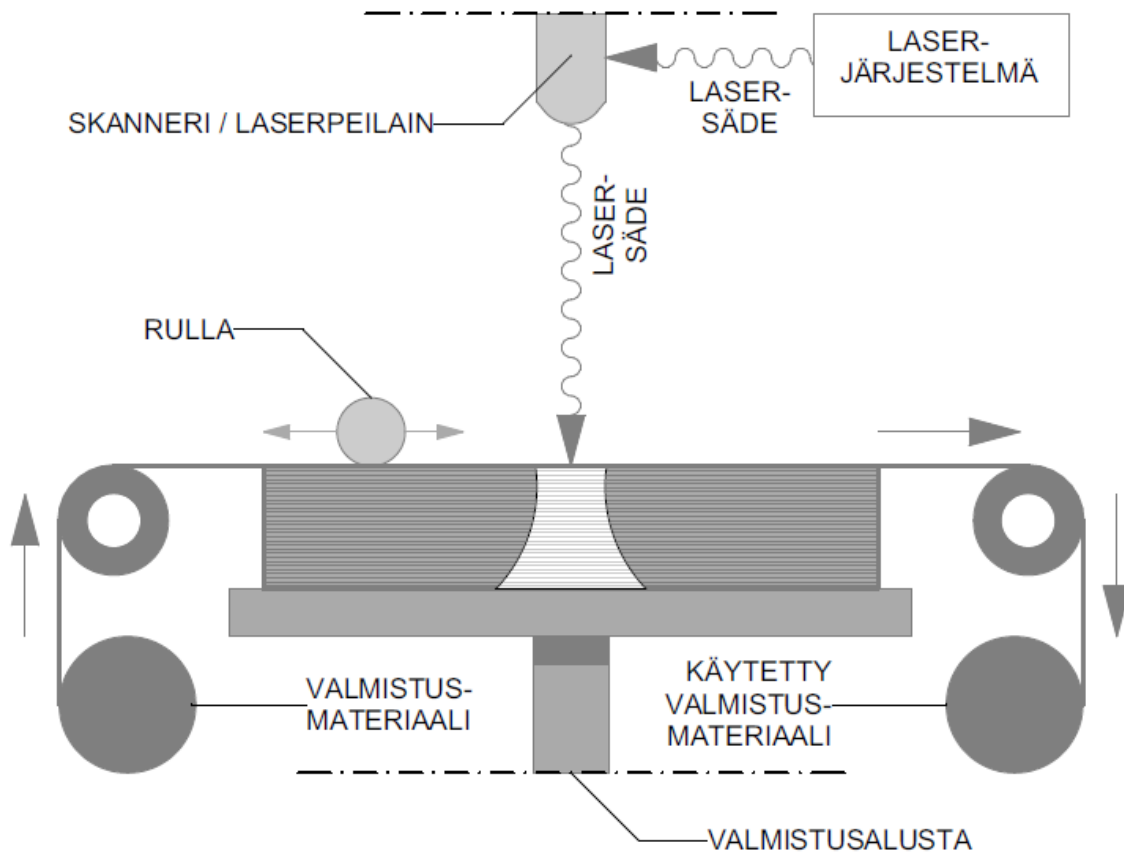
Kun sideaineen suihkutukseen käytetään nestemäistä sideainetta, kutsutaan menetelmää toisinaan kolmiulotteiseksi tulostamiseksi tai 3DP:ksi. Menetelmässä tärkeitä muuttujia ovat sideaineen kemia ja reologia, jauhepartikkeleiden koko ja muoto, jauheen kerrostusnopeus, jauheen ja sidosaineen välinen interaktio sekä jälkikäsittelymenetelmät. Tällaisten kappaleiden huokoisuus on yleensä suurempi kuin sintraamalla tai sulattamalla muodostettujen. (Ngo ym. 2018, 174.)

Materiaalin suihkutus on käytetyimpiä keraamisten materiaalien 3D-tulostamiseen tarkoitettuja menetelmiä. Tekniikkaa käytetään monimuotoisten ja edistyneiden keraamisten rakenteiden tulostamiseen. (Ngo ym. 2018, 174.)

### **3.5 Kerroslaminointi**

Kerroslaminointi (Sheet Lamination, SL) on materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa levymäinen materiaali liitetään yhteen käyttämällä sideainetta, lämpöenergiaa ja ulkoista voimanlähdettä (kuva 9). Kerroslaminoinnissa yhdistyy materiaalia lisäävä ja materiaalia poistava menetelmä, mitä kutsutaan hybridimenetelmäksi. (Bikas ym. 2015; Chua ym. 2010, 26; Deckers ym. 2014; SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017, 7; Wong – Hernandez 2012.)





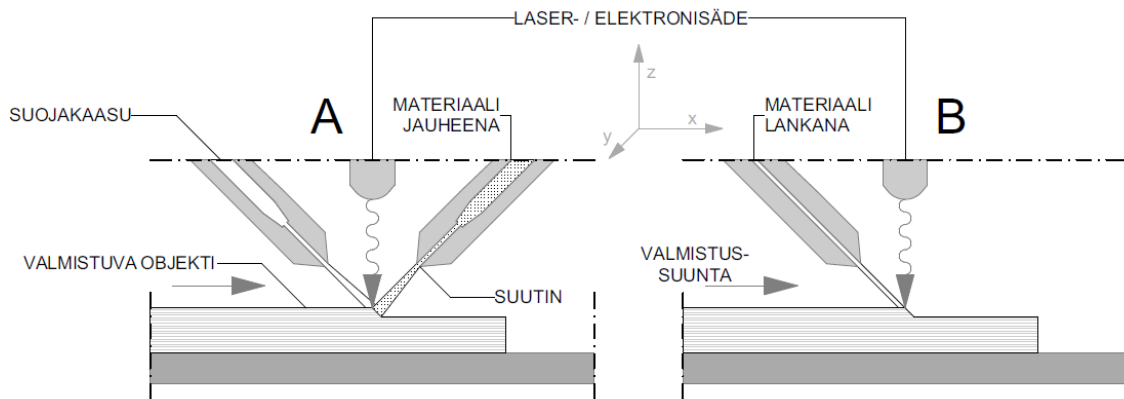
KUVA 9. Kerroslaminointi yksinkertaistetusti

UAM (Ultrasonic Additive Manufacturing) on metallilevy laminoinnin käytetyimpiä menetelmiä, jossa metallilevy hitsataan ultraäänen synnyttämällä värinällä yhteen. Tasaiset levyt yhdistetään kerros kerrokselta toisiinsa. Jokaisen suorituskerran välissä kerros leikataan haluttuun muotoon. Prosessi toistetaan, kunnes haluttu lopputulos on saavutettu. (Sames – List – Pannala – Dehoff – Babu 2015, 320.)

### 3.6 Suorakerrostus

Suorakerrostus (Direct Energy Deposition, DED), joka tunnetaan myös LENS:nä (Laser Engineered Net Shaping) ja LMD:nä (Laser Metal Deposition), on materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa objekti rakentuu käyttämällä kohdennettua lämpöenergiaa sulattamaan kohdennetusti lisättyä metallijauhetta tai -

lankaa. Suorakerrostus eroaa SLM:stä sillä, ettei tulostuksessa käytetä jauhepe-  
 tiä vaan materiaalia lisätään tarpeen mukaan (Ngo ym. 2018, 175). Kuvassa 10  
 on esitetty suorakerrostuksen yksinkertaistettu toimintaperiaate. Metalli sulaa  
 suuritehoisen laser- tai elektronisäteen vaikutuksesta, minkä jälkeen se kovete-  
 taan jäähdyttämällä. Prosessin suorittaminen suljetussa argonpitoisessa kammi-  
 oissa tai prosessin aikana argonpitoisen suojakaasun lisääminen mahdollistaa  
 useamman metallin käyttämisen estämällä metallin hapettumisen (kuva 10).  
 (Herzog ym. 2016, 373; SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017, 7; Wong – Her-  
 nandez 2012.)



*KUVA 10. Suorakerrostuksen yksinkertaistettu toimintaperiaate käyttämällä jauhe- (A) ja lankamateriaalia (B)*

### 3.7 Lisäävän valmistuksen materiaalit

Teollisuuden eri aloilla yleisesti käytettäviä materiaalia lisäävän valmistuksen ma-  
 teriaaleja ovat metallit, metalliseokset, polymeerit, polymeerikomposiitit sekä ke-  
 raamiset ja sementtipohjaiset materiaalit. Taulukossa yksi on esitetty yleisimmät  
 materiaalit, niiden käyttökohteet sekä hyödyt ja haasteet. (Ngo ym. 2018.)

*TAULUKKO 1. Yhteenveto pääasiallisista materiaalia lisäävän valmistuksen materiaalien käyttökohteista, hyödyistä ja haasteista (mukaillen Ngo ym. 2018)*

Materiaalit	Käyttökohteet	Hyödyt	Haasteet
Metallit ja metalliseokset	Ilmailu- ja autoteollisuus, asevoimat, biolääketiede	Monitoiminen metalliseosten optimointi, massakustomointi, pienempi materiaalihävikki, vähemmän kokoonpantavia osia, mahdollisuus korjata rikkoutuneita tai kuluneita osia	Rajoittunut metalliseosten valikoima, epätarkkuus ja huono pintaviimeistely, mahdollinen jälkikäsitellyn tarve (jyrsintä, lämpökäsittely tai kemiallinen etsaus)
Polymeerit ja polymeerikomposiitit	Ilmailu- ja autoteollisuus, urheilu, lääketiede, biolääketiede, arkkitehtuuri, lelut	Nopeat prototyyppit, kustannustehokas, monimuotoisia rakenteita, massakustomointi	Huonot mekaaniset ominaisuudet, rajoittunut polymeerien ja vahvikkeiden valikoima, anisotrooppiset mekaaniset ominaisuudet (etenkin kuituvahvisteissa komposiiteissa)
Keraamiset materiaalit	Biolääketiede, ilmailu- ja autoteollisuus, kemianteollisuus	Huokoisuuden sekä säleisyyden kontrollointi, ihmiskehon monimutkaisten rakenteiden ja tukiverkkojen tulostaminen, nopeampi valmistus, parempi mikrostruktuurin ja koostumuksen kontrollointi	Rajoittunut valikoima tulostettavia keraamisia materiaaleja, epätarkkuus ja huono pintaviimeistely, mahdollinen jälkikäsitellyn tarve (sintraus)
Sementtipohjaiset materiaalit	Infrastruktuuri, rakentaminen	Massakustomointi, muottityön tarpeettomuus, pienempi työvoiman tarve - erityisesti hyödyllinen hankalissa olosuhteissa	Kerrosittaisen rakentamisen ulkomuoto, anisotrooppiset mekaaniset ominaisuudet, huono kerrosten välinen kiinnittyminen, hankaluuksia suuren mitakaavan hankkeissa, rajoittunut tulostusmenetelmien ja sementtiseosten määrä

### 3.7.1 Keraamiset materiaalit

Materiaalia lisäävästä valmistuksesta on tullut välttämätön menetelmä edistyneiden kudosteknologiassa käytettävien keraamisten biomateriaalien valmistuksessa. Keraamisilla materiaaleilla tulostettaessa haasteina ovat kerros kerrokselta rakentuminen sekä rajoitetusti saatavilla olevat materiaalit. Sintratun keraamisen osan jälkikäsitely haluttuun muotoon on työlästä ja kallista, minkä takia kompleksien muotojen 3D-tulostaminen ensin ja jälkikäteen keramiikaksi sintraaminen on houkuttelevampaa. (Ngo ym. 2018, 179.)

3D-tulostamisen etuna on mahdollisuus kontrolloida tulostettavan keraamisen ristikkorakenteen huokoisuutta. Keraamisia materiaaleja käytetään lähinnä monimuotoisten ja edistyneiden, esimerkiksi kudosteknologiassa käytettävien, ristikkorakenteiden valmistamiseen hyödyntäen materiaalin suihkutusta. (Ngo ym. 2018, 173-179.)

Keraamisia materiaaleja voidaan tulostaa seuraavilla tulostusmenetelmillä: materiaalin suihkutetus, jauhepetisulatus, tahnapursotus sekä SLA. Materiaalin suihkutetus on pääasiällisin tapa tulostaa tiheitä keraamisia osia, jotka eivät mahdollisesti vaadi jälkikäsitelyä. SLS on myös yleinen keraamisten jauheiden tulostamisessa. SLS-menetelmää käyttämällä tulostetut keraamiset osat ovat yleensä vähemmän tiheitä sekä huokoisempia kuin valetut keraamiset osat, ellei niitä jatkokäsitellä. (Ngo ym. 2018, 179; Travitzky – Bonet – Dermeik – Fey – Filbert – Demut – Schlier – Schlordt – Greil 2014.)

### **3.7.2 Raaka maa-aines**

Ra'at maa-aineet ovat vähemmän tutkittuja ja käytettyjä tulostamismateriaaleja johtuen suuresta kustannuksesta verrattuna teolliseen betoniin. Maa-aineksen haasteena on kuivarakenteen heikko kantokestävyys, mikäli se halutaan helposti 3D-tulostettavana. (Perrot – Rangeard – Courteille 2018.)

Maa-aineksen käyttäminen materiaalia lisäävässä valmistuksessa vaatii erinäisten lisäaineiden tai -materiaalien käytön. Maa-aineksen sekaan on mahdollista lisätä vastaavia lisäaineita kuin betonimassaankin sekä luontaisia lisäaineita, kuten algiinihappoa ruskolevän soluseinistä, mikä mahdollistaa maa-aineksen nopeamman kovettumisen. (Perrot ym. 2018.)

### **3.7.3 Metallit ja metalliseokset**

Yleisesti joko jauhe- tai johdinmaisen metallisyötteen tulostaminen tapahtuu suorakerrostamalla tai jauhepetisulattamalla käyttäen laseria tai elektronisädettä. Monia metallimateriaaleja, kuten terässeoksia, alumiiniseoksia, titaania sekä titaaniseoksia ja nikkelpohjaisia seoksia, voidaan käyttää jauhepetimenetelmällä. Yleisesti metalleja ja niiden seoksia voidaan käyttää esimerkiksi LBM-, EBM-, SLM-, DMLS- ja LENS-tekniikoissa, joista jauhepetimenetelmät ovat käytetyimpiä teollisuudessa. (Herzog ym. 2016; Ngo ym. 2018, 175.)

Jauhepetimenetelmillä voidaan valmistaa hyvät mekaaniset ominaisuudet omavia monimuotoisia ja tarkkoja tulosteita. Menetelmä on hidas, minkä takia sitä

käytetään lähinnä pienikokoisten osien valmistamiseen. Yleisesti tiheät 3D-tulostetut metalliosat ovat yhtä laadukkaita, elleivät jopa laadukkaampia, kuin perinteisillä menetelmillä valmistetut osat. (Herzog ym. 2016; Ngo ym. 2018, 175.)

Titaania ja titaani-, teräs-, nikkeli- ja magnesiumseoksia sekä joitakin alumiini- ja kobolttipohjaisiaseoksia on optimoitu materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiin (Herzog ym. 2016). Erityisesti titaani ja sen seokset ovat yleisesti teollisuudessa käytettyjä korkeasuoritteisia metalleja. (Sheydaeian – Toyserkani 2018.)

Alumiiniseoksien käyttäminen materiaalia lisäävässä valmistamisessa on harvinaisempaa, sillä esimerkiksi titaanin verrattuna on pehmeämpi alumiini helpommin työstettävä koneistamalla ja jyrsimällä. Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmissä metalleja käytetään lähinnä vain ilmailu- ja avaruusteollisuudessa, sillä tavanomaiset menetelmät ovat yleensä kalliimpia ja aikaa vieviä, kun kyseessä on monimuotoinen ja geometrialtaan optimoitu rakenne. (Ngo ym. 2018, 173-175.)

#### **3.7.4 Polymeerit**

Polymeerit ovat yleisimmin käytetty 3D-tulostamisen materiaali johtuen niiden monipuolisuudesta ja soveltuvuudesta useisiin tulostusprosesseihin (Ngo ym. 2018, 177). Polymeeri on materiaalina edullinen ja kevyt sekä varastoitavissa helposti tulostettavassa muodossa. Se paljon käytetty materiaali esimerkiksi ilmailualan teollisuudessa monimuotoisten sekä kevyiden rakenteiden valmistuksessa. (Ghaffar ym. 2018, 8.)

Useita 3D-tulostamisen tekniikoita kuten SLA, SLS, FFF sekä FDM, 3D-biotulostaminen ja materiaalin suihkutuspohjainen tulostus on käytettävissä polymeereillä valmistettaessa. Pursotus on yleisimmin käytetty polymeerikomposiittien sekä alhaisen sulamispisteen omaavien termoplastisten polymeerien tulostamisessa. (Ngo ym. 2018, 177.)

Polymeerejä käytetään termoplastisina filamentteina, reagoivina monomeereina, hartsina tai jauheena. Valokovettuvat hartsit polymeroituvat aktivoituaan UV-valon vaikutuksesta esimerkiksi SLA-tulostuksessa. Valopolymeeripohjaisilla tulostusmenetelmillä saavutetaan yksityiskohtaisia ja tarkkoja tulosteita. Uusien

hartsien kehityksen myötä on valokovettuvalla hartsille saatu lisää kestävyyttä ja lämpötilaresistanssia. SLS:ssä käytetään polystyreeniä, polyamidia ja termoplastisia elastomeereja. Yleiset termoplastiset polymeerit, kuten PLA, ABS ja nylon, soveltuvat materiaalia pursottaviin menetelmiin. (Ghaffar ym. 2018, 8; Ngo ym. 2018, 177.)

Ympäristöystävälliset ja hyvät fyysiset ominaisuudet omaavat polymeerimateriaalit ovat FDM- ja FFF-tulostamisessa puutteellisia. Materiaalit, kuten ABS ja PLA, eivät täytä kaikkia vaatimuksia riittävällä tasolla. ABS:llä on hyvät mekaaniset ominaisuudet, mutta materiaali erittää epämiellyttävää hajua tulostusprosessin aikana. PLA on ympäristöystävällinen, mutta omaa huonot mekaaniset ominaisuudet. (Ngo ym. 2018, 178.)

### **3.7.5 Polymeerikomposiitit**

Polymeerikomposiittien tarkoituksena on kasvattaa materiaalin mekaanisia ominaisuuksia käyttämällä polymeerien yhteydessä mikrokuituja, kuten lasi-, hiili- ja puukuituja (Ngo ym. 2018, 173-178). Polymeeripohjaisiin biokomposiittifilamentteihin luokitellaan esimerkiksi puukuituja sisältäviä polymeerifilamentteja. Polymeerikomposiiteissa on mahdollista käyttää noin 40 % kuituja, jolloin se on vielä mahdollista tulostaa. Tällaisten materiaalien mekaaniset ominaisuudet ovat riippuvaisia tulostinsuuttimen kulmasta sekä tulostuksen leveydestä. Tulosteen huokostilavuus on myös suurempi nostoen materiaalin absorptiokykyä. (Ghaffar ym. 2018, 8-9.)

Suurimmalla osalla tulostettavista komposiiteista on edelleen alhaiset mekaaniset ominaisuudet, mitkä eivät ole riittävät rakentamisen standardeille verrattuna perinteisiin tuotantomenetelmiin. Tulostettavien komposiittien rakenteellista heikoutta kasvattaa tulostusprosessissa syntyvät tyhjiöt materiaalissa. (Ghaffar ym. 2018, 8-9.)

### **3.7.6 Sementtipohjaiset**

Rakennusalalla sementtipohjaiset materiaalit ovat tutkituimpia materiaalia lisäävän valmistuksen suurtuotantoa varten. Sementtipohjaisilla materiaaleilla on unii-

kit tuore- ja kovettuneet materiaaliominaisuudet ja monia vaihtoehtoisia sementtiseoksia, joilla voidaan hienosäätää seoksen tulevia rakenneominaisuuksia. Sementtipohjaiset materiaalit, kuten betoni, ovat käytetyimpiä 3D-tulostamisen materiaaleja rakennusteollisuudessa. (Ghaffar ym. 2018, 6-7; Ngo ym. 2018, 173.)

Sementtipohjaiset seokset vaativat nopeaa kovettumista sekä alhaista painumaa, sillä materiaali on tukematta lähdettyään tulostimen suuttimesta. Sementin sekaan sekoitetaan esimerkiksi silikaattia ja lentotuhkaa, minkä jälkeen luodaan sementin, hiekan ja veden keskinäinen tulostuskelpoinen seos. Seokseen voidaan lisätä notkeuteen, ilmapitoisuuteen sekä kovettumiseen vaikuttavia lisäaineita. (Ghaffar ym. 2018, 6-7.)

Erilaisia betoniseoksia tutkittaessa on selvitetty, että betoniseoksen reologisilla ominaisuuksilla, erityisesti tiksotrooppisella käytöksellä, on vaikuttava tekijä seoksen pumppaukseen ja tulostukseen. Sementtiseoksen reologiselle käyttäytymiselle on myös tutkimuksissa määritetty teoreettiset raamit, jotta sementtiseoksen tulostaminen ilman pohjakerrosten murtumista ja epämuodostumista onnistuu. (Paul – Tay – Panda – Tan 2018; Perrot – Rangeard – Pierre 2016.)

Kerrosten välinen kiinnittyminen on yksi suurimmista sementtipohjaisten materiaalien tulostamisen haasteista. Runkoaineen koon, pursotuksen ja kerrospaksuuden vaikutuksia kerrosten väliseen kiinnittymislujuuteen tutkittaessa on havaittu, että mitä pienempää runkoainetta ja suurempaa sementtisuhdetta runkoaineeseen nähden käytettiin sitä suurempi kerrosten välinen kiinnityslujuus. Kerrospaksuuden kasvattaminen suuremmalla kerrosten tulostusaikavälillä johti suurempaan kerrosten väliseen kiinnityslujuuteen, mutta heikensi rakenteen puristuslujuutta. (Zareiyan – Khoshnevis 2017.)

Märkäbetonin tulostamisen haasteina ovat tuorebetonin käsiteltävyys ja ominaisuudet. Seoksen on oltava hyvin työstettävää ja suuren suuttimen aukioloajan omaavaa. Rakenteellisesti kehitettävää löytyy kerrosten välisessä kiinnityksessä, puristuslujuudessa ja rakenteen painumassa. (Ngo ym. 2018, 180.)

### 3.7.7 Sementtipohjaiset komposiitit

Tutkimuksissa on kehitetty korkeasuorituskykyistä 3D-tulostettavaa polypropeenikuituvahvistettua laastia Portland-sementistä, lentotuhkasta, silikaatista, hiekasta ja vedestä. Lisäämällä notkistinta ja hidastinta saatiin riittävä työstettävyys, jotta seoksen pursottaminen halkaisijaltaan 9 mm:n suuttimen läpi onnistui. Suutin pysyi avonaisena tulostettaessa noin 100 minuuttia. Käyttökelpoisia kuituja ovat esimerkiksi lasi-, basaltti ja hiilikuidut, joista hiilikuitu on toimivin. (Hamback – Volkmer 2017; Le – Austin – Lim – Buswell – Gibb – Thorpe 2012; Ngo ym. 2018, 180.)

3D-tulostettava kuituvahvistettu betonikomposiitti mahdollistaa kuitujen asennon kontrolloinnin tulostetussa rakenteessa toisin kuin perinteisessä kuituvahvistettuun betonissa. Hiilikuitujen vapaa orientointi pitkin eri tulostuspolkuja kasvattaa taivutuslujuutta merkittävästi. Tehokas kuitujen linjaaminen voi johtaa suurenmoiseen taivutuslujuuden kasvuun, saavuttaen jopa 30 MPa:n taivutuslujuuden seoksella, jossa oli yksi tilavuusprosentti hiilikuitua. (Hamback – Volkmer 2017; Ngo ym. 2018, 180.)



## 4 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS RAKENTAMISESSA

Wohlersin raportin mukaan arkkitehtoniset käyttökohteet kattoivat arvoiltaan vain noin kolme prosenttia materiaalia lisäävän valmistuksen teollisuudesta vuonna 2017 (Wohlers 2017). 3D-tulostaminen rakennusteollisuudessa on vielä vähäistä, sillä asuntorakentamisessa menetelmien hyödyntäminen suuremmin aloitettiin vasta 2014, minkä jälkeen se on vain kasvattanut potentiaaliaan. Taulukossa 2 on esitetty tunnetuimpia 3D-tulostamisen toimijoita ja menetelmiä rakennusalalla. (Ngo ym. 2018.)

*TAULUKKO 2. Materiaalia lisäävän valmistuksen teknologioita rakennusalalla (mukaillen Camacho ym. 2018)*

Menetelmä	Sementtipohjaiset materiaalit			Polymeerit			Metallit	
	Siltanosturi	Robotiikka	Muu	Siltanosturi	Robotiikka	Muu	Siltanosturi	Robo- tiikka
Sideaineen suihkutus	Pegna, D-Shape							
Pursotus	Contour Crafting, Concrete Printing, WinSun, TotalKustom, BetAbram, 3D Concrete Printing <sup>b</sup> (3DCP)	XtreeE, CyBe <sup>b</sup> Construction, Apis Cor	WASP	BAAM (Big Area Additive Manufacturing), Qingdao Unique, Products Develop, KamerMaker	C-Fab, Digital Construction Platform <sup>b</sup> (DCP), FreeFAB™ Wax	Mini-Builders		
Jauhepetisulatus				Skanska <sup>a</sup>			Arup <sup>a</sup> , Permasteelisa <sup>a</sup>	
Suorakerrostus								MX3D

<sup>a</sup> Teknologiaa käyttävä yritys

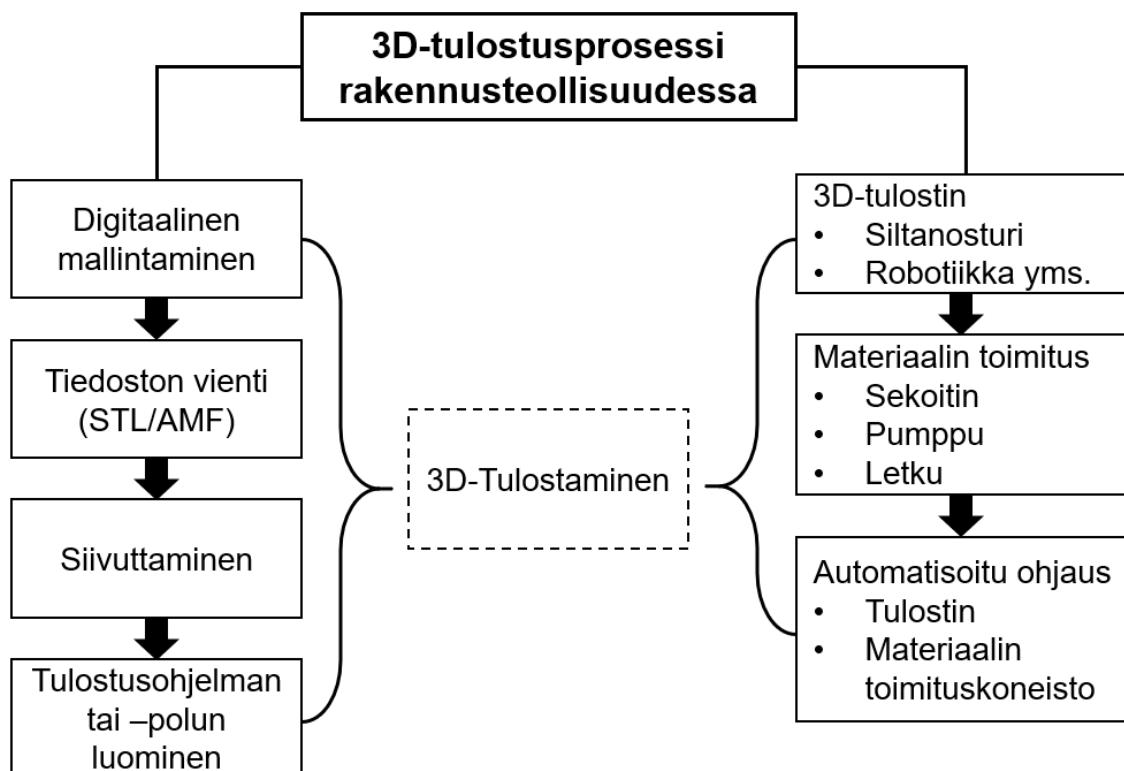
<sup>b</sup> Kehitteillä

Ensimmäinen 3D-tulostettava polymeeripohjainen asuinrakennus kehitettiin Amsterdamissa vuonna 2014. Projekti ei ole vielä valmistunut, ja sen on määrä käyttää kierrätettävää biopolymeeriä FDM-tulostustekniikka hyödyntäen. Projektin takana ovat Dus Arkkitehdit, jotka halusivat osoittaa tulostimen monikäyttöisyyden minimaalisella materiaalihävikillä ja kuljetuskustannuksilla (Dus Architects, linkit Work -> Project -> 3D-Print-Canal-House). Samana vuonna kiinalai-

nen arkkitehtuurin 3D-tulostamiseen erikoistunut WinSun tulosti useita asuinrakennuksia elementteinä Shanghaissa alle 24 tunnissa (Wu – Wang – Wang 2016). Projektissa käytettiin suurta 150 x 10 x 6.6 m:n kokoista tulostinta sekä materiaalina lasikuitusementtikomposiittia. Projekti sisälsi haasteita rakenteiden haurauden ja pystyttämisen kanssa. (Ngo ym. 2018, 186; Wu ym. 2016.)

Suuri osa rakentamisessa käytettävistä materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmistä on sementtipohjaisten rakenteiden tulostamista. Sementtipohjaisia rakenteita tehdään eniten materiaalia pursottamalla. Sementtinä yleisimmin käytetään Portland-sementtiä, joka rakennusteollisuudessa tunnetaan luotettavana ja alhaiseen hintaan hyvät mekaaniset ominaisuudet omaavana. Sementtirakenteiden alhaisempi hinta tekee niistä helpommin lähestyttävän ja tutkittavan kuin esimerkiksi metallirakenteiden. Polymeerit ovat myös yleisesti käytettyjä materiaaleja yritysmaailmassa, ja niitä tulostetaan pursottamalla sekä robotiikan avustamana. (Bos – Wolfs – Ahmed – Salet 2016, 211; Camacho ym. 2018, 112.)

Yleisesti 3D-tulostamisen prosessi rakennusteollisuudessa muistuttaa paljon tavanomaista 3D-tulostamista, kuten kuvassa 11 on nähtävissä. Suurimmat eroavaisuudet ovat tulostusmenetelmissä, joissa on monia muuttujia kuten tulostustekniikka ja materiaalit. Jotkin prosessit esimerkiksi eivät käytä pelkästään sementtiä. Tästä on esimerkkinä D-Shape, joka käyttää hiekkaa sekä sideaineena magnesiumoksidia ja magnesiumkloridia. World's Advanced Saving Project (WASP) käyttää sementtiä, mutta pääpainona luonnollisia seoksia, jotka sisältävät luonnollista maa-ainesta sekä olkea. (Camacho ym. 2018, 112.)



KUVA 11. Materiaalia lisäävän valmistuksen prosessi rakennusteollisuudessa (mukaillen Paul ym. 2018)

#### 4.1 Betoni- ja sementtipohjaisen rakenteen 3D-tulostaminen

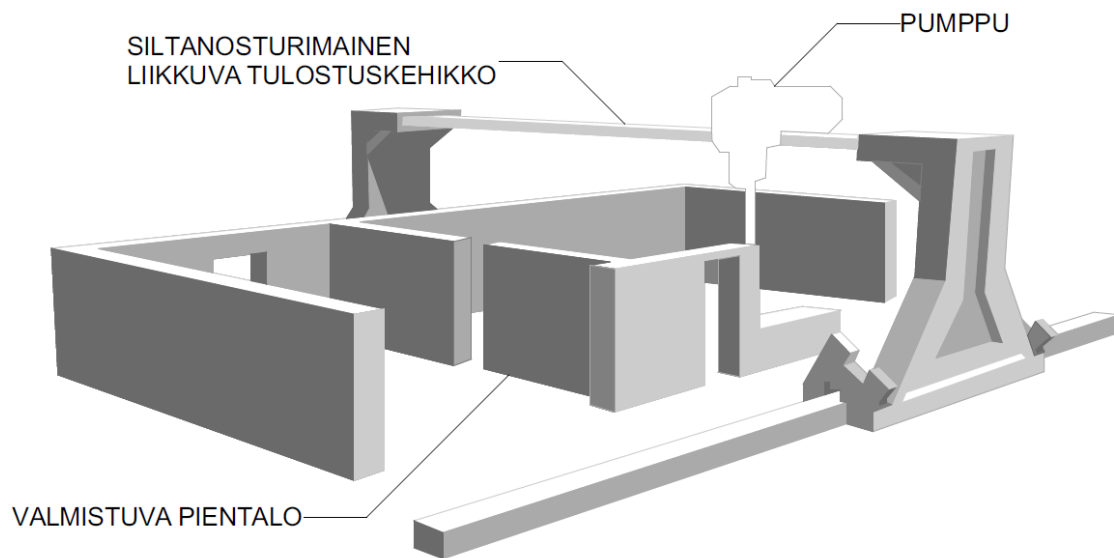
Useimmat sementtipohjaista materiaalia pursottavat teknologiat toimivat siltanosturin kaltaisen kehikkosysteemin avulla. Näiden systemien toiminta perustuu koordinaatistoon, jossa tulostimen suutin liikkuu kolmiaksaalisesti x-, y- ja z-koordinaateilla. Tulostimen suutin liikkuu yleensä sivusuunnassa käyttäen kiskoa. Tulostimen suuri koko ja tulostaminen ylhäältä materiaalia pursottamalla ovat teknologian rajoittavia tekijöitä. (Camacho ym. 2018, 112; Ghaffar ym. 2018, 1-2; Lowke – Dini – Perrot – Weger – Gehlen – Dillenburger 2018, 51.)

Pursotettaessa ylhäältä on rakenteet tulostettava kohtisuoraan valmistusalueeseen nähden, jolloin horisontaalista kaarevuutta ei voida tulostaa. Materiaalilla on aina oltava tuki alapuolella, jotta materiaali ei leikkaannu tai valu (Bos ym. 2016,

218). Tästä syystä on kehitetty muitakin sementtipohjaisten materiaalien tulostamiseen käytettäviä tekniikoita, kuten D-Shapen käyttämä partikkelipetitulostaminen, mikä mahdollistaa monimuotoisten rakenteiden tulostamisen. Partikkelipetitulostamista rajoittaa myös suuri tulostimen koko, mikäli tavoitellaan suurten yhtenäisten rakenteiden tulostamista, sillä tulostimen on oltava tulostettavaa rakennetta suurempi. (Camacho ym. 2018, 112; Ghaffar ym. 2018, 1-2; Lowke ym. 2018, 51.)

#### 4.1.1 Contour crafting

Contour Crafting (CC) käyttää tietokoneohjattua materiaalia lisäävää valmistusta rakentaakseen edullisia ja ympäristöä säästäviä rakenteita. Menetelmä integroi sementtipohjaisen materiaalin pursottamisen ja robotiikka-avusteisen asentamisen yhdessä systeemissä (kuva 12). Nopea valmistaminen ja kuusiakselisen robotiikan soveltaminen on CC:n etuja. (Zareiyan – Khoshnevis 2017, 112.)



*KUVA 12. Materiaalin pursotus Contour Crafting -menetelmässä yksinkertaistusti (mukaillein Contour Crafting, linkit Building Construction -> Detached Houses)*

Jo vuonna 2004 Khoshnevis esitteli contour crafting tekniikan, jolla voidaan valmistaa rakenteita kahdessa eri prosessissa (Khoshnevis 2004). Esitetyt prosessit ovat elementtien ulkokuoren valmistaminen automatisoidulla pursottamisella, minkä jälkeen se täytetään perinteisesti valettavalla betonilla, tai tulostamalla ulkokuori ja samalla rakenteen sisäpuoli siniaaltoilevana rakenteena. (Schutter – Lesage – Mechtcherine – Nerella – Habert – Agusti-Juan 2018, 29.)

Menetelmä käyttää suuria suuttimia ja korkeaa painetta pursottaakseen betonitahnaa. Tulostinpään yhteydessä sijaitsevien tasoituslastojen kontrollointi on tärkeä osa konetta. Tasoituslastojen kulma ja orientaatio ovat muunneltavissa, jotta voidaan tulostaa monimuotoista geometriaa tasaisella tulostuspinnalla. CC:n käyttäminen rakentamisessa on keskittynyt betonirakenteisiin, mikä johtuu sementtipohjaisten rakenteiden alhaisesta hinnasta, saatavuudesta sekä rakennominaisuuksista. CC:ssa rakenne muodostetaan pursottamalla sementtipohjaista seosta kerros kerrokselta, alhaalta ylöspäin rakentuen. Kerrokset pursotetaan suuttimesta toistuvana. (Ngo ym. 2018, 180; Zareiyan – Khoshnevis 2017, 112.)

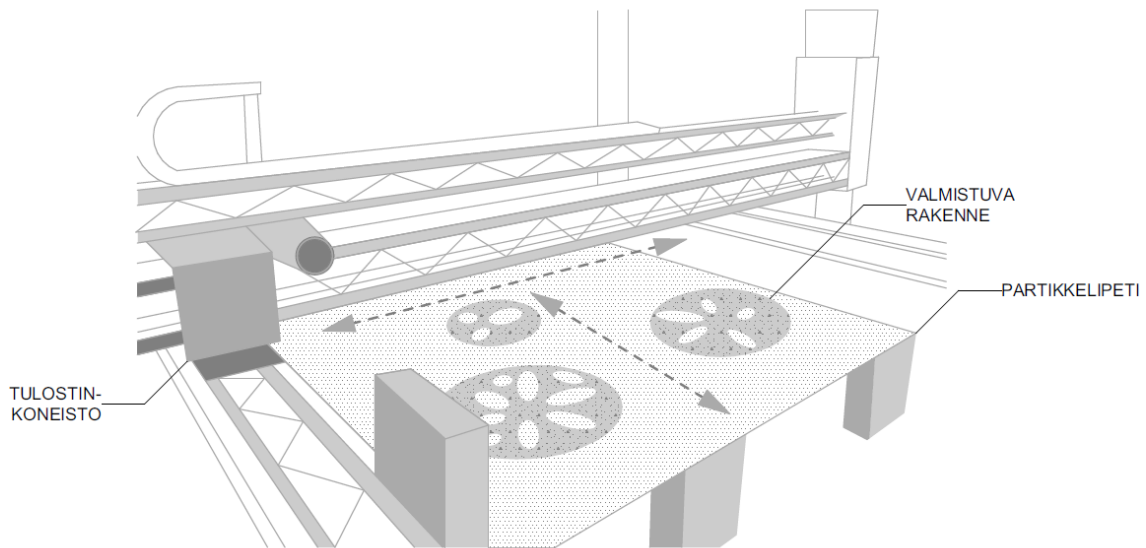
Betonin tuoreominaisuudet ovat tärkeitä onnistuneelle CC:lle. Monitahoisten muotojen tulostaminen vaatii monipuolista betonin työstettävyyttä. Pursotettavuus ja betonin korkea alkulujuus, jotta kerroksittainen tulostaminen edellisen päälle on mahdollista, ovat tärkeitä ominaisuuksia. (Ngo ym. 2018, 180.)

On myös kehitetty menetelmä, jossa esisekoitettu laasti ja kiihdytin pumpataan eri putkista, jolloin ne sekoittuvat tulostuspäässä ennen pursotusta. Tällä tavoin esisekoitetun laastin reologisia ominaisuuksia voidaan kontrolloida pidempään, uhraamatta tulostuvien kerrosten alkulujuutta, mahdollistaen tulevien kerrosten rakentumisen ilman painumaa. Tällä menetelmällä voitaisiin rakentaa suurempia ja monimuotoisia rakenteita, ilman väliaikaisten tukien tarvetta tai materiaalin käyttäytymisen kontrollointia kesken tulostuksen. (Gosselin – Duballet – Roux – Gaudillière – Dirrenberger – Morel 2016; Ngo ym. 2018, 180.)

#### 4.1.2 Partikkelipetitulosaminen

Vaikka yleisin tutkittu menetelmä rakennusten 3D-tulostamisessa on sementtipohjaisten tahnojen pursottaminen, on myös jauhepetimenetelmiin lukeutuvaa partikkelipetitulosamista tutkittu. Sideaineen suihkuttaminen on yksi yleisimmin käytetyistä 3D-tulostamisen menetelmistä eri teollisuuden aloilla, ja sillä on suurta potentiaalia rakentamisteollisuudessa sementtipohjaisten rakenteiden valmistamisessa. Menetelmä on hyvin samankaltainen kuin jauhepetitulosukset yleensä, mutta jauheen sijaan käytetään sementti- tai runkoainepartikkeleja, jotka kiinnitetään nestemäisellä sideaineella muodostaen kiinteää rakennetta. Jotkin tulostusmateriaalit vaativat kovettumista tai uunissa polttamista jälkikäsittelyksi. (Shakor – Nejadi – Paul – Malek 2019; Shakor – Sanjayan – Nazari – Nejadi 2017.)

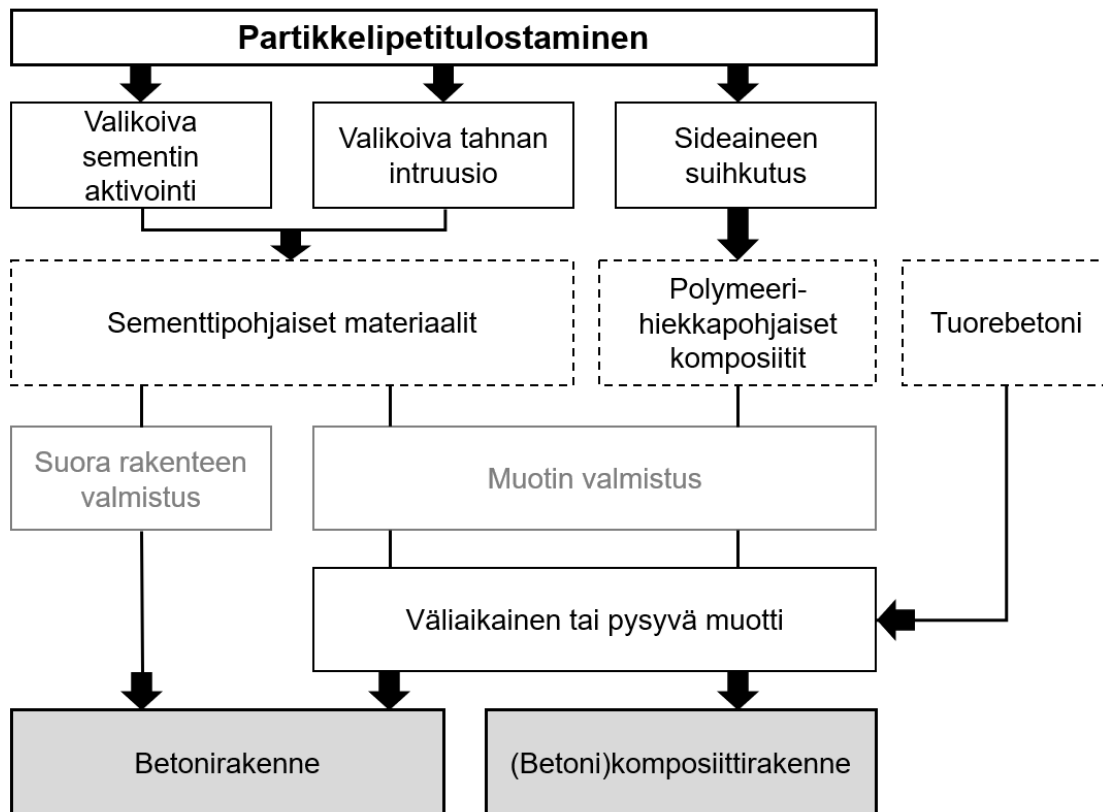
Partikkelipetitulosaminen on materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jolla voidaan tulostaa vapaamuotoisia rakenteita jauhepetimenetelmän tavoin (kuva 13). Tulostusprosessi koostuu kuivapartikkeleiden kerroksittaisesta lisäämisestä sekä nestemäisen faasin tai sideaineen lisäämisestä kuivapartikkelipakkautuman päälle, käyttäen tulostuspäätä tai suutinta, jotta kuivapartikkelit sitoutuvat yhteen. Lopuksi sitoutumattomat kuivapartikkelit poistetaan ”jauheenpoisto”-vaiheessa. Tulostusprosessin päätyttyä, voidaan kappaleen lujuutta lisätä käsittelemällä se vielä sideaineella tai lämmöllä. (Lowke ym. 2018, 51.)



*KUVA 13. Partikkelipetitulosaminen yksinkertaistetusti (mukaillen D-Shape, linkit 3D-printers)*

Partikkelipetitulosamista voidaan pääpiirteiltään käyttää betonikomponenttien tuottamiseen. Menetelmällä on mahdollista tulostaa rakenne käyttämällä sementtipohjaista partikkeliseosta tai tulostamalla rakenteen muotti, mikä tulostuksen jälkeen valetaan tavanomaisella tuoreella betonilla. Muotti voidaan joko poistaa valetun betonin jälkeen tai vaihtoehtoisesti integroida rakenteeseen. Mikäli tulostettu muotti integroidaan rakenteeseen, muodostaa se komposiitin valetun betonin kanssa. Muotin voi tulostaa esimerkiksi sementti- tai polymeeripohjaisella materiaalilla. (Lowke ym. 2018, 51.)

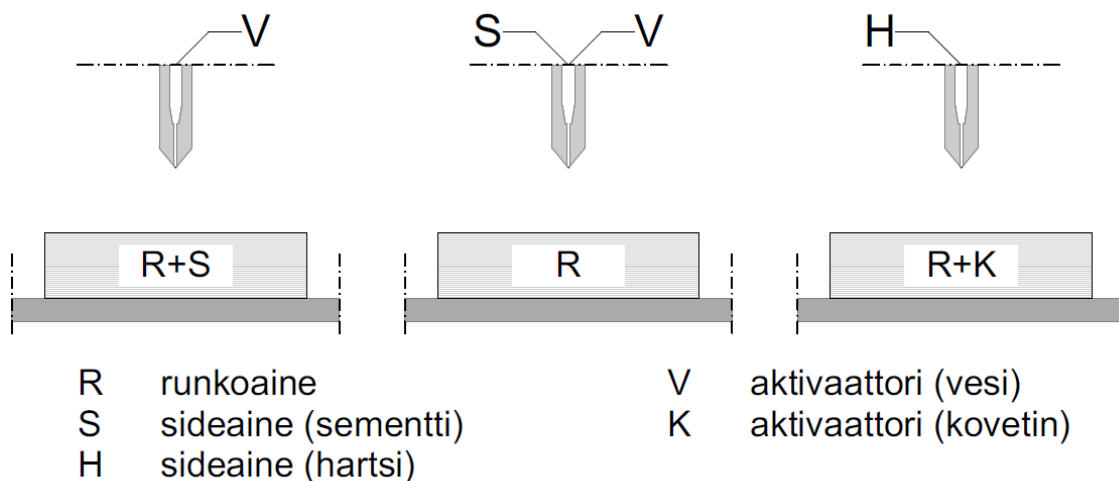
Riippuen käytettävistä materiaaleista, voidaan prosessissa käyttää kolmea eri partikkelipetitulosamisen menetelmää: valikoivaa sementtiaktivointia, valikoivaa tahnan intruusioita tai sideaineen suihkuttamista (kuva 14). (Lowke ym. 2018, 51.)



KUVA 14. Partikkelipetitulosamisen menetelmät (mukaillen Lowke ym. 2018)

Valikoivassa sementtiaktivoinnissa partikkelipeti koostuu todella hienojakoisesta runko- ja sementtisidosaineksesta. Partikkeliseokseen suihkutetaan vettä tai vesi-lisäaineseosta, mikä aktivoi sideaineena toimivan sementin. Valikoivassa tahnan intruusioissa partikkelipedillä on runkoainesta, minkä sekaan lisätään veden, sementin ja lisäaineiden muodostamaa tahnaa suuttimella, minkä on täytettävä runkoainepartikkelien väliset raot. Sideaineen suihkutuksessa suihkutetaan partikkelipedille nestemäistä sideainetta, joka kiinnittää partikkelit yhteen. Mikäli sideaineen suihkutusta käytetään muotin valmistamiseen, käytetään suihkutukseen yleensä hartsia, joka reagoi partikkeliseoksen jo sisältämään kovettumiskomponenttiin. Menetelmät on esitetty yksinkertaistetusti kuvassa 15. (Ngo ym. 2018, 181.)





*KUVA 15. Partikkelipetituloistamisen menetelmät vasemmalta oikealle: valikoiva sementin aktivointi, valikoiva tahnan intruusio ja sideaineen suihkutus (mukailen Lowke ym. 2018)*

Verrattuna muihin rakentamisessa käytettäviin materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiin, partikkelipetimenetelmä ei aseta rajoitteita rakenteen muodolle. Menetelmää täytyy kuitenkin edelleen tutkia ja jatkokehittää, jotta saavutettaisiin korkealujuusrakenteita. (Lowke ym. 2018, 51.)

## 4.2 Rakennusten digitaalinen valmistus

Digitalisaatio muuttaa rakennusteollisuutta ja betoniteknologiaa, jonka digitalisointuminen tuo mukanaan muotoilun sekä rakennusprosessin lisääntyvän automaation ja rakentamisen älyllistämisen (Lim – Buswell – Le – Austin – Gibb – Thorpe 2012). Teknologian tuoma muutos alentaa samalla työkustannuksia sekä lisää työturvallisuutta (Bos ym. 2016).

Materiaalia lisäävä valmistus on osa digitaalista valmistusta, jossa valmistetaan monimuotoisia 3D-objekteja suoraan CAD-mallista kohtuullisessa ajassa yhdistelemällä materiaalia lisäävää, muovaavaa ja poistavaa valmistusta (Chua ym. 2010). Viime vuosina tämä teknologia on näyttänyt suurta potentiaalia rakennus- ja rakentamiskäytännöissä vähentämällä rakennusaikaa ja -jätettä sekä ihmisresurssien tarvetta verrattuna perinteiseen rakentamiseen. Betonin 3D-tulostamista on jo sovellettu rakenteellisissa ja muodollisissa kohteissa useissa maissa,

kuten Dubaissa, Espanjassa, Hollannissa, Kiinassa, Ranskassa, Saudi Arabiassa, Tanskassa ja Yhdysvalloissa. (Panda – Tay – Paul – Tan 2018b; Reiter – Wangler – Roussel – Flatt 2018, 86.)

Digitaalista valmistusta on käytetty vapaamuotoiseen arkkitehtoniseen suunnitteluun ja mallien prototyyppeihin jo vuosia. Valmistus on keskittynyt sementtipohjaisten rakennelmien digitaaliseen valmistukseen erityisesti pursottamalla. Behrokh Khoshnevis on betonin digitaalisen valmistuksen pioneeri Contour Crafting teknologialla. Digitaalisen valmistuksen kanssa yhdistetyt teknologiat asettavat uusia haasteita betonin reologian kontrolloinnissa. Monimuotoisia ja yksilöityjä rakenteita on myös pidetty mahdollisina sovelluksina betonin digitaalisessa valmistuksessa. (Reiter ym. 2018, 87; Schutter ym. 2018, 28-29.)

Energiatehokkaat seinärakenteet ja monikäyttöiset rakennuselementit ovat merkittäviä potentiaalisia betonin digitaalisen valmistuksen käyttökohteita. Nämä voidaan saavuttaa kehittämällä materiaaleja ja hybriditekniikoita sekä integroimalla rakenteisiin toimintoja. Toisaalta topologian optimointi mahdollistaa monitahoisen rakenteen, joka tarjoaa lisätoiminnon muotonsa kautta esimerkiksi akustoivana pintana. Khoshnevis on konseptoinut betonin digitaalisen valmistuksen menetelmän, jossa voidaan valmistaa kokonaisia rakenteita, joihin on integroitu viennit erinäisiä LVIS-tekniikan jälkiasennuksia varten. (Khoshnevis 2004; Schutter ym. 2018, 29.)

Useiden materiaalien käyttämistä eri toimintatarkoituksiin, kuten puristus- ja vetokuormien vastaanottamiseen sekä lämmön eristämiseen, on demonstroitu, mikä tarjoaa paljon mahdollisuuksia älyrakenteiden digitaaliseen valmistukseen. Monimateriaaliset rakenteet, joissa ulkokuori on kuormia kantavaa betonia ja sisäpuoli lämmöneristettä, on kaavailtu markkinoitavaksi lähitulevaisuudessa. (Schutter ym. 2018, 29.)

### **4.3 Rakennusalan esimerkkipilotteja**

Dubai Future Foundationille toteutettu toimistorakennus ”Office of the Future” on maailman ensimmäinen 3D-tulostettu toimistorakennus (kuva 16). Rakennus toteutettiin vuonna 2016 ja se on arkkitehtitoimisto Killa Designin suunnittelema.

(Killa Design, linkit Projects -> Office of the Future; Office of the Future, linkit Learn More.)

Rakennuksen tulosti kiinalainen yritys WinSun, joka yhteistyössä arkkitehtien sekä rakennesuunnittelijoiden kanssa rakensi 250 m<sup>2</sup>:n toimistorakennuksen. Rakennus tulostettiin Shanghaissa, josta se siirrettiin Dubaihin työmaalla pystytettäväksi. Toimistorakennus tulostettiin betonikomposiitista osissa, joiden tulostamiseen kului 17 päivää, minkä jälkeen se pystytettiin kahdessa päivässä. Työvoiman määrä oli vastaaviin rakennukseen verrattuna arviolta 50–80 % pienempi. Kaikkiaan rakennusten viimeistelyyn kului noin kolme kuukautta. (Camacho ym. 2018, 113; Ghaffar ym. 2018, 3; Office of the Future.)



*KUVA 16. Office of the Future – Dubai Future Foundation (Piper 2016)*

Dus arkkitehtien vuonna 2015 suunnittelema kahdeksan neliön urbaani mökki on pilottirakennus, joka demonstroi biopohjaisen materiaalin käyttämistä rakennusten 3D-tulostamisessa (kuva 17). Mökki sijaitsee Hollannissa Amsterdamissa ja koostuu biopohjaisesta polymeeristä, joka voidaan uudelleen käyttää ja kierrättää. Dus arkkitehtien on tarkoitus hyödyntää samaa materiaalia rakenteilla olevassa 700 m<sup>2</sup>:n rakennusprojektissaan 3D Print Canal House, jonka odotetaan valmistuvan lähitulevaisuudessa. (Dus Architects, linkit Work-> Projects -> 3D Print Canal House; Dus Architects, linkit Work -> Project -> Urban Cabin.)



*KUVA 17. 3D-tulostettu urbaani mökki (Van Duivenbode 2016)*

Kiinassa betonitulostamisen tuorein saavutus on jalankulkijoille suunnattu betonisilta, joka valmistui Shanghaissa tammikuussa 2019 (kuva 18). Sillan suunnitteli Tsinghuan yliopiston professori Xu Weiguo tiimeineen. Silta on 26,3 metriä pitkä, ja sen tulostamiseen käytettiin Xu Weiguon tiimin suunnittelemaa 3D-tulostuksen menetelmää. Se koostuu 44 3D-tulostetusta polyeteenikuiduilla vahvistetusta ontosta betoniosasta. Käsijohteita varten tulostettiin kokonaisuudessaan 68 rakenneosaa. (Ravenscroft 2019; Walsh 2019.)



*KUVA 18. Shanghaissa 3D-tulostettu betonisilta (Weiguo 2019)*

Vuoden 2018 Dutch Design Week (DDW) kohteena esitetty MX3D:n ruostumattomasta teräksestä tulostettu silta osoittaa näyttävästi materiaalia lisäävän valmistuksen tulevaisuuden mahdollisuuksia (kuva 19). Silta tulostettiin käyttämällä metallin suorakerrostusta hyödyntäen kuusiaksiaalista robottia. Sillan on suunnitellut Joris Laarman Lab ja Arup toimi sillan johtavana rakennesuunnittelijana. Silta on määrä asentaa paikoilleen Amsterdamiin vuoden 2019 aikana. (MX3D, linkit Projects -> Bridge; Yalcinkava 2018.)



*KUVA 19. Vuonna 2018 valmistunut MX3D:n valmistama terässilta (MX3D)*

BOD (Building On Demand) on tanskalaisen 3D Printhusetin vuonna 2017 betonista tulostama Euroopan ensimmäinen 3D-tulostettu rakennus (kuva 20). Tulostamiseen käytetty teknologia on peräisin COBODilta, joka on 3D Printhusetin perustama rakentamiseen soveltuvien 3D-tulostimien suunnitteluun erikoistunut yritys. (COBOD, linkit About Us.)

Pilotin tarkoitus oli demonstroida eurooppalaisten rakennusmääräysten mukaisen 3D-tulostamisen olevan mahdollista. Rakennus on alle 50 m<sup>2</sup>:ä, mutta silti riittävä havainnollistamaan 3D-tulostamisen ekonomisia ja arkkitehtonisia etuja rakentamisessa. Pilotissa tulostettiin myös rakennuksen perustukset. (COBOD, linkit The BOD Building.)



*KUVA 20. Kierrätettyjä materiaaleja hyödyntävästä betonimassasta 3D-tulostettu BOD (COBOD International 2017)*

## 5 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN POTENTIAALI RAKENTAMISESSA

Materiaalia lisäävä valmistus on saanut 2010-luvulla paljon huomiota rakennusteollisuudessa. Materiaalia lisäävällä valmistuksella on monia hyötyjä rakennusalalle ja mahdollisesti useita etuja perinteisiin rakennustekniikoihin verrattuna. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa pienemmän materiaalihävikin ja energiankulutuksen, arkkitehtonisesti vapaamman suunnittelun sekä kokonaisuudessaan alhaisemman resurssien kulutuksen. Useita kokeellisia ja konseptien toimivuuden todistavia hankkeita on jo toteutettu, mutta lisätutkimuksille on edelleen tarvetta. Seuraavaksi käsitellään haasteita ja mahdollisuuksia, jotka rakennusteollisuuden sektorilla on ratkaistava. (Camacho ym. 2018.)

Rakennusteollisuuden arvellaan kuluttavan jopa kolmasosan maapallon resursseista, minkä takia materiaalitehokkuus ja toimivat rakennusstrategiat ovat tärkeitä tekijöitä ympäristövaikutusten vähentämisessä. Jotta materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiä voidaan hyödyntää suuremmissa mittakaavoissa ja täydellä potentiaalilla, on sen tuoma teknologia ymmärrettävä läpikotaisin. (Ngo ym. 2018, 187.)

Materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien kehittyminen voi mahdollistaa potentiaalisten sovelluksien käytön rakennusteollisuudessa. Potentiaaliasia materiaalia lisäävän valmistuksen sovelluksia rakentamisessa on esitetty taulukossa 3. Menetelmät, kuten valmistus useita materiaaleja käyttäen, paikkasidonnaisten resurssien käyttäminen, hybriditeknikoiden, jotka yhdistävät materiaalia lisäävää, poistavaa sekä muovaavaa valmistusmenetelmää, hyödyntäminen ja 3D-tulostamismahdollisuuksien laajentaminen sekä työmaalla ja sen ulkopuolella mahdollistavat uusien valmistusmenetelmien kehittymisen. (Camacho ym. 2018, 116.)



### TAULUKKO 3. Potentiaalisia materiaalia lisäävän valmistuksen sovelluksia rakentamisessa (mukaillen Camacho ym. 2018)

Potentiaalinen soveltaminen	Esimerkkejä materiaalia lisäävän valmistuksen teknologioista	Tulevaisuuden kehitystarpeet
Uudenlaisia muotoja	D-Shape, Contour Crafting, Concrete Printing, 3D Concrete Printing <sup>b</sup> (3DCD), XtreeE, CyBe <sup>b</sup> Construction, Apis Cor, Big Area Additive Manufacturing (BAAM), KamerMaker, C-Fab, Skanska <sup>a</sup> , Arup <sup>a</sup> , MX3D, Digital Construction Platform <sup>b</sup> (DCP), FreeFAB <sup>TM</sup> Wax	Suuren mittakaavan hankkeet, rakenteelliset sovellukset, nopeampi tulostus, työmaalla tulostaminen
Muodon optimointi	D-Shape, Contour Crafting, Concrete Printing, 3D Concrete Printing <sup>b</sup> (3DCP), XtreeE, Big Area Additive Manufacturing (BAAM), KamerMaker, Skanska, Arup <sup>a</sup> , Permasteelisa <sup>a</sup> , MX3D	Laadun kontrollointi, standardit ja materiaalikokeet, tulostustarkkuus, suuren mittakaavan kokeet, rakenteelliset sovellukset, kerrosten välinen kiinnittyminen, uudenlainen suunnittelu
Kustomoitavat rakenneosat	Skanska <sup>a</sup>	Suuren mittakaavan hankkeet, rakenteelliset sovellukset, nopeampi tulostus, työmaalla tulostaminen
Hyödyntäminen korjaushankkeissa		Korjattavien rakenteiden tunnistaminen, automaatio, työmaalla tulostaminen, kerrosten välinen kiinnittyminen
Mittatoleranssiin soveltaminen		Mittatoleranssiin sovitettavien alueiden tunnistaminen, automaatio

<sup>a</sup> Teknologiaa käyttävä yritys

<sup>b</sup> Kehitteillä

#### 5.1 Uudenlaisia muotoja

Arkkitehdit ovat käyttäneet 3D-tulostimia jo vuosia luodakseen suunnitelmistaan pienoismalleja asiakkailleen. Suuremman mittakaavan 3D-tulostaminen mahdollistaa arkkitehdeille vapauden monimuotoisten geometrioiden käyttämiseen, mikä olisi tavanomaisilla tekniikoilla hidasta ja kallista. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaisi funktionaalisten rakenteiden ja elementtien suunnittelun ilman rakentamisvaiheen ongelmia. Esimerkiksi betonirakenteiden toteuttaminen vaatii muodoltaan oikeanlaisen muotin, jotta rakenteen valaminen on mahdollista. (Bos ym. 2016, 209-210; Camacho ym. 2018, 114.)

3D-tulostettujen betonirakenteiden hinta on alhaisempi, sillä monimuotoisten betonirakenteiden hinnasta arviolta noin puolet koostuu muottien suunnittelusta ja toteuttamisesta. Käyttämällä 3D-tulostamista voidaan betonirakentamisen kokonaiskustannusta laskea jopa 35–60 % poistamalla tavanomaisen muottityön tarpeen (Lloret – Shahab – Linus – Flatt – Gramazio – Kohler – Langenberg 2015). Lisäksi muottien pystyttäminen ja terästen asetteleminen on fyysisesti vaativaa

työtä, varsinkin kun tehdään geometrisesti haastavia muotteja. (Bos ym. 2016, 209-210; Camacho ym. 2018, 114; Panda ym. 2018b.)

Betonin 3D-tulostaminen tuo rakennusteollisuuteen monia etuja. Muodon vapautuminen on yksi suurista 3D-tulostamisen hyödyistä, mikä antaa arkkitehdille ja suunnittelijalle vapauksia suunnitelmiensa muodoissa. Käyttämällä tulostettavia materiaaleja ja komposiittiyhdisteitä, voidaan 3D-tulostimilla valmistaa raamikkaita ja monimuotoisia elementtejä. (Tay – Panda – Paul – Tan – Qian – Leong – Chua 2016.)

## 5.2 Muodon optimointi

Perinteisessä rakentamisessa rakennesuunnitelmat, jotka optimoivat materiaalin ja geometrian rakenteellisessa kestävydessä, johtavat moninaiisiin ja poikkeaviin muotoihin. Perinteisesti nämä suunnitelmat yksinkertaistetaan muodoltaan, jotta säästettäisiin rakennuskustannuksissa, sillä monimuotoisten ja toisistaan poikkeavien rakenteiden toteuttaminen on kallista. (Camacho ym. 2018, 115.)

Materiaalia lisäävän valmistuksen avulla voidaan rakenteet optimoida suunnittelun 3D-mallin datan mukaisiksi. Tällöin ei tarvita kallista työvoimaa rakenteen toteuttamiseen sekä saadaan mahdollisia materiaalisäästöjä, mikä mahdollistaa tulevaisuudessa edullisemmän rakentamisen. Topologian optimointi on tuonut vakuuttavia hyötyjä esimerkiksi ilmailu- ja autoteollisuudessa. Esimerkiksi General Electric Company valmisti polttoainesuuttimia yksittäisinä komponentteina materiaalia lisäävällä valmistuksella, mikä mahdollisti 25 % kevyemmän, viisi kertaa vahvemman ja polttoteholtaan parannellun suuttimen uusiin moottoreihinsa. (Camacho ym. 2018, 115; Panda ym. 2018b.)

3D-tulostaminen mahdollistaa materiaalin lisäämisen sinne, missä sitä tarvitaan. Käyttäen ”muoto seuraa voimaa” -periaatetta on mahdollista tulostaa monenlaisia topologiaoptimoituja rakenteita, jotka ovat hyvin kuormaa kestäviä mutteivat massiivisia. Tästä esimerkkinä on kuvassa 21 esitetty 3D-tulostettu ristikkomainen neljä metriä korkea pilari, joka kannattelee koulun leikki- ja koulun katon Ranskassa.

Pilarin kuoren tulostamiseen meni noin 16 tuntia, minkä jälkeen se valettiin betonilla. Pilari on myös hyvä esimerkki yksilöidystä rakenteesta. (Schutter ym. 2018, 29; XtreeE 2017.)



*KUVA 21. Ranskassa toteutettu, ”muoto seuraa voimaa” -periaatetta edustava, betonista 3D-tulostettu pilari (Ricciotti 2017)*

### **5.3 Kustomoitavat rakenneosat**

Viimeaikaiset kehitykset digitaalisessa valmistuksessa rakennusalalla johtavat yksilöitävien rakennuselementtien valmistukseen perinteisen massatuotannon sijaan. Tulevaisuuden rakentamismallissa rakennus suunnitellaan ja toteutetaan entistä läheisemmin tilaajan kanssa. Rakennusalan ammattilaiset ja suunnittelijat toimivat enemmän konsultoivissa ja ohjeistavissa rooleissa, mahdollistaen rakennuksen digitaalisen valmistuksen. (Schutter ym. 2018, 31.)

Vaikka rakennuskustannukset voi minimoida vähentämällä työn ja materiaalin määrää, tarvikkeiden ja rakenteiden kuljettamista sekä projektiin kuluvaa aikaa,

on tutkimuksissa viitattu materiaalia lisäävän valmistuksen mahdollisesti nostavan projektin hintaa. Hinnan nousu johtuu esimerkiksi osien valmistusnopeudesta, joka muuttuu rajoittavaksi tekijäksi. Toistaiseksi materiaalia lisäävä valmistus on ekonomisin kustomoitavien osien valmistuksessa eikä niinkään rakenteiden ja osien, jotka voidaan massatuottaa. (Camacho ym. 2018, 116.)

Kyky tuottaa erikoisia ja uniikkeja osia kysynnän mukaan, ilman standardisoitujen osien varastoinnin tarvetta, voi johtaa projektikohtaisesti räätälöityjen osien tuottamiseen. Arkkitehdit ja insinöörit ovat rajoittaneet suunnitelmiaan standardisoitujen muotojen ja osien käyttöön, tasoittaakseen tai vähentääkseen rakennusaiakaa ja -kustannuksia. Mikäli projektissa käytetään uniikkia rakennetta, vaatii se nykyään enemmänkin kuin vain rakenteen suunnittelun. Rakenne täytyy vielä toteuttaa ja viimeistellä, mikä vaatii suunnattomasti suunnittelua ja työtunteja. Tämän lisäksi vaaditaan vielä useita kokeita, jotta voidaan varmistaa rakenteen vastaavan rakennusmääräysten mukaisia standardeja. (Camacho ym. 2018, 116.)

Rakennusalalla on moninaisia tarpeita ja toimintatapoja, joista jotkin ovat hyvin erikoistuneita. Materiaalia lisäävä valmistus on ideaalinen erikoisille osille, joilla on poikkeavia mittoja ja muotoja. Konsepti on jo osoitettu toimivaksi esimerkiksi Skanskan toimesta. (Camacho ym. 2018, 116; Ghaffar ym. 2018, 2.)

Skanska tulostutti Lontoossa sijaitsevan 6 Bevis Marks toimiston kattokerroksen uniikkia kattoverhousta kannattelevien pilarien ja latvuston monimuotoisiin ja haastaviin liittymäkohtiin liitosrakenteiden verhoukset (Skanska, linkit About Skanska -> Innovation and digital engineering -> Innovation -> 3D Printing for construction). Kustomoituja osia ja tarvikkeita tulostetaan jo pienessä määrin muilla teollisuuden aloilla, mikä johtaa alhaisempiin kustannuksiin ja ajan säästöön. Tällaisia tarvikkeita ovat esimerkiksi lentokoneiden huoltoon tarkoitetut työkalut, yksilöidyt dentaaliproteesilaitteet tai tulostettavat arkkitehtuurimallit. (Camacho ym. 2018, 116; Ghaffar ym. 2018, 2.)

#### **5.4 Hyödyntäminen korjaushankkeissa**

Suuri osa materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmien tutkimuksista on kohdennettu uusien elementtien valmistukseen, mutta menetelmien käyttö olevien

rakenteiden korjaamiseen paikan päällä on myös lupaavaa. Esimerkiksi Siemens kaasuturbiinin polttopään korjaus tutkii materiaalia lisäävän valmistuksen käyttämistä vaurioituneiden komponenttien korjaamiseen. Vaurioituneet alueet poistetaan jyrsimällä, minkä jälkeen uudet materiaalikerrokset lisätään tilalle, mikä mahdollistaa komponentin palauttamisen alkuperäiseen tai tarpeen mukaan muokattuun muotoon. (Camacho ym. 2018, 116; Navrotsky – Graichen – Brodin 2015.)

Rakennusten ikääntyessä ne vaativat ylläpitoa, huoltoa, kunnostamista, korjaamista sekä rakenteiden korvaamista. Materiaalia lisäävä valmistus voisi toimia osana rikkoutuneiden rakenteiden korjaamista. Rakenne 3D-skannataan, minkä jälkeen vaurioituneet alueet rakennetaan uudelleen suoraan olevaan rakenteeseen hyödyntämällä lisäävän valmistuksen tekniikoita tai hybridimenetelmiä. Tarvittaessa monimuotoiset ja uniikit julkisivukoristeetkin voidaan replikoida ja tulostaa alkuperäisen kaltaisina. (Camacho ym. 2018, 116.)

Vaihtoehtoisesti materiaalia lisäävän valmistuksen tekniikoita voitaisiin hyödyntää luonnon tai ihmisten aiheuttamissa tapaturmissa, jolloin rakenteet ovat vaurioituneet, eikä rakennukseen siirtyminen ole järkevää. Tällöin materiaalia lisäävillä menetelmillä voitaisiin tulostaa väliaikaisia tukirakenteita, jotka mahdollistaisivat rakennuksen turvallisen lähestymisen. Vastaavasti menetelmä olisi hyödyllinen vaaralliseksi luokitelluissa ympäristöissä, kuten esimerkiksi ydinvoimalaonnettomuuden sattuessa. Robotiikalla vahvistettuna pystyttäisiin vaurioituneet rakenteet korjaamaan ilman ihmisten välttämätöntä läsnäoloa. (Camacho ym. 2018, 116.)

Lisätyötä vaaditaan edelleen, jotta materiaalia voitaisiin lisätä suoraan olemassa olevaan rakenteeseen, ennen kuin siirrytään vaativimpiin ja monimutkaisempiin toimenpiteisiin. Materiaalien kiinnittymistä toimivaksi kokonaisuudeksi on edelleen tutkittava ja kehitettävä. (Camacho ym. 2018, 116.)

## 5.5 Valmistus työmaalla ja sen ulkopuolella

Materiaalia lisäävää valmistusta toteutetaan lähinnä kontrolloidussa ympäristössä, mikä mahdollistaa korkealaatuisten rakenneosien valmistamisen. Kontrolloitu ympäristö on ihanteellinen, sillä eri materiaalit voivat reagoida erilaiseen ympäristöön ja sen muutoksiin. Esimerkiksi metalli- ja sementtipohjaiset tulosteet ovat herkkiä lämpö-, kosteus- sekä erinäisille ympäristömuutoksille. Nykyiset työmaalle soveltuvat materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät vaativat edelleen ihanteelliset ympäristöolosuhteet, jotta saavutetaan parhaat tulokset. (Camacho ym. 2018, 117.)

Lisätutkimuksia ja kehitystyötä on lisättävä, jotta voidaan kehittää kestäviä laitteita, menetelmiä ja materiaaleja, mitkä soveltuvat työmaaympäristöön. Rakenneosien herkkyys ympäristötekijöille valmistamisen aikana ja niiden viimeisteleminen työmaalla on tärkeitä huolen aiheita. (Camacho ym. 2018, 116.)

Työmaille sekä paikkasidonnaiseen tulostamiseen soveltuvia tulostimia on jo ehdotettu, ja niitä pilotoidaan tällä hetkellä (Nerella – Mechtcherine 2019; Apis Cor). Tunnetuista sementtipohjaisten materiaalien tulostusmenetelmistä D-shapen etuna on monimuotoisuus, mutta tulostaminen on yleensä suoritettava työmaan ulkopuolella. Contour Crafting on taas alkujaankin konseptoitu toteutettavaksi myös työmaaolosuhteissa. (Ngo ym. 2018, 186.)

## 5.6 Mittatoleranssiin sovittaminen

Materiaalia lisäävälle valmistukselle voisi olla kysyntää rakenteiden mahdollisesti poikkeavien mittojen sovittamisessa toleranssiarvoihin. Rakennusteollisuudessa on mahdollista, että elementit tai rakenteet eivät kohdistu työmaalla riittävällä tarkkuudella paikoilleen. Tällainen inhimillinen este voi aiheutua esimerkiksi liiallisesta mittavirhemarginaalista, suunnitteluvirheestä tai jopa rakenteen valmistusvirheestä. Tällöin tilanne voi vaatia työmaalla suoritettavia korjaus- ja muutostoimenpiteitä, mikä aiheuttaa työn viivästymistä. (Camacho ym. 2018, 116.)

Materiaalia lisäävän valmistuksen avulla voidaan tulostaa mittatarkkoja rakenteita suunnitelmien mukaisesti. Lisäksi mahdollistaa toleranssien mukaisen ra-

kentämisen tulostamalla kustomoituja liittimiä tai täyttöjä tarpeen mukaan. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa tilanteeseen sopeutumisen samalla vähentäen työvoiman ja inhimillisten virheiden määrää. (Camacho ym. 2018, 116.)

### **5.7 Valmistusmenetelmien yhdistäminen**

Hybriditekniikat, jotka yhdistävät materiaalia lisäävää, poistavaa sekä muovavaa valmistusmenetelmää, voivat johtaa materiaalia lisäävän valmistuksen sisällyttämiseen rakentamisessa. Hybriditekniikoilla voidaan parantaa rakenneosien tarkkuutta ja pinnan viimeistelyä ilman tulostusajan kasvamista. Esimerkiksi voidaan tulostaa nopeammin epätarkempi rakenne, mikä sen jälkeen viimeistellään materiaalia poistavalla menetelmällä, kuten hiomalla tai jyrsimällä. Käyttämällä hyväksi jokaisen tekniikan etuja, samalla tutkien uusia materiaaleja, prosesseja ja lisäävän valmistamisen teknologioita, johtaa innovaatioiden kehittymiseen rakentamisessa. (Camacho ym. 2018, 117; Ghaffar ym. 2018, 2.)

### **5.8 Tulevaisuuden materiaalit**

Merkittävänä esteenä 3D-tulostamisen edistymiselle rakennusalalla on rajoittunut materiaalipaletti. Esimerkiksi kevyiden betonikomposiittien valmistaminen yksilöitävillä parametreilla ja materiaaleilla on mielenkiintoinen konsepti tulevaisuuden kehittämisen kannalta. (Ngo ym. 2018, 187; Schutter ym. 2018, 26.)

Useat nykyiset pilotit eivät perustu rakentamisen standardit täyttäviin korkealuokkaiseen materiaaleihin, joiden odotetaan kestävän kohtuullisen pitkään luonnollisessa tai teollisuuden ympäristössä. Ne ovat oikeastaan kapeakatseisesti rajoittuneet kerroksittaisen rakentamisen haasteisiin, jottei kerrosten ennen aikaista painumaa tapahtuisi. (Schutter ym. 2018, 26.)

Tarkasteltaessa pilottien materiaalin suoriutumista voidaan toisinaan havaita materiaalien alisuoriutumista esimerkiksi kutistuman ja halkeilun tavoin. On entistä tärkeämpää, että ymmärretään betonin valmistusolosuhteet ja materiaalikäyttäytyminen, sillä 3D-tulostettaessa betonirakenteita tai -elementtejä kasvaa materiaalin yhtymäkohtien merkitys. Nämä kerrosten väliset kiinnityspinnat ovat merkittäviä rakenteen kokonaislujuuden kannalta. (Schutter ym. 2018, 26-27.)

Tämän hetkinen fokusointi rakenteellisiin materiaaliominaisuuksiin on edelleen rajoittunutta, vaikkakin tällä sektorilla on aloitettu merkittäviä tutkimuksia. Haasteena on edelleen nykyisten korkealuokkaisten ja -lujuus betonien muuntamisessa tulostettavaan muotoon, jotta muottimaisesta tulostamisesta voitaisiin edetä automatisoidumpaan materiaalia lisäävään valmistukseen. (Schutter ym. 2018, 26.)

Betonin tulostamisen yhtenä ongelmana on, ettei sen reologisia ominaisuuksia voida aktiivisesti säätää tulostusprosessin aikana. Olennaisesti uusi tapa on tuoreen sementtipohjaisen seoksen reologian ja kovettumisen aktiivinen säätäminen, mitä tällä hetkellä tutkitaan European Research Council Advanced Grant "SmartCast" -projektissa (Schutter 2017). "SmartCast" in tarkoituksena on luoda betoni, jonka reologiaa ja kovettumista voidaan aktiivisesti kontrolloida. (Schutter ym. 2018, 26.)

Yksi suurimmista materiaalia lisäävän valmistuksen rajoitteista rakennusteollisuudessa on materiaalien ja komponenttien sertifiointi. Varsinkin Euroopassa rakennusteollisuus on riippuvainen vakiintuneista standardeista rakennusprosesseissa ja materiaalivalinnoissa, jotta voidaan varmistaa laadun tasaisuus. Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmissä käytettävistä materiaaleista ei ole vielä vastaavia standardeja, mikä rajoittaa menetelmien käyttöä lähivuosina. Nykyiset rakenne- ja kestävyysstandardit eivät ole tarpeeksi kattavat 3D-tulostetuille materiaaleille. (Ghaffar ym. 2018, 5; Schutter ym. 2018, 28.)

### **5.8.1 Usean materiaalin tulostaminen**

Perinteisessä betonirakenteen valussa käytetään yleisesti yhtä betonilaatua koko rakenteelle. Materiaalia lisäävä valmistus voi mahdollistaa usean materiaalin tulostamisen rakennusvaiheessa, sillä siinä voidaan hyödyntää esimerkiksi materiaalin pursottamisvaiheessa useampaa suutinta ja materiaalia. Tällä menetelmällä voitaisiin esimerkiksi vaihtaa korkealujuusbetoni alhaisempaan lujuusluokkaan alueilla, joilla rakenteessa ei ole yhtä suuria rakennelujuuden vaatimuksia. (Camacho ym. 2018, 117.)



Usean materiaalin käyttäminen ei ole rakentamisessa uusi keksintö. Betonia ja terästä käytetään yleisesti yhdessä, johtuen niiden toisiaan täydentävistä rakennemekaanisista ominaisuuksista ja samankaltaisesta lämpölaajenemisesta. Betoni antaa rakenteelle suuren puristuskestävyyden ja teräs täydentää betonin heikkoa vetolujuutta. Yhdistelemällä eri materiaalia lisääviä menetelmiä voidaan yhdenaikaisesti pursottaa betonia ja tulostaa terästä muodostaen teräsbetonia. Normaalisti teräsbetonista poiketen voidaan materiaalia lisäävällä valmistuksella luoda monimuotoisia rakenteita, joiden rakenteelliset vaatimukset on optimoitu muodon mukaan, mikä on haastavaa perinteisin keinoin. (Camacho ym. 2018, 117.)

Monimateriaalista tulostamista on syytä tutkia tulevaisuudessa, jotta voidaan vastata haasteisiin, joita syntyy esimerkiksi metallia ja betonia tulostettaessa johtuvasta lämpövaihtelusta. Monimateriaalinen tulostaminen voisi tuoda etuja rakentamisessa, mutta lisätutkimuksia vaaditaan tulostamiseen optimoitujen materiaalien käytöstä ja rakenteellisista ominaisuuksista. (Camacho ym. 2018, 117.)

Pystysuuntaisten vahvikkeiden integroiminen 3D-tulostettuun elementtiin on kriittinen haaste, johon ei ole vielä tyydyttävää ratkaisua. Tämä on vaatimus, joka on täytettävä, jotta voidaan täysin hyödyntää 3D-tulostamisen tuomaa muodon vapautta ja topologista optimointia hyödyntämällä digitaalista valmistusta. Tästä on suoritettu useita tutkimuksia eri näkökulmista. (Asprone – Menna – Bos – Salet – Mata-Flacón – Kaufmann 2018.)

Materiaaleilta vaaditaan parempia tuore- ja kovaominaisuuksia riippuen käytetystä lisäävän valmistuksen menetelmästä ja käyttökohteesta. Ominaisuuksiin kuuluvat viskositeetti, varhainen lujuus, lämpölaajeneminen, resistiivisyys, tuloskerroksien mekaaninen kiinnittyminen, muokattavuus sekä vähäisempi työstettävyyteen vaadittu kokonaisenergia. Samanaikaisesti materiaaleilta vaaditaan ekonomisuutta, jotta materiaalia lisäävästä valmistuksesta tulisi mahdollinen vaihtoehto rakentamisessa. (Camacho ym. 2018, 117.)

### 5.8.2 Paikkasidonnaiset materiaalit

Paikallisten ja paikkasidonnaisten materiaalien käyttäminen vähentäisi materiaalikuljetusten kustannuksia sekä mahdollistaisi ympäristöä säästävät suunnitteluratkaisut alueille, joihin on hankala pääsy. Contour Crafting ja D-Shape tutkivat mahdollisuutta rakentaa rakenteita käyttämällä paikkasidonnaisia resursseja kuten kuun regoliittia, sillä raakamateriaalin toimittaminen esimerkiksi kuuhun on erityisen hankalaa ja kallista (Cesaretti – Dini – De Kestelier – Colla – Pambaguian 2014). World's Advanced Saving Project (WASP) suuntaa materiaalia lisäävällä valmistuksella alueille, missä rakennusmateriaaleja ei ole helposti saatavilla, vaan rakentaminen suoritetaan paikkasidonnaisilla materiaaleilla. (Camacho ym. 2018, 117.)

Materiaalia lisäävää valmistusta voi myös hyödyntää esimerkiksi luonnonkatastrofialueilla, missä tarvitaan pikaista katastrofin jälkihoitoa, mutta työvoimaa ja rakennusmateriaaleja on rajoitetusti. Paikalle voidaan toimittaa 3D-tulostin sekä riittävästi raakamateriaaleja tai vaihtoehtoisesti hyödynnetään paikkasidonnaisia materiaaleja. Tällöin alueella tarvitaan minimaalinen määrä työvoimaa, ja alueelle voidaan rakentaa kustomoituja sijais- tai pitkäaikaiskoteja ihmisille, jotka ovat turvaa vailla. (Camacho ym. 2018, 117.)

3D-tulostaminen ei vaadi paljoa ruumiillista työtä, mutta se tarvitsee oikeat materiaalit ja tulostimen, joka voi tulostaa yhtäjaksoisesti minimaalisella valvonnalla. Näiden perusteella 3D-tulostaminen haastavilla ja etäisillä alueilla, jotka ovat mahdollisesti vaarallisia ihmisille, on paras vaihtoehto rakentamiselle. (Panda ym. 2018b.)

Tutkimus paikkasidonnaisten resurssien käyttämisestä materiaalia lisäävässä valmistuksessa on vielä varhaisessa vaiheessa. Työmaa-alueen lähimaastosta kerätyllä maa-aineksella on ainoastaan suoritettu kerroksittaista tulostamista, todentaen sen konseptina mahdolliseksi. Lisätutkimuksia tarvitaan, jotta tulostusaikea, rakenneteknisiä ominaisuuksia, kustomoitavia rakennelmia sekä toistettavuutta voidaan kehittää. (Camacho ym. 2018, 117.)

## 5.9 Rajoitteet

Materiaalista ja tulostustekniikasta riippumatta on materiaalia lisäävä valmistus aikaa vievää. Skaalaamalla tulostusprosessi suuremmaksi kasvaa vaadittava materiaalmäärä, mikä aiheuttaa tulostusprosessissa teknisiä ja logistisia vaikeuksia. Tulosteen tarkkuus on myös huomioitava, jolloin tarkemman tulostuksen saavuttaminen kasvattaa tulostusaikaa. Tarkkuus määräytyy yleisesti materiaalia lisäävissä menetelmissä kerroksen paksuudesta. Mikäli kerrospaksuus on alhainen, on kerroksia toistettava useampi, mikä nostattaa tulostuksen kestoa. (Carmacho ym. 2018, 112; Sakin – Kiroglu 2017, 707-708.)

3D-tulostamisen menestymiseen vaikuttaa tulostusprosessi kokonaisuudessaan, mikä on riippuvainen materiaalista, koneistosta sekä suunnittelusta. On välttämätöntä ylläpitää kunnollinen yhteensopivuus näiden osa-alueiden välillä, sen sijaan että yksittäisiä alueita optimoitaisiin huippuunsa. (Panda – Paul – Mohamed – Tay – Tan 2018a; Panda ym. 2018b.)

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli antaa yleistietoa materiaalia lisäävän valmistuksen tämän hetkisestä kehityksestä, käyttökohteista ja potentiaalisista sovelluksista rakennusosalalla. Aihealue on laaja ja moniulotteinen, mikä teki kirjallisuustutkimuksesta työlää. Käsiteltävien aiheiden rajaaminen oli erityisen vaikeaa, sillä työn tulisi välittää riittävän laajan kuvan alan kehityksestä ja tulevaisuuden potentiaalista, vaikuttamatta liian vaikeaselkoiselta.

Materiaalia lisäävä valmistus on jatkuvasti kehittyvä ja elävä osa tulevaisuuden rakentamisteollisuutta, mikä tekee siitä vaikean aihealueen. Aiheesta julkaistaan maailmalla kasvavassa määrin uutta tietoa ja tutkimustuloksia, joiden seuraaminen on työlästä, varsinkin kun alan termistö ja menetelmät eivät ole täysin vakiintuneita ja vanhentuvat nopeasti.

Materiaalia lisäävä valmistus tuo rakennusosalalle monia etuja perinteisiin tekniikoihin verrattuna. Se mahdollistaa pienemmän materiaalihävikin ja energiakulutuksen, kustannustehokkaamman rakentamisen sekä uudenlaisia valmistusmenetelmiä, rakenteita ja materiaaleja.

Jotta rakennusosalalla voitaisiin täysin hyödyntää materiaalia lisäävää valmistusta, tulee tulostusprosessi ymmärtää kokonaisuudessaan, mikä on riippuvainen materiaaleista, tulostustekniikoista ja -koneista sekä suunnittelusta. Lisäksi se vaatii jo pilotoitujen menetelmien integroimista aktiivisemmin osaksi rakennusprosessia sekä rajoittavien tekijöiden kuten esimerkiksi materiaalien ja komponenttien sertifiointin asettamien haasteiden ratkaisemista.

Digitaalisen valmistuksen, jonka osa-alueena materiaalia lisäävä valmistus toimii, integroiminen osaksi perinteistä työmaatoimintaa ja rakentamista vaatii vielä kehitystä ja lisätutkintaa. Kehittymisen mahdollistamiseksi on rakennusosalalla hyödynnettävä hybriditekniikoita, jotka yhdistävät materiaalia lisäävää, poistavaa ja muovaavaa valmistusmenetelmää kasvavassa määrin. On kuitenkin varmaa, että materiaalia lisäävä valmistus ja digitaalinen valmistus muuttavat tavanomaisen rakentamisen tulevaisuudessa.

## LÄHTEET

Apis Cor – Apis Cor construction technology. Saatavissa: <https://www.apis-cor.com/en/faq/teknologiya-stroitelstva>. Hakupäivä 1.3.2019.

Asprone, Domenico – Menna, Costantino – Bos, Freek P. – Salet, Theo A. M. – Mata-Flacón, Jaime – Kaufmann, Walter 2018. Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete. Cement and Concrete Research vol. 112. S. 111-121.

Bikas, Harry - Stavropoulos, Panagiotis – Chryssolouris, George 2016. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology vol. 83. 2016. S. 389-405.

Bos, Freek – Wolfs, Rob – Ahmed, Zeeshan – Salet, Theo 2016. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and physical prototyping vol. 11. S. 209-225.

Camacho, Daniel Delgado – Clayton, Patricia – O'Brien, William John. – Seepersad, Carolyn – Juenger, Maria – Ferron, Raissa – Salamone, Salvatore 2018. Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review. Automation in Construction vol. 89. S. 110-119.

Carbon3D Inc. Saatavissa: <https://www.carbon3d.com/>. Hakupäivä 17.1.2019.

Cesaretti, Giovanni – Dini, Enrico – De Kestelier, Xavier – Colla, Valentina – Pambaguian, Laurent 2014. Building components for and outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. Acta Astronautica vol. 93. S. 430-450.

Chua, Chee Kai – Leong, Kah Fai – Lim, Chu Sing 2010. Rapid Prototyping: Principles and Applications vol. 1. 3. painos. Singapore: World Scientific.

COBOD. Saatavissa: <https://cobod.com/>. Hakupäivä 25.3.2019.

COBOD International 2017. The BOD Building. Saatavissa: <https://cobod.com/the-bod/>. Hakupäivä 25.3.2019.

Contour Crafting. Saatavissa: <http://contourcrafting.com/>. Hakupäivä 22.3.2019.

Deckers, Jan – Vleugels, Jef – Kruth, Jean-Pierre 2014. Additive Manufacturing of Ceramics: A Review. Journal of Ceramic Science and Technology vol. 5.

D-Shape. Saatavissa: <https://d-shape.com/>. Hakupäivä 23.3.2019.

Dus Architects. Saatavissa: <https://houseofdus.com/>. Hakupäivä 28.2.2019.

Eckel, Zak C. – Zhou, Chaoyin – Martin, John H. – Jacobsen, Alan J. – Carter, William B. – Schaedler, Tobias A. 2016. Additive manufacturing of polymer-derived ceramics. Science vol. 351. S. 58-62.

Ghaffar, Seyed Hamidreza – Corker, Jorge – Fan, Mizi 2018. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. Automation in Construction vol. 93. S. 1-11.

Gosselin, Clement – Duballet, Romain – Roux, Philippe – Gaudillière, Nadja – Dirrenberger, Justin – Morel, Philippe 2016. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. Materials and Design vol.100. S. 102-109.

Hager, Izabela – Golonka, Anna – Putanowicz, Roman 2016. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? Procedia Engineering vol. 151. S. 292-299.

Hambach, Manuel – Volkmer, Dirk 2017. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. Cement and Concrete Composites vol. 79. S. 62-70.

Herzog, Dirk – Seyda, Vanessa – Wycisk, Eric – Emmelmann, Claus 2016. Additive manufacturing of metals. Acta Materialia vol. 117. S. 371-392.

Khoshnevis, Behrokh 2004. Automated construction by contour crafting – related robotics and formation technologies. Automation in Construction vol. 13. S. 5-19.

Killa Design. Saatavissa: <https://www.killadesign.com/>. Hakupäivä 22.3.2019.

Le, Thanh T. – Austin, Simon A. – Lim, Sungwoo – Buswell, Richard Andrew – Gibb, Alistair G. F. – Thorpe, Tony 2012. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures* vol. 45(8). S. 1221-1232.

Ligon, Samuel Clark – Liska, Robert – Stampfl, Jürgen – Gurr, Matthias – Mülhaupt, Rolf 2017. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews* vol. 117. S. 10212-10290.

Lim, Sungwoo – Buswell, Richard Andrew – Le, Thanh T. – Austin, Simon A. – Gibb, Alistair G. F. – Thorpe, Tony 2012. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction* vol. 21. S. 262-268.

Lloret, Ena – Shahab, Amir R. – Linus, Mettler – Flatt, Robert J. – Gramazio, Fabio – Kohler, Matthias – Langenberg, Silke 2015. Complex concrete structures Merging existing casting techniques with digital fabrication. *Computer-Aided Design* vol. 60. S. 40-49.

Lowke, Dirk – Dini, Enrico – Perrot, Arnaud – Weger, Daniel – Gehlen, Christoph – Dillenburger, Benjamin 2018. Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. *Cement and Concrete Research* vol. 112. S. 50-65.

MacDonald, Eric – Wicker Ryan 2016. Multiprocess 3D printing for increasing component functionality. *Science* vol. 353. Issue. 6307.

MX3D. Saatavissa: <https://mx3d.com/>. Hakupäivä 22.3.2019.

Navrotsky, Vladimir – Graichen, Andreas – Brodin, Håkan 2015. Industrialisation of 3D printing (additive manufacturing) for gas turbine components repair and manufacturing. *VGB PowerTech* vol. 12. S. 48-52.

Nerella, Venkatesh Naidu – Mechtcherine, Viktor 2019. Chapter 16 – Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D). *3D Concrete Printing Technology 2019*. S. 333-347.

Ngo, Tuan D. – Kashani, Alireza – Imbalzano, Gabriele – Nguyen, Kate T.Q. – Hui, David 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B vol. 143. S. 172-196.

Office of the Future. The World's First 3D Printed Office. Saatavissa: <http://www.officeofthefuture.ae/#>. Hakupäivä 22.3.2019.

Panda, Biranchi – Paul, Suvash Chandra – Mohamed, Nisar Ahmed Noor – Tay, Yi Wei Daniel – Tan, Ming Jen 2018a. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymers mortar. Measurement vol. 113. S. 108-116.

Panda, Biranchi – Tay, Yi Wei Daniel – Paul, Suvash Chandra – Tan, Ming Jen 2018b. Current challenges and future potential of 3D concrete printing. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik vol.49(5).

Paul, Suvash Chandra – Tay, Yi Wei Daniel – Panda, Biranchi – Tan, Ming Jen 2018. Fresh and Hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. Archives of civil and mechanical engineering vol. 18. S. 311-319.

Perrot, Arnaud – Rangeard, Damien – Pierre, Alexandre 2016. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Materials and Structures vol. 49. S. 1213-1220.

Perrot, Arnaud – Rangeard, Damien – Courteille, Eric 2018. 3D printing of earth-based materials: Processing aspects. Construction and Building Materials vol. 172. S. 670-676.

Piper, Ben 2016. Killa Design. Office of the Future. Saatavissa: <https://www.killadesign.com/portfolio/office-of-the-future/>. Hakupäivä 22.3.2019.

Ravenscroft, Tom 2019. Dezeen. World's longest 3D-printed concrete bridge opens in Shanghai. Saatavissa: <https://www.dezeen.com/2019/02/05/worlds-longest-3d-printed-concrete-bridge-shanghai/>. Hakupäivä 22.3.2019.



Reiter, Lex – Wangler, Timothy – Roussel, Nicolas – Flatt, Robert J. 2018. The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. Cement and Concrete Research vol. 112. S. 86-95.

Ricciotti, Lisa 2017. Post in Aix-En-Provence. Saatavissa: <http://www.xtreee.eu/post-in-aix-en-provence/>. Hakupäivä 28.2.2019.

Sakin, Mehmet – Kiroglu, Yusuf Caner 2017. 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. Energy Procedia vol. 134. S. 702-711.

Sames, William J. – List, Fred. A. – Pannala, Sreekanth – Dehoff, Ryan R. – Babu, Sudarsanam S. 2016. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. International Materials Reviews vol. 61(5). S. 315-360.

Schutter, Geert De 2017. Smart Casting of Concrete Structures by Active Control of Rheology. SmartCast, ERC Advanced Grant Project, European Research Council, 2016-2021. Video. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=ZgVwNkyvJFg&feature=youtu.be>.

Hakupäivä 28.2.2019.

Schutter, Geert De – Lesage, Karel – Mechtcherine, Viktor – Nerella, Venkatesh Naidu – Habert, Guillaume – Agusti-Juan, Isolda 2018. Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials. Cement and Concrete Research vol. 112. S. 25-36.

Senatov, Fedor S. – Niaza, Kirill V. – Zadorozhnyy, Mihail Yu. – Maksimkin, Aleksey V. – Kaloshkin, Sergey D. – Estrin, Yuri Z. 2016. Mechanical properties and shape memory effect of 3D-printed PLA-based porous scaffolds. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials vol. 57. S. 139-148.

SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry.

Shakor, Pshtiwan – Sanjayan, Jay – Nazari, Ali – Nejadi, Shami 2017. Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing. *Construction and Building Materials* vol. 138. S. 398-409.

Shakor, Pshtiwan – Nejadi, Shami – Paul, Gavin – Malek, Sandar 2019. Review of Emerging Additive Manufacturing Technologies in 3D Printing of Cementitious Materials in the Construction Industry. *Frontiers in Built Environment* vol. 4(85). S. 1-17.

Sheydaeian, Esmat – Toyserkani, Ehsan 2018. A new approach for fabrication of titanium-titanium boride periodic composite via additive manufacturing and pressure-less sintering. *Composites Part B* vol. 138. S. 140-148.

Skanska. 3D printing for construction. Saatavissa: <https://www.skanska.co.uk/>. Hakupäivä 25.2.2019.

Tay, Yi Wei – Panda, Biranchi – Paul, Suvash Chandra – Tan, Ming Jen – Qian, Shun Zhi – Leong, Kah Fai – Chua, Chee Kai 2016. Processing and Properties of Construction Materials for 3D Printing. *Materials Science Forum* vol. 861. S. 177-181.

Travitzky, Nahum – Bonet, Alexander – Dermeik, Benjamin – Fey, Tobias – Filbert-Demut, Ina – Schlier, Lorenz – Schlordt, Tobias – Greil, Peter 2014. Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials. *Advanced Engineering Materials* vol. 16(6).

Van Duivenbode, Ossip 2016. Urban Cabin. Saatavissa: <https://www.archdaily.com/794855/urban-cabin-dus-architects>. Hakupäivä 22.3.2019.

Vayre, Benjamin – Vignat, Frédéric – Villeneuve, François 2012. Designing for Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* 3. S. 632-637.

Walsh, Niall Patrick 2019. ArchDaily. World's Largest 3D-Printed Concrete Pedestrian Bridge Completed in China. Saatavissa: <https://www.archdaily.com/909534/worlds-largest-3d-printed-concrete-pedestrian-bridge-completed-in-china>. Hakupäivä 22.3.2019.

Weiguo, Xu 2019. World's longest 3D-printed concrete bridge opens in Shanghai. Saatavissa: <https://www.dezeen.com/2019/02/05/worlds-longest-3d-printed-concrete-bridge-shanghai/>. Hakupäivä 22.3.2019.

Wohlers, Terry. 2017. 3D printing and additive manufacturing state of the industry Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Report.

Wong, Kaufui V. – Hernandez, Aldo 2012. A Review of Additive Manufacturing. ISRN Mechanical Engineering vol. 2012. S. 1-10.

Wu, Peng – Wang, Jun – Wang, Xiangyu 2016. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. Automation in Construction vol. 68. S. 21-31.

XtreeE 2017. Post in Aix-en-Provence. Saatavissa: <http://www.xtreee.eu/post-in-aix-en-provence/>. Hakupäivä 28.2.2019.

Yalcinkaya, Günseli 2018. World's first 3D-printed steel bridge unveiled at Dutch Design Week. Dezeen. Saatavissa: <https://www.dezeen.com/2018/10/22/worlds-first-3d-printed-steel-bridge-completed-mx3d-technology/>. Hakupäivä 2.12.2018.

Zareiyan, Babak – Khoshnevis, Behrokh 2017. Interlayer adhesion and strength of structures in Contour Crafting – Effects of aggregate size, extrusion rate and layer thickness. Automation in Construction vol. 81. S. 112-121.