



3D-tulostus

Esiselvitys tuotannon aloittamiseksi

Markus Suomalainen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2023

Konetekniikka
Tuotekehitys, koneautomaatio

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Tuotekehitys, koneautomaatio

SUOMALAINEN, MARKUS:
3D-Tulostus
Esiselvitys tuotannon aloittamiseksi

Opinnäytetyö 41 sivua, joista liitteitä 3 sivua
Toukokuu 2023

Etra OY:n tuotantojen palvelutarjontaa haluttiin monipuolistaa nykyisten vesileikkaus- ja alihankintakoneistuspalveluiden lisäksi uudella tuotantomenetelmällä, 3D-tulostuksella. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin, millä menetelmällä yrityksen kannattaa aloittaa uuden, jatkuvasti kehittyvän tuotantomenetelmän implementointi osaksi nykyistä toimintaa. Tarkastelun kohteeksi valittiin yleisimmät teolliseen valmistukseen soveltuvat menetelmät ja niitä vertailtiin keskenään prosessin, materiaalien, työturvallisuuden ja vaadittavan infrastruktuurin näkökulmista. Tutkimuksen aineisto hankittiin useasta eri tietokannasta artikkelien muodossa, laitevalmistajien ja 3D-tulostusyhteisöjen www-sivuilta sekä maahantuojaisten toimipisteissä tehdyillä vierailuilla.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi ehdotus, jonka mukaan aloitukseen valitaan SLA- ja FFF-menetelmät. Näillä menetelmillä Etra OY pystyy aloittamaan ainetta lisäävän valmistuksen kohtuullisella aloituskustannuksella, ja ne myös mahdollistavat laadukkaiden kappaleiden valmistuksen asiakkaiden vaatimusten mukaan. Menetelmän valinnassa painotettiin laajaa materiaalivalikoimaa, tuotannon tehokkuutta ja helppoa integraatiota nykyiseen toimintaympäristöön.

3D-tulostuksen tullessa yhdeksi tuotantomenetelmäksi muiden rinnalle Etra OY pystyy laajentamaan palvelukonseptiaan, lisäämään osaamista omissa tuotannoissa ja tulevaisuudessa kasvattamaan liikevaihtoa. Ainetta lisäävä valmistusmenetelmä on vielä teollisessa käytössä uusi ja sen prosessit kehittyvät jatkuvasti. Tämä toisaalta luo mahdollisuuden pysyä kehityksen kärjessä, mutta toisaalta myös edellyttää alan muutosten jatkuvaa seuraamista ja oman toiminnan kehittämistä uusia innovaatioita hyödyntämällä ja tuotantoa tehostamalla.

Asiasanat: 3d-tulostus, tuotanto, ainetta lisäävä, valmistus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Degree Programme in Mechanical Engineering
Product Development, Machine Automation

SUOMALAINEN, MARKUS:
3D-Printing
Preliminary study for beginning of manufacturing

Bachelor's thesis 41 pages, appendices 3 pages
May 2023

Etra Oy wanted to extend their range of services with the production method of additive manufacturing (AM), i.e. 3D printing. Current industrial quality AM methods were studied to find out, which would be suitable for the new branch of Etra production and which would suit the production site. The methods were compared against each other in the terms of the production process, material library, occupational safety and required infrastructure. The material for the study was collected from different databases in the form of articles, websites of machine manufacturers and 3D printing communities, and on-site visits to companies that import AM Machines.

This study came to the conclusion that the right methods for the start of production are SLA and FFF. With these choices it is possible to start manufacturing of high-quality parts according to a wide variety of customers' specifications with a reasonable starting cost. Material options, efficiency of production and easy integration to current infrastructure were considered when choosing the methods.

As AM is added to the company's current production methods, Etra Oy will be able to improve service concept, extend production proficiency and in the future grow turnover. Additive manufacturing is still a rather new production method, which is rapidly developing and evolving. This on the other hand gives opportunity to adapt efficient state-of-the-art methods and processes to production, but also demands constant development of production and following the new innovations in the AM industry.

Key words: 3d-printing, production, additive manufacturing, manufacturing

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	3D-TULOSTUSMENETELMÄT	9
	2.1 SLS, Selective Laser Sintering, lasersintraus	9
	2.2 MJF, Multi Jet Fusion	10
	2.3 SLA, Stereolithography ja DLP, Digital Light Processing	11
	2.4 FDM, Fused Deposition Modeling (FFF, Fused Filament Fabrication)	12
3	MATERIAALIT	15
	3.1 Polyamidit	15
	3.2 Termoelastomeerit	15
	3.3 Polypropeeni	16
	3.4 SLS- ja MJF-menetelmät, jauheet	16
	3.5 Resiinit eli fotopolymeerit	17
	3.6 Filamentit	18
	3.7 Materiaalit tulevaisuudessa	19
4	TYÖTURVALLISUUS	20
	4.1 Henkilökohtaiset suojaimet	20
	4.2 Koneturvallisuus	20
	4.3 Tila	21
	4.4 Työvaiheet	22
	4.4.1 Asetustyö	22
	4.4.2 Tulostus	22
	4.4.3 Jälkikäsittely	23
5	LAITTEISTO	24
	5.1 Laittevalmistajat	24
	5.1.1 EOS	24
	5.1.2 Hewlett-Packard	24
	5.1.3 Formlabs	25
	5.1.4 miniFactory	26
	5.1.5 Nexa3D	26
	5.1.6 Markforged	27
	5.2 Jälkikäsittelylaitteet ja -menetelmät	27
	5.2.1 Jauhepedin purkuasema	28
	5.2.2 Pesu- ja kovetusasema	28
	5.2.3 Lasikuulapuhallus	28
	5.2.4 Värjäys	29

5.2.5	Kiillotus ja pinnanlaadun parantaminen	30
6	YHTEENVETO	31
6.1	Vertailu	31
6.1.1	Materiaalivalikoima	31
6.1.2	Materiaalinkäsittely ja -varastointi	32
6.1.3	Valmistusprosessi	32
6.1.4	Jälkikäsittely tulostuksen jälkeen	33
6.1.5	Tilavaatimukset	33
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	35
	LÄHTEET	37
	LIITTEET	39
	Liite 1. SLA-menetelmän laitevertailu	39
	Liite 2. FFF-menetelmän laitevertailu	40
	Liite 3. SLS- ja MJF-menetelmien laitevertailu	41

LYHENTEET JA TERMIT

SLS	Selective Laser Sintering
MJF	Multi Jet Fusion
SLA	Stereolithography
DLP	Digital Light Processing
FDM	Fused Deposition Modelling
FFF	Fused Filament Fabrication
PA	Polyamidi
TPE	Thermoplastic Elastomer
TPU	Thermoplastic Urethane
PVC	Polyvinyylikloridi
PP	Polypropeeni
PE	Polyeteeni
ABS	Akrylibutadieenistyreeni
PC	Polykarbonaatti
POM	Polyoksimetyleeni (tunnetumpi polyasetaali)
PLA	Polylaktidi
PEEK	polyeetterieetteriketoni
PEKK	polyeetteriketoniketoni
LSPc	Lubricant Sublayer Photo-curing
IPA	Isopropanoli
UV	Ultravioletti
resiini	Nestemäinen fotopolymeeri
filamentti	Kiinteä, pyöreää profiilia oleva materiaalilanka

1 JOHDANTO

Perinteinen valmistusmenetelmä konepajoilla on lastuava työstö eli koneistus. Tällä tarkoitetaan aineen poistoa puolivalmisteesta, esimerkiksi tangosta, putkesta tai levystä, jotta saadaan suunnittelijan suunnittelema kappale valmistettua. Puolivalmisteen tyypistä ja koneistettavasta kappaleesta riippuen poistettavaa materiaalia saattaa olla todella paljon. Poistetun materiaalin kierrättäminen uusiokäyttöön vie aikaa ja on energiaa kuluttavaa, eikä sitä yleensä pystytä tekemään kuljettamatta hukkamateriaalia ensin muualle. Valmiiden kappaleiden toimitus loppuasiakkaalle saattaa myös vaatia pitkän, resursseja kuluttuvan kuljetuksen maa-, meri- tai ilmaitse. Kestävän kehityksen periaatteiden mukaisesti uusilla valmistusmenetelmillä pystytään vähentämään raaka-aineen menekkiä kappaleissa ja hukkamateriaalin syntyä, sekä siirtämään kappaleiden valmistusta lähemmäs loppuasiakasta.

Ainetta lisäävä valmistusmenetelmä (engl. Additive Manufacturing, AM) on tullut pysyväksi osaksi valmistavan teollisuuden tuotantoa. Suunnittelijat pystyvät hyödyntämään menetelmän mahdollistamat geometriat, millä kappaleet voidaan optimoida mm. pienimmän massan tai suurimman jäykkyyden saavuttamiseksi. Tätä kutsutaan topologiseksi optimoinniksi ja sillä pystytään saavuttamaan tarvittavat funktionaaliset ominaisuudet kappaleelle mahdollisimman vähällä materiaalin käytöllä. Menetelmä mahdollistaa myös kappaleiden sisäisten kanavien suunnittelun optimaalisen nesteen tai kaasun virtauksen saavuttamiseksi, mitä ei välttämättä perinteisillä valmistusmenetelmillä pystytty toteuttamaan. Pystytään siis käyttämään raaka-aine tehokkaammin ja valmistamaan paremmin käyttötarkoituksensa täyttäviä kappaleita, joiden suunnittelu on voitu tehdä ilman perinteisten valmistusmenetelmien rajoitteita.

Uuden tuotantomenetelmän käyttöönotto luo alihankintakonepajalle mahdollisuuden kasvattaa liikevaihtoa uudella markkina-alueella. Ainetta lisäävä tuotantomenetelmä on vakiinnuttanut paikkansa sarjakoosta riippumattomassa tuotannossa ja luonut uusia mahdollisuuksia monimutkaisia geometrioita omaavien kappaleiden suunnitteluun ja valmistukseen. Menetelmällä pystytään valmistamaan myös

oman tuotannon käyttöön erilaisia kiinnittimiä ja tarttuvia, joten konepajan menetelmäkehityksen näkökulmastakin hyödyt ovat merkittävät.

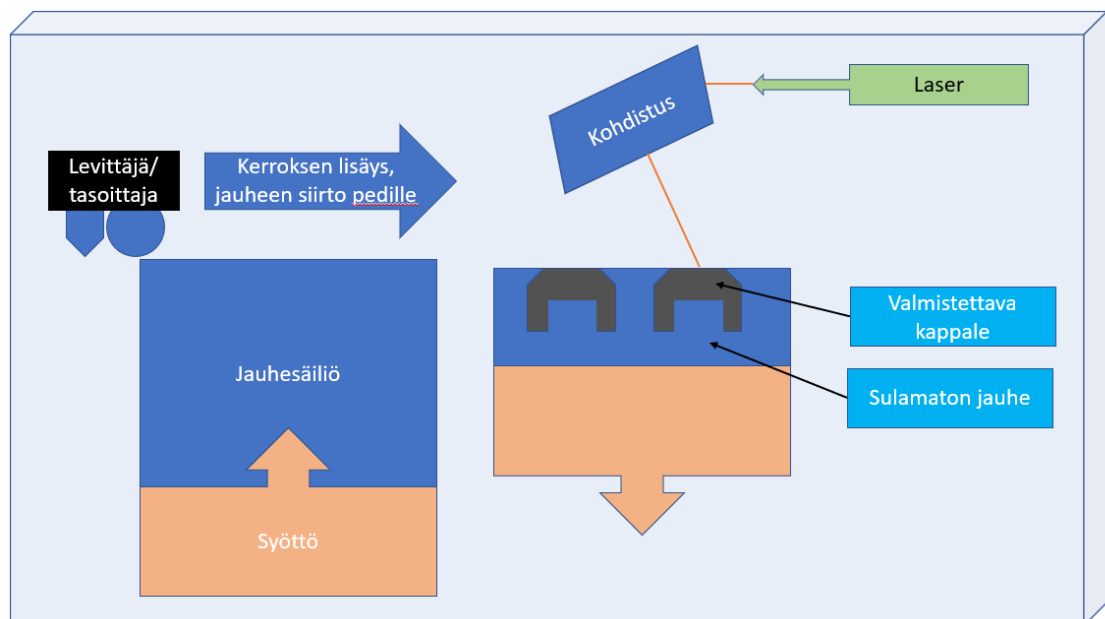
Etra OY:llä on laaja asiakaskunta teollisuuden alalla ja yrityksen yhtenä keskeisenä arvona on asiakaslähtöinen palvelu. Asiakasyritykset suunnittelevat nykyään tuotteitaan ainetta lisäävän menetelmän mahdollisuuksien mukaan, jolloin niitä ei ole tehokasta valmistaa perinteisesti koneistamalla. 3D-tulostus palvelee yritystä myös sisäisesti. Tuotannoissa tarvitaan erilaisia apuvälineitä kappaleiden kiinnitykseen ja asemointiin koneistusta varten, ja näiden valmistukseen 3D-tulostus on joustava ja tehokas menetelmä. Lisääntyvän automaation myötä erilaisten robotin tarttujen valmistus onnistuu myös uudella menetelmällä.

Uusien tuotantomenetelmien käyttöönotto vaatii henkilöresurssin kasvattamista ja investointeja, mutta ne mahdollistavat tulevaisuudessa kilpailukyvyn säilyttämisen ja laajemman palvelutarjonnan asiakkaille. Asiakkaina on suuria kotimaisia laitevalmistajia, joiden tarpeet ovat prototyyppien 0-sarjoista tyypillisesti kymmenien ja satojen kappaleiden sarjatuotantoon.

2 3D-TULOSTUSMENETELMÄT

2.1 SLS, Selective Laser Sintering, lasersintraus

SLS-menetelmässä jauhepartikkeleihin kohdistetaan lasersäde, jonka synnyttämä lämpöenergia sulattaa jauhetta ja se fuusioituu osaksi valmistuvan kappaleen materiaalia. Laitteen pääosat ovat jauheen levittäjä/tasoittaja, jauhepeti ja laser ja ne on esitetty kuviossa 1. Jauheen levittäjä/tasoittaja tuo jauhepedille kerroksen jauhetta ja tasaa sen pinnan. Lasersäde kohdistetaan jauheeseen tietokoneohjatuilla peileillä x- ja y-suunnassa, jolloin kappaleet valmistuvat kerros kerrokselta. Tyypillisesti kerrosvahvuus on 100–500 µm. Lämpöenergiaa tuodaan oikea määrä, joka nostaa jauhepartikkelien lämpötilan fuusioon riittävälle tasolle, mutta kuitenkin alle materiaalin sulamispisteen. Sulamaton jauhe toimii tukirakenteena valmistettavalle kappaleelle, jolloin erillisiä tukirakenteita ei tarvitse generoida malliin. Kerroksen valmistuttua jauhepeti laskee z-suunnassa kerroksen vahvuuden verran, jonka jälkeen tuodaan seuraava kerros uutta jauhetta pedille. Prosessia jatketaan edellä kuvatusti, kunnes työ on valmis. (Natarajan, J., Muralimohan. C, ja Che-Hua, Y., 2021 Advances in Additive Manufacturing Processes. Singapore: Bentham Science Publishers, 8-9)

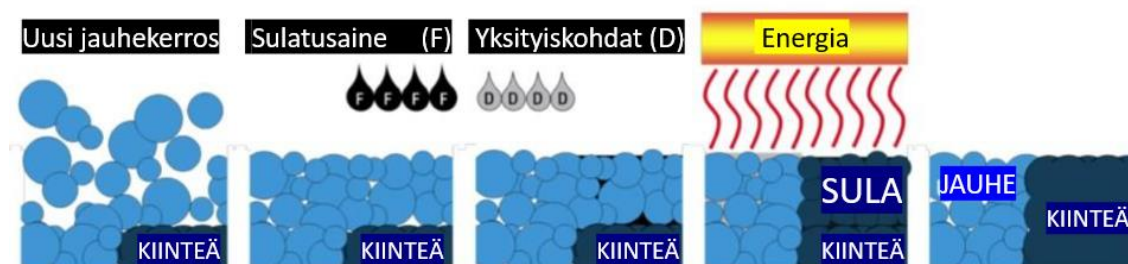


KUVIO 1. SLS-menetelmän toimintaperiaate.

SLS-menetelmällä on tehokasta valmistaa sarjatuotantona kappaleita, joiden materiaaleina ovat erilaiset lasi-, alumiini- ja hiiliseostetut polyamidit (PA, nylon). Lisäksi pystytään valmistamaan myös vaativiin olosuhteisiin mm. ilmailu- ja raide-teollisuuteen kehitetystä PEKK (polyeetteriketoniketoni) materiaalista olevia kappaleita. Valmistusnopeus riippuu valmistettavien osien määrästä ja poikkileikkauskerrosten lukumäärästä. Lopputuotteiden ominaisuuksia parannetaan ja kappaleiden väriä pystytään muuttamaan erilaisten jälkikäsittelyvaihtoehtojen avulla.

2.2 MJF, Multi Jet Fusion

Laitevalmistaja HP:n kehittämässä MJF-menetelmässä kappale muodostuu kerroksittain jauhepedissä, jossa levitetylle jauhekerrokselle ruiskutetaan tulostuspään suuttimista kahta erilaista kemikaalia (vaikuttaja-aineita). Laitteen pääosat ovat jauheen levittäjä/tasoittaja, jauhepeti, tulostuspää vaikuttaja-aineiden ruiskutukseen ja infrapunavalonlähde. Tulostuspää liikkuu levitetyn jauhekerroksen päältä ruiskuttaen sulatusainetta valmistettavan kappaleen täyttöön ja yksityiskohdat määrittelevää ainetta muotojen reunoihin. Tällä tavalla saavutetaan suuri tarkkuus sulaneen ja sulamattoman jauheen rajalla. Vaikuttaja-aineiden ruiskutuksen jälkeen fuusioitumisreaktio aktivoidaan alueen yli liikkuvalla infrapunavalo-loyksiköllä, minkä jälkeen jauhetta levitetään seuraava kerros. Kuviossa 2 on esitetty poikkileikkauksen valmistumisen eri vaiheet. Kerrosvahvuus tällä menetelmällä on 80 µm. Vaiheita toistetaan, kunnes työ on valmis. Jauhepeti poistetaan laitteesta ja viedään jälkikäsittelyasemalle, jossa valmiit kappaleet puhdistetaan ja käyttämätön jauhe imuroidaan talteen uusiokäyttöä varten. (HP, Multi Jet Fusion Technology, n. d.)

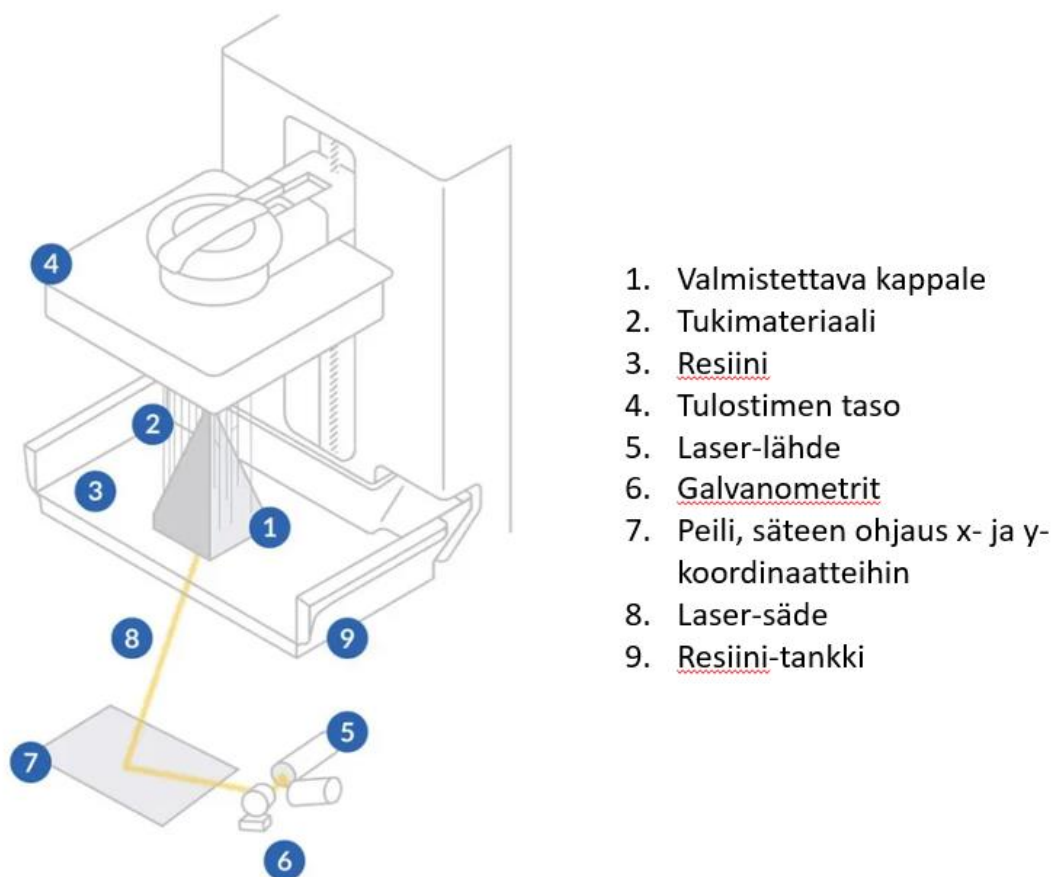


KUVIO 2. MJF-menetelmän vaiheet järjestyksessä vasemmalta oikealle (3D-print.com, 2016, muokattu)

MJF-menetelmällä pystytään valmistamaan tarkkoja kappaleita polyamideista, polypropeenista (PP) ja termoelastomeereistä. Menetelmä on suunniteltu teolliseen sarjatuotantoon ja sillä valmistetut kappaleet vaativat jauhepetimenetelmään liittyen huomattavan määrän jälkikäsitelyä. Valmistusprosessi on nopea, eikä samalla kertaa tulostettujen kappaleiden määrä suoraan lisää valmistusaikaa. Ainoastaan poikkileikkausten määrästä tuleva korkeus vaikuttaa työn kestoon, pinta-alan täyttöasteella ei ole siihen vaikutusta.

2.3 SLA, Stereolithography ja DLP, Digital Light Processing

SLA- ja DLP-menetelmässä kappaleet valmistetaan nestemäisistä fotopolymeereistä, resiineistä. Laitteiston rakenne ja pääosat on esitetty kuviossa 3. SLA-menetelmässä tasolla olevaan resiiniin kohdistetaan laservalo moottoroidun peilin kautta, jolloin tapahtuu kovettuminen polymerisaatiolla. DLP-menetelmässä valo projisoidaan koko poikkileikkauksen alalle kerralla, jolloin päästään nopeampaan valmistusaikaan. Kappaleesta valmistetaan poikkileikkaus kerrallaan n. 10–50 µm vahvuinen kerros, minkä jälkeen, laitteesta riippuen, taso nousee kerrosvahvuuden verran ylös tai laskee alas. Mikäli valmistus tapahtuu yläpuolelta, neste-pinta tasoitetaan valmistuneen kerroksen päälle tulostusalan yli liikkuvalla las-talla. Tulostuksen päätteeksi mallista on poistettava resiinijäämät ja tukimateri-aali, minkä jälkeen kappale on vielä kovetettava lopulliseksi tuotteeksi (Dassault Systemes, 3Dexperience MAKE, n. d.).



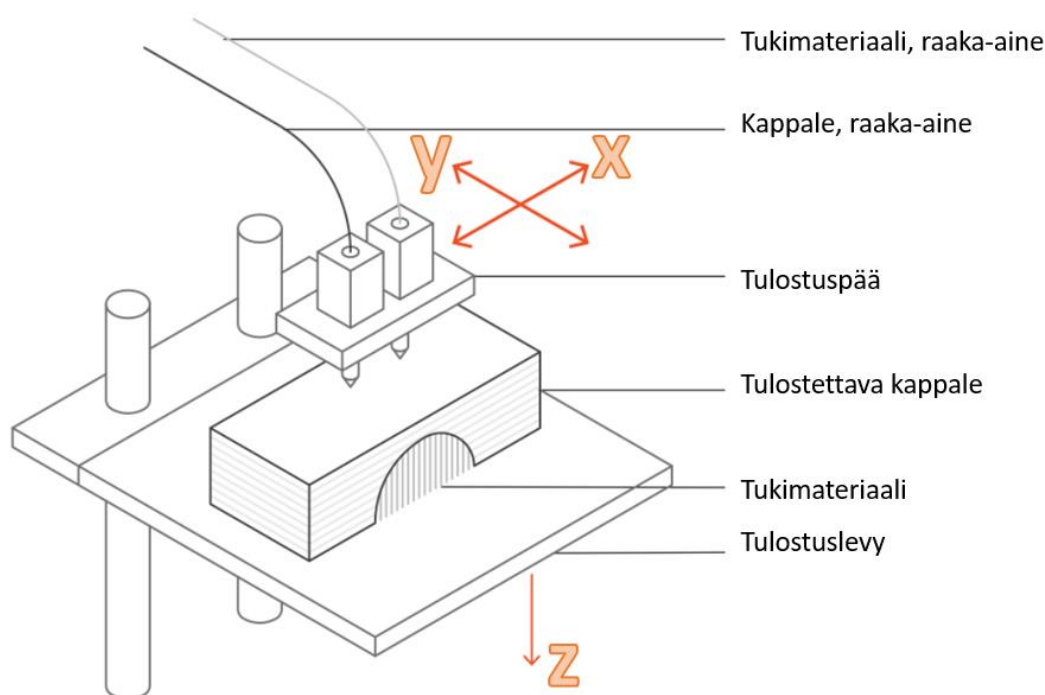
KUVIO 3. SLA-menetelmän toimintaperiaate ja rakenne (Formlabs n. d., muokattu)

Tällä menetelmällä pystytään valmistamaan nopeasti käyttövalmiita osia erittäin hyvällä tarkkuudella ja pinnanlaadulla. Prosessin jälkeen jälkikäsittelyvaihe on nopea ja vaatii vain vähän käyttäjän toimia. Menetelmä sopii sekä yksittäisten kappaleiden valmistukseen että sarjatuotantoon. Materiaalivalikoima on jatkuvasti laajeneva ja tälläkin hetkellä todella monipuolinen kattaen useita kymmeniä eri materiaaleja. Myös käyttökohteisiin, joissa vaaditaan mm. lämmönkestoa, mekaanista lujuutta tai kemikaalien kestoja, on saatavilla sopivia materiaaleja.

2.4 FDM, Fused Deposition Modeling (FFF, Fused Filament Fabrication)

3D-tulostusmenetelmistä yleisin on FDM, jonka laitevalmistaja Stratasys on patentoinut. Tästä on kuitenkin tullut yleisesti käytetty lyhenne muidenkin valmistajien, samalla periaatteella toimivien laitteiden yhteydessä. Yleisesti voidaan käyttää myös lyhennettä FFF. Menetelmässä materiaali pursotetaan kuumapään,

suuttimen, läpi 3D-tulostusohjelman (engl. slicer) luomaa liikerataa pitkin. Muovien tulostuksessa materiaali tuodaan lankana tai granulaattina kuumalle suuttimelle. Suuttimessa materiaalin lämpötila nousee lähes sulamispisteeseen, jolloin se saadaan pursotettaessa tarttumaan alkuvaiheessa tulostimessa olevan levyn pintaan, myöhemmin edellisen kerroksen materiaaliin. Suuttimen ympärille luodaan tuulettimilla ilmavirtaus, mikä ohjataan jäähdyttämään materiaali pursotuksen jälkeen, mikä parantaa tulostuksen tarkkuutta. Kuviossa 4 on esitetty laitteiston pääosat ja niiden liikesuunnat punaisilla nuolilla. Kerrosvahvuudet vaihtelevat huomattavasti tulostettavan kappaleen koon ja tarkkuuden mukaan, sekä tulostuspäässä olevan suuttimen sisähalkaisijan mukaan. Tulostustyön päätyttyä kappale irrotetaan tulostusalustalta ja siitä poistetaan tukirakenteet, jos kappaleessa on ollut niitä vaativia geometrioita. (Dassault Systemes, 3Dexperience MAKE, n. d.)



KUVIO 4. FFF-menetelmän toimintaperiaate ja rakenne (Engineering Product Design n. d., muokattu). Tulostuspää liikkuu yleensä x- ja y-suunnassa ja tulostuslevy z-suunnassa.

FFF-menetelmällä pystytään tulostamaan todella laajasta valikoimasta eri materiaaleja ja laitteiden kokoa pystytään skaalaamaan vapaasti niiden suhteellisen yksinkertaisen toimintaperiaatteen vuoksi. Tulostusnopeuteen pystytään vaikut-

tamaan tulostettavan mallin ominaisuuksien lisäksi laitteen liikenopeuksilla, suuttimen koolla ja materiaalin syötöllä. FFF-menetelmällä valmistettuja kappaleita ei ole välttämätöntä jälkikäsitellä (pl. tukirakenteiden poisto), joten jäähtymisen jälkeen kappale on lopullisessa muodossaan ja valmis.

3 MATERIAALIT

3.1 Polyamidit

Polyamidit eli nylonit ovat erittäin laajasti käytettyjä materiaaleja. Seostamattomanakin polyamidit kestävät hyvin mm. mekaanista rasitusta, uv-säteilyä ja kemikaaleja. Niiden käyttölämpötilat ovat verrattain korkeita perinteisten koneenrakennusmuovien joukossa, ja niillä on hyvä sähkön eristävyys. Tarkkoja kappaleita valmistettaessa on otettava huomioon polyamidille tyypillinen kosteuden absorbointi ympäristöstä, mikä huomataan mm. hieman pidempään varastoidun kappaleen mittamuutoksina. Seostamalla perusmateriaaliin esim. alumiinia, lasia, hiiltä tai hiilikuitua saadaan materiaalia muokattua vielä paremmaksi käyttökohteeseen (EOS, Plastic material overview 11/2022.).

Jauhepetiteknikoilla valmistettujen osien materiaalina käytettävä polyamidi PA11 on seostamattomana osittain tai kokonaan uusiutuvista raaka-aineista valmistettu, pohjautuen risiinikasvin papuihin ja risiiniöljyyn. Hieman edullisempi ja yleisesti ominaisuuksiltaan heikompi polyamidi on öljypohjainen PA12 (HP, A complete guide to 3D printing materials n. d.).

3.2 Termoelastomeerit

Termoelastomeereilla tarkoitetaan kumimaisia kestopuoveja, joista valmistetut kappaleet pysyvät joustavina ja kimmoisina. Niiden tunnusomaisia ominaisuuksia ovat vaimennuskyky, hyvä mekaanisen ja abrasiivisen kulutuksen kestävyys ja UV-säteilyn kesto. Kappaleet säilyttävät ominaisuutensa myös alhaisissa lämpötiloissa. Kovuudet vaihtelevat tyypillisesti 60 ShA (vastaa pehmeää silikonikumia) ja 80 ShD (muoveissa vastaavaa kovuutta ovat polyamidit ja kova PVC) välillä käyttökohteesta riippuen.

Pehmeitä tuotteita ovat mm. tiivisteet ja putkiosat, kun taas kovuudeltaan kovempaa materiaalia käytetään mm. rullien ja pyörien pinnoissa, sekä iskunvaimennuksen kohteissa (Wevolver, What is TPU Material in 3D printing: material properties, applications, and technologies, n. d.).

3.3 Polypropeeni

Polypropeeni on yksi yleisimmistä muovilaaduista. Se on ominaispainoonsa nähden vahva ja iskunkestävä. Sillä on myös korkea jatkuva käyttölämpötila ja hyvä kemikaalien kesto. Lämpötilan suhteen on huomioitava kohtuullisen suuri lämpölaajenemiskerroin ja käyttölämpötilan alarajan jälkeen kylmäaurastuminen. Polypropeeni ei absorboi kosteutta, joten siitä valmistettujen kappaleiden mitat eivät muutu varastoinnin yhteydessä ilmankosteuden vaikutuksesta.

Materiaalia käytetään paljon elintarvike- ja kemianteollisuudessa mm. säiliöissä, putkistoissa ja laitteiden rakenneosissa. Hyvän hitsattavuutensa ja lämpömuovausominaisuuksiensa vuoksi polypropeenista on mahdollista valmistaa suuria kappaleita ja kokoonpanoja, joissa materiaali itsessään on edullisimpien teknisten muovien joukossa. (VINK Finland OY, Muovitietopankki, PP-Polypropeeni)

3.4 SLS- ja MJF-menetelmät, jauheet

3D-tulostusmateriaaleja jauhetyyppisenä käytetään SLS ja MJF-menetelmässä. Lukuisia metalli- ja muovimateriaaleja on saatavilla jauheena, käytetyimpinä muoveista ovat polyamidit ja termoelastomeerit. Jauheen partikkelikoko vaihtelee tyypillisesti n. 30 – 180 µm välillä ja niiden vaihteluvälissä on valmistajasta riippuen eroja.

Prosessin aikana fuusioitumaton jauhe voidaan jälkikäsitteilyvaiheessa ottaa talteen ja käyttää uudelleen tulevilla tulostuskerroilla. Jälkikäsitteilyssä kappaleiden puhdistuksen yhteydessä materiaalia saadaan talteen mm. imuroimalla jauhetta kappaleista ja siirtämällä sitä käytetyn materiaalin säiliöön suodatuksen kautta. MJF menetelmässä voidaan päästä jopa 70–80 % uudelleen käytettävän jauheen

osuuteen, jolloin puhdasta jauhetta tarvittaisiin mahdollisesti vain 20–30 % jokaista tulostustyötä kohti. SLS-menetelmässä suhde on tyypillisesti jonkin verran alhaisempi, tulostuskammioon voidaan laittaa puolet aiemmin käytettyä ja puolet puhdasta jauhetta (Dassault Systemes, MJF-Multi Jet Fusion, n. d.)

3.5 Resiinit eli fotopolymeerit

Resiinejä käytetään materiaaleina SLA-menetelmässä, missä valonlähteellä kovetetaan valoon reagoivaa nestettä joko pistemäisenä (SLA-menetelmä) tai kappaleen/tulostusalueen poikkileikkaus kerrallaan (DLP-menetelmä). Resiineillä ei suoraan ole vastineita teknisten muovien parissa, mutta materiaalien tietojen perusteella voidaan valita oikea raaka-aine kappaleen käyttötarkoitus ja -olosuhteet huomioiden. Taulukossa 1 on esitetty laitevalmistaja Formlabsin ilmoittamat vastaavuudet, joissa tunnettujen teknisten muovien ominaisuuksia vertailemalla pystytään valitsemaan oikea resiini kappaleen valmistukseen. Suoria vastaavuuksia ei löydy, joten valinta täytyy tehdä aina kappaleen käyttötarkoituksen ja -olosuhteiden mukaan (Formlabs, How to Select the Right Material for SLA 3D Printing, n.d.).

Taulukko 1. Formlabsin vertailutaulukko yleisten teknisten muovien ja resiinien välillä, koottu webinaarista ”How to Select the Right Material for SLA 3D Printing”.

Polyeteeni (PE) ja polypropeeni (PE)		
Muovattavuus	Alhainen kitkakerroin	Kulutuskestävyys
Durable Resin Tough 1500 Resin	Durable Resin Tough 1500 Resin	Durable Resin Tough 1500 Resin Tough 2000 Resin
Akrylibutadieenistyreeni (ABS) ja polykarbonaatti (PC)		
Jäykkyys	Kohtalainen lämmön-kesto	Kovuus
Tough 2000 Resin Grey Pro Resin Rigid Resin	Tough 2000 Resin Grey Pro Resin Rigid Resin	Durable Resin Tough 1500 Resin Tough 2000 Resin
Polyasetali (POM)		
Jäykkyys	Alhainen kitkakerroin	Hyvä lämmön-kesto
Rigid Resin High Temp Resin	Durable Resin	High Temp Resin

Resiineihin on mahdollista sekoittaa väriaineita ja niillä pystytään valmistamaan läpikuultavia kappaleita. Myös joustavien, kumimaisten kappaleiden valmistus eri kovuuksilla onnistuu resiineistä. Käyttökohteissa, missä kappaleilta vaaditaan kovuutta ja jäykkyyttä, voidaan käyttää lasi- tai keraamipartikkeleita sisältävää resiiniä.

3.6 Filamentit

Filamentilla tarkoitetaan FDM/FFF-menetelmän materiaalia, mikä on poikkileikkaukseltaan pyöreää lankaa. Langat toimitetaan keloilla ja yleisimmät langan halkaisijat ovat 1,75 mm ja 2,85 mm, vahvuuden valinta tehdään laitteen tulostuspäässä olevan suuttimen koon mukaan. Valittavissa on todella laaja valikoima eri

materiaaleja, yleisistä PLA (polylaktidi) ja ABS (akrylibutadieenistyreeni) muoveista aina mekaanisesti, kemiallisesti ja termisesti hyvin kestäviin esim. PA (polyamidi), PC (polykarbonaatti) ja PEEK (polyeetterieetteriketoni) muoveihin.

Filamentteihin on mahdollista myös seostaa eri materiaaleja, esim. hiilikuitua ja lasia, joilla pystytään parantamaan materiaalin ominaisuuksia sopivammaksi lopputuotteen käyttötarkoitukseen. Lasi on perusaineessa aina pieninä partikkeleina ja hiilikuitua on mahdollista saada valmistettavaan kappaleeseen kahdessa eri muodossa:

- yhtenäisenä lankana, vaatii käyttötarkoitukseen sopivan tulostimen
- lyhyeksi katkottuna perusaineen seassa

Metallikappaleiden valmistus filamentista on myös mahdollista, tällöin filamentti koostuu sideaineista ja metallijauheesta. Tulostuksen jälkeen kappale vaatii vielä pesun ja sintrauksen, jolloin metallijauhe fuusioituu valmiiksi kappaleeksi.

3.7 Materiaalit tulevaisuudessa

3D-tulostuksen ollessa nopeasti kehittyvä valmistusmenetelmä, myös käytettävissä olevien materiaalien valikoima kasvaa ja muuttuu jatkuvasti. Laittevalmistajat ja 3D-tulostuspalveluntarjoajat tekevät tiivistä yhteistyötä materiaalivalmistajien kanssa saadakseen tulostusprosessissa käytettävät materiaali-kohtaiset parametrit selville. Tällä tavalla laittevalmistaja pystyy validoimaan materiaalin omalle laitteelleen ja taltioimaan parametrit ohjelmistoon. Uuden materiaalin validointi perustuu käytännössä materiaalivalmistajan ilmoittamiin tietoihin ja 3D-tulostusprosessin sekä valmistuneiden kappaleiden tutkimiseen laittevalmistajan toimesta.

Materiaaleille haetaan mm. paloluokituksia, jolloin niiden käyttö esim. rautatie- tai ilmailuteollisuudessa on mahdollista. Tulostettavissa sähköä johtavissa materiaaleissa tapahtuu myös nopeasti kehitystä. Kehitetään materiaaleja, joista pystytään valmistamaan mm. erilaisia antenneja, sähköä johtavia rakenteita, elektronikan komponentteja ja antureita.

4 TYÖTURVALLISUUS

4.1 Henkilökohtaiset suojaimet

Työntekijöiden henkilökohtaisiin suojaimiin kuuluvat kemikaaleilta, jauheilta ja materiaalien käsittelyssä ja viimeistelyssä syntyviltä partikkeleilta suojaavat suojalasit, käsineet ja suojapuku. Myös hengityssuojainta on syytä käyttää tilassa työskentelyn aikana ja sen avulla estää hiukkasten ja kaasujen päätyminen hengityselimiin.

Henkilökohtaisille suojaimille ja suojahaalarille pitäisi olla myös SLS- ja MJF-menetelmien parissa työskennellessä omat säilytystilansa jauheenkäsittelytilan ja muun tuotantotilan rajapinnassa. Tällä järjestelyllä pystytään estämään jauheen kulkeutuminen muihin tuotantotiloihin ja muiden työntekijöiden altistuminen mahdollisille jauheen sisältämille haitallisille partikkeleille.

4.2 Koneturvallisuus

3D-tulostusprosessissa vaaditaan, käytetyn menetelmän mukaan, erilaisia koneturvallisuuteen liittyviä laitteita ja rakenteita. Prosessissa syntyvät kaasut ja pöly täytyy suodattaa tai puhdistaa ennen niiden palauttamista työskentelytilaan tai johtamista ulos kiinteistöstä.

Jälkikäsittelyssä ylimääräisen materiaalin tai tukirakenteiden poisto on tehtävä suljetussa tilassa, mistä jauhe tai kemikaalit eivät pääse leviämään ympäristöön. Tähän on monella laitevalmistajalla saatavilla omat tuotteensa, joissa samalla otetaan talteen uudelleen käytettävä materiaali tai esimerkiksi pestään ylimääräinen resiini pois valmiista kappaleista.

4.3 Tila

3D-tulostustilan tulee olla muista työskentelytiloista erillään. Materiaalipartikkeleiden ja kaasujen kulkeutuminen muihin tiloihin on estettävä tehokkaalla kohdepoistolla ja hyvällä ilmanvaihdolla. Työskentelytilalle on erilaisia vaatimuksia menetelmäkohtaisesti ja nämä ovat esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Tilavaatimukset menetelmäkohtaisesti.

	Jauhepetimenetelmät (SLS ja MJF)	Resiinitulostus (SLA ja DLP)	Lankatulostus (FDM/FFF)
Materiaali	Jauhepartikkeleiden kulkeutumisen estäminen osastoinnilla ja kohdepoistoilla.	Materiaalikohtaiset resiinitankit säilytettävä UV-valolta suojattuna.	Ilmankosteuden vaikutus filamenttiin huomioitava.
Tulostus	Syntyneen lämmön johtaminen pois tilasta, olosuhteiden valvonta ja säätö.		Materiaalikohtaisten prosesseissa syntyvien epäpuhtauksien suodattaminen tai johtaminen pois tilasta.
Jälkikäsittely	Kohdepoisto jauheen käsittelyssä. Mahdollinen pintakäsittely esim. lasikuulapuhalluksella, käytetyn median vaatimukset tilalle.	Isopropanolin (kappaleiden pesuaine) tms. käsittelyyn liittyen kohdepoiston tarve. Tukirakenteiden poistoon liittyvän hiontapölyn kohdepoisto.	Tukirakenteiden poistoon liittyvän hiontapölyn kohdepoisto.

Tavanomaiseen konepajan tuotantotilaan sopivat ilman suurempia muutoksia FFF- ja SLA-menetelmien laitteet. Näiden menetelmien materiaalit ovat helposti ja turvallisesti käsiteltävissä muodossa ja niiden varastointi onnistuu pienemmissäkin tuotantotilassa, joskin olosuhteiden tulee näillekin olla oikeat ilmankosteuden ja UV-säteilyltä suojauksen suhteen.

4.4 Työvaiheet

Alla on käsitelty eri työvaiheet työturvallisuuden näkökulmasta. Käytettävästä menetelmästä ja materiaaleista riippuen eri työvaiheisiin liittyy erilaisia riskejä, joiden tunnistaminen ja huomioiminen on oleellista työntekijöiden turvallisuuden takaamiseksi.

4.4.1 Asetustyö

3D-tulostuslaitteen valmistelussa tulostusta varten joudutaan käsittelemään mahdollisesti haitallisia aineita. Filamentit ovat kiinteimpänä materiaalin muotona turvallisempia, kuin jauheet ja resiinit. Jauheen käsittelyssä on huolehdittava, ettei sitä pääse leviämään työskentelytilaan ja sitä kautta aiheuttamaan vaaraa käyttäjälle. Resiinejä käsitellessä on vältettävä niiden päätymistä käyttäjän iholle. Ilmankosteuden vaikutus tiettyihin materiaaleihin saattaa myös aiheuttaa tulostusprosessiin epävarmuutta, joten tämä on huomioitava materiaalin käsittelyssä.

Materiaalin käsittelyä lukuun ottamatta laitteiden käyttökuntoon valmistelu tapahtuu yleensä käyttäjää ohjaavan käyttöliittymän avulla. Esivalmisteluiden jälkeen järjestelmä ilmoittaa, kun tulostusprosessi voidaan aloittaa. Tähän liittyviä esivalmisteluita ja aloitustarkasteluja menetelmän mukaan ovat esimerkiksi materiaalin todentaminen pakkauksen RFID-sirulla, kammion ja suuttimen lämpötilan nosto asetettuun arvoon sekä tulostustason korkeuden ja kaltevuuden mittaaminen.

4.4.2 Tulostus

Varsinainen tulostusvaihe on automatisoitu prosessi. Sen aikana käyttäjän ei tarvitse olla samassa tilassa laitteiston kanssa, ellei siellä tehdä esimerkiksi jälkikäsitteilyä aiemmin valmistetuille kappaleille. Valmistuksen aikana on huolehdittava tilan hyvästä ilmanvaihdosta, jotta prosessissa syntyvä lämpö ja ilman epäpuhtaudet saadaan johdettua tilasta pois.

Tulostusprosessin valvontaa toteutetaan automaattisesti. Laittevalmistajat hyödyntävät erilaisia anturointeja ja konenäköä prosessin laadunvalvonnassa. Laatu seurataan ja prosessin onnistumista todennetaan mm. kerroksittain taltioituilla poikkileikkausten kuvilla ja konenäön tarkastuksilla sekä lämpötilojen jatkuvalla seurannalla.

4.4.3 Jälkikäsittely

3D-tulostettujen kappaleiden jälkikäsittely vaihtelee valmistusmenetelmän mukaan. Jälkikäsittely sisältää mm. tukimateriaalin irrottamisen, ylimääräisen jauheen tai resiinin poistoa ja kappaleen pintaan/pinnanlaatuun vaikuttavaa työtä.

Tukimateriaalin poisto, kun materiaali on samaa kuin tulostettava kappale, on mekaanista työtä erilaisilla leikkureilla, terillä tai hiovilla käsi- ja sähkötyökaluilla. FFF-menetelmällä voidaan kuitenkin myös tulostaa saman työn aikana useampaa eri materiaalia, jolloin tukirakenteet on mahdollista tulostaa materiaalista, minkä pystyy liottamaan pois valmiista kappaleesta ilman aikaa vievää mekaanista poistoa. Tällöin kappale jätetään nesteeseen tai liotuslaitteeseen, jossa tukimateriaali irtoaa ajan kanssa kappaleesta. Mikäli tukirakenteet joudutaan poistamaan mekaanisesti leikkaamalla tai hiomalla, pitää työntekijän olla asianmukaisesti suojautunut mahdollisia viiltoja ja pölyaltistusta vastaan.

Jauhepetimenetelmissä ylimääräisen jauheen poisto tehdään jälkikäsittely-yksikössä. Kappaleista poistetaan ylimääräinen jauhe mm. harjaamalla, paineilmalla ja imuroimalla yksikköön integroidulla imurilla. Jauheen hienojakoisuuden vuoksi työntekijän on varustauduttava muiden henkilökohtaisten suojaimien lisäksi suojahaalarilla, jotta voidaan välttää jauheen kulkeutuminen työvaatteiden mukana muihin tiloihin. Tilan, missä jauheita käsitellään, tulee olla erotettuna muusta tuotantotilasta.

5 LAITTEISTO

5.1 Laitevalmistajat

Tarkasteltaviksi laitevalmistajiksi valittiin tunnettuja suuria ja keskisuuria yrityksiä, joiden tuotevalikoimassa on luotettavia, teollisen tuotannon laatuvaatimuksiin vastaavia laitteita.

5.1.1 EOS

EOS on vuonna 1989 muodostettu yritys, joka valmistaa SLS-menetelmän laitteita ja materiaaleja ja lisäksi tarjoaa palveluna prosessin kehitystyötä, mm. automatisointia, asiakkaille. Yrityksellä on yli 30 vuoden kokemus jauhepetimenehtelmän kehityksestä muovi- ja metallitulostuksen parissa.

EOS:n valmistamat laitteet ovat korkealaatuiseen sarjatuotantoon suunniteltuja ja ne soveltuvatkin jatkuvasti käynnissä olevaan tuotantoon. Yritys kehittää myös valmistuksen automatisointia ja tavoitteena on luoda skaalautuvien autonomisten tuotantolaitosten konsepti, missä kappaleen valmistus jauheesta valmiiksi tuotteeksi tapahtuu täysin automaattisesti.

Yrityksen valmistama materiaalivalikoima on laaja ja materiaalit ovat hyvin jäljitettävissä eräkohtaisesti. Tiukan laadunvalvonnan alaisena jokainen materiaalierä testataan ja validoidaan, jolloin päästään korkeaan laatuun lopputuotteessa ja prosessista saadaan hyvin ennakoitava. (EOS, n.d.)

5.1.2 Hewlett-Packard

Hewlett-Packardilla (HP) yrityksenä on yli 30 vuoden kokemus tulostinten valmistamisesta. 3D-tulostuksen jauhepetimenehtelmistä MJF on heidän kehittämänsä ja siinä hyödynnetään mustesuihkutulostimien toimintaperiaatetta ja tarkkuutta.

Yritys valmistaa metalli- ja muovimateriaalien tulostimia ja tarjoaa laajan valikoiman materiaaleja monen eri teollisuuden alan käyttöön.

HP toimii yhteistyössä monen suuren materiaalivalmistajan kanssa ja uusia materiaaleja kehitetään jatkuvasti. He tarjoavat materiaalien kehitystyöhön tukea ja ovat perustaneet laboratorion helpottaakseen uusien materiaalien kehitystyötä, testausta ja sertifiointia oman menetelmänsä materiaalikirjaston laajentamiseksi. (HP, 3D-Printing solutions, n.d.)

5.1.3 Formlabs

Formlabs on vuonna 2011 kolmen MIT (amerikkalainen Massachusetts Institute of Technology-oppilaitos) opiskelijan perustama startup-yritys. He onnistuivat suunnittelemaan ja tuottamaan teollisuuden laatuvaatimukset täyttäviä kappaleita SLA-menetelmällä valmistavan 3D-tulostimen (Form 1), jonka hinta oli pystytty pitämään markkinaan nähden edullisena.

Yritys valmistaa ja myy SLS- ja SLA-menetelmän 3D-tulostimia ja oheislaitteita (mm. jälkikäsitteily ja automatisointi), resiniinimateriaaleja ja prosessiin liittyviä ohjelmistoja. Heillä tehdään laitteistojen tuotekehityksen lisäksi myös resiniinimateriaalien tutkimusta ja tuotekehitystä. Yritys on historiansa aikana myynyt yhteensä yli 100 000 laitetta ja heillä on yli 750 työntekijää globaalisti sijoitettuna, toimipisteitä on yhteensä kymmenen (Amerikassa neljä, Euroopassa ja Aasiassa 3 kummassakin). Yrityksen arvoksi on arvioitu yli 2 miljardia dollaria. (Formlabs, Company, n.d.).

Yritys jakaa myös paljon tuottamaansa tietoa ainetta lisäävän-tuotantomenetelmän mahdollisuuksista lukuisilla koulutusmateriaaleilla, joissa käsitellään mm. suunnitteluun ja materiaaleihin tai laitteiden käyttöön liittyviä asioita. Materiaalit ovat vapaasti käytettävissä ja niistä saa selkeän käsityksen yrityksen valmistamien laitteiden soveltuvuudesta eri käyttökohteisiin. Niissä esitellään myös valikoituja esimerkkitapauksia yrityksen asiakkaiden ongelmista tai kehityskohteista ja niihin löydetyistä ratkaisuista.

5.1.4 miniFactory

Kotimainen yritys miniFactory OY on perustettu vuonna 2012 ja se valmistaa Seinäjoella FFF-menetelmän 3D-tulostimia. Yrityksen valmistamia tulostimia käytetään tällä hetkellä yli 30 maassa. Heidän valmistamillaan laitteilla pystytään tulostamaan erittäin laajasti eri polymeerejä ja komposiitteja, ja ne ovatkin suunniteltu korkean lämmönkeston, hyvän kemiallisen- ja mekaanisen kestävyuden erikoismuovien tulostukseen.

Valmistajan laitteilla pystytään tulostamaan materiaalin toimittajasta riippumatta kaikkia filamenttimuodossa saatavilla olevia materiaaleja. Yritys on tehnyt periaatepäätöksen olla sitoutumatta tiettyihin materiaalitoimittajiin pitäen materiaaliportfolion avoimena, mutta tekee myös yhteistyötä suurien materiaalivalmistajien kanssa tulostusprosessin optimoimiseksi korkean tason polymeereillä.

5.1.5 Nexa3D

Amerikkalainen Nexa3D on vuonna 2014 perustettu yritys ja se suunnittelee ja valmistaa erittäin nopeita SLA- ja SLS-menetelmän laitteita sekä niihin liittyvää ohjelmistoa. Yritys on kehittänyt LSPc-menetelmän (Lubricant Sublayer Photocuring), millä resini-materiaaleista tulostaminen on nopeutunut huomattavasti. Nexa3D tekee yhteistyötä suurien materiaalivalmistajien (mm. Henkel ja BASF) kanssa, joten käytettävissä olevien materiaalien valikoima on laaja ja jatkuvasti kehittyvä.

Yrityksen valmistamilla laitteilla päästään moninkertaisesti nopeampiin valmistusaikoihin, kuin kilpailijoiden vastaavan menetelmän laitteilla. Käytännössä tämä mahdollistaa tuotteen valmistuksen tuntien sijaan kymmenissä minuuteissa, joten esimerkiksi nopeissa varaosatarpeissa asiakkaan on mahdollista saada valmis tuote odottaessa. Tarkoituksena on kasvattaa tuotevalmistajien valmistuskapasiteettia, lyhentää toimitusaikaa ja pienentää valmistuskustannuksia.

5.1.6 Markforged

Markforged on vuonna 2014 perustettu amerikkalainen yritys, joka valmistaa korkeatasoisia FFF-menetelmän 3D-tulostimia ja tuottaa niiden käytön mahdollistavaa pilvipalvelua. Yrityksen suunnittelemissa laitteissa voidaan valmistaa komposiittikappaleita, joiden rakenteellisia ominaisuuksia pystytään parantamaan erilaisilla perusaineeseen lisätyillä pitkillä, koko poikkileikkauksen alalle lisätyillä kuiduilla (kevlar-, lasi- ja hiilikuitu). Myös laitteet metallikappaleiden valmistukseen filamenttimateriaalista kuuluvat yrityksen tuoteohjelmaan (mm. sintrausuuni).

Keskeinen osa Markforgedin laitteiden käyttöä on yrityksen luoma DigitalForge-pilvipalvelu. Palvelussa käytännössä tehdään kaikki tulostuksen aloittamiseen vaadittavat asiat: valmistettavan kappaleen 3D-malli ladataan palveluun, tulostusohjelma valmistellaan, valitaan käytettävä tulostin ja annetaan käsky tulostuksen aloitukselle. Pilvipalvelussa on mahdollista tehdä myös tuotannonohjausta luomalla työjonoja tulostettavista kappaleista.

5.2 Jälkikäsittelylaitteet ja -menetelmät

Jälkikäsittelylaitteisiin kuuluvat tulostuksen jälkeisen työn suorittamiseen käytetyt laitteet, joilla valmistetut kappaleet viimeistellään lopulliseksi tuotteeksi. Tulostuksen jälkeen kappaleet vaativat erilaista käsittelyä käytetyn tulostusmenetelmän mukaan ja niiden avulla tuotteet saavuttavat lopullisen muotonsa ja ulkonäkönsä. Valmiiden tuotteiden ominaisuuksia voidaan myös parantaa erilaisilla pinnoitteilla.

Jälkikäsittely vaatii erillisiä laitteita, joista välittömästi tulostuksen jälkeisiä toimenpiteitä suorittavat ovat yleensä kyseisen laitevalmistajan omia tuotteita. Lisäksi lopputuotteen viimeistelyyn, yksilöintiin ja ominaisuuksien parantamiseen on useita erikoistuneita laitevalmistajia.

5.2.1 Jauhepedin purkuasema

SLS- ja MJF-menetelmällä tulostettaessa jauhepedistä puretaan valmiit kappaleet purkuasemalla. Asema on käytännössä työpiste, jossa on kohdepoisto ja imuri jauheen leviämisen estämiseksi, käytetyn jauheen talteenotto uudelleenkäyttäväksi ja jauhepedin täyttöön tarvittavat välineet.

Tulostusprosessissa lämmentyneen jauhesäiliön jäähtyttyä se viedään purkuasemalle. Säiliöstä imuroidaan ylimääräinen materiaali pois asemaan integroidulla imurilla ja se päätyy kierrätetyn materiaalin säiliöön. Kappaleista puhdistetaan suurin osa jauheesta käsin ja harjaamalla, jonka jälkeen ne menevät vielä lasikuulapuhallukseen.

5.2.2 Pesu- ja kovetusasema

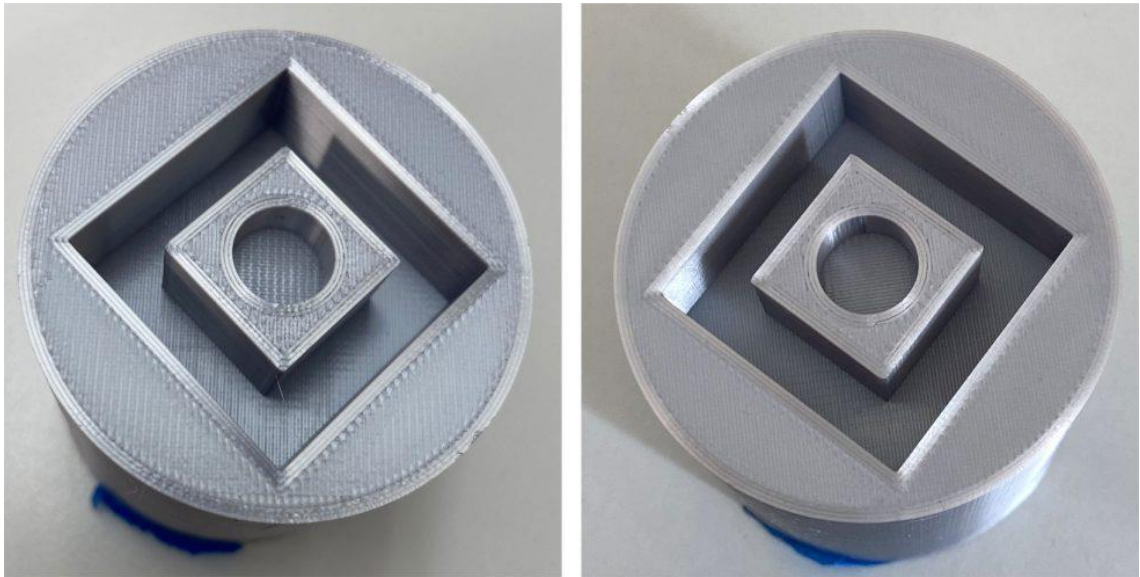
SLA-menetelmällä tulostuksen jälkeen kappaleista täytyy pestä ylimääräinen resini pois. Pesu tapahtuu käyttötarkoitukseen sopivilla kemikaaleilla yleensä laitevalmistajan toimittamassa pesulaitteessa. Osalla laitevalmistajista on myös omia pesuaineita tähän tarkoitukseen, mutta yleisesti käytetään myös helposti saatavilla olevaa isopropanolia, IPAa.

Pesun ja tukimateriaalin poiston jälkeen kappaleet menevät vielä niin ikään laitevalmistajan toimittamaan kovetusasemaan. Täällä kappaleet saavuttavat lämmön ja UV-valon vaikutuksessa lopulliset mekaaniset ominaisuutensa. Käsittelyaika riippuu kappaleen koosta ja materiaalista.

5.2.3 Lasikuulapuhallus

Lasikuulapuhallusta käytetään pintojen viimeistelyyn ja ylimääräisen jauhemaisen materiaalin poistoon valmiin kappaleen pinnasta. Jauheen hienojakoisuuden vuoksi kaikkea materiaalia ei saada esimerkiksi imuroimalla tai harjaamalla pois

pinnasta. Samalla pinnan tekstuurista tulee yhtenäinen, mutta terävissä kulmissa voi tapahtua pientä pyöristymistä.



KUVA 1. Vasemmassa kuvassa FFF-menetelmällä tulostettu kappale ilman jälkikäsittelyä. Oikeassa kuvassa lasikuulapuhalluksen jälkeen. (https://www.comcoinc.com/finishing_3d_printed_parts/)

Lasikuulapuhallus vaatii jälkikäsittelytilaan tarkoitukseen sopivan puhalluskaapin, jossa kappaleet käsitellään eristetyssä, läpinäkyvällä kannella varustetussa laatikossa pölyn leviämisen estämiseksi. Pienet lasikuulapartikkelit tuodaan paineilman kuljettamana pistooliin, mistä tulevalla suihkulla puhalletaan kappaleen pinta tasaiseksi ja puhtaaksi.

5.2.4 Värjäys

Värjäystä käytetään yleensä SLS- ja MJF-menetelmällä valmistetuille tuotteille. Prosessissa kappaleet upotetaan lämmitettyyn vesialtaaseen, jossa hapan väriaine imeytyy kappaleen pintaan n. 0,2 mm syvyyteen asti. Värivalikoima on todella laaja, etenkin SLS-menetelmällä valmistetuille kappaleille, koska niiden luonnollinen väri yleisimmissä materiaaleissa on valkoinen.

MJF-menetelmällä valmistetut kappaleet sen sijaan ovat harmaita pinnaltaan ja mustia sisältä, joten ne värjätään useimmiten mustaksi. Värjäys tehdään useim-

miten ulkonäöllisistä syistä, mutta sillä voidaan vaikuttaa myös kappaleen ominaisuuksiin, esimerkiksi UV-valon kestävyuteen. (Xometry, Post-processing for MJF and SLS 3D printed parts, n.d.).

5.2.5 Kiillotus ja pinnanlaadun parantaminen

3D-tulostettujen kappaleiden kiillotus ja huokoisen pinnan sulkeminen voidaan tehdä tehokkaasti kemiallisella höyryllä. Tätä prosessia käytetään SLS-, MJF- ja FFF-menetelmillä valmistettuihin kappaleisiin. Kappaleet asetetaan kammioon, missä höyry pääsee vaikuttamaan kappaleiden kaikkiin pintoihin tasoittaen ne erinomaiselle pinnanlaadulle. Tällä saavutetaan parantuneet mekaaniset ominaisuudet pinnan pienten epäjatkuvuuskohtien hävitessä ja tuotteista tulee samalla vesi- ja ilmatiiviitä. Kappaleet on myös helpompi pitää puhtaina esimerkiksi elintarvike- ja lääketeollisuudessa, joissa vaarana on bakteerikasvuston muodostuminen kappaleiden pintaan jäävien epäpuhtauksien vuoksi. (AMT, PostPro Chemical Vapor Smoothing, n.d.)

Toinen pinnanlaadun parantamisen menetelmä on perinteinen maalaus. Se on värjäystä kestävämpi tapa muuttaa valmistettujen kappaleiden ulkonäköä ja parantaa niiden pinnanlaatua. Värivalikoima on laaja ja maalauksen jälkeen pinnan kestävyyttä pystytään parantamaan esimerkiksi erilaisilla lakoilla ja pinnoitteilla. Maalaus on monivaiheinen prosessi ja vaatii erityisosaamista ja laitteistoa, sekä oikeanlaiset tilat työn kaikkiin eri vaiheisiin. Tähän menetelmään on järkevää hankkia hyvä yhteistyökumppani.

6 YHTEENVETO

6.1 Vertailu

3D-tulostusmenetelmien vertailua tehtiin useasta eri näkökulmasta. Alla käsitellään materiaalivalikoimaa, materiaalinkäsittelyä ja -varastointia, valmistusprosessin soveltuvuutta kappaleen kokoon ja tulostettavaan määrään nähden, jälkikäsittelyä ja tilavaatimuksia.

6.1.1 Materiaalivalikoima

SLA- ja FFF-menetelmillä pystytään valmistamaan kappaleita laajasta materiaalivalikoimasta. Näihin sisältyy myös erikoismuoveja vaativiin olosuhteisiin, missä käyttölämpötilat ovat jatkuvasti korkeita ja kappaleilta vaaditaan mm. mekaanista ja kemiallista kestävyyttä. Materiaalivalikoima on todella laaja, koska laitteita ei ole sidottu vain yhteen tai pieneen määrään materiaalivalmistajia. SLS- ja MJF-menetelmissä materiaalivalikoima on huomattavasti rajoitetumpi ja käytännössä joka materiaalille pitäisi olla oma laitteensa, koska materiaalin vaihto toiseen on joko erittäin aikaa vievää (Formlabs, Fuse1+ 30W, 8h), tai ei lainkaan suositeltavaa (EOS ja HP).

Nexa3D:n SLA-menetelmän ja miniFactoryn FFF-menetelmän laitteet mahdollistavat kaikkien soveltuvien materiaalivalmistajien tuotteiden käyttämisen. Laittevalmistajat ovat pitäneet materiaalikirjaston avoimena, jolloin pystytään ottamaan käyttöön nopeasti markkinoille tulevat uudet materiaalit. Valmistajat tarjoavat myös materiaalien validointipalvelua, jolloin asiakkaan puolesta tutkitaan uuden materiaalin käyttäytyminen prosessin aikana ja selvitetään laadukkaan lopputuotteen valmistukseen oikeat parametrit.

6.1.2 Materiaalinkäsittely ja -varastointi

Materiaalin käsittely ja varastointi osoittautui SLA- ja FFF-menetelmillä yksinkertaiseksi. Resiinit säilytetään myyntipakkauksissaan tavanomaisten kemikaalien tapaan. Materiaalikohtaiset koneenosat, esim. resiinitankki, säilytetään UV-valolta suojattuna ja hyvin merkittynä materiaalin tyyppillä. Osa filamenttimateriaaleista absorboi itseensä kosteutta ilmasta ja sillä on heikentävä vaikutus tulostuksen laatuun. Korkealuokkaisissa FFF-menetelmän tulostimissa materiaali esilämmitetään kammiossa, jolloin minimoidaan ilmankosteuden vaikutus tulostuksen laatuun.

Molempien materiaalityyppien kiinteän tai nestemäisen olomuodon vuoksi niiden leviäminen ympäristöön on helposti hallittavissa. Jauhepetimenetelmissä hienojakoisen jauheen käsittely vaatii oman tilansa, mikä on erotettu muusta työskentelytilasta. Myös jauheen kulkeutuminen mm. työntekijän vaatteiden mukana muihin tiloihin ja leviäminen ilmaan on estettävä. Etenkin jauheiden seassa mahdollisesti olevat hiilikuitu- tai lasipartikkelit aiheuttavat työterveysriskin, mikäli ne päätyvät hengityselimiin tai verenkiertoon.

6.1.3 Valmistusprosessi

FFF-menetelmällä pystytään tehokkaasti valmistamaan yksittäisiä kappaleita tai piensarjoja. Piensarjojen valmistuksessa kappalekohtainen aika pysyy kuitenkin samana, joten todellinen tulostusaika on yhden kappaleen valmistukseen kulunut aika kertaa kappalemäärä. SLA-menetelmällä resiinin kovetus on mahdollista tehdä pistemäisellä laserilla (Formlabs SLA) tai voidaan kovettaa koko tulostuspinta-ala kerralla (Nexa3D LSPc), jolloin päästään suuriin valmistusnopeuksiin. Tästä on huomattavaa hyötyä etenkin silloin, kun pystytään asettelemaan mahdollisimman monta kappaletta tulostuspinta-alalle. MJF-menetelmällä kappaleiden määrä ei vaikuta valmistusnopeuteen, koska koko pinta-ala päästään hyödyntämään LSPc-menetelmän tapaan. SLS-menetelmällä pistemäinen lasersäde joutuu käymään läpi jokaisen pisteen valmistettavasta poikkileikkauksesta, jolloin kappaleiden määrällä on vaikutusta valmistusaikaan. FFF-, SLS- ja MJF-

menetelmän kappaleet vaativat jäähdytyksen ennen jälkikäsittelyä, joista lyhin aika menee FFF-kappaleen jäähtymiseen.

MJF-menetelmä kuluttaa selkeästi eniten energiaa tarkasteltujen menetelmien joukosta. HP Multi Jet Fusion 4200 laitteen valmistajan ilmoittama teho on 9-11 kW, kun toisella jauhepetimenetelmällä SLS:llä EOS Formiga P 110 laitteen teho on vain 3-5 kW. Korkeilla suutin- ja kammiolämpötiloilla tulostettaessa FFF-menetelmän miniFactoryn Ultra2 käyttää arviolta saman verran tehoa kuin edellä mainittu lasersintrauslaite. SLA-menetelmässä lämmityksen tarve on huomattavasti pienempi ja esimerkiksi Formlabsin suurempi laite Form3L käyttämä teho on vain 650 W.

6.1.4 Jälkikäsittely tulostuksen jälkeen

Jälkikäsittelyssä FFF- ja SLA-menetelmän kappaleista joudutaan poistamaan tukirakenteet mekaanisesti tai liottamalla. Tukirakenteiden poistamisen jälkeen reisiinistä valmistettu kappale pestään ja kovetetaan, filamentista valmistettu kappale ei välttämättä vaadi muuta käsittelyä. SLS- ja MJF-menetelmän tulostuskammioiden jäähdyttyä niistä täytyy purkaa ylimääräinen materiaali kierrätetyn jauheen osioon, puhdistaa kappaleet jauheesta imuroimalla ja lasikuulapuhalluksella, minkä jälkeen kappaleet ovat valmiit tulostusprosessista.

Seuraavat valinnaiset työvaiheet tulisivat jatkokäsittelyssä, jolloin on mahdollista värjätä kappaleita, parantaa niiden pinnanlaatua ja ominaisuuksia. Nämä mahdollisuudet tuovat lisäarvoa valmistetuille kappaleille ja lopputuotteen laatua saadaan parannettua huomattavasti. Jatkokäsittelyllä saattaa tosin olla pidentävä vaikutus toimitusaikaan, etenkin jos se ostetaan palveluna yhteistyökumppanilta.

6.1.5 Tilavaatimukset

Tarkastelluista menetelmistä SLA- ja FFF-menetelmät asettavat ylivoimaisesti vähiten vaatimuksia tuotantotilan infrastruktuurille. Tilassa tulee olla hyvä ilman-

vaihto ja säilytystilat materiaaleille. Filamenttikelojen varastoinnissa tulee minimoida kosteuden absorboituminen materiaaliin, joka huonontaisi tulostuslaatua. SLS- ja MJF-menetelmissä materiaalin käsittelyyn vaadittavaa osastointia ei tarvitse tehdä ja työntekijä voi työskennellä kevyemmällä suojavarustuksella. Jälkikäsittely tehdään tavanomaisessa työpisteessä, joka on varustettu yleisillä käsi- ja paineilmatyökaluilla sekä kohdepoistolla.

Valituilla menetelmillä on mahdollista aloittaa tuotanto nykyisen infrastruktuurin puitteissa ilman suurten muutosten tuomaa lisäkustannusta ja viivettä. Kiinteistön tilojen käyttöä joudutaan muutenkin tehostamaan tuotannon lisääntyvän automaation vaatiman tilan vuoksi layout-muutoksilla, joten halutun uuden tuotantomenetelmän ei tarvitse kilpailla samoista neliöistä. Laitteiston koon ja materiaalien käsittelyn helppouden vuoksi 3D-tulostus voidaan sijoittaa pienellekin pinta-alalle tehokkaasti.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

3D-tulostus kannattaa aloittaa menetelmillä, joissa pystytään aluksi palvelemaan muutamaa eri sidosryhmää. Yrityksen sisäisiksi asiakkaiksi voidaan ajatella mm. eri tuotantojen ja valmistavan teollisuuden sisaryritysten toimijat, joiden kanssa pystytään arvioimaan uudella menetelmällä tuotettujen kappaleiden laatua ja materiaalivalintoja. Menetelmien käyttöönottoa helpottaa prosessien nopea läpimenoaika, jolloin pystytään tekemään kehitystyötä nopealla syklillä laadun parantamiseksi.

Tarkastelluista vaihtoehtoista ehdotan valittavaksi FFF- (filamenttimateriaalit) ja SLA-menetelmän (nopeampi LSPc, resiniinimateriaalit). Molempien menetelmien etuja ovat laaja materiaalivalikoima (sisältäen vaativat erikoismuovit) ja sujuva integrointi nykyiseen tuotannon infrastruktuuriin. FFF-menetelmä sopii hieman suurempien (tulostuskammion koko 330x180x180 mm) kappaleiden valmistamiseen yksittäisinä tai pienissä erissä, kun taas SLA-menetelmä mahdollistaa pienten kappaleiden suurempien sarjojen nopean valmistamisen (valmistusalueen koko 115x195x210 mm). Näillä menetelmillä valmistetuille kappaleille on useita jälkikäsittelyvaihtoehtoja, joilla pystytään vastaamaan asiakkaiden laatuvaatimuksiin. Eri menetelmien esimerkkilaitteiden vertailut löytyvät liitteistä 1-3.

Markkinoinnin näkökulmasta SLA-menetelmä avaa myös mielenkiintoisia, uusia mahdollisuuksia. Materiaalin media ja laitteiston pieni koko mahdollistavat esimerkiksi esittelykäytön messuosastoilla, jolloin pystytään valmistamaan mm. vieraille jaettavia pieniä käyttöesineitä. Samalla saadaan menetelmän markkinoinnin avuksi tarvittavaa näkyvyyttä ja pystytään esittelemään asiakkaille uutta, kehittyvää tuotantomenetelmää. Etralla on tällä hetkellä n. 45 toimipistettä (Megacenter-myymälät ja suurten asiakkaiden välittömään läheisyyteen sijoittuneet On-Site-pisteet), jotka tavoittavat todella laajan skaalan teollisuuden asiakkaista. Ne ovat olennaisena osana uusasiakashankintaa ja uuden 3D-tulostuspalvelun markkinointia, jolla pystytään tarjoamaan asiakkaille esimerkiksi On-Demand-varaosapalvelua.

Teollisuustason 3D-tulostinlaitteiston hinnoissa tässä arvioidut SLA-menetelmän laitteet asettuvat edullisimpaan päähän (n. 10 000 €). Laadukkaiden FFF-menetelmän laitteiden hinnat ovat n. 75 000 € ylöspäin ja Suomestakin löytyy laitevalmistaja miniFactory. Jauhepeti-menetelmien (SLS ja MJF) laitteiden hinnat ovat alkaen n. 50 000 € (Formlabs), mutta varsinaisten tuotantolaitteiden hinnat nousevat yli 200 000 €:n. SLS- ja MJF-menetelmien käyttöönotot vaativat myös huomattavasti enemmän pinta-alaa tuotannosta ja infrastruktuurin rakentamista, joten niiden aloituskustannukset nousevat korkeiksi.

Kokonaiskustannus ehdotettujen kahden menetelmän investoinnista sisältäen laitteet, kalustuksen ja muutostyöt olisivat arviolta n. 115 000 €. Alla olevasta taulukosta 3 käy karkeasti ilmi, mistä kustannukset koostuvat.

Taulukko 3. Aloituskustannukset.

Kustannuksen tyyppi	Huomiot	Summa
3D-tulostuslaitteisto	miniFactory Ultra 2 (75 k€) Nexa3D XiP (10 k€)	85 000 €
Infrastruktuuri ja varustelu	väliseinät, sähkö, paineilma, kalusteet, työkalut, kohdepoisto	20 000 €
Jälkikäsittelylaitteisto		10 000 €
Yhteensä		115 000 €

Ainetta lisäävän tuotannon käynnistäminen kahdella eri menetelmällä lisää joustavuutta. Näin saavutetaan mahdollisimman laaja valikoima käytettävissä olevia materiaaleja, pystytään valmistamaan korkeatasoisia kappaleita niin sarjatuotantona kuin piensarjoja ja yksittäiskappaleina. Laadukkaaseen laitteistoon investoimalla saadaan läpimenoaika pidettyä lyhyenä ja tulostusprosessi luotettavana. Tulevaisuudessa valmistettujen kappaleiden validointi ja jäljitettävyyden tulevat lisääntymään, joten siihen on syytä kiinnittää huomiota laitehankintoja tehdessä.

LÄHTEET

J. Natarajan, C. Muralimohan, & Y. Che-Hua, 2021 Advances in Additive Manufacturing Processes. Singapore: Bentham Science Publishers.

C. Chao, ym. 2021, Comparative Study on 3D Printing of Polyamide 12 by Selective Laser Sintering and Multi Jet Fusion, Journal of materials processing technology 288 (2021): 116882–. Web.

HP, Multi Jet Fusion Technology, <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/products/multi-jet-technology.html>, n. d., viitattu 28.3.2023)

Dassault Systemes, 3Dexperience MAKE, SLA-Stereolithography, <https://www.3ds.com/make/service/3d-printing-service/sla-stereolithography>, n. d., viitattu 25.3.2023

Dassault Systemes, 3Dexperience MAKE, FDM-Fused Deposition Modelling, <https://www.3ds.com/make/service/3d-printing-service/fdm-fused-deposition-modeling>, n. d., viitattu 25.3.2023

HP, A Complete guide to 3D-printing materials, <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/learning-center/complete-guide-3d-printing-materials.html>, n.d., viitattu 14.2.2023.

EOS, Plastic materials overview, 11/2022., https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/material_pdf/eos_plastic_materials_overview_en.pdf, viitattu 14.2.2023.

VINK Finland OY, Muovitetopankki, PP-Polypropeeni, https://www.vink.fi/muovitetopankki/pp_muovi, viitattu 20.3.2023.

Dassault Systemes, MJF - Multi Jet Fusion, n. d., <https://www.3ds.com/make/service/3d-printing-service/mjf-multi-jet-fusion>, viitattu 8.4.2023.

Wevolver, What is TPU Material in 3D printing: material properties, applications, and technologies, <https://www.wevolver.com/article/what-is-tpu-material-in-3d-printing-material-properties-applications-and-technologies>, n. d., viitattu 28.3.2023.

Formlabs, How to Select the Right Material for SLA 3D Printing, <https://3d.formlabs.com/webinar-how-select-right-3D-printing-material>, n.d., viitattu 8.4.2023.

Stockmann-Juvala, H., Oksanen, K., Viitanen, A-K., Kangas, A., Huhtiniemi, M., Kanerva, T., Säämänen, A. Ohjeita turvalliseen 3D-tulostukseen, Työterveyslaitos 11/2016.

Formlabs, Company, <https://formlabs.com/company/>, n.d., viitattu 16.4.2023.

EOS, Professional 3D Printing solutions, <https://www.eos.info/en>, n.d., viitattu 3.5.2023

HP, 3D-Printing technologies, <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers.html>, n.d. viitattu 3.5.2023

Xometry, Post-processing for MJF and SLS 3D printed parts, <https://xometry.eu/en/post-processing-for-mjf-and-sls-3d-printed-parts/>, n.d., viitattu 5.5.2023

AMT, PostPro Chemical Vapor Smoothing, <https://amtechnologies.com/vapor-smoothing/>, n.d., viitattu 5.5.2023

LIITTEET

Liite 1. SLA-menetelmän laitevertailu

Menetelmä	SLA	
Merkki	Formlabs	Nexa3D
Malli	Form 3L	XiP
Laitteen koko (cm)	77x52x74	42x35x53
Tulostusala (mm)	335x200x300	115x195x210
Tulostustilavuus (cm ³)	20100	4710
Kerospaksuus (mm)	0,025-0,3	0,025; 0,05; 0,1
Materiaalit	30+ materiaalia https://formlabs.com/materials/	28 materiaalia https://nexa3d.com/materials-selection-tool/ Mahdollisuus käyttää muiden valmistajien resiineitä
Huom.	Mahdollisuus automatisointiin	Tulostusnopeus 5-10 x nopeampi LSPc-menetelmä SLA:han verrattuna, enintään 18 cm tulostusalan korkeutta / h.
Jälkikäsittely	Kappaleiden pesu ja tukirakenteiden poisto, lopullinen kovetus lämmöllä ja UV-valolla.	
Maahantuoja	Maker3D	Vossi
Hinta	10 000 €	8 000 €

Liite 2. FFF-menetelmän laitevertailu

Menetelmä	FFF		
Merkki	Markforged	miniFactory	
Malli	Mark Two	Ultra1	Ultra2
Laitteen koko (cm)	58,4x33,0x35,5	100x80x190	
Tulostusala (mm)	320x132x154	330x180x180	
Tulostustilavuus (cm ³)	6500	10690	
Kerrospaksuus (mm)	0,1; 0,2	0,1-0,8 (?)	
Materiaalit	Onyx (PA CF), PA Pitkät kuidut: hiili, lasi, lämmönkestävä lasi, kev- lar	Kaikki filamentti-tyyppiset	
Huom.	Valmiiden kappaleiden hy- vät mekaaniset ominai- suudet pitkien kuitujen vuoksi.	Laajin materiaali- vaihtokoma, myös erikoismuovit. Mal- lia oli kolme kpl jäl- jellä, poistuva tuote.	Nopeampi kuin Ultra 1, tulos- tusprosessin monitorointi ja raportin luomi- nen
Jälkikäsittely	Tukirakenteiden poisto.		
Maahantuojaja	Vossi	miniFactory	
Hinta	30 000 €	50 000 €	75 000 €

Liite 3. SLS- ja MJF-menetelmien laitevertailu

Menetelmä	SLS		MJF
	EOS	Formlabs	HP
Malli	Formica P110 Velocis	Fuse1+ 30W	Jet Fusion 4200
Laitteen koko (cm)	132x107x221	64,5x68,5x165,5	221x120x145
Tulostusala (mm)	200x250xs300	159x159x295	380x284x380
Tulostustilavuus (cm ³)	15000	7460	4100
Kerrospaksuus (mm)	0,06; 0,1; 0,12	0,11	0,08
Materiaalit	Alumide (PA Al), PA 11, PA 12, PA 12GF, TPE	PA 11, PA 11CF PA 12, PA 12GF TPU 90A	PA 11, PA 12, PA 12 GB, TPU, TPA
Huom.	Materiaalin vaihto ei ole järkevää, kone/materiaali	Materiaalin vaihto noin päivän työ	Materiaalin vaihto ei ole järkevää, kone/materiaali
Jälkikäsittely	Jäähdytys, ylimääräisen materiaalin poisto ja talteenotto, painelma- ja raepuhallus.		
Maahantuoja	Tamspark	Maker3D	PLM Group
Hinta	170 000 €	55 000 €	200 000 €