Tampereen yliopisto

Lari-Petteri Koiso-Kanttila

MIKROTASON 3D-TULOSTAMINEN

Menetelmät, kaupalliset laitteet ja sovellukset

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Jorma Vihinen
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Lari-Petteri Koiso-Kanttila: Mikrotason 3D-tulostaminen: menetelmät, laitteet ja sovellukset
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Toukokuu 2023

3D-tulostaminen on materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä, jossa kappale luodaan tietokonemallin pohjalta tulostusalustalle tai -altaaseen esimerkiksi pursottamalla tai valokovettamalla. Tässä työssä tarkastellaan mikro- ja nanotason ilmiöitä 3D-tulostamisessa, eli mittaväliä 0,1–1000 *µm*. Osa 3D-tulostamiseen liittyvistä ilmiöistä toistuu samanlaisena niin makro- kuin mikrotasoillakin, osa on tyypillisiä vain toiselle.

Tämän tutkielman tavoite on selvittää mitä menetelmiä käytetään mikrotason 3D-tulostamiseen, mitkä ovat näiden menetelmien erikoispiirteet ja käyttökohteet, sekä miten ne vertautuvat toisiinsa. Työ voidaan jakaa neljään osaan: Aluksi käydään läpi menetelmien toimintaperiaatteet ja seuraavaksi niiden käyttämät materiaalit ja käyttökohteet. Sitten käsitellään menetelmiin liittyviä ongelmia ja vahvuuksia. Lopuksi käsitellään ja vertaillaan näitä menetelmiä hyödyntäviä kaupallisia laitteistoja lyhyesti. Viimeisenä on yhteenvetokappale, jossa kiteytetään yhteen tutkielmassa käsitellyt asiat.

Tutkielmassa huomataan, että yleisesti on käytössä seitsemän tulostusmenetelmää, joista viisi voidaan jakaa vielä kahteen tai useampaan alamenetelmään. Nämä menetelmät ovat: mustesuihkutus, sideaineen suihkutus, mikrostereolitografia, kaksifotonipolymerisaatio, jauhepetimenetelmät sekä laminointi ja pursotus. Kaksi ensimmäistä ovat suihkutusmenetelmiä ja kaksi seuraavaa valokovetusmenetelmiä. Vaikkei laminointia tai pursotusta enää juuri käytetä mikrotasolla, on ne esitelty tässä tutkielmassa lyhyesti. Esiteltäviä menetelmiä voidaan käyttää lähes kaikkeen mikrotason valmistukseen, mutta erityisesti tässä tutkielmassa käyttökohteina korostuvat sähköteollisuus sekä bio- ja hammaslääketieteet.

Eri menetelmien resoluutioita vertailtaessa havaitaan, että kaksifotonipolymerisaatio on ylivoimaisesti paras mikrotason tulostamiseen. Menetelmällä voidaan saavuttaa jopa 0,1 *µm*:n resoluutio, mikä on kymmenen kertaa parempi kuin seuraavaksi parhaalla menetelmällä, mikrostereolitografialla. Suihkutusmenetelmillä päästään noin 20 *µm*:n resoluutioon, jauhepetimenetelmillä hieman tätä parempaan. Laminoinnilla ja pursotuksella saavutettavat resoluutiot ovat jo paljon näitä huonompia.

Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena, jossa käsiteltävät lähteet ovat englanninkielisiä. Käsiteltävät kirjalähteet ovat mahdollisimman uusia ja vertaisarvioituja. Työssä käytetään lähteenä myös alan yritysten internetsivuja.

Avainsanat: Mikrotaso, 3D-tulostaminen, materiaalia lisäävät menetelmät, valmistustekniikka, 3D-printing, microscale, additive manufacturing

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. MENETELMIEN ESITTELY: TEORIA JA TEKNIIKKA 3
2.1 Mustesuihkutus 3
2.2 Sideaineen suihkutus 5
2.3 Mikrostereolitografia 6
2.4 Kaksifotonipolymerisaatio 8
2.5 Jauhepetimenetelmät 10
2.6 Muut menetelmät 12
3. MATERIAALIT JA KÄYTTÖKOHTEET 17
3.1 Mustesuihkutus 17
3.2 Sideaineen suihkutus 18
3.3 Mikrostereolitografia 19
3.4 Kaksifotonipolymerisaatio 19
3.5 Jauhepetimenetelmät 21
4. ONGELMAT, KEHITYSKOHTEET JA VAHVUUDET 22
4.1 Mustesuihkutus 22
4.2 Sideaineen suihkutus 23
4.3 Mikrostereolitografia 23
4.4 Kaksifotonipolymerisaatio 24
4.5 Jauhepetimenetelmät 24
5. KAUPALLISIA LAITTEISTOJA 26
6. YHTEENVETO 28
LÄHTEET 31

KUVALUETTELO

Kuva 1. *Tutkielmassa käsiteltävät mikrotason 3D-tulostusmenetelmät..... 3*
Kuva 2. *Mustesuihkutusmenetelmän toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [8]..... 4*
Kuva 3. *Sideaineen suihkutusmenetelmän toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [1, s. 81], alkuperäinen lähde poistunut..... 5*
Kuva 4. *a) Pyyhkäisymikrostereolitografian toimintaperiaate, b) heijastusmikrostereolitografian toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [5, s. 557]..... 7*
Kuva 5. *Kaksifotonipolymerisaation toimintaperiaate [17, s. 165]..... 9*
Kuva 6. *Jauhepetimenetelmien toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [2, s. 135, katso 21. ..... 11*
Kuva 7. *Laminointimenetelmän toimintaperiaate [24, s. 3244]..... 13*
Kuva 8. *Pursotusmenetelmän toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [25]. 15*
Kuva 9. *Mustesuihkutus- ja sideaineen suihkutusmenetelmillä valmistettu mikrokomponentti [4, s. 1743], alkuperäinen lähde ei saatavilla. 18*
Kuva 10. *Esimerkkejä MSL-menetelmän käyttökohteista a) perustuu lähteeseen [4, s. 1740, katso 27], b) perustuu lähteeseen [28]..... 19*
Kuva 11. *2PP-menetelmällä tulostettuja solujen tukirakenteita, perustuu lähteeseen [4, s. 1741, katso 29]. 21*

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BJ	binder jetting, sideaineen suihkutus
CAM-LEM	computer aided manufacturing of laminated engineering materials, laminoitujen koneenrakennusmateriaalien tietokoneavustettu valmistus
DLP	digital light processing, digitaalinen valoprosessointi
DMD	digital micromirror device, digitaalinen mikropeililaite
DoD	drop-on-demand, vain-tarpeeseen
FSP-laser	femtosekuntipulssilaser
FDM	fused deposition modelling, pursotus
IJP	inkjet printing, mustesuihkutustulostus
3D-	kolmiulotteinen-
LOM	laminated object manufacturing, laminoiva objektin valmistus
MSL	mikrostereolitografia
SLM	selective laser melting, valikoiva lasersulatus
SLS	selective laser sintering, valikoiva lasersintraus
SLA	stereolitografia
2PP	two-photon polymerisation, kaksifotonipolymerisaatio
UV	ultravioletti
C°	celsiusaste
mPas	mikroPascal-sekunti
pL	pikolitra
µm	mikrometri
mm	millimetri
ms	millisekunti
nm	nanometri
tW	terawatti

1. JOHDANTO

3D-tulostaminen (kolmiulotteinen tulostaminen) on materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä, jossa kappale luodaan tietokonemallin pohjalta tulostusalustalle tai -altaaseen esimerkiksi pursottamalla tai valokovettamalla. Se toimii siis päinvastaisella tavalla kuin perinteiset, materiaalia poistavat menetelmät, joissa valmiista kappaleesta poistetaan materiaalia esimerkiksi lastuavalla työstöllä halutun lopputuloksen aikaansaamiseksi. Ensimmäinen 3D-tulostusmenetelmä *stereolitografia (SLA)* eli valokovetus altaassa kehitettiin vuonna 1984 [1, s. 69], [2, s. 120].

Tämä työ rajataan käsittelemään mikrotason 3D-tulostamista. Työtä lukiessa on huomioitava, että mikrotason 3D-tulostusmenetelmät ja sovellukset ovat monelta osin vielä kehitys- ja prototyyppivaiheessa [2, s. 44], ja esitetyt tulokset ja päätelmät voivat näyttää vanhentuneilta jo muutaman vuoden päästä.

Makrotasolla tarkoitetaan tässä työssä kaikkea yli 1 *mm*:n kokoista, mikrotasolla mittaväliä 0,1–1000 *µm* ja nanotasolla 0,1–100 *nm*. Esimerkiksi ihmisen hius on keskimäärin 100 *µm*:n paksuinen eli mikrotasoa. Ihmisen DNA-kierteen paksuus on noin 2,5 *nm*, siis nanotasoa. [3]

Tämän tutkielman tarkoituksena on kuvata mikrotason 3D-tulostamiseen liittyviä ilmiöitä ja se vastaa seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Mitä menetelmiä käytetään mikrotason 3D-tulostamiseen?
- Mitkä ovat näiden menetelmien erityispiirteet ja käyttökohteet?
- Miten nämä menetelmät vertautuvat toisiinsa?

Tutkielmassa esitellään seitsemän eri menetelmää, joita käytetään mikrotason 3D-tulostamiseen. Nämä menetelmät ovat: mustesuihkutus, sideaineen suihkutus, mikrostereolitografia, kaksifotonipolymerisaatio, jauhepetimenetelmät sekä laminointi ja pursotus. Näistä kaksifotonipolymerisaatiolla saadaan aikaan huomattavasti pienintä tulostusjälkeä ja se on siksi tämän tutkielman kannalta merkityksellisin.

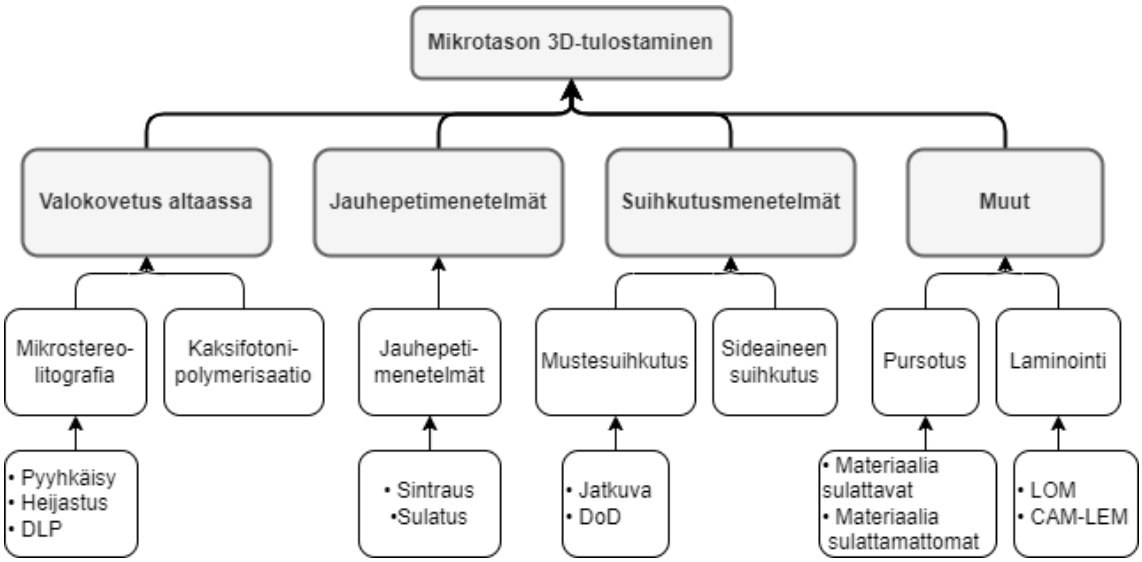
Aluksi tutkielmassa esitellään erilaiset käytössä olevat menetelmät yksitellen ja seuraavaksi niiden käyttämät materiaalit ja käyttökohteet. Sitten paneudutaan eri menetelmien ongelmiin, kehityskohteisiin ja vahvuuksiin. Sen jälkeen käsitellään ja vertaillaan näitä

menetelmiä hyödyntäviä kaupallisia laitteistoja lyhyesti. Lopuksi on yhteenvetokappale, jossa kiteytetään työn keskeisimmät ilmi tulleet asiat ja tulokset.

Tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksen pohjalta ja käsitellyt lähteet ovat englanninkielisiä. Aiheesta ei juuri löytynyt suomenkielisiä tutkimuksia esimerkiksi kirjaston Andor-verkkopalvelusta, joten ratkaisu on perusteltu. Käytetyt lähteet ovat lisäksi mahdollisimman uusia ja vertaisarvioituja julkaisuja. Vanhin käytetty kirjallisuuslähde on vuodelta 2013, uusimmat vuodelta 2023. Suurin osa käytetyistä kirjalähteistä on 2020-luvulta. Näillä rajauksilla tehdyn kirjallisuuskatsauksen tuloksista saadaan mahdollisimman oikeellisia ja ajankohtaisia. Työssä käytetään lähteenä myös alan yritysten internetsivuja. Työssä käytetyt suomennukset ovat mahdollisuuksien mukaan SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021 mukaisia.

2. MENETELMIEN ESITTELY: TEORIA JA TEKNIIKKA

Mikrotason 3D-tulostamisessa on käytössä lukuisia eri menetelmiä ja useista menetelmistä on erilaisia variaatioita. Selvitän tutkielmassani seitsemän erilaista menetelmää, joista viisi jakautuu vähintään kahteen eri alamenetelmään. Mikrotason 3D-tulostusmenetelmät voidaan jakaa karkeasti kolmeen ryhmään: skaalautuva materiaalia lisäävä valmistus, 3D-suorakirjoitus, sekä näiden yhdistelmä, hybridiprosessit (engl. scalable additive manufacturing, 3D direct writing, hybrid processes) [1, s. 68], [4, s. 1723]. Kaikki tässä tutkielmassa esitettävät menetelmät voidaan luokitella skaalautuviksi materiaalia lisääviksi valmistusmenetelmiksi [1, s. 68], [4, s. 1723] ja edelleen toimintaperiaatteen mukaan neljään ryhmään: *valokovetus altaassa, jauhepetimenetelmät, suihkutusmenetelmät* ja *muut menetelmät*. Tätä jakoa on havainnollistettu kuvassa 1, jossa nimetään myös kaikki esiteltävät tulostusmenetelmät.

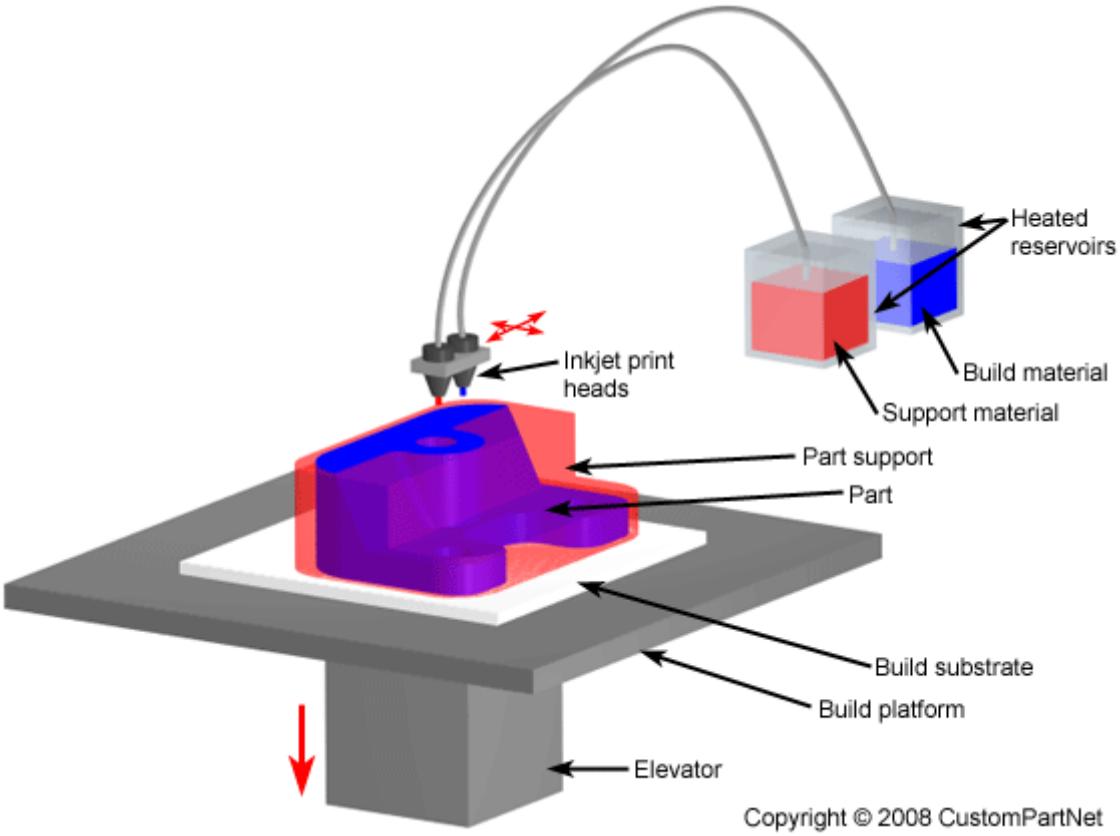


Kuva 1. *Tutkielmassa käsiteltävät mikrotason 3D-tulostusmenetelmät.*

2.1 Mustesuihkutus

Mustesuihkutusmenetelmässä (engl. inkjet printing, IJP), toiselta nimeltään *materiaalisuihkutusmenetelmässä* (engl. material jetting) tulostussuutin suihkuttaa mustetta tulostusalustalle pieninä, jopa vain 1 *pL*:n pisaroina [5, s. 551], jolloin paras saavutettava resoluutio on noin 20 *µm* [5, s. 552], [6, s. 2]. Kun muste on suihkutettu tulostusalustalle, se kovetetaan UV-valolla välittömästi [1, s. 87], [4, s. 1728]. Tämän jälkeen tulostusalus-

taa lasketaan ja uusi kerros mustetta suihkutetaan suoraan edellisen päälle. Näin tulostusalustalle muodostuu 3D-kappale, jonka kuitenkin usein täytyy vielä antaa viilentyä kovettuakseen. Kuva 2 havainnollistaa IJP-menetelmän toimintaa, tosin kuvassa näkyvässä laitteistossa on myös toinen mustesuutin ja -säiliö tukimateriaalia varten. Luotua kappaletta voidaan jälkikäsitellä esimerkiksi sintraamalla [4, s. 1728], jolloin kappaletta tiivistetään korkean lämpötilan ja/tai paineen avulla [2, s. 61], [7]. IJP-menetelmällä tulostettaessa voidaan käyttää apuna myös tulosteiden tukirakenteita, jotka koostuvat geelimäisestä materiaalista [1, s. 87], [4, s. 1729].



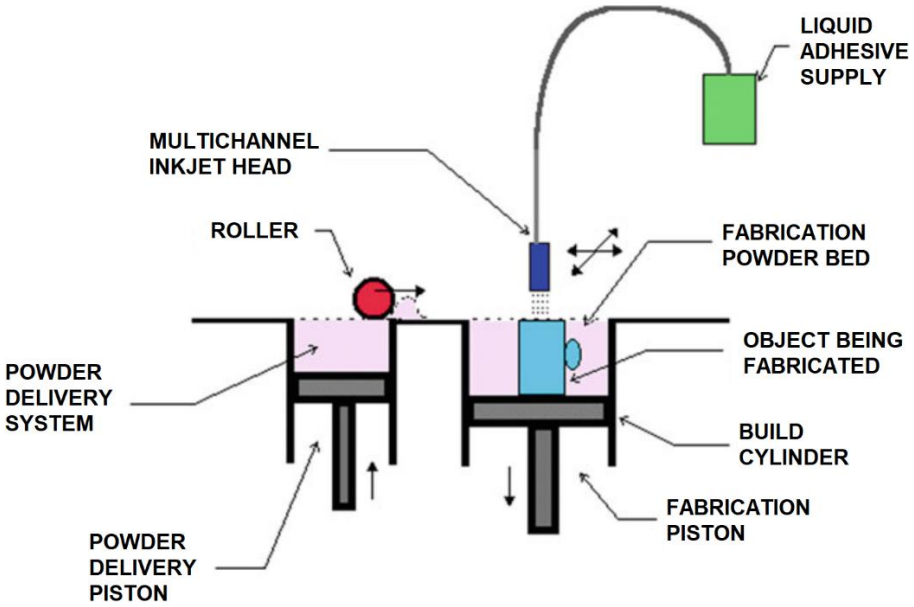
Kuva 2. *Mustesuihkutusmenetelmän toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [8].*

IJP-menetelmä voidaan jakaa kahteen alamenetelmään, *jatkuvatoimiseen tulostamiseen* ja *vain-tarpeeseen tulostamiseen* (engl. continual, drop-on-demand, DoD). Jatkuvatoimiset tulostimet suihkuttavat mustetta koko tulostusprosessin ajan, jolloin osa suihkutetusta musteesta menee hukkaan. DoD-tulostimet suihkuttavat mustetta vain tarvittaessa, jolloin turhaan suihkutetun musteen kierrätystä tai uudelleenkäyttöä ei tarvita. [4, s. 1728], [5, s. 551] Näistä kahdesta menetelmästä DoD-tulostimilla on suurempi potentiaali mikrotason 3D-tulostamisessa, sillä niillä saadaan aikaan parempaa resoluutiota kuin jatkuvatoimisilla tulostimilla. Tämä johtuu siitä, että niissä voidaan käyttää korkeamman viskositeetin omaavia musteita, sekä siitä, että suihkutetun mustepisaran nopeus on pienempi [4, s. 1728].

IJP-tulostimilla saavutettava resoluutio pohjautuu pitkälti pisaran kokoon, mikä riippuu muun muassa laitteen käyttöjännitteestä, suihkutustaajuudesta, pulssimuodosta, suihkutuspään koosta sekä musteen ominaisuuksista [5, s. 551]. Musteen viskoosi vaihtelee tulostustavan mukaan välillä 2–100 *mPas* [4, s. 1738]. Osassa tulostimista voidaan käyttää musteen esilämmitystä, mikä laskee sen viskositeettia pienentäen pisaran kokoa ja täten parantaen tulostusprosessia [5, s. 551]. Erään tutkimuksen mukaan tulostuspään lämmitystä parempia tuloksia saa pietsosähköisellä tulostuspäällä [4, s. 1728].

2.2 Sideaineen suihkutus

Sideaineen suihkutusmenetelmä (engl. binder jetting, BJ) kehitettiin 1990-luvulla [1, s. 80] mustesuihkutusmenetelmän pohjalta ja sen toimintaperiaate onkin samankaltainen. Erona on se, että BJ-menetelmässä suihkutettava materiaali sitoo tulostusalustalla olevan jauheen yhteen. Tulostusalustaa lasketaan kerros kerrokselta ja siihen lisätään uutta jauhetta, joka taas sidostetaan suihkutetulla sideaineella, kuten on havainnollistettu kuvassa 3. Tätä jatketaan, kunnes tulostettava kappale on valmis. [1, s. 81], [4, s. 1727] BJ-tulostimissa käytetään yleensä pietsosähköisiä tulostuspäitä lämmitettyjen sijaan parhaimman tarkkuuden ja resoluution saavuttamiseksi [1, s. 82], [4, s. 1728]. Kuten mustesuihkutusmenetelmässäkin, on tarkin saavutettava resoluutio noin *20 µm* [4, s. 1738].



Kuva 3. *Sideaineen suihkutusmenetelmän toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [1, s. 81], alkuperäinen lähde poistunut.*

Usein BJ-menetelmällä luotua kappaletta tulee myös jälkikäsitellä. Tällaisia jälkikäsittelymetodeja ovat *kovetus*, *ylimääräisen jauheen poistaminen*, *sintraus* [9, s. 1385] ja *in-*

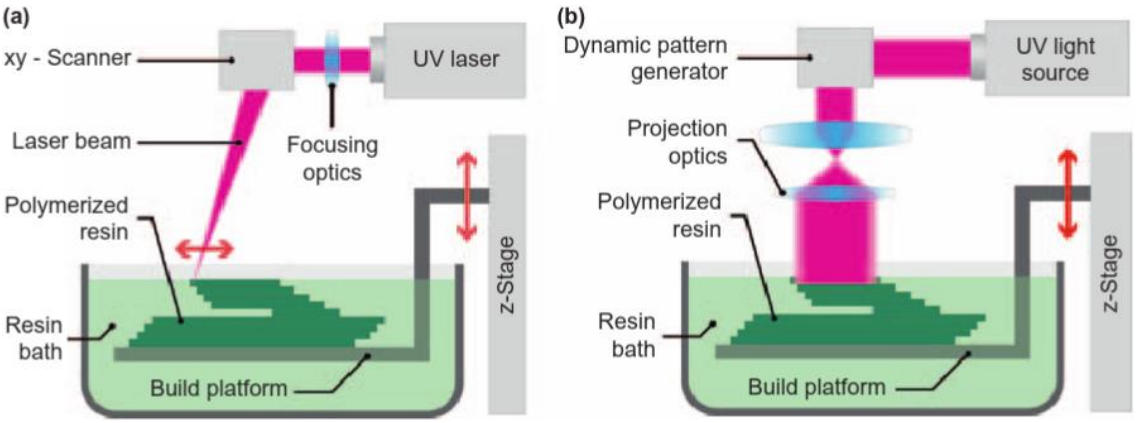
filtraatio [1, s. 81]. Kovetuksessa tulostettua kappaletta lämmitetään uunissa, jolloin sideaine kovettuu [9, s. 1385]. Tulostettavaan kappaleeseen voi myös helposti jäädä turhaa, sidostamatonta jauhetta, joka tulee poistaa [2, s. 172], [9, s. 1385]. Tulostettua kappaletta voidaan lisäksi infiltroida, eli siihen imeytetään toista ainetta maksimaalisen kestävyyden saavuttamiseksi [1, s. 81].

Suuremmalla partikkelikoolla saavutetaan suurempi huokoskoko sekä homogeenisempi lopputulos. Tämä johtuu siitä, että suuremman tilavuus-pinta-ala -suhteensa takia suuremmat sidepartikkelit tunkeutuvat tulostuspohjan jauheeseen paremmin ja myös sitovat enemmän jauhetta. Useimmiten pienempi mustepartikkelikoko on kuitenkin parempi, sillä siten saadaan aikaan parempi resoluutio. [4, s. 1728] Pienemmällä partikkelikoolla saavutetaan myös pienempi pinnankarheus kappaleelle [1, s. 82], [4, s. 1728].

Sideaineen suihkutusmenetelmää voidaan käyttää yhdessä mustesuihkumenetelmän kanssa: itse 3D-kappale voidaan tulostaa BJ-menetelmällä ja sen pinnalle tulostetaan kustomoidulla musteella IJP-menetelmää käyttäen [4, s.1742]. Näin itse kappale saadaan valmistettua nopeasti ja tukirakenteetta, mutta sen pinnalle saadaan lisättyä esimerkiksi metallipohjaisia johteita.

2.3 Mikrostereolitografia

Mikrostereolitografia (engl. micro-stereolitography, MSL) perustuu *stereolitografiaan* (SLA), mutta on nimensä mukaisesti kehitetty mikrotason 3D-tulostamiseen. Mikrostereolitografiassa muodostetaan kappale heijastamalla *UV-lasersäde* tulostusaltaan pintaan, jolloin tulostusaltaassa oleva nestemäinen materiaali kovettuu altistuessaan UV-valolle. Tulostusaltaassa olevaa tulostusalustaa lasketaan tulostettavan kerrospaksuuden verran ja kovetusprosessi suoritetaan uudestaan tuoreelle nestekerrokselle. Näin tulostusaltaaseen muodostuu kolmiulotteinen kappale. [1, s. 69], [4, s.1723], [10, s. 242] MSL voidaan jakaa kahteen eri alamenetelmään: *pyyhkäisymikrostereolitografiaan* (engl. scanning micro-stereolitography [1, s. 69] tai ”vector-by-vector” micro-stereolitography [4, s. 1723], [5, s. 556]) ja *heijastusmikrostereolitografiaan* (engl. projection microstereolitography) [1, s. 69], [4, s. 1723], [5, s. 555–556]. Kuvassa 4 havainnollistetaan MSL-menetelmän toimintaperiaate sekä siitä voidaan havaita a) pyyhkäisy- ja b) heijastusmikrostereolitografian eroavaisuudet. On tärkeää huomioida, että MSL-menetelmässä polymerisaatio tapahtuu yhden fotonin polymerisaationa: resiinimolekyylit vaativat siis vain yhden fotonin polymerisoituakseen [4, s. 556], [11, s. 13].



Kuva 4. *a) Pyyhkäisymikrostereolitografian toimintaperiaate, b) heijastusmikrostereolitografian toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [5, s. 557].*

Pyyhkäisymenetelmässä UV-laserilla ”pyyhkäistään” kaikki tulostettavan kappaleen piirteet piste pisteeltä erikseen tulostusalustalle laserin fokuspistettä liikuttamalla [1, s. 69], [4, s. 1723–1724], kuten on esitetty kuvassa 4 a. Menetelmän ongelmaksi muodostuu se, että toimiakseen UV-laserin polttovälin tulisi pysyä hyvin pienenä. Tästä syystä UV-laserin fokuspisteen liikuttaminen tulisi toteuttaa liikuttamalla itse tulostusallasta lasersäteen pysyessä paikallaan eikä lasersädettä heijastamalla. [4, s. 1724]

Heijastusmenetelmässä lasersäteen eteen asetetaan *optinen maski* (engl. optical mask), jota on kuvassa 4 b merkattu laatikolla ”Dynamic pattern generator”, johon on muodostettu tulostettavan kerroksen kaikki muodot [1, s. 69], [4, s. 1724], [5, s. 556]. Lasersäde pääsee läpi siis vain halutuista kohdista, ja näin voidaan kovettaa kaikki 3D-kappaleen kerrospiirteet kerralla tulostusalustalle. Tästä syystä heijastusmenetelmä on huomattavasti pyyhkäisymenetelmää nopeampi [1, s. 69], [4, s. 1724], [5, s. 556]. Menetelmän alkuvaiheessa käytettävät maskit täytyi tulostaa jokaiselle kerrokselle erikseen, mikä oli kallista ja aikaa vievää. Vuonna 2000 ongelmaan kehitettiin ratkaisu: nestekidenäyttöä (LCD) voidaan käyttää dynaamisena maskina säätämällä nestekiteitä päälle tai pois päältä. Näin lasersäteen muodostamaa kuviota tulostusalustassa voidaan muuttaa kerros kerrokselta ilman maskin vaihtoa. Dynaamisen maskin käyttäminen tekee heijastusmenetelmästä huomattavasti aiempaa edullisempaa, mutta siihen liittyy myös ongelmia. Esimerkiksi näytön pikseleiden päälle-pois-säätämisessä on viive, noin 20 *ms*, sekä pikseleiden koko on verrattain suuri. [4, s. 1724] Tämä rajoittaa heijastusmenetelmän käyttöä mikrotason 3D-tulostamiseen.

MSL:sta on kehitetty myös kolmas alamenetelmä, *digitaalinen valoprosessointi* (engl. digital light processing, DLP), jossa dynaaminen maski voidaan luoda *digitaalisen mikropeililaitteen* (engl. Digital Micromirror Device, DMD) avulla [1, s. 69], [4, s. 1724], [12]. DMD on Texas Instrumentsin kehittämä puolijohdesiru, joka koostuu tuhansista [12] tai

jopa yli miljoonasta [1, s. 70], [4, s. 1724], [10, s. 3242] mikropeilistä, joiden asentoa muuttamalla saadaan luotua haluttu tulostuskuva [1, s. 70], [4, s. 1724], [10, s. 3242], [12], [13, s. 7]. Yksittäisen peilin sivun pituus on noin 13 *µm*. DLP:ssä materiaalin kovettamiseen käytetään UV-laserin sijaan esimerkiksi halidipolttimoa, jonka emittoivan valon aallonpituutta voidaan muuttaa optisten suodattimien avulla UV-valosta näkyvään valoon, kovetettavan materiaalin mukaan [1, s. 69], [4, s. 1724]. Tässä menetelmässä valo yleensä heijastetaan tulostusastiaan alapuolelta [1, s. 69], [4, s. 1724], [10, s. 3242], [13, s. 7], [14, s. 4].

MSL:ssa UV-laserin fokuspisteen halkaisija on muutaman mikrometrin, jolloin saavutetaan noin 1–10 *µm*:n kerrospaksuus [1, s. 69], [4, s. 1723], [5, s. 556] ja 1–2 *µm*:n resoluutio [1, s. 72], [15]. Yksi tärkeimmistä vaakatason tarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä on käytetyn laserin polttopisteen etäisyys nestemateriaalin pinnasta [10, s. 244]. Muita vaakatason tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat käytetyn nestemateriaalin ominaisuudet, kuten valokäynnisteiden konsentraatio, käytetyn laserin aallonpituus ja intensiteetti. Vertikaaliseen tarkkuuteen eli kerrospaksuuteen vaikuttavat etenkin käytetyn nestemateriaalin viskositeetti ja pintajännitys [10, s. 242], koska menetelmällä voidaan tulostaa uusi kerros ainoastaan tulostusaltaan pintaan [4, s. 1725].

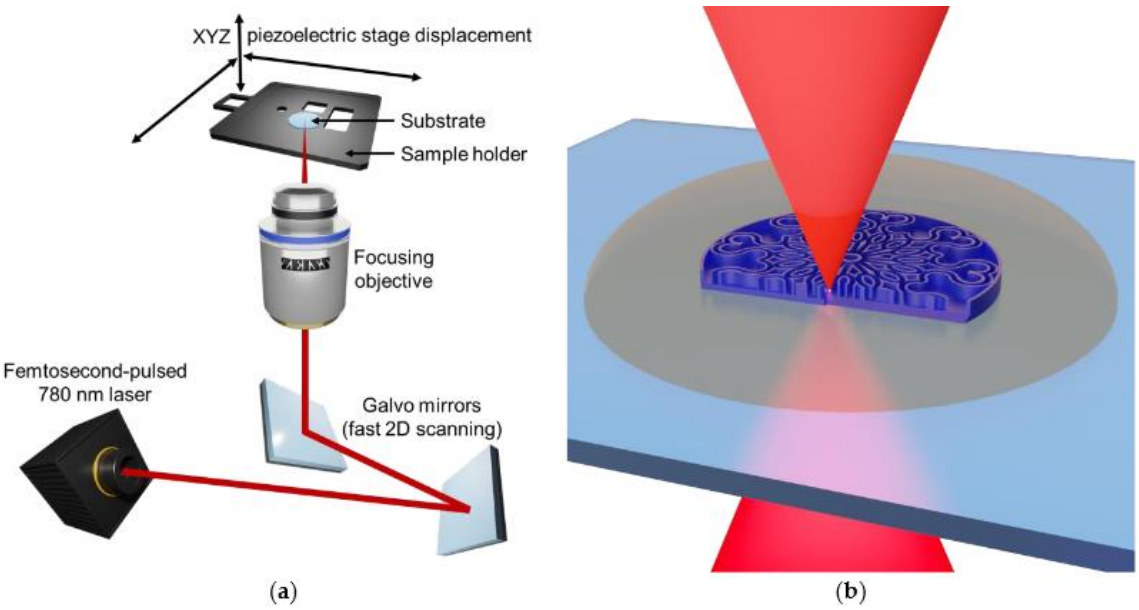
2.4 Kaksifotonipolymerisaatio

Kaksifotonipolymerisaatio (engl. two-photon polymerization, 2PP) toimii lähtökohtaisesti samanlaisella toimintaperiaatteella kuin mikrostereolitografia: tulostusaltaassa olevaa nestemäistä materiaalia eli resiiniä valokovetetaan 3D-kappaleen muodostamiseksi. Tässä menetelmässä kuitenkin käytetään kovetukseen *femtosekuntipulssilaseria* (FSP-laser) UV-valon sijaan ja käytettävä nestemäinen materiaali tulostusaltaassa tarvitsee kaksi fotonia polymerisoituakseen. [1, s. 70], [4, s. 1725], [5, s. 557], [11, s. 12], [13, s. 2] 2PP-menetelmän laitteiston toimintaa on havainnollistettu kuvassa 5 a. Käytettävä FSP-laser voidaan optimoida niin, että polymerisaation raja ylittyy ainoastaan laserin fokuspisteessä [16, s. 2], jolloin usean neliömikrometrin FSP-laserisäteen vaikutusalueella voidaan saavuttaa 100–200 *nm*:n resoluutio. [1, s. 71] Koska kaksifotonipolymerisaation tapahtuminen vaatii kirjaimellisesti kahden erillisen fotonin osumisen kovetettavaan molekyyliin, on sen tapahtumistodennäköisyys hyvin pieni. Tästä syytä käytettävän FSP-laserin valon voimakkuus tulee olla hyvin suuri, siis tasolla tW/cm^2 [11, s. 12]. FSP-laserin fokuspistettä on havainnollistettu kuvassa 5 b.

2PP-menetelmällä luotua kappaletta voidaan jälkikäsitellä tulostamisen jälkeen paremman laadun aikaansaamiseksi. Tällaisia jälkikäsittelyn muotoja on useita: kovetettua ja jo polymerisoitunutta materiaalia voidaan kovettaa vielä lisää esimerkiksi UV-valolla yhä

verkkoutuneemman rakenteen aikaansaamiseksi tai lämpökäsitellä sileämmän pinnankarheuden saavuttamiseksi. [17, s. 166] Kappaletta voidaan myös käsitellä isotrooppisella plasmaetsauksella ja -kuivatislauksella (eng. isotropic plasma etching and pyrolysis) paremman resoluution saavuttamiseksi [17, s. 166], jolloin polymerisoitua kappaletta kuumennetaan inertissä ympäristössä. Tämä tuhoaa orgaanisia molekyylejä, mikä johtaa kappaleen kutistumiseen. [18] Kuten MSL-menetelmässä, tulee 2PP-menetelmällä tulostettu kappale usein puhdistaa valmistuksen jälkeen, jotta siitä saadaan poistettua kovettumaton neste [1, s. 73].

MSL-menetelmään verrattuna 2PP-menetelmä on monella tapaa ylivoimainen mikrotason 3D-valmistuksessa: MSL-menetelmällä saavutettava paras resoluutio on noin 1–2 *µm*:n luokkaa [1, s. 72], [15], 2PP-menetelmällä noin 100 *nm* [1, s. 72], [4, s. 1726]. 2PP-menetelmää voidaankin kutsua todelliseksi nanotason menetelmäksi. Toinen kriittinen eroavaisuus menetelmien välillä on valokovetustapa: siinä missä MSL-menetelmässä polymerisaatio tapahtuu vain tulostusaltaan pinnassa, voidaan 2PP-menetelmässä käytetty FSP-laser keskittää mihin tahansa tulostusaltaan kohtaan, myös syvyyssuunnassa [1, s. 71], [5, s. 557], [17, s. 165]. Laserin fokuspistettä voidaan siirtää tulostusaltaassa joko laserin polttopistettä tai koko tulostusallasta liikuttamalla [5, s. 557], [19, s. 12], ja näin saavutetaan todellinen kolmiulotteinen valmistus. Kuvassa 5 fokuspisteen liikutus on toteutettu tulostusallasta liikuttamalla.



Kuva 5. *Kaksifotonipolymerisaation toimintaperiaate [17, s. 165].*

2PP-menetelmään perustuvien laitteiden käyttäminen ja optimointi valmistukseen on haastavaa: usein tarvitaan paljon aikaa ja resursseja sopivien asetusten löytämiseksi [17, s. 165]. 2PP-prosessin optimoinnissa tulisi kiinnittää huomiota etenkin FSP-laserin

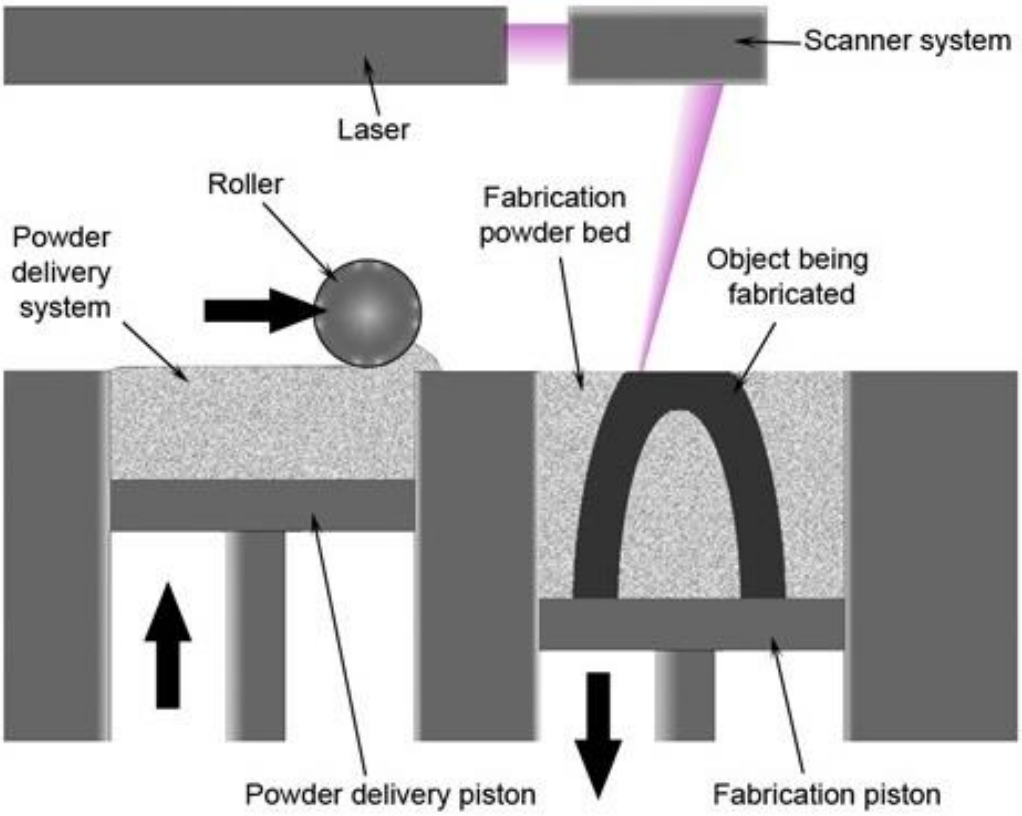
tehoon ja pyyhkäisynopeuteen: mikäli näistä tekijöistä riippuva laserin intensiteetti on liian suuri, tapahtuu *laservaurio*, jolloin tulosteeseen muodostuu kuplia [11, s. 13]. Kriittisimmät 2PP-menetelmällä saatuihin tuloksiin vaikuttavat tekijät ovat jo mainitut FSP-laserin teho ja pyyhkäisynopeus [17, s. 166] sekä lasersäteen energian jakautuminen resiiniin [11, s. 12], mutta niihin vaikuttavat lisäksi esimerkiksi käytetty resiini sekä jälkikäsittely [17, s. 177]. Lisäksi on tärkeää tarkastaa FSP-laserin aallonpituuden ja käytettävä resiinin yhteensopivuus: muuten vaarana on, että polymerisaatio tapahtuu kuin MSL-menetelmässä, siis yhden fotonin polymerisaationa [11, s. 13].

2.5 Jauhepetimenetelmät

Jauhepetimenetelmät voidaan jakaa kahteen hyvin samankaltaiseen menetelmään: *valikoivaan lasersintraukseen* (engl. selective laser sintering, SLS) ja *valikoivaan lasersulatukseen* (engl. selective laser melting, SLM). Näiden merkittävin ero on se, että SLS-menetelmässä kappale luodaan sintraamalla, SLM-menetelmässä sulattamalla jauhepartikkelit yhteen. Vaikka SLM-menetelmällä voidaan tulostaa ainoastaan metallijauheita, sen etuna on mahdollisuus käyttää hienompaa jauhetta. [1, s. 76] Lisäksi SLM-menetelmässä käytettävä lasersäde on useimmiten SLS-menetelmää tehokkaampi [1, s. 77], [4, s. 1727], jotta saavutetaan jauheen täysi sulaminen ja tiiviimpi rakenne [4, s. 1727]. Vaikka tämä luku keskittyykin pääosin SLS-menetelmään, pitävät monet esitetyistä tutkimustuloksista paikkansa myös SLM-menetelmässä edellä mainitut erot huomioiden.

SLS-menetelmässä suhteellisen korkeatehoisella [5, s. 555] ja -lämpöisellä lasersäteellä yhdistetään jauhepedissä oleva jauhe kolmiulotteiseksi kappaleeksi kerros kerrokselta [1, s. 76], [4, s. 1726]. Lasersäteen teho voi olla luokkaa 50 *W* [20] ja fokuspisteen lämpötila vaihtelee käytettävän materiaalin mukaan, ollen lähellä sulamislämpötilaa. Kun jauhepedin pinta on kauttaaltaan pyyhkäisty lasersäteellä, lasketaan tulostusalustaa kerrospaksuuden verran ja levitetään jauhepedille uusi kerros jauhetta. Prosessia jatketaan, kunnes jauhepetiin on muodostettu haluttu 3D-kappale. [1, s. 76], [4, s. 1726], [5, s. 555] Jauhepetimenetelmien toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 6. Tulostuksen jälkeen kappaleesta tulee poistaa siihen kiinnittymätön irtonainen jauhe [5, s. 555].

SLS-menetelmässä tulostusalusta on usein esilämmitetty lähelle jauheen sulamispistettä, jotta lasersäteen vaikutusalue ja -aika saadaan optimoitua [5, s. 555]. Nykyisellä teknologialla jauhepetimenetelmillä on mahdollista saavuttaa sintraamalla lähes 100 % tiheys tulostetulle kappaleelle [2, s. 62].



Kuva 6. *Jauhepetimenetelmien toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [2, s. 135, katso 21.*

Jotta jauhepetimenetelmillä päästäisiin mahdollisimman hyvään resoluutioon, tulee käytettävän tulostusjauheen olla myös hyvin hienojakoista. Pienipartikkeliset jauheet reagoivat kuitenkin voimakkaammin hapen ja kosteuden kanssa [4, s. 1726], joten tällaisia jauheita käytettäessä tulee tulostusympäristö pitää hapettomana oksidoitumisen ja epäpuhtauksien muodostumisen välttämiseksi [1, s. 76]. Tämä saavutetaan yleensä käyttämällä tulostuksessa apuna inerttiä kaasua, kuten typpeä ja argonia [1, s. 79], mutta toinen mahdollisuus on suorittaa tulostusprosessi tyhjiössä [1, s. 79], [4, s. 1726]. Suojakaasuja käytettäessä tulee varmistaa, että kaasu on varmasti inertti prosessissa: esimerkiksi ruostumatonta terästä tulostettaessa argon vaikuttaa prosessiin, kasvattaen huomattavasti kappaleen murtovenymää [1, s. 79].

SLS-menetelmällä saavutettava paras resoluutio on noin 20 *µm* [5, s. 555] tai jopa 5 *µm* [22] ja käytettävä kerrospaksuus yleensä 5–20 *µm*:n välillä [5, s. 555]. Joillain kaupallisilla laitteilla tulostettavien mikrokomponenttien minimikoko on kuitenkin rajoittunut noin 500 *µm*:iin, koska lasersäteen halkaisija on yleisesti luokkaa 50–300 *µm* [1, s. 77], [4, s. 1726]. Tämä vaikeuttaa näiden laitteiden hyödyntämistä mikrotason 3D-tulostamiseen. [1, s. 80], [4, s. 1743].

Jauhepetimenetelmillä saavutettavaan parhaimpaan resoluutioon vaikuttavat monet tekijät, jotka voidaan jakaa teknisiin, materiaalisiin ja fysikaalisiin osatekijöihin. Teknisiä osatekijöitä ovat käytetyn laserin teho, aallonpituus, säteen halkaisija ja vaikutusaika. Materiaalisia osatekijöitä ovat jauheen kerrospaksuus, materiaalin kemiallinen koostumus, sekä kideopilliset-, lämpöopilliset-, mekaaniset-, optiset-, metallurgiset- ja virtausopilliset ominaisuudet. Fysikaalisia osatekijöitä ovat laserin ja jauheen väliset ilmiöt, esimerkiksi absorptio, faasimuutokset, heijastuminen, lämmönsiirto ja erilaiset kemialliset ilmiöt. Jauhepetimenetelmät ovat täten hyvin monimutkaisia prosesseja, eikä yksittäisten parametrien muutoksella usein saavuteta täysin haluttua vaikutusta lopputulokseen. [1, s. 77]

2.6 Muut menetelmät

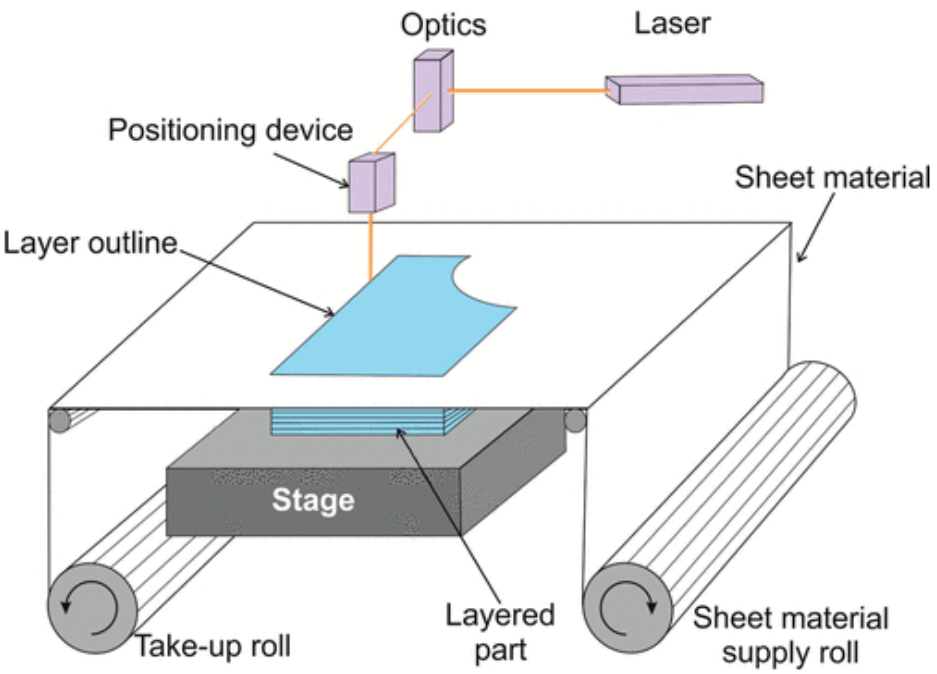
Seuraavaksi esitellään kaksi menetelmää, joita ei nykyään juuri käytetä mikrotason 3D-tulostamiseen. Menetelmistä on kerrottu muita lyhyemmin ja ne on siksi esitelty yhteisen pääotsikon alla, eikä niihin palata enää myöhemmissä luvuissa. Näistä kahdesta menetelmästä *pursotus* on kuitenkin käytetyimpiä menetelmiä makrotason 3D-tulostamisessa ja se on siksi huomioitu myös tässä tutkielmassa [1, s. 89], [14, s. 9].

Laminointi

Alkuun on huomioitava, että laminointi kuuluu *levy-levyltä-prosesseihin* (engl. Sheet stacking process [23, s. 12], micro-transfer printing [5, s. 561]). Osassa levy-levyltä-prosesseista kerrokset luodaan ensin valmiiksi ja vasta sen jälkeen siirretään tulostusalustalle ja kasataan päällekkäin [5, s. 561], [23, s. 12]. Tässä tutkielmassa käsitellään levy-levyltä-prosesseista vain laminointia.

Mikrotason 3D-tulostamiseen käytettäviä laminointimenetelmiä on käytössä kaksi: *Laminoitujen koneenrakennusmateriaalien tietokoneavustettu valmistus* (engl. Computer Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials, CAM-LEM) [4, s. 1733] sekä *Laminoiva objektin valmistus* (engl. Laminated Object Manufacturing, LOM). Nämä menetelmät toimivat pääperiaatteiltaan samalla tavalla, jota on havainnollistettu kuvassa 7: menetelmissä tulostettava materiaali syötetään kerroksittain keskeytyksettä rullalta, josta leikataan laserilla [4, s. 1733], [23, s. 13], [24, s. 3244] tai mekaanisesti [24, s. 3244] sopivat palat tulosteeseen. Kuvassa 7 palat leikataan rullasta irti laserilla. Kerrokset liitetään toisiinsa materiaalin mukaan joko lämpöaktivoituvalla muovilla [4, s. 1733], lämpöaktivoituvalla resiinillä [23, s. 13], liimalla tai hitsillä [24, s. 3244], jonka jälkeen tulostusalustaa lasketaan kerrospaksuuden, eli rullalla olevan materiaalin paksuuden verran,

ja prosessi toistetaan [23, s. 13], [24, s. 3244]. Näitä kerroksia kasataan päällekkäin, kunnes tulostusalustalle on muodostettu haluttu 3D-kappale [4, s. 1733], [23, s. 13].



Kuva 7. *Laminointimenetelmän toimintaperiaate [24, s. 3244].*

LOM:illa voidaan valmistaa kappaleita erilaisista keraameista [4, s. 1733], paperista, muovista ja metalleista [24, s. 3244]. CAM-LEM:illä voidaan käyttää apuna tulostamisessa myös tukimateriaaleja. Nämä tukimateriaalit tulee poistaa kappaleesta mekaanisella tai kemiallisella jälkikäsittelyllä. Molempien menetelmien pääasiallinen käyttösovellus on erilaisten mikronestejärjestelmien valmistaminen, mutta CAM-LEM:illä voidaan lisäksi valmistaa erilaisia mikrosensoreita, -reaktoreita, -lämmönvaihtimia ja -polttokennoja. [4, s. 1733]

Laminointimenetelmillä saavutettava resoluutio on huono, noin 50 *µm,* joten menetelmää ei juurikaan käytetä mikrotason 3D-tulostamiseen. CAM-LEM:in ongelma on myös kappaleiden suuri (12–18 %) kutistuminen jälkikäsittelyssä. [4, s. 1733, 1738] Ongelmia aiheuttavat lisäksi käytetyiltä materiaaleita vaaditut erikoispiirteet: tulostusmateriaalien ominaisuuksien täytyy mahdollistaa sen säilyttäminen ja purkaminen rullilta, sekä kerrosten kiinnittyminen toisiinsa esimerkiksi liimaamalla [24, s. 3244]. Tyypillinen kerrospaksuus on 150–600 *µm*, minimissään noin 30 *µm* [4, s. 1733], eli muihin mikrotason 3D-tulostusmenetelmiin verrattuna suuri.

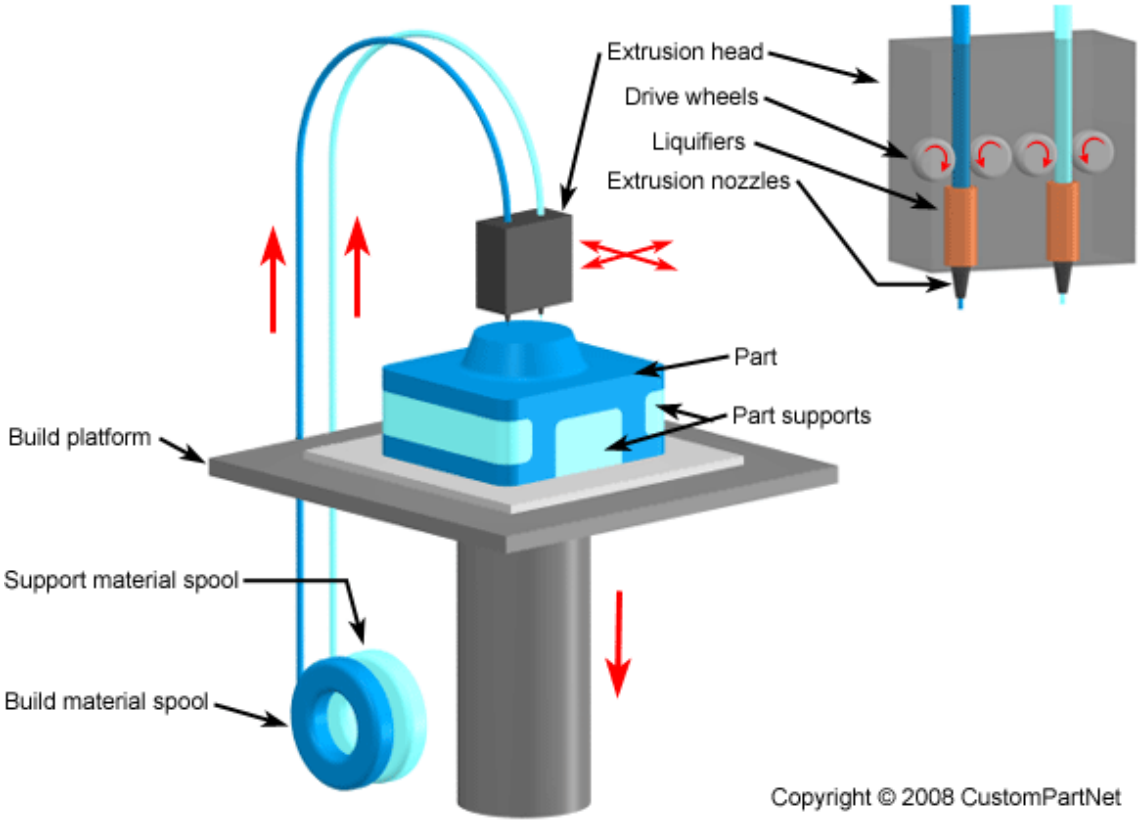
Laminoinnissa käytetään kerrospalojen leikkaamiseen usein hiilidioksidilaseria [23, s. 13], [24, s. 3244]. On huomattava, että menetelmä vaatii materiaalin esilämmityksen ennen leikkaamista, jos kerrokset aiotaan kiinnittää toisiinsa liimaamalla. Esilämmityksen

lämpötilan tulee tarkasti säädetty: liian kylmä lämmitys johtaa kerrosten huonoon kiinnittymiseen, liian kuuma taas voi johtaa rakennevaurioihin materiaalin tai liiman sulaessa. [24, s. 3244] Muita prosessiin vaikuttavia parametrejä ovat rullat, joihin materiaali on varastoituna ja käytetty laser [23, s. 13].

Pursotus

Vaikka *pursotus* (engl. fused deposition modelling, FDM) käsitellään tässä tutkielmassa yhtenä menetelmänä, pitää käsite *pursotusmenetelmät* sisällään hyvin moninaisen joukon samankaltaisia menetelmiä. Nämä menetelmät voidaan jakaa kahteen ryhmään, joiden ero on samanlainen kuin jauhepetimenetelmilläkin: materiaalia sulattaviin ja materiaalia sulattamattomiin menetelmiin [4, s. 1731].

Verrattuna moneen muuhun mikrotason 3D-tulostusmenetelmään, on pursotus varsin yksinkertainen toimintaperiaatteeltaan. Siinä rullalla olevaa kiinteää tulostusmateriaalia, filamenttia, syötetään rullien avulla mikrokokoisen ja useimmiten lämmitetyn suuttimen läpi tulostusalustalle [1, s. 89], [12], [14, s. 3], [24, s. 3243]. Syöttömekanismin rullien avulla filamenttia voidaan syöttää ja vetää hyvin tarkalla nopeudella ja voimalla [1, s. 89]. Pursotussuutinta lämmitetään niin, että filamentti pysyy juuri ja juuri sulamislämpötilan yläpuolella [1, s. 89], [24 s. 3243], jolloin se on pehmeää ja tahnamaista. Näin tulostetut kerrokset tarttuvat toisiinsa ja tulostusalustaan, jota lasketaan alaspäin aina kerroksen valmistuttua [1, s. 89–90], [12], [24, s. 3243]. Tulostusalustalla materiaali jäähtyy ja kovettuu [14, s. 3], [24, s. 3243]. Prosessia jatketaan, kunnes tulostettava kappale on valmis. Pursotusmenetelmän laitteiston toimintaperiaate on esitetty kuvassa 8, jossa on käytössä myös toinen suutin tukimateriaalin pursotusta varten.



Kuva 8. *Pursotusmenetelmän toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [25].*

Vaikka FDM-menetelmä on muihin mikrotason 3D-tulostusmenetelmiin verrattuna yksinkertainen prosessi, vaikuttaa sillä saatavaan lopputulokseen useita parametrejä. Tulosteen makrorakenteeseen vaikuttavat esimerkiksi kerrospaksuus, tulostusorientaatio sekä täytön tiheys. Näiden parametrien vaikutuksen arviointi esimerkiksi kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin on kuitenkin vaikeaa, mikä voi johtaa kappaleelle epätoivottuihin anisotrooppisiin ominaisuuksiin tai haurauteen. [1, s. 90]

FDM-menetelmällä luodut kappaleet muistuttavat LOM/CAM-LEM-menetelmien tuotoksia rakenteeltaan: molemmissa on ongelmana huomattava kerroksellisuus. Pursottamalla saadaan aikaan kuitenkin komposiittimainen rakenne, jolloin kerrosten syysuunta on vuorotteleva. Kerrokset myös muodostuvat pursotetuista ”kuiduista”, joiden välissä voi olla ilmaa. Nämä ”kuidut” kiinnittyvät toisiinsa eräänlaisella lämmöstä johtuvalla diffuusiohitsauksella. [1, s. 90]

Pursotusmenetelmällä saavutetaan vain noin 200–300 *μm* resoluutio [4, s. 1738], [14, s. 3] mikä on sen suurin este mikrotason 3D-tulostamiseen [1, s. 90], [14, s. 2]. Lisäksi prosessi vaatii materiaalin sulattamiseksi yleensä korkean lämpötilan ja on heikosti toistettavissa [4, s. 1738]. Menetelmän etuja ovat helppo täytön tiheyden ja siten huokoisuuden muunneltavuus [1, s. 90], prosessin yksinkertaisuus [4, s. 1738], [14, s. 2] ja mah-

dollisuus *monimateriaalitulostukseen* (engl. multimaterial printing) eli mahdollisuus tulostaa samaan kappaleeseen useilla eri materiaaleilla [4, s. 1738], [14, s. 2], [24, s. 3244]. Lisäksi tulosteesta saadaan oikeasti huokoinen, koska sen sisälle ei jää materiaalia esimerkiksi jauhepedistä tai tulostusaltaasta. FDM-menetelmä on myös muihin menetelmiin verrattuna hyvin halpa sen verrattain yksinkertaisen toimintaperiaatteensa vuoksi [12], [14, s. 2].

FDM-menetelmällä on potentiaalia kudosteknologiassa etenkin luuproteesien tai -siirrännäisten tulostamisessa [1, s. 91], [4, s. 1731]. Pursotuksella saadaankin kontrolloitua hyvin tarkasti kappaleen huokoisuutta, huokoisten jakautumista ja morfologiaa. Menetelmällä voidaan tehdä myös lääkeaineiden mikroannostelijoita tai erilaisia sähkökomponentteja. [1, s. 91–92]

Pursotuksen käyttö mikrotason sovelluksiin on kuitenkin vähäistä juuri sen epätarkkuuden vuoksi. Tulostemateriaalin tilavuusvirran tulisi olla joitain nanolitroja sekunnissa ja filamentin paksuus välillä 20–30 *µm*. Tähän vaaditaan äärimmäisen tarkka suuttimen lämpötilakontrolli sekä sulan materiaalin hallintasysteemi. [4, s. 1731] Muita pursotusprosessiin vaikuttavia parametrejä ovat suuttimen läpimitta, syöttöpaine, materiaalin ominaisuudet, lämpötilan muutokset kappaleessa [4, s. 1743] ja tulostusnopeus [23, s. 202]. Näiden ongelmien voittamiseksi on kehitetty lukuisia jatkokehityksiä FDM-menetelmään perustuen, mutta yksikään niistä ei ole muuttanut tilannetta huomattavasti [4, s. 1731–1732].

Pursotusmenetelmällä yleisimmin käytettyjä materiaaleja ovat erilaiset kestomuovit [4, s. 1738], [14, s. 3], [24, s. 3243] ja polymeerit, mutta sillä voidaan lisäksi tulostaa kappaleita keraameista, biomateriaaleista [1, s. 93], [24, s. 3244] tai metalleista, jolloin mukana on myös seosainetta [24, s. 3244]. Sopivien materiaalien puute vaikeuttaa kuitenkin entisestään pursotuksen hyödyntämistä mikrotason 3D-tulostamiseen [4, s. 1743].

3. MATERIAALIT JA KÄYTTÖKOHTEET

Moni mikrotason 3D-tulostusmenetelmistä on hyvin monipuolinen materiaalivalikoimaltaan, kuten tutkielmassa tullaan havaitsemaan. Yleisimpiä käytettyjä materiaaleja ovat erilaiset metallit, kuten titaani tai erilaiset teräkset, jotka useimmiten tuodaan prosessiin resiininä tai jauhemuodossa. Myös keraamit, komposiitit ja muovit kuten mono- tai polymeerit ovat hyvin käytettyjä, ja jotkut materiaaleista ovat lisäksi bioyhteensopivia.

Menetelmien käyttökohteet ovat hyvin laajat: monilla niistä on tuotantopotentiaalia esimerkiksi sähkö-, kemian- tai ilmailuteollisuuden aloilla, joiden käyttöön voidaan tulostaa erilaisia mikrokomponentteja, -nestejärjestelmiä, tai -optiikkaa. Osaa menetelmistä voidaan hyödyntää tutkimuskäyttöön bio- ja hammaslääketieteessä.

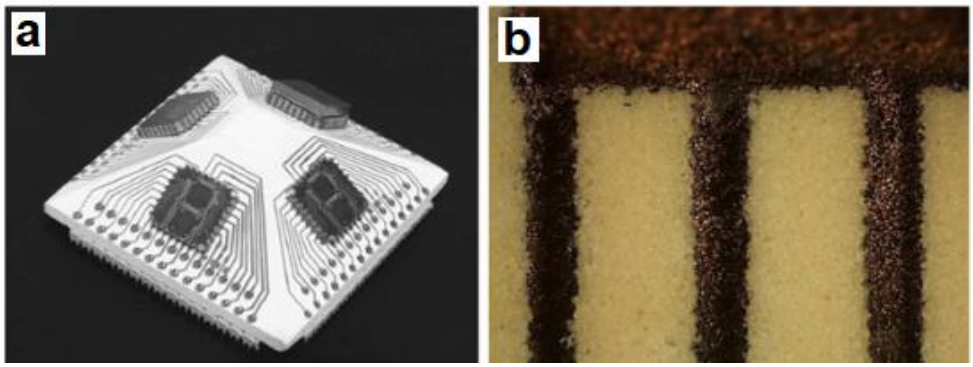
3.1 Mustesuihkutus

IJP-menetelmällä toimivat tulostimet käyttävät tulostusmateriaaleina metallipohjaisia musteita ja erilaisia polymeerejä [4, s. 1730], esimerkiksi optisia polymeerejä, kestomuoveja, valoa säteileviä polymeerejä ja biologisesti aktiivisia fluideja [1, s. 87]. Suihkutettava muste voi lisäksi sisältää esimerkiksi (sähköä) eristäviä polymeerejä, sekä puolijohdepartikkeleita [5, s. 550]. Muste voi koostua myös metallipohjaisista nanopartikkeleista, esimerkiksi kupari-, hopea- tai kulta-atomeista [5, s. 551]. Näitä voidaan käyttää esimerkiksi juotteina, orgaanisina transistoreina [1, s. 87], tai (orgaanisina) sähkönjohteina [5, s. 550].

Musteita valittaessa tulee kiinnittää huomiota yhteensopivuuteen sekä musteen ja tulostusalustan, että musteen ja tulostuspään välillä. Erään tutkimuksen mukaan musteella on lisäksi kolme kriittistä ominaisuutta, jotka tulee ottaa huomioon tulostettaessa: viskoosi, pintajännitys sekä mustepartikkeleiden koko [5, s. 551]. Toisen tutkimuksen mukaan tärkeimmät seikat mustesuihkutustulostuksessa ovat suihkutustaajuus sekä tulostuspohjan lämpötila [4, s. 1731].

Metallipohjaisten musteiden partikkelikoon pienentyessä musteen sulamislämpötila pienenee: esimerkiksi hopea-atomeita sisältävän musteen sulamislämpötila voi vaihdella 120–220 °C välillä [5, s. 551], kun taas puhtaan hopean sulamispiste on 962 °C [26]. DoD-tulostimia käytettäessä metallipohjaisia musteita tulee ottaa huomioon myös se, että parhaan tulostustuloksen aikaansaamiseksi tulostusympäristön tulisi olla vähähappinen metallimusteen oksidoitumisen välttämiseksi [4, s. 1731].

IJP-tulostimien monet käyttökohteet ovat vasta prototyyppivaiheessa. Suurin käyttöpotentiaali on tällä hetkellä lääketieteen alalla, jossa mahdollisia sovelluksia ovat esimerkiksi asiakkaalle mitoitettavat kuulokojeet, hammasproteesit ja erilaiset tähystyksissä käytettävät joustavat instrumentit. [1, s. 88] IJP-menetelmän käyttökohteita voivat olla myös erilaisten joustavien virtapiirien valmistaminen, jolloin samassa prosessin vaiheessa voidaan tulostaa sekä johtimet, että vastukset. Lisäksi mikrokoon antennien, passiivikomponenttien ja diodien valmistus on hyödyllistä toteuttaa mustesuihkutusmenetelmällä. [5, s. 551–552] Tästä on esimerkki kuvassa 9, missä inertiamittayksikön (kuva 9 a) keraaminen pohja on tulostettu BJ-menetelmällä ja mikropiirien johtimet IJP-menetelmällä hopeamusteella. Kuvassa 9 b esitetyn johtimen paksuus on noin 300 *µm* [4, s. 1743].



Kuva 9. *Mustesuihkutus- ja sideaineen suihkutusmenetelmillä valmistettu mikrokomponentti [4, s. 1743], alkuperäinen lähde ei saatavilla.*

3.2 Sideaineen suihkutus

Sideaineen suihkutusmenetelmällä toimivat tulostimet voivat käyttää lukuisia eri materiaaleja. Näillä menetelmillä on onnistuneesti tulostettu kappaleita keraameista, metalleista, muistimetalleista (engl. shape-memory alloy) sekä erilaisista polymeereistä [4, s. 1727]. Kehitteillä on myös tulosteiden tekeminen kullasta, hopeasta tai titaanista [1, s. 83].

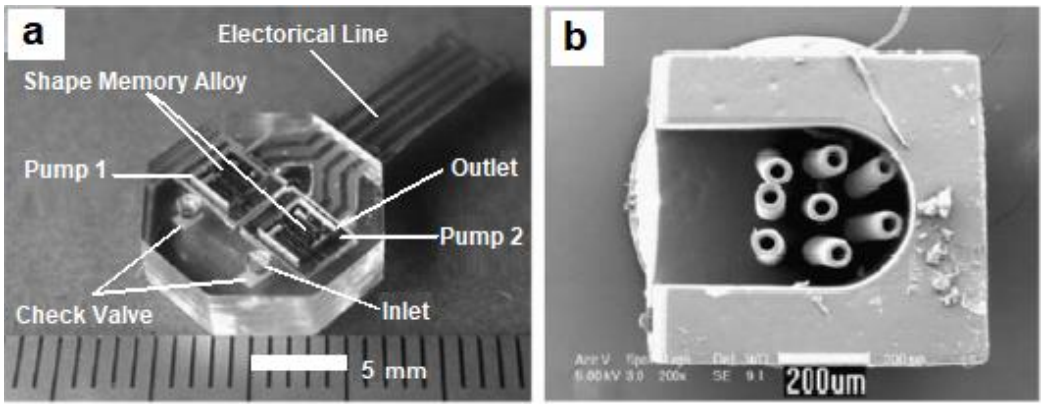
Tällä menetelmällä on suuri potentiaali lentokone- ja avaruustekniikan aloilla, koska sillä saadaan tuotettua kestäviä mutta huokoisia ja täten kevyitä mikrokomponentteja. Menetelmällä voidaan myös luoda kappaleisiin onkaloita tai onttoja kohtia, jolloin sillä voidaan tehdä esimerkiksi mikroturbiineita tai -koteloita. Potentiaalia on myös bio- ja hammaslääketieteen aloilla. [1, s. 84] Menetelmää voidaan käyttää yhdessä muiden menetelmien kanssa, kuten nähdään kuvassa 9. Tutkimuksen mukaan BJ-menetelmällä voidaan lisäksi tuottaa mikrokeraamisia muotteja mikrokomponenttien valmistamiseen nopeammin ja kustannustehokkaammin kuin perinteisiä menetelmiä käyttäen [4, s. 1728]. Erään tutkimuksen mukaan BJ-menetelmän resoluution parantaminen on kuitenkin vaikeaa,

sillä sidostettavan jauheen raekoon pienentyessä sen käsittely vaikeutuu huomattavasti [4, s. 1743]. Tämä vaikeuttaa esimerkiksi uuden jauhekerroksen tarkkaa levitystä tulostusalustalle.

3.3 Mikrostereolitografia

MSL:ssa käytetään materiaaleina pääosin erilaisia *UV-valoaktivoituvia valokäynnisteitä* (engl. UV-curable photoinitator) sisältäviä muoveja, esimerkiksi monomeerejä, polymeerejä [1, s. 73], [4, s. 1723, 1739] tai akryylejä. Menetelmällä voidaan tulostaa myös bioyhteensopivia materiaaleja [5, s. 556], keraameja tai metalleja, mutta tällöinkin mukana tulee olla UV-valoaktivoituva polymeerisuspensiopohja, joka toimii sideaineena. Lisäksi materiaalina voidaan käyttää joko synteettisistä tai luonnollisista polymeereistä koostuvaa hydrogeeliä [4, s. 1739].

MSL:aa voidaan käyttää niin biolääketieteen kuin teollisuuden tarpeisiin. Menetelmä soveltuu hyvin esimerkiksi erilaisten mikrokoneiden ja -nestejärjestelmien sekä nestekiteiden [1, s. 74], [4, s. 1723], mikro-optiikan [10, s. 242] tai -kanavien valmistamiseen. Lisäksi mikrostereolitografialla voidaan valmistaa niin aktiivi- kuin passiivikomponentteja teollisuuden käyttöön [4, s. 1740]. Kuvassa 10 a on esitetty lähes kokonaan MSL-menetelmällä valmistettu mikropumppusiru. Lääketieteen käyttötarkoituksiin menetelmällä voidaan tuottaa erilaisia mikroantureita ja -sensoreita tai kuulokojeiden osia [4, s. 1740] tai biohajoavia lääkeaineenannostelusysteemejä [4, s. 1725], kuvassa 10 b esimerkkinä hiivaa viljelevä bioreaktori [27, s. 1312].



Kuva 10. *Esimerkkejä MSL-menetelmän käyttökohteista a) perustuu lähteeseen [4, s. 1740, katso 27], b) perustuu lähteeseen [28].*

3.4 Kaksifotonipolymerisaatio

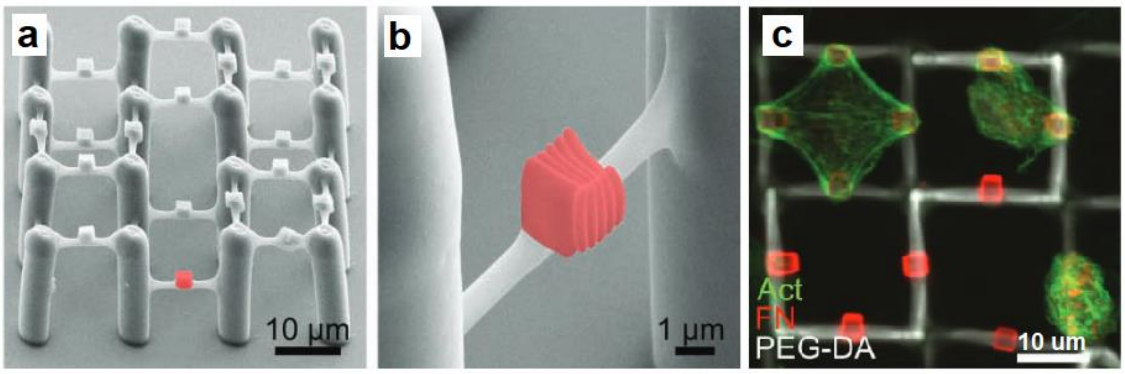
Tällä hetkellä käytössä olevia materiaaleja ovat erilaiset mono- ja polymeerit [1, s. 74], [11, s. 16], oligomeerit, keraamit [11, s. 13, 16] metallisekoitteet, bio- ja nanomateriaalit

[1, s. 74], hydrogeelit [5, s. 557], sekä erilaiset hybridimateriaalit [1, s. 74], [5, s. 557], esimerkiksi polymeeri-selluloosa-seos [16, s. 9]. Käytettävistä materiaaleista suurin osa on kuitenkin akrylaattipohjaisia [11, s. 16], [17, s. 165], muun muassa niiden suuren reaktiivisuuden, saavutettavien ominaisuuksien helpon kustomoitavuuden [16, s. 2], sekä halvan hinnan vuoksi [11, s. 16]. Myös epoksipohjaisia resiinejä käytetään laajasti [17, s. 165].

2PP-menetelmän materiaalien valinnassa tulee kiinnittää erityistä huomiota muutamaan seikkaan. Koska FSP-laserin aallonpituus on lähellä infrapunavalon aluetta, tulee käytettävien materiaalien olla läpinäkyviä sekä näkyvän valon, että infrapunavalon alueella. Niiden tulisi lisäksi olla nopeita kovettumaan, jotta FSP-laserin vaikutusaika voitaisiin pitää lyhyenä, jolloin polymerisaatio tapahtuu vain halutussa pisteessä. [1, s. 74] Lisäksi käytettäessä polymeeripohjaista hartsia biolääketieteen sovelluksiin tulee varmistua sen bioyhteensopivuudesta [16, s. 2].

Teollisuudessa 2PP-menetelmää voidaan hyödyntää mikroroottoreiden, -oskillaattoreiden, optisten tallennusyksiköiden, fotonikiteiden [1, s. 71], [4, s. 1726], [5, s. 557] ja mikrosuodattimien valmistukseen [11, s. 19], [19, s. 98]. Menetelmää voidaan hyödyntää myös samoihin kohteisiin kuin MSL-menetelmääkin: sillä voidaan valmistaa esimerkiksi mikrosensoreita, erilaisia mikronestejärjestelmiä, [1, s. 74], [13, s. 2] nestekiteitä [1, s. 74] tai tarkkoja mikrovalumalleja perinteisille valmistusmenetelmille [5, s. 557]. Lisäksi mikroelektroniikan komponenttien, aaltoputkien ja diffraktoivan tai taittavan mikro-optiikan valmistaminen on mahdollista 2PP-menetelmää hyödyntäen [4, s. 1740].

Biolääketieteessä 2PP-menetelmällä on suuri potentiaali. Sillä voidaan valmistaa erilaisia biomekaanisia komponentteja [11, s. 18], [13, s. 8], [17, s. 164], kuten lääkeannosteluun käytettäviä mikroneuloja [11, s. 18–19], [16, s. 2], korvaluuproteeseja [11, s. 18] tai luoda pintoja, joilta bakteerit eivät pääse leviämään tai jopa tutkia ja vaikuttaa solutasolla [17, s. 170]. Vuonna 2011 tutkija Bastmeyerin ryhmä valmisti 3D-tukirakenteita yksittäisiä soluja varten: tukirakenteeseen tehtiin pieniä ”kahvoja”, joihin yksittäiset solut kiinnittyivät. Tämä rakenne on nähtävissä kokonaisuudessaan kuvassa 11 a. Rakenteiden pienimmät osat olivat noin yhden mikrometrin kokoisia (kuva 11 b) kahvoja, joihin solut kiinnittyivät (kuva 11 c). [4, s. 1740–1741] Menetelmällä on lisäksi luotu mikrosuodattimia, joilla voidaan erotella veriplasma ja punasolut toisistaan [11, s. 19].



Kuva 11. *2PP-menetelmällä tulostettuja solujen tukirakenteita, perustuu lähteeseen [4, s. 1741, katso 29].*

3.5 Jauhepetimenetelmät

Kuten todettu luvussa 2.5, SLM-menetelmällä pystytään tulostamaan kappaleita ainoastaan erilaisista metallijauheista ja metallijauheseoksista. Käytettyjä materiaaleja ovat kulta, pronssi, molybdeeni [1, s. 78], erilaiset ruostumattomat teräkset, titaani, koboltti, kromi, hopea, kupari, volframi [1, s. 78], [4, s. 1727, 1743], alumiini ja työkaluteräs [4, s. 1727]. SLS-menetelmällä voidaan lisäksi tulostaa kappaleita erilaisista komposiiteista [1, s. 78], [4, s. 1743] keraameista [1, s. 78], [4, s. 1726], [5, s. 555] tai polymeereistä. Useimmiten sitä käytetään kuitenkin metallisten mikrotulosteiden valmistukseen esimerkiksi ruostumattomasta teräksestä tai titaanista. [5, s. 555] Jauhepetimenetelmillä voidaan lisäksi tulostaa erilaisia mikrometallikappaleita, kuten kustomoituja kruunuja hammaslääketieteeseen tai mikrokomponentteja teollisuuteen [1, s. 80].

4. ONGELMAT, KEHITYSKOHTEET JA VAHVUUDET

Kaikkiin mikrotason 3D-tulostusmenetelmiin liittyy myös ongelmia ja kehityskohtia. Jotkut näistä tiettyjen menetelmien ongelmista esiintyvät samanlaisina niin makro- kuin mikrotasoilla, toiset aiheutuvat vain mikrotason poikkeuksellisten tarkkuusvaatimusten takia. Myös monet menetelmien vahvuuksista ovat samanlaisia makro- ja mikrotasoilla.

Tyypillinen ongelma 3D-tulostamisessa koosta riippumatta on tulostettujen kappaleiden kerroksisuus, mikä voi johtaa reunoilla porrasmaisiin muotoihin ja kappaleen sisällä kerrosten vääristymään. Kerroksisuus johtaa lisäksi anisotrooppisiin mekaanisiin ominaisuuksiin, mikä tosin on useimmiten häviävän pieni ilmiö. [4, s. 1739]

Yhteisiä kehityskohteita esitellyissä menetelmissä ovat esimerkiksi yhä paremman resoluution aikaansaaminen ja jälkikäsittelyn haasteet. Kehitettävää on myös prosessien optimoinnin ymmärtämisessä, koska monilla prosessin parametreista on hyvin monimutkainen vaikutus lopputulokseen. 3D-tulostettuja mikrokappaleita tulisi lisäksi olla helppo ja nopea tuottaa, viimeistellä ja jälkikäsitellä, jotta menetelmiä voitaisiin käyttää kustannustehokkaasti teollisuudessa. [4, s. 1739]

Yleisesti voidaan todeta, että mikrotason 3D-tulostusmenetelmät avaavat suuria mahdollisuuksia niin kappaleiden suunnittelijoille kuin ominaisuuksillekin. Ennen suunnittelussa täytyi ottaa huomioon esimerkiksi materiaalia poistavien menetelmien akseleiden ja työkalujen rajoitukset kappaleen tuotannossa [4, s. 1739], kuten lastun paksuus tai terän säde [1, s. 108]. 3D-tulostuksessa kappaleen ulkoinen ja sisäinen geometria voidaan tehdä huomattavasti monimutkaisemmaksi.

4.1 Mustesuihkutus

IJP-tulostimien käyttöön liittyy ongelmia etenkin tukirakenteiden suhteen. Erään tutkimuksen mukaan ongelmana on tarve käyttää tukirakenteita [4, s. 1738], toisen tutkimuksen mukaan suurin ongelma on näiden tukirakenteiden vaikea poistaminen monimutkaisista kappaleista [1, s. 87]. Lisäksi tulostusprosessin herkkyys vaikeuttaa mustesuihkutusmenetelmien käyttöä. IJP-menetelmän hyviä puolia ovat käytettävien materiaalien monipuolisuus, monimateriaalitulostus, musteiden helppo käsiteltävyys sekä prosessin toistettavuus. [4, s. 1738]

Tulevaisuudessa IJP-tulostimien tarkkuuden parantaminen on tärkeää, jotta menetelmää voitaisiin hyödyntää nykyistä laajemmin sovelluksiin [1, s. 87]. Myös tulostusprosessin optimointi olisi tärkeää, mikä voitaisiin toteuttaa tutkimalla ja mallintamalla suihkutetun pisaran muotoutumista ja osumista tulostusalustaan sekä kappaleen kuivumisprosessia. Parempi ymmärrys ei-newtonilaisista fluideista auttaisi parantamaan mustesuihkutustulostimien toimintaa ja laajentaisi käytettävien materiaalien listaa. Lisäksi metalli- tai keraamipohjaisten musteiden käyttämisessä tulostus- tai tukimateriaalina on kehitettävää. [4, s. 1741–1742]

4.2 Sideaineen suihkutus

BJ-menetelmään liittyy muutamia ongelmia, esimerkiksi usein huono pinnanlaatu [4, s. 1742], mikä johtaa jälkikäsittelyn tarpeeseen [1, s. 83]. Mikrotason kappaleiden jälkikäsittely on kuitenkin haastavaa ja esimerkiksi ylimääräisen jauheen poistaminen vaikeaa [4, s. 1743]. Myös tulostetun kappaleen huokoisuus voi olla ongelma [4, s. 1742], mikä on kuitenkin ratkaistavissa esimerkiksi tulosteen infiltroinnilla.

Koska BJ-menetelmä on huomattavasti nopeampi prosessi kuin moni muu mikrotason 3D-tulostusmenetelmistä, voidaan sitä käyttää jopa sarjatuotantoon [4, s. 1728]. Muita BJ-menetelmän hyviä puolia ovat monimateriaalitulostus ja prosessin vaatima vähäinen lämpötila [4, s. 1738]. Koska prosessi tapahtuu huoneenlämpötilassa, ei tulosteen lämpösupistumista tarvitse huomioida [1, s. 83]. Prosessi ei myöskään tarvitse tulosteisiin tukirakenteita, sillä tulostusalustana toimiva jauhepeti tukee tulostetta [4, s. 1742].

4.3 Mikrostereolitografia

MSL:n ongelmia ovat soveltuvien materiaalien vähyys, sekä menetelmän kalliit kustannukset muihin mikrotason 3D-tulostusmenetelmiin verrattuna. [4, s. 1740] Menetelmällä ei myöskään voida tulostaa epätasaiselle pinnalle, mikä rajoittaa käyttökohteita [10, s. 242].

DLP-menetelmällä on muutamia vahvuuksia perinteiseen MSL:ään verrattuna, suurimpana huomattavasti nopeampi [12], [14, s. 4] ja tehokkaampi tulostusprosessi [12]. DLP:ssä ei myöskään tarvita laseria resiinin kovetukseen, mikä laskee prosessin vaatimaa lämpötilaa ja energiankulutusta, ja sen myötä käyttökustannuksia. DLP-menetelmällä on lisäksi mahdollista tuottaa pienempiä ja tarkempia kappaleita kuin MSL-menetelmällä. [14, s. 4]

Tulevaisuuden kannalta olisi tärkeää kehittää stereolitografiaan materiaaleja, joilla saavutettaisiin esimerkiksi mekaanisia tai optisia säätömahdollisuuksia, vedenkestävyyttä

tai bioyhteensopivuutta. Myös puolijohdekomponenttien käyttö materiaalina olisi erittäin hyödyllistä. [4, s. 1740] Yhteensopivien materiaalien puutetta voidaan kuitenkin paikata käyttämällä MSL:aa yhdessä muiden mikrotason 3D-tulostusmenetelmien kanssa [4, s. 1740], [10, s. 242].

4.4 Kaksifotonipolymerisaatio

2PP-menetelmään liittyy useita ongelmia, jotka haittaavat menetelmän käyttöä. Ensimmäinen ongelma on rajoittunut tulostusalueen koko, joka on vain muutamia kuutiomillimetrejä [19, s. 95]. Lisäksi 2PP-menetelmällä on vaikeaa tai jopa mahdotonta saavuttaa resiinin 100 % kovettuminen [16, s. 4], mikä johtaa jälkikäsittelyn tarpeeseen. Merkittävä ongelma on myös menetelmässä usein käytettävien akryylipohjaisten resiinien suuri tilavuuden muutos polymerisoituessa, mikä johtaa sisäisten jännitteiden syntymiseen sekä muodon vääristymiseen [11, s. 16]. Suurimpana ongelmana on kuitenkin, kuten MSL-menetelmässäkin, sopivien materiaalien vähyys [4, s. 1740], [6, s. 8]. 2PP-menetelmän käyttäminen on lisäksi sekä hyvin hidasta [4, s. 1740], [6, s. 8–9], [13, s. 8], [19, s. 95] että kallista, ja näistä syistä sen käyttö rajoittuu pääosin tutkimuslaboratorioihin [13, s. 8], vaikka myös kaupallistettuja laitteita on kehitetty [17, s. 165]. Ratkaisu ainakin osaan näistä ongelmista voi olla käyttää tätä menetelmää yhdessä muiden mikrotason 3D-tulostusmenetelmien kanssa [5, s. 557], [19, s. 95], jolloin 2PP-menetelmällä tulostetaan vain ehdotonta tarkkuutta vaativat pienosat.

Ongelmistaan huolimatta useiden tutkimuksien mukaan 2PP on parhaita menetelmiä mikrotason 3D-tulostamiseen sen erinomaisen tarkkuuden [4, s. 1740], [13, s. 2, 8], [17, s. 170], hyvän pinnanlaadun ja huokosettomuuden vuoksi [4, s. 1740]. 2PP-menetelmä ei myöskään vaadi resiinin uudelleenlevitystä [4, s. 1725], toisin kuin MSL-menetelmä.

4.5 Jauhepetimenetelmät

Jauhepetimenetelmien ongelmia ovat ei-metallisten materiaalien käytön vaikeudet ja sopivien materiaalien vähyys, jauheen käsittelyn vaikeudet, jälkikäsittelyn tarve sekä prosessin vaatima korkea lämpötila [4, s. 1727, 1738, 1743], joka voi olla jopa yli 800 °C [30, s. 12064]. Pienipartikkelisten jauheiden käsittely ja levittäminen jauhepedille on lisäksi haastavaa [4, s. 1726].

Metallijauheista tulostettaessa tarvitaan lisäksi usein suuria tukirakenteita sisäisistä jännityksistä syntyvien geometristen vääristymien välttämiseksi sekä prosessissa syntyvän lämmön poistamiseksi. Nämä tukirakenteet tulee poistaa jälkikäsittelyssä tulostusprosessin jälkeen, tosin niiden tarvetta voidaan vähentää huolellisella suunnittelulla ja kiinnittämällä huomiota kappaleen orientaatioon tulostettaessa. [1, s. 76] Toisaalta toisen tutkimuksen mukaan jauhepetimenetelmien vahvuutena on juuri tukirakenteiden tarpeettomuus [4, s. 1738], joten tukirakenteiden vaikutus riippuu selvästi tulostettavasta kappaleesta ja sen materiaalista. Osalla jauhepetimenetelmällä toimivista laitteista on mahdollista käyttää myös monimateriaalitulostusta [1, s. 79], [4, s. 1738].

5. KAUPALLISIA LAITTEISTOJA

Kuten tutkielmassa on tuotu jo esiin, monet mikrotason 3D-tulostamiseen tarkoitetuista laitteista ovat vielä prototyyppi- tai laboratoriokäytössä. Kuitenkin myös kaupalliseen käyttöön tarkoitettuja laitteita on markkinoilla ja näitä on esitelty taulukossa 1. Taulukkoon on valittu eri menetelmillä toimivien laitteiden parhaimmistoa, pääpainona paras saavutettava resoluutio. Taulukkoon ei lisätty tietoja laitteiden painoista tai ulkoisista mitoista taulukon selvyyden ja tiedon irrelevanttisuuden vuoksi, mutta yleisesti todettakoon, että kaikki laitteet painavat yli 500 *kg* ja ovat ulkomitoiltaan 1–3 *m* välillä. Aivan pienistä koneista ei siis ole kyse.

Taulukko 1. *Mikrotason 3D-tulostamiseen käytettäviä laitteita (* hinta varmistettiin sähköpostitse, ei saatavilla lähteissä)*

Valmistaja	Desktop Metal	Boston Micro Fabrication	Nano-Dimension	Micro-light3D	3DMicroPrint
Valmistajan kotimaa	Yhdysvallat	Yhdysvallat	Israel	Ranska	Saksa
Tuotenimi	X25Pro	microArch™ S230	Fabrica 2.0	microFAB-3D.standard	DMP70-sarja
Toimintamenetelmä	Sideaineen suihkutus	Heijastus-mikrostereolitografia	Digitaalivaloprosessointi	Kaksifotonipolymerisaatio	Valikoiva lasersintraus
Materiaalit	Metallit, keraamit, hiekka, komposiitit	Valoaktivoituva resiini, keraamit	Polymeerit, komposiitit	Polymeerit, hydrogeelit, biomateriaalit	Erilaiset teräkset
Resoluutio (µm)	>30	2	1,9	0,2–3	20–30
Kerrospaksuus (µm)	30–200	5–20	1–5	0,6–10	1–5
Piirtoalue (mm)	250 x 400 x 250	50 x 50 x 50	50 x 50 x 100	75 x 25 x 0,15	60 x 60 x 30
Maksimipiirtonopeus	1200 cm^3/h	--	50 mm^3/h	0,1–1 mm/s	--
Hinta* (k€)	800	230	--	100–200	1 000–1700
Lähde	[31]	[32]	[33]	[34]	[20]

Taulukossa 1 esitettyjen laitteiden ominaisuudet pääosin tukevat tässä kandidaatintyössä jo käsiteltyjä tutkimustuloksia. Aluksi nostettakoon esille sideaineen suihkutusmenetelmällä toimivan, Desktop Metal:in valmistavan X25Pro:n poikkeuksellisen nopea maksimipiirtonopeus. Tämä nopeus on noin 24 000 kertaa nopeampi kuin toiseksi nopein laite, mikä on valtava ero. Kuten todettu luvussa 4.2., voidaan sideaineen suihkutusmenetelmää hyödyntää jopa sarjatuotantoon juuri sen nopeuden vuoksi. Laitteen

saavuttama resoluutio ja kerrospaksuus ovat kuitenkin huonoimmat käsitellyistä laitteista, mikä rajoittaa sen käytettävyyttä joissain mikrotason sovelluksissa.

Seuraava huomio taulukosta 1 voidaan tehdä MicroLight3D:n valmistaman microFAB-3D.standard-laitteen kohdalta, joka toimii 2PP-menetelmällä. Laite saavuttaa parhaimmillaan 0,2 *µm*:n resoluution, mikä on noin 10-kertaa parempi kuin seuraavaksi tarkimmalla laitteella. Myös laitteen mahdollistama minimikerrospaksuus on reilusti pienempi kuin muilla laitteilla. Näiden vahvuuksien syitä on käsitelty tarkemmin luvussa 2.4. Laitteen ja yleisesti 2PP-menetelmän ongelma on kuitenkin sen erittäin hidas tulostusnopeus sekä hyvin pieni tulostusalue, kuten jo mainittu luvussa 4.4.

Taulukon 1 tuloksista voidaan myös havaita heijastusmikrostereolitografialla toimivan microArch™ S230:n ja digitaalivaloprosessoinnilla toimivan Fabrica 2.0:n lähes sama saavutettava paras resoluutio. Laitteiden toimintaperiaatteet ovatkin hyvin samankaltaiset, kuten todettu luvussa 2.3. Käsitellyistä laitteista Fabrica 2.0 saavuttaa kuitenkin microArch™ S230:a pienemmän kerrospaksuuden.

Taulukossa 1 esitettyjen laitteiden hintoja tarkasteltaessa voidaan tehdä mielenkiintoinen havainto: 2PP-menetelmällä toimiva microFAB-3D.standard on kaikista laitteista edullisin. Tämä on ristiriidassa luvussa 4.4 esitetyn väitteen kanssa siitä, että 2PP-menetelmän ongelma olisi sen korkeat käyttökustannukset. Ainakaan laitteiston hankinta ei tällaisia kustannuksia tuo. Yhtiön edustajan mukaan kyseinen laite onkin valmistettu yksinkertaiseksi ja kustannustehokkaaksi, hitaan tulostusnopeuden kustannuksella [35].

Tarkasteltaessa taulukkoa 1 tulee muistaa, että esitettyjen laitteiden ominaisuudet vahvuuksineen ja heikkouksineen ovat tai voivat olla hyvin valmistaja-, tai mallikohtaisia. Sen perusteella ei tule vetää johtopäätöksiä eri menetelmien suhteen, koska taulukkoon valitut laitteet eivät täysin edusta hyödyntämiään menetelmiä. Esimerkiksi mikään esitetyistä laitteista ei käytä kaikkia menetelmän mahdollistamia materiaaleja. Mallitapauksena tästä on 3DMicroPrint:in DMP70-sarja, joka voi tulostaa metallijauheista ainoastaan erilaisia teräksiä, vaikka SLS-menetelmällä voitaisiin tulostaa lisäksi vaikkapa metallista titaania tai keraameja.

6. YHTEENVETO

Tässä tutkielmassa esiteltiin tärkeimmät mikrotason 3D-tulostamisessa käytettävät tulostusmenetelmät, niiden käyttösovellukset ja hyödyntämät materiaalit sekä ongelmat. Tarkastellut menetelmät on koottu taulukkoon 2. Tehty listaus ei kuitenkaan ole kaiken kattava, vaan on olemassa myös muita, vähemmän käytettyjä menetelmiä. Poisjätetyt menetelmät saattavat olla joko toiminnaltaan jo vanhentuneita tai niin uusia, ettei niistä vielä löydy vertaisarvioituja tutkimustuloksia. Osasta esitellyistä menetelmistä on myös olemassa erilaisia jatkokehitteitä ja onkin haastavaa arvioida, milloin jatkokehitteen voi laskea jo omaksi menetelmäkseen. Esimerkiksi tässä tutkielmassa MSL-menetelmän yhteydessä käsitelty DLP-menetelmä poikkeaa tekniikaltaan perinteisestä pyyhkäisymikrostereolitografiasta jo huomattavasti, muttei toimintaperiaatteeltaan kovinkaan paljoa.

Taulukko 2. *Mikrotason 3D-tulostuksen yleisimpien menetelmien ominaisuuksia (resoluutio paras saavutettava)*

Menetelmä	**Toimintaperiaate**	**Käyttöalat**	**Materiaalit**	**Resoluutio (µm)**
IJP	Nesteen ruiskutus ja kovetus	Bio- ja hammaslääketiede, sähköteollisuus	Metallit, polymeerit	20
BJ	Jauheen sidostaminen	Lentokone- ja avaruustekniikka, bio- ja hammaslääketiede	Metallit, polymeerit, keraamit	20
MSL	Resiinin valokovetus yhdellä fotonilla	Koneteollisuus, sähköteollisuus, (bio)lääketiede	Metallit, muovit, biomateriaalit, keraamit, hydrogeeli	1–2
2PP	Resiinin valokovetus kahdella fotonilla	Teollisuus, sähköteollisuus, biolääketiede	Metallit, muovit, keraamit, nano-, hybridi-, biomateriaalit	0,1
SLS/*SLM*	Jauheen lasersintraus / *sulatus*	Teollisuus, hammaslääketiede	Metallit, polymeerit, keraamit, komposiitit / *Metallit*	5–20
LOM/CAMLEM	Rullasta leikkaus ja liimaus	Ei nykyisiä käyttösovelluksia	Metallit, muovit, keraamit, paperi	50
FDM	Filamentin sulatus ja pursotus	Kudosteknologia, sähköteollisuus	Muovit, biomateriaalit sekä metallit ja keraamit (seosteena)	200–300

Kuten tutkielmassa on jo useasti todettu, on moni esitellyistä mikrotason 3D-tulostusmenetelmistä vielä kehitysvaiheessa. Jotkut esitetyistä menetelmistä tai niiden jatkokehitteistä saattavat olla vahvasti vain yhden yrityksen hallussa, esimerkiksi DLP-menetelmän vaatima DMD-siru on Texas Instrumentsin kehittämä ja valmistama.

Kenties tärkein menetelmistä on tämän tutkielman kannalta 2PP, jolla savutetaan taulukon 2 mukaisesti paras resoluutio, jopa nanotasoa. Tätä menetelmää toimintaperiaatteeltaan lähellä on MSL, molemmat toimivat valokovetusperiaatteella. MSL voidaan jakaa kolmeen alamenetelmään: pyyhkäisy-, heijastus-, ja valoprosessointimenetelmään, joista pyyhkäisymenetelmä on hitautensa vuoksi vähiten potentiaalisin.

Toimintaperiaatteiltaan lähellä toisiaan ovat myös IJP- ja BJ-menetelmät. Molemmissa tulostuspää suihkuttaa materiaalia, joka IJP:ssä kovetetaan valmiiksi kappaleeksi, BJ:ssä taas sitoo tulostusalustan jauhepartikkelit yhteen. IJP-menetelmä voidaan jakaa kahteen alamenetelmään: jatkuvatoimiseen-, ja DoD-tulostamiseen. Näistä DoD on potentiaalisempi mikrotason 3D-tulostamiseen.

Jauhepetimenetelmistä on tässä tutkielmassa esitelty SLS-, ja SLM-menetelmät. Molemmat toimivat lähes identtisesti: suurimpana erona on se, yhdistetäänkö jauhepedin materiaali sintraamalla vai sulattamalla. Näitä menetelmiä käytetään pääosin metallikappaleiden valmistamiseen, mutta SLS-menetelmää voidaan taulukon 2 mukaisesti hyödyntää myös muuhun.

Tutkielmassa käsiteltiin lyhyesti myös laminointi- ja pursotusmenetelmät. Vaikka pursotusmenetelmää hyödynnetään makrotason 3D-tulostamisessa hyvin laajasti, ei sitä juuri käytetä mikrotasolla. Laminointimenetelmää ei käytetä enää laajasti edes makrotasolla, mutta se on esitelty esimerkkinä siitä, kuinka erilaisia lähestymisiä voidaan kehittää mikrotason 3D-tulostamiseen.

Materiaalivalikoima on yhteensä kaikilla 3D-tulostusmenetelmillä hyvin laaja, mutta osalla menetelmistä rajoittunut. Kaikki esitellyistä menetelmistä voivat käyttää erilaisia metalleja ja polymeerejä tulostusmateriaalina, kuten voidaan todeta taulukosta 2. Monella menetelmällä voidaan tulostaa myös keraameja tai komposiitteja, osalla myös bio- tai nanomateriaaleja. Menetelmät voidaan helposti jakaa kolmeen ryhmään niiden raakamateriaalien olomuodon mukaan: IJP-, MSL-, ja 2PP-menetelmät käyttävät nestemäisiä resiinejä, SLS/SLM käyttää materiaalijauhetta ja LOM/CAM-LEM sekä pursotusmenetelmä tarvitsevat kiinteää tulostusmateriaalia rullalta. BJ-menetelmä on jotain resiinin ja jauheen väliltä: vaikka liima suihkutetaan nestepisaroina, muodostuu kappale yhteen liimatuista jauhepartikkeleista.

Tässä tutkielmassa on monen tulostusmenetelmän kohdalla painottunut hyödyntäminen esimerkiksi sähköteollisuuden tai bio-, tai hammaslääketieteen käyttöön. Taulukkoon 2 kootut käyttöalat eivät kuitenkaan ole poissulkevia, ja mikrotason 3D-tulostusta voikin hyödyntää lähes mihin tahansa erikoistarkkuutta vaativaan työhön. Sähköteollisuus on kuitenkin erityisen merkittävä kohderyhmä, sillä 3D-tulostamalla yksittäiset komponentit saadaan sähkölaitteista todella pieniä.

Yhteinen ongelma monelle esitetylle tulostusmenetelmälle on jälkikäsittelyn tarve. Monen menetelmän kohdalla tulostusmateriaalin myös hallitseminen on haastavaa: hyvin pienipartikkelista jauhetta on vaikea levittää tasaisesti tulostusalustalle, resiinejä käytettäessä täytyy huomioida nesteen viskoosi ja pintajännitys. Useimmat menetelmät ovat myös hyvin hitaita verrattuna perinteisiin työstömenetelmiin, eivätkä siksi sovellu sarjatuotantoon, pois lukien IJP-menetelmä.

Useimmista esitellyistä mikrotason 3D-tulostusmenetelmistä on saatavilla myös kaupallisia laitteistoja. Laitteiden ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi menetelmästä ja valmistajasta riippuen. Osa on kehitetty tutkimus- tai yksittäistuotantokäyttöön, osa soveltuu jopa sarjatuotantoon. Tässä tutkielmassa esitettyjen laitteiden hinnat vaihtelevat välillä 0,1–1,7 M€, tulostusalueen koot välillä 280 mm^3 – 25 dm^3. Laitteita kuitenkin yhdistää niiden kyky tulostaa poikkeuksellisen pieniä kappaleita, joiden pienimmät piirteet voivat olla alle sadasosan ihmisen hiuksen paksuudesta.

Kootusti voidaan todeta, että 3D-tulostamisella on suuri potentiaali muuttaa ja muovata mikrotason työstämistä. 3D-tulostamisen parhaita puolia onkin sen kyky luoda kappaleita näennäisesti tyhjästä, mikä laajentaa suunnittelun vapautta. Jatkotutkimuksia kuitenkin tarvitaan monen esitellyn menetelmän kohdalla esimerkiksi paremman resoluution tai laajemman materiaalivalikoiman saavuttamiseksi. Myös uusia mikrotason 3D-tulostamismenetelmiä kehitetään jatkuvasti, joten alan kilpailukenttä voi näyttää hyvinkin erilaiselta jo muutaman vuoden päästä. Mikrotason 3D-tulostaminen on kuitenkin merkittävässä roolissa luomassa uusia mahdollisuuksia maailmaan, jossa tarvitaan yhä pienempiä komponentteja ja jopa solutason ratkaisuja.

LÄHTEET

[1] I. Fassi, D. Shipley, Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications A Theoretical and Practical Guide, Springer International Publishing, Cham, 2017, pp. 68–108.

[2] J. Milewski, Additive Manufacturing of Metals, Springer International Publishing, Cham, pp. 61–172.

[3] National Nanotechnology Initiative, Size of the Nanoscale. Saatavissa (viitattu 2.2.2023): https://www.nano.gov/nanotech-101/what/nano-size.

[4] M. Vaezi, H. Seitz, S. Yang, A review on 3D micro-additive manufacturing technologies, In The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer Nature B.V., Heidelberg, 2013, pp. 1721–1754.

[5] M. Tilli, M. Paulasto-Krockel, T. Motooka, V. Lindroos, V.-M. Airaksinen, Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies, Elsevier Science & Technology Books, Norwich, 2015, pp. 550–564.

[6] F. Matheuse, K. Vanmol, J. Van Erps, W. De Malsche, H. Ottevaere, G. Desmet, On the potential use of two-photon polymerization to 3D print chromatographic packed bed supports, Journal of Chromatography A, Vol. 1663, Jan 2022, pp. 2–9.

[7] L. Lu, Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability, Elsevier Science & Technology, United Kingdom, 2015, p. 395.

[8] CustomPartNet, Inkjet Printing. Saatavissa (viitattu 23.3.2023): http://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing.

[9] S. Manoharan et al., Manufacturing Process Design of a Micro-Scale Liquid-Liquid Extractor and Multi-phase Separator, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 56, Aug 2020, pp. 1381–1391.

[10] K. Obata, U. Klug, J. Koch, O. Suttmann, L. Overmeyer, Hybrid Micro-stereolithography by Means of Aerosol Jet Printing Technology, Journal of Laser Micro Nanoengineering, Vol. 9, No. 3, Nov 2014, pp. 242–247.

[11] M. Mahmood, A. Popescu, 3D Printing at Micro-Level: Laser-Induced Forward Transfer and Two-Photon Polymerization, Polymers, Vol. 13, No. 13, 2021, pp. 1–27.

[12] H. Kadry, S. Wadnap, C. Xu, F. Ahsan, Digital light processing (DLP) 3D-printing technology and photoreactive polymers in fabrication of modified-release tablets, European Journal of Pharmaceutical Sciences, Vol. 135, Jul 2019, p. 61.

[13] O. Ulkir, Design and fabrication of an electrothermal MEMS micro-actuator with 3D printing technology, Materials Research Express, Vol.7, No. 7, Jul 2020, pp. 2–8.

[14] J. Zhu et al., Recent advances in 3D printing for catalytic applications, Chemical Engineering Journal, Vol. 433, Apr 2022, pp. 2–4, 9.

[15] Y. Wang et al., Three-Dimensional Stretchable Microelectronics by Projection Microstereolithography (PμSL), ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 13, No. 7, Feb 2021, pp. 8901–8908.

[16] A. Groetsch et al., Microscale 3D Printing and Tuning of Cellulose Nanocrystals Reinforced Polymer Nanocomposites, Small, Vol. 19, No. 3 , 2022, pp. 2–9.

[17] A.-I. Bunea, N. del Castillo Iniesta, A. Droumpali, A. E. Wetzel, E. Engay, R. Taboryski, Micro 3D Printing by Two-Photon Polymerization: Configurations and Parameters for the Nanoscribe System, Micro, Vol.1, No. 2, Dec 2021, pp. 164–180.

[18] NFFA, Plasma etching and pyrolysis contribute to size reduction of laser polymerized 3D structures. Saatavissa (viitattu 28.4.2023): https://www.nffa.eu/news/scientific-highlights/plasma-etching-and-pyrolysis-contribute-1/.

[19] F. Perrucci, Optimization of a suspended two photon polymerized microfluidic filtration system, Microelectronic Engineering, Vol. 195, Aug 2018, pp. 95–100.

[20] 3D Micro Print, DMP70 series. Saatavissa (viitattu 10.4.2023): https://www.3dmicroprint.com/products/machines/dmp70series/.

[21] Wikimedia Commons, Selective laser melting system schematic. Saatavissa (viitattu 23.3.2023): https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Selective_laser_melting_system_schematic.jpg.

[22] N. K. Roy, D. Behera, O. G. Dibua, C. S. Foong, M. A. Cullinan, A novel microscale selective laser sintering (μ-SLS) process for the fabrication of microelectronic parts, Microsystems & Nanoengineering, Vol. 5, Dec 2019, pp. 1–14.

[23] J. Natarajan, M. Cheepu, C.-H. Yang, Advances in Additive Manufacturing Processes, Bentham Science Publishers, Singapore, 2021, pp. 12–13, 202.

[24] B. Gross, J. Erkal, S. Lockwood, C. Chen, D. Spence, Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences, Analytical Chemistry, Vol. 86, No. 7, Apr 2014, pp. 3240–3253.

[25] CustomPartNet, Fused Deposition Modelling. Saatavissa (viitattu 18.4.2023): https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling.

[26] R. Seppänen et al., MAOL taulukot, 1.–2. painos. Kustannusosakeyhtiö Otava, Helsinki, 2013, s. 72.

[27] K. Ikuta, T. Hasegawa, T. Adachi, The Optimized SMA Micro Pump Chip Applicable to Liquids and Gases, In Obermeier, E. (eds) Transducers ’01 Eurosensors XV, Springer, Berlin, 2001, p. 918.

[28] C. Xia, N. Fang, 3D microfabricated bioreactor with capillaries, Biomedical microdevices, Vol.11, Oct 2009, p. 1312.

[29] F. Klein et al., Two-Component Polymer Scaffolds for Controlled Three-Dimensional Cell Culture, Advanced Materials, Vol. 23, No. 11, 2011, p. 1342, 1344.

[30] D. Parekh et. al., Liquid–Solid Mixtures of Ga Metal Infused with Cu Microparticles and Nanoparticles for Microscale and Nanoscale Patterning of Solid Metals at Room Temperature, ACS Applied Nano Materials, Vol. 3, No. 12, Dec 2020, pp. 12064–12070.

[31] Desktop Metal, X25Pro. Saatavissa (viitattu 10.4.2023): https://www.desktopmetal.com/products/xseries.

[32] Boston Micro Fabrication, microArch® S230. Saatavissa (viitattu 10.4.2023): https://bmf3d.com/2%ce%bcm-series-3d-printers/.

[33] Nano Dimension, Fabrica 2.0. Saatavissa (viitattu 10.4.2023): https://www.nanodi.com/product-overview/micro-am-fabrica.

[34] Microlight 3D, Microfab-3D. Saatavissa (viitattu 10.4.2023): https://www.microlight3d.com/our-products/microfab-3d.

[35] Henkilökohtainen sähköpostikeskustelu Micro-light3D:n edustajan kanssa, 13.4.2023.