



SAVONIA



■ TEKNIIKAN ALA

3D-TULOSTUKSEN TERVEYDELLE HAITALLISET ALTISTEET JA TYÖHYGIENIA

KIRJOITANUT: Antti Väisänen

3D-TULOSTUKSEN TERVEYDELLE HAITALLISET ALTISTEET JA TYÖHYGIENIA

Antti Väisänen

Savonia-ammattikorkeakoulu
PL 6
70201 KUOPIO
julkaisut@savonia.fi

Copyright © 2017 tekijät ja Savonia-ammattikorkeakoulu Oy

1. painos

Tämän teoksen kopioiminen on tekijänoikeuslain (404/61) ja tekijänoikeusasetuksen (574/95) mukaisesti kielletty lukuun ottamatta Suomen valtion ja Kopiosto ry:n tekemässä sopimuksessa tarkemmin määritellyä osittaista kopiointia opetustarkoituksiin. Teoksen muunlainen kopiointi tai tallentaminen digitaaliseen muotoon on ehdottomasti kielletty. Teoksen tai sen osan digitaalinen kopioiminen tai muuntelu on ehdottomasti kielletty.

ISBN 978-952-203-247-8 (nid.)

ISBN 978-952-203-248-5 (PDF)

ISSN 2343-5496

Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja 8/2017

Kustantaja: Savonia-ammattikorkeakoulu

Taitto: Tapio Aalto

Kansikuva: Antti Väisänen

SISÄLLYS

1. 3D-tulostus ja työympäristön turvallisuus	5
2. 3D-tulostamisen päästöt	6
3. Materiaalilla on merkitystä päästöjen kannalta	11
4. 3D-tulostaminen: materiaalin pursotusmenetelmä	13
4.1. Laitteistot	13
4.2. Materiaalit	13
4.3. Välttämättömät jälkikäsittelytoimenpiteet	14
4.4. Menetelmän päästöt ja terveysvaikutukset	14
5. 3D-tulostaminen: Nesteen fotopolymerisaatiomenetelmä	16
5.1. Laitteistot	16
5.2. Materiaalit	16
5.3. Välttämättömät jälkikäsittelytoimenpiteet	17
5.4. Menetelmän päästöt ja terveysvaikutukset	17
6. 3D-tulostaminen: Jauhepetimenetelmä	19
6.1. Laitteistot	19
6.2. Materiaalit	20
6.3. Välttämättömät jälkikäsittelytoimenpiteet	20
6.4. Menetelmän päästöt ja terveysvaikutukset	21
7. 3D-tulostaminen: Materiaalin ruiskutusmenetelmä	22
7.1. Laitteistot	22
7.2. Materiaalit	22
7.3. Välttämättömät jälkikäsittelytoimenpiteet	23
7.4. Menetelmän päästöt ja terveysvaikutukset	23
8. 3D-tulostaminen: Sidosaineruiskutusmenetelmä	24
8.1. Laitteistot	24
8.2. Materiaalit	25
8.3. Välttämättömät jälkikäsittelytoimenpiteet	25
8.4. Menetelmän päästöt ja terveysvaikutukset	25

9. 3D-tulostaminen: Multi jet fusion	27
9.1. Laitteistot	27
9.2. Materiaalit	28
9.3. Välttämättömät jälkikäsittelytoimenpiteet	28
9.4. Menetelmän päästöt ja terveysvaikutukset	28
10. Tulostusmateriaalien varastointi	29
11. Laitteiden turvallinen sijoittelu ja valvonta	30
12. Huomio kappaleiden viimeistelyyn	31
13. Työtilojen siivoaminen	32
14. Terveyshaitoilta suojautuminen	33
15. Yhteenveto ja pohdinta	35
Lähteet	36
Kuvalähteet	38

1. 3D-tulostus ja työympäristön turvallisuus

3D-tulostusprosesseista peräisin olevia terveydelle haitallisia altisteita on tutkittu laitevalmistajien toimesta jo vuosikymmeniä, mutta tutkimustulokset ja data eivät kuitenkaan ole julkista tietoa, vaikka kyseessä on nopeasti yleistynyt valmistusmenetelmä. Tähän saakka kolmansien osapuolien tuottamia tutkimustuloksia on saatavissa kattavasti vain materiaalin pursotusmenetelmästä, joka on yksi monesta 3D-tulostusmenetelmästä. Muissa tapauksissa laitteen hankkijan on täytynyt luottaa laitteen valmistajan tarjoamiin tietoihin. Savonia-ammattikorkeakoulun LIVA-hankkeessa suoritettiin tutkimuksia liittyen eri tulostusprosesseihin sekä kappaleiden jälkikäsittelyiden päästöihin. Tutkimuksia suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulun 3D-tulostuslaboratoriossa sekä 3D-tulostustekniikkaa hyödyntävien yritysten tiloissa, jolloin saatiin tietoa todellisista 3D-tulostustyön aikaisista terveydelle haitallisten altisteiden määristä.

3D-tulostusprosesseissa syntyy tutkimusten mukaan terveydelle haitallisia altisteita. Nämä altisteet esiintyvät tyypillisesti melko matalina pitoisuuksina, jolloin akuutit oireet ovat harvinaisia ja terveysvaikutuksia syntyy vasta pitkäaikaisessa altistumisessa. Altisteet ovat luonteeltaan hiukkasia ja kemiallisia yhdisteitä. 3D-tulostamisesta peräisin olevien altisteiden pitkäaikaisia terveysvaikutuksia ei vielä tunneta, mutta niitä voidaan arvioida muiden tutkimusten perusteella. 3D-tulostamisessa tulee mukailla varovaisuusperiaatetta eli altistuminen terveyshaittoja aiheuttaville tekijöille tulee minimoida [1]. Tässä tietopaketissa käsitellään lyhyesti Savonia-ammattikorkeakoulun LIVA-hankkeessa tutkittujen eri 3D-tulostusmenetelmien käyttökohteita sekä laitteistoja ja pääasiassa niiden päästöjä ja terveysvaikutuksia. Lisäksi käsitellään varsinaisten tulostusprosessien ulkopuolisia työvaiheita, joissa terveydelle haitallisia altisteita voi esiintyä sekä henkilökohtaisen altistumisen vähentämistä.

2. 3D-tulostamisen päästöt

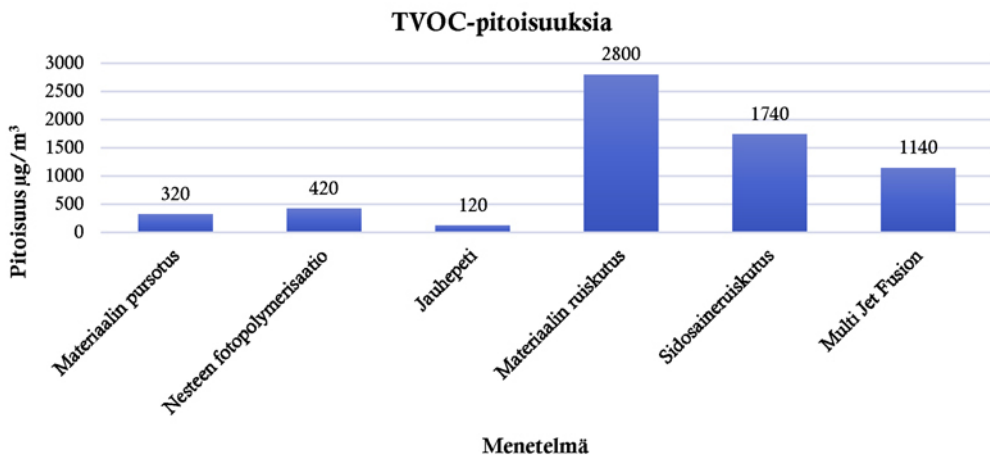
Kaikista 3D-tulostusmenetelmistä vapautuu päästöjä, jotka tulee ottaa huomioon 3D-tulostuslaitteita hankittaessa ja niitä sijoitettaessa tilaan. Päästöjen syntymiseen vaikuttavat useat tekijät, kuten käytetty menetelmä, laite, tulostusprosessin lämpötila ja käytettävä tulostusmateriaali. Lisäksi päästöjen pitoisuuteen tilassa vaikuttaa etenkin ilmanvaihdon tehokkuus ja kohdepoistojen käyttö [1, 5].

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC-yhdisteet) ovat yleisimpiä muovimateriaaleista peräisin olevia altisteita. Ne voivat aiheuttaa ärsytysoireita, allergioita ja hengitystiesairauksia, osa jopa syöpää. Yhdisteitä vapautuu muovimateriaalin lämpöhajotessa tulostusprosessin aikana tai yhdisteiden haihtuessa nestemäisestä tulostusmateriaalista [1, 5]. Tyypillisesti VOC-altistumista tarkastellaan TVOC-pitoisuuden (VOC-yhdisteiden yhteenlaskettu pitoisuus) avulla, sillä yksittäisiä yhdisteitä esiintyy tyypillisesti useita kymmeniä yhtäaikaaisesti mutta matalina pitoisuuksina. Vertailuarvona käytetään Työterveyslaitoksen esitystä TVOC-pitoisuuden tulkitsemiseksi, joka on esitetty taulukossa 1 [9].

Taulukko 1. TVOC-pitoisuuden tulkintaohje [9].

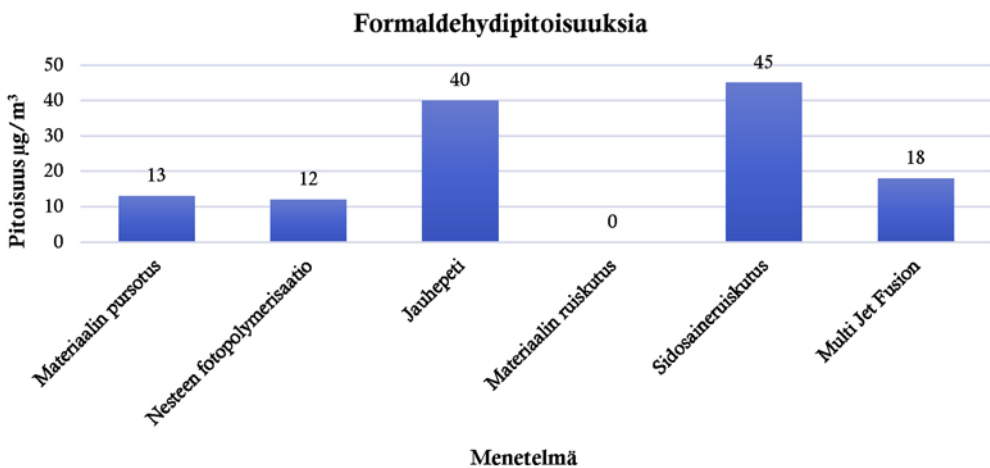
Taso	Pitoisuusalue ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tulkinta/toimenpiteet
1	< 300	Tilanne hyvä
2	> 300–1000	Tilanne kohtuullinen (mikäli yksittäisten yhdisteiden raja-arvot ei ylity)
3	> 1000–3000	Pitoisuus koholla
4	> 3000–10 000	Pitoisuus liiallinen
5	> 10 000	Pitoisuus ei hyväksyttävä

Lisäselvityksiä päästölähteestä, päästöjen vähentämisestä ja työntekijöiden suojautumisesta aletaan tavallisesti suorittamaan, mikäli TVOC-pitoisuus ylittää $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ rajan [9]. Kuvaajassa 1 on esitetty LIVA-hankkeessa työtiloista mitattuja TVOC-pitoisuuksia eri 3D-tulostusmenetelmistä.



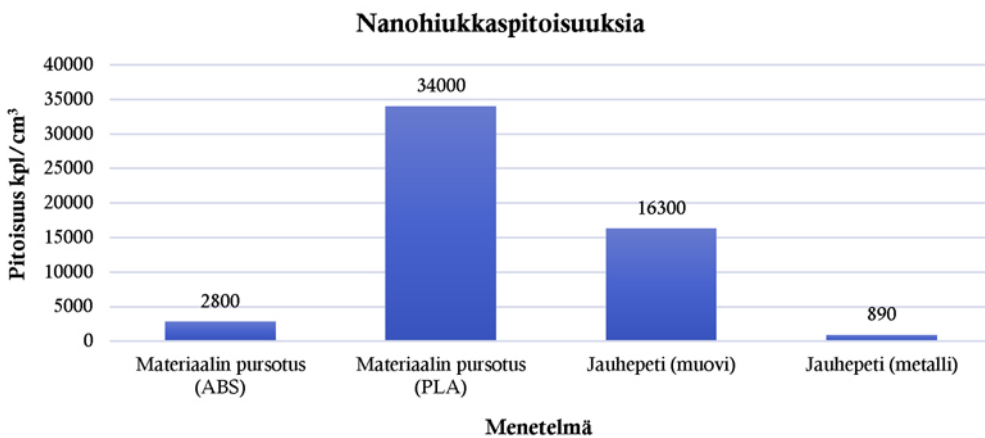
Kuvaaja 1. TVOC-pitoisuuksia eri 3D-tulostusmenetelmistä.

Formaldehydi on yleinen erilaisten muovien lämpöhajoamistuote joka on luokiteltu luokan 1B karsinogeeniksi. 1B-luokan aineisiin tulee suhtautua olettaen, että aine aiheuttaa syöpää. Aine on myös luokiteltu luokan 2 mutageeniksi, eli perimää mahdollisesti vaurioittavaksi aineeksi. Kuvaajassa 2 on esitetty LIVA-hankkeessa eri menetelmistä mitattuja formaldehydipitoisuuksia. Mitatuilla pitoisuuksilla riski syövän kehittymiselle on erittäin pieni, vaikka altistumisjakso olisi erittäin pitkä. Formaldehydin vertailuarvo ja haitalliseksi tunnettu pitoisuus on $370 \mu\text{g}/\text{m}^3$, joten mitatut pitoisuudet eivät aiheuta merkittävää terveydellistä riskiä [18].

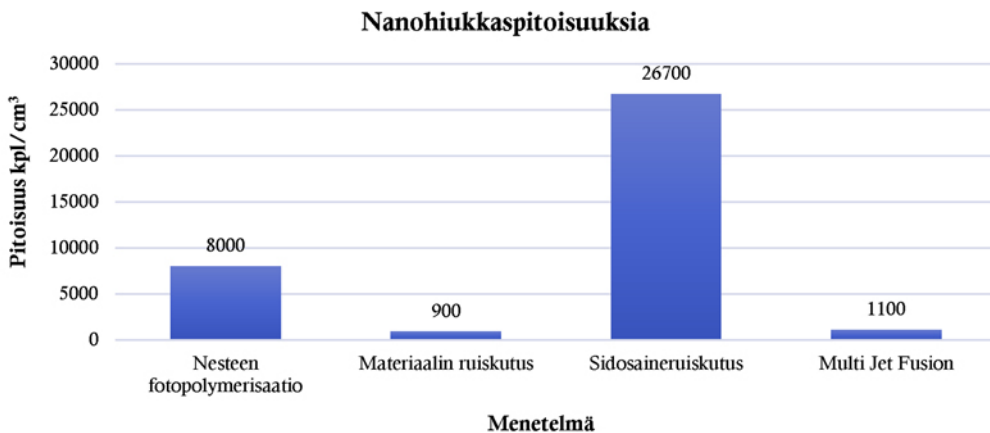


Kuvaaja 2. Formaldehydipitoisuuksia eri tulostusmenetelmistä.

Nanohiukkasia syntyy muovin lämpöhajoamisessa ja nestemäisten tulostusmateriaalien haihtuessa. Lämpöhajonneet ja haihtuneet kemikaalit kiinnittyvät toisiinsa muodostaen pieniä hiukkasia. Nanohiukkaset ovat tarpeeksi pieniä kulkeutumaan hengitysteistä suoraan verenkiertoon. Niiden terveysvaikutuksista on olemassa vielä vain vähän tietoa, mutta ne ovat yhdistetty etenkin sydän- ja hengitystiesairauksiin [1]. Työterveyslaitos on ehdottanut nanohiukkasten tavoitetasoksi alle 40 000 hiukkasta muoviperäisille hiukkasille ja alle 20 000 hiukkasta metalliperäisille hiukkasille [15]. Kuvaajissa 3 ja 4 on esitetty LIVA-hankkeessa työtiloista mitattuja nanohiukkaspitoisuuksia eri tulostusmenetelmistä ja -materiaaleista.



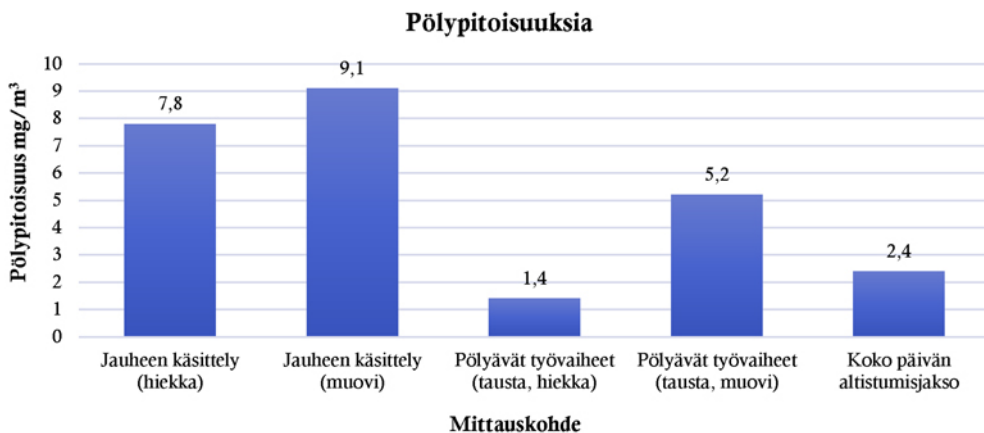
Kuvaaja 3. Nanohiukkaspitoisuuksia eri materiaaleista materiaalin pursotus- ja jauhepeti-menetelmässä.



Kuvaaja 4. Nanohiukkaspitoisuuksia eri tulostusmenetelmistä.

Pölyä esiintyy, kun 3D-tulostusprosessissa hyödynnetään jauhemaisia tulostusmateriaaleja tai kun kappaleita hiotaan. Pölyä vapautuu ilmaan jauhemateriaaleja käsitellessä, mutta sitä ei synny tai esiinny juurikaan varsinaisen tulostusprosessin aikana. Käytetystä materiaalista riippuen pöly on orgaanisessa tai epäorgaanisessa muodossa. Epäorgaaniselle pölylle (kuten metallipöly) on ominaista sen heikko poistuminen kehosta. Pöly poistuu keuhkoista limanerityksen mukana, mutta hiukkaset voivat jäädä keuhkoihin jumiin aiheuttaen arpi-kudoksen syntymisen. Orgaaninen pöly (kuten muovipöly) poistuu kehosta tehokkaammin. Orgaaniset hiukkaset voivat poistua limanerityksen mukana tai ne hajoavat hitaasti keuhkoissa ja poistuvat aineenvaihdunnan avulla pois kehosta.

Pölyt aiheuttavat ihon, limakalvojen sekä hengitysteiden ärsytysoireita ja pitkäaikainen altistuminen voi johtaa vakavien keuhkosairauksien, myös allergioiden tai astman puhkeamiseen [1, 15]. Orgaanisen pölyn haitalliseksi tunnettu pitoisuus on 5 mg/m^3 , epäorgaanisen pölyn haitalliseksi tunnetun pitoisuuden ollessa 10 mg/m^3 . Työterveyslaitoksen ehdottama ohjearvo ja tavoitetaso ovat alle 2 mg/m^3 ja se perustuu pölyn epäspesifisiin terveysvaikutuksiin. Todellisuudessa pölyhiukkaset voivat aiheuttaa oireita jo huomattavasti matalampina pitoisuuksina, jos niiden pintaan on kiinnittynyt kemikaaleja [15]. Kuvaajassa 5 on esitetty LIVA-hankkeessa mitattuja pölypitoisuuksia eri jauhemateriaalien käsittelyprosesseista. Taustanäytteet on kerätty kiinteistä pisteistä, muut näytteet suoraan työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä.



Kuvaaja 5. Eri jauheenkäsittelyprosesseista mitattuja pölypitoisuuksia.

3D-tulostusprosesseissa voi syntyä hiilimonoksidia eli häkää. Häkää syntyy epätäydellisessä palamisessa ja tiettyjen tulostusprosessien suuret lämpötilat voivat aiheuttaa tulostusmateriaalin palamisen etenkin häiriötilanteissa. Häkä on erittäin haitallinen, lisääntymisterveyttä heikentävä yhdiste, joka aiheuttaa hermostollisia oireita kuten uupumusta ja sekavuutta jo matalina pitoisuuksina. Häkä on hajutonta ja väritöntä kaasua, jolloin sen havainnointi on mahdotonta ilman mittalaitteita. LIVA-hankkeen tutkimuksissa havaitut häkäpitoisuudet olivat välillä 0...5 ppm (*parts per million*, tilavuuden miljoonasosaa) yhdisteen aiheuttaessa oireita vasta yli 30 ppm pitoisuuksina [2].

3. Materiaalilla on merkitystä päästöjen kannalta

3D-tulostuslaitteet käyttävät perinteisesti joko jauhetta, nestettä/vahaa, lankaa tai rakeita tulostusmateriaalina. Materiaalien ominaisuuksiin ja päästöihin vaikuttavat keskeisesti materiaaleissa käytetyt lisäaineet. Ominaisuuksiltaan, koostumuksiltaan ja päästöiltään eroavia tulostusmateriaaleja on olemassa sadoittain, ellei tuhansittain. Materiaalin valitsemiseen vaikuttaa pääasiassa tulostettavan kappaleen ominaisuudet ja tulostusprosessin materiaalivaatimukset [3].

Materiaalin pursotusmenetelmän muovifilamenttien suurimmat päästöerot näkyvät pääasiassa tulostusprosessissa syntyvien nanohiukkasten määrässä. Esimerkiksi PLA-muovin tulostaminen on erittäin puhdasta eikä merkittäviä nanohiukkaspitoisuuksia ole havaittu sen tulostamisessa. ABS-muovin tulostamisessa puolestaan vapautuu merkittäviä määriä nanohiukkasia [1, 5].

Nestemäiset tulostusaineet sisältävät helposti ilmaan haihtuvia yhdisteitä. Osa yhdisteistä, kuten akrylaatit ja epoksit ovat voimakkaasti herkeitä aineita. Yhdisteet haihtuvat ilmaan alhaisen kiehumispisteen sekä korkean höyrönpaineen vuoksi ja ne voivat kiinnittyä ilmassa olevaan pölyyn tai toisiinsa, jolloin syntyy nanokokoisia hiukkasia [1].

Jauhepeti- ja sidosaineruiskutusmenetelmissä käytetään pääasiassa muovi- tai metallijauheita. Muovista valmistettuja jauheita käytettäessä tulostusprosessista vapautuu haihtuvia orgaanisia yhdisteitä sekä nanohiukkasia. Metallijauheesta puolestaan vapautuu hitsauksen tapaan pääasiassa epäorgaanisia nanohiukkasia, jotka voivat olla herkeitä, allergisoivia tai jopa syöpävaarallisia. Sidosaineruiskutusmenetelmässä päästöt liittyvät ennemminkin sidosaineen käyttöön eikä materiaalin ominaisuuksiin [1].

Kaikissa tulostusmateriaaleissa on lisäaineita, jotka vaihtelevat suuresti materiaalista riippuen. Lisäaineet voivat olla esimerkiksi pehmittimiä, UV-suoja-aineita tai väriaineita. Lisäaineet voivat muuttaa materiaalin ominaisuuksia ja tulostusprosessin kemikaalipäästöjä merkittävästi [1].

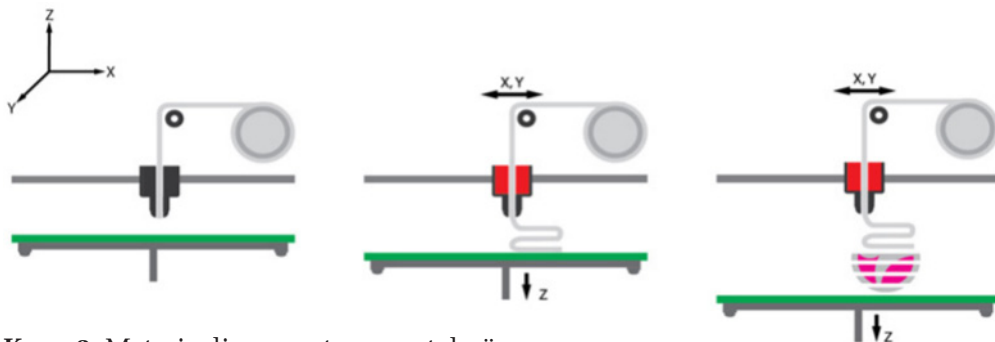
Tulostusmateriaaleja hankittaessa tulee perehtyä niiden ominaisuuksiin, terveelliseen ja turvalliseen käyttöön sekä varastointiin. Tietoa tulostusmateriaaleista saa tuotteiden valmistajilta sekä materiaalien käyttöturvallisuustiedotteista.



Kuva 1. Eri materiaaleista tulostettuja esimerkkikappaleita.

4. 3D-tulostaminen: materiaalin pursotusmenetelmä

Materiaalin pursotusmenetelmä on etenkin kuluttajatasen laitteistoissa yleisimmin käytetty, edullisin lisäävän valmistuksen menetelmä jonka toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2. Menetelmässä materiaalia lisätään lämmitetyn suuttimen kautta tulostusalueelle. Tulostettava materiaali notkistuu suuttimessa ja kiinnittyy tulostusalueeseen ja aiempiin tulostettuihin kerroksiin. Menetelmän tarkkuuteen vaikuttavat useat seikat, kuten suuttimen ja tulostuspedin lämpötilat sekä nopeus, jolla materiaalia pursotetaan. Tulostusjälki on tyypillisesti karkea muihin menetelmiin verrattuna. Materiaalin pursotusmenetelmää käytetään etenkin harrastelijatulosteiden, pienoismallien ja prototyyppien tuottamiseen, mutta nykyään myös lopputuotteiden valmistamiseen [3, 4].



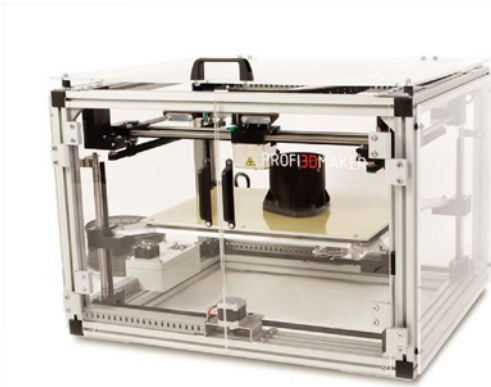
Kuva 2. Materiaalin pursotusmenetelmä.

4.1. Laitteistot

Kuluttajatasen laitteet ovat pääasiassa pieniä ja yksinkertaisia laitteita (tulostusalueet kuutiometrin sadasosia), mutta suuria materiaalia pursottavia laitteita on olemassa myös teollisen mittakaavan 3D-tulostamisen tarpeisiin (tulostusalueet jopa kuutiometrin luokkaa.) Kuluttajatasen laitteita voi myös tilata ja koota itse. Esimerkkejä laitevalmistajien tarjoamista laitteista on esitetty kuvissa 3 ja 4.

4.2. Materiaalit

Materiaalina käytetään yleisimmin lankamaista muovifilamenttia, mutta etenkin suuremmissa laitteissa materiaali on rakeisessa muodossa. Materiaaleja on olemassa satoja erilaisia, kuten eri ominaisuuksia omaavia muoveja sekä muovipohjaisia erikoismateriaaleja kuten metalli- ja hiilikuitumateriaaleja [3, 4].



Kuvat 3 ja 4. Profi3DMaker-tulostin ja Stratasys Fortus 900mc.

4.3. Välttämättömät jälkikäsittelytoimenpiteet

Muodostettu kappale täytyy irrottaa tulostusalustasta ja siitä täytyy leikata irti mahdolliset tulostuksen vaatimat tukirakenteet. Lisäksi muodostettujen kappaleiden pintaa täytyy usein hioa pinnan epätasaisuuden vuoksi [3, 4].

4.4. Menetelmän päästöt ja terveysvaikutukset

Tulostusprosessissa vapautuu kemikaaleja ja nanohiukkasia. Kappaleiden hiomisesta puolestaan vapautuu pölyä. Tutkimusten mukaan tulostusprosessin päästöt riippuvat useasta tekijästä, kuten suuttimen lämpötilasta ja käytetystä tulostusmateriaalista. Mitä lämpimämpi suutin on, sitä suuremmat ovat materiaaleista peräisin olevat päästöt [5].

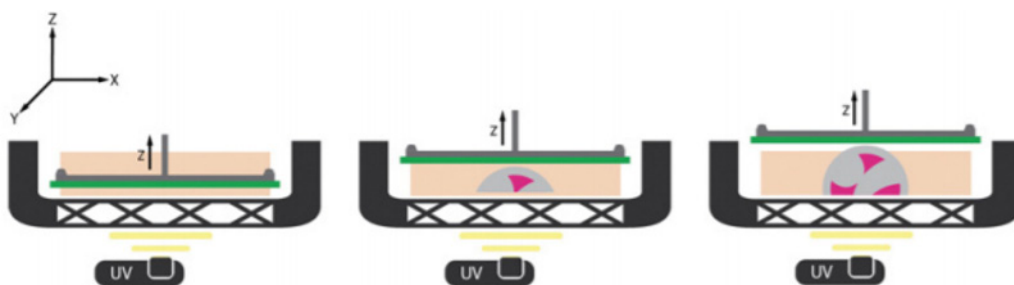
Kemikaalipäästöjen suuruusluokka on tutkimusten mukaan kohtuullisella tasolla materiaalista riippumatta, mutta vapautuvien yhdisteiden kemiallinen koostumus vaihtelee suuresti. Vapautuvien nanohiukkasien määrä puolestaan vaihtelee suuresti eri materiaalien välillä [5]. On myös huomioitava, että häiriötilanteissa, joissa tulostusmateriaali palaa, vapautuu erittäin suuria määriä nanohiukkasia ja mahdollisesti myös häkää.

Pitkäaikainen ja toistuva altistuminen tulostusprosessin päästöille voi aiheuttaa etenkin hengitysteiden ja limakalvojen ärsytysoireita. Vuosien mittainen altistuminen voi aiheuttaa myös vakavampia oireita, kuten astman tai hengitystiesairauksien puhkeamisen [1, 5, 6]. Häkä

voi aiheuttaa akuutin myrkytystilan, mikäli pitoisuus nousee korkeaksi esimerkiksi pitkään jatkuneen häiriötilanteen vuoksi [2]. Nanohiukasten aiheuttama kuormitus voi lisäksi aiheuttaa sydän- ja verisuonisairauksien puhkeamisen [1]. Tilan johon materiaalia pursottavat laitteet sijoitetaan tulee olla hyvin tuuletettu, vaikka menetelmästä peräisin olevat päästöt ovat kohtuullisia.

5. 3D-tulostaminen: Nesteen fotopolymerisaatiomenetelmä

Nesteen fotopolymerisaatiomenetelmässä nestemäistä fotopolymeeri-seosta kovetetaan haluttuun muotoon UV-laserin avulla. Menetelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5. Tulostusjäljeltään fotopolymerisaatiomenetelmä on erittäin tarkkaa. Menetelmässä tulostusalustana toimiva levy kulkee laserin sijainnista riippuen alas tai ylös tulostusnesteellä täytetyssä altaassa jossa UV-laser kovettaa tulostusnesteestä halutun muotoisen kappaleen. Menetelmää hyödynnetään useilla eri aloilla kuten lääketieteessä, hammaslääketieteessä, koru- ja taidealoilla sekä suunnittelussa [3, 4].



Kuva 5. Nesteen fotopolymerisaatiomenetelmä.

5.1. Laitteistot

Nesteen fotopolymerisaatiomenetelmää hyödyntävät laitteet vaihtelevat käyttökohteesta riippuen. Laitteita on saatavilla pienistä pöytämalleista (tulostusalueet kuutiometrin sadasosia) suuriin teollisuusmittakaavan laitteisiin (tulostusalueet jopa puoli kuutiometriä) ja esimerkiksi hammaslääketieteen omiin tarpeisiin [4, 7]. Kuvissa 6 ja 7 on esitetty esimerkkejä nesteen fotopolymerisaatioon perustuvista laitteista.

5.2. Materiaalit

Menetelmässä käytetyt tulostusnesteet ovat tyypillisesti kalliimpia kuin muissa menetelmissä käytetyt materiaalit. Materiaalihävikki on kuitenkin erittäin pientä. Koostumuksiltaan eroavia nesteitä on olemassa suuria määriä jotka todennäköisesti kaikki sisältävät terveydelle haitallisia yhdisteitä. Eräistä nesteistä tuotetut ja viimeistellyt kappaleet

leet voidaan kuitenkin hyväksyä lääketieteellisesti turvallisiksi [1, 7]. Nesteitä käytettäessä ja varastoitaessa on huomioitava tulostusmateriaalin kontaminaatoriski, jonka voi aiheuttaa esimerkiksi ilmassa leijuva pöly.

5.3. Välttämättömät jälkikäsittelytoimenpiteet

Tulostusprosessin jälkeen ylimääräinen tulostusneste ja tukirakenteet täytyy liuottaa tuotetusta kappaleesta irti. Tämä tapahtuu yleensä iso-propanolin avulla [4]. Prosessissa syntyy jätettä joka täytyy varastoida huolellisesti ja kuljettaa jätteenkeräyspisteeseen, joka vastaanottaa ongelmajätettä.



Kuvat 6 ja 7. Formlabs Form2 ja UnionTech RSPro 600.

5.4. Menetelmän päästöt ja terveysvaikutukset

Kemikaalit ja nanohiukkaset ovat nesteen fotopolymerisaatiomenetelmän pääasialliset päästöt. Tutkimuksessa päästöjen suuruus oli kohtuullisella tasolla. Kemikaaleja vapautuu sekä tulostusprosessista, jälkikäsittelystä että laitteiden nestesäiliöiden täyttämisestä. Tulostusnesteissä voi olla voimakkaasti herkistäviä yhdisteitä jotka ovat usein pistävän hajuisia. Tulostusnesteistä vapautuvat kemikaalit aiheuttavat täten helposti viihtyvyyshaittaa jo pieninä pitoisuuksina [1].

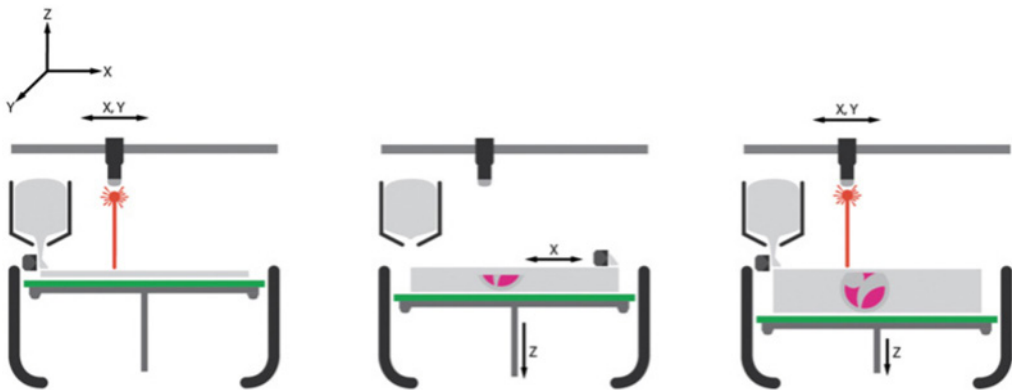
Tulostusprosessista aiheutuvat päästöt voivat aiheuttaa limakalvojen ja hengitysteiden ärsytys-oireita. Pitkäaikainen, vuosia jatkuva altistuminen voi aiheuttaa vakavampien sairauksien, kuten astman tai allergian syntymisen. Ihoaltistuminen tulostusnesteille voi myös aiheuttaa ihot-

tumia tai palovamman kaltaisia oireita. Nanohiukkasten aiheuttama kuormitus voi edesauttaa sydän- ja verisuonisairauksien puhkeamista [1, 6].

Merkittävimmit kemikaalipäästöt syntyvät jälkikäsittelyprosessissa, kun liuotinaineesta sekä liuotettavasta kappaleesta vapautuu kemikaaleja. Korkeat kemikaalipitoisuudet voivat aiheuttaa välittömiä ärsytysoireita, yskää sekä huonovointisuutta ja hermostollisia oireita [6]. Jälkikäsittelyprosessi tulee suorittaa hyvin ilmastoidussa tilassa tai vetokaapin sisällä. Kemiallisen altistumisen taso voidaan saattaa huomattavasti alemmalle tasolle myös henkilökohtaisten suojainten avulla.

6. 3D-tulostaminen: Jauhepetimenetelmä

Jauhepetimenetelmässä tulostusalueelle levitetty jauhe liitetään yhteen lämmön, perinteisesti laserin avulla. Prosessissa jauhetta levitetään kerroksittain tulostusalueelle ja levityskertojen välissä aine sulatetaan tai sintrataan kiinni aiempaan kerrokseen. Menetelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 8. Menetelmän etuihin kuuluu jauhepedin toimiminen muodostettavien kappaleiden tukena, jolloin ylimääräisiä tukirakenteita ei tarvita. Jauhepetimenetelmä on teollisen mittakaavan 3D-tulostamisen käytetyimpiä menetelmiä sen nopeuden ja laitteiden suurten tulostuskapasiteettien vuoksi. Menetelmällä tuotetaan osia suurina määrinä eri aloille lentoteollisuudesta hammaslääketieteeseen ja kuluttajatuotteisiin [3, 4].



Kuva 8. Jauhepetimenetelmä.

6.1. Laitteistot

Jauhepetitulostimet ovat hintavia, suuria ja tarkoitettu teolliseen käyttöön. Esimerkkejä jauhepetimenetelmää hyödyntävistä laitteista on esitetty kuvissa 9 ja 10. Laitteiden tulostusalueet ovat tyypillisesti noin puolesta kuutiometristä ylöspäin. Jauhepetimenetelmää hyödyntäviä laitteistoja on erilaisia, jotka perustuvat esimerkiksi materiaalin sintraukseen (tulostusaineen kiinnittyminen yhteen molekyyllitasolla korkeassa lämpötilassa) tai sulatukseen [3, 4].

6.2. Materiaalit

Jauhepetimenetelmässä käytetään erilaisia jauhemateriaaleja. Jauhe on yleensä muovia tai metallia. Jauhemateriaalit ovat yleensä suhteellisen edullisia, mutta jotkin materiaalit vaativat suojavaasun läsnäolon tulostuksen mahdollistamiseksi. Hinta ja tulostuksen laatu riippuvat jauheen raakoista ja tasalaatuisuudesta. Tulostusalue kannattaa hyödyntää tulostustilanteessa kokonaan, sillä jauheen ominaisuudet muuttuvat tulostusprosessin aikana. Ylimääräistä jauhetta voidaan käyttää uudelleen neitseellisen materiaalin seassa, mutta osa jauheesta päättyy jätteeksi. Jätteeksi päättyvä jauhe täytyy varastoida ja toimittaa jätteenkeräyspisteeseen [3, 4].



Kuvat 9 ja 10. EOS Formiga P100 ja SLM 500 HL.

6.3. Välttämättömät jälkikäsittelytoimenpiteet

Muodostetut kappaleet täytyy puhdistaa ylimääräisestä jauheesta tulostuksen jälkeen. Tämä suoritetaan purkamalla ensin kappaleet ulos tulostusjauheen peitosta ja tämän jälkeen kappaleet käsitellään paineilmalla. Jauhesäiliöt täytyy myös täyttää ennen seuraavaa tulostusta. Jauheen ja jauheisten kappaleiden käsittelystä vapautuu merkittäviä määriä pölyä.

6.4. Menetelmän päästöt ja terveysvaikutukset

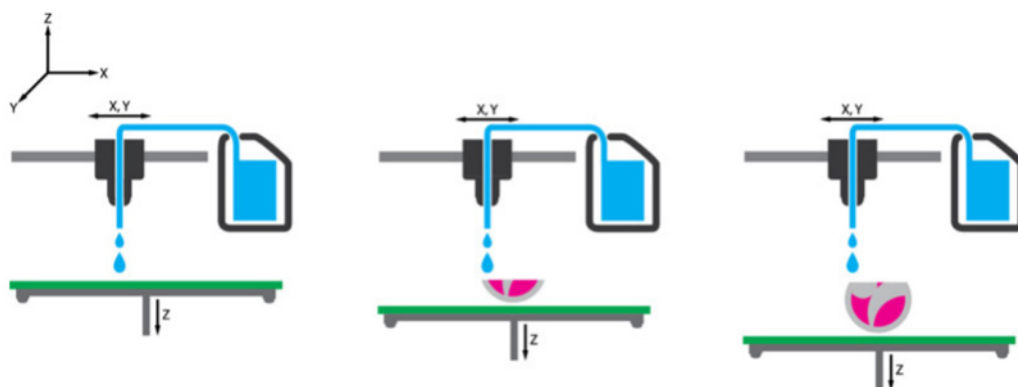
Terveydelle haitallisille tekijöille altistutaan jauhepetimenetelmää hyödynnettäessä pääasiassa materiaalia käsiteltäessä. Pölypitoisuuksien on havaittu olevan tasoilla jotka voivat ilman suojaantumista aiheuttaa merkittäviä terveydellisiä haittoja. Muovi- ja metallipölyt aiheuttavat yskää ja keuhkosairauksia, jopa astmaa ja keuhkohtaumatautia. Ihoaltistuminen voi aiheuttaa ärsytysoireita ja ihottumaa. Metallipölyt voivat olla hengitettynä myös allergisoivia tai syöpävaarallisia [1, 6]. Tulostusjauhetta käsiteltäessä tulee käyttää ihoa suojaavaa vaateetusta sekä hengityksensuojainta haitallisten terveysvaikutusten ehkäisemiseksi. Lisäksi tulostusjauheen ylimääräinen leviäminen tulee estää teknisin ratkaisuin.

Tutkimuksissa muovijauheen tulostamisen kemiallisten päästöjen havaittiin olevan matalalla tasolla, mutta nanohiukkasia syntyi tulostusprosessista runsaasti. Jauhepetimenetelmää hyödyntävien tulostuslaitteiden läheisyydessä työskenteleminen on tutkimuksen mukaan turvallista. Pitkäaikainen altistuminen nanohiukkasille voi kuitenkin lisätä sydän- ja verisuonisairauksien riskiä ajan saatossa [1, 6].

Metallijauheen tulostamisesta ei vapautunut taustapitoisuudesta poikkeavia nanohiukkaspitoisuuksia työtilaan, mutta pitoisuudet kohosivat eri metallikappaleiden jälkikäsittelyprosesseissa. Myös metallipölyn pitoisuus oli koholla kappaleiden jälkikäsittelyprosesseissa.

7. 3D-tulostaminen: Materiaalin ruiskutusmenetelmä

Materiaalin ruiskutusmenetelmässä materiaalia lisätään tulostusalueelle selektiivisesti pisaroina tai jatkuvana suihkuna. Materiaali kovetetaan muotoon UV-valon avulla. Menetelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 11. Materiaalin ruiskutuksessa voidaan hyödyntää useampaa suutinta, mikä mahdollistaa nopeamman tulostamisen tai useamman materiaalin yhtäaikaista tulostamista. Tämä avaa mahdollisuuksia ominaisuuksiltaan erilaisten kappaleiden tuottamiselle. Materiaalin ruiskutus on tulostusjäljeltään tarkkaa. Menetelmällä valmistetaan etenkin prototyyppisiä, hammaslääketieteen ja perinteisen lääketieteen kappaleita sekä koru- ja muita muotteja. [3, 4, 8].



Kuva 11. Materiaalin ruiskutusmenetelmä.

7.1. Laitteistot

Menetelmässä käytetyt laitteistot ovat usein hintavia ja suuria tekniikkansa vuoksi. Laitteet ovat yleensä kookkaita toimisto- ja teollisuusmittakaavan koneita, mutta myös pöytämalleja on saatavilla. Esimerkkejä materiaalin ruiskutusmenetelmää hyödyntävistä laitteista on esitetty kuvissa 12 ja 13. Laitteiden tulostusalueet ovat usein pieniä, mutta suuria tulostusalueita omaavia laitteitakin on saatavilla.

7.2. Materiaalit

Menetelmässä käytetään UV-kovettuvaa muovia tai vahaa. Prosessissa ylijäänyt tulostusmateriaali kierrätetään takaisin tulostimen käyttöön jolloin tulostusjätettä syntyy hyvin pieniä määriä [3, 4].



Kuvat 12 ja 13. 3DSystems Projet MJP 2500 ja Stratasys Polyjet -sarjan laitteita.

7.3. Välttämättömät jälkikäsittelytoimenpiteet

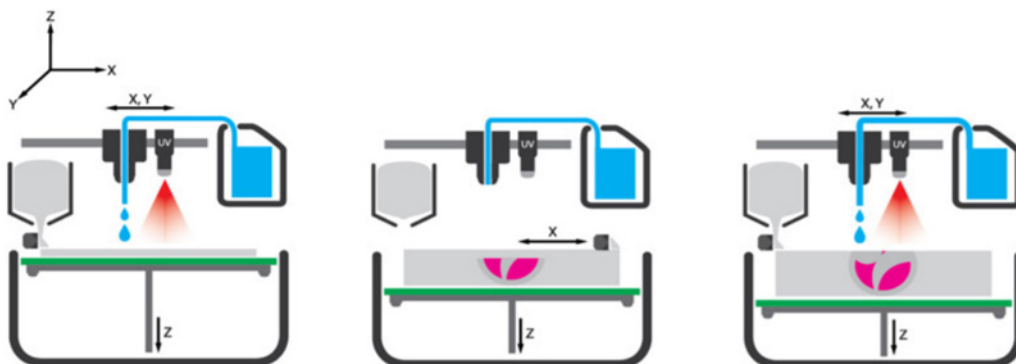
Tulostettujen kappaleiden pintaan jää pieniä määriä tulostusnestettä. Lisäksi kappaleet vaativat usein tukirakenteita jotka voidaan ylimääräisen tulostusaineen poiston yhteydessä poistaa valmiista kappaleesta esimerkiksi vesisuihkun, ultraäänihauteen tai liuotinaineiden avulla [4, 8].

7.4. Menetelmän päästöt ja terveysvaikutukset

Tutkimusten mukaan materiaalin ruiskutusmenetelmästä ja kappaleiden puhdistamisesta ultraäänihauteessa vapautuu vain kemiallisia yhdisteitä. Havaittujen kemikaalipitoisuuksien havaittiin olevan merkittävästi muiden menetelmien pitoisuuksia suurempia, muttei liiallisella tasolla. Pitoisuudet aiheuttavat muita menetelmiä todennäköisemmin limakalvojen ja hengitysteiden ärsytysoireita pitkäaikaisessa altistumisessa, mikäli laite ei ole sijoitettu hyvin tuuletettuun tilaan tai laitteen lähellä työskennellään jatkuvatoimisesti suojautumatta. Erityisen herkäät yksilöt voivat kokea ärsytysoireita jo lyhytaikaisessa (tuntien) altistumisessa. Vuosia jatkuva altistuminen menetelmän päästöille voi edesauttaa esimerkiksi astman, allergian tai keuhkohtaumataudin puhkeamista mikäli päästöjen leviämistä ei rajoiteta teknisillä ratkaisuin tai niiltä ei suojauduta. [6].

8. 3D-tulostaminen: Sidosaineruiskutusmenetelmä

Sidosaineruiskutusmenetelmässä jauhemaista tulostusainetta liitetään yhteen ruiskuttamalla nestemäistä sidosainetta selektiivisesti tulostusalueelle. Prosessi muistuttaa jauhepetimenetelmää ja sen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 14. Jauhemaainen tulostusaine levitetään tulostusalueelle, sidosainetta ruiskutetaan haluttuihin kohtiin ja uusi jauhekerros levitetään aiemman päälle. Eräät laitteet kovettavat sidosaineen esimerkiksi UV-valolla tai tulostusaine voidaan joissain tapauksissa kyllästää aineella joka kovettuu tullessaan kontaktiin sidosaineen kanssa. Sidosaimea ei aina koveteta jauhekerrosten levittämisen välissä. Tässäkin menetelmässä jauhepeti toimii tukirakenteena jolloin niitä ei tarvitse erikseen muodostaa kappaleeseen. Menetelmää käytetään yleisesti muottien, prototyyppien ja näytösesineiden valmistukseen [3, 4].



Kuva 14. Sidosaineruiskutusmenetelmä.

8.1. Laitteistot

Sidosaineruiskutusmenetelmää hyödyntävät laitteet ovat tyypillisesti suuria toimisto- ja teollisuusmittakaavan laitteita. Pieniä pöytämalleja ollaan kehittämässä ja niiden saatavuuden oletetaan paranevan lähitulevaisuudessa. Laitteistojen ominaisuudet vaihtelevat suuresti ja esimerkkejä sidosaineruiskutusmenetelmää hyödyntävistä laitteista on esitetty kuvissa 15 ja 16. Joissain laitteissa on esimerkiksi mahdollista käyttää suojakaasua ja joissain laitteissa voi olla useita tulostuspäitä, mikä mahdollistaa useamman eri sidosaineen käytön. Tällöin yhdellä tulostuskerralla voidaan tuottaa eri ominaisuuksien omaavia kappaleita [3, 4].



Kuvat 15 ja 16. 3D Systems ZPrinter 850 ja Voxeljet VX2000.

8.2. Materiaalit

Sidosaineruiskutusmenetelmässä voidaan hyödyntää lähes mitä tahansa jauhemateriaalia, kuten hiekkaa, metallia, muovia tai keraamia. Eräät materiaalit vaativat suojakaasun läsnäolon tulostuksen mahdollistamiseksi. Sidosaineet ovat yleensä kemiallisia seoksia ja aineen valinta riippuu käytettävästä tulostusmateriaalista. Sidosaineen lisäksi laitteet voivat ruiskuttaa tulostusalueelle väriainetta [3, 4].

8.3. Välttämättömät jälkikäsittelytoimenpiteet

Tulostuksessa käytetty sidosaine täytyy kovettua täysin ennen kuin tuotetut kappaleet voidaan purkaa tulostusalueelta. Kappaleita voidaan myös joutua täyttämään tai lämpökäsittelemään ennen kuin ne ovat valmiita. Kappaleet täytyy myös puhdistaa ylimääräisestä tulosjauheesta kuten jauhepetimenetelmässä, esimerkiksi paineilmalla [3, 4].

8.4. Menetelmän päästöt ja terveysvaikutukset

Sidosaineruiskutusmenetelmän päästöt voivat vaihdella suuresti riippuen käytetystä tulosjauheesta sekä sidosaineesta. Tulostusprosessissa esiintyi korkeita nanohiukkas- ja kemikaalipäästöjä kun tulosjauheena käytettiin kemiallisesti kyllästettyä hiekkaa, sidosaineen

ollessa alkoholia. Myös formaldehydiä esiintyi kohtalaisesti. Päästöt olivat todennäköisesti peräisin sidosaineen käytöstä. Kemikaalipäästöt voivat olla korkeammat, mikäli tulostusaineena käytetään muovia. Mitatut kemikaalipitoisuudet voivat aiheuttaa pitkäaikaisessa altistumisessa limakalvojen ärsytys- ja iho-oireita, keuhkosairauksia, allergiaa sekä astmaa. Lyhytaikainen altistuminen voi aiheuttaa lieviä ärsytysoireita. Mitattu formaldehydipitoisuus voi hieman lisätä syöpäriskiä pitkäaikaisessa altistumisessa [1, 6].

Pölypitoisuuden todettiin olevan koholla, kun jauhemateriaalia käsiteltiin. Mitatut pitoisuudet olivat lähelle epäorgaanisen pölyn HTP-arvoa, joten hengitysteiden ärsytystilat ovat todennäköisiä jo lyhytaikaisen altistumisen jälkeen. Pitkäaikainen altistuminen voi aiheuttaa vakavia keuhkosairauksia, astmaa ja allergiaa mikäli pölyltä ei suojauduta. Hiekkapölyn ei havaittu leviävän tehokkaasti pisteestä jossa sitä käsiteltiin, mutta kevyempi muovipöly voi levitä helpommin muualle työtilaan jolloin pölylle altistuvat muutkin kuin jauheen käsittelijä. Lisäksi tulostusprosessista mitatut nanohiukkaspitoisuudet voivat edesauttaa allergian, astman sekä sydän- ja verisuonisairauksien puhkeamista. Myös pöly ja nanohiukkaset voivat lisätä syöpäriskiä [1, 6].

Sidosaineruiskutusmenetelmässä syntyy useita erilaisia terveydelle haitallisia päästöjä. Päästöjen leviäminen voidaan estää tehokkaasti teknisin ratkaisuin. Myös henkilökohtainen suojautuminen on suositeltavaa tilanteissa, joissa terveydelle haitallisia altisteita tiedetään syntyvän huomattavia määriä.

9. 3D-tulostaminen: Multi jet fusion

Multi jet fusion on toimintaperiaatteeltaan jauhepeti- ja sidosaineruis-
kusmenetelmien yhdistelmä. Menetelmässä jauhemaista tulostusma-
teriaalia levitetään alueelle, kuten jauhepetimenetelmässä. Jauhepeti
lämmitetään infrapunalamppujen avulla lähelle käytettävän tulostus-
materiaalin sulamispistettä. Jauheen levityksen jälkeen sen päälle le-
vitetään sidosainetta, joka on väriltään jauhetta tummempaa. Tumma
sidosaine absorboi jauhetta enemmän energiaa ja jauhe sulaa alueel-
ta johon sidosainetta lisättiin. Tämän jälkeen alueelle levitetään uusi
jauhekerros ja prosessi toistuu. Menetelmää käytetään erityisesti muo-
visten kappaleiden 3D-massatuotantoon. Tekniikkaa on luonnehdittu
merkittävästi perinteistä jauhepetimenetelmää nopeammaksi [19].

9.1. Laitteistot

Toistaiseksi ainoat Multi jet fusion-tekniikkaa hyödyntävät laitteet
ovat HP:n valmistamia, kuten kuvassa 17 esitetty HP Jet Fusion 3D
4200. Laitteet ovat kooltaan suuria teollisuusmittakaavan laitteita, jois-
sa voi olla yhdistettynä kappaleiden jälkikäsittely- ja jauhemateriaalin
talteenkeräyslaitteet [19].



Kuva 17. HP Jet Fusion 3D 4200.

9.2. Materiaalit

Multi jet fuson-laitteissa käytetään polyamidijauhetta. Materiaalit ovat pääasiassa HP:n valmistamia, mutta ulkopuolisia valmistajia on olemassa. HP:n tuottama jauhe on ominaisuuksiltaan kestävää monille ulkopuolisille tekijöille, jotka tavallisesti heikentävät materiaalin laatua [19].

9.3. Välttämättömät jälkikäsittelytoimenpiteet

Tuotettuja kappaleita täytyy jälkikäsitellä samoin kuin perinteisellä jauhepetimenetelmällä muodostettuja kappaleita. Ylimääräinen tulosjauhe poistetaan tyypillisesti paineilman tai lasikuulapuhalluksen avulla.

9.4. Menetelmän päästöt ja terveysvaikutukset

Tutkimusten mukaan Multi jet fusion-menetelmästä vapautuu vain kemiallisia yhdisteitä. Havaitut kemikaalipitoisuudet voivat aiheuttaa ärsytysoireita lyhytaikaisessa altistumisessa. Vuosia jatkuvassa altistumisessa ärsytysoireet, keuhkosairaudet, astma ja allergiat ovat mahdollisia. Menetelmässä esiintyi myös pieniä määriä formaldehydiä, joten syöpäriski voi kohota lievästi pitkäaikaisessa altistumisessa. Lisäksi jauheen käsittelystä ja tuotettujen kappaleiden viimeistelystä voi vapautua merkittäviä määriä pölyä. Altistuminen suurille pölypitoisuuksille voi aiheuttaa yskää, hengitystieärsytystä ja pitkäaikaisessa altistumisessa vakavampia keuhkosairauksia kuten keuhkohtaumatautia [6].

Multi jet fusion -menetelmää hyödyntävät laitteet tulee sijoittaa hyvin tuuletettuun tilaan mahdollisuuksien mukaan niin, ettei tilassa suoriteta muita pitkäkestoisia töitä. Materiaalia käsitellessä ja kappaleita jälkikäsitellessä pölyaltistuminen voidaan ehkäistä henkilökohtaisin suojaimin ja kohdepoistoja hyödyntämällä.

10. Tulostusmateriaalien varastointi

Muoviset tulostusmateriaalit haurastuvat ja hajoavat ajan saatossa valon, ilmankosteuden ja muiden tekijöiden johdosta. Kaikki eri muovityypit reagoivat eri tavoin materiaaleja pilaaviin muuttujiin, joten samaa säilöntämenetelmää ei voida soveltaa jokaiselle materiaalille. Muovimateriaalit säilyvät parhaiten kuivassa ilmassa, normaalissa huoneen lämmössä tai viileämmässä. Materiaalit kannattaa mahdollisuuksien mukaan eristää huoneilmasta koteloimalla tai pussittamalla. Eristettyyn materiaalipakkaukseen voidaan lisätä esimerkiksi silikaageleipusseja jotka imevät ilmankosteuden itseensä. Myös tyhjiöpakkaminen on mahdollista. Varastointitapaa valittaessa tulee selvittää, mikä säilöntätapa on riittävä ja sopiva kyseiselle materiaalille [11, 12].

Nestemäisten tulostusmateriaalien varastointi tapahtuu yleensä materiaalin valmistajan tarjoamissa säiliöissä. Kannelliset säiliöt tulee varastoida huoneenlämmössä, jolloin nesteen ominaisuudet eivät kärsi. Nesteitä ei myöskään tule siirtää takaisin varastointisäiliöön sen jälkeen, kun sitä on lisätty 3D-tulostimen tulostusnestesäiliöön. Varastointisäiliöitä tulee sekoittaa esimerkiksi ravistelemalla noin kuukauden välein, mikäli varastointiaika on hyvin pitkä. Täten nesteen yhdisteet eivät eroitu toisistaan ja neste säilyttää tulostusominaisuutensa [13].

Jauhepetitulostimiin on olemassa lisälaitteita, jotka hoitavat materiaalin käsittelyn, syötön ja varastoinnin niin, ettei työntekijän tarvitse suorittaa pölyäviä työvaiheita. Muutoin jauhemateriaalien varastointiin pätevät samat periaatteet kuin muidenkin kiinteiden muovien varastointiin. Jauhepetimenetelmää hyödynnettäessä tulee muistaa myös se, että yleisimmin käytetty jauhemateriaali on polyamidi, joka imee ilmankosteutta tehokkaasti. Täten ilmankosteuden kontrollointi materiaalia käytettäessä ja varastoitaessa on tärkeää [14].

11. Laitteiden turvallinen sijoittelu ja valvonta

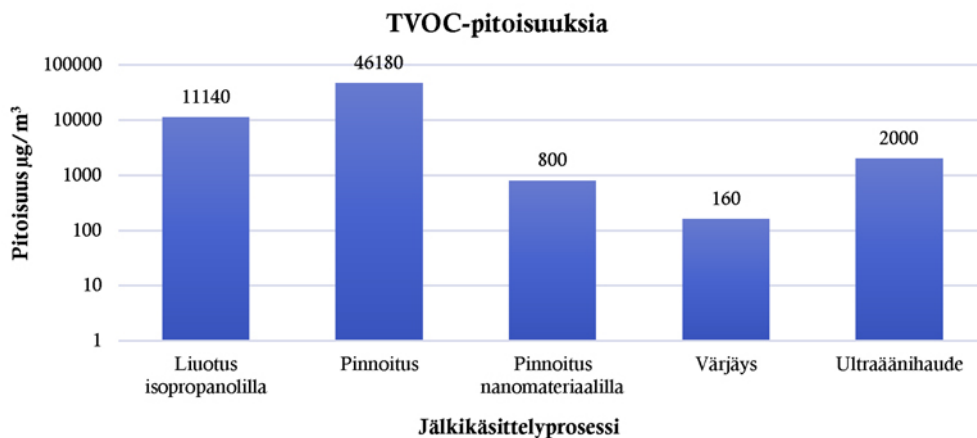
3D-tulostuslaitteet tulee sijoittaa tilaan niin, ettei niiden välittömässä läheisyydessä työskennellä pitkäjäksoisesti. Tilan ilmanvaihdon tulee olla tarpeeksi tehokas puhdistamaan ilma niin, etteivät terveydelle haitalliset altisteet pääse rikastumaan työtilan ilmaan. Mahdollisuuksien mukaan tulostuslaitteet tulee sijoittaa ilman kohdepoiston alle tai vetokaappiin, jolloin syntyvät päästöt eivät pääse leviämään.

Varsin pitkälle kehittyneestä teknologiasta huolimatta tulostusprosesseissa voi esiintyä häiriöitä. Häiriötilanteissa tulostettava kappale menee usein pilalle ja tulostus on aloitettava alusta. Ajoissa havaittu häiriötilanne säästää aikaa ja tulostusmateriaalia, kun prosessi keskeytetään mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Lisäksi häiriötilanteiden on havaittu aiheuttavan suurimpia terveydelle haitallisia päästöjä työtilaan. Tulostimet tulee sijoittaa helposti valvottavaan paikkaan ja tulostusprosesseja tulee seurata säännöllisesti häiriötilanteiden varalta.

12. Huomio kappaleiden viimeistelyyn

3D-tulostettuja kappaleita täytyy usein jälkikäsitellä ennen kuin kappale on viimeistely käytettäväksi. Jälkikäsitelyprosesseista vapautuu usein merkittäviä päästöjä, jotka tulee ottaa huomioon työpaikan toimintaa suunniteltaessa. Vapaaehtoisin jälkikäsitelytoimenpiteisiin lasketaan esimerkiksi asetonikäsitely, pinnoitus, värjäys ja hiominen. Jälkikäsitelyprosessit, myös vapaaehtoiset sellaiset, ovat yleensä lyhyitä työvaiheita. Lyhyiden altistumisjaksojen vuoksi pitkäaikaisesta altistumisesta aiheutuvia terveysvaikutuksia ei aina ole mielekästä arvioida.

Kemikaalipitoisuuksien on havaittu olevan erittäin korkeita jälkikäsitelyprosesseissa, joissa kappaleesta liuotetaan materiaalia pois tai kun kappaleet käsitellään kemiallisilla pinnoitteilla. Kuvaajassa 6 on esitetty LIVA-hankkeessa mitattuja eri jälkikäsitelyprosessien TVOC-pitoisuuksia. Pinnoituksesta ja isopropanoliliuotuksesta mitatuilla pitoisuuksilla voi olla akuutteja terveysvaikutuksia kuten ärsytysoireita, pahoinvointia ja hermostollisia oireita etenkin mikäli työympäristön ilmanvaihto tai työntekijän suojautuminen ei ole järjestetty asianmukaisesti. Muista jälkikäsitelyprosesseista ei todennäköisesti aiheudu akuutteja oireita, mutta krooniset ärsytys- ja hengitystieoireet voivat olla mahdollisia.



Kuvaaja 6. Eri jälkikäsitelyprosessien TVOC-pitoisuuksia. Huom. logaritminen pitoisuusasteikko.

Tukirakenteiden leikkauksen jälkeen niiden liitoskohdat ja muut epätasaisuudet täytyy hioa. Hiomisessa syntyy pölyä, jonka määrä voi olla merkittävää, mikäli kappaleita on paljon tai hiottavat pinta-alat ovat suuria. Keuhkojen, limakalvojen ja ihon ärsytysoireet ovat mahdollisia hiontapölylle altistuttaessa.

13. Työtilojen siivoaminen

3D-tulostinlaitteiden, esi- ja jälkikäsittelypisteiden sekä niiden ympäristöjen siisteydestä tulee pitää huolta. Puhtaat työtilat estävät ylimääräisen altistumisen haitallisille epäpuhtauksille ja vähentävät tapaturmariskiä [10].

Jauhemaiset ja pölyn tapaiset epäpuhtaudet, joita syntyy pääasiassa jauhepeti- ja sidosaineruiskutusmenetelmää hyödynnettäessä tai kappaleita hiottaessa tulee siivota säännöllisesti imurilla tai kostealla pyyhkeellä. Jauheen ja pölyn harjaaminen tai pyyhkiminen kuivalta pyyhkeellä vapauttaa epäpuhtaudet ilmaan. Ilmanvaihtokanavien puhtaudesta tulee myös pitää huolta, mikäli työpaikalla esiintyy huomattavia määriä pölyä [10].

Nestemäisiä tulostusmateriaaleja voi läikkyä työtasolle. Niitä siivottaessa suositellaan käyttämään hansikkaita, jotka eivät ime kosteutta itseensä ja jotka kestävät kemikaaleja. Nestemäiset epäpuhtaudet tulee siivota pyyhkeellä mahdollisimman nopeasti, jolloin ilmaan vapautuvien kemikaalien määrä jää mahdollisimman pieneksi [10].

14. Terveyshaitoilta suojautuminen

Terveydelle haitallisten päästöjen hallinnassa on ensisijaisesti pyrittävä estämään päästöjen syntyminen teknisillä ratkaisuilla tai työjärjestelyin. Mikäli tämä ei ole mahdollista, tulee päästöjen leviäminen estää. Viimeinen, mutta usein helpoin suojautumiskeino haitallisilta päästöiltä on henkilökohtainen suojautuminen [9].

Päästöjen syntyminen ehkäisy on harvoin mahdollista kun 3D-tulostuslaitteita käytetään. Työntekijän altistumista voidaan pienentää merkittävästi sijoittamalla tulostuslaitteet tilaan, jossa ei suoriteta pitkään kestäviä työvaiheita. Usein tämä ei ole mahdollista ja laitteet täytyy sijoittaa tilaan jossa tapahtuu muuta työskentelyä. Tällöin tilan ilmanvaihdon tai laitteen kohdepoiston tulee olla tarpeeksi tehokas tuulettamaan tulostusprosessista syntyvät altisteet pois tilasta. Tulostuslaitteiden kotelointi vähentää myös syntyvien päästöjen määrää tehokkaasti [10].

Kemikaaleilta ja/tai pölyltä suojaavia hengityssuojaimia tulee käyttää prosesseissa, joissa päästöjä tiedetään syntyvän merkittäviä määriä. Suojainten kunnosta tulee pitää huolta ja niiden käyttöikäen tulee kiinnittää huomiota. Hengityssuojaimia hankittaessa tulee huomioida filterien luokitus, jotta työpaikalle voidaan valita paras suojaus [17]. Taulukossa 2 on esitetty kemikaali- ja hiukkassuodatinluokat. Lisäksi merkittäviä päästöjä synnyttävät prosessit kannattaa suorittaa erillisissä tiloissa tai vetokaapissa.

Taulukko 2. Kemikaali- ja hiukkassuodatinluokat [17].

Kemikaalisuodattimet		Hiukkassuodattimet	
Luokka	Suojaus	Luokka	
A	Orgaaniset kaasut (kiehumispiste yli 65 °C)	P	Hiukkassuodatin
B	Epäorgaaniset kaasut	FF	Suodattava puolinaamari
E	Happamat kaasut	TM	Puhaltimella toimiva suodatin, puoli- tai kokonaamari
K	Orgaaniset, epäorgaaniset ja happamat kaasut, ammoniakki	TH	Puhaltimella toimiva suodatin, kypärä tai huppu
AX	Orgaaniset kaasut (kiehumispiste alle 65 °C)	-	-
Hg-P3	Elohopeahöyry	-	-

Markkinoilla on olemassa myös yhdistelmäsuodattimia, joissa yhdistyy kemikaalien ja hiukkasten suodattaminen. Suodatinta valittaessa tulee selvittää, ovatko työpaikan altisteet kemikaaleja, hiukkasia vai molempia. Usein paras ja varmin valinta on APEK P -luokan suodatin joka on yhdistetty puolinaamariin.

Kemikaalisuodattimien käyttöään määrittää ilman kemikaalipitoisuus ja työntekijän hengitystiheys. Suodattimissa on aktiivihiilisuodatin, jolla on tietty suodatuskapasiteetti ja kemikaalit pääsevät kulkeutumaan suodattimen läpi, kun kapasiteetti on ylitetty. Tällöin suodatin täytyy vaihtaa. Hiukkassuodattimien käyttöikään vaikuttaa ilman pölypitoisuus. Suodattimen kerätessä pölyä se alkaa tukkiutumaan, jolloin hengitysvastus kasvaa ja työstä tulee raskaampaa. Työntekijän on vaihdettava suodatin, kun se on kerännyt tarpeeksi pölyä ja työnteko käy raskaaksi [17].

Suodattimissa luokat 1-3 kuvaavat suodatustehokkuutta. Luokan 1 suodattimet suojaavat heikommin tai niiden suodatuskapasiteetti on matalin. Luokan 3 suodattimet puolestaan suodattavat epäpuhtauksia parhaiten tai suurimpia määriä. Lisämerkintä R tarkoittaa että suodatin on uudelleenkäytettävä eli sitä voi käyttää useampana päivänä [17].

Nestemäisiä ja jauhemaisia tulostusmateriaaleja käsitellessä tulee paljaat ihoalueet ja silmät suojata hyvin altistumisen ehkäisemiseksi. Pitkähihaiset ja -lahkeiset vaatteet sekä kemikaaleilta suojaavat käsi- neet ovat yksinkertainen ratkaisu. Suojahansikkaiden tulee kestää orgaanisia liuottimia, joten muovilaminaatista tai kumista valmistetut hansikkaat ovat paras valinta. Työntekijän kannattaa käyttää kevyttä suojahaalaria, mikäli työpaikalla esiintyy huomattavia määriä epäpuhtauksia. Tällöin epäpuhtaudet eivät kulje vaatetuksen mukana työpaikalta muualle työntekijän mukana. Silmät voivat olla erityisen herkat kiinteille, nestemäisille tai kaasumaisille altisteille. Usein paras suojautumiskeino on käyttää naamiollista silmiensuojainta jolloin silmien alueelle ei jää ilmarakoja, kuten sangallisissa silmiensuojaimissa [10, 17].

15. Yhteenveto ja pohdinta

Savonia-ammattikorkeakoulun LIVA-hankkeessa saatuja tietoja voidaan käyttää apuna, kun arvioidaan eri tulostusmenetelmistä syntyviä päästöjä ja kun työpaikalle valitaan sopivia henkilökohtaisia suojaimia työntekijöille. Ensimmäisenä tulee tarkastella päästöjen luonne, eli mitä terveydelle haitallisia altisteita työpaikalla esiintyy tai voi esiintyä ja kuinka paljon. Päästöjen pitoisuuksien havaittiin olevan pääasiassa kohtuullisella tasolla, paitsi tilanteissa joissa kappaleita käsiteltiin kemikaaleilla tai kun tulostusmateriaalina käytettiin jauhetta. Nopeasti ilmenevät haitalliset terveystaikutukset ovat harvinaisia, mutta jos altistuminen kestää vuosia tai vuosikymmeniä ovat erilaisten vakavienkin sairauksien puhkeaminen mahdollisia.

Tutkimuksessa saatiin runsaasti uutta tietoa eri 3D-tulostusmenetelmien ja jälkikäsitelyprosessien päästöistä. Saadut tulokset ovat pääasiassa suuntaa-antavia, sillä päästöjen määrään ja koostumukseen liittyvät useat tekijät, kuten tulostusprosessin lämpötila ja käytetty materiaali. Eri materiaalien havaittiin materiaalin pursotusmenetelmässä aiheuttavan hyvin erityyppisiä päästöjä joten niiden voidaan olettaa vaihtelevan eri materiaalien välillä myös muissa menetelmissä. Päästöjä mitattiin muista menetelmistä vain yhdestä materiaalista, jota mittauskohteessa käytettiin. Tutkittavaa on täten vielä hyvin paljon.

Mittauksia suorittaessa havaittiin 3D-tulostustekniikkaa hyödyntävien toimijoiden mielenkiinto laitteiden päästöihin liittyen ja päästöiltä suojautuminen nousi puheenaiheeksi jokaisessa tutkimuskohteessa. Etenkin hengityksensuojainten filteriluokitukset olivat mielenkiinnon kohteena useassa kohteessa. Materiaalien valmistajat olivat usein kysyttäessä suositelleet käytettäväksi tiettyä filteriluokkaa, mutta suositeltu luokka ei aina soveltunut parhaiten työkohteeseen. Kaikissa kohteissa henkilökohtaisia suojaimia oli työntekijöillä saatavilla, mutta niitä ei aina käytetty. Palautteen mukaan tutkimustulokset olivat motivoineet työntekijöitä käyttämään tarjottuja suojaimia säännöllisesti ja työpaikkakohtaiset tutkimustulokset oli otettu huomioon esimerkiksi työterveydenhuollossa.

Lähteet

[1] Työterveyslaitos 2016. Materiaalia lisäävän valmistuksen (3D-tu-
lostus) kaasu- ja hiukkaspäästöt eri työvaiheissa.
[http://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131891/Materiaalia%20lis%C3%A4%C3%A4v%C3%A4n%20valmistuksen%20%283D-tu-
lostus%29%20kaasu-%20ja%20hiukkasp%C3%A4st%C3%%B6t%20eri%20ty%C3%B6vaiheissa.pdf?sequence=1](http://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131891/Materiaalia%20lis%C3%A4%C3%A4v%C3%A4n%20valmistuksen%20%283D-tu-
lostus%29%20kaasu-%20ja%20hiukkasp%C3%A4st%C3%%B6t%20eri%20ty%C3%B6vaiheissa.pdf?sequence=1)

[2] Työterveyslaitos 2015. OVA-ohje: HIILIMONOKSIDI.
<http://www.ttl.fi/ova/hiilimono.html>

[3] Alonen A., Alonen L. & Hietikko E. 2016. Lisäävän valmistuksen
perusteet. Savonia-ammattikorkeakoulu Oy, ALVO-hanke 2016.

[4] Loughborough University 2017. Additive Manufacturing Research
Group.
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/>

[5] Mendes L., Kangas A., Kukko K., Mølgaard B., Säämänen A., Ka-
nerva T., Ituarte I. F., Huhtiniemi M., Stockmann-Juvala H., Partanen
J., Hämeri K., Eleftheriadis K. & Viitanen A-K. 2017. Characterization
of Emissions from a Desktop 3D Printer. *Journal of Industrial Ecology*
21: S94–S106.

[6] Sisäilmayhdistys 2008. Eri tekijöiden vaikutus oireisiin.
[http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Terveysvaikutukset/
Eri-tekijoiden-vaikutus-oireisiin](http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Terveysvaikutukset/
Eri-tekijoiden-vaikutus-oireisiin)

[7] Ligon S. C., Liska R., Stampfl J., Gurr M. & Mülhaupt R. 2017.
Polymers for 3D Printing And Customized Additive Manufacturing.
Chemical Reviews 117: 10212–10290.

[8] 3D Hubs 2017. Introduction to Material Jetting 3D Printing.
[https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jet-
ting-3d-printing#work](https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jet-
ting-3d-printing#work)

[9] Työterveyslaitos 2012. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden koko-
naispitoisuuden (TVOC) tavoitetasot teollisten työympäristöjen yleis-
ilmassa.
<https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/TVOC-tavoitetasot.pdf>

[10] Työterveyslaitos 2016. Tietokortti 34: Ohjeita turvalliseen 3D-tu-
lostukseen.

<https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2017/01/Ohjeita-turvalliseen-3D-tulostukseen.pdf>

[11] Kickstarter 2017. The Filament Safe – 3D Printing Material Storage Solution.

<https://www.kickstarter.com/projects/1162923316/the-filament-safe-3d-printing-material-storage-sol>

[12] The Getty Conservation Institute 2017. A Safe Place. Storage Strategies for Plastics.

http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/newsletters/29_1/storage.html

[13] Formlabs 2017. Resin Care.

<https://support.formlabs.com/hc/en-us/articles/115000018044-Resin-Care>

[14] EOS 2017. Material Management for EOS Plastic Additive Manufacturing Materials.

<https://www.eos.info/material-management-plastic>

[15] Työterveyslaitos 2013. Teollisesti tuotettujen nanomateriaalien tavoitetasoperustelumui-
stio.

https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/nanojen_tavoitetasot.pdf

[16] Työterveyslaitos 2016. Hengittyvän ja alveolijakeisen pölyn tavoitetasoperustelumui-
stio.

<https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/hengittyva-ja-alveolijakeinen-poly-tavoitetaso.pdf>

[17] Työterveyslaitos 2014. Henkilönsuojaimet työssä. Multiprint Oy, Vantaa 2014.

[18] Työterveyslaitos 2017. OVA-ohje: FORMALDEHYDI.

<https://www.ttl.fi/ova/formalde.pdf>

[19] Sculpteo 2017. 3D Printing up to 10 times faster: Sculpteo welcomes HP Multi Jet Fusion technology!

<https://www.sculpteo.com/blog/2017/07/04/3d-printing-up-to-10-times-faster-sculpteo-welcomes-hp-multi-jet-fusion-technology/>

Kuvalähteet

Kuva 1. Shapeways Material Sample Kit - Basic

<https://www.shapeways.com/product/QG2UWX2BB/material-sample-kit-basic>

Kuvat 2, 5, 8, 11, 14: Alonen A., Alonen L. & Hietikko E. 2016. Lisäävän valmistuksen perusteet. Savonia-ammattikorkeakoulu, ALVO-hanke.

Kuva 3: 3D-tulostus.fi

<https://www.3d-tulostus.fi/Profi3DMaker>

Kuva 4: Stratasys Ltd. 2017. Fortus 900mc.

<http://www.stratasys.com/3d-printers/fortus-900mc>

Kuva 6: Savonia-ammattikorkeakoulu, LIVA-hanke

Kuva 7: UnionTech

<http://en.union-tek.com/news/detail/9>

Kuva 9: 3D Hubs 2017. Formiga P100.

<https://www.3dhubs.com/3d-printers/formiga-p-100>

Kuva 10: Savonia-ammattikorkeakoulu, LIVA-hanke

Kuva 12: Projet3D

<http://projet3d.co.uk/>

Kuva 13: Stratasys

<http://www.stratasys.com/polyjet-systems>

Kuva 15: Projet3D

<http://projet3d.co.uk/>

Kuva 16: Voxeljet

<https://www.voxeljet.com/3d-drucksysteme/vx2000/>

Kuva 17: Savonia-ammattikorkeakoulu, LIVA-hanke



SAVONIA

3D-TULOSTUKSEN TERVEDELLE HAITALLISET ALTISTEET JA TYÖHYGIENIA

3D-tulostuslaitteiden käyttö yleistyy kaiken aikaa maailmanjaalaisesti. 3D-tulostusprosessien terveydelle haitallisista altisteista eli päästöistä julkisesti saatavilla oleva tieto on kuitenkin edelleen hyvin vähäistä eikä useimmista tulostusmenetelmistä ole julkaistu tutkimustuloksia lainkaan. 3D-tulostuslaitteiden käytön yleistyessä yhä useampi henkilö altistuu niiden päästöille töissä, oppilaitoksissa sekä vapaa-ajalla ja teollisen mittakaavan 3D-tulostusyritysten lisääntyessä syntyy uusi työntekijäryhmä, joka altistuu laitteiden päästöille päivittäin jopa vuosikymmenten ajan.

Tähän julkaisuun on koottu Savonia-ammattikorkeakoulu Oy:n LIVA-hankkeessa tutkittujen 3D-tulostusmenetelmien päästötutkimustulokset tiiviiksi tietopaketti. Lisäksi julkaisussa perehdytään lyhyesti tutkittuihin menetelmiin ja 3D-tulostustyöympäristön terveellisyyteen.



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

Pohjois-Savon liitto tukee
maakunnan
menestystä

