



Työterveyslaitos | Arbetshälsöinstitutet
Finnish Institute of Occupational Health

Materiaalia lisäävän valmistuksen (3D-tulostus) kaasu- ja hiukkaspäästöt eri työvaiheissa

Anna-Kaisa Viitanen
Anneli Kangas
Marika Huhtiniemi
Tomi Kanerva
Helene Stockmann-Juvala
Arto Säämänen
Kirsi Kukko
Jukka Tuomi
Jouni Partanen
Kimmo Kallonen
Kaarle Hämeri





Työterveyslaitos | Arbetshälsöinstitutet
Finnish Institute of Occupational Health

Materiaalia lisäävän valmistuksen (3D-tulostus) kaasu- ja hiukkaspäästöt eri työvaiheissa

TSR LOPPURAPORTTI NUMEROT 114374, 114406, 114337

Anna-Kaisa Viitanen, Anneli Kangas, Marika Huhtiniemi, Tomi Kanerva,
Helene Stockmann-Juvala, Arto Säämänen
Työterveyslaitos

Kirsi Kukko, Jukka Tuomi, Jouni Partanen
Aalto-yliopisto

Kimmo Kallonen, Kaarle Hämeri
Helsingin yliopisto



Työterveyslaitos

Työympäristö

PL 40

00251 Helsinki

www.ttl.fi

Toimitus: Anna-Kaisa Viitanen

Kansi: Ella Smeds

Valokuvat: Adolfo Vera, Tomi Kanerva

Piirroksat: Anna-Kaisa Viitanen, Tomi Kanerva, Kirsi Kukko, Kimmo Kallonen

© 2016 Työterveyslaitos ja kirjoittajat

Tutkimushanke on toteutettu Työsuojelurahaston tuella.

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain (404/61, siihen myöhemmin tehtyine muutoksineen) mukaisesti kielletty ilman asianmukaista lupaa.

ISBN 978-952-261-671-5 (nid.)

ISBN 978-952-261-670-8 (PDF)

Unigrafia, Helsinki

TIIVISTELMÄ

Materiaalia lisäävän valmistuksen (3D-tulostus) kaasu- ja hiukkaspäästöt eri työvaiheissa – tutkimushankkeessa selvitettiin 3D-tulostusalaan liittyvää työturvallisuutta kyselytutkimuksen, kokeellisten mittausten sekä mallinnuksen avulla. Tutkimustulosten perusteella työntekijät voivat altistua hiukkasmaisille epäpuhtauksille ja kaasumaisille yhdisteille hengitysteiden kautta 3D-tulostuksen eri työvaiheissa. Eri työvaiheita ovat 3D-tulostusmateriaalin käsittely, varsinainen 3D-tulostustyö, 3D-tulostetun kappaleen jälki- ja pintakäsittely sekä huolto- ja kunnossapitotyöt. Altistumisen havaittiin riippuvan mm. työvaiheesta, käytettävästä tulostustekniikasta sekä 3D-tulostusmateriaalista.

Hankkeen mittaukset jakautuivat pientulostimien ja teollisen mittakaavan tulostimien tutkimiseen. Pientulostimia käytetään erityisesti kirjastoissa, oppilaitoksissa ja toimistotyyppeissä työympäristöissä.

3D-tulostusmateriaalin käsittelyyn liittyen todettiin, että jauhemaiset materiaalit pölyvät ja voivat aiheuttaa ihon ja hengitysteiden ärsytysoireita työntekijöille. Metallitulostamisen yhteydessä käytetään metalleja, joista osa on syöpävaarallisia. Nestemäisiä tulostusmateriaaleja käsiteltäessä on tarpeen huomioida ihon suojaus. Erityisesti epoksihartsia ja muita kovettumattomia muovikemikaaleja käsiteltäessä on kiinnitettävä syytä erityiseen varovaisuuteen ja oikeaan suojautumiseen, sillä nämä materiaalit ovat voimakkaasti allergisoivia.

Koteloimattomia pientulostimia käytettäessä hengitysilmaan havaittiin vapautuvan nanohiukkasia. Tutkittaessa pientulostimille soveltuvia torjuntateknisiä ratkaisuja todettiin, että kotelointi, josta ilma johdetaan poiston avulla ulos työtiloista, torjuu nanohiukkaspäästöjä tehokkaasti. Teollisen mittakaavan tulostimet ovat tyypillisesti koteloituja. Teollisen mittakaavan tulostuksen yhteydessä nanohiukkaspitoisuudet olivat tyypillisen teollisuusympäristön tasolla tai jopa sen alle. Koteloinnin todettiin vähentävän nanohiukkasten vapautumista työpaikan ilmaan teollisen mittakaavan 3D-tulostimissa. Kuitenkin johtamalla päästöt ulos kotelosta, tehostuu kotelon suojaavaa vaikutusta myös teollisen mittakaavan 3D-tulostamisen yhteydessä.

3D-tulostettujen kappaleiden jälki- ja pintakäsittelyssä havaittiin käytettävän runsaasti erilaisia kemikaaleja. Osa käytetyistä kemikaaleista, kuten epoksi-, akrylaatti- ja isosyanaattiyhdisteet, ovat haitallisia, jolloin suojautumiseen tulisi kiinnittää erityistä huomiota käytettäessä tällaisia kemikaaleja. 3D-tulostettujen kappaleiden hionnassa todettiin vapautuvan pölyä.

Altistumista kemikaaleille ja materiaalipölylle voi tapahtua myös huolto- ja kunnossapitotöiden yhteydessä.

Tulosten perusteella laadittiin sekä työpaikoille että työterveyshuoltoon suunnatut ohjeistukset, jotka julkaistiin Työterveyslaitoksen Malliratkaisu- ja Tietokortti-formaattien alla. *Malliratkaisu: 3D-tulostuksen kemikaaliturvallisuus työpaikoilla* ja *Tietokortti: Ohjeita turvalliseen 3D-tulostamiseen* ovat vapaasti saatavilla Työterveyslaitoksen internet-sivuilla (www.ttl.fi/malliratkaisut, www.ttl.fi/tietokortit).

ABSTRACT

Gas and particle emissions at the different work stages of additive manufacturing (3D printing) –research project studied the work safety of 3D-printing by means of questionnaire survey, experimental measurements and indoor modelling. According to the results, during different work stages of 3D-printing, workers' may expose to particulate impurities and gas phase compounds via respiratory. Different work stages are handling of 3D-printing material, 3D-printing, post processing of 3D-printed objects and maintenance work. Workers' exposure was found to depend on e.g. the work stage, the printing technique and the material used.

The measurements of the research study divided to small scale 3D-printing and industrial 3D-printing. Small scale 3D-printers are being used especially in libraries, academies and office-like environments.

Related to handling of 3D-printing material it was found that dust released from powder form material may irritate the skin or airways of the workers. Some metal powders used in 3D-printing may be carcinogenic. When using 3D-printing materials in liquid form, appropriate chemical-resistant gloves should be used. Especially, epoxy chemicals and other reactive polymers must be handled safely while these chemicals are extremely sensitizing. Appropriate chemical-resistant gloves should be used, clothes should be protected against spatter and surfaces from getting soiled should be prevented.

When using 3D-printers that are not enclosed, nanoparticles were released to the breathing air. Enclosure with local exhaust ventilation was found to prevent the workers' exposure to nanoparticles. 3D-printers used in industrial applications are typically enclosed. When 3D-printing in industrial settings was studied, concentrations of nanoparticles was found to be on the level of typical industrial environment or even lower than that. It was concluded that enclosure prevents the nanoparticle emissions. Nevertheless, local exhaust ventilation added to the enclosure enhances the prevention of the emissions also in industrial settings.

During post-handling of 3D-printed objects, a number of different chemicals are being used. Some of the chemicals, such as epoxy, acrylate and isocyanate compounds are harmful and personal protective measures should be applied. Sanding of 3D-printed objects released dust.

Exposure to chemicals and dust may occur also during maintenance work.

According to the results, guidelines for workplaces and occupational health care were formulated. These can be found from the Finnish Institute of Occupational Health web site



(Model solution: Chemical Safety in 3D printing at workplace and Data card: Instructions for safe 3D printing).



ALKUSANAT JA KIITOKSET

Materiaalia lisäävän valmistuksen (3D-tulostus) kaasu- ja hiukkaspäästöt eri työvaiheissa – tutkimushanke käynnistyi 1.1.2015 ja päättyi 31.12.2016. Hanke toteutettiin yhteistyössä Työterveyslaitoksen, Aalto-yliopiston ja Helsingin yliopiston kanssa. Tutkimuslaitosten lisäksi hanketta rahoitti Työsuojelurahasto.

Haluamme kiittää tutkimushankkeen rahoittajia tutkimustyön mahdollistamisesta. Tutkimukseen osallistuneita yrityksiä haluamme kiittää hyvästä yhteistyöstä ja käytännön neuvoista tutkimushankkeen aikana. Työterveyslaitoksen, Aalto-yliopiston ja Helsingin yliopiston henkilökuntaa kiitetään avusta ja tuesta hankkeen aikana. Työterveyslaitokselta halusimme kiittää erityisesti Katri Oksasta työlääketiteen konsultoisesta hankkeen aikana, Pasi Polvea avusta mittausteknisten ratkaisujen kanssa sekä johtaja Tuula Liukkosta ohjauksesta ja tuesta. Helsingin yliopistolta erityiskiitokset Bjarke Mølgaardille ja Tareq Husseinille avusta sisäilmamallinnuksessa sekä Luís Mendesille yhteistyöstä emissiomittauksissa. Aalto-yliopiston tutkijaa Iñigo Flores Ituartea kiitetään 3D-tulostustekniikkaan liittyvien kysymysten konsultoinnista.

Tampereella, Espoossa ja Helsingissä joulukuussa 2016

Kirjoittajat



SISÄLLYS

1	Johdanto	9
1.1	Materiaalia lisäävän valmistus (3D-tulostus)	9
1.2	Työpaikan ilman epäpuhtaudet, HTP-arvot ja tavoitetasot	13
1.3	Hankkeen tavoitteet.....	15
2	Tutkimusasetelma, aineisto ja menetelmät	17
2.1	3D-tulostus suomalaisilla työpaikoilla.....	17
2.2	Mittaukset	17
2.2.1	Pientulostaminen.....	17
2.2.2	Teollinen tulostaminen.....	18
2.2.3	Mittausmenetelmät.....	20
2.3	Sisäilmamalli	21
3	Tulokset	22
3.1	Kansainvälisen kyselyn tulokset	22
3.2	Pientulostaminen.....	23
3.2.1	Torjuntateknisten keinojen tarpeellisuuden selvittäminen.....	25
3.2.2	Pientulostamisen torjuntatekniset keinot	27
3.3	Teollinen 3D-tulostus.....	27
3.3.1	Pitoisuustasot 3D-tulostuksessa.....	27
3.3.2	3D-tulostusmateriaalin käsittely ja laitteiden ylläpito	29
3.3.3	3D-tulostetun kappaleen jälki- ja pintakäsittely.....	31
4	Johtopäätökset	32
5	Suosituks	36
	Lähteet	37

1 JOHDANTO

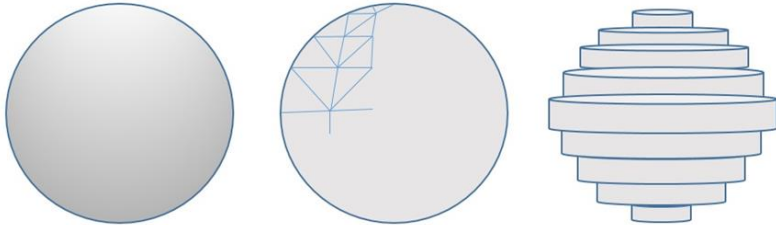
Hankkeen tavoitteena oli varmistaa materiaalia lisäävän valmistuksen eli 3D-tulostuksen turvallinen hyödyntäminen työpaikoilla. Työntekijöiden altistuminen erilaisille kemiallisille tekijöille tapahtuu yleensä hengitysteitse tai ihon kautta. Lisäksi voi altistua suun kautta mm. huonon työhygienian seurauksena. Työntekijöiden altistumista ilman epäpuhtauksille ja kemikaaleille 3D-tulostuksen eri työvaiheissa tutkittiin mittauksen ja havaintojen avulla laboratoriossa ja työpaikoilla. Tuloksia sovellettiin sisäilmamallinnukseen, jolloin hankkeen tulokset voitiin yleistää erilaisten työympäristöjen pitoisuuksien arviointiin.

Hankkeen tuloksena luotiin ohjeistus turvallisista työtavoista ja laitteiden oikeanlaisesta käytöstä työntekijöille, yrityksille, työterveyshuolloille ja maahantuojille. Hankkeessa säädetty mittaus- ja mallinnustulokset sekä kehitetyt riskinhallintakeinot mahdollistavat uusien 3D-tulostusta hyödyntävien tuotantolaitosten kehittämisen niin, että työturvallisuuskäsitteet voidaan huomioida jo suunnitteluvaiheessa.

1.1 Materiaalia lisäävän valmistus (3D-tulostus)

Materiaalia lisäävä valmistus on uusi valmistusmenetelmä, joka on yleistynyt viime vuosina maailmanlaajuisesti. Myös Suomessa toimii useita materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntäviä yrityksiä, ja ala kasvaa voimakkaasti. Materiaalia lisäävä valmistus on tullut kolmanneksi valmistusteknologiaryhmäksi materiaalia poistavien ja materiaalia muovaavien teknologioiden rinnalle. Kyseessä on erittäin harvinainen ilmiö teollisen valmistuksen historiassa, sillä materiaalia poistavien menetelmien kehitys on alkanut jo ainakin 40 000 vuotta sitten ja materiaalia muovaavien 7 000 vuotta sitten. Ensimmäinen kaupallinen materiaalia lisäävän valmistuksen laite myytiin vuonna 1988.

Materiaalia lisäävä valmistus ja siihen kansainvälisen standardin mukaan alaryhmänä kuuluva 3D-tulostus on yhteinen nimitys ryhmälle valmistustekniikoita, joilla fyysinen kappale valmistetaan suoraan numeerisen määrittelyn (3D-CAD) pohjalta kerros kerrokselta nopeasti, täysin automaattisesti, geometrisilta rajoituksiltaan vapaassa prosessissa (kuva 1). Vaikka 3D-tulostus on virallisen standardin mukaan materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien osajoukko, puhekieleen ja moniin yhteyksiin nämä kaksi termiä ovat vakiintuneet synonyymeiksi.

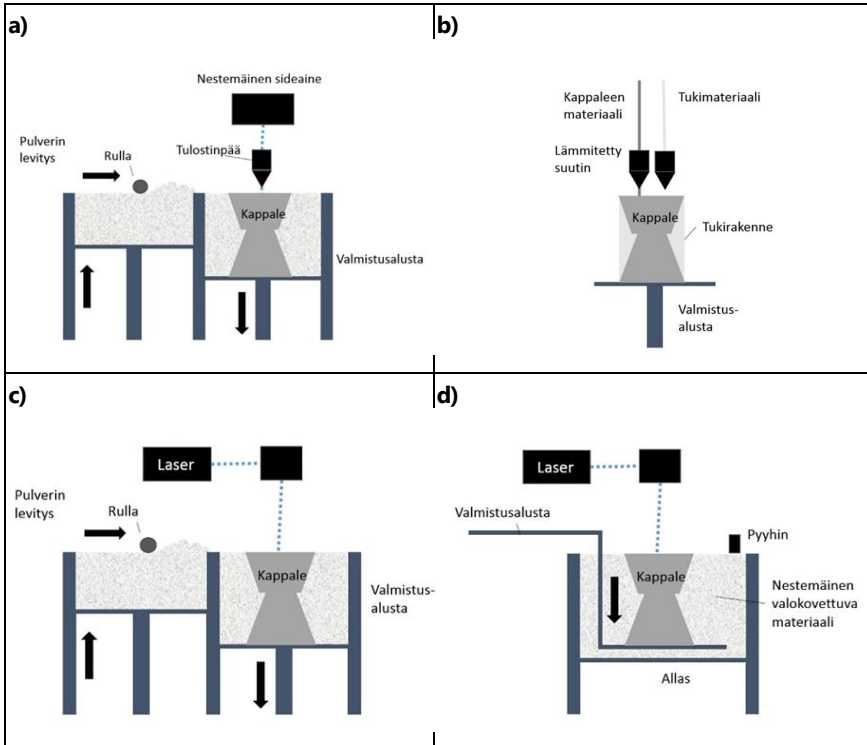


Kuva 1. Kappaleen matemaattisesti eksakti esitysmuoto (CAD), joka tallennetaan stl-kolmioverkko muotoon 3D-tulostimia varten. 3D-tulostimet käyttävät tätä de facto-standardia kerros kerrokselta viipaloinnissa.

SFS-ISO/ASTM 52900 Standardi on vuonna 2016 määritellyt seitsemän 3D tulostusmenetelmää (SFS-ISO/ASTM 2016), jotka selkeyttävät aikaisemmin käytössä olleiden kaupallisten menetelmänimien laajaa ja osin epäselvää kirjoa. Nämä ovat:

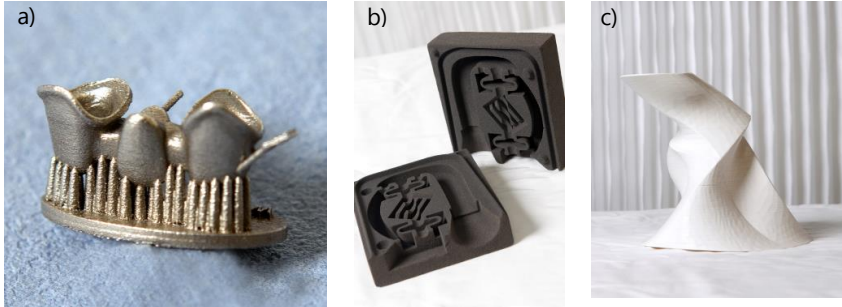
- sideaineen suihkutus
- suorakerrostus
- pursotus
- materiaalin suihkutus
- jauhepetisulatus
- kerroslaminointi
- valokovetus altaassa

Tässä hankkeessa keskityttiin tutkimaan näistä pursotusta, sideaineen suihkutusta, jauhepetisulatasta ja valokovetusta altaassa. Tutkittujen tulostusmenetelmien toimintaperiaatteet on esitetty kuvissa 2a-d.



Kuva 2a-d. Yleisimpien tulostusmenetelmien periaatteet a) sideaineen suihkutus b) purсот c) jauhahetisetulatus d) valokovetus altaassa.

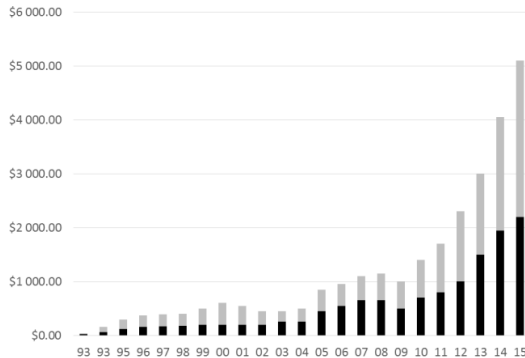
Kaikki 3D-tulostimet valmistavat kappaleita kerros-kerrokselta –menetelmällä. Valmistusprosessi 3D-tietokonemallista on varsin yksinkertainen verrattuna perinteiseen koneistukseen tai esimerkiksi työkalujen valmistamiseen metallista. 3D-tulostuksen teolliset sovellukset jakautuvat 1) prototyyppiin, 2) työvälineiden ja 3) lopputuotteiden valmistukseen (Tuomi and Vihtonen 2007). Kuvassa 3 esitellään esimerkkejä 3D-tulostetuista kappaleista.



Kuva 3a-c. 3D-tulostettuja esimerkkikappaleita lääketieteestä, teollisuudesta ja taiteesta: a) hammassilta, jossa on tukimateriaali vielä irrottamatta b) valumuotti ja c) taideteos.

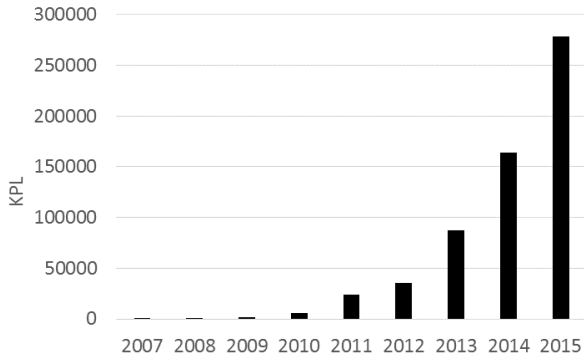
3D-tulostimissa käytettävä materiaalivalikoima on hyvin laaja. Käytettävissä on erilaisia muoveja, metalleja ja esimerkiksi hiekka ja vaha valusovelluksia varten. Muovien osalta tulostusmateriaalina käytetään tyypillisesti ABS (akryliniiriilbutadieenistyreeni) ja PLA (polylaktidi) -muoveja ja vaativimmissa sovelluksissa mm. PEEK:a (polyeetterieetteriketoni) ja kuitulujitteisia muoveja. Lääketieteellisissä sovelluksissa käytetään mm. titaania ja kobolttikromia (Tuomi ym. 2009; Salmi ym. 2012; Mäkitie ym. 2010).

Teollisuudessa 3D-tulostuksen sovellukset lisääntyvät nopeasti (Gausemeier ym. 2012). Alan liikevaihdon kasvu on tällä hetkellä noin 30 % vuositasolla. Kuvassa 4 on eritelty tulostettujen tuotteiden myynnin kehitys (mustat palkit) ja alan valmistuspalvelujen (harmaat palkit) kehitys. Vuonna 2015 alan kokonaisliikevaihto oli luokkaa 5,1 Mrd. USD.



Kuva 4. 3D-tulostusmarkkinan globaali kehitys jaettuna tulostettujen tuotteiden myynnin kehitykseen (mustat palkit) ja alan valmistuspalvelujen (harmaat palkit) kehitykseen. (Wohlens 2016 mukailleen)

Halvemman hintaluokan pursotinlaitteiden, ns. pientulostimien määrä on vasta aivan viimevuosina noussut voimakkaasti esiin. Kuvassa 5 on kuvattu näiden alle 5000 USD hintaluokan laitteiden kappalemääräisen myynnin kehitys.



Kuva 5. Alle 5000 USD hintaisten 3D tulostimien globaali kappalemääräinen myynnin kehitys. (Wohlers 2016 mukailten)

3D-tulostuksen kasvusta kertoo myös konsulttiyhtiö Gartnerin kesällä 2016 julkaisema, ainoastaan 3D-tulostusteknologiaan keskittyvä Hype-käyrä, joka kuvaa sekä kansainvälistä että Suomen tilannetta 3D-tulostimien yleistymisen ja odotusten osalta. Merkittävää näkyvyyttä viime vuosien aikana saanut ”pientulostaminen” on tällä käyrällä pikkuhiljaa ohittanut korkeimpien odotusten aseman. Vastaavasti 3D-tulostuksen sovellukset yrityksissä ovat jo ohittaneet tämän vaiheen ja ovat vakaan kasvun ja yleistymisen vaiheessa. (Gartner 2016)

Suomessa alan piirissä työskentelee tällä hetkellä vielä suhteellisen vähän työntekijöitä (arviolta muutamia satoja alan yrityksissä), mutta ala kasvaa voimakkaasti ja sillä on merkittäviä välillisiä vaikutuksia myös työllisyyden kannalta. Voidaankin olettaa, että 3D-tulostus tulee koskettamaan yhä kasvavaa työntekijämäärää tulevina vuosina.

1.2 Työpaikan ilman epäpuhtaudet, HTP-arvot ja tavoitetasot

Hiukkaset voivat olla kiinteitä tai nestemäisiä. Hiukkaset voidaan luokitella niiden kokonsa perusteella pieniin alle 1 µm läpimitan ja kärkeisiin yli 1 µm läpimitan hiukkasiin. Hiukkasten koko kertoo niiden syntytavasta ja vaikuttaa myös hiukkasten kulkeutumiseen hengityselimistössä (Starck ym. 2008). Hiukkaskoon pienetessä yhä suurempi osa hiukkasista pääsee tunkeutumaan syvälle hengityselimistöön (Starck ym. 2008). Karkeat hiukkaset jaetaan työhygieniassa standardeissa EN 481 (CEN 1993) ja ISO 7708 (ISO

1995) esitetyn sopimuskäyrän mukaisesti hiukkasen aerodynaamisen halkaisijan ja koon mukaan alveolijakeeseen, keuhkojakeeseen ja hengittyvään jakeeseen. Jaottelu on terveysperusteinen ja jakeet kuvaavat hiukkasten kulkeutumisalueita hengityselimistössä. Hengittyvä jae koostuu alle 100 µm:n hiukkasista, jotka sisäänhengittyvät nenän ja suun kautta. Keuhkojakeen hiukkaset kerääntyvät kurkunpään alueelle sopimuskäyrän mukaisen leikkausrajan ollessa 10 µm. Alveolijakeen hiukkaset kulkeutuvat keuhkorakkuloihin asti leikkausrajan ollessa 4 µm (ISO 1995). Pienet alle 0,1 mikrometrin hiukkaset ovat ns. nanohiukkasia, joihin lukeutuvat myös tässä raportissa tarkoitettut nanohiukkaset. EU-komission suosituksen mukaan puhuttaessa nanomateriaaleista tarkoitetaan 1 nm -100 nm:n läpimitan hiukkasia, jotka voivat olla peräsin luonnollisista tai tuotetuista lähteistä (EU 2011).

Muovien lämpöhajoamisessa muodostuu kiinteiden ja nestemäisten aerosolien lisäksi kaasumaisia yhdisteitä. Lämpöhajoamistuotteiden määrään ja laatuun vaikuttaa mm. raaka-aineena käytetyn polymeerin koostumus ja määrä, lisäaineiden määrä ja laatu, sekä lämpötila. Esimerkiksi polystyreenin keskeisiä lämpöhajoamistuotteita ovat mm. muoviaerosolit, styreeni ja formaldehydi (Työterveyslaitos 2011).

Hiukkasia ja muita epäpuhtauksia voi vapautua työilmaan joko ulkoilmasta ilmanvaihdon kautta tai erilaisista sisälähteistä. Esimerkiksi lasertulostinten on havaittu tuottavan nanohiukkasia ympäristöön (Koivisto ym. 2010) ja muodostavan myös sivutuotteena otsonia (Lee ym. 2001). Kirjallisuudesta löytyy myös 3D-tulostukseen liittyviä julkaisuja, joissa käsitellään 3D-tulostuksessa vapautuvia hiukkasmaisia ja kaasumaisia päästöjä. Päästöjä on tutkittu erityisesti työpöytäkokoisilla 3D-tulostimilla muovipolymeeriä käyttäen, joista yleisimpinä akryliiniriilibutadienistyreeniä (ABS) ja biohajoavaa polylaktidia (PLA). Erilaisten 3D-tulostinten toimintaa ja emissiopäästöjä on tutkittu emissiokammioissa, huoneiloissa tai molemmissa (Afshar-Mohajer ym. 2015; Azimi ym. 2016; Yi ym. 2016; Mendes ym. 2017). Pöytämallin 3D-tulostinten on todettu vapautuvan nanohiukkasten lisäksi erilaisia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, kuten esimerkiksi styreeniä (Azimi ym. 2016, Mendes ym. 2017) ja formaldehydiä (Mendes ym. 2017), joiden päästöt ovat liittyneet tulostettavan materiaalin koostumukseen.

Sosiaali- ja terveysministeriö on antanut ohje-arvot (HTP-arvot) yli 500 aineelle tai ainerihmälle. HTP-arvot ovat työpaikan ilman epäpuhtauksien haitalliseksi tunnettuja pitoisuuksia, jotka on tarkoitettu huomioitavaksi arvioitaessa työpaikan ilman puhtautta ja työntekijän altistumista. HTP-arvo annetaan kahdeksan tunnin altistumiselle ja/tai lyhytaikaiselle altistumiselle (15 min). Hiukkasmaisten altisteiden osalta HTP-arvot ovat pääasiassa annettu ko. kemikaalien pölyn hengittyvälle jakeelle, mutta joidenkin aineiden kohdalla HTP-arvot koskevat alveolijaetta (STM 2014). Spesifijä kemikaaleja koskevien HTP-

arvojen lisäksi HTP-arvot on annettu mm. orgaanisen ja epäorgaanisen pölyn hengittyville jakeille. Nanohiukkasille ei ole virallisia terveysperusteisia raja-arvoja Suomessa eikä muissakaan maissa.

Tavoitetasot ovat Työterveyslaitoksen suosittelemia altistumisen tasoja, joilla terveysriskit ja -haitat ovat olemattomia/minimaaliset ja joiden voidaan lisäksi katsoa tukevan viihtyvyyttä ja hyvinvointia. Työterveyslaitos on vuonna 2013 julkaissut tavoitetasot teollisesti tuotetuille nanomateriaaleille. Nämä pohjautuvat varovaisuusperiaatteeseen, sillä monien nanomateriaalien terveysvaikutuksista ei ole tarpeeksi tietoa terveysperusteisten arvojen ehdottamiseksi (Työterveyslaitos 2013). Teollisesti tuotetuille nanohiukkasille annetut tavoitetasot ovat 8-tunnin altistumisajalle 20 000 hiukkasta/cm³ (tiheys > 6000 kg/m³) ja 40 000 hiukkasta/cm³ (tiheys < 6000 kg/cm³) pitoisuudesta, josta tausta on vähennetty (Työterveyslaitos 2013). Tässä raportoiduista arvoista ei ole vähennetty taustapitoisuutta. Hankkeessa tutkitut nanohiukkaset eivät olleet teollisesti tuotettuja vaan ne ovat syntyneet prosessin sivutuotteena (ns. tahattomasti tuotetut nanohiukkaset). Kuitenkin tahattomasti tuotetuille nanohiukkasille asetettujen raja-arvojen ja tavoitetasojen puuttuessa sovelletaan tässä em. teollisesti tuotettujen nanohiukkasten tavoitetasoja tahattomasti tuotetuille nanohiukkasille.

Työterveyslaitos on lisäksi äskettäin julkaissut tavoitetasot hengittyvälle ja alveolijakeiselle pölylle, joita voidaan soveltaa sellaisille pölyille, joilla ei ole erityisiä toksisia vaikutuksia esimerkiksi kemiallisesta koostumuksesta johtuen (Työterveyslaitos 2016). Myös muoviaerosolille on annettu tavoitetaso (Työterveyslaitos 2011).

1.3 Hankkeen tavoitteet

Tutkimushankkeen ensisijaisena tavoitteena oli varmistaa turvallinen työskentely 3D-tulostustekniikkaa hyödyntävillä työpaikoilla. Hankkeessa selvitettiin mittausten ja asiantuntija-arvioiden avulla sellaiset työvaiheet, joissa työntekijöiden on mahdollista altistua hengitysilmän kaasu- tai hiukkaspäästöille tai kemikaaleille.

Hankkeen keskeiset tavoitteet:

- Selvittää nykyinen työturvallisuuden taso sekä kehittämisen tarve Suomessa toimivien 3D-tulostusta hyödyntävien yritysten keskuudessa
- Pientulostimien aiheuttamien päästöjen määrittäminen sekä soveltuvien torjuntateknisten keinojen selvittäminen
- Työntekijöiden henkilökohtaisten altistumistasojen selvittäminen teollisessa 3D-tulostustyön yhteydessä sekä riskinhallintakeinojen määrittäminen
- Teollista 3D-tulostustekniikkaa hyödyntävien työpaikkojen yleisten pitoisuustasojen selvittäminen sekä riskinhallintakeinojen määrittäminen



- Työpaikoilla käytössä olevien kemikaalien tunnistaminen ja työntekijöiden suojautumistarpeen määrittäminen
- Mittaustulosten saattaminen yleistettävään muotoon mallinnuksen avulla
- Ohjeistuksen laatiminen turvallisista työskentelykäytännöistä 3D-tulostusta hyödyntäville työpaikoille ja työterveyshuoltoon
- Hankkeen tuloksista tiedottaminen

2 TUTKIMUSASETELMA, AINEISTO JA MENETELMÄT

Tutkimushankkeen kokeellinen osuus jakautui 3D-tulostusta hyödyntävän alan turvallisuustilannetta kartoittavaan kyselytutkimukseen, kokeellisiin mittauksiin sekä mittaustulosten mallinnukseen.

2.1 3D-tulostus suomalaisilla työpaikoilla

Hankkeen aikana kartoitettiin 3D-tulostuksen nykytilaa Suomessa tavoitteena selvittää, mikä on 3D-tulostustekniikoiden suuntaukset ja alan kehitys. Kartoitukseen liittyen pyrittiin myös muodostamaan arvio siitä, mitkä käytännöt vallitsevat Suomessa liittyen työtöihin, menetelmiin ja työturvallisuuteen. Tätä tärkeää tietoa kerättiin koko hankkeen ajan, varmistaen, että hankkeella on nopeasti kehittyvän alan viimeisintä tietoa. Kartoitus jakautui kahteen osioon: Suomen nykytilanne sekä kansainvälinen kysely, jossa käsiteltiin mm. työturvallisuutta. Kyselytutkimuksen menetelmät on kuvattu tarkemmin tieteellisessä artikkelissa Kukko ym. 2017.

2.2 Mittaukset

Kokeelliset mittaukset jakautuivat pientulostimien päästöjen mittaukseen sekä teollisen mittakaavan 3D-tulostusta hyödyntävillä työpaikoilla tehtyihin mittauksiin.

2.2.1 Pientulostaminen

3D-tulostuksessa vapautuvia hiukasmaisten ja kaasumaisten päästöjen pitoisuuksia tutkittiin laboratoriossa kontrolloiduissa olosuhteissa tulostamalla materiaalin pursotukseen perustuvalla pöytämallin 3D-tulostimella (miniFactory Oy, Finland, model Education Edition Single Extruder). Tulostuksessa syntyviä päästöjä mitattiin akryylinitriilibutadienistyreeni-muovin (ABS) ja biohajoavan polylaktidi-muovin (PLA) tulostuksessa. Esimerkki nauhamaisista tulostusmateriaaleista on esitetty kuvassa 6. Tulostuslämpötilat vaihtelivat materiaalista ja koejärjestelystä riippuen välillä 200 - 250 °C. (Mendes ym. 2017)

Laboratoriomittaukset tehtiin kahdessa eri koejärjestelyssä. Ensimmäisessä koejärjestelyssä 3D-tulostin sijoitettiin emisioammioon, jonka tilavuus oli noin 0,18 m³. Emissioammioon johdettu voimakas ilmavirta suodatettiin täysin hiukkasten osalta HEPA-suodattimella. Ilmavirtauksen avulla varmistettiin



Kuva 6. Nauhamaista 3D-tulostusmateriaalia.

tulostuksessa vapautuvien hiukkasten nopea kulkeutuminen mittalaitteelle. Kaasu- ja hiukaspitoisuudet mitattiin emissiokammion ulostulosta. Toisessa koejärjestelyssä 3D-tulostinta käytettiin noin 81 m³ kokoisessa ruostumatonta terästä ja lasia olevassa laboratorio-tilassa. Tulostin sijoitettiin laboratoriohuoneen keskiosaan työpöydälle. Huoneilman sekoittumista tehostettiin pöytätuulettimien avulla. Laboratorion tuloilma suodatettiin H13-tyyppin suodattimella mahdollisimman pienen taustahiukaspitoisuuden saavuttamiseksi. Tilan ilmanvaihtokerroin oli noin 5 kertaa tunnissa, joka kuvaa oleskelutilojen ilmanvaihtokertoimen vähimmäisvaatimuksia (Ympäristöministeriö, 2012). (Mendes ym. 2017)

Koejärjestelyt on kuvattu yksityiskohtaisesti tieteellisessä artikkelissa Mendes ym. (2017).

Pientulostamiseen soveltuvien 3D-tulostimien käytöstä aiheutuvien hiukkasmaisten epäpuhtauksien hallintaan käytettävien torjuntateknisten keinojen toimivuutta ja tehokkuutta arvioitiin kontrolloiduissa olosuhteissa toimistohuoneessa. 3D-tulostuksessa vapautuvia hiukkasmaisten ja kaasumaisten päästöjen pitoisuuksia tutkittiin tulostamalla kuluttajakäyttöön tarkoitettua pöytämallin 3D-tulostimella (miniFactory Oy, Finland). Tulostuksessa syntyviä päästöjä mitattiin ABS-muovin tulostuksessa käyttäen erilaisia torjuntateknisiä ratkaisuja: kotelointi, kohdepoisto, ilmastointi. Mittausjärjestelyt on kuvattu yksityiskohtaisesti tieteellisessä artikkelissa Viitanen ym. (2017).

2.2.2 Teollinen tulostaminen

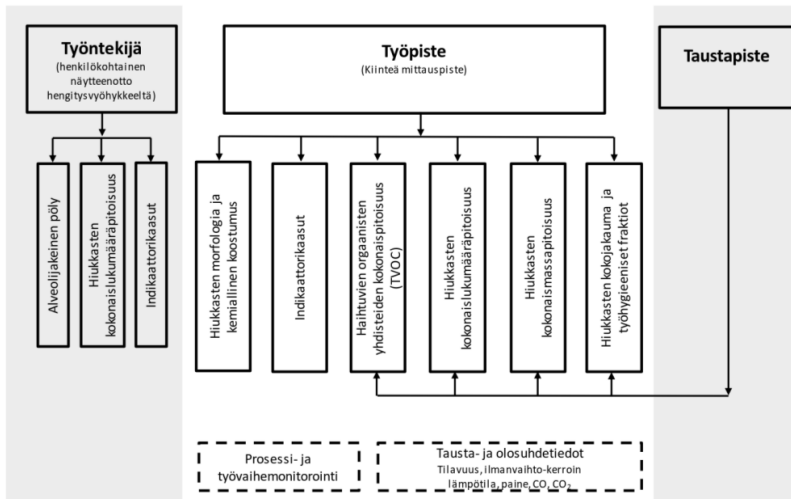
3D-tulostamista tutkittiin erilaisissa työympäristöissä, joissa hyödynnettiin 3D-tulostamista teollisessa mittakaavassa. Esimerkki teollisen mittakaavan 3D-tulostimesta on esitetty kuvassa 7. Työpaikoilla tutkittiin kaasu- ja hiukaspitoisuuksia jatkuvatoimisesti viiden vuorokauden ajan kolmella eri työpaikalla. Mittaukset suoritettiin kaikissa kohteissa kolmesta eri mittauspisteestä: kiinteä mittauspiste, työntekijän hengitysvyöhyke ja taustapiste (Kuva 8). Kiinteä mittauspiste sijaitsi lähellä tutkimuksen kohteena ollutta 3D-tulostinta. Hengitysvyöhykemittauksiin käytettiin kannettavia mittalaitteita, joita työntekijä kantoi mukanaan mittausten ajan. Taustapistemittauksissa mitattiin tiloihin tulevaa ilmaa tuloilmakanavan edestä. Taustapistemittausten avulla saatiin tietoa ilmanvaihdon mukana tiloihin



Kuva 7. Sideaineen suihkutukseen perustuva teollinen 3D-tulostin.

kulkeutuvien hiukkasten määrästä ja laadusta, jolloin prosessihiukkaset voitiin erottaa taustahiukkasista.

Kaikki mittauskohteet olivat teollisuustiloja, joissa oli käytössä samanaikaisesti useampia tulostimia. Hankkeen mittauksien aikana käytetyt 3D-tulostimet olivat kaikki koteloituja malleja. Lisäksi osa tulostimista oli kokonaan eristetty työpaikan ilmasta. Erityisesti metallitulostukseen käytetyt 3D-tulostimet olivat lisäksi varustettu sisäisellä kaasukierrolla, jolloin kyseessä oli suljettu systeemi. Mittausten aikana tiloissa työskenteli 3D-tulostuksen parissa alle kymmenen henkilöä. Lisäksi tiloissa oli muuta toimintaa. Osassa kohteista tulostimet oli sijoitettu tulostushuoneisiin erilleen muista tiloista.



Kuva 8. Työpaikkamittauksissa käytetty mittausjärjestely.

Työympäristöissä tutkittiin 3D-tulostukseen liittyen materiaalin esikäsitteilyä, varsinaista tulostusta, kappaleiden jälkikäsitteilyä ja työstöä sekä laitteiden puhdistus- ja huoltotöitä. 3D-tulostettujen kappaleiden jälki- ja pintakäsittelyyn käytetään erilaisia menetelmiä ja kemikaaleja. Taulukossa 1 on esitetty työpaikkamittausten aikana tutkitut tulostustekniikat, tulostukseen käytetyt materiaalit, tulostimissa käytetyt torjuntatekniset ratkaisut ja tuotantoympäristö. Mittausjärjestelyt on kuvattu yksityiskohtaisemmin tieteellisessä artikkelissa Kangas ym. (2017).

Taulukko 1. Työpaikkamittauksissa tutkitut tulostustekniikat ja –materiaalit sekä tulostimessa käytetty torjuntatekninen ratkaisu.

Tulostustekniikka	Tulostusmateriaali	Torjuntatekninen ratkaisu	Ympäristö
Sideaineen suihkutus	Kipsijauhe	Koteloitu, ei ilmanvaihtoa	Teollisuushalli, useita tulostimia, osittain yhtä aikaa käytössä
Pursotustekniikka	ABS-muovi	Koteloitu, ei ilmanvaihtoa	Teollisuushalli, useita tulostimia, osittain yhtä aikaa käytössä
Jauhepetisulatus	Titaanijauhe	Koteloitu, erillinen ilmanvaihto, kohdepoisto	Tulostushuone, kolme tulostinta, osittain yhtä aikaa käytössä
Jauhepetisulatus	Polystyreeni	Koteloitu, ilmanvaihto	Tulostushuone, kaksi tulostinta, osittain yhtä aikaa käytössä
Jauhepetisulatus	Polyamidi	Koteloitu, ilmanvaihto	Tulostushuone, kaksi tulostinta, osittain yhtä aikaa käytössä
Valokovetus altaassa	Epoksiharts	Koteloitu, ei ilmanvaihtoa	Tulostushuone, viisi tulostinta, osittain yhtä aikaa käytössä

2.2.3 Mittausmenetelmät

Mittauksiin käytetyt hiukkasmittalaitteet perustuvat keskenään eri tekniikkoihin. Hiukkas-ten lukumäärää mittaavia laitteita ei ole kalibroitu pitoisuuden suhteen ja lisäksi hiukkas-
mittalaitteiden mittaama hiukaskokoalue vaihtelee laitteiden välillä, joten mittaustuloksia tarkastellessa ei laitteiden ilmoittamia pitoisuuksia voida suoraan vertailla. Tämä on hyvä huomata erityisesti työpisteen ja taustan pitoisuuksia tarkasteltaessa. Pitoisuuden muutokset ovat kuitenkin vertailukelpoisia ja taustamittauksen avulla voidaan osoittaa, johtuvatko työtilan pitoisuuden muutokset sisälähteiden aiheuttamista päästöistä vai taustapitoisuudessa tapahtuvista muutoksista.

Tulosten yhteydessä nanohiukkasten pitoisuudet ilmoitetaan yksikössä hiukkasta/cm³, joka tarkoittaa hiukkasten lukumäärää ilman tilavuusyksikköä kohden. Kuvissa hiukkasten lukumääräpitoisuus on piirretty logaritmiselle asteikolle.

Pienhiukkasten pitoisuus suoraan osoittavilla mittalaitteilla ilmoitetaan sekä lukumääräyksikössä hiukkasta/cm³ että massayksikössä µg/m³ käytetystä tekniikasta riippuen. Keräysnäytteissä hiukkasten pitoisuus punnitaan, jolloin pitoisuus on aina massayksikössä mg/m³.

Työntekijän altistumista tarkasteltiin myös videomonitorointilaitteistolla. PIMEX (Picture Mix Exposure) -menetelmä perustuu työympäristön altistusmittauksessa otetun videokuvan ja suoraan osoittavan mittalaitteen signaalin yhdistettyyn esitykseen. Visualisointi mahdollistaa muutoin näkymättömien työympäristötekijöiden havainnoinnin ja on monissa tapauksissa erittäin arvokas apuväline työperäisen riskien tehokkaassa vähentämisessä (Rosen ym. 2005). Menetelmä mahdollistaa tarkastelun kohteena olevan prosessin reaaliaikaisen analysoinnin työpisteellä sekä jälkikäteen tapahtuvan käsittelyn, esim. koulutuksissa.

Keräysnäytteet analysoitiin laboratoriossa. Työterveyslaitoksen laboratoriotoinnot on akkreditoitu testauslaboratorio T013 (FINAS-akkreditointipalvelut, ISO/IEC 2005). Osa käytetyistä näytteenkeräys- ja analyysimenetelmistä olivat akkreditoituja.

2.3 Sisäilmamalli

Sisäilmamallinnus mahdollistaa mittaustulosten saattamisen yleistettävään muotoon. Mallinnuksen avulla voidaan simuloida erilaisia sisätiloja ja määrittää päästölähteen vaikutukset erilaisiin tilaratkaisuihin huomioiden tilan koko ja ilmanvaihto. Mallinnuksen avulla voidaan myös ratkaista tarvittavan ilmanvaihdon määrä tai torjuntateknisten ratkaisujen tarve kun tilan koko ja päästölähteen voimakkuus tunnetaan.

Sisäilmamalli perustuu tasapainoyhtälöön, joka ottaa huomioon sisäilman hiukkaspitoisuuden aikamuutokseen vaikuttavat muuttujat. Muuttujia ja vaikuttavia tekijöitä ovat ulkoilman hiukkaspitoisuus, tulo- ja poistoilmanvaihto, suodattimet tuloilmanvaihdossa, hiukkasten laskeutuminen sisätilan pinnoille, hiukkasten kasaantuminen sekä hiukkaslähteet. Mallissa oletetaan sisäilman olevan hyvin sekoittunutta, eli hiukkaspitoisuus on sama kaikkialla sisätilassa. Mallinnus toteutetaan numeerisesti tietokoneella laskien. Tutkimuksessa käytetty malli on Helsingin yliopiston ilmakehätieteiden osaston kehittämä, ja sitä on käytetty useissa tutkimuksissa (Hussein ym. 2006; Koivisto ym. 2010).

3 TULOKSET

3.1 Kansainvälisen kyselyn tulokset

Kyselyyn saatiin 336 vastausta, joista 170 oli Suomesta. Vastauksista 30 % tuli pienistä yrityksistä (< 10 henkeä), 25 % suurista yrityksistä (> 1000 henkeä). Vastanneista suurin edustus (18 %) tuli tutkimuslaitoksilta ja yliopistoilta ja seuraavat ryhmät olivat teollisten laitteiden valmistus, kuluttajatuotteet ja konsultointi n. 11 %:n edustuksella. (Kukko ym. 2017)

Suomessa käytetyistä 3D tulostusmateriaaleista ylivoimaisesti käytetyimmät olivat muovifilamentit, joihin kuuluvat ABS ja PLA. Niitä kertoi käyttävänsä 75 % vastanneista. Nämä materiaalit ovat käytössä erityisesti pientulostamiseen sopivissa pursotuslaitteissa. Tasaväkisesti kolme seuraavaksi yleisintä olivat muovipulverit (sintrattavat muovit, Nylon), muovihartsit ja metallit (ruostumaton teräs, alumiini, pronssi). Näiden suosio vaihteli 38 prosentista 32 prosenttiin. Muovi- ja metallijauheita käytetään erityisesti jauhepetisuluslaitteissa. Muovihartsia käytetään valokovetus altaassa- sekä materiaalin suihkutus -laitteissa. Muut materiaalit joihin kuuluivat esim. titaaniseokset, PEEK ja muut vaativiin olosuhteisiin tarkoitetut muovit, arvometallit ja vaha olivat selkeästi vähemmän käytettyjä, korkeimman suosion ollessa 17 %. (Kukko ym. 2017)

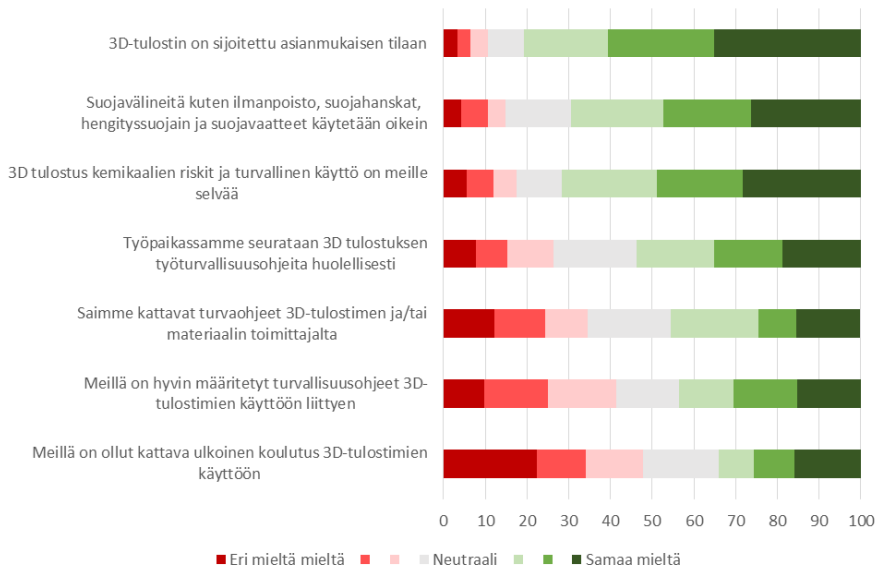
Kyselytutkimuksen avulla saatiin hankkeen kannalta tärkeää tietoa mm. materiaalia lisäävän valmistuksen yhteydessä käytettävistä jälkikäsittelykemikaaleista sekä siitä, miten kyselyyn vastaajat kokevat työturvallisuuteen liittyvien asioiden tilan työpaikoilla. Käytetyimmät jälkikäsittelykemikaalit olivat alkoholi tai isopropanoli (40 %), asetoni (27 %), vesi (26 %), epoksi (22 %) ja muut liottimet (22 %). Myös liimat, maalit, lipeä ja erilaiset mekaaniset menetelmät mainittiin. (Kukko ym. 2017)

Kuvassa 9 on esitetty kyselyn tulokset turvallisuudesta työpaikoilla Suomessa. Erityisen huomattavaa on, että tulostimien koetaan olevan sopivassa ympäristössä ja että torjuntatekniset ratkaisut (ilmanvaihto ja suojarusteet) ovat riittävät. Sen sijaan lisäkoulutusta 3D-tulostuslaitteen käyttöön kaivattaisiin. Verrattaessa kyselyssä ulkomailta saatuihin vastaaviin tuloksiin, voidaan todeta, että suomalaiset kokivat lisäkoulutuksen tarpeen suuremaksi ja olivat enemmän huolissaan turvallisuudesta. (Kukko ym. 2017)

3D-tulostuksen tarkan laajuuden arvioimista Suomessa vaikeuttaa pientulostimien yleistymisen mm. kotona, kouluissa, kirjastoissa ja toimistoympäristöissä. Monet yritykset eivät kilpailullisista syistä myöskään kerro omaan tuotekehitykseen liittyvästä 3D-tulostuksesta. Tästä huolimatta on selkeästi havaittavissa 3D-tulostuksen yleistymisen. Erilaisia palveluliiketoimintana 3D-tulostusta tarjoavia yrityksiä onkin suomessa jo noin 50. Palveluliiketoiminta voi keskittyä pelkästään 3D-tulostukseen tai se voi olla osa muuta palvelua.

3D-tulostuksen suosion kasvusta kertoo perinteisten tulostinvalmistajien kuten Canon Oy:n, HP:n ja Ricoh Oy:n toiminnan laajentaminen 3D-tulostusteknologiaihin. Suomessa on myös kotimaisia laitevalmistajia. Opetusta 3D-tulostuksesta saa Suomessa ainakin 15 korkeakoulussa tai ammattiopistossa. Sinänsä 3D-tulostuksen suosio Suomessa ei yllätä. Suomella on pitkä historia 3D-tulostuksen alueella, alan ammatillinen yhdistys Suomen Pikavalmistusyhdistys FIRPA ry. on perustettu jo vuonna 1998. (Kukko ym. 2017)

Työterveys liittyen 3D tulostukseen



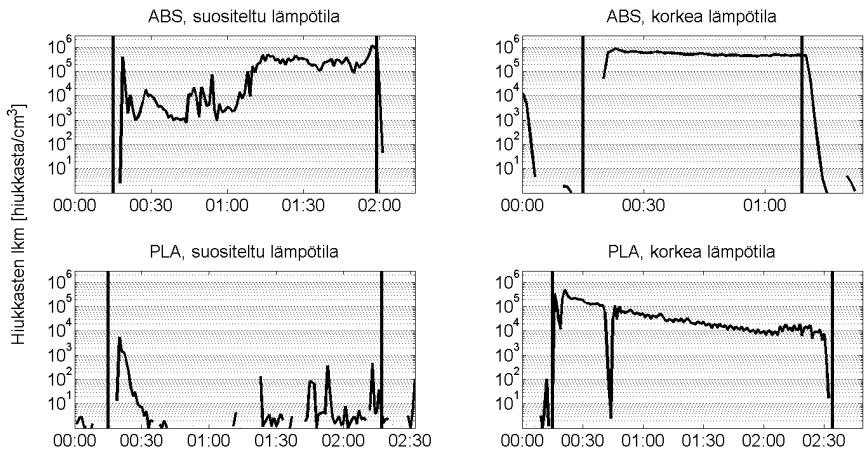
Kuva 9. Vastaajien mielipiteet 3D tulostuksen turvallisuudesta työpaikoilla Suomessa. Vastaajia oli 97.

Kyselytutkimuksen tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti julkaisussa Kukko ym. (2017).

3.2 Pientulostaminen

Pientulostimen aiheuttamat nanohiukkaspäästöt mitattuna kokoalueelta 10–420 nm (NanoScan, TSI Inc.) on esitetty kuvassa 10a-d. Emissiokammiotestissä havaittiin tulostuksen alkuvaiheessa voimakas nanohiukkaspitoisuuden nousu tulostuslämpötilan lähestyessä käytettyjen tulostusmateriaalin sulamispisteitä, jonka jälkeen hiukkasemissiot vakioi-

tuivat tulostuksen edetessä (kuva 10a). Tulostettaessa PLA-muovia olivat vapautuneet nanohiukkaspitoisuudet 2-kertaluokkaa pienempiä kuin korkeamman lämpötilan edellyttävän ABS-muovin tulostuksessa (kuva 10b). Tulostuslämpötilan nosto havaittiin emittoituvien hiukkasten määrän nousuna molemmilla tulostusmateriaaleilla (kuvat 10c-d). Myös toisessa koejärjestelyssä, laboratoriohuoneen mittauksissa, havaittiin tulostusmateriaalin vaikutus hiukkaspitoisuuteen. PLA-muovia tulostettaessa nanohiukkaspäästöt olivat pienempiä kuin ABS-muovia tulostettaessa. Lisäksi tulostimen toimintahäiriöiden, kuten tulostusmateriaalin takertuminen suuttimen ympärille, havaittiin kasvattavan hiukkaspäästöjä. (Mendes ym. 2017)



Kuva 10a-d. Emissiokammiossa mitatut nanohiukkasten (10–420 nm, NanoScan, TSI Inc.) primaarihiukkaspäästöt kun tulostettiin a) ABS-muovia suositellulla lämpötilalla ja b) suositeltua korkeammalla lämpötilalla sekä c) PLA-muovia suositellulla lämpötilalla ja d) suositeltua korkeammalla lämpötilalla. Mustat pystyviivat osoittavat tulostusjakson.

Nanohiukkasten pitoisuuksien perusteella lasketut päästötaajuudet olivat ABS-muovilla $1.9 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$ ja PLA-muovilla $1.0 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$, kun tulostuslämpötila oli valmistajan suosittelemalla tasolla. Nostettaessa tulostuslämpötilaa kasvoivat myös päästötaajuudet. 3D-tulostuksessa mitattuja päästötaajuuksia on vertailtu muihin tyypillisiin sisäilman nanohiukkaslähteisiin johtopäätöksen yhteydessä taulukossa 2. (Mendes ym. 2017)

Tulostuksessa käytettyjen muovien käyttöturvallisuustiedotteissa ilmoitettujen lämpöhaajoamistuotteiden perusteella valikoituja kaasuja ei todettu laboratoriomittauksissa. Myös TVOC-pitoisuudet olivat pieniä, ja aiheutuivat osittain käytettyjen hiukkasmittalaitteiden

työliuosten päästöistä. Mittaustulosten perustella kuitenkin osoitettiin, että ABS-muovia tulostettaessa styreenipäästöt ovat mahdollisia. Lisäksi huoneilmasta todettiin tulostusmateriaalista riippumatta pieniä määriä formaldehydiä. (Mendes ym. 2017)

3.2.1 Torjuntateknisten keinojen tarpeellisuuden selvittäminen

Hankkeessa hyödynnettiin sisäilmamallinnusta laboratoriossa ja toimistohuoneessa tehtyjen mittausten tulosten jalostamiseen. Mallinnuksen avulla ratkaistiin pöytäkäyttöisen 3D-tulostimen aiheuttamat primaarit päästötaajuudet eri materiaaleille ja tulostuslämpötiloille. Vastaavasti toimisto-olosuhteissa tehtyjen mittausten avulla voitiin simuloida toimistohuone ja määrittää 3D-tulostimen aiheuttamat hiukkaspäästöt todellisessa tulostusympäristössä. Erityisesti haluttiin tutkia hiukkaspitoisuuden 8 tunnin aikakeskiarvoa tulostamisen aloittamisesta ja verrata tätä arvoa nanohiukkasille asetettuun tavoitetasoon kahdeksan tunnin altistumiselle (Työterveyslaitos 2013). Simulaatioiden avulla saatiin yleistettävää tietoa hiukkaspäästöistä ja torjuntatoimenpiteiden vaatimuksista eri tilanteissa.

Mallinnuksen avulla hiukkaspäästömittaus suoritettiin kontrolloidussa toimistotilassa, joten tilaan ja ilmanvaihtoon liittyvät parametrit tunnettiin. Loput parametrit selvitettiin mallin avulla. Simulaatioissa vähennettiin taustapitoisuus kokonaispitoisuudesta, jolloin saatiin selville 3D-tulostimen vaikutus tilan hiukkaspitoisuuteen. 3D-tulostimen päästövoimakkuus ratkaistiin, minkä jälkeen 3D-tulostin voitiin sijoittaa erilaisiin simuloituihin sisätiloihin ja tulostusaikaa säädellä.

Simulaatioiden avulla selvitettiin, minkälainen ilmanvaihto täytyisi tulostustilassa olla, jotta Työterveyslaitoksen tavoitetasot teollisesti tuotetuille nanohiukkasille alittuisivat. Tämän yhteydessä selvitettiin kuinka pitkiä tulostusjaksoja voi työpäivän aikana suorittaa, ilman, että vaaditaan 3D-tulostimeen kohdistettuja torjuntatoimenpiteitä.

Mallinnuksen avulla tutkimuksessa tutkittiin tulostuksen vaikutuksia kolmessa eri tilassa. Ensimmäinen tila oli tyypillinen toimistohuone (68 m^3) ja kaksi muuta tulostustilaa valikoitui Työterveyslaitoksen monitilatoimiston suunnitteluohjeen (Nenonen ym. 2012) ja hiukkaspitoisuuden tavoitetason mukaan (Työterveyslaitos 2013).

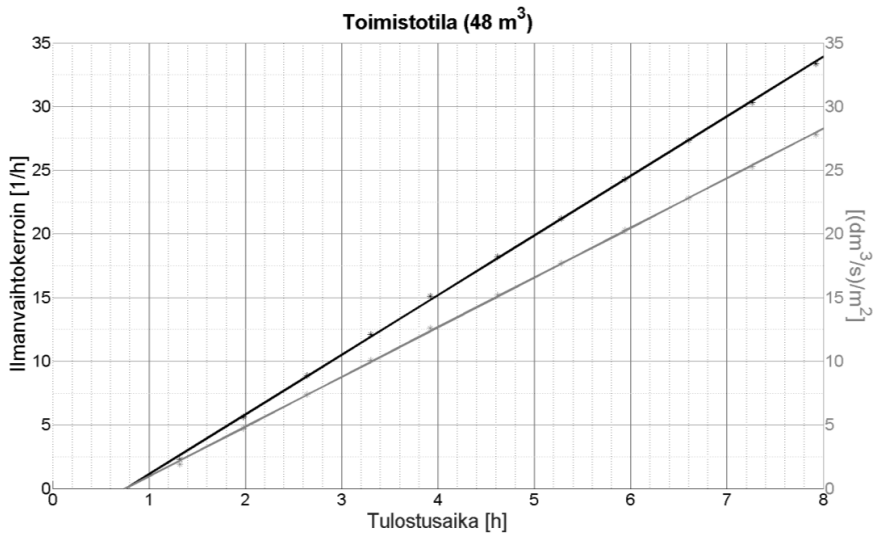
Monitilatoimiston suunnitteluohjeessa neuvotaan kopiointialueen ilmanvaihdoksi $5\text{--}10 \text{ (dm}^3/\text{s)/m}^2$ kopiokoneiden yläpuolella (Nenonen ym. 2012). Rinnastamalla tila 3D-tulostutila kopiointialueeksi, mallinnuksen avulla todettiin, että $5 \text{ (dm}^3/\text{s)/m}^2$ ilmanvaihdolla voidaan tulostaa 8 tuntia 3D-tulostimella 108 m^3 huoneessa ja vastaavasti $10 \text{ (dm}^3/\text{s)/m}^2$ ilmanvaihdolla 168 m^3 huoneessa ilman, että tavoitetaso ylittyy. Kaikissa tiloissa oletettiin huoneen korkeuden olevan 3 metriä, joten lattian pinta-alat huoneissa olivat noin 23 m^2 , 36 m^2 ja 56 m^2 .

Kuvassa 11 on esitetty millainen ilmanvaihto tiloissa täytyy olla tulostusajan mukaan. Kuvassa musta viiva osoittaa tilan ilmanvaihtokertoimen. Harmaan viivan osoittama arvo

vastaa yksiköltään ympäristöministeriön asetuksen ohjearvoa toimistotilan ilmanvaihdosta, eli vaadittavaa ilmapirtaa tilan jokaista neliometriä kohden. Ohjearvo on 1,5 (dm³/s)/m² (Ympäristöministeriö 2012).

Toimistohuoneen mallinnoiksi perusteella hiukaspitoisuuden tavoitetaso ylittyy alle kahden tunnin tulostuksen myötä. Pitkäaikaisen tulostamisen vaatima ilmanvaihto on niin suuri, ettei sellaista ole käytännössä mahdollista toteuttaa normaalissa toimistotilassa. Tämä tarkoittaa, että toimistohuoneessa tulostimeen kohdistetut torjuntatoimenpiteet ovat suositeltavia, mikäli tulostus kestää työpäivän aikana muutamaa tuntia pidempään.

Toimistohuoneita suurempien tulostustilojen kohdalla voidaan sanoa, että tulostaminen on mahdollista yhdellä tulostimella ilman välttämättömiä torjuntatoimenpiteitä, mikäli ilmastoinnista huolehditaan. Mikäli 3D-tulostimia on kuitenkin useampi samassa tilassa, torjuntatoimenpiteet ovat tarpeen. Erityisesti kahden suuremman tilan kohdalla tulokset ovat kuitenkin vain suuntaa antavia johtuen tiloihin kohdistuvista arvioista ja oletuksista.



Kuva 11. Toimistotilassa tavoitetason alittamiseen vaadittava ilmanvaihto tulostusajan mukaan. Musta viiva osoittaa ilmanvaihtokertoimen. Harmaa viiva osoittaa ilmavirran neliometriä kohden.

3.2.2 Pientulostamisen torjuntatekniset keinot

Laboratoriomittauksissa osoitettiin, että pientulostamiseen soveltuvat pöytäkäyttöiset pursotintulostimet emittoivat nanohiukkasia. Halvimman hintaluokan pursotintulostimissa ei käytetä kotelointia, jolloin päästöt vapautuvat suoraa työpaikan ilmaan. Tällaisia 3D-tulostimia käytetään myös tyypillisesti tiloissa, joita ei ole suunniteltu teolliseen tuotantoon (vrt. kirjastot, oppilaitokset, toimistot). Mittausten avulla selvitettiin, miten eri torjuntatekniset keinot vaikuttavat tavanomaisen toimiston ilmanlaatuun 3D-tulostuksen aikana.

Kun torjuntateknisenä keinona käytettiin ainoastaan toimistohuoneen ilmanvaihtoa, nanohiukkasten pitoisuus nousi nopeasti tulostuksen alettua moninkertaiseksi verrattuna taustapitoisuuteen. Toimistohuoneeseen sijoitetun tulostimen yläpuolelle asennettiin kohdepoisto. Tässä tapauksessa kohdepoiston voimakkuus ei ollut riittävä torjumaan 3D-tulostimen aiheuttamia nanohiukaspäästöjä. Lisäksi 3D-tulostimen geometria esti kohdepoiston sijoittamisen tarpeeksi lähelle suutinta, jossa nanohiukaspäästö pääosin syntyy, mikä heikensi kohdepoiston toimivuutta.

3D-tulostimen sijoittamisen muovisen suojakotelon sisään osoitettiin torjuvan nanohiukaspäästöjä tehokkaasti. Kotelo ei ollut täysin ilmatiivis eikä poistoilmaa johdettu ulos kotelosta. Tästä huolimatta koteloinnin osoitettiin torjuvan syntyneitä päästöjä tehokkaasti. Viimeisessä koejärjestelyssä koteloon lisättiin kohdepoisto, jonka avulla ilma kotelosta johdettiin ulos. Kohdepoiston yhdistäminen koteloon torjui syntyneet päästöt lähes täysin, jolloin työpisteen nanohiukaspitoisuus pysyi taustapitoisuuden tasolla. (Viitanen ym. 2017)

3.3 Teollinen 3D-tulostus

Työpaikkamittausten tulokset on jaettu yleisiin pitoisuustasoihin työpaikalla ja 3D-tulostukseen liittyviin työvaiheisiin. Mitattuja pitoisuuksia on vertailtu eri kirjallisuusarvoihin yhteenvedossa olevassa taulukossa 3.

3.3.1 Pitoisuustasot 3D-tulostuksessa

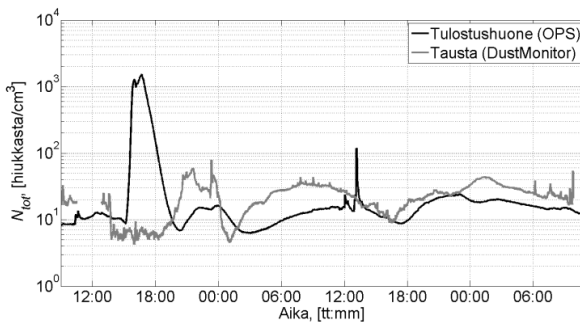
Kaikissa tutkituissa 3D-tulostusta hyödyntävissä työpaikoissa tulostustilojen hiukkaspitoisuudet pysyivät työpäivän aikana keskimäärin tavallisissa teollisuusympäristössä mitattujen pitoisuuksien tasolla tai jopa sen alla. Eri työvaiheiden aikana havaittiin kuitenkin taustapitoisuuden yleistaso korkeampia pitoisuuksia.

Kaasumaisten yhdisteiden mittauksissa yleistaso oli kaikilla työpaikoilla alhainen ja ainoastaan yksittäisiä 3D-tulostettujen kappaleiden jälkikäsitteilyn aiheuttamia pitoisuuksien hetkellisiä kohoamisia havaittiin. Kaasumaisten yhdisteiden mittauksissa mahdollisten lämpöhajoamisessa syntyvien yhdisteiden pitoisuudet olivat pieniä. Materiaalin palamista indikoivista kaasusta mitattiin hiilimonoksidia ainoastaan yhdessä työympäristössä.

Sideaineen suihkutukseen perustavassa tulostamisessa koteloidulla 3D-tulostimella olivat työstä aiheutuvat hiukkasten pitoisuudet keskimäärin hyvin alhaiset sekä nanohiukkasten että karkeampien hiukkasten kokoluokissa. Yksittäisiä työstä johtuvia hetkellisiä pitoisuuksien kohoamisia havaittiin, johtuen tyypillisesti laitteen koteloinnin avaamisesta ja sen aikana tehdyistä työvaiheista (kappaleen irrotus, puhdistus). Työpäivän aikana hengitysvyöhykkeeltä mitatut nanohiukkasten lukumääräpitoisuuksien keskiarvot olivat välillä 2000–3700 hiukkasta/cm³, ja työpisteeltä 1980 hiukkasta/cm³.

Pursotustekniikalla tulostaminen koteloidulla 3D-tulostimella ei myöskään aiheuttanut merkittävästi kohonneita hiukaspitoisuuksia työtilojen ilmassa. Nanohiukkasten keskimääräiset lukumääräpitoisuudet työpäivien aikana olivat välillä 1 200–2 200 hiukkasta/cm³ työntekijän hengitysvyöhykkeellä ja työpisteellä 2 100 hiukkasta/cm³.

Metallitulostuksen yhteydessä nanokokoisten hiukkasten pitoisuudet työpaikan ilmassa vaihtelivat jonkin verran työpisteellä työstä johtuen, mutta myös tuloilmassa koneellisen ilmanvaihdon ja ulkoilman vaikutuksista. Nanohiukkasten lukumäärän keskiarvopitoisuus tulostushuoneessa metallitulostuksen yhteydessä oli mittausjakson aikana 7600 hiukkasta/cm³. Työvaiheiden aikana mitatut nanohiukkasten lukumääräpitoisuuksien keskiarvot mitattuna työpisteellä vaihtelivat välillä 5500–19400 hiukkasta/cm³ ja hengitysvyöhykkeeltä mitatut nanohiukkasten lukumääräpitoisuuksien keskiarvot välillä 1500–9300 hiukkasta/cm³. Työntekijän hengitysvyöhykkeellä havaittiin lisäksi yksittäisiä työstä johtuvia hetkellisiä pitoisuuden muutoksia nanokokoisten hiukkasten mittauksissa. Selvemmin pitoisuusvaihtelut olivat havaittavissa karkeampien hiukkasten massapitoisuuksia mitattaessa työpisteellä (kuva 12). Tämä johtui jauhemaisen tulostusmateriaalin pölyämisestä työvaiheiden aikana.



Kuva 12. Tulostushuoneesta mitattu karkeiden hiukkasten (0,3–10 µm, OPS3300, TSI Inc.) pitoisuuden vaihtelu kahden vuorokauden ajalta tilassa, jossa tehtiin metallien 3D-tulostusta (musta viiva) sekä vastaavalta ajanjaksolta mitattu taustailman hiukaspitoisuus (harmaa viiva) (0,265–31 µm, DustMonitor model 1.109, Grimm Aerosol Technik GmbH).

Menetelmän metallitulostukseen liittyen tutkitussa työympäristössä todettiin hiilimonoksidin ja nanohiukkaspitoisuuden yhtäaikainen nousu yhtenä yönä. Päästölähde jäi epäselväksi, mutta se viittaa epätäydelliseen palamiseen.

Jauhepetisulatukseen perustuvan teollisen 3D-tulostimen käytön todettiin nostavan tulostuhuoneen nanohiukkaspitoisuutta kun tulostusmateriaalina käytettiin muovia. Tulostuhuoneessa esiintyneet nanohiukkaspitoisuudet olivat tuloilman taustahiukkaspitoisuutta suurempia, minkä todettiin johtuvan 3D-tulostuksesta. Tutkitussa jauhepetisulatusta hyödyntävässä työympäristössä, nanohiukkasten ($d_p > 2,5$ nm) lukumäärän keskiarvopitoisuus tulostuhuoneessa tutkimuksen mittausjakson aikana oli 27500 hiukkasta/cm³, taustan nanohiukkaspitoisuuden keskiarvon ollessa 5000 hiukkasta/cm³. Suurimmat nanohiukkastot mitattiin tilanteessa, jolloin tulostuhuoneen kaksi tulostinta tulosti yhtäaikaisesti.

Nanohiukkaspitoisuudessa esiintyi vaihtelua taustahiukkaspitoisuudesta riippumatta enemmän päivällä kuin yöllä, mikä johtui myös muista hiukkaslähteistä kuin tulostuksesta. Tutkimuksessa todettiin 3D-tulostukseen liittyviin työvaiheisiin liittyen muita hiukkaslähteitä, jotka olivat mm. tulostimen kasetin täyttö ja pienkoneiden käyttö. Suuremmissa pölyn kokoluokissa, ns. työhygieenisissä jakeissa, havaittiin ajoittain lyhyitä hetkellisiä pitoisuuspiikkejä työpäivisin, jotka liittyivät muihin pölylähteisiin kuin 3D-tulostukseen.

Nanohiukkasten lisäksi muovien tulostuksen yhteydessä tulostuhuoneesta mitattiin myös pieniä määriä styreeniä, joka on yksi polystyreenimuovien lämpöhajoamistuote. Tulostuhuoneen TVOC- ja formaldehydipitoisuudet (mukaan lukien styreeni) eivät kuitenkaan suuresti poikenneet muiden mitattujen tilojen pitoisuuksista. Muovien palamisessa muodostuvia mahdollisia kaasumaisia päästöjä, kuten hiilimonoksidia ja typen oksideja (NO ja NO₂) ei todettu.

Työympäristötutkimusten yhteydessä havaittiin, että osa tulostimista tuotti huomattavasti lämpöä nostaen työtilojen lämpötilaa jopa 5 °C taustalämpötilaa korkeammaksi.

Valokovetusta altaassa (stereolitografia) –tulostusmenetelmässä nanohiukkasten pitoisuus oli vain hetkittäin taustahiukkaspitoisuutta korkeampi. Mitatut pitoisuudet työtilassa ja taustassa olivat 5000–5400 hiukkasta/cm³. Mitatut pitoisuudet olivat tasoltaan suhteellisen matalia ja erot johtuivat pääasiassa käytettyjen mittalaitteiden eri tekniikoista.

Tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti tieteellisessä artikkelissa Kangas ym. 2017.

3.3.2 3D-tulostusmateriaalin käsittely ja laitteiden ylläpito

Jauhemaisen kipsimateriaalin käsittely vapautti ilmaan karkeita hiukkasia. Työvaihetta tutkittiin PIMEX-videointimenetelmän avulla, jolloin pölyävät työvaiheet pystyttiin erottamaan havainnollisesti. Kuvassa 13 on esitetty pölypitoisuus mitattuna työntekijän hengitysvyöhykkeeltä. Jauheen käsittelyn aikana työntekijän hengitysvyöhykkeeltä mitattiin ly-

hytaikaisia pitoisuuspiikkejä, jotka olivat suuruudeltaan $>2 \text{ mg/m}^3$. Tutkitun työvaiheen aikana pölyn kokonaispitoisuus työpäivän aikana pysyi kuitenkin selkeästi pölyn raja-arvoksi asetetun pitoisuuden alapuolella. Työntekijän altistuminen työpaikalla riippuu tehtävän työn määrästä sekä käytössä olevista torjuntateknisistä menetelmistä.



Kuva 13. Pimex-menetelmällä tutkittu työvaihe jauhemaisen tulostusmateriaalin käsittelystä. Työvaiheen aikana havaittiin lyhytaikaisia pölypiikkejä liittyen jauheen käsittelyyn.

Metallitulostuksessa metallijauheita käsiteltäessä hengittyvän jakeen pölypitoisuudet eivät missään tuotantotiloissa olleet merkittävän suuria, mutta syntynyt pöly sisälsi käytetystä raaka-aineesta riippuen metallihiukkasia, kuten nikkeliä, kromia ja kobolttia. Nämä ovat syöpävaaralliseksi luokiteltuja aineita. Titaanikoneen täytön ja seulonnan aikana titaanipitoisuus työtiloissa oli $0,5 \text{ mg/m}^3$. Titaanille ei ole Suomessa työhygienistä raja-arvoa. Ruotsissa hengittyvälle jakeelle on annettu työhygieninen raja-arvo 5 mg/m^3 . Titaanikoneen puhdistuksen aikana ilmaan vapautui pääasiassa nanokokoa suurempia hiukkasia. Nousua nähtiin lähinnä kun työskenneltiin tulostimen lähellä.

Keräävien menetelmien pölymittauksissa jäätii alhaiselle, alle 5 % HTP_{8h}-arvosta, tasolle kaikissa mittausjaksoissa sekä hengitysvyöhykkeen, että työpisteen mittauksissa.

Jauhepetisulatuksessa valmiin tulostetun kappaleen pinta on jauhemaisen tulostusmateriaalin peittämä. Tutkitussa työympäristössä tulostusmateriaaliylimäärä poistettiin mekaanisesti kohdeimun alla ja paineilman avulla imukaapissa. Pinnalta puhdistettu raaka-aine seulottiin koneellisesti raaka-aineen uudelleen käyttöä varten. Työvaiheen aikaiset hiukaspitoisuudet työntekijän hengitysvyöhykkeellä olivat tuolloin tulostushuoneen hiukaspitoisuuksia pienemmät tai korkeintaan taustahiukaspitoisuuden tasolla, johtuen työvaiheen tehokkaista pölynhallintakeinoista (imukaappi, kohdeimu).

Valokovetus altaassa –menetelmässä käytettiin tutkimuksen aikana epoksihartsia. Epoksihartsin käsittelyyn ei havaittu liittyvän erityistä hengitystiealtistumista hiukkasille. Epoksin tiedetään kuitenkin olevan voimakkaasti herkistävä eli allergiaa aiheuttava kemikaali, jonka

käsittelyssä tulee noudattaa erityistä varovaisuutta ja huolellista suojautumista. Menetelmässä on huomioitava erityisesti kovettumattoman hartsin käsittely, jolloin on erityisen tärkeää huomioida myös suoran ihokosketuksen välttäminen kovettumattomaan kappaleeseen.

Nauhamaisten muovitulostusmateriaalien käsittelyssä ei havaittu olevan erityistä syytä varotoimenpiteille.

3.3.3 3D-tulostetun kappaleen jälki- ja pintakäsittely

Tutkituista työvaiheista suurimmat nanohiukkasten keskiarvopitoisuudet mitattiin viimeistelyssä, käsin hionnassa poistoimullisen hiontapöydän ääressä. Tulosteiden viimeistelyssä hiontahuoneen nanohiukkaspitoisuus oli taustahiukkaspitoisuuden tasolla, mutta työntekijän hengitysvyöhykkeellä hiontatyön aikana nanohiukkaspitoisuus oli huomattavasti taustapitoisuutta suurempi. Kappaleiden hionnassa vapautuva pöly on riippuvainen hiotavan kappaleen raaka-aineesta ja voi olla esimerkiksi hengitystä ärsyttävää.

Valmiita kappaleita käsiteltiin erilaisilla kemikaaleilla, kuten epoksiyhdisteillä, syanoakrylaatti- ja akrylaattiyhdisteillä sekä liuottimilla. Näiden työvaiheiden aikana ei mitattu hengitystiealtistumisen kannalta merkittäviä pitoisuuksia muissa kuin ruiskumaalauksessa. Tulosteita viimeisteltiin yhdessä tutkitussa työympäristössä ruiskumaalamalla erillisessä maalaamossa käyttäen erilaisia maaleja, joista osa oli herkistäviä. Esimerkiksi ns. automaalien kohdalla, isosyanaattipitoisuudet ylittivät ruiskumaalauksen niiden viidentoista minuutin raja-arvon (HTP_{15 min}) hengityksen suojaimen ulkopuolella. Jälkikäsitelyyn liittyvissä työvaiheissa havaittiin olevan merkittävä ihoaltistumisen riski.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

3D-tulostustyöhön liittyy neljä pääasiallista työvaihetta, jolloin altistumista saattaa tapahtua.

- **Materiaalin käsittely:** Tulostettavan materiaalin (yleensä jauhemainen) käsittely, jolloin työntekijä saattaa altistua hengitysteitse jauheen päästessä työilmaan. Käsiteltäessä raaka-aineita paljain käsin, voidaan olla ihokosketuksessa ihoa ärsyttävien tai allergisoivien kemikaalien kanssa.
- **Tulostus:** Tulostuksen aikana työtilan ilmaan vapautuu nanohiukkasia. Vapautuvien hiukkasten koko ja määrä riippuu mm. käytetystä tulostusmateriaalista ja menetelmästä sekä siitä, onko laite koteloitu vai ei. Tulostuksessa voi myös syntyä terveydelle haitallisia muovikäryjä.
- **Jälkikäsitteily:** Tulostetun kappaleen puhdistus käyttäen esimerkiksi alkoholia tai vahvasti emäksisiä aineita, jotka voivat olla ihoa voimakkaasti ärsyttäviä. Jälkikäsitteilyvaihe saattaa myös sisältää kappaleen hiontaa, jolloin syntyy pölyä. Jälkikäsitteilyyn liittyen valmiin hiotun kappaleen maalaaminen voi liittyä tuotannollisen 3D-tulostuksen jälkivaiheisiin.
- **Laitteiden huolto- ja kunnossapitotyöt:** altistuminen tulostusmateriaaleille ja kemikaaleille voi vaihdella merkittävästi toimenpiteestä riippuen.

Oikeanlaisten työtapojen varmistamiseksi työpaikalla on syytä lukea aineiden mukana tulleet käyttöturvallisuustiedotteet ja 3D-tulostuslaitteen käyttöohjeet, sekä noudattaa niitä. Käyttöturvallisuustiedotteessa kerrotaan mm. tuotteen haittavaikutuksista sekä oikeanlaisesta suojautumisesta (TTK 2010).

Laboratoriomittausten perusteella määritetty pöytäkäyttöisen 3D-tulostimen nanohiukkasten emissiotaajuus tulostettaessa yleisimpiä muovimateriaaleja (ABS ja PLA) oli samaa luokkaa kuin muilla tyypillisillä sisälähteillä (taulukko 2). Huomioitavaa kuitenkin on, että 3D-tulostaminen kestää tavallisesti useita tunteja verrattuna muihin tyypillisiin nanohiukkasten sisälähteisiin. Nanohiukkaspäästöt olivat riippuvaisia tulostettavasta materiaalista sekä käytetystä lämpötilasta. ABS-muovin 3D-tulostamisen osoitettiin muodostavan enemmän nanohiukkasia kuin PLA-muovin 3D-tulostamisen käytettäessä suositeltuja lämpötiloja. Myös muissa tutkimuksissa on havaittu tulostusmateriaalilla olevan yhteys tulostuksen päästöihin (Yi ym. 2016; Deng ym. 2016). Häiriöt 3D-tulostuksessa, kuten materiaalin tukkeutuminen tulostimen pursoritimeen, nostavat nanohiukkasten päästöjä (Mendes ym. 2017).

Laboratoriomittauksissa mitatut formaldehydi- ja styreenipitoisuudet olivat pieniä, alle ohjearvojen (STM 2014) ja mitattuja kaasumaisia yhdisteitä ei pystytty yhdistämään tulostusprosessin vaiheisiin.

Mittaustulosten ja mallinnuksen avulla arvioiden tulostustilan ilmanvaihdon tulisi olla 0,2 m³/s, jonka saavuttaminen ei ole tavallista toimistoissa ja kodeissa (Mendes ym. 2017). Sisäilmamallinnuksen avulla arvioitiin ABS-muovin pientulostamisesta aiheutuneita hiukaspäästöjä erilaisissa sisätiloissa. Mallinnustulosten perusteella tyypillisessä toimistotilassa pelkkä ilmanvaihto ei riitä pitämään nanohiukaspitoisuuksia kohtuullisella tasolla, mikäli tulostus kesti pidempään kuin muutaman tunnin. Suuressa (~300 m³) tilassa kolmen tulostimen yhtäaikainen käyttö pidempään kuin neljä tuntia tuotti vastaavan pitoisuudet tilaan. Mallinnustulosten perusteella suuressa tilassa satunnainen pitkäkestoinenkin tulostus yhdellä tulostimella ei välttämättä vaadi tehokkaan ilmanvaihdon lisäksi muita torjuntateknisiä keinoja. Muissa tapauksissa tulostimen koteloointi on suositeltavaa päästöjen hallitsemiseksi.

Hankkeen tulosten perusteella 3D-tulostimen koteloointi pienentää kotelon ulkopuolelle vapautuvien päästöjen määrää tehokkaasti (Viitanen ym. 2017). Samaan tulokseen ovat päätyneet myös Yi ym. (2016). Toimistoissa, kirjastoissa, oppilaitoksissa ja muissa vastaavissa tiloissa tulostimet on hyvä sijoittaa erilliseen tulostushuoneeseen.

Taulukko 2. Sisälähteiden emissiotaajuuksia.

Sisälähde	Emissiotaajuus
3D-tulostus, ABS-muovi	2·10 ⁹ 1/s (Mendes ym. 2017)
3D-tulostus, PLA-muovi	2·10 ⁷ 1/s (Mendes ym. 2017)
Laser-tulostin	7-40·10 ⁸ 1/s (Koivisto ym. 2010)
Ruuanlaitto	3·10 ¹⁰ 1/s (Isaxon ym. 2015)
Siivous	4·10 ¹⁰ 1/s (Isaxon ym. 2015)

Teollisen 3D-tulostamisen yhteydessä erilaiset tulostukseen ja jälkikäsittelyyn liittyvät terveydelle vaaralliset kemikaalit sekä jauhemaisien tulostusmateriaalien, erityisesti metallijauheiden, käsittelyn todettiin aiheuttavan suurimman riskin työntekijöiden terveydelle tulostamisen sijasta.

Jauhemaisia tulostusmateriaaleja käsitellessä ja valmiita kappaleita viimeistellessä, etenkin hiottaessa, syntyy myös pölyä, joka sisältää herkistäviä aineita riippuen käytetyistä raaka-aineista.

Metallitulostuksen yhteydessä jauhemainen tulostusmateriaali sisältää metallihiukkasia. Mikäli syntynyt pöly sisältää syöpävaarallisia metalleja, kuten nikkeliä, kromia ja kobolttia,

on syytä erityiseen varovaisuuteen jauheen käsittelyn yhteydessä. Valtioneuvoston asetuksen 716/2000 mukaan syöpäsairauden vaaraa aiheuttaville aineille ja menetelmille ammatissaan altistuvat tulee ilmoittaa ns. ASA-rekisteriin (Ammatissaan syöpäsairauden vaaraa aiheuttaville aineille ja menetelmille altistuvien rekisteri, VN 2000). Rekisteriin ilmoitetaan työntekijät, jotka ovat altistuneet vähintään 20 työpäivänä vuodessa suuren osan työpäivästä. Rekisteri ei ota kantaa pitoisuustasoon.

Ennen työn aloittamista on tärkeää tutustua käsiteltävien tulostusraaka-aineiden käyttö- ja turvallisuustiedotteisiin, joissa valmistaja antaa turvalliseen käyttöön liittyvää tietoa. Jauhe- ja materiaalia käsitellessä on hyvä huomioida myös materiaalin mahdollinen sähköinen varautuminen ja itsesyttymisvaara. Tämä on huomioitava erityisesti valittaessa tiloissa käytettäviä sähkölaitteita ja valittava tarvittaessa EX-suojatut laitteet.

Taulukossa 3 esitetään teollista 3D-tulostamista hyödyntävillä työpaikoilla mitattujen nanohiukkasten keskiarvopitoisuuksien vertailu kirjallisuudessa raportoituihin keskiarvopitoisuuksiin. Nanohiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvo oli monin paikoin tyypillisen toimistoympäristön tasolla (Tran Ngoc ym. 2013; Vosburgh ym. 2014). Muutamassa mittauskohteessa nanohiukkasten keskiarvopitoisuus nousi tätä korkeammaksi ollen kuitenkin vielä kohtuullisen matala verrattuna teolliseen ympäristöön. Missään tutkitussa työympäristössä nanohiukkasten keskiarvopitoisuus ei ylittänyt Työterveyslaitoksen asettamia tavoitetasoja nanohiukkasille.

Yleisesti ottaen tutkittujen työpaikkojen ilmanvaihto oli riittävä 3D-tulostimien mittausten aikaisille käyttömäärille. Koteloinnin havaittiin osaltaan pitävän työpaikan ilmaan vapautuvat päästöt alhaisina tulostuksen aikana. Tutkittujen työvaiheiden perusteella nano- ja pienhiukaspitoisuustasot eivät aiheuta syytä erityisiin toimenpiteisiin nykytietämyksen valossa. Ilmanlaatua voi kuitenkin parantaa johtamalla päästöt kotelosta ulos työtiloista.

Tässä hankkeessa raportoidut pitoisuudet tulee suhteuttaa työvaiheiden keston ja tuotantomääriin. Mikäli työvaiheiden kestot pitenevät, esim. tuotannon kasvaessa, myös työhön kulunut aika ja mahdollinen altistuminen pitenevät.

Taulukko 3. Mitattujen nanohiukkasten keskiarvopitoisuuksien vertailu kirjallisuudessa raportoituihin keskiarvopitoisuuksiin.

Mittausympäristö	Lukumääräpitoisuus [hiukkasta/cm ³]
Ulkoilma (kaupunki – tienvarsi)	10 700–48 000 (Morawska ym. 2008)
Toimisto	2500–12 100 (Tran Ngoc ym. 2013; Vorsburg ym. 2011)
Ravintola yms.	9 100–773 000 (Levy ym. 2002; Park, Ramachandran, Raynor, Eberly, ym. 2010; Park, Ramachandran, Raynor, and Olson 2010; Valente ym. 2007; See and Balasubramanian 2006)
Teollisuusympäristö	15 000–1 646 000 (Elihn ym. 2011; Young ym. 2013)
Hitsaus	33 000–4 860 000 (Elihn ym. 2011; Elihn and Berg 2009; Lehnert ym. 2012; Lee ym. 2007)
Teollinen 3D-tulostus	2100–27 500

Jälkikäsittelyssä hengitystiealtistumisen lisäksi tulee kiinnittää huomiota myös ihon kautta tapahtuvaan altistumiseen käytetyille jälkikäsittelyaineille, jotka ovat usein hyvinkin herkistäviä kemikaaleja ja liuottimia, esimerkiksi epoksit ja isosyanaatteja sisältävät maalit. Stereolitografisessa tulostusmenetelmässä, jossa tulostusmateriaalia kovetaan lasersäteiden avulla, käytetään tyypillisesti epoksihartsihyytelöä, joka voi sisältää voimakkaasti mm. ihoa herkistäviä aineosia.

3D-tulostinten havaittiin luovuttavan lämpöä ympäröivään työtilaan. Tämä on hyvä huomioida työpisteiden sijoittelussa.

Tulostimien huolto- ja kunnossapitotyöt on tärkeää huomioida osaksi 3D-tulostustyötä. Altistuminen pölyille ja kemikaaleille on todennäköistä myös näissä työvaiheissa. Säännöllisestä siivouksesta tulee huolehtia pölyn leviämisen ehkäisemiseksi.

5 SUOSITUKSET

Hankkeen tuloksiin pohjautuen laadittiin Malliratkaisu: 3D-tulostuksen kemikaaliturvallisuus työpaikoilla ja Tietokortti: Ohjeet turvalliseen 3D-tulostukseen. Malliratkaisu on suunnattu työpaikoille sekä työntekijän ja työnantajan tueksi. Tietokorttia voidaan hyödyntää erityisesti työterveyshuollossa.

Altistumisen minimoimiseksi on suositeltavaa noudattaa raaka-aineiden valmistajien ohjeita ja varmistaa 3D-tulostimien kotelointien ja ilmanvaihdon toimivuus. Ilmanvaihdon voimakkuus tyypillisessä toimistuhuoneessa ei ole riittävä keino torjumaan 3D-tulostimien nanohiukkaspäästöjä, mikäli tulostus on pitkäaikaista.

Jauhemaisten aineiden käsittelyssä tulee minimoida pölyn syntyminen harkituilla työtaivoilla ja teknisiä pölyntorjuntakeinoja hyödyntäen (kohdepoisto, imukaapit, vetokaappi). Teknisten torjuntatoimenpiteiden säännöllinen toimivuuden tarkastaminen ja laitteiden huolto on erityisen tärkeää sisällyttää osaksi työpaikan käytäntöjä. Pölyn hallinnan kannalta suositeltavia työmenetelmiä ovat imurointia ja pintojen nihkeäpyyhintä. Paineilmaa ei tule käyttää, sillä se levittää pölyä työtiloihin ja nostaa jo laskeutuneen pölyn uudelleen ilmaan.

Altistavimmissa työvaiheissa tulee käyttää käyttöturvallisuustiedotteiden mukaisia suojavausteita – hengityksensuojain, suojavaatetus, silmiensuojaimet ja oikeantyyppiset suojakäsineet. Myös muiden samassa tilassa työskentelevien työskentelijöiden osalta tulee huomioida riittävä suojautuminen ja mahdollisesti rajoittaa kulkua 3D-tulostustiloihin pölyävien työvaiheiden aikana. Pölyn leviämistä muihin työpaikan tiloihin voidaan rajoittaa pitämällä työtöiden väliset ovet suljettuina. Suljettu ovi vaikuttaa myös ilmanvaihdon toimimiseen.

Hienojakoinen jauhe voi aiheuttaa myös itsesyttymisvaaran. Käytössä olevat laitteet tulee olla EX-suojattu.

Metallijauheita käsitellessä tulee huomioida mahdollisesti syöpävaaralliset yhdisteet.

3D-tulostimien tuottaman lämmön vuoksi tulee huomioida niiden sijoittelu, ja ottaa huomioon paloturvallisuus.

Jauheita ja kemikaaleja käsiteltäessä tulee käyttää työhön soveltuvia kemikaalinsuojakäsineitä. Kovettumattomiin muovikappaleisiin ei saa koskea paljaalla iholla. Työterveyslaitos on julkaissut epoksikansion kemikaaliturvallisuuden parantamiseksi epoksityössä, josta löytyy mm. lisätietoa epoksityöhön liittyvistä kosketushottumien torjunnasta. Epoksikansio löytyy internetosoitteesta www.ttl.fi/epoksikansio.

Tulosteiden jälkikäsitelyssä on huomioitava kappaleiden maalauksessa altistuminen maalille ja niiden mahdollisille liuotinhenteille. Etenkin ruiskumaalaus on voimakkaasti altistava työvaihe, jolloin tarvitaan hyvä ilmavaihto sekä työhön soveltuva hengityksensuojain.

LÄHTEET

- Afshar-Mohajer N, Wu C-Y, Ladun T, Rajon DA, Huang Y. (2015) Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer. *Building and Environment*; 93, Part 2 293-301.
- Azimi P, Zhao D, Pouzet C, Crain NE, Stephens B. (2016) Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. *Environ Sci Technol*; 50 1260-68.
- CEN (1993). EN 481, Workplace atmospheres - Size fraction definitions for measurement of airborne particles. European Committee for standardization. European Standards.
- Deng YL, Cao SJ, Chen AL, Guo YS. (2016) The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction. *Building and Environment*; 104 311-19.
- Elihn K, Berg P. (2009) Ultrafine Particle Characteristics in Seven Industrial Plants. *Ann Occup Hyg*; 53 475-84.
- Elihn K, Berg P, Liden G. (2011) Correlation between airborne particle concentrations in seven industrial plants and estimated respiratory tract deposition by number, mass and elemental composition. *J Aerosol Sci*; 42 127-41.
- EU (2011) Komission suositus, annettu 18 päivänä lokakuuta 2011, nanomateriaalien määritelmästä. 2011/696/EU. Saatavilla: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32011H0696&from=FI> (viitattu 14.12. 2016)
- Gartner (2016) Hype Cycle for 3D printing. Saatavilla: <http://www.gartner.com/document/3383717> (viitattu 1.11. 2016)
- Gausemeier J, Echterhoff M, Kokoschka M, Wall M (2012) Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing – Analysis of Promising Industries. Saatavilla: https://dmrc.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/06_Downloads/01_Studies/DMRC_Study_Part_1.pdf (viitattu 1.11. 2016)
- Hussein T, Glytsos T, Ondráček J, *ym.* (2006) Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house. *Atmos Environ*; 40 4285-307.
- Isaxon C, Gudmundsson A, Nordin EZ, *ym.* (2015) Contribution of indoor-generated particles to residential exposure. *Atmos Environ*; 106 458-66.
- ISO (1995). ISO 7708 Air quality — Particle size fraction definitions for health-related sampling: 1995.
- ISO/IEC. (2005) SO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- Kangas A, Kukko K, Huhtiniemi M, *ym.* (2017) Workers' exposure to particles in industrial 3D-printing (työnimi). Valmisteilla.
- Koivisto AJ, Hussein T, Niemelä R, Tuomi T, Hämeri K. (2010) Impact of particle emissions of new laser printers on modeled office room. *Atmos Environ*; 44 2140-46.
- Kukko K, Ituarte IF, Viitanen A-K, *ym.* (2017) Workplace safety practices in additive manufacturing (Työnimi). Valmisteilla.
- Lee MH, McClellan WJ, Candela J, Andrews D, Biswas P. (2007) Reduction of nanoparticle exposure to welding aerosols by modification of the ventilation system in a workplace. *J Nanopart Res*; 9 127-36.

- Lee SC, Lam S, Fai HK. (2001) Characterization of VOCs, ozone, and PM10 emissions from office equipment in an environmental chamber. *Building and Environment*; 36 837-42.
- Lehnert M, Pesch B, Lotz A, *ym.* (2012) Exposure to Inhalable, Respirable, and Ultrafine Particles in Welding Fume. *Ann Occup Hyg*; 56 557-67.
- Levy JI, Dumyahn T, Spengler JD. (2002) Particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in indoor and outdoor microenvironments in Boston, Massachusetts. *J Expo Anal Env Epid*; 12 104-14.
- Mendes L, Kangas A, Kukko K, *ym.* (2017) Characterization of emissions from a desktop 3D printer. *Journal of Industrial Ecology*; Accepted.
- Morawska L, Ristovski Z, Jayaratne ER, Keogh DU, Ling X. (2008) Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmos Environ*; 42 8113-38.
- Mäkitie A, Paloheimo KS, Björkstrand R, *ym.* (2010) Teollisen Pikavalmistuksen Lääketieteelliset Sovellukset. *Duodecim; laaketieteellinen aikakauskirja*; 126 143-51.
- Nenonen S, Hyrkkänen U, Rasila H, *ym.* (2012) Monitilatoimisto ohjeita käyttöön ja suunnitteluun. Saatavilla: <http://docplayer.fi/465362-Monitilatoimisto-ohjeita-kayttoon-ja-suunnitteluun.html> (viitattu 14.12. 2016)
- Park JY, Ramachandran G, Raynor PC, Eberly LE, Olson G. (2010) Comparing Exposure Zones by Different Exposure Metrics Using Statistical Parameters: Contrast and Precision. *Ann Occup Hyg*; 54 799-812.
- Park JY, Ramachandran G, Raynor PC, Olson GM. (2010) Determination of Particle Concentration Rankings by Spatial Mapping of Particle Surface Area, Number, and Mass Concentrations in a Restaurant and a Die Casting Plant. *J Occup Environ Hyg*; 7 466-76.
- Rosen G, Andersson IM, Walsh PT, *ym.* (2005) A review of video exposure monitoring as an occupational hygiene tool. *Annals of Occupational Hygiene*; 49 201-17.
- Salmi M, Tuomi J, Paloheimo K-S, *ym.* (2012) Patient specific reconstruction with 3D modeling and DMLS additive manufacturing. *RAPID PROTOTYPING JOURNAL*; 18 209-14.
- See SW, Balasubramanian R. (2006) Risk assessment of exposure to indoor aerosols associated with Chinese cooking. *Environ Res*; 102 197-204.
- SFS-ISO/ASTM (2016). 52900:2016 Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia.
- Starck J, Kalliokoski P, Kangas J, *ym.* (2008) Työhygieniä. Suomi: Työterveyslaitos.
- STM (2014) HTP-arvot 2014, Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2014:2. Saatavilla: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/70272> (viitattu 14.12. 2016)
- Tran Ngoc Q, He C, Morawska L, Knibbs LD. (2013) Influence of ventilation and filtration on indoor particle concentrations in urban office buildings. *Atmos Environ*; 79 41-52.
- TTK (2010) Uudet käyttöturvallisuustiedotteet ja pakkausmerkinnät -opas työpaikoille. Työturvallisuuskeskus TTK, kemianteollisuuden työalatoimikunta. Saatavilla: http://ttk.fi/files/4668/Uudet_kayttoturvallisuustiedotteet_ja_pakkausmerkinnat.pdf (viitattu 14.12. 2016)
- Tuomi J, Paloheimo K-S, Björkstrand R, *ym.* (2009) Medical applications of rapid prototyping from applications to classification. *Innovative Developments in Design and Manufacturing Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping - Proceedings of VR'P4, Leiria, Portugal, October 2009*: Taylor & Francis Group.

- Tuomi J, Vihtonen L. (2007) Incremental sheet forming as rapid prototyping and manufacturing technology. International Conference of Manufacturing Automation, ICMA '07, National University of Singapore, May 28-30, 2007.
- Työterveyslaitos (2011) Polystyreenin työstöstä muodostuvien ilman epäpuhtauksien tavoitetasoperustelumuistio, Tavoitetaso TY-02-2011. Saatavilla: <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/PS-tavoitetaso.pdf> (viitattu 16.12. 2016)
- Työterveyslaitos (2013) Teollisesti tuotettujen nanomateriaalien tavoitetasoperustelumuistio. Tavoitetaso TY-02-2013. Saatavilla: https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/nanojen_tavoitetasot.pdf (viitattu 16.12. 2016)
- Työterveyslaitos (2016) Hengittävän ja alveolijakeisen pölyn tavoitetasoperustelumuistio, Tavoitetaso TU-01-2016. Saatavilla: <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/hengittyva-ja-alveolijakeinen-poly-tavoitetaso.pdf> (viitattu 16.12. 2016)
- Valente P, Forastiere F, Bacosi A, *ym.* (2007) Exposure to fine and ultrafine particles from secondhand smoke in public places before and after the smoking ban, Italy 2005. *Tob Control*; 16 312-17.
- Viitanen A-K, Kanerva T, Kallonen K, *ym.* (2017) Control measures of nanoparticle emissions from desktop 3D-printers (työnimi). in preparation.
- VN (2000) Valtioneuvoston asetus työhön liittyvän syöpävaaran torjunnasta, 716/2000. Sosilaali- ja terveysministeriö 01.09.2000. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2000/20000716> (viitattu 14.12. 2016)
- Wohlers. (2016) Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report: OakRidge Business Park, 1511 River Oak Drive, Fort Collins, Colorado, USA.
- Vosburgh DJH, Ku BK, Peters TM. (2014) Evaluation of a Diffusion Charger for Measuring Aerosols in a Workplace. *Annals of Occupational Hygiene*; 58 424-36.
- Yi JH, LeBouf RF, Duling MG, *ym.* (2016) Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional (3D) printer. *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part a-Current Issues*; 79 453-65.
- Ympäristöministeriö (2012) D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Saatavilla: http://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf (viitattu 3.3. 2015)
- Young LH, Lin YH, Lin TH, *ym.* (2013) Field Application of a Newly Developed Personal Nanoparticle Sampler to Selected Metalworking Operations. *Aerosol Air Qual Res*; 13 849-61.



Työsuojelurahasto
Arbetskryddsfonden
The Finnish Work Environment Fund

Työterveyslaitos
Arbetshälsainstitutet
Finnish Institute of Occupational Health

PL 40, 00251 Helsinki

www.ttl.fi

ISBN 978-952-261-671-5

ISBN 978-952-261-670-8