



# 3D-tulostuksen hiukkaspäästöt

Lassi Rantanen

OPINNÄYTETYÖ  
Toukokuu 2024

Konetekniikka  
Älykkäät koneet

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Älykkäät koneet

RANTANEN, LASSI:  
3D-tulostuksen hiukkaspäästöt

Opinnäytetyö 45 sivua  
Toukokuu 2024

---

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Tampereen ammattikorkeakoulu. Tutkimuksessa selvitettiin koulun 3D-tulostimiin asennettujen koteloiden ja HEPA-suodattimien vaikutusta tulostuksesta syntyviin pienhiukkaspäästöihin. Opinnäytetyön idea syntyi, kun työterveystarkastajat huomauttivat opetustiloissa olevien kotelottomien 3D-tulostimien määrästä. Tulostimien on havaittu heikentävät sisäilman laatua.

Työ aloitettiin perehtymällä aikaisempiin aiheesta tehtyihin tutkimuksiin, käytettäviin laitteisiin ja mittausympäristöön. 3D-tulostamisesta syntyviä hiukkaspäästöjä mitattiin Pegasor AQ™ Indoor -sisäilmanlaatumittarilla. Hiukkaspäästöjen mittauksissa käytettiin kolmea eri materiaalia: PLA, PET-G ja ABS. Opinnäytetyön aikana ilmeni sisäilmanlaatumittarin toimintaan, VOC-mittarin hankintaan sekä aikatauluun liittyviä haasteita, joiden vuoksi VOC-mittaukset jätettiin lopulta toteuttamatta.

Työn aikana ilmenneistä haasteista huolimatta saatiin tuloksia, jotka osoittavat, että kotelointi ja HEPA-suodatin vähentävät tulostamisesta vapautuvia pienhiukkaspäästöjä merkittävästi. Tulokset ovat osittain epäluotettavia sisäilmanlaatumittariin syntyneiden häiriöiden takia. Jatkotutkimusehdotuksena on selvittää 3D-tulostimen koteloinnin ja HEPA-suodattimen vaikutus VOC-päästöihin.

---

Asiasanat: hiukkaspäästömittaus, hiukkassuodatus, kotelointi, muoviset materiaalit, 3D-tulostus

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering  
Intelligent Machines

RANTANEN, LASSI:  
Particle Emissions of 3D Printing  
Bachelor's thesis 45 pages  
May 2024

---

The thesis was commissioned by Tampere University of Applied Sciences. The study investigated the effect of the housings and HEPA filters installed on the school's 3D printers on small particle emissions from printing. The need for the work came about when the occupational health inspectors pointed out the number of uncased 3D printers on the teaching premises. Printers have been found to degrade indoor air quality.

The work started by becoming familiar with previous studies on the subject, the equipment used, and the measurement environment. Particle emissions from 3D printing were measured with the Pegasor AQ™ Indoor air quality meter. Three different materials were used in the measurements of particle emissions: PLA, PET-G, and ABS. During the thesis work, there were challenges related to the operation of the indoor air quality meter, the purchase of the VOC meter, and the schedule, due to which the VOC measurements were ultimately not carried out.

Despite the challenges that arose during the work, results show that the enclosure and the HEPA filter significantly reduce the small particle emissions released from 3D printing. The results are partly unreliable due to interference with the indoor air quality meter. A further research proposal is to find out the effect of the 3D printer housing and the HEPA filter on VOC emissions.

---

Key words: particle emission measurement, particle filtration, enclosure, plastic materials, 3D printing

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	AIHEEN TAUSTA .....	7
2.1	Työn tarpeet ja tavoitteet.....	7
2.2	Mittaushuone.....	7
2.3	3D-tulostin .....	8
2.4	Mitä on 3D-tulostaminen? .....	11
2.5	Aikaisemmat tutkimukset .....	13
3	MITTAUSYMPÄRISTÖ .....	20
3.1	Mittauksissa käytettävät tulostusmateriaalit .....	20
3.2	Sisäilmanlaatumittari .....	21
3.3	Mittauksissa käytettävä testikappale .....	23
4	MITTAUKSET .....	25
4.1	Mittausten valmistelu.....	25
4.2	Mittausten suorittaminen .....	27
5	MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY.....	30
5.1	Mittaukset avoimesta kotelosta ja sen ympäristöstä .....	30
5.2	Mittaukset suljetun kotelon sisältä.....	31
5.3	Mittaukset suljetun kotelon sisältä ja sen ulkopuolelta .....	36
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	41
	LÄHTEET.....	43

**LYHENTEET JA TERMIT**

ABS	Acrylonitrile butadiene styrene Akrylinitriilibutadieenistyreeni
G-Code	Geometric Code Geometrinen koodi
HEPA	High efficiency particulate air Korkean erotusasteen ilmansuodatin
LDSA	Lung deposited surface area Keuhkodespositiivapinta-ala
MPPS	Most Penetrating Particle Size Tunkeutuvien hiukkaskoko
PET-G	Polyethylene terephthalate glycol Polyeteenitereftalaatti-glykoli
PLA	Polylactic acid or polylactide Polymaitohappo tai polylaktidi
PM2.5	Particulate matter less than 2.5 microns in diameter Hiukkaset, joiden läpimitta on alle 2,5 mikronia
PM1	Particulate matter less than 1 micron in diameter Hiukkaset, joiden läpimitta on alle 1 mikroni
VOC	Volatile organic compounds Haihtuvat orgaaniset yhdisteet

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on 3D-tulostamisen hiukkaspäästöt ja sen toimeksiantaja on Tampereen ammattikorkeakoulu (TAMK). Työterveystarkastajat tekivät tarkastuksen TAMKin tiloista ja he huomauttivat 3D-tulostimien suuresta määrästä, sekä opetustilassa olevasta hajusta. Työterveystarkastajat suosittelivat asentamaan tulostimiin kotelot ja ilmansuodattimet sisäilman pienhiukkaspäästöjen vähentämiseksi.

TAMKilla heräsi kiinnostus tulostamisesta syntyvien pienhiukkasten määrästä ja haluttiin selvittää tulostamisesta aiheutuvan hajuhaitan todellinen syy. Tämän seurauksena päätettiin teettää tutkimus, jossa mitataan sisäilmanlaatua tulostuksen aikana ja analysoidaan pienhiukkaspitoisuuksia. Opinnäytetyön aihe päätettiin tulostimien koteloinnin jälkeen.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, miten 3D-tulostimiin asennetuilla koteloidilla ja HEPA-suodattimilla voidaan vaikuttaa pienhiukkaspäästöihin sisäilmanlaadun parantamiseksi. Tutkimuksessa vertaillaan kahta tilannetta, jossa ensimmäisessä tilanteessa on koteloitu tulostin, joka on varustettu HEPA-suodattimella ja toisessa tilanteessa on tulostin ilman koteloa ja suodatinta.

## 2 AIHEEN TAUSTA

### 2.1 Työn tarpeet ja tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää 3D-tulostimien koteloinnin ja HEPA-suodattimen vaikutus tulostamisessa syntyviin pienhiukkaspäästöihin. Tutkimuksessa mitataan 3D-tulostamisesta vapautuvien hiukkasten pitoisuuksia sisäilmanlaatumittarilla. Mitattuja tuloksia vertaillaan, jotta nähdään kuinka suuri vaikutus koteloinnilla ja HEPA-suodattimella, sekä eri materiaaleilla on pienhiukkaspäästöihin. Mittauksessa käytettävät tulostusmateriaalit ovat PLA, PET-G ja ABS.

Tampereen ammattikorkeakoulun 3D-tulostimissa ei ole ollut aikaisemmin suljettuja koteloita, tai ilmansuodattimia. Työterveystarkastajien teettämässä tarkastuksessa TAMKin tiloista, kiinnittivät he huomiota 3D-tulostimien suureen määrään koulun opetustiloissa. Työterveystarkastajat huomauttivat, että 3D-tulostimien suuri määrä heikentää sisäilmanlaatua ja tulostuksesta syntyvien pienhiukkaspäästöjen vähentämiseksi olisi suotavaa kehittää ratkaisu.

Koulun 3D-tulostimiin suunniteltiin ja asennettiin päälikannet, sekä etuluukut olemassa olevien avonaisten koteloiden lisäksi. Kannen ja etuluukun tarkoituksena on estää 3D-tulostamisesta syntyviä pienhiukkaspäästöjä leviämästä sisäilmaan. Päälikanteen tehtiin myös paikka ilmansuodattimelle, jonka läpi kotelon sisäilmaa poistetaan tuulettimen avulla. Tällä pyritään suodattamaan osa pienhiukkaspäästöistä, sekä hallitsemaan 3D-tulostimen sisälämpötilaa, jotta se ei nousisi liian korkeaksi.

### 2.2 Mittaushuone

Mittaushuoneena toimii 3D-tulostushuone F2-01 (Kuva 1), joka sijaitsee TAMKin pääkampuksella. Huone on aikaisemmin ollut henkilökunnan työhuoneena, mutta vuonna 2023 se muutettiin 3D-tulostushuoneeksi. Huoneen koko mitattiin ja se on pinta-alaltaan 11.5 m<sup>2</sup> ja tilavuudeltaan 29.45 m<sup>3</sup>. Huoneessa on päivisin hyvin

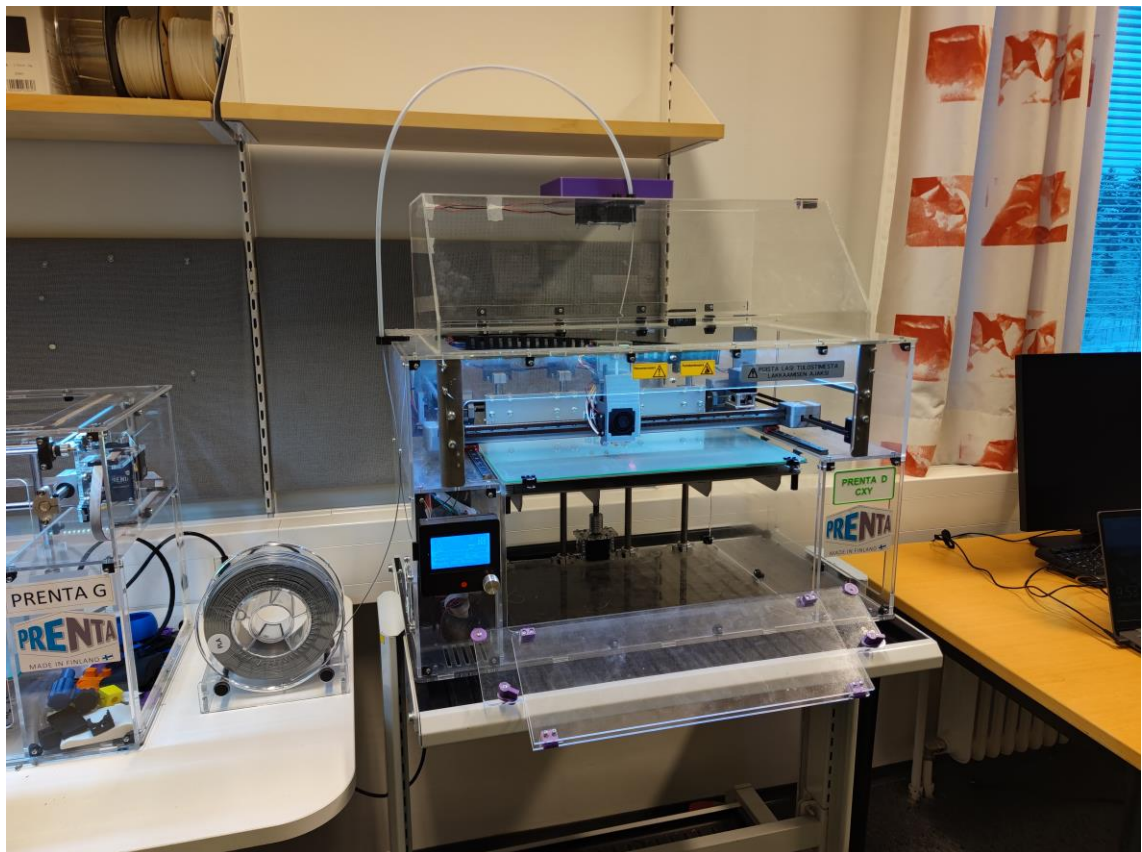
vähän liikennettä, joka tekee siitä oivallisen testiympäristön myös sen pienen kokonsa vuoksi, joka helpottaa mittausdatan keruussa. Tilan ilmanvaihto toimii täydellä teholla klo 8–18 välisenä aikana, ja sen tulo- ja poistoilmakapasiteetti on 45 l/s (Sillanpää & Ojala 2023).



KUVA 1. F2-01 3D-tulostushuone (Rantanen 2023).

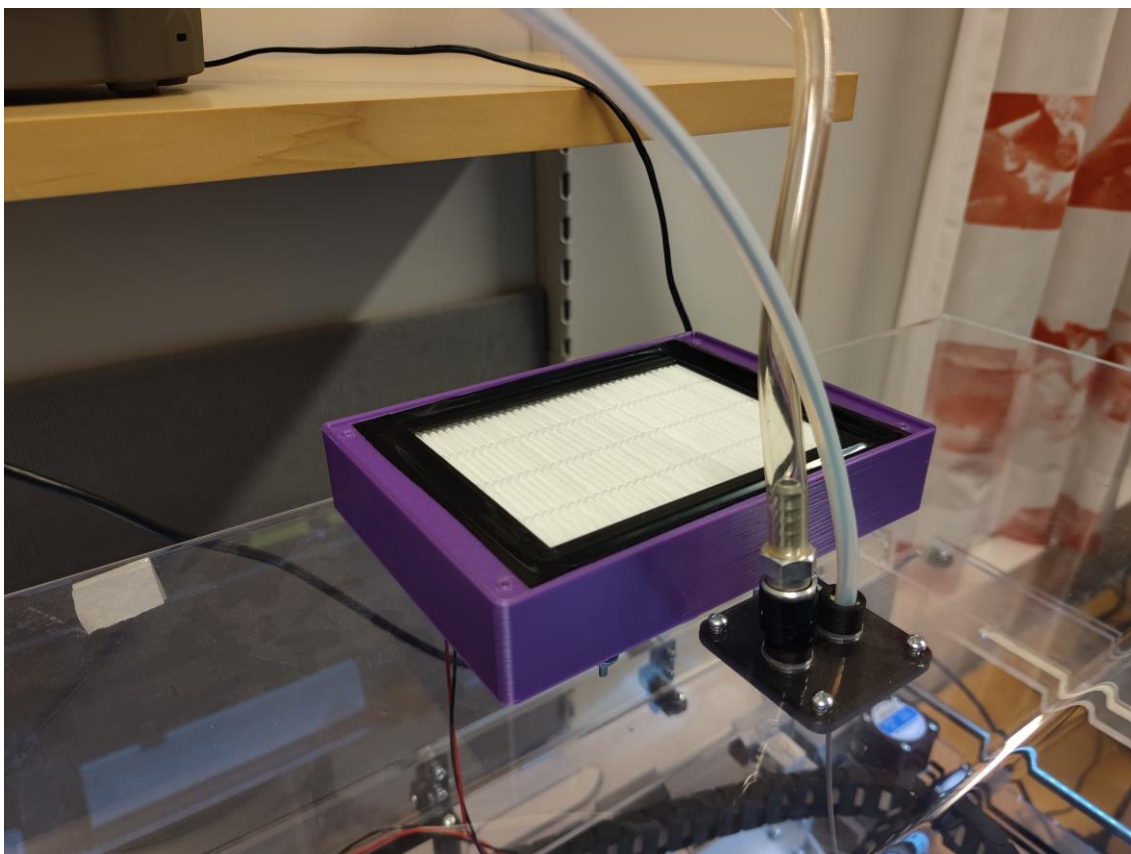
### 2.3 3D-tulostin

Toteutettavien mittauksien aikana testikappaleiden tulostukset tehdään Prenta CXY 3D-tulostimella (Kuva 2), jonka toiminta perustuu FFF-menetelmään. Tulostimessa on yksi pursotin, jonka suuttimen läpimitta on 0.4 mm, sekä yksi lämmitettävä tulostusalusta, joka on kooltaan 400 mm x 200 mm x 200 mm. Tulostimella voidaan tulostaa 1.75 mm paksuista filamenttia. Tulostimen jäähdytysratkaisu on toteutettu kahdella tuulettimella, joista ensimmäinen sijaitsee kuuma-päässä, jonka tehtävänä on poistaa lämmityselementistä syntyvää hukkalämpöä. Toinen tuulettimista sijaitsee suuttimen vieressä, jota käytetään tulostettavien kappaleiden jäähdyttämiseen, jotta sula filamentti kovettuu haluttuun muotoon. Materiaalit, jota 3D-tulostimella voidaan tulostaa ovat PLA, PET-G ja ABS. Opetuskäytössä sillä tulostetaan PLA ja PET-G materiaaleja.



KUVA 2. Mittauksessa käytettävä Prenta CXY 3D-tulostin (Rantanen 2023).

3D-tulostimeen on jälkeinpäin asennettu etu- ja pääliluukut pienhiukkaspäästöjen vähentämiseksi. Pääliluukkuun on asennettu HEPA-ilmansuodatin (Kuva 3), jonka läpi tulostimen sisäilma poistetaan tuulettimen avulla, tällä pyritään suodattamaan osa pienhiukkasista ja hallitsemaan tulostimen sisälämpötilaa, jotta se ei nousisi liian korkeaksi. Asennettu ilmansuodatin on NEDIS VCFI250ELPH ja sillä on HEPA 13 luokitus (Nedis n.d.). Ilmansuodatin on tiivistetty suodatinkoteloon sähköteipillä, jotta poistoilma ei pääse kulkeutumaan suodattimen ja suodatinkotelon välistä. Käytettävä ilmansuodatin on valittu sen edullisuuden ja saatavuuden vuoksi.



KUVA 3. Ilmansuodatin, vasemmalla sisäilmanlaatumittarin imuletku (Rantanen 2023).

Testikappaleiden tulostamisessa käytetyt asetukset on esitelty (taulukossa 1). Tulostusasetukset ovat peräisin Prenta CXY profiilista, joka on suunniteltu koulun tulostimille. Jokaisella mittauksessa käytettävällä filamentilla tulostusnopeus, sekä täyttötiheys pysyvät samana, mutta suuttimen ja tulostusalustan lämpötilat, sekä jäähdytyspuhaltimen nopeus muutettiin filamenttien valmistajien suositusten mukaiseksi. Kappaleet viipaloitiin Simplify3D-ohjelman avulla, joka muuttaa 3D-kappaleen G-koodiksi, jota 3D-tulostin osaa tulkita.

TAULUKKO 1. 3D-tulostimen tulostusasetukset.

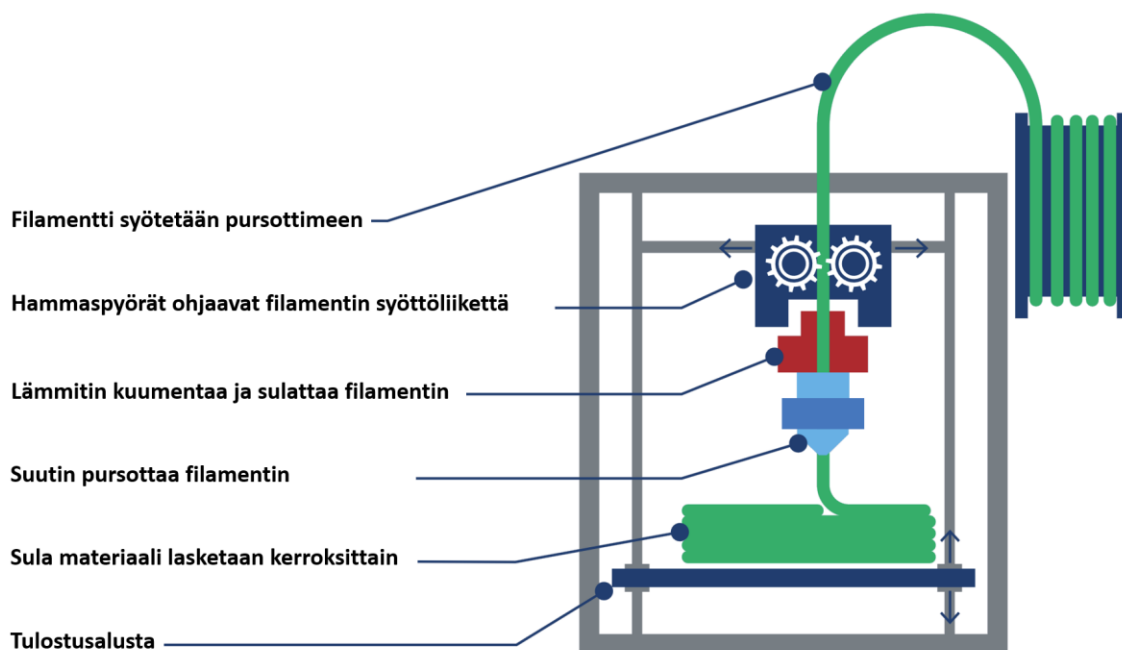
Materiaali	PLA	PET-G	EasyFil ABS
Suuttimen lämpötila	210 °C	240 °C	250 °C
Tulostusalustan lämpötila	60 °C	80 °C	100 °C
Jäähdytyspuhaltimen nopeus	100 %	50 %	30 %
Tulostusnopeus	100 mm/s	100 mm/s	100 mm/s
Täyttötiheys	20 %	20 %	20 %

## 2.4 Mitä on 3D-tulostaminen?

3D-tulostaminen on materiaalia lisäävä valmistusprosessi, jossa materiaalia lisätään kappaleen valmistamiseksi. Valmistuksessa käytetään digitaalista 3D-mallia, joka viipaloidaan yksittäisiin kerroksiin tietokoneen avulla, jonka jälkeen tuloslinjalaitteisto tulostaa kappaleen kerros kerrokselta. Jokaista kerrosta voidaan ajatella kappaleen poikkileikkauksena (PLM Group n.d.).

Viimeisten vuosien aikana 3D-tulostimien hinnat ovat laskeneet merkittävästi. Tulostintekniikan kehitys, patenttien raukeaminen, verkossa olevat yhteisöt ja avoimen lähdekoodin mallit ovat vaikuttaneet 3D-tulostamisen yleistymiseen ja tulostimien hintojen laskuun (Tukes n.d.).

Yleisin käytössä oleva 3D-tulostustekniikka on Fused Filament Fabrication (FFF), joka tunnetaan myös nimellä Fused Deposition Modeling (FDM), jossa termoplastista materiaalia pursotetaan kerroksittain tulostusalustalle kuumennetun suuttimen läpi (Kuvio 1). FFF-tekniikka alkoi yleistymään nopeasti vasta reilut 10 vuotta sitten, kun aikaisemmat patentit raukesivat (PLM Group n.d.).



KUVIO 1. FFF-menetelmä (Chemical Insights 2020, 2, muokattu).

3D-tulostustekniikoista ensimmäinen kaupallistettu oli stereolitografia (SLA), jonka keksi Chuck Hull 1980-luvulla. SLA-menetelmässä käytetään nestemäistä hartsia, joka kovetetaan ultraviolettilaserin avulla. SLA soveltuu loppukäyttöön tarkoitettuihin osiin, työkaluihin, prototyyppeihin ja tarkkuusvalumalleiksi (PLM Group n.d.).

Kaksi muuta yleistä 3D-tulostusmenetelmää ovat DLP (Digital Light processing) ja MJF (Multi Jet Fusion). DLP-menetelmässä käytetään projisoitua valoa kerroksien kovettamiseen. Se sopii hyvin monimutkaisten kappaleiden tulostamiseen ja se on nopeampi kuin SLA, sillä se kovettaa kerralla koko kerroksen. MJF-tekniikassa polymeerijauhe suihkutetaan tulostusalustalle, jonka jälkeen se sulatetaan valon tuottamalla lämpöenergialla. Se on myös hyvin tarkka ja kestävä tulostusmenetelmä, sekä se soveltuu pienen tai keskisuuren volyymin tuotantoihin, prototyyppien nopeaan valmistukseen tai ruiskuvaluprosessin siirtymävaiheeseen (PLM Group n.d.).

Yleisimpiä tulostusmateriaaleja FFF-tulostimissa ovat PLA, joka on biohajoavaa materiaalia. Sillä on matala sulamislämpötila, se on kevyttä ja hyvin helppo tulos-taa. PET-G on lähes samaa materiaalia mitä muovipulloissa käytetään (Polyeteenitereftalaatti), ainoana erona on siihen lisätty glykoli. Se on hyvin kestävä, joustavaa ja sillä on korkeampi lämmönsietokyky, kuin PLAlla. Materiaalina ABS on hyvin jäykkä, sekä sillä on parempi iskunkestävyys, kuin monilla muilla polymeereillä ja se on myös edullinen (Turney 2023).

3D-tulostusta hyödynnetään esimerkiksi lentokoneiden osien valmistamisessa. General Electric Aviation (GE Aviation) kehitti LEAP suihkumoottoriin polttoainesuuttimet 3D-metallitulostuksen avulla, joka mahdollisti kappaleen valmistamisen yhdestä osasta, kun tavallisilla tuotantomenetelmillä suutin olisi täytynyt hitsata kahdestakymmenestä eri osasta. Samalla GE Aviation onnistui pienentämään suuttimen painoa 25 prosenttia (Kennedy 2019).

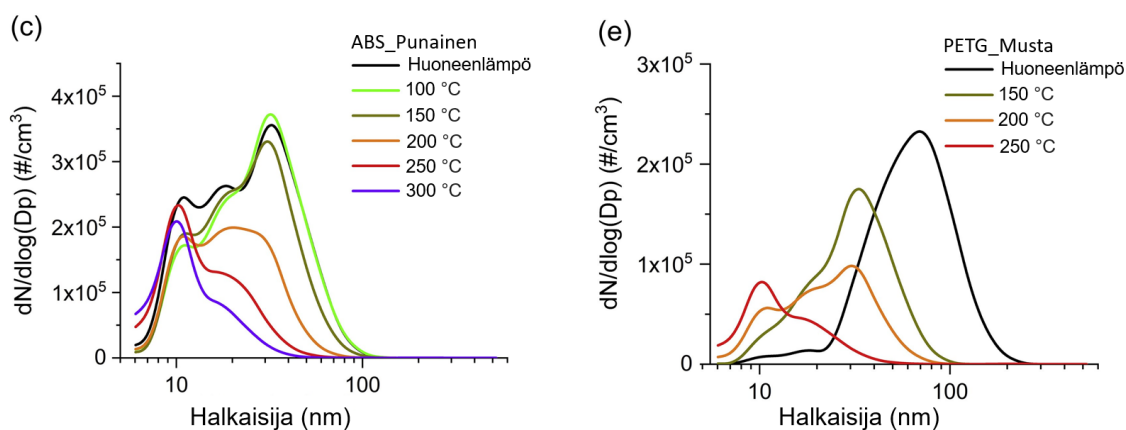
## 2.5 Aikaisemmat tutkimukset

Opinnäytetyön aiheesta on tehty lukuisia tutkimuksia eri 3D-tulostusmenetelmillä, materiaaleilla, tulostusasetuksilla, sekä suodatusmenetelmillä. Aihepiirin laajuuden ja opinnäytetyön kohteen takia tässä kappaleessa keskitytään FFF-tulostuksen päästöihin, sekä niiden torjuntaan.

3D-tulostamisen on havaittu erittäin runsaasti PM1 kokoluokan pienhiukkasia sisäilmaan, joiden läpimitta on alle yksi mikrometri, niiden lisäksi tulostamisesta syntyy VOC-yhdisteitä, joista eniten vapautui styreeniä ABS filamenttia tulostaessa. ABS tulostuksen styreenipitoisuudet vaihtelivat 20 – 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  välillä. PLA-filamentilla tulostaessa VOC-pitoisuudet eivät juurikaan eronneet huoneiston taustapitoisuuksista (Hartikainen, Johansson, Hyttinen & Pasanen 2016).

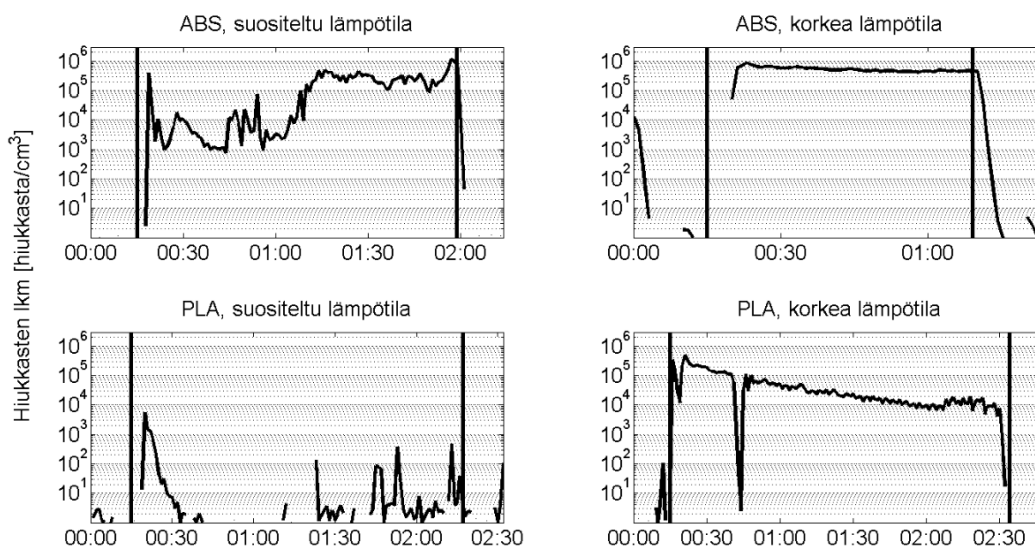
VOC-yhdisteet ovat kaasuja ja niihin kuuluvat mm. aromaattiset hiilivedyt, kuten bentseeni ja tolueeni, aldehydit, alkaanit, alkoholit ja esterit. Normaalisti nämä yhdisteet esiintyvät pienissä määrin sisäilmassa ja niitä vapautuu talojen rakenteista, sekä eri materiaaleista. Yksittäisen yhdisteen lisääntynyt pitoisuus sisäilmassa voi aiheuttaa silmien ja limakalvojen ärsytysoireita, sekä päänsärkyä. Useiden yhdisteiden yhteisvaikutuksen epäillään olevan terveydelle haitallista (Hengitysliitto 2022).

Suurin osa 3D-tulostamisesta syntyvistä pienhiukkaspäästöistä on halkaisijaltaan alle 100 nm. Kuviossa 2 on esitelty ABS ja PETG materiaalien hiukkaspäästöjen konsentraatio, sekä hiukkaskokojakauma. Pienhiukkaset ohjattiin termodenuderin läpi, joka poistaa kosteuden ja osan haihtuvista yhdisteistä. Termodenuderissa käytetyt lämpötilat on ilmaistu eri väreillä. 10 nm pienempiä pienhiukkaspäästöjä havaittiin ABS ja PETG materiaaleilla, josta ABS:lla oli suurimmat pienhiukkaspäästöt (Gu, Wensing, Uhde & Salthammer. 2019a, 482).



KUVIO 2. ABS & PETG tulostamisen hiukkaskoon jakauma ja konsentraatio. (Gu ym. 2019a. Muokattu, 482).

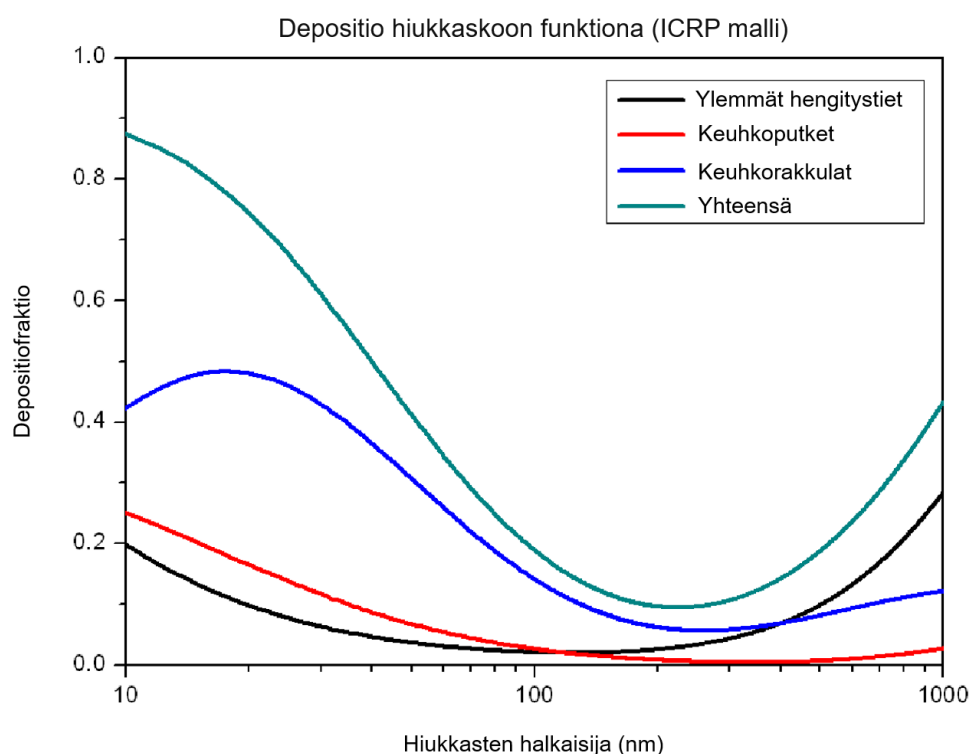
FFF-tulostuksessa käytettävä materiaali kuumennetaan suositeltuihin lämpötiloihin, jotka riippuvat sen materiaaliominaisuuksista. Tulostuslämpötilan on havaittu olevan suoraan yhteydessä pienhiukkaspäästöjen pitoisuuksiin. Kuviossa 3 on esikammiossa tehty hiukkasmittaus 3D-tulostuksesta, jossa vertaillaan lämpötilan vaikutusta pienhiukkaspäästöihin. Mittauksen pienhiukkasten havaintoalue oli 10–420nm. Tulostuksen alkuvaiheessa pienhiukkaspitoisuudet nousivat voimakkaasti tulostuslämpötilojen kohotessa tulostusmateriaalien sulamispisteeseen. Tulostuksessa käytettiin ensin ABS ja PLA materiaalien suositeltuja tulostuslämpötiloja, jotka olivat 230°C ja 200°C. Tämän jälkeen tehtiin korkean lämpötilan tulostukset, joissa materiaalien lämpötilat nostettiin 250°C ja 230°C (Viitanen ym. 2017, 23-24).



KUVIO 3. Esikammiossa mitattujen hiukkasten lukumäärä (Viitanen ym. 2017, 24).

Hengitysteihin deponoitavien pienhiukkasten määrää pystytään arvioimaan pienhiukkasten keuhkocodepositoiva pinta-alan (LDSA) avulla. Suurin osa hengityksen ja keuhkoverenkierron vuorovaikutuksesta tapahtuu keuhkorakkuloissa, jonka vuoksi se on äärimmäisen tärkeä pienhiukkasten terveysvaikutusten takia (Leppistö ym. 2022, 2).

Keuhkocodepositivien hiukkasten kokojakauma, sekä depositiofraktio (Kuvio 4). Kuvio on ICRP (International Commission on Radiological Protection) laskema depositokäyrä, joka kuvastaa miten hiukkaskoko, sekä hengitystiet vaikuttavat pienhiukkasten deponoitumiseen. Pienhiukkasista halkaisijaltaan 40 nm jopa 50 % deponoitui hengityselimiin ja 10 nm hiukkasista n. 87 % (naneos 2021, 1). Vertailemalla (Kuvioita 2 ja 4) voidaan tarkastella, kuinka 3D-tulostamisesta vapautuvat pienhiukaspäästöt jakautuvat juuri sille alueelle, jossa keuhkocodepositiota tapahtuu eniten.



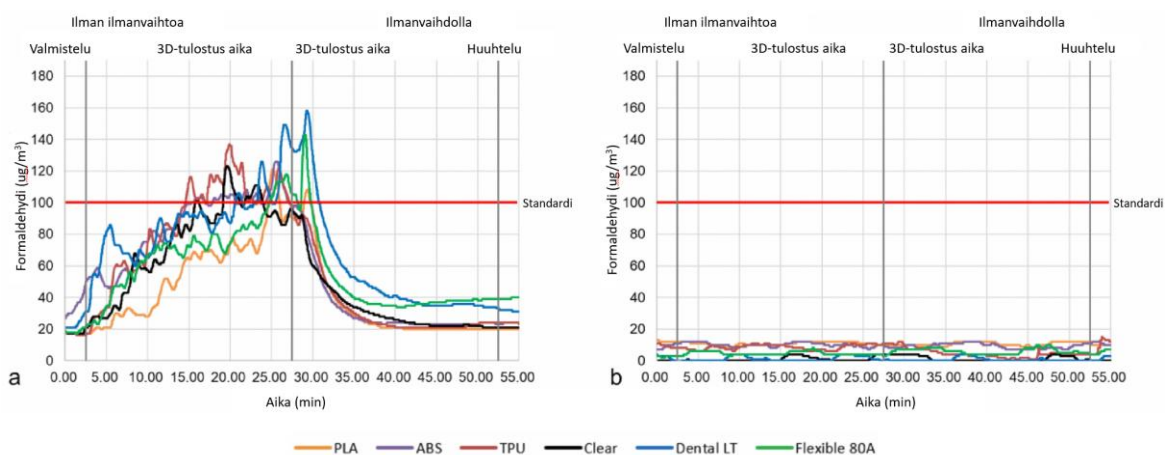
KUVIO 4. Depositio hiukkaskoon funktiona (naneos 2021, 1, muokattu).

3D-tulostuksesta vapautuville pienhiukkasille altistuminen saattaa aiheuttaa tulehdusreaktioita keuhkoissa, mutta kaikkia sen terveysvaikutuksia ei vielä kuitenkaan tunneta. 3D-tulostamisesta vapautuu myös lukuisia orgaanisia yhdisteitä kuten formaldehydiä ja styreeniä, mutta pientulostuksessa niiden pitoisuudet ovat

usein matalia, eikä niiden terveydelle haitalliset vaikutukset ole nykytiedon mukaan merkittäviä (Työterveyslaitos 2016, 2).

Maateriaaleista PLAn on havaittu tuottavan paljon erilaisia VOC-päästöjä, jossa laktidi, metyyli metakryylihapon esteri ja kaprolaktaami olivat yleisimmät havaitut päästöt. Vaikkakin laktidi ei ole suoranaisesti ihmisille vaarallinen yhdiste, PLA ei kuitenkaan ole materiaalina turvallinen käyttäjille, varsinkaan korkeilla lämpötiloilla tulostaessa. (Finnegan ym. 2024, 2). ABS tulostamisessa suurimmat vapautuvat VOC-päästöt jokaisella tutkimuksessa käytetyssä filamentissa aiheutuivat styreenistä, isofronista ja etyylibentseenistä, joista kaikki kolme ovat mahdollisesti karsinogeenisiä ihmisille (Finnegan ym. 2024, 7).

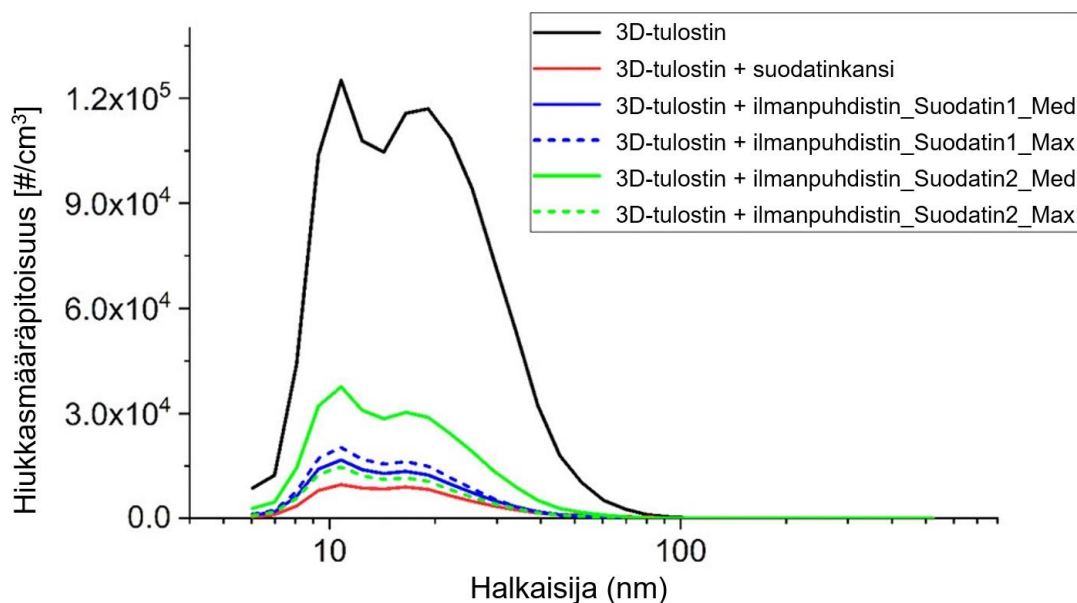
3D-tulostamisen on myös havaittu ylittävän formaldehydin suositellun rajan  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Kuvio 4). Tutkimuksessa PLA, ABS ja termoplastinen polyuretaani (TPU) tulostettiin FFF-menetelmällä. Clear, Dental LT ja Flexible 80A, jotka ovat tuotenimiä 3D-tulostushartseille, tulostettiin fotopolymeroinnilla. Kuviossa a) mitataan 3D-tulostuksesta vapautuvia formaldehydi tasoja 3D-tulostushuoneessa. Kuviossa b) on kontrollialueen formaldehydipitoisuus ennen mittauksia. Kontrollialue sijaitsee 3D-tulostushuoneen ulkopuolella (Taehun, Dayeong, Sojin & Namkug. 2022, 6).



KUVIO 4. Formaldehydi päästöt 3D-tulostuksessa (Taehun ym. 2022, 6, muokattu).

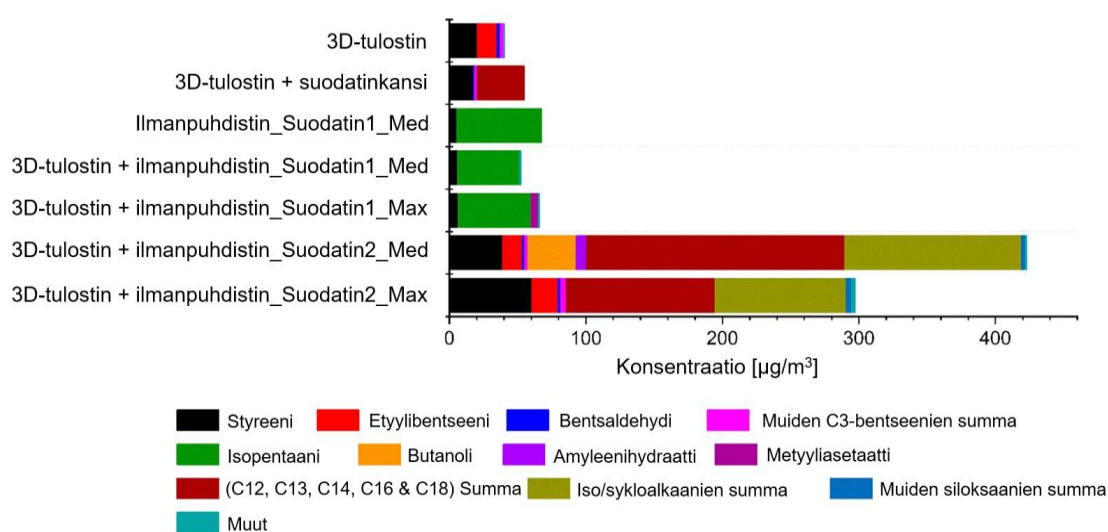
3D-tulostuksesta syntyvien pienhiukkaspäästöjen vähentämiseksi on tutkittu toimistohuoneen ilmanvaihdon tehokkuutta, jonka havaittiin olevan riittämätön pienhiukkasten poistamiseen pientulostuksessa, kun tilassa käytettiin koteloimatonta 3D-tulostinta, joka nosti pienhiukkasten pitoisuuden moninkertaiseksi taustapitoisuuden verrattuna. Myös kohdepoiston havaittiin olevan riittämätön, sillä kohdepoistoa ei saatu asennettua tarpeeksi lähelle tulostimen suutinta, josta suurin osa pienhiukkaspäästöistä syntyy. Sijoittamalla 3D-tulostimen muovikotelon sisälle, havaittiin sen estävän pienhiukkaspäästöjä leviämistä sisäilmaan, vaikka käytetty kotelo ei ollut ilmatiivis, eikä sen sisällä olevaa ilmaa poistettu. Kohdepoiston ja muovikotelon yhdistelmällä saatiin tulostamisesta syntyneet päästöt torjuttua lähes täysin, madaltaen pienhiukkaspitoisuudet taustapitoisuuden tasolle (Viitanen ym. 2017, 27).

3D-tulostamisesta vapautuvia pienhiukkasten määrää on myös pystytty pienentämään merkittävästi käyttäen ilmansuodattimia (Kuvio 5). Eri suodatusmenetelmien vaikutusta vertailtiin ABS tulostamisesta vapautuviin pienhiukkaspäästöihin. Vertailuarvona on mittaus 3D-tulostimesta, jossa ei ole suodatinkantta, tai ilmanpuhdistinta, jolloin pienhiukkaspäästöt pääsivät leviämään vapaasti sisäilmaan. Suodatinkansi koostuu HEPA- ja aktiivihiilisuodattimesta ja sen avulla saatiin aikaiseksi paras suodatustehokkuus, suodatinkansi myös teki 3D-tulostimesta ilmatiiviin. Lähtötilanteen pienhiukkaspäästöistä 93 % saatiin suodatettua. Ilmanpuhdistimen kanssa pienhiukkaspitoisuudet olivat korkeammat, koska ilmanpuhdistin oli sijoitettu tulostimen taakse 0.5 m päähän, eikä 3D-tulostimessa ollut kantta, joka estäisi pienhiukkasten leviämistä huoneen sisäilmaan (Gu ym. 2019a, 501).



KUVIO 5. ABS tulostuksen pienhiukkaskonsentraatio ja kokojakauma suodatuksella ja ilman (Gu ym. 2019b, 501, muokattu).

Suodatusmenetelmien vaikutusta haihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin tutkiessa havaittiin, että suodattimien käyttö johti uusien VOC-yhdisteiden syntymiseen (Kuvio 6). Suodatinkannen avulla etyylibentseeni saatiin kokonaan suodatettua, sekä styreenipitoisuuksista 15 %. Suodatuksesta kuitenkin syntyi C14, C16 ja C18 yhdisteitä. Ilmanpuhdistimen käytössä havaittiin sama ilmiö. Syy uusien VOC-yhdisteiden syntyyn epäiltiin johtuvan uusista suodattimista (Gu ym. 2019b, 501).



KUVIO 6. ABS tulostuksen VOC-yhdisteet ja niiden konsentraatiot (Gu ym. 2019b, 502, muokattu).

Tutkimuksessa käytetyt uudet ilmansuodattimet laitettiin kammioon tuuletuttamaan. Suodatinkantta tuuletettiin viiden päivän aikana yhteensä 58 tuntia ja ilmanpuhdistinta neljän päivän aikana 32 tuntia. Suodattimien tuulettamisen havaittiin laskevan VOC-päästöjä joka päivä. 3D-tulostimissa käytetyt suodattimet kuumennettiin 62 °C lämpötilaan tehtyjen mittausten jälkeen, eikä niistä havaittu vapautuvan etyylibentseeniä, styreeniä, tai bentsaldehydiä (Gu ym. 2019c, 7).

### 3 MITTAUSYMPÄRISTÖ

#### 3.1 Mittauksissa käytettävät tulostusmateriaalit

Testikappaleen tulostus toteutetaan kolmella eri tulostusmateriaalia, näitä ovat PLA, PET-G ja ABS, joista TAMKissa yleisin käytössä oleva tulostusmateriaali on PLA. Vähäisemmässä käytössä oleva PET-G käytetään tapauksissa, joissa tulostettavasta kappaleesta halutaan kestävämpi, sekä pitkäikäisempi. ABS tulostaminen koulussa on hyvin harvinaista, sen hajuhaittojen ja haastavan tulostettavuuden takia.

PLA ja PET-G filamenttien valmistaja on Devil Design ja EasyFil ABS filamentin valmistaja on Formfutura. Mittauksessa käytettävän filamentin väri on harmaa, sillä se on yleisesti saatavilla oleva väri, sekä siitä näkee helposti yksityiskohdat ja mahdolliset tulostusvirheet. Samalla minimoidaan filamentin väriaineiden vaikutus mittaustuloksiin. Mittauksissa käytettyjen filamenttien koostumukset on koottu (Taulukkoon 2). Tiedot ovat peräisin valmistajien käyttöturvallisuustiedoista (Materialpro3D 2016, 2; Formfutura 2019, 2).

TAULUKKO 2. Filamenttien valmistajat, materiaali, koostumus ja tiedot ainesosista.

Valmistaja, materiaali, koostumus ja tiedot ainesosista	Konsentraatio	CAS Numero
<b>Devil Design (PLA)</b>		
Polylaktidiharts, väriaine	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu
Alumiinijauhe	0,1 - 0,25 %	7429-90-5
Kinoliiniväriaine	10 - 20 %	17772-51-19
<b>Devil Design (PET-G)</b>		
Glykoli modifioitu Polyeteenitereftalaatti	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu
Neopentyyliglykoli	Ei ilmoitettu	026780-49-4
<b>Formfutura (EasyFil ABS)</b>		
Akrylinitriilibutadieeni Styreeniharts	Ei ilmoitettu	9003-56-9
Muut raportoitavat tasot alittavat komponentit	1 - < 3 %	Ei ilmoitettu

### 3.2 Sisäilmanlaatumittari

3D-tulostamisesta vapautuvia pienhiukkasia mitataan Pegasor AQ™ Indoor sisäilmanlaatumittarilla. Opinnäytetyössä avustava opettaja auttoi sisäilmanlaatumittarin hankinnassa, jonka Pegasor Oy lainasi minulle opinnäytetyön toteuttamiseksi (Kuva 4). AQ™ Indoor sisäilmanlaatumittari on suomalaisyrityksen Pegasor Oyn valmistama. Yritys valmistaa nykyisin myös Airam ja Airin laiteita sisäilman mittaamiseen, sekä hiukkasantureita ja mittareita, jotka soveltuvat esimerkiksi polttomoottorien päästöjen mittauksiin.



KUVA 4. Vasemmalla Pegasor AQ™ Indoor, oikealla ylhäällä Pegasor Airam ja oikealla alhaalla Pegasor Airin (Pegasor 2019; Pegasor 2024a; Pegasor 2024b).

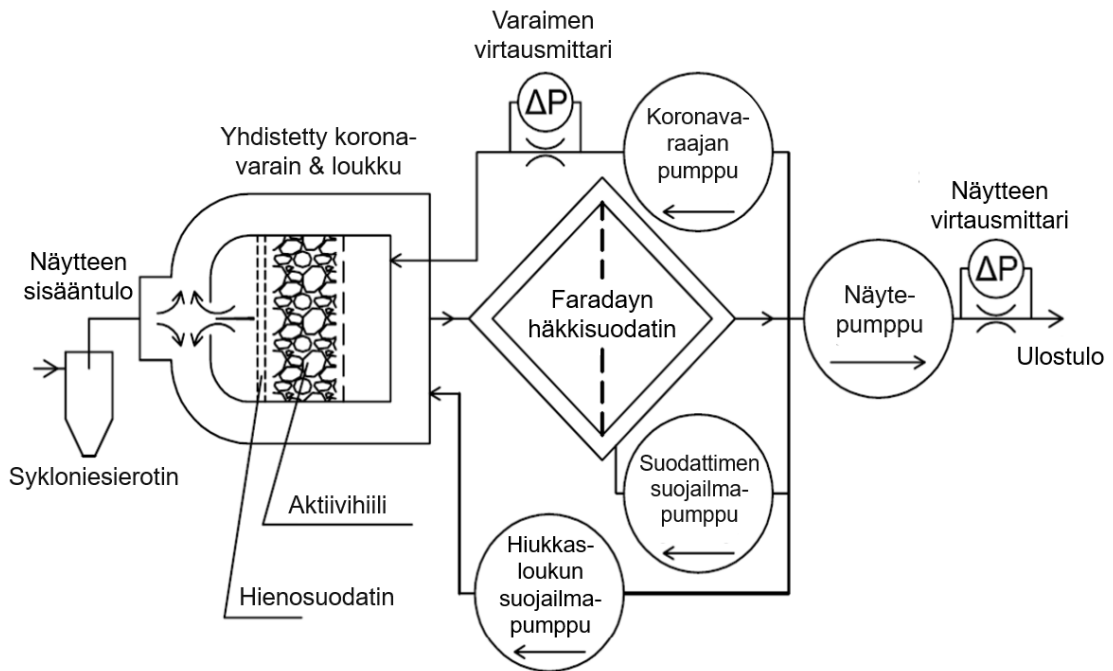
Mittauksiin soveltuvia mittareita löytyy markkinoilta muiltakin valmistajilta kuten Dekatilta ja naneosilta (Kuva 5). Dekati® High Resolution ELPI®+ on aerosolin hiukkaskokospektrometri, jolla voidaan havaita 6 nm – 10 µm kokoluokan hiukkasia, sekä LDSA-pitoisuuksia. (Dekati Ltd. 2023, 6). naneos Partector Pro 2 on kompakti sisäilmanlaatumittari, jonka havaintoalue on 13–300 nm ja sillä pystytään mittaamaan LDSA-pitoisuuksia. Sen lisäksi siinä on sisäänrakennettu näyttö, sekä mahdollisuus yhdistää älypuhelimeen (naneos, n.d.).



KUVA 5. Dekati® High Resolution ELPI®+ & naneos Partector 2 Pro. (Dekati Ltd. 2023, 2; naneos n.d. muokattu).

Pegasor AQ™ Indoor toimintaperiaate perustuu aerosolhiukkasten sähköiseen varaukseen. Mittaustulokset voidaan esittää hiukkamassapitoisuutena (PM2.5), hiukkaslukumääräpitoisuutena (PN), tai hiukkasten aktiivisten pinta-alan pitoisuutena (PA). Laitteella voidaan mitata myös hiukkasten LDSA-pitoisuuksia (Lung Deposited Surface Area), jolla voidaan tarkastella keuhkorakkuloihin laskeutuvien hiukkasten pinta-alaa. Laite kykenee havaitsemaan 0.01-2.5 µm halkaisijaltaan olevia hiukkasia, sekä sillä pystytään mittaamaan sisäilman lämpötilaa, suhteellista ilmakestettä, sekä ilmanpainetta. (Pegasor 2019).

AQ™ Indoor toimintaperiaate perustuu aerosolipartikkeleiden sähköiseen varaukseen (Kuvio 7). Mitattava ilma ohjataan sykloniin, joka erottaa PM2,5 suuremmat pienhiukkaset. Esisuodatuksen jälkeen partikkelit varataan sähköisesti koronaneulalla, jossa on 5000 voltin tasavirtajännite. Faradayn häkin avulla voidaan tarkastella sitoutuneiden hiukkasten sähkövarausta, joka luetaan hyvin herkillä elektrometrillä (BSRIA 2016, 37).

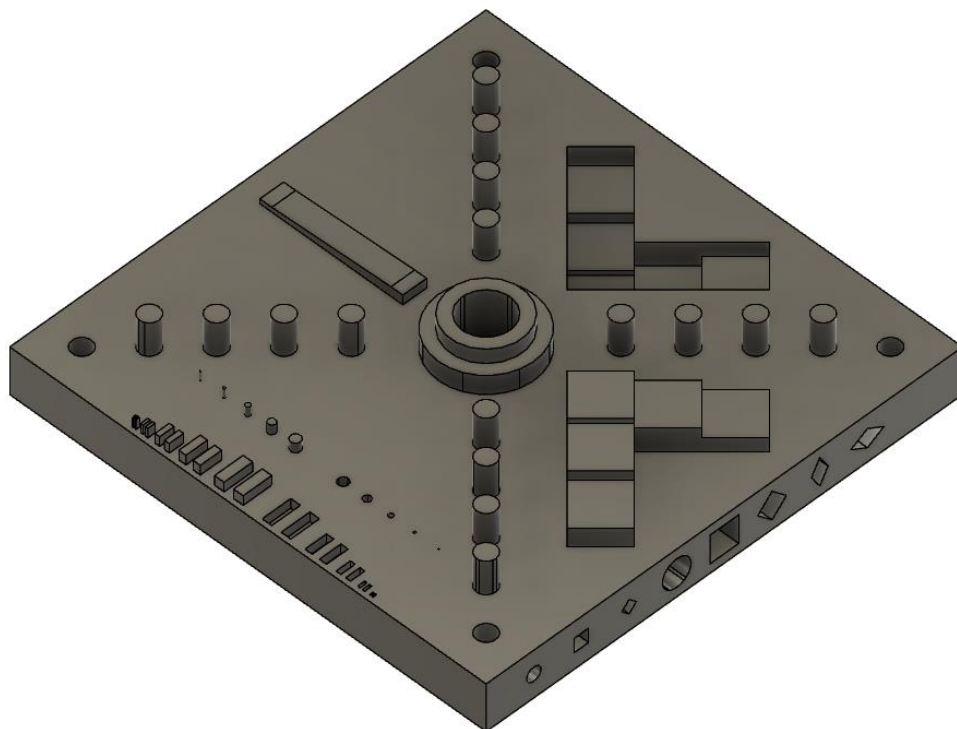


KUVIO 7. Pegasor AQ™ Indoor toimintaperiaate (Pegasor 2019, muokattu).

### 3.3 Mittauksissa käytettävä testikappale

Mittausten tulostettavaksi testikappaleeksi valittiin Yhdysvaltain standardisointi- ja teknologiainstituutin (NIST) suunnittelema materiaalia lisäävän valmistuksen testikappale (Kuvio 8). Testikappaletta on ehdotettu käytettäväksi standardoituna testikappaleena lisäävän materiaalin valmistusprosessissa. Testikappaleen ideana on testata materiaalia lisäävän prosessin tehokkuutta ja tarkkuutta (NIST 2021). Kappaleen pohja on geometrialtaan yksinkertainen, jossa yhdessä kappaleen sivussa on tehty erilaisten kuvioiden leikkaus. Kappaleen pinnalla on monimutkaisempia yksityiskohtia. Testikappale mahdollistaa tutkimustulosten vertailun muihin tutkimuksiin, joissa on käytetty samaa testikappaletta. Testikappale tulostetaan alkuperäisessä koossaan 100 mm x 100 mm x 17 mm.

Testikappale valittiin tehtäviin mittauksiin, sillä se mahdollistaa testitulosten vertailun aikaisempiin tehtyihin tutkimuksiin. Yhdessä aikaisemmassa tutkimuksessa tulostettiin kyseisen testikappale, joka skaalattiin 90 % alkuperäisestä koosta, kappaleen tulostus kesti ~4 tuntia. (Gu ym. 2019, 477).



KUVIO 8. Yhdysvaltain standardisointi- ja teknologiainstituutin materiaalia lisäävän valmistuksen testikappale (Rantanen 2023).

## 4 MITTAUKSET

### 4.1 Mittausten valmistelu

Ennen suoritettavia mittauksia 3D-tulostimen sisältä putsataan irtoroskat, sekä tulostusalusta pestään huolellisesti astianpesuaineella. Puhtaalle tulostusalustalle suihkutetaan kerros 3D Jake Adheasy Spray nimistä suihkutettavaa liimaa (Kuva 5), joka parantaa tulostettavan kappaleen tarttumista tulostusalustalle. Liiman suihkuttamisen jälkeen 3D-tulostimella tulostetaan yksi testikappale, jotta liimasta syntyvät yhdisteet haihtuvat pois ennen varsinaisia mittauksia.



KUVA 5. Mittauksissa käytettävät kiinniteaineet (Rantanen 2024).

Testitulostuksen jälkeen 3D-tulostimessa oleva HEPA-suodatin vaihdetaan uuteen, sillä vanhan suodattimen suodatustehokkuus ei vastaisi uutta. Mittauksissa tehtäviin tulostuksiin ei enää jatkossa lisätä liimaa, tai muita adheesiota parantavia aineita, jotta nämä eivät häiritse mittaustuloksia, sillä liiman levittäminen tulostusalustalle tasaisesti ennen jokaista tulostusta käsin on lähes mahdotonta. Mittaustulokset voivat vääristyä liiman määrän mukaan, jolloin ei pysytä tarkasti näkemään tulostusmateriaalin vaikutusta kaasu- ja hiukkaspäästöihin. Kun kaikki

mittaukset on saatu suoritettua, tehdään vielä mittaus PLA filamentilla, jossa tulostusalustalle suihkutetaan hiuslakkaa, jotta nähdään sen vaikutus pienhiukkaspitoisuuksiin. Hiuslakkaa käytetään kappaleiden tarttuvuuden parantamiseksi.

Mittaukset suoritetaan klo 8–18 välisenä aikana, jolloin TAMKin ilmanvaihto toimii täydellä teholla (Sillanpää & Ojala 2023). Tällä vältetään ilmanvaihdon tehon vaihtelujen aiheuttamia vaikutuksia testituloksiin. Suurin osa koulussa tapahtuvasta 3D-tulostuksesta tapahtuu kyseisellä aikavälillä, kun oppilaat ovat koululla. Tämä auttaa havainnoimaan minkälaisia päästöarvot ovat aktiivisten tuntien aikana.

Jokaisen mittauksen jälkeen mittaushuone, sekä 3D-tulostin, tulisi tuulettaa, jotta aikaisempien tulostusten pienhiukkaspäästöt eivät vaikuta seuraavaan suoritettavaan mittaukseen. Jotta tiedettäisiin kuinka kauan tuuletuksen tulisi kestää, tulee huoneen ilmanvaihtokerroin laskea. Kaavalla (1) voidaan laskea mittaushuoneen ilmanvaihtokerroin (Hillo 2019, 22).

$$n = \frac{q_v}{V} \cdot 3600 \quad (1)$$

missä

$n$  on ilmanvaihtokerroin [1/h]

$q_v$  on ilmamäärä [m<sup>3</sup>/s]

$V$  Huoneen tilavuus [m<sup>3</sup>]

Huoneen tunnettujen mittojen perusteella ilmanvaihtokertoimeksi saadaan kaavalla (1)

$$n = \frac{0,045 \text{ m}^3}{29,45 \text{ m}^3} \cdot 3600 = 5.5$$

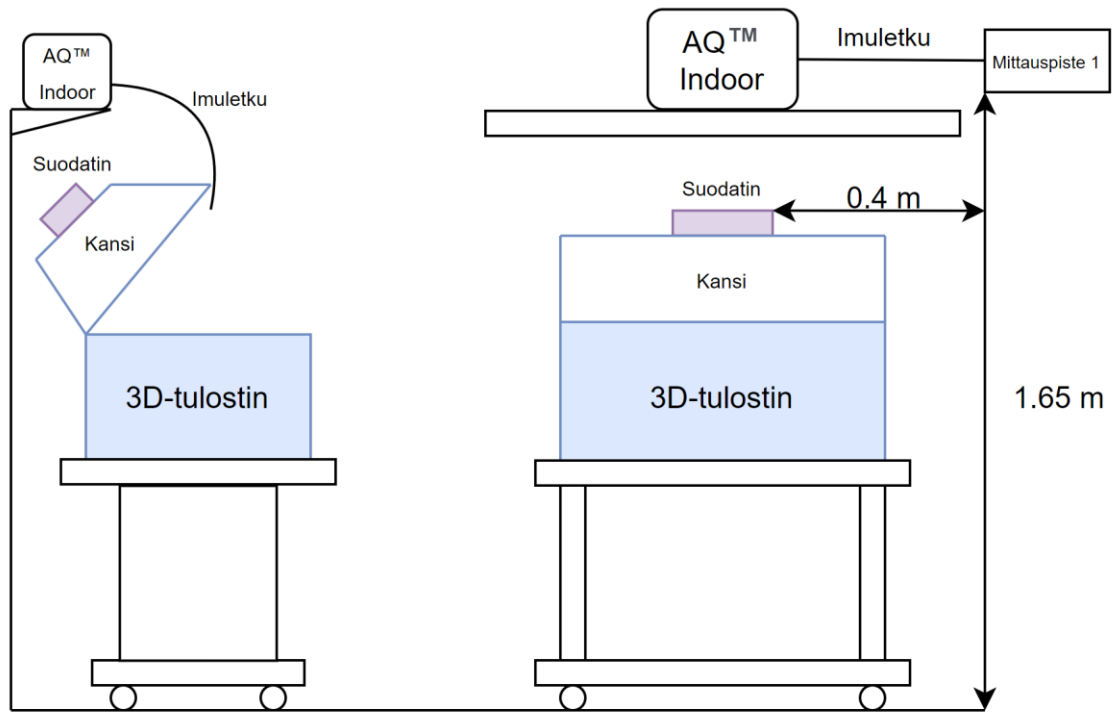
Ilmanvaihtokertoimeksi saatiin 5,5. Tämä tarkoittaa sitä, että yhden tunnin aikana huoneen sisäilma vaihtuu 5,5 kertaa. Mittausten sujuvoittamiseksi huonetta tuuletetaan puolen tunnin ajan, jolloin huoneen ilma vaihtuu 2,75 kertaa. Sisäilmanlaatumittarilla myös tarkistetaan, että pitoisuudet ovat palautuneet tausta-arvoihin.

## 4.2 Mittausten suorittaminen

Ennen 3D-tulostamisen aloittamista AQ Indoor™ sisäilmanlaatumittari käynnistetään ja sen annetaan mitata huoneen sisäilmaa noin 5 minuuttia, jonka aikana mitatut arvot tasoittuvat. Tämän jälkeen mittarissa oleva letku asetetaan 3D-tulostimen kuvun päällä olevaan filamenttiputken reikään, josta se mittaa kuvun sisällä olevan ilman pienhiukkaspitoisuuden.

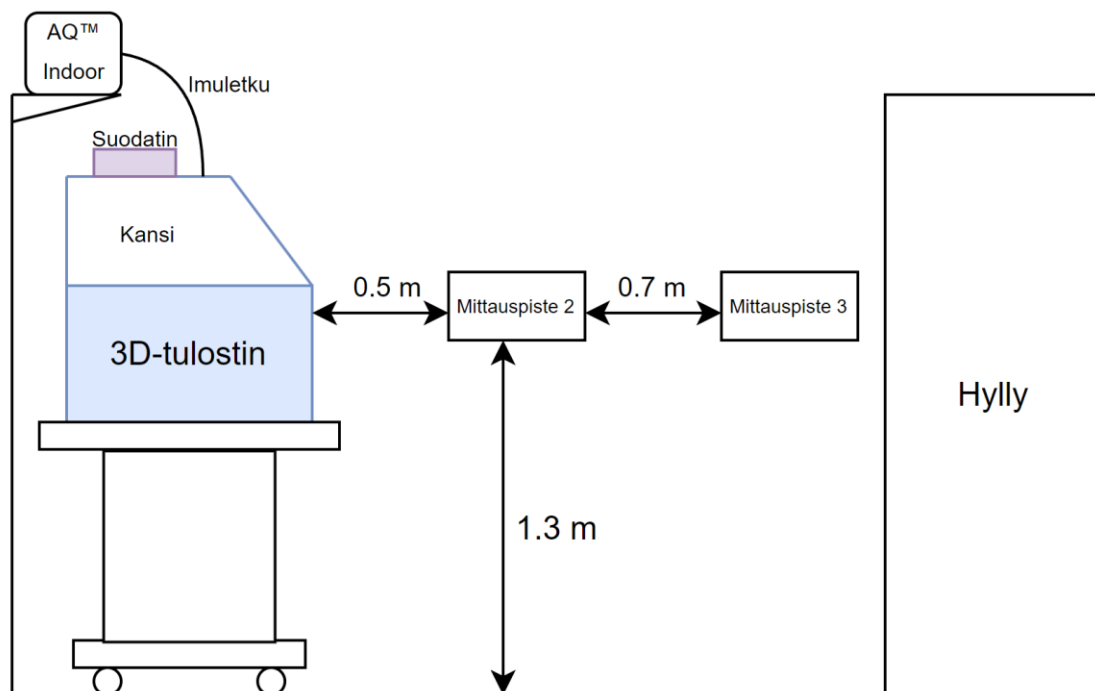
Prenta CXY 3D-tulostinta käynnistettäessä suuttimen, sekä tulostusalustan lämmitys laitetaan päälle. Ennen tulostuksen aloitusta täytyy odottaa, kunnes tavoitelämpötila on saavutettu. Mittauksissa havaittiin, että Prenta CXY tulostimen lämmityksessä kestää n. 2-10 minuuttia riippuen käytetyistä lämpötiloista, joista PLA tavoitelämpötilan saavutettiin ~2 minuutissa, PET-G ~5 minuutissa ja ABS ~10 minuutissa. Tämän jälkeen varsinainen tulostaminen voidaan aloittaa. Tulostamisen aikana huoneessa liikkumista ja oven avaamista vältetään, jottei huoneen sisäilmaan synny turbulenssia, eikä käytävän sisäilma sekoitu mittaushuoneen sisäilman kanssa aiheuttaen vääristymiä mittaustuloksissa.

Kuviossa 9 on esiteltyinä 3D-tulostimen mittauspisteet. Sisäilmanlaatumittari AQ™ Indoor on sijoitettu tulostimen päälle ylähyllylle. Mitattava ilma ohjataan imuletkun avulla sisäilmanlaatumittariin. Imuletku on pääsääntöisesti asetettuna 3D-tulostimen kuvun päällä olevaan tyhjään filamenttiputken reikään (Kuva 3), josta se mittaa tulostimen sisällä olevan ilman pienhiukkaspitoisuuksia. Mittauksissa imuletkun paikkaa vaihdellaan kotelon reiän, suodattimen ja tulostimen ympäristön pisteiden välillä. HEPA-suodattimen tehokkuuden mittaamisessa imuletku laitetaan suodattimen päälle kyljelleen, jotta imuletkun sisääntuloreikä ei ole suorassa kosketuksessa suodattimen kanssa. Jokaisen tehdyn mittauksen jälkeen mittaushuone ja tulostin annetaan tuulettua 30 minuuttia, jonka jälkeen sisäilmanlaatumittarilla tarkistetaan vielä, että sisäilman pitoisuudet vastaavat taustapitoisuuksia.



KUVIO 9. Mittauspisteiden visualisointi (Rantanen 2024).

Avustavan opettajan kanssa käytiin läpi suoritettavia mittauksia ja päätettiin, että tulostimen ympäriltä tehdään mittauksia muutamista eri pisteistä, jotta nähtäisiin etäisyyden vaikutus pienhiukkaspäästöjen leviämiseen. Mittauspisteet, sekä niiden etäisyydet tulostimesta ja lattiasta on merkitty (Kuvioihin 9 & 10). Näiden avulla voidaan havainnoida, miten pienhiukkaspäästöt leviävät huoneessa, sekä mikä niiden pitoisuus on kussakin mittauspisteessä. Pienhiukkaspitoisuuksien mittaamiseksi 3D-tulostimen edestä tulee sisäilmanlaatumittaria siirtää. Mittauspisteiden sijainti ja etäisyys on mitattu imuletkun sisääntuloreiästä.

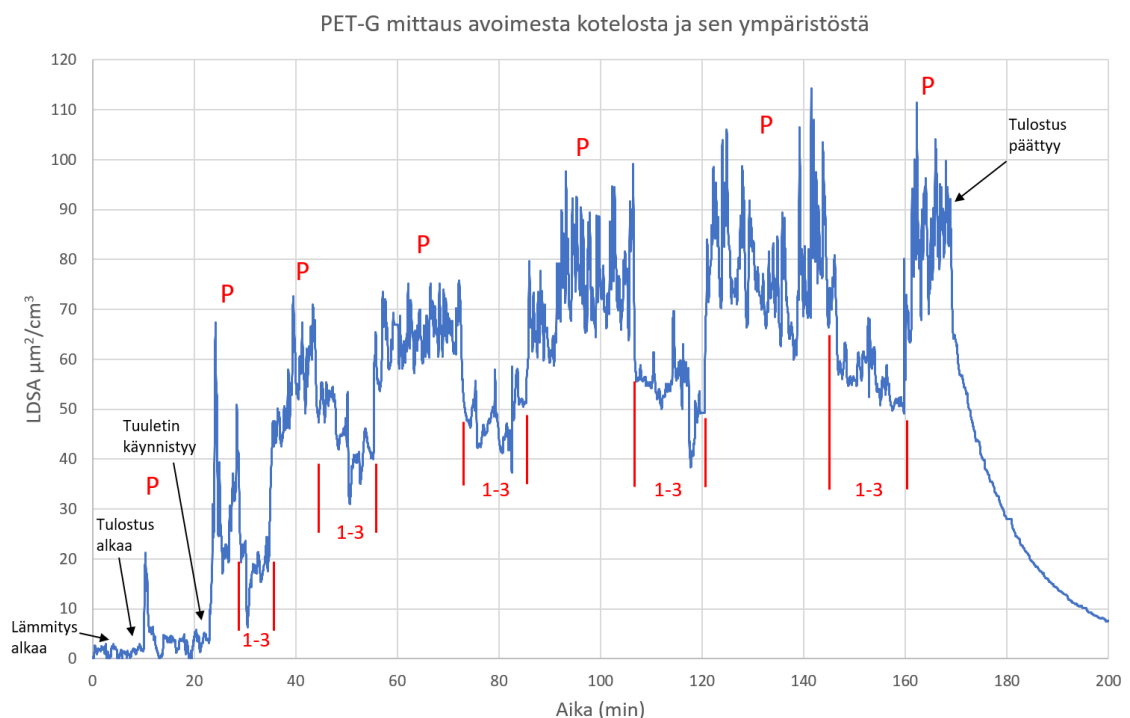


KUVIO 10. Mittauspisteiden visualisointi (Rantanen 2024).

## 5 MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY

### 5.1 Mittaukset avoimesta kotelosta ja sen ympäristöstä

Tulostaminen avonaisella kotelolla, jossa hiukkaset pääsevät vapaasti leviämään huoneen sisäilmaan nosti merkittävästi LDSA-pitoisuuksia (Kuvio 11). Kuviossa käyrät ovat hyvin epätasaiset, tämä johtuu todennäköisesti huoneen ilmanvaihdosta, 3D-tulostimen tulostuspään liikkeistä, sekä tuulettimista, jotka yhdessä aiheuttavat epätasaisen pienhiukkasjakauman huoneen sisäilmassa. Tulostuksen aikana sisäilmanlaatumittarin imuletku asetettiin tulostimen yläpuolelle 45 cm korkeudelle suuttimesta. Mittaukset tulostimen yläpuolelta on merkitty kirjaimella (P). Mittauksessa tarkasteltiin myös tulostimen ympäristön pitoisuuksia, jolloin mittaria, sekä imuletkua siirrettiin mittapisteisiin 1–3 (Kuvio 9).



KUVIO 11. PET-G mittaus avoimesta kotelosta ja sen ympäristöstä (Rantanen 2024)

Mittaukset tulostimen ympäristössä näkyvät kuviossa kuoppina ja ne ovat merkittävänä kohtina 1–3. LDSA-pitoisuus huoneen sisäilmassa kasvoi hiljalleen aina tulostuksen loppuun saakka. Tämä viittaa siihen, ettei huoneen ilmanvaihto yksin

riitä poistamaan 3D-tulostamisesta vapautuvia pienhiukkaspäästöjä tarpeeksi tehokkaasti. Tulostuksen loppuvaiheessa LDSA-pitoisuuden keskiarvo tulostimen yläpuolella oli  $85 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ , joka oli 35-kertainen huoneen taustapitoisuuteen verrattuna.

Avoimen kotelon mittauksia saatiin tehtyä vain yksi aikatauluun liittyvien haasteiden takia, sillä sisäilmanlaatumittarin liikuttaminen aiheutti usein häiriöitä, jotka hidastivat mittauksen suorittamista, sillä mittaukset piti aina aloittaa uudestaan, sekä mittaushuone piti tuulettaa ennen uuden mittauksen suorittamista. Tämän takia toistomittauksia ei saatu toteutettua.

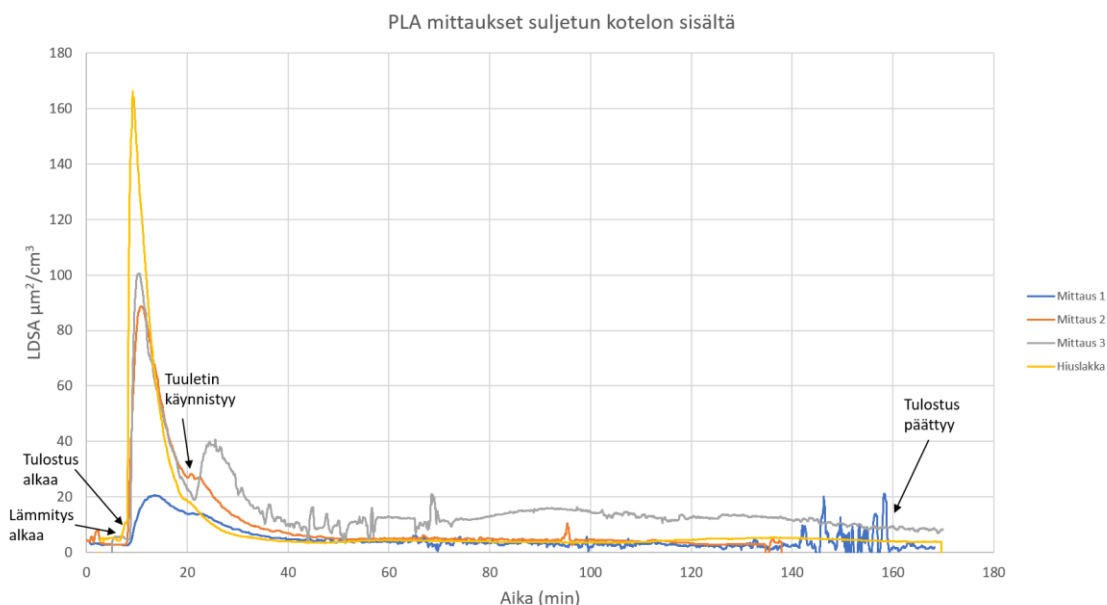
## 5.2 Mittaukset suljetun kotelon sisältä

Suljetun kotelon sisäpuolelta toteutetuissa mittauksissa sisäilmanlaatumittari mittasi kotelon sisällä olevaa ilmaa koko tulostuksen ajan. Tämän avulla saatiin mitattua tarkasti tulostuksesta vapautuvat pienhiukkasten LDSA-pitoisuudet. Mittaukset toteutettiin PLA, PET-G ja ABS materiaaleille.

PLA mittaukset koituivat haasteellisiksi, sillä usein tulostuksen aikana ei syntynyt tarpeeksi pienhiukkasia, jotta niiden pitoisuus tulostimen sisällä olisi eronnut taustapitoisuuksista. Osassa mittauksista taas sisäilmanlaatumittariin tuli häiriö, jolloin mittaustulokset alkoivat heittelehtiä, vaikka mittariin ei koskettu. Tarkkaa syytä mittarin häiriölle ei tiedetä, mutta epäillään, että 3D-tulostimen sisällä on ollut suuria yksittäisiä pölypartikkeleita tai PLA-tulostuksen aikana on syntynyt tavallista suurempia satunnaisia hiukkasia, jotka ovat onnistuneet aiheuttamaan häiriön mittarissa.

Kuviossa 12 on esitelty neljä mittausta, jotka ovat pääasiassa onnistuneet ja niissä havaitaan kohonneita pienhiukkasarvoja. Mittauksen 1 lopussa on syntynyt häiriö, joka on aiheuttanut mittaustulosten epämääräisen heittelyn, lopulta häiriö kuitenkin korjaantui itsestään. Mittauksessa 3 tulostus on alkanut hyvin, mutta 24 minuutin kohdalla mittarissa on tapahtunut häiriö, joka aiheutti mittaustulosten heittelyn. Häiriö tasoittui 70 minuutin kohdalla, mutta tästä huolimatta mitatut arvot olivat silti selkeästi suuremmat, kuin muissa tehdyissä PLA mittauksissa. 20

minuutin kohdalla tulostimen kappaleen jäähdytystuuletin käynnistyy, joka nostaa pienhiukkasten pitoisuuksia.



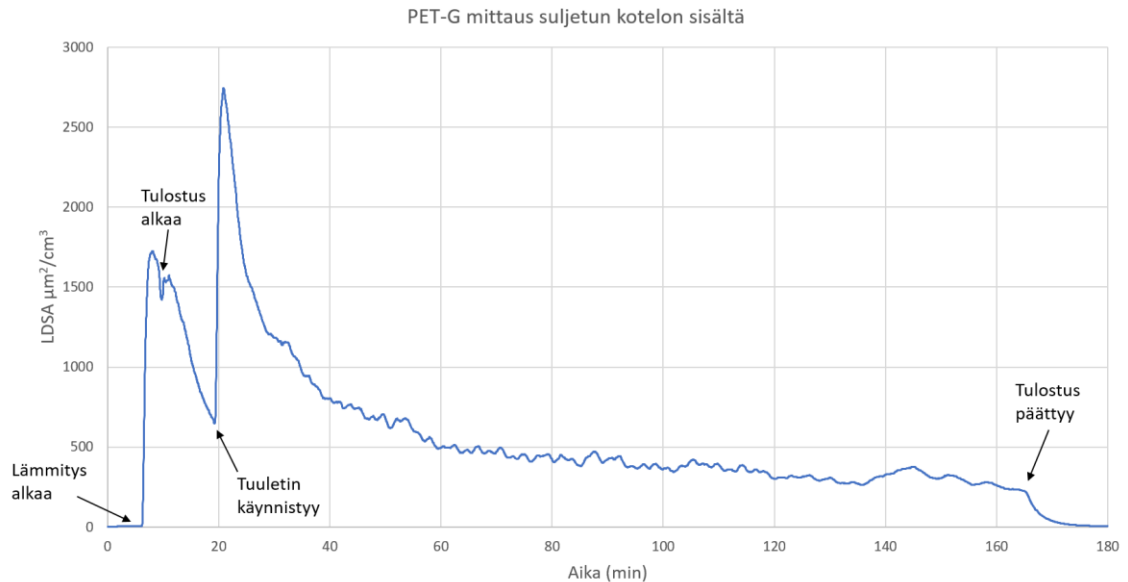
KUVIO 12. PLA mittaukset suljetun kotelon sisältä (Rantanen 2024).

Mittauksessa 3 pitoisuudet ovat nousseet jyrkästi 95 minuutin kohdalla. Tulostamisen aikana ei havaittu, että filamenttia olisi tarttunut suuttimeen, joka olisi saattanut nostaa pitoisuuksia. 135 minuutin kohdalla mittarin arvot tippuivat negatiiviselle, eikä arvot palanneet normaaliksi, jonka vuoksi mittaus keskeytettiin.

PLAn tulostamisessa haluttiin myös tutkia hiuslakan vaikutusta pienhiukkaspäästöihin, sillä hiuslakka on yleisessä käytössä 3D-tulostamisessa. Hiuslakan tarkoituksena on parantaa kappaleen kiinnittymistä tulostusalustaan. Mittauksissa nähtiin, että hiuslakka aiheutti merkittävän nousun LDSA-pitoisuuksissa. Pian tulostamisen alkamisen jälkeen pitoisuudet laskivat hyvin nopeasti mittausten 1 ja 3 tasolle.

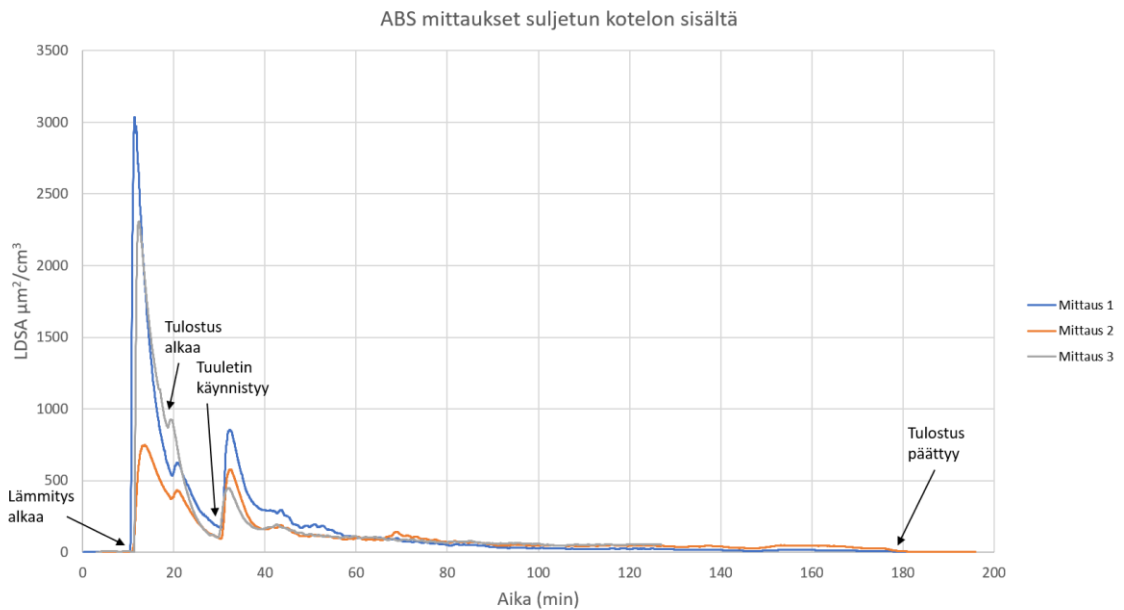
PET-G tulostamisessa havaittiin merkittävä kasvu LDSA-pitoisuuksissa (Kuvio 13). 3D-tulostimen lämmitysvaiheessa hiukkasten määrä kasvoi 116-kertaiseksi verrattuna tausta-arvoihin. Pitoisuudet laskivat tasaisesti tulostimen lämmityksen jälkeen. 20 minuutin kohdalla 3D-tulostimen osien jäähdytystuuletin käynnistyi, joka aiheutti merkittävän nousun pienhiukkaspitoisuuksiin, jolloin niiden määrä kasvoi 125-kertaiseksi taustapitoisuuksiin verrattuna. Tulostuksen päättyminen

näkyi myös selvästi, toisinkuin PLAn kanssa, jossa konsentraatiot olivat hyvin lähellä tausta-arvoja tulostuksen loppuvaiheessa. Jäähdytystuulettimen aiheuttama pitoisuuksien nousu saattaa johtua siitä, että pienhiukkaset ovat laskeutuneet kappaleeseen ja tulostusalustaan, josta ne irtoavat ja leviävät, kun jäähdytystuuletin käynnistyy.



KUVIO 13. PET-G mittaus suljetun kotelon sisältä (Rantanen 2024).

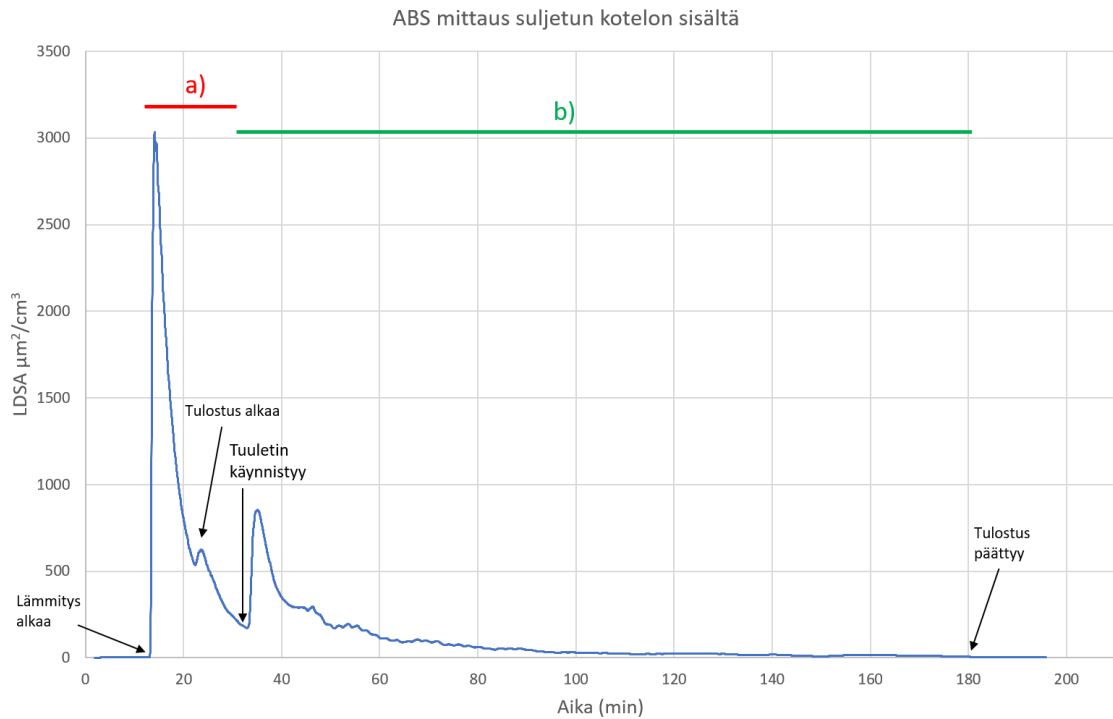
ABS tulostamisesta mitattiin suurimmat LDSA-pitoisuudet. Mittauksessa 1 pitoisuudet olivat tulostuksen alkuvaiheessa hetkellisesti 750-kertaiset tausta-arvoihin verrattuna (Kuvio 14). ABS-tulostamisen aikana huoneessa oli hyvin vahva palaneen muovin haju. HEPA-suodatus ei riitä poistamaan kaasumaisia yhdisteitä.



KUVIO 14. ABS mittaukset suljetun kotelon sisältä (Rantanen 2024).

Ensimmäisten ABS mittauksien aikana ilmeni ongelmia kappaleen tartumisessa tulostusalustaan. Liiman käytön välttämiseksi G-koodiin lisättiin kappaleeseen ylimääräiset kiinnittymistä parantavat ulkoreunat. Ulkoreunat pystytään helposti poistamaan kappaleesta tulostuksen päätyttyä. Reunojen lisäyksellä ei pitäisi olla pienhiukkaspäästöjen kannalta merkittävää vaikutusta, sillä ne vastaavat normaalia 3D-tulostamista ja niiden tulostuksessa käytetään samoja asetuksia, kuin testikappaleen tulostuksessa.

Tulostimien kotelon sisällä havaittujen LDSA-pitoisuuksien maksimi- ja keskiarvot on laskettu merkatuilta alueilta (Kuvio 15). Alueelta a) katsotaan tulostuksen alkuvaiheen pienhiukkaspäästöt ja alueelta b) tulostuksen alkuvaiheen jälkeiset pienhiukkaspäästöt. Tällä vertaillaan, kuinka paljon enemmän pienhiukkasia vapautuu tulostamisen alkuvaiheessa, kun tulostimen suutinta kuumennetaan ja tulostettava materiaali alkaa sulaa.



KUVIO 15. Mittauspisteiden a) ja b) havainnollistaminen (Rantanen 2024).

Taulukossa 3 on esitetty LDSA- ja pienhiukkaspitoisuudet eri materiaaleille, sekä mittausten taustapitoisuudet. Pienhiukkaspitoisuus  $N_{x1000}/cm^3$  tarkoittaa hiukasten lukumäärän pitoisuutta yhden kuutiosenttimetrin sisällä. Mittauspisteiden a) ja b), sekä taustapitoisuuksista arvoista laskettiin keskiarvot.

TAULUKKO 3. Suljetun kotelon sisämittausten arvot taulukoituna.

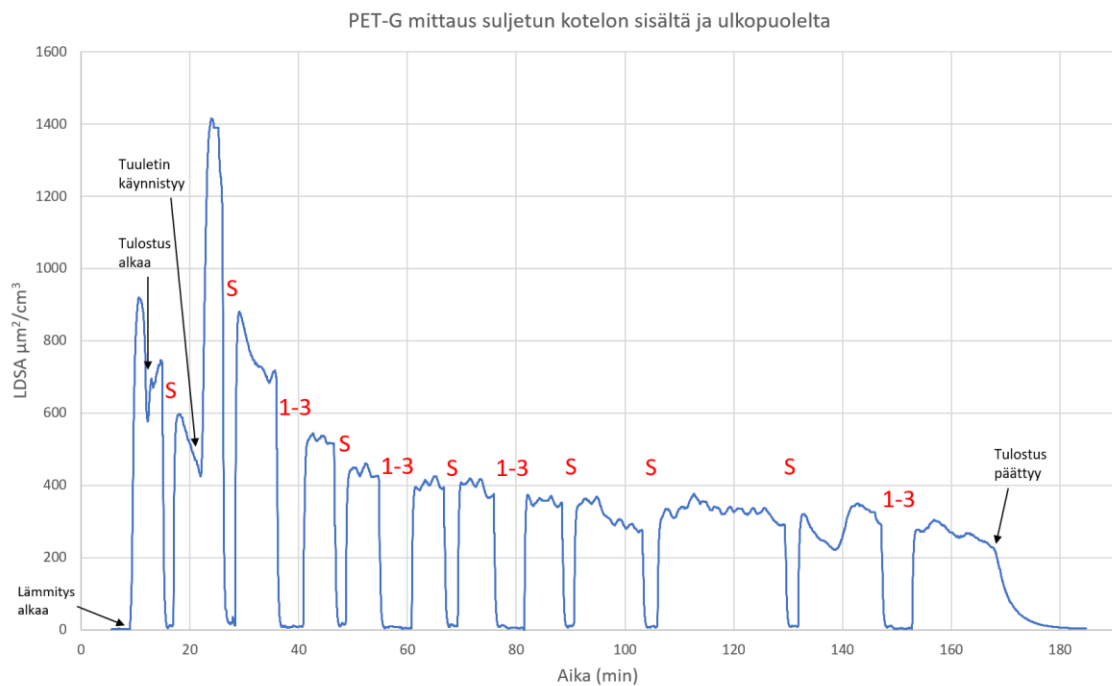
Pitoisuus/materiaali	Max a)	Max b)	ka. a)	ka. b)	Tausta ka.
LDSA_PLA	100,5	40,6	41,9	5,1	3,5
LDSA_PLA_Hiuslakka	166,2	20,9	77,8	4,8	4,4
LDSA_PETG	1725,4	2741,9	1239,3	518,9	4
LDSA_ABS	3034,8	625,4	700,5	89,2	5,1

Pitoisuus/materiaali	Max a)	Max b)	ka. a)	ka. b)	Tausta ka.
$N_{x1000\_PLA}$	24,5	8,1	8,1	0,5	0,28
$N_{x1000\_PLA}$ Hiuslakka	19,5	2,3	9,8	0,3	0,26
$N_{x1000\_PETG}$	468,3	503,2	232,5	51,7	0,4
$N_{x1000\_ABS}$	642,6	129,9	120,9	7,5	0,33

PET-G mittauksissa arvot olivat a) kohtaa lukuun ottamatta suuremmat, kuin kaikissa muissa mittauksissa. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että ABS filamentti tuottaa suuria määriä alle 10 nm kokoluokan pienhiukkasia, joita sisäilmanlaatu mittari ei pysty havaitsemaan. (Gu ym. 2019a). Tämän takia osa pienhiukkasista jää kokonaan havaitsematta. PET-G mittaus saatiin toteutettua vain kerran, jolloin ei pystytä osoittamaan, että ovatko arvot aina näin suuret. Mikäli verrataan PLA ja ABS mittausten tuloksia, on tietenkin mahdollista, että PET-G arvot ovat aina näin suuria.

### 5.3 Mittaukset suljetun kotelon sisältä ja sen ulkopuolelta

LDSA-pitoisuuksien lähtöarvojen saamiseksi mittaaminen aloitetaan tulostimen kotelon sisältä. Tämän jälkeen hiukkasarvoja mitataan HEPA-suodattimen päältä kohta (S), sekä mittauspisteistä 1–3 tulostimen ympäristöstä, nämä mittaukset näkyvät kuoppina (Kuvio 16). Ilmansuodattimen päällä LDSA-pitoisuudet olivat keskimäärin 12-kertaiset taustapitoisuuksiin verrattuna. Myös 3D-tulostimen ympärillä tehtyjen mittausten arvot olivat kohonneet keskimäärin kolminkertaiseksi.



KUVIO 16. PET-G mittaus suljetun kotelon sisältä ja ulkopuolelta (Rantanen 2024).

Sisä- ja ulkomittauksia saatiin toteutettua vain yksi, sillä sisäilmanlaatumittariin tuli usein häiriö sitä liikuteltaessa, joka sai aikaan hyvin epämääräisiä mittaustuloksia, joissa pitoisuuksien kuvaaja lähti tekemään sahakuviota ja arvot saattoivat käydä negatiivisen puolella. Kuviossa 16 on ainoa mittaus, josta saatiin aikaiseksi erinomainen kuvio. Oletettavasti muiden materiaalien tulostamisessa vapautuvat pienhiukkaset leviävät huoneen sisäilmaan samalla tavalla.

HEPA-suodattimen suodatustehokkuuden laskemiseksi valitaan tehdystä mittauksesta kolme ensimmäistä mittauspistettä, tässä tapauksessa käytetään PET-G tuloksia (Kuvio 16). Suodattimen tehokkuuden laskemiseksi käytetään kaavaa (2) (AFPRO n.d.). Kaavaan voidaan sijoittaa PET-G mittauksen arvot, jotka ovat koottuna (Taulukko 4).

$$R = 1 - \frac{(I - E)}{I} \cdot 100 \quad (2)$$

missä

*I* on hiukkaspitoisuus ennen suodatinta

*E* on hiukkaspitoisuus suodattimen jälkeen

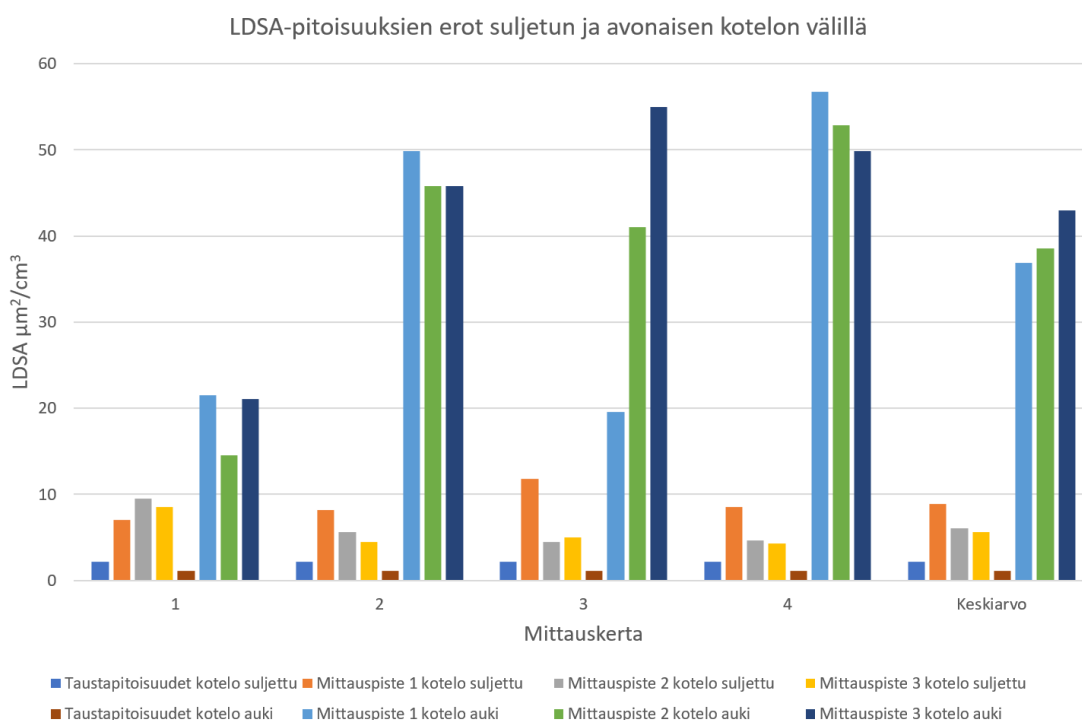
TAULUKKO 4. HEPA-suodattimen tehokkuuden tulokset PET-G.

Mittauspiste	I	E	Suodatustehokkuus %
1	118,49	0,488	98,59
2	220,7	1,545	98,29
3	40,46	1,120	96,23
	Keskiarvo		97,7

Sijoittamalla taulukon 4 arvot kaavaan (2), voidaan taulukoiduista arvoista laskea keskiarvo suodatustehokkuudelle, jolloin tulokseksi saadaan 97,7 % suodatustehokkuus. 3D-tulostuksen aikana käytetyn Nedis VCFI250ELPH HEPA-suodattimen luokitus on H13 (Nedis n.d.). Kyseisen luokituksen ilmoitettu suodatustehokkuus on 99,95 %, tämä tarkoittaa montako prosenttia tunkeutuvimmista pienhiukkasista pysähtyy suodattimeen. Tunkeutuvimmista pienhiukkasista käytetään lyhennettä MPPS (Most Penetrating Particle Size), joiden koko vaihtelee 0,1–0,25 µm välillä. (Hengitysliitto n.d.).

HEPA-suodattimen laskettu suodatustehokkuus on pienempi, kuin H13 luokituksen ilmoitettu arvo. Tämä voi johtua suuresta määrästä alle 0,1  $\mu\text{m}$  kokoluokan pienhiukkasista, joista kaikki eivät pysähdy suodattimeen. Mittausten 1–3 välillä nähdään suodatustehokkuuden heikentyminen. Mahdollisia syitä tähän voi olla edellä mainittujen pienhiukkasten lisäksi myös tausta-arvojen kohoaminen tulostuksen edetessä, sekä suodattimen mahdolliset vuodot.

3D-tulostimen koteloinnin ja HEPA-suodattimen vaikutus LDSA-pitoisuuksiin saadaan vertailemalla avoimen ja suljetun kotelon mittauksia. Suljetun kotelon ympäristöstä tehdyissä mittauksissa LDSA-pitoisuudet olivat keskimäärin 3-kertaiset tausta-arvoihin verrattuna (Kuvio 17). Avoimen kotelon mittauksissa pitoisuus kasvoi keskimäärin 34,8-kertaiseksi taustapitoisuuksiin verrattuna. Kun tulostimen kotelo oli tulostuksen aikana kiinni, LDSA-pitoisuudet laskivat keskimäärin 82,7 % verrattuna avoimen kotelon mittauksiin.

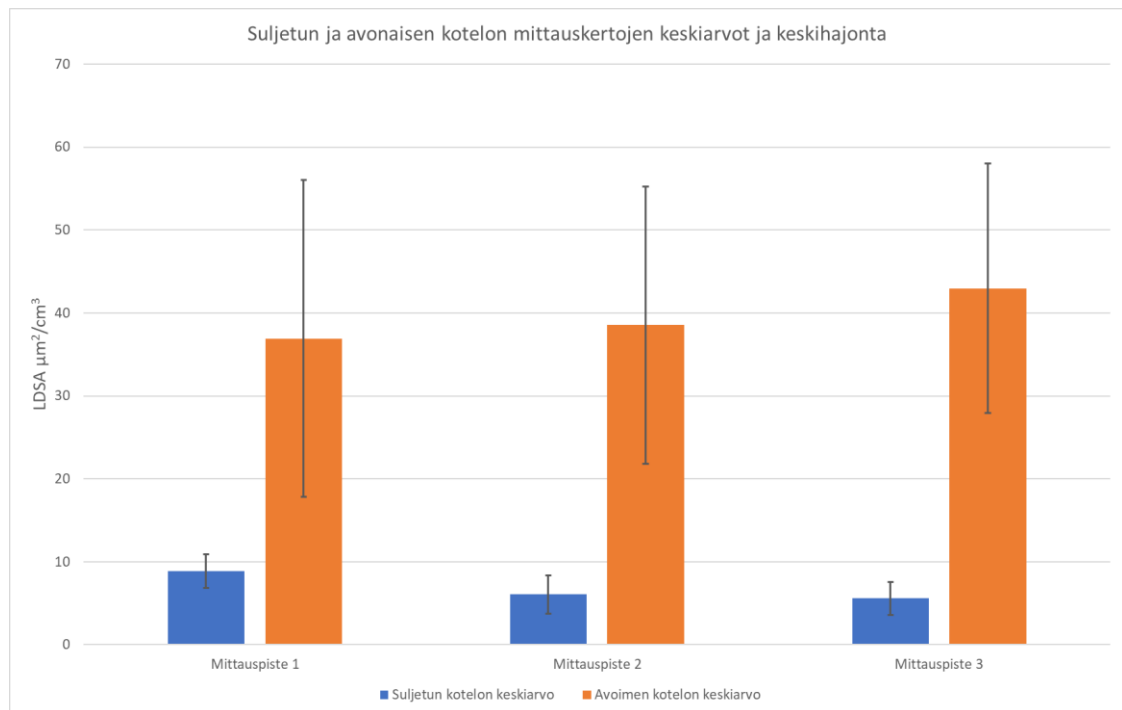


KUVIO 17. LDSA-pitoisuuden ero suljetun ja avonaisen kotelon välillä (Rantanen 2024).

Suljetun kotelon mittaustuloksissa oli suuria vaihteluja mittauskertojen välillä. Suljetun kotelon mittauksissa LDSA-pitoisuudet eivät vaihdelleet merkittävästi mittauskertojen välillä. Tämä johtuu lähinnä siitä, että suurin osa tulostuksen aikana

syntyneistä hiukkaspäästöistä jäi 3D-tulostimen kotelon sisälle, jolloin mittaus- huoneen sisäilman pienhiukkaspitoisuudet pysyivät pääasiassa matalina.

Avonaisen kotelon LDSA-pitoisuudet taas vaihtelivat selkeästi. Syy suurelle vaihtelulle on todennäköisesti tulostimen tulostuspään liikehdintä, jäähdytyspuhaltimien ilmanvirtaus, sekä liikkuminen tulostimen ympäristössä mittauspisteiden välillä. Nämä aiheuttavat turbulenssia sisäilmassa, jolloin pienhiukkaset jakautuvat epätasaisesti sisäilmaan, joka näkyy suurina vaihteluina mittaustuloksissa. Kuviossa 17 esitetyistä arvoista tehtiin (Kuvio 18), jossa näytetään mittauskertojen keskihajonta jokaisessa mittauspisteessä.



KUVIO 18. Suljetun ja avonaisen kotelon mittauskertojen keskiarvot ja keskihajonta (Rantanen 2024).

Tulostuksen alkuvaiheessa pienhiukkaspitoisuudet nousivat voimakkaasti tulostuslämpötilojen kohotessa tulostusmateriaalien sulamispisteeseen. (Viitanen ym. 2017, 23-24). Opinnäytetyössä tehdyissä mittauksissa havaittiin sama ilmiö, jossa kaikilla materiaaleilla näkyi kyseinen pienhiukkaspitoisuuksien merkittävä kasvu. PET-G oli ainoa materiaalia, jossa kappaleen jäähdytystuuletin nosti pienhiukkaspitoisuuden lämmitysvaihetta korkeammaksi.

Toisessa tutkimuksessa pienhiukkaspäästöjä saatiin vähennettyä 93 %, kun 3D-tulostimeen asennettiin suodatinkansi, joka koostui HEPA- ja aktiivihiilisuodattimesta, kansi myös teki tulostimen kotelosta ilmatiiviin, jolloin pienhiukkaset eivät päässeet vuotamaan ympäristöön.

HEPA- ja aktiivihiilisuodattimesta koostuvan suodatinkannen avulla pienhiukkaspitoisuuksia saatiin suodatettua 93 % lähtöarvoihin verrattuna. (Gu ym. 2019b, 501). Opinnäytetyössä tehtyjen mittauksien perusteella pienhiukkasten keskiarvopitoisuus laski 82,7 %, kun 3D-tulostimeen asennettiin suojakotelot ja HEPA-suodattimet.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön tehtävänä oli selvittää TAMK:n opetuskäytössä olevien 3D-tulostimiin asennettujen koteloiden, sekä HEPA-suodattimen vaikutusta 3D-tulostamisesta vapautuviin hiukkaspäästöihin niiden toimivuuden ja tehokkuuden testaamiseksi. Opinnäytetyön idea syntyi työterveystarkastajien antamasta huomautuksesta koteloimattomien 3D-tulostimien suuresta määrästä opetustiloissa, jotka heikentävät sisäilmanlaatua, jonka vuoksi niihin piti kehittää torjuntaratkaisut.

Työ aloitettiin tutustumalla aikaisempiin aiheesta tehtyihin tutkimuksiin, käytettäviin mittauslaitteisiin ja 3D-tulostimiin, sekä mittaushuoneeseen. Opinnäytetyön toimeksiantajan kautta sain avustavan opettajan, joka auttoi suunnittelemaan ja toteuttamaan mittauksia, sekä opastamaan mittausdatan analysoinnissa ja esittämisessä.

Tehdyissä mittauksissa ilmeni haasteita sisäilmanlaatumittarin toiminnan kanssa, johon tuli usein häiriöitä. Tarkkaa syytä häiriöiden syyllä ei tiedetä, mutta kotelosta sisäältä tehdyissä mittauksissa epäillään, että yksittäiset isot hiukkaset ovat sekoittaneet mittalaitteen. Ympäristöstä tehdyissä mittauksissa mittarin liikuttaminen on saattanut aiheuttaa häiriötä ilmanvirtauksen ja imuletkujen liikkeen takia. Toistomittauksia ei saatu toteutettua kaikista mittauksista, jolloin saadut tulokset eivät ole täysin luotettavia, tulokset kuitenkin näyttävät, että tulostimen kotelo ja HEPA-suodatin auttavat vähentämään pienhiukkaspäästöjä. Mittauksissa, jossa vertailtiin suljetun ja avonaisen kotelosta sisäilman LDSA-pitoisuuksiin, havaittiin, että pitoisuudet laskivat 82,7 %, kun tulostimen kotelo oli suljettuna.

Opinnäytetyön toisena tehtävänä oli selvittää koteloinnin ja HEPA-suodattimen vaikutusta VOC-päästöihin, mutta siihen soveltuvan mittalaitteen hankinta koitui haasteelliseksi, joka aiheutti myöhästyksiä opinnäytetyössä. Toimeksiantajan kanssa sovittiin, että VOC-mittaukset jätetään tekemättä ja hiukkasmittausten tulokset raportoidaan. Vaikka VOC-mittauksia ei saatu toteutettua, saadut lopputulokset hiukkasmittauksista osoittivat, että kotelo ja HEPA-suodatin vähentävät

hiukkaspäästöjä merkittävästi, joten niiden asentaminen on ehdottomasti suotavaa.

Mielestäni onnistuin opinnäytetyön tutkimuksissa melko hyvin. Tutkimusten aikana ilmenneistä haasteista huolimatta sain aikaiseksi tuloksia, joilla pystytään todistamaan tulostimen koteloinnin ja HEPA-suodattimien pienentävän tulostamisesta vapautuvien pienhiukkaspäästöjen pitoisuuksia. Tilaajan toiveena oli, että saataisiin tutkittua, miten kotelointi ja suodatin vaikuttavat pienhiukkaspitoisuuksiin ja VOC-päästöihin. Työstä saatiin suoritettua vain puolet, sillä VOC-mittaria ei saatu hankittua opinnäytetyötä varten.

Opinnäytetyön aihe oli hyvin mielenkiintoinen ja opettavainen. Opinnäytetyön tulosten parantamiseksi olisi järkevää käyttää kompakteja pienhiukkasmittareita, joita voidaan sijoittaa useampia ympäri mittaushuonetta. Tällöin mittareita ei tarvitse liikutella mittauksen aikana. Opinnäytetyön tutkimusta voisi jatkaa VOC-päästöjen mittauksella, mikäli siihen soveltuva mittalaite saadaan hankittua. Haluan vielä kiittää Pegasor Oy:ta AQ™ Indoor sisäilmanlaatumittarin lainaamisesta, joka mahdollisti tämän opinnäytetyön toteuttamisen.

## LÄHTEET

AFPRO. n.d. Efficiency of filters. Verkkosivu. Viitattu 15.4.2024.  
<https://www.afprofilters.com/expertises/calculations/>

BSRIA. 2016. Pegasor AQ™ Indoor Air Quality Monitor Operating Manual. Viitattu 9.1.2024.  
<https://www.bsria.com/doc/r87RRB/>

Chemical Insights. 2020. 3D Printer Safety: A Guide for Supporting Indoor Air Quality & Human Health. Viitattu 8.4.2024.  
<https://chemicalinsights.org/wp-content/uploads/2022/04/3DP-General-Toolkit-A-Guide-for-Supporting-Indoor-2020.pdf>

Dekati Ltd. 2023. Dekati® High Resolution ELPI®+. Viitattu 18.4.2024.  
[https://dekati.com/wp-content/uploads/dekati\\_hr-elpi\\_brochure.pdf](https://dekati.com/wp-content/uploads/dekati_hr-elpi_brochure.pdf)

Finnegan, M. Thach, C. Khaki, S. Markey, E. O'Connor, D. Smeaton, A. Morrin, A. 2023. Characterization of Volatile and Particulate Emissions from Desktop 3D Printers. Viitattu 09.12.2023.  
<https://doi.org/10.3390/s23249660>

Formfutura. 2019. Safety Data Sheet. Premium ABS/EasyFil ABS. Viitattu 13.12.2023.  
<https://formfutura.com/datasheets/formfutura-sds-easyfilabs.pdf>

Gu, J. Uhde, E. Wensing, M. Salthammer, T. 2019a. Characterization of particulate and gaseous pollutants emitted during operation of a desktop 3D printer. 476-485. Viitattu 9.4.2024.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.014>

Gu, J. Uhde, E. Wensing, M. Xia, F. Salthammer, T. 2019b. Emission Control of Desktop 3D Printing: The Effects of a Filter Cover and an Air Purifier. Vaatii käyttöoikeuden. Viitattu 9.4.2024.  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.estlett.9b00376>

Gu, J. Uhde, E. Wensing, M. Xia, F. Salthammer, T. 2019c. Supporting Information. Emission Control of Desktop 3D Printing: The Effects of a Filter Cover and an Air Purifier. Viitattu 9.4.2024.  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.estlett.9b00376>

Hartikainen, S. Johansson, M. Hyttinen, M. Pasanen, P. 2016. Kotikäyttöisen 3D-tulostimen aiheuttamat VOC- ja hiukkaspäästöt asuinhuoneiston sisäilmassa. Viitattu 15.4.2024.

Hengitysliitto. n.d. Ilmanvaihdon suodattimet. Verkkosivu. Viitattu 15.4.2024.  
<https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/ilmanvaihto/ilmanvaihdon-suodattimet/>

Hengitysliitto. n.d. Sisäilman epäpuhtaudet ja hajut. Verkkosivu. Viitattu 15.4.2024.

<https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/sisailman-laatu/sisailman-epapuhtaudet-ja-hajut/>

Hillo, T. 2019. Toimivan painovoimaisen ilmanvaihdon edellytykset. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Turun ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 18.4.2024.

<https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019062417479>

Kennedy, R. 2019. Outside the Box: How GE Aviation Entered the Brave New World of Additive Manufacturing. Verkkosivu. Viitattu 06.12.2023.

<https://blog.geaerospace.com/manufacturing/outside-the-box-how-ge-aviation-entered-the-brave-new-world-of-additive-manufacturing/>

Lepistö, T. Kuuluvainen, H. Lintusaari, H. Kuittinen, N. Salo, L. Helin, A. Niemi, J. Manninen, H. Timonen, H. Jalava, P. Saarikosi, S. Rönkkö, T. 2022. Connection between lung deposited surface area (LDSA) and black carbon (BC) concentrations in road traffic and harbour environments. Viitattu 18.4.2024.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118931>

Materialpro 3D. 2016a. Material Safety Data Sheet. Devil Design PET-G. Viitattu 13.12.2023.

[https://www.materialpro3d.cz/user/related\\_files/msds\\_-\\_pet-g\\_eng-6.pdf](https://www.materialpro3d.cz/user/related_files/msds_-_pet-g_eng-6.pdf)

Materialpro 3D. 2016b. Material Safety Data Sheet. Devil Design PLA. Viitattu 13.12.2023.

[https://www.materialpro3d.cz/user/related\\_files/msds\\_-\\_pla\\_eng.pdf](https://www.materialpro3d.cz/user/related_files/msds_-_pla_eng.pdf)

Mendes, L. Kangas, A. Kukko, K. Mølgaard, B. Säämänen, A. Kanerva, T. Ituarte, I. Huhtiniemi, M. Stockmann-Juvala, H. Partanen, J. Hämeri, K. Eleftheriadis, K. Viitanen, A. 2017. Characterization of Emissions from a Desktop 3D Printer. 94-106 Viitattu 18.3.2024.

<https://doi.org/10.1111/jiec.12569>

Naneos. 2021. Lung-deposited surface area. Viitattu 17.4.2024.

<https://www.naneos.ch/pdf/LDSA.pdf>

Nedis. n.d. Replacement HEPA Filter. Verkkosivu. Viitattu 06.12.2023.

<https://nedis.com/en-us/product/household-and-living/vacuum-cleaning/filters/550718627/replacement-hepa-filter-replacement-for-electrolux-philips-black-white>

NIST. 2021. NIST Additive Manufacturing Test Artifact. Verkkosivu. Viitattu 13.12.2023.

<https://www.nist.gov/topics/additive-manufacturing/resources/additive-manufacturing-test-artifact>

Sillanpää, T. Ojala, P. Tila- ja kiinteistöpalvelut. Tampereen ammattikorkeakoulu. Sähköpostiviesti. 8.12.2023. Viitattu 18.4.2024.

Pegasor Oy. 2024a. Pegasor Airam. Verkkosivu. Viitattu 18.4.2024.

<https://pegasor.fi/particle-instruments/pegasor-airam/>

Pegasor Oy. 2024b. Pegasor Airin. Verkkosivu. Viitattu 18.4.2024.

<https://pegasor.fi/particle-instruments/pegasor-airin/>

Pegasor Oy. 2019. White Paper Pegasor AQ™ Indoor. Viitattu 13.12.2023

Pegasor Oy. 2015. AQ™ Indoor Brochure. Viitattu 13.12.2023.

[https://www.etserv.be/wp-content/uploads/2017/05/pegasor\\_indoor\\_brochure\\_2015\\_web.pdf](https://www.etserv.be/wp-content/uploads/2017/05/pegasor_indoor_brochure_2015_web.pdf)

PLM Group. n.d. Mitä 3D-tulostus on ja miten sitä käytetään? Verkkosivu. Viitattu 2.4.2024.

<https://plmgroup.fi/blogi/mita-3d-tulostus-on-ja-miten-sita-kaytetaan/#:~:text=3D%2Dtulostus%2C%20eli%20ainetta%20lis%C3%A4%C3%A4v%C3%A4,kerrokselta%2C%20kundesine%20on%20luotu.>

Taehun, K. Dayeong, H. Sojin, M. Namkug, K. 2022. Evaluation of formaldehyde, particulate matters 2.5 and 10 emitted to a 3D printing workspace based on ventilation. Viitattu 11.04.2024.

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-25957-x>

Tukes. n.d. 3D-tulostus yleistyy vauhdilla. Verkkosivu. Viitattu 2.4.2024.

<https://tukes.fi/3d-tulostus>

Työterveyslaitos. 2020. 3D-tulostuksen kemikaaliturvallisuus työpaikoilla. Viitattu 15.4.2024.

<https://www.ttl.fi/file-download/download/public/2380>

Viitanen, A. Kangas, A. Huhtiniemi, M. Kanerva, T. Stockmann-Juvala, H. Säämänen, A. Kukko, K. Tuomi, J. Partanen, J. Kallonen, K. Hämeri, K. 2017. Materiaalia lisäävän valmistuksen (3D-tulostus) kaasua ja hiukkaspäästöjä eri työvaiheissa. Viitattu 8.12.2023.

<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-261-670-8>