

3D-TULOSTUSLABORATORION TULOSTUSKOTELOI-
DEN ILMANVAIHDON VIRTAUSANALYYSI JA PARTIKKE-
LIMITTAUS

Eskelinen Kalle

Opinnäytetyö
Konetekniikka
Insinööri (AMK)

2022

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Kalle Eskelinen	Vuosi	2022
Ohjaaja	TkT Ari Pikkarainen		
Toimeksiantaja	Lapin AMK		
Työn nimi	3D-tulostuslaboratorion tulostuskoteloiden ilmanvaihdon virtausanalyysi ja partikkelimittaus		
Sivu- ja liitesivumäärä	41		

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin harrastus ja opetuskäytössä yleisimmin käytetyn tulostusmateriaalin turvallisuutta. Osana työtä suoritettiin kyseiselle materiaalille partikkelipäästömittauksia sekä tutustuttiin jo olemassa olevaan tutkimustietoon aiheesta. Vaikka 3D-tulostuksen turvallisuutta on voitu tarkastella jo pitkän aikaa, on tarkastelun näkökulma keskittynyt pitkälti nimenomaan teollisuuteen. Laitteistojen kuluttajakäytön yleistyessä tulee myös tämä uusi osa-alue huomioida aikaisempaa tarkemmin.

Työn käytännön osuus toteutettiin Lapin ammattikorkeakoulun 3D-tulostuslaboratoriossa. Tarkoituksena oli varmistaa avotulostimien koteloiden toimivuus ja tuottaa mittausdataa käytetyn tulostusmateriaalin tuottamista partikkelipäästöistä. Käytännön osuuteen kuului myös tulostinkoteloiden ilmanpoiston ilmanvirtauksen tarkastelu.

Työn tuloksena syntyi mittausdataa avotulostimien toiminnassa syntyvistä partikkelipäästöistä sekä varmuus tulostuslaboratorion avotulostinkoteloiden toiminnasta. Mittaustuloksilla myös todistettiin tarkasteltavan tulostusmateriaalin tuottavan selkeästi muita materiaaleja vähemmän partikkelipäästöjä ja olevan siksi myös muita materiaaleja turvallisempi ympäristössä, jossa tulostuslaitteistoa ei esimerkiksi ole koteloitu. Lisäksi koteloiduille tulostimille muodostui käyttöohjeistus.

Mechanical Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Kalle Eskelinen	Year	2022
Supervisor	Ari Pikkarainen, D.Sc. (tech.)		
Commissioned by	Lapland University of Applied Sciences		
Subject of thesis	Ventilation Flow Analysis and Particle Measurement of 3D Printing Laboratory's Printer Enclosures		
Number of pages	41		

The purpose of this thesis was to study the safety of the most commonly used printing material in hobby and educational use. The work included the performing of particulate emission measurements on material in question and the examination of existing research data on the topic. Although 3D printing safety has been a point of interest for some time, the perspective of safety in 3D printing has largely been from the industry's point of view. As the consumer use of printer equipment becomes more widespread, this new perspective must also be considered more closely than before.

The practical part of the work has been carried out in the 3D printing laboratory of Lapland University of Applied Sciences. The purpose was to ensure that the laboratory's printer enclosures function as intended and to produce measurement data on the particulate emissions caused by chosen material during printing. The practical part also included inspecting the air flow in printer housing's exhaust ducts.

As a result of the work the proper operation of printer housings was confirmed and measurement data on the particulate emission levels caused by 3D printing was produced. The particulate measurement data also proved that the inspected material produces fewer particulate emissions during printing compared to other materials, making it a safer material to be used in an environment where printers for example lack housings. Operating instructions for printer cases were also created and information on particulate emissions caused by 3D printing was produced.

Key words

3D printing, respiratory safety, particle emissions

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
1.1	Tavoite	8
1.2	Rajaus.....	9
2	LAPIN AMMATTIKORKEAKOULU	10
2.1	Konetekniikan AMK insinööritutkinto.....	10
2.2	Kestävä kehitys.....	10
3	3D-TULOSTUSLABORATORIO	12
3.1	Osana opetusta	12
3.2	Laitteisto	13
4	LISÄÄVÄ VALMISTUS	16
4.1	Tulostusprosessi ja -menetelmät	16
4.2	Materiaalinpursotus	17
4.3	Yleisimmät materiaalinpursotuksessa käytettävät materiaalit	20
5	TYÖ- JA HENGITYSTURVALLISUUS.....	21
5.1	VOC-päästöt.....	21
5.2	PM10-, PM2,5- ja PM0,1(UF)-partikkelit	22
6	PARTIKKELIPÄÄSTÖMITTAUKSET.....	24
6.1	Pegasor AQ™ Indoor.....	24
6.2	Mittausuunnitelma.....	26
6.3	Tulokset	27
6.4	Analyysi	30
7	ILMAVIRTAUKSEN MITTAUS.....	31
7.1	TSI Inc. VelociCalc Plus.....	31
7.2	Mittausuunnitelma.....	32
7.3	Tulokset	33
8	KOTELOIDEN ILMANPOISTON SÄÄTÖ	34
8.1	Tilavuusvirran määrittäminen	34
8.2	IRIS-venttiilien säätö.....	35
10	KÄYTTÖOHJEIDEN MUODOSTUS	36

10.1	Koteloiden toiminta	36
10.2	Koteloille laaditut käyttöohjeet	37
11	POHDINTA	38
	LÄHTEET	40

ALKUSANAT

Haluan kiittää Pegasor Oy:ta opinnäytetyön kannalta avainasemassa olleen mit-talaitteen tarjoamisesta käytettäväksi työssäni. Lisäksi kiitokset työni ohjaajalle Ari Pikkaraiselle mielenkiintoisesta aiheesta sekä kannustavasta ohjauksesta opinnäytetyön tekemisessä.

Torniossa 29.3.2022

Kalle Eskelinen

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

ABS	Akrylinitrilibutadienistyreeni
AM	Additive Manufacturing
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
PC	Polykarbonaatti
PET	Polyeteenitereftalaatti
PLA	Polylaktidi
UF	Ultra Fine
SLA	Stereolitografia
SLS	Selective Laser Sintering
TPU	Termoplastinen polyuretaani
VOC	Volatile Organic Compound

1 JOHDANTO

3D-tulostuksen yleistyminen asettaa uusia haasteita toimivien työympäristöjen suunnittelussa esimerkiksi tulostuksesta syntyvien päästöjen vuoksi. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on hankkia konkreettista tietoa 3D-tulostuksen synnyttämistä päästöistä sekä tutkia niiden merkitystä 3D-tulostuksen turvallisuudelle.

1.1 Tavoite

Päätavoitteena on tutustua 3D-tulostuksen teoriaan keskittyen tulostuksen aikana syntyviin partikkelipäästöihin. Teorian lisäksi työssä tarkastellaan myös lyhyesti työn kannalta merkityksellistä partikkelipäästöjen tutkimusdataa. Kerättyä tietoa käytetään hyödyksi työssä tehtävien mittausten toteuttamisessa sekä tulosten tarkastelussa. Toisena päätavoitteena on varmistaa Lapin ammattikorkeakoulun Tekniikan yksikön Kosmos-rakennuksessa sijaitsevan 3D-tulostuslaboratorion tiloihin valmistettujen tulostuskoteloiden sekä niiden ilmanpoistojärjestelmän toimivuus. Tämä tapahtuu toteuttamalla tulostuskoteloissa oleville 3D-tulostimille partikkelipäästömittauksia sekä tutkimalla koteloiden ilmanpoiston tilavuusvirtaa. Tarkoituksena on kerättyjen mittaustulosten perusteella säätää kotelokohtaiset ilmanpoiston virtaussäätöventtiilit siten, että tulostuksesta vapautuvat partikkelit eivät pääse huoneilmaan. Opinnäytetyön tuloksena syntyvää 3D-tulostuksen partikkelipäästöjen mittausdataa voidaan lisäksi käyttää alan työturvallisuuden parantamiseen.

Lisäksi mittaustulosten perusteella tulostuskoteloille muodostetaan käyttöohjeet, jotka on suunnattu erityisesti laboratoriossa työskenteleville opiskelijoille. Ohjeiden laatimisessa huomioidaan myös tilassa työskentelevät vaihto-opiskelijat muodostamalla sekä suomen- että englanninkieliset versiot.

1.2 Rajaus

Työssä tullaan keskittymään PLA (polylaktidi) -muovimateriaalin tulostuksessa syntyvien partikkelipäästöjen mittaukseen. Näin ollen työn ulkopuolelle jää esimerkiksi ABS (akryylinitriilibutadieenistyreeni) -muovin synnyttämien partikkelipäästöjen tarkastelu. Lisäksi työssä tutkitaan nimenomaan materiaalinpursotustulostuksessa tapahtuvan muovinsulamisosprosessin synnyttämiä partikkelipäästöjä, joten työn ulkopuolelle on rajattuna myös muiden tulostusmenetelmien synnyttämien partikkelipäästöjen tarkastelu.

Työn osaksi kuuluu myös koteloiden erilliseen ilmanpoistoon liittyvä ilmanvirtaus-tutkimus. Tutkimuksen perusteella säädetään koteloiden ilmanpoiston virtaus-säätimet. Itse laboratoriotilan ilmanvaihto ja ilmanpoiston laajempi analyysi raja-taan työn ulkopuolelle.

2 LAPIN AMMATTIKORKEAKOULU

Lapin ammattikorkeakoulu (Lapin AMK) on Pohjois-Suomen alueella toimiva ammattikorkeakoulu, jonka toiminta keskittyy Rovaniemelle, Kemiin sekä Tornioon. Yhdessä Lapin yliopiston kanssa Lapin AMK muodostaa Lapin korkeakoulukonsernin. Lapin AMK työllistää kaikkien toimipisteiden kesken 370 henkilöä ja oppilaitoksessa suorittaa opintojaan läsnä olevaa opiskelijaa. (Lapin AMK 2021.)

2.1 Konetekniikan AMK insinööritutkinto

Lapin AMK tarjoaa työelämään ja sen kehittämisen edistämiseen rakennettua korkeakouluopetusta. Koululaitoksen tarjoamat koulutusalat koostuvat esimerkiksi liiketalouden, matkailun, tekniikan sekä terveystieteiden koulutuksista. Lapin AMK:ssa on mahdollista suorittaa sekä AMK- että ylempi AMK-tutkinto. (Lapin AMK 2021.)

Lapin AMK:n tarjoama konetekniikan insinöörikoulutus on osa tekniikan alan koulutusohjelmia. Konetekniikan koulutus mahdollistaa toimimisen teollisuuden sekä sen alihankkijoiden tarjoamissa asiantuntijatehtävissä. Näitä ovat esimerkiksi suunnittelu-, tuotanto- ja työnjohtotehtävät. Koulutuksen aikana opiskelijan on mahdollista valita syventävänsä osaamistaan joko teollisuus-, kaivos-, tuotekehitys- tai kiertotalousosaajana oman kiinnostuksensa mukaan. Tutkintokoulutus kestää 4 vuotta ja on laajuudeltaan 240 opintopistettä. Opiskelussa isossa roolissa on projektityöskentely, joka näkyy opiskelun aikana monipuolisten lukukausiprojektien muodossa. (Lapin AMK 2022.)

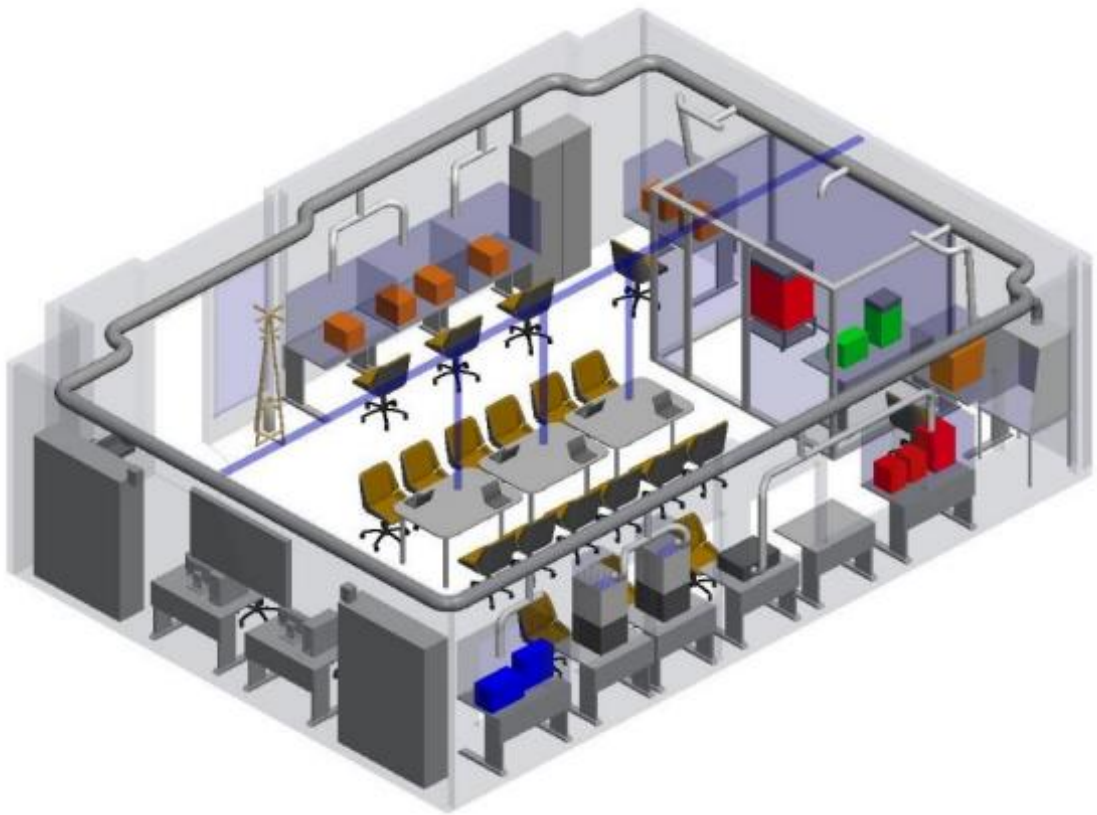
2.2 Kestävä kehitys

Lapin AMK toimii aktiivisesti kestävä kehityksen edistämisen hyväksi tarjoamalla opiskelijoilleen aiheeseen liittyvää opetusta ja antaen näin valmistuville opiskelijoille taitoja edistää kestävä kehitystä työelämässä. Kiertotalouden ja kestävä kehityksen opetus suunnitelmaan sisällyttämisen lisäksi Lapin AMK kannustaa alueen yrityksiä energiatehokkuuteen ja vähähiilisyteen erinäisten hankkeiden kautta. (Lapin AMK 2021.)

Parhaillaan Lapin AMK:lla on meneillään hanke, jossa perustetaan aiheeseen liittyen kehittämissympäristöjä oppilaitoksen toimipisteisiin. Tavoitteena on kannustaa alueiden yrityksiä panostamaan energiatehokkuuteen ja vähähiilisyyteen toiminnassaan tarjoamalla perustettujen toimipisteiden avulla uusia näkökulmia ja ratkaisuja yrityksissä ilmeneviin mahdollisiin kehittämishaasteisiin. (Tiihonen 2021.)

3 3D-TULOSTUSLABORATORIO

Lapin AMK:n Kemissä sijaitsevan Kosmos-rakennuksen tiloihin valmistui vuonna 2021 lisäävän valmistuksen menetelmien käytön opetukseen räätälöity laboratoriotila. Kuva 1 on esitettyä 3D-tulostuslaboratorion layout isometrisenä projektiona. 3D-tulostuslaboratorio on osa Älypaja-hanketta, jonka tavoitteena on luoda Lapin AMK:lle moderni kehittämissympäristö käytettäväksi osana insinöörikoulutusta.

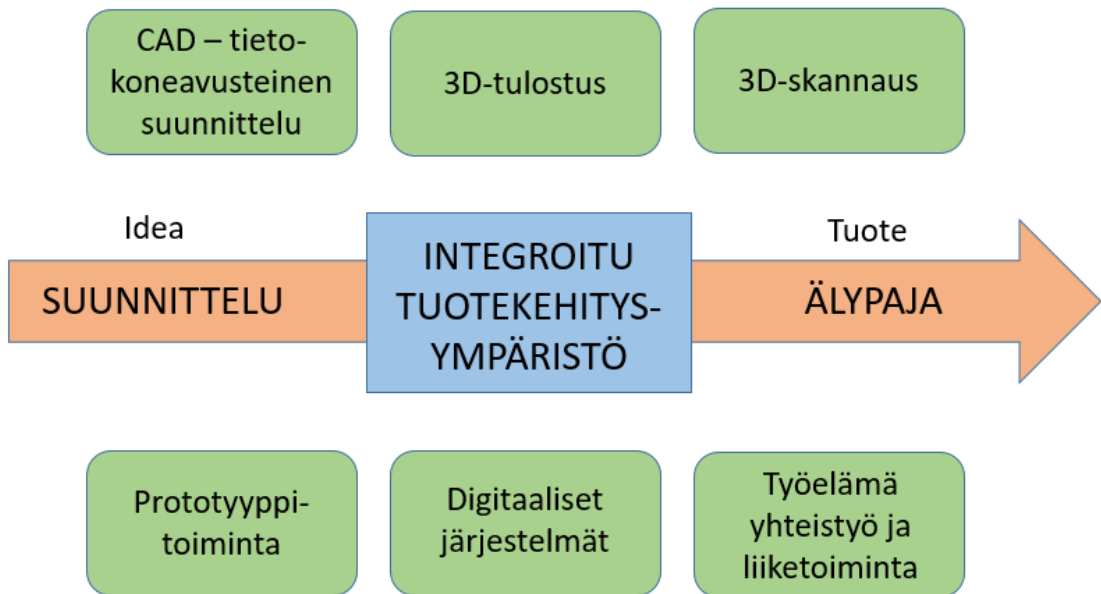


Kuva 1. Lapin AMK:n Kosmosrakennuksen 3D-tulostuslaboratorio (Pikkarainen 2021)

3.1 Osana opetusta

3D-tulostuslaboratorion päätavoitteena on muodostaa Älypaja-hankkeen Ideasta tuotteeksi -polun alkuosio. Yhdessä erillisen CAD-suunnitteluluokan kanssa 3D-tulostuslaboratorio muodostaa Kuvio 1 esitetyn integroidun tuotekehitysympäristön. Integroitua tuotekehitysympäristöä hyödynnetään kiinteästi osana erityisesti tuotekehitykseen erikoistuvien konetekniikan opiskelijoiden opetussuunnitelmaa.

Myös muissa opiskelun suuntaushaaroissa kyseistä ympäristöä hyödynnetään erityisesti lukukausiprojektien lomassa. (Joutsenvaara 2017.)



Kuvio 1. Integroidun tuotekehitysympäristön toiminta-ajatus (Pikkarainen 2018)

Lisäksi opiskelijoilla on kurssien lomassa saadun 3D-tulostuslaboratorion laitteistojen käyttöopastuksen jälkeen mahdollista saada laboratorion tiloihin henkilökohtainen kulkukortti. Tämä mahdollistaa tilojen käytön opiskelijoille myös opetuksen ulkopuolella sekä myös esimerkiksi mahdollisten vapaa-ajan projektien työstämisen tilan laitteita hyödyntämällä. Henkilökohtaisille tulostuksille edellytyksenä on kuitenkin tulostuksissa käytettävien materiaalien omakustanteinen hankinta. (Pikkarainen 2021.)

3.2 Laitteisto

3D-tulostuslaboratorion laitekanta on valikoitu monipuolisen lisäävän valmistuksen menetelmien opetuksen mahdollistamiseksi. Oppilaiden käyttöön on hankittu yleisimpiä 3D-tulostusmenetelmiä hyödyntäviä tulostimia. Aiheeseen liittyvien kurssien yhteydessä saadun laitteistojen käyttökoulutuksen jälkeen laboratorion laitteisto on opiskelijoille vapaasti käytettävissä.

Lapin AMK:n Kosmoksen 3D-tulostuslaboratorion laitteistot:

Materiaalinpursotustulostimet:

- 1kpl Creality CR-10 Max
- 2kpl Creality Ender 3 Pro
- 4kpl Prusa i3 MK3s
- 2kpl Ultimaker S5 Pro Bundle.

Stereolitografiatulostuslaitteisto:

- Formlabs FORM 3
- Form Wash
- Form Cure.

Jauhepetisulatuslaitteisto:

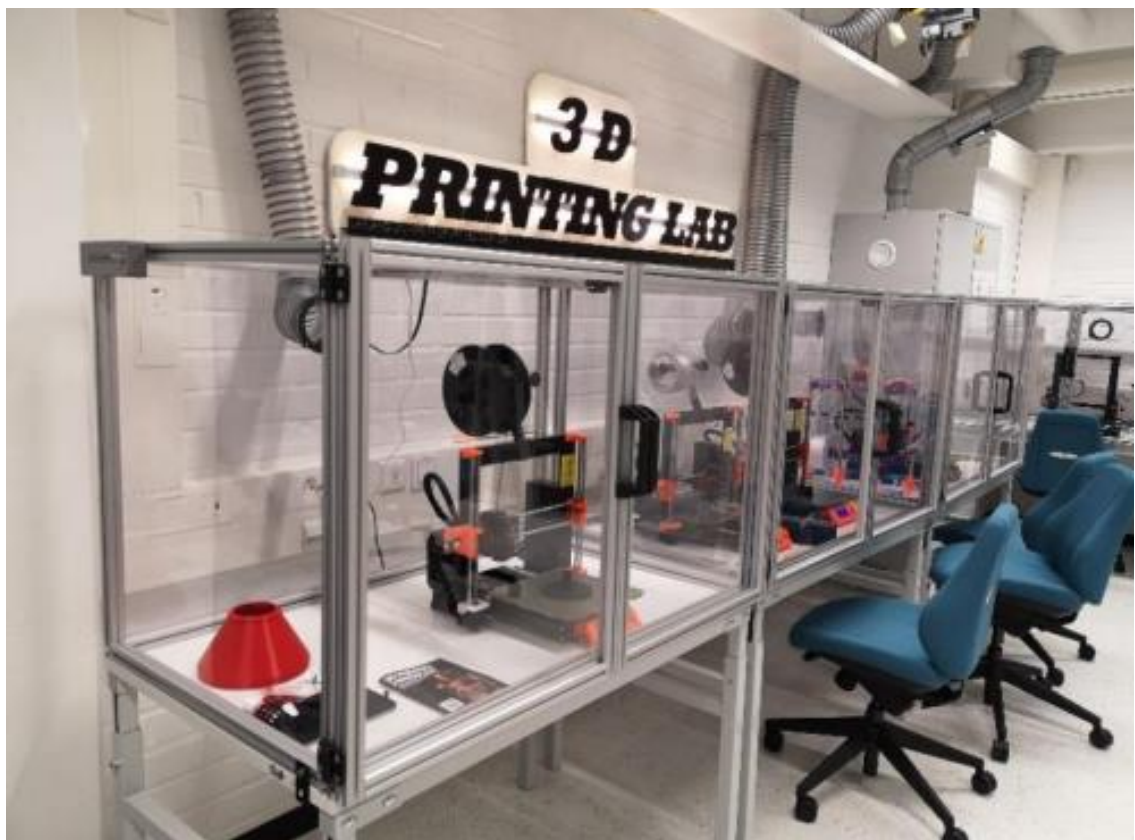
- Sinterit LISA PRO
- Sinterit tulostusjauhesihti
- tulostusjauheen erottimella varustettu imuri
- kuulapuhalluskaappi.

Filamentinkierrätyslaitteisto sekä 3D-skannauslaitteisto:

- 3D EVO Composer 450 Filament Maker
- 3D EVO SHR3D IT Plastic Shredder
- 3D EVO AIRID Granulate Dryer
- Artec Leo 3D scanner. (Pikkarainen 2021.)

Kuva 2 on esitettyä opiskelijoiden lukukausiprojektissa suunnittelemat ja valmistamat ilmanpoistolla varustetut avotulostimien tulostuskotelot. Rakenne koostuu

alumiiniprofiilirungosta sekä tiivistyksellä varustetusta pleksilasista. Koteloiden tarkoituksena on mahdollistaa turvallinen työskentely laboratorion tiloissa aktiivisten tulostusten aikana estämällä tulostuksen aikana muovifilamentin sulatusprosessin muodostamien päästöjen pääsy huoneilmaan. Tämä tapahtuu laboratoriotilaan valmistetun erillisen ilmanpoiston avulla. Laboratorion erillinen ilmanpoisto koostuu kotelokohtaisista haaroista, joissa on oma virtaussäätöventtiili sekä ajastintoiminen sähköventtiili. Kotelot on mitoitettu niiden alla olevien pöytätasojen mittojen mukaisesti huomioiden samalla myös sisälle sijoitettavien tulostimien käytettävyys.



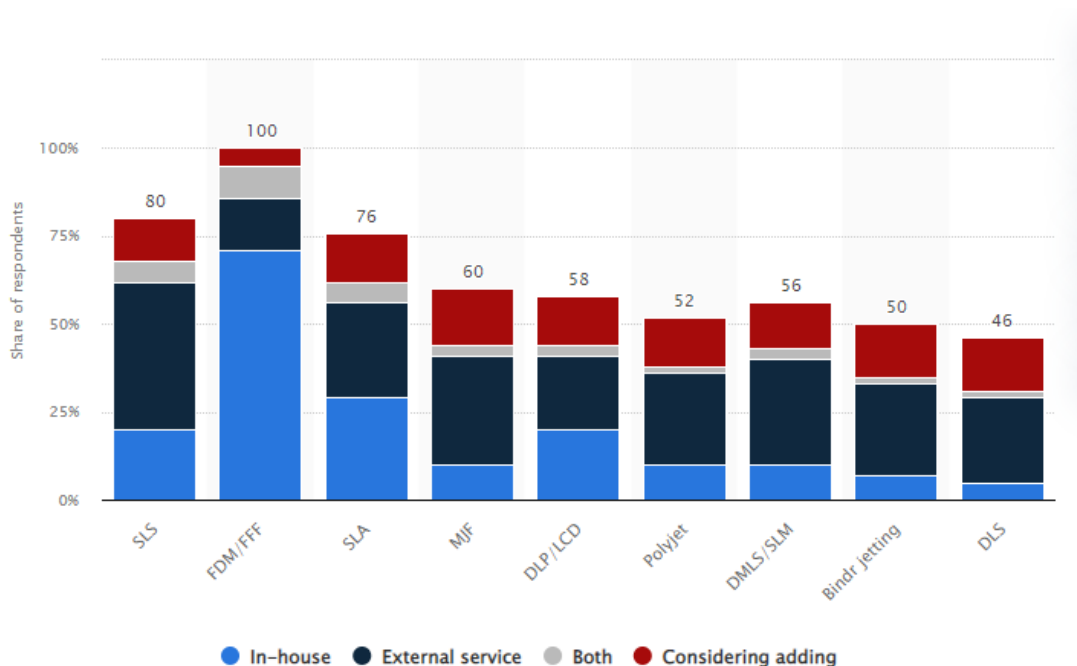
Kuva 2. 3D-tulostuslaboratorion avotulostinkotelot

4 LISÄÄVÄ VALMISTUS

Lisäävä valmistus (tunnetaan myös nimellä 3D-tulostus) tarkoittaa valmistusmenetelmää, jossa 3D-mallinnusohjelmalla luotu kappalemalli valmistetaan laitteistolla, joka riippuen laitteesta eri menetelmin sitoo materiaalia taso kerrallaan halluttuun muotoon. 3D-tulostuksen haasteena on valmistettujen kappaleiden lähtökohtaisesti heikommät mekaaniset ominaisuudet verrattuna esimerkiksi koneistamalla valmistettuihin kappaleisiin. Etuna on kuitenkin mahdollisuus valmistaa edullisesti hyvinkin monimutkaisia kappaleita. 3D-tulostus soveltuukin tämän vuoksi hyvin prototyyppien valmistukseen. (Garret, Redwood & Schöffer 2017, 9.)

4.1 Tulostusprosessi ja -menetelmät

Tulostusmenetelmät jaotellaan seitsemään menetelmäluokkaan toimintaperiaatteen perusteella. Nämä menetelmäluokat ovat sideaineen suihkutusta, suorakerrostusta, pursotusta, materiaalin suihkutusta, jauhepetisulatus, kerroslaminointi ja valokovetus altaassa. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2015, 2.2.) Näistä suosituimpia menetelmäluokkia ovat materiaalinpursotus, jauhepetisulatus sekä valokovetus altaassa, kuten käy ilmi Kuvio 2 (Alsop 2021).



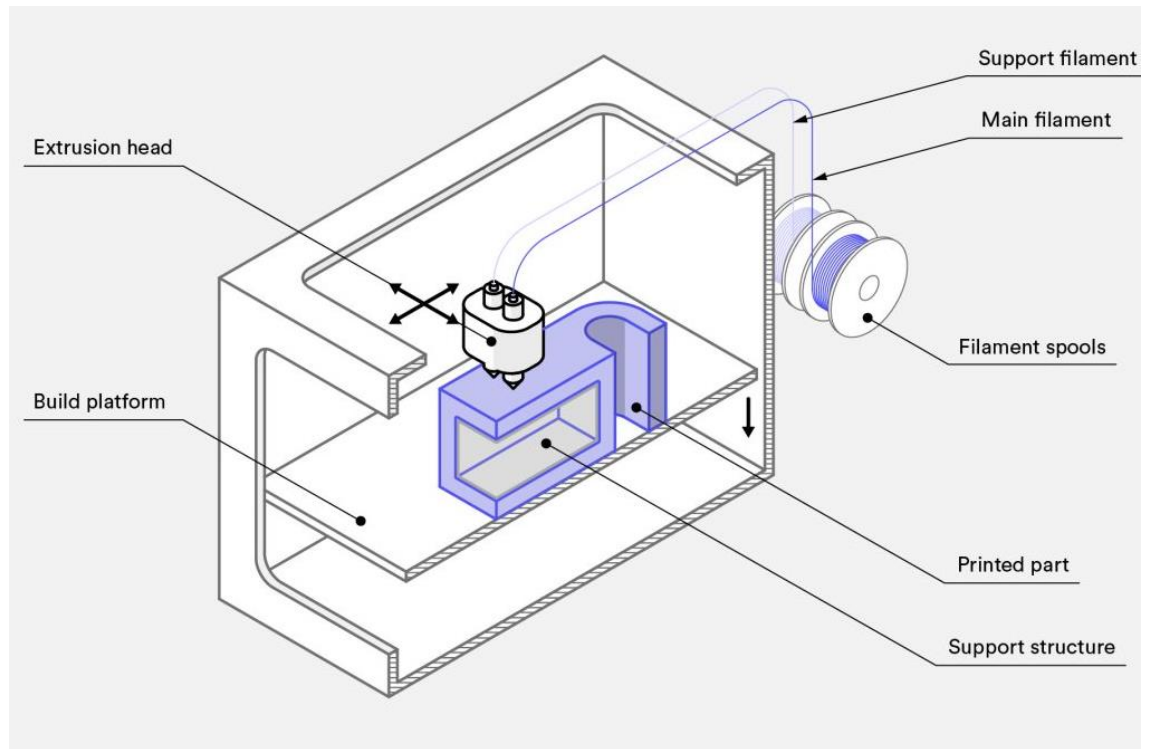
Kuvio 2. Suosituimmat 3D-tulostusmenetelmät (Alsop 2021)

Jauhepetisulatuksessa kappale valmistetaan kerroksittain polymeerijauheesta käyttäen peiliohjattua laseria kovettamaan kerrokset yhteen. Kyseistä menetelmää hyödyntävä teknologia on SLS eli selective laser sintering tai LS eli laser sintering. SLS menetelmän yksi suurimpia etuja muihin nähden on, että se ei vaadi tulosteisiin erillistä tukimateriaalia, koska tuloste valmistuu ympäröivän kovettamattoman jauheen sisällä. Tämän vuoksi SLS mahdollistaakin hyvin monimutkaisten kappaleiden sekä funktionaalisten kappaleiden kuten esimerkiksi jousien yksinkertaisen tulostuksen. Tulostusaika on lähtökohtaisesti kuitenkin muita menetelmiä pidempi, mutta toisaalta useiden samanaikaisesti tulostettavien kappaleiden määrä ei juurikaan pidennä aikaa. (Garret ym. 2017, 73–84.)

Valokovetus altaassa on 3D-tulostusmenetelmä, jossa ultraviolettisäteilylle herkää hartsia kovetetaan kerroksittain joko peilein kohdennetun UV-laserin tai kerroksen kuvion muodostavan UV-valolähteen avulla. Menetelmää hyödyntäviä teknologioita ovat SLA eli stereolitografia, missä hartsi kovetetaan UV-laserin avulla sekä DLP eli direct light processing, missä hartsi kovetetaan hyödyntäen UV-valolähdettä, joka kykenee muodostamaan jokaista yksittäistä tulostettavaa kerrosta vastaavan kuvan. (Garret ym. 2017, 53–57.)

4.2 Materiaalinpursotus

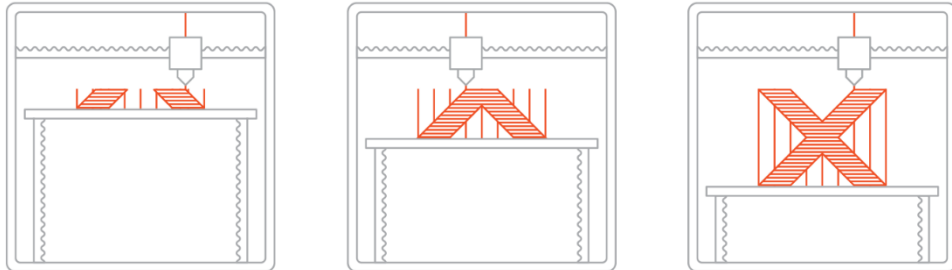
Materiaalinpursotusta käytetään menetelmänä FFF- eli fused filament fabrication- tulostuksessa. Nykyisin yleisesti käytetään termiä FDM- eli fused deposition modeling. FDM- termi on sitä koskevan patentin rauettua vakinaistunut käytettäväksi materiaalinpursotuslaitteistojen kaupallisena terminä. Materiaalinpursotusta hyödyntävät 3D-tulostuslaitteet ovat erityisesti yksityiskäytössä suosittuja johtuen laajasta laitetarjonnasta sekä etenkin suhteessa muihin tulostusmenetelmiin myös edullisesta hankintahinnasta. (Grames 2020.) Kuva 3 on esitetty materiaalinpursotustulostimen tavanomainen rakenne.



Kuva 3. Materiaalinpursotustulostimen perusrakenne (Varotsis 2022)

Materiaalinpursotuksessa kappaleen valmistukseen käytettävä lankamainen muovikomposiittimateriaali pursotetaan ohuen suuttimen läpi tulostuspedille. Sekä tulostuspeti että tulostinpää liikkuvat stepperimoottorien avulla XYZ-akselistossa mahdollistaen näin kolmiulotteisen mallin tuottamisen. Stepperimoottoreita ohjataan digitaalisesta kappalemallista muodostetun G-koodin avulla, jota tulostuslaitteiston ohjain tulkitsee. Kappale valmistuu kuvan Kuva 4 mukaisesti

kerros kerrallaan. Kerroksen paksuuteen on mahdollista vaikuttaa ja sillä on suora vaikutus tulostuksen tarkkuuteen. (Varotsis 2022).

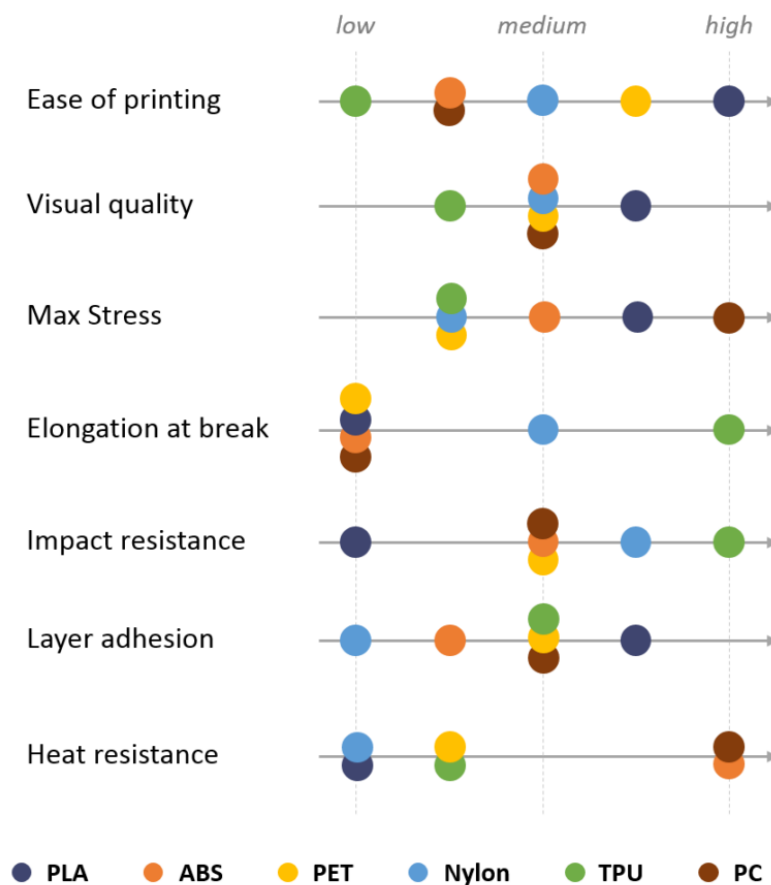


Kuva 4. Kappaleen valmistus materiaalinpursotusmenetelmällä (Garret ym. 2017, 28)

Materiaalinpursotusmenetelmän haasteina ilmenee esimerkiksi tulostettavan kappaleen epätasainen jäähtyminen, joka voi johtaa kappaleen deformaatioon sekä kerrosten irtoamiseen toisistaan. Taipumus kyseiseen käyttäytymiseen riippuu pitkälti käytettävästä materiaalista. Deformaatiota ja kerrosten irtoamista on mahdollista ehkäistä käyttämällä esimerkiksi lämmitettävää tulostuspetiä. Lisäksi valmistettaessa kappaletta materiaalinpursotusmenetelmällä on tärkeää huomioida kappaleen käyttötarkoitus sekä siihen kohdistuva mekaaninen rasitus. Valmistettu kappale on selkeästi heikompi kerrosten suuntaisesti kohdistuvalle voimalle kuin kerrosten vastakkaiselle voimalle. (Grames 2020.)

4.3 Yleisimmät materiaalinpursotuksessa käytettävät materiaalit

Materiaalinpursotuksessa käytettäviä materiaaleja on saatavana useita eri käyttötarkoituksia varten. Eniten käytettyjä materiaaleja ovat PLA ja ABS, mutta lisäksi tarjolla on esimerkiksi joustava TPU- eli termoplastinen polyuretaani, elintarvikekäyttöön soveltuva PET- eli polyeteenitereftalaatti, kemikaaleja hyvin sietävä Nylon sekä ABS muovia korkeamman iskunkestävyyden omaava PC- eli polykarbonaatti. (Hubs 2022.)



Kuvio 3. FDM-tulostusmateriaalin valintaopas (Hubs 2022)

Kuvio 3 on esitettyä tulostusmateriaalin valintaopas, jossa materiaalin valintaan vaikuttavia asioita ovat esimerkiksi tulostettavuus, lämmönkesto ja valmiin kappaleen ulkonäkö. Mekaanisten ja visuaalisten ominaisuuksien lisäksi materiaalin valinnassa on suotavaa huomioida myös materiaalin aiheuttamat päästöt valmistuksen aikana. Esimerkiksi ABS ja Nylon tulostuksen aikana vapautuu muita materiaaleja enemmän päästöjä tulostusympäristöön. (Hubs 2022.)

5 TYÖ- JA HENGITYSTURVALLISUUS

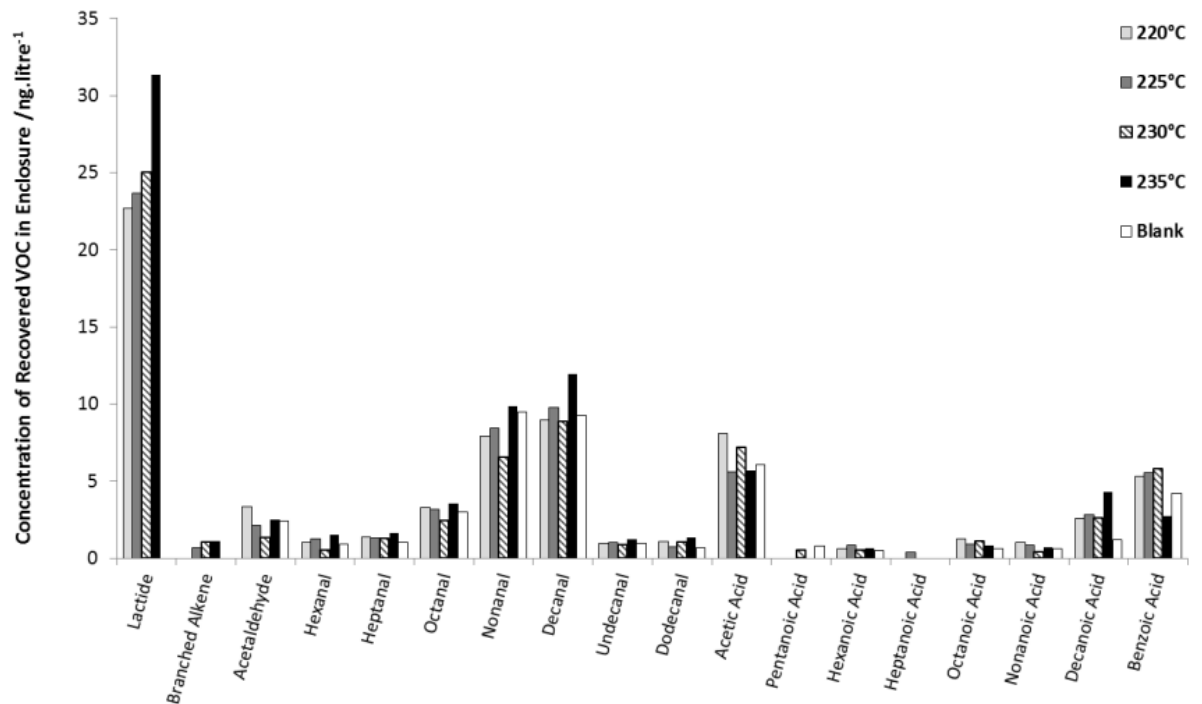
Osana työturvallisuutta koskevia säädöksiä on eri työolosuhteissa suoritettaville työtehtäville määritetty hengitysilmanlaatuvaatimuksia. Laatuvaatimusten noudattamisesta vastuu on työnantajalla. Hengitysilman epäpuhtauksille asetettuja viitearvoja, eli haitallisiksi tunnettuja pitoisuuksia, käsitetään yhteisnimityksellä HTP- arvot. (STM 2018a, 10.)

Riippuen altistavasta aineesta ja sen tuomista vaikutuksista HTP-arvo voidaan määrittää eripituiselle ajanjaksolle. Yleensä arvo muodostuu kahdeksan tunnin työvuoron keskiarvoaltistumisesta. Lyhyellä aikavälillä haittavaikutuksia aiheuttaville aineille on asetettu lyhyen ajan altistumisen raja-arvo, joka ei saa ylittyä 15-minuutin altistumisen aikana. Lyhytaikaisen altistumisen raja-arvoa sovellettaessa raja-arvoa vastaavia mittauksia ei myöskään saa esiintyä yli neljää kertaa kahdeksan tunnin aikana. (STM 2018b,11.)

5.1 VOC-päästöt

3D-tulostuksen aikana huoneilmaan vapautuu käytettävästä menetelmästä riippuen VOC- eli volatile organic compound -päästöjä. VOC-päästöt ovat kaasuja, joihin kuuluu muun muassa aromaattisia hiilivetyjä, kuten esimerkiksi bentseeni, ketonit, terpeenit ja osa alkoholeja. Näitä yhdisteitä ilmenee huoneilmassa pienissä pitoisuuksissa normaalisti, kuitenkin riippuen koostumuksesta jo yksittäisen yhdisteen kasvanut pitoisuus hengitysilmassa voi aiheuttaa tilassa oleileville oireita, kuten päänsärkyä sekä silmien ja limakalvojen ärsytystä. Pitkäaikaisen VOC-päästöille altistumisen riskinä on myös vakavia terveyshaittoja. VOC-yhdisteiden määrään huoneilmassa vaikuttaa esimerkiksi tilassa käytetyt rakennus- ja sisustusmateriaalit. (Hengityслиitto 2022.)

Kuvio 4 on esitettyä PLA-muovimateriaalin tulostuksessa FDM-tulostimella syntyvät VOC-päästöt. Päästöt koostuvat isomeerin 1 ja 2 laktideista sekä alifaattisista yhdisteistä, joista suurimpina pitoisuuksina ilmenevät nonanaali, dekanaali sekä etikkahappo. Näistä ainoastaan etikkahapolle löytyy olemassa oleva HTP-raja-arvo. Kahdeksan tunnin aikana etikkahapon pitoisuus hengitysilmassa ei saa ylittää 13 mg/m^3 . (STM 2018c, 30.)



Kuvio 4. PLA:n tulostuksessa vapautuvia VOC-yhdisteitä (Evans, Hall, Pengelly, Plant & Staff 2019,32)

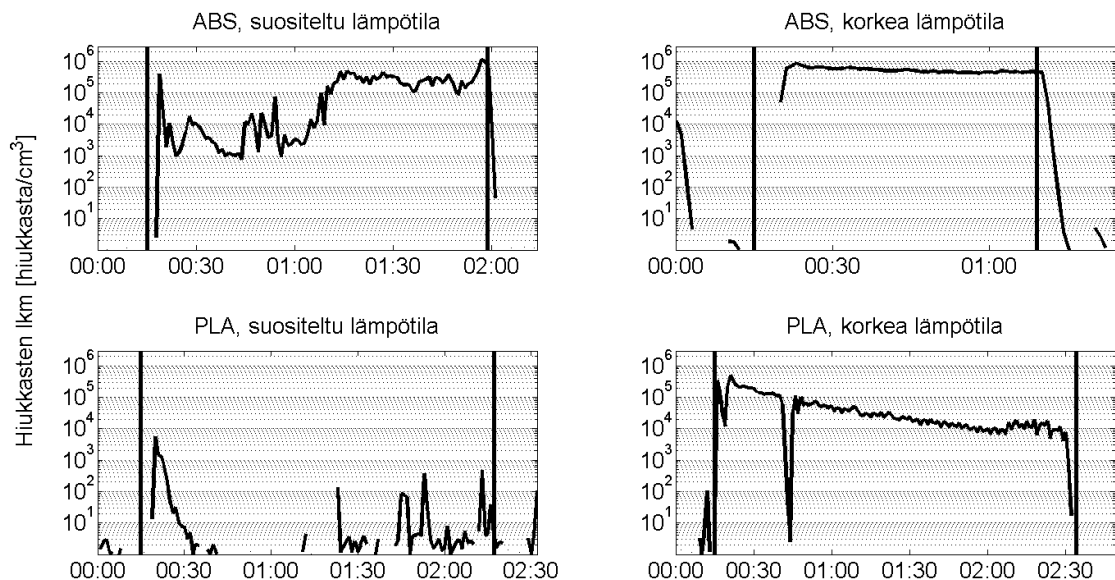
5.2 PM10-, PM2,5- ja PM0,1(UF)-partikkelit

Kun käsitellään hengitysilman sisältämiä partikkelisaasteita, ne voidaan jaotella kolmeen luokkaan partikkelihalkaisijan mukaan. Hengitettäviä hiukkasia käsitetään PM10-merkinnällä, joka tarkoittaa alle 10 mikrometrin halkaisijan omaavia hiukkasia. Käytännössä hengitettäviin hiukkasiin kuuluu esimerkiksi katupöly. (Ilmatieteenlaitos 2022a.) Alle 2,5 mikrometrin halkaisijan omaavat partikkelit käsitetään pienhiukkasiksi ja niitä kuvataan PM2,5-merkinnällä. Ilmasta löytyvät pienhiukkaset koostuvat pääosin polttoaineiden palamisesta ja puunpoltosta. Lisäksi pienhiukkasiksi muuntuvat myös ilmaan vapautuneet rikki- ja typpidioksidikaasut. (Ilmatieteenlaitos 2022b.)

3D-tulostuksen aikana ilmaan vapautuvat partikkelit ovat halkaisijaltaan huomattavasti edellä mainittujen kategorioiden määrittämiä partikkelikokoja pienempiä. FDM-tulostuksessa syntyvien partikkeleiden halkaisijat ovat lähtökohtaisesti alle

0,1 mikrometriä. (Gu, Salthammer, Uhde & Wensing 2018.) Tämän vuoksi tulostuksessa vapautuvat partikkelit luetaan ultrapieniksi hiukkasiksi, joita myös määritetään PM_{0,1} tai UF-merkinnällä.

FDM-tulostukseen käytettävä muovimateriaali kuumennetaan materiaalikohtaiseen lämpötilaan. Tulostuksesta muodostuvat partikkelipäästöt ovatkin sidonnaisia lämpötilaan, kuten käy ilmi Kuvio 5. Työlle tärkeimmän PLA:n tulostuslämpötila on muihin tulostusmateriaaleihin verrattuna kohtuullisen matala, yleensä 190°C - 220°C (Tyson 2019). Kuvio 5 ilmenee, että verrattain muihin FDM tulostuksessa käytettäviin materiaaleihin, kuten esimerkiksi ABS muoviin, PLA omaa matalamman tulostuslämpötilansa vuoksi myös matalamman hiukkaspäästöä.



Kuvio 5. Hiukkasmittauksia ABS ja PLA tulostuksilla (Huhtiniemi ym. 2016, 24)

6 PARTIKKELIPÄÄSTÖMITTAUKSET

Opinnäytetyön päätehtävänä on tutkia reaaliaikaisesti materiaalin pursotus 3D-tulostuksen toiminnassa tapahtuvan muovimateriaalin sulatuksen muodostamia PM_{0,1} hiukaspäästöjä. Mittauksia varten kartoitettiin aluksi tehtävään soveltuva mittauslaite. Tämä tapahtui tutustumalla olemassa olevien tutkimusten tuloksiin koskien esimerkiksi mitattavien partikkeleiden kokoa.

6.1 Pegasor AQ™ Indoor

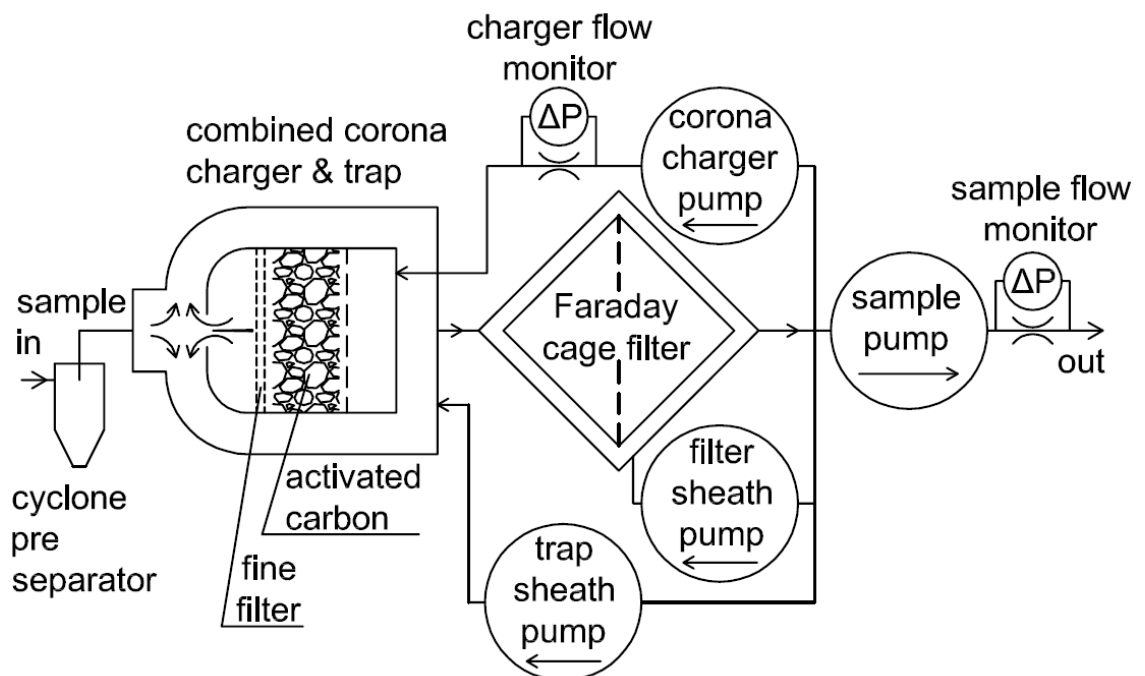
Taustatutkimuksen pohjalta mittauksissa päädyttiin käyttämään Kuva 5 esitettyä Pegasor Oy:n valmistamaa AQ™ Indoor- sisäilmanlaadun mittauslaitetta. AQ™ Indoor mahdollistaa sisäilmanlaadun monipuolisen tarkastelun keskittyen PM_{0,1} kategorian hiukkasten tutkimiseen.



Kuva 5. Pegasor AQ™ Indoor (Pegasor Oy 2022)

Kuvio 6 on esitettyinä mittalaitteen toimintaperiaate. Mitattava ilma otos kulkeutuu aluksi suurempien PM_{2,5} hiukkaskoon partikkelit erottavaan sykloniin. Tämän jälkeen suodatettuun otokseen muodostetaan sähkövaraus, joka mahdollistaa ai-noastaan varautuneiden partikkeleiden kulkeutumisen mittausyksikköön. Käytet-

tävän virran määrää tarkkaillaan käyttäen hyödyksi Faradayn häkkiä. Sähkömagneettiset kentät eristävä Faradayn häkki mahdollistaa sähköisesti varautuneiden partikkelien sitovan varauksen tarkastelun mahdollistaen puolestaan otoksen PM_{0,1} hiukkasten määrän, yhteenlasketun pinta-alan ja painon tarkkailun. Lisäksi laitteella on myös mahdollista mitata hiukkasten LDSA-arvoa, jota käytetään tutkittaessa hiukkasten muodostamia terveyshaittoja. Työn kannalta partikkelimittauksista eniten merkitystä on partikkelikonsentraatiolla. Partikkelikonsentraatiolla tarkoitetaan havaittujen partikkelien lukumäärää kuutiosenttimetrissä ilmaa. AQ™Indoor mahdollistaa hiukkasten mittauksen 10 nanometrin halkaisijasta ylöspäin. (Pegasor Oy 2019.)



Kuvio 6. AQ Indoor™ sensorin toimintaperiaate (Pegasor Oy 2019)

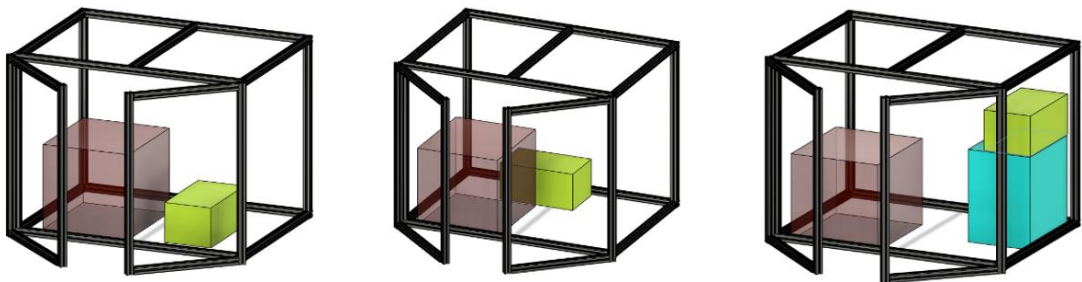
AQ Indoor™ mahdollistaa huoneilman PM_{0,1} partikkelipitoisuuksien, ilmankosteuden ja ilman lämpötilan sekä hiilidioksidipitoisuuksien reaaliaikaisen tarkastelun laitteen edessä olevalta kosketusnäytöltä. Laitteen kirjoittamaa mittausdataa on mahdollista tallentaa USB-muistitikulle esimerkiksi Excel-muotoon. Oletuksena laite kirjoittaa mittausdatan kymmenen sekunnin intervallilla, mutta tämä on valittaessa kirjoitettavaa tiedostomuotoa mahdollista muuttaa. Kirjoitettaessa mit-

tausdataa muistitikulle laite kirjoittaa kaikki laitteen mittaamat arvot omissa sarakkeissa automaattisesti. Lisäksi laite on mahdollista yhdistää verkkoon, jolloin mittausdata voidaan tallentaa langattomasti pilvipalveluun (Pegasor Oy 2022.)

6.2 Mittaussuunnitelma

Mittaukset tullaan toteuttamaan Kuva 6 näkyvässä kolmessa määritetyssä sijainnissa tulostinkotelon sisällä huomioiden käytettävän mittalaitteen koon ja muodon asettamat rajoitteet. Kuvassa ruskea kuutio esittää 3D-tulostinta, vihreä kuutio esittää UF-partikkelimittauslaitetta ja sininen kuutio on mittauslaitteen asettelussa käytetty koroke. Tulostinta esittävä ruskea kuutio on lisäksi kuvattu läpinäkyvänä tulostimen takana tapahtuvan mittauksen havainnollistamiseksi.

Mittaukset suoritetaan tulostimen vieressä mittalaitteen ollessa samassa tasossa kuin tulostin, tulostimen takana, sekä mittarin ollessa sijoitettuna mahdollisimman lähelle kotelon ilmanpoistoaukkoa. Mittausten sijainneista 1 ja 2 on valittu partikkelikonsentraation tarkkailemiseksi tulostimen tasolla sijainti 3 on valittu ilmanpoistoaukon sijainnin perusteella. Jokaisessa sijainnissa suoritetaan neljä mitaustapahtumaa, joiden keskiarvosta muodostetaan kullekin sijainnille mitaustulos.



Kuva 6. Partikkelimittauksen sijainnit 1, 2 ja 3

Mittaustapahtuma on kolmivaiheinen. Mittaus käynnistetään 10 minuuttia ennen tulostuksen käynnistymistä, jotta saadaan selville pitoisuuksien niin sanottu normaalitaso. Tämän jälkeen mittauksia jatketaan tulostusvaiheessa, joka kestää noin 1h10min. Tulostusvaiheen jälkeen mittauksia jatketaan, kunnes partikkelipitoisuudet kotelon sisällä ovat palautuneet normaalitasoa vastaavalle tasolle. Valmiista mitaustuloksista muodostetaan Excel-taulukon avulla sijaintikohtaisten

neljän mittauksen keskiarvo. Mittaustulosten keskiarvoista muodostetaan tämän jälkeen sijaintikohtaiset kuvaajat, joista käy ilmi UF-partikkelikonsentraatio mittauksen eri vaiheissa.

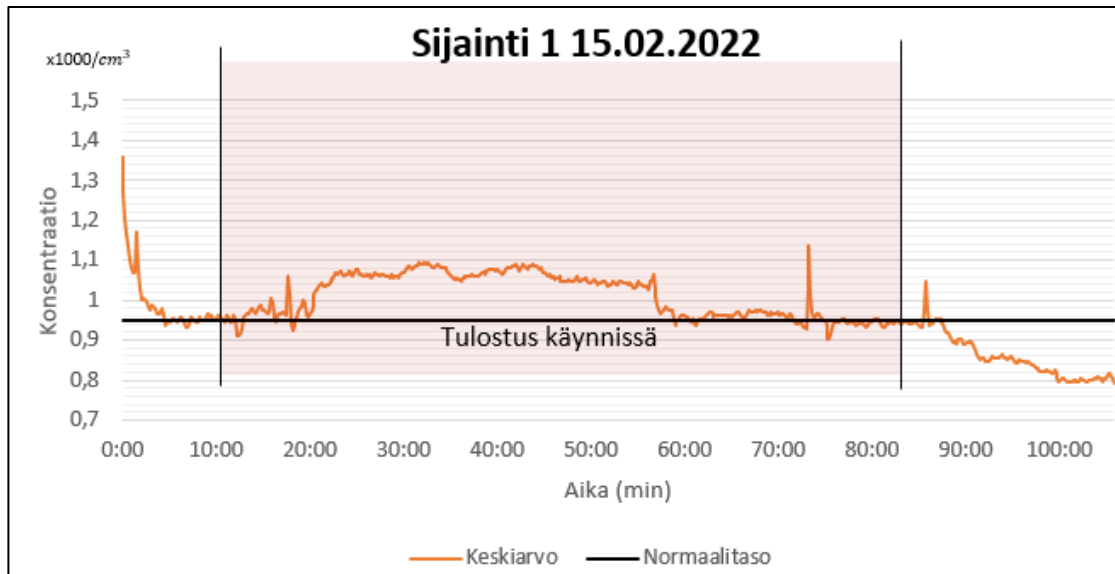
Mittauksien aikana tulostettava kappale on 35x35x35mm kuutio, joka tulostetaan PLA-muovifilamentilla lämpötila-asetuksilla 210°C/60°C (hot end/bed). Tulostimena käytetään Kuva 7 esitettyä Original Prusa i3 MK3S+ 3D-tulostinta.



Kuva 7. Original Prusa i3 MK3S+ (Prusa Research 2022)

6.3 Tulokset

Mittaustuloksissa havaittiin selkeitä keskinäisiä eroja UF-partikkelikonsentraatioissa mittauspäivien ja sijaintien välillä. Kuvio 7 ja Kuvio 8 mittaukset on toteutettu samassa sijainnissa kahtena eri päivänä johtuen ongelmista tulostimen toiminnassa ensimmäisten mittausten toteutuspäivänä. Kuvioista ilmenee, että 15.02. toteutettujen mittausten konsentraation kuvaaja on tasaisempi, kuin 18.02. toteutettujen mittausten kuvaaja, mutta konsentraatio itsessään on huomattavasti korkeampi koko 15.02. suoritettujen mittausten ajan.



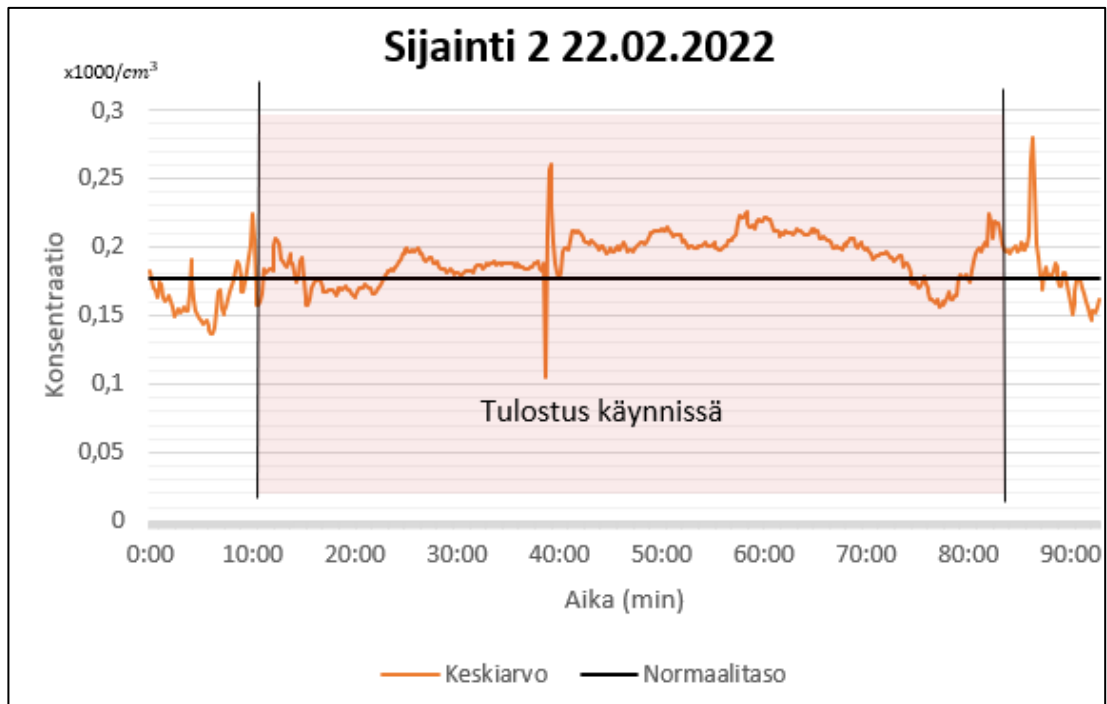
Kuvio 7. Partikkelimittaukset tulostimen vieressä 15.2.2022

Kuvio 8 havaitaan korkein piikki UF-partikkelikonsentraatiossa tulostuksen alkuvaiheessa. Lukuun ottamatta Kuvio 9 kuvaajaa myös muissa mittauksissa on mitattu korkeimmat konsentraatioarvot 20 minuutin sisällä tulostuksen aloituksesta.



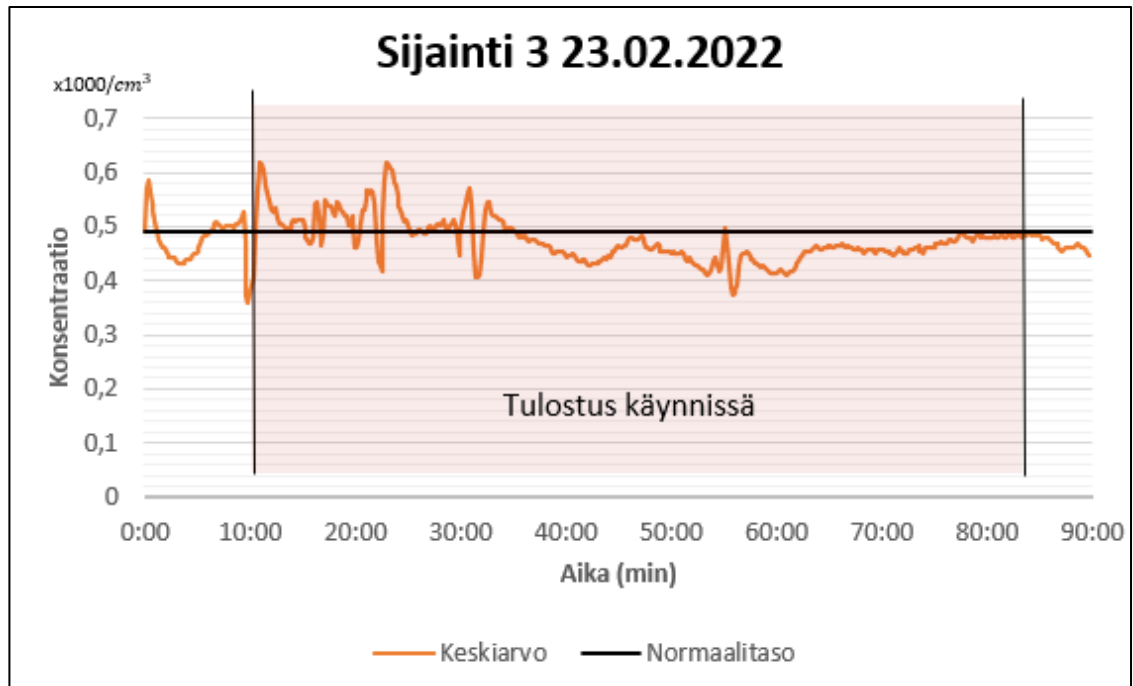
Kuvio 8. Partikkelimittaukset tulostimen vieressä 18.2.2022

Poiketen muista mittaustuloksista Kuvio 9 havaitaan, että mitattaessa UF-partikkelikonsentraatiota tulostimen takaa korkeimmat konsentraatioarvot mitattiin tulostuksen keskivaiheessa. Ennen konsentraation kasvua havaitaan myös erittäin jyrkkä piikki.



Kuvio 9. Partikkelimittaukset tulostimen takana 22.2.2022

Kuvio 10 UF-partikkelikonsentraatio on palautunut tulostuksen käynnistystä edeltävälle tasolle noin 30 minuuttia tulostuksen käynnistyksestä. Myös Kuvio 7 on havaittavissa vastaava ilmiö, vaikkakin itse konsentraatio on selkeästi korkeampi.



Kuvio 10. Partikkelimittaukset ilmanpoistokanavan edestä 23.2.2022

6.4 Analyysi

Kaikkien mittausten kesken kävi ilmi, että noin 10 minuuttia tulostuksen päättymisestä UF-partikkelikonsentraatio tulostuskotelon sisällä on palautunut tulostusta edeltävälle tasolle. Osassa mittauksia normaalitaso saavutettiin jo ennen tulostuksen päättymistä.

Syy siihen, miksi konsentraatiolukemat ja ennen tulostuksen käynnistystä mitattu normaalitaso vaihtelevat mittaussijainneittain sekä kuvioista Kuvio 7 ja Kuvio 8 myös päivien välillä, selittyy kotelon ilmanpoiston ilmavirtauksen vaihtelulla, jota käsitellään luvussa 7. Mittausten alussa havaitaan myös korkea piikki konsentraatiossa ennen tulostuksen käynnistymistä. Tämä johtuu siitä, että aloitettaessa päivän mittauksia myös filamenttirullan lataus tulostimeen ja toiminnan testaus edellyttää filamentin kuumentamista ja näin muodostaa partikkelipäästöjä. Vaikka tämä tapahtuukin ainoastaan ensimmäisen mittauksen aloittamisen yhteydessä, aiheuttaa se silti keskiarvoa kuvaavalla graafilla piikin.

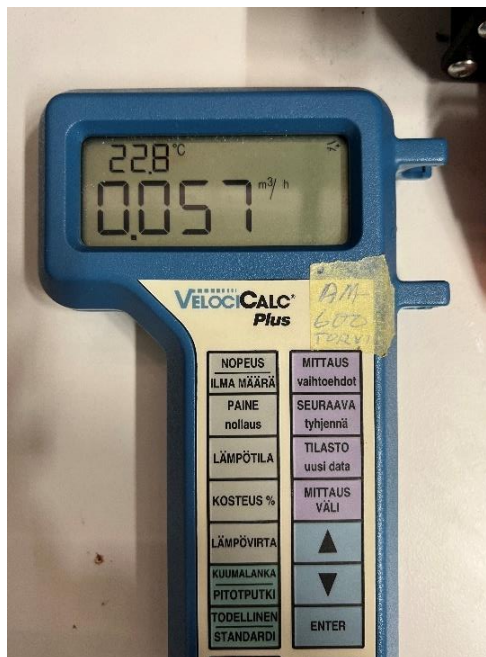
7 ILMAVIRTAUKSEN MITTAUS

Tulostinkoteloiden ilmanpoiston virtauksen mittauksen tarkoituksena on tukea partikkelipäästöjen mittausta sekä lopullista koteloiden käyttöohjeiden muodostusta. Mittaamalla selvitetään koteloiden ilmanpoistokanavan ilmanvirtausnopeus sekä massavirta. Näiden avulla saadaan selville koteloiden sisältämän ilmamäärän vaihtumisaika, jota käytetään koteloiden käyttöohjeiden muodostuksessa.

7.1 TSI Inc. VelociCalc Plus

Tilavuusvirran mittauksessa käytetään yhdysvaltalaisen TSI Incorporatedin valmistamaa ilmanvaihtojärjestelmien toiminnan tarkkailuun käytettävää mittalaitetta. Työssä tarvittavan suureen lisäksi mittalaite mahdollistaa esimerkiksi ilman lämpötilan, -tiheyden ja -kosteuden tarkastelun. VelociCalc Plus- mittalaitteella on mahdollista mitata ilmanvaihdon toimintaa sekä pyöreästä, että neliskantisesta ilmastointilinjasta.

Lisäksi käytettäessä Kuva 9 näkyvää mittausapulaitetta VelociCalc Plus mahdollistaa mittauksen myös ilmanvaihtokanavan suulta, kun esimerkiksi kanavan muoto on epäsymmetrinen, kanavan halkaisija ei ole tiedossa tai mittaus suoraan kanavasta on muuten estynyt. (TSI Incorporated 2010.)



Kuva 8. VelociCalc Plus -päätelaitte

7.2 Mittaussuunnitelma

Koteloiden ilmanpoistokanavasta mitataan ilman tilavuusvirta käyttäen apuna AM-300 mittausapulaitetta, joka mahdollistaa mittauksen ilmanpoistoaukon suuaukolla. Mittaus suoritetaan asettamalla VelociCalc Plusin anturi AM-300 mittausapulaitteeseen valitsemalla päätelaitteesta AM-300:a vastaava mittausasetus ja asettamalla AM-300 mittausanturin kanssa sen jälkeen tiiviisti tulostinkotelon ilmanpoistoaukolle Kuva 9 mukaisesti.

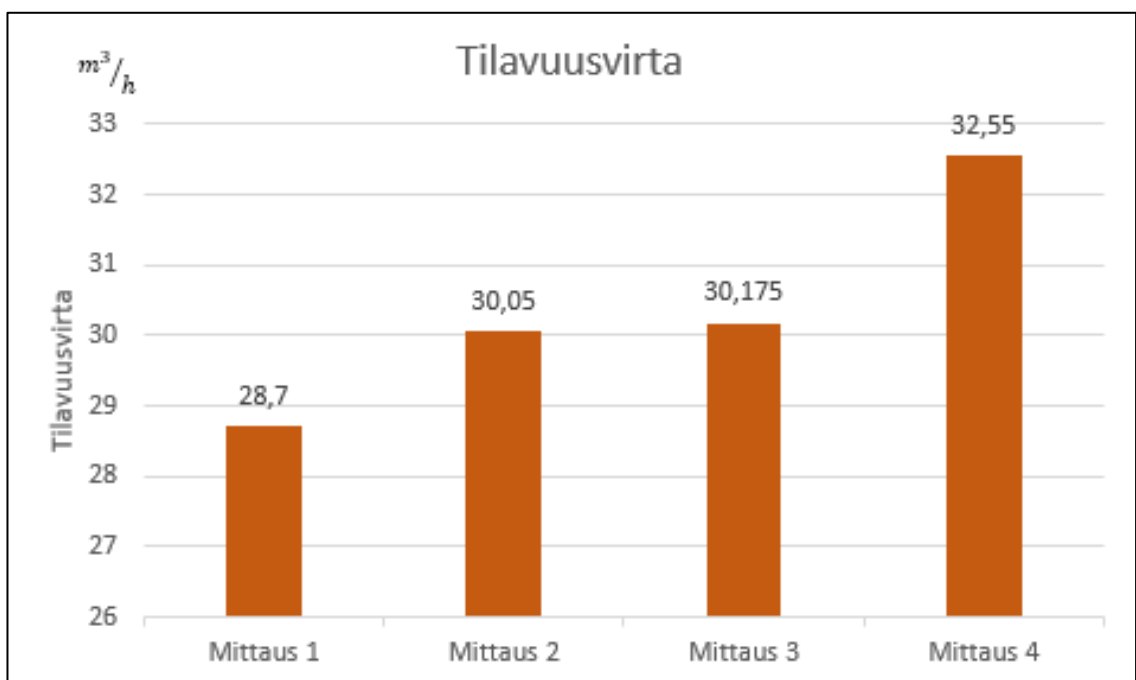


Kuva 9. Kotelon ilmanpoiston mittausperiaate AM-300 apulaitteella

Mittausta jatketaan, kunnes Kuva 8 päätelaitteella näkyvä mittausarvon lukema tasaantuu. Mittaus suoritetaan ennen jokaista partikkelipäästömittausta. Mittausten jälkeen taulukkoon syötetään päiväkohtaiset keskiarvot, joista muodostetaan kuvio.

7.3 Tulokset

UF-partikkelipäästöjen mittauksen ohessa tehdyissä ilmanpoiston tilavuusvirran mittauksissa havaittiin selkeitä keskinäisiä eroja. Tilavuusvirran mittaukset selittävät myös erot UF-partikkelimittausten konsentraatiopitoisuuksien kesken. Kuvio 7 mittauksessa UF-partikkelikonsentraatio kotelon sisällä on selkeästi muita mittauksia korkeampi ja samanaikaisesti Kuvio 11 esitettävistä tilavuusvirroista käy ilmi, että juuri mittauksen 1 aikana ilmanpoiston tilavuusvirta on ollut selkeästi alhaisin.



Kuvio 11. Ilmanpoistokanavan tilavuusvirrat

Syy tilavuusvirtojen vaihtelevuuteen jäljitettiin laboratoriotilan ilmanpoiston toimintaperiaatteeseen. Kun koteloiden erillispoistoja kytketään päälle, tilassa olevan yleispoiston teho laskee samalla litramäärällä, kuin erillispoisto kasvaa. Vaihtelevuus on aiheutunut siitä, että koteloiden erillispoistojen ajastinten ohitukset eivät ole olleet kaikissa haaroissa käytössä.

8 KOTELOIDEN ILMANPOISTON SÄÄTÖ

Osana opinnäytetyötä tehtävänä oli säätää koteloiden ilmanpoistiventtiilit toimimaan kotelokohtaisesti yhtenäisesti. Tarvittavat tiedot säätämiseen saatiin tehtyjen mittausten perusteella. UF-partikkelimittauksen tulostrendejä verrattiin poistoilman tilavuusvirtoihin. Tavoitteena oli selvittää tarvittava poistoilman tilavuusvirta, että kotelo on mahdollista avata heti tulostuksen päätyttyä.

8.1 Tilavuusvirran määrittäminen

Tarkasteltaessa UF-partikkelimittausten ja tilavuusvirtausten mittausdataa kävi ilmi, että tilavuusvirran ollessa $32,55 \pm 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ UF-partikkelipitoisuudet kotelon sisällä olivat palautuneet tulostuksen aloitusta edeltävälle tasolle jo tulostuksen loppuvaiheessa mahdollistaen kotelon avaamisen ja tulosteen poiston heti tulostuksen päättyessä. Ilmanpoiston säätö pohjattiin siis tähän arvoon.

Koska tulostinkoteloita on kahta eri kokoa ja mittaukset on toteutettu näistä suuremmassa kahdelle tulostimelle tarkoitetussa kotelokoossa, pienemmän kotelon ilmanpoiston tarvittava tilavuusvirta määritettiin yksinkertaisesti käyttäen alla olevaa kaavaa. Kaavalla saadaan laskettua pienemmän kotelon prosentuaalinen tilavuus verrattuna isompaan koteloon. Isomman kotelon tilavuusvirta kerrotaan tämän jälkeen kyseisellä prosenttiluvulla, jotta saadaan pienemmän kotelon tilavuusvirran vaadittava arvo.

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \times Q_1 = Q_2 \quad (1)$$

Missä

V_2	on	Pienemmän kotelon tilavuus
V_1	on	Suuremman kotelon tilavuus
Q_1	on	Suuremman kotelon tilavuusvirta
Q_2	on	Pienemmän kotelon tilavuusvirta

Pienemmän kotelokoon tilavuusvirraksi saatiin kaavaa käytettäessä $26,6 \pm 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

8.2 IRIS-venttiilien säätö

Kotelokohtaisten tilavuusvirtojen laskennallisen määrittämisen jälkeen siirryttiin säätämään laboratoriossa sijaitsevia ilmanpoistokanavan IRIS-virtaussäätöventtiileitä. Kuva 10 esitetty IRIS-virtaussäätöventtiili mahdollistaa ilmanvaihtokanavan ilmanvirtauksen portaattoman säädön.



Kuva 10. IRIS-virtaussäätöventtiili (FläktGroup 2021.)

Normaalisti säätö tapahtuu asettamalla ilmanvirtauksen mittalaite säätöventtiilissä oleviin mittauspisteisiin. Tämän työn tapauksessa ilmavirran säätö toteutettiin kuitenkin käyttämällä mittaukseen kuvien Kuva 8 ja Kuva 9 mittalaitteistoa. Syynä tähän on säätöventtiilien asento ja sijoituskorkeus tilassa, minkä vuoksi mittauslaitetta ei voitu asettaa mittausaukkoon tiiviisti.

Venttiilin säätö tapahtui kääntämällä Kuva 10 näkyvää mutteria kiintoavaimella. Mutterin liikuttaminen muuttaa venttiilin säätöpeltien asentoa muuttaen näin venttiilin kanavassa olevan aukon halkaisijaa. Säätöä jatkettiin, kunnes virtausmittalaitteessa saavutettiin tavoiteltu virtausarvo.

10 KÄYTTÖOHJEIDEN MUODOSTUS

Työn päätavoitteina oli tutkia FDM-tulostuksen muodostamia partikkelipäästöjä sekä tulostuskoteloiden ilmanpoiston virtausta ja näiden mittausten pohjalta varmistaa tulostuslaboratorion tulostinkoteloiden toiminta. Lisäksi tulostuskoteloille muodostettiin käyttöohjeet.

10.1 Koteloiden toiminta

Luvuissa 6.3 ja 7.3 esitettyjen mittaustulosteiden perusteella voitiin todeta avotulostimille valmistettujen koteloiden toimivan asianmukaisesti. Tulostuksen aikana partikkelikonsentraatio kasvoi kotelon sisällä selkeästi ja palautui myös takaisin tulostusta edeltävälle tasolle. Partikkelikonsentraatioon kotelossa myös selkeästi vaikutti ilmanpoiston tilavuusvirran määrä, jonka havaittiin olevan suurimpien konsentraatio pitoisuuksien mittauspäivinä, selkeästi alhaisempi.

Mittaustulosten avulla myös koteloiden ilmanpoisto voitiin säätää tasolle, joka mahdollisti koteloiden sujuvan käytön. Edellytyksenä ilmanpoiston halutulle toiminnalle on kuitenkin, että ilmanpoiston kotelokohtaisten haarojen sähköiset ajastinventtiilit ovat ohitettuna, koska kotelokohtaiset ilmanpoiston tilavuusvirrat säädettiin kaikkien haarojen ajastinventtiilien ollessa auki. Tämä on huomioitu myös Kuvio 12 esitetystä käyttöohjeesta lisäämällä muistutus tarkastaa, että ajastimen ohitus on päällä.

10.2 Koteloille laaditut käyttöohjeet

Lopuksi tulostuskoteloille laadittiin käyttöohjeet. Kirjallisella ohjeistuksella oli tarkoitus varmistaa, että koteloita käytetään menettelyllä, joka minimoi käyttäjän altistumisen tulostuksesta vapautuville partikkeleille. Kuvio 12 on esitettyinä valmiit käyttöohjeet tulostinkoteloille.

Tulostuskoteloiden käyttöohje

1. Avaa ovet ja valmistele tulostin
 - Tarkasta ennen tulostuksen aloitusta tulostimen suutin ja puhdista se tarvittaessa IPA:lla.
 2. Käynnistettyäsi tulostuksen sulje kotelon ovet
 3. Ovet pidettävä suljettuna koko tulostuksen ajan
 4. Tulostuksen päätyttyä odota 10min ennen ovien avaamista
 - 10min odotusajalla varmistetaan tulostuksen partikkelipäästöjen haihtuminen kotelosta
 5. Avaa kotelon ovet ja poista tuloste
 - Mikäli tulostimen käyttöä ei jatketa muista myös poistaa filamenttirulla ja palauta se kuivauskaappiin.
 6. Sulje ovet
- Huom. muista myös tarkastaa, että kotelon takana olevassa ajastimen ohituskatkaisijassa palaa valo

Printer case user instructions

1. Open case doors and prepare the printer
 - Before starting the print check the condition of the printer nozzle and clean it with IPA if necessary.
 2. After starting the print close the case doors
 3. Case doors are to remain closed during active print
 4. After print has finished wait 10 minutes
 - 10 minute wait time is to allow particulate emissions caused by printer to disperse inside the case
 5. Open the case doors and remove the print
 - If the printer is not in use afterwards also remove the filament roll and return it to the drying cabinet.
 6. Close the case doors
- Note, before use check that the timer bypass switch behind the printer case is turned on and has a light on.

Kuvio 12. Tulostuskoteloiden käyttöohjeet

Ohjeita laadittaessa on huomioitu myös laboratoriotiloissa työskentelevät vaihto-opiskelijat. Tästä syystä ohjeistukset on käännetty myös englannin kielelle. Käynnissä olevan tulostuksen aikana kotelon ovet tulee pitää suljettuna, oli tärkein asia, mitä kotelon käyttöohjeistuksella haluttiin välittää käyttäjälle. Tulostuksen aikana ja eteenkin alkuvaiheessa ilmenevät ongelmat vaativat sattuaan usein käyttäjän toimia, jolloin kotelon ovien avaaminen tulostuksen aikana ja sen myötä altistuminen partikkelipäästöille on välttämätöntä. Vastaavien tilanteiden aiheuttamat altistumiset eivät ole kuitenkaan säännöllisiä. Lisäksi laboratoriossa käytettävä tulostusmateriaali on pääasiassa PLA, minkä muodostamat partikkelipäästöt ovat jo itsessään alhaiset verrattuna muihin tulostusmateriaaleihin, kuten käy ilmi työn partikkelimitaustuloksista ja Kuvio 5. Tämän vuoksi voidaan katsoa, ettei niistä aiheudu käyttäjälle merkittävää riskiä.

11 POHDINTA

Työn tarkoituksena oli saada konkreettista tietoa PLA muovimateriaalin tulostuksen aikana muodostamista partikkelipäästöistä sekä varmistaa tulostuslaboratorioon valmistettujen avotulostinkoteloiden toiminta. Haastetta mittauksen suunnittelussa tuotti ennen kaikkea ajatus siitä, kuinka paikkansapitävää mittauksista kerätyt tulokset todellisuudessa ovat. Poiketen muista tutkimuksista työssä tehdyt mittaukset toteutettiin ympäristössä, missä kaikkia tulokseen vaikuttavia muuttujia ei ollut mahdollista hallita. Kuitenkin, koska työn tavoitteena oli tutkia tulostuksen muodostamia partikkelipäästöjä konsentraatiopitoisuuksina ja vahvistaa siinä tapahtuvien muutosten pohjalta koteloiden ilmanpoiston toiminta, mittaustulokset ovat työn kannalta uskottavia.

Työssä onnistuttiin kuitenkin hyvin. Partikkelimittauksista saatiin onnistuneesti selville PLA materiaalin muodostamat partikkelipäästöt ja mitatut tulokset myös vastasivat jo olemassa olevaa tietoa PLA:n muodostamista partikkelipäästöistä. Lisäksi partikkelimittausten tuloksena havaittiin, että suurimmat pitoisuudet mitataan lähes poikkeuksetta tulostuksen alkuvaiheessa. Partikkelikonsentraation määrään niitä kasvattavasti vaikutti myös tulostimen suuttimen ympärille epäonnistuneiden tulostusten yhteydessä tarttuneet materiaali jäänteet. Näin ollen FDM tulostimen käytössä suuttimen puhtaana pito ei ole pelkästään tulosteen laadunvaan myös tulostuksessa vapautuvien partikkelien määrän vähentämisen kannalta tärkeää. Mittaustulosten perusteella varmistettiin myös koteloiden ilmanpoiston toiminta vertaamalla mitattuja tilavuusvirtoja partikkelipäästöihin, jonka pohjalta määritettiin tilavuusvirran arvo, minkä mukaan virtaukset säädettiin kaikkien koteloiden kesken.

Partikkelimittausten pohjalta tehdyt koteloiden ilmanpoiston virtaussäädöt pohjautuvat PLA muovimateriaalin tuottamiin partikkelipäästöihin. Jatkotutkimusta voisi toteuttaa esimerkiksi ABS muovimateriaalilla tutkien esimerkiksi ilmanpoiston riittävyyttä tästä muodostuville partikkelipäästöille. Osana vastaavaa tutkimusta voisi olla myös koteloiden tiiveyden riittävyyden tarkastelu sijoittamalla partikkelimittari kotelon ulkopuolelle tulostuksen ajaksi.

Opinnäytetyöstä on ollut hyötyä myös oman harrastuskäyttöön hankitun tulostimen toimintaympäristön suunnittelussa. Olen työn tulosten myötä vakuuttunut, että pääosin PLA materiaalin tulostukseen hankitun harrastuskäyttöön tarkoitetun tulostimen käyttö on turvallista myös tavallisessa huoneillassa. Luonnollisesti tarkoituksena on työstä kerätyn osaamisen pohjalta koteloida myös oma tulostimeni, mutta tähän syy on lähinnä aikomus käyttää tulostuksessa myös materiaaleja, jotka ehdottomasti edellyttävät tulostimen eristämistä huoneilmasta.

LÄHTEET

Alsop, T. 2021. Most used 3D printing technologies worldwide 2021. Viitattu 14.11.2021 <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>, Statista.

Evans, G., Hall, S., Pengelly, I., Plant, N. & Staff, J. 2019. Measuring and controlling emissions from polymer filament desktop 3D printers. Health and Safety Executive 2019:32

FläktGroup 2021. IRIS mittaus- ja säätölaite. Viitattu 7.3.2022 <https://www.flaktgroup.com/fi/products/ilman-hallinta-ja-huonelaitteet/mittaus-saato-ja-sulkupelit/saato-ja-mittauspellit/iris-mittaus-ja-saatolaite/>

Garret, B., Redwood, B. & Schöffner, F. 2017. The 3D Printing Handbook. Amsterdam: Coers & Roest.

Grames, E. 2020. What Is 3D Printing? – Simply Explained. Viitattu 16.3.2022 <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>

Gu, J., Salthammer, T., Uhde, E. & Wensing, M. 2019. Characterization of particulate and gaseous pollutants emitted during operation of a desktop 3D printer. Environment International 123, 476–485.

Hengitysliitto. 2022. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet. Viitattu 15.3.2022 <https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/sisailman-laatu/sisailman-epapuhautaudet-ja-hajut/>

Hubs 2022. FDM 3D printing materials compared. Viitattu 29.3.2022 <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>

Huhtiniemi, M., Hämeri, K., Kallonen, K., Kanerva, T., Kangas, A., Kukko, K., Partanen, J., Stockmann-Juvala, H., Säämänen, A. & Tuomi, J. 2016. Materiaalia lisäävän valmistuksen (3D-tulostus) kaasua ja hiukkaspäästöt eri työvälineissä. Työterveyslaitos 2016:24

Ilmatieteenlaitos 2022a. Hengitettävät hiukkaset. Viitattu 15.3.2022 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/hengitettavat-hiukkaset>

Ilmatieteenlaitos 2022b. Pienhiukkaset. Viitattu 15.3.2022 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/pienhiukkaset-ilmansaasteena>

Joutsenvaara, J. 2017. Älykäs tuotantotekniikan oppimis- ja kehittämisympäristö – ÄLYPAJA. Hankehakemus 2017

Lapin AMK 2021a. Esittely. Viitattu 22.12.2021 <https://www.lapinamk.fi/fi/Esittely>

Lapin AMK 2021b. Tunnuslukuja. Viitattu 22.12.2021 <https://www.lapinamk.fi/fi/Esittely/Tunnuslukuja>

Lapin AMK 2021c. Vastuullisuus ja kestävä kehitys Lapin AMKissa. Viitattu 30.12.2021 <https://www.lapinamk.fi/fi/Esittely/Vastuullisuus-ja-kestava-kehitys>

Lapin AMK 2022. Insinööri (AMK), Konetekniikka. Viitattu 21.2.2022 <https://www.lapinamk.fi/fi/Hakijalle/AMK-tutkinnot/Insinööri,-konetekniikka>

Pegasor Oy 2019. White Paper Pegasor AQ Indoor™. Viitattu 15.3.2022 https://pegasor.fi/site/attachments/AQ_Indoor_white_paper_4.pdf

Pegasor Oy 2022. Pegasor AQ™ Indoor. Viitattu 15.3.2022 <https://pegasor.fi/products/aq-indoor>

Pikkarainen, A. 2018. Raportti. Lapin AMK. Integroitu tuotekehitys työpaketti. 2018

Pikkarainen, A. 2021a. 3D-tulostuslaboratorio – kuva. Sähköposti kalle.eskelinen@edu.lapinamk.fi 31.3.2021. Tulostettu 2.4.2021.

Pikkarainen, A. 2021b. Lapin AMK. Lehtorin haastattelu 4.10.2021

Prusa Research by Josef Prusa 2022. Original Prusa i3 MK3S+ 3D printer. Viitattu 5.03.2022 <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-3d-printer-3/#Specs>

SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Viitattu 22.2.2022 <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID6/5/480362.html.stx>

STM 2018a. Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2018:10.

STM 2018b. Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2018:11.

STM 2018c. Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2018:30.

Tiihonen, J. 2021. Lapin ammattikorkeakoulu käyttää lähes kaksi miljoonaa euroa yritysten vähähiilisyteen ja energiatehokkuuteen. Viitattu 22.2.2022 <https://yle.fi/uutiset/3-12117688>

TSI Incorporated 2010. VelociCalc® Plus Air Velocity Meter Viitattu 29.3.2022 <https://tsi.com/getmedia/382745b3-69a6-487d-9fc7-c972684c45bb/1980321J-8384-86-VelociCalc-Plus?ext=.pdf>

Tyson, M. 2019. Advanced guide to printing pla filament. Viitattu 16.3.2022 <https://www.3dprintingsolutions.com.au/User-Guides/how-to-3d-print-pla-filament>

Varotsis, A.B. 2022. What is FDM 3D printing. Viitattu 16.3.2022 <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>