



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# TYÖYMPÄRISTÖSSÄ TAPAHTUVAN ALTISTUMISEN SEURANTA ANTURITEKNIIKAN AVULLA

TEKIJÄ: Matti Tuppurainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Matti Tuppurainen			
Työn nimi Työympäristössä tapahtuvan altistumisen seuranta anturitekniikan avulla			
Päiväys	24.11.2019	Sivumäärä/Liitteet	36
Ohjaaja(t) Tuntiopettaja Aku Tuppurainen, yliopettaja Pasi Pajula			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Envimetria Oy, Secora Systems Oy			
Tiivistelmä <p>Tämän työn toimeksiantajana oli Envimetria Oy. Työn tarkoituksena oli tehdä selvitys siitä, millaisia antureita voisi käyttää teollisessa ympäristössä seuraamaan työntekijöiden altistumista erilaisille fyysisille ja kemiallisille haitta- altisteille.</p> <p>Opinnäytetyötä varten tehtiin kirjallisuuskatsaus, jossa selvitettiin työympäristömittaamisen lainsäädännöllistä taustaa, antureiden mittaus- ja tiedonsiirtomenetelmiä, sekä tehtiin kartoitus siitä millaisia antureita työn toimeksiantaja voisi käyttää työssään. Kirjallisuuskatsauksen lisäksi tehtiin pilottikoe, jossa testattiin valittujen antureiden soveltuvuutta pienhiukkasmittaukseen raskaissa teollisissa ympäristöissä. Pilottikoe suoritettiin työn toimeksiantajan laboratoriossa. Pienhiukkas-antureiden tuloksia verrattiin samassa koeasetelmassa olleiden Dust-Trak-mittarin sekä IOM- ja syklonikeräinten tuloksiin.</p> <p>Kirjallisuuskatsauksen myötä työn toimeksiantajalla on alustava opas siihen, millaisia antureita he voisivat käyttää ympäristömittauksissaan. Pilottikokeen perusteella testatut pienhiukkas-anturit eivät sovellu raskaiden teollisten ympäristöjen monitorointiin, ja testattu pienhiukkas-anturi on vain joko PM2.5 tai PM10 anturi, josta anturi sitten päättelee toisen hiukkasen pitoisuuden. Jatkotoimenpiteenä pienhiukkas-antureita voidaan todellisessa ympäristössä kontrolloidun laboratorion lisäksi.</p>			
Avainsanat Anturi, ympäristömittaus, jatkuvatoiminen monitorointi, työympäristö			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author Matti Tuppurainen			
Title of Thesis Measuring exposure to hazardous factors in a work environment using sensor technology			
Date	24 November 2019	Pages/Appendices	36
Supervisor(s) Mr Aku Tuppurainen, Lecturer and Mr Pasi Pajula, Principal Lecturer			
Client Organisation/Partners Envimetria Oy, Secora Systems Oy			
<p>Abstract</p> <p>This thesis was commissioned by Envimetria Oy. The purpose of this work was to create a report on what kind of sensors could be used in an industrial environment to track and measure the amount of exposure workers have to different kinds of harmful physical quantities and chemical substances. Physical quantities are things like the amount suspended fine particulate matter in the air, and chemical substances are things like solvent vapors.</p> <p>As part of this thesis, a literature review was made in order to study the legislative background for monitoring the work environment and the methods for sensor measurement and data transmission. In addition, a survey was carried out to find out which sensors the commissioner could use in their work. In addition to the literature review, a pilot experiment was performed, in which selected fine particle sensors were tested for suitability for use in heavy industrial environments. The pilot experiment was performed in the commissioner's laboratory. The results of the fine particle sensors were compared to the results of a Dust-Trak-sensor and IOM- and cyclone samplers, which were also present in the experiment.</p> <p>Following the literature review the commissioner has an initial guide to what sensors they can use in environmental monitoring. According to the pilot experiment, the tested fine particle sensors are not suitable for monitoring in heavy industrial environments. Furthermore, the sensor that was tested is only a PM2.5 or PM10 sensor, and the sensor derives the value of one from the other. As a follow up the fine particle sensors should be tested in a real environment in addition to a controlled laboratory environment.</p>			
<p>Keywords</p> <p>Sensor, environmental monitoring, continuous monitoring, work environment</p>			

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	7
1.1	Tausta.....	7
1.2	Tavoitteet ja rajaukset .....	7
2	KIRJALLISUUSKATSAUS .....	8
2.1	Työympäristön seurannan tausta ja lainsäädäntö .....	8
2.2	Mittausmenetelmät .....	9
2.3	Anturit.....	11
2.4	Antureiden tiedonsiirtomenetelmät.....	15
3	PILOTTIKOE .....	17
3.1	Yleiskuvaus ja tavoite.....	17
3.2	Koeasetelma ja käytetyt laitteet .....	17
3.3	Toteutus .....	21
3.4	Tulokset ja niiden tarkastelu .....	21
3.5	Epävarmuustarkastelu .....	33
3.6	Johtopäätökset .....	33
4	YHTEENVETO.....	34
	LÄHTEET .....	35

## Määritelmiä

*Altisteella* tarkoitetaan sellaisia fysikaalisia, kemiallisia tai biologisia tekijöitä, jotka voivat aiheuttaa ihmiselle haittavaikutuksia.

*Anturi* on se osa mittalaitetta, joka mittaa haluttua suuretta, ja lähettää suureen arvon mittariin tai mittalaitteeseen.

*IoT* (Internet Of Things, esineiden internet) tarkoittaa trendiä, jossa fyysiset laitteet tai mittarit varustetaan internetyhteydellä, jonka avulla niitä voidaan seurata tai ohjata etäältä.

*Suhteellinen kosteus* on luku, joka ilmaisee, kuinka monta prosenttiyksikköä ilmasta on vesihöyryä, huomioiden sen kuinka paljon kyseisessä ilmassa voi enimmillään olla vesihöyryä lämpötilan vaikutuksesta.

*CO* eli hiilimonoksidi on väritön, hajuton ja mauton kaasu. Se on ilmaa kevyempää. Hiilimonoksidia syntyy orgaanisen aineen epätäydellisessä palamisessa, eli sellaisessa palamisreaktiossa, jossa hapen saanti on liian pieni, lämpötila liian alhainen tai liian korkea. Ihmisen hengittäessä hiilimonoksidia se kulkeutuu keuhkoihin ja sitä kautta vereen, ja veressä se sitoutuu hemoglobiiniin, jolloin hapen sitoutuminen vereen estyy. Seurauksena on hengenahdistus, päänsärky, pahoinvointi, tajunnan menetys ja kuolema. (Starck, Kalliokoski ym. 2008, 206 - 207.)

*CO<sub>2</sub>* eli hiilidioksidi on hiilimonoksidin tapaan väritön, hajuton ja mauton kaasu. Se on ilmaa painavampaa. Hiilidioksidia syntyy myös palamisreaktiossa, mutta sitä syntyy sekä täydellisessä että epätäydellisessä palamisessa, mukaan lukien ihmisen hengittäessä. Hiilidioksidi ei ole terveydellä läheskään yhtä haitallista kuin hiilimonoksidi, mutta koska sitä syntyy myös ihmisen hengityksessä, hiilidioksidin määrä sisäilmassa on hyvä indikaattori ilmanvaihdon riittävydestä.

*PM<sub>2.5</sub> & PM<sub>10</sub>* eli pienhiukkaset ovat hiukkasia, joiden koko on 2,5 tai 10 mikrometriä tai pienempi. Pienhiukkasia syntyy monin erin tavoin, esimerkiksi tiettyjen pintojen hangatessa toisiaan vasten tai ilmassa olevien höyryjen tiivistyessä. Ihmisen hengittäessä ilmassa olevat pienhiukkaset kulkeutuvat pienen kokonsa takia keuhkorakkuloihin. Tarkkaa syytä pienhiukkasten aiheuttamille terveyshaitoille ei tiedetä, mutta tutkimuksissa on havaittu niiden lisäävän hengityselinsairauksia sekä sydän- ja verisuonisairauksia. Pienhiukkaset, joiden koko on pienempi kuin 2,5 mikrometriä on havaittu olevan erityisen haitallisia terveydelle. (Starck, Kalliokoski ym. 2008, 131 - 133.)

*Hengittävä- ja alveolijakeinen pöly* ovat määritelmiä erilaisille pölytyypeille. Hengittävä pöly on kaikkea hengitettävää pölyä, ja alveolijakeinen pöly on sellaista hienoa pölyä, joka kulkeutuu hengitettäessä aina keuhkorakkuloihin asti. (Työterveyslaitos 2016, 2 - 3.)

VOC eli haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat nestemäisiä orgaanisia yhdisteitä. Tämän luokituksen alle kuuluvat alkoholit, esterit, ketonit, halogenoidut hiilivedyt, eetterit ja monet muut. Niitä käytetään paljon monissa erilaisissa teollisuuden aloissa. Monet liuotinaineet tähän ryhmään kuuluvia. Kuten nimi viittaa, VOCit haihtuvat helposti ilmaan jo huoneenlämmössä. VOC höyryt ärsyttävät silmien sidekalvoa ja hengitysteiden limakalvoa, aiheuttavat päänsärkyä ja jopa tajunnan menetystä ja kuolemaa. (Starck, Kalliokoski ym., 2008, 210 - 214.)

## 1 JOHDANTO

### 1.1 Tausta

Envimetria Oy (alana ympäristömittaukset) ja Secora Systems Oy (alana verkkopohjaiset palvelut) ovat etsineet ratkaisua, jolla voisi tarjota asiakkaille mahdollisuutta seurata työntekijöiden altistumista erilaisille haitallisille altisteille teollisissa ympäristöissä. Erilaisia terveydelle haitallisia altisteita on monenlaisia, kuten pienhiukkaset, liuottimien huurut, säteily ja värinä.

### 1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tehdä kirjallinen selvitys antureista, joilla työntekijöiden altistumista voitaisiin seurata jatkuvatoimisesti, sekä tehdä pilottikoe teollisessa ympäristössä.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään altisteisiin, joita syntyy teollisen ympäristön prosessipäästöistä. Myöhemmin tarkastelun pääkohteeksi tarkentuivat pienhiukkaset. Syynä teollisen ympäristön päästöjen keskittymiseen oli se, että toimistotiloihin tällaisia tutkimuksia on tehty jo useita, kun taas teollisiin ympäristöihin huomattavasti vähemmän.

Opinnäytetyö jaettiin kolmeen vaiheeseen: tiedonhakuun, pilotointiin ja raportointiin. Tiedonhaku- vaiheessa opinnäytetyön tekijä etsi tietoa erilaisista antureista, jonka perusteella tarvittavat anturit tilattiin. Pilotointivaiheessa kyseisiä antureita testattiin laboratorio-olosuhteissa. Raportointivaiheessa pilotoinnin tulokset ja johtopäätökset kirjattiin ylös ja raportointiin opinnäytetyön tilaajalle.

## 2 KIRJALLISUUSKATSAUS

### 2.1 Työympäristön seurannan tausta ja lainsäädäntö

Yleisellä tasolla työntekijöiden altistuminen liiallisesti haitallisille aineille on vähentynyt viime vuosikymmeninä Suomessa. Työnantajat ja valtio olivat molemmat havahtuneet siihen, että työntekijät ovat joutuneet työskentelemään epäterveellisissä ja vaarallisissa olosuhteissa. Molemmat osapuolet ovat olleet sitä mieltä, että mikäli työntekijöiden terveyttä ja turvallisuutta parannetaan, siitä saadaan taloudellisesti nettona positiivisia vaikutuksia, kun työntekijöiden motivaatio kasvaa, työtapa-urmat, -sairaudet ja poissaolot vähenevät ja yrityksen imago paranee. (Starck, Kalliokoski ym. 2018, 11 - 13.)

Sisäilman laatu vaikuttaa luonnollisesti työterveyteen, ja moni osapuoli pyrkii edistämään työterveyttä. Näistä tärkeimmät Suomen näkökulmasta ovat Euroopan Unioni ja Sosiaali- ja terveysministeriö. EU valmistelelee ja hyväksyy yleisdirektiivejä sen jäsenvaltioiden yhteistyönä. Näissä yleisdirektiiveissä määritellään työterveyteen vaikuttavien asioiden vaatimustasoja ja toimintaperiaatteita. Jäsenvaltiot seuraavat näitä direktiivejä omilla kansallisilla säädöksillään. Suomessa Sosiaali- ja Terveysministeriö on vastuussa työterveyden suunnittelusta ja ohjauksesta. Esimerkkinä tästä prosessista Euroopan Unioni laati vuonna 2002 työterveys- ja työturvallisuudirektiivin 89/391/EEC, jonka perustella Suomi laati työturvallisuuslain 738/2002. (Starck, Kalliokoski ym. 2018, 14 - 20.)

Suomessa toimii myös Työterveyslaitos (TTL), joka on Sosiaali- ja terveysministeriön alaisuudessa toimiva julkisoikeudellinen yhteisö, jonka tavoitteena on edistää ja ylläpitää työntekijöiden terveyttä. Se toimii tutkimalla erilaisia työterveyteen liittyviä asioita ja kouluttamalla työnantajia ja työntekijöitä työterveyteen liittyvissä asioissa. TTL on julkaissut ehdotetut ohjearvot ja tavoitetasot hengittävälle ja alveolijakoiselle pölylle. Hengittävälle pölylle tämä ohjearvo on  $2 \text{ mg/m}^3$ , ja alveolijakoiselle pölylle  $0,5 \text{ mg/m}^3$ . Tässä tulee kuitenkin ottaa huomioon pölyn muut mahdolliset terveyshaitat, kuten toksisuus tai pölyn molekyylien erityisen haitallinen rakenne. Näitä ominaisuuksia tulee mitata erikseen ja arvioida verraten tuloksia niille asetettuihin tavoitetasoihin. (Työterveyslaitos, 2016, 2 - 3.)

## 2.2 Mittausmenetelmät

Anturi on se osa mittalaitetta, joka reagoi jollain tavalla ympäröivän ilman kanssa, ja mittaa siitä jonkin suureen arvon. Antureiden mittausmenetelmä voi perustua fysikaalisiin tai kemiallisiin muutoksiin. Anturi ei itsessään kerro, mikä mitattavan suureen arvo on. Anturi sen sijaan lähettää mittamansa tiedon esimerkiksi analogisessa tai digitaalisessa muodossa mittariin, jossa anturin tulos muutetaan yhtälön avulla mitattavaksi suureeksi.

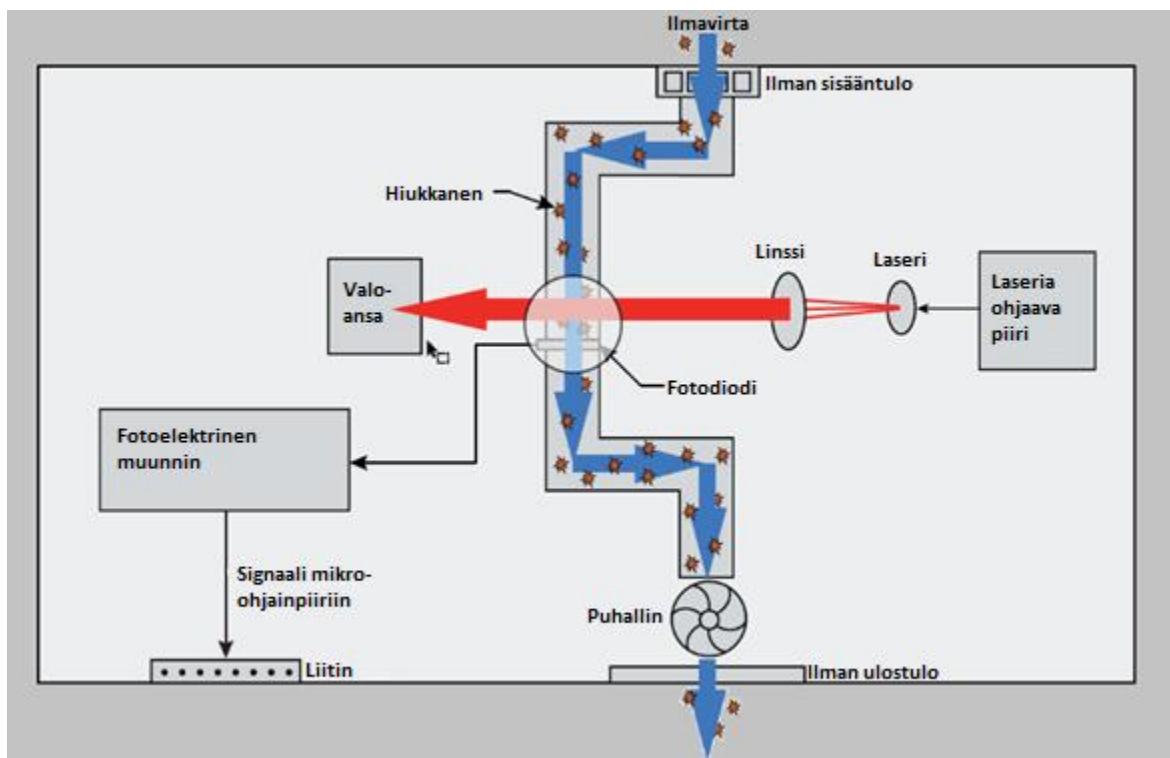
Antureiden lisäksi ilman ominaisuuksia voidaan tutkia esimerkiksi keräimillä. Keräin on laite, johon halutut ilmassa olevat ainesosat päätyvät talteen. Yleensä keräimiin johdetaan tasainen ilmavirta imupumpulla, ja halutut ainesosat jäävät kiinni suodattimeen, päästäen ei-halutut ainesosat sen läpi. Vertaamalla suodattimen painoa ennen ja jälkeen keräyksen, voidaan laskea ilman ominaisuuksia. Keräimistä saatuja tuloksia voidaan sitten käyttää sellaisenaan tai verrata antureiden tuloksiin antamaan suuntaa antureiden tarkkuudesta.

Alla on esitelty lyhyesti tässä opinnäytetyössä mainittuja antureita ja keräimiä:

**Pellistor-katalyyttianturi** mittaa resistanssin eroa. Se on tarkoitettu palavien kaasujen mittaamiseen. Siinä on kaksi osaa, joista yksi anturin osa reagoi helposti palavien kaasujen kanssa, ja toinen reagoi heikosti tai ei ollenkaan. Kun palava kaasu koskettaa helposti reagoivaa anturin osaa, kaasu syttyy palamaan, ja nostaa tämän anturin osan lämpötilaa ja sähkön resistanssia. Anturin toinen osa ei reagoi palavan kaasun kanssa, ja sen lämpötila ja resistanssi pysyvät samoina. Vertaamalla näiden osien resistanssin eroa voidaan laskea ilman palavan kaasun pitoisuus. (GFG 2013, 3.)

**Infrapunaspektrometri** mittaa infrapunasäteilyn absorboitumista säteilyn liikkua mitattavan ilman läpi. Eri aineet reagoivat infrapunasäteilyn eri aallonpituuksiin, absorboiden sitä enemmän tai vähemmän aallonpituuden mukaan. Tutkimalla mitkä aallonpituudet absorboituvat ja mitkä eivät, voidaan päätellä ilman ainesosien pitoisuudet. (Libretexts 2019.)

**Valon sironta** mittaa nimensä mukaisesti sitä, miten valo siroutuu ilmassa olevien hiukkasten ansiosta. Kun valo osuu ilmassa olevaan hiukkaseen, sen liike muuttuu suuntaansa, eli valo siroutuu. Mittaamalla tätä valon siroutumista, voidaan laskea ilmassa olevien hiukkasten määrä. Tätä menetelmää käytetään mm. ilman pienhiukkasten määrän mittaamiseen. (Amaral, Carvalho, Costa, Pinheiro 2015, 5 - 6.) Kuvassa 1 on esimerkki valon sironnan toiminnasta.



Kuva 1. Esimerkkikuva valon sironnan toiminnasta. (Muokattu lähteestä: Invisible Systems "LoRa PM2.5 – PM10 Transmitter" Technical Datasheet)

**Elektrokemiallinen anturi** mittaa sähkövirtaa. Siinä anturi on tehty aineesta, joka reagoi halutun kaasun kanssa tuottaen sähkövirtaa. Sähkövirran määrä on verrannollinen kaasun pitoisuuteen, joten sähkövirran määrästä voidaan laskea mitattavan kaasun pitoisuus. (SGX Sensortech 2007.)

**Induktiivinen sähköistys** mittaa induktiota. Siinä anturiin johdetaan hiukkasia, jotka osuessaan tai mennessään läheltä anturia tuottavat induktiolla vaihtovirtaisen signaalin. Koska erilaisista materiaaleista koostuvat hiukkaset tuottavat erilaisen signaalin, voidaan signaalista laskea hiukkasten määrä ja koostumus. (Sintrol 2014, 3 - 4.)

**IOM-keräin** kerää ilmasta pienhiukkasia, johon niitä johdetaan tasaista virtaa syöttävällä ilmapumpulla. Pienhiukkaset jäävät kiinni keräimessä olevaan suodattimeen, ja muu ilma pääsee keräimestä läpi.

**Sykloni-keräin** kerää ilmasta pienhiukkasia. Kuten IOM-keräimessä siihen johdetaan tasainen ilmavirta ilmapumpulla, mutta siinä ilma johdetaan kartion muotoiseen laitteeseen. Ilma pyörii kartion sisällä keskipakoisvoiman vaikutuksesta, ja ilmassa olevat painavammat hiukkaset laskeutuvat kartion pohjalla olevaan keräysastiaan, ja muu ilma menee keräimestä läpi.

## 2.3 Anturit

Osana opinnäytetyötä kartoitettiin eri valmistajien eri altisteita mittaavia antureita. Anturit jaettiin niiden mittaaman suureen mukaan kaasu-, pienhiukkas- tai monitoimianturiksi. Kartoituksen yhteenveto on esitettytaulukkoissa 1 - 3. Antureiden kuvausten lisäksi on esitetty internet-linkki kyseisen anturin tekniseen tiedotteeseen, mikäli sellainen löydettiin. Antureiden tiedonsiirtomenetelmistä kerrotaan enemmän kohdassa 2.4.

Taulukko 1. Tarkastellut kaasuanturit.

<b>Anturi</b>	<b>Mitattavat suureet</b>	<b>Mittausalue</b>	<b>Mittaus tapa</b>	<b>Valmistaja, tiedonsiirto &amp; Lisätietoa</b>
Connected AirWits CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	0 - 5000 ppm	Infrapunaspektrometri	Connected Finland Sigfox
Connected PressGuard	Paine-ero	-500 - 500 Pa	Ei mainitse	Connected Finland Sigfox
ERS CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	0 - 10000 ppm	Ei mainitse	ELSYS Lora
RA0701-Wireless CO Sensor	CO	0 - 1000 ppm	Elektrokemiallinen sensor	Nervox Lora
Grove - HCHO Sensor	VOC (formaldehydi, bentseeni, tolueeni)	1 - 50 ppm	Elektrokemiallinen sensor	Seeed studio Pelkkä sensor, ei sisällä tiedonsiirtoa tai lukulaitetta
LoRa VOC Transmitter	VOC	0 - 1187 ppb	Ei mainitse	Invisible Systems Lora
MCF-LW12CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , paine-ero, VOC	CO <sub>2</sub> : 300 - 5000 ppm Paine-ero: 300 - 1100 hPa bVOC: 500 - 50000 ppb	Ei mainitse	MCF16 Lora

**Connected Airwits CO<sub>2</sub>** mittaa hiilidioksidia, lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Se tekee mittauksen 30 minuutin välein, ja lähettää tiedon Sigfox-verkon kautta. Lähetyväli on säädettävissä. Saatavissa: [https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2019/10/AirWitsCO2\\_brochure-1pageFIN.pdf](https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2019/10/AirWitsCO2_brochure-1pageFIN.pdf) (Connected Finland 2019, 1.)

**Connected PressGuard** mittaa kahden eri pisteen välistä paine-eroa. Kuten Airwits se tekee mittauksen 30 minuutin välein ja lähettää tiedon Sigfox-verkon kautta, ja myös sen lähetyväli on säädettävissä. Saatavissa: [https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2019/08/PressGuard\\_brochure-1pageFIN.pdf](https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2019/08/PressGuard_brochure-1pageFIN.pdf) (Connected Finland 2019, 1.)

**ERS CO<sub>2</sub>** mittaa hiilidioksidia, lämpötilaa, kosteutta ja valoa. Se myös havaitsee liikettä. Se lähettää tiedon Lora-verkon kautta. Sen asetuksia voidaan säätää Lora-signaalin lisäksi NFC-laitteella (Near Field Communication), esimerkiksi älypuhelimella. Saatavissa: [https://elsys.se/public/datasheets/ERS\\_CO2\\_datasheet.pdf](https://elsys.se/public/datasheets/ERS_CO2_datasheet.pdf) (Elsys 2019, 2 - 3.)

**RA0701-Wireless CO Sensor** mittaa hiilimonoksidia. Se lähettää tiedon Lora-verkon kautta. Saatavissa: <http://www.netvox.com.tw/um/ra0701/ra0701DataSheet.pdf> (Netvox, 2 - 3.)

**Grove - HCHO Sensor** mittaa tiettyjä VOC-yhdisteitä ja on tarkoitettu mittaamaan formaldehydiä, bentseeniä ja tolueneja. Toisin kuin muut tässä mainitut tuotteet, HCHO Sensor on pelkkä sensori Arduino-piirilevyjä varten. Se ei sisällä itsessään tiedonsiirtoa tai lukulaitetta. Saatavissa: [https://www.mouser.com/catalog/specsheets/Seeed\\_101020001.pdf](https://www.mouser.com/catalog/specsheets/Seeed_101020001.pdf) (Seeed 2015, 6.)

**LoRa VOC Transmitter** mittaa VOC-yhdisteitä. Se tekee mittauksen 60 sekunnin välein ja lähettää tiedon Lora-verkon kautta. Se voi ilmaista VOC-pitoisuuden lisäksi VOC-yhdisteiden hiilidioksidiekvivalentin (eCO<sub>2</sub>). Saatavissa: <https://www.invisible-systems.com/wp-content/uploads/2018/03/LoRa-VOC-transmitter.pdf> (Invisible Systems 2018, 1 - 3.)

**MCF-LW12CO<sub>2</sub>** mittaa hiilidioksidia, lämpötilaa, kosteutta, paine-eroa ja valoa. Se lähettää tiedon Lora-verkon kautta. Saatavissa: <https://www.mcf16.com/wp-content/uploads/2018/11/mcf16-MCF-LW12CO2.pdf> (MCF16 2018, 1 - 2.)

Taulukko 2. Tarkastellut pienhiukkasanturit.

Anturi	Mitattavat suureet	Mittausalue	Mittaustapa	Valmistaja, tiedon- siirto & Lisätietoa
Connected Airwits PM	PM2.5, PM10	0 - 1000 µg/m <sup>3</sup>	Valon sironta	Connected Finland Sigfox
LoRa PM2.5 – PM10 Transmitter	PM2.5, PM10	0 - 1000 µg/m <sup>3</sup>	Valon sironta	Invisible Systems Lora
RA0716-Wireless PM2.5/Temperature/Humidity Sensor	PM2.5	0 - 500 µg/m <sup>3</sup>	Ei mainitse	Netvox Lora
Dumo EX G Ympäristöpölymittari	Pölypitoisuus	0,1 mg <sup>3</sup> - 3 g/m <sup>3</sup>	Induktiivinen sähköistyminen	Sintrol ISM radiotaajuus- kaista

**Connected Airwits PM** mittaa pienhiukkasia (PM2.5 ja PM10), lämpötilaa ja ilmankosteutta. Se lähettää tiedon Sigfox-verkon kautta. Saatavissa: [https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2019/08/AirWits\\_PM\\_brochure-1pageFIN.pdf](https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2019/08/AirWits_PM_brochure-1pageFIN.pdf) (Connected Finland 2019, 1.)

**LoRa PM2.5-PM10 Transmitter** mittaa pienhiukkasia (PM2.5 ja PM10). Se lähettää tiedon Lora-verkon kautta. Saatavissa: [https://www.invisible-systems.com/wp-content/uploads/2018/03/LoRa-PM2\\_5-PM10-transmitter\\_.pdf](https://www.invisible-systems.com/wp-content/uploads/2018/03/LoRa-PM2_5-PM10-transmitter_.pdf) (Invisible Systems 2018, 1-3.)

**RA0716-Wireless PM2.5/Temperature/Humidity Sensor** mittaa pienhiukkasia (PM2.5), lämpötilaa ja kosteutta. Se lähettää tiedon Lora-verkon kautta. Saatavissa: <http://www.netvox.com.tw/um/ra0716/ra0716DataSheet.pdf> (Netvox, 2 - 4.)

**Dumo EX G Ympäristöpölymittari** mittaa pölypitoisuutta. Muista tässä mainituista antureista ero-  
ten se ei erottele PM2.5 ja PM10 pienhiukkasia, vaan mittaa kaikkien pienhiukkasten määrää. Siitä on saatavilla eri versioita: turvallisten alueiden valvontaan, ja räjähdysvaarallisten tilojen valvontaan. Saatavissa: <http://industllc.com/wp-content/uploads/2017/12/User-Manual-Sintrol-Dumo-EXG-A-and-Dumo-EXG-RF-A-Version-1.0-27th-April-2017.pdf> (Sintrol 2017, 8, 40-41.)

Taulukko 3. Tarkastellut monitoimianturit.

Anturi	Mitattavat suureet	Mittausalue	Mittaustapa	Valmistaja, tiedonsiirto & Lisätietoa
Waspnote (Gases PRO Sensor Board)	CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , HCl, HCN, PH <sub>3</sub> , ETO, Cl <sub>2</sub> , PM1, PM2.5 ja PM10	CO: 0 - 25 ppm CO <sub>2</sub> : 0 - 5000 ppm O <sub>2</sub> : 0 - 30% O <sub>3</sub> : 0 - 18 ppm NO: 0 - 20 ppm NO <sub>2</sub> : 0 - 20 ppm SO <sub>2</sub> : 0 - 20 ppm NH <sub>3</sub> : 0 - 100 ppm CH <sub>4</sub> : 0 - 100 %/LEL H <sub>2</sub> : 0 - 1000 ppm HCl: 0 - 50 ppm HCN: 0 - 50 ppm PH <sub>3</sub> : 0 - 20 ppm ETO: 0 - 100 ppm Cl <sub>2</sub> : 0 - 50 ppm PM1, PM2.5, PM10: 0,35 - 40 ug/m <sup>3</sup>	Muut kaasut paitsi palavat kaasut ja CO <sub>2</sub> havaitaan elektrokemiallisesti. CH <sub>4</sub> ja palavat kaasut havaitaan Pellistor-katalyyttianturilla. CO <sub>2</sub> havaitaan infrapunaspektrometrillä. Pienhiukkaset havaitaan valon sironnalla.	Libelium 4G, NB-IoT, Lora, Sigfox, Wifi tai Bluetooth.
NEMo	Formaldehydi, CO <sub>2</sub> , LVOC, paine-ero, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , PM1, PM2.5, PM10	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ethera Lora

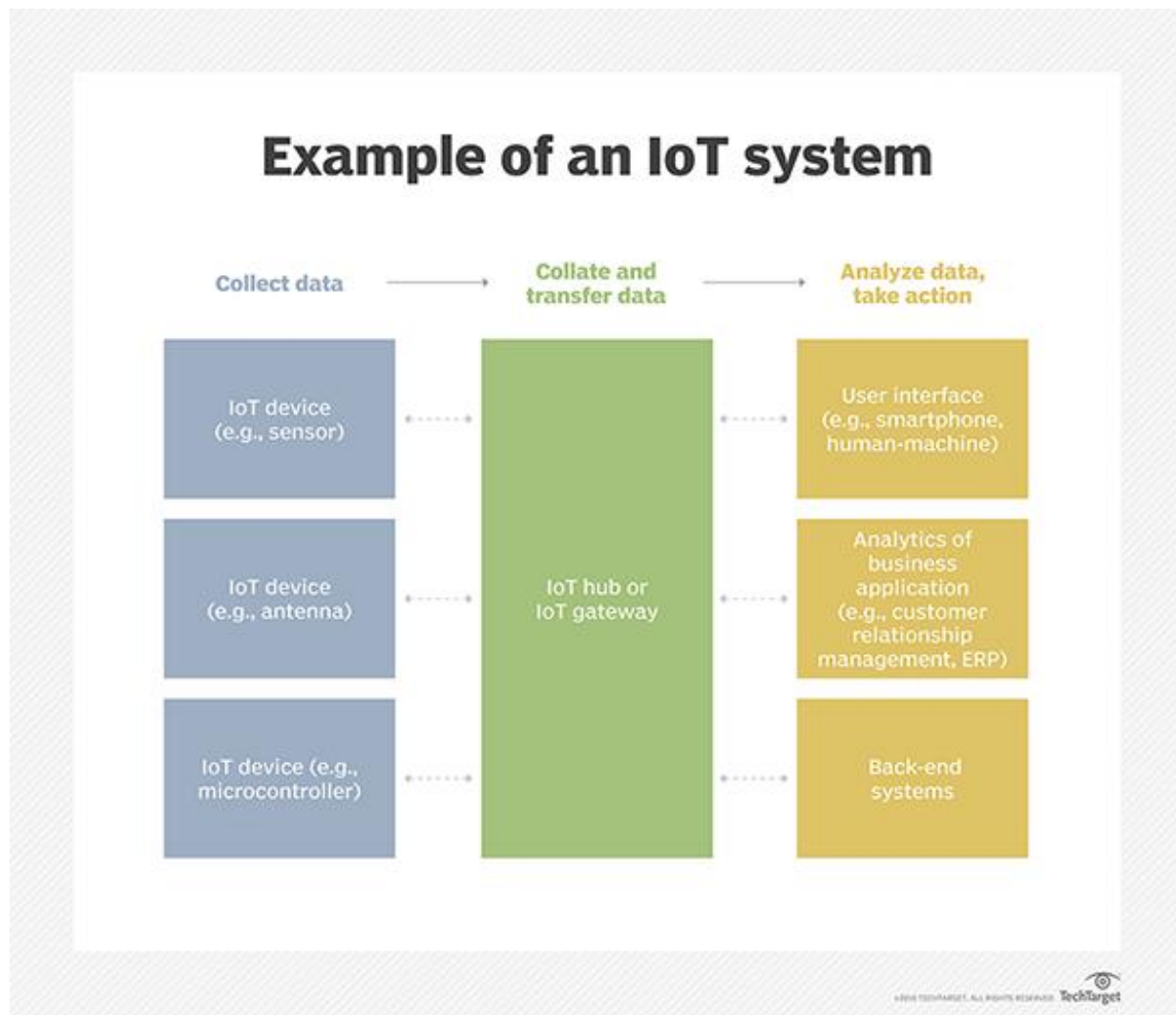
**Waspnote** on monitoimianturi, johon on saatavissa erilaisia sensoreita, mukaan lukien ilmaa mittaava **Gases PRO**. Gases PRO mittaa ilmasta monia eri aineita, ja Waspnoteen on saatavilla monia erilaisia tiedonsiirtomenetelmiä. Gases PRO:n lisäksi saatavilla on myös edullisempi **Gases Sensor Board**. Valmistajan mukaan Gases PRO on tarkoitettu tarkkaan arvojen ja prosenttien mittaukseen, ja Gases on tarkoitettu pelkkään kaasun olemassaolon havaitsemisen tai kaasutasojen monitorointiin. Saatavissa: [http://www.libelium.com/downloads/documentation/gases\\_sensor\\_board\\_pro.pdf](http://www.libelium.com/downloads/documentation/gases_sensor_board_pro.pdf) (Libelium 2019, 28 - 29.)

**NEMo** on monitoimianturi, joka mittaa formaldehydiä, hiilidioksidia, LVOC, paine-eroa, typpidioksidia, otsonia ja pienhiukkasia (PM1, PM2.5 ja PM10). Se lähettää tiedon Lora-verkon kautta.

## 2.4 Antureiden tiedonsiirtomenetelmät

Kun anturi on mitannut jonkin suureen arvon, data lähetetään eteenpäin lukulaitteeseen. Perinteisessä anturissa tieto lähetetään sähköisesti johdon kautta, mutta tämä asettaa rajoitteita anturin käytölle. Langaton tiedonsiirtäminen mahdollistaa antureiden käyttämisen tilanteissa, joissa perinteinen tiedonsiirto ei ole käytännöllistä, ja antaa samalla tilaisuuden lähettää tieto esimerkiksi palvelimelle, josta sitä pystyy tarkastelemaan pitkän matkankin päästä reaaliaikaisesti.

Viime vuosina yritykset ovat ajaneet ideaa IoT:sta (Internet of Things, esineiden internet). IoT:ssa jokin esine varustetaan Internet-yhteydellä, jonka kautta sitä voidaan seurata tai ohjata. Esimerkkejä IoT:sta ovat esimerkiksi "älykodit" joissa termostaatti saa tiedon paikallisesta säästä internetistä, ja näyttää tämän käyttöliittymässään, jotta asukas voi varautua sään muutokseen ennalta. Liikenteessä IoT-järjestelmät voivat seurata teitten kuntoa ja antaa tarvittaessa varoituksia. Teollisella puolella IoT voi jopa ohjata robotteja tarkastelemaan putkia tai alueita rikkojen varalta. Kuvassa 2 on esitelty malli IoT-järjestelmästä: IoT-laite, esimerkiksi anturi, kerää dataa, jonka jälkeen data lähetetään IoT-yhdyskäytävään tai keskittimeen, jonka jälkeen se on nähtävissä käyttöliittymässä. Tämän myötä dataa voidaan muokata eteenpäin ja siitä voidaan tehdä johtopäätöksiä.



Kuva 2. Havainnollistava kuva IoT:n toimintamallista (IoT Agenda 2019)

Tiedonsiirtomenetelmiä on useita, ja niiden ominaisuudet vaihtelevat virrankulutukseltaan, viiveeltään, kantamaltaan, hinnaltaan ynnä muilta ominaisuuksiltaan. IoT:n kasvaessa suosiossa uusia menetelmiä on kehitetty, sillä perinteiset kommunikaatioon tarkoitetut tiedonsiirtomenetelmät kuten GSM ovat turhan raskaita IoT-sovelluksiin, joissa siirtyvät datamäärät ovat pieniä ja datansiirtotahtumat ovat harvemmassa.

**Sigfox** on Sigfox-yrityksen kehittänyt tiedonsiirtomenetelmä. Se on tehty nimenomaan IoT-järjestelmiä varten, ja sen etuina ovat erittäin pieni virrankulutus ja helppous liittyä Sigfox-verkkoon. Sen tiedonsiirtokapasiteetti on hyvin pieni, joka tarkoittaa sitä, että isojen datamäärien siirtämisessä kuluu enemmän aikaa kuin muissa menetelmissä. Se on käytettävissä suurissa osin Eurooppaa, ja joissakin osin Yhdysvaltoja.

**LoRa** on Semtech-yrityksen omistama tiedonsiirtomenetelmä. Sekin on suunniteltu IoT-järjestelmiä varten. Sen virrankulutus on pieni, ja sen tiedonsiirtokapasiteetti on suurempi kuin Sigfoxin, mutta pienempi kuin monien muiden menetelmien. Suomessa sitä on testattu vapaana liikkuvien porojen liikkumisen seurantaan.

**NB-IOT** on 3GPP standardiorganisaation kehittänyt tiedonsiirtomenetelmä. Senkin virrankulutus on pieni, sen tiedonsiirtokapasiteetti on suurempi kuin Lora, ja se voi käyttää olemassa olevia LTE tiedonsiirtoasemia. Näiden asemien käyttö tosin vaatii operaattorilta aseman muokkaamista. Toisin kuin useimmat muut IoT-tiedonsiirtomenetelmät, datan siirtäminen ei vaadi yhdyskäytävää, vaan data siirtyy suoraan palvelimille. Tämä vähentää NB-IOT-menetelmään käyttöönottokustannuksia.

**4G** ja **5G** ovat matkapuhelimista tuttuja tiedonsiirtomenetelmiä. 4G on yleisemmin käytössä oleva menetelmä, ja 5G:tä ollaan ottamassa käyttöön lähivuosina. Molempien menetelmien tiedonsiirtokapasiteetti on paljon isompi kuin aiemmin mainittujen menetelmien.

**Bluetooth** on Bluetooth Special Interest Group standardiorganisaation kehittänyt tiedonsiirtomenetelmä. Sitä on käytetty aikaisemmin esimerkiksi viihde-elektronikassa, mutta uudempien versioiden myötä siitä on kaavailtu myös käytettävän IoT-sovelluksiin. Sen kantama pieni, noin 50 - 150 metriä.

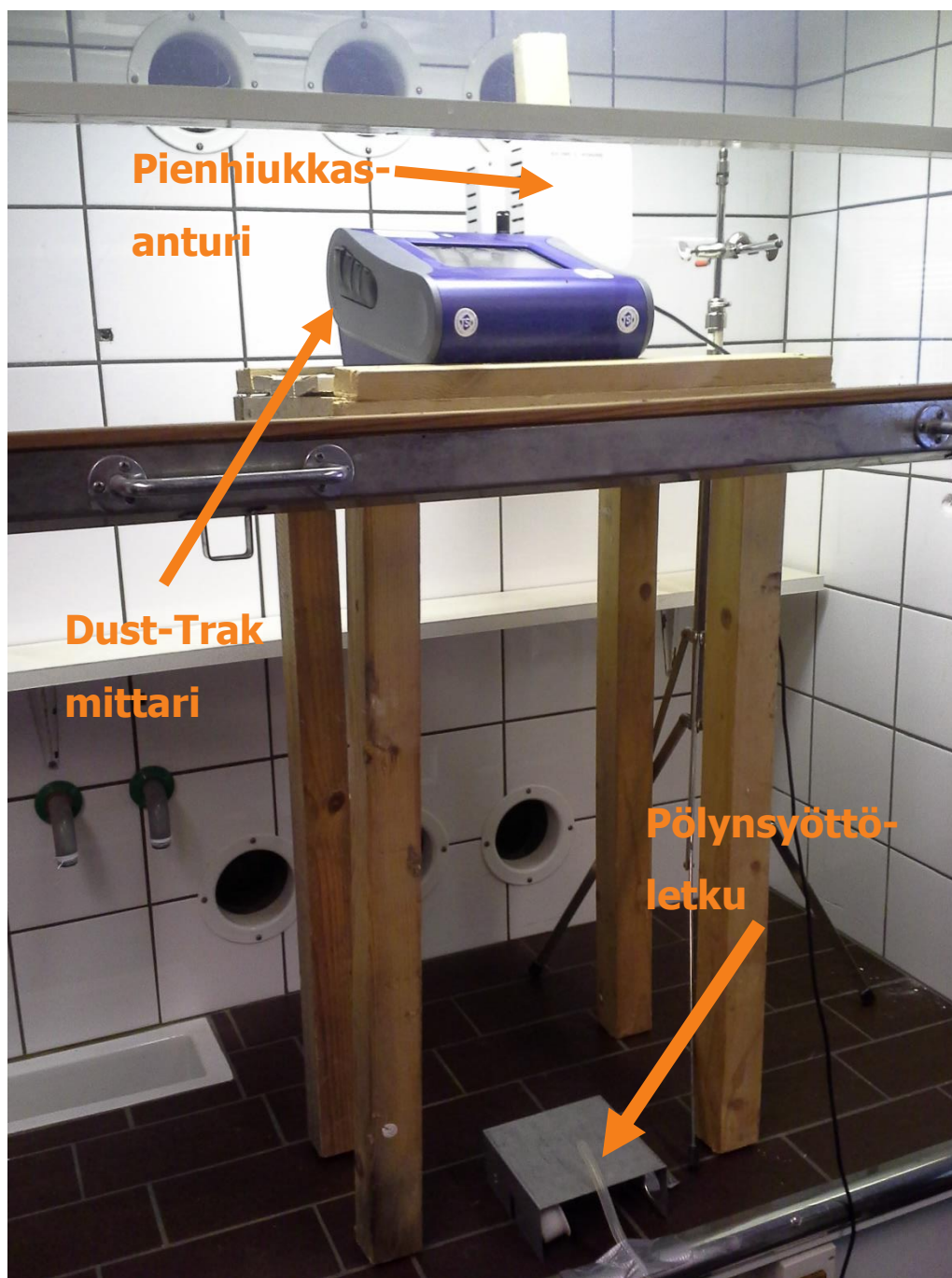
### 3 PILOTTIKOE

#### 3.1 Yleiskuvaus ja tavoite

Osana opinnäytetyötä suoritettiin pilottikoe valituille antureille. Valinnan perusteena oli se, että kyseisen anturin oletettiin olevan kustannustehokas vaihtoehto hiukkasmittaukseen. Pilottikokeen tavoitteena oli testata antureiden toimivuutta ja käyttöön soveltuvuutta. Alkuperäinen suunnitelma oli, että antureita testattaisiin todellisessa työympäristössä, jossa altisteita esiintyisi mahdollisesti vaihtelevasti ja huomattavissa määrin, mutta olosuhteet eivät sallineet tätä. Tämän vuoksi pilottikoe suoritettiin tilaajan omistamassa laboratoriossa, johon luotiin keinotekoisesti tilanne, jossa altisteita esiintyi riittävästi. Koetestaukset suoritettiin kolmena eri päivänä. Jotta antureiden mittaustulosten tarkkuuksia voitaisiin arvioida, vetokaappiin sijoitettiin myös Dust-Trak DRX pienhiukkasanturi, ja IOM- ja syklonikeräimiä. Pienhiukkas-anturit lähettivät tuloksensa Secoran Nerviot-palveluun, ja Dust-Trak-anturi tallensi tiedon omaan muistiinsa.

#### 3.2 Koeasetelma ja käytetyt laitteet

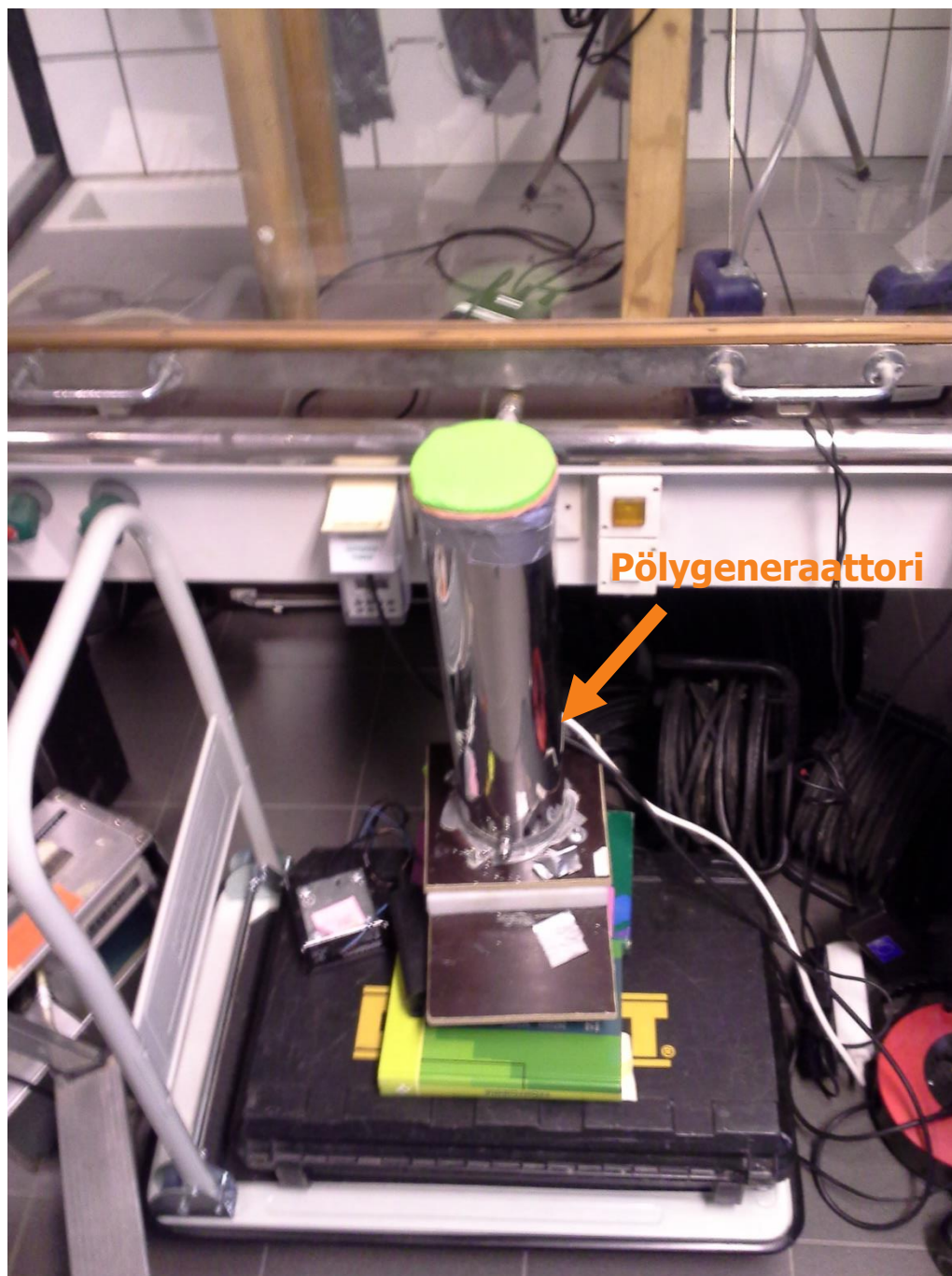
Koeasetelma sijoitettiin vetokaappiin. Aluksi vetokaappiin sijoitettiin kolme pienhiukkas-anturia, Dust-trak-mittari ja keräimet. Laitteet asetettiin 92 cm:n korkeuteen vetokaapin pohjasta. Pienhiukkas-anturit kiinnitettiin puiseen alustaan, Dust-Trak-mittari asetettiin pöydälle, ja keräimet kiinnitettiin statiiviin. Tämän jälkeen vetokaapin ovea suljettiin niin, että sen alareunaan jäi pieni rako. Tämän raon kautta pölygeneraattori työnsi vetokaappiin betonipölyä. Kuvissa 2, 3 ja 4 näkyy koeasetelma.



Kuva 3. Yleiskuva koeasetelmasta. Keräimet ja yksi pienhiukkas-anturi puuttuvat vielä, ja pölygeneraattori siirretään vielä suoraan vetokaapin viereen.



Kuva 4. Pienhiukkas-anturit, Dust-Trak-mittari ja keräimet paikoillaan.



Kuva 5. Pölygeneraattori

Dust-Trak-pölymittari ja pienhiukkas-anturit mittaavat ilman pienhiukkaspitoisuutta mittaamalla valon sirontaa. Laitteen sisällä ovat laser ja valon ilmaisimet. Laitteen läpi kulkevan ilmavirran läpi ammuetaan laser. Kun laser osuu ilmavirrassa oleviin pienhiukkasiin, se heijastuu takaisin. Valon ilmaisimet mittaavat tämän heijastuvan valon, ja laite laskee heijastuvan valon intensiteetin perusteella ilmavirran pienhiukkaspitoisuuden. Valosironta menetelmän lisäksi Dust-Trak-anturissa on sisäinen keräin.

Keräimet keräävät näytteen gravimetrisesti. Gravimetrisessä mittauksessa käytetään suodattimia. Suodattimet punnitaan ennen mittauksia, jonka jälkeen ne asetetaan keräimen sisälle. Kun ilmavirta kulkee keräimen läpi, pienhiukkaset jäävät suodattimelle. Mittausten jälkeen suodattimet punnitaan, ja käyttäen mittausaikaa, tilavuusvirtausta ja suodattimen painon eroa ennen ja jälkeen mittauksen voidaan laskea ilmassa olleen hiukkaspitoisuus.

### 3.3 Toteutus

Ensimmäiseksi keräimissä käytetyt suodattimet kuivattiin eksikaattorissa, jonka jälkeen ne punnittiin Itä-Suomen Yliopiston Kuopion kampuksen punnitushuoneessa. Tätä odottaessa koeasetelma tehtiin valmiiksi testiä varten. Testiä varten selvitettiin oikea pölykuormituksen tuotto ja ilmanpoisto vetokaappiin, jotta pienhiukkaspitoisuus pysyisi antureiden mittausrajojen sisällä. Tätä testiä varten anturit sijoitettiin vetokaappiin. Tämän jälkeen pölygeneraattorin generointiaikaa, pölygeneraattorissa olevan kaiuttimen äänen voimakkuutta, pölygeneraattorin pumpun ilmansyötön voimakkuutta ja vetokaapin ilmanpoistoa säätämällä pölyntuottoa optimoitiin sopivaksi. Kun tuotto havaittiin sopivaksi, kalibroitiin imupumput IOM- ja syklonikeräimiä varten, jonka jälkeen keräimiin asetettiin punnitut suodattimet ja keräimet koottiin näytteiden keräämistä varten.

Varsinaisia testauspäiviä oli kolme. Jokaisena testauspäivänä pölygenerointi aloitettiin aamulla, ja lopetettiin iltpäivällä. Joka päivä IOM- ja syklonikeräimistä kerättiin niiden suodattimet ja laitettiin uudet tilalle. Pölyn generointi vetokaappiin kesti 6 - 8 tuntia. Generoinnin jälkeen pienhiukkasantureiden ja Dust-trak-mittareiden annettiin olla päällä ja mitata yön yli. Viimeisen testin jälkeen koeasetelma purettiin ja keräimissä olleet suodattimet punnittiin kuivatuksen jälkeen.

### 3.4 Tulokset ja niiden tarkastelu

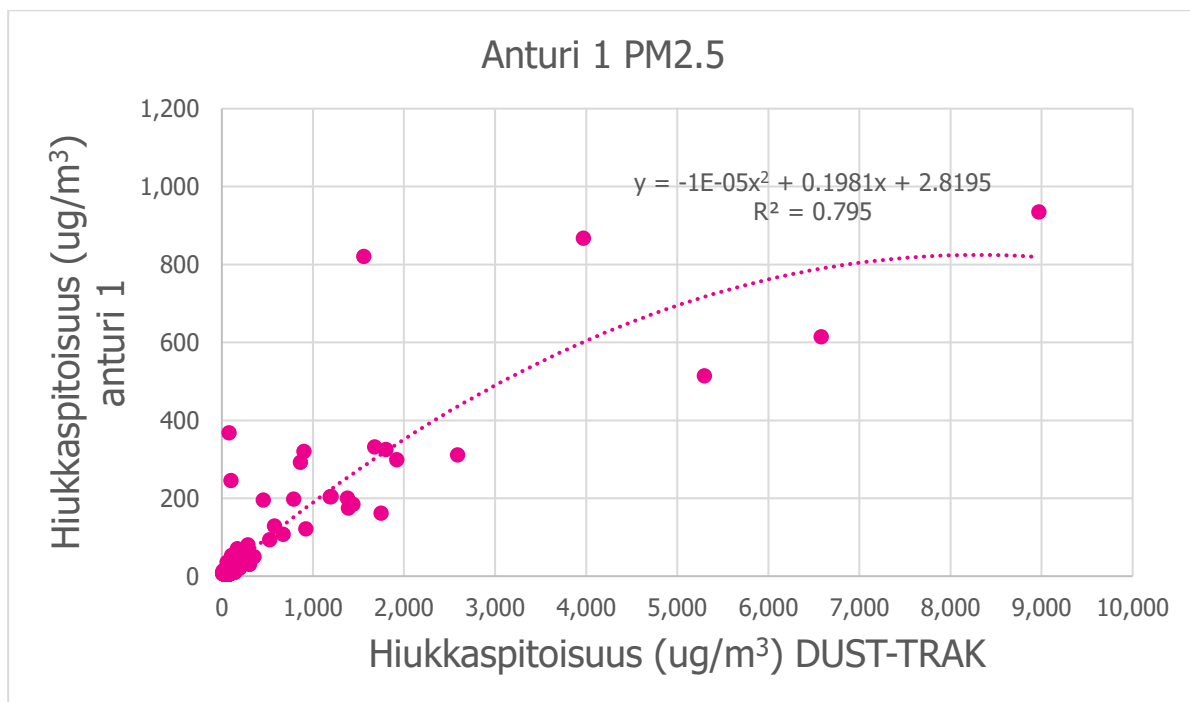
Tulosten käsittelyssä pienhiukkas-antureiden mittaamia pienhiukkaspitoisuuksia verrattiin Dust-Trak-mittarin vastaavaan pienhiukkaspitoisuuteen ja keräämistä saatuihin tuloksiin.

Tuloksia käsitellessä pienhiukkas-antureiden mittauspisteiden aikaleimojen epäiltiin olevan jäljessä todellista mittaushetkeä. Työn aikana saatujen tiedoksiantojen mukaan mittaushetken ja tiedon vastaanoton välillä oli 5 - 15 sekunnin viive, joka huomioitiin tulosten tarkastelussa 10 sekunnin korjauksella. Käytännössä tämä huomioitiin tuloksia tarkastellessa ottamalla mittauspisteen arvo 10 sekuntia aikaisemmin annetusta mittauspisteestä. Verrattaessa korjaamattoman ja korjatun datan muuttujien korrelaatioita, korjatun datan korrelaatiot olivat parempia, minkä vuoksi päätettiin käyttää aikakorjattua dataa.

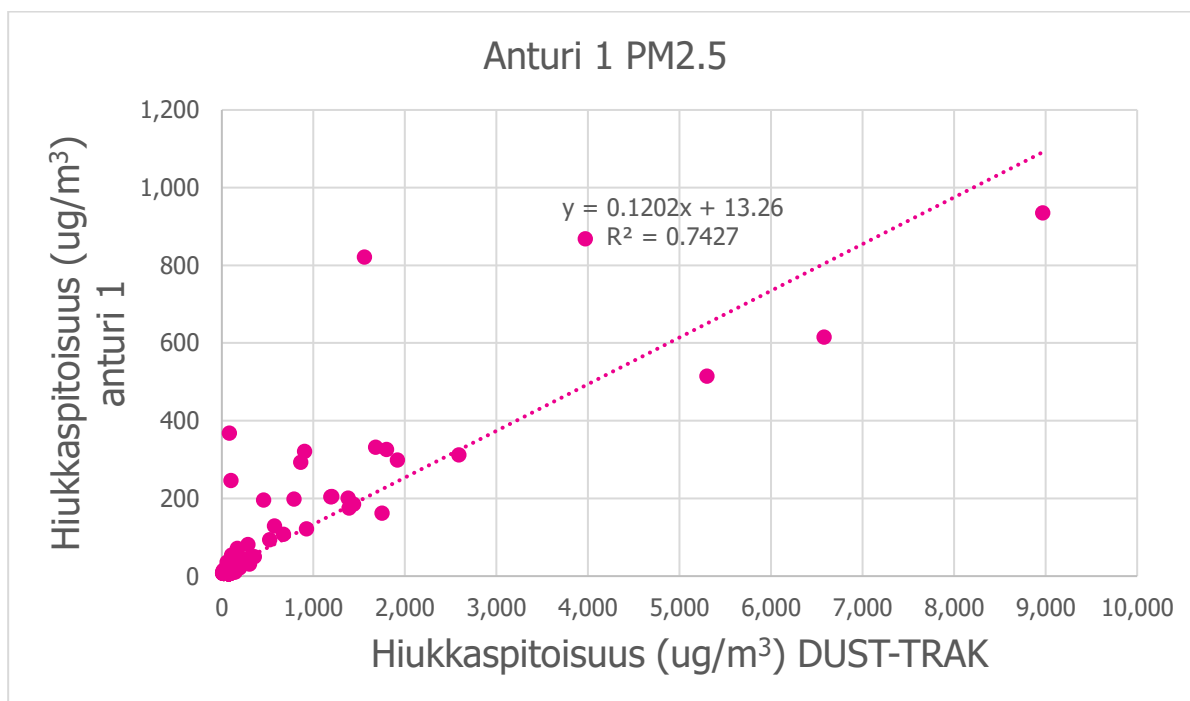
Käsitellyistä tuloksista tehtiin kuvaajat, jotka on esitelty kuvissa 6 - 25. Kuvaajissa pystyakselina on kyseisen anturin mittaama pienhiukkaspitoisuus, ja vaaka-akselina Dust-Trakin mittaama vastaava pienhiukkaspitoisuus. Kuvaajat laadittiin erikseen PM2.5 ja PM10 hiukkasille siten, että yhdessä trendiviiva on piirretty toisen asteen yhtälöllä, ja toisessa ensimmäisen asteen yhtälöllä. Nämä ovat kuvaajat 6 - 17. Lisäksi laadittiin kuvaajat, joihin piirrettiin kaikkien antureiden kuvaajat ensimmäisen asteen yhtälöllä. Nämä kuvaajat on esitetty kuvissa 24 ja 25.

Tuloksissa kävi ilmi joitakin poikkeuksellisia havaintoja. Keräimistä saadut tulokset viittaisivat siihen, että Dust-Trakin tulokset ovat suurempia kuin niiden pitäisi. Näin ei voida kuitenkaan sanoa varmuudella, sillä keräimet eivät mittaa pitoisuutta samalla tavalla kuin Dust-Trak. Dust-Trak mittaa pienhiukkasten pitoisuutta mittaamalla valon sirontaa, kun taas keräimet keräävät näytteen, josta läskennallisesti päätellään pienhiukkasten pitoisuus. Näiden eri menetelmien tulokset eivät siis ole suoraan verrattavissa keskenään. Tuloksia käsitellessä havaittiin, että pienhiukkas-antureiden mittaamat PM2.5 ja PM10 arvot ovat lähes samankaltaisia. Tämä näkyy kuvaajissa 18 - 23.

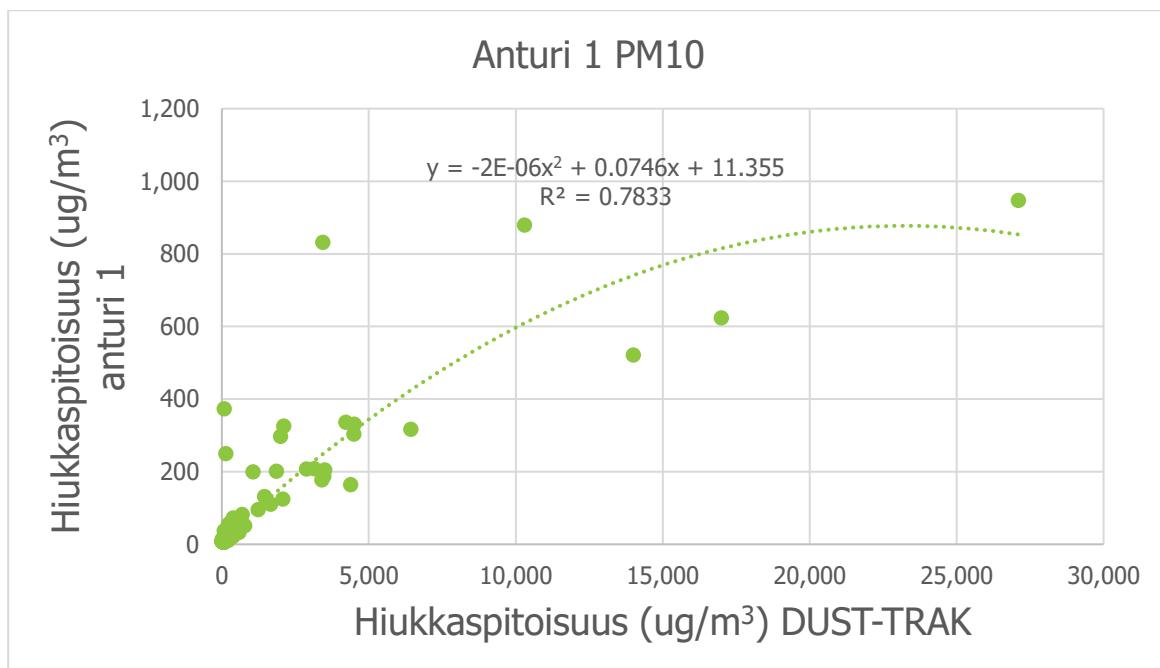
Anturi 3:en antamat tulokset olivat paljon pienempiä kuin muiden antureiden. Syyksi epäiltiin sitä, että anturi mittasi ilman pienhiukkaspitoisuutta muista antureista poiketen pölygenerointien välillä sellaisella hetkillä, kun ilman pienhiukkaspitoisuus oli pienempi.



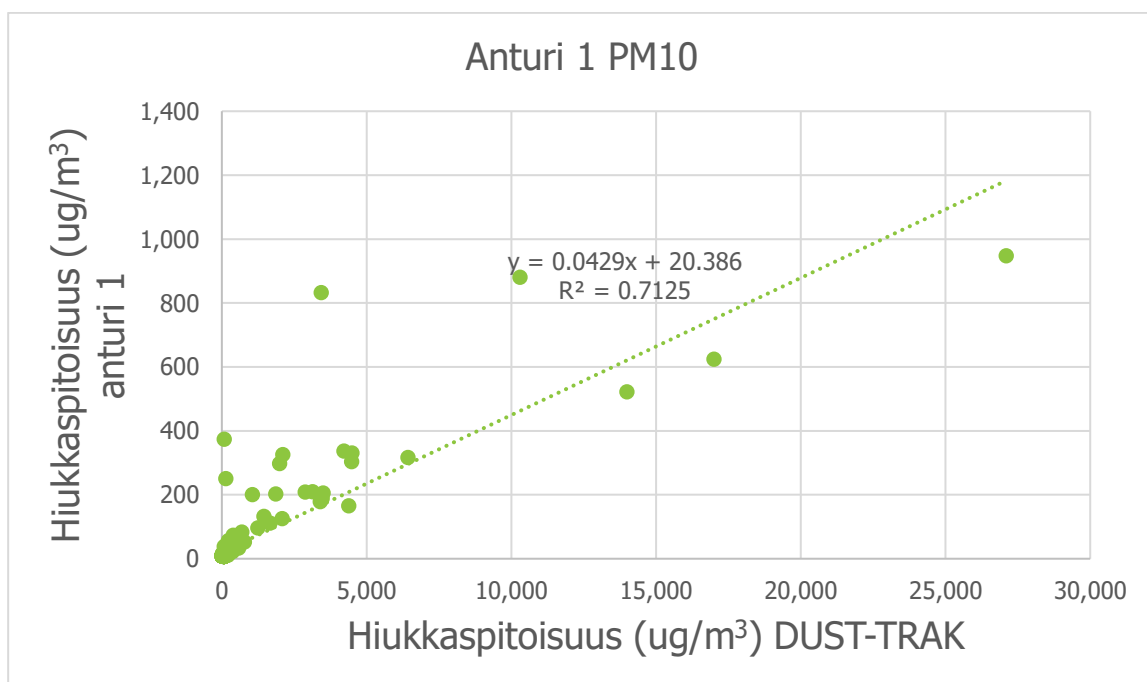
Kuva 6. Anturi 1 PM2.5 (kuvaaja piirretty toisen asteen yhtälöllä)



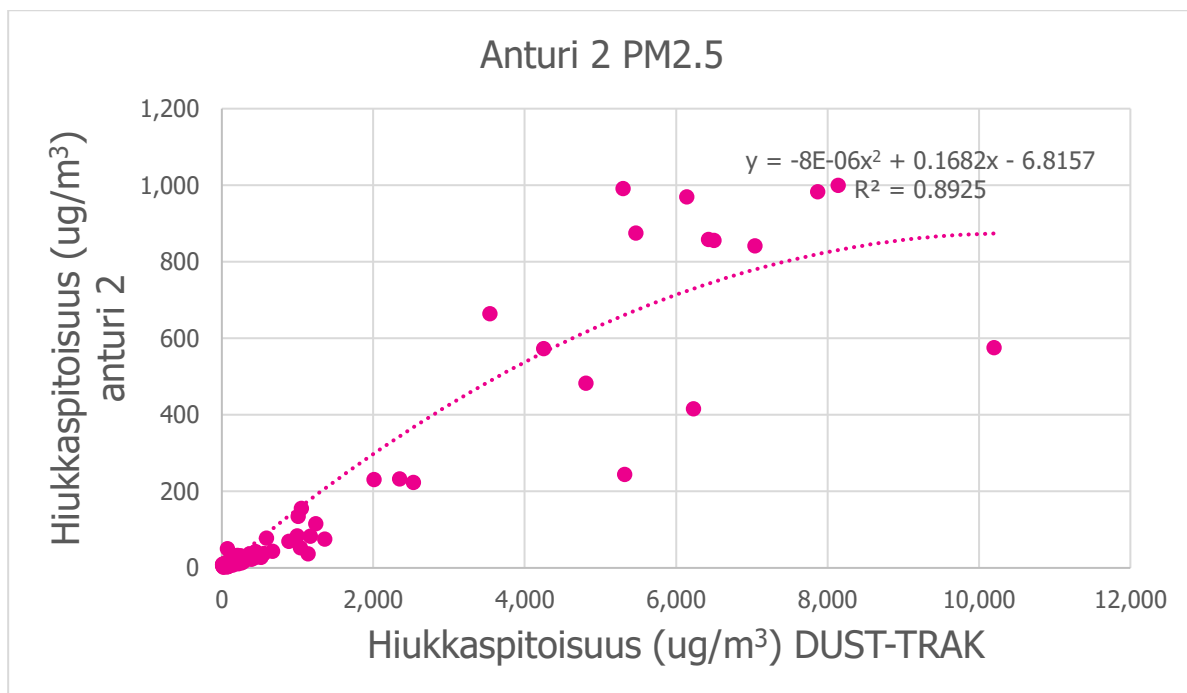
Kuva 7. Anturi 1 PM2.5 (kuvaaja piirretty ensimmäisen asteen yhtälöllä)



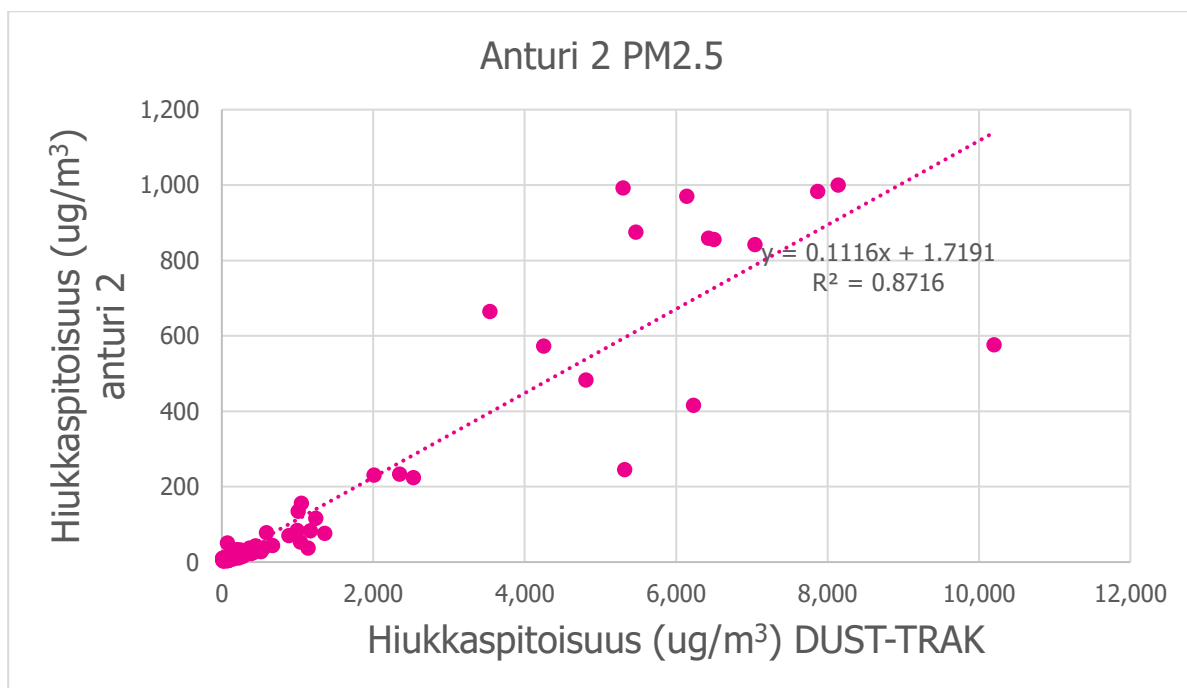
Kuva 8. Anturi 1 PM10 (kuvaaja piirretty toisen asteen yhtälöllä)



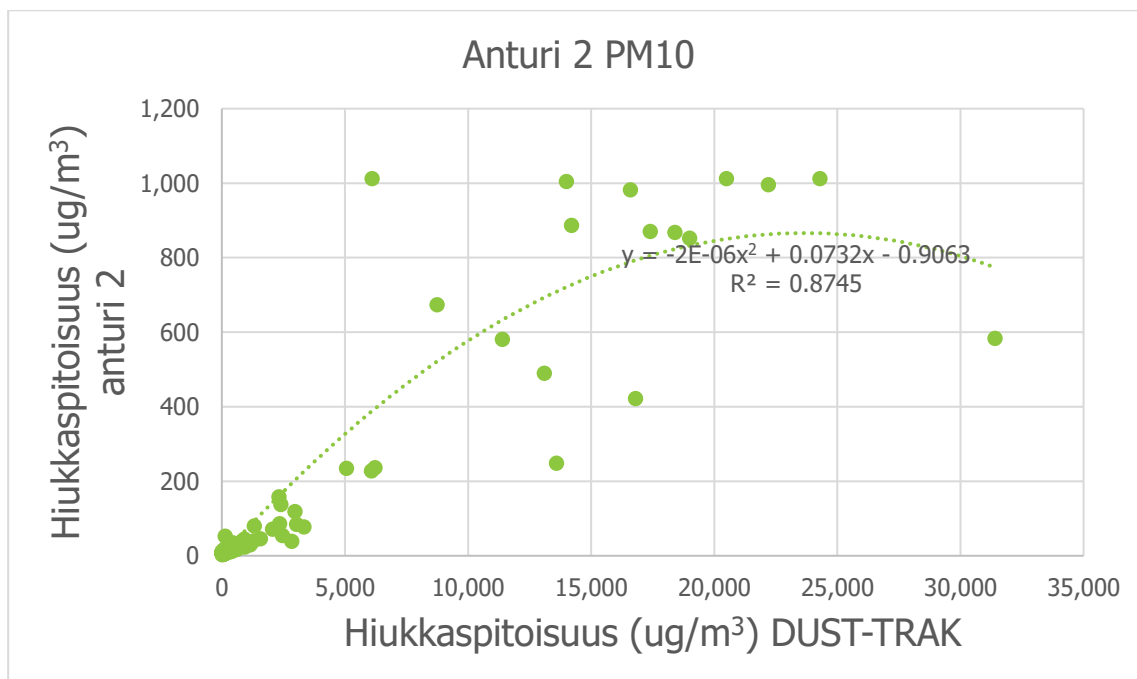
Kuva 9. Anturi 1 PM10 (kuvaaja piirretty ensimmäisen asteen yhtälöllä)



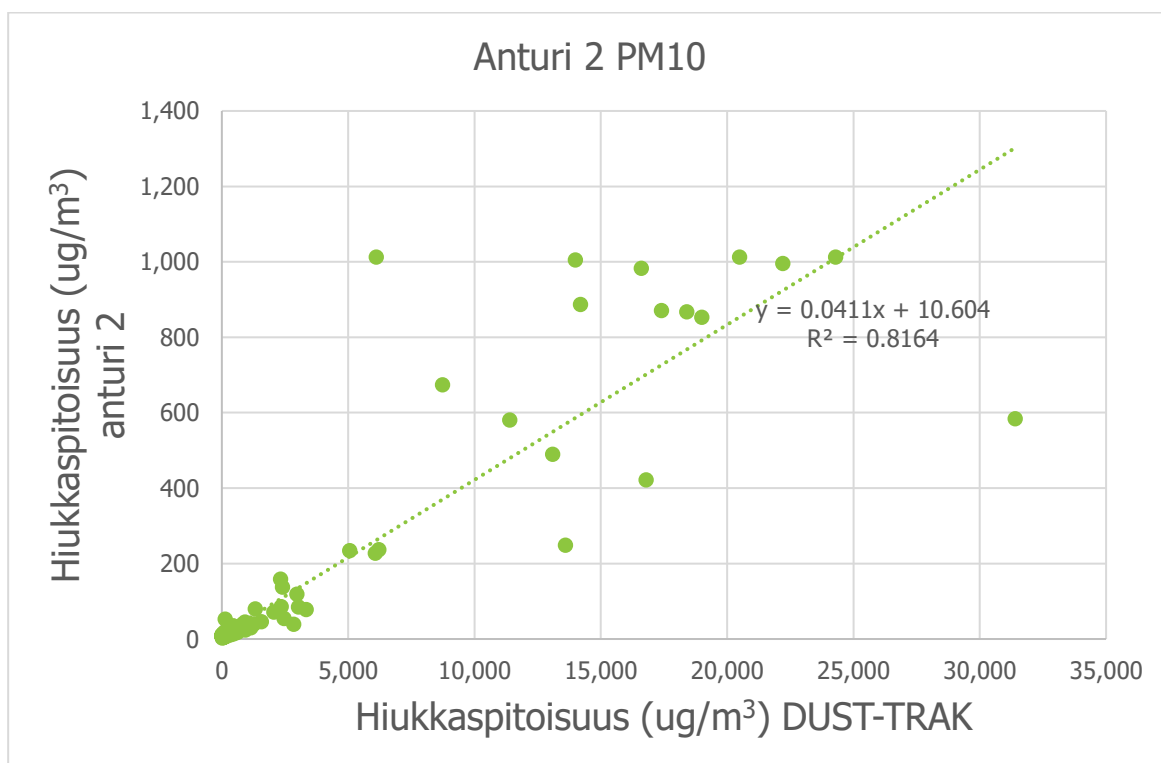
Kuva 10. Anturi 2 PM2.5 (kuvaaja piirretty toisen asteen yhtälöllä)



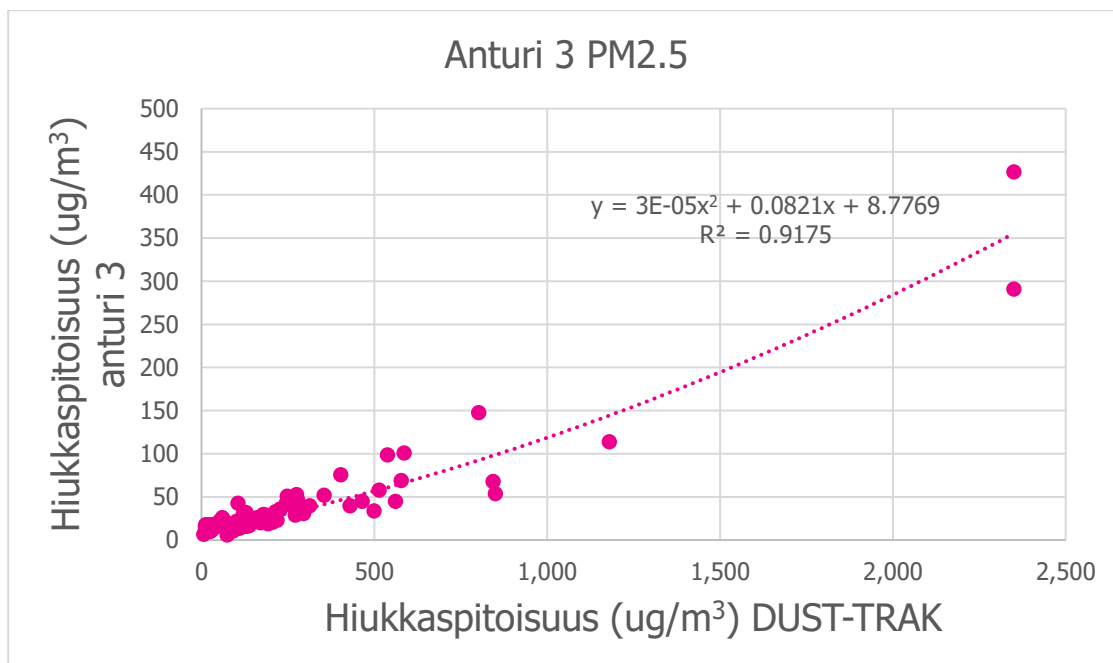
Kuva 11. Anturi 2 PM2.5 (kuvaaja piirretty ensimmäisen asteen yhtälöllä)



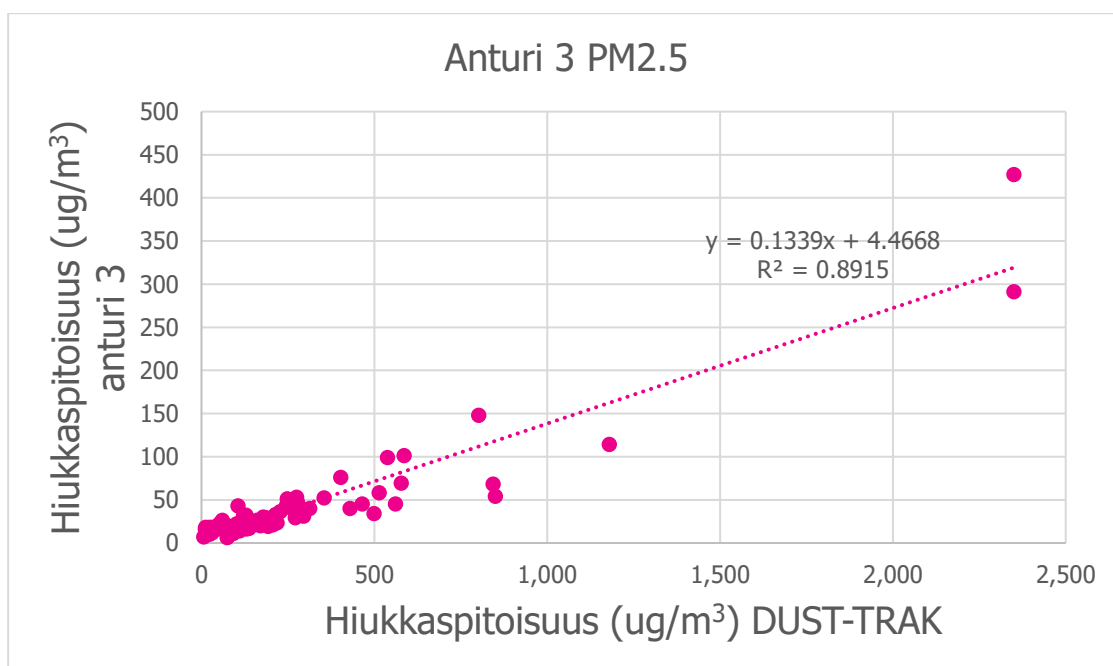
Kuva 12. Anturi 2 PM10 (kuvaaja piirretty toisen asteen yhtälöllä)



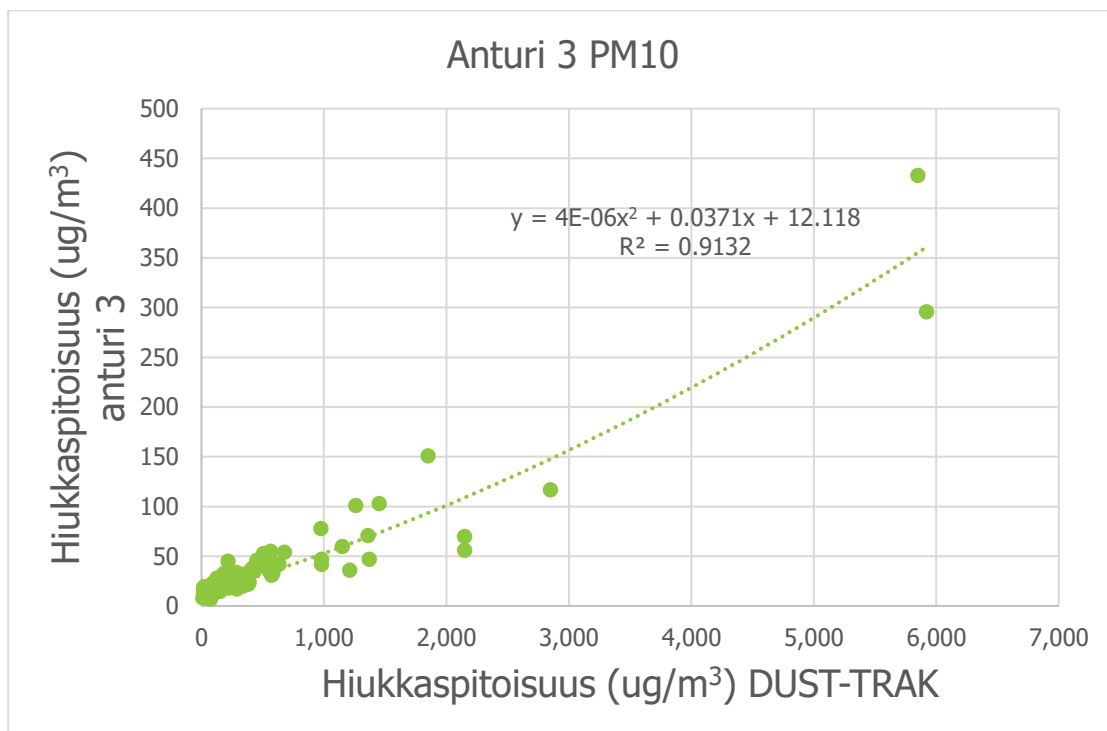
Kuva 13. Anturi 2 PM10 (kuvaaja piirretty ensimmäisen asteen yhtälöllä)



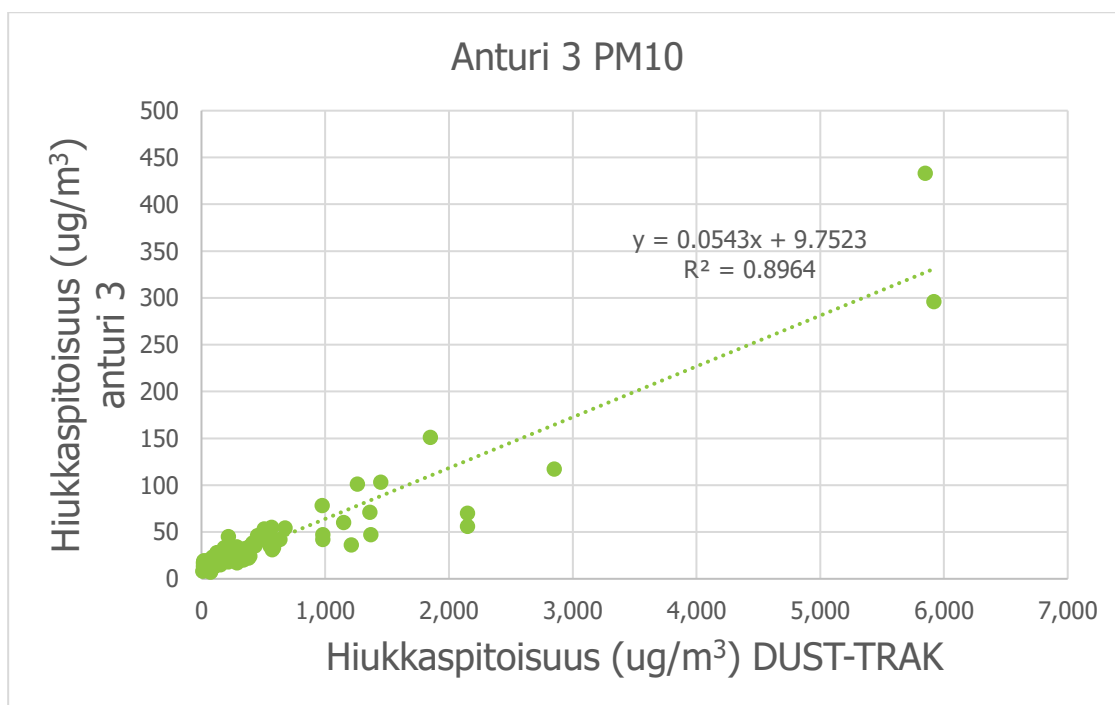
Kuva 14. Anturi 3 PM2.5 (kuvaaja piirretty toisen asteen yhtälöllä)



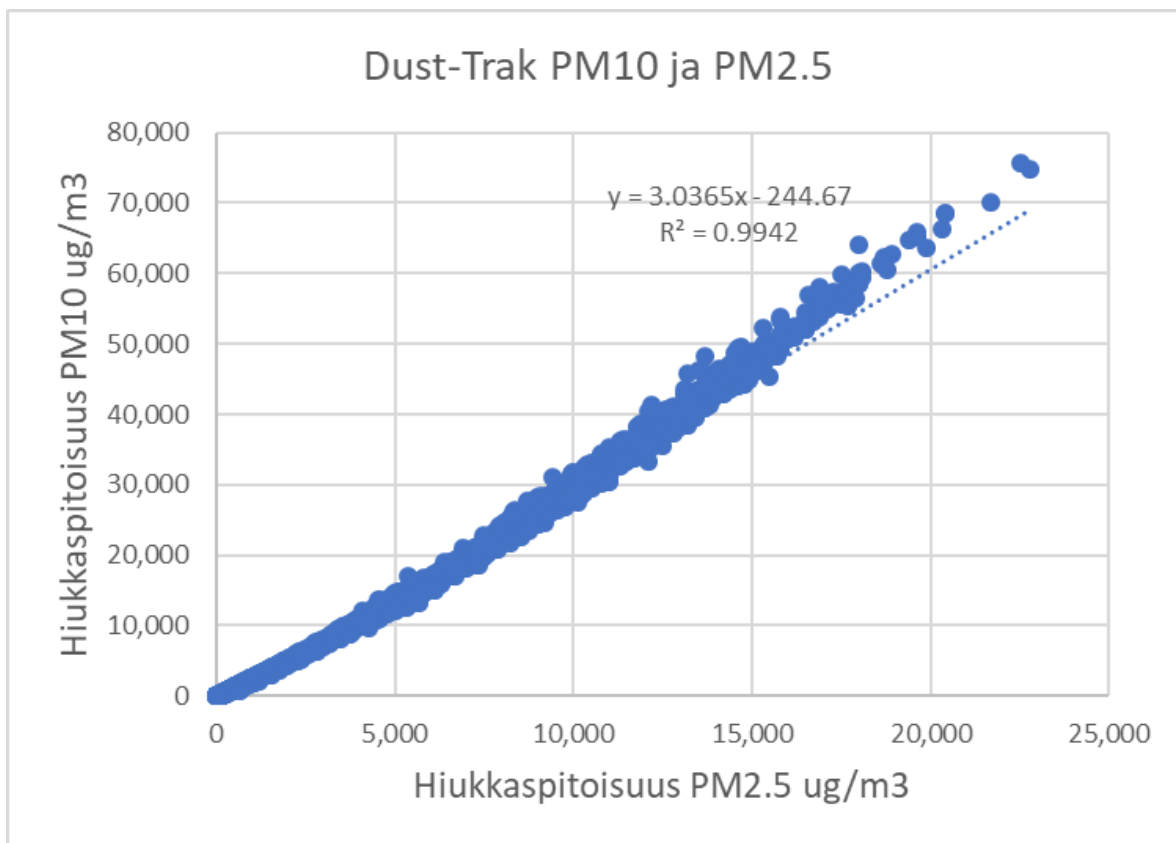
Kuva 15. Anturi 3 PM2.5 (kuvaaja piirretty ensimmäisen asteen yhtälöllä)



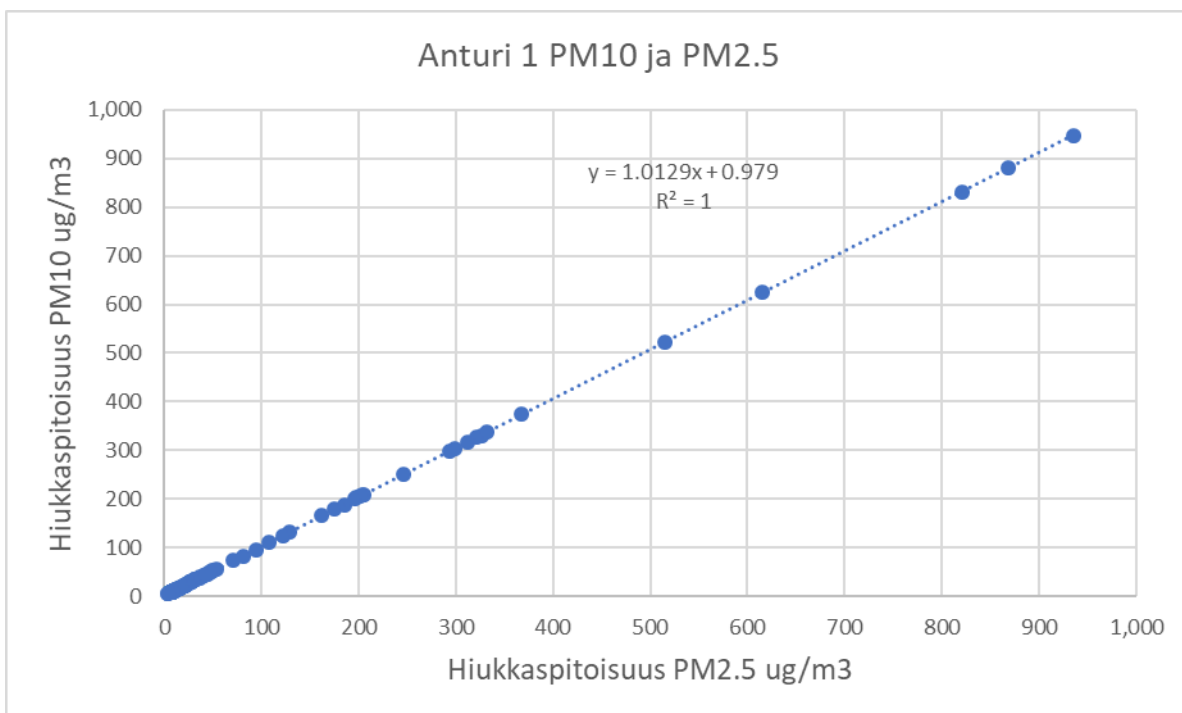
Kuva 16. Anturi 3 PM10 (kuvaaja piirretty toisen asteen yhtälöllä)



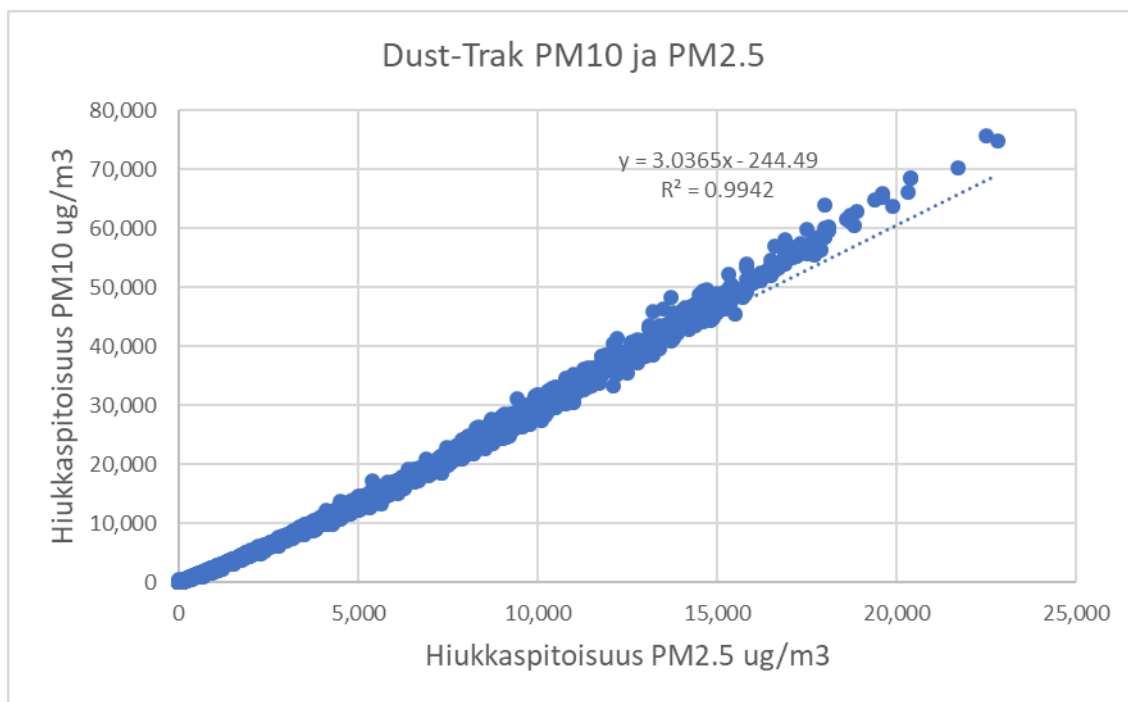
Kuva 17. Anturi 3 PM10 (kuvaaja piirretty ensimmäisen asteen yhtälöllä)



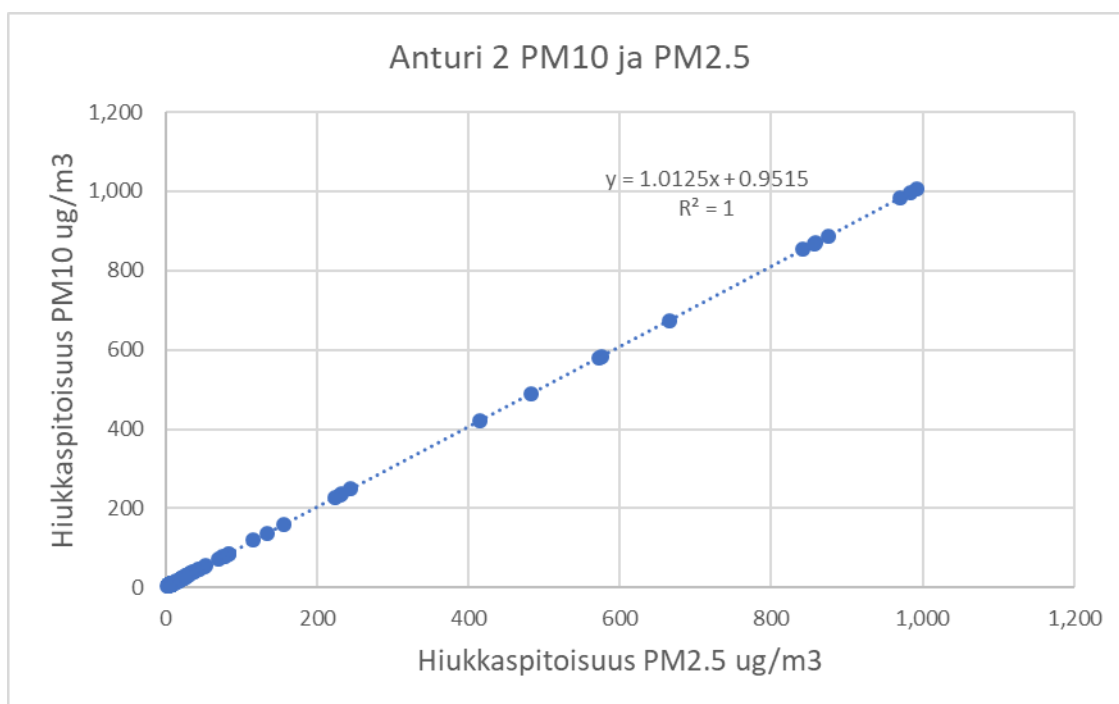
Kuva 18. Dust-Trak PM10 vertailu PM2.5 kanssa.



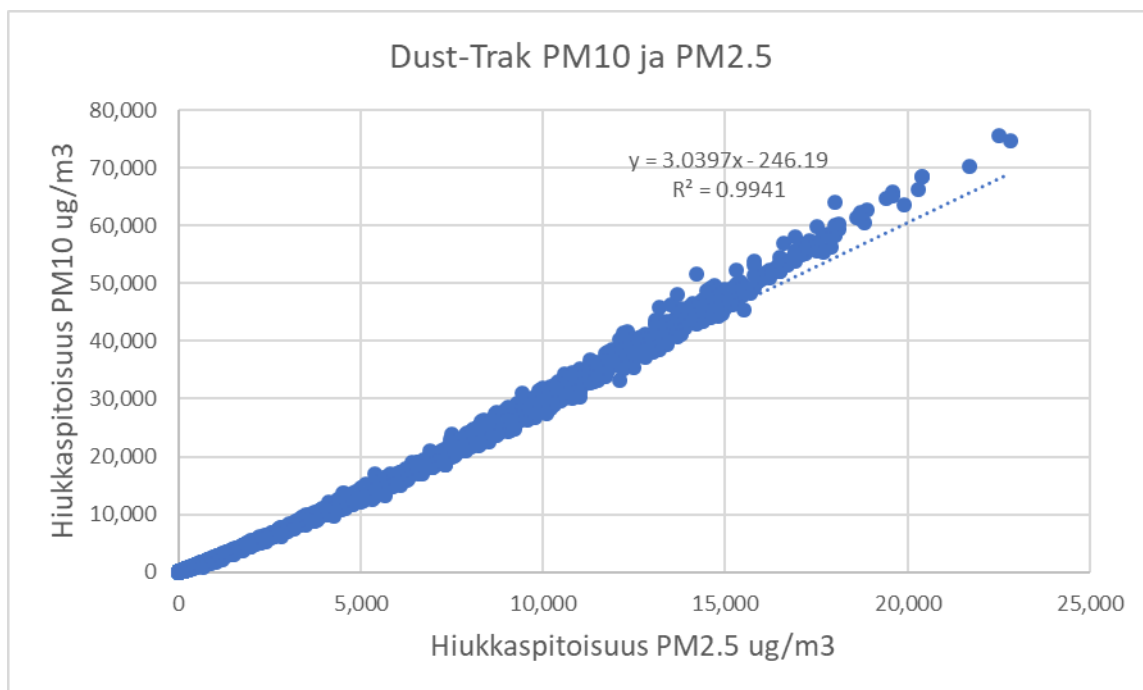
Kuva 19. Anturi 1 PM10 vertailu PM2.5 kanssa.



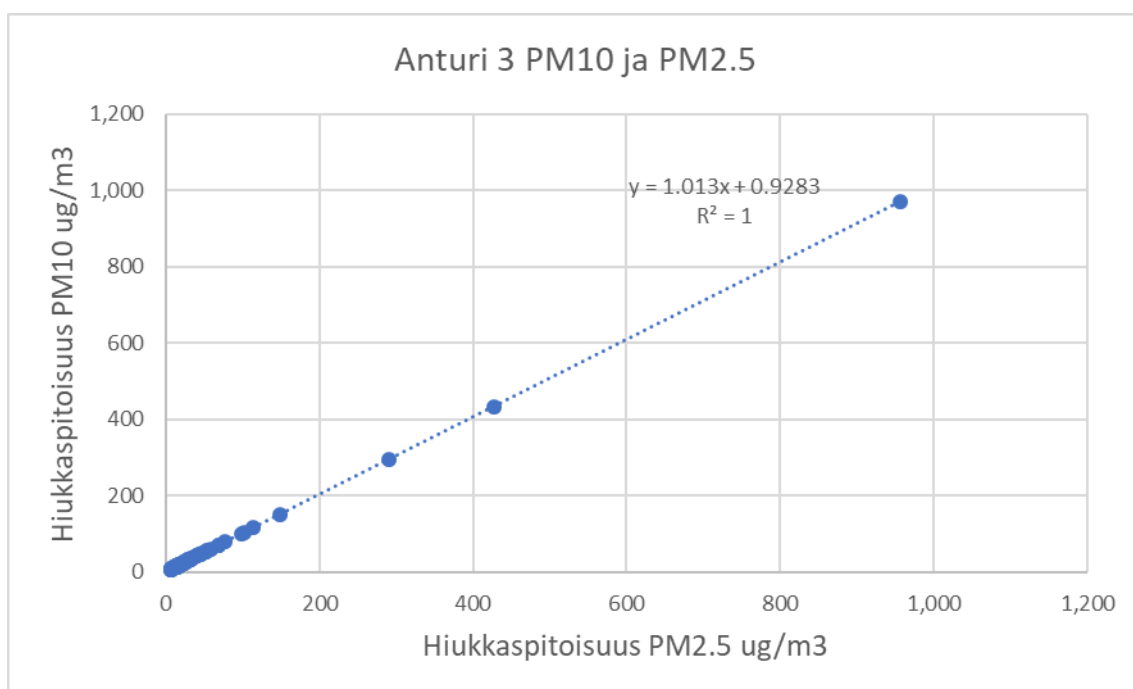
Kuva 20. Dust-Trak PM10 vertailu PM2.5 kanssa.



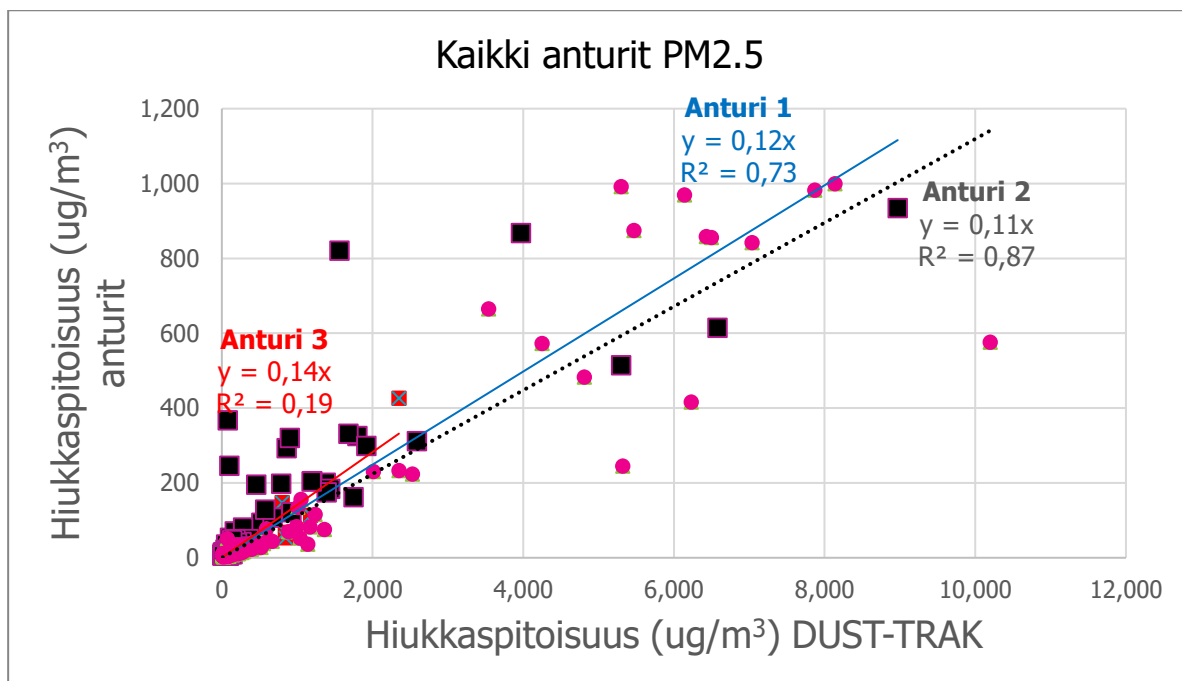
Kuva 21. Anturi 2 PM10 vertailu PM2.5 kanssa.



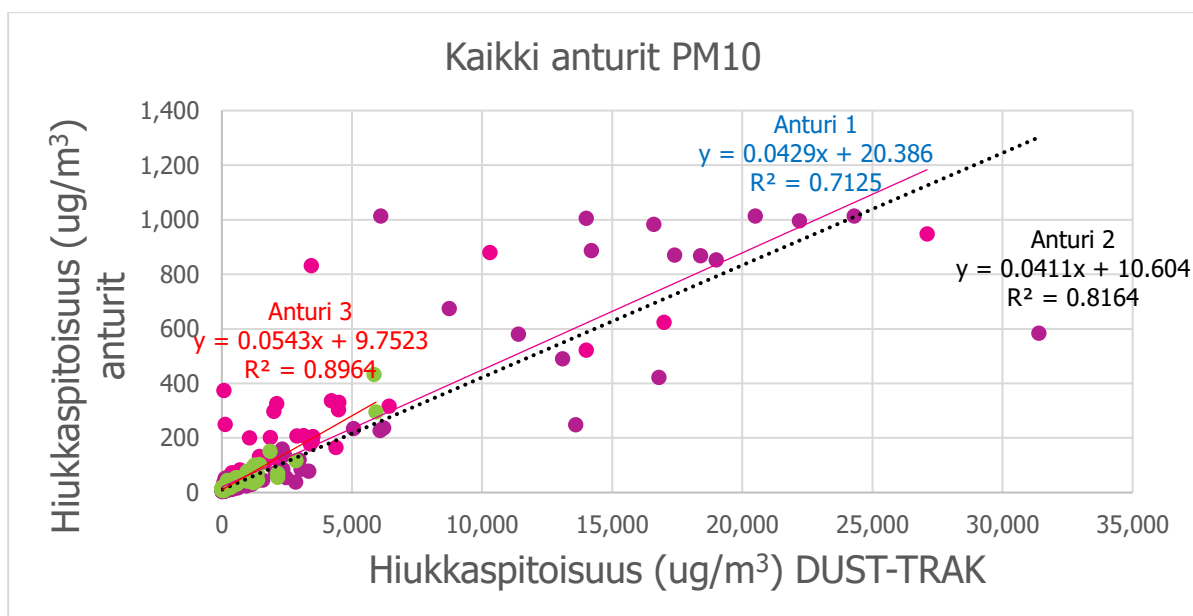
Kuva 22. Dust-Trak PM10 vertailu PM2.5 kanssa.



Kuva 23. Anturi 3 PM10 vertailu PM2.5 kanssa.



Kuva 24. Kaikkien anturien kuvaajat samassa kuvassa (PM2.5).



Kuva 25. Kaikkien anturien kuvaajat samassa kuvassa (PM10).

### 3.5 Epävarmuustarkastelu

Kuten luvussa 3.3 mainittiin, pölygeneroinnin säätämisessä oli ongelmia, ja jotkin mittaustulokset ylittivät antureitten mittausalueen. Nämä tulokset poistettiin tarkastelusta.

Pienhiukkas-antureiden antamat aikaleimat olivat tiedustelujen mukaan 5 - 15 sekuntia myöhässä todellista mittaustapahtumaa. Tämä huomioitiin tuloksia käsiteltäessä olettaen tämän viiveen pysyvän 10 sekunnin pituisena. Ei voida olla kuitenkaan varmoja, että viive oli 10 sekuntia, tai että viive pysyy vakiona ajan kuluessa.

Testauksen toteutuksessa oli joitakin ongelmia. Vaikka pölygenerointi piti olla säädetty oikein antureiden mittausalueet huomioiden, ensimmäisen päivän jälkeen huomattiin joidenkin mittaustuloksien ylittävän pienhiukkas-antureiden mittausalueen ylärajan. Pölygenerointiaikaa vähennettiin toiselle päivälle, mutta tästä huolimatta jotkin mittaustulokset ylittyivät. Syyksi epäiltiin sitä, että pienhiukkas-anturit mittasivat ilman pienhiukkaspitoisuuden liian pian generoinnin jälkeen. Kolmantena päivänä väliä pölygenerointikertojen lisättiin, mutta tämä johti hyvin pieniin pienhiukkaspitoisuuksiin pienhiukkas-antureissa. Syyksi tähän epäiltiin sitä, että pienhiukkas-anturit olivat mitanneet juuri ennen generointia. Tämän lisäksi pölygeneroinnissa käytetty kellokytkin oli lakannut toimimasta kesken toisen mittauspäivän. Kolmatta päivää varten hankittiin uusi kellokytkin, joka toimi onnistuneesti.

### 3.6 Johtopäätökset

Tulosten perusteella pienhiukkas-anturi ei erota PM2.5 ja PM10 hiukkasia, vaan se käytännössä mittaa toista näistä hiukkasista ja laskee sen perusteella toisen hiukkasen pitoisuuden. On syytä huomioida, että anturit ovat myös yksilöllisiä. Antureiden tulokset korreloivat yleisesti Dust-trak-mittarin tuloksia, josta voidaan päätellä antureiden olevan hintaluokaltaan luotettavia mittausantureita. Tulosten perusteella antureita on suositeltavaa testata todellisessa tilanteessa kontrolloidun laboratorio-olosuhteiden sijaan. Pienhiukkas-anturit eivät kelpaa sellaisiin raskaisiin työympäristöihin, joissa hiukkaspitoisuus on suuri, sillä niiden mittausyläraja ( $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) on liian alhainen, sillä teollisessa ympäristössä pienhiukkaspitoisuudet voivat olla huomattavasti korkeampia.

#### 4 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä kirjallinen selvitys antureista, joilla työntekijöiden altistumista haitallisille aineille voitaisiin mitata, sekä suorittaa pilottikoe valitulle anturille testaten niiden soveltuvuutta tähän tarkoitukseen. Kirjallisuusosio koostui mittaustarpeen lainsäädännöllisestä taustasta, kuvauksesta antureiden mittauseriaa-anteista ja tiedonsiirrosta, sekä katsauksesta mahdollisesti soveltuvista antureista. Pilottikoe koostui tilaajan kanssa tehdystä kokeesta laboratorio-olosuhteissa.

Kirjallisuuskatsauksessa tietoa etsittiin kirjallisista ja verkkolähteistä. Monet antureiden ominaisuudet löytyivät valmistajien sivuilta tai antureiden käyttöohjeista, muussa tapauksessa valmistajiin pyrittiin ottamaan yhteyttä. Tilaajalla on kirjallisuuskatsauksen myötä alustavaa tietoa siitä, millaisia antureita he voisivat mahdollisesti käyttää ympäristömittauksissa. Kartoitetut anturit on luokiteltu käyttö-tarkoituksensa mukaan, ja niistä kerätty tieto toimii tukena oikeanlaista anturia valittaessa.

Pilottikoe suoritettiin onnistuneesti ongelmista huolimatta. Pilottikokeen perusteella testatut pienhiukkas-anturit eivät sovellu mittaamaan sellaisia työympäristöjä, joissa pienhiukkaspitoisuus on suuri, kuten raskaissa teollisuusympäristöissä. Pienhiukkas-anturi oli pilottikokeen perusteella käytännössä vain PM2.5 tai PM10-anturi, josta anturi sitten päätteli toisen pienhiukkaskoon pitoisuuden. Jatkotoimenpiteinä pienhiukkas-antureita voidaan vielä testata todellisessa ympäristössä kontrolloidun laboratorion lisäksi.

## LÄHTEET

AMARAL, S., CARVALHO J., COSTA M., ja PINHEIRO C. 2015. An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments [verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2019.] Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/282511398\\_An\\_Overview\\_of\\_Part particulate\\_Matter\\_Measurement\\_Instruments](https://www.researchgate.net/publication/282511398_An_Overview_of_Part particulate_Matter_Measurement_Instruments)

BIRKNER, N. ja Wang, Q. 2019. How an FTIR Spectrometer Operates [verkkoaineisto]. Libretexts. [Viitattu 12.10.2019.] Saatavissa: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Spectroscopy/Vibrational\\_Spectroscopy/Infrared\\_Spectroscopy/How\\_an\\_FTIR\\_Spectrometer\\_Operates](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Vibrational_Spectroscopy/Infrared_Spectroscopy/How_an_FTIR_Spectrometer_Operates)

Connected Finland. Connected Airwits CO2 tekniset tiedot [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2019] Saatavissa: [https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2019/10/AirWitsCO2\\_brochure-1pageFIN.pdf](https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2019/10/AirWitsCO2_brochure-1pageFIN.pdf)

Connected Finland. Connected Airwits PM tekniset tiedot [verkkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2019] Saatavissa: [https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2019/08/AirWits\\_PM\\_brochure-1pageFIN.pdf](https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2019/08/AirWits_PM_brochure-1pageFIN.pdf)

Connected Finland. Connected Pressguard tekniset tiedot [verkkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2019] Saatavissa: [https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2019/08/PressGuard\\_brochure-1pageFIN.pdf](https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2019/08/PressGuard_brochure-1pageFIN.pdf)

Elsys. ERS CO<sup>2</sup> Data sheet [verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2019] Saatavissa: [https://elsys.se/public/datasheets/ERS\\_CO2\\_datasheet.pdf](https://elsys.se/public/datasheets/ERS_CO2_datasheet.pdf)

GFG 2013. Understanding catalytic LEL combustible gas sensor performance [verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2019.] Saatavissa: [http://goodforgas.com/wp-content/uploads/2013/12/AP1018\\_Combustible-sensor-performance\\_6\\_30\\_13.pdf](http://goodforgas.com/wp-content/uploads/2013/12/AP1018_Combustible-sensor-performance_6_30_13.pdf)

HYYTINEN, E-R., SANTONEN, T., VAINIOTALO S., RANTONEN, J., ja LINNAINMAA, M. 2016. Hengittävän ja alveolijakeisen pölyntavoitetasoperustelumuiatio [verkkojulkaisu]. Työterveyslaitos. [Viitattu 10.10.2019.] Saatavissa: <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/hengittyva-ja-alveolijakeinen-poly-tavoitetaso.pdf>

Invisible Systems. LoRa PM2.5 - PM10 Transmitter [Viitattu 12.10.2019.] Saatavissa: [https://www.invisible-systems.com/wp-content/uploads/2018/03/LoRa-PM2\\_5-PM10-transmitter\\_.pdf](https://www.invisible-systems.com/wp-content/uploads/2018/03/LoRa-PM2_5-PM10-transmitter_.pdf)

Invisible Systems. LoRa VOC Transmitter [Viitattu 12.10.2019.] Saatavissa: <https://www.invisible-systems.com/wp-content/uploads/2018/03/LoRa-VOC-transmitter.pdf>

Libelium 2019. Smart Gaser PRO Technical Guide [Viitattu 12.10.2019] Saatavissa: [http://www.libelium.com/downloads/documentation/gases\\_sensor\\_board\\_pro.pdf](http://www.libelium.com/downloads/documentation/gases_sensor_board_pro.pdf)

MCF16. MCF-LW12CO<sup>2</sup> datasheet [Viitattu 12.10.2019.] Saatavissa: <https://www.mcf16.com/wp-content/uploads/2018/11/mcf16-MCF-LW12CO2.pdf>

Netvox. Wireless CO Sensor (DC Powered) [Viitattu 12.10.2019.] Saatavissa: <http://www.netvox.com.tw/um/ra0701/ra0701DataSheet.pdf>

Netvox. Wireless Outdoor PM2.5/Temperature/Humidity Sensor RA0716 Data Sheet [Viitattu 12.10.2019.] Saatavissa: <http://www.netvox.com.tw/um/ra0716/ra0716DataSheet.pdf>

ROUSE, M. 2019. Internet of things [verkkoaineisto]. IoT Agenda. [Viitattu 16.10.2019.] Saatavissa: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>

Seeed, 2015. Grove - HCHO sensor [verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2019.] Saatavissa: [https://www.mouser.com/catalog/specsheets/Seeed\\_101020001.pdf](https://www.mouser.com/catalog/specsheets/Seeed_101020001.pdf)

SGX Sensortech 2007. Introduction to Electrochemical (EC) Gas Sensors [verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2019.] Saatavissa: <https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2014/08/Introduction-to-Electrochemical-EC-Gas-Sensors1.pdf>

Sintrol 2017. Dumo EXG A and Dumo EXG RF A user manual [verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2019.] Saatavissa: <http://industl1c.com/wp-content/uploads/2017/12/User-Manual-Sintrol-Dumo-EXG-A-and-Dumo-EXG-RF-A-Version-1.0-27th-April-2017.pdf>

STARCK, J., KALLIOKOSKI, P., KANGAS, J., PÄÄKKÖNEN, R., RANTANEN, S., RIIHIMÄKI, V., ja KARHULA A-L. 2008. Työhygienia. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.

VENELAMPI, E. 2015. Ionisoiva säteily. [verkkajulkaisu]. Säteilyturvakeskus. [Viitattu 10.10.2019.] Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/mita-sateily-on/ionisoiva-sateily>