



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

VOC-PUOLIJOHDEANTURIT TYÖSTÖKONEYMPÄRISTÖSSÄ

Sonja Viinikainen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2018

Tieto- ja viestintäteknikan koulutusohjelma
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tieto- ja viestintätekniikan koulutusohjelma
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka

VIINIKAINEN, SONJA:
VOC-puolijohdeanturit työstökoneympäristössä

Opinnäytetyö 42 sivua, joista liitteitä 9 sivua
Toukokuu 2018

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan VOC-puolijohdeantureiden soveltuvuutta konepajojen työstökoneiden ilmanpuhdistusjärjestelmien puhdistustulosten seurantaan. Pohjatutkimus sai alkunsa TAMK:n ja TTL:n edeltävän projektin aikana esille tulleesta ilmanpuhdistusjärjestelmän puutteellisesta kaasumaisten epäpuhtauksien suodattamisesta. Opinnäytetyön tuloksia tullaan hyödyntämään työskentelyolosuhteiden seurannan kehittämisessä.

Testattavat anturit, joille on määritelty reagoitavat kaasut ja niiden ppm-tasot, olivat eri valmistajien TVOC-antureita, joiden testaus toteutettiin Sandvikin Tampereen tehtaalla 10 viikon ajanjaksolla. Antureiden dataa seurattiin mikrokontrollereiden ja PC:llä ajettavan Putty-ohjelman avulla, joka tallensi datan tekstitiedostoksi. Mittaustulokset käsiteltiin Excelin avulla. Yhtenä testaamisen osana olivat myös lyhytkestoiset testit sekä olosuhdemittaukset, joissa tarkasteltiin kosteuden ja lämpötilan vaikutuksia tuloksiin.

Tehtyjen testien perusteella antureiden tuloksiin eivät vaikuta oleellisesti ympäristön olosuhteiden muutokset. Tuloksista kävi lisäksi ilmi, että tällä hetkellä järjestelmässä käytettävän kemiallisen suodattimen käyttöikä on lyhyt, jolloin se ei ole kustannustehokas. Projektin seuraavassa vaiheessa päätettiin testata kapasiteetiltaan suurempaa suodatinta.

Antureiden suoriutumisten perusteella päätettiin jatkaa projektin eteenpäin viemistä Environment click -moduulin kanssa. Oleellisimpia kriteerejä saatujen mittaustuloksien lisäksi olivat helppokäyttöisyys sekä suhteellisen kosteuden ja lämpötilan seuraamismahdollisuudet. Seuraavaksi moduulia tullaan testaamaan Tampereen tehtaalla uuden suodatinmallin kanssa, jonka jälkeen moduuli pyritään integroimaan olemassa olevaan seurantajärjestelmään.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in ICT Engineering
Embedded Systems and Electronics

VIINIKAINEN, SONJA:
Semiconductor VOC-sensors in Workshop Environments

Bachelor's Thesis 42 pages, appendices 9 pages
May 2018

This thesis examines if the semiconductor VOC sensors can be used in monitoring workshop air purification systems. The need for this type of study arose from a previous TAMK and TTL related project, where it was discovered that the current filtering methods used in air purification systems was insufficient. The results of this thesis will be utilized by developing the current air purification monitoring system and improving working conditions in the workshops. This research is part of a larger project that also examines for example the pH values of cutting fluids.

The sensors react to different VOC gases and at different rates, both of which are determined by the manufacturer. To find a suitable sensor, there was a 10-week long test run at Sandvik, Tampere. Sensor data was collected using microcontrollers and the data was saved into a text file using a PC program called Putty. The results were processed using Excel. There were also short test runs and environmental testing in which it was examined if relative humidity and temperature changes affect the sensor readings.

Based on the tests, the sensor results were not noticeably affected by the changes in environmental conditions. The results also revealed that the currently used chemical filter, used in these kinds of conditions, has a short service time, making it not cost-effective. In the next phase of the project, the filter will be changed into a different kind, which can absorb more impurities.

It was decided to continue the project with the Environment click module. The most important criteria, in addition to the measurement results, were the ease of use and the relative humidity and temperature monitoring possibilities. Next step in the project is to test the module with the new filter model at the Tampere factory.

Key words: VOC, semiconductor, sensor

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	TOIMEKSIANTO.....	8
3	VOC-YHDISTEET	9
4	ILMANPUHDISTUSJÄRJESTELMÄ.....	10
5	PUOLIJOHTEET	11
	5.1 Toimintaperiaate	11
	5.2 Puolijohdekaasuanturit.....	11
6	ANTURIT	13
	6.1 Kytkenä.....	13
	6.2 Jännitearvon lukeminen ja AD-muunnos	15
	6.3 Resistanssin laskeminen	15
7	OHJELMOINTI	17
	7.1 Arduino Nano	17
	7.2 Environment click.....	17
8	DATAN KERÄYS JA KÄSITTELY.....	18
9	MITTAUKSET	19
	9.1 Koetestit.....	19
	9.1.1 Huoneilma.....	19
	9.1.2 Sandvik, Lahti	20
	9.1.3 Olosuhdekaappi.....	20
	9.2 Testi, Sandvik Tampere	21
	9.3 TTL	21
10	TULOKSET	22
	10.1 Huoneilma.....	22
	10.2 Sandvik, Lahti	23
	10.3 Olosuhdekaappi	24
	10.4 Sandvik, Tampere	27
	10.4.1 Hanwei, puhdistettava ilma.....	27
	10.4.2 Fis, Winsen ja Figaro, suodattimien väli.....	28
	10.4.3 Environment click, puhdistettu ilma	28
	10.4.4 Vertailu.....	29
	10.5 TTL	30
11	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	32
	LÄHTEET.....	33
	LIITTEET	34
	Liite 1. Arduino Nanon ohjelmakoodi	34

Liite 2. Ote Boschin ohjelmakoodikirjastosta	35
Liite 3. Tampereen testi, Hanwei, VOC-yhdisteet	36
Liite 4. Tampereen testi, Winsen, VOC-yhdisteet	37
Liite 5. Tampereen testi, Fis, VOC-yhdisteet.....	38
Liite 6. Tampereen testi, Figaro, VOC-yhdisteet	39
Liite 7. Tampereen testi, Environment click, VOC-yhdisteet	40
Liite 8. Tampereen testi, Environment click, suhteellinen kosteus.....	41
Liite 9. Tampereen testi, Environment click, lämpötila	42

LYHENTEET JA TERMIT

AD-muunnos	Analogisen signaalin muutos digitaaliseksi
Aerosoli	Kaasun ja kiinteiden/nestemäisten hiukkasten seos
Alkanoliamiini	Kemiallinen yhdiste, joka esiintyy pääasiassa sumuna ilmassa
Elektrodi	Sähköjohde, jolla yhdistetään virtapiiri ei-metalliseen väliaineeseen
Epämetalli	Alkuaine, jolla ei ole metallin ominaisuuksia, pääosin kaasuja
HEPA-suodatin	Erittäin tehokas hiukkassuodatin
I ² C	Synkroninen kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä
IAQ	Sisäilmanlaatu
Metallioksidi	Kiinteä aine, joka on metallin ja hapen yhdiste (esim. ruoste)
Ppm	Suhdeyksikkö, joka kertoo, montako miljoonasosaa jokin on jostakin
Puolijohde	Materiaali, jonka johtavuus on eristeen ja johtimen väli- maastossa
Puolimetalli	Alkuaine, jolla on metallin ja epämetallin ominaisuuksia (esim. pii)
Suhteellinen kosteus	Vesihöyryn määrä ilmassa suhteessa mahdolliseen maksimiin (RH)
TVOC	VOC-yhdisteiden kokonaispitoisuus
VOC	Haihtuva orgaaninen yhdiste, jolla on alhainen kiehumis- piste

1 JOHDANTO

Tässä Tampereen ammattikorkeakoulun Aerosolihanke-projektin teettämässä työssä tarkastellaan puolijohdeisten VOC-antureiden (engl. volatile organic compound) toimivuutta ja soveltuvuutta konepajojen työstökoneiden ilmanpuhdistusjärjestelmien puhdistusjärjestelmien seurantaan. Tutkimuksen tuloksia tullaan hyödyntämään nykyisen seurantajärjestelmän kehittämisessä ja työskentelyolosuhteiden seurannassa. Anturitutkimus on osa isompaa järjestelmäkehitystä; samaan projektiin liittyy lisäksi myös esimerkiksi työstökoneissa käytettävän leikkuunesteen pH-arvon tarkastelu.

Lähtökohtana tutkimukselle oli projektin edeltävässä vaiheessa havaittu nykyisten ilmanpuhdistusjärjestelmien puutteellinen epäpuhtauksien suodatuskyky. Työterveyslaitoksen tekemistä mittauksista oli käynyt ilmi, että ilmanpuhdistusjärjestelmässä käytettävät hiukkasmaisten epäpuhtauksien suodattamiseen soveltuvat HEPA-suodattimet (engl. high efficiency particulate air -filter) eivät pysty tarvittavissa määrin sitomaan kaasumaisia epäpuhtauksia. Koska järjestelmät ovat toteutettu niin, että puhdistettu poistoilma puhalletaan takaisin työskentelyhalliin, tarkoittaa se sitä, että työntekijät altistuvat näille epäpuhtauksille jatkuvasti työvuoronsa aikana.

Projektissa päädyttiin tarkastelemaan VOC-puolijohdeantureita niiden edullisuuden vuoksi. Verrattaessa esimerkiksi optisiin sensoreihin, joiden hinnat ovat useissa sadoissa euroissa, olivat muutamien kymmenien eurojen hintaiset puolijohdeanturit ensisijainen tutkimuskohde, jonka toivottiin soveltuvan kyseiseen mittausympäristöön. Mahdollisena ongelmana ennakkoon nähtiin mitattavan ilman suhteellisen kosteuden suuruus, sillä puolijohdekaasuantureiden toiminta perustuu niiden johtavuuden muutokseen. Testausjärjestelmä toteutettiin olemassa olevaa järjestelmää silmällä pitäen, joten sen tuli olla yksinkertainen ja helposti integroitava.

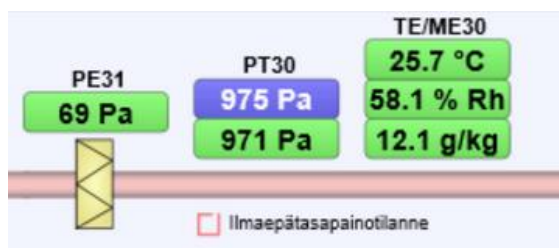
Testi toteutettiin Sandvikin Tampereen tehtaalla, jossa oli tätä tutkimusta varten toteutettu yhdelle työstökoneelle oma uusi ilmanpuhdistusjärjestelmä. Mittausdataa kerättiin 10 viikon ajan. Lisäksi antureilla tehtiin lyhyempiä koetestejä Sandvikin Lahden tehtaalla, TAMK:n opetustiloissa sekä paperi- ja pakkauslaboratorion olosuhdekaapilla.

2 TOIMEKSIANTO

Tämä opinnäytetyö liittyy Tekesin rahoittamaan aerosolihallinta työstökoneympäristössä -tutkimusprojektiin, joka on jatkoa Kohdepoistoilman suodattaminen ja palauttaminen metallin työstössä -hankkeelle. Projektin tarkoituksena on löytää ratkaisut, miten vähentää konepajatyöntekijöiden altistusta työstönesteistä syntyville alkanoliamiineille ja VOC-yhdisteille sekä ehkäistä yhdisteistä aiheutuvia iho- ja hengitystieoireita.

Tässä työssä pyritään selvittämään VOC-puolijohdeantureiden soveltuvuutta työstökoneiden ilmanpuhdistusjärjestelmien toiminnan seurantaan ja niissä käytettävään seurantaohjelmaan. Tällöin epäpuhtauksiin voidaan reagoida nopeasti esimerkiksi vaihdattamalla ilmanpuhdistusjärjestelmän suodatin tai ohjaamalla epäpuhtas ilma tehtaasta ulos sisätilojen sijaan. Lisäksi työssä tarkastellaan kosteuden ja lämpötilan mahdollista vaikutusta antureiden toimintaan.

Nykyisellä seurantaohjelmalla ja siinä käytetyillä antureilla pystytään seuraamaan mm. puhdistettavan ilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa. Kuvassa 1 on ote seurantajärjestelmästä, josta voidaan nähdä, että ilman lämpötila on noin 26 °C mittauspisteessä TE/ME30. Tähän järjestelmään halutaan integroida kustannustehokkaasti VOC-yhdisteiden tarkastelu, jolloin tarkastelun kohteeksi valittiin hintansa puolesta edulliset puolijohdeanturit esimerkiksi optisten sensoreiden sijaan.



KUVA 1. Ilmanpuhdistusjärjestelmän seurantaohjelma

3 VOC-YHDISTEET

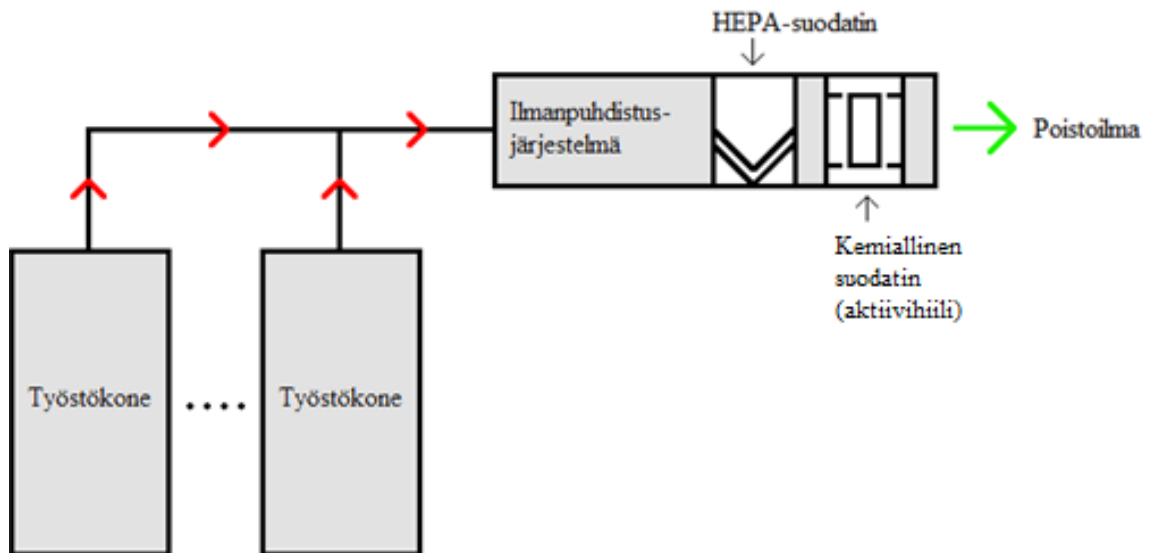
VOC-yhdisteet tai -kaasut ovat haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, joiden yleisiä ei-teollisia päästölähteitä ovat esimerkiksi uudet sisustus- ja rakennusmateriaalit, joissa saattaa olla liuotin- tai raaka-ainejäämiä (Hengitysliitto n.d.). Yhdisteet esiintyvät yleensä kaasumaisina, mutta ne saattavat tiivistyä hiukkasiksi tai imeytyä epäorgaanisiin hiukkasiin, jolloin niiden kemiallinen koostumus muuttuu (Camfil n.d.).

VOC-kaasujen terveyshaittoja ovat esimerkiksi silmien tai limakalvojen ärsytysoireet ja päänsärky, joita saattaa ilmetä jo vähäisestä altistumisesta, mutta varsinkin useamman VOC-kaasun yhteisvaikutuksen uskotaan olevan terveydelle haitallista. (Hengitysliitto n.d.). Lisäksi osa VOC-kaasuista on itsessään jo karsinogeenisia eli syöpää aiheuttavia. Tällainen on mm. formaldehydi, jonka voi haistaa esimerkiksi uusissa huonekaluissa useamman päivän ajan, kun materiaalipäästöt laimentuvat sisäilmaan. (Maria Nordin 2015.)

Konepajaympäristöissä syntyy metallien työstön yhteydessä käytettävästä työstöneesteestä aerosolia, jonka mukana on sekä kaasumaisia yhdisteitä, eli esimerkiksi alkanoliamiineja ja VOC-kaasuja, että hiukkasmaisia yhdisteitä (Säämänen 2016). Työstökoneiden ilmanpoiston yhteydessä olevan ilmanpuhdistusjärjestelmän olisi tarkoitus suodattaa nämä epäpuhtaudet pois, jotta poistoilmasta saataisiin terveydelle haitatonta.

4 ILMANPUHDISTUSJÄRJESTELMÄ

Tässä osiossa käsitellään pääosin järjestelmässä käytettyjen suodattimien toimintaa, sillä vain ne ovat oleellisesti osana VOC-antureiden soveltuvuuden tarkastelua. Kuvassa 2 on esitetty järjestelmä yksinkertaistettuna.



KUVA 2. Järjestelmäkuvaus

Ilmanpuhdistusjärjestelmässä eli koneellisessa kohdepoistossa käytetään HEPA-suodattimia. Nämä pidättävät hyvin hiukkasmaisia epäpuhtauksia, kun taas kaasumaisia epäpuhtauksia ne eivät pidätä käytännössä ollenkaan (Säämänen 2016). Tästä johtuen järjestelmään tarvitaan vaihtoehtoinen tapa suodattaa kaasumaiset epäpuhtaudet.

Mahdollisia keinoja kaasujen poistamiseen ovat esimerkiksi kemialliset suodattimet, kuten aktiivihiilisuodatin. Kyseisellä suodattimella on tietty kapasiteetti, jonka verran se voi sitoa itseensä epäpuhtauksia. Kun se on loppuun käytetty, suodattimesta ei ole enää huomattavaa hyötyä ja se saattaa jopa alkaa luovuttaa suodatettuja epäpuhtauksia.

VOC-antureiden lopputarkoitus projektissa on, että niillä seurattaisiin työstökoneilta tulevan, järjestelmän puhdistaman sekä mahdollisesti suodattimien välissä olevan ilman VOC-tasoa. Tällöin nähtäisiin, kuinka tehokkaasti ilmanpuhdistusjärjestelmä toimii ja pystyttäisiin reagoimaan nouseviin epäpuhtauksien määriin mahdollisimman nopeasti, sekä ennakoimaan suodatinvaihtotarvetta.

5 PUOLIJOHTEET

5.1 Toimintaperiaate

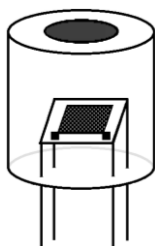
Puolijohteet ovat yhdisteitä, joissa puolimetalliin on sekoitettu epäpuhtauksia niiden sähkönjohtavuuden muuttamiseksi. Niiden johtavuus on parempi kuin eristeiden, kuten esimerkiksi lasin, mutta huonompi kuin johteiden, joita ovat esimerkiksi kupari ja hopea. Elektroniikassa yleisesti käytettyjä puolimetalleja ovat pii, germanium ja gallium.

Puolijohteet tarvitsevat johteita enemmän energiaa toimiakseen johtavina. Tyypillinen esimerkki puolijohteesta on diodi. Kun sen napojen välinen jännite on vähemmän kuin sen kynnysjännite, käyttäytyy diodi kuten eriste, eli se ei johda. Kynnysjännitteen ylittyä, tulee diodista johtava, mutta kynnysjännite näkyy diodin napojen yli mitattaessa.

5.2 Puolijohdekaasuanturit

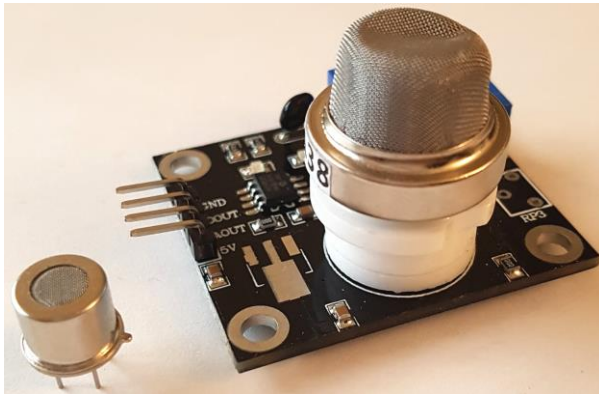
Antureiden toiminta perustuu niissä oleviin puolijohtaviin metallioksidipintoihin, jotka reagoivat kaasuihin. Pintojen lämpötila nostetaan satoihin celsiusasteisiin niiden alla olevien lämmityselementtien avulla. Kun pintaan imeytyy kaasua, muuttuu metallioksidipinnan resistanssi (R_S). Tätä muutosta voidaan mitata yksinkertaisella jännitteenjakopiirillä. (Edaphic n.d.)

Kuvassa 3 on esiteltyä sylinterimallisen anturin rakenne. Se koostuu anturiosasta ja sen kuoresta, jonka päällä on aukko(ja). Mallista riippuen aukko voi olla peitettynä vettähylykivällä kalvolla. Anturiosaan kuuluvat elektrodit ja metallioksidipinta, jonka alapuolella on lämmityselementti. (Edaphic n.d.)



KUVA 3. VOC-anturin rakenne

Antureita löytyy monille eri kaasuille, kuten esimerkiksi hiilimonoksidille (häkä), ammoniakille ja VOC-yhdisteille. Mahdollisia sovelluskohteita ovat kaasuvuotojen tai tulipalojen havaitseminen, alkometrit ja sisäilman laaduntarkkailu. Anturit ovat yleensä pienikokoisia riippuen niiden koteloinnista ja siitä, tulevatko ne valmiiksi piirilevyille asennettuna. Kuvassa 4 ovat vasemmalla Winsenin WSP2110 -anturi, jonka halkaisija on 8 mm ja oikealla valmis piiri, jossa on käytetty Hanwein MQ-138 -anturia.



KUVA 4. Testattavia anturimalleja

Valmistuskustannukset yhtä kappaletta kohden ovat alhaiset vähäisistä materiaalitarkpeista johtuen. Näiden tarve anturia kohden on muutamia grammoja/materiaali ja hinnat suhteellisen edullisia. Esimerkiksi alumiinin hinta on viimeisen viiden vuoden aikana vaihdellut 0,15 sentin grammahinnan molemmin puolin ja kuparin 0,5 sentin (InvestMine n.d.).

Yksinkertaisen toiminnan ja edullisen hintansa lisäksi puolijohdeantureilla on myös rajoituksensa. Ne saattavat reagoida VOC-kaasujen lisäksi lämpötilan jatkuvaan vaihteluun tai suhteellisen kosteuden suuruuteen, jolloin tulokset eivät ole enää luotettavia. Tästä johtuen tarvitaan tietoa myös mitattavan ympäristön lämpötilan ja kosteuden muutoksista ja niiden vaikutuksista tuloksiin tällaisissa mittauskohteissa. (Edaphic n.d.)

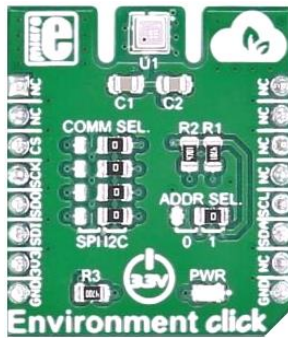
Anturit saattavat myös reagoida muihinkin kuin VOC-kaasuihin, sillä ne eivät pysty erottelemaan, minkä kaasun kanssa ne reagoivat. Tässä työssä tutkitussa tapauksessa tämä on kuitenkin epätodennäköistä, sillä kyseessä on suljettu järjestelmä, jossa puhdistettava ilma tulee työstökoneilta suoraan ilmastointiputkia pitkin puhdistettavaksi.

6 ANTURIT

Projektiin oli valmiiksi hankittuna valikoima eri valmistajien antureita. Kaikki olivat tyypiltään TVOC-antureita (engl. total volatile organic compounds), eli ne mittaavat yhden tietyn kaasun sijaan useamman kaasun kokonaispitoisuutta. Antureille on valmistajien puolesta määritelty, mihin kaasuihin ja millä ppm-tasolla ne reagoivat. Sopivan anturin löytämiseksi päätettiin testata seuraavia anturimalleja:

- SGX Sensortech, Mics-5524
- Hanwei Electronics, MQ-138
- Fis, SP3S-AQ2
- Winsen, WSP2110
- Figaro, TGS 2602.

Näiden lisäksi tilattiin vielä MikroElektronikan Environment click -moduuli, jossa on Boschin BME680-anturi (kuva 5). Tällä voidaan mitata TVOC-arvon lisäksi myös ilmanpainetta, lämpötilaa sekä suhteellista kosteutta. Valmiin click-moduulin käyttö erosi muista antureista, joten sitä käsitellään omassa osiossaan myöhemmin.



KUVA 5. Environment click -moduuli

6.1 Kytkenä

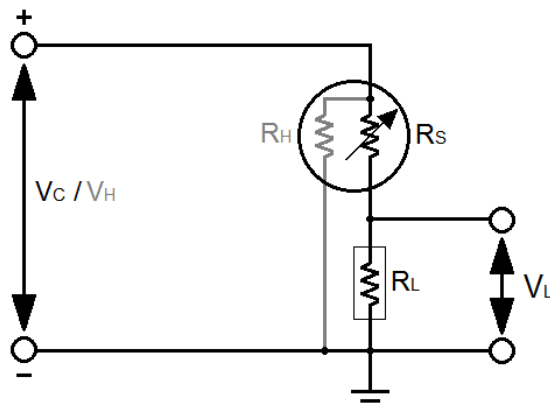
Anturit tarvitsevat 5 voltin käyttöjännitteen (V_C), jota voidaan kyseisissä malleissa käyttää samalla myös kaasuihin reagoivan metallioksidipinnan lämmitykseen (V_H). Tämän lisäksi tarvitaan kuormavastus (R_L), jonka suuruudeksi valittiin systemaattisuuden vuoksi jokaiselle anturille 10 k Ω . Tämä vastasi jokaiselle anturille datalehdissä annettuja määrittelyjä. Kuvassa 6 ovat samalle kytkentälevylle juotetut Fis:in, Winsenin ja Figa-

ron anturit, näiden kuormavastukset sekä johtimet käyttöjännitteille, maille ja antureiden analogisille ulostuloille.



KUVA 6. Sylinterimalliset anturit kytkentälevyllä

Kuvassa 7 on Fis:in anturin toiminnan perusteella tehty kytkentäkaavio. Winsenin ja Figaron antureissa on lämmitysvastuksille (R_H) erilliset tulonastansa, mutta ne ovat muuten toiminnaltaan samanlaisia. SGX:n ja Hanwein anturit tulivat valmiina piireinä, joiden mallia ei ole tiedossa, mutta SGX:n piiri vaikutti olevan toteutukseltaan sen datalehdissä esitetyn esimerkkitoiteutuksen kaltainen. Hanweille oli piirilevyllä erikseen kuormavastukselle ja ”aistimisherkkyydelle” trimmerit, joiden ko’oiksi säädettiin 10 k Ω ja 4 k Ω .



KUVA 7. Antureiden yksinkertaistettu kytkentäkaavio

Anturin resistanssin R_S selvittämiseksi tarvitaan erillistä mikrokontrolleria, jonka mikroprosessorilla suoritetaan V_L jännitteen AD-muunnos sekä mm. resistanssin laskeminen. Tähän käytettiin Arduino Nanoa, johon päädyttiin sen helppouden ja nopean saatavuuden vuoksi. Nämä olivat oleellisia kriteerejä, sillä projektin toimeksiannosta oli ensimmäiseen testimittaukseen aikaa vain muutama päivä. Mikrokontrollerit saivat tehonsa USB-kaapelin kautta PC:ltä.

6.2 Jännitearvon lukeminen ja AD-muunnos

Antureiden V_L -jalat olivat kiinni Arduino Nanon analogipinneissä. Mikroprosessori käsittelee pinneissä näkyvän analogisen jännitetason 10-bittisellä AD-muuntimella (engl. analog-to-digital converter). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että muunnin etsii millä tasolla jännite on 0 ja 1023 välillä, jolloin yhden askelman suuruus on viiden voltin käyttöjännitteellä noin 5 mV.

Muunnoksen jälkeen saatu arvo (ADC) tulee skaalata oikean suuruiseksi V_L jännitteen selville saamiseksi, jolloin

$$V_L = \frac{ADC}{1024} * V_C, \quad (1)$$

jossa V_C on käyttöjännite ja 1024 muuntimen tasojen lukumäärä eli sen resoluutio. Tämän jälkeen saatu jännitearvo voidaan muuttaa anturin resistanssiksi.

6.3 Resistanssin laskeminen

Anturin resistanssi R_S saadaan selville kuormavastuksen yli mitatun jännitteen V_L avulla. Ensimmäiseksi selvitetään kuormavastuksen virta I_L seuraavan laisesti:

$$I_L = \frac{V_L}{R_L}, \quad (2)$$

jossa V_L on kuorman yli näkyvä jännite ja R_L kuormavastuksen resistanssi. Kuormassa kulkevan virran ja sen yli olevan jännitteen avulla saadaan sensorin resistanssi R_S , joka on

$$R_S = \frac{V_C - V_L}{I_L}. \quad (3)$$

Nämä kaksi kaavaa ovat yhdistetty Nanolle tehdyssä koodissa muotoon

$$R_S = \frac{V_C - V_L}{\frac{V_L}{R_L}}. \quad (4)$$

Saatus resistanssia ei voida muuttaa suoraan tilavuusosuudeksi (ppm), koska mitattavassa ilmassa on useita eri VOC-kaasuja, joihin jokaiseen metallioksidipinta reagoi hieman eri intensiteetillä. Jos näin haluttaisiin tehdä, tulisi ensin selvittää mistä kaasuisista epäpuhtaudet koostuvat, mutta tällöinkin niiden osuudet saattaisivat vaihdella liikaa luotettavan tuloksen saamiseksi.

Tuloksien tarkkuuden kannalta kytkennässä olisi mahdollisuus johtohäviöihin, jolloin esimerkiksi antureilta tuleva jännitetaso olisi hieman pudonnut tullessaan Nanolle. Tässä tapauksessa näiden vaikutus on kuitenkin pieni, koska tasojen tarkasteluun käytetään suhteellista osuutta. Tarkkuuteen voi vaikuttaa myös AD-muunnos, mutta tämäkin aiheuttaisi maksimissaan 5 mV:n virheen V_L -jännitteessä.

7 OHJELMOINTI

7.1 Arduino Nano

Koodin kirjoittamiseen ja mikroprosessorin ohjelmoimiseen käytettiin Arduino IDE:tä. Tehdyssä ohjelmakoodissa kuorman yli oleva jännite mitataan sekunnin välein ISR(TIMER1_COMPA_vect)-keskeytyksen kutsumalla lue_voimakkuus-funktiolla (liite 1). Kyseinen funktio sisältää AD-muunnoksen, sen arvon skaalauksen (kaava 1) ja siitä saadun jännitearvon muutoksen resistanssiksi kaavan neljä mukaisesti.

Lyhyellä mittausvälillä (1 s) pystyttiin varmistamaan antureiden looginen toiminta ja tarkistelemaan, etteivät arvot vaihtele ilman syytä huomattavasti ja jatkuvasti. Arvojen mittausväli oli pidemmälle testausajalle liian lyhyt siitä syntyvän suuren datamäärän vuoksi. Jos kyseisiä antureita haluttaisiin käyttää projektin jatkossa, tulisi ohjelmakoodia kehittää esimerkiksi niin, että mitatuista arvoista lasketaan sekunnin mittausvälin sijaan keskiarvo esimerkiksi 10 minuutin ajalta.

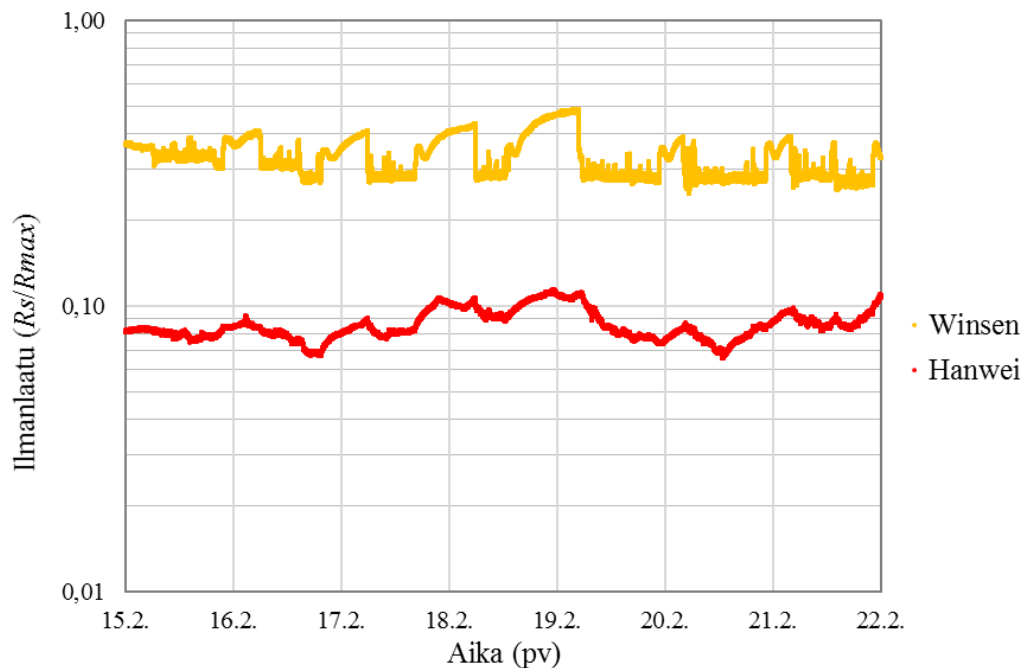
7.2 Environment click

Environment clickille oli saatavilla Boschin tarjoama ohjelmakirjasto. Tämä soveltuu vain tietyille alustoille, joten se rajasi Nanon pois. Sen tilalle valittiin ARM Cortex-M0+ -prosessorilla varustettu Teensy LC -mikrokontrolleri, jolle clickin mittaamat arvot saatiin valmiiksi oikeaan muotoon käsiteltyinä I²C-väylää käyttäen. Ohjelmointiin käytettiin Arduino IDE:ä, johon asennettiin Teensyduino-lisäosa. Kytkentä toteutettiin yhdistämällä moduulin ja mikrokontrollerin I²C-väylille tarkoitetut SDA- ja SCL-pinnit toistensa kanssa sekä lisäämällä käyttöjännitteet.

Kirjastoa käytettiin muuttamattomana lukuun ottamatta bsec_iot_example.ino:sta löytyvää void output_ready -funktiota. Kyseisellä funktiolla suoritetaan datansiirto sarjamuodossa kolmen sekunnin välein. Siihen lisättiin kaikkien mahdollisten parametrin tulostus (liite 2). Kirjasto on saatavilla osoitteesta www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bsec.

8 DATAN KERÄYS JA KÄSITTELY

Nanolta ja clickiltä tulevaa dataa seurattiin PC:llä pyörivän Putty-ohjelman avulla, joka samalla tallensi USB-portista luetun datan tekstitiedostoksi. Tämän jälkeen se siirrettiin Exceliin Text import wizardia apuna käyttäen. Arvoista saatiin vertailukelpoisia selvittämällä jokaisen anturin mittaama maksimiresistanssi (R_{max}) ja jakamalla anturikohtaisesti niiden mitaamat arvot (R_s) näillä maksimeilla. Tämän tyyppinen suhteellinen kaasupitoisuuden tarkastelu mahdollistaa myös eri antureiden tulosten havainnollistamisen samassa graafissa, kun jokaisella anturilla mitattu puhtain arvo vastaa lukua 1 (kuvio 1). Suhteellinen pitoisuus on suoraan verrannollinen ilmanlaatuun, eli mitä suurempi antureiden mittaama VOC-yhdisteiden suhteellinen pitoisuus on, sitä parempi ilmanlaatu on.



KUVIO 1. Mittausdatan havainnollistaminen

Graafien pystyakseleissa käytettiin logaritmista pystyakselia. Kyseistä lähestymistapaa hyödynnettiin yleisesti antureiden datalehdissä ja lisäksi huomattiin, että ajosykli erotuivat selvemmin tällä tavoin kuin lineaarista akselia käytettäessä. Ilmanlaadun huonontuessa vähenee laskettu suhteellinen osuus. Kuviosta 1 voidaan huomata esimerkiksi Winsenillä mitatut arvojen nousut, eli ilmanlaadun paranemiset, jotka ajoittuvat vuoro-kauden vaihtumisen ympärille.

9 MITTAUKSET

9.1 Koetestit

Ennen pitkäkestoista testausta Sandvikin Tampereen tehtaalla, antureita koeajettiin yleisesti TAMK:n sisätiloissa, TAMK:lla olevassa olosuhdekaapissa ja kaksi kertaa Sandvikin Lahden tehtaalla. Testien ensisijaisena tarkoituksena oli varmistaa antureiden ja kytkennän toiminta, sekä mahdollisesti eliminoida kyseiseen tarkoitukseen soveltumattomat anturit.

Sandvikilla tehtyjen mittausten osalta tuloksista haluttiin myös nähdä, pysyvätkö sisätiloissa mitatut arvot samansuuruisina ennen ja jälkeen tehdasmittauksia. Tämä on yksi tapa tarkastella, pysyykö antureiden herkkyys samana. Jos herkkyys heikkenisi merkittävästi, tulisi se tulevaisuudessa ottaa huomioon R_{max} -arvon päivittämisessä sopivin väliajoin.

9.1.1 Huoneilma

Yleisen testauksen tarkoituksena oli herkkyyden mahdollisen muutoksen havaitsemisen lisäksi löytää, millä tasolla antureiden arvot ovat normaalissa sisätilassa. Näin saadaan hyvälaatuista huoneilmaa vastaava keskimääräinen arvo, johon tehtaalla mitattuja tuloksia voidaan verrata.

Mittaukset toteutettiin ennen ja jälkeen jokaista tehdasmittausta TAMK:in ilmastoidussa tieto- ja viestintätekniikan laboratoriotilassa A3-17, jonka pinta-ala on noin 200 m². Tila oli testaamisen ajan tyhjillään ja dataa kerättiin reilun 3 tunnin ajalta.

Ensimmäisen Lahden tehtaan mittauksen yhteydessä testauksessa olivat SGX:n, Hanwein ja Fis:in anturit. Tämän jälkeisillä mittauskerroilla käytössä olivat Hanwein, Fis:in, Winsenin ja Figaron anturit sekä click-moduuli.

9.1.2 Sandvik, Lahti

Lahden tehtaalla ilmanpuhdistusjärjestelmään on kytketty neljä eri työstökoneetta, joilta tulevat ilmastointiputket ovat useita kymmeniä metrejä pitkiä. Työstökoneet ovat vaihtelevasti ajossa, joten työstösyklien erottaminen mittausdatasta varsinkin lyhyeltä ajalta kerätystä datasta on haasteellista. Ilmastointiputkiin tehtiin anturimittauksia varten reiät.

Anturit mittasivat yhtä aikaa samaa järjestelmän pistettä reilun tunnin ajan. Ensimmäiseksi mitattiin järjestelmään tulevaa puhdistettavan ilman laatua, jonka jälkeen anturit siirrettiin mittaamaan puhdistettua poistoilmaa. Ensimmäisellä testauskerralla käytössä olivat vanhat suodattimet ja SGX:n, Hanwein ja Fis:in anturit. Toisella kerralla aktiivihiili- ja HEPA-suodatin vaihdettiin uusiin ennen mittauksien aloitusta. Testauksessa olivat Hanwein, Fis:in, Winsenin ja Figaron anturit sekä click-moduuli.

9.1.3 Olosuhdekaappi

TAMK:n paperi- ja pakkauslaboratoriossa olevalla Espec PL-4KPH -olosuhdekaapilla (kuva 8) haluttiin testata lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaikutusta antureiden mitaustuloksiin. Näistä lähinnä kosteuden arveltiin vaikuttavan arvoihin, sillä antureiden metallioksidipinnat ovat lämpötilaltaan niin korkeat testiympäristöön nähden, että ympäristön lämpötilamuutoksen ei tulisi näkyä huomattavissa määrin. Testauksessa olivat Hanwein, Fis:in, Winsenin ja Figaron anturit sekä click-moduuli.



KUVA 8. Olosuhdekaappi

Ilmanpuhdistusjärjestelmän lämpötilan vaihteluväli on noin 20–50 °C ja suhteellisen kosteuden 5–70 %. Testissä kaapin tavoitelämpötilaksi asetettiin 40 °C ja tavoitteelliseksi suhteelliseksi kosteudeksi 40 %. Testausajan lyhytkestoisuuden ja olosuhdekaapin rajallisten ominaisuuksien vuoksi näitä arvoja ei ehditty saavuttaa mittauksien aikana.

9.2 Testi, Sandvik Tampere

Sandvikin Tampereen tehtaalla toteutettuun ilmanpuhdistusjärjestelmään oli mittauksien aikana kiinnitettynä yksi työstökone, kun järjestelmissä on yleensä kytkettynä useampia koneita. Ennakko-oletuksena oli, että tämä mahdollistaisi työstökoneen ajosykliden erottamisen mittaustuloksista. Järjestelmän suodattimet olivat alussa uudet, jonka lisäksi aktiivihiiisuodatin vaihdettiin kerran mittausjakson aikana. Dataa kerättiin yhtäjaksoisesti 10 viikon ajan.

Hanwein anturilla mitattiin puhdistettavaksi tulevaa ja clickillä puhdistettua ilmaa. Kun työstökone ja puhdistusjärjestelmä eivät olleet käytössä, click mittasi ilmavirran puutteesta johtuen tehtaan ilmanlaatua. Näiden lisäksi Fis:in, Winsenin ja Figaron antureilla mitattiin suodattimien välissä olevan ilman epäpuhtauksia.

9.3 TTL

Kaikilla Sandvikin mittauskerroilla oli samanaikaisesti mittauksia tekemässä myös työterveyslaitos. Heidän mittauksensa perustuvat VOC-yhdisteiden keräämiseen putkimaiseen ATD-keräimeen (engl. automatic thermal desorption). Näytteenotto kesti noin tunnin mittauspistettä kohden.

Mittauksien tuloksena saadaan antureiden tapaan TVOC-pitoisuus, jonka yksikkö on $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mitä korkeampi lukema on, sitä enemmän ilmassa on epätoivottuja VOC-yhdisteitä. Kyseinen menetelmä on tarkka, mutta näytteiden analysointiin kuluvan ajan takia se ei sovellu toivotunlaiseen jatkuvaan järjestelmäseurantaan.

10 TULOKSET

10.1 Huoneilma

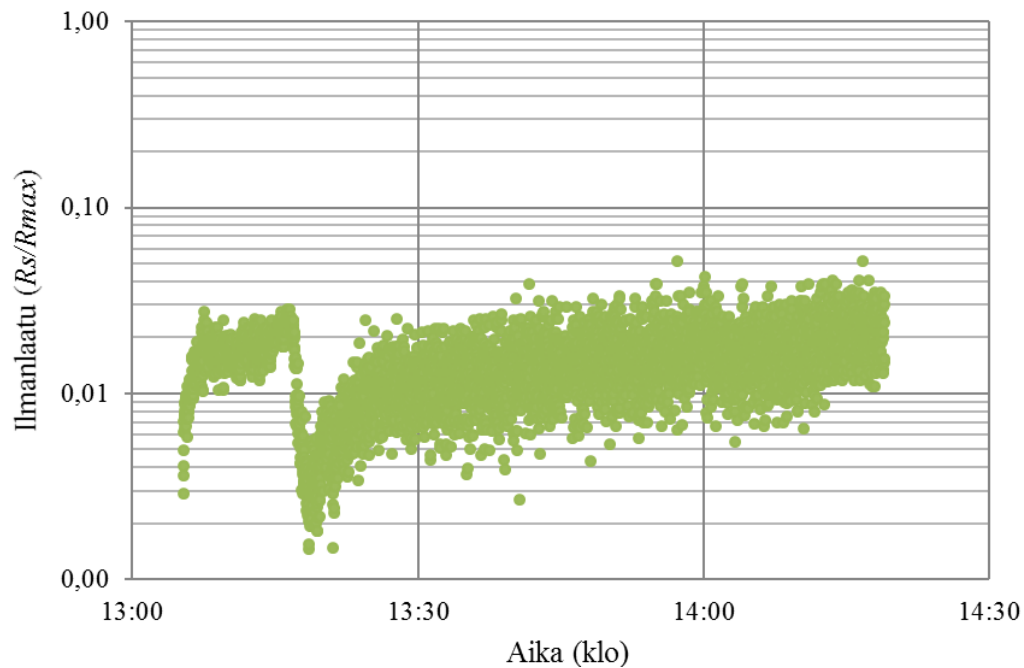
Taulukossa 1 on esiteltynä TAMK:n laboratoriotilassa suoritetujen mittauksien tulokset. Näistä mittauksista saatiin kaikille paitsi Fis:in anturille suhteelliseen vertailuun käytettävä R_{max} -arvo, eli suurin arvo, mitä kullakin anturilla mitattiin kaikkien testien ajalta. Nämä arvot ovat korostettuna taulukossa.

TAULUKKO 1. Huoneilman tulokset

Pvm.	Keskiarvo / Maksimi (R_S)					
	SGX	Hanwei	Fis	Winsen	Figaro	Click
16.8.2017	362127 Ω / 435217 Ω	117237 Ω / 124737 Ω	14310 Ω / 14915 Ω	-	-	-
24.10.2017	702789 Ω / 10230000 Ω	113117 Ω / 126533 Ω	17943 Ω / 19595 Ω	38560 Ω / 40693 Ω	41099 Ω / 61608 Ω	385888 Ω / 402089 Ω
3.11.2017	-	21850 Ω / 28352 Ω	14300 Ω / 21220 Ω	29396 Ω / 34716 Ω	22124 Ω / 32490 Ω	403767 Ω / 419682 Ω /
12.5.2018	-	15734 Ω / 18683 Ω	11595 Ω / 16597 Ω	38560 Ω / 41980 Ω	54482 Ω / 61111 Ω	997646 Ω / 1260704 Ω

Tuloksista voidaan havaita, että Hanwein anturilla mitatut arvot ovat kahdella viimeisellä kerralla olleet huomattavasti alemmat kuin mittauksia aloitettaessa. Tästä johtuen, sitä ei oteta huomioon vaihtoehtona projektin jatkoa varten. Winsenin, Figaron ja Fis:in arvot ovat pysyneet samoissa suuruusluvuissa ja clickin jopa suurentuneet. Näiden antureiden herkkyys vaikuttaisi säilyneen mittauksien ajan vähintäänkin yhtä hyvänä.

SGX:n anturin soveltuvuudesta ei voida näiden kahden ja yhden Lahden mittauskerran perusteella tehdä lopullisia johtopäätöksiä. Lyhyen mittausvälin ansiosta huomattiin, että arvoissa oli kuitenkin muihin antureihin verrattuna enemmän vaihtelua, joka voidaan havaita verrattaessa kuvioiden 2 ja 1 käyrien hajontaa. Tästä johtuen kyseinen anturi päätettiin jättää pois testauksesta.



KUVIO 2. SGX-anturi, Lahti 17.8. likaisen ilman mittaus

10.2 Sandvik, Lahti

Lahdessa vanhoilla suodattimilla tehtyjen mittausten tulokset löytyvät taulukosta 2. Tulokset vastaavat toivottua; keskiarvot ovat nousseet siirryttäessä likaiselta puolelta puhtaalle. Vaikka Hanwein maksimiarvo puhdistetulle ilmalle onkin huonompi kuin likaisella puolella mitattuna, on keskiarvo kuitenkin huomattavasti parempi.

TAULUKKO 2. Lahden Sandvikin tulokset 17.8.2017

Mittauspiste	Keskiarvo / Maksimi (R_s)		
	SGX	Hanwei	Fis
Likainen ilma	123291 Ω / 528947 Ω	8474 Ω / 47528 Ω	612 Ω / 2019 Ω
Puhdistettu ilma	220132 Ω / 592353 Ω	37337 Ω / 43895 Ω	4279 Ω / 5730 Ω

Toisella mittauskerralla uusien suodattimien kanssa tehtyjen mittausten tulokset ovat taulukossa 3. SGX:n anturi oli jätetty pois testauksesta ja sen tilalle otettu Winsenin ja Figaron anturit sekä Environment click. Tuloksista nähdään, että keskiarvot ja maksimit olivat kaikilla paremmat puhdistettua kuin likaista ilmaa mitattaessa. Hanwein ja Fis'in tulokset eivät ole suoraan verrannollisia edelliseen Lahden mittauskertaan nähden, sillä

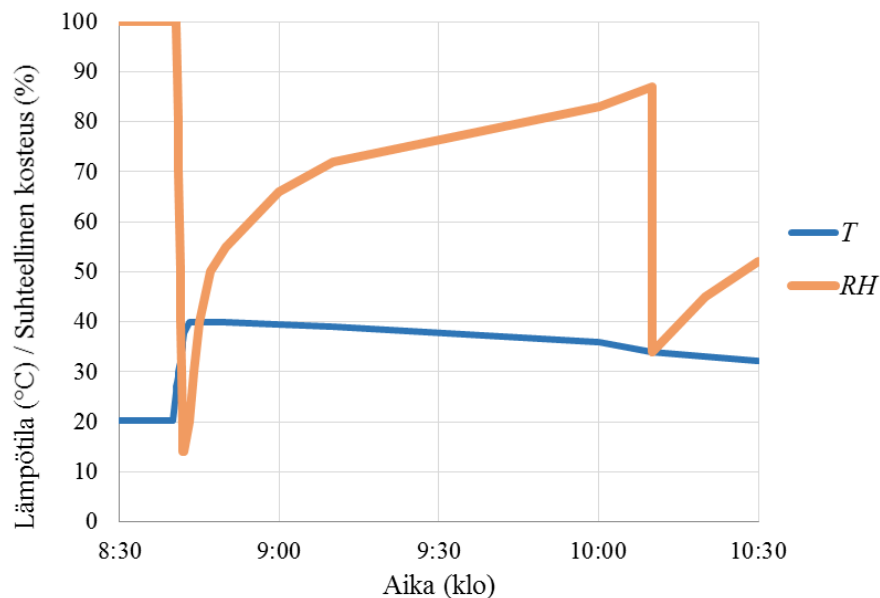
ilmanlaatuun ja näin ollen myös tuloksiin vaikuttaa oleellisesti käynnissä olleiden työstökoneiden määrä.

TAULUKKO 3. Lahden Sandvikin tulokset 25.10.2017

Mittauspiste	Keskiarvo / Maksimi (R_s)				
	Hanwei	Fis	Winsen	Figaro	Click
Likainen ilma	9317 Ω / 14208 Ω	1489 Ω / 2397 Ω	7381 Ω / 8351 Ω	2680 Ω / 3456 Ω	38927 Ω / 41037 Ω
Puhdistettu ilma	9567 Ω / 15859 Ω	2846 Ω / 4342 Ω	14361 Ω / 17234 Ω	3963 Ω / 4927 Ω	66708 Ω / 88721 Ω

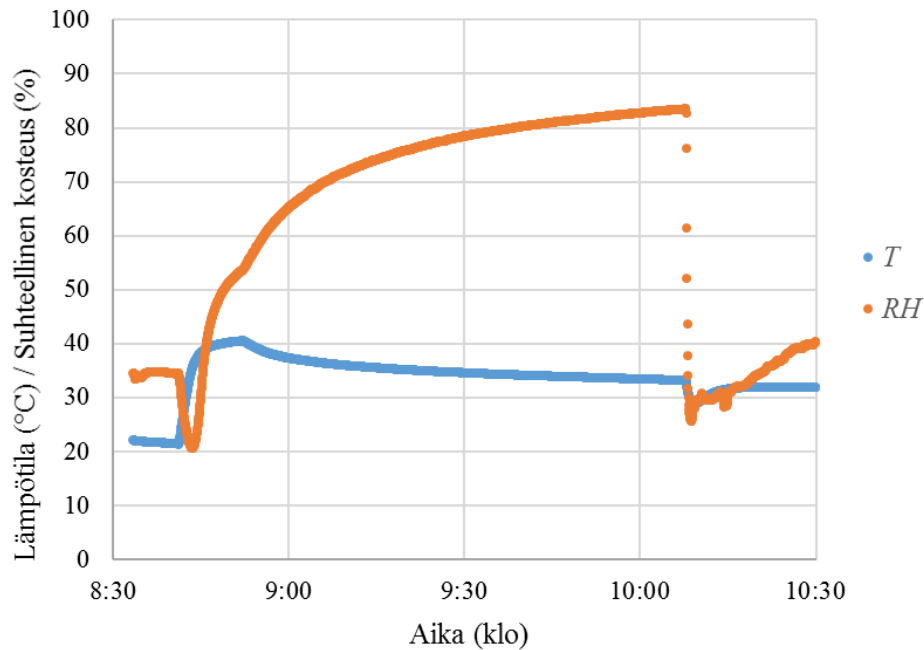
10.3 Olosuhdekaappi

Olosuhdekaapilla tarkisteltiin VOC-yhdisteiden lisäksi myös clickillä mitattavia lämpötilan T ja suhteellisen kosteuden RH (engl. relative humidity) arvoja. Näitä verrattiin kaapin omien antureiden mittaamiin arvoihin, joita pystyi tarkastelemaan laitteen etupaneelista. Kuviossa 3 ovat näin kerätyt lämpötilan (T) ja suhteellisen kosteuden (RH) arvot. Laite käynnistettiin klo 8.40 ja klo 10.10 kaapin ovi avattiin, jotta kosteutta saatiin laskettua. Fis-anturin R_{max} -arvo (21508 Ω) saatiin näiden mittauksien aikana.



KUVIO 3. Olosuhdekaapin lämpötila ja suhteellinen kosteus

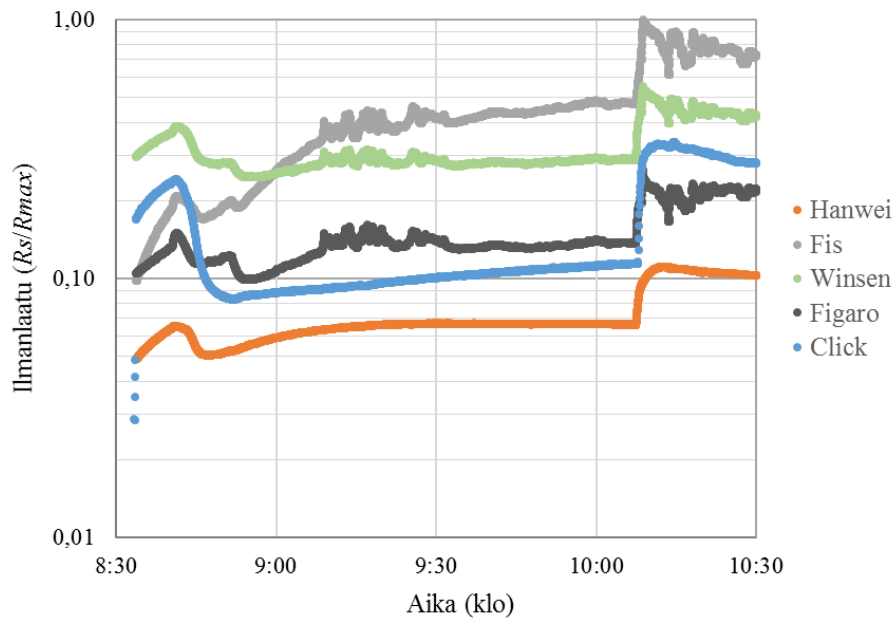
Kuviossa 4 ovat samanaikaisesti clickillä mitatut lämpötilan T ja suhteellisen kosteuden RH arvot. Arvot vastaavat hyvin toisiaan; varsinkin lämpötilojen käyrät ovat lähestulkoon identtiset ja niiden maksimiero mittauksen ajalta on noin $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Suhteellisen kosteuden arvo käynnistettäessä on ollut kaapin antureilla mitattuna 15 ja clickillä 20 %. Tätä edeltävä kaapin anturin 100 prosentin suhteellisen kosteuden arvo ei pidä paikkaansa. Laite näyttää kyseistä arvoa, kun se ei ole käytössä.



KUVIO 4. Clickillä mitatut lämpötila ja suhteellinen kosteus

Lämpötilan arvo on melko lähellä asetettua $40\text{ }^{\circ}\text{C}$:tta, mutta suhteellinen kosteus oli huomattavasti suurempi kuin toivottu 40 %. Maksimissaan sen arvo on noussut molemmilla antureilla noin 85 prosenttiin. Tämän jälkeen se on pudonnut oven aukaisemisen yhteydessä noin 30 prosenttiin ja noussut tämän jälkeen vielä kaapin antureiden datan perusteella noin 50 prosenttiin ja clickin mukaan 40 prosenttiin. Maksimiero kaapin ja clickin arvojen välillä oli 12 %.

Olosuhteiden vaikutusta antureihin voidaan tarkastella vertaamalla edeltäviä tuloksia VOC-antureiden käyriin (kuvio 5). Suhteellisen kosteuden arvoina käytettiin olosuhdekaapin lukemia. Tarkasteltavat hetket ovat kosteuden nousu 15 prosentista 85 prosenttiin, lasku tästä noin 30 prosenttiin ja lopuksi nouseminen 50 prosenttiin.



KUVIO 5. Antureilla mitatut VOC-yhdisteiden suhteelliset pitoisuudet

Taulukkoon 4 on koottu arvot tarkasteltavien muutoksien alku- ja loppuhetkiltä. Käynnistyksen jälkeisen tasaantumisen päätyttyä (klo 8.53) kaikkien antureiden tuloksien perusteella ilmanlaatu parani vähitellen oven avaamiseen asti, jonka seurauksena arvot nousivat huomattavasti. Lämpötilamuutos tällä hetkellä oli niin vähäinen (max. 5 °C), että sen ei oleteta vaikuttaneen tuloksiin.

TAULUKKO 4. Antureiden mitaamat suhteelliset pitoisuudet muutoshetkillä

Kellonaika	RH	Ilmanlaatu (R_s/R_{max})				
		Hanwei	Fis	Winsen	Figaro	Click
8.40	15 %	0,06	0,18	0,36	0,13	0,23
8.53	65 %	0,05	0,19	0,25	0,10	0,08
10.05	85 %	0,07	0,47	0,29	0,14	0,11
10.08	33 %	0,11	1,00	0,55	0,26	0,29
10.30	52 %	0,10	0,73	0,43	0,22	0,28

Tuloksista ei löydy suhteellisen kosteuden ja VOC-yhdisteiden suhteellisten pitoisuuksien välille systemaattista käyttäytymistä. Kosteuden noustessa välillä 65–85 %, suhteelliset pitoisuudet kasvavat, kuten myös oven avaamisen yhteydessä, jolloin kosteus putoaa 33 prosenttiin. Tämän jälkeen kosteuden noustessa antureiden tulokset pienenevät. Tästä johtuen oven avauksesta seuraava arvojen nousu johtuu oletettavasti kaapin sisäilmanlaadun parantumisesta eikä suhteellisen kosteuden tai lämpötilan muutoksesta.

10.4 Sandvik, Tampere

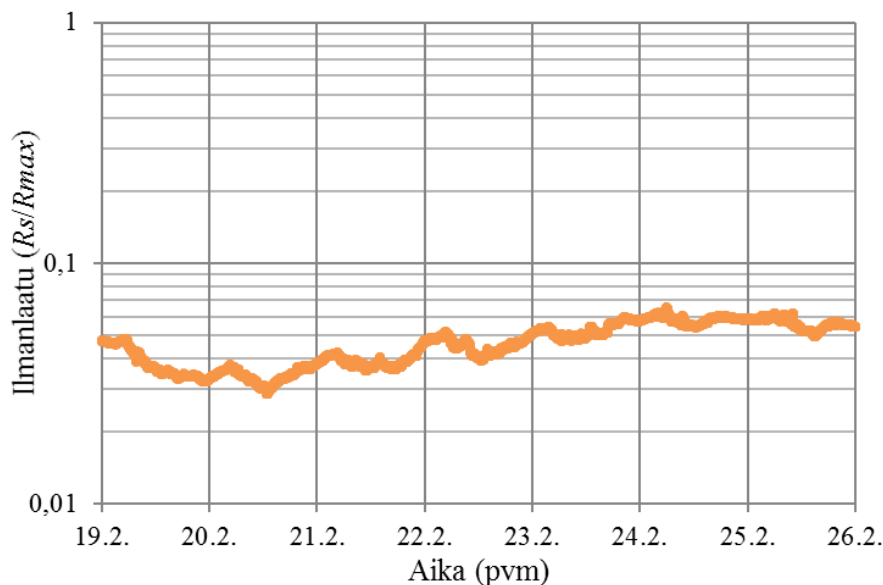
Tuloksissa oletettiin ilmenevän suodattimen vaihdon (16.3.) vaikutus puhdistetun ilman VOC-yhdisteiden suhteelliseen pitoisuuteen. Suodattimen vaihdolla haettiin myös toistettavuutta mittaustuloksille. Odotuksena oli, että uuden suodattimen vaihdon jälkeiset tulokset vastaisivat testin alussa käytetyn vastaavanlaisen uuden suodattimen tuloksia.

Liitteissä 3–7 esitellyt antureiden mitaamat ilmanlaadun muutoksien ajankohdat vastasivat toisiansa yleisesti ottaen hyvin. Poikkeavuudet tulivat ilmi isompien muutoksien yhteydessä, kuten esimerkiksi työstökoneen ollessa pois päältä.

10.4.1 Hanwei, puhdistettava ilma

Hanwein anturilla mitatut tulokset ovat liitteessä 3. Tuloksista erottuu selkeästi ajanjakso, jolloin ilmanlaatu on noussut paremmaksi (4.–15.4.). Työstökone ei ole ollut tänä aikana käytössä. Suhteellisen pitoisuuden arvot ovat alhaiset, mikä on toivottua ja oletettua mittauspisteestä johtuen.

Tarkasteltaessa tuloksia lyhyemmältä aikaväliltä, huomataan, että työstökoneen ajosykli eivät erotu selkeästi käyristä (kuvio 6). Syy tähän saattaa olla se, että järjestelmä on niin ilmatiivis, että kyseisen mittauspisteeseen ilmanvaihto on olematonta. Näin ollen epäpuhtauksien määrä säilyy pitempään samansuuruisena, kuin muissa mittauspisteissä.

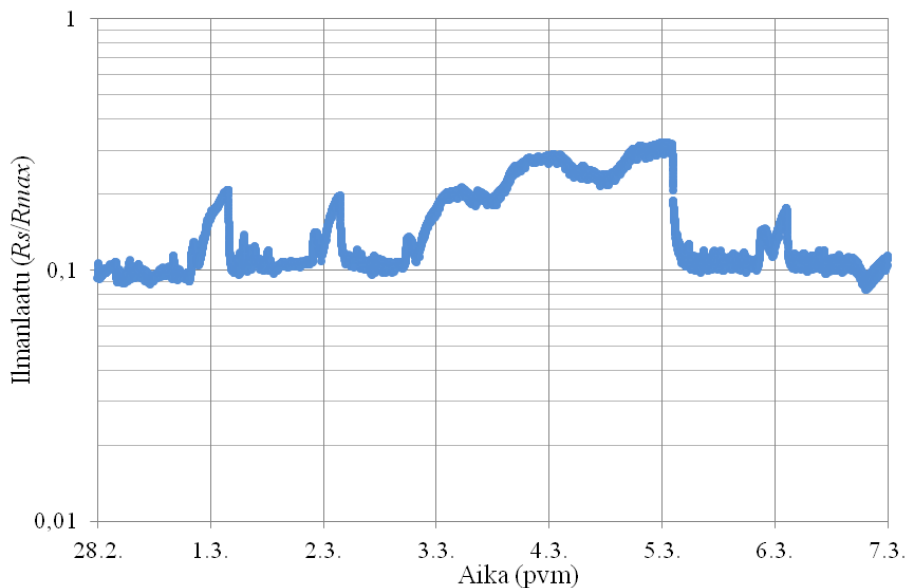


KUVIO 6. Ote Hanwein mittaustuloksista

10.4.2 Fis, Winsen ja Figaro, suodattimien väli

HEPA- ja aktiivihiilisuodattimen välissä mitanneiden antureiden tulokset olivat keskenään muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta hyvin samankaltaisia. Yhtenä oleellisena erona oli Winsenin anturin suhteellisen osuuden korkea keskitasokoko, joka oli noin 0,35 koko mittauksen ajan (liite 4). Lisäksi työstökoneen ollessa poissa käytöstä 4.4. eteenpäin, olivat kyseisellä anturilla mitatut arvot nousseet huomattavasti lähemmäksi asteikon maksimia kuin Fis:llä (liite 5) ja Figarolla (liite 6).

Suodattimien välistä mitatuista tuloksista voitiin jo erottaa työstökoneen ajosyklejä. Esimerkiksi kuviossa 7 voidaan havaita vuorokausien vaihtumisien ympärille sijoittuvat ilmanlaadun paranemiset. Työstökone ei ole oletettavasti ollut käytössä tällöin. 3. ja 4. päivä konetta on aaltoilevasta käyrästä perustellen käytetty lyhytaikaisesti, jonka jälkeen ilmanlaatu on voinut jatkaa nousuaan. Tämän jälkeen on palattu normaaliin ajorutiiniin ja ilmanlaatu on laskenut aikaisemmalle tasolle.



KUVIO 7. Ote Fis:in mittaustuloksista

10.4.3 Environment click, puhdistettu ilma

Clickillä mitatut VOC-yhdisteiden suhteellisen pitoisuudet löytyvät liitteestä 7. Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että mittauksen alussa järjestelmään asennetun suodattimen kapasiteetti olisi käytetty loppuun noin kahdessa viikossa. Jälkimmäisen suodattimen

vaihdon yhteydessä kapasiteetti vaikuttaisi olleen käytetty loppuun nopeammin. Tuloksien analysointitavasta ja vertailuarvosta riippuen, on suodattimen käyttöikä ollut tällöin huonoimmillaan vain viikon.

Clickin tulostuloksesta erottuu selkeästi ajanjakso, jolloin työstökone ei ole ollut käytössä (4.–23.4.). Tämän jakson ajalta mitatut tulokset ovat olleet toisiinsa verrattuna samansuuruisia. Koska työstökone ja puhdistusjärjestelmä eivät olleet käytössä, on click ilman virran puutteesta sekä osittain sijoittelunsa vuoksi mitannut tehtaan ilmanlaatua.

Clickillä mitattujen suhteellisen kosteuden (liite 8) ja lämpötilan (liite 9) tuloksia verrattiin toisiinsa sekä VOC-yhdisteiden pitoisuuksien kanssa. Suhteellisen kosteuden arvo on vaihdellut paljon, kun työstökone ei ole ollut käytössä. Vaihtelu ei näyttäisi vaikuttaneen muihin tuloksiin, vaan esimerkiksi lämpötila on säilynyt erittäin stabiilina. Vertailun lopputulos oli, että olosuhdekaapin tulosten mukaisesti vaikuttaisi, että ympäristön muutokset eivät ole suuremmin vaikuttaneet moduulin tuloksiin.

10.4.4 Vertailu

Suurin eroavaisuus antureiden kesken tuli tarkasteltaessa ajanjaksoa, kun työstökone ei ollut käytössä. Hanwein, Winsenin ja Figaron antureiden perusteella työstökone on otettu takaisin käyttöön jo 15.4., kun clickin ja Fis:in tuloksien pohjalta näin on tehty vasta 23.4. Figaron anturista ei voida varmuudella sanoa, kumpaan ryhmään se kuuluu. Tehtaalla paikanpäällä tehtyjen havaintojen perusteella, jälkimmäisten mittaustulokset pitävät paikkansa.

Seurantajärjestelmän kannalta tuloksista on tärkeää pystyä erottamaan, onko työstökone käytössä, ettei järjestelmä anna virheellisiä ilmoituksia ilmanpuhtauden muutoksista. Fis:in ja Figaron antureiden tuloksien tasoerot eivät erottuneet kyseisissä olosuhteissa tarpeeksi. Näiden antureiden käyttö järjestelmän jatkokehittämistä varten vaatisi niiden kanssa käytettävältä mikrokontrollerilta tarkempaa tulosten analysointia.

Tarkastelun kohteena ollut suodattimen vaihto näkyi ainoastaan click-moduulin tuloksissa. Tämän ja paikanpäällä esimerkiksi työstökoneen käynnissä olemisen suhteen tehtyjen havaintojen perusteella voitiin todeta, että clickillä mitatut tulokset pitävät hy-

vin paikkansa puhdistettua ilmaa mitattaessa. Jatkotutkimuksissa tullaan selvittämään, kuinka moduulin tulokset käyttäytyvät muissa järjestelmän pisteissä, eli erottuvatko esimerkiksi ajosykliä kuinka selkeästi mittausdatan joukosta.

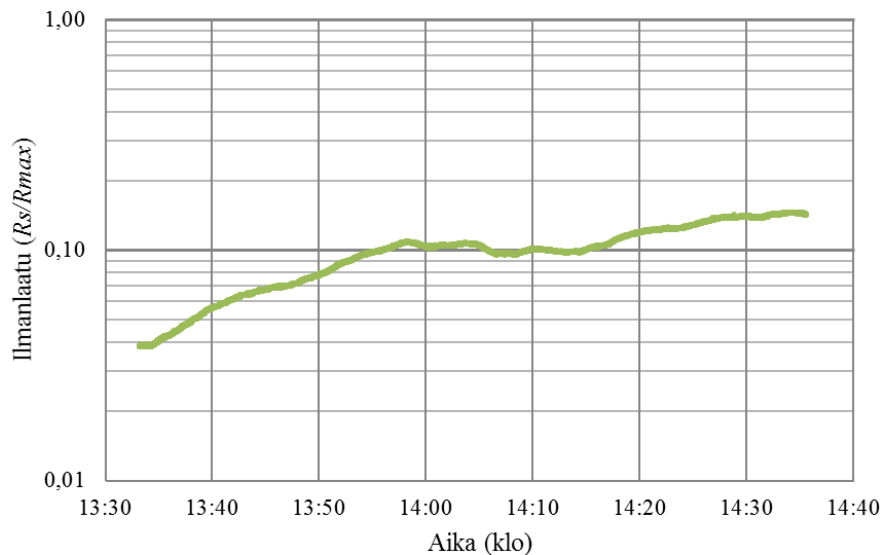
10.5 TTL

Työterveyslaitoksen tulokset olivat antureilla mitattuihin verrattuina samansuuntaisia. Taulukkoon 5 on koottu TTL:n Lahdessa tehtyjen mittauksien tulokset, sekä vertailukohteeksi Fis-anturin keskiarvot vastaavista mittauksista (Pihlajamaa 2017). TTL:n menetelmällä toivotaan ilmanlaadun kannalta mahdollisimman pieniä pitoisuuden arvoja, kun antureilla isompi R_S -arvo on parempi. Parhaimmat tulokset ovat molemmilla saavutettu puhdistettua ilmaa mitattaessa.

TAULUKKO 5. TTL:n tuloksien vertailu Fis:in tuloksiin (Pihlajamaa 2017)

Mittauskerta	Mittauspiste	TVOC-pitoisuus	Fis, keskiarvo (R_S)
Lahti, 17.8.2017	Likainen ilma	6000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	612 Ω
Lahti, 17.8.2017	Puhdistettu ilma	3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	4279 Ω
Lahti, 25.10.2017	Likainen ilma	5800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1489 Ω
Lahti, 25.10.2017	Puhdistettu ilma	130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2846 Ω

Fis:in tulos viimeisestä mittauskohteesta on TTL:n tulokseen verrattuna alhainen. Tämän oletetaan johtuvan siitä, että tällä mittauskerralla anturit siirrettiin likaiselta puolelta suoraan puhtaalle, jolloin arvot olivat lähtökohtaisesti hieman alemmat kuin edeltävällä mittauskerralla. Kuviossa 8 on Fis:illä tästä pisteestä mitattu data, jossa alussa resistanssi on ollut 1130 Ω ja lopussa 4222 Ω . Käyrän perusteella keskiarvo olisi todennäköisesti noussut, jos mittaus olisi kestänyt kauemmin.



KUVIO 8. Fis-anturi, Lahti 25.10.2017, puhdistettu ilma

Tuloksien osoittaututtua samansuuntaisiksi Lahdessa, hyödynnettiin TTL:n mittaamia arvoja Tampereen testissä lähinnä aktiivihiilisuodattimen käyttöiän tarkasteluun. Työterveyslaitoksen mittaamat puhdistetun ilman tulokset ovat taulukossa 6, johon lisättiin samassa pisteessä mitanneen clickin tulokset. Suodattimen läpäisy oli noin 140 % viimeisellä mittauskerralla, eli suodattimien välistä mitatun ilman TVOC-pitoisuus on ollut vähemmän kuin puhdistetun. Tämä tarkoittaa sitä, että suodattimen kapasiteetti on ollut käytetty loppuun kahden viimeisen mittauskerran välillä. (Säämänen 2018.)

TAULUKKO 6. TTL:n tuloksien vertailu clickin tuloksiin (Säämänen 2018)

Pvm	TVOC-pitoisuus	Click, keskiarvo (R_s)
16.2.2018	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	426595 Ω
23.2.2018	1300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	26456 Ω
2.3.2018	2500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	13089 Ω
9.3.2018	3500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	19130 Ω

Tuloksien trendit vastaavat toisiansa viimeistä kertaa lukuun ottamatta. Ero saattaa johtua siitä, että TTL:n mittaukset ovat kestäneet tunnin, kun taas clickin keskiarvot ovat laskettu aikaväliltä 9.00–15.00. Keskiarvoja tarkasteltiin pidemmältä aikaväliltä, koska tarkkaa TTL:n mittauskellonaikaa ei tiedetty. Clickin tuloskäyrien (liite 7) perusteella suodattimen kapasiteetti olisi käytetty loppuun viimeistään 28.2., mutta moduulin tulos-
tasot perustuvat kuitenkin vain muutamiin mittauksiin.

11 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

VOC-mittauksien yhteydessä tehty kosteuden ja lämpötilan seuranta osoitti suurella todennäköisyydellä sen, että anturin mittaamat muutokset ovat toivotun mukaisesti VOC-yhdisteiden pitoisuuksien muutoksesta johtuvia, eivätkä olosuhteista aiheutuvia. Tuloksista kävi lisäksi ilmi, että nykyinen aktiivihiilisuodatin ei ole kustannustehokas, sillä se jouduttaisiin vaihtamaan liian usein. Tästä johtuen projektissa siirrytään testaamaan toisenlaista kemiallista suodatinta, jonka oletetaan kestävän jopa vuoden (Pihlajamaa 2017).

Tulosten perusteella VOC-puolijohdeanturit soveltuvat ilmanpuhdistusjärjestelmän toiminnan seurantaan. Seurantajärjestelmän jatkokehitystä varten valittiin Environment click -moduuli. Perusteluina olivat lupaavien tuloksien lisäksi helppo kytkentä sekä käyttöönotto muihin antureihin verrattuna ja mahdollisuus seurata samalla suhteellista kosteutta sekä lämpötilaa. Seuraavaksi projektissa tullaan testaamaan click-moduuleja jokaisessa järjestelmän mittauspisteessä uuden suodatinmallin kanssa. Tämän jälkeen ne tullaan todennäköisesti integroimaan puhdistuslaitteiston seurantajärjestelmään.

LÄHTEET

Camfil. Nd. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC). Luettu 16.4.2018.

<https://www.camfil.fi/Suodatintekniikkaa/Sisailman-laatu-IAQ/Saastelahteet/Haihtuvat-orgaaniset-yhdisteet-VOC/>

Edaphic. N.d. The semiconductor gas sensing technique. Luettu 16.4.2018.

<http://www.edaphic.com.au/gas-detection-encyclopedia/semiconductor-sensors/>

Hengitysliitto. N.d. VOC-yhdisteet. Luettu 16.4.2018.

<https://www.hengitysliitto.fi/fi/sisailma/sisailma-asiat-sisailmaongelmat/kaasumaiset-epapuhautaudet/voc-yhdisteet>

InvestmentMine. N.d. 5 Year Aluminum Prices and Price Charts. Luettu 17.4.2018.

<http://www.infomine.com/investment/metal-prices/aluminum/5-year/>

Maria Nordin. 2015. Katseet kalusteiden M1-luokitukseen. Luettu 16.4.2018.

<https://www.sisailmauutiset.fi/maaraykset/katseet-kalusteiden-m1-luokitukseen/>

Pihlajamaa, P. Tampereen ammattikorkeakoulu. 2017. Sandvik Lahti tulokset. Sähköpostiviesti. Luettu 10.5.2017.

Säämänen, A. 2016. Ilmansuodatuksen puutteet aiheuttavat hengitystieoireita konepajoissa. Luettu 16.4.2018.

<https://www.ttl.fi/ilmansuodatuksen-puutteet-aiheuttavat-hengitystieoireita-konepajoissa/>

Säämänen, A. Työterveyslaitos. 2018. Aktiivihiihen kesto aika Tampereella. Sähköpostiviesti. Luettu 10.5.2018.

LIIITEET

Liite 1. Arduino Nanon ohjelmakoodi

```

#include <SoftwareSerial.h>

//
volatile uint32_t mittausvali = 1;
volatile uint32_t kuormavastus = 10000;
//

volatile uint32_t ss = mittausvali-1;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  DDRC = B00000000;
  DIDRO = B00011110;
  noInterrupts();
  TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0;
  TCNT1 = 0;
  OCR1A = 62550;
  TCCR1B |= (1 << WGM12);
  TCCR1B |= (1 << CS12);
  TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);
  interrupts();
  Serial.print("test\r\n");
}

ISR(TIMER1_COMPA_vect){
  ss++;
  if (ss == mittausvali){
    ss = 0;
    static uint32_t id = 0;
    id++;
    Serial.print(id);
    Serial.print(" ");
    for(uint8_t kanava = 4; kanava <= 7; kanava++) {
      float jannite;
      float resistanssi;
      lue_voimakkuus(kanava, &jannite, &resistanssi);
      Serial.print(jannite);
      Serial.print(' ');
      Serial.print(resistanssi);
      Serial.print(" ");
    }
    Serial.write("\r\n");
  }
}

void loop(){}

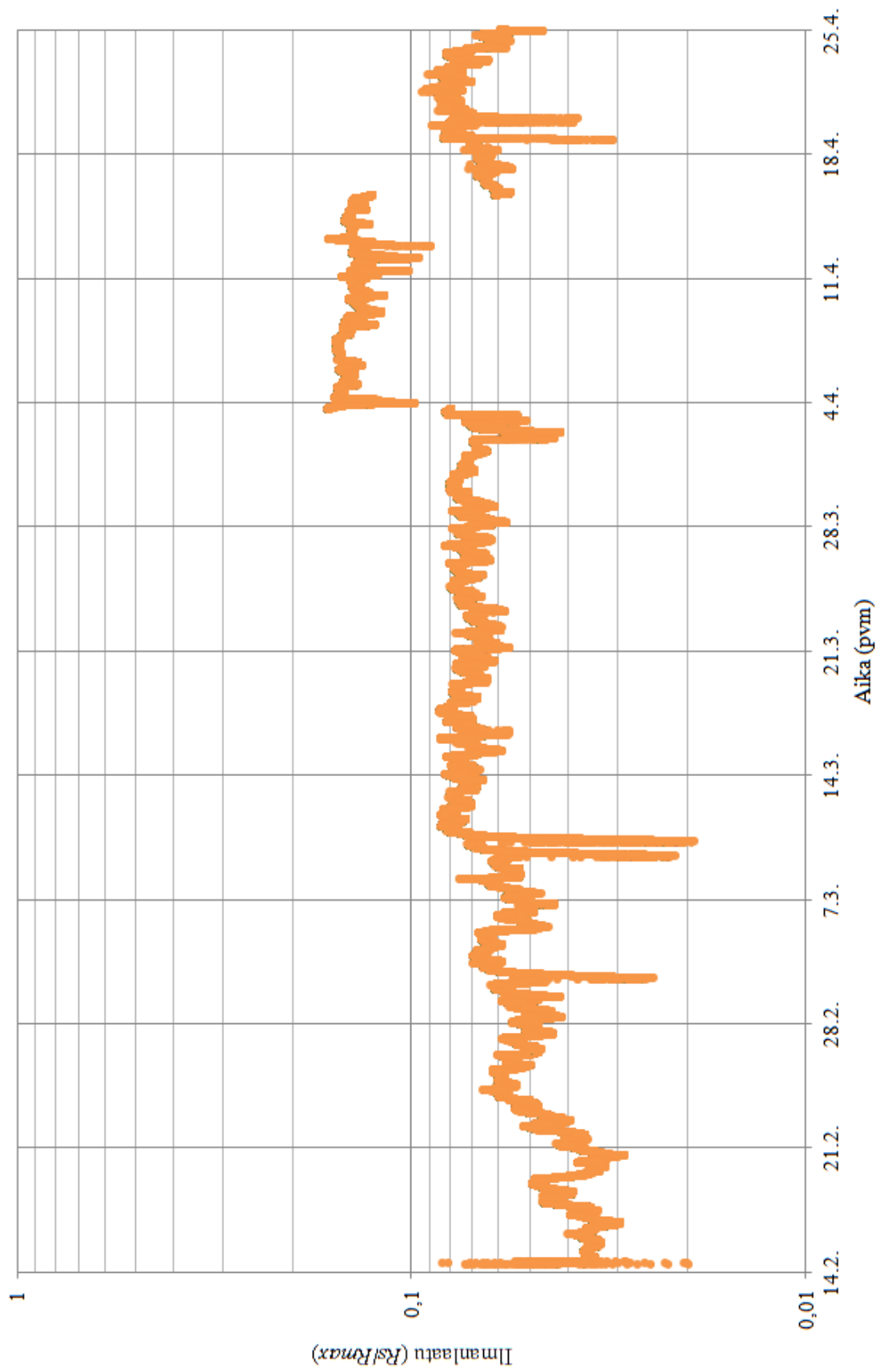
void lue_voimakkuus(uint8_t kanava, float *jannite, float *resistanssi){
  if(kanava > 7) {
    return;
  }
  ADMUX = (B01000000 | kanava);
  ADCSRA |= B01000000;
  while (0 != (ADCSRA & B01000000));
  float adc = (ADC / 1024.0) * 5.0;
  *resistanssi = (5-adc)/(adc/kuormavastus);
  *jannite = adc;
}

```

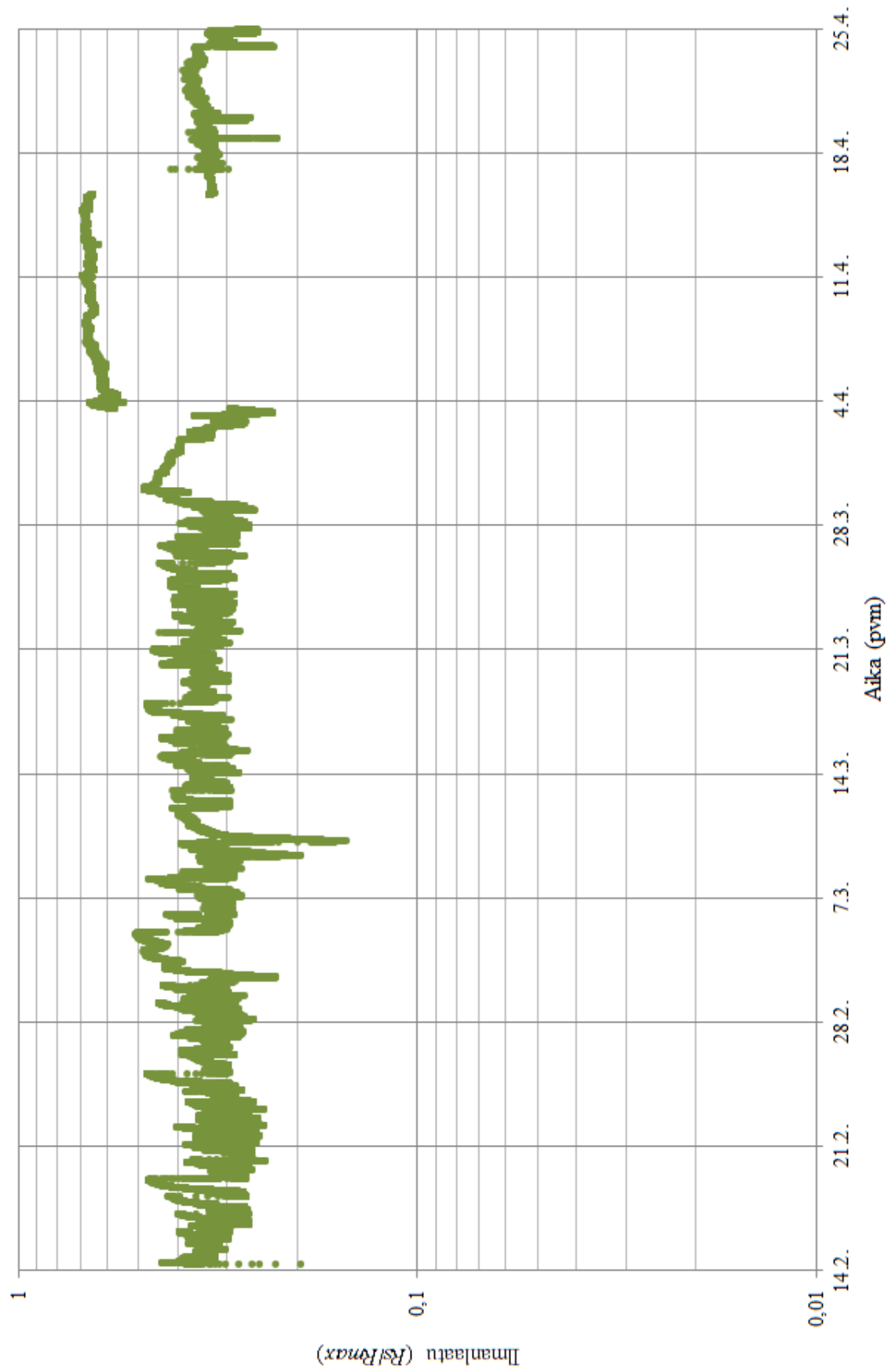
Liite 2. Ote Boschin ohjelmakoodikirjastosta

```
void output_ready(int64_t timestamp, float iaq, uint8_t iaq_accuracy, float temperature, float humidity,
float pressure, float raw_temperature, float raw_humidity, float gas, bsec_library_return_t bsec_status)
{
    Serial.print(timestamp/1e6);
    Serial.print(" T: ");
    Serial.print(temperature);
    Serial.print(" rH: ");
    Serial.print(humidity);
    Serial.print(" pressure: ");
    Serial.print(pressure);
    Serial.print(" IAQ: ");
    Serial.print(iaq);
    Serial.print(" (");
    Serial.print(iaq_accuracy);
    Serial.print(")");
    Serial.print(" raw_hum: ");
    Serial.print(raw_humidity);
    Serial.print(" raw_temp: ");
    Serial.print(raw_temperature);
    Serial.print(" raw_gas: ");
    Serial.println(gas);
}
```

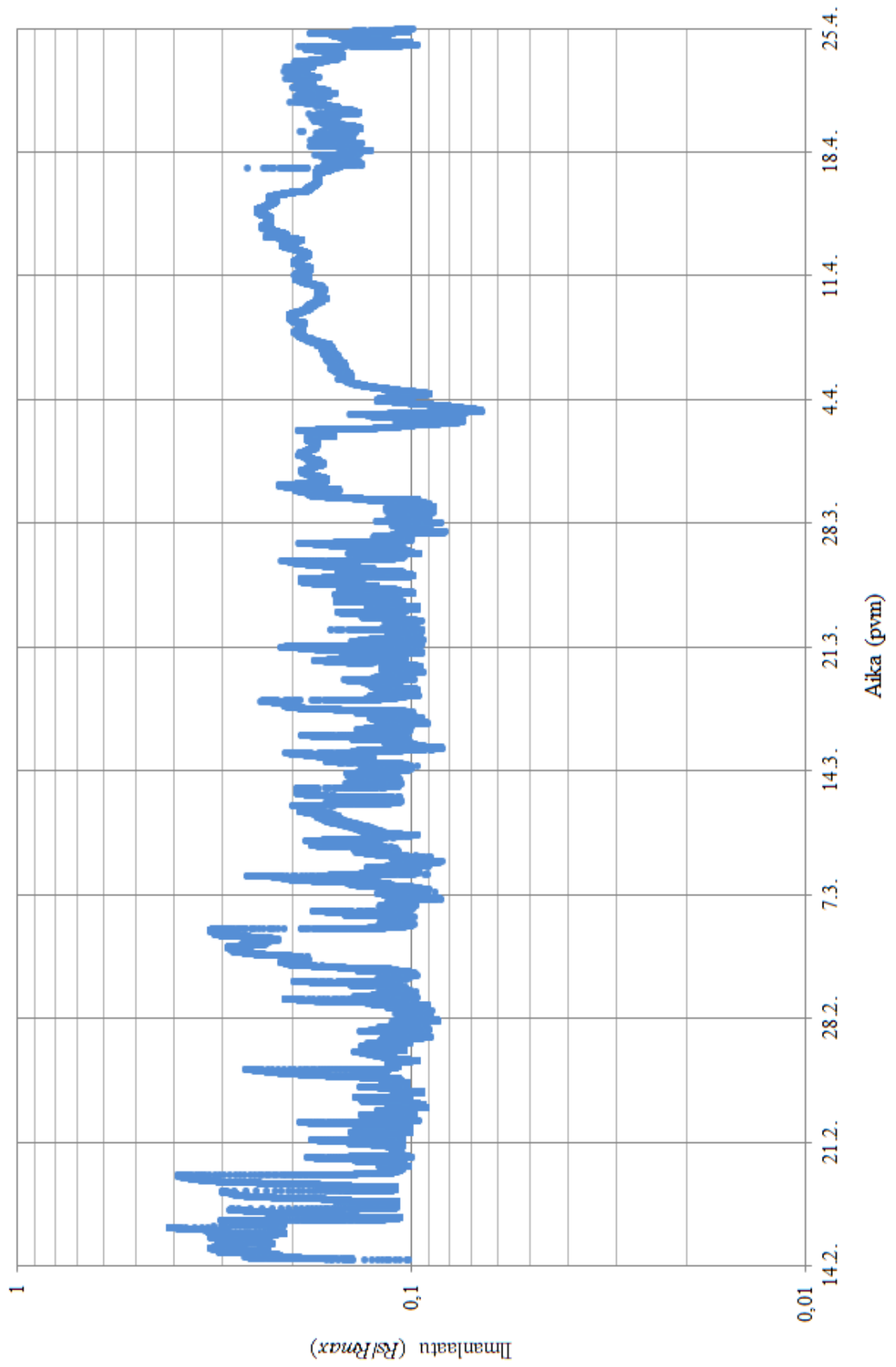
Liite 3. Tampereen testi, Hanwei, VOC-yhdisteet



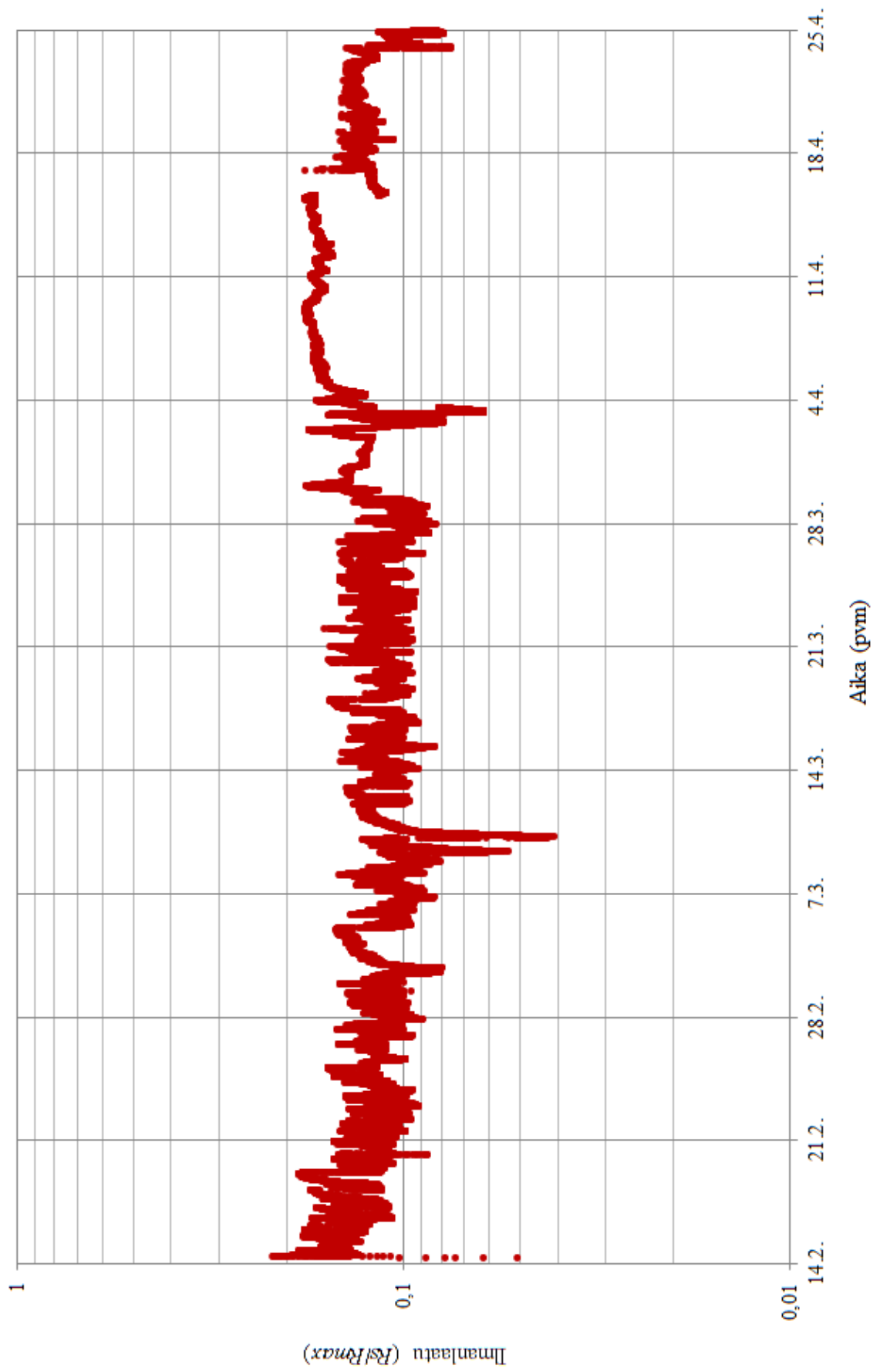
Liite 4. Tampereen testi, Winsen, VOC-yhdisteet



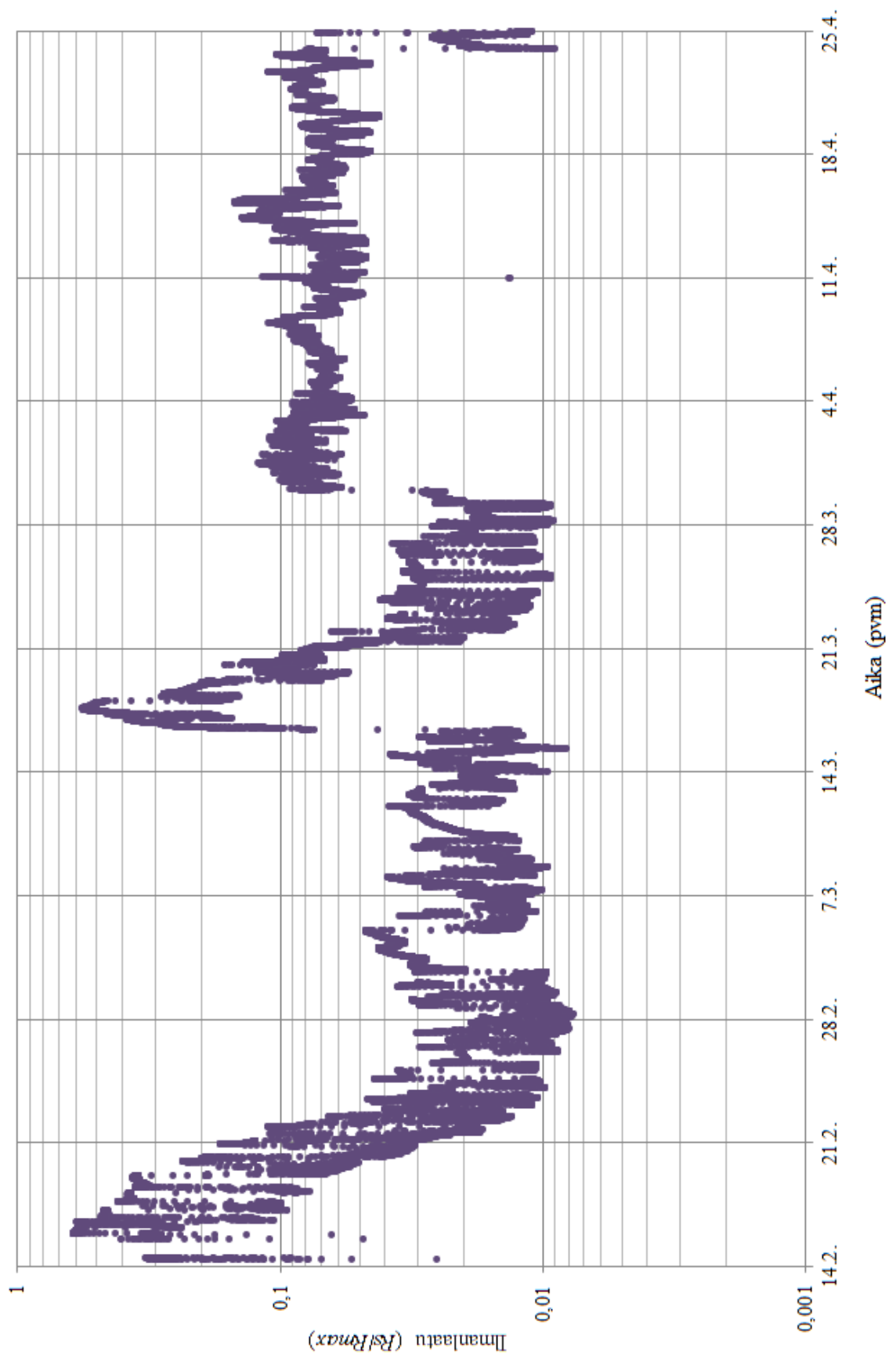
Liite 5. Tampereen testi, Fis, VOC-yhdisteet



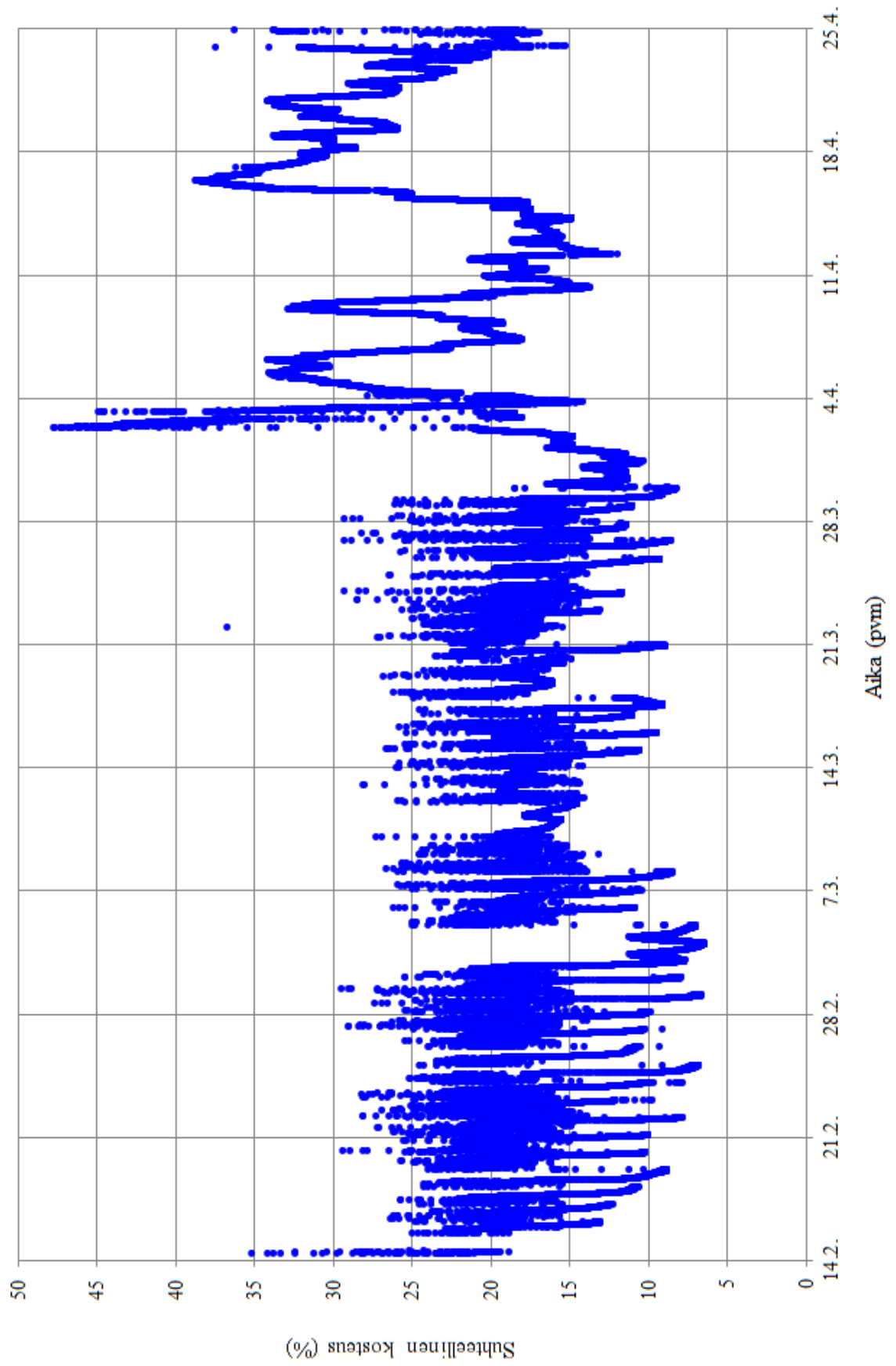
Liite 6. Tampereen testi, Figaro, VOC-yhdisteet



Liite 7. Tampereen testi, Environment click, VOC-yhdisteet



Liite 8. Tampereen testi, Environment click, suhteellinen kosteus



Liite 9. Tampereen testi, Environment click, lämpötila

