

Opinnäytetyö Turun AMK

Elektroniikan koulutusohjelma | Elektroniikkasuunnittelu

2019

Mikko Koskinen

VOC- SISÄILMANLAATUMITTAUS

TURKU AMK 
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Mikko Koskinen

VOC-SISÄILMANLAATUMITTAUS

Mittalaitteisiin ja anturitekniikkaan erikoistuneelle Envic Oy:lle tehtiin opinnäytetyö, jossa tutkittiin haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) terveysvaikutuksia sisäilmassa ja toteutettiin VOC-arvoille mittaussovellus, joka integroitiin Envicin Multisens-laitteeseen sopivaksi.

VOC-pitoisuuksien haitallisuudesta havaittiin tutkimuksissa erilaisia tuloksia eikä tarkkaa rajaa TVOC-pitoisuudelle voitu määrittää. Huonon sisäilmanlaadun raja-arvon todettiin olevan 400-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tavoitearvon ollessa alle 200-300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Opinnäytetyössä päädyttiin käyttämään Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen 545/2015 toimenpideraja-arvoa 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sekä anturivalmistaja Sensirionin asettamaa arvoa 220 ppb huonon sisäilmaston raja-arvona.

TVOC-puolijohdeanturit rajattiin speksien mukaan kahteen sopivimpaan, jotka olivat AMS IAQ-core ja Sensirion SGP30. Alkutestausten jälkeen päädyttiin prototyypissä käyttämään Sensirionin SGP30-anturia, jolle rakennettiin regulaattori- ja logiikkamuunnospiirit ja anturi integroitiin Multisens-laitteen koteloon.

Prototyyppiä rakennettiin 3 kappaletta ja niitä testattiin toimistoympäristössä. Liitteenä olevista trendikäyristä voidaan päätellä, että anturit näyttivät samankaltaisia arvoja ja arvot olivat tyypillisiä toimistoympäristön lukemia. Anturien lukemien havaittiin kuitenkin riippuvan suuresti käynnistysympäristön vaikutuksesta, koska anturi korjasi omia arvojaan käyttäen niin sanottua automatic baseline correction -algoritmia estääkseen anturin arvojen vääristymisen ajan myötä. Anturin havaittiin toimivan parhaiten, kun se käynnistettiin puhtaassa ulkoilmassa, jossa voitiin olettaa TVOC-arvojen olevan lähellä nollaa. Parhaimmat tulokset anturista saatiin, kun anturi altistettiin vähintään 15 minuuttia puhtaalle ulkoilmalle, minkä jälkeen laite vietiin todelliseen mittaustaikansa sisätiloihin.

TVOC-mittauksessa käytetyn anturin soveltuvuudesta tarkempiin mittauksiin ei voitu suoraan vetää johtopäätöksiä, koska kyseessä oli prototyyppi, eikä valmis laite. Testausten perusteella SGP30 soveltuu TVOC-pitoisuuksien mittaukseen, mutta samoihin tarkkuuksiin anturilla ei päästä kuin esimerkiksi laboratoriotestein analysoidun TVOC-pitoisuuden määrittelyssä. Anturilla voidaan kuitenkin havaita VOC-kaasujen kohonnuttua pitoisuutta sisäilmastossa ja TVOC-arvoa voidaan käyttää suurpiirteisenä sisäilmanlaadun mittarina CO₂-pitoisuuden ohella. Anturilla voidaan myös paikallistaa mahdollisia VOC-ongelmakohtia sisätiloissa, jotta kalliita VOC-laboratoriomittauksia ei tarvitse tehdä turhaan.

ASIASANAT:

VOC, sisäilmanlaatu, anturit, TVOC, sisäilmamittaus, sisäilmasto

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Electronic design

2019 | 36 pages + 1 appendice

Mikko Koskinen

VOC INDOOR AIR QUALITY MEASUREMENT

Envic Ltd. is a company specialized in measurement and sensor technology. Envic Ltd. wanted a measurement unit which can measure volatile organic compounds (VOC) and a prototype using metal oxide sensor integrated to Envics Multisens indoor air quality measurement application.

Studies referenced in this thesis ranged widely about volatile organic compounds and their impact on human health and indoor air quality. Bad indoor air quality values in the studies ranged from 400 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and desired indoor air quality TVOC values ranged from 200 to 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Desired TVOC value used in this thesis is 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ used by the Ministry of Social Affairs and Health in Finland in their act STM 545/2015 and sensor manufacturer Sensirions own limit value of 220 ppb.

Two TVOC MOS sensors qualified to the testing based on their specifications. Sensors that were selected were AMS IAQ-core and Sensirion SGP30. After first tests with Arduino Uno development board SGP30 was selected for the prototype. For the first tests voltage regulator and logic level shifting boards were designed for the SGP30. After successful tests with Arduino the sensor was integrated to the Multisens application.

Three units of the Multisens application with the TVOC measurement were built and they were tested in the office environment. In the appendices there are trends of the TVOC measurement values, and the values matched the theoretical values of TVOC in office environments. SGP30 uses an automatic baseline correction algorithm to prevent contamination of the sensor have an impact on the TVOC absolute values. It was noticed that because of the automatic baseline correction algorithm the values were different based on where the sensor was powered on. The sensor performed the best when powered on in the clean air where TVOC value was assumed to be near zero and after fifteen minutes the sensor was moved to the real measurement environment.

After tests it was not clear whether the sensors TVOC values were the precise absolute values because there was not absolute reference value available. In the tests SGP30 performed well and it is a suitable sensor for measuring TVOC values from indoor air, but it was not as accurate as laboratory testing. It was declared that SGP30 TVOC sensor is suitable for detecting VOCs in indoor air and the TVOC value is a good indicator to determine indoor air quality along with the carbon dioxide value.

KEYWORDS:

VOC, Indoor air quality, TVOC, IAQ measurement, sensors

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	8
2 SISÄILMANLAATU	9
2.1 Sisäilmaston raja-arvoja	9
2.1.1 Lämpötilan raja-arvot	9
2.1.2 Radon- ja pienhiukkaspitoisuuden raja-arvot	11
2.1.3 Hiilidioksidipitoisuuden raja-arvot	12
2.1.4 TVOC-pitoisuuden raja-arvot	12
2.2 Terveellinen sisäilmasto	12
2.3 Sisäilmanlaadun mittaaminen	13
3 SISÄILMASTON HAITALLISET YHDISTEET	15
3.1 Radon ja pienhiukkaset	15
3.2 Hiilidioksidi	15
3.3 VOC-yhdisteet	16
3.3.1 Liuottimet, maalit ja puhdistusaineet	17
3.3.2 Muovimattojen emissiot	17
3.3.3 Suurien VOC-pitoisuuksien terveysongelmat	18
3.4 Kosteusvauriot ja mikrobikasvustot	18
4 VOC-ANTURIEN TESTAUS	20
4.1 Anturien testaus ja valinta	20
4.1.1 AMS IAQ-core	20
4.1.2 Sensirion SGP30	21
4.2 Tiedonsiirto I2C-väylän kautta	23
4.3 Testaus Arduino Uno -kehitysalustalla	24
4.4 Testaus Envicin DAT1-kortilla	25
5 PROTOTYYPIN RAKENNUS JA TESTAUS	26
5.1 Regulaattoriipiiri ja logiikkamuunnos	26
5.2 Anturin alustus ja tiedonsiirto	26
5.3 Anturi asennus piirilevylle ja kotelointi	27
5.4 Regulaattoriipiirikortin kotelointi	28

6 PROTOTYYPIN LOPPUTESTAUS	31
6.1 Omat lopputestaukset ja tulokset	32
6.2 Mittausdatan luku ja trendikäyrät	32

7 LOPUKSI	34
7.1 TVOC-mittauksen merkitys sisäilmanlaatumittauksessa	34
7.2 TVOC-mittauksen luotettavuus	35
7.3 Sovelluksen jatkokehitys	35

LÄHTEET	37
----------------	-----------

LIITTEET

Liite 1. Testattavien laitteiden trendikäyrät.

KAAVAT

Kaava 1. Regulaattorin ulostulojännitteen laskentakaava [13].	22
---	----

KUVAT

Kuva 1. S1-luokituksen lämpötilamääreet [1].	10
Kuva 2. S2-luokituksen lämpötilamääreet [1].	10
Kuva 3. S3-luokituksen lämpötilamääreet [1].	11
Kuva 4. Lohkokaaviokuva anturin kytkennöistä.	21
Kuva 5. Lohkokaavio SGP30-anturin kytkennöistä.	22
Kuva 6. Regulaattoriin kytkentäkaavio.	23
Kuva 7. Koekytkentälevylle rakennettu regulaattoriin.	23
Kuva 8. Anturien vertailua tietokoneen näytöllä sarjaportin kautta.	25
Kuva 9. Lohkokaaviokuva prototyypin kytkennöistä.	27
Kuva 10. Anturikortin koteloitinta metalliputkessa.	28
Kuva 11. Regulaattoriin ja logiikkamuuntimen sijoitus kotelossa.	29
Kuva 12. Valmis Multisens-laite koteloituna.	30
Kuva 13. TVOC-arvojen (ppb) trendikäyrä tulostettuna Meslog-ohjelman kautta	33
Kuva 14. 3D-mallinnettu kuva anturikortista.	35

TAULUKOT

Taulukko 1. Sensirionin antamat viitearvot TVOC-pitoisuuksille (ppb) [14].

31

KÄYTETYT LYHENTEET

ABC	Automatic baseline correction -algoritmi
I2C	Yksinkertainen tiedonsiirto- ja ohjausväylä
IAQ	Sisäilmanlaatu
IAQ-core	AMS:n valmistama ilmanlaatuanturi
NTP	Normaaliolosuhteet
PM2.5	Alle 2,5 µm:n kokoiset pienhiukkaset
PM10	Alle 10 µm:n kokoiset pienhiukkaset
PPB	Parts per billion (miljardisosa)
PPM	Parts per million (miljoonasosa)
RTC	Reaaliaikakello
SBS	Sairas rakennus -oireyhtymä
SCL	I2C-väylän kellolinja
SDA	I2C-väylän datalinja
SGP30	Sensirionin valmistama SGP30-anturi (VOC)
SL2008	Sisäilmastoluokitus vuodelta 2008 (Sisäilmayhdistys ry)
SVOC	Puolihaihtuvat orgaaniset yhdisteet
TVOC	VOC-yhdisteiden kokonaispitoisuus
TXIB	2,2,4-trimetyyli-1,3pentaalidioli di-isobutyraatti
USB	Sarjaväylä oheislaitteiden kytkemiseksi tietokoneeseen
VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet
VVOC	Erittäin haihtuvat orgaaniset yhdisteet

1 JOHDANTO

Nykyaikana ihmiset viettävät suuren osan ajastaan sisällä, joten sisäilmanlaadun tulisi olla mahdollisimman hyvälaatuista sekä työpaikalla että kotona. Sisäilmaan vaikuttavia asioita on monia, kuten lämpötila, kosteus, pienhiukkaset ja erilaiset kaasut, joita sisä- ja ulkoilmassa on. Ilmastoinnilla pystytään poistamaan sisäilmasta epäpuhtauksia, mutta ilmastoinnin lisääminen taas lisää ulkoilmasta tulevia epäpuhtauksia sisäilmassa. Mittaamalla sisäilmanlaatua voidaan tuloksista päätellä, tarvitseeko ilmastointia lisätä. Tärkeimpinä suureina monissa sisäilmanlaadun raja-arvoissa käytetään lämpötilan, hiilidioksidipitoisuuden, radonin pienhiukkasten (PM2.5 ja PM10) ja VOC-yhdisteiden arvoja.

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) kokonaispitoisuuden (TVOC) määrittäminen sisäilmasta on hankalaa puolijohdeantureilla, eikä valmiita ratkaisuja ei ole ollut juurikaan saatavilla. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä Envic Oy:lle mittalaitesovellus, jolla voidaan suhteellisen tarkasti mitata ja tallettaa muistiin TVOC-arvo sisäilmasta. Anturin valinta osoittautui mutkikkaaksi, koska monet anturit eivät vastanneet laatuvaatimuksia ja arvot eivät olleet absoluuttisia arvoja vaan ilmaisivat TVOC-pitoisuuden muutosta.

Prototyypin rakennus aloitettiin vertailemalla VOC-antureita käyttäen Arduino Uno -kehitysalustaa, jolle tehtiin yksinkertainen koodi arvojen tulostamiseksi I2C-väylän kautta. Testattavana olivat AMS:in IAQ-core ja Sensirionin SGP30 VOC-anturit. Kyseiset anturit valikoituivat sillä perusteella, että niissä oli I2C-väyläinen tiedonsiirtoprotokolla ja ne olivat suhteellisen edullisia (alle 50 euroa vuonna 2019).

Lopuksi prototyyppiin valittiin anturi SGP30 ja se integroitiin Envicin omaan laitteeseen, jossa oli myös paine-, lämpötila-, kosteus- ja hiilidioksidianturit. Anturille toteutettiin myös piirilevylle regulaattori ja logiikkamuunnin, jotta tulokset saatiin luettua 3,3 V:n käyttöjännitteisellä prosessorilla. Anturi todettiin toimivaksi laitteessa, mutta anturin arvojen absoluuttisuutta on vaikea arvioida kunnollisten kalibroitukaasujen puuttuessa.

Opinnäytetyön ensimmäiset luvut käsittelevät sisäilmanlaatua yleisesti ja VOC-pitoisuuksien terveysvaikutuksia tutkimusten perusteella. Tutkimukset esittävät ohjearvoja sisäilmanlaadun mittareiksi ja näitä arvoja käytetään opinnäytetyön myöhemmissä vaiheissa viitearvoina. Luvuissa 4, 5 ja 6 käsitellään puolijohdeanturien testausta sekä prototyypin rakennusta ja testausta. Lopuksi tarkastellaan prototyypin soveltuvuutta sisäilmanlaadun mittaamiseen ja esitetään kehitysideoita.

2 SISÄILMANLAATU

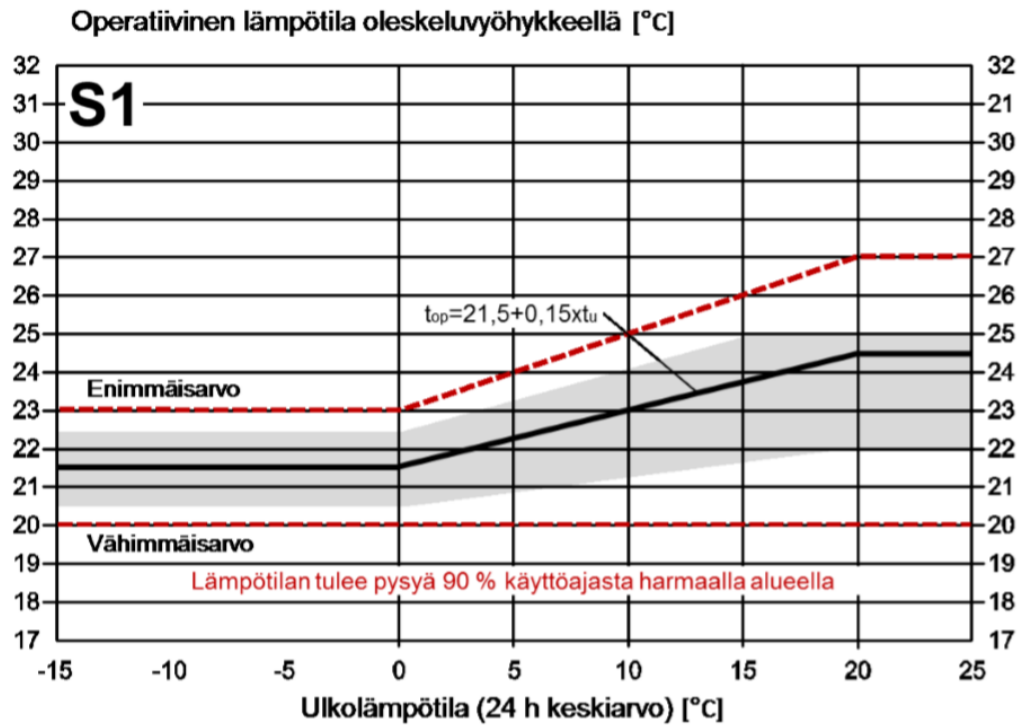
Nykyisin ihmiset viettävät suuren osan ajastaan sisätiloissa, joten sisäilmanlaadulla on merkittäviä vaikutuksia sekä viihtyvyyden että terveyden kannalta. Sisäilmanlaadulle on tehty maailmalla monia eri raja-arvomäärytyksiä, mutta tässä opinnäytetyössä perehdytään pääasiallisesti Suomessa käytettäviin standardeihin, jotka Suomen terveysturvallisuusviranomaiset ovat säätäneet. Työympäristöissä vietetään suuri osa ajasta, joten ilmanlaadun merkitys myös työpaikoilla on terveyden kannalta tärkeää. Tässä opinnäytetyössä keskitytään lähinnä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) vaikutuksiin terveyden kannalta, ja miten näitä yhdisteitä voidaan mitata anturien avulla.

2.1 Sisäilmaston raja-arvoja

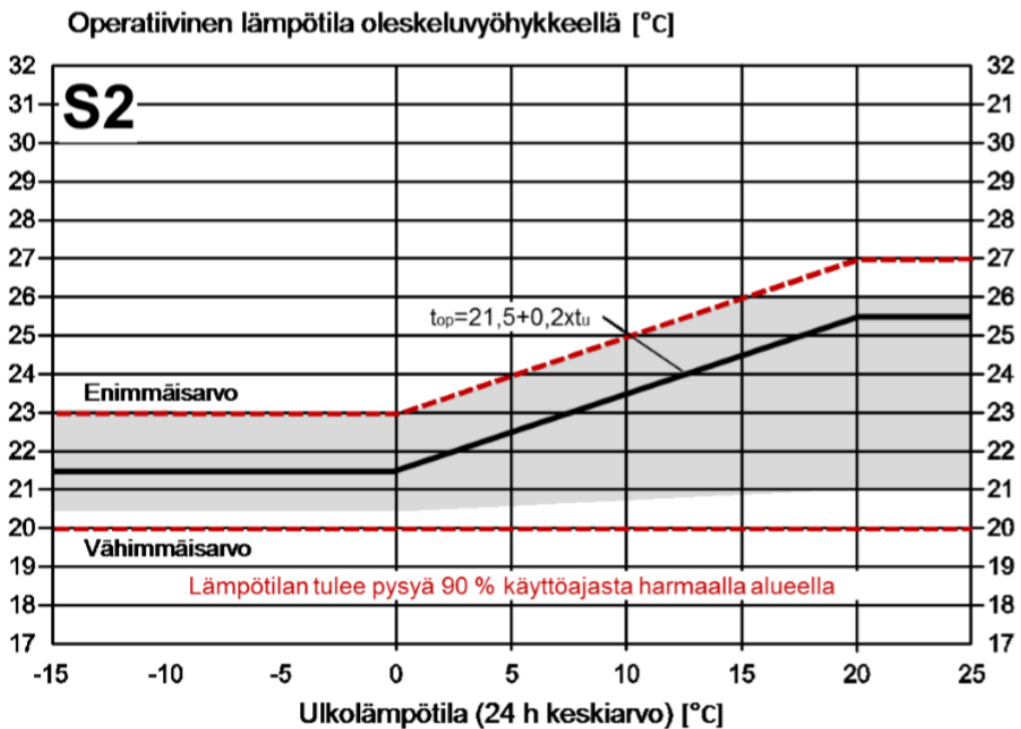
Tässä opinnäytetyössä perehdytään tarkemmin Sisäilmayhdistys ry:n tekemään 2008 julkaistuun sisäilmastoluokitukseen, johon kuuluu kolme luokkaa S1: Yksilöllinen sisäilmasto, S2: Hyvä sisäilmasto ja S3: Tyydyttävä sisäilmasto. Tekstissä myöhemmin viitataan kyseiseen sisäilmastoluokitukseen lyhenteellä SL2008. Myös muun muassa Sosiaali- ja terveysministeriö on antanut asetuksen sisäilmanlaadun vaatimuksista (STM 545/2015). [1]

2.1.1 Lämpötilan raja-arvot

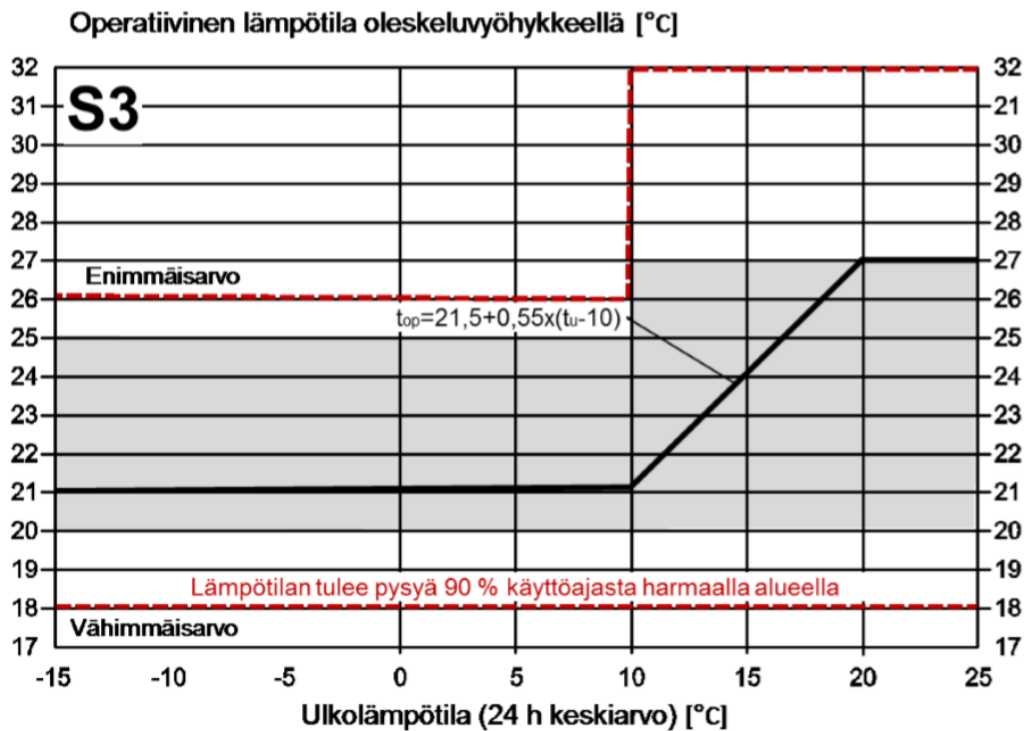
Terminen viihtyvyys on iso tekijä sisäilmanlaatua määritettäessä, sillä se on helposti ihmisten aistittavissa. Sisäilmayhdistys ry esittää luokituksessaan monimutkaisia kaavoja (ks. SL2008), mutta yksinkertaistettuna S1-luokitukseen päästään, mikäli sisäilman lämpötila pysyy talvikuukausina (ulkolämpötila alle 0 °C) 20-23 °C ja lämpimämpinä kuukausina alaraja-arvon pysyessä 20°C:ssa nousee yläraja jopa 27 °C:en (ulkolämpötilan ollessa yli 20 °C) [1]. Kuvissa 1, 2 ja 3 on esitetty luokitusten lämpötilamääreet.



Kuva 1. S1-luokituksen lämpötilamääreet [1].



Kuva 2. S2-luokituksen lämpötilamääreet [1].



Kuva 3. S3-luokituksen lämpötilamääreet [1].

2.1.2 Radon- ja pienhiukkaspitoisuuden raja-arvot

SL2008 esittää radonpitoisuudelle S1- ja S2-luokassa alle 100 Bq/m³ ja S3-luokassa 100-200 Bq/m³ [1]. Pienhiukkasille (PM10 ja PM2.5) SL2008 ei aseta raja-arvoja, mutta sosiaali- ja terveysministeriön toimenpiderajat ovat 50 µg/ m³(PM10) ja 25 µg/ m³(PM2.5) [2]. Radonpitoisuuden mittaus tulee hoitaa Säteilyturvakeskuksen ohjeiden mukaisesti. Pienhiukkaspitoisuuden mittaaminen on hankalaa, mutta joitakin lasermittaukseen perustuvia mittalaitteita on tarjolla. Pienhiukkasten on epäilty olevan terveydelle vaarallisia erityisesti sydän- ja verisuonitautien muodostumisessa, mutta tutkimuksia aiheesta ei ole tehty tarpeeksi, jotta korrelaatio voitaisiin todistaa varmaksi. Suuri osa pienhiukkasista on ulkoilmassa, joten niitä tulisi suodattaa, jotta hiukkaset eivät siirtyisi suoraan sisäilmastoon. [3]

2.1.3 Hiilidioksidipitoisuuden raja-arvot

Puhtaan ilman viitearvona pidetään ulkoilman hiilidioksidipitoisuutta, joka on noin 400 ppm. Sosiaali- ja terveysministeriö esittää asetuksessaan (STM 545/2015) hiilidioksidipitoisuuden toimenpiderajaksi 1 150 ppm yli ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden eli käytännössä noin 1 550 ppm [2]. SL2008 taas esittää hieman yksityiskohtaisemman määrittelyn sisäilman hiilidioksidipitoisuuden määrittämiseksi. S1-luokkaan päästään alle 750 ppm:n, S2-luokkaan 750-900 ppm:n ja S3-luokkaan 900-1 200 ppm:n hiilidioksidipitoisuuksilla [1]. Hiilidioksidimittaukseen löytyy laajasti erilaisia ratkaisuja ammattimaisten ratkaisujen ollessa hinnakkaampia, mutta myös edullisemmilla laserantureilla päästään tarkkoihin mittaustuloksiin nykyisillä tekniikoilla.

2.1.4 TVOC-pitoisuuden raja-arvot

TVOC-pitoisuuden (VOC-kokonaispitoisuuden) raja-arvot vaihtelevat suuresti, mutta esimerkiksi sosiaali- ja terveysministeriö esittää asetuksessaan toimenpiderajaksi 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tolueenivasteella laskettuna [2]. SL2008 taas esittää TVOC S1-luokituksen rajaksi 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, S2-luokituksen 200-300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja S3-luokituksen 300-600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tolueenivasteella laskettuna [1]. Joillekin yksittäisille kaasuille on omat toimenpiderajansa. Sosiaali- ja terveysministeriö esittää yksittäisen VOC-kaasun raja-arvoksi 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja toimenpiderajat (tolueenivasteella laskettuna) muutamalle yhdisteelle: 2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaalidioli di-isobutyraatti (TXIB) 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2-etyyli-1heksanoli (2EH) 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, naftaleeni 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja styreeni 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [2].

2.2 Terveellinen sisäilmasto

Tutkimuksissa on noussut esiin niin sanottu sairas rakennus -oireyhtymä, joka on tullut esiin asukkaiden, työntekijöiden tai koulun oppilaiden saadessa kyseisessä rakennuksessa selittämättömiä allergia- tai hengitystieoireita. Aina sisäilmanlaadun tutkimuksissa ei kuitenkaan löydetty oireyhtymän aiheuttajaa ja monet oireilua aiheuttavat yhdisteet voivat jäädä mittauksien ulkopuolelle, koska pitoisuudet ovat pieniä ja erilaiset yhdisteet vaikuttavat eri tavalla eri ihmisiin ja jotkut ovat oireilulle alttiimpia kuin toiset. [4]

Terveellistä sisäilmastoa on kuitenkin vaikea määrittää, koska tavanomaiset suureet, kuten sisäilmaston lämpötila, hiilidioksidi- tai radonpitoisuudet, voivat olla alle määritettyjen raja-arvojen. TVOC-pitoisuuksien mittaaminen tarkasti vaatii yleensä monimutkaisia mittauksia monesta eri paikasta, laboratorioanalyysijä, ja saattaa siten olla kallis vaihtoehto, joten se voi jäädä monessa tapauksessa tekemättä kokonaan. Sisäilmaston ongelmien takia markkinoille on kuitenkin tullut halvempia puolijohdeantureita, joilla voidaan mitata VOC-yhdisteiden kokonaispitoisuutta. Anturit eivät kuitenkaan erottele eri yhdisteitä ja monet haitallisemmat yhdisteet saattavat pienempinä pitoisuuksina aiheuttaa allergisia oireita ihmisille, vaikka TVOC-pitoisuus jäisikin mittauksissa alle määritettyjen raja-arvojen.

Huonoa sisäilmaa ei voida myöskään korvata suoraan ulkoilmalla. Ulkoilmassa on vaihtelevasti pienhiukkasia ja radonkaasua sekä radonin hajoamistuotteita. Saasteista ja liikenteen päästöistä aiheutuvat pienhiukkaset pitäisi tautitaakan vähentämiseksi suodattaa mahdollisimman hyvin ennen kuin ilmaa päästetään sisäilmastoon. Sisäilmastoseminaari 2014 -raportista suurimmaksi tautitaakan aiheuttajaksi on esitetty juuri PM2.5-pienhiukkaset (67 %) ja radon (16 %). Raportissa on esitetty oletus, että radonista, hiilimonoksidista ja sisätupakoinnista voitaisiin poistaa noin 90 %, VOC-yhdisteistä ja kosteusvaurioista noin 50 % ja sisälähteiden hiukkasista noin 25 %. Näillä toimenpiteillä päästäisiin jo tulokseen, jossa tautitaakka Suomessa putoaisi yli puoleen alkuperäisestä. [3]

2.3 Sisäilmanlaadun mittaaminen

Sisäilmanlaatu ja sen mittaaminen ovat nykyään suosittuja erilaisten sisäilmasta johtuvien oireiden takia ja asia on saanut paljon julkisuutta medioissa. Tämän takia sisäilmanlaadun tutkimus on hyvä bisnes yrityksille. Monet yritykset tarjoavatkin sisäilmanlaadun mittauspalveluita Suomessa. Sisäilmanlaadun määrittäminen on kuitenkin ongelmallista, ja esimerkiksi homeongelmia on vaikea määrittää pelkästään sisäilmastoa mittaamalla. Lisäksi analyysissä on tärkeää ottaa huomioon monia erilaisia seikkoja, kuten VOC-mittauksien virhealttius ja VOC-pitoisuuksien mittaaminen oikeista paikoista.

VOC-pitoisuudet voidaan todeta ja erotella tarkasti vain laboratoriotestein termodesorptio-kaasukromatografi-massaspektrometriä avuksi käyttäen, mutta markkinoille on viime aikoina tullut myös puolijohdetekniikkaan perustuvia antureita. Kyseisillä antureilla

voidaan mitata TVOC-pitoisuutta, mutta yhtä tarkkoihin tuloksiin ei antureilla päästä ja tulokset ovat vain suuntaa antavia eikä niillä voida erotella yksittäisiä yhdisteitä.

3 SISÄILMASTON HAITALLISET YHDISTEET

3.1 Radon ja pienhiukkaset

Radonkaasu itsessään ei ole niin vaarallista kuin sen hajoamistuotteet. Radonin hajoamistuotteet ovat niin pieniä hiukkasia, että ne kulkeutuvat hengitysteitä pitkin keuhkoihin ja aiheuttavat keuhkoille säteilyannoksen, joka taas lisää riskiä sairastua keuhkosyöpään. [5]

Pienhiukkaset ovat yleensä peräisin teollisuuden ja liikenteen päästöistä. Pienhiukkaset voidaan karkeasti jakaa koon perusteella kahteen ryhmään. Pienhiukkaset määritellään alle 10 µm:n (PM10) ja alle 2,5 µm:n (PM2.5) hiukkasiin. Alle 10 µm:n kokoiset hiukkaset eivät kokonsa puolesta leviä laajalle alueelle eivätkä ole yhtä haitallisia terveydelle kuin alle 2,5 µm:n hiukkaset, mutta voivat pahentaa esimerkiksi astman oireita. Alle 2,5 µm:n hiukkasten on monissa tutkimuksissa havaittu olevan vaarallisempia terveydelle ja pitkäaikaisen altistumisen alle 2,5 µm:n hiukkasille on todettu aiheuttavan kohonnutta riskiä sairastua tyypin 2 diabetekseen tai keuhkosyöpään ja jopa dementiaan. [6]

Sisäilmassa olevat pienhiukkaset ja radon ovat peräisin ulkoilmaston saasteista tai tupakkoinnista sisätiloissa, joten huonon sisäilmaston korvaaminen suoraan ulkoilmalla, esimerkiksi tuulettamalla, ei välttämättä paranna sisäilmanlaatua. Tautitaakan pienentämiseksi on ulkoilmastosta suodatettava haitallisia hiukkasia ja kaasuja, mikäli mahdollista.

3.2 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi on terveydelle vaarallista vain todella suurina pitoisuuksina, ja vasta 20 000 ppm pitoisuuden ylittyessä aiheutuu ihmisille esimerkiksi päänsärkyä. Työhygieenisissä olosuhteissa riittävä pitoisuus on alle 5 000 ppm / 8 h [7]. Hyvän sisäilmaston hiilidioksidipitoisuus on SL2006:n mukaan alle 750 ppm. Arvo voi helposti ylittyä, jos pienessä tilassa on paljon ihmisiä. Riittävä ilmanvaihto on siten tarpeellista tiloissa, joissa oleskelee paljon ihmisiä samanaikaisesti. Korkea hiilidioksidipitoisuus onkin yleensä merkki riittämättömästä ilmanvaihdosta. Hiilidioksidi ei yleensä ole syynä oireisiin vaan muut yhdisteet, kuten VOC-yhdisteet, ilmanvaihdon riittämättömyyden takia.

3.3 VOC-yhdisteet

VOC-yhdisteet eli haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat orgaanisia yhdisteitä, joiden kiehumispiste on 50-260 °C ja täten pieniä pitoisuuksia voi esiintyä sisäilmassa. On olemassa myös VVOC-yhdisteitä (kiehumispiste 0-100 °C) ja SVOC-yhdisteitä (kiehumispiste 240-400 °C), mutta kyseisiä yhdisteitä ei käsitellä tässä opinnäytetyössä, koska käytettävät anturit on suunniteltu ilmaisemaan vain VOC-yhdisteitä. VOC-kaasujen terveysvaikutuksista ei ole päästy yhteisymmärrykseen, mutta suurina pitoisuuksina VOC-kaasujen on todettu joillain ihmisillä aiheuttavan allergisia reaktioita, kuten silmien ärtymistä ja hengitysvaikeuksia. Jotkin tutkimukset ovat väittäneet VOC-yhdisteiden pitkäaikaisen altistumisen lisäävän riskiä sairastua astmaan tai syöpään. VOC-yhdisteiden pitoisuudet ovat kuitenkin yleensä sisäilmastossa niin pieniä, etteivät ne yksistään aiheuta sairastumista vaan ovat lähinnä indikaattori esimerkiksi muovimaton alla piilevästä kosteusvauriosta.

Suurimmaksi osaksi haitalliset VOC-emissiot ovat peräisin rakennusmateriaaleista ja kohonneita VOC-pitoisuuksia voidaan havaita vielä noin kuusi kuukautta rakentamisen tai remontoinnin jälkeen. Esimerkiksi yhtenä ongelmakohtana viime aikoina on ollut asuntoihin sijoitettavat muovimatot ja erityisesti niiden puutteellinen asennus, jos muovimatto on asennettu liian kostealle betonille, jolloin sisäilmaan voi emittoitua terveydelle haitallisia VOC-yhdisteitä kuten TXIB:tä tai 2-etyyliheksanolia. TXIB tai 2-etyyliheksanoli ovat yleensä indikaattoreita piilevästä kosteusvauriosta. [8]

VOC-yhdisteet käsittävät paljon eri hiiliyhdisteitä, ja toiset yhdisteet ovat haitallisempia kuin toiset, ja aiheuttavat herkemmin allergisia reaktioita kuin toiset. Yhdisteiden erottelu on näin ollen tärkeää, ja siksi haitallisimmille yhdisteille on asetettu omat toimenpiderajat. Toimenpiderajat liittyvät suurilta osin edellä mainittuihin muovimattojen pehmittimenä ennen käytettyjen materiaalien emissioihin, jotka indikoivat kosteusvaurioita maton alla.

Suurimmaksi osaksi VOC-pitoisuus johtuu yleensä ihmisen erittämistä yhdisteistä ja heidän käyttämistään hygienia- ja hajustetuotteista. Kuitenkin korkea VOC-pitoisuus sisäilmassa voi myös johtua erinäisten rakennusmateriaalien emissioista. Esimerkiksi liuottimet ja maalit voivat emittoida VOC-yhdisteitä sisäilmastoon vielä kauan rakentamisen tai remontoinnin jälkeenkin. Sisäilmayhdistys ry on kuitenkin tehnyt rakennusmateriaaleista luokituksia, ja Suomessakin on viime aikoina suurimmaksi osaksi alettu käyttää vähäpäästöisiä materiaaleja ja parhaimmat kuuluvat M1-luokkaan.

3.3.1 Liuottimet, maalit ja puhdistusaineet

Rakennus- tai saneerauskohteissa pyritään nykyään käyttämään suurelta osin vähäpäästöisiä materiaaleja. Erinäiset liuottimet ja maalit ovat kuitenkin vahvasti VOC-yhdisteitä sisältäviä aineita, jotka vaativat huolellisen tuuletuksen käytön jälkeen, jotta VOC-pitoisuus saadaan minimoitua ennen asukkaiden muuttamista asuntoon.

Tyypillisiä emittoituvia yhdisteitä ovat esimerkiksi alkoholit, alifaattiset hiilivedyt ja terpeenit. Kyseiset yhdisteet aiheuttavat yleensä oireita vain suurina pitoisuuksina, joten asukas voi havaita kyseisiä yhdisteitä rakentamisen tai remontoinnin jälkeen, mutta muutama kuukauden kuluttua oireilua ei pitäisi enää olla, jos ei asunnossa ole haitallista VOC-lähdettä.

3.3.2 Muovimattojen emissiot

Viime aikoina on paljon puhuttu rakentamisessa käytettyjen muovimattojen ja niiden pehmittimien materiaaleista ja niiden tuottamista sisäilmaongelmista. PVC-muovimattojen pehmittimenä käytettyjen ftalaattien hajoamistuotteena voi sisäilmastoon päätyä 2-etyyliheksanolia, joka rasvaliukoisena voi aiheuttaa terveydellisiä ongelmia pieninäkin pitoisuuksina, koska se kertyy ajan mittaan elimistöön. Vuoden 2006 jälkeen Suomessa valmistetuissa PVC-matoissa ei ole saanut käyttää pehmittimiä, mutta niiden tuonti ulkomailta on ollut kuitenkin sallittua. Hyvässä sisäilmassa 2-etyyliheksanolia ei pitäisi esiintyä lainkaan, joten sen löytyminen sisäilmasta indikoi yleensä sisäilmaongelmista. 2-etyyliheksanoli on myös joidenkin mikrobien aineenvaihduntatuote, joten se voi myös indikoida home- tai kosteusvaurioista. [9]

Muita ongelmayhdisteitä, joita muovi- tai kumimattojen puutteellisen asennuksen takia voi sisäilmaan emittoitua TXIB:tä ja styreeniä. Kaikille kolmelle yhdisteelle on asetettu omat toimenpiderajat, sillä monessa tutkimuksessa kyseisten yhdisteiden on todettu aiheuttaneen suurempina pitoisuuksina oireilua joissain ihmisissä. Toimenpiderajat ovat TXIB:lle $10\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2-etyyliheksanolille $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja styreenille $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ [2].

3.3.3 Suurien VOC-pitoisuuksien terveysongelmat

Sisäilmasto-ongelmat ovat ajankohtaisia, koska nykyään ihmiset viettävät suurimman osan ajastaan sisätiloissa, joten sisäilmanlaatu on tärkeää myös terveyden kannalta. Herkimmin ihminen aistii VOC-ongelmakohtia hajun tai muun ärsykkeen kautta, mutta yleensä tällöin pitoisuus on jo todella suuri. Tietyin poikkeuksin VOC-kaasut ovat ihmisen aistien ulottumattomissa ja suuret pitoisuudet huomataan yleensä vasta allergiaoireiden ilmaannuttua. Suurille VOC-pitoisuuksille altistumista on tutkittu vain vähän ja todellisista terveyshaitoista ei ole varmuutta. Joissain tutkimuksissa on kuitenkin todettu ongelmakohteissa asuvien allergiaoireiden vähentyneen, jos ongelmakohteesta on muutettu toisaalle asumaan.

Suurien VOC-pitoisuuksien vaikutukset ovat yksilöllisiä, mutta yhteistä oireilla on tutkimuksissa ollut se, että ne muistuttavat tavallisia allergiaoireita, kuten silmien limakalvojen tai hengitysteiden ärsytystä. Suoraa vaikutusta terveyteen pitkäaikaisella altistumisella suurelle VOC-pitoisuudelle ei ole tutkimuksissa saatu aukottomasti todistettua, mutta joidenkin yhdisteiden on todettu aiheuttavan suurina pitoisuuksina esimerkiksi syöpää.

3.4 Kosteusvauriot ja mikrobikasvustot

Kosteusvaurioiden syynä ovat yleensä suunnittelu- tai rakennusvirheet. Homeongelmat ovat olleet ajankohtaisia monen vuoden ajan ja monista julkisista rakennuksista on löytynyt kosteusvaurioita. Puutteellinen ilmanvaihto on myös ollut joissain tapauksissa kosteusvaurion syynä, ja siksi kunnolliseen ilmanvaihtoon on syytä kiinnittää huomiota kosteusvaurioiden estämiseksi.

Mikrobikasvustot ovat normaaleja tavallisessa sisäilmastossa, johon niitä on tullut esimerkiksi ulkoilmastosta, maaperästä tai ihmisistä. Mikrobilajisto on yleensä sisäilmastossa samanlainen kuin sitä ympäröivässä ulkoilmastossa. Rakenteiden kostuessa niihin muodostuu mikrobikasvustoja ja mikrobit tuottavat sisäilmastoon esimerkiksi itiöitä ja kaasumaisia aineenvaihduntatuotteita. Tällöin sisäilmaston mikrobikasvusto eroaa ulkoilmaston mikrobikasvustosta. Jotkin mikrobit voivat myös aiheuttaa sisäilmastoon myrkyllisiä toksineja. Kosteusvauriot voivat olla vaikeita huomata, koska rakenteisiin ja eristeisiin ei ole yleensä suoraa näköyhteyttä. Aistinvaraisesti huomattu kosteusvaurio voi

olla jo pitkällä ja voi vaatia suuria toimenpiteitä sen korjaamiseksi. Kosteusvaurioita esiintyy jopa 25 % rakennuksista ja jopa 60 % koulurakennuksista, joten kosteusvauriot ovat yleinen haitta sisäilmastoille. [10]

4 VOC-ANTURIEN TESTAUS

4.1 Anturien testaus ja valinta

Opinnäytetyön tarkoituksena oli löytää edullinen, mutta tarpeeksi tarkka anturi, joka voitaisiin integroida Envicin omaan ilmanlaatusovellukseen. Pohdinnan jälkeen päädyttiin testaamaan kahta VOC-anturia, jotka olivat Sensirionin valmistama SGP30 ja AMS:n valmistama IAQ-core. SGP30 oli luotettavan anturivalmistajan tekemä ja siinä oli niin sanottu automatic baseline correction -algoritmi, joten se esittää TVOC-arvon absoluuttisena arvona, toisin kuin monet muut VOC-anturit mukaan lukien toinen testauksessa käytettävä AMS:n anturi IAQ-core.

Alkutestaukset päätettiin tehdä Arduino Uno -kehitysalustan avulla, koska se oli helposti koodattavissa ja AMS:n anturille löytyi tutoriaaleja. SGP30:lle kirjoitettiin yksinkertainen ohjelma, jotta tulokset saatiin I2C-väylän kautta tulostettua näytölle reaaliaikaisesti.

TVOC-arvot esitetään antureissa yleensä yksikkönä ppb (miljardisosa), ja tätä arvoa ei tule sekoittaa yksikköön $\mu\text{g}/\text{m}^3$, joka taas riippuu siitä minkä kaasun vasteena anturi mittaa VOC-pitoisuutta.

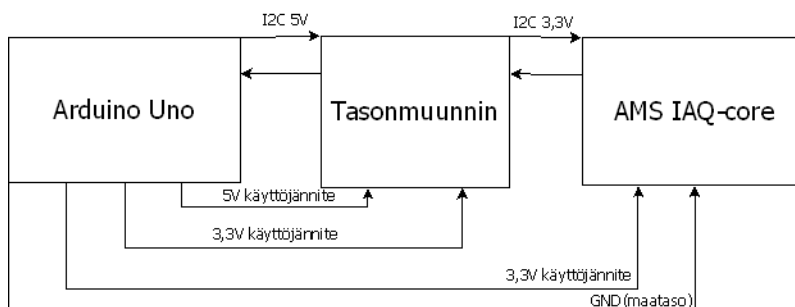
4.1.1 AMS IAQ-core

Anturi valikoitui testaukseen, koska myös eräs ilmanvaihtoyritys käyttää kyseistä anturia sovelluksissaan, ja sen voitiin olettaa olevan edes jokseenkin toimiva VOC-anturi TVOC-pitoisuuksien mittaamiseen. Anturissa oli ongelmana, ettei se näytä absoluuttisia arvoja vaan VOC-pitoisuuden muutosta, sekä suppea mittausalue (125-600 ppb) [11].

Anturi mittaa VOC-arvojen suhteellisuutta, eli jos VOC-kaasuja tulee sisäilmaan lisää se näyttää suurempaa arvoa, ja taas kaasujen määrän laskiessa arvo on pienempi. Anturin arvo ei siis ole absoluuttinen arvo, joten AMS:n anturin lukema jäi vain raa'aksi vertailukohteeksi.

Anturin käyttöjännite oli 3,3 V, joten anturin ja 5 V:n käyttöjännitteellä toimivan Arduino Unon välille tarvitsi niin sanotun tasonmuuntimen, joka muuntaa I2C-väylän signaalit sopiviksi eli 5 V:n data- ja kellosignaalin 3,3 V:n muotoon, ja datan liikkua toiseen

suuntaan 3,3 V:n signaalit 5 V:n muotoon. Kuvassa 4 on lohkokaaviokuva anturin ja kehitysalustan välisestä kytkennästä.



Kuva 4. Lohkokaaviokuva anturin kytkennöistä.

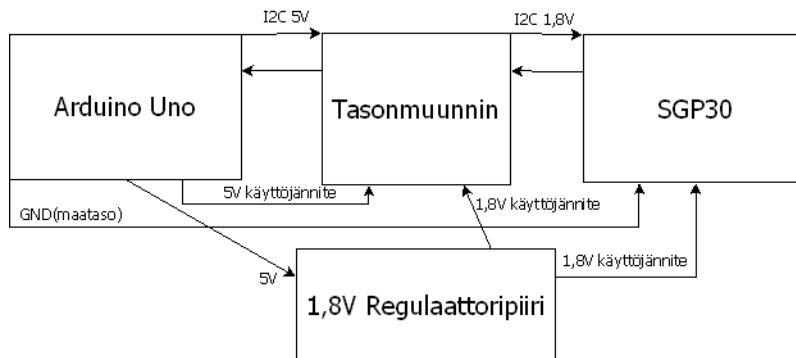
4.1.2 Sensirion SGP30

Eri VOC-anturien ominaisuuksia vertailtaessa monet karsiutuivat pois, koska ne eivät ilmoittaneet TVOC-pitoisuutta absoluuttisena arvona vaan suhteessa aiempiin arvoihin, ja näin ollen sitä ei voida pitää vertailukelpoisena arvona esimerkiksi eri olosuhteissa mitatuille arvoille. SGP30 kuitenkin on poikkeuksellinen, koska siihen on kehitetty niin sanottu automatic baseline correction -algoritmi, joka asettaa korjauksen mittaamalla vetykaasun referenssin ilmasta ja korjaa VOC-arvon näyttämään tarkemmin absoluuttista arvoa.

Automatic baseline correction -algoritmi on tarkoitettu korjaamaan anturin mittaamaa TVOC-raaka-arvoa lähemmäksi absoluuttista arvoa, koska puolijohdeanturien herkkä pinta kontaminoituu ja anturin raaka-arvo muuttuu ajan myötä. ABC-algoritmi kuitenkin parantaa absoluuttisen arvon tarkkuutta ja se asettuu SGP30-anturissa itsestään noin 2-24 h:n kuluessa käynnistyksestä. Viitearvona anturi käyttää vetykaasun (H₂) pitoisuutta, joka pysyy ilmassa lähes muuttumattomana (noin 0,5 ppm) normaaliolosuhteissa (NTP). Anturi on datalehden mukaan hyvä käyttää puhtaassa ilmassa tietyin väliajoin ja suositus on, että anturi saisi viikoittain puhdasta ilmaa, ettei korjausalgoritmi ala näyttää vääränlaista arvoa. [12]

Anturi toimii 1,8 V:n käyttöjännitteellä, joten anturille tarvitsi rakentaa erillinen regulaattoriipiiri, jotta 5 V:n jännite saatiin tiputettua noin 1,8 V:iin anturin käyttöjännitteeksi.

Lisäksi tarvittiin myös logiikkamuunnin, jotta 5 V:n data- ja kello-signaalit saatiin muunnettua sopiviksi ja etteivät 5 V:n signaalit rikkoneet anturia.



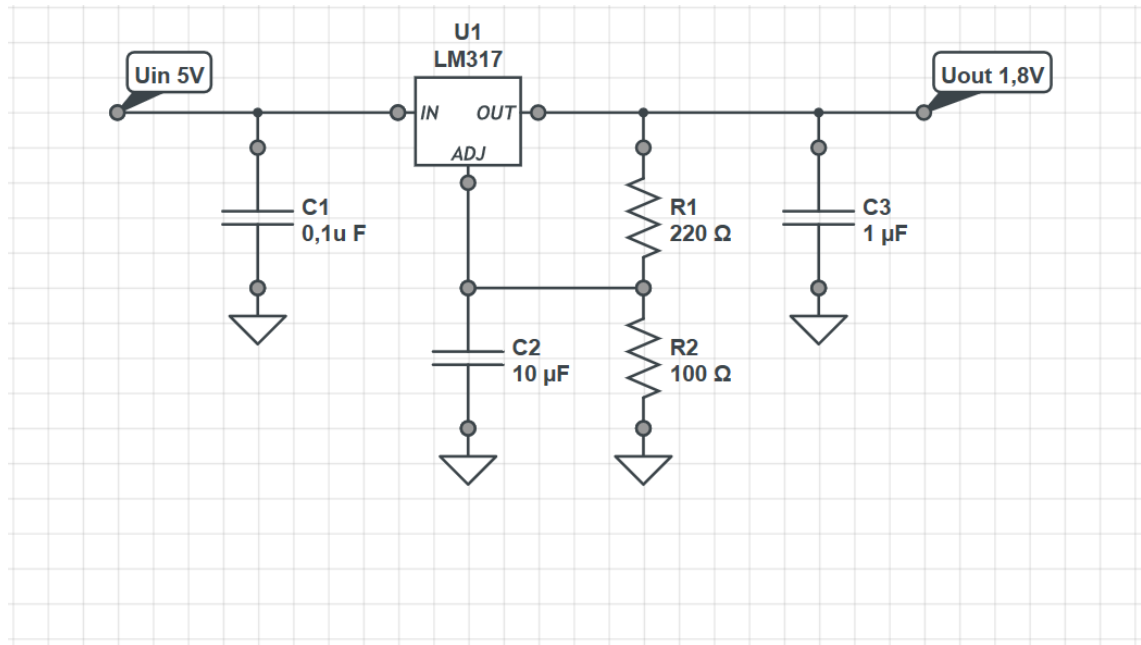
Kuva 5. Lohkokaavio SGP30-anturin kytkennöistä.

Regulaattorina käytettiin Texas Instrumentsin LM317-regulaattoria. Regulaattorin datalehdeltä löydettiin laskentakaava, jolla muut komponentit laskettiin. Kaavassa 1 yksityiskohtainen kaava ulostulojännitteen laskemiseksi.

$$U_o = U_{ref} (1 + R2/R1) + (I_{adj} * R2)$$

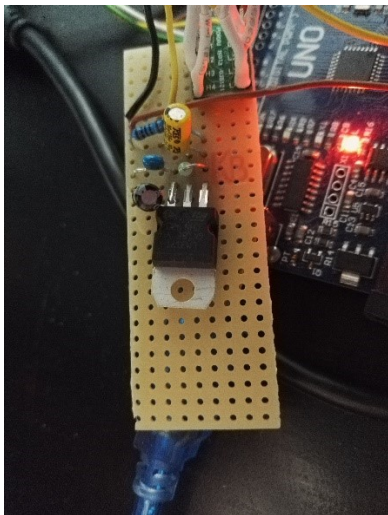
Kaava 1. Regulaattorin ulostulojännitteen laskentakaava [13].

Viimeinen termi voidaan ohjeiden mukaan jättää huomioimatta, joten vastukset lasketaan kaavasta 1 käyttäen $U_o=1,8\text{ V}$ ja $U_{ref}=1,25\text{ V}$ [13]. Näin ollen lähimmäksi osuvat E12-sarjan vastukset olivat $R1=220\ \Omega$ ja $R2=100\ \Omega$. Datalehden ohjeiden mukaisesti asetettiin kondensaattorit vähentämään rippeliä. Kuvassa 6 kytkentäkaavio valmiista regulaattoriipiiristä.



Kuva 6. Regulaattoripiirin kytkentäkaavio.

Regulaattoripiiri rakennettiin prototyyppissä niin sanotulle verolevyille, joka on juovakuparoitu koekytkenälevy. Kuvassa 7 prototyypin valmis kytkentä verolevyille asennettuna.



Kuva 7. Koekytkenälevylle rakennettu regulaattoripiiri.

4.2 Tiedonsiirto I2C-väylän kautta

Opinnäytetyössä käytettävät anturit käyttävät tiedonsiirtoon yksinkertaista digitaalista I2C-väylää, joka yksinkertaisuudessaan koostuu kellosignaalista, jolla data tahdistetaan,

ja datasiignaalista, jolla varsinainen tiedonsiirto toteutetaan. Antureilla on tehtaalla asetettu osoite, jonka avulla laitteeseen voidaan ottaa yhteys. Osoite on 7-bittinen ja sitä seuraa joko kirjoitus- tai lukubitti, joten kahta samanlaista anturia ei voida laittaa ilman osoitteen muuttamista samaan väylään. Tässä sovelluksessa osoitteista ei ollut ongelmaa, koska antureilla on eri osoitteet. Väylä toimii isäntä-orja-periaatteella, joten mikrokontrolleri toimii isäntänä ja ohjaa muita laitteita.

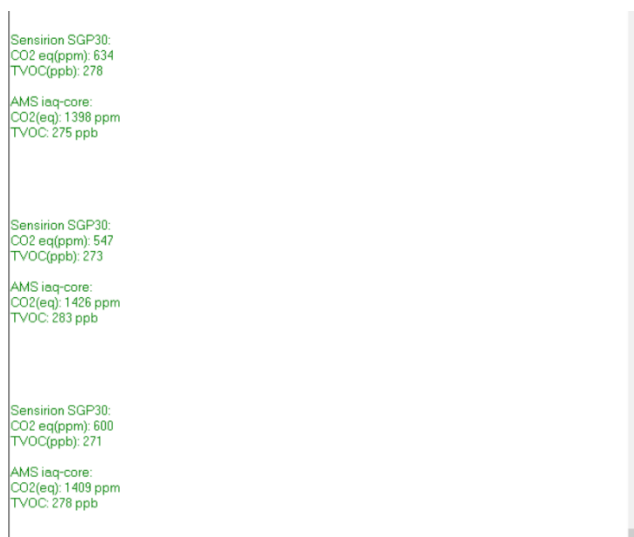
Yksinkertaisuudessaan tiedonsiirto toteutettiin niin, että mikrokontrolleri lähetti anturille osoitteen ja kirjoitusbitin, jonka jälkeen lähetettiin mittauskäsky. Käskyn jälkeen anturi suoritti mittauksen, jonka jälkeen mittausdata luettiin anturilta ja tulostettiin ruudulle. Valmiissa sovelluksessa SGP30:n lähettämä TVOC-arvo talletettiin muistiin ja arvoista pysytettiin muodostamaan trendikäyrä.

4.3 Testaus Arduino Uno -kehitysalustalla

Alkuun anturien arvoja vertailtiin keskenään eikä arvoja ollut syytä tallettaa muistiin ennen kuin vasta loppusovelluksessa. Antureille saatiin pienten alkuvaikeuksien jälkeen koodit Arduinolle sopivaksi, ja tulokset saatiin tulostettua sarjaportin kautta tietokoneen näytölle samanaikaisesti. Ensimmäisissä testauksissa havaittiin, että anturit tarvitsivat aikaa stabilisoitumiseen käynnistyksen jälkeen monia tunteja, jotta saatiin järkeviä tuloksia. SGP30 myös muodostaa niin sanottua baselinea käynnistyksen jälkeen, missä kuluu aikaa muutamasta tunnista 24 tuntiin.

Tulokset tulostettiin reaaliaikaisesti tietokoneen näytölle ja niitä vertailtiin muutaman tunnin käynnissä olon jälkeen. Tuloksista huomattiin, että AMS:n anturi pitää niin sanottua TVOC-nollatasoa sen minimiarvossa 125 ppb, mutta muuten arvot vastasivat hyvin toisiaan. Ratkaisuna ongelmaan tehtiin anturille uusi ohjelma, jossa TVOC-arvosta vähennettiin 125 ppb ja toistettiin testit uudestaan.

Seuraavassa testissä anturien annettiin stabilisoitua ja verrattiin TVOC-arvoja uudestaan. Arvot olivat hyvin lähellä toisiaan ja oli syytä olettaa, että SGP30-anturin arvot ovat ainakin AMS:n anturiin verrattuna järkeviä arvoja, joten kunnolliset testaukset voitiin aloittaa. Antureissa oli myös CO₂-ekvivalenttiarvo, mutta sen arvot heittelevät sen verran, että ne päätettiin jättää huomioimatta ja lopullisessa sovelluksessa olikin oma anturinsa CO₂-pitoisuuden mittaamiseksi. Kuvassa 8 näkyy muutama perättäinen arvo, kun anturit ovat olleet päällä muutaman tunnin tavallisessa kerrostaloasunnossa.



Kuva 8. Anturien vertailua tietokoneen näytöllä sarjaportin kautta.

4.4 Testaus Envicin DAT1-kortilla

Envicin oma anturien lukemiseen tarkoitettu piirikortti on nimeltään DAT1, jota käytetään monissa Envicin sovelluksissa lähinnä I2C-anturien kanssa. Prosessorina levyllä toimii LPC11U34F, jonka ohjelma on kirjoitettu C-kielellä ja ohjelma on pienin muutoksin muokattavissa erilaisten I2C-anturien lukua varten.

Ensimmäinen koodi saatiin muiden työntekijöiden avustuksella suhteellisen helposti valmiiksi ja arvoja anturilta voitiin lukea sarjaportin kautta kyselemällä. Koodia muutettiin hieman Arduinin oman wire-kirjaston koodista (ks. luku 5). Anturin todettiin testauksissa toimivan samalla tavoin kuin edellisessä testauksessa, joten sen oletettiin olevan yhteensopiva integroitavaksi Multisens-sovellukseen.

5 PROTOTYYPIN RAKENNUS JA TESTAUS

Testaukset saatiin päätökseen ja alettiin suunnitella, miten anturi saataisiin integroitua Multisens-sovellukseen. Anturin käyttöjännite on 1,8 V, ja aiemmin oli suunniteltu jo testausvaiheessa regulaattoriipiiri, jota käytettiin myös prototyypissä. Multisens-sovellus toimii lähinnä akun avustuksella, ja siinä on laturipiiri PowerBoost 1000C, jossa on 5 V:n ulostulo. Ulostuloa käytetään käyttöjännitteenä regulaattoriipiirille, DAT1-kortille ja GDU-kortille, joka lukee anturien tiedot sarjaportin kautta ja tallettaa arvot muistiin.

Regulaattoriipiiri ja logiikkamuunnin päätettiin rakentaa verolevyille, eikä piirilevyä lähdetty suunnittelemaan vielä protovaiheessa.

5.1 Regulaattoriipiiri ja logiikkamuunnos

Regulaattoriipiiri suunniteltiin jo testausvaiheessa, ja sitä käytettiin sellaisenaan myös prototyypissä. Logiikkasignaaleille tarvittiin myös muunnos, koska DAT1-kortin käyttöjännite on 3,3 V:a ja anturi on 1,8 V:lla toimiva. Jo testausvaiheessa käytettiin Pololun valmistamaa logiikkamuunninta ja kytkennästä muutettiin vain DAT1-kortin puoleinen käyttöjännite 5 V:sta 3,3 V:iin. 3,3 V:n käyttöjännite saatiin helposti DAT1-kortin I2C-väylän käyttöjännitepinnistä. Muutoin kytkentä vastasi testausvaiheessa käytettyä kytkentää.

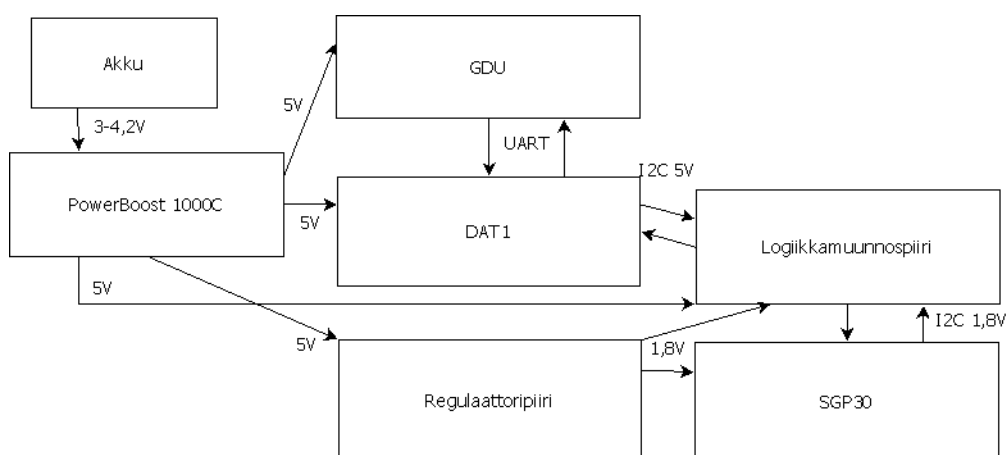
5.2 Anturin alustus ja tiedonsiirto

Käynnistyksen jälkeen anturille pitää lähettää alustuskoodi, joka käynnistää anturin ja prosessorin. Alustus kestää noin 15 sekuntia ja sen aikana ei anturilta voi lukea arvoja vaan se näyttää TVOC-arvoksi nollaa. Anturi alkaa käynnistyksen jälkeen hakea baseline-tasoa, ja sen asetuksessa menee yleensä muutamasta tunnista 24 tuntiin, joten anturin oli hyvä olla päällä ainakin 24 tuntia ennen varsinaisten mittausten aloittamista, koska arvot saattavat olla epätarkkoja.

Alustuksen jälkeen anturilta luettiin arvot I2C-väylän kautta, eli ensin lähetettiin DAT1:ltä osoite ja kirjoitusbitti, minkä jälkeen anturi odotti käskyä ja lähetettiin mittauskäsky anturille. Tämän jälkeen anturi suoritti mittauksen, ja sitten arvo oli valmis luettavaksi. Alussa

huomattiin, että mittauskäskyn jälkeen tarvittiin aikaa noin sekunnin verran, ennen kuin arvo voitiin lukea anturilta, joten piti asettaa sekunnin viive (delay) koodiin ennen lukukäskyn lähettämistä.

Multisens-laitteessa datan tallennus suoritetaan GDU-kortilla, joka lähettää käskyt sarjaportin kautta DAT1:lle, joka taas kysyy I2C-väylän kautta antureilta arvot ja lähettää sarjaportin kautta GDU:lle, joka tallettaa antureiden arvot muistiin. GDU:ssa on niin sanottu reaaliaikakello (RTC), joka tallettaa kellonajan mukaan arvot järjestykseen, jotta ne voidaan tulostaa trendikäyräksi myöhemmin. Arvot voidaan lukea GDU:lta USB:n kautta Envicin Meslog-ohjelmalla, jolla voidaan myös tulostaa trendikäyrä arvoista. Kuvassa 9 on esitetty lohkokaaviokuva prototyypin kytkennöistä.



Kuva 9. Lohkokaaviokuva prototyypin kytkennöistä.

5.3 Anturi asennus piirilevylle ja kotelointi

Anturi asennettiin toiselle anturille (SHT21) tehtyyn piirilevyyn, koska piirilevyä ei tässä vaiheessa vielä suunniteltu ja anturin asentaminen onnistui Sensirionin lämpötila- ja kosteusanturille tehtyyn piirilevyyn. Johdotukset tehtiin anturille sopiviksi ja se oli valmis koteloitavaksi ja asennettavaksi Multisens-laitteeseen.

Anturi asetettiin kotelon ulkopuolelle samanlaiseen metalliputkeen kuin lämpötila- ja kosteusanturi, ja johdotettiin läpiviennin kautta kotelon sisälle. Metalliputken päähän tehtiin

aukotus, jotta kaasujen mittaus onnistui ja anturi sai hieman suojaa esimerkiksi kosteudelta, mekaaniselta rasitukselta ja muilta ulkoisilta häiriötekijöiltä, jotka voisivat vahingoittaa anturia. Kuvassa 10 on anturin kotelointi ja asennus valmiissa laitteessa.



Kuva 10. Anturikortin kotelointi metalliputkessa.

5.4 Regulaattoriipiirikortin kotelointi

Regulaattoriipiiri tehtiin verolevyllä, asennettiin kotelon sisälle ruuvikiinnityksellä ja johdettiin anturilta logiikkamuuntimelle ja käyttöjännite otettiin regulaattorin ulostulonastasta

liittimen kautta. Prototyypin ei vielä suunniteltu valmistettavaa piirilevyä, ja sen suunnittelu päätettiin siirtää myöhemmäksi.

Logiikkamuunnin sijoitettiin tilan säästämiseksi samalle levyille ja johdotukset toteutettiin suoraan logiikkamuuntimen pinneistä anturille ja DAT1:lle. Kuvassa 11 on verolevyn sijoitus kotelon sisälle.



Kuva 11. Regulaattoripiirin ja logiikkamuuntimen sijoitus kotelossa.

Laitteelle oli jo suunniteltu kotelo ja päällystarra, joten prototyyppi kasattiin koteloonsa. Kuvassa 12 on valmis kotelointi ja kuva lopullisesta prototyypistä.



Kuva 12. Valmis Multisens-laite koteloituna.

Koteloinnin jälkeen laite oli valmis testattavaksi, joten prototyypin lopputestaukset aloitettiin.

6 PROTOTYYPIN LOPPUTESTAUS

Lopuksi prototyyppiä testattiin ja TVOC-arvoja talletettiin muistiin, jotta arvoja voitaisiin tarkastella myöhemmin, ja tutkia, ovatko arvot järkeviä. Kuten edellä on mainittu, TVOC-arvojen absoluuttisuutta on vaikea todentaa, koska referenssimittaria ei ollut ja laboratoriomittauslaitteita TVOC-arvojen mittaamiseen ei ollut käytettävissä. Ppb-arvoja ei myöskään anturin käyttämän algoritmin takia voida suoraan muuttaa $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -muotoon, koska arvo ei ole suoraan etanolin vasteena mitattu arvo. Tästä syystä arvoja ei voi suoraan verrata esimerkiksi suomalaisten terveystieteiden viitearvoihin.

Anturin valmistaja Sensirion on kuitenkin antanut omat viitearvonsa perustuen saksalaisten terveystieteiden viitearvoihin. Anturin toimintaa testattiin erilaisissa olosuhteissa ja huomattiin, että arvoissa oli eroa, jos anturi käynnistettiin niin sanotussa puhtaassa tilassa (ulkoilmassa) tai tavallisessa sisätilassa, jossa yleensä jonkin verran VOC-yhdisteitä on. Taulukossa 1 Sensirionin antamat ppb-viitearvot.

Taulukko 1. Sensirionin antamat viitearvot TVOC-pitoisuuksille (ppb) [14].

Taso	Suosittelut toimenpiteet	Suosittelun altistumisaika	TVOC-arvo (ppb)
1	Tavoiteltu arvo	Ei rajoitusta	0-65
2	Ilmastoinnin lisäämistä suositellaan	Ei rajoitusta	65-220
3	Ilmastointia lisättävä merkittävästi, lähteitä etsittävä	< 12 kk	220-660
4	Ilmastoinnin merkittävä lisäys välttämätöntä, lähteitä etsittävä	< 1kk	660-2200
5	Tilaa on vältettävä, mikäli mahdollista, lähteet etsittävä, ilmastoinnin merkittävä lisäys välttämätöntä	Tunteja	2200-5500

6.1 Omat lopputestaukset ja tulokset

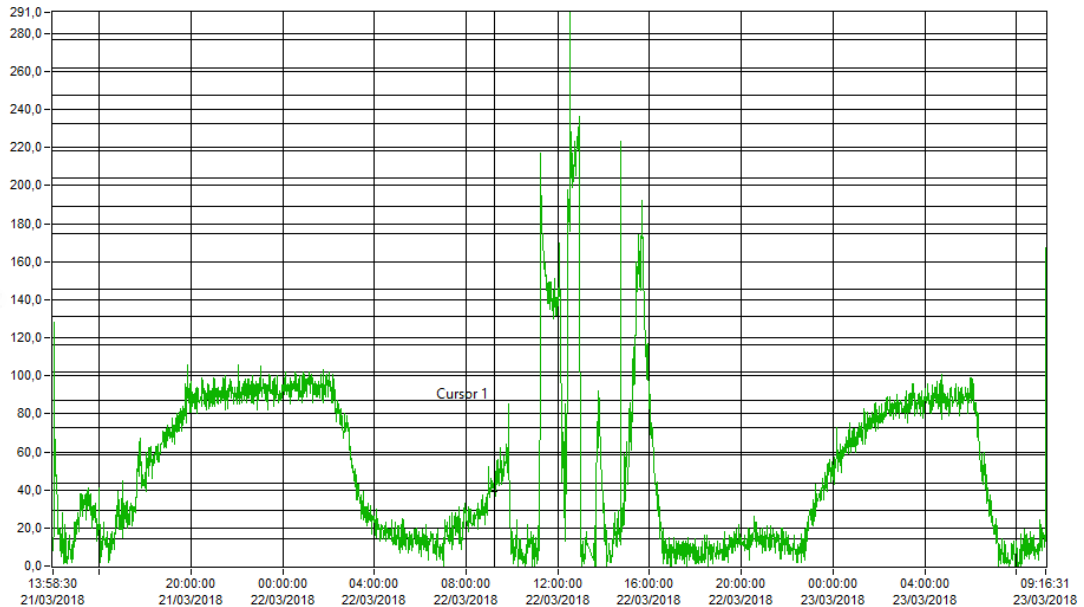
Kuten edellä mainittiin, lopputestausta suoritettiin erilaisissa olosuhteissa ja laitetta käynnistettiin eri olosuhteissa, jotta nähtiin miten se vaikuttaa anturin antamiin arvoihin. Todettiin, että anturi olisi syytä käynnistää puhtaassa ilmassa oikeanlaisen baseline-arvon saamiseksi. Anturi aloittaa baseline-arvon aloittamisen 0:sta joka kerta kun se käynnistetään, ellei arvoa ole ohjelmallisesti asetettu johonkin ulkoiseen muistiin. Sitä ei tässä vaiheessa tehty, joten baseline-algoritmi alkaa aina käynnistyksen jälkeen alusta, ja siki on tärkeää, että se saa puhtaan ilman referenssikseen alussa. Paras tulos saatiin, kun laite käynnistettiin ulkoilmassa, jossa VOC-pitoisuuden voidaan olettaa olevan lähellä nollaa. Huomattiin myös, että ihmisten tai VOC-lähteiden läsnäolo saattoi asettaa TVOC-trendiin piikin ja käyrä ei vastannut todellista TVOC-pitoisuutta huoneilmassa.

Alussa testauksissa saatiin käyriä, jotka näyttivät hieman korkeita arvoja ja eräs muu taho, joka teki laboratoriotestejä samasta ilmasta, jossa laite oli, ilmoitti samasta ongelmasta. Sama taho ilmoitti arvojen vastaavan paremmin heidän laboratoriotestejään, kun anturi käynnistetään puhtaassa ilmassa ja odotetaan 15-20 minuuttia, jonka jälkeen laite voidaan siirtää mitattavaan kohteeseen.

Testaukset suoritettiin alkuvaikeuksien jälkeen niin, että laite käynnistettiin ulkotiloissa ja anturin annettiin asettua 20 minuuttia, jonka jälkeen se siirrettiin sisätiloihin. Arvot olivat järkevämpiä kuin aiemmin ja vastasivat suunnilleen sisäilmaston yleisiä arvoja. Normaalissa sisäilmassa TVOC-arvo yleisesti voidaan olettaa olevan hyvä, eli Sensirionin taulukon mukaisesti alle 220 ppb, ja näihin arvoihin päästiin testausmittauksissa.

6.2 Mittausdatan luku ja trendikäyrät

Mittausdata luettiin Meslog-ohjelmalla USB:n kautta tietokoneelle ja ohjelmassa muodostettiin arvoista trendikäyrä. Kuvassa 15 on tyypillinen trendikäyrä muistiin tallennetuista TVOC-arvoista (ppb).



Kuva 13. TVOC-arvojen (ppb) trendikäyrä tulostettuna Meslog-ohjelman kautta

Kuten kuvasta 15 nähdään, arvot nousivat päivisin, koska sisätiloissa on työntekijöitä ja mahdollisesti VOC-lähteitä, kuten liimoja. TVOC-arvot taas laskivat yöllä, koska henkilöitä ei ollut paikalla ja poistoilmaventtiilit toimivat suuremmalla teholla poistaen muuan muassa VOC-yhdisteitä sisäilmasta. TVOC-arvot olivat järkevällä tasolla ja suurimmaksi osaksi alle 100 ppb, jota voidaan pitää kohtalaisena sisäilman arvona. Absoluuttista referenssiä ei kuitenkaan ollut mahdollista mittauksiin saada, joten tulosten oikeellisuus jää arvioinnin varaan ennen kuin paremmat referenssimittaukset ovat mahdollisia.

Trendikäyrän keskellä on myös hieman epätavallinen käyrä muuhun mittauskäyrään verrattuna, mikä taas selittyy sillä, että 22.3.2018 noin klo 10 aamulla laite on käynnistetty uudelleen ja baselinen asettuessa arvot eivät ole luotettavia. Baselinen asetuttua anturi on taas palannut normaaliksi, ja arvot vastaavatkin hyvin ennen käynnistystä olevia arvoja.

Liitteessä 1 on esitetty kolmen eri laitteen yhtäaikaiset TVOC-trendikäyrät ja niistä voi huomata, että anturien arvot vastaavat suurelta osin toisiaan. Laitteet käynnistettiin ohjeistuksen mukaisesti puhtaassa tilassa ja arvot olivat järkeviä eivätkä anturikohtaisesti vaihtelee suuresti, joten voitiin todeta, ettei suurta epätarkkuutta ole anturien välillä. Laitte numero kolmen skaala on erilainen ja siksi se poikkeaa hieman muista.

7 LOPUKSI

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia sisäilmanlaatua ja sisäilmanlaadun mittausta puolijohdeanturien avulla, ja pohtia miten mittaustuloksia voitaisiin hyödyntää nykyisten menetelmien ohella. Opinnäytetyössä keskityttiin VOC-yhdisteiden raja-arvoihin ja sisäilmanlaadun tulkitsemiseen TVOC-puolijohdeanturien arvojen perusteella. Työn edetessä huomattiin, ettei valmiita antureita ollut saatavilla järkevään hintaan kyseiseen tarkoitukseen kuin muutama, joten anturivalikoima rajattiin kahteen soveltuvimpaan anturiin. Testauksessa huomattiin, että Sensirionin SGP30 oli tarkoitukseen soveltuvin ja luotettavin anturi ja sitä käytettiin prototyypissä.

Envic Oy:llä oli jo valmis sovellus, Multisens-ilmanlaatumittari, jonka osaksi TVOC-mittaus tehtiin. Multisens-sovelluksessa on vain I2C-väyläisiä antureita, joten SGP30-anturi saatiin suhteellisen helposti integroitua sovellukseen yhdeksi ilmanlaadun mittariksi.

7.1 TVOC-mittauksen merkitys sisäilmanlaatumittauksessa

TVOC-mittaus on nykyään tärkeä osa-alue sisäilmanlaadun mittaamisessa, ja monet yritykset tarjoavatkin VOC-mittauspalveluita muiden kuntotarkastuspalveluiden ohessa. Multisens-sovelluksen TVOC-mittauksella voidaan sisäilmastosta löytää mahdollisia ongelmakohtia tai poistaa epäilyt VOC-yhdisteiden ongelmista sisäilmastosta, jotta asiaa voidaan tutkia lisää tai siirtyä muihin mittausmenetelmiin. TVOC-anturimittaus säästää näin ollen aikaa ja resursseja yrityksiltä. Mittausta voidaan myös käyttää esimerkiksi yleisissä tiloissa ja sillä voidaan arvioida sisäilmaston laatua ja ilmaston riittävyttä kyseisessä tilassa.

TVOC-pitoisuus on hiilidioksidipitoisuuden ohella tärkeä sisäilmanlaadun mittari. Yleisesti hiilidioksidipitoisuus nousee TVOC-pitoisuuden noustessa, koska yleensä hiilidioksidipitoisuuden kasvaminen kertoo ilmanvaihdon riittämättömyydestä kyseisessä tilassa, jolloin myös VOC-yhdisteet lisääntyvät. Joissain tapauksissa kuitenkin TVOC-pitoisuus voi olla korkea, vaikka tilassa ei olisi ihmisiä, ja näin ollen matala on hiilidioksidipitoisuus. Korkea TVOC-arvo voi kieliä rakenteiden ongelmista, kuten muovimaton alla olevasta kosteusvauriosta. Kosteusvauriossa mikrobikasvustot voivat aineenvaihduntansa kautta levittää sisäilmastoon haitallisia VOC-yhdisteitä ja ihmiset voivat saada sairas rakennus-syndroomalle tyypillisiä oireita kyseisessä tilassa.

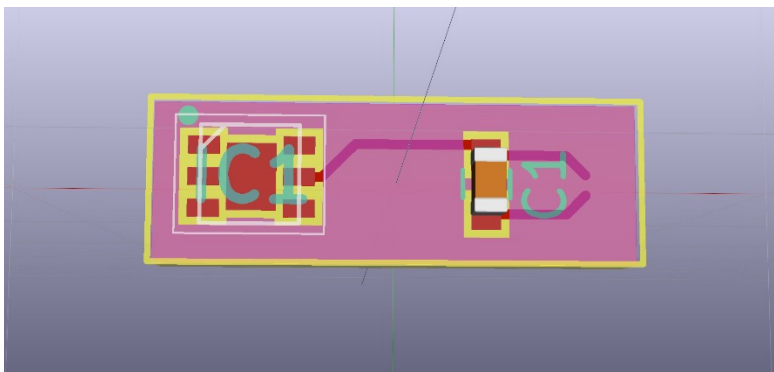
7.2 TVOC-mittauksen luotettavuus

Lopputestauksen aikana huomattiin anturien arvojen poikkeavan toisistaan, mutta Seniorin tuen ansiosta mittaustuloksista saatiin stabiilimpia ja tarkempia. Testauksissa huomattiin anturien olevan stabiilimpia ja niiden arvot vastasivat paremmin toisiaan, kun sovellus käynnistettiin puhtaassa ilmassa, kuten ulkoilmastossa, jossa voitiin olettaa TVOC-arvon olevan lähellä nollaa. Mittaukset olivat luotettavia ja TVOC-arvot olivat järkeviä, mutta arvojen absoluuttisuutta ei pystytty todentamaan, koska absoluuttista vertailuarvoa ei ollut saatavilla. Mittaustulokset hyvin ilmastoidussa toimistoympäristössä jäivät kuitenkin odotettuihin arvoihin ja alle hyvän sisäilmaston raja-arvon (alle 220 ppb).

Prototyypistä saatiin hyviä lopputuloksia, joten kehitystä jatketaan tulevaisuudessa. Tärkeintä on saada anturista luotettava mittari TVOC-pitoisuudelle, jotta sovellusta voidaan käyttää luotettavasti eri tilanteissa. Testaukset jatkuvat ja anturin suorituskykyä testataan referenssikaasuilla, jotta mittauksen epävarmuutta voidaan testata erilaisissa tilanteissa ja antaa takuu mittauksen tarkkuudelle.

7.3 Sovelluksen jatkokehitys

Anturille aiotaan kehittää piirilevy, jotta voidaan varmistua kytkentöjen oikeellisuudesta ja siitä, että anturi saa tarvittavan käyttöjännitteen. Kuvassa on alustava suunnitelma anturikortista. Piirilevy on suunniteltu KiCad-ohjelmistolla.



Kuva 14. 3D-mallinnettu kuva anturikortista.

Multisens-sovellukselle olisi myös hyvä suunnitella piirilevykortti, jotta tarvittavat liitännät tulisivat samalle kortille ja vältettäisiin turhia johtovetoja anturireille ja muille piirikorteille

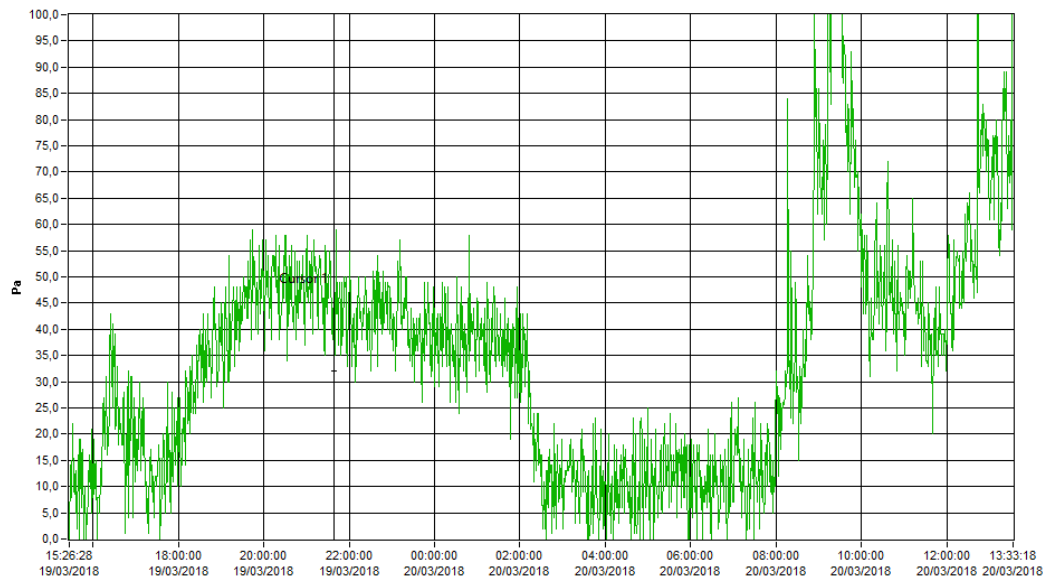
ja niille saataisiin kunnollinen maataso, jotta häiriöitä saataisiin pienemmäksi herkässä I2C-väylässä.

Tärkeintä on kuitenkin varmistua TVOC-anturin arvojen oikeellisuudesta, jotta arvo olisi luotettava. Testauksia aiotaan jatkaa, jotta anturin stabiilius saadaan todistettua ja absoluuttiset arvot saadaan anturivalmistajan virhemarginaalien puitteissa todennettua oikeiksi.

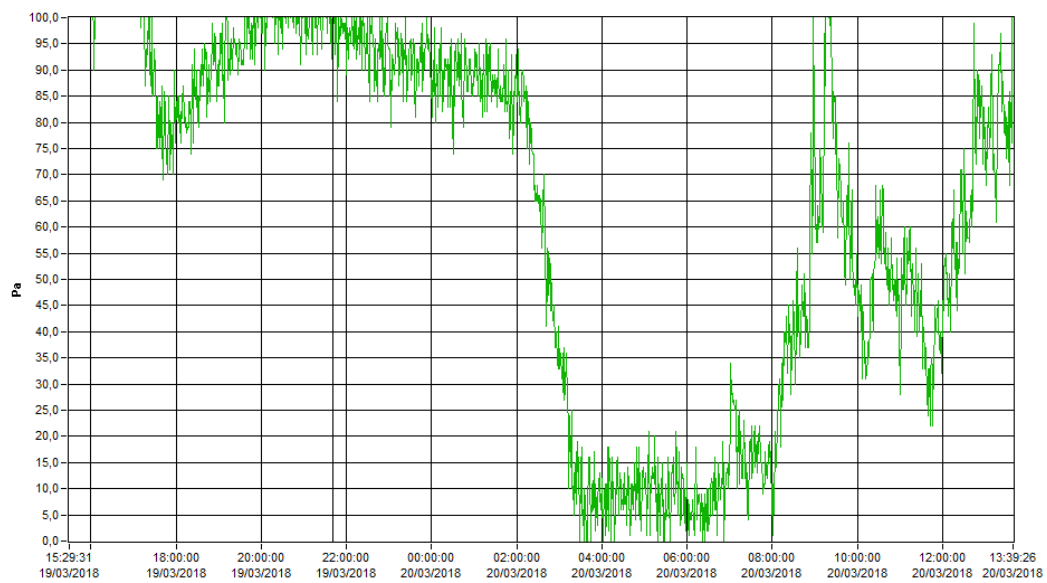
LÄHTEET

- [1] Sisäilmayhdistys. *Sisäilmastoluokitus 2008: Sisäympäristön Tavoitearvot, Suunnitteluohjeet Ja Tuotevaatimukset*. 2008. ISSN 1237-1866; 5.
- [2] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. STM 545/2015. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545> (luettu 1.2.2019).
- [3] Otto Hänninen ja Arja Asikainen. *Terveysperusteiset ilmanvaihdon ohjearvot Euroopalle ja vaikutukset sisäilman terveysriskeihin Suomessa*. 2014. [PDF-dokumentti]. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2015111217157> (luettu 1.2.2019).
- [4] Jouko Tuomisto. *Mikä on sairas rakennus?* [WWW-sivu]. Saatavilla: https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=asy00412 (luettu 1.3.2019).
- [5] Anne Weltner, Hannu Arvela, Tuukka Turtiainen, Ilona Mäkeläinen & Tuomas Valmari. *Radon sisäilmassa*. [PDF-dokumentti]. Saatavilla: https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirja2_4.pdf/e4ad6bfe-b60f-4394-b6a5-049d9c63e148 (luettu 1.3.2019).
- [6] Jussi Huttunen. *Hengitysilman pienhiukkaset – savusta ja saasteista sairautta*. [WWW-sivu]. Saatavilla: https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=kol00207&p_listatyyppi=kol (luettu 1.3.2019).
- [7] Työterveyslaitos. *OVA-ohje: HIILIDIOKSIDI* [WWW-sivu]. Saatavilla: <https://www.ttl.fi/ova/hii-lidioksidi.html> (luettu 1.3.2019).
- [8] Järnström Helena. *Muovimattopinnoitteisen lattiarakenteen VOC-emissiot sisäilmaongelmatapauksissa*. VTT Publications 571. 2005. [PDF-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2005/P571.pdf> (luettu 1.2.2019).
- [9] Ositum Oy. *Ositum oy, 2-etyyliheksanoli*. [WWW-sivu]. Saatavilla: <http://www.ositum.fi/index.php?p=2etyyliheksanoli> (luettu 1.3.2019).
- [10] Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. *Miten kosteusvaurio syntyy*. [WWW-sivu]. Saatavilla: <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/sisailma/hometalo-ja-kosteusvaurio/miten-kosteusvaurio-syntyy-miten-kosteusvaurio-syntyy-> (luettu 1.3.2019).
- [11] AMS. *IAQ-core air quality sensor datasheet*. [PDF-dokumentti]. Saatavilla: <http://ams.com/eng/content/download/686523/1787697/348216> (luettu 1.1.2019).
- [12] Sensirion. *SGP30 gas sensor datasheet*. [PDF-dokumentti]. Saatavilla: https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/0_Datasheets/Gas/Sensirion_Gas_Sensors_SGP30_Datasheet.pdf (luettu 1.3.2019).
- [13] Texas Instruments. *LM317 voltage regulator datasheet*. [PDF-dokumentti]. Saatavilla: www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf (luettu 1.2.2019).
- [14] Sensirion. *Sensirion_Gas_Sensors_IAQ-VOC_Product_Brochure_EN*. [PDF-dokumentti]. Saatavilla: https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/9_Gas_Sensors/Sensirion_Gas_Sensors_IAQ-VOC_Product_Brochure_EN.pdf (luettu: 1.3.2019).

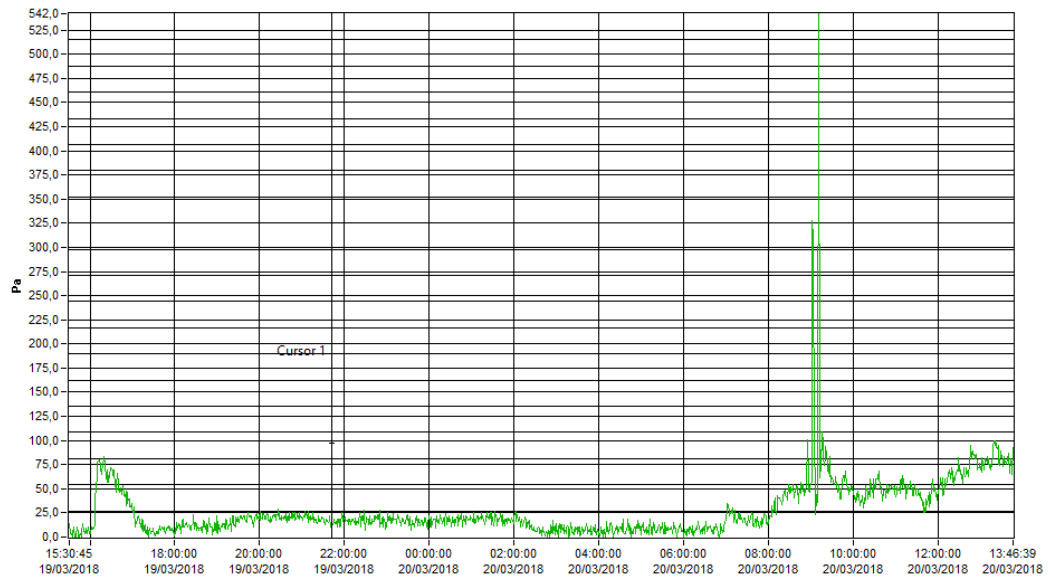
Testattavien laitteiden trendikäyrät



Laitteen numero 1 TVOC-trendikäyrä (ppb).



Laitteen numero 2 TVOC-trendikäyrä (ppb).



Laitteen numero 3 TVOC-trendikäyrä (ppb).