

Enni Haverinen

Hiilidioksidimittalaitteiden suorituskykyvertailu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

5.1.2015

Tekijä Otsikko	Enni Haverinen Hiilidioksidimittalaitteiden suorituskykyvertailu
Sivumäärä Aika	38 sivua 5.1.2015
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	elektroniikka ja terveydenhuollon tekniikka
Ohjaajat	yliopettaja Matti Fischer T&K päällikkö Riku Hakala
<p>Tässä insinööryössä tehtiin Vaisalan ja sen kilpailijoiden hiilidioksidimittalaitteiden suorituskykyvertailu. Suorituskykyvertailu tehtiin kahden Vaisalan hiilidioksidimittalaitteen ja kolmen eri valmistajan hiilidioksidimittalaitteiden kesken. Työn tavoitteena oli tuottaa tietoa Vaisalalle sen kilpailijoiden laitteista, niiden suorituskyvystä Vaisalan laitteisiin verrattuna ja materiaalia markkinoinnin tueksi.</p> <p>Suorituskykyä testattiin erityisesti olosuhdetestien avulla, joilla saadaan muodostettua kuvaa mm. hiilidioksidimittalaitteiden pitkän ajan stabiiliudesta. Tällaisia olosuhdetestejä ovat esim. hiilidioksidimittalaitteiden testaaminen eri lämpötiloissa ja kosteudessa. Laitteita vertailtiin testien lisäksi mittausteknologioiden osalta.</p> <p>Hiilidioksidimittalaitteille tehtyjen testien avulla saatiin hyvä yleiskuva, millaisia Vaisalan ja kilpailijoiden hiilidioksidimittalaitteet ovat suorituskyvyltään. Vaisalan hiilidioksidimittalaitteet pärjäsivät suorituskykyvertailussa hyvin: erityisesti olosuhdetesteissä ja pitkän ajan stabiiliudessa.</p>	
Avainsanat	Hiilidioksidi, mittalaite, suorituskykyvertailu

Author Title Number of Pages Date	Enni Haverinen Performance Comparison of Carbon Dioxide Measurement Devices 38 pages 5 January 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical engineering
Specialisation option	Electronics and medical engineering
Instructors	Matti Fischer, Principal Lecturer Riku Hakala, R&D Manager
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to perform a performance comparison between Vaisala's and its competitor's carbon dioxide measurement devices. In this performance comparison two different Vaisala's and three competitor's devices from different manufacturers were tested. The purpose of testing was to produce information to Vaisala about its competitor's technology, performance and also material for marketing purposes.</p> <p>Comparison was made by testing devices in different environments for example in different temperature and humidity. Test results provided information about overall performance and stability of carbon dioxide measurement device in long term use.</p> <p>Measurement results provided a good overview about performance of Vaisala's and its competitor's carbon dioxide measurement devices. Vaisala's devices performed well in the tests, particularly in environmental tests and long term stability.</p>	
Keywords	Carbon dioxide, measurement device, performance comparison

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Hiilidioksidi	2
2.1	Hiilidioksidin ominaisuudet	2
2.2	Hiilen kiertokulku	2
2.3	Kasvihuoneilmiö ja ihmisen vaikutus siihen	3
2.4	Hiilidioksidi ja terveysvaikutukset	4
2.5	Hiilidioksidin käyttäminen sovelluksissa ja teollisuudessa	5
2.5.1	Hiilidioksidin käyttö inkubaattoreissa	5
2.5.2	Hiilidioksidin käyttö teollisuudessa	6
2.5.3	Hiilidioksidin käyttö maataloudessa	7
2.6	Ideaalikaasulaki	8
3	Hiilidioksidin mittaaminen	10
3.1	Hiilidioksidianturin mittauseriaatteet	10
3.1.1	Yhden säteen ja yhden aallonpituuden NDIR-anturi	11
3.1.2	Kahden säteen ja yhden aallonpituuden NDIR-anturi	11
3.1.3	Yhden säteen ja kahden aallonpituuden NDIR-anturi	12
3.1.4	Vaisalan CARBOCAP® -hiilidioksidianturi	12
4	Hiilidioksidimittalaitteet	14
4.1	Ilmanvaihdon valvonnan mittalaitteet	14
4.2	Inkubaattorien ja sääkaappien mittalaitteet	15
5	Vaisalan ja kilpailijoiden hiilidioksidimittalaitteet	16
5.1	Vaisalan GMM222 -hiilidioksidimoduuli	16
5.2	Vaisalan GMP231 -hiilidioksidimittapää	17
5.3	Kilpailija 1:n hiilidioksidimittalaite	17

5.4	Kilpailija 2:n hiilidioksidimittalaite	18
5.5	Kilpailija 3:n hiilidioksidimittalaite	18
5.6	Vaisalan ja kilpailijoiden hiilidioksidimittalaitteiden teknologiavertailu	18
6	Hiilidioksidimittalaitteiden testaaminen	20
6.1	Hiilidioksidimittalaitteiden tarkkuus	20
6.2	Hiilidioksidimittalaitteiden vasteaika	22
6.3	Hiilidioksidimittalaitteiden olosuhdetestit	24
6.3.1	Hiilidioksidimittalaitteiden jatkuva kostea lämpö -testit	24
6.3.2	Hiilidioksidimittalaitteiden korkealämpötilatetit	28
6.3.3	Hiilidioksidimittaukset eri lämpötiloissa	32
7	Yhteenveto	35
	Lähteet	36

Lyhenteet

ABC	Automatic Background Calibration; automaattinen taustapitoisuus kalibrointi
FPI	Fabry-Perot Interferometer; elektronisesti säädettävä suodatin, joka sijaitsee Vaisala CARBOCAP-anturissa infrapunadetektorin edessä
LSL	Lower Specification Limit; alempi spesifikaatoraja
NDIR	Nondispersive Infrared Sensor; ei-dispersiivinen infrapuna-anturi
ppm	parts per million; suhteellinen suhdeyksikkö, joka kuvaa esim. tilavuuden miljoonasosaa.
USL	Upper Specification Limit; ylempi spesifikaatoraja

1 Johdanto

Tämä insinööri työ on tehty Vaisala Oyj:lle, joka on maailman johtava teollisuuden ja ympäristön mittausratkaisuja tuottava yritys. Se tarjoaa teollisuuden, meteorologian ja muiden säästä riippuvaisten toimialojen mittaustarpeisiin kattavan valikoiman erilaisia havainto- ja mittalaitteita.

Hiilidioksidilla on tärkeä rooli maapallon hiilikierrossa. Sitä vapautuu ilmakehään palamisreaktioissa ja se sitoutuu takaisin maaperään yhteyttämisen kautta. Hiilidioksidin mittaustarvetta ilmenee useissa teollisuuden sovelluksissa, joissa hiilidioksidia käytetään tai sitä vapautuu hengitysilmaan. Suuret hiilidioksidipitoisuudet saattavat olla haitallisia ihmisille, joten tarkkojen ja stabiilien hiilidioksidianturien käyttäminen on hyvin tärkeää.

Tässä insinööri työssä vertaillaan Vaisalan ja sen kilpailijoiden hiilidioksidimittalaitteiden suorituskykyä erilaisten testien avulla. Laitteita vertaillaan erityisesti ilmastollisten olosuhdetestien avulla, johon kuuluvat laitteiden altistamiset erilaisille lämpötiloille ja kosteuksille. Tällaiset testit antavat kattavaa tietoa mitattavasta laitteesta ja erityisesti pitkän ajan stabiilisuudesta. Lisäksi työssä vertaillaan laitteiden teknologioita, tarkkuutta ja vasteaikaa. Testien päätarkoituksena on tuottaa tietoa, millaisia kilpailevien valmistajien hiilidioksidimittalaitteet ovat suorituskyvyltään verrattuna Vaisalan vastaaviin hiilidioksidimittalaitteisiin. Insinööri työn tuloksia on myös mahdollista käyttää markkinoinnin tukena. Lisäksi insinööri työ toimii ohjekirjana, kuinka kilpailijalaitetestausta olisi hyvä suorittaa tulevaisuudessa.

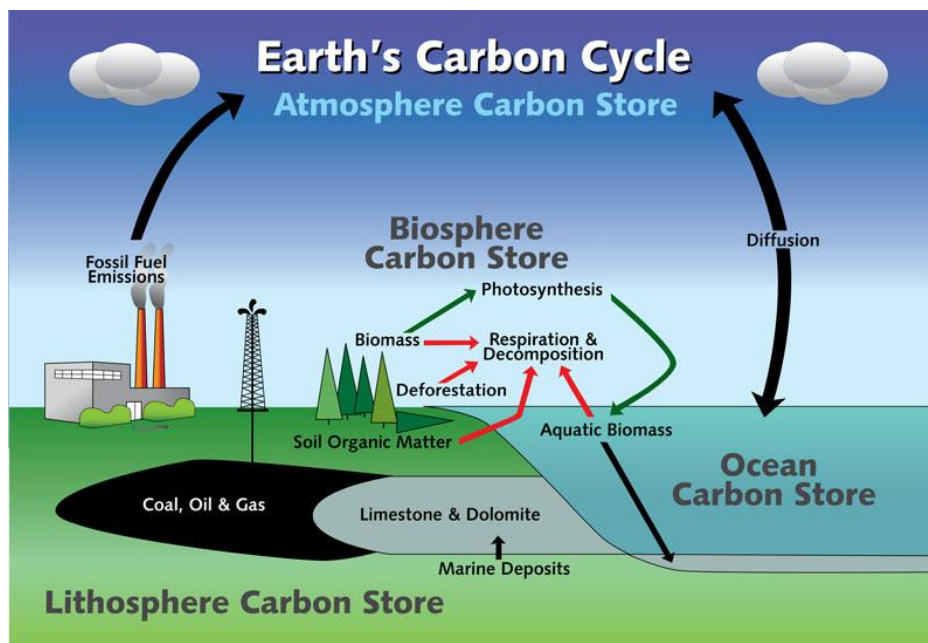
2 Hiilidioksidi

2.1 Hiilidioksidin ominaisuudet

Hiilidioksidimolekyyli (molekyylikaavaltaan CO_2) koostuu yhdestä hiiliatomista ja kahdesta happiatomista. Sitä esiintyy luontaisesti normaaliolosuhteissa värittömänä ja hajuttomana kaasuna ilmakehässä. Hiilidioksidia syntyy sekä luontaisesti maapallon hiilikierrosta että ihmisen toiminnasta. [1.]

2.2 Hiilen kiertokulku

Maapallon hiili on varastoituneena biosfäärin eläviin ja kuolleisiin organismeihin, maaperän orgaaniseen materiaan, maankuoren fossiilisiin polttoaineisiin, valtameriin ja ilmakehään hiilidioksidina. Näitä hiilivarastoja sanotaan hiilinieluiksi. Kuten kuvasta 1 nähdään, hiilikierrossa hiilidioksidia vapautuu näistä hiilinieluista muun muassa palamisreaktioissa ilmakehään, josta se palautuu jälleen hiilinieluihin fotosynteesin avulla ja lopulta maatumisen kautta maankuoreen sekä diffuusion avulla valtameriin. [2.]



Kuva 1. Hiilen kiertokulku [3]

Ilmakehän hiilidioksidi toimii raaka-aineena kasvien yhteyttämisessä eli fotosynteesissä. Yhteyttämisreaktiossa kasvit muodostavat glukoosia ja happea hiilidioksidista ja vedestä valoenergian avulla. Yhteyttämisen avulla kasvit tuottavat itselleen käyttökelpoista energiaa. [4.]

Fotosynteesireaktiota kuvaa seuraava yhtälö:



2.3 Kasvihuoneilmiö ja ihmisen vaikutus siihen

Kasvihuoneilmiöksi kutsutaan ilmiötä, jossa maan ilmakehä päästää sisään auringon lyhytaaltoisen säteilyn, mutta estää maapallolta tulevan pidempiaaltoisen säteilyn poistumisen. Tällöin maapallon ilmakehä toimii kasvihuoneen tavoin, josta tämä ilmiö on saanut nimensä. Maapallon elämän kannalta kasvihuoneilmiö on välttämätön, mutta ihmisten toimesta monen kasvihuonekaasun taseeseen on tullut merkittäviä muutoksia. Tämä ilmenee ilmastonlämpenemisen lisäksi ilmansaasteina, jotka ovat terveydelle haitallisia.

Tärkeimpiä kasvihuonekaasuja ovat vesihöyry, hiilidioksidi, metaani, dityppioksidi ja otsoni. Nämä kaasut absorboivat erittäin voimakkaasti lämpösäteilyä ilmakehässä. Vesihöyryn määrään ilmakehässä ihmisen toimilla ei ole juurikaan vaikutusta, mutta hiilidioksidin ja metaanin määrä on ajan kuluessa kasvanut. Hiilidioksidin määrää on kasvattanut erityisesti fossiilisten polttoaineiden käyttö, energiantuotanto, metsien kaataminen ja teollisuus. Metaania ilmakehään vapautuu maataloudesta, kaatopaikoilta, jätevedenkäsittelystä ja fossiilisten polttoaineiden käytöstä. [5, s.96 - 99.]

Teollisen vallankumouksen jälkeen hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä on kasvanut noin 35 %. Ennen teollista vallankumousta ilmakehän hiilidioksidipitoisuus oli noin 280 ppm (parts per million; tilavuuden miljoonasosa), kun nykypäivänä pitoisuus on noin 385 ppm. Hiilidioksidin määrän oletetaan kasvavan tulevaisuudessa noin 2 ppm joka vuosi. [1.]

2.4 Hiilidioksidi ja terveysvaikutukset

Hiilidioksidipitoisuuden ollessa alle 2 % eli 20 000 ppm hiilidioksidista ei ole todettu aiheutuvan ihmiselle terveysvaikutuksia. Hiilidioksidipitoisuuden kasvaminen hengitysilmassa aiheuttaa ihmiselle hapenpuutetta, joka ilmenee suorituskyvyn heikentymisenä, pahoinvointina, päänsärkynä tai tajuttomuutena. Suurissa pitoisuuksissa (kun ilman happipitoisuus on alle 18 %) hiilidioksidi saattaa syrjäyttää hapen, jonka seurauksena tapahtuu tukehtuminen. Taulukossa 1 esitetään hiilidioksidin vaikutukset ihmiselle eri pitoisuuksissa. [6.]

Tiloissa joissa hiilidioksidipitoisuus saattaa nousta huomattavasti, on mitattava hiilidioksidipitoisuutta jatkuvasti. Lisäksi tilojen tulee olla hyvin ilmastoidut haitallisten terveysvaikutusten välttämiseksi.

Taulukko 1. Hiilidioksidialtistumisen vaikutukset ihmiseen eri pitoisuuksissa [7]

Hiilidioksidipitoisuus	Vaikutus ihmiseen
350 - 450 ppm	Tyypillinen ilmakehän hiilidioksidipitoisuus
600 - 800 ppm	Hyväksyttävä sisäilmanlaatu
1 000 ppm	Siedettävä sisäilmanlaatu
5 000 ppm	Keskimääräinen raja yli 8 tunnin altistumiselle
6 000 - 30 000 ppm	Huolestuttava, vain lyhyt aikainen altistuminen
30 000 - 80 000 ppm	Hengitystiheyden kasvaminen, päänsärky
> 100 000 ppm	Pahoinvointi, oksentelu, tajuttomuus
> 200 000 ppm	Nopea tajuttomuus, kuolema

2.5 Hiilidioksidin käyttäminen sovelluksissa ja teollisuudessa

Hiilidioksidia käytetään runsaasti eri teollisuuden aloilla. Esimerkiksi ruokateollisuudessa hiilidioksidia käytetään virvoitusjuomien ja oluiden hiilihapotuksessa, elintarvikkeiden suojakaasupakkaamisessa ja elintarviketeollisuudessa kylmäaineena. Kasvihuoneissa hiilidioksidia käytetään kasvien hiilidioksidilannoituksessa. Hiilidioksidi on inerttiä eli reaktiokyvytöntä kaasua, joten sitä voidaan käyttää myös hapettumissuojauksessa, palojen ja räjähdysten ehkäisyssä ja palonsammuttimissa. [6.]

2.5.1 Hiilidioksidin käyttö inkubaattoreissa

Inkubaattoreita käytetään laboratorioissa erityisesti solujen kasvatukseen ja ylläpitämiseen. Inkubaattorit voidaan jakaa kahteen ryhmään: CO₂-inkubaattoreihin ja mikrobiologiin inkubaattoreihin. CO₂-inkubaattoreita käytetään pääasiassa soluviljelyssä kun taas mikrobiologisia inkubaattoreita käytetään bakteeriviljelmien kasvatukseen ja ylläpitämiseen. CO₂-inkubaattorien avulla saadaan aikaiseksi soluille optimaaliset olosuhteet (taulukko 2). Inkubaattorin lämpötila on yleensä n. 37 °C, ilman suhteellinen kosteus 95 %RH ja hiilidioksidipitoisuus n. 5 %. Mikrobiologiset inkubaattorit ovat pääsääntöisesti lämpötilakaappeja, joiden lämpötila vaihtelee 5 - 70 °C:een välillä.

Taulukko 2. CO₂-inkubaattoreissa tyypillisesti ylläpidettävät olosuhteet [8]

Olosuhde	Arvo
Lämpötila	37 °C
Ilman suhteellinen kosteus	95 %RH
Hiilidioksidipitoisuus	5 %
Happamuus	pH 7,0 - 7,4

Inkubaattoreita on puhdistettava ajoittain kontaminaation ehkäisemiseksi. Inkubaattori-valmistajat ovat kehittäneet tähän useita erilaisia keinoja perinteisten desinfiointiaineiden lisäksi. Tällaisia menetelmiä ovat mm. ultraviolettivalon käyttäminen, ilma-suodattimet, kostean ja kuuman ilman tai pelkän kuuman ilman (kuumasterilisointi) käyttäminen. Kuumasterilisoinnissa lämpötila vaihtelee yleensä 160 - 180 °C:een välillä, ja sen

hyöty muihin puhdistustapoihin verrattuna on nopeus. Esimerkiksi kuumasterilisointi 180 asteessa kestää n. 30 min, kun taas kuuman ja kostean lämpötilan (lämpötila vaihtelee 90 - 120 °C:een) käyttö vaatii aikaa useita tunteja. [9.]

Hiilidioksidia käytetään ylläpitämään inkubaattoreissa happamuustasapainoa, joka vaihtelee normaalisti 7,0 - 7,4 pH. Happamuuteen vaikuttaa liuenneen hiilidioksidin ja vetykarbonaatin eli bikarbonaatin (HCO_3^-) tasapaino, joten ilman muuttuva hiilidioksidipitoisuus vaikuttaa inkubaattorissa vallitsevaan happamuuteen. Tätä voidaan ehkäistä käyttämällä ulkoista hiilidioksidilähdettä, jolloin inkubaattorin hiilidioksidipitoisuus saadaan pidettyä tasaisesti 5 % hiilidioksidipitoisuudessa. Tämän vuoksi useat inkubaattorivalmistajat käyttävät inkubaattoreissa hiilidioksidimittauslaitteita, jotta hiilidioksidipitoisuus voidaan tarkasti määritellä. [10.]

2.5.2 Hiilidioksidin käyttö teollisuudessa

Hiilidioksidia käytetään hyödyksi teollisuudessa mm. kylmälaitoksissa ja virvoitusjuomatuotannossa. Hiilidioksidia tulee valvoa useilla eri teollisuudenaloilla, joissa hiilidioksidipitoisuus saattaa nousta liian korkeaksi ja siten terveydelle haitalliseksi. Tällaisia aloja ovat esimerkiksi elintarviketeollisuus (mm. virvoitusjuomateollisuus ja fermentaatioprosessit) ja varastointi.

Fermentaatio- eli käymisprosesseja käytetään elintarvike- ja lääketeollisuudessa. Fermentaatiolla tarkoitetaan aineenvaihduntatapautumaa, jossa orgaanisia aineita pilkotaan tietyiksi tuotteiksi käyttäen hyödyksi mikrobeja, kuten bakteereja, hiivoja ja homeita. Yleisimpiä teollisuudessa tuotettuja käymistuotteita ovat alkoholi, antibiootit, aminohapot ja entsyymit. Fermentaatioprosessissa aineenvaihduntatuotteena syntyy hiilidioksidia, jonka pitoisuus saattaa kasvaa hyvinkin suureksi prosessin aikana.

Virvoitusjuomateollisuudessa hiilidioksidia lisätään virvoitusjuomiin pullotusprosessin aikana, jolloin juomille saadaan niille ominainen hiilihappopitoisuus. Pullotusprosessissa hiilidioksidia lisätään täyttölaitteista suuria määriä juomasäiliöihin. Prosessin aikana hiilidioksidia saattaa vuotaa täyttölaitteista huoneilmaan.

Varastoissa (kuten kylmä- ja elintarvikevarastot) hiilidioksidipitoisuutta tulee tarkkailla varastotilassa ja tarvittaessa säädellä ilmanvaihtoa. Kylmävarastoissa hiilidioksidin (R744) käyttö jäähdytysaineena on yleistynyt nopeasti, sillä se on ympäristöystävälli-

nen, paloturvallinen ja myrkytön toisin kuin perinteiset jäähdytysaineet. Höyrystettäessä nestemäistä hiilidioksidia kaasuksi se sitoo itseensä moninkertaisesti lämpöenergiaa verrattuna muihin jäähdytysaineisiin. Tästä syystä hiilidioksidin pumppauskustannukset ovat huomattavan alhaiset, sillä se tuottaa suuren jäähdytystehon pienilläkin nestevirtauksilla. [11; 12; 13; 14.]

2.5.3 Hiilidioksidin käyttö maataloudessa

Hiilidioksidia on tarpeen mitata maataloudessa mm. eläinsuojissa ja kasvihuoneissa. Mittaamalla hiilidioksidia voidaan varmistaa, että näissä tiloissa hiilidioksidipitoisuus pysyy optimaalisena ja sitä voidaan tarvittaessa säätää. Lisäksi hiilidioksidin valvonta tuo maatalousyrittäjälle huomattavia säästöjä energian ja hiilidioksidikaasun kulutuksessa, sillä valvonnan avulla voidaan ehkäistä turhaa ilmastointia tai kaasunkäyttöä.

Kasvihuoneissa pyritään säätämään olosuhteet sellaisiksi, että ne olisivat kasvatettaville kasveille mahdollisimman optimaaliset. Kasvihuoneissa mitattavia määreitä ovat lämpötila, suhteellinen kosteus ja hiilidioksidipitoisuus. Hiilidioksidia käytetään kasvihuoneissa kasvien lannoitukseen. Kasvit käyttävät hiilidioksidia ja vettä hyödykseen fotosynteesissä (kaava 1), jonka avulla ne tuottavat itselleen hyödyntämiskelpoista energiaa vapauttaen samalla happea. Viljeltävästä kasvista riippuen kullakin kasvilla on oma optimaalinen ilman hiilidioksidipitoisuus (yleensä noin 1 000 ppm), jossa kasvi voi kasvaa ihanteellisesti. Pitämällä hiilidioksidipitoisuus oikeanlaisena kasveille voidaan satoa kasvattaa jopa 40 % verrattuna kasvatukseen, jossa hiilidioksidia ei säädellä. Hiilidioksidipitoisuus pidetään tietyssä pitoisuudessa ilmanvaihdon tai ulkoisen hiilidioksidisyötön avulla, sillä liian alhainen tai korkea hiilidioksidipitoisuus on kasvien kasvun kannalta haitallista. Lisäksi hiilidioksidipitoisuuden kasvaminen yli 5 000 ppm on haitallista ihmisen terveydelle.

Eläinsuojissa (esim. karjasuojissa, kanaloissa ja sikaloissa) tarvitaan ilmastointia, jotta eläimille voidaan tuottaa tasaiset olosuhteet. Hiilidioksidin lisäksi eläinsuojissa pitää mitata lämpötilaa ja kosteutta. Eläinsuojissa ihanteellinen hiilidioksidipitoisuus on noin 370 ppm luokkaa. Hiilidioksidia syntyy eläinten uloshengityksen kautta. Eläinsuojien sisäilmaa tulee ilmastoida liian korkean hiilidioksidipitoisuuden välttämiseksi. Sisäilman hiilidioksidipitoisuuteen vaikuttaa eläinten lukumäärä ja päivärytmi sekä kuinka kauan ne viettävät aikaa tiloissa. Korkea hiilidioksidipitoisuus heikentää eläinten elinolosuhteita, jolloin eläimet ovat alttiina sairauksille. Lisäksi huonolla ilmanvaihdolla saattaa olla

vaikutuksia myös rakennusten rakenteisiin. Hiilidioksidin valvonnalla voidaan estää myös liiallinen ilmastointi, sillä se on energiaa kuluttavaa ja tuo yrittäjälle lisäkustannuksia. [15; 16; 17.]

2.6 Ideaalikaasulaki

Kaasuantureiden mittaustulokseen vaikuttaa mitattavan kaasun molekyylitiheys, joka muuttuu lämpötilan ja paineen vaikutuksesta. Ideaalikaasulain avulla voidaan lämpötilan ja paineen vaikutusta mittaukseen ja sitä voidaan käyttää hyödyksi mittalaitteiden hiilidioksidilukemien kompensoinnissa.

Lämpötilan, paineen ja tilavuuden välisiä riippuvuuksia kuvaavat klassiset kaasulait. Ideaalikaasuksi kutsutaan kaasua, joka noudattaa näitä lakeja tarkasti. Ideaalikaasu on teoreettinen kaasu, joka koostuu pistehiukkasista, jotka liikkuvat satunnaisesti. Ideaalikaasumolekyyliden oletetaan törmäilevän kimmoisasti seinämien ja toistensa kanssa ja että molekyyliden väliset voimat ovat merkityksettömiä.

Todellisuudessa reaalikaasut eli todelliset kaasut noudattavat näitä lakeja vain likimääräisesti. Toisin kuin ideaalikaasut reaalikaasuilla on äärellinen koko ja molekyylit ovat vuorovaikutuksessa keskenään myös silloin, kun ne eivät törmää toisiinsa. Paineen ollessa pieni, alle 1 MPa (normaali ilmanpaine on 1013 hPa), monet kaasut noudattavat ideaalikaasulakeja melko tarkasti. Paineen ollessa suuri, ideaalikaasulain tilanyhtälö antaa liian pienen tilavuuden ja lämpötilan kasvaessa liian suuren tilavuuden arvon. Ideaalikaasua kuvaa ideaalikaasun yleinen tilanyhtälö

$$pV = nRT, \tag{2}$$

jossa p on kaasun paine (Pa), V on kaasun tilavuus (m^3), n on kaasun ainemäärä (mol), R on yleinen kaasuvakio ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) ja T = lämpötila (K).

Kaavan mukaisesti ideaalikaasun yleinen tilanyhtälö liittyy paineen, tilavuuden ja lämpötilan tiettyyn kaasumäärän tilaan. Paineen ja lämpötilan muutos nähdään anturin ppm-lukeman muutoksena, kun kaasun tiheys muuttuu tämän seurauksena. Taulukosta 3 nähdään esimerkiksi miten paljon 1 000 ppm hiilidioksidilukema muuttuu paineen

ja lämpötilan vaikutuksesta. Ideaalikaasulain yleisen tilanyhtälön avulla voidaan tehdä kompensointeja lukeman korjaamiseksi. [7; 18, s. 31, s. 33, s. 39; 19.]

Taulukko 3. Hiilidioksidinäyttämään (1 000 ppm) aiheutuva muutos paineen ja lämpötilan vaikutuksesta ideaalikaasulain mukaan, kun näyttämä on kalibroitu 25 °C:ssa ja 1013 hPa:ssa [7]

		Lämpötila [°C]						
		0	10	20	25	30	40	50
Paine [hPa]	800	862	832	803	790	777	752	729
	900	970	936	904	888	874	846	820
	1000	1078	1039	1004	987	971	940	911
	1013	1092	1053	1017	1000	983	952	923
	1100	1185	1143	1104	1086	1068	1034	1002
	1200	1293	1247	1205	1185	1165	1128	1093
	1300	1401	1351	1305	1283	1262	1222	1184

Ideaalikaasulain avulla voidaan laskea paineen ja lämpötilan vaikutusta hiilidioksidipitoisuuteen alla olevalla kaavalla, kun kaasun konsentraatio on tiedossa normaaliolosuhteissa. Kun ideaalikaasulain yleisen tilanyhtälöön sijoitetaan kaasun ainemäärän n tilalle pV / M ja oletetaan, että kahdessa erilaisessa olosuhteissa M on vakio, saadaan muodostettua alla oleva yhtälö:

$$\rho(t, p) = \rho(25\text{ °C}, 1013\text{ hPa}) * \frac{p}{1013} * \frac{298}{(273+t)} \quad (3)$$

Missä ρ on kaasun konsentraatio (ppm tai %), p on paine mittaolosuhteissa (hPa) ja t on lämpötila mittaolosuhteissa (°C). [7.]

3 Hiilidioksidin mittaaminen

3.1 Hiilidioksidianturin mittausperiaatteet

Hiilidioksidianturi on väline, jonka avulla voidaan mitata kaasun hiilidioksidipitoisuutta. Yleisimmät hiilidioksidin mittaamiseen tarkoitettut anturit ovat ei-dispersiivisiä infrapuna-antureita (NDIR) tai kemiallisia antureita.

Kemialliset anturit koostuvat polymeeri- tai heteropolysiloksaanikerroksista. Nämä anturit ovat pienikokoisia ja kuluttavat hyvin vähän energiaa. Kemiallisten anturien ongelmana on kuitenkin lyhyen ja pidemmän aikavälin näyttämisen vääristyminen ja eliniän lyhyys verrattuna NDIR-antureihin.

Ei-dispersiivinen infrapuna -anturi koostuu tyypillisesti mm. mittauskammioista, valonlähteestä ja infrapunadetektorista. Infrapunasäteily syntyy valonlähteestä, josta se ohjataan mittakammioon ja mitattavan kaasun läpi infrapunadetektorille. Detektorille saapuneen infrapunasäteilyn määrän avulla saadaan selville mittakammion hiilidioksidipitoisuus.

Hiilidioksidille ominainen absorptiokaista on infrapuna-alueella aallonpituudella 4,26 μm . Kuvassa 2 valonlähteen tuottama infrapunasäteily kulkee hiilidioksidipitoisen kaasun läpi ja osa säteilystä absorboituu hiilidioksidimolekyyleihin. Hiilidioksidin määrä vaikuttaa siihen, miten paljon absorptiota tapahtuu. Mitä enemmän hiilidioksidia on optisella matkalla, sitä enemmän tapahtuu infrapunan absorptiota ja samalla detektorille saapuu vähemmän säteilyä.



Figure 1.
Infrared absorption of CO_2 molecules can be detected with an infrared detector.
A: Infrared source. **B:** Optical path. **C:** Detector.

Kuva 2. Hiilidioksidin aiheuttama infrapunan absorptio mittauskammiossa [8]

Infrapunatekniikan avulla voidaan havaita hiilidioksidin lisäksi myös muita kahdesta tai useammasta erilaisesta atomista koostuvia kaasuja, kuten vesihöyryä, metaania ja hiilimonoksidia. Nämä kaasut absorboivat infrapunaa ominaisella tavalla ja aallonpituudella. [7; 20; 21.]

3.1.1 Yhden säteen ja yhden aallonpituuden NDIR-anturi

Yhden säteen ja yhden aallonpituuden NDIR-anturissa (kuva 3) on yksi infrapunalähde, mittauskammio ja yksi detektori. Tällaisessa anturissa ongelmana on hiilidioksidilukeman ryömiminen pois oikeasta näyttämästä pitkällä aikavälillä. Tämä johtuu esimerkiksi infrapunalähteen intensiteetin muuttumisesta ajan kuluessa. Tämä menetelmä on myös erityisen herkkä anturin pinnalle kerääntyvälle lialle ja pölylle, mikä heikentää anturin näyttämän lukeman luotettavuutta. Lisäksi ongelmana on infrapunadetektorin lämpötilaherkkyys. [21.]



Kuva 3. Yhden säteen ja yhden aallonpituuden NDIR-anturin rakenne; kuvassa nähdään yksi valonlähde ja yksi detektori

3.1.2 Kahden säteen ja yhden aallonpituuden NDIR-anturi

Kahden säteen ja yhden aallonpituuden NDIR-anturissa on kaksi infrapunalamppua ja yksi detektori. Kuvasta 4 nähdään, miten yksi lampuista toimii hiilidioksidin mittausta varten ja toinen referenssinä. Referenssilamppua voidaan käyttää automaattisen kalibroinnin apuna. Tämän menetelmän hyviä puolia ovat kustannustehokkuus ja stabiilius lämpötilan suhteen. Kahden lampun ja niiden intensiteetin heikkenemisen vuoksi ajan kuluessa tämä menetelmä on epäluotettava pitkän ajan stabiiliuden suhteen. [22.]



Kuva 4. Kahden säteen ja yhden aallonpituuden NDIR-anturin rakenne: yksi detektori ja kaksi lamppua, joista toinen toimii referenssinä ja toinen mittaavana lamppuna [22]

3.1.3 Yhden säteen ja kahden aallonpituuden NDIR-anturi

Anturissa, jossa käytetään yhden säteen ja kahden aallonpituuden NDIR -menetelmää, on yksi infrapunalamppu hiilidioksidin mittausta varten ja kaksi detektoriä (kuva 5). Yksi detektori on viritetty $4,2 \mu\text{m}$ aallonpituudelle, joka on hiilidioksidille ominainen absorptioaallonpituus. Toinen detektoreista on viritetty $3,9 \mu\text{m}$ aallonpituudelle, jossa ei tapahdu minkään kaasun absorptiota. Hiilidioksidipitoisuus lasketaan molempien detektoreiden ulostulojen avulla. Tämän menetelmän hyvinä puolina on pitkän ajan stabiilius. Se on toisaalta kallis toteuttaa, herkkä lämpötilan muutoksille ja epäsymmetriselle kontaminaatiolle sekä kahden detektorin erilaiselle lämpötilakäyttäytymiselle. [22.]

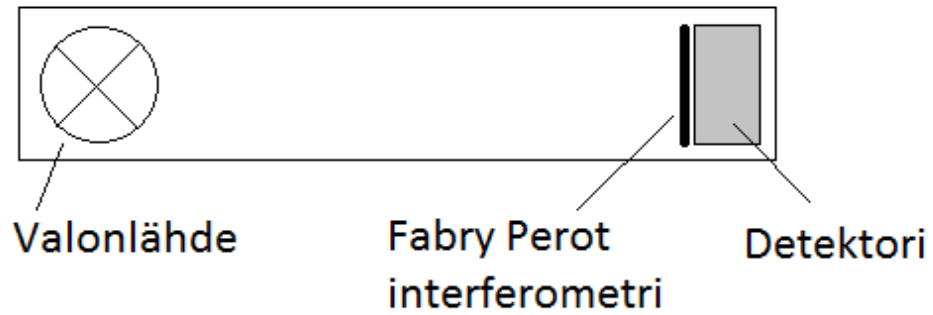


Kuva 5. Yhden säteen ja kahden aallonpituuden NDIR-anturin rakenne; kuvassa on yksi valonlähde ja kaksi detektoriä [22]

3.1.4 Vaisalan CARBOCAP® -hiilidioksidianturi

Kuvassa 6 nähdään Vaisalan CARBOCAP® -hiilidioksidianturi, jossa käytetään myös yhden säteen ja kahden aallonpituuden NDIR -menetelmää. Toisin kuin edellä mainitussa menetelmässä, CARBOCAP®-anturissa on yksi valonlähde, mikromekaaninen Fabry-Perot-Interferometri (FPI) ja yksi detektori kahden sijasta.

Fabry-Perot-Interferometri on sijoitettu anturissa detektorin eteen. Se toimii viritettävänä suodattimena, joka päästää läpi detektorille vain tietyntyylisiä aallonpituuksia. Nämä aallonpituudet ovat hiilidioksidin absorptioaallonpituus ja aallonpituus jossa hiilidioksidin absorptiota ei tapahdu. [23.]



Kuva 6. Vaisalan CARBOCAP® -anturin rakenne; yksi valonlähde, Fabry-Perot-Interferometri ja yksi detektori

4 Hiilidioksidimittalaitteet

Kun hiilidioksidimittalaitetta valitaan, kannattaa kiinnittää huomiota valmistajien antamiin tietoihin koskien laitteen suorituskykyä. Tällaisia ovat esimerkiksi mittalaitteen tarkkuus, mittausalue (ppm- tai %-luokan laite), vasteaika, pitkän ajan stabiilius, tehonkulutus ja helppo kunnossapito. Muita huomioitavia ominaisuuksia on mm. lämpötilan ja kosteuden sieto, IP-luokitus (Ingress Protection), laitteen elinikä ja siitä saatavat analogiset tai digitaaliset ulostulot. Lisäksi laite kannattaa valita juuri sen mukaan mihin sovellukseen se on tarkoitettu. [21.]

4.1 Ilmanvaihdon valvonnan mittalaitteet

Hiilidioksidipitoisuus huoneilmassa vaikuttaa huonetilassa olevien ihmisten viihtyvyyteen, suorituskykyyn ja terveyteen. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi teollisuuden tuotantotilat, auditoriot, toimistotilat ja luokkahuoneet. Ilmanvaihto on tärkeää jotta hiilidioksidipitoisuus ei kasva yli sallittujen rajojen. Lisäksi liiallinen ilmanvaihto on energiaa kulluttavaa ja kallista. Hiilidioksidimittalaitteiden avulla voidaan mitata jatkuvasti tilan hiilidioksidipitoisuutta ja tarvittaessa säätää ilmastointia, jolloin säästetään kustannuksissa ja saavutetaan miellyttävä ympäristö.

Ilmanvaihdon valvonnan mittalaitteiden tulee olla hyviä mittaustarkkuudeltaan ja herkkyydeltään. Mittaustarkkuudella tarkoitetaan, kuinka lähelle hiilidioksidimittalaitteen antama hiilidioksidipitoisuuden lukema vastaa oikeaa hiilidioksidipitoisuutta. Herkkyydellä puolestaan tarkoitetaan, kuinka herkästi mittalaite havaitsee pieniä hiilidioksidipitoisuuksia tai kuinka pieniin hiilidioksidipitoisuusmuutoksiin laite vastaa. Muita tarvittavia mittalaitteiden ominaisuuksia ovat pitkän ajan stabiilius ja pitkä elinikä.

Tilat, kuten eläinsuojat ja kasvihuoneet, asettavat mittalaitteille erityisiä vaatimuksia, kun ilmanvaihtoa valvotaan näissä olosuhteissa. Eläinsuojat saattavat olla likaisia ja pölyisiä sekä niissä saattaa olla normaalisti korkeampi lämpötila ja kosteus. Myös kasvihuoneissa lämpötila ja kosteus ovat suhteellisen korkeita. Molemmissa saattaa ilmetä erilaisia kemikaaleja, joita mittalaitteen tulee kestää. [15; 21.]

4.2 Inkubaattorien ja sääkaappien mittalaitteet

Inkubaattoreihin ja sääkaappeihin tarkoitetut hiilidioksidimittalaitteet kestävät tyypillisesti korkeaa lämpötilaa ja kosteutta. Tällaiset olosuhteet vanhentavat mittalaitetta käytön aikana, jolloin mittalaitteen näyttämään saattaa tulla ryömintää. Koska inkubaattoreissa tyypillisesti pyritään pitämään hiilidioksidipitoisuus tasaisena happamuustasapainon ylläpitämiseksi, on tärkeää, että käytettävä hiilidioksidilaitte on lämmön- ja kosteudenkeston lisäksi pitkän ajan stabiili.

Inkubaattoreissa käytetään myös ajoittain sterilisointia epäpuhtauksien syntymisen estämiseksi. Tämä lisää mittalaitteiden vaatimustasoa, sillä laitteita ei useinkaan poisteta sterilisoinnin ajaksi. Kuumasterilisointi vaatii anturilta kuumuuden kestoa, sillä lämpötilaa saatetaan nostaa lähelle 200 astetta. Mittalaitteiden on hyvä sietää myös erilaisia kemiallisia aineita, joita käytetään desinfiointiaineina. [8; 9.]

5 Vaisalan ja kilpailijoiden hiilidioksidimittalaitteet

Tässä insinööriyössä valittiin suorituskykyvertailuun kaksi Vaisalan hiilidioksidimittalaitetta ja kolmen kilpailevan valmistajan CO₂-mittalaitetta. Mittalaitteet valittiin hiilidioksidimittausalueiden ja käyttötarkoitusten mukaan.

5.1 Vaisalan GMM222 -hiilidioksidimoduuli

Vaisalan CARBOCAP® -hiilidioksidimoduuli GMM222 (kuva 7) kuuluu GMM220-hiilidioksidimoduulisarjaan, johon kuuluu useita erilaisia moduuleja eri hiilidioksidimittausalueita varten. GMM222-hiilidioksidimoduuli on tarkoitettu pienemmille hiilidioksidipitoisuuksille ja GMM221 korkeammille hiilidioksidipitoisuuksille. Tässä insinööriyössä käytettiin GMM222:sta, jonka mittausalue on 0 - 10 000 ppmCO₂.

GMM220-hiilidioksidimoduulisarjan laitteet on tarkoitettu ankarien ja vaativien olosuhteiden hiilidioksidimittauksiin. Vaisalan GMM220 -hiilidioksidimoduulisarjan laitteet koostuvat emolevystä, kaapelista ja vaihdettavasta mittapäätä, joka helpottaa kalibrointia ja mittapään vaihtamista. Laitteissa on myös valittavissa erilaisia ulostulo-, kaapeli- ja liitinvaihtoehtoja tarpeen mukaan. [24.]



Kuva 7. Vaisalan CARBOCAP® -hiilidioksidimoduuli GMM222

5.2 Vaisalan GMP231 -hiilidioksidimittapää

Vaisalan CARBOCAP® -hiilidioksidimittapää GMP231 (kuva 8) on tarkoitettu erityisesti inkubaattorivalmistajille, joilla on tarvetta kuumasterilisoinnille epäpuhtauksien poistamiseksi. GMP231-hiilidioksidimittapää kestää + 180 °:een kuuma-altistuksen, sillä sen anturin rakenne ja materiaalit on valittu kuumasterilisoinnin kestäviksi. Tämä takaa samalla laitteen pitkän ajan stabiiliuden. Lisäksi materiaalit on valittu niin, ettei vesihöyryllä, pölyllä ja suurimalla osalla kemikaaleista ole vaikutusta hiilidioksidimittaukseen. Se on optimoitu mittaamaan hiilidioksidipitoisuutta 5 %:sta 20 %:iin. Laitteessa on myös sisäinen paine- ja lämpötilamittaus, joita laite käyttää hyväksi mittaustuloksen kompensoinnissa. [25.]



Kuva 8. Vaisalan CARBOCAP® -hiilidioksidimittapää GMP231 [25]

5.3 Kilpailija 1:n hiilidioksidimittalaite

Kilpailija 1:n hiilidioksidimittalaitetta voidaan käyttää mm. kasvihuoneissa, hedelmä- ja vihannesvarastoissa, inkubaattoreissa ja kananmunahautomoissa. Kuten Vaisalan CARBOCAP® -hiilidioksidimittalaitteissa, Kilpailija 1:n mittalaitteessa on kahden aallonpituuden NDIR-anturi. Sen mittausalue ulottuu 10 000 ppmCO₂ asti ja laitteesta löytyy useita analogisia ja digitaalisia (esim. Modbus RTU) ulostuloja.

5.4 Kilpailija 2:n hiilidioksidimittalaite

Kilpailija 2:n hiilidioksidimittalaite on tarkoitettu korkeammille hiilidioksidipitoisuuksille (0 %:sta 20 %:iin). Mittalaitteen anturissa käytetään yhden säteen ja kahden aallonpituuden NDIR -menetelmää, joka on sama menetelmä kuin Vaisalan CARBOCAP®-antureissa. Laitteen anturipää kestää 200 °:een lämpötilaa ja sitä voidaankin käyttää esimerkiksi inkubaattorisovelluksissa, joissa on kuumasterilisointimahdollisuus. Laitteessa on analogisen ulostulon lisäksi digitaalinen RS232-ulostulo.

5.5 Kilpailija 3:n hiilidioksidimittalaite

Kilpailija 3:n hiilidioksidimittalaite on tarkoitettu käytettäväksi inkubaattoreissa ja sääkaapeissa. Sen hiilidioksidipitoisuuden mitta-alue on 0 %:sta 3 %:iin ja laitteessa on useita erilaisia analogisia ulostuloja. Mittalaite käyttää lukeman korjaamiseksi ABC-menetelmää (Automatic Background Calibration; automaattinen taustapitoisuus kalibrointi), jonka avulla laite kalibroi itsensä tietyin aikavälein pienimmän mittaamansa hiilidioksidilukeman mukaan.

5.6 Vaisalan ja kilpailijoiden hiilidioksidimittalaitteiden teknologiavertailu

Seuraavissa taulukoissa on esitelty insinööriyössä testattujen laitteiden teknisissä tiedoissa ilmoitettuja parametreja. Taulukossa 4 on esitelty ppm-luokan hiilidioksidimittalaitteet, joihin kuuluu Vaisalan GMM222 -hiilidioksidimoduuli sekä Kilpailijoiden 1 ja 3 -hiilidioksidimittalaitteet. Taulukossa 5 on esitelty insinööriyön %-luokan hiilidioksidimittalaitteet, johon kuuluvat Vaisalan GMP231 ja Kilpailija 2 -hiilidioksidimittalaitteet. Laitteiden teknilliset tiedot vaihtelevat valmistajien kesken ja kaikkia parametreja ei välttämättä ole esitelty tiedoissa lainkaan. Esimerkiksi vertailun valmistajista vain Vaisala on ilmoittanut pitkän ajan stabiiliuden GMP231:n ja GMM222:n teknillisissä tiedoissa.

Taulukko 4. Insinööriyössä testattujen ppm-luokan hiilidioksidimittalaitteiden teknologiavertailu; GMM222, Kilpailijat 1 ja 3

Parametri	GMM222	Kilpailija 1	Kilpailija 3
Mittausperiaate	Yhden säteen ja kahden aallonpituuden NDIR-anturi	Kahden aallonpituuden NDIR-anturi	NDIR-anturi, ABC-menetelmä
Mittausalue	0 – 10 000 ppm	0 – 10 000 ppm	0 – 30 000 ppm
Tarkkuus	± (1,5 % alueesta + 2 % lukemasta)	± (100 ppm + 5 % lukemasta)	± 200 ppm
Pitkän ajan stabiilius	< ± 5 % koko mittausalueesta / 2 vuotta	Ei tiedossa	Ei tiedossa
Vasteaika	30 s	60 – 105 s	Ei tiedossa
Ulostulot	Analoginen / digitaalinen	Analoginen / digitaalinen	Analoginen
IP-luokitus	IP65 (mittapää)	IP65 (mittapää)	IP54 (kotelo)
Käyttöympäristö: lämpötila / ilmankosteus	- 20 ... + 60 °C / 0 ... 100 %RH	- 40 ... 60 °C / 0 ... 100 %RH	0 ... 50 °C / 0 ... 95 %RH

Taulukko 5. Insinööriyössä testattujen %-luokan hiilidioksidimittalaitteiden teknologiavertailu; GMP231 ja Kilpailija 2

Parametri	GMP231	Kilpailija 2
Mittausperiaate	Yhden säteen ja kahden aallonpituuden NDIR-anturi	Yhden säteen ja kahden aallonpituuden NDIR-anturi
Mittausalue	0 – 20 %	0 – 20 %
Tarkkuus	± 0,4 %CO ₂ (toistettavuus)	± (0,2 % alueesta + 2 % lukemasta)
Pitkän ajan stabiilius	< ± 0,2 %CO ₂ (pitoisuudessa 0 ... 8 %CO ₂) < ± 1,0 %CO ₂ (pitoisuudessa 12 ... 20 %CO ₂)	Ei tiedossa
Vasteaika	< 30 - 50 s	< 30 s
Ulostulot	Analoginen / digitaalinen	Analoginen / digitaalinen
IP-luokitus	IP54 (anturi)	Ei tiedossa
Käyttöympäristö: lämpötila / ilmankosteus	0 ... + 70 °C / 0 ... 100 %RH	0 ... + 180 °C / ei tiedossa
Kuumasterilisoinnin kesto (lämpötila)	+ 195 °C (Max, anturi)	+ 200 °C (anturi)

6 Hiilidioksidimittalaitteiden testaaminen

Hiilidioksidimittalaitteiden testauksessa tietty hiilidioksidipitoisuus saadaan kaasupulloista, joissa on tarvittava hiilidioksidi- tai typpipitoisuus. Kaasupullojen avulla saadaan laitteelle %- tai ppm-tason hiilidioksidipitoisuuksia. Kun laitteelle syötetään typpeä, saadaan tilanne, jossa hiilidioksidia ei esiinny lainkaan laitteen mittauskammiossa (hiilidioksidipitoisuus on 0 %). Kaasupullosta saatava hiilidioksidi ohjataan letkujen kautta rotametrille, jonka avulla säädellään laitteelle sopiva kaasuvirtaus. Tämän jälkeen kaasu kulkee adapterille, johon laite on kiinnitetty. Adaptereita on useita erilaisia riippuen laitteen rakenteesta. Tässä insinööriyössä adaptereina käytettiin mm. kaasulaatikoita ja -putkia.

Seuraavissa kappaleissa on esitelty keskeisimpiä testejä, joita tehtiin Vaisalan ja kilpailijoiden hiilidioksidimittalaitteille. Testejä suunniteltaessa huomiota kiinnitettiin erityisesti olosuhdetesteihin, sillä ne antavat hyvän kuvan laitteen suorituskyvystä ja esimerkiksi pitkän ajan stabiiliudesta.

6.1 Hiilidioksidimittalaitteiden tarkkuus

Tarkkuudella (oikeammin epätarkkuudella) tarkoitetaan, kuinka tarkasti hiilidioksidimittalaitteen lukema vastaa todellista hiilidioksidipitoisuutta, ja se on yksi anturien tärkeimmistä ominaisuuksista. Testin tarkoituksena on mitata oikeaa arvoa, mutta testissä on huomioitava tietynlainen epävarmuus, sillä koskaan ei voida olla täysin varmoja mikä todellinen arvo on.

Anturivalmistajat ilmoittavat yleensä tarkkuusrajat siten, että se vastaa tilannetta, jossa on otettu huomioon laitteen huonoin mahdollinen suorituskyky. Mittalaitteen tarkkuuteen voi vaikuttaa mm. kalibrointi- ja toistettavuusvirheet, lämpökohina ja hystereesi. Tarkkuutta voidaan parantaa poistamalla siihen vaikuttavia virhetekijöitä esim. kalibroimalla laite ennen mittauksia.

Tarkkuus voidaan ilmoittaa laitteen teknillisissä tiedoissa eri tavoilla, riippuen anturin toiminnasta ja tyypistä. Se voidaan ilmaista esimerkiksi vakiovirheen, anturin koko mittausalueen tai sen mittaaman alueen prosentuaalisen virheen avulla. Lisäksi anturival-

mistajien ilmoittamissa tarkkuuksissa saattaa olla sisällytettynä useita eri virheitä, kuten toistettavuus, epälineaarisuus ja kalibrointivirhe. [26 s. 31 - 33.]

Taulukossa 6 on esimerkkinä Kilpailija 1:lle ja GMM222:lle teknillisissä tiedoissa ilmoitetut tarkkuudet pitoisuuksissa 0 (N₂), 2 010 ja 4 980 ppmCO₂. Kilpailija 1:n tarkkuus on ilmoitettu vakiovirheen ja mitatun alueen prosentuaalisen virheen avulla. GMM222:n virhe on ilmoitettu koko mittausalueen ja mitatun alueen prosentuaalisen virheen avulla.

Taulukko 6. Kilpailija 1:n ja GMM222:n tarkkuusrajat pitoisuuksissa 0 (N₂), 2 010 ja 4 980 ppmCO₂ ja laitteiden näyttämävirheet kompensoituihin pullopitoisuuksiin nähden

	Kilpailija 1	GMM222
Teknillisissä tiedoissa ilmoitetut tarkkuudet	< ± (100 ppm + 5 % mitatusta arvosta)	± (1,5 % koko mittausalueesta + 2 % mitatusta arvosta)
Tarkkuusraja pitoisuudessa 0 ppmCO ₂ (N ₂)	100 ppmCO ₂	150 ppmCO ₂
Laitteen näyttämävirhe pullopitoisuuteen nähden pitoisuudessa 0 ppmCO ₂ (N ₂)	15 ppmCO ₂	- 7 ppmCO ₂
Tarkkuusraja kompensoidussa pullopitoisuudessa (n. 2010 ppmCO ₂)	200 ppmCO ₂	190 ppmCO ₂
Laitteen näyttämävirhe kompensoituun pullopitoisuuteen nähden (n. 2010 ppmCO ₂)	19 ppmCO ₂	-32 ppmCO ₂
Tarkkuusraja kompensoidussa pullopitoisuudessa (n. 4980 ppmCO ₂)	349 ppmCO ₂	249 ppmCO ₂
Laitteen näyttämävirhe kompensoituun pullopitoisuuteen nähden (n. 2010 ppmCO ₂)	67 ppmCO ₂	5 ppmCO ₂

Taulukosta voitiin havaita, että molempien laitteiden näyttämävirheet ovat matalimpia kuin teknillisissä tiedoissa ilmoitetut tarkkuusrajat. GMM222:lla on hieman tiukemmat

tarkkuusrajat verrattuna Kilpailija 1-mittalaitteen vastaaviin rajoihin. Näyttämävirheet ja tarkkuusrajat eri pitoisuuksissa on laskettu lämpötila- ja painekompensoitujen pullopitoisuuksien mukaan. Testissä on oletettu, että kaasupullon valmistajan ilmoittama pullopitoisuus on riittävän lähellä kaasupullon oikeaa pitoisuutta, joten laskuissa ei ole huomioitu kaasupullon mahdollista virhettä.

6.2 Hiilidioksidimittalaiteiden vasteaika

Vasteajalla tarkoitetaan aikaa, miten nopeasti mittalaite kykenee huomaamaan muutuneen hiilidioksidipitoisuuden. Tällä saattaa olla vaikutusta sovelluksissa, joissa hiilidioksidipitoisuus on pidettävä tasaisena ja joissa hiilidioksidipitoisuuden muutokset ovat merkittäviä. Esimerkiksi ilmanvaihdon mittalaitteissa tämä saattaa olla merkittävä ominaisuus.

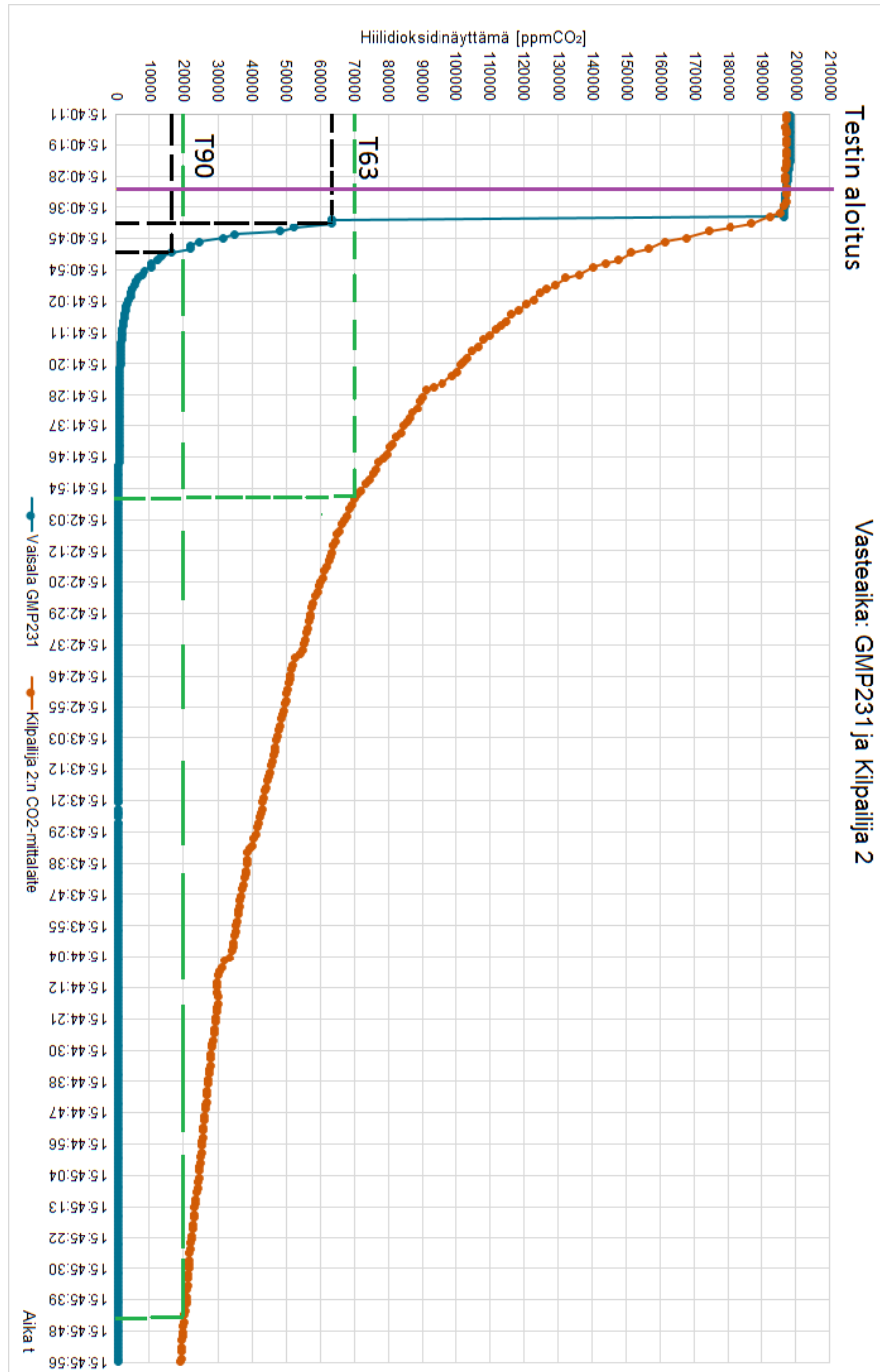
Tässä insinööriyössä vasteaikatesti tehtiin Vaisalan GMP231 ja Kilpailija 2 -mittalaitteille. Laitteet sijoitettiin ensimmäiseksi kaasulaatikkoon, jonne ohjattiin 20 % hiilidioksidia. Kaasupitoisuuden tasoittumisen jälkeen laitteet otettiin samanaikaisesti pois laatikosta huoneilmaan.

Taulukosta 7 nähdään vasteaikatestin tulokset. Siinä vasteaikaa on ilmaistu parametrien T63 ja T90 avulla. Parametri T63 tarkoittaa aikaa, joka kuluu, kun näyttämä muuttuu alkuperäisestä näyttämästä ja saavuttaa 63 % lopullisesta näyttämästä. Parametri T90 vastaavasti tarkoittaa aikaa, joka kuluu, kun näyttämä on saavuttanut 90 % lopullisesta näyttämästä.

Taulukko 7. Vasteaikatestin testitulokset

Parametri	GMP231: Vasteaika [s]	Kilpailija 2: Vasteaika [s]
T63	10	84
T90	18	315

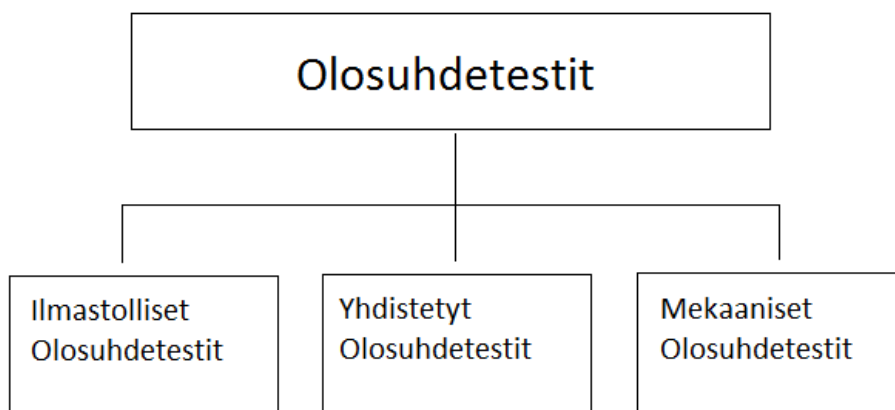
Taulukosta 7 nähtiin, miten Kilpailija 2 -mittalaitteen vasteaika on T90 kohdalla huomattavasti suurempi. Kuvassa 9 testitulokset on esitetty myös graafisesti. Kuvasta nähdään kuinka GMP231:n näyttämä on saavuttanut 63 % loppunäyttämästä 10 sekunnissa ja 90 % 18 sekunnissa testin aloittamisen jälkeen. Kilpailija 2-mittalaitteen vastaavat ajat ovat 84 (T63) ja 315 sekuntia (T90).



Kuva 9. Vasteaikatestin tulokset, joka suoritettiin Vaisalan GMP231:lle ja Kilpailija 2:n hiilidioksidimittalaitteille

6.3 Hiilidioksidimittalaitteiden olosuhdetestit

Olosuhdetestien tarkoituksena on testata, miten vaativat olosuhteet vaikuttavat testattavaan laitteeseen. Olosuhdetestit voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin: ilmastollisiin ja mekaanisiin olosuhdetesteihin sekä näiden yhdistelmätesteihin (kuva 10). Ilmastollisissa olosuhdetesteissä voidaan testata esimerkiksi paineen, kosteuden, lämpötilan, auringon säteilyn, tuulen, suolan ja kaasujen vaikutuksia laitteeseen. Mekaanisia olosuhdetestejä ovat taas esimerkiksi isku-, värinä-, kiihtyvyyss- ja törmäystestit. Yhdistetyissä olosuhdetesteissä testataan mekaanisia ja ilmastollisia olosuhteita samaan aikaan. Tässä insinööriyössä Vaisalan ja kilpailijoiden CO₂-mittalaitteille tehtiin lähinnä lämpötilan ja kosteuden osalta ilmastollisia olosuhdetestejä, jotka vastaavat mittalaitteiden normaalia käyttöä ja aiheuttavat ongelmia pitkän ajan stabiilisuuteen. [27.]



Kuva 10. Olosuhdetestaukseen kuuluvat erilaiset testityypit [26]

6.3.1 Hiilidioksidimittalaitteiden jatkuva kostea lämpö -testit

Hiilidioksidilaitteen pitkän ajan stabiilius on yleensä ilmoitettu teknisissä tiedotteissa tarkkuuden yhteydessä. Sen avulla voidaan kuvata miten anturin näyttämä muuttuu anturin vanhetessa. Erityisesti mittalaitteissa, joiden tulee kyetä tarkkaan mittaamiseen, pitkän ajan stabiilius on tärkeä ominaisuus. Pitkän ajan stabiiliutta voidaan tehokkaasti testata laittamalla laite ääriolosuhteisiin, kuten korkeaan lämpötilaan ja suhteelliseen kosteuteen (jatkuva kostea lämpö-testit). [26, s. 45 - 46.]

Jatkuva kostea lämpö -testin tarkoituksena on verifioida sähkölaitteiden tai komponenttien käyttöä, varastointia ja kuljetusta korkean suhteellisen kosteuden olosuhteissa.

Testi tuo esille, millaisia vaikutuksia laitteelle syntyy vakioämpötilassa ja korkeassa ilman suhteellisessa kosteudessa ilman kondensaatiota. Taulukossa 8 on esitetty esimerkkejä rasisusasteista jatkuva kostea lämpö -testissä.

Ennen testin aloittamista testattava laite tutkitaan visuaalisesti ja mekaanisesti sekä tehdään sähköiset mittaukset, kuten esimerkiksi hiilidioksidimittalaitteelle hiilidioksidimittaukset. Alkutilassa testattava laite ja kammio ovat samassa lämpötilassa. Kun laite on asetettu testikammioon, tulee testikammion lämpötila asettaa ensin testilämpötilaan. Kun testattava laite on stabiloitunut oikeaan testilämpötilaan, asetetaan testikammion suhteellinen kosteus määriteltyyn arvoonsa.

Jatkuva kostea lämpö -testin suositeltuja testausaikoja ovat 12 h, 16 h, 24 h, 2 vrk, 10 vrk, 21 vrk tai 56 vrk (Usein esimerkiksi tuotekehityksessä tehtävää jatkuva kostea lämpö -testiä jatketaan mahdollisimman pitkään). Tuotteen testispesifikaation mukaan laitteelle tehdään tarvittavat väli- ja loppumittaukset, huomioiden laitteen mahdolliset toipumisajat ja -olosuhteet altistumisen jälkeen.

Testiraporttiin tulee sisällyttää tiettyjä yksityiskohtia, kuten testin rasisusaste ja toleranssit, alkumittaukset, näytteen tila testin aikana, välimittaukset, toipumisaika ja olosuhteet sekä loppumittaukset. [28.]

Taulukko 8. Esimerkkejä rasisusasteista jatkuva kostea lämpö -testissä [28]

Testikaapin lämpötila	Testikaapin suhteellinen kosteus
$(30 \pm 2) ^\circ\text{C}$	$(93 \pm 3) \%RH$
$(30 \pm 2) ^\circ\text{C}$	$(85 \pm 3) \%RH$
$(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$	$(93 \pm 3) \%RH$
$(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$	$(85 \pm 3) \%RH$

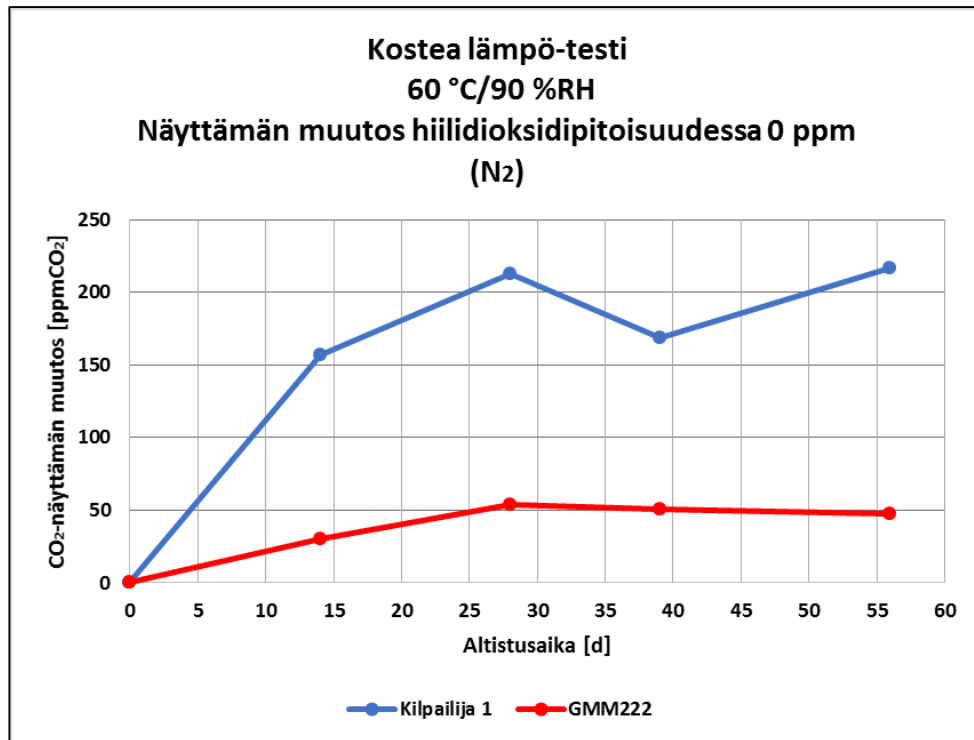
Tässä insinööriyössä tehtiin jatkuva kostea lämpö -testi Vaisalan GMM222 -hiilidioksidimoduulille ja kilpailijalaite 1 -hiilidioksidimittalaitteelle. Laitteille tehtiin ennen

testiä alkumittaukset seuraavissa CO₂-pitoisuuksissa: 0 ppm (N₂), 501 ppm, 1 010 ppm, 2 010 ppm ja 4 980 ppm. Lisäksi laitteet tarkistettiin visuaalisesti ja mekaanisesti.

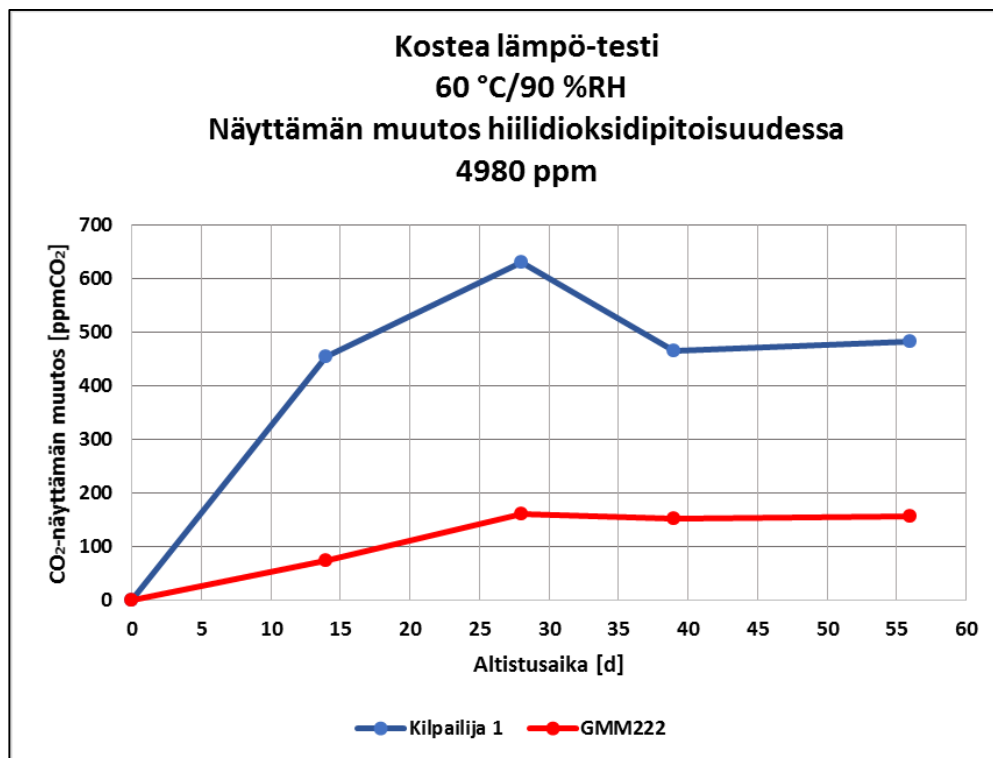
Testin rasisasteeksi valittiin lämpötila 60 °C ja suhteellinen kosteus 90 %RH. Testikammiona toimi Vötsch Industrietechnikin VC 4018 -olosuhdekaappi.

Laitteet asetettiin testikammioon virrattomina, jonka jälkeen olosuhdekaapin lämpötila nostettiin ensin 60 °:een. Testilaitteiden annettiin stabiloitua tähän lämpötilaan. Stabiloitumisen jälkeen olosuhdekaapin suhteellista kosteutta nostettiin porrastetusti ensin olosuhteeseen 50 %RH ja lopuksi 90 %RH kondenssin välttämiseksi. Välimittauksia tehtiin 1 - 2 viikon välein. Tällöin laitteet tarkastettiin visuaalisesti ja mekaanisesti sekä tarkastettiin niiden sähköinen toiminta. Laitteet mitattiin jälleen hiilidioksidipitoisuuksissa 0 ppm (N₂), 501 ppm, 1 010 ppm, 2 010 ppm ja 4 980 ppm. Loppumittaus suoritettiin 56 vrk altistamisen jälkeen välimittauksien tapaan.

Testitulokset nähdään kuvissa 11 ja 12. Kuvissa esitetään, miten Vaisalan GMM222 ja Kilpailija 1 -mittalaitteen hiilidioksidinäyttämä on muuttunut verrattuna mittaukseen, joka suoritettiin laitteille ennen altistusta. Laitteiden hiilidioksidinäyttämää verrattiin paine- ja lämpötilakompensoituun kaasupullopitoisuuteen. Kuvassa 11 nähdään näyttämään syntynyt muutos hiilidioksidipitoisuudessa 0 ppm ja kuvassa 12 pitoisuudessa 4 980 ppm. Kuvista voidaan huomata, kuinka Kilpailija 1 -mittalaitteen näyttämä hiilidioksidilukeman muutos on noin 100 - 150 ppm korkeampi kuin GMM222:sen pitoisuudessa 0 ppm. Pitoisuudessa 4 980 ppm Kilpailija 1 -mittalaitteen näyttämän muutos on noin 300 - 400 ppm suurempi.



Kuva 11. Jatkuva kostea lämpö -testin tulokset hiilidioksidipitoisuudessa 0 ppm 56 vuorokauden altistusajan jälkeen



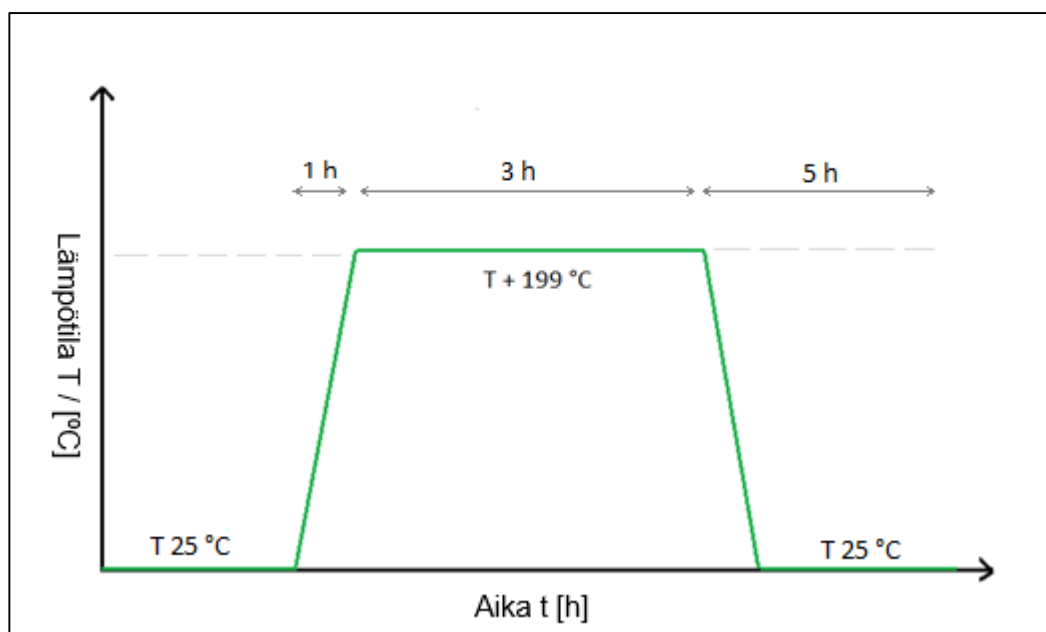
Kuva 12. Jatkuva kostea lämpö -testin tulokset hiilidioksidipitoisuudessa 4 980 ppm 56 vuorokauden altistusajan jälkeen

6.3.2 Hiilidioksidimittalaitteiden korkealämpötilatestit

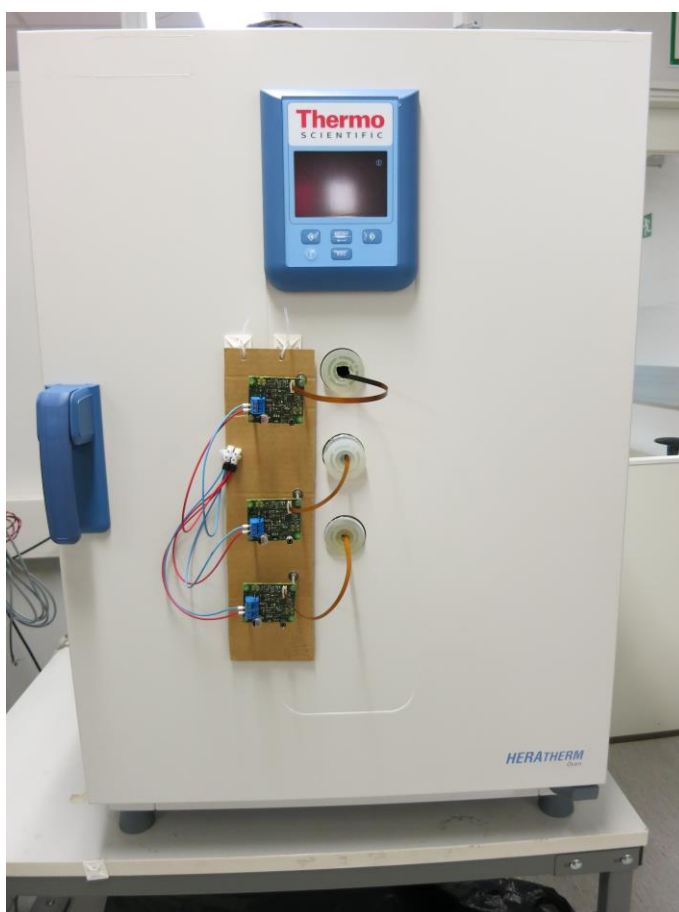
Korkealämpötilatesteissä testataan, miten hyvin hiilidioksidimittalaite kestää korkeaa lämpötilaa (n. 200 °C) niin, että sitä altistetaan lämpötilalle useamman kerran. Inkubaattoreissa korkeaa lämpötilaa käytetään kuumasterilisoinnissa, joten inkubaattori-käyttöön suunniteltujen laitteiden olisi hyvä kestää korkeita lämpötiloja. Tällöin laitetta ei tarvitse poistaa inkubaattorista sterilisoinnin ajaksi, mikä lisää laitteen käyttömukavuutta ja poistaa kontaminaation mahdollisuutta.

Tässä insinööriyössä testeihin valittiin kaksi kappaletta Kilpailija 2:n hiilidioksidimittalaitteita. Referenssinä käytettiin Vaisalan GMP231:lle jo aikaisemmin suoritettuja korkealämpötilatestejä, jotka oli tehty 195 °C lämpötilassa. Testiä suunniteltaessa oletettiin, että inkubaattorin käyttäjä sterilisoi inkubaattorin noin kerran kuukaudessa. Jos laitteen eliniäksi oletetaan noin 10 vuotta, laitteen tulisi kestää sterilisointia noin 120 kertaa. Lämpötilaksi valittiin n. 199 °C.

Aluksi hiilidioksidimittalaitteet mitattiin tietyissä hiilidioksidipitoisuuksissa analogisen ulostulon kautta ja suoritettiin ns. alkumittaukset. Tämän jälkeen laitteet asetettiin Thermo Scientific HERATharm OMH180 -lämpötilakaappiin (kuva 14), joka oli huone-lämpötilassa. Kuvasta 13 nähdään, kuinka lämpötilakaapin lämpötilaa nostettiin noin tunnin ajan huoneenlämpötilasta 199 asteeseen. Tämän jälkeen tätä lämpötilaa pidettiin yllä kolmen tunnin ajan. Lopuksi lämpötila palautettiin huonelämpötilaan noin viiden tunnin kuluessa. Tämä lämpötilasykli toistettiin 20 kertaa, minkä jälkeen mittalaitteille suoritettiin uudelleen hiilidioksidimittaukset samoissa hiilidioksidipitoisuuksissa, jotka mitattiin alkumittauksen aikana. Hiilidioksidimittauksien jälkeen laitteet sijoitettiin jälleen lämpötilakaappiin ja testi toistettiin. Testi lopetettiin, kun korkealämpötilasyklejä oli tehty yhteensä 120 kappaletta.



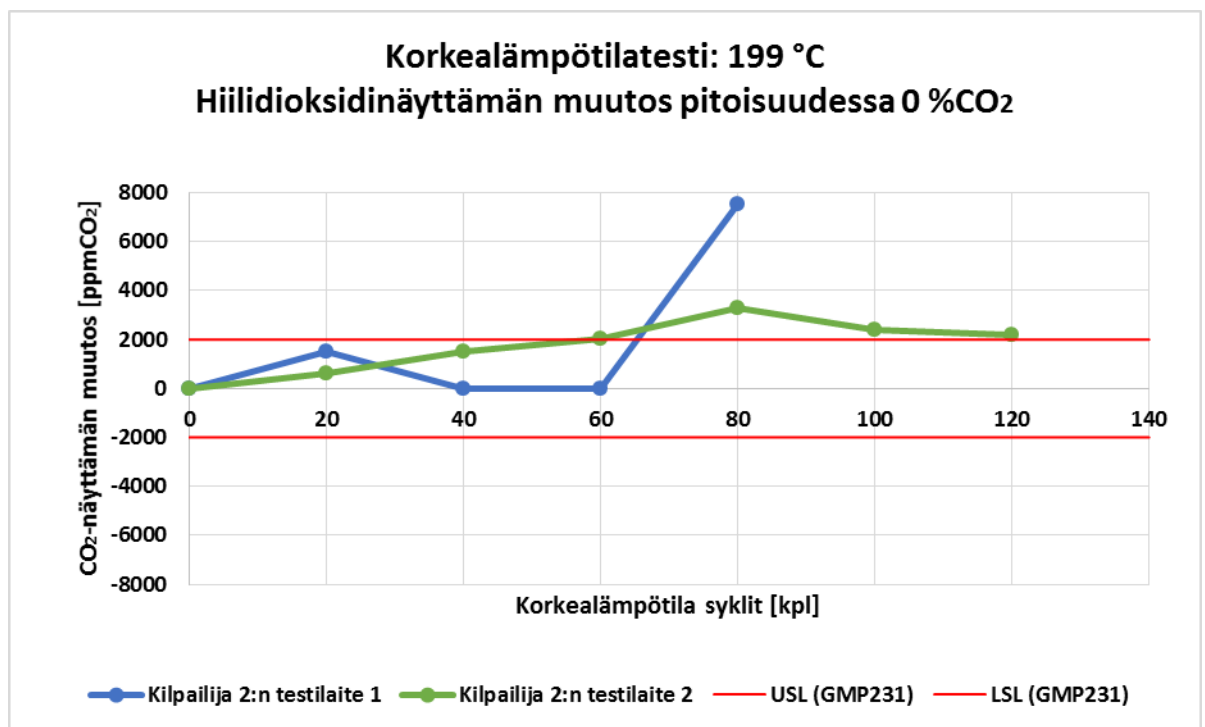
Kuva 13. Korkealämpötilatestin lämpötilat lämpötilakaapissa tietyllä ajanhetkellä



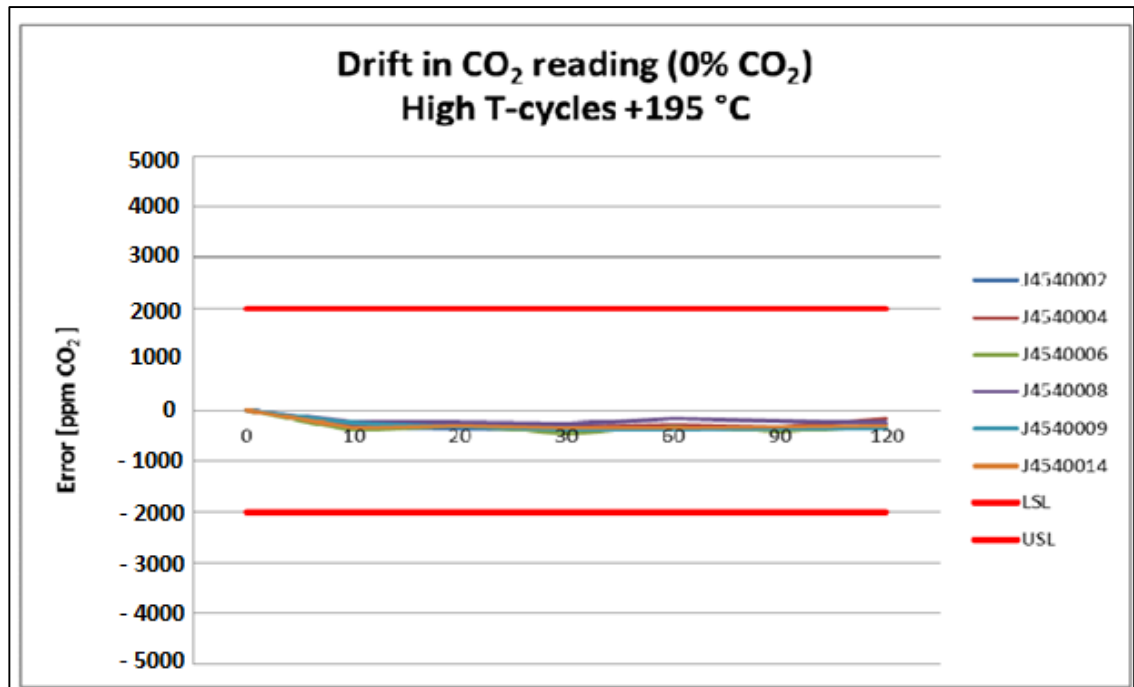
Kuva 14. Thermo Scientificin HERATHERM OMH180 -lämpötilakaappi

Testien aikana Kilpailija 2 -mittalaitteilla esiintyi näyttämän ryömimistä. Kilpailija 2 -mittalaitteen analogisessa ulostulossa havaittiin testien aikana maksimirajoin, joka rajoittaa laitteen hiilidioksidinäyttämää 20,04 %:iin. Tämän vuoksi testien aikana ei saatu esille mittalaitteen näyttämän todellista ryömintää 20 %:n hiilidioksidipitoisuudessa. Tämä voidaan ehkäistä testaamalla laite matalammassa hiilidioksidipitoisuudessa, jolloin voidaan varmistaa paremmin näyttämän todellinen ryömiminen. Lisäksi toinen testattavista laitteista rikkoutui 80 syklin jälkeen. Testiä jatkettiin toisen laitteen osalta 120 sykliin saakka.

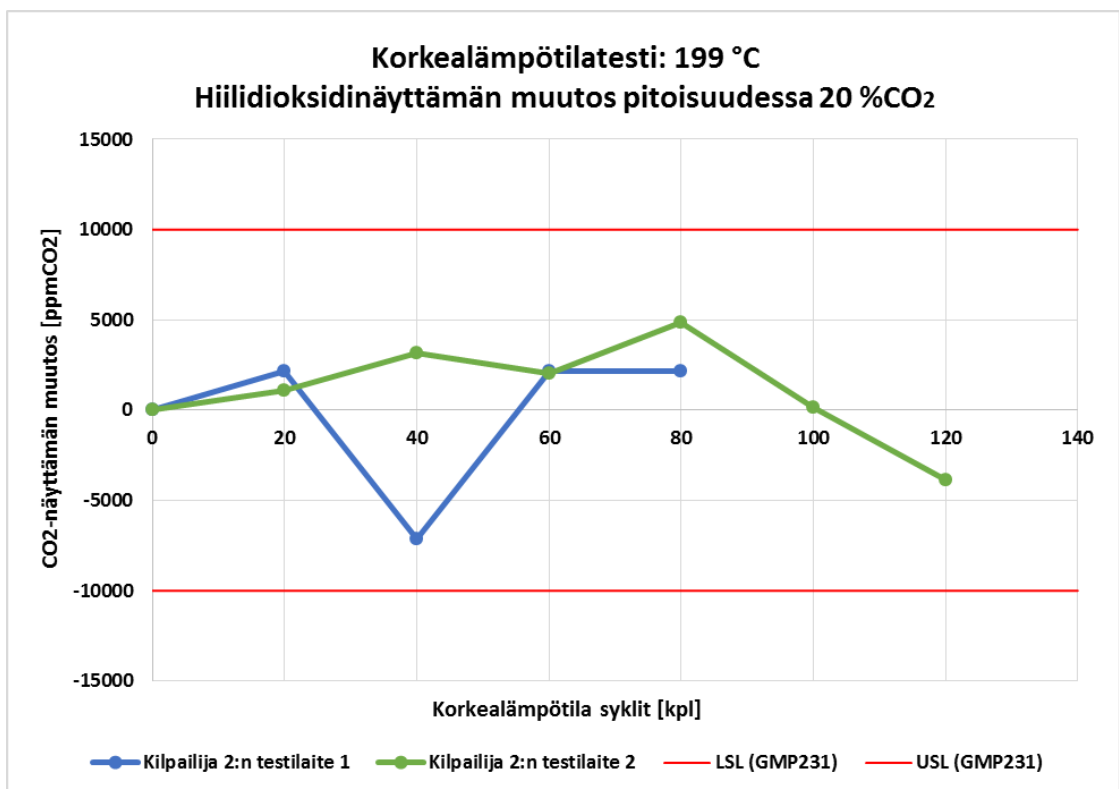
Kuvassa 15 nähdään Kilpailija 2 -mittalaitteiden hiilidioksidinäyttämien muutokset hiilidioksidipitoisuudessa 0 % ja kuvassa 17 hiilidioksidipitoisuudessa 20 %. Lisäksi kuviin on lisätty GMP231:lle ilmoitetut pitkän ajan stabiilisuuden ala- ja ylärajat (LSL; Lower Specification Limit ja USL; Upper Specification Limit), jotka on annettu laitteen teknisissä tiedoissa. Kuvissa 16 ja 18 nähdään Vaisalan GMP231:lle aiemmin suoritettujen referenssitulokset samoissa hiilidioksidipitoisuuksissa.



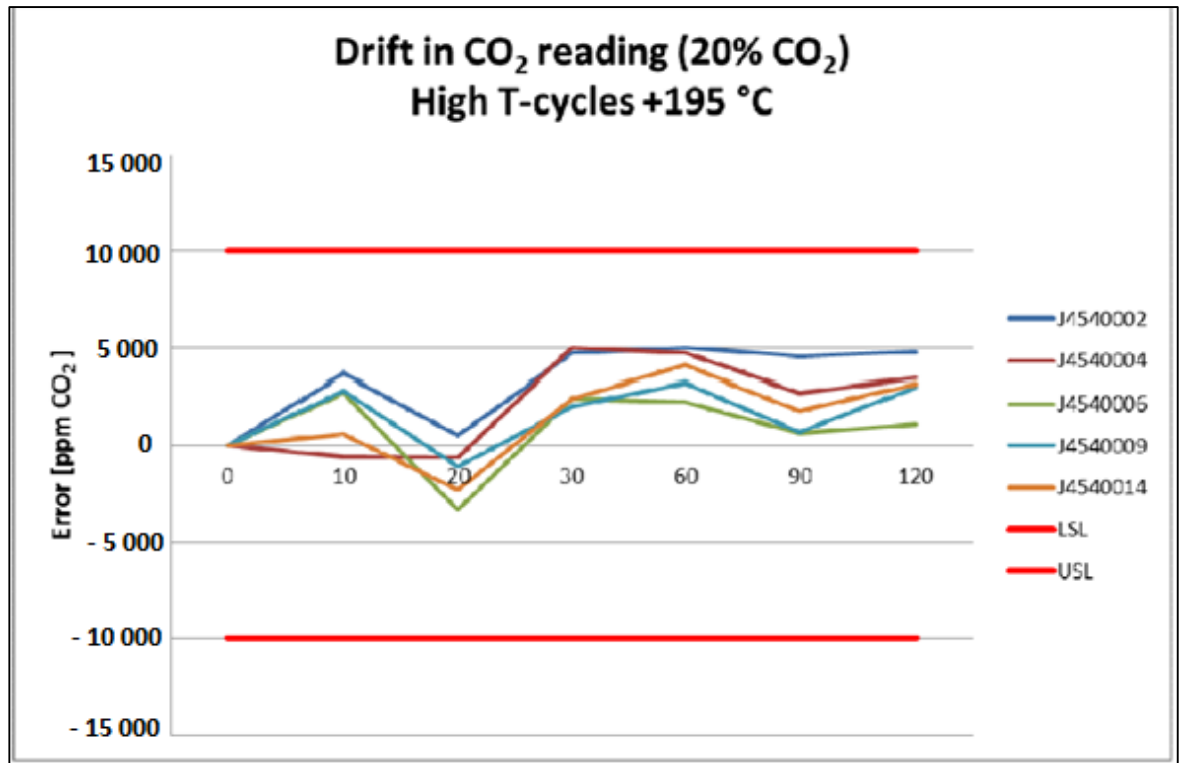
Kuva 15. Testitulokset korkeanlämpötilan-testistä hiilidioksidipitoisuudessa 0 %. Testille altistettiin kaksi kappaletta Kilpailija 2 -testilaitteita ja testejä suoritettiin yhteensä 120 sykliä



Kuva 16. Vaisalan GMP231:n referenssitulokset hiilidioksidipitoisuudessa 0 %. Kuvassa 6 kpl GMP231 on altistettu korkealle lämpötilalle (195 °C) 120 syklin ajan. Kuvaan on lisäksi merkitty GMP231:lle asetetut pitkän ajan stabiilisuuden ala- ja ylärajat



Kuva 17. Testitulokset korkealämpötilan-testistä hiilidioksidipitoisuudessa 20 %. Testille altistettiin kaksi kappaletta Kilpailija 2 -testilaitteita ja testejä suoritettiin yhteensä 120 sykliä



Kuva 18. Vaisalan GMP231:n referenssitulokset hiilidioksidipitoisuudessa 20 %. Kuvassa 6 kpl GMP231 on altistettu korkealle lämpötilalle (195 °C) 120 syklin ajan. Kuvaan on lisäksi merkitty GMP231:lle asetetut pitkän ajan stabiilisuuden ala- ja ylärajat

6.3.3 Hiilidioksidimittaukset eri lämpötiloissa

Ideaalikaasulain mukaan paineen ja lämpötilan muutos nähdään anturin ppm-lukeman muutoksena, kun kaasun tiheys muuttuu tämän seurauksena. Tässä testissä tarkoituksena oli testata erityisesti miten eri lämpötilojen muutokset vaikuttavat hiilidioksidimittalaitteiden lukemaan. Testi suoritettiin GMM222:n ja Kilpailija 3 -mittalaitteen kesken.

Testi tehtiin Vötsch Industrietechnik VC 4002 -lämpötilakaapissa. Mittalaitteet asetettiin testikaappiin virrat päällä. Mittalaitteiden lukemat mitattiin analogisen ulostulon kautta. Laitteisiin johdettiin eri hiilidioksidipitoisuuksia kaasoadaptereiden avulla. Testi aloitettiin asettamalla kaapin lämpötila 25 °C:een, minkä jälkeen lämpötilaa laskettiin alaspäin 0 °C:een. Tämän jälkeen lämpötilaa nostettiin uudelleen 37 °C:een ja lopuksi vielä 50 °C:een. Testilämpötilat valittiin Kilpailijan 3 -mittalaitteen käyttölämpötila-alueen mukaan, joka on hieman suppeampi kuin GMM222:en. Eri hiilidioksidipitoisuudet mitattiin jokaisessa lämpötilassa erikseen. Kaasujen ja lämpötilojen vaihto suoritettiin automaattisella testiasemalla.

Alla olevista taulukoista 9 ja 10 nähdään, kuinka lämpötila on vaikuttanut Kilpailija 3 -mittalaitteen ja GMM222:n näyttämiin, kun hiilidioksidipitoisuus on 0 (N₂) ja 4 980 ppm. Testituloksissa on huomioitu lämpötilan ja paineen vaikutus hiilidioksidipitoisuuteen kompensoimalla hiilidioksidipullon konsentraatiota. Testikaapin lämpötila ja paine mitattiin erillisillä paine- ja lämpötilamittareilla. Testissä käytetyn hiilidioksidikaasupullon valmistaja on ilmoittanut kaasupullonpitoisuuksien olevan 4 980 ppm normaaliolosuhteissa (25 °C, 1 013 hPa). Taulukossa on esitelty myös tämän pullopitoisuuksien kompensoidut arvot eri lämpötiloissa ja paineissa, jotka esiintyivät testin aikana. Kompensointia ei ole tehty pitoisuudessa 0 ppmCO₂ (N₂), koska paineella ja lämpötilalla ei juurikaan ole vaikutusta tyypeen.

Taulukko 9. GMM222:n ja Kilpailija 3:n testitulokset hiilidioksidipitoisuudessa 0 ppm (N₂)

GMM222:n ja Kilpailija 3:n testitulokset hiilidioksidipitoisuudessa 0 ppm (N₂)						
Testikaapin lämpötila [°C]	Testikaapin paine [hPa]	Kompensoitu pullopitoisuus [ppmCO₂]	GMM222 näyttämän keskiarvo [ppmCO₂]	GMM222 näyttämän virhe [ppmCO₂]	Kilpailija 3:n näyttämän keskiarvo [ppmCO₂]	Kilpailija 3:n näyttämän virhe [ppmCO₂]
+24,6	1 014,3	0	8,5	8,5	-69,0	-69,0
-0,24	1 014,5	0	30,8	30,8	30,8	30,8
+36,1	1 014,6	0	1,7	1,7	-82,8	-82,8
+48,2	1 014,6	0	-9,3	-9,3	20,5	20,5

Taulukko 10. GMM222:n ja Kilpailija 3:n testitulokset hiilidioksidipitoisuudessa 4 980 ppm

GMM222:n ja Kilpailija 3:n testitulokset hiilidioksidipitoisuudessa 4 980 ppm						
Testikaapin lämpötila [°C]	Testikaapin paine [hPa]	Kompensoitu pullopitoisuus [ppmCO₂]	GMM222 näyttämän keskiarvo [ppmCO₂]	GMM222 näyttämän virhe [ppmCO₂]	Kilpailija 3:n näyttämän keskiarvo [ppmCO₂]	Kilpailija 3:n näyttämän virhe [ppmCO₂]
24,6	1 014,351	4 993,4	4 914,9	-78,5	5 136,1	142,7
-0,03	1 014,337	5 443,8	5 535,1	91,3	5 578,7	134,9
36,1	1 014,657	4 808,3	4 729,5	-78,8	5 058,5	250,2
48,2	1 014,58	4 627,7	4 524,5	-103,2	5 332,3	705,0

Testituloksista nähdään, että Kilpailija 3 -mittalaitteella on hieman enemmän lämpötilariippuvuutta näyttämään verrattuna GMM222:een hiilidioksidipitoisuudessa 4 980 ppm. Hiilidioksidipitoisuudessa 0 ppm riippuvuutta lämpötilaan ei juurikaan havaita kummasakaan laitteessa.

7 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli tehdä suorituskykyvertailu testaamalla kahta Vaisalan ja sen kolmen kilpailevan valmistajan hiilidioksidimittalaitteita. Laitteiden suorituskykyä testattiin erityisesti olosuhdetestien avulla, sillä ne antavat kattavaa tietoa mittalaitteiden toiminnasta.

Olosuhdetesteistä valittiin suorituskykyvertailuun ilmastolliset olosuhdetestit, joissa testattiin erityisesti lämpötilan ja kosteuden vaikutusta mittalaitteisiin. Näitä testejä olivat korkealämpötila- ja jatkuva kostea lämpö -testit. Näiden testien avulla saatiin tietoa laitteiden kuumasterilisoinnin kestosta ja pitkän ajan stabiilisuudesta. Lisäksi hiilidioksidimittauksia tehtiin eri lämpötiloissa ja laitteiden vasteaikaa ja tarkkuutta testattiin. Työssä vertailtiin myös laitteiden teknologioita.

Hiilidioksidimittalaitteille tehtyjen testien avulla saatiin hyvä yleiskuva, millaisia Vaisalan ja kilpailijoiden hiilidioksidimittalaitteet ovat suorituskyvyltään. Vaisalan GMM222 -hiilidioksidimittalaitteet pärjäsivät hyvin olosuhde- ja pitkän ajan stabiilisuuden -testeissä. Myös korkealämpötilatestissä Vaisalan GMP231 -hiilidioksidimittalaite suoriutui kilpailijan laitetta huomattavasti paremmin.

Suorituskykyvertailua voisi tulevaisuudessa jatkaa tekemällä laitteille uusia olosuhdetestejä tai laajentaa testeihin, joita tässä insinööriyössä ei tehty (esimerkiksi mekaaniisiin testeihin). Lisäksi testeihin olisi hyvä ottaa mukaan useampi testilaitte mittaustulosten varmistamiseksi. Tässä insinööriyössä esiteltyt testit olisi myös hyvä toistaa, jotta saadaan luotettavimmat testitulokset. Suorituskykyvertailua voisi myös laajentaa kolmen kilpailijan valmistamien laitteiden lisäksi muiden valmistajien laitteisiin, jotta saadaan laajempi kuva tämänhetkisestä tilanteesta. Vertailuun voisi ottaa olosuhde- ja suorituskykytestien lisäksi mukaan esimerkiksi laitteiden käytettävyy-, käyttöohje- ja pakkausvertailua.

Lähteet

- 1 Carbon dioxide. 2010. Verkkodokumentti. The Encyclopedia of Earth <<http://www.eoearth.org/view/article/150925/>>. Päivitetty 22.2.2013. Luettu 20.8.2014
- 2 Carbon cycle. 2010. Verkkodokumentti. The Encyclopedia of Earth <<http://www.eoearth.org/view/article/150923/>>. Päivitetty 7.3.2012. Luettu 20.8.2014
- 3 Earth's Carbon cycle. 2014. Department of environmental conservation <<http://www.dec.ny.gov/energy/76572.html>>. Luettu 6.12.2014
- 4 Yhteyttäminen. 2014. Verkkodokumentti. Wikipedia Vapaa tietosanakirja. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Yhteytt%C3%A4minen>>. Luettu 15.9.2014
- 5 Karttunen ym. 2008. Ilmakehä, sää ja ilmasto. Keuruu: Otava Kirjapaino Oy. Luettu 7.10.2014
- 6 OVA-ohje: hiilidioksidi. 2014. Verkkodokumentti Työterveyslaitos. <<http://www.ttl.fi/ova/hiilidioksidi.html#ots4>>. Luettu 15.9.2014
- 7 How to Measure Carbon Dioxide. 2012. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj <<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/CEN-TIA-Parameter-How-to-measure-CO2-Application-note-B211228EN-A.pdf>> Luettu 20.8.2014.
- 8 Incubators. 2009. Verkkodokumentti. Lab Manager. <http://www.labmanager.com/news/2009/07/incubators?fw1pk=2#.VDuqd_I_si> . Luettu 13.10.2014
- 9 CO2 incubator. 2009. AtmoSAFE. Verkkodokumentti. <<http://www.atmosafe.net/en/glossary/incubator/co2-incubator.html>>. Luettu 13.10.2014
- 10 Cell culture basics. 2014. Verkkodokumentti. Gibco, Invitrogen <<http://www.vanderbilt.edu/viibre/CellCultureBasicsEU.pdf>> Luettu 13.10.2014
- 11 A Brief History of Fermentation. 2004. Verkkodokumentti. Soyinfo Center. <<http://www.soyinfocenter.com/HSS/fermentation.php>>. Luettu 13.10.2014
- 12 Fermentaatioprosessit. 2014. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj. <<http://www.vaisala.fi/fi/industrialmeasurements/applications/co2safety/Pages/fermentation.aspx>>. Luettu 29.10.2014

- 13 Measuring Carbon Dioxide in the Soft Drinks Industry. 2000. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.
<http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/Vaisala%20News%20Articles/VN154/VN154_Measuring_Carbon_Dioxide_in_the_Soft_Drinks_Industry.pdf>. Luettu 30.10.2014
- 14 Kylmäaineiden historiasta nykypäivään. 2005. Verkkodokumentti. Kehittyvä Elintarvike & Elintarviketiedeiden Seura r.y.
<<http://kehittyvaelintarvike.fi/teemajutut/kylmaaineiden-historiasta-nykypaivaan>>. Luettu 30.10.2014
- 15 Greenhouse Climate Measurements Ensure Optimal Plant Growth. 2011. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.
<<http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/Application%20notes/CEN-BAU-Greenhouse-Climate-Application-Note-B211142EN-A-LOW-v3.pdf>>. Luettu 30.10.2014
- 16 CO2 fertilization in greenhouses. 2014. Verkkodokumentti Nixon Energy Solutions.<<http://nixonenergy.com/greenhouse.html>>. Luettu 27.10
- 17 Ventilation System Clears the Air in Turkey Farm. 2004. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.
<http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/Vaisala%20News%20Articles/VN166/VN166_Ventilation_System_Clears_the_Air_in_Turkey_Farm.pdf>. Luettu 27.10.2014
- 18 Laitinen, R & Toivonen, J. 1999. Yleinen ja epäorgaaninen kemia. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. Luettu 21.6.2014.
- 19 Ilmanpaine. 2014. Verkkodokumentti. Wikipedia Vapaa tietosanakirja.
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/Ilmanpaine>>. Luettu 21.6.2014
- 20 Carbon dioxide sensor. 2014. Verkkodokumentti. Wikipedia Vapaa tietosanakirja.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide_sensor>. Luettu 15.7.2014
- 21 Infrared Sensor Technology and its Impact on HVAC CO2 Measurement Accuracy. 2013. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.
<<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Technology%20Descriptions/CEN-TIA-HVAC-CO2-Measurement-Accuracy-B211311EN-A.pdf>>. Luettu 13.11.2014
- 22 CO2 Measurement Tutorial. 2014. Verkkodokumentti. E+E Elektronik Ges.m.b.H.
<http://www.epluse.com/fileadmin/data/miscellaneous/principles_of_co2_measurement.pdf>. Luettu 13.11.2014

- 23 CO2 Measurement in Incubators - Questions and Answers. 2009. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.
<<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/CO2-Measurement%20in-Incubators-B210826EN-A-LowRes.pdf>> Luettu 13.11.2014
- 24 GMM220 Carbon Dioxide Modules for Demanding OEM applications. 2013. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.
<http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datasheets/GMM220_Datasheet-B210856EN-E.pdf>. Luettu 6.12.2014
- 25 Vaisala CARBOCAP® Carbon Dioxide Probe GMP231 for CO2 incubators. 2014. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.
<[http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datash eets/CEN-LSC-G-GMP231-Datasheet-B211312EN-B%20LoRes.pdf](http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datasheets/CEN-LSC-G-GMP231-Datasheet-B211312EN-B%20LoRes.pdf)>. Luettu 6.12.2014
- 26 Fraden, Jacob. 2010. Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs, and Applications. New York: Springer Science + Business Media, LLC.
- 27 What is Environmental Testing?. 1996. Verkkodokumentti. Espec co.
<http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech_info/pdf/a1/e_1.pdf>. Luettu 6.12.2014
- 28 IEC 60068-2 –sarja Ympäristöolosuhdetestiivitelmiä Ed.1. 2001. Elektroniikan tutkimuksen ja kehityksen yhteistyöelin KOTEL ry. Luettu 15.9.2014