

Juho Inkinen

Hiilidioksidiantureiden paine- ja lämpötilatestiasema

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Elektroniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

2.2.2013

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Juho Inkinen Hiilidioksidiantureiden paine- ja lämpötilatestiasema 44 sivua 2.2.2013
Tutkinto	insinööri AMK
Koulutusohjelma	elektroniikka
Ohjaajat	yliopettaja Matti Fischer tekn. tri Mikko Aronniemi
<p>Tässä insinööriyössä suunniteltiin ja rakennettiin automaattinen hiilidioksidiantureiden paine- ja lämpötilatestiasema Vaisalan mikroanturituotekehityksen käyttöön. Testiaseman tarkoitus on ensisijaisesti tehdä automaattisia hiilidioksidiantureille suunniteltuja paine- ja lämpötilatestiajoja, mutta sitä voidaan käyttää myös muihin anturituotekehityksen testeihin.</p> <p>Testiaseman toimintaa hallitaan erillisen LabVIEW'illä toteutetun käyttöliittymän välityksellä. Käyttöliittymä suunniteltiin mahdollisimman monipuoliseksi siten, että kokonaisuus pysyi kuitenkin mahdollisimman selkeänä. Ohjausohjelmisto kommunikoi automaattisesti testattavien antureiden, referenssimittalaitteiden ja olosuhdetestikaapin kanssa sekä ohjaa testiaseman kaasunsyöttöä magneettiventtiileiden ja pumpun avulla.</p> <p>Lopullisen testiaseman kokoonpano ja ohjelmiston toiminta testattiin ajamalla hiilidioksidiantureille täysimittaisia paine-, lämpötila- sekä useita muita testiajoja. Näiden testiajojen perusteella varmistuttiin siitä, että testiasema toimii oikein ja luotettavasti.</p>	
Avainsanat	Testiasema, LabVIEW

Author Title Number of Pages Date	Juho Inkinen Pressure and Temperature Test Environment for Carbon Dioxide Sensors 44 pages 2 February 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Instructors	Matti Fischer, Principal Lecturer Mikko Aronniemi, Research Scientist
<p>This Bachelor's thesis was made in co-operation with Vaisala and its Micro Sensor Technology Team. The aim of this thesis was to design and implement an automatic sensor test environment for R&D purposes. It provides conditions for both automatic and manual pressure and temperature tests including other miscellaneous R&D tests made for carbon dioxide sensors.</p> <p>The operation is managed by a control interface created with LabVIEW system design software. The interface was designed as versatile as possible while still maintaining its usability at high level. The interface automatically communicates with connected sensors, reference devices and the environmental test chamber. It also controls the gas feed with solenoid valves and diaphragm pump.</p> <p>The final assembly of the test environment was tested and verified with full-scale pressure and temperature tests and many other miscellaneous sensor tests. The results of these tests were promising and confirmed the reliable and correct operation of the test environment.</p>	
Keywords	Test environment, LabVIEW

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Hiilidioksidi mitattavana suureena	2
2.1	Hiilidioksidin ominaisuudet	2
2.2	Ideaalikaasulaki	4
2.3	Vaisala CARBOCAP® -mittausteknologia	7
2.3.1	Mittausteknologian perusteet	7
2.3.2	Vaisala CARBOCAP® -anturin toimintaperiaate	8
3	Testiaseman suunnittelun lähtökohdat	10
4	Testiaseman rakenne	12
5	Testiaseman ohjausjärjestelmän osat	15
5.1	Magneettiventtiilit	15
5.2	Tyhjiöpumppu	17
5.3	Ohjauselektroniikka	18
5.4	Kaasulinjojen paineregulaattorit ja suodattimet	20
5.5	Virtausmittarit ja kuristimet	21
5.6	Referenssimittalaitteet	23
5.6.1	Vaisala PTU300 -lähetin	23
5.6.2	Vaisala PTB220 -barometri	25
5.7	Painetestikammio	26
6	Testiaseman ohjausohjelmisto	27
6.1	LabVIEW-testiympäristö	27
6.2	Ohjausohjelmiston toiminta	27
6.2.1	Automaattitila	28
6.2.2	Manuaalitila	30

6.3	Graafinen käyttöliittymä	31
7	Testiaseman testaus ja testitulokset	34
7.1	Tyhjiöpumpun suorituskyky	34
7.2	Automaattinen painetestiajo	35
7.3	Automaattinen lämpötilatestiajo	39
8	Yhteenveto	42
	Lähteet	43

Lyhenteet

FPI	<i>Fabry-Perot Interferometer</i> , Fabry-Perot-kaistanpäästösuodatin
NDIR	<i>Nondispersive Infrared Sensor</i> , ei-dispersioiva infrapuna-anturi
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i> , alkuperäinen laitevalmistaja
PPM	<i>Parts Per Million</i> , suhteellinen pitoisuusmitta, joka ilmaistaan miljoonasosina
RS-232	tietoliikennestandardi; data liikkuu bitti kerrallaan sarjamuotoisena asynkronisesti
SATP	<i>Standard Ambient Temperature and Pressure</i> , normaalilämpötila ja -paine

1 Johdanto

Kaikki elävät organismit, ihminen mukaan lukien, tuottavat hengittäessään hiilidioksidia. Tämän vuoksi hiilidioksidipitoisuuden mittaaminen huoneistoissa, luentosaleissa ja muissa vilkkaissa tiloissa on tärkeää, jotta ilmaston ohjaus toimii luotettavasti, ja hiilidioksidipitoisuus ei pääse nousemaan liian korkeaksi. Hiilidioksidia vapautuu myös runsaasti ilmakehään hiilivetyjen palamisreaktioissa, mikä onkin muodostunut globaalisti ongelmaksi. Hiilidioksidia käytetään lisäksi hyväksi useissa teollisuuden prosesseissa, joissa tarkka hiilidioksidimittaus on usein prosessien onnistumisen perusta.

Nämä kaikki edellä mainitut osa-alueet yhdessä luovat omat vaatimuksensa ja ehtonsa hiilidioksidipitoisuuden luotettavalle mittaamiselle. Vaisala tarjoaakin hiilidioksidilähettimeä kaikille edellä mainituille osa-alueille teollisista OEM-sovelluksista (*Original Equipment Manufacturer*) ja ympäristömittauksiin tarkoitetuista lähettimistä aivan ilmanvaihtoon asennettaviin hiilidioksidimoduuleihin asti.

Insinööriyössä esitellään Vaisalan mikroanturituotekehityksen käyttöön suunniteltu ja toteutettu automaattisesti toimiva hiilidioksidiantureiden paine- ja lämpötilatestiasema, jonka pääasiallisena käyttötarkoituksena on hiilidioksidiantureille suunniteltujen lämpötila- ja paineriippuvuusmittausten tekeminen. Koska vallitsevalla ilmanpaineella ja lämpötilalla on merkittävä vaikutus hiilidioksidin ominaisuuksiin, kuten tiheyteen, mittauksista saatava data on antureiden toiminnan kannalta erittäin hyödyllistä informaatiota. Sen pohjalta on mahdollista muun muassa luoda kullekin anturityypille paine- ja lämpötilakompensointialgoritmit, jotka mahdollistavat anturin hyvän mittaustarkkuuden eri paine- ja lämpötila-alueilla. Testiaseman avulla on myös mahdollista tutkia muita antureissa esiintyviä ominaisuuksia sekä niiden vaikutusta anturien näyttämiin.

2 Hiilidioksidi mitattavana suurena

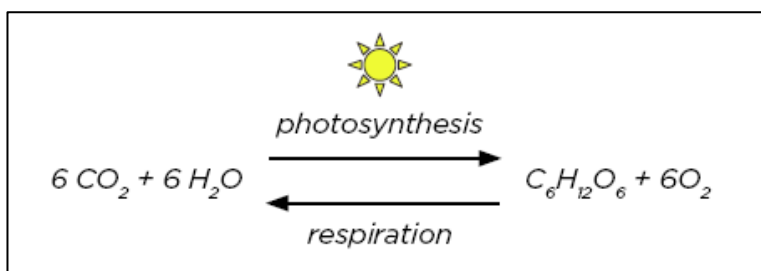
2.1 Hiilidioksidin ominaisuudet

Hiilidioksidimolekyyli koostuu hiiliatomista ja kahdesta happiatomista. Se pysyy kaasumaisessa muodossa $-78,5\text{ °C}$ suuremmissa lämpötiloissa, mutta sitä alemmissa lämpötiloissa tapahtuu faasimuutos kaasusta kiinteäksi kuivajääksi, jota kutsutaan härmistymiseksi. Muutos tapahtuu myös toiseen suuntaan kiinteästä muodosta kaasuksi, mitä taas kutsutaan sublimoitumiseksi. Taulukossa 1 esitetään hiilidioksidin fysikaalisia ominaisuuksia [1; 2]:

Taulukko 1. Hiilidioksidin fysikaaliset ominaisuudet [1; 2]

Molekyyli massa	44.01 g/mol
Tiheys, kaasu (1013 bar, 15 °C)	1.87 kg/m ³
Tiheys, kiinteä	1 562 kg/m ³
Ominaispaine	1.521
Kriittinen lämpötila ja paine	31 °C, 73.825 bar
Kolmoispisteen lämpötila ja paine	-56.6 °C, 5.185 bar
Härmistymislämpötila	-78.5 °C

Hiilidioksidi on yksi tärkeimmistä elämää ylläpitävistä molekyyleistä, sillä luonnossa kasvit käyttävät sitä fotosynteesiin. Fotosynteesissä kasvit tuottavat auringon säteilyenergian avulla hiilidioksidista ja vedestä sokereita sekä happea. Fotosynteesin vastareaktio eli soluhengitys tapahtuu vastaavasti taas kaikissa muissa elävissä organismeissa (kuva 1.)



Kuva 1. Fotosynteesi ja soluhengitys [1; 3]

Hiilidioksidia vapautuu ilmakehään runsaasti hiilivetyjen palamisreaktioissa, joten teollisuuden päästöjen ohella myös maailman autokannan kasvu on lisännyt rajusti maailman hiilidioksidipäästöjä, minkä vuoksi päästöjä pyritäänkin valvomaan entistä

tarkemmin. Hiilidioksidin haitallisuus ympäristössä kasvihuonekaasuna johtuu sen ominaisuudesta absorboida valoa infrapuna-aallonpituuksilla. Sillä kaikki auringonvaloa absorboivat kaasut aiheuttavat kasvihuoneilmiötä. Näistä merkittävämpiä ovat esimerkiksi vesihöyry, hiilidioksidi ja metaani. Tyypillinen hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä on noin 350 - 450 ppm. Ilmaa raskaampana kaasuna hiilidioksidi vajoaa lattian tasolle ja syrjäyttää hapen ilmasta. Tämän vuoksi prosesseissa, joissa käytetään hiilidioksidia suurina pitoisuuksina, ja vuodot ovat mahdollisia, tulee olla asianmukaiset mittalaitteet sekä mahdolliset riskit huomioituina. Taulukko 2 esittää hiilidioksidipitoisuuksien vaikutuksia ihmiseen [1; 2].

Taulukko 2. Hiilidioksidipitoisuuden vaikutus ihmiseen [1; 2]

Pitoisuus	Vaikutus ihmiseen
350 - 450 ppm	Tyypillinen ilmakehän pitoisuus
600 - 800 ppm	Hyväksyttävä sisäilman laatu
1000 ppm	Siedettävä sisäilman laatu
5000 ppm	Keskimääräinen yli 8h altistusraja
6000 - 30 000 ppm	Huolestuttava, vain lyhyt altistus
30 000 - 80 000 ppm	Kiihtyvä hengitys ja päänsärky
Yli 100 000 ppm	Pahoinvointi, oksennus, tajuttomuus
Yli 200 000 ppm	Välitön tajuttomuus, kuolema

Hiilidioksidilla on monia käyttötarkoituksia myös teollisuudessa. Sen reagoimattomuus tekee siitä turvallisen ja ympäristöystävällisen kaasun moniin teollisuuden prosesseihin. Kiinteää ja nestemäistä hiilidioksidia käytetään esimerkiksi ilmastoinnin jäähdytyksessä sekä juomateollisuudessa ja suljetuissa pakkauksissa, jossa sen tarkoitus on estää bakteerien kasvua. Sillä voidaan korvata myös ympäristölle haitallisia aerosolien propellantteja. Hiilidioksidia käytetään lisäksi hiilidioksidisammuttimissa, jossa sen purkautumislämpötila on hyvin alhainen eikä se myöskään aiheuta suurta vahinkoa irtaimistolle, kuten esimerkiksi jauhesammutin [1; 2].

Vaisala tarjoaa mittausinstrumentteja hiilidioksidin mittaamiseen sekä ppm-, että %-pitoisuusalueille. Näitä mittausinstrumentteja voidaan käyttää moniin teollisuuden käyttötarkoituksiin, kuten rakennusten ilmastoinnin ohjauksessa, elintarviketeollisuuden prosesseissa sekä laboratoriodien inkubaattorisovelluksissa. Sääolosuhteita hyvin kestäviä lähettämiä käytetään lisäksi myös erilaisissa ympäristömittauksissa.

2.2 Ideaalikaasulaki

Molekyylirakenteensa ja sähköisten ominaisuuksiensa vuoksi reaalikaasujen ominaisuudet poikkeavat todellisuudessa toisistaan enemmän tai vähemmän, mikä taas puolestaan vaikeuttaa kaasujen ominaisuuksia selittävien teoreettisten mallien hallintaa. Reaalikaasujen ominaisuuksia voidaan halutessa selittää tarkemmin monimutkaisemmilla tilanyhtälöillä, kuten esimerkiksi van der Waalsin yhtälöllä. Tätä helpompi tapa on kuitenkin käyttää yksinkertaista kaasumaista olomuotoa selittävää teoreettista mallia, jota kutsutaan Ideaalikaasumalliksi.

Ideaalikaasumallin tarkoituksena on selittää useiden reaalikaasujen todellisia ominaisuuksia suuntaa antavasti. Ideaalikaasumalli toimii parhaiten pienessä paineessa, jolloin kaasun osat ovat etäämmällä toisistaan, ja niiden sähköisillä ominaisuuksilla on vain vähäinen vaikutus osien välisiin lentoratoihin. Ideaalikaasumallissa oletetaan, että ideaalikaasun molekyylit ovat pistemäisiä ja keskenään identtisiä sekä liikkuvat lämpöliikkeen johdosta suoraviivaisesti ja tasaisella nopeudella täysin satunnaisiin suuntiin. Molekyylit ei myöskään oleteta vuorovaikuttavan keskenään muuten kuin toisiinsa sekä astian seinämiin törmäämällä kimmoisasti niin, että niiden liikemäärä ja liikeenergia säilyvät törmäyksissä [4, s. 210; 5].

Kaasun ominaisuuksia kuvataan ideaalikaasun tilanyhtälöllä [4, s. 210; 5; 6, s. 131]:

$$pV = nRT, \quad (1)$$

missä

p = kaasun paine (pascal),

V = kaasun tilavuus (m^3),

n = kaasun ainemäärä (mol),

T = lämpötila (K),

R = Yleinen kaasuvakio ($8,31451 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$).

Edellä olevaan tilanyhtälöön voidaan sijoittaa seuraavat Boltzmannin ja Avogadron vakioista saatavat yhteydet [5]:

$$k = \frac{R}{N_A} \Leftrightarrow R = kN_A, \quad (2)$$

missä N_A on Avogadron vakio ($6,0221367 \times 10^{23}$ 1/mol), k on Boltzmannin vakio ($1,380658 \times 10^{-23}$ J/K) [6, s. 71] ja

$$n = \frac{N}{N_A}, \quad (3)$$

missä N on kaasumolekyylien lukumäärä [6, s. 131; 5].

Kun alkuperäiseen tilanyhtälöön sijoitetaan edelleen yllä esitetyt yhtälöt, saadaan tilanyhtälö saatettua seuraavaan muotoon:

$$pV = NkT \Leftrightarrow \frac{N}{V} = \frac{p}{kT} \quad (4)$$

Yhtälöstä nähdään, että muutokset kaasun paineessa ja lämpötilassa vaikuttavat suoraan kaasun molekyyliitiheyteen, mikä taas vaikuttaa suoraan antureiden kompensoimattomaan näyttämään. Useiden kaasuantureiden ulostulosignaali on suoraan verrannollinen molekyyliitiheyteen, vaikka näyttämä ilmoitetaankin usein loppukäyttäjälle ppm-yksikköinä. Käytännössä ilmiö on siis yksi mittauksen virhelähteistä, koska todellinen kaasukonsentraatio ei muutu paineen ja lämpötilan muuttuessa. Tarkan ja luotettavan mittauksen takaamiseksi tämä pyritään kumoamaan mahdollisimman tehokkaasti antureille syötettävillä kompensointialgoritmeilla.

Ideaalikaasulain avulla kaasun molekyyliitiheys saadaan määritettyä tunnetuissa paine ja lämpötilalukemissa, kun kaasun tiheys SATP-olosuhteissa tunnetaan (SATP = Standard Ambient Temperature and Pressure). Kaasun molekyyliitiheyden laskemiseksi voidaan ideaalikaasulaista johtaa seuraavat yhtälöt (ks. seur. s.):

$$pV = nRT \Leftrightarrow \frac{n}{V} = \frac{p}{RT} \Leftrightarrow c = \frac{p}{RT} \quad (5)$$

$$\frac{c}{c_{SATP}} = \frac{pT_{SATP}}{p_{SATP}T} \Leftrightarrow c = c_{SATP} * \frac{p}{p_{SATP}} * \frac{T_{SATP}}{T}, \quad (6)$$

missä

c = kaasun molekyylitiheys vallitsevissa olosuhteissa

c_{SATP} = kaasun molekyylitiheys SATP-olosuhteissa (1 013,25 hPa)

T = kaasun lämpötila mittaolosuhteissa (K)

T_{SATP} = kaasun lämpötila SATP-olosuhteissa (25 °C = 298 K)

Yhtälöä 6 voidaan käyttää myös kaasukonsentraation määrittämiseen ppm-yksikköinä, kun molekyylitiheyden paikalle sijoitetaan testikaasun konsentraatio ppm-yksikköinä SATP-olosuhteissa. Tämä onnistuu, koska kaasun molekyylitiheyden muunnos konsentraatioksi on vain matemaattinen prosessi, johon paineella ja lämpötilalla ei ole vaikutusta. Taulukossa 3 esitetään ideaalikaasulaista johdetun yhtälön 6 avulla lasketut teoreettiset paineen ja lämpötilan vaikutukset hiilidioksidianturin näyttämään 1 000 ppm hiilidioksidipitoisuudessa.

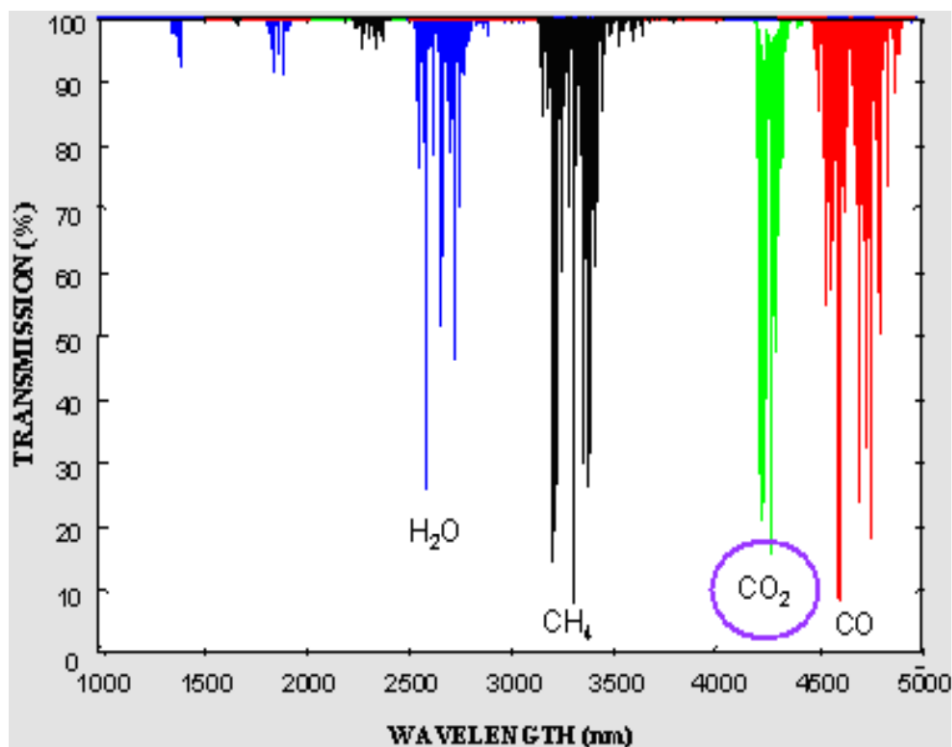
Taulukko 3. Ideaalikaasulain mukaiset teoreettiset hiilidioksidianturin näyttämät 1 000 ppm hiilidioksidipitoisuudessa eri paine- ja lämpötilalukemissa

		Lämpötila (°C)									
		-20	-10	0	10	20	25	30	40	50	60
Paine (hPa)	600	698	671	647	624	602	592	583	564	546	530
	700	814	783	754	728	703	691	680	658	638	618
	800	930	895	862	832	803	790	777	752	729	707
	900	1046	1007	970	936	904	888	874	846	820	795
	1000	1163	1119	1078	1039	1004	987	971	940	911	883
	1013	1178	1133	1092	1053	1017	1000	983	952	923	895
	1100	1279	1230	1185	1143	1104	1086	1068	1034	1002	972
	1200	1395	1342	1293	1247	1205	1185	1165	1128	1093	1060
	1300	1512	1454	1401	1351	1305	1283	1262	1222	1184	1148

2.3 Vaisala CARBOCAP® -mittausteknologia

2.3.1 Mittausteknologian perusteet

Hiilidioksidi absorboi sähkömagneettista säteilyä infrapuna-alueella. Tätä hiilidioksidin absorptiota voidaan käyttää apuna hiilidioksidipitoisuuden määrittämiseen tilavuusprosentteina [1]. Kuvassa 2 esitetään hiilidioksidin, veden, metaanin ja hiilimonoksidin transmissiokaistat aallonpituuden funktiona. Kuvasta kaksi nähdään, että noin 4,2 - 4,3 mikrometrin kohdalla infrapunasäteilyn läpäisy on hyvin heikkoa. Siitä löytyykin hiilidioksidin absorptiokaista, missä hiilidioksidimolekyylit ovat absorboineet suurimman osan detektorille lähetetystä säteilystä.



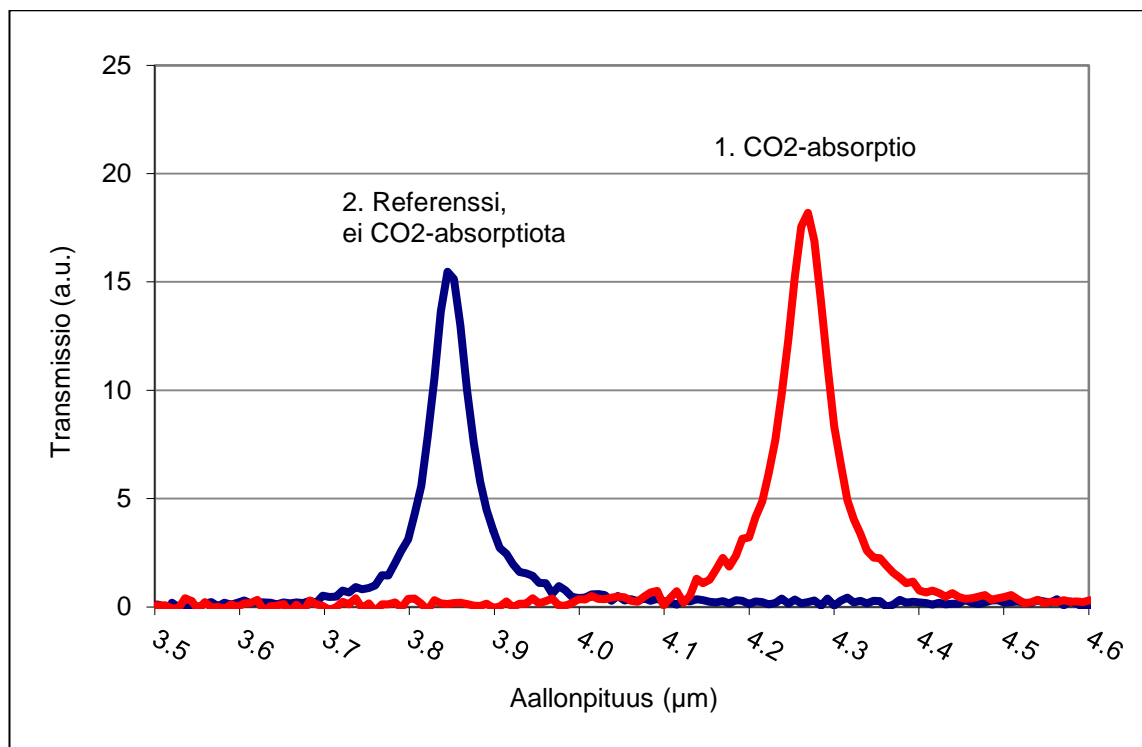
Kuva. 2 Hiilidioksidin transmissiokaista aallonpituuden funktiona [1]

Vaisala CARBOCAP® -anturi on piipohjainen, ei-dispersiivinen infrapuna eli NDIR-anturi, joka on kehitetty kaasumaisessa muodossa olevan hiilidioksidin mittaamiseen. Sen toimintaperiaate perustuu menetelmään nimeltä *Single-Beam Dual-Wavelength NDIR*. Tämä tarkoittaa sitä, että mittatilavuudessa on vain yksi valonlähde, jonka sähkömagneettista säteilyä mitataan vuorotellen kahdella eri aallonpituudella. Tämä menetelmä on myös yleisesti käytössä hyvin arvokkaissa ja suorituskykyisissä

NDIR-analysaattoreissa. Vaisalan oma CARBOCAP®-anturi poikkeaa kuitenkin muista siltä osin, että siinä perinteinen kääntyvä suodatin on korvattu pienellä elektronisesti ohjattavalla pii-pohjaisella Fabry-Perot-kaistanpäästösuodattimella (Fabry-Perot Interferometer, FPI). Tämä mahdollistaa sen, että tarkka kahden aallonpituuden mittaus voidaan toteuttaa käyttämällä hyvin yksinkertaista ja käytännöllistä rakennetta [1].

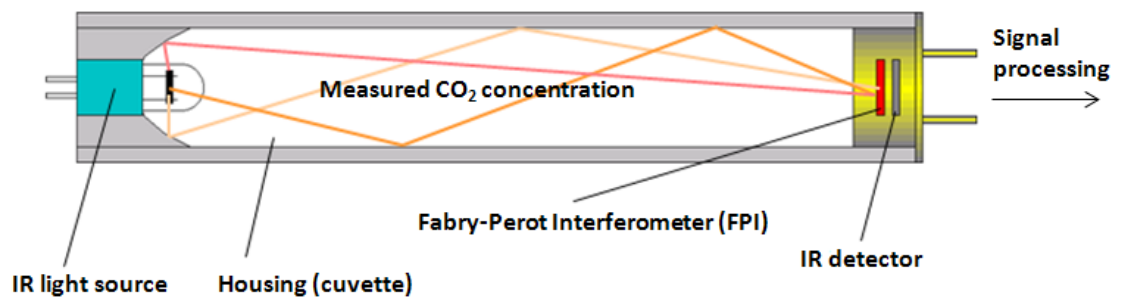
2.3.2 Vaisala CARBOCAP® -anturin toimintaperiaate

CARBOCAP®-anturissa mittakammion päässä oleva infrapunalähde emittoi infrapunasäteilyä, josta mittakammiossa olevat hiilidioksidimolekyylit absorboivat osan. Vastaanottopäässä sijaitseva Fabry-Perot-kaistanpäästösuodatin on vastaavasti säädetty elektronisesti siten, että sen päästökaista kattaa hiilidioksidille ominaiset absorptioaallonpituudet (ks. kuva 2, s. 7) ja suodattaa ylimääräiset pois. Tämä haluttu osa saapuvasta säteilystä ohjataan edelleen infrapunadetektorille, joka mittaa saapuvan säteilyn intensiteettiä. Tästä saadaan mittaukselle absorptiosignaali, jonka jälkeen FPI:n päästökaista siirretään elektronisesti sellaisen aallonpituuden kohdalle, jossa hiilidioksidin absorptiota ei tapahdu, ja näin saadaan vuorostaan referenssisignaali [1]. FPI:n toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 3:



Kuva 3. Fabry-Perot -kaistanpäästösuodattimen toimintaperiaate [7]

Näiden kahdella eri aallonpituudella mitatun signaalin suhteen avulla saadaan laskettua säteilyn absorptioaste kaasussa, jonka avulla voidaan määrittää kaasun konsentraatio mittakammiossa. Absorptioasteen määrittämiseen ei kuitenkaan välttämättä tarvita erikseen referenssisignaalia, ja se voidaankin määrittää myös pelkästä absorptiosignaalista. Referenssisignaalin tarkoituksena on parantaa mittauksen stabiilisuutta pitkällä aikavälillä kompensoimalla anturin mahdollisia vanhenemiseen liittyviä ilmiöitä tai muutoksia mittausympäristössä. Kuvassa 4 esitetään Vaisala CARBOCAP® -anturin toimintaperiaate:



Kuva 4. Vaisala CARBOCAP® -anturin toimintaperiaate [7]

3 Testiaseman suunnittelun lähtökohdat

Perinteisesti antureiden lämpötila- ja paineriippuvuustestit on tehty täysin manuaalisesti, mikä on vaatinut yhden henkilön usean päivän työpanoksen. Toimenpiteisiin kuuluivat kaasupullojen vaihto, olosuhdetestikaapin lämpötilan säätö, testikammion paineen säätö pumpun ja venttiilin avulla sekä kommunikointi testattavien antureiden kanssa usean terminaali-ikkunan kautta. Terminaalista lisäksi jokaisen anturin näyttämät kopioidiin erikseen jatkokäsittelyä varten. Tämän kaiken välttämiseksi sekä antureille suoritettavien testien nopeuttamiseksi ja automatisoimiseksi tässä työssä suunniteltiin ja toteutettiin automaattinen paine- ja lämpötilatestiasema.

Testiaseman tuli mahdollistaa sekä automaattisesti että manuaalisesti suoritettavat paine- ja lämpötilatestiajot operaattorin asettamilla parametreilla ja useilla testikaasuilla. Lisäksi aseman oli tarkoitus suorittaa halutut paine- ja lämpötilatasot järjestyksessä pienimmästä suurimpaan tai päinvastoin. Tarkoituksena oli myös, että vaihtoehtoisesti painetasot voitaisiin ajaa peräkkäin molempiin suuntiin aseman operaattorin näin halutessa. Tällä tavoin voidaan muun muassa tutkia mahdollista testattavissa laitteissa esiintyvää hystereesi-ilmiötä tai varmistua siitä, että aseman syöttölinjoissa ei esiinny vuotoja.

Suunnittelun lähtökohtana oli, että testiaseman operaattori voisi hallita aseman toimintaa suoraan PC:n välityksellä erillisestä LabVIEW'illä toteutetusta käyttöliittymästä. Koska Vaisalan anturituotekehityksessä antureille suoritettavia testejä on anturityypistä riippuen hyvin monenlaisia, vaativat ne myös testiasemalta joustavuutta. Aseman suunnittelussa otettiin huomioon erityisesti anturituotekehityksen vaatimukset siten, että esimerkiksi aseman mekaanisesta rakenteesta tuli helposti siirrettävä, liitännöistä helposti muokattavat sekä graafisen käyttöliittymän säädöistä mahdollisimman monipuoliset.

Testiaseman perustoimintoihin kuuluvat seuraavat automaattiset toiminnot: testikammion paineen ja lämpötilan säätö, maksimissaan viiden kytketyn testikaasun hallinta, testattavien antureiden kanssa kommunikointi sekä testitulosten tallennus ja käsittely. Lisäksi aseman operaattorilla on mahdollisuus suorittaa myös yksittäisiä toimintoja tai testiajoja täysin manuaalisesti ohjausohjelmiston manuaalillassa.

Testikammion paineen säätö toteutetaan alipainealueella pumpun avulla ja ylipainealueella nostamalla testikammion painetta asemaan kytketyistä kaasunsyöttölinjoista. Näin voidaan olla varmoja siitä, että painetiiviissä järjestelmässä testikammion kaasukonsentraatio on aina oikea painetasosta riippumatta. Testikammion lämpötilan säätö puolestaan toteutetaan asettamalla testikammio olosuhdetestikaappiin, jonka kanssa aseman ohjausohjelmisto kommunikoi automaattisesti RS232-sarjaväylän välityksellä.

Testiasema soveltuu paine- ja lämpötila-ajojen lisäksi myös muihin anturitesteihin, joissa on tarvetta ainoastaan testikaasujen automaattiselle vaihdolle ja mitattavien antureiden lukemiselle. Aseman avulla on siis mahdollista myös ajaa automaattisesti haluttu testiajo valituilla testikaasuilla ilman paine- tai lämpötila-askelia. Tällöin asemaa voidaan käyttää hyvin monenlaisiin käyttötarkoituksiin, kuten esimerkiksi jonkin aikaisemman testiajon tulosten täydentämiseen tai muihin lyhytkestoisiin normaalista poikkeaviin anturitesteihin.

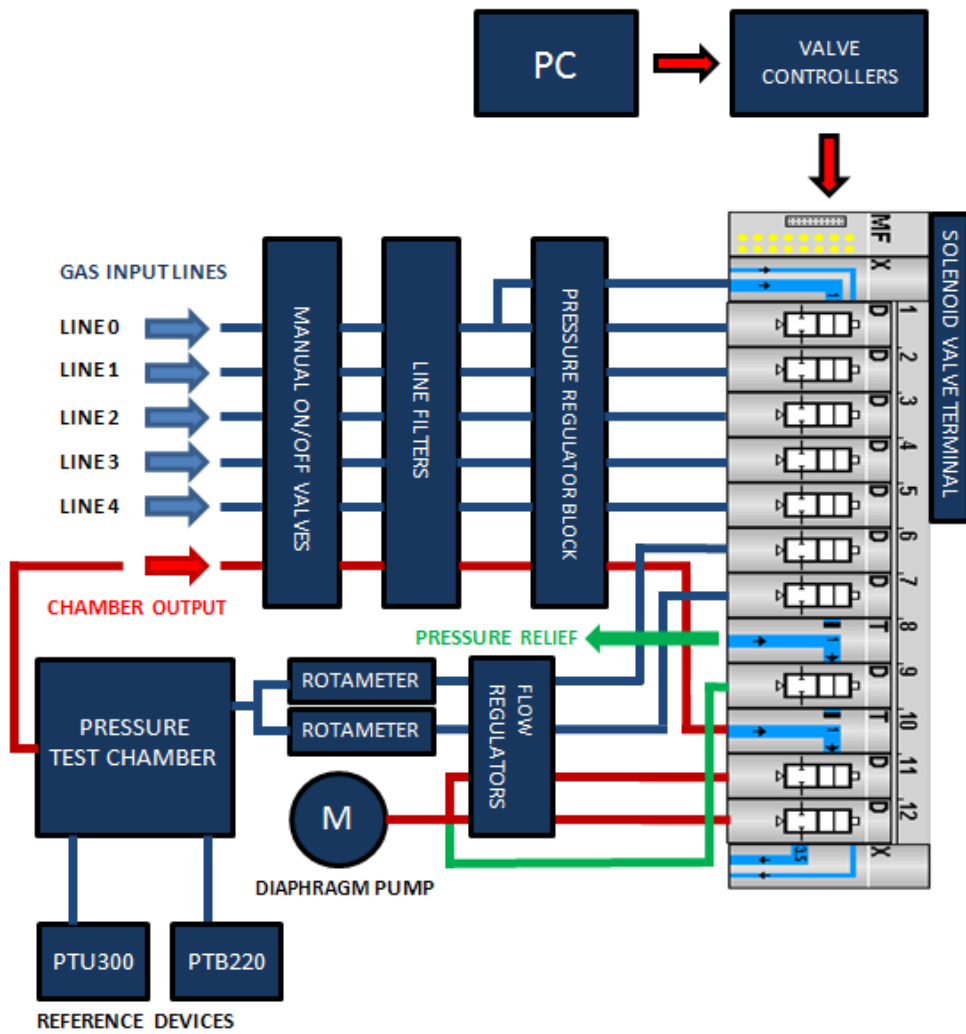
4 Testiaseman rakenne

Testiaseman tarkoituksena on mahdollistaa hiilidioksidiantureille suunniteltujen paine- ja lämpötilatestiajojen suorittaminen täysin automaattisesti erillisen PC:llä hallittavan graafisen käyttöliittymän välityksellä. Tätä varten testiasemassa on monta toiminnallista ryhmää, jotka voidaan jakaa yhdeksään osaan seuraavasti. Näitä ovat syöttölinjojen suodattimet ja paineregulaattorit, magneettiventtiilit, ohjainkontrollerit, ohjausohjelmisto, testikammiota syöttävät virtausmittarit, paine- ja lämpötilareferenssimittalaitteet sekä varsinainen painetestikammio ja vakuumpumppu.

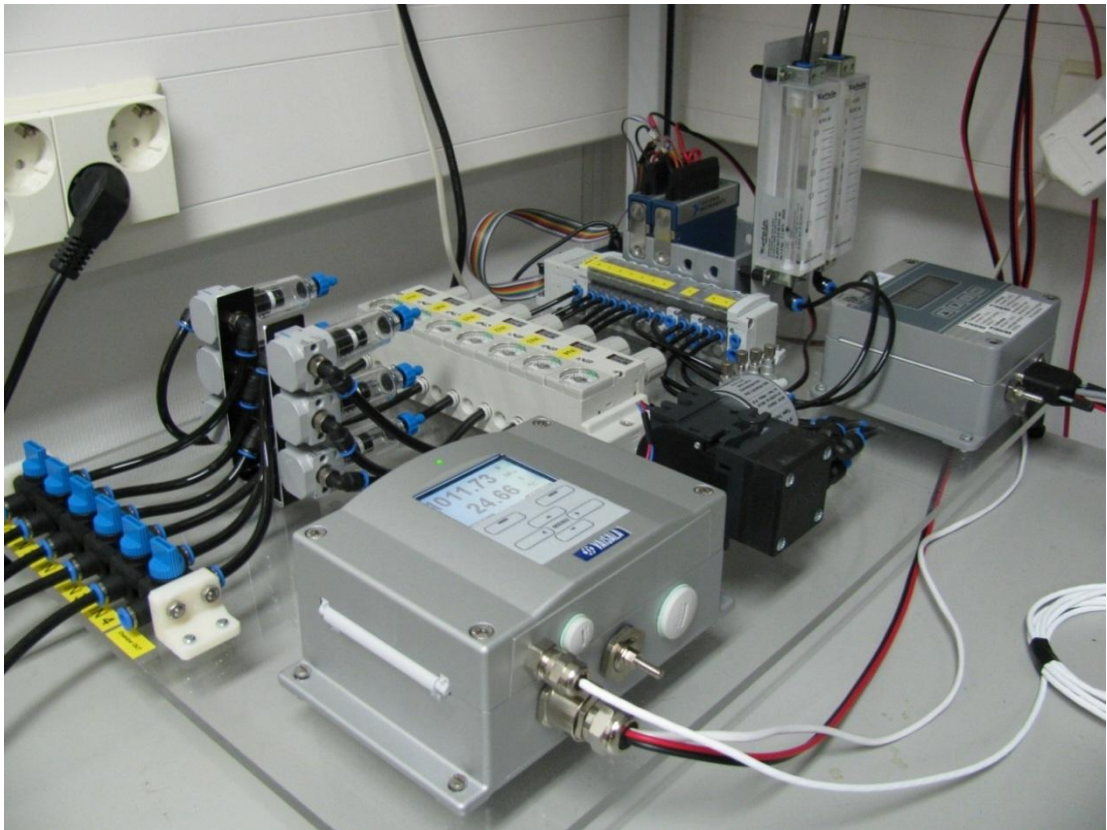
Testiaseman ensimmäisenä asteena toimivat syöttölinjojen manuaaliset kytkimet, suodattimet ja paineregulaattorit. Tämän asteen tarkoituksena on säätää syöttölinjojen painetasot keskenään samalle tasolle sekä estää mahdollisten syöttölinjoihin joutuneiden roskien kulkeutuminen järjestelmään. Tämän jälkeen kaasulinjat johdetaan testiaseman toiselle asteelle, johon kuuluvat magneettiventtiilit, ohjainkontrollerit, ohjausohjelmisto ja tyhjiöpumppu. Tämä aste käytännössä vastaa aseman automaattisesta toiminnasta ja on siten testiaseman tärkein osakokonaisuus. Magneettiventtiilien ja tyhjiöpumpun toimintaa ohjataan elektronisesti National Instrumentsin ohjainkontrollereilla, joita taas hallitaan PC:n ohjausohjelmiston välityksellä.

Magneettiventtiileiltä mittakaasu johdetaan lopuksi testiaseman pääasteelle. Siihen kuuluvat virtausmittarit, virtausrajoittimet sekä referenssimittalaitteet ja testikammio. Virtausmittareista toinen on mitoitettu suuremmille ja toinen pienemmille kaasuvirtauksille. Näiden yhteinen ulostulo viedään haluttuun testikammioon yhdessä referenssimittalaitteiden antureiden kanssa. Testikammion ulostulo vuorostaan kytketään takaisin testiasemaan, josta se johdetaan suodattimen kautta takaisin magneettiventtiileille. Testikammion ulostuloa hallitsevien magneettiventtiilien on tarkoitus kytkeä tilanteesta riippuen kammion ulostulo pumpulle tai vaihtoehtoisesti paineentasausventtiilille. Magneettiventtiilien ollessa suljettuna kammion tulee siis olla painetiivis, jotta painemittaukset voidaan suorittaa luotettavasti ja asema toimii oikein painetestiajoissa.

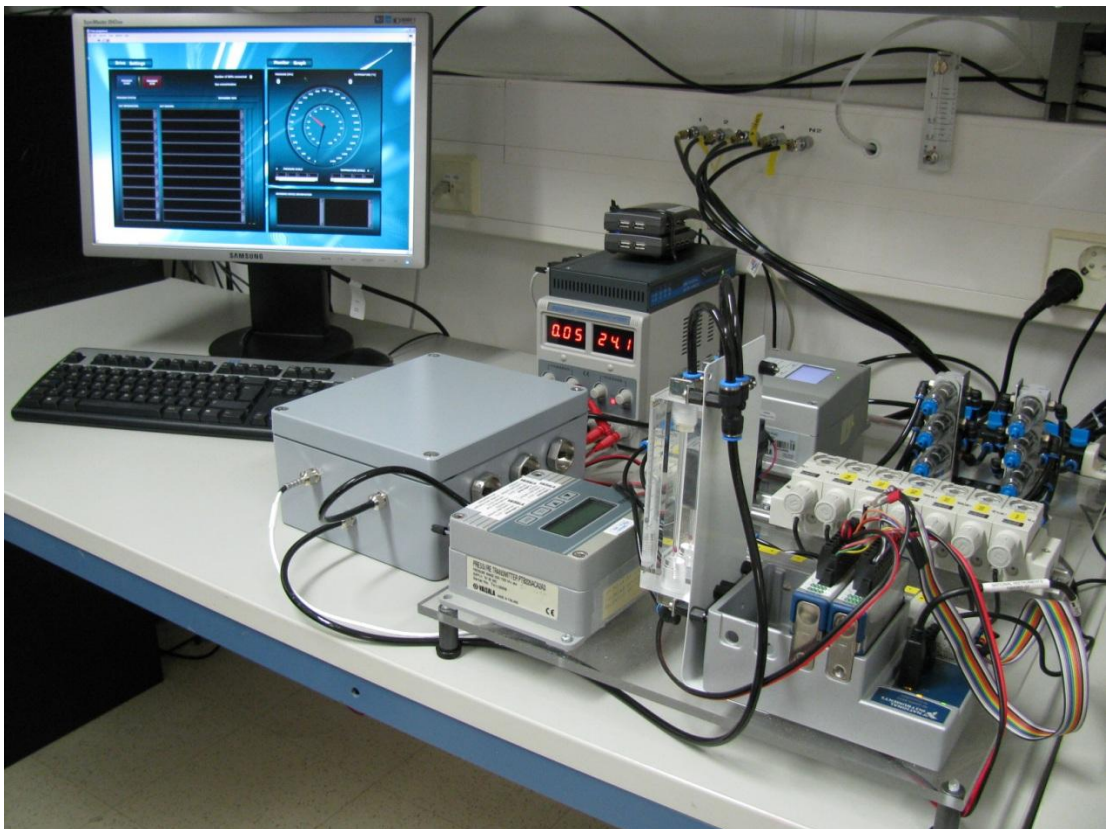
Aseman tärkeimmät toiminnalliset osat kiinnitettiin yhteiselle alustalevyllä, joka toimii testiaseman runkona ja siten mahdollistaa testiaseman helpon liikuteltavuuden ja hallinnan. (Testiaseman rakenne, ks. kuvat 5, seur. s.; 6, 7, s. 14.)



Kuva 5. Hiilidioksidiantureiden paine- ja lämpötilatestiaseman rakenne



Kuva 6. Hiilidioksidiantureiden paine- ja lämpötilatestasema



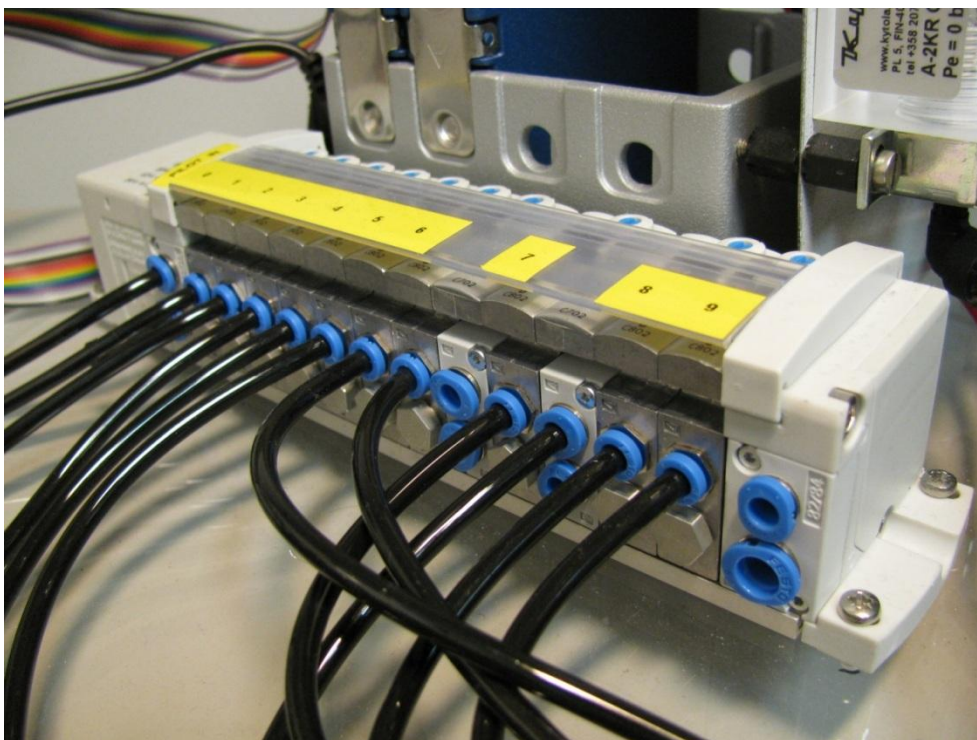
Kuva 7. Hiilidioksidiantureiden paine- ja lämpötilatestasema kokonaisuutena

5 Testiaseman ohjausjärjestelmän osat

5.1 Magneettiventtiilit

Testikaasujen sähköiseen kytkentään valittiin alun perin pneumatiikkakäyttöön suunniteltu FESTO CPV-SC Smart Cubic -magneettiventtiiliyksikkö (kuva 8). Tähän malliin päädyttiin, koska se oli valintavaiheessa nähtävissä toisen asemasovelluksen yhteydessä, mikä vuorostaan mahdollisti tuotteeseen tutustumisen etukäteen ja näin helpotti yksikön tulevan kokoonpanon etukäteissuunnittelua ennen varsinaista ostopäätöksen tekoa.

Magneettiventtiiliyksikön avulla haluttu määrä erillisiä magneettiventtiilejä on mahdollista liittää yhdeksi kokonaisuudeksi. Yksikköön on myös mahdollista valita erilaisia erotinmoduuleita, joilla voidaan muokata sen rakennetta omaan käyttötarkoitukseen sopivaksi. Lisäksi yksikön avulla jokaisen venttiilin ohjaaminen onnistuu erikseen elektronisesti joko D- tai lattaakaapeliliittimen kautta, mikä sijaitsee yksikön päädysssä. Kyseisen asemasovelluksen käyttöön valittiin 20-napainen lattaakaapeliliitin lähinnä helpon muokattavuuden vuoksi.

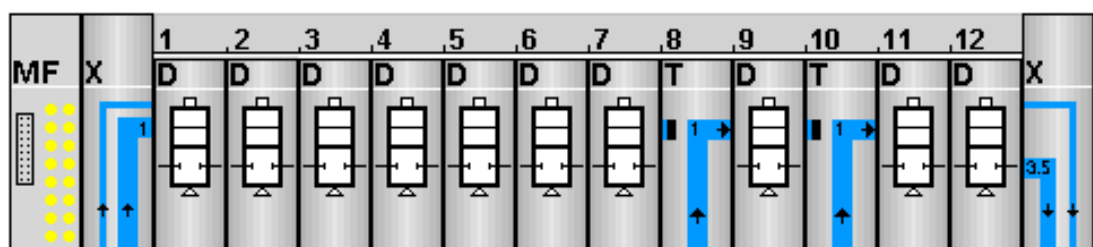


Kuva 8. Magneettiventtiiliyksikkö CPV-SC Smart Cubic

Pienen kokonsa vuoksi yksikkö tarvitsee venttiilien varman toiminnan takaamiseksi myös *pilot*-paineen, joka varmistaa venttiilien avautumisen riippumatta syöttölinjoissa kulloinkin vallitsevasta paineesta. Venttiilien ollessa paineistettuna pelkkä säätöjännitteen voima ei siis riitä avaamaan venttiiliä. Tämä *pilot*-paine on ensisijaisesti suunniteltu otettavaksi aseman ensimmäisestä syöttölinjasta, joka on varattu tyypelle, sillä se toimii usein mittauksissa yhtenä mittakaasuna. Vaihtoehtoisesti *pilot*-linjassa voidaan käyttää tosin myös paineilmaa. Kuitenkin ensimmäiseksi mainitulla tavalla toteutettuna asema ei tarvitse välttämättä paineilmaa toimiakseen, joka taas mahdollistaa aseman käytön myös sellaisissa olosuhteissa, joissa ei ole paineilmalinjaa tai kompressoria.

Testiasemaa varten tilattuun venttiiliyksikköön valittiin yhteensä 10 kappaletta venttiilejä ja 2 erotinmoduulia, jotka erottavat venttiiliyksikön kahden eri puoliskon sisäiset linjat toisistaan (kuva 9). Testiaseman syöttölinjoja säätämään valittiin venttiiliyksikön venttiilit 1 - 5 ja testikammion sisäänmenon hallintaan venttiilit 6 ja 7. Nämä 7 venttiiliä ovat yksikön sisällä toisiinsa pneumaattisesti yhteydessä eli niillä on yhteinen kaasutilaavuus.

Seuraavassa asteessa 7 ensimmäisen venttiilin yhteinen linja on erotettu lopuista T-moduulilla, joka yhdessä venttiilin 9 kanssa toimii kammion paineentasausventtiilinä. Jäljelle jäävät venttiilit 11 ja 12 vastaavat yhdessä T-moduulin kanssa testikammion ulostulojen hallinnasta. Nämä venttiilit on kytketty kahdelle virtausrajoittimelle, jotka molemmat on kytketty tyhjiöpumppuun. Tällä tavalla saadaan helposti rajoitettua tyhjiöpumpun imuvirtaus halutulle tasolle. Toista venttiiliä käytetään testikammion vaakuimi-ässä ja toista testikammion paineen hienosäädössä.

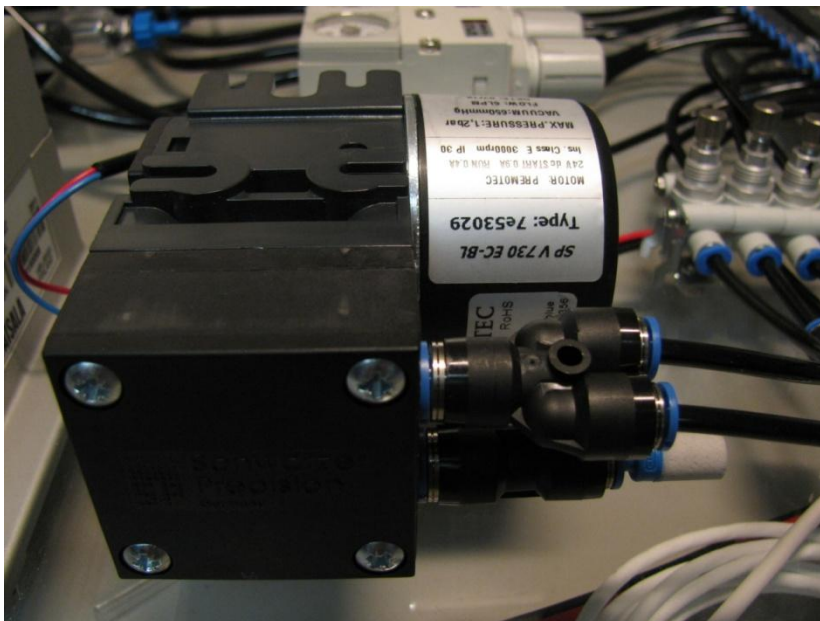


Kuva 9. Magneettiventtiiliyksikkö CPV-SC Smart Cubic [8]

5.2 Tyhjiöpumppu

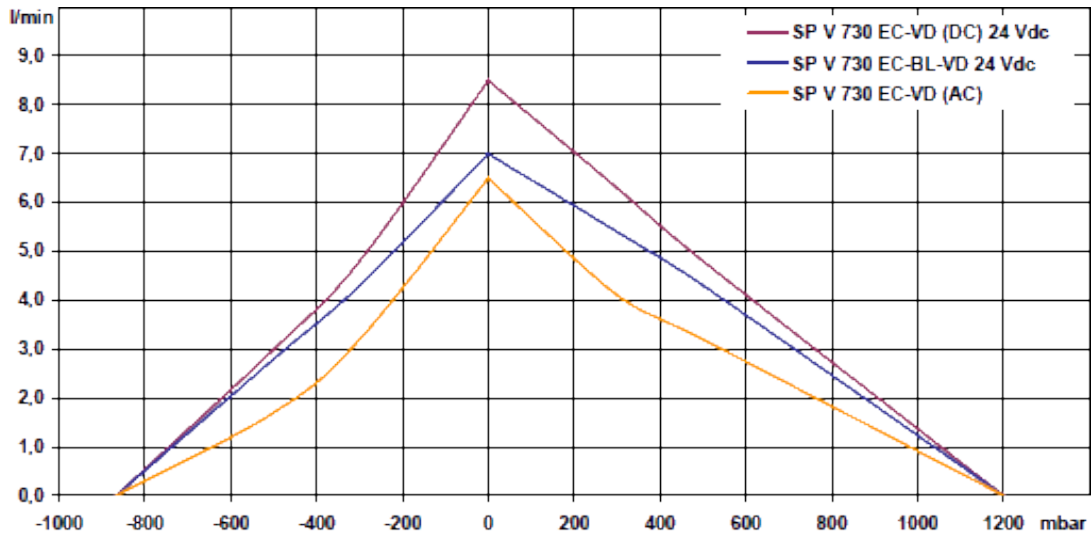
Jotta testikammion painetta saadaan säädettyä myös vallitsevan ilmanpaineen alapuolella eli alipainealueella, tarvitaan asemaan elektronisesti ohjattava tyhjiöpumppu. Tätä tarkoitusta palvelemaan valittiin Schwarzer Precision -miniatyyryhjiöpumppu 730 EC-BL-VD, joka on kooltaan erittäin pieni, mutta tehokas (kuva 10). Kyseinen malli on varustettu harjattomalla 24 V:n DC-moottorilla, jonka ansiosta pumpun eliniän pitäisi olla perinteistä metallisydämellä varustettua mallia pidempi. Lisäksi pumppu tuottaa vähemmän lämpöenergiaa ja toimii paremmalla hyötysuhteella. Aseman kannalta pumpulla on myös toinen käyttötarkoitus, sillä kaasua vaihdettaessa testikammioon halutaan luoda mahdollisimman voimakas vakuumi. Tämän tarkoituksena on tyhjentää testikammio aikaisemmasta kaasusta ennen uuden testikaasun syöttöä.

Normaalisti testikaasun vaihto suoritetaan läpivirtauttamalla kaasua kammion läpi niin kauan, kunnes koko kammion tilavuus on varmasti saavuttanut halutun kaasukonsentraation. Tämä kuitenkin vie aikaa ja kuluttaa paljon testikaasuja. Vakuumpumpun avulla tätä aikaa voidaan yrittää lyhentää ja siten vähentää testikaasujen kulutusta. Vakuumi-imu voidaan tarvittaessa toistaa useita kertoja, jotta voidaan varmistua siitä, että kammiossa on varmasti oikea kaasukonsentraatio. Menetelmä vaatii lisäksi toimiakseen täysin painetiiviin järjestelmän, johon ei vuoda kaasua ympäröivästä ilmasta.



Kuva 10. Schwarzer 730 EC-BL-VD Eccentric Diaphragm Pump

Kuvassa 11 esitetään valmistajan ilmoittaman pumpun syöttö- ja imuvirtaus paineen funktiona. Kuvaajasta nähdään, että pumppu kykenee luomaan melko voimakkaan alipaineen pienestä koostaan huolimatta, mutta luontaisesti syöttö- ja imuvirtaus laskee voimakkaasti paineen laskiessa ja kasvaessa.



Kuva 11. Schwarzer 730 EC-BL-VD -pumpun syöttö- ja imuvirtaus paineen funktiona. Kuvaajassa vaak akselin arvot kuvaavat erotusta ympäröivään painetasoon. [9]

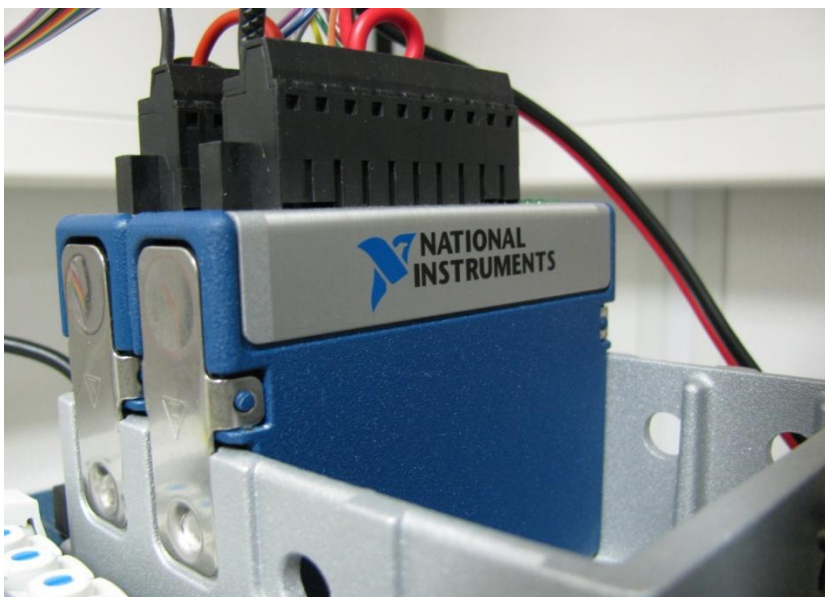
5.3 Ohjauselektronikka

Magneettiventtiilien ja pumpun ohjausta varten tarvitaan 24 V:n jännitelähtöjä, joita hallitaan testiaseman ohjausohjelmiston välityksellä. Tähän tarkoitukseen valittiin kaksi digitaalista National Instruments 9474 -ohjainmoduulia (kuva 12, ks. seur. s.). Molemmilla ohjainmoduuleissa on kahdeksan kappaletta säädettäviä jännitelähtöjä, jotka pystyvät kukin ajamaan noin 1 A:n virtaa kuormaan. Molemmat ohjainmoduulit tarvitsevat lisäksi ulkoisen jännitelähteen, jonka avulla säädetään kanaviin kytkettävä jännite halutulle tasolle. Pumppu tarvitsee käynnistyäkseen yhtä ampeeria suuremman käynnistysvirran, joten sille tulee varata toisesta ohjainmoduulista kaksi lähtöä. Tarvittaessa ohjainmoduuleiden jännitelähtöjä voidaan siis kytkeä rinnan, mikäli yhden lähdön antama virta ei ole sovellukselle riittävä. Tällöin kuitenkin molemmat lähdöt tulee kytkeä päälle ja pois samanaikaisesti.



Kuva 12. National Instruments 9474 8-Channel Digital Output Module [10]

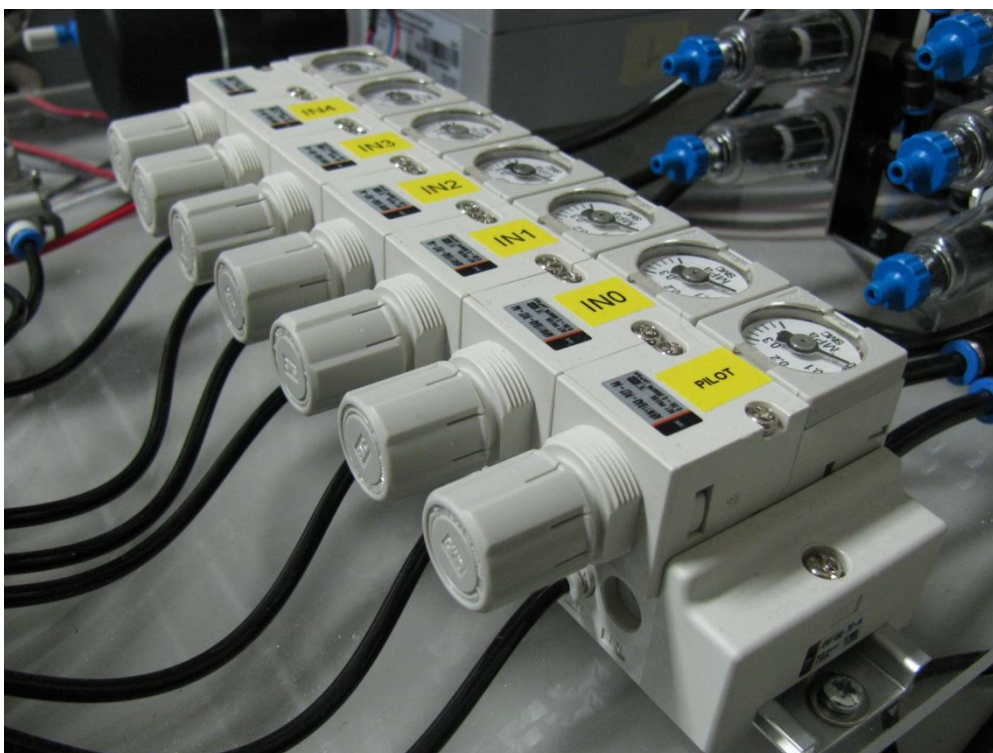
Moduuleiden ohjaus toteutettiin LabVIEW'n kautta National Instruments NI-DAQmx-ohjelmistolla. Moduuleita komennetaan 8-bittisellä binääriluvulla, jossa jokainen bitti vastaa yhtä kontrollerin jännitelähtöä. Ohjausohjelmistossa komennot on käännetty ohjausta varten hex-muotoon. Ohjainmoduulit asennettiin nelipaikkaiseen koteloon (NI cDAQ-9174 USB CompactDAQ chassis) (kuva 13), jonka avulla molempien moduulien ohjaus onnistuu PC:ltä luontevasti yhden USB-väylän kautta. Lopuksi magneettiventtiiliyksikön lattaakaapeli liitettiin ohjainmoduulien ulostuloihin siten, että ensimmäinen ohjainmoduuli vastaa testiasemaan kytkettyjen testikaasujen kytkemisestä ja toinen kaikista muista aseman toiminnoista.



Kuva 13. NI cDAQ-9174, CompactDAQ chassis (4 slot USB)

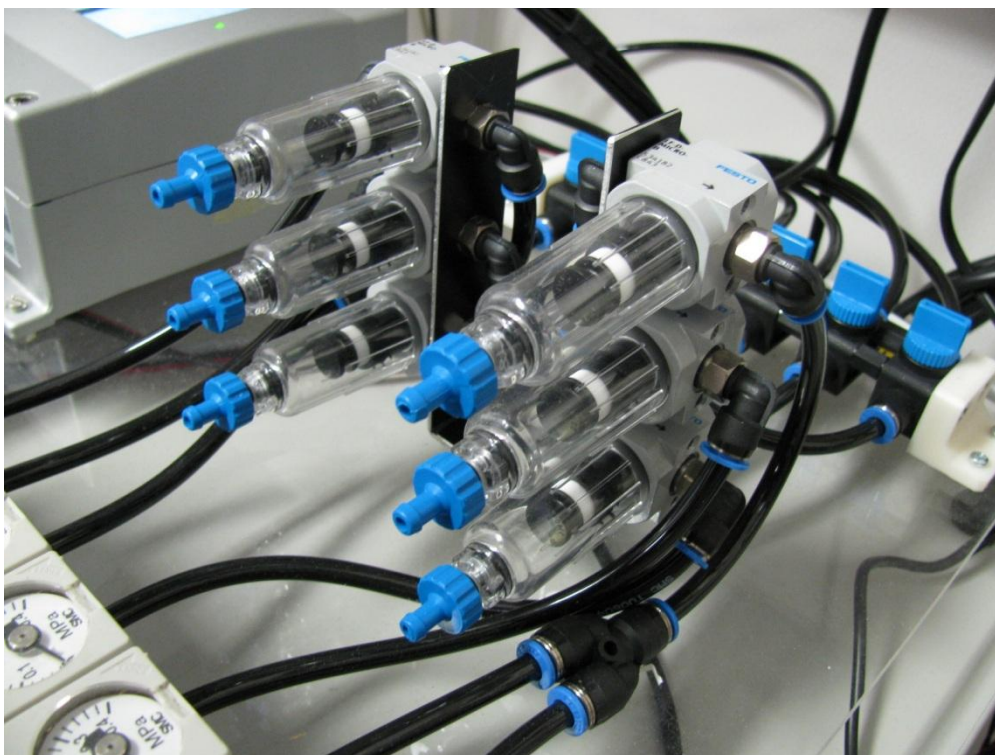
5.4 Kaasulinjojen paineregulaattorit ja suodattimet

Mahdollisten testiaseman sisäänmenolinjojen paine-erojen tasaamiseksi ja säätämiseksi asemaa varten hankittiin SMC Pneumatics ARM11BA3-707-A4 -paineregulaattoriyksikkö (kuva 14), jonka on tarkoitus myös vikatilanteessa rajoittaa aseman kammioon syntyvä ylipaine maksimissaan 4:ään baariin riippumatta kaasunsyöttölinjoissa kulloinkin vallitsevasta paineesta. Regulaattoriyksikössä on yhteensä 7 paineregulaattoria, joista jokaisen ulostulon painetasoa voi säätää manuaalisesti halutulle tasolle.



Kuva 14. ARM10 Manifold -regulaattoriyksikkö

Regulaattoriyksikön eteen asennettiin lisäksi FESTO LF-D-MICRO-B -suodattimet (kuva 15, ks. seur. s.), joiden on määrä estää mahdollisten syöttölinjojen kautta kulkeutuvien roskien eteneminen järjestelmässä. Järjestelmään pääsevät roskat voivat pahimmassa tapauksessa tukkia magneettiventtiilit, mikä taas aiheuttaa aseman käytölle tarpeettomia huoltokatkoksia.



Kuva 15. LF-D-MICRO-B-suodattimet

5.5 Virtausmittarit ja kuristimet

Testikammioon syötettävien kaasuvirtausten hallitsemiseksi asemaa varten tilattiin kaksi eri käyttöalueille mitoitettua Kytölä Instruments -virtausmittaria (kuva 16, ks. seur. s.). Näistä malli A-2KR on mitoitettu 0,1-0,9 l/min ja A-3AR 0,5-8 l/min virtauksille. Mallin A-2KR on tarkoitus näyttää testikammion paineen säädössä käytettävän hyvin pienen virtausrajoittimella säädettävän kaasuvirtauksen voimakkuutta, jotta testiase-
man operaattori voi helposti kontrolloida testikammion painetta. Toista suuremmille virtauksille mitoitettua mallia A-3AR taas käytetään testikammion huuhtelussa ja muissa läpivirtausmittauksissa, joissa on tarvetta testikaasun nopealle vaihdolle.

Virtausmittareiden todellinen virtaus riippuu virtautettavan kaasun tiheydestä ja syötötpaineesta. Jos siis mitattavan kaasun tiheys, paine tai lämpötila poikkeaa virtausmittareiden kalibrointiolosuhteista (20 °C, 1.013 bar), voidaan näyttämien korjaus suorittaa seuraavan kaavan avulla [11].

$$V = V_0 \sqrt{\left(\frac{r_1 T_1 p_2}{r_2 T_2 p_1} \right)}, \quad (7)$$

missä

V = todellinen virtaus (l/min)

V_0 = virtausmittarin näyttämä (l/min)

r_1 = ilman suhteellinen tiheys (1)

r_2 = mitattavan kaasun suhteellinen tiheys

p_1 = normaali ilmanpaine (1.013 bar)

p_2 = mitattavan kaasun paine (bar)

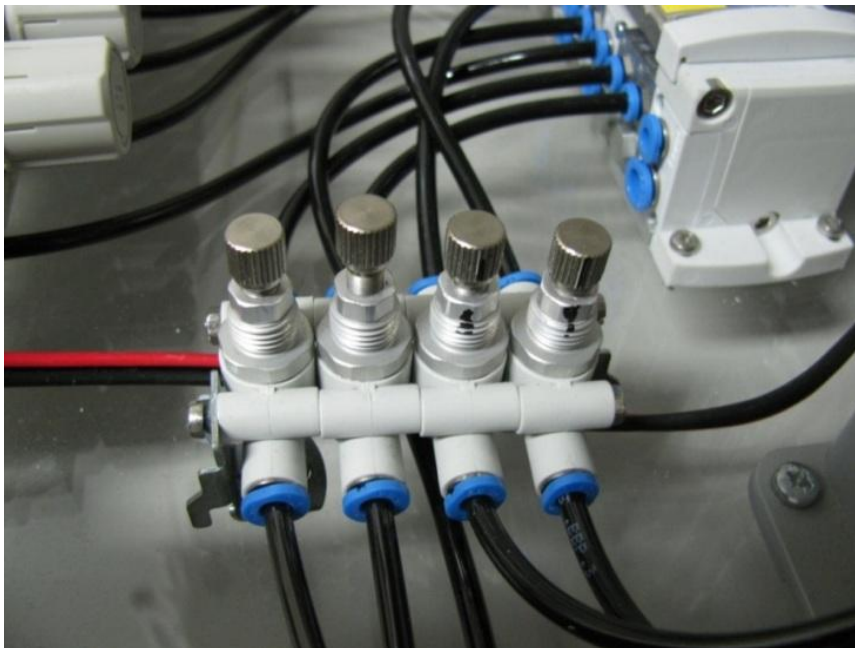
T_1 = kalibrointilämpötila (20 °C, 293 K)

T_2 = mitattavan kaasun lämpötila (K)



Kuva 16. Kytölä A-2KR- ja A-3AR-virtausmittarit

Virtausmittareille syötettävien kaasuvirtausten hallinnan helpottamiseksi asemaan asennettiin lisäksi 4 manuaalisesti säädettävää FESTO GRO-QS-4 -vastusventtiiliä (kuva 17, ks. seur. s.). Näistä kahdella vastusventtiilillä hallitaan testikammion kaasunsyöttöä, yhdellä tyhjiöpumpun imuvirtausta ja viimeisellä kammion paineen tasausta. Tyhjiöpumppuun kytketyn vastusventtiilin funktio on hillitä pumpun imuvirtausta ainoastaan silloin, kun testikammion painetasoa ollaan laskemassa.



Kuva 17. Syöttö- ja imulinjojen virtausrajoittimet

5.6 Referenssimittalaitteet

Jotta testiasemasta saadaan tarkka ja luotettava, tarvitsee se tuekseen luotettavat referenssimittalaitteet, joiden lukemien pohjalta suorittaa toimintoja. Sovelluksessa käytetäänkin kahta Vaisalan painelähetintä PTU300 ja PTB220, joista toinen mittaa painetestikammion painetta ja toinen kammion lämpötilaa.

5.6.1 Vaisala PTU300 -lähetin

Testikammion lämpötilanmittauksessa käytetään Vaisalan yhdistettyä ilmanpaine-, kosteus- ja lämpötilalähetintä PTU300 (kuva 18, ks. seur. s.). Laitteessa on aktiivisena ainoastaan asemassa tarvittavat lämpötila- ja painemittaus. PTU300 kykenee mittaamaan lämpötilaa alueella $-40 - +60$ °C, mikä riittää hyvin asemasovelluksen tarpeisiin. Lähettimellä voidaan myös mitata ilmanpainetta alueella 500 - 1 100 hPa, ja näin se soveltuu hyvin vallitsevan ilmanpaineen mittaamiseen testiympäristöissä (taulukko 4, ks. seur. s.). Kuitenkaan kyseisen testiaseman käyttötarkoitukseen painemittausalue ei ole riittävän laaja, jotta sitä voitaisiin käyttää testiaseman painereferenssinä. Varsinaista testikammion paineen mittausta varten valittiinkin erikoisversio Vaisalan PTB220-barometrasta.

Taulukko 4. PTU300-lähettimen tekniset tiedot [12]

Technical Specifications	
Barometric pressure measurement	
Measurement range	500 ... 1100 hPa, 50 ... 1100 hPa
Accuracy at +20 °C	
Class A 500 ... 1100 hPa	±0.10 hPa
Class B 500 ... 1100 hPa	±0.20 hPa
50 ... 1100 hPa	±0.30 hPa
Total accuracy	
(-40...+60 °C/-40...+140 °F)	
Class A 500 ... 1100 hPa	± 0.15 hPa
Class B 500 ... 1100 hPa	± 0.25 hPa
50 ... 1100 hPa	± 0.45 hPa
Long-term stability	
Class A 500 ... 1100 hPa	± 0.1 hPa
Class B 500 ... 1100 hPa	± 0.1 hPa
50 ... 1100 hPa	± 0.2 hPa
Sensor	Vaisala BAROCAP®
Temperature measurement	
Measurement range	-40 ... +60 °C (-40 ... +140 °F)
Accuracy	
at -40 °C (-40 °F)	± 0.4 °C (±0.8 °F)
at +20 °C (68 °F)	± 0.2 °C (±0.4 °F)
at +60 °C (140 °F)	± 0.3 °C (±0.6 °F)
Sensor	Pt100 RTD Class F0.1 IEC 60751



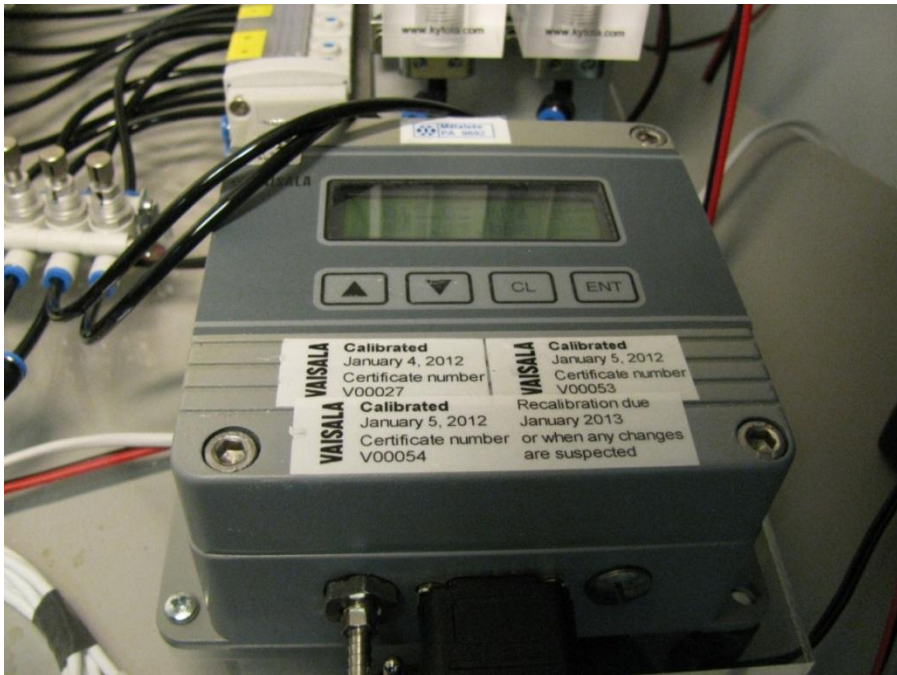
Kuva 18. Vaisala PTU300 -paine- ja lämpötilälähetin

5.6.2 Vaisala PTB220 -barometri

Testiaseman varsinaiseksi painereferenssiksi valittiin kolmella eri paineanturilla ja painealueella varustettu erikoisversio PTB220-barometrissa (kuva 19). Sen avulla saadaan katettua koko testiaseman käyttämä painealue 50 – 1 300 hPa. PTB220 tulostaa sarjavyölyn kautta kaikkien kolmen paineanturin lukemat, joista testiasema valitsee automaattisesti testikammion paineesta riippuen kulloinkin sopivimman. Lähettimen kolme eri painealuetta ovat, 50 - 1 100, 500 - 1 100 ja 800 - 1 300 hPa. Taulukossa 5 esitetään PTB220-barometrin tekniset tiedot:

Taulukko 5. PTB220-barometrin tekniset tiedot [13]

Accuracy	Pressure range:	500...1100 hPa		50...1100 hPa
		0.1 % R ¹	class A	
Linearity*		± 0.05 hPa	± 0.05 hPa	± 0.10 hPa
Hysteresis*		± 0.02 hPa	± 0.03 hPa	± 0.03 hPa
Repeatability*		± 0.02 hPa	± 0.03 hPa	± 0.03 hPa
Calibration uncertainty**		± 70 ppm	± 0.07 hPa	± 0.15 hPa
Accuracy at +20 *C***		±100 ppm	± 0.10 hPa	± 0.20 hPa
Temperature dependence****			± 0.1 hPa	± 0.1 hPa
Total accuracy			± 0.15 hPa	± 0.25 hPa
Long-term stability			± 0.1 hPa / year	0.20 hPa/year



Kuva 19. Vaisala PTB220 -barometri

5.7 Painetestikammio

Testiaseman painetestejä varten hankittiin Fibox Oy:n painetiivis alumiinilaatikko, johon asennettiin mekaniikkasuunnittelijan avustuksella painetiivit läpiviennit testilaitteiden kommunikointikaapeleille, kaasunsyötölle ja -poistolle sekä referenssimittalaitteiden antureille (kuva 20). Testiasemaa ei ole kuitenkaan lopullisesti lukittu käytettäväksi minkään tiettyä testikammion kanssa, vaan siinä on mahdollista käyttää lähes mitä tahansa käyttötarkoitukseen soveltuvaa testikammiota. Painetestikammioille suoritettiin lisäksi painetesti ennen varsinaisia testiajoja, missä kammio todettiin painetiiviiksi.



Kuva 20. Painetestikammio

6 Testiaseman ohjausohjelmisto

Testiaseman ohjausohjelmistoa voidaan pitää yhtenä aseman tärkeimmistä osaluista, sillä sen tehtävänä on antaa aseman operaattorille mahdollisimman vapaat kädet aseman säätöparametrien hallintaan. Kuitenkin niin, että aseman käyttö olisi mahdollisimman helppoa ja nopeaa. Tähän kiinnitettiin huomiota erityisesti ohjauspaneelin ulkoasussa sekä tarvittavien säätöpainikkeiden sijoittelussa. Ohjausohjelmisto toteutettiin kokonaisuudessaan LabVIEW 8.6 Professional -ohjelmistolla.

6.1 LabVIEW-testiympäristö

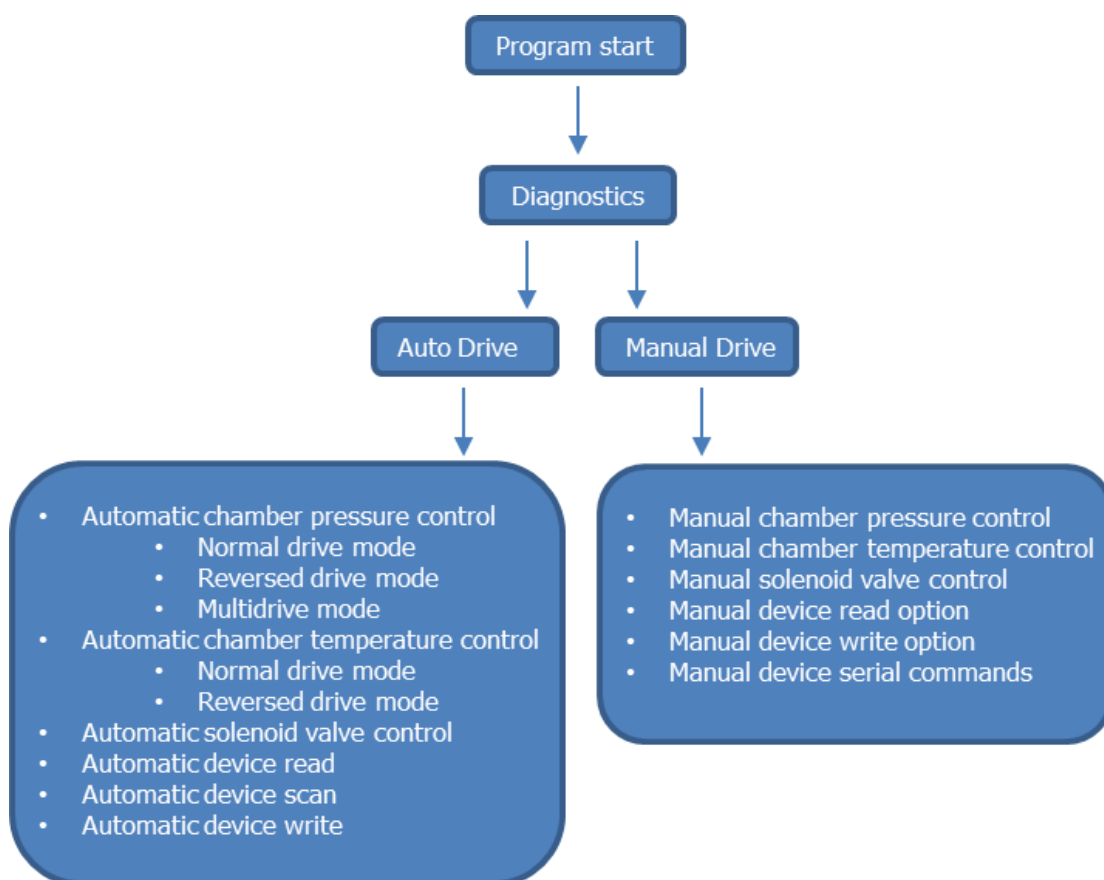
LabVIEW on yksi graafisista ohjelmointikielistä, jonka avulla on mahdollista luoda monimuotoisia mittaus- ja valvontajärjestelmiä. Se tarjoaa laajan valikoiman ammattilaisten työkaluja mittausdatan analysointiin, keräämiseen sekä tallentamiseen. LabVIEW tarjoaa myös tehokkaita työkaluja, jotka helpottavat koodatun ohjelman vianetsintää. LabVIEW-ohjelmia kutsutaan virtuaalisiksi instrumenteiksi (VI), koska ne muistuttavat ulkonäöltään fyysisiä instrumentteja, kuten esimerkiksi yleismittareita ja oskilloskooppia. LabVIEW'n ohjelmat koostuvat kolmesta komponentista, etupaneelistä, ohjelmaikkunasta sekä ikoni- ja liitinpaneelistä [14, s. 2].

6.2 Ohjausohjelmiston toiminta

Käynnistyessään ohjausohjelmisto diagnosoi kytkettyjen antureiden lukumäärän ja käyttäjän syöttämät testiparametrit sekä luo ennalta määriteltyyn tiedostopolkuun jokaiselle testattavalle laitteelle omat kansiot ja tekstitiedostot testin tuloksia varten. Ohjelman lähtökohtana oli antaa käyttäjälle ohjelman käynnistyessä mahdollisuus valita, missä tilassa aseman haluaa toimivan. Alkudiagnostiikan jälkeen ohjelma siis jakautuu kokonaisuudessaan kahteen tilaan, Auto Drive ja Manual Drive -tiloihin. Näistä jälkimmäinen mahdollistaa nimensä mukaisesti aseman toiminnan täysin manuaalisesti perustuen operaattorin käskyihin, kun taas automaattitilassa asema toimii käytännössä täysin automaattisesti operaattorin asettamien alkuparametrien mukaisesti.

Automaattiajon aikana asema lukee jokaisen testattavan laitteen näyttämää ja muita parametreja sekä kirjoittaa ne erikseen kullekin testilaitteelle luotuihin tekstitiedostoihin. Lisäksi jokaisen luetun jakson jälkeen asema laskee luettujen parametrien keskiarvot ja tekee niistä testiajon lopussa erillisen tekstitiedoston, mikä helpottaa testitulosten jatkokäsittelyä. Vuokaaviossa 1 esitetään ohjausohjelmiston yksinkertaistettu toimintaperiaate.

Vuokaavio 1. Ohjausohjelmiston yksinkertaistettu toimintaperiaate



6.2.1 Automaattitila

Automaattitilassa testiaseman operaattori voi suorittaa lämpötilatestiajon kahdessa eri tilassa, joita ovat Normal Drive Mode ja Reversed Drive Mode. Nämä tilat määrittelevät asemalle sen, että ajetaanko asetetut lämpötila-askleet korkeimmasta lämpötilasta alimpaan vai toisinpäin. Painetestiajossa taas on vastaavasti valittavissa kolme eri ajo-tilaa, joita ovat Normal, Reversed ja Multidrive. Näistä kaksi ensimmäistä toimii samalla periaatteella, kuin lämpötilatestiajossa, mutta lisäksi ajo voidaan halutessa suorittaa

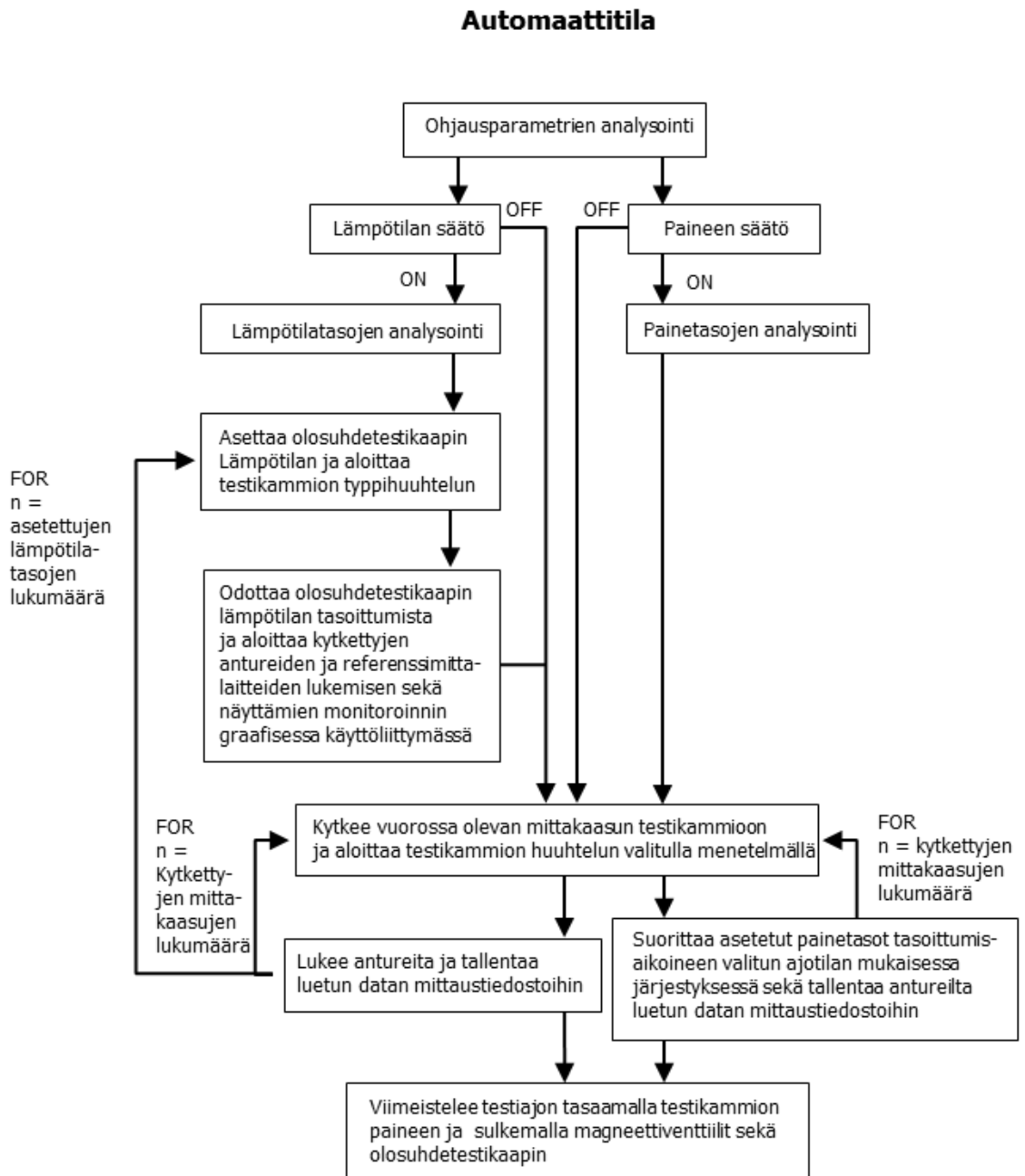
Multidrive-tilassa, joka suorittaa Reversed ja Normal-tilat peräkkäin alkaen Reversed-tilasta. Näiden kahden ajotilan välissä asema luo painetestikammioon voimakkaan alipaineen, jonka jälkeen vasta siirtyy seuraavaan ajotilaan.

Multidrive-tilan avulla voidaan testata testiajajen toistettavuutta sekä havaita mahdollisia järjestelmässä esiintyviä vuotoja sillä testattavien anturien näyttämien tulisi pysyä samalla tasolla riippumatta siitä, että ajetaanko paineaskeleet suurimmasta pienimpään vai toisin päin. Normal-tilassa testiasema aluksi pumpppaa testikammioon vakuumin, jonka jälkeen se lähtee suorittamaan painetasoja alimmasta syötetystä painetasosta lähtien nostamalla kammion painetta avaamalla syöttölinjan venttiiliä. Reversed-tilassa asema taas nostaa tai laskee kammion paineen vastaavasti ensin korkeimmalle syötetylle tasolle, josta se sitten lähtee laskemaan kammion painetta tyhjiöpumpun avulla.

Automaattitilassa asema lisäksi tulkitsee aseman operaattorin ohjauspaneelin asetusvälilehteen syöttämät testiparametrit ja säätää toimintaansa reaaliaikaisesti niiden mukaiseksi. Operaattori voi siis käytännössä valita, suorittaako asema automaattisen paine- tai lämpötilatestiajon tai vaihtoehtoisesti molemmat yhdessä. On myös mahdollista olla valitsematta kumpaakaan, jolloin asema ainoastaan ajaa automaattisen normaalin testiajon, jossa kammiota huuhdellaan kytketyillä testikaasuilla ja luetaan kytkettyjen testilaitteiden näyttämää testikammion painetta ja lämpötilaa säätämättä. Tätä tilaa on siis mahdollista käyttää lähes minkä tahansa testikammion kanssa.

Käytännössä ohjausohjelmiston automaattiosa muodostuu kahden sisäkkäin olevan FOR-silmukan ympärille, joista toinen vastaa olosuhdetestikaapin lämpötilan säädöstä ja toinen testikammion paineen säädöstä. Silmukoiden iteraatiokierrosten eli paine- ja lämpötilatasojen lukumäärän asema laskee testiajon alussa operaattorin määrittelemistä parametreista. Mikäli operaattori on valinnut sekä lämpötilan, että paineen säädön aktiiviseksi, siirtyy asema ensimmäisenä säätämään olosuhdetestikaapin lämpötilaa määrättyksi ajaksi, jonka jälkeen alkaa paineaskelten suorittaminen. Muussa tapauksessa asema suorittaa ainoastaan kulloinkin aktivoidut toiminnot. (Automaattitilan toiminta, ks. vuokaavio 2, seur. s.).

Vuokaavio 2. Ohjausohjelmiston automaattitilan toiminta



6.2.2 Manuaalitila

Testiasemaa voidaan käyttää myös manuaalitulassa, jossa operaattori voi hallita lähes kaikkia aseman osia ja parametreja täysin vapaasti. Operaattorin valitessa manuaalitilan, asema avaa tätä varten käyttöliittymän pääikkunaan ohjauspaneelin (kuva 21, ks. seur. s.), joka näkyy ainoastaan manuaalitilan ollessa aktivoituna. Tästä ohjauspaneelistä operaattori voi muun muassa hallita testiaseman molempia ohjainmoduuleita ja

siten säätää testikammion paineen haluamalleen tasolle. Lisäksi manuaalitilan avulla on mahdollista säätää olosuhdetestikaapin lämpötilaa, kommunikoida kytkettyjen antureiden kanssa sekä lukea ja tallentaa antureiden näyttämiä tekstitiedostoihin sekä kommunikoida testattavien antureiden kanssa sarjaväylän välityksellä. Kun operaattori syöttää antureille sarjaväyläkomennon, asema lähettää saman komennon jokaiselle asemaan kytketylle anturille. Tämä nopeuttaa esimerkiksi testattavien antureiden säätöparametrien konfigurointia ennen testiajoja.

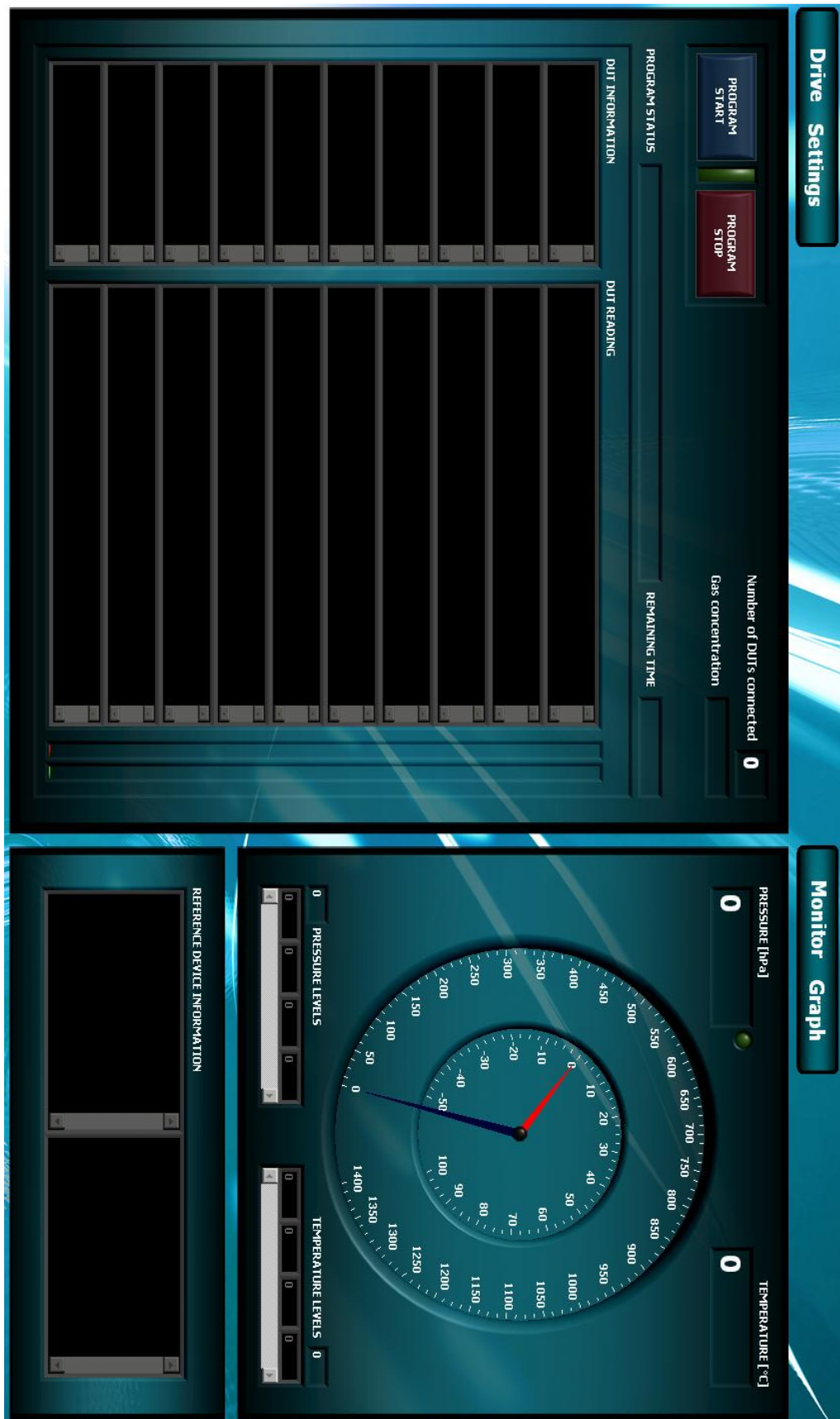


Kuva 21. Manuaalitilan ohjauspaneeli

6.3 Graafinen käyttöliittymä

Testiaseman graafisen käyttöliittymän suunnittelun tavoitteena oli toteuttaa mahdollisimman informatiivinen, mutta kuitenkin selkeä ja helppokäyttöinen kokonaisuus. Tavoitteena oli sisällyttää kaikki tarvittavat painikkeet, parametrit sekä muu informaatio loogisesti niin, että välilehtien määrä saatiin pidettyä mahdollisimman pienenä. Graafinen käyttöliittymä koostuu kokonaisuudessaan kahdesta osasta ja neljästä välilehdestä.

Ensimmäisen osan ensimmäinen välilehti koostuu aseman hallintapainikkeista, informaatiopalkeista sekä ikkunoista, joihin päivitetään automaattisesti kytkettyjen antureiden tiedot sekä sarjaväylän kautta testiajon aikana tulostama informaatio. Toiselle välilehdelle on koottu vastaavasti testiaseman käyttöön tarvittavat valintapainikkeet ja sekä ajoparametrit. Käyttöliittymän toiseen osioon sisällytettiin asemaan kytketyiltä referenssimittalaitteilta saatava informaatio analogisessa sekä digitaalisessa muodossa. Toisella välilehdellä aseman operaattori voi vuorostaan seurata testattavana olevien antureiden sekä referenssimittalaitteiden näyttämiä graafisessa muodossa (kuva 22, ks. seur. s.; kuva 23, ks. s. 33).



Kuva 22. Testiaseman graafisen käyttöliittymän 1. välilehdet

Drive Settings

DEVICE SETTINGS

Valve controller 1: Dev1/Port0
 Valve controller 2: Dev1/Port0

REFERENCE: BAUD RATE: 4800
 PTU: COM28
 PTB: COM28
 CHAMBER: BAUD RATE: 9600
 DUT: BAUD RATE: 19200

19200 COM1
19200 COM1
19200 COM1
19200 COM1
19200 COM1
19200 COM1
19200 COM1

DRIVE PARAMETERS

Gas change mode: Standard
 Read interval [s]: 0
 Data capture [min]: 0
 Chamber temp. wait [min]: 0
 Chamber pressure wait [min]: 0
 Gas change wait [min]: 0
 Chamber vacuum strength [hPa]: 0
 Perform PFI scan

DRIVE OPTIONS

Temperature control: disabled
 Pressure control: disabled

Normal Normal

Temperature [°C] Pressure [hPa] Scan [0,1000]

T START: 0 P START: 0 S START: 0
 T STOP: 0 P STOP: 0 S STOP: 0
 T STEP: 0 P STEP: 0 S STEP: 0

Line input commands for controller 1

Open line 0
 Open line 0
 Open line 0
 Open line 0

Type in CO₂ concentrations of connected gases [ppm]

Log file directory

Created file paths

System file path: Data average path

Monitor Graph

DUT NUMBER: 1

PARAMETER: 1

Plot 0

DUT reading

1 -
0.8 -
0.6 -
0.4 -
0.2 -
0 -
-0.2 -
-0.4 -
-0.5 -
-0.8 -
-1 -
00:00

Time

00:00

0:00

Temperature Pressure

10,00 -
8,000 -
6,000 -
4,000 -
2,000 -
0,000 -
-2,000 -
-4,000 -
-6,000 -
-8,000 -
-10,000 -
00:00

Time

0:00

-1,0
-0,8
-0,6
-0,4
-0,2
-0,0
-0,2
-0,4
-0,6
-0,8
-1,0
00:00

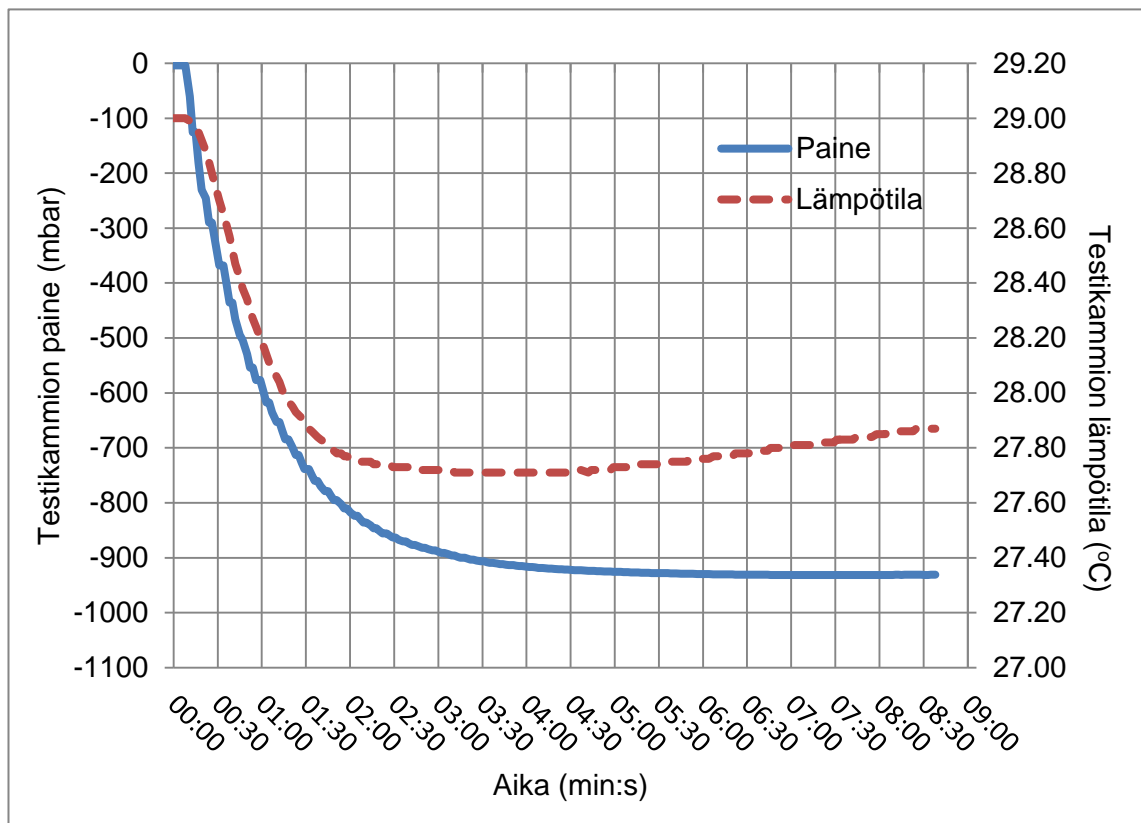
Temperature [°C] Pressure [hPa]

Kuva 23. Testiaseman graafisen käyttöliittymän 2. välilehdet

7 Testiaseman testaus ja testitulokset

7.1 Tyhjiöpumpun suorituskyky

Testiaseman pumpulle tehtiin suorituskykytesti, jossa pumpu kytkettiin testiaseman painetestikammioon ja järjestelmä suljettiin täysin painetiiviiksi. Tämän jälkeen aloitettiin vakuumi-imu ja samalla testikammion painelukemaa luettiin toistuvasti siihen kytketystä PTB220-barometristä. Pumpun suorituskykyä testatessa testikammioon saatiin testitilanteessa luotua parhaimmillaan noin 82 hPa (-930 mbar) alipaine täydellä imuteholla, joka ylittää jopa valmistajan ilmoittaman maksimisuorituskyvyn -867 mbar. Tähän kuluu aikaa kyseisen painetestikammion tapauksessa noin kuusi minuuttia. Kuvasta 24 voidaan havaita kammion lämpötilan muuttuvan imun aikana. Tämä tulee huomioida painetestiajon vapaasti valittavissa painetasojen välisissä odotusajoissa, jotta kammion lämpötila on tasoittunut riittävästi ennen varsinaisen mittausdatan keräämistä testattavilta antureilta.



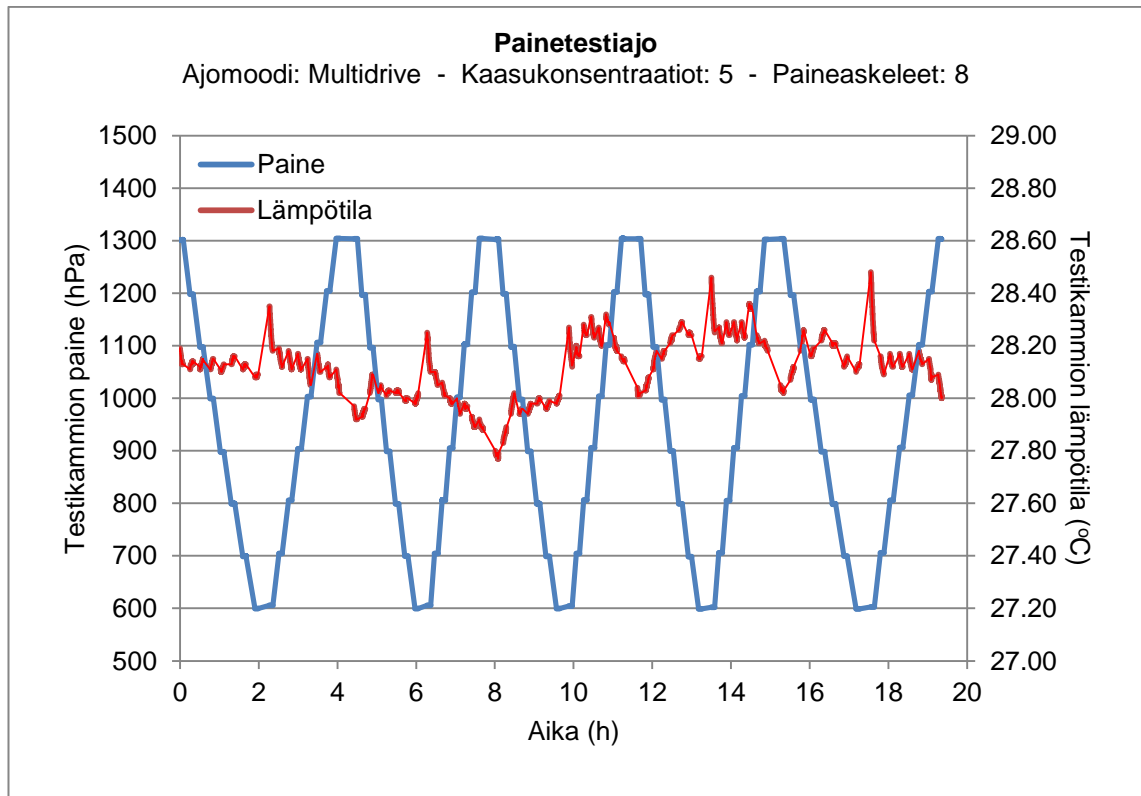
Kuva 24. Schwarzer 730 EC-BL-VD -tyhjiöpumpun suorituskyky testiasemasovelluksessa

7.2 Automaattinen painetestiajo

Testiaseman testausta jatkettiin suorittamalla painetestiajo kymmenelle hiilidioksidianturille käyttäen viittä eri testikaasua. Testikaasuina käytettiin puhdasta tyyppiä (N₂) sekä pullokaasuja, joiden hiilidioksidikonsentraatiot olivat 500 ppm, 1 000 ppm, 2 000 ppm sekä 5 000 ppm sekä ilmoitettu mittausepävarmuus 0,5 %. Kyseessä oli automaattitestiajo viidellä testikaasulla Multidrive-tilassa, jossa testiasema ajoi syötetyt paineaskeleet molempiin suuntiin ja suunnanvaihdoksen välissä loi testikammioon vakuumin. Ennen varsinaista testiajoa testattavien antureiden annettiin olla päällä riittävän kauan, jotta testikammion lämpötila saatiin stabiloitua, sillä käynnissä olevat anturit nostavat tiiviin testikammion lämpötilaa muutamalla asteella.

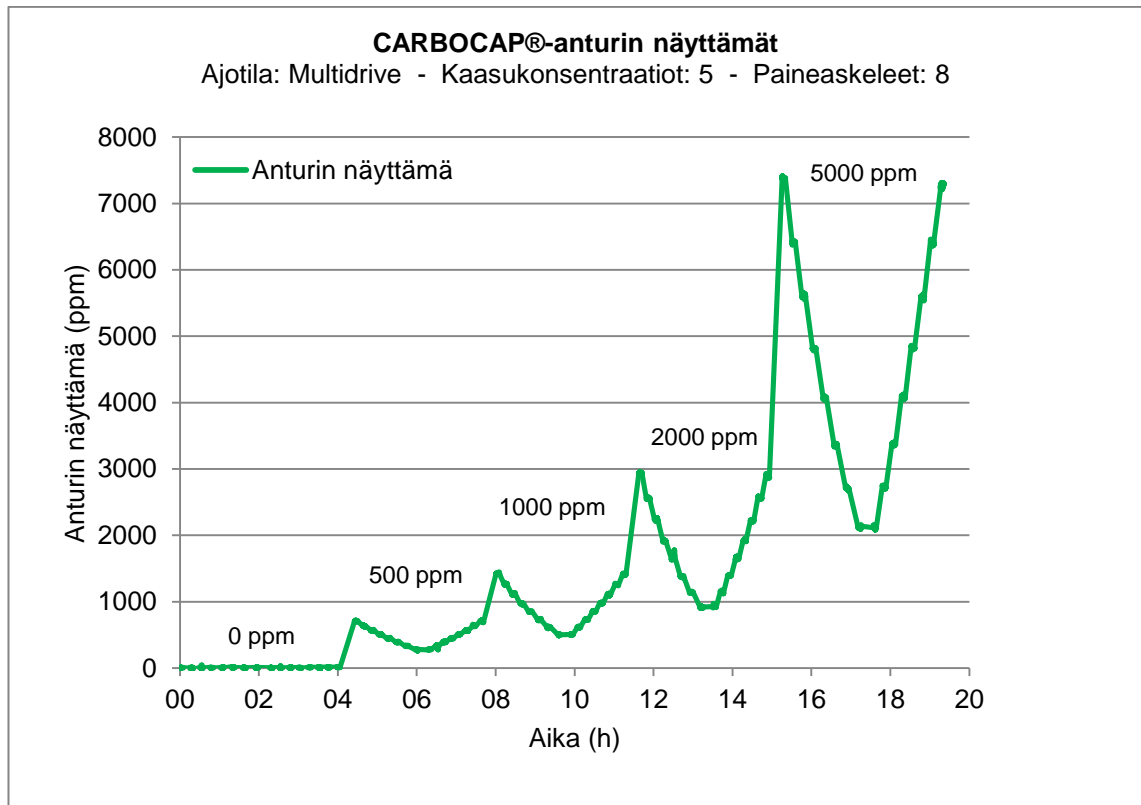
Kaasunvaihtojen yhteydessä testikaasua virtautettiin aluksi testikammion läpi 10 minuuttia, jotta testikammioon saatiin varmasti haluttu hiilidioksidipitoisuus. Matalimmaksi testiajon painetasoksi valittiin lukema 600 hPa ja korkeimmaksi lukema 1 300 hPa. Näillä arvoilla saatiin katettua reilusti alue, jonka testattavat anturit lopputuotteena näkevät normaalin ilmanpaineen vaihdellessa. Paineaskeleeksi valittiin 100 hPa, joten siis jokaisella testikaasulla ajettiin kokonaisuudessaan kahdeksan eri mitattavaa painetasoa. Kunkin painetaso tasoittumisajaksi määritettiin 5 minuuttia, minkä jälkeen asema luki testattavia laitteita toiset 5 minuuttia ennen siirtymistä seuraavaan painetasoon.

Kuvassa 25 (ks. seur. s.) esitetään testikammion paine- ja lämpötilalukemat painetestiajon aikana. Kyseinen testiajo kesti viidellä mittakaasulla ja kahdeksalla paineaskeleella Multidrive-tilassa noin 20 tuntia. Kuvasta nähdään, että asema pystyi suorittamaan halutut paineaskeleet toistettavasti sekä ylhäältä alas, että alhaalta ylös jokaisella mittakaasulla eikä testiajon aikana myöskään testikammion lämpötilassa tapahtunut suuria muutoksia. Tämä kertoo testiaseman säätöparametrien osuneen hyvin kohdalleen. Ensimmäisen ja viimeisen testikaasun kohdalla testi kesti muita kaasuja kauemmin, koska niiden kohdalla lisäksi testattiin Fabry-Perot -kaistanpäästösuodattimen automaattisen skannauksen toiminta, missä kaistanpäästösuodattimen säätöjännitettä muutettiin askeltaen.



Kuva 25. Testikammion paine- ja lämpötilalukemat painetestiajon aikana

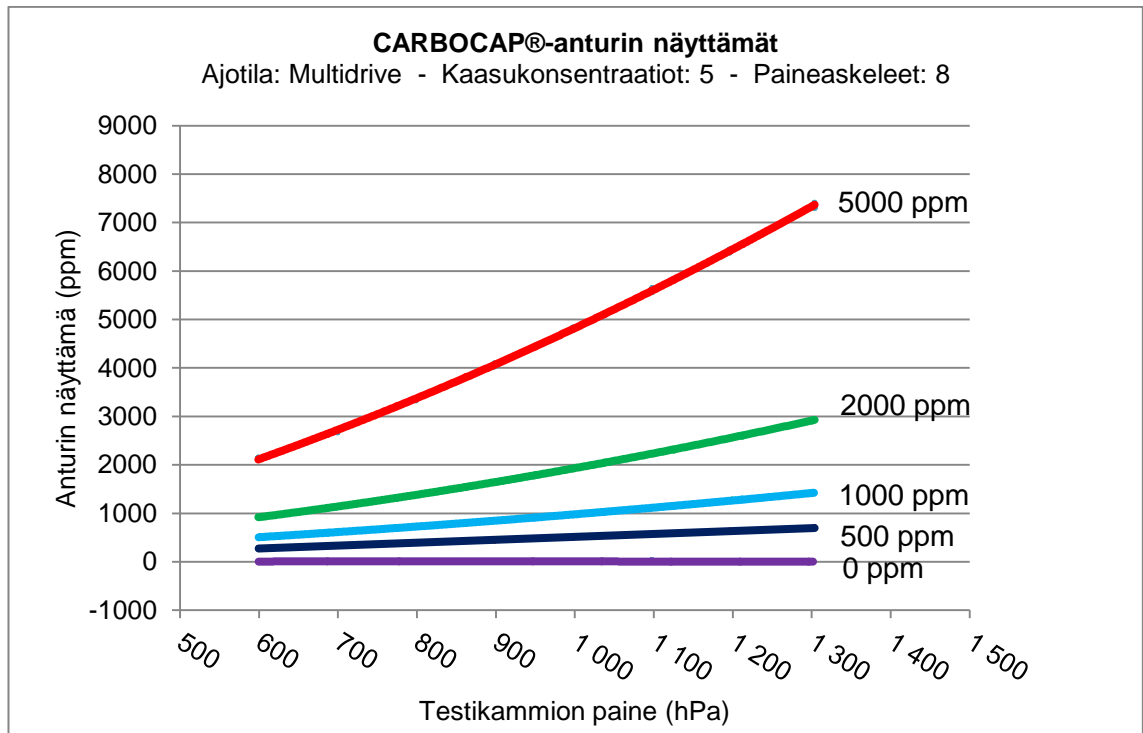
Kuva 26 (ks. seur. s.) esittää vastaavasti testattavalta anturilta luettua näyttämää painetestiajon aikana. Kuvasta nähdään, että ensimmäistä testikaasua eli typpeä ajettaessa testikammiossa ei ollut hiilidioksidimolekyylejä, joten anturi näytti nolaa painetasosta riippumatta. Kun testikammioon syötettiin ensimmäinen hiilidioksidipitoisuus, nähdään kuinka testikammion paineen kasvaessa myös hiilidioksidimolekyylien määrä kammiossa kasvoi ja anturin näyttämä nousi. Vastaavasti paineen laskiessa hiilidioksidimolekyylien määrä väheni ja näyttämä seurasi perässä, vaikka testikammioon syötetty kaasukonsentraatio pysyi koko ajan vakiona.



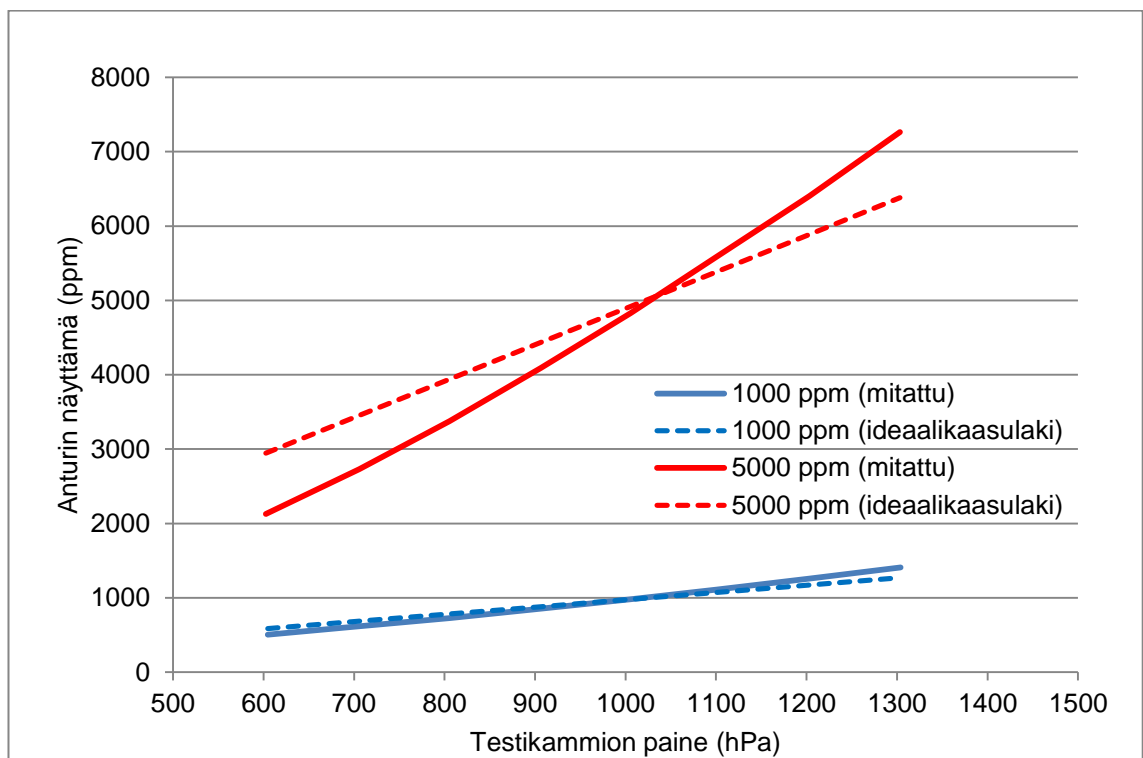
Kuva 26. CARBOCAP®-anturin kompensoimattomat näyttämät painetestiajon aikana

Kuva 27 (ks. seur. s.) esittää hiilidioksidianturin paineriippuvuutta eli testiajossa havaittua muutosta testattujen hiilidioksidiantureiden näyttämässä paineen funktiona. Kuvista 26 ja 27 nähdään, että paineriippuvuus on vähäisintä pienissä hiilidioksidipitoisuuksissa ja voimistuu huomattavasti hiilidioksidipitoisuuden kasvaessa. Paineriippuvuus ei myöskään todellisuudessa ole täysin lineaarista.

Kuva 28 (ks. seur. s.) esittää CARBOCAP®-anturin näyttämät 1 000 ppm ja 5 000 ppm hiilidioksidipitoisuuksissa paineen funktiona. Kuvaan on lisäksi piirretty katkoviivalla ideaalikaasulain avulla määritetyt teoreettiset näyttämät painetestiajossa rekisteröidyillä paine- ja lämpötila-arvoilla. Kuvasta nähdään, että ideaalikaasulaki vastaa melko hyvin todellisuutta pienissä hiilidioksidipitoisuuksissa, mutta suurissa hiilidioksidipitoisuuksissa ero todellisen mittaustuloksen ja ideaalikaasulain välillä kasvaa. Tämä johtuu muun muassa anturin epälinearisuuksista sekä muista fysikaalisista tekijöistä, joita ideaalikaasumallissa ei oteta huomioon (ks. 2.2 Ideaalikaasulaki). Testi osoittaa sen, että jos anturin näyttämien kompensointi suoritetaan pelkän ideaalikaasulain avulla, syntyy lopulliseen mittaustulokseen virhettä, jonka suuruus riippuu hiilidioksidikonsentraatiosta.



Kuva 27. CARBOCAP®-anturin kompensoimattomat näyttämät paineen funktiona painetestiajon aikana

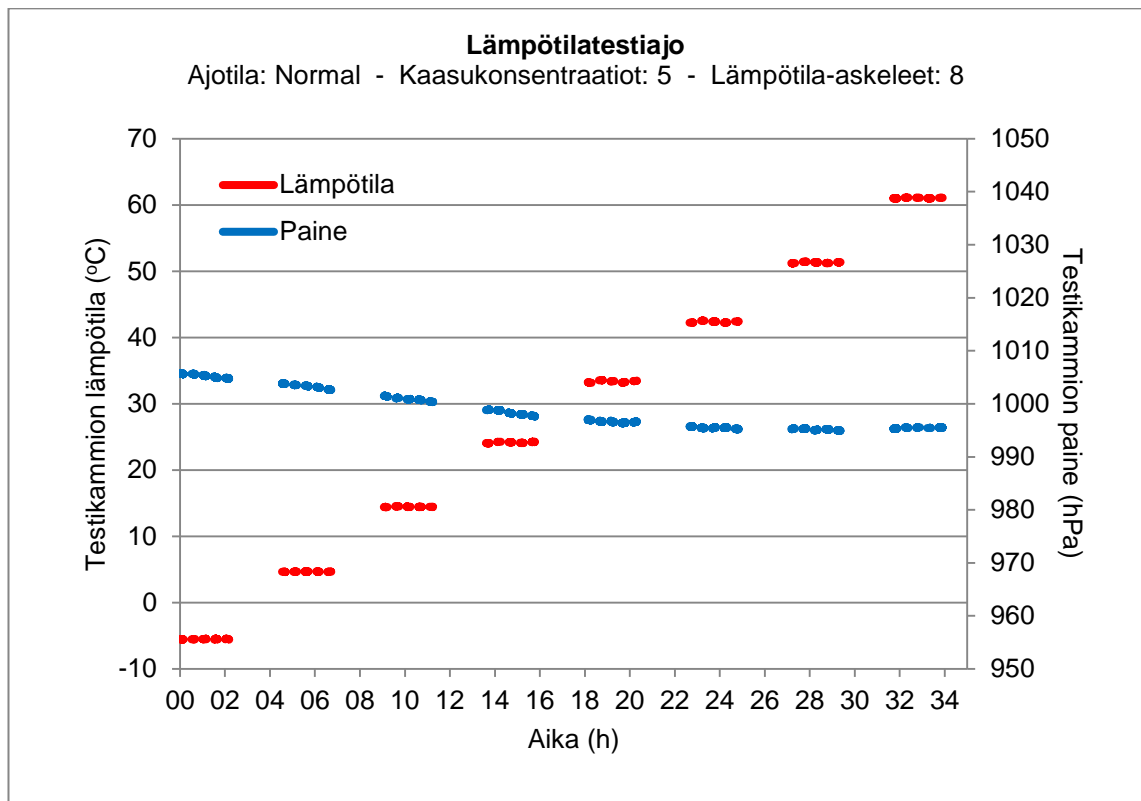


Kuva 28. CARBOCAP®-anturin kompensoimattomat näyttämät paineen funktiona kahdessa eri hiilidioksidipitoisuudessa painetestiajon aikana. Kuvaaajaan on lisäksi piirretty vertailun vuoksi mittausdataa vastaavat teoreettiset ideaalikaasulain mukaiset näyttämät

7.3 Automaattinen lämpötilatestiajo

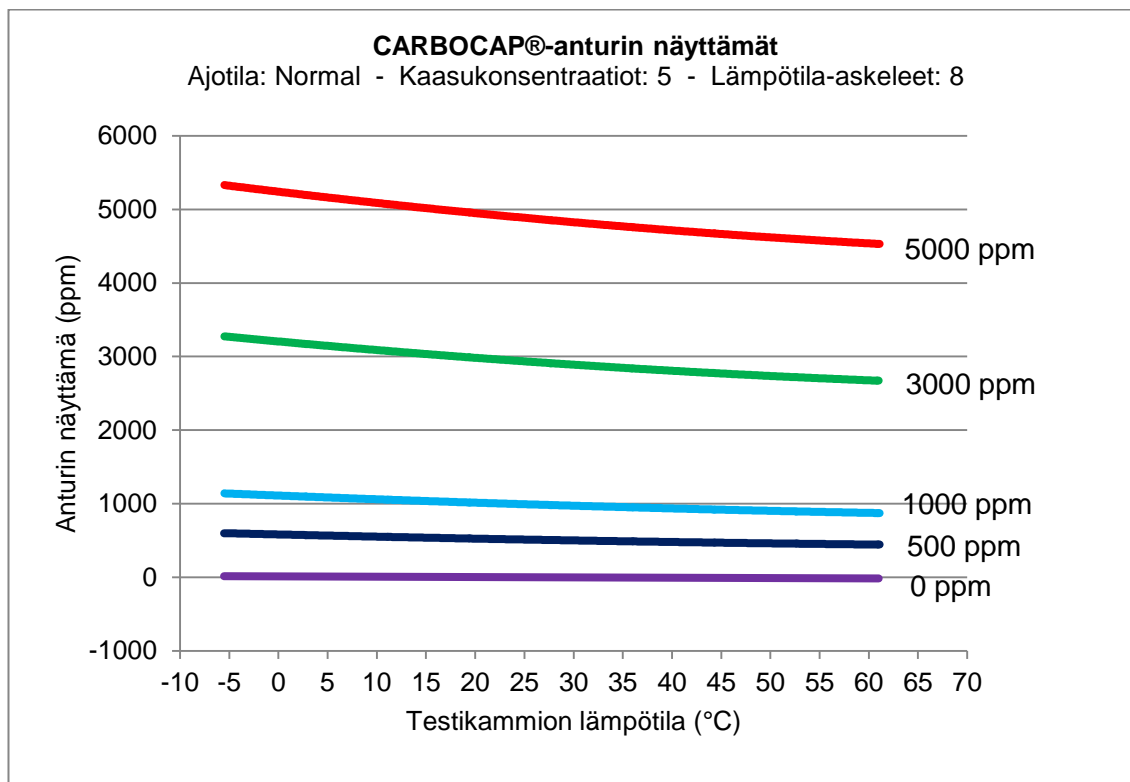
Seuraavaksi testiaseman testausta jatkettiin ajamalla automaattinen täysimittainen lämpötilatestiajo hiilidioksidiantureille, jossa testiasemaan kytkettiin viisi testikaasua, joiden hiilidioksidipitoisuudet olivat 0 (N₂), 500, 1 000, 3 000 ja 5 000 ppm ja ilmoitettu mittausepävarmuus 0,5 %. Aseman lämpötilaparametrit asetettiin siten, että olosuhde-testikaappi ohjattiin kahdeksaan eri lämpötilaan kymmenen asteen välein alkaen lämpötilasta -10 °C ja päättyen lämpötilaan +60 °C. Jokaisessa lämpötilapisteessä testiasema ajoi kytketyt testikaasut läpi ja talletti antureiden näyttämät tiedostoihin. Asetetuilla testiparametreilla testiajon kesto tuli kokonaisuudessaan noin 34 tuntia.

Kuvassa 29 esitetään testikammion lämpötila- sekä painelukemat testiajon aikana. Muutokset testikammion paineessa johtuvat normaalista ilmanpaineen vaihtelusta testiympäristössä, minkä vaikutus anturin näyttämiin on mahdollista poistaa painetestiajon mittausdatan perusteella kehitettävissä olevalla painekompensointialgoritmilla tai vastaavasti hieman epätarkemmin ideaalikaasumallin avulla.



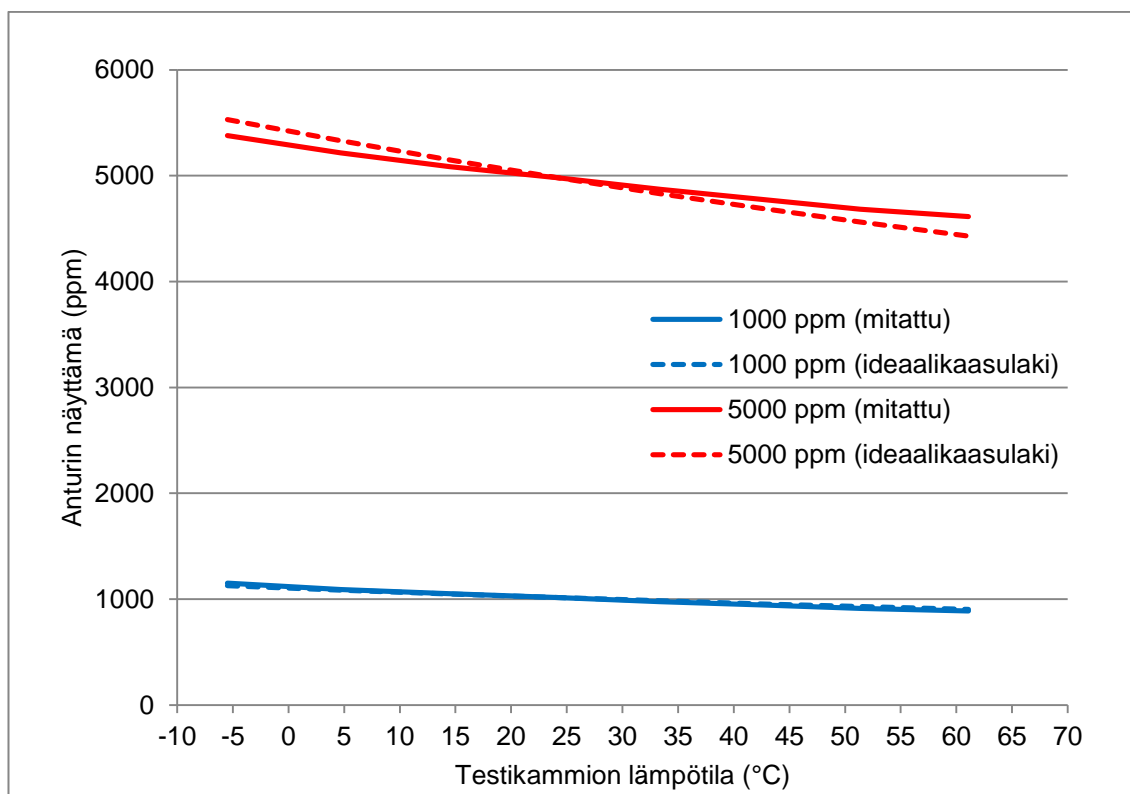
Kuva 29. Testikammion paine- ja lämpötilalukemat lämpötilatestiajon aikana

Kuva 30 esittää hiilidioksidianturin näyttämän lämpötilariippuvuutta lämpötilatestiajon aikana. Kuvaajasta nähdään, että lämpötilariippuvuus on huomattavasti vähäisempää paineriippuvuuteen verrattuna. Lämpötilariippuvuus on myös paineriippuvuuden lailla kaasukonsentraatiosta riippuvaa ja voimistuu hiilidioksidipitoisuuden kasvaessa.



Kuva 30. CARBOCAP®-anturin kompensoimattomat näyttämät lämpötilan funktiona lämpötilatestiajon aikana

Kuvassa 31 esitetään CARBOCAP®-anturilta luetut ideaalikaasumallin avulla painekompensoidut näyttämät lämpötilatestiajon aikana hiilidioksidipitoisuuksissa 1 000 ppm ja 5 000 ppm. Samaan kuvaan on myös merkitty vertailun vuoksi katkoviivalla lämpötilatestiajon paine- ja lämpötilatietojen avulla lasketut ideaalikaasulain mukaiset teoreettiset näyttämät. Kuvasta nähdään, että ideaalikaasulain mukainen lämpötilariippuvuus on melko lähellä todellista lämpötilariippuvuutta, vaikka paineriippuvuuden lailla virhe mitattuihin näyttämiin kasvaa suuremmissa hiilidioksidipitoisuuksissa.



Kuva 31. CARBOCAP®-anturin painekompensoidut näyttämät lämpötilan funktiona kahdessa eri hiilidioksidipitoisuudessa lämpötilatestiajon aikana. Kuvaajaan on lisäksi piirretty vertailun vuoksi mittausdataa vastaavat teoreettiset ideaalikaasulain mukaiset näyttämät.

Insinööriyössä ei kuitenkaan ollut tarkoituksena kehittää antureille kompensointialgoritmeja. Esimerkkien avulla oli ainoastaan tarkoitus havainnollistaa, kuinka teoreettisen ideaalikaasulain mukaista paine- ja lämpötilakompensointimallia käyttämällä ei päästä riittävän hyvään mittaustarkkuuteen olosuhteiden vaihdeltaessa. Testiaseman tarkoituksena olikin mahdollistaa luotettavien paine- ja lämpötilatestiajojen tekeminen, joiden tulosten perusteella antureille saadaan luotua huomattavasti ideaalikaasulakia tarkemmat ja todellisuutta vastaavat kompensointialgoritmit, jotka mahdollistavat anturin hyvän mittaustarkkuuden olosuhdemuutoksista riippumatta.

8 Yhteenveto

Insinööriyössä suunniteltiin ja toteutettiin hiilidioksidiantureiden lämpötila- ja painetestasema Vaisalan mikroanturituotekehityksen käyttöön. Testiaseman avulla voidaan suorittaa automaattisia ja manuaalisia paine- ja lämpötilatestiajoja sekä lisäksi myös muita hiilidioksidiantureille suoritettavia testejä.

Testiaseman ohjausohjelmiston graafisesta käyttöliittymästä hioutui selkeä ja helppokäyttöinen kokonaisuus, mistä aseman operaattorin on helppo seurata testiajon etenemistä ja testattavien antureiden näyttämiä sekä numeerisesti, että graafisesti esitettyinä. Testiajon lopuksi ohjelmisto tallentaa testiajossa kerätyn mittausdatan omaan testiajoa varten luotuun kansioon, mistä nähdään muun muassa testattujen antureiden sarjanumerot, jäsennelty mittausdata sekä valmiiksi erilliseen tiedostoon anturin parametreista lasketut keskiarvot. Tämä nopeuttaa ja helpottaa huomattavasti testitulosten jatkokäsittelyä.

Testiasema täytti kokonaisuudessaan sille asetetut tavoitteet ja odotukset. Asema suoriutui suunnitelluista testeistä luotettavasti ja onnistuneesti (ks. 7 Testitulokset). Lisäksi asema nopeuttaa huomattavasti testien suorittamiseen kuluvaan aikaan sekä vapauttaa testaukseen sidottuja henkilöstöresursseja muuhun käyttöön. Testiasemalla suoritettujen testien mittausdatan perusteella saadaan kehitettyä anturimallikohtaiset paine- ja lämpötilakompensointialgoritmit, jotka mahdollistavat antureiden hyvän mittauksen käyttöympäristön lämpötilan ja paineen vaihteluista huolimatta.

Lähteet

- 1 Vaisala CARBOCAP® Carbon Dioxide Sensors. 2009. Verkkodokumentti. <<http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/Measurement%20Theory/WhatIsCO2.pdf>>. Luettu 10.1.2013.
- 2 Carbon Dioxide. Verkkodokumentti. Wikipedia vapaa tietosanakirja. <http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide>. Päivitetty 20.1.2013. Luettu 24.1.2013.
- 3 Yhteyttäminen. Verkkodokumentti. Wikipedia vapaa tietosanakirja. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Yhteytt%C3%A4minen>>. Päivitetty 22.11.2012. Luettu 24.1.2013.
- 4 Hautala M. & Peltonen H. 2007. Insinöörin (AMK) fysiikka osa I. Lahti: Lahden Teho-Opetus Oy. Luettu 28.1.2013
- 5 Ideaalikaasu. Verkkodokumentti. Wikipedia vapaa tietosanakirja. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Ideaalikaasu>>. Päivitetty 30.12.2012 klo 14:42. Luettu 13.1.2013.
- 6 Seppänen, Kervinen, Parkkila, Karkela & Meriläinen. 2005. MAOL-taulukot. Helsinki: Otava. Luettu 24.1.2013.
- 7 Vaisalan sisäinen materiaali. Luettu 15.1.2013.
- 8 Festo CPV-SC Smart Cubic, kuva. Verkkodokumentti. <www.festo.com/CMS/fi_fi/catalog_search.htm?query=cpv-sc>. Luettu 16.10.2012.
- 9 Schwarzer Precision Performance diagram. Verkkodokumentti. <http://www.schwarzer.com/pics/prod/kurven/diagr_ec_730.gif>. Luettu 20.11.2012.
- 10 NI 9474 Sourcing Digital Output Module, kuva. Verkkodokumentti. <http://sine.ni.com/images/products/us/040729_crio9494_I.jpg>. Luettu 16.10.2012.
- 11 Kytola Instruments virtausmittarit kaasuille. Verkkodokumentti. <http://www.kytola.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=32&Itemid=60>. Luettu 15.1.2013.

- 12 Vaisala PTU300-Datasheet. Verkkodokumentti. 2012.
<<http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datasheets/PTU300-Datasheet-B210954EN-D-LoRes.pdf>>. Luettu 9.1.2013.
- 13 Vaisala PTB220-Datasheet. Verkkodokumentti. 2001.
<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/PTB220_User_Guide_in_English.pdf>. Luettu 9.1.2013.
- 14 National Instruments. 2004. LabVIEW Basics I: Introduction, Course Manual. Luettu 24.1.2012.