



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Mikko Marsch

Bentseeniselektiivisen henkilösuoja- analysointilaitteen muutostyö kaasukroma- tografista fotoionisaatioteknikaksi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

3.12.2019

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Mikko Marsch Bentseeniselektiivisen henkilösuoja-analysaattorin muutostyö kaasukromatografista fotoionisaatiodetektoriksi 38 sivua + 1 liite 3.12.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	Automaatiotekniikka
Ohjaajat	lehtori Markku Inkinen instrumenttityönjohtaja Janne Kumpulainen
<p>Opinnäytetyössä rakennettiin ilman bentseenipitoisuutta mittaava henkilösuoja-analysaattori. Laitteisto tulee Borealis Polymers Oy:n petrokemian laitoksen prosessialueelle valvomaan ilman puhtautta. Koska laitoksella käsitellään terveydelle vaarallisia aineita, tarvitaan kattava kaasujen haistelujärjestelmä varmistamaan työntekijöiden hengitysilman puhtaus. Analysaattori ottaa näyteilmaa prosessialueen kahdeksasta eri pisteestä. Laitteisto korvaa käyttökänsä päässä olevan kaasukromatografian. Tavoitteena oli valmistaa tuote, joka voidaan helposti kopioida myös muihin vastaaviin kohteisiin. Tuotteen käyttökulut ja hinta ovat merkittävästi edeltäjää pienemmät.</p> <p>Laitteiston perustaksi valittiin PID-tekniikkaan pohjautuva ilman bentseenipitoisuutta mittaava analysaattori. Analysaattori muunnettiin monipistemittaukseen kykeneväksi, suunnitteleamalla ja rakentamalla näyteilman ohjaus prosessialueen eri pisteistä analysaattorille. Näyteilma siirretään prosessialueelta näyteventtiileille ohuita putkia pitkin alipaineen avulla.</p> <p>Näyteventtiileitä ohjaamaan valittiin teollisuus-PC, joka toimii ohjelmoitavana logiikkana (PLC). PID-analysaattorin ja PLC:n välillä tietoa välittää Modbus-väylä. PLC ohjelmoitiin siten, että se lukee PID-analysaattorin mittaussyklin tilaa väylän kautta ja ajoittaa näyteventtiilien toiminnan sen avulla. Teollisuus-PC:hen liitettiin myös HMI-paneeli, josta laitteen keskeisiä toimintoja voidaan ohjata ja lukea tietoja. PLC lähettää tiedon mittaustuloksesta ja mahdollisesta hälytysrajan ylityksestä laitoksen automaatiojärjestelmälle.</p> <p>Koko laitteisto rakennettiin yhteen kojekaappiin, prosessialueen ilmaputkia lukuun ottamatta. Laite testattiin testikaasun avulla. Testien mukaan valmis tuote toimii odotetusti, ja se voidaan ottaa käyttöön. Tämä opinnäytetyö kattaa työvaiheet suunnittelusta FAT-testaukseen.</p>	
Avainsanat	henkilösuoja-analysaattori, PLC, Modbus

Author Title Number of Pages Date	Mikko Marsch A Modification of a PID Benzene Gas Analyzer To a Multipoint Measurement 38 pages + 1 appendix 3 July 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Automation Engineering
Instructors	Markku Inkinen, Senior Lecturer Janne Kumpulainen, Supervisor
<p>This thesis study was commissioned by Borealis Polymers. A benzene gas analyzer for the measurement of ambient air was constructed. The equipment will be monitoring toxicity of ambient air in the process area of the petrochemical plant. It replaces an old gas chromatograph which is nearing end of life.</p> <p>The analyzer is based on a PID technology. The analyzer was converted to multipoint measurement device by constructing air sampling control from different points in the process area. The sample air is transferred from the process area to the sample valves via thin tubes by low pressure. The valves are taking a sample of the air to the analyzer from one tube at the time</p> <p>The sample valves are controlled by a programmable logic controller (PLC). Data is transmitted between the analyzer and the PLC via the Modbus bus. The PLC reads the analyzer measurement cycle status through the bus and uses it in timing the operation of the sample valves. The hardware also includes an HMI panel that is used to control and read the key functions of the device. The PLC sends information of the measurement results and possible exceedance of the alarm limit to the automation system of the plant.</p> <p>The entire equipment was built in one instrument cabinet, except for the air tubes in the process area. The goal was to design a single piece of equipment into a product that is easy to replicate for other similar applications. This thesis contains the steps from the design to the factory acceptance testing. All tests were passed successfully.</p>	
Keywords	toxic gas analyzer, Modbus, PLC

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kaasukromatografi	2
3	Fotoionisaatiodekettori	4
4	Komponentit ja niiden ominaisuudet	8
4.1	Sulautettu teollisuus-PC ja käyttöliittymä	10
4.2	Magneettiventtiilit	10
4.2.1	Venttiilien valinta	10
4.2.2	Virtaushäviöt	12
4.2.3	Virtaushäviön laskeminen numeerisesti iteroimalla	13
4.2.4	Välinpuolitusmenetelmä	16
4.3	Ilmakanavan tuulettuminen ennen seuraavaa näytettä	17
4.4	Modbus-protokolla	19
5	Laitteiston asentaminen ja testaus	23
5.1	Perusasetukset ja ohjelmoinnin aloittaminen	23
5.2	Modbus-yhteyden luominen	23
5.3	HMI	28
5.4	Laitteiston asennus kojekaappiin	31
5.5	Kokeet testikaasulla	33
6	Yhteenveto	34
	Lähteet	36
	Liitteet:	
Liite 1	Kytkentäkaaviot	

Lyhenteet

ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange.</i> Eräs tapa määritellä merkkien koodaus bitteinä.
DCS	<i>Distributed Control System.</i> Hajautettu automaatiojärjestelmä.
FID	<i>Flame Ionization Detector.</i> Liekkidetektor.
HMI	<i>Human Machine Interface.</i> Käyttöliittymä.
PID	<i>Photo-Ionization Detector.</i> UV-valolla ionisoiva kaasuilmaisim.
PLC	<i>Programmable Logic Controller.</i> Ohjelmoitava logiikkaohjain.
ppb	<i>Parts Per Billion.</i> Miljardisosa, tilavuuden ja moolien suhteen tässä opin- näytetyössä.
ppm	<i>Parts Per Million.</i> Miljoonasosa, tilavuuden ja moolien suhteen tässä opin- näytetyössä.
RTU	<i>Remote Terminal Unit.</i> Toinen tapa määritellä merkistön koodaus bitteinä.
VOC	<i>Volatile organic compound.</i> Haihtuvat orgaaniset yhdisteet.

1 Johdanto

Työn tarkoituksena on korvata käyttöikänsä päässä oleva henkilösuoja-analysaattori uudella. Analysaattori mittaa Borealiksen petrokemian laitoksen prosessialueen ilman bentseenipitoisuutta.

Bentseeniä syntyy sivutuotteena, kun se erotetaan öljyn jalostuksessa mm. polttoaineksi tarkoitettusta bensiinistä. Se on myös sivutuote eteenin, butadieenin ja propeenin tuotannosta, kun näitä krakataan erilaisista neste- ja kaasujakeista. Eteeniä ja propeenit tarvitaan muovitehtaalla polyeteenin ja polypropeenin tuotannossa. Borealiksen bentseeniyksikkö erottaa bentseeniä Nesteen polttoaineen tuotannosta ja Borealiksen oman eteenin, propeenin ja butadieenin krakkerin välituotteesta. Bentseenilaitos palauttaa puhdistetun tuotteen paluuvirroissa ja bentseeni ohjataan raaka-aineksi Borealiksen fenolin ja asetonin tuotantoon.

Bentseeni on karsinogeeninen aine, jolle altistuminen saattaa aiheuttaa pitkäaikaista terveydellistä vaaraa. Koska Borealiksen petrokemian laitoksilla käsitellään välituotteena bentseeniä, on aina vaarana, että sitä päätyy hengitysilmaan vuotojen yms. seurauksena. Siksi tarvitaan automaattista hengitysilman laadun valvontaa. Tämän työn bentseeniä ilmaiseva analysaattori on osa tätä valvontaa. Eri puolille laitosta on sijoitettu ohuita putkia, joista johdetaan ilmanäytteitä analysaattorille. Jos jossakin näytevirrassa esiintyy bentseeniä merkittäviä määriä, analysaattori antaa hälytyksen laitoksen DCS-järjestelmään.

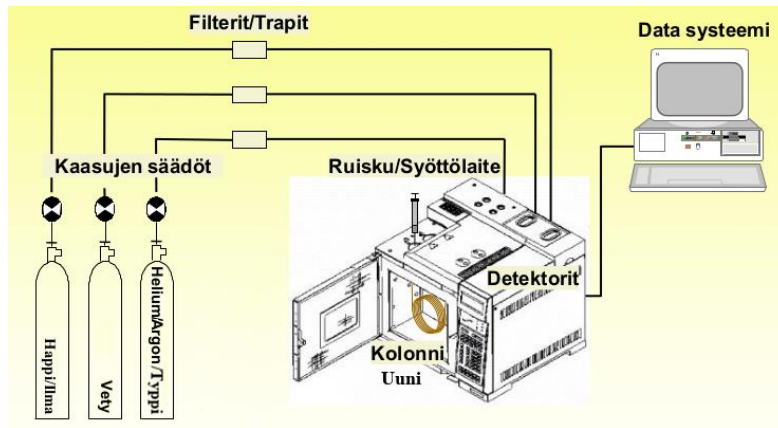
Työturvallisuuslaissa on määritelty raja-arvo ilman bentseenipitoisuudelle, jonka alle menevien pitoisuuksien ei katsota aiheuttavan merkittävää terveydellistä vaaraa. Nykyisin voimassa oleva raja-arvo on 1 ppm, korkeintaan 8 tunnin päivittäisen altistuksen kohteissa [1, 21 §]. Koska Borealiksella työskennellään myös 12 tunnin vuoroissa, raja-arvo on 0,7 ppm. Raja-arvoon on tulossa muutos lähitulevaisuudessa, ja PID-perustainen laite on tarkempi pienillä pitoisuuksilla.

Vanhan kaasukromatografi vaatisi perusteellisen huollon toimintaiän jatkamiseksi. Hinta olisi noin 30 000 €. Uuden vastaavan hinta olisi noin 50 000 €. Laitteessa on myös melkoisesti käyttökuluja: määräaikaishuoltoja ja vaihtopulloina vetykaasua liekki-ilmaisimelle ja kantajakaasuksi typpeä. Tämän projektin budjetti materiaalikuluihin oli noin 30 000 €. Säännölliset käyttö ja huoltokustannukset ovat uudessa analysaattorissa kohtuullisella tasolla: puolen vuoden välein vaihdetaan aktiivihiihisiuodatin ja vettä hylkivä suodatin. Hinta yhteensä on 320 €. Vuoden välein vaihdetaan PID-lamppu ja suodattimet. Osat maksavat yhteensä noin 1700 €.

Uusi analysaattori perustuu PID-ilmaisimeen, ja lisäksi siinä on kaasujen erottelua varten suodatinpatruuna, jonka läpi eri kaasut kulkevat eri nopeudella. Analysaattori on ulkomitoiltaan pieni. Se mahtuu samaan laitekaappiin näytteenohjauslaitteiston kanssa. Se tarvitsee toimiakseen vain sähköä, kunhan jokin laitteisto huolehtii näyteilman toimittamisesta analysaattorille asti. Tässä työssä rakennetaan näyteilman ohjauksesta vastaava laitteisto ja käyttöliittymä. Laitteisto on tarkoitus saada testivaiheeseen tämän opinnäytetyön aikana. Laitteisto asennetaan analysaattorisuojaan ja liitetään laitoksen automaatiojärjestelmään sen jälkeen.

2 Kaasukromatografi

Kaasukromatografian hankintahinta ja käyttökustannukset ovat yleensä suuria. Syitä ovat esimerkiksi: kolonnit pitää sijoittaa tasalämpöiseen uuniin, näyte pitää kuljettaa sopivan inertin kantajakaasun (liikkuva faasi) avulla kolonnien läpi, ja mahdollinen liekki-ilmaisin vaatii vetykaasua toimiakseen. Vaihtopullot täytyy tilata kaasujen toimittajalta säännöllisesti. Laitteisto kuuluu vielä näyteventtiilit yms. Hyvänä puolena on hyvä kaasujen erottelukyky, jolloin muut hiilivedyt eivät vaikuta häiritsevästi mittaustulokseen. Kuvassa 1 näkyy kaasukromatografian periaatekaavio.



Kuva 1. Kaasukromatografian periaatekaavio [2].

Kaasukromatografi erottelee kaasuseoksen eri komponentit toisistaan, ja halutut komponentit voidaan mitata toisistaan riippumatta. Kaasun näyte ohjataan kantajakaasuvirtaan (liikkuva faasi), joka kulkee kolonnin läpi. Kolonni on yleensä pitkä ohut rullalle käärittynyt putki, jonka sisäpinnassa on ns. stationäärinen faasi. Näytekaasun komponentit vuorottain tiivistyvät ja haihtuvat stationäärisen faasin pinnasta. Eri kaasukomponenteilla on erilainen haihtumisnopeus ja tiivistymistäipumus stationäärisen faasin pintaan, joten eri komponentit kulkevat kolonnin läpi eri nopeudella. Kolonnin läpi kuljettuaan komponentit ovat erottuneet toisistaan, ja ne voidaan mitata yksi kerrallaan, ja niiden määrä voidaan analysoida ilmaisimella. Kolonnissa kiinteä faasi voi olla ohuena kerroksena putken reunaan (neste tai kiinteä aine), tai täyttää koko putken huokoisena täytteenä. Täytteen kolonnin retentioajassa on yleensä hieman enemmän hajontaa, koska huokoinen aine ei ole täysin homogeenista, ja kaasu voi kulkea useita eri reittejä. [2;3.]

Retentioaika

Kaasun kulkeutumisenopeus kolonnin sisällä riippuu kunkin kaasun ominaisuuksista. Kaasumolekyylien törmätessä kolonnin sisäpinnan kiinteään faasiin, ne vuorovaikuttavat kiinteään faasin kanssa ja keskenään. Esimerkiksi jos kiinteä faasi ja kaasumolekyylit, ovat poolisia, niiden välinen sähköinen vetovoima tehostaa tiivistymistä, ja se vaatii suuremman energian pinnasta irrotukseen. Molekyylit jatkaa matkaansa, kun lämpöliikkeen energia riittää vapauttamaan molekyylejä heikoista sähköisistä sidoksistaan. Lämpöenergia on jakautunut hiukkasille lämpötilasta riippuvan jakauman mukaisesti, ja vain

jakauman kynnysarvoa korkeammalla energialla varustetut hiukkaset pääsevät irtautumaan. Karkeasti voidaan sanoa, että helposti haihtuvat ja vähiten stationääriseen faasiin kanssa reagoivat komponentit kulkevat kolonnissa nopeammin. Suurempi lämpötila nopeuttaa mittauksen vasteaikaa, mutta heikentää erottelua. Lämpötilan on oltava vakaa, jotta komponentit voidaan erotella oikein. Siksi kolonni on sijoitettu tarkasti säädeltyyn uuniin. [2;3, s 402–404.]

Liekki-ionisaattori

Erottelun jälkeen tarvitaan ilmaisimien. Kaasukromatografian ilmaisimien voi olla esimerkiksi PID (ks. seuraava luku) tai liekki-ionisaattori FID (Flame Ionization Detector). Tämän työn käytöstä poistuva kaasukromatografi käyttää liekki-ionisaattoria. FID:in toimintaperiaate on samankaltainen kuin PID:ssä, mutta näytteen kaasun ionisointiin käytetään liekkiä UV-valon sijaan. Liekin polttoaineena käytetään yleensä vetyä. Hiilivedyt reagoivat liekissä. Reaktiot tapahtuvat liekin suurenergisten molekyylien ja atomien törmäysten edesauttaessa kemiallisia reaktioita, mm. virittämällä molekyyliä. Hapen yhdistyessä jokaisen hiilijonon hiilivetyketjun osan kanssa, syntyy ioneja. Tavoiteltu pääreaktio on $\text{CH} + \text{O} \rightarrow \text{CHO}^+ + \text{e}^-$. Liekissä on muitakin ionisaatiota aiheuttavia reaktioita. Reaktiossa vapautuva energia riittää ionisoimaan kunkin syntyneen molekyylin. Ilmaisimen vaste riippuu tällöin lähinnä näytteen hiiliatomien määrästä, eli melko tarkkaan näytteen hiilivetyjen massavirrasta. Ionien määrä ionisointikammiossa mitataan kuten PID:ssäkin, eli kamion eri puolilla sijaitsevien elektrodien välille syntyvän virran mittauksella. [2, 3, s. 406–407.]

3 Fotoionisaatiodetektor

PID (Photo-Ionization Detector), eli fotoionisaatiodetektor on herkkä ja kohtuuhintainen menetelmä haihtuvien hiilivetyjen (VOC = Volatile Organic Compound) pitoisuuksien mittaamiseen. Niitä on käytössä monissa eri sovelluksissa. Tehtaissa voidaan mitata työkentelytilan VOC-pitoisuuksia, prosessiteollisuudessa voidaan etsiä vuotoja kannettavilla mittareilla, tai määritetään kotien huoneilman laatua. Tämän työn analysaattori on hieman kannettavia laitteita suurempi ja sisältää enemmän tekniikkaa kuin pelkän PID-

ilmaisimen. Laite sisältää mm. kaasujen erottelun ja siihen liittyvän näytteen analyysisyklin kiertoon liittyvän laitteiston. Siihen kuuluu pumppuja, lämmitys erottelusuodatinta varten, muutama erilainen suodatin ja niin edelleen. Kuitenkin laite on hankintahinnaltaan ja kooltaan merkittävästi pienempi kuin väistävä kaasukromatografi. Menetelmä on myös käyttökustannuksiltaan halpa, koska säännöllisesti vaihdettavina osina ovat lähinnä lamppu ja suodattimet.

Fotoionisaatiodektoressa käytetään UV-lamppua, joka ionisoi näyteilman mukana olevat hiilivedyt. UV-säteilyn taajuus on valittu riittävän matalaksi, jotta se ei riitä ionisoimaan ilman tavanomaisia komponentteja, kuten happea, tyyppiä hiilidioksidia, ja vettä. UV-lampulla valaistussa mittauskammiossa näyte ionisoituu, ja hiilivetyjen määrä mitataan ionisoituneen kaasun määrästä. Menetelmän yksi hyvä puoli on herkkyys. Se kykenee ppm- ja jotkut mittarit jopa ppb-luokan mittauksiin. Vaste on lineaarinen laajalla pitoisuusalueella yksittäisten hiilivetykomponenttien tapauksessa. Huonona puolena on se, että tuloksesta ei suoraan erotu, mistä hiilivedystä tai hiilivedyistä on kyse ilman lisäjärjestelyjä, kuten tässä työssä käytetyn analysaattorin suodatinpatruunaa. [3, s. 407–408; 4, s. 4–25.]

UV-lamppu

UV-lampun toiminta perustuu lampun sisällä olevan kaasun atomien/molekyylien virittämiseen. Viritystilän purkautuessa atomi/molekyyli emittoi fotonin. Emittoituneiden fotonien energiat riippuvat täytekaasulle ominaisista energiatasoista. UV-säteilyyn riittävät viritysenenergiat saavutetaan yleensä jalokaasuilla, joilla uloimmat elektronit ovat saavuttaneet täyden oktetin, jolloin elektronit ovat syvällä potentiaalikuopassa [5, s. 123]. Toisaalta inertteinä kaasuina ne sopivat täytekaasuksi, koska ne eivät aiheuta reaktioita lampun materiaaleille.

Sopivat UV-fotonien energiat riippuvat siitä, mitä hiilivetyjä on tarkoitus mitata. Eri tarkoituksiin on olemassa eri täytekaasuilla täytettyjä UV-lamppuja. Kaikilla atomeilla ja molekyyleillä on lukuisia erilaisia energiatasoja. Tavoiteltu täytekaasun säteily syntyy ensimmäisen viritystilän purkautuessa ja atomin palatessa perustilaan. Kokonaan ionisoitunut atomi voi emittoida ensin pienienergisien fotonin, päätyen ensimmäiseen viritystilaan, jolloin lamppu voi emittoida myös näkyvää valoa tai infrapunavaloa ennen UV-säteilyä.

Suurin emissiopiikki on ensimmäisen viritystilan purkautumisesta syntyvä. Sähkökentässä liikkuvat ionit virittävät ympäröivää kaasua törmäyksissä ja ionisoivat täytekaasua lisää. [5, s. 121–128.]

Perusviritystilakin ovat jakautuneet useampiin tasoihin mm. spin-vuorovaikutusten vuoksi (hienorakenne ja ylihienorakenne), ja siten UV-lamppu säteilee myös fotoneja, joilla on hieman ylimmästä energiasta poikkeavia energioita [5, s.121–128; 4, s. 7–8]. Lamppujen teknisissä tiedoissa ilmoitetaan yleensä suurin perustilan ja ensimmäisen viritystilan energian muutos, jonka lampun kaasu emittoi UV-fotoneina. [4, s. 7].

Tavallinen lasi ei läpäise hyvin UV-säteilyä, joten lampun ikkuna pitää valita sopivaksi käytetyn täytekaasun mukaan. Taulukossa 1 on esimerkkejä eri täytekaasuista, lampun säteilyikkunamateriaaleista ja lampun emittoimien fotonien energioista.

Taulukko 1. UV-lamppujen erilaisia täytekaasuja ja säteilyikkunoita [4, s. 7].

Fotonien energiat [eV]	Täytekaasu	Suurimmat emissioviivat [eV/nm]	Suhteellinen intensiteetti	Säteilyikkunan materiaali	Ikkunan läpäisyalue [nm]
11,7–11,8	Ar	11,83/104,8	1000	LiF	105–5000
		11,62/106,7	500		
10,6	Kr	10,64/116,5	200	MgF ₂	115–7000
		10,03/123,6	650		
10,2	H ₂	10,2/121,6	1000	MgF ₂	
9,8–10,0	Kr	10,03/123,6	650	CaF ₂	125–8000
9,5–9,6	Xe	9,92/125	250	BaF ₂	135–9900
		9,57/129,6	1000		
		8,44/147	600		
9,5	O ₂	9,52/130,2	900	CaF ₂	
		9,5/130,5	600		
		9,49/130,6	300		
8,4	Xe	8,44/147	600	Al ₂ O ₃	145–4500
				SiO ₂	145–2300

Täytekaasun virittämiseen on useampia eri tapoja. Ensimmäinen tapa on luoda voimakas sähkökenttä tasajännitteellä lampun päädyissä olevilla elektrodeilla. Käynnistys tarvitsee suurehkon kV-luokan jännitteen. Satunnaiset ionit kiihtyvät sähkökentässä ja luovat samalla uusia ioneja. Ionien synnyttämisen jälkeen jännite lasketaan ylläpitotasolle noin 300 volttiin. Keskellä on reiällinen levy, joka rajoittaa ja ohjaa sopivasti ionisointia.

Sähkökentässä liikkuvat ionit virittävät ympäröivää täytekaasua. Vaikka täytekaasu on useimmiten jalokaasua, elektrodien korroosio laskee lampun käyttöikä. [4, s. 10–12.]

Toinen tapa on vastaavat elektrodit lampun molemmilla puolilla, mutta ilman reikälevyä ja vaihtojännitteellä. Elektrodit voidaan jättää lampun ulkopuolelle, jolloin ne eivät ole korroosiolle alttiina. Vaihtojännitteen taajuus on matala radiotaajuus, joka on yleensä niin alhainen, ettei se häiritse merkittävästi muita radiotaajuuksia käyttäviä laitteita. Ionit kulkevat sähkökentän mukaisesti edestakaisin, ylläpitäen ionisointia ja täytekaasun viritystä. Tämä lamppumalli sallii katkonaisen käytön energiansäästön nimissä (kannettavissa laitteissa). [4, s. 10–12.]

Kolmas keino on lampun ympärillä oleva käämitys, johon johdetaan radiotaajuinen vaihtovirta. Muuttuva magneettikenttä indusoi täytekaasuun muuttuvan sähkökentän. Tämä keino on melko energiatehokas. Käynnistysvaiheessa sähkökentän täytyy olla merkittävästi suurempi kuin lampun saavutettua stabiilin tilan. Käämin ollessa lampun ulkopuolella korroosio ei ole ongelmana. Käämi kuitenkin voi aiheuttaa häiriöitä muille lähistön sähkölaitteille. [4, s. 10–12.]

Näytteen ionisointi ja selektiivisyys

Näytevirta ohjataan UV-lampulla valaistuun kammioon. UV-valo ionisoi näytteen molekyylejä, jos fotonin energia riittää ionisoimaan sen. Lamppu ei ionisoi molekyylejä, jonka ionisointienergia on suurempi kuin UV-fotonin energia. Hiilivetyanalysaattoreissa käytetyt lamput eivät ionisoi esimerkiksi tavallisia ilmassa esiintyviä molekyylejä, mutta haihtuvien hiilivetyjen tapauksessa vaste riippuu valitusta lampputyypistä. Lamppuja on saatavilla 8,4–11,8 eV:n ionisoimisenergioilla (ks. taulukko 1 edellä). PID:in vaste on melko lineaarinen molekyyleiden määrälle, toisin kuin liekki-ilmaisimella (FID), jonka vaste on verrannollinen massavirtaan. PID-mittauksissa tulos ei kuitenkaan varsinaisesti erottele ionisoituneen hiilivedyn laatua, jos lamppu ionisoi useampia näytteessä esiintyviä kaasuja. Yksityiskohtaisempaan erittelyyn on muita mittaustapoja, esimerkiksi kaasukromatografi, jossa PID tosin voi olla ilmaisimena. [4, s. 13–15.]

Bentseenin ionisointiin riittäisi jo 9,8 eV:n lamppu, mutta tämän työn Titan-analysaattori käyttää 10,6 eV:n lamppua, luultavasti siksi, että tällä lampputyypillä on pisin käyttöaika

[4, s 8]. Erottelukykyä lisäämässä on suodatinpatruuna, jonka läpikulkuaika on erilainen eri hiilivedylle. Bentseeni erottuu näytteestä, kun mittaus otetaan bentseenille ominaisen läpikulkuajan kohdalta [6, s. 13]. Periaate on vastaava kuin kaasukromatografissa, jossa kolonni erottelee kaasut myös läpikulkuajan mukaan. Suodatin toimii luultavasti kuten huokoisella kiinteällä faasilla toimiva kolonni (ks. Retentioaika).

Ionisoituneiden molekyylien määrä mitataan ionisointikammion reunoille asetettujen elektrodien avulla. Elektrodeissa on korkea jännite, ja ionit aiheuttavat sähkövirran näiden välille liikkeessaan sähkökentässä. Virta on sama myös elektrodien virtapiirissä, ja suuruus on kammion ionimäärään verrannollinen. Vaste riippuu ionisoitavasta aineesta, ja ainekohtaisia korjauskertoimia käytetään oikean tuloksen saamiseksi [3;4.]

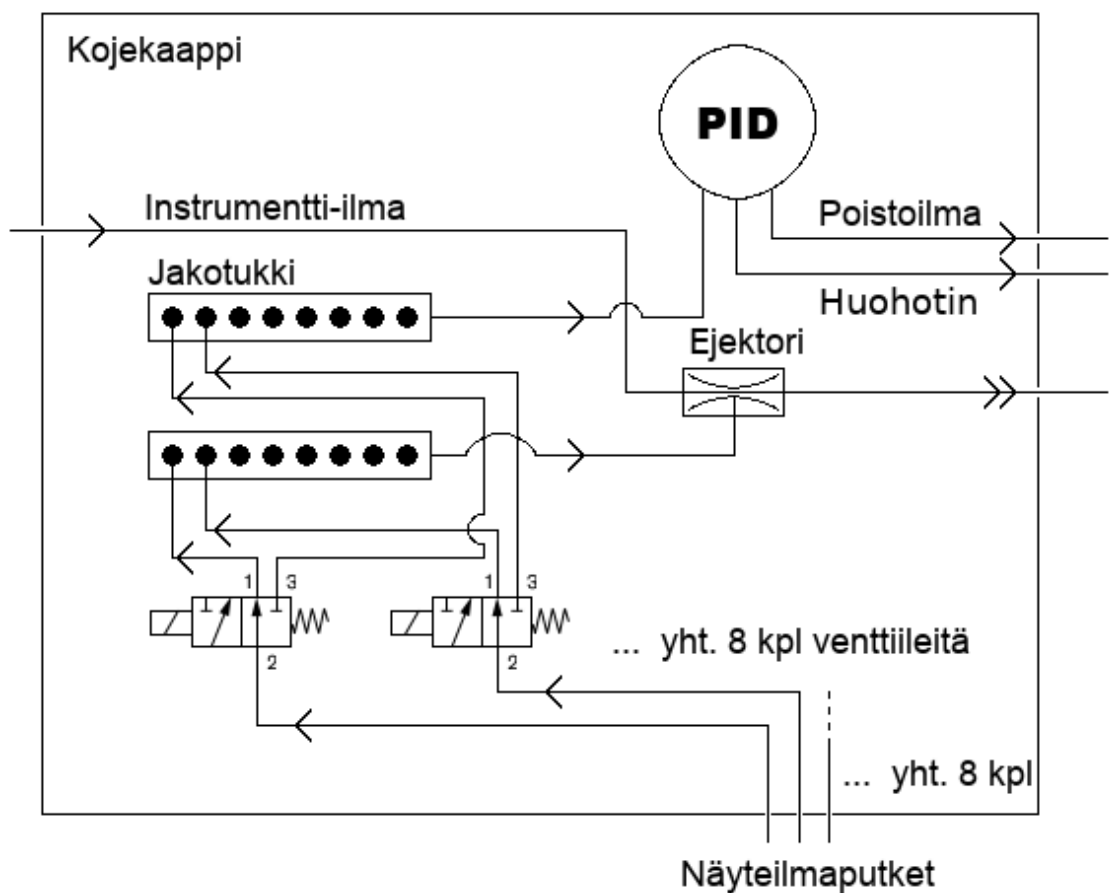
4 Komponentit ja niiden ominaisuudet

Analysaattori ja näytevirtojen ohjaukseen tarkoitettu laitteisto sijoitetaan samaan koje-kaappiin. Kaappi sijaitsee ATEX-alueella. Alueen luokitus on Zone 2, johon sijoitettavilta laitteilta vaaditaan EU-direktiivin mukaan vähintään EX II 3G-luokitus [7]. Luokitus II tarkoittaa laiteryhmiä, ja ryhmään kuuluu kolme eri luokkaa sekä kaasuseoksia että pölyräjähdysuojatuille laitteille. Luokat 1G, 2G ja 3G kuuluvat alueille, jossa voi esiintyä räjähtäviä kaasuseoksia. Vastaavasti luokat 1D, 2D ja 3D kuuluvat alueille, jossa voi esiintyä räjähtäviä pölyseoksia. 1G-luokan laitteet on tarkoitettu tilaan, jossa räjähdyskaasuseoksia on jatkuvasti, toistuvasti tai pitkiä aikoja. 2G-luokan laitteet on tarkoitettu tilaan, jossa räjähdyskelpoisia kaasuseoksia ilmenee todennäköisesti satunnaisesti normaalikäytössä. 3G-luokan laitteet alueelle, jossa räjähdyskelpoisten kaasuseosten esiintyminen on epätodennäköistä, epäsäännöllistä ja lyhytaikaista. [7.]

Borealoksen omien standardien mukaan tilaan vaaditaan korkeampi 2G-luokitus, mutta tämän laitteiston tapauksessa saatiin lupa 3G-laitteille sillä ehdolla, että kojekaappiin tulee ilmapursotus. Pursotusvahti säätelee kaapin sisäistä painetta paineanturin ja venttiilin avulla, ja katkaisee tarvittaessa sähkön syötön, jos paineistus ei toimi. Mahdolliset räjähdyskelpoiset kaasut vaihtuvat hallitun päästön avulla. Paineistukseen käytetään

instrumentti-ilmaa. Kojekaapin laitteita ovat analysaattori, näyttöpaneeli, sulautettu teollisuus-PC ja magneettiventtiilit. Tässä työssä käytetään nimityksiä PC ja PLC rinnakkain, koska käyttötapa on sama.

Kuvassa 2 on näyteilman ohjauksen periaate pneumatiikkakaaviona. Ejektori imee ilmaa jatkuvasti prosessialueen eri pisteisiin sijoitetuista näyteilmaputkista jakotukin kautta. Näin mittapisteiden näyteilma saadaan kojekaappiin asti. Magneettiventtiileistä yksi kerrallaan vetää, jolloin analysaattorin oma pumppu pääsee imemään näyteilmaa analysoitavaksi toisen jakotukin kautta.



Kuva 2. Näyteilman ohjauksen pneumatiikkakaavio.

Analyysisykli kestää minuutin, eli se antaa analyysistä tuloksen minuutin välein. Logiikkaohjaus saa herätteen magneettiventtiilien ohjaukseen Modbus-väylän kautta. Logiikka sulkee auki olevan venttiilin ja avaa seuraavan, kun analyysisykli on valmis. Jos analyysin tulos ylittää hälytysrajan, logiikka lähettää hälytyksen laitoksen DCS-järjestelmään.

Jokaisella mittapisteellä on oma kanava hälytykselle, jolloin ohjaamossa heti nähdään mistä mittapisteestä hälytys on peräisin.

4.1 Sulautettu teollisuus-PC ja käyttöliittymä

Hintavertailun ja ATEX-vaatimusten valossa venttiilien ohjaukseen ja käyttöliittymän luontiin valikoituivat Beckhoffin laitteet. 3G-luokitukseen asti oli saatavana melkein normaalihintaisia laitteita ja siten, että ei ollut pakko käyttää etä-I/O-moduulia. Näin laitteet saatiin asennettua yhteen kaappiin. I/O-korttien suhteen etuna oli se, että valikoimasta löytyi 0,5 A:iin asti toimivia 24 VDC:n digitaaliulostulo-kortteja, joilla voi ohjata suoraan magneettiventtiileitä. Tarjouksia kyseltiin myös muilta valmistajilta, mutta muuten sopivat ratkaisut eivät sopineet käytössä olevaan budjettiin tai eivät sopineet yhden kojekaapin ratkaisuun.

Beckhoffin sulautettu teollisuus-PC ohjaa venttiileitä ja HMI-paneelia. Se kysyy myös analysaattorilta tarvittavia tietoja Modbus-väylän kautta. Tietoja tarvitaan venttiilien ohjauksen ajoittamiseen analysaattorin toimintasyklin mukaisesti, hälytysten välittämiseen laitoksen DCS-järjestelmään ja toimintaan liittyvien tietojen keräämiseen mahdollista vika-analyysiä varten.

4.2 Magneettiventtiilit

4.2.1 Venttiilien valinta

Sovelluksessa venttiileille on asetettu vaatimuksia, jotka rajaavat sopivien vaihtoehtojen määrää merkittävästi. Yksi rajoittavimmista vaatimuksista on EX II 3G -tyyppihyväksyntä. Toinen on magneettiventtiilin itsenäinen toiminta ilman paineilma-avustusta eli ns. pilotiohjausta. Pilotti-ilman käyttö rajattiin pois siksi, että tiivisteiden mahdollisesti vikaantuessa instrumentti-ilmaa voi päästä näyteilman puolelle, jolloin mittaustulos voi häiriintyä. Henkilösuoja-analysaattorin tapauksessa se olisi turvallisuusriski. Toisaalta se tekisi laitteistosta monimutkaisemman. Itsenäisesti toimiva magneettiventtiili vaatii usein suuremman virran toimiakseen, koska kelan magneettinen voima on ainoa toimilaitteen voimanlähde. ATEX-tyyppihyväksyntä usein rajaa sähkölaitteiden virrankäyttömahdollisuuksia,

koska räjähdysvaarallisissa tiloissa hyväksytyt laitteet (virtalähteet, I/O kortit yms.) eivät saa tuottaa kipinöitä vikatilanteissakaan. Nämä vaatimukset ovat hieman ristiriidassa, jolloin sopivien vaihtoehtojen määrä on pieni.

Venttiilit on tarkoitus asentaa samaan laitekaappiin logiikkaohjauksen kanssa, jolloin pieni koko on eduksi. Venttiilit olisi hyvä myös saada asennuslevylle, jossa on vähintään yksi yhteinen kanava. Näin näytevirta saadaan mahdollisimman lyhyttä ja tilavuudeltaan pientä reittiä pitkin analysaattorille. Tällaiset venttiilit ovat tyypillisesti pieniä, varsinkin itsenäisinä ja pienitehoisina. Virtauskanavan koko on usein alle pari millimetriä halkaisijaltaan. Venttiili ei saa auki ollessaan kuristaa virtausta liian pieneksi. Pitkien näyteputkien vuoksi pieni virtaus tarkoittaisi hidasta näytteen perille saapumista. Aikaisemmin käytössä olleessa laitteistossa virtausnopeus on ollut 3–6 l/min, eikä sitä haluta merkittävästi muuttaa. Ennen sopivien vaihtoehtojen etsimistä piti selvittää, minkä kokoista aukon kokoa venttiililtä vaaditaan. Valmistajilla on usein tarkempiakin tietoja virtaushäviöistä, mutta niiden läpi käyminen vie paljon aikaa, koska venttiilejä on paljon, mutta sopivia hyvin vähän. Virtausaukon koko puolestaan ilmoitetaan yleensä jo mallien myyntilistoilla, ja se riittää sopivuusarvion tekemiseen.

Täsmällinen painehäviö riippuu venttiilin rakenteesta, mutta arvion voi laskea olettamalla venttiilin nimellisen aukon koon vastaavan putkessa oleva kuristuslaippa. Arvio on silloin hieman yläkanttiin, koska venttiilin sisäkanavien muotoilu ei ihan vastaa ohutta kuristuslaippaa. Suuruusluokaltaan arvio kuitenkin antaa tietoa siitä, pitääkö venttiilin virtaushäviöistä olla huolissaan.

Virtauslaskut eivät kuulu automaatioinsinöörin ydinosamisalueeseen, mutta tämä toimii esimerkkinä asioista, jotka ovat kuitenkin mahdollista opetella tarpeen vaatiessa. Tässä tapauksessa virtauslaskujen opettelu oli perusteltua sopivien vaihtoehtojen rajaamiseksi, ilman tarpeettoman suurta ylimitoitusta. Varsinaisen toimivan laskentakoodin luominen onnistui muutamassa tunnissa, vaikka tässä työssä tehdyt täsmällisemmät tarkastelut ottivat hieman lisää aikaa. Virtauslaskureitakin löytyy internetistä, mutta hieman tarkempi perehtyminen tukee soveltamisen varmuutta. Virtauslaskujen osaaminen voi olla hyödyksi myöhemminkin, jos työt prosessiteollisuuden parissa jatkuvat.

4.2.2 Virtaushäviöt

Virtausmittauksissa käytetään joskus kuristuslaippaa. Kuristuslaippa on putkilinjan sisälle asennettava levy, jolla virtaus pakotetaan kulkemaan halkaisijaltaan putkea pienemmästä reiästä. Levyn eri puolille muodostuu paine-ero. Paine-ero aiheutuu pääosin Bernoullin lain mukaisesta virtauksen nopeuden muutoksesta, mutta myös virtaushäviöistä, jotka aiheuttavat kokonaispainehäviöitä. Paine-eron laskemiseen käytetään teoreettisesti johdettuja yhtälöitä yhdessä kokeellisesti määritettyjen parametrien kanssa. Yhtälöistä on hieman eri muotoja riippuen siitä, miten yhtälöt ja kokeet on sovitettu toisiinsa. Suuruusluokka kuitenkin on näissä sama. Tässä työssä ei keskitytä näiden johdamiseen, mutta tarvittavat kaavat esitellään lyhyesti.

Kuristuslaipan läpi kulkevalle virtaukselle pätee [8, kappale 8.2]

$$Q = C_d Y A_o \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_1(1-\beta^4)}} \quad (1)$$

jossa C_d on purkauskerroin, Y on laajenemiskerroin, $\beta = \frac{d_o}{D}$ on reiän halkaisijan d_o ja putken halkaisijan D suhde, ρ on kaasun tiheys ja Δp on paine-ero levyn eri puolilla.

Neliöjuuren sisällä oleva lauseke yhtälössä (1) tulee suoraan Bernoullin laista, mutta kaasun kokoonpuristuvuus, lämpötilan muutos ja lämpökapasiteetti tuovat kertoimeksi laajenemiskertoimen Y . Purkauskanavan jälkeen nopean kaasun törmätessä hitaaseen syntyy energiahäviöitä viskositeetin vuoksi. Energiahäviöt tuovat mukaan yhtälöön (1) purkauskertoimen C_d . Kertoimet on määritetty fysiikan lakien ja kokeellisesti määritettyjen parametrien yhteistuloksena. Kertoimille on hieman erilaisia kaavoja, riippuen millä likiarvoilla ja oletuksilla ne on määritetty. Tässä työssä käytetään tuloksia, joita ovat esitelleet Holland ja Bragg [8] sekä Pistun ja Lesovoy [9].

Laajenemiskerroin Y voidaan laskea kaavalla [9]

$$Y = 0,993023 - (0,3507 + 0,0849\beta^4 + 1,8195\beta^8) \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta p}{p} \right)^{\frac{1}{k}} \right]$$

jossa p on paine ennen reikälevyä ja κ on kaasun adiabaattivakio. Kaksiatomiselle kaasulle adiabaattivakio on $7/5 = 1,4$, ja ilma koostuu pääosin kaksiatomisesta kaasusta (N_2 ja O_2) [10, s. 104].

Purkauserroin C_d voidaan laskea kaavalla [9]

$$C_d = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 \\ + 0,000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A)\beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0,3} \\ + (0,043 + 0,08e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1})(1 - 0,11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \\ - 0,31(M_2 - 0,8M_2^{1,3})\beta^{1,3} + M_3$$

jossa $A = \left(\frac{19000\beta}{Re} \right)^{0,8}$, $L_1 = L_2 = \frac{0,0254}{D}$, $M_2 = \frac{2L_2}{1-\beta}$, $Re = \frac{\rho Q D}{A_1 \mu}$

ja $M_3 = \begin{cases} 0, & \text{kun } D \geq 0,07112 \text{ m} \\ 0,011(0,75 - \beta) \left(2,8 - \frac{D}{0,0254} \right), & \text{kun } D < 0,07112 \text{ m} \end{cases}$

Reynoldsin luvussa Re ρ on ilman tiheys, Q virtaus, D putken halkaisija, A_1 putken pinta-ala ja μ ilman dynaaminen viskositeetti (vaihtelee lämpötilan mukaan). Kaava 1 koskee paine-eroa levyn eri puolilla, mutta painehäviö kokonaisuudessaan jää pienemmäksi. Paine kauempana virtauksen suuntaan on suurempi kapean virtaussuihkun tasoituttua koko putken alueelle. Kokonaispaine-ero Δp_{tot} noudattaa likimain kaavaa 2 kokoonpuristumattoman virtauksen tapauksessa [11, s. 67]:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p(1 - \beta^{1,9}) \quad (2)$$

Tässä se antaa suuntaa antavan tuloksen, kun paine-erot pysyvät pieninä.

4.2.3 Virtaushäviön laskeminen numeerisesti iteroimalla

Virtausta kuvaava yhtälö 1 on muotoa $Q = \phi(Q)$, koska Q esiintyy myös yhtälön oikealla puolella Reynoldsin luvussa. Q :n ratkaisu suljetussa muodossa on hankalaa, joten yhtälö

on käteväntä ratkaista numeerisesti. Iteroimalla ratkaisu löytyy melko pienellä laskentaajalla. Yhtälö on valmiiksi muodossa, joka on iteroituva. Tässä luvussa tarkastellaan tiivistettynä hieman iteroimisen periaatetta ja sen ehtoja. Yleisempää teoriaa iteroinnista löytyy esimerkiksi Arvion teoksesta [12]. Vastaavia tarkasteluja löytyy melko helposti muualtakin, ja tässä lähteisiin on viitattu määritelmien kohdalla.

Iterointi tapahtuu käyttämällä rekursiivista kaavaa, joka määrittelee lukujonon.

$$Q_{n+1} = f(Q_n), n \in \mathbb{N}_+ \quad (3)$$

Tarkastellaan seuraavaksi millä ehdoilla lukujono ja iterointi suppenee. Yleisesti lukujonon suppenemiselle pätee Cauchyn kriteeri [13, s. 27]:

$$\forall \epsilon > 0 \exists n_0 \text{ s. e. } |Q_n - Q_{n+p}| < \epsilon, \text{ kun } n > n_0 \text{ ja } p \in \mathbb{N}$$

Cauchyn kriteeri on melko väljä, eikä sovi käytännön suppenemistestiksi. Tarvitaan paremmin käytännön laskuihin soveltuvaa kriteeriä, joka voidaan johtaa Lipschitz-jatkuvuudesta.

Lipschitz-jatkuvuus välillä I on määritelty [14, s. 54]:

$$|f(Q_k) - f(Q_p)| \leq L|Q_k - Q_p| \quad \forall Q_k, Q_p \in I \quad (4)$$

Vaativalla $0 < L < 1$ saadaan ehto, joka tarkoittaa funktion argumenttien Q_k ja Q_p olevan lähempänä toisiaan kuin funktion arvojen samoissa pisteissä.

Sijoittamalla edelliseen yhtälö 3, helposti nähdään, että iterointikierrosten n kasvaessa lukujonon peräkkäisten termien erotus pienenee:

$$|f(Q_n) - f(Q_{n+1})| \leq L|Q_n - Q_{n+1}| = L|f(Q_{n-1}) - f(Q_n)|$$

Voidaan myös todeta, edellistä proseduuria jatkamalla, erotuksen lähestyvän nollaa iterointikierroksien kasvaessa:

$$|f(Q_n) - f(Q_{n+1})| \leq L|f(Q_{n-1}) - f(Q_n)| \leq \dots \leq L^{n-1}|f(Q_1) - f(Q_2)|$$

Edellä itseisarvon sisällä oleva lauseke on rajoitettu äärellisen alueen I ja oletetun funktion jatkuvuuden vuoksi. L^{n-1} lähestyy nollaa L :n ollessa alle 1. Tällöin myös koko lauseke lähestyy nollaa n arvojen kasvaessa.

Toisaalta nähdään myös, että suppeneminen tapahtuu kohti yhtälön 3 ratkaisua, koska

$$|Q_n - Q_{n+1}| = |Q_n - f(Q_n)|$$

Käytännön tapauksissa voidaan olettaa funktion f olevan derivoituva, joten voidaan iteroituvuudelle löytää laskemiseen sopiva kriteeri suppenemiselle:

Oletetaan edelleen $x, y \in I$, jolloin väliarvolause [14, s. 54] sanoo, että on olemassa piste $\xi \in I$, s.e.

$$|f(x) - f(y)| = |f'(\xi)||x - y|$$

Tämän ja yhtälön 4 perusteella nähdään, että $|f'(\xi)| \leq L$, joten funktion iteroituvuudelle on saatu riittävä (mutta ei välttämätön) ehto:

$$|f'(\xi)| \leq 1$$

Ehto ei vielä takaa riittävän nopeaa suppenemistä numeeriseen laskemiseen, mutta jos derivaatan itseisarvo $|f'(\xi)|$ on paljon ykköstä pienempi, iteroituminen on riittävän nopeaa tietokoneella laskettavaksi. Kyseessä olevan virtauslaskun tapauksessa derivaatan arvo on pieni, koska virtausnopeus sisältyy Reynoldsin lukuun, ja se vaihtelee yhtälön sovellusalueella suhteellisesti paljon virtausnopeuteen nähden. Iterointi suppenee riittävän nopeasti kohti oikeaa arvoa, kunhan alkuarvaus on sopivalla alueella, siten että tässä käytetyt oletukset, Lipschitz-jatkuvuus ja derivaatan riittävän pieni arvo, pysyvät voimassa.

4.2.4 Välinpuolitusmenetelmä

Yhtälö 1 antaa iteroinnin jälkeen virtauksen tietyllä paine-erolla ja systeemistä riippuvilla parametreilla. Jos halutaan laskea, millainen paine-ero muodostuu annetulla virtausnopeudella, täytyy joko muodostaa iteroitava funktio toisin yhtälöstä 1 tai voidaan hakea sopiva paine-ero kokeilemalla, kunnes virtaus vastaa haluttua. Kokeileminen onnistuu järjestelmällisesti välinpuolitusmenetelmällä, kuten esimerkkikoodissa 1 on näytetty. Menetelmä toimii yksinkertaisesti siten, että annetaan paine-erolle alkuarvaus, sitten lisätään tai vähennetään arvauksesta askeleen verran. Kun erotus halutusta vaihtaa etumerkkiä, vaihdetaan myös askeleen etumerkkiä ja puolitetaan askeleen pituus. Tämä algoritmi hakeutuu kohti ratkaisua verrattain hitaasti, mutta kuitenkin säädylisessä ajassa. Ehtona on se, että yhtälö on aidosti monotoninen sovellettavalla alueella. Algoritmi on helppo toteuttaa matematiikkaohjelmilla yhdessä iteroinnin kanssa sisäkkäisinä luoppeina esimerkkikoodin 1 tapaan.

```
// Välinpuolitusmenetelmän luuppi. Askel on "step"
while (ehto välinpuolitusmenetelmän tarkkuudelle)

    if Q_target > Q
        deltaP = deltaP + step;
        o=1;
    endif

    if Q_target < Q
        deltaP = deltaP - step;
        if o==1
            step = step/2;
            o=0;
        endif
    endif

    // Iterointiluuppi
    while(ehto perättäisten iterointikertojen erotukselle)

        // Tähän kaikki sijoitukset edellä esiteltyihin kaavoihin
        Q_n+1 = f(Q_n);

    endwhile

endwhile
```

Esimerkkikoodi 1. Iterointi- ja välinpuolitusmenetelmä pseudokoodina

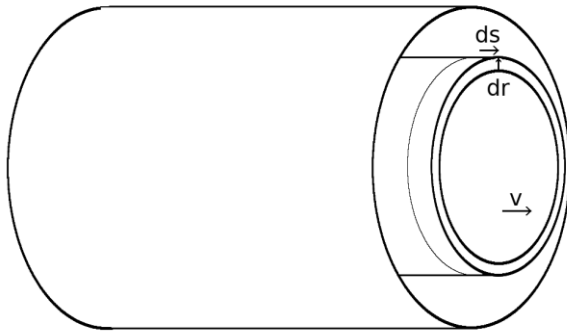
Esimerkkinä valitaan tavoitevirtausnopeudeksi 7 l/min, 6 mm:n putki ja 1,5 mm:n aukkoisen kuristuslevy. Paine-eroksi levyn eri puolilla saadaan 4,5 kPa. Tarkka tulos riippuu

valitusta ilman dynaamisesta viskositeetista, joka vaihtelee lämpötilan mukaan. Kokonaispainehäviöksi saadaan 4,15 kPa kaavaa 2 käyttäen, tosin samoin varauksin kuin kaavan esittelyn yhteydessä. Kuitenkin 1,5 mm riittää hyvin venttiilin aukoksi näillä virtausnopeuksilla.

4.3 Ilmakanavan tuulettuminen ennen seuraavaa näytettä

Titan-analysaattorissa on vain yksi sisääntuloliitäntä. Analysaattorin oma pumppu imee ilmaa hyvin pienellä virtausnopeudella: noin 200 ml/min. Jotta analysaattori ehtii saada näytteen sisälle asti, ilmakanava ei saa olla kovin suuri tilavuudeltaan matkalla venttiileiltä analysaattorille. Mittausrytmisessä analysaattori imee ilmaa 40 s ennen varsinaisen näytteen ottamista. Pienen virtauksen vuoksi on syytä tarkastella tarkemmin ilman vaihtumista.

Sopivaksi venttiilimalliksi löytyi Bürkert 6014, johon on saatavissa suoraan venttiileiden alla jakotukkina toimiva asennuslevy. Näyteilman on tarkoitus kulkea jakotukin kautta paineilmaletkuun, joka on kytketty analysaattorin sisääntuloon. Jakotukin sisällä on 8 mm halkaisijaltaan ja 350 mm pitkä sileä lieriön muotoinen kanava. Tilavuus on 17,5 ml. Jos koko kanava tyhjenisi tasaisesti, virtausnopeudella 200 ml/min se tyhjenisi 5,3 sekunnissa. Ilma ei kuitenkaan vaihdu koko putken leveydeltä kerrallaan. Virtaus on laminaarista näin pienellä virtausnopeudella, jos pyörteisyys ehtii tasoittua venttiilin jälkeen. Perusteluksi voidaan laskea Reynoldsin luku edeltävän kappaleen kaavalla. Tulos on noin 1300, ja virtaus on laminaarista sen ollessa alle 2000. Laminaarisessa virtauksessa virtaus on keskellä nopeampaa. Siten reunoilla kanavan tuulettuminen on hitaampaa. Ilma virtaa kerroksittain. Kuvassa 3 on piirretty yksittäinen ilmakerros, ja ilmaistu laskuissa tarvittavat merkinnät.



Kuva 3. Havainnekuva yksittäisestä ilmakerroksesta laminaarisessa virtauksessa.

Laminaarisessa putkivirtauksessa nopeusprofiili noudattaa tunnetusti kaavaa $v(r) = v_{max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$, jossa R on putken säde. Virtaus on keskellä ($r = 0$) suurimmillaan, ja reunalla 0. Tästä saadaan laskettua kokonaisvirtaus termin v_{max} avulla.

$$dQ(r) = d\left(\frac{dV}{dt}\right) = \frac{ds dA}{dt} = \frac{2\pi ds r dr}{dt} = 2\pi r v(r) dr$$

$$Q = \int_0^R 2\pi r v(r) dr = 2\pi v_{max} \int_0^R r \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) dr = 2\pi v_{max} \left[\frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{4R^2} \right]_0^R \quad (5)$$

$$= \frac{1}{2} v_{max} \pi R^2 = \frac{1}{2} v_{max} A$$

$$\Rightarrow v_{max} = 2 * \frac{Q}{A}$$

Eli virtausnopeus keskellä on kaksi kertaa keskivirtausnopeus. Virtausaika jakotukin läpi eri kohdissa voidaan laskea, kun nopeus on tunnettu.

$$t(r) = \frac{s}{v(r)}$$

Sijoittamalla edellä esitetty nopeus, ja ratkaisemalla yhtälöstä r , saadaan yhtälö 6, joka kertoo, millä etäisyydellä keskipisteestä kanavan ilma on vaihtunut kullakin ajan hetkellä:

$$r(t) = R \sqrt{1 - \frac{s}{v_{max}t}}, t \geq \frac{s}{v_{max}} \quad (6)$$

Tässä on tarvittavat välineet arvioiden tekemiseen. Esimerkiksi kaavan 6 mukaan $r(t)$ saavuttaa arvon $0,8 \cdot R$, kun aika $t \approx 2,7 \cdot \frac{s}{v_{max}} = 1,35 \cdot \frac{s}{v_{keski}}$. Kappaleen alussa arvioitiin, että $\frac{s}{v_{keski}} \approx 5,3 \text{ s}$, joten kanava on laskelmien mukaan tuulettunut 80 % säteestä, kun aikaa on kulunut n. 7 s. Yhtälöstä (5), vaihtaen integroinnin ylärajan R :stä $0,8 \cdot R$:ään, saadaan tulos, että se vastaa n. 87 % kokonaisvirtauksesta.

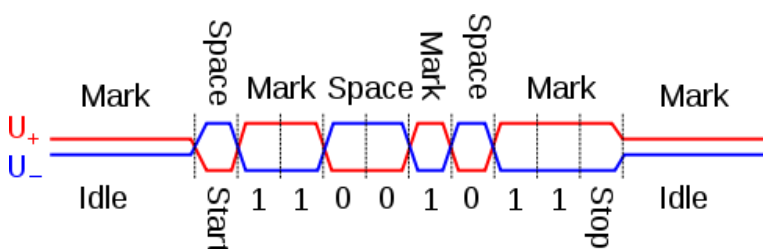
Edellä oleva päätelmä tiivistetysti on, että pahimmassakin tapauksessa jakotukista ulos tulee melkein 90 % uuden näytteen ilmaseosta noin 7 sekunnissa. Esimerkiksi 1 ppm bentseeniä sisältävä näyte olisi vähintään 0,9 ppm seosta jakotukista ulos tullessa. Analysointitoimintasyklissä ilmaa imetään 40 s, joten jakotukki ehtii tuulettua hyvin. Vastaavasti jakotukin ja analysointitoimintasyklissä sisähalkaisijaltaan 4 mm:n ilmaletkukin ehtii tuulettua hyvin. Useimmat vastaan tulleet jakotukit olivat merkittävästi suurempia. Esimerkiksi toinen tässä projektissa käytetty jakotukki on sisähalkaisijaltaan 20 mm. Edellä olevilla tarkasteluilla se olisi vajaa 90 % tuulettunut noin 45 sekunnissa, joka on enemmän kuin mitä analysointitoimintasyklissä pumpataan. Mitoitus on siis tärkeää toiminnan kannalta.

Tuulettuminen on tärkeää myös siksi, että 0,7 ppm rajan sijaan lähitulevaisuudessa käytetään tiukempaa rajaa. EU päättää rajan tiukennuksesta 0,5 ppm, 0,2 ppm tai 0,05 ppm välillä 8h päivittäisessä altistuksessa [15]. Titan on päivitettävissä 0,05 ppm tarkkuuteen.

4.4 Modbus-protokolla

Modbus-väylä perustuu sarjaliikenteeseen, jossa tieto kulkee yksi bitti kerrallaan. Fyysisesti signaali on RS-485:n mukainen. RS-485-signaali perustuu kahden johtimen potentiaalieroon. Bitti 1 merkitään siten, että Tx+ potentiaali on suurempi kuin maa ja Tx- pienempi kuin maa (n. $\pm 5 \text{ V}$). Vastaavasti bitti 0 ilmaistaan siten, että napaisuudet ovat edelliseen nähden vastakkaiset. Yhteyden nopeus on määritelty asetuksissa, ja lähettäjän ja vastaanottajan asetukset pitää vastata toisiaan. Kuvassa 4 on näytetty signaalin

aikakaavio. RS-485 mahdollistaa useamman laitteen kytkemisen samaan väylään. Topologia väylässä on lineaarinen, eli laitteet ovat kytkettynä sähköisesti sarjaan. Yhteys voi olla joko Full- tai Half-duplex. Half-duplex tarkoittaa sitä, että lähetys ja vastaanotto täytyy tapahtua eriaikaisesti. Full-duplex mahdollistaa samanaikaisen lähetyksen ja vastaanoton, mutta vaatii oman johdinparin molemmille toiminnoille. Varsinaisen signaalin kuljettamisen lisäksi molemmissa tavoissa tarvitaan maadoitusjohdin.



Kuva 4. Yhden tavun mittainen RS-485-signaali [16].

Modbus-protokollia on kahta eri tyyppiä, sarjaportti ja ethernet. Sarjaporttiprotokollasta on olemassa kaksi eri muunnelmaa, ASCII ja RTU. Molemmat perustuvat heksadesimaalien käyttöön, jokseenkin samalla tavalla. Erona on se, kuinka heksadesimaalit on koodattu binääreiksi sarjaliikennettä varten ja miten virheiden havaitsemiseen käytetty tarkistuslaskenta toimii.

ASCII-merkistössä on 256 erilaista merkkiä, jotka on merkitty juoksevin numeroin nolasta alkaen, jolloin merkin ilmaisemiseen riittää 8 bittiä (binääriluku 11111111 on kymmenjärjestelmässä 255). Modbus-protokollassa käytetään vain rajoitetusti merkkejä heksadesimaalien ilmaisuun. Tarvitaan vain numeroita 0–9 ja aakkososista A–F. Näiden merkkien järjestysluku ASCII-merkistössä on alle 127 (= 01111111), joten etummainen nolla voidaan tipauttaa pois ja seitsemän bittiä riittää. Virheen tunnistus ja pakettien luenta vaatii lisäksi aloitusbitin ja joko kaksi lopetusbittiä tai pariteettibitin ja lopetusbitin. Yhteensä 10 bittiä siis yhden heksadesimaaliluvun ilmaisuun. Modbus-viesteissä data on jaettu kahden heksadesimaalin mittaisiin lukuihin (0x00–0xFF), joita on peräkkäin viestin sisältöön riittävä määrä. ASCII-koodilla näiden ilmaisuun tarvitaan neljä merkkiä (ks. esimerkki taulukosta 2.). Kokonaiseen Modbus-viestiin sisältyy aloitusmerkki kaksoispiste, ja lopussa lopetusbitit. [17;18.]

RTU-koodauksessa heksadesimaalien ilmaisu on matemaattisesti suoraviivaisempi ja vähemmän bittejä vaativa. Muunnos on yksinkertaisesti binäärijärjestelmästä heksadesimaaleiksi, jolloin yhtä heksadesimaalilukua kohden tarvitaan neljä bittiä ($F = 1111$). Paketti koostuu aloitusbitistä, kahdesta heksadesimaaliluvusta (=data, 8 bittiä) ja joko kahdesta lopetusbitistä tai pariteettibitistä ja lopetusbitistä. Yhteensä tarvitaan kymmen bittiä kahden heksadesimaaliluvun ilmaisuun. RTU-koodaus on siten sisällöltään tiiviimpi. Modbus-viestien sisältö heksadesimaaleina on sama kuin ASCII:lla. Itse viesti eroaa tarkistusmerkkien lisäksi sillä, että aloitus ei sisällä aloitusmerkkiä, kuten ASCII:ssa. Aloitusmerkinä toimii jännitteettömän tilan jälkeen tuleva 0. [17.]

Kuvassa 5 näkyy esimerkki yhdestä kyselystä ja siihen tulleesta vastauksesta. Portin 2 puolella viestit kulkevat ASCII-muodossa ja portin 1 puolella RTU-muodossa. Viestien tulkintaa vaikeuttaa se, että on olemassa erilaisia tapoja merkitä lukuja. Erona voi olla lukujen bittimäärä, käänteinen tai suora esitysjärjestys ja luvun tyyppi. Luku voi olla liukuluku tai kokonaisluku, ja bittimäärä voi olla 16 tai 32.

Traffic Monitor (MGate MB3270 192.168.127.254)

All
 Exception only
 Slave ID only
 Source only
 Function code only

Filter info:

Start Stop Clear

No.	Time	Src. & Dst.	Type	Slave...	Function Code	Data	Comme
1	5457.910	Port1<-	RTU Req.	10	0x04	0A 04 00 80 00 04 F1 5A	Read ir
2	5457.910	Port2->	ASCII Req.	10	0x04	3A 30 41 30 34 30 30 38 30 30 30 30 34 36 45 0D 0A	Read ir
3	5457.930	Port2<-	ASCII Resp.	10	0x04	3A 30 41 30 34 30 38 30 41 31 44 30 30 30 30 39 43 34 30 30 30 30 46 36 0D 0A	Read ir
4	5457.930	Port1->	RTU Resp.	10	0x04	0A 04 08 0A 1D 00 00 09 C4 00 00 0E 36	Read ir

Kuva 5. Esimerkki Modbus-viesteistä, jossa paluuviesti sisältää kaksi kokonaislukua.

Kuvan 5 rivillä 1. näkyy isäntälaitteen (Beckhoffin teollisuus-PC) lähettämä kyselyviesti, ja rivillä 4 käännetty orjalaitteen (Titan-analysaattori) vastausviesti. Taulukossa 2 näkyy viestin osat ja niiden merkitys. Ohjelma kääntää binäärimuotoisen viestin heksadesimaaleiksi. RTU-viestin tapauksessa viesti on siten valmiiksi luettavassa muodossa, mutta ASCII-viestissä näkyy vain ASCII-merkkien järjestysnumerot heksadesimaaleina.

Taulukko 2. Kuvan 5 esimerkin tulkinta.

Kysely RTU	0A	04	00 80	00 04	F1 5A
Kysely ASCII	3A 30 41	30 34	30 30 38 30	30 30 30 34	36 45 0D 0A
ASCII-taulukosta muunnos	: 0A	04	0080	0004	6E CR E
Merkitys	Orjalaitteen identifiointinumero väylässä: 10	Kyselyn laatu: Vain luettavissa olevan muistipaikan luku	Muistipaikan osoite	16 bittisten tietueiden määrä, jota osoitteesta luetaan =8 tavua	Lopetusbitit
Vastaus RTU	0A	04	08	0A 1D 00 00 09 C4 00 00	0E 36
Vastaus ASCII	3A 30 41	30 34	30 38	30 41 31 44 jne.	46 36 0D 0A
ASCII-taulukosta muunnos	: 0A	04	08	0A 1D 00 00 09 C4 00 00	-
Merkitys	- -	- -	luettujen tavujen määrä	* erillinen selitys alla tekstissä	Lopetusbitit

*) Titan-analysaattorin käyttöohjeen [6, s.18–19] mukaan muistiosoitteessa 0x80 luvut on annettu 32-bittisinä kokonaislukuina. Luku 0A 1D 00 00 voidaan tulkita heksadesimaaliluvuksi $0x00000A1D = 10 * 16^2 + 1 * 16^1 + 13 * 16^0 = 2589$. Vastaavasti alempi luku on $0x000009C4 = 2500$. Käyttöohjeen mukaan tästä muistipaikasta nämä kaksi ensimmäistä lukua ilmaisevat analysaattorin suodattimen lämmittimen ja kuoren sisäisen lämpötilan muodossa °C*100. Lämpötilat ovat siis 25,89 °C ja 25,00 °C. Lukemat on otettu ennen laitteen lämpenemistä, ja siksi ne ovat lähellä huoneen lämpötilaa.

Viestit voivat sisältää myös liukulukuja, jolloin tulkintaa tehdessä heksadesimaalit on käännettävä binäärimuotoon ensin. Binääribiteistä ensimmäinen ilmaisee luvun etumerkin ja seuraavat kahdeksan bittiä desimaalipilkun paikan ja loput vasta ilmaisevat merkitsevät luvut. Esimerkin vuoksi muutetaan edellä esiintynyt luku 25,89 liukulukuna heksadesimaalimuotoon. Taulukossa 3 on esitetty lyhyesti proseduurin muunnoksesta Modbus-dataksi kelpaavaan muotoon. Liukuluvun merkintätapa on kuvailtu esimerkiksi lähteessä [17].

Taulukko 3. Liukuluvun heksadesimaalimuotoon muuttamisen vaiheet.

Binääriluvuksi	25,89 = 11001,11100011111
Kymmenpotenssimuotoon	$10^4 * 1,100111100011111$
Kymmenpotenssin skaalaus 256 luvun alueelle	$4 = 131 - 127, 131 = 10000011$
Ensimmäinen 1 poistetaan kantaosasta	$1,100111100011111 := ,100111100011111$
positiivinen etumerkki ilmaistaan nollana	0
Asetetaan peräkkäin 32 bitin binääriluvuksi	0 10000011 100111100011111 00000000
Neljän bitin ryhmissä heksadesimaaliluvuiksi	0100 0001 1100 1111 0001 1111 0000 0000
0100 = 4 jne.	41 CF 1F 00

5 Laitteiston asentaminen ja testaus

Ennen varsinaista laitteiden asentamista kojekaappiin, yhteydet PLC:n, ohjelmointiin käytetyn tietokoneen ja analysaattorin välille luotiin rauhassa työpöydän äärellä. Analysaattori ja PLC kytkettiin jännitelähteeseen ja toisiinsa Modbus-väylän kautta. Vaikka etukäteen jo oli varauduttu siihen, että yhteyksien luominen voi olla hankalaa, todellinen vaikeusaste pääsi yllättämään.

5.1 Perusasetukset ja ohjelmoinnin aloittaminen

Oletusasetuksilla yhteys ethernet-kaapelin kautta ohjelmointiin käytetyn tietokoneen ja Beckhoffin teollisuus-PC:n välillä ei toiminut. Onneksi varustukseen kuului HMI-näyttö, jonka avulla Beckhoffin PC:n Windows 10 -käyttöjärjestelmään ja asetuksiin saa näkyvän. IP-osoitteet asetettiin molempiin osapuoliin manuaalisesti samaan aliverkkoon, mutta TwinCAT 3 ei vielä löytänyt yhteyttä. Laite ei myöskään vastannut pingiin. Ongelman nopea ratkaisu oli ottaa Windowsin palomuuuri pois käytöstä. Myöhemmin palomuurin asetuksiin asetettiin auki vain yhteyden vaatima portti.

Seuraavaksi piti tehdä lukuisia asetuksia, jotta Windowsista erillinen logiikan oma TwinCAT-järjestelmä saatiin toimimaan oikein. Asetuksia on paljon, esimerkiksi lisenssidonglen asetukset ja HMI:n liittymän automaattinen käynnistyminen. Tässä ei ole tarpeen käydä niitä kaikkia läpi. Todettakoon kuitenkin, että ilman aiempaa syvempää kokemusta Beckhoffin laitteista, aloituskynnys ei ollut pieni. Asiaa kuitenkin helpotti se, että osien myynnistä vastannut edustaja kävi paikalla katsomassa, kuinka käyttöönotto onnistuu. Se säästi paljon vaivaa asetuksiin tutustumisessa. Ohjelmien ja HMI-käyttöliittymän luominen oli mahdollista aloittaa.

5.2 Modbus-yhteyden luominen

Vaikka Modbus on yleisesti käytössä oleva väylä, ei yhteyden luominen onnistunut helposti. Hyvänä puolena on mm. se, että se toimii tavallisia parikaapeleita käyttäen, ja yhteyden nopeus riittää tämänkaltaisiin sovelluksiin. Beckhoffin valikoimaan kuuluu sarjaliikenteen mahdollistava kortti EL6021. Kortin asetusvalikot ovat turhankin runsaita, ja

muutoksia vaativien asetusten löytäminen ei ollut helppoa. Esimerkki pienestä osasta asetuksia näkyy kuvassa 6. Lopulta kuitenkin vain muutamaa asetusta oli tarpeen muuttaa. Yhteyden nimellinen nopeus, paketoinnin tyyppi (kahdeksan bittiä, ei pariteettia ja kaksi lopetusbittiä) ja kahden kaapelin kautta kulkevan viestinnän mahdollistava half-duplex-asetus.

Index	Name	Flags	Value	Unit
4071	Data bytes in receive buffer	RO	0x0000 (0)	
4072:0	Diagnostic	RO	> 5 <	
4073	Baudrate	RW	38,4 kBaud (8)	
4074	Data frame	RW	8N2 (11)	
4075:0	Feature bits	RO	> 6 <	
4076	Rx buffer full notification	RW	0x0360 (864)	
6000:0	COM Inputs	RO	> 38 <	
6001:0	COM ext. inputs	RO	> 66 <	
7000:0	COM Outputs	RO	> 38 <	
7001:0	COM ext. outputs	RO	> 66 <	
8000:0	COM Settings	RW	> 28 <	
8000:02	Enable XON/XOFF supported tx data	RW	FALSE	
8000:03	Enable XON/XOFF supported rx data	RW	FALSE	
8000:04	Enable send FIFO data continuous	RW	FALSE	
8000:05	Enable transfer rate optimization	RW	TRUE	
8000:06	Enable half duplex	RW	TRUE	
8000:07	Enable point to point connection (R...	RW	FALSE	
8000:11	Baudrate	RW	38,4 kBaud (8)	
8000:15	Data frame	RW	8N2 (11)	
8000:1A	Rx buffer full notification	RW	0x0360 (864)	
8000:1B	Explicit baudrate	RW	0x00009600 (38400)	
8000:1C	Extended data frame	RW	8N2 (11)	

Kuva 6. Sarjaliikennekorttiasetuksia.

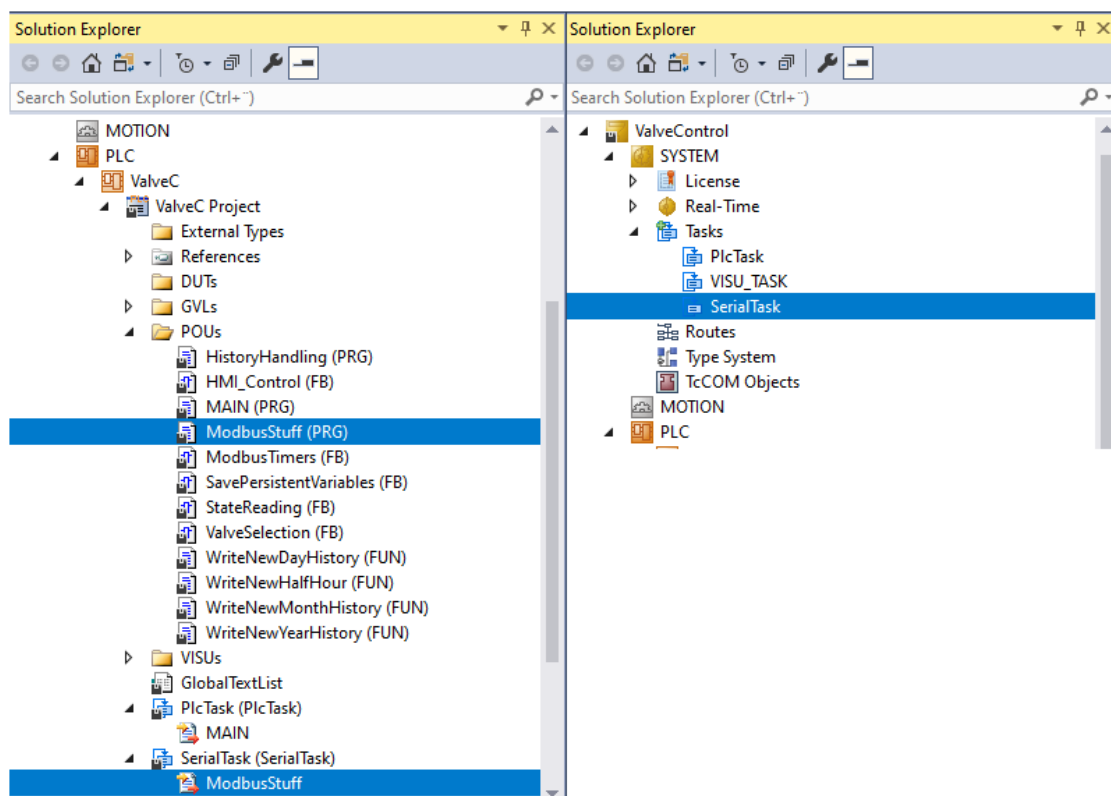
Yhteyttä muodostettaessa huomattiin merkittävä puutteellisuus asioiden etukäteen selvittämisessä. Modbus-sarjaliikenneprotokollia on kahdenlaisia: toinen perustuu ASCII-koodaukseen ja toinen RTU-koodaukseen. TwinCAT:in valmiit kirjastot tukevat vain RTU-pohjaista koodausta ja tämän projektin analysointori puolestaan vain ASCII-koodausta. Ongelma huomattiin vasta yhteyttä kokeiltaessa. Yksi mahdollisuus ongelman ratkaisuksi olisi ollut ottaa käyttöön yleinen sarjaliikennekirjasto ja luoda kyselyt ja vastausten tulkinnot bittitasolta alkaen omalla ohjelmakoodilla. Tähän vaihtoehtoon olisi luultavasti mennyt aikaa, vaikka protokolla ei ole kovin monimutkainen periaatteeltaan (ks.

esimerkit luvussa Modbus-protokolla). Rajallisen ajan vuoksi päädyttiin käyttämään erillistä mediamuunninta ASCII- ja RTU-koodauksen välillä. Näin voitiin hyödyntää valmiita Beckhoffin RTU-kirjastoja. Käyttötarkoitukseen sopiva muunnin oli tässä tapauksessa MOXA MB3270, joka myös täyttää ATEX-vaatimukset.

Valmiiden kirjastojenkaan käyttäminen ei ollut ihan helppoa, sillä dokumentoinnilla, joka löytyi Beckhoffin sivuilta. TwinCAT:in RTU-kirjastosta TF6255 löytyy funktioblokki ModbusRtuMasterV2_KL6x22B (jäljempänä lyhemmin funktioblokki), joka hoitaa kyselyn lähettämisen ja vastauksen kirjaamisen. Esimerkkikoodissa 2 näkyy sen parametrit. Yhteyttä kokeiltaessa selvisi, että kutsua ei voi tehdä siten kuin yleensä ohjelmoinnissa, eli sitä kutsutaan tarvittaessa vain metodin nimellä. Näin ei saatu aikaiseksi viestiliikennettä. Kutsu täytyy kirjoittaa omaan PLC-tehtävänoodiin (PLC-task), niin että se toistuu koko ajan 1 ms:n välein. Tämän selvittämisessä apua saatiin Beckhoffin teknisestä tuesta.

Kuvassa 7 oikealla näkyy miten SYSTEM-otsikon alla päänoodiin (Tasks) alle on lisätty alinoodi SerialTask. Samassa kuvassa vasemmalla näkyy, miten alinoodiin kutsutaan kutsua varten kirjoitettu ohjelma ModbusStuff. Ohjelman sisältö näkyy esimerkkikoodissa 2. Funktioblokkia kutsutaan ensin ja annetaan kutsuun sisääntuloparametrit. Sen jälkeen vielä muutetaan yksi sen sisääntuloparametreista, Execute, arvoon TRUE, jolloin se vasta toteuttaa kyselyn ja kirjaa vastauksen.

Vaikka teknisen tuen avustuksella kutsu oli jo osattu laittaa omaan noodiin, parametrin Execute oikea käyttö selvisi kokeilujen ja tarkemman tutustumisen myötä. Käyttö vaatii parametrin nousevan harjan, eli sen täytyy olla välillä myös FALSE. Onneksi käytössä olevassa mediamuuntimessa oli mahdollisuus monitoroida viestiliikennettä, jolloin sen puuttuessa vikaa osattiin etsiä kutsusta. Tämä funktioblokki on teknisessä mielessä olio, jonka tyyppi on ModbusRtuMasterV2_KL6x22B. Olion ilmentymä kirjoitettiin yleisten muuttujien listaan GVL nimellä Modbusdata. Esimerkkikoodissa 2 näkyy, kuinka sen metodia ReadInputRegs kutsutaan.



Kuva 7. Alinoodi SerialTask, joka sisältää ohjelman ModbusStuff.

Kun kutsu oli lopulta saatu toteutumaan oikein, monitoriohjelmassa näkyi kyselyjä ja vastauksia. Yleisten muuttujien listalle lisäystä oliosta Modbusdata näkyi suoraan monenlaista tietoa. Kaivattuja lukuja ei kuitenkaan löytynyt sieltä. Tässä välissä piti alkaa tarkastelemaan monitoriohjelman kautta viestiliikenteen sisältöä (ks. esimerkki luvussa 4.3). Kynän, paperin ja laskimen avulla tehdyn tulkinnan tulos oli, että viestiliikenne näyttää toimivan, ja siellä on olemassa kaivattu data. Lopulta oikeat luvut löytyivät parametrin pMemoryAddr avulla, joka näkyi ohjelman ajon aikana ModbusStuff-ohjelmassa. Beckhoffin dokumentoinnissa kyseisestä parametrin kerrotaan seuraavaa:

pMemoryAddr: Memory address in the PLC, calculated with ADR (Modbus data). For read actions, the read data are stored in the addressed variable. For send actions, the data are transferred from the addressed variable to the end device.

Vapaasti suomennettuna edellä oleva lainaus on:

pMemoryAddr: Muistiosoite PLC:ssä, laskettuna ADR(Modbus data):lla. Lukutoiminnossa tieto tallennetaan osoitettuun muuttujaan laitteelle. Lähetystoiminnossa tieto siirretään osoitetusta muuttujasta laitteelle.

Esimerkkikoodissa 2 näkyy, kuinka nyt muuttuja arrRead on kirjattu ohjelman ulkopuolelle näkyväksi muuttujaksi (VAR_OUTPUT) ja miten edellä olevaa ohjetta on sovellettu.

```

PROGRAM ModbusStuff
VAR_INPUT
    Executel : BOOL;          // Käynnistää lukemiskäskyn
    nQuantity : WORD;        // Datan koko Wordeina, (WORD = 2 tavua)
    MBAddr : WORD;          // Muistiosoite desimaaleina, esim. 0x80 --> dec 128
END_VAR

VAR_OUTPUT
    arrRead : ARRAY [1..21] OF WORD;    // Datan sisältö
    BUSY:BOOL;
END_VAR

VAR
    // test: ModbusRtuMasterV2_KL6x22B;
    // Inputs : ARRAY[0..255] OF WORD;    // serverikäyttöön
    // Outputs : ARRAY[0..255] OF WORD;    // serverikäyttöön
    // Memory : ARRAY[0..255] OF WORD;    // serverikäyttöön
    BytesRead : UINT;                    // Luetun datan määrä
    Error : MODBUS_ERRORS;
    ReadInputRegs: INT;

END_VAR

// Funktioblokin kutsu (metodi ReadInputRegs)

GVL.Modbusdata (
    UnitID:=10 ,
    Quantity:= nQuantity ,
    MBAddr:= MBAddr ,
    cbLength:= 2*nQuantity ,
    pMemoryAddr:= ADR(arrRead),
    //AuxQuantity:= ,
    //AuxMBAddr:= ,
    //AuxcbLength:= ,
    //pAuxMemoryAddr:= ,
    Execute:=Executel ,
    Timeout:= t#4s,                // Älä aseta liian pitkää aikaa!
    BUSY=> ,
    Error=> ,
    ErrorId=> Error ,
    cbRead=> BytesRead );

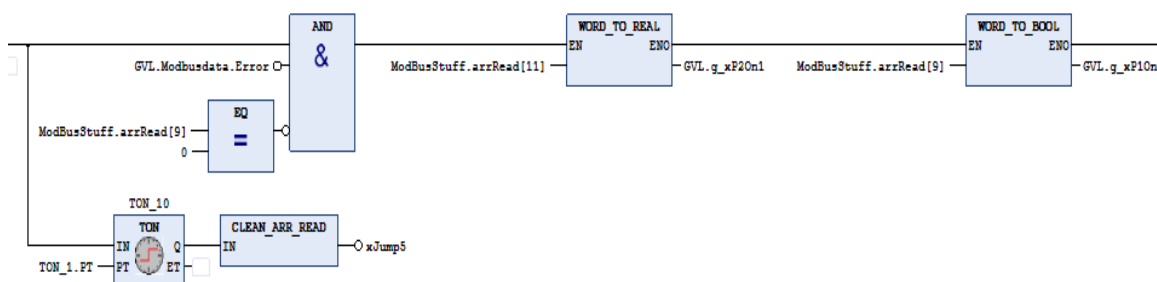
GVL.Modbusdata.ReadInputRegs ();

```

Esimerkkikoodi 2. Ohjelma, jossa on analysaattorin muistin lukevan funktion kutsu.

Projektiin tuli muutaman viikon viive analysaattorin vikaantuessa. Vika saatiin korjattua, jonka jälkeen yhteyttä taas pääsi kokeilemaan. Projektin loppuun saattamisella alkoi jo tässä vaiheessa olla kiire.

Vaikka kaikki Titan:in parametrit löytyivät ohjekirjan mukaisista osoitteista, ja yhteys jo toimi oikein, eräs tärkeä asia piti vielä viimeistellä. Modbus-protokollaan kuuluu tarkastuslaskenta virheiden varalta, mutta tässä käytetty funktioblokki ei automaattisesti lähetä uutta kyselyä yms. Funktioblokki muuttaa ulostuloparametrin Error arvoon TRUE, jos luennassa on tapahtunut jokin mahdollisista virheistä (ei läpäissyt virheentarkistusta, vastausta ei saatu yms.). Ohjelmia kirjoittaessa pitää muistaa itse huolehtia siitä, että ohjelma käyttäytyy oikein lukuvirheiden sattuessa. Esimerkiksi voidaan asettaa ehto "Error = FALSE" palautetun parametrin arvon siirtämiselle muuttujan arvoksi. Tämä ehto ei kuitenkaan jostain syystä ole riittävä. Edellisen osoitteen luettuja tuloksia päätyi väärän muuttujan arvoksi. Se estettiin lisäämällä taulukon arrRead nollaus jokaisen osoitteen luvun jälkeen (kuvassa 8 itse kirjoitettu funktio CLEAN_ARR_READ). Lisäksi asetettiin muita sopivia. Kuvassa 8 näkyy mm. ehdot siitä, että taulukko ei ole enää tyhjä, kun sen arvoja siirretään. Bentseenipitoisuuden tapauksessa ehtojen pitää paitsi estää turhia hälytyksiä myös varmistaa, että lukuvirheiden sattuessa hälytys ei jää laukaisematta. Ohjelmaan kirjoitettiin 10 s:n aikaikkuna bentseenipitoisuuden lukemiselle, joten yksittäiset lukuvirheet eivät estä hälytyksen tekemistä.



Kuva 8. Osa ohjelmakoodista, jossa on ehtoja parametrien välittämiseksi.

5.3 HMI

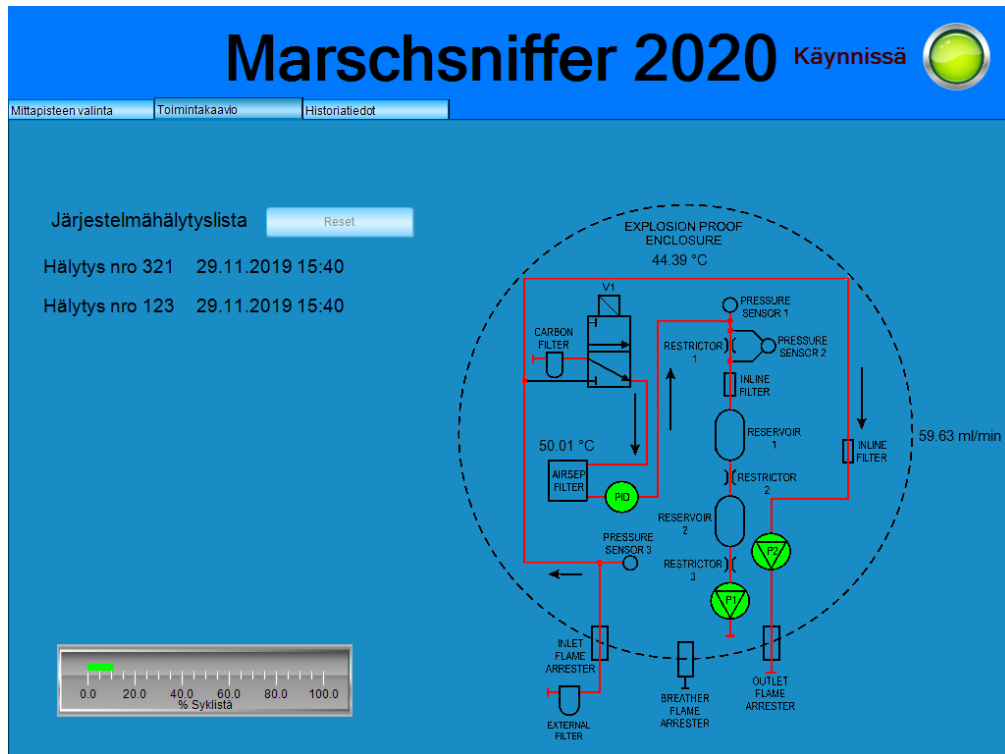
Ensimmäiselle välilehdelle (kuva 9) laitettiin mm. hälytykset ja hälytysten kuittaus näkyviin, viimeisimpien tulosten yläpuolelle. Samalla sivulla on myös seuraavan halutun mitauspisteen valinta ja kalibrointimoodin valinta. Testikaasun käytön helpottamiseksi kalibrointimoodissa tulokset eivät tallennu historiatietoihin, hälytykset eivät laukea ja venttiilin voi valita heti ilman tahdistussignaalia. Hälytysrajan muutokseen vaaditaan salasana.



Kuva 9. HMI-paneelin ensimmäinen välilehti, jossa näkyy hälytykset.

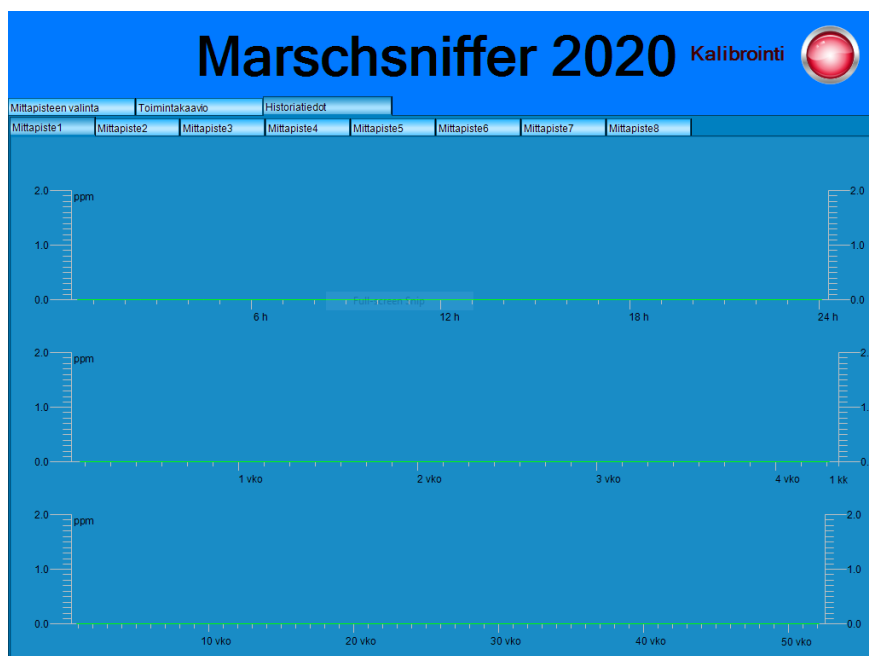
Toisella välilehdellä (kuva 10) näkyy analysaattorin toimintakaavio ja joitakin sen toimintaan liittyviä tietoja, jotka saadaan Modbus-väylän kautta. Toimintasyklissä pumppu P2 sammuu näytteen analysoinnin ajaksi, jolloin kuvake vilkkuu. Jos kaasun erottimen lämpötila on alle tavoitteen, sen kuvake myös vilkkuu. PID-lampun kuvake muuttuu vihreäksi sen ollessa toiminnassa eli melko nopeasti analysaattorin käynnistyksen jälkeen. Kaavion vasemmalle puolelle on jätetty tilaa erilaisille järjestelmähälytyksille.

Kolmannella välilehdellä (kuva 11) näkyy historiatietoja mitatuista bentseenipitoisuuksista. Ylimmässä kuvaajassa näkyy tiedot vuorokauden ajalta, toisessa kuukauden ja viimeisessä vuoden ajalta. Tulokset ovat suurimpia arvoja kultakin aikaväliltä



Kuva 10. HMI-paneelin toinen välilehti, jossa näkyy analysaattorin toimintakaavio.

Paneeliin on suunniteltu neljäskin välilehti, jossa näkyy mittapisteiden sijainti kartalla.



Kuva 11. HMI-paneelin kolmas välilehti, jossa näkyy mittaustulosten historiaa.

5.4 Laitteiston asennus kojekaappiin

Kojekaappiin tuli runsaasti läpivientejä, yhteensä 18 kappaletta, ja näytön aukko oveen. Ilmapursotuksen vuoksi sen täytyi olla riittävän tiivis paineistukseen, joten reikien piti olla riittävän säännölliset, jotta niihin tulevat nipat asentuivat tiiviisti. Sopivia työkaluja reikien tekemiseen ei ollut heti saatavilla, vaan joka reikäkoolle piti etsiä sopivat terät hydrauliseen puristimeen. Tämä aiheutti pientä viivästystä projektin etenemiselle, mutta lopulta kaikki välineet löytyivät, ja asennus kojekaappiin pääsi alkamaan.

Taustalevyyn porattiin sopivat alkureiät ruuveja varten. Ruuveilla kiinnitettiin kiskot ja johtokotelot. Analysaattori, ejektori ja venttiilien aluslevynä toimiva jakotukki kiinnitettiin pulteilla. Kuvassa 12 näkyy kojekaapin sisälle asennettu laitteisto. Oikealla ylhäällä sijaitsee analysaattori. Vasemmalla alhaalla ovat venttiilit, jakotukit ja virtausmittarit. Virtausmittareista voidaan valvoa näyteilman virtausta prosessialueelta. Kuvasta voi nähdä, että näytettä analysaattorille otetaan neljännestä mittapisteestä vasemmalta alkaen. Virtauksen ilmaiseva kuula on alhaalla, kun ilma ohjautuu näytteen ottoon. Analysaattorin alla on Beckhoffin teollisuus-PC, I/O-kortit ja Moxa-mediamuunnin. Oveassa on näyttö. DCS-järjestelmän kytkennät puuttuvat tästä vielä.



Kuva 12. Laitteisto asennettuna.

Tiivistestissä todettiin, että muilta osin kojekaappi oli riittävän tiivis pursotusvahdin toiminnalle, paitsi oven alareuna vuoti. Kaapin ollessa vaakatasossa tiiviste piti hyvin. Siten vika ei ole tiivisteessä, vaan oven muodon muutoksessa oman painonsa alla. Ratkaisuna oveen tuli lisätä lukkoja tiivistyksen varmistamiseksi. Tämän arveltiin olevan mahdollista jo suunnitteluvaiheessa, joten lisälukkojen tarve ei tullut yllätyksenä. Lukkojen lisäksi laite vaatii viimeistelyä käyttöliittymän osalta. Lopullinen ulkoasu muokataan kaikkien toiminnallisuuden hyväksymisen jälkeen. Lisäksi käyttöliittymään on tarkoitus lisätä karttasivu.



Kuva 13. Kojekaapin ovi, HMI ja pursotinvahdi.

Kuvassa 13 vasemmassa reunassa näkyy pursotinvahdi. Sen yläpuolella on magneettiventtiili, jolla pursotinvahdi voi katkaista instrumentti-ilman sisään virtauksen. Alapuolella näkyy avain, jolla pursotinvahdin voi ohittaa, esimerkiksi oven avaamista varten. Ohitettaessa ilman sisäänvirtaus katkaistaan, mutta pursotinvahdi ei katkaise sähkövirtaa paine-eron hävitessä.

5.5 Kokeet testikaasulla

Toiminta varmistettiin testikaasulla, jonka bentseenipitoisuus on 5 ppm. Ohjelman viimeistelyn ajoitusten suhteen pääsi tekemään vasta tässä vaiheessa. Ennen testikaasun käyttöä ei vielä ollut tietoa siitä, missä vaiheessa analysaattori antaa lopullisen tuloksen. Testiajossa selvisi, että analysaattori antaa tuloksen noin 40 s syklin päättymisen jälkeen.

Toinen seikka mikä varmistettiin testikaasulla, oli ilmakehän riittävä kaasunvaihto venttiilin ja analysaattorin välillä. Laite toimi niin kuin pitää, eli laite ilmoitti testikaasun mukaisen tuloksen oikean venttiilin kohdalla, ja tulos palasi normaaliksi seuraavan näytevirtauksen kohdalla, josta sisään virtasi puhdasta ilmaa. Kuvassa 14 näkyy kuvankaappaus pidemmästä testiajosta laihemmalla kaasuseoksella (testikaasun säästämiseksi). Testin aikana vieressä käytettiin liuottimia työkalujen puhdistukseen, joka näkyy 0,1 ppm taustakohinanä. Tämä varmisti myös sen, että aistein voimakkaasti havaittavatkin määrät haihtuvia hiilivedyjä suodattuivat melko hyvin, eikä tulos muuttunut sen vuoksi merkittävästi. Muut haihtuvat hiilivedyt vaikuttavat väistämättä tulokseen suurina pitoisuuksina.



Kuva 14. Kuvankaappaus näytesyklin testiajosta

6 Yhteenveto

Opinnäytetyössä rakennettiin vanhan kaasukromatografian korvaava analyysilaitteisto, joka pohjautuu PID-tekniikkaan. Analysaattori valvoo ilman bentseenipitoisuutta prosessialueella. Varsinainen analysaattori ostettiin valmiina, mutta siihen rakennettiin näytevirran ohjaus kahdeksasta eri pisteestä. Näyte ohjataan analysaattorille syklisesti yksi kerrallaan.

Osien valinnalla on suuri merkitys sekä laitteen toimivuudelle että turvallisuudelle. Laitteen teoreettista toimintaa läpi käydessä osien mitoitus osoittautui kriittiseksi laitteen luotettavalle toiminnalle. Ennen oikeanlaisten osien tilausta täytyi miettiä asiaa virtausmekaniikan kannalta. Käyttöturvallisuuden suhteen tärkeää on ATEX-luokitus. Koska laitteen perimmäinen tarkoitus on työturvallisuuden varmistaminen, toimivuus on myös turvallisuuskysymys.

Ohjelmoinnissa oli haasteita, varsinkin Modbus-väylän kanssa. Ongelmat kuitenkin ratkottiin aikataulun puitteissa. Samalla yksi väyläprotokolla tuli tutuksi bittitasolta alkaen. Henkilökohtaisesti opin logiikkaohjelmoinnista paljon uutta tätä projektia tehdessä. Omien funktioiden, ohjelmien ja funktioblokkien luominen oli jossain määrin tuttua, mutta tässä niiden rakenteita joutui pohtimaan tarkemmin.

Laite ehdittiin rakentaa valmiiksi testikuntoon, ja konseptin toimivuus osoitettiin. Tämä raportti keskittyi suunnittelu- ja rakennusvaiheeseen. Lisätesteille, pienille parannuksille ja laitteiston lopulliselle asennukselle on varattu aikaa hieman pidemmälle. Esimerkiksi kojekaapin ovi vaatii lisää lukkoja, koska oven alareuna vuosi hieman. Käyttökokemus vasta kertoo mm., aiheuttaako prosessialueella huoltotöissä esiintyvät muut haihtuvat hiilivedyt ongelmia analysaattorin bentseeniselektiivisyydelle. Jos ongelmia esiintyy vain erikoistilanteissa, turhienkin hälytysten kanssa voidaan tulla toimeen. Analysaattori reagoi testeissä riittävän nopeasti, jolloin eri mittapisteiden tulokset eivät vaikuta merkittävästi toisiinsa.

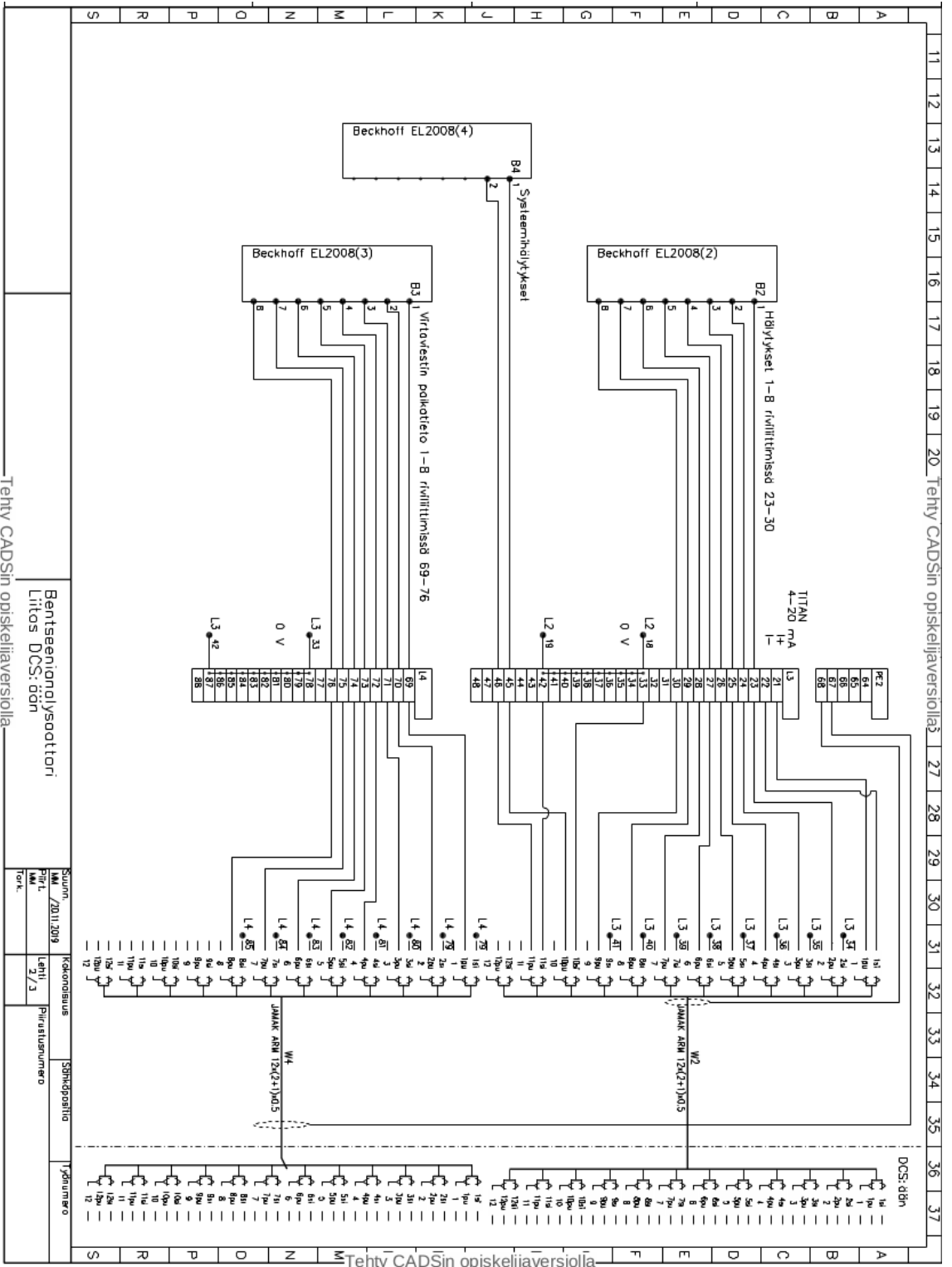
Kun laite osoittautuu käytössä luotettavaksi, se on helppo kopioida muihinkin kohteisiin sopivaksi kustannustehokkaaksi tuotteeksi. Tarkoitus on luoda tämän työn lisäksi kat-

tava dokumentointi, jonka avulla huollot ja tarvittaessa uuden vastaavan laitteen rakentaminen onnistuu. Dokumentteja tarvitaan myös esimerkiksi ATEX-pöytäkirjojen laadintaan.

Lähteet

- 1 2000. Finlex 716/2000, <<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2000/20000716#P19>>. 3.8.2000. Luettu 6.10.2019.
- 2 Aaljoki, Kari. 2012. Kaasukromatografisista mittauksista, Luentokalvo, Borealis 2012.
- 3 Laird, C.K.; edited by Verhappen, I. 2010. Instrumentation Reference Book, Chapter 25: Chemical Analysis: Gas Analysis. Elsevier Inc.
- 4 2013. The PID Handbook, Theory and Applications of Direct-Reading Photoionization Detectors. RAE Systems Inc. Honeywell.
- 5 Niskanen, Jouni. 2003. Kvanttimekaniikka II. Limes ry.
- 6 2016. TITAN, 875 Benzene Monitor, Instrument User Manual V1.1-R. ION Science Ltd.
- 7 2014. ATEX-direktiivi, 2014/34/EU.
- 8 F.A. Holland and R. Bragg. 1995. Fluid Flow for Chemical Engineers, 2nd Edition. Elsevier Ltd.
- 9 Pistun, Yevhen & Lesovoy, Leonid. 2016. Calculation of Expansibility Factor of Gas at Its Flow Through an Orifice Plate with Flange Pressure Tappings, Energy Engineering and Control Systems, Volume 2, Number 2.
- 10 Paakkari, Timo. 1997. Termofysiikka, Limes ry.
- 11 Reader-Harris, Michael. 2015. Orifice Plates and Venturi Tubes. Springer.
- 12 Arvio, Ville. 2017. Numeeriset yhtälönratkaisumenetelmät, Matematiikan pro gradu, <<http://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-201801231313>>. Luettu 6.10.2019.
- 13 Honkonen, Juha. 2003. Fysiikan matemaattiset menetelmät I. Limes ry.
- 14 Gyllenberg, Mats; Piironen Petteri & Ola, Petri. 2006. Tavalliset differentiaaliyhtälöt, luentomoniste. Helsingin yliopisto, Matematiikan ja tilastotieteen laitos.

- 15 2018. Opinion on scientific evaluation of occupational exposure limits for Benzene, Committee for Risk Assessment RAC, ECHA/RAC/ O-000000-1412-86-187/F. <https://echa.europa.eu/documents/10162/13641/benzene_opinion_en.pdf/4fec9aac-9ed5-2aae-7b70-5226705358c7>. 9.11.2018. Luettu 3.12.2019.
- 16 2007. Wikipedian havainnekuva samasta aiheesta. <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-485#/media/File:RS-485_waveform.svg>. 27.1.2007. Luettu 29.10.2019.
- 17 2019. Modbus-väylän rakennetta kuvaileva verkkosivusto, <<https://www.modbus-tools.com/modbus.html>>. Luettu 29.10.2019.
- 18 2019. ASCII merkistötaulukko. <<https://www.rapidtables.com/code/text/ascii-table.html>>. Luettu 29.10.2019.



Tehty CADSin opiskelijaversiolla

Bentseenianalyysoittori
Litos DCS: dön

Suunn.	MM /2011/2019	Kokonaisuus	SBHrkkoasitio	Yönnunero
Piirri	MM	Lehti	Piirustunnumero	
Tekn.	3 / 3			

Tehty CADSin opiskelijaversiolla