

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Eetu Kotro

PROSESSIAUTOMAATIO
PINNANKORKEUSMITTAUKSEN KOELAITTEISTOISSA

Ohjaaja: DI Antti Räsänen
Tarkastajat: Professori Juhani Hyvärinen
DI Antti Räsänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Eetu Kotro

Prosessiautomaatio pinnankorkeusmittauksen koelaitteistossa

Diplomityö
2014

86 sivua, 1 taulukko ja 31 kuvaa

Tarkastajat: Professori Juhani Hyvärinen
DI Antti Räsänen

Hakusanat: BWR, pinnankorkeus, kelpoistaminen, prosessiautomaatio, LabView
Keywords: BWR, level measurement, qualification, process automation, LabView

Pinnankorkeuden tunteminen kiehutusvesireaktorin painesäiliössä on erittäin tärkeää sen turvallisuusvaikutusten takia. Pinnankorkeutta mitataan vesipatsaiden korkeutta havaitsevien paine-eromittausten avulla. Säteilyturvakeskuksen YVL-ohjeiden mukaan turvallisuuteen vaikuttavien mittausten täytyy noudattaa moninkertaistus- ja erilaisuusperiaatteita. Yleensä erilaisuusperiaatetta on toteutettu käyttämällä erityyppisiä paine-eromittareita, mutta erilaisella fysikaalisella toimintaperiaatteella oleva mittaus olisi parempi ja toteuttaisi paremmin erilaisuusperiaatetta. Uimurikytkin olisi tällainen fysikaalisesti eri periaatteeseen perustuva pinnankorkeuden mittauslaite.

Ydinvoimalaan tarkoitettu teknologia tulee kelpoistaa riippumattoman tahon toimesta ennen käyttöönottoa. Kelpoistamiskokeita varten Lappeenrannan teknillisen yliopiston Ydinturvallisuuden tutkimusyksikköön rakennettiin vuosina 2011–2013 kaksi koelaitteistoa. Näillä koelaitteistoilla tutkittiin uimurikytkimien toimintaa ja ominaisuuksia erilaisissa kiehutusvesireaktorin käyttötilanteissa.

Koelaitteistot tarvitsivat toimiakseen automaatiojärjestelmät, jotka suunniteltiin pääosin noudattamalla suunnittelun elinkaarimallia sekä automaatiosuunnittelun sisältökokonaisuuksia. Automaatiojärjestelmien suunnittelu aloitettiin määrittelemällä koejärjestelyjen asettamat vaatimukset, jonka jälkeen tehtiin teknologiavalinnat. Seuraavaksi suunniteltiin automaatiojärjestelmien logiikkaohjelmistot, joiden kuvaukseen tämä työ pääasiassa keskittyy. Logiikkaohjelmistot toteutettiin graafisella National Instruments LabView -ohjelmointikielellä. Logiikkaohjelmistojen tuli hoitaa tiedonkeruuta, käyttöautomaatiota, turvallisuustehtäviä sekä kokeisiin liittyviä erikoistehtäviä. Ohjelmistot saatiin esikokeiden aikana toimimaan halutusti, ja varsinaiset kokeet voitiin suorittaa ilman merkittäviä ongelmia.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Technology
Master's Degree Programme in Energy Technology

Eetu Kotro

The process automation systems of test rigs used to test level measurements

Master's Thesis
2014

86 pages, 1 chart and 31 pictures

Examiners: Professor Juhani Hyvärinen
M.Sc. (Tech.) Antti Räsänen

Keywords: BWR, level measurement, qualification, process automation, LabView

Knowledge of the water level inside the reactor pressure vessel of a boiling water reactor (BWR) is vital for reactor safety. The water level is usually measured using differential pressure measurements that detect the height of water columns. According to the Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority's Regulatory Guides on nuclear safety (YVL) all measurements that have safety implications, shall apply the principles of redundancy and diversity. Generally the principle of diversity is applied using different brands or types of differential pressure transducers, but measurements based on different principle of operation would fit the principle of diversity better. A float switch would fulfill the specification of different physical principle of operation.

Technology intended to be used in nuclear power plants must be qualified by an independent operator. In order to perform the qualification tests, two test rigs were constructed between 2011 and 2013 at Nuclear Safety Research Unit of Lappeenranta University of Technology. The characteristics and operational performance of the level switches were studied with the test rigs in different operating conditions of a BWR.

For the operation of the test rigs automation systems were needed. These were designed according to the life cycle model of design and contents of automation design process. Design of the systems was started by defining requirements imposed by the different test procedures. Then decision about the automation technology was made. In the next phase the measurement and control programs were designed. The main topic of this Master's Thesis is the description of these programs. The measurement and control programs were built using National Instruments graphic LabView-code. These measurement and control programs had to be able to handle data acquisition, process automation, safety functions and some special tasks during multiple test procedures. After pretests these programs functioned as planned and the actual tests could be carried out without any major problems.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston Ydinturvallisuuden tutkimusyksikössä. Haluan kiittää ohjaajaani ja työtoveriani DI Antti Räsästä avusta ja tuesta sekä tarvittaessa erittäin nopeasta kommentoinnista koko diplomityöprosessin aikana. Haluan myös kiittää professori Juhani Hyväristä kommentoinnista ja ohjauksesta.

Lisäksi haluan esittää kiitokseni koko Ydinturvallisuusyksikön sekä Ydinvoimatekniikan laboratorion henkilökunnalle avusta työn eri vaiheissa. Haluan esittää myös kiitokset koelaitteistojen tilaajan edustajille kommenteista.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja sukulaisiani tuesta koko opiskeluajan.

Lappeenranta 17.11.2014

Eetu Kotro

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	2
1 JOHDANTO	4
1.1 Työn tarkoitus	5
1.2 Työn rakenne	5
2 KOHO-TUTKIMUKSEN TAUSTAA	6
2.1 Uimurikytkimien kelpoistamiskokeet	11
3 AUTOMAATIOSUUNNITTELUN PERUSPERIAATTEITA	15
3.1 Käyttö- ja turvallisuusautomaatiojärjestelmät	15
3.2 Automaatiojärjestelmän suunnittelun elinkaarimalli	16
3.3 Automaatiojärjestelmän suunnittelun sisältö	19
3.3.1 Lähtötiedot ja vaatimukset	21
3.3.2 Automaatiojärjestelmän tiedot ja toiminnot	22
3.3.3 Teknologiavalinnat ja toteutus	23
3.3.4 Käytön ja ylläpidon suunnittelu	24
4 KOHO-KOELAITTEISTOT JA NIIDEN AUTOMAATIOJÄRJESTELMIEN VAATIMUKSET	25
4.1 Matalapainekoelaitteisto	25
4.1.2 Matalapainekoelaitteistojen automaatiojärjestelmän vaatimukset	27
4.2 Korkeapainekoelaitteisto	31
4.2.2 Korkeapainelaitteiston automaatiojärjestelmän vaatimukset	33
4.3 Koelaitteistojen automaatiojärjestelmien yleiset vaatimukset	36
4.3.1 Mittaustarkkuusvaatimukset	36
4.3.2 Turvallisuusvaatimukset	38
4.4 Koelaitteistojen automaatiojärjestelmien teknologiavalinnat	39
4.4.1 Lämpötilamittaukset	39
4.4.2 Paine-, paine-ero- ja pinnankorkeusmittaukset	40
4.4.3 Virtausmittaukset	41
4.4.4 Pumppujen, lämmitysvastusten ja venttiilien ohjaukset	42
4.4.5 Tiedonkeruu- ja prosessiohjauslaitteet	44
5 KOELAITTEISTOJEN MITTAUS- JA AUTOMAATIO-OHJELMISTOT	46
5.1 Matalapainekoelaitteiston mittaus- ja automaatio-ohjelmisto	47
5.1.1 Ohjelmiston tehtävien ja ominaisuuksien määrittely	47
5.1.2 Ohjelmiston toteutus	49
5.1.3 Automaatiojärjestelmän toiminnan testaus ja varsinaiset kokeet	63
5.2 Korkeapainekoelaitteiston mittaus- ja automaatio-ohjelmisto	65
5.2.1 Ohjelmiston tehtävien ja ominaisuuksien määrittely	66
5.2.2 Ohjelmiston toteutus	67
5.2.3 Automaatiojärjestelmän toiminnan testaus ja varsinaiset kokeet	77
6 YHTEENVETO	79
LÄHTEET	82

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

δ	muuttujan virhe	
Δp	paine-ero	[Pa]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
a	virhe	
g	maan vetovoiman kiihtyvyys	[m/s ²]
h	pinnankorkeus, korkeusero	[m]
L	korkeusero	[m]
q	useiden muuttujien funktio	
s	pinnankorkeus	[m]
$s_{x_i}^2$	variassi	
t	aika	[s]
T	lämpötila	[°C], [K]
v	muutosnopeus	[m/s]
x	muuttuja	

Alaindeksit

a	alaraja
i	muuttuja
m	mitattu
s	höyry
t	impulssiputken vesi
w	vesi
x	laskettava
y	yläraja

Lyhenteet

A/D	Analogi/Digitaali
BWR	Boiling Water Reactor, kiehutusvesireaktori
cFP	compact FieldPoint
I/O	Input/Output
IEC	International Electrotechnical Committee
kp	korkeapaine
LV	LabView
MAX	Measurement & Automation Explorer
mp	matalapaine
NI	National Instruments
PACTEL	Parallel Channel Test Loop
PI	Prosessi & Instrumentointi
PID	Proportional-Integral-Derivative
S/s	mittausta sekunnissa
SDDA	Set Dynamic Data Attributes
STUK	Säteilyturvakeskus
SV	Shared Variable
SVE	Shared Variable Engine
.vi	virtual instrument
YTY	Ydinturvallisuuden tutkimusyksikkö
YVL	ydinvoimalaitos

1 JOHDANTO

Kiehutusvesilaitoksissa höyry tuotetaan reaktoripainesäiliössä. Siten reaktoripainesäiliössä on sekä jäähdytettä että höyryä toisin kuin painevesilaitoksissa, joissa reaktoripainesäiliö on täynnä jäähdytettä ja höyry tuotetaan erillisissä höyrystimissä. Kiehutusvesilaitoksissa reaktorin pinnankorkeuden tunteminen on tärkeää, koska pinnan heilahtelut kumpaankaan suuntaan eivät ole suotavia. (Kondo et al, 2012, 137–138).

Jos vettä kiehuu höyryksi enemmän kuin syöttövettä syötetään reaktoriin, on vaarana että polttoainesauvat paljastuvat, mikä johtaa lämmönsiirtokriisiin ja mahdollisesti polttoaineen sulamiseen. Toisaalta pinnankorkeuden ollessa liian suuri, voi höyryn mukaan tempautua niin paljon vesipisaroita että ne pääsevät vedenerottimien ja höyrynkuivaimien läpi aiheuttaen vahinkoa turbiineille. (Ibid, 140).

Pinnankorkeus ja varsinkin sen alaraja vaikuttaa siten oleellisesti reaktorin turvallisuuteen. Pinnankorkeuden laskiessa liian alas, täytyy laitoksen turvallisuusjärjestelmien suorittaa pikasulku sekä käynnistää hätäjäähdytyspumput jäähdytyksen turvaamiseksi. Pinnankorkeuden turvallinen alaraja on ennalta määritelty, joten turvallisuusjärjestelmien laukaisuun tarvitaan ainoastaan tieto rajan alituksesta, ei kuinka kaukana rajasta pinta on. (Ibid, 140).

Perinteisesti reaktorin pinnankorkeus on mitattu vesipatsaiden korkeuseroa havainnoivan paine-eromittauksen avulla. Paine-eromittaukset on moninkertaistettu, mutta ne kaikki toimivat samalla fysikaalisella toimintaperiaatteella. Säteilyturvakeskuksen YVL (ydinvoimalaitos) -ohjeen B.1 mukaan turvallisuuteen vaikuttavien automaatiokomponenttien suunnittelussa on noudatettava erilaisuusperiaatetta (STUK 2013a, §5237). Yhtenä vaihtoehtona pinnankorkeuden turvarajojen varmistamiseksi on esitetty paine-eromittaukselle rinnakkaisten uimurikytkimien käyttöä.

YVL-ohjeiden B.1 ja E.7 mukaan turvallisuuteen liittyvät automaatiolaitteet tulee kelpoistaa ja kelpoistus toteuttaa varsinaisesta suunnittelusta riippumattoman organisaation toimesta (STUK 2013b, §351 & STUK 2013a, §362). Lappeenrannan teknillisen

Yliopiston (LUT) Ydinturvallisuuden tutkimusyksikkö (YTY) on tehnyt kokeellista ydinturvallisuustutkimusta lähes neljänkymmenen vuoden ajan. Yksikölle on siten kertynyt kokemusta erilaisten ydinvoimalaitosten turvallisuuteen vaikuttavien tekijöiden ja komponenttien testauksesta sekä testaukseen tarvittavien koelaitteistojen rakennuksesta. Uimurikytkimien toiminnan testaaminen toteutettiin kahdella koelaitteistolla vuosina 2011–2013.

1.1 Työn tarkoitus

Tämän diplomityön tarkoituksena on esitellä uimurikytkimien testaukseen käytetyt koelaitteistot ja erityisesti koelaitteistojen ohjausta ja tiedonkeruuta varten rakennetut automaatiojärjestelmät. Lisäksi työssä esitetään automaatiojärjestelmien suunnitteluun liittyvää teoriaa ja sen soveltamista koelaitteistojen automaatiojärjestelmien suunnitteluun. Pääpaino työssä on koelaitteistoja varten suunnitelluissa ja National Instruments:in (NI) LabView (LV) -koodilla toteutetuissa tiedonkeruu- ja prosessinohjausohjelmistoissa.

1.2 Työn rakenne

Tässä luvussa on esitetty johdantona tiivistelmä tutkimuksen taustoista ja esitelty työn tarkoitus. Luvussa 2 kerrotaan tutkimuksen, jota varten koelaitteistot rakennettiin, taustasta sekä laitteistoilla tehdyistä kokeista. Luku 3 sisältää automaatiojärjestelmän suunnittelun teoriaa, josta esitellään sekä turvallisuusautomaatiojärjestelmän suunnittelun elinkaarimallia että yleisen automaatio suunnittelun sisältöä. Luku 4 sisältää kuvauksen toteutetuista matala- ja korkeapainekoelaitteistoista sekä kuvauksen, kuinka automaatio suunnittelun sisältövaiheita toteutettiin koelaitteistojen automaatiojärjestelmien suunnittelussa. Näistä esitellään erityisesti suunnittelun alkuvaiheessa määritellyt automaatiojärjestelmien vaatimukset ja teknologiavalinnat. Luku 5 esittelee työn pääsisällön eli koelaitteistojen logiikkaohjelmiston suunnittelun ja toteutuksen. Lisäksi luvussa kerrotaan lyhyesti automaatiojärjestelmän testauksesta ja toiminnasta varsinaisten kokeiden aikana. Luku 6 sisältää yhteenvedon ja parannusehdotukset koelaitteistojen automaatiojärjestelmiin tulevaisuudessa mahdollisesti tapahtuvia kokeita varten.

2 KOHO-TUTKIMUKSEN TAUSTAA

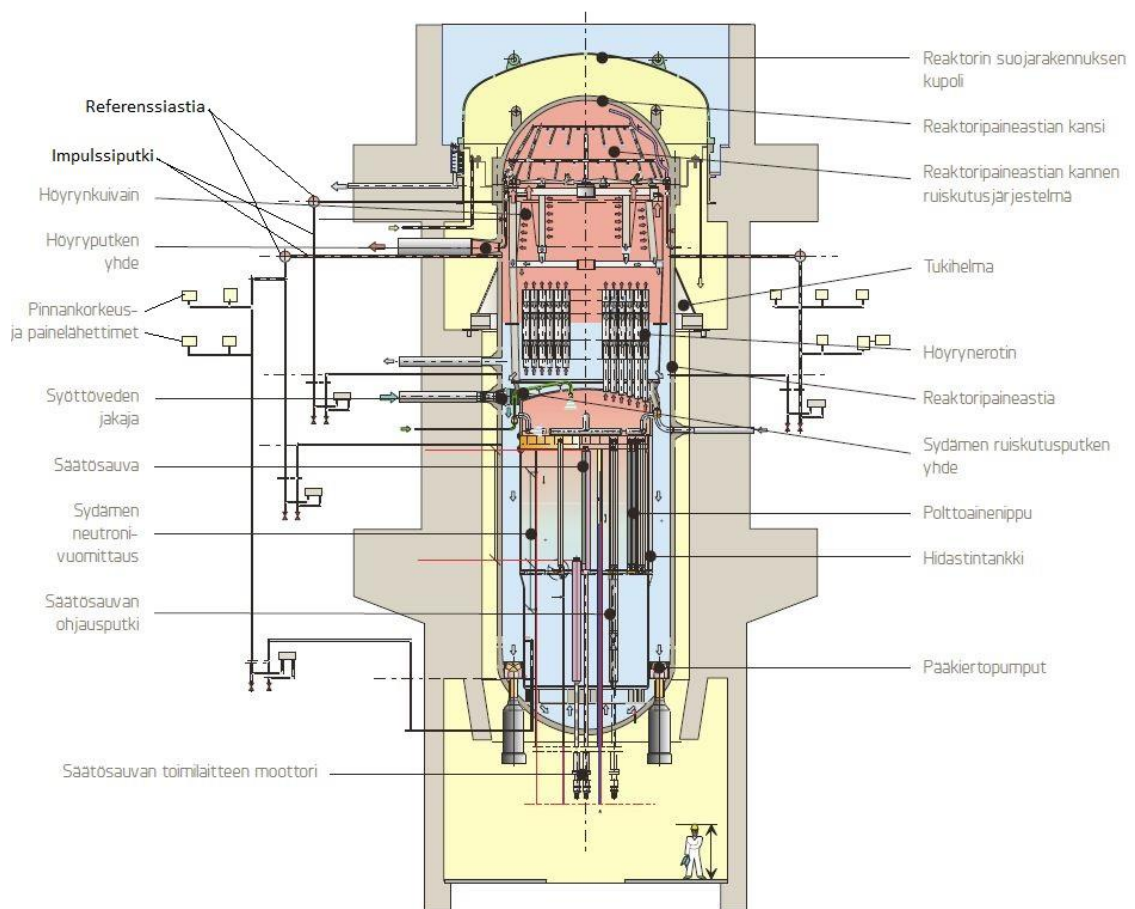
Kiehutusvesilaitoksen pinnankorkeuden tunteminen varsinkin alemman turvarajan alueella on laitoksen turvallisuuden kannalta ehdottoman tärkeää. Pinnankorkeuden mittausta tarvitaan sekä ydinvoimalaitoksen käyttöautomaation että suojausautomaation toimintoihin. Normaalikäyttöön tarvitaan jatkuva pinnankorkeustieto, jonka perusteella pintaa säädetään syöttöveden virtausta muuttamalla (Kondo et al, 2012, 140–141). Pinnan laskiessa liian alas täytyy suojausautomaation laukaista pikasulku ja käynnistää hätäjähdytys polttoainevaurioiden estämiseksi.

Ydinvoimalaitoksen suojausautomaation suunnittelua ja toteutusta säätelevät STUK:n YVL-ohjeet, joiden mukaan suojausautomaation tulee olla käyttöautomaatiosta erillinen järjestelmä. Näiden ohjeiden mukaisesti turvallisuuteen vaikuttavien komponenttien tulee noudattaa sekä moninkertaisuus- että erilaisuusperiaatetta (STUK 2013a, §5237). Erilaisuusperiaate on määritelty Valtioneuvoston asetuksen ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta 2 §:ssä seuraavasti: ”Erilaisuusperiaatteella tarkoitetaan toimintojen varmistamista eri toimintaperiaatetta käyttävillä tai muuten keskenään erilaisilla järjestelmillä tai laitteilla, joista kukin erikseen pystyy toteuttamaan toiminnon.” Erilaisuusperiaatetta voidaan siten toteuttaa eri tavoilla. Kiehutusvesilaitoksen pinnankorkeuden mittauksessa se on nykyisin yleisesti toteutettu käyttämällä erityyppisiä tai eri valmistajien paine-eromittareita.

Kuvassa 1 on esitetty kiehutusvesilaitoksen reaktoripainesäiliön halkileikkaus, johon on merkitty osa paine-eromittauksista ja niihin liittyvistä apujärjestelmistä. Paine-eromittarit on yhdistetty reaktoripainesäiliöön impulssiputkistoilla, jotta mittarit voidaan sijoittaa suojarakennuksen ulkopuolelle. Suojarakennuksen sisällä laitteiden käytönaikaiset ympäristöolosuhteet olisivat huomattavasti vaativammat. Lisäksi sijoitus ulkopuolelle mahdollistaa laitteiden huollon myös laitoksen tehoajon aikana. (Laukkanen, puhelinhaastattelu 14.11.2014).

Mittaukset on toteutettu referenssihaarojen avulla. Paine-eromittauksien alemmat impulssiputket ovat yhteydessä reaktorin vesitilaan ja ylemmät referenssihaarojen

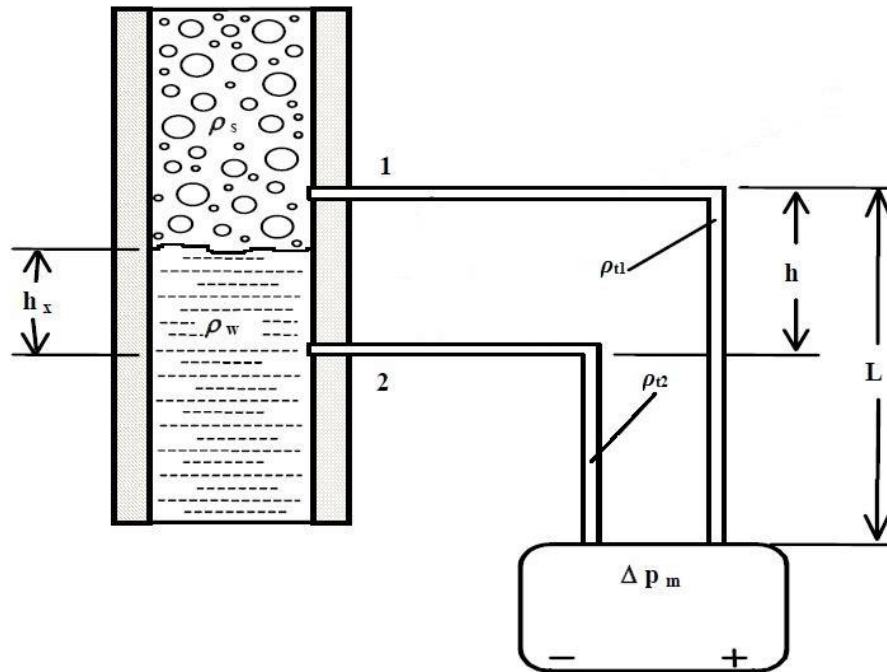
välityksellä reaktoripainesäiliön höyrytilaan. Höyrytilaan menevät impulssiputket on varustettu referenssiastioilla eli lauhdutuskammioilla, joista alaspäin putket on täytetty vedellä. Referenssiastioissa höyrytilan höyry lauhtuu ja pitää impulssiputken vesimäärän vakiona ylimääräisen lauhteen valuessa takaisin reaktoriin. Reaktoripainesäiliö on varustettu kuvan 1 mukaisesti usealla mittauksella, joista karkeapinnan mittauksiksi kutsutut mittaavat pinnankorkeutta laajemmalta alueelta ja hienopinnan mittaukset pienemmältä alueelta, jotta mittausepävarmuuksia voidaan pienentää. (Laukkanen, puhelinhaastattelu 14.11.2014).



Kuva 1. Kiehuvesilaitoksen reaktoripainesäiliön poikkileikkaus (mukaillen TVO 2007, 12).

Reaktorin pinnankorkeusmittauksia tarvitaan siis sekä normaalikäyttöön että turvatoimintoihin. Pinnankorkeustietoa varten tarvittava paine-ero saadaan mittaamalla referenssihaaran vesipatsaan ja reaktorin pinnankorkeuden aiheuttaman hydrostaattisen paineen erotusta. Ylemmässä impulssiputkessa veden määrä pysyy siis vakiona, joten

paine-ero muuttuu ainoastaan alemman impulssiputken hydrostaattisen paineen mukaan. Alemman impulssiputken hydrostaattiseen paineeseen vaikuttaa suoraan mitattavan säiliön pinnakorkeus kuvan 2 mukaisesti. Mitatusta paine-erosta saadaan pinnakorkeustieto laskemalla yhtälöstä 1, kun lisäksi mitataan vesitilan ja referenssihaaran lämpötilat ja paineet. Lämpötilojen ja paineiden perusteella saadaan referenssihaarojen ja säiliön vesien sekä säiliössä olevan höyryn tiheydet veden ja höyryn termodynaamisten ominaisuuksien taulukosta. (Semken 2006, 34–36).



Kuva 2. Pinnankorkeusmittauksen toteutus referenssihaarojen avulla (mukaillen Semken 2006, 34).

$$h_x = \frac{\Delta p_m - gL(\rho_{t1} - \rho_{t2}) - gh(\rho_{t2} - \rho_s)}{g(\rho_s - \rho_w)} \quad (1)$$

Kuvassa 2 ja yhtälössä 1 h_x on laskettava pinnankorkeus, Δp_m on mitattu paine-ero, g on maan vetovoiman kiihtyvyyys, h on referenssihaarojen korkeusero, L on yläyhteen ja mittarin välinen korkeusero, ρ_{t1} on ylemmän ja ρ_{t2} on alemman impulssiputkien veden tiheys, ρ_s on säiliön höyryn tiheys sekä ρ_w on säiliön veden tiheys.

Pinnankorkeusmittausten perusteella laukaistavista turvatoiminnoista on esitetty esimerkkejä taulukossa 1. Taulukossa esitetyt laukaisurajat ovat myös kyseisessä

järjestyksessä voimalaitoksella eli L4 on alin ja H2 ylin laukaisuraja. Taulukossa H merkitsee liian korkean ja L liian matalan pinnankorkeuden laukaisurajoja.

Taulukko 1. Tyypillisiä pinnankorkeusmittausten laukaisemia turvatoimintoja kiehutusvesilaitoksessa (Laukkanen, puhelinhaastattelu 14.11.2014).

Laukaisuraja	Laukaistava turvatoiminto
H2	<ul style="list-style-type: none"> - Reaktorin pikasulku - Reaktorin päävedensyötön ja hätäjähdytysveden syötön pysäytys - Höyrylinjojen eristys ja turbiinipikasulku
H1	Hälytys operaattoreille korkeasta pinnasta
L1	<ul style="list-style-type: none"> - Hälytys operaattoreille matalasta pinnasta - Pääkiertopumppujen pyörimisnopeuden pudottaminen minimiarvoon tehon pienentämiseksi
L2	<ul style="list-style-type: none"> - Reaktorin pikasulku - Korkeapaineisen hätäjähdytysjärjestelmän käynnistys - Pääkiertopumppujen pysäytys pikasulun tukemiseksi
L2T	<p>Nämä toiminnot vaativat matalan pinnan lisäksi muiden laukaisuehtojen täyttymistä</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reaktorin paineenalennus, jotta matalapainehätäjähdytystä voidaan käyttää - Hätäbooraus pikasulun epäonnistuessa
L3	<ul style="list-style-type: none"> - Hätäjähdytysjärjestelmien käynnistys
L4	<ul style="list-style-type: none"> - Reaktoripikasulku - Suojarakennuksen eristäminen ja suojarakennuksen ruiskutuksen käynnistys paineen hallitsemiseksi - Hätäilmastoinnin käynnistys - Dieselgeneraattoreiden käynnistys
L4T	<p>Nämä toiminnot vaativat matalan pinnan lisäksi muiden laukaisuehtojen täyttymistä</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pääkiertopumppujen alasajo ja pysäytys pikasulun epäonnistuessa - Reaktorin paineenalennus, jotta matalapainehätäjähdytystä voidaan käyttää

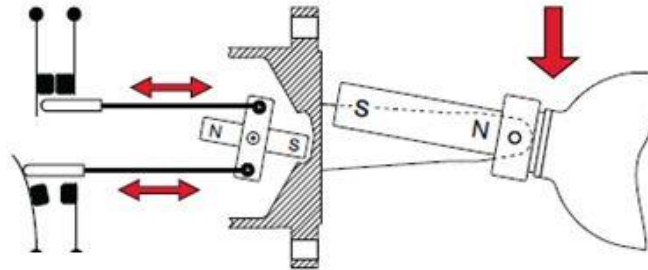
Koska näitä mittauksia käytetään turvatoimintoihin, on ne moninkertaistettu STUK:n vaatimusten mukaisesti. Turvallisuustoiminnon käynnistyspäätös tapahtuu rinnakkaisista mittauksista äänestämällä, eli esimerkiksi 2/4 logiikalla. Jos mitkä tahansa kaksi mittausta neljästä ilmoittavat laukaisuehdon täyttävän arvon, käynnistetään kyseessä oleva turvallisuustoiminto (Sanberg (toim.) 2004, 102). Kuten edellä on todettu, on pinnankorkeusmittausten erilaisuusperiaate yleensä toteutettu käyttämällä eri merkkisiä ja tyyppisiä paine-eromittareita. Kuitenkin, kuten erilaisuusperiaatteen määritelmäkin ensimmäiseksi sanoo, olisi parempi käyttää eri toimintaperiaatteen mukaisesti toimivia laitteita. Lisäksi on mahdollista, että reaktoria alas ajettaessa tai muussa nopeassa paineenlaskutilanteessa impulssiputkistoissa olevasta vedestä alkaa paineen alenemisen vuoksi erota lauhtumatonta kaasua (Tossavainen (toim.) 2000, 26). Kaasu jää kuplina impulssiputkiin aiheuttaen veden tiheyden pienenemistä, jolloin paine-eromittarit näyttävät pienempää paine-eroa ja siten korkeampaa pinnankorkeutta todelliseen tilanteeseen verrattuna. Impulssiputkien vesi voi myös kuohahtaa, jolloin veden pinta impulssiputkissa putoaa ja kestää jonkin aikaa ennen kuin putki täyttyy normaalitilaan.

Edellä mainituista syistä pinnankorkeuden turvarajojen tarkkailua varten on ehdotettu uimurikytkimiä. Uimurikytkimiä on käytössä joissakin maailman BWR-laitoksista, mutta niiden liittäminen jo toiminnassa olevaan reaktoriin ei ole yksinkertaista.

Uimurikytkimiä on erilaisia, mutta kaikissa on toimielin, joka liikkuu nesteeseen pinnan mukaan. Kytkin voi toimia kahdella tavalla, joko niin että pinnan olleessa alle rajan virtapiiri on auki ja pinnan noustua tarpeeksi virtapiiri sulkeutuu, tai niin että virtapiiri on kiinni pinnan olleessa alle rajan ja pinnan noustua virtapiiri avautuu. Muutos virtapiirissä voidaan saada aikaan mekaanisesti, esimerkiksi kohon varsi painaa kytkintä, tai magneetin avulla. Tällöin virtapiiri sulkeutuu magneetin tullessa oikeaan kohtaan, jossa sen magneettikenttä vetää kytkentäpinnat yhteen. Kytkimen toimintatavan valinta riippuu käyttökohteesta ja halutusta vikatilasta. Esimerkiksi ydinvoimalaitoksessa virtapiirin katkaiseva uimurikytkin on parempi valinta, sillä myös johtimen katkeaminen laukaisee turvallisuustoiminnon, joten vika ei jää piileväksi. Koelaitteistoilla tutkitut uimurikytkimet olivat tyyppiltään magneettisia, koska elektroninen kytkin voi vahingoittaa biologisen

suojan sisäpuolisen tilan säteilytasossa. Tällaisen magneettisen uimurikytkimen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3. (Mobrey 2012, 71).

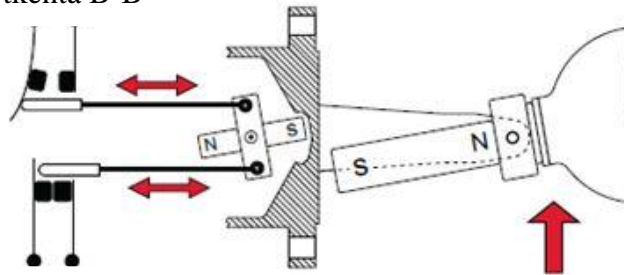
Kytkeä B-B



Kytkeä A-A

Uimuri ala-asennossa pinnan ollessa uimurin alapuolella, jolloin kytkeä A-A on auki

Kytkeä B-B



Kytkeä A-A

Uimuri yläasennossa pinnan ollessa uimurin yläpuolella, jolloin kytkeä A-A on kiinni

Kuva 3. Magneettisen uimurikytkimen toimintaperiaate (mukaillen Mobrey 2012, 71).

2.1 Uimurikytkimien kelpoistamiskokeet

YVL-ohjeen B.1 mukaan ydinvoimaloiden automaatiokomponentit ja erityisesti suojausautomaatioon liittyvät komponentit tulee kelpoistaa. Kelpoistaminen tehdään, jotta komponentin toimivuus varmistetaan käyttökohteessaan. Uimurikytkimien tapauksessa kelpoistustestit käsittivät sekä niiden laukaisunopeuden testaamisen että testit aiheettomien laukaisujen estämiseksi. Aiheettomat laukaisut eivät ole suotavia, koska usean kytkimen laukaisusta aiheutuu pikasulku äänestyslogiikan mukaisesti. Pikasulusta aiheutuu tuotantotappioita ja ne rasittavat reaktorin rakenteita.

Ennen kelpoistamiskokeita piti suunnitella uimurikytkimien mahdollinen sijoituspaikka voimalaitoksella, koska niitä on mahdoton asentaa suoraan reaktoripainesäiliöön. Vaikka suora asennus reaktoripainesäiliöön olisikin mittausten kannalta paras paikka, jo käytössä olevaan painesäiliöön on mahdotonta tehdä uusia reikiä. Uimurikytkimet on siten sijoitettava reaktoripiirin putkistoihin siten, että laukaisurajat ovat sopivilla kohdilla. Kun uimurikytkimien paikka oli kokeiden tilaajan toimesta päätetty, voitiin sen perusteella aloittaa koelaitteiden suunnittelu.

Uimurikytkimien kelpoistamista varten rakennettiin LUT:n Ydinturvallisuuden tutkimusyksikköön yksi erilliskoelaitte ja yksikön PACTEL-koelaitteistoon tehtiin lisäosa jatkokokeita varten. Erilliskoelaitte rakennettiin matalapainekokeita varten, ja PACTEL-koelaitteen lisäosa korkeapainekokeita varten. Nämä koelaitteet on esitetty kuvissa 4 ja 5.



Kuva 4. Matalapainekoelaitteen ensimmäinen versio (Laine 2011, liite 3, 2).



Kuva 5. Korkeapainekoelaitte (Laine 2013, liite 3, 1).

Ydinvoimalaitoksella uimurikytkimet toimivat normaalitilanteessa 70 bar:in paineessa ja 286 °C:een lämpötilassa. Matalapainekokeet suoritettiin 8 bar:in paineessa ja 170 °C:een lämpötilassa. Matalapainekoelaitteella testattiin erityisesti uimurikytkimien laukaisunopeutta. Laukaisunopeuskokeissa haluttiin ensisijaisesti selvittää, kuinka nopeasti uimurikytkimet reagoivat reaktoripainesäilön pinnakorkeuden muutoksiin sijoituspaikassaan sekä mitatun laukaisunopeuden pysyvyyttä kokeita toistettaessa. Kokeet suoritettiin pudottamalla pinnankorkeutta nopeasti, minkä jälkeen uimurikytkimien laukeamishetkeä verrattiin hetkelliseen mitattuun pinnankorkeuteen. Tarpeeksi nopea laukaisu on turvallisuustoimintojen käynnistymisen kannalta erittäin tärkeää. Korkeapainekoelaitteistolla tehdyt kokeet suoritettiin voimalaitosta vastaavissa olosuhteissa. Sekä korkea- että matalapainekoelaitteilla suoritettiin kokeita voimalaitoksen ylös- ja alasajotilanteita vastaavissa olosuhteissa. Ylösajotilannetta tutkittiin, koska

uimurikytkimien valitusta sijoituspaikasta johtuen oli mahdollista, että uimurikytkimien ja sijoituspaikkana olevan putkiston välille muodostuu suuri lämpötilaero, mikä on ristiriidassa ydinvoimalan käyttöluoepaehtojen kanssa. Alasajotilannetta tutkittiin, koska oli mahdollista, että reaktorin jäähtyessä uimurikytkimien kammio ei jäähdy tarpeeksi nopeasti. Tällöin voi paineen laskiessa kammioon muodostua höyrykuplia, jotka muuttavat veden tiheyttä ja siten saavat aikaan aiheettoman laukaisun. Nämä kokeet toteutettiin ajamalla koelaitteistoilla lämmitys- ja jäähdytysramppeja ennalta määritettyjen lämpötilanmuutosnopeuksien perusteella. Lisäksi aiheettomia laukaisuja testattiin tilanteissa, joissa virtaus sijoituspaikaksi valitussa putkessa muuttuu, tai uimurikytkimien kammioon kerääntyy lauhtumatonta kaasua. Nämä kokeet suoritettiin vaihtelemalla koelaitteistossa kulkevan veden virtausnopeutta sekä syöttämällä uimurikytkinkammioihin paineilmaa tai tyyppeä. Kahteen eri koelaitteistoon päädyttiin, koska pinnankorkeuden rajut muutokset eivät olisi onnistuneet korkeapainelaitteessa ja toisaalta kaikkiin tarvittaviin koetyyppeihin pystyvä korkeapainekoelaitte olisi ollut erittäin kallis toteuttaa. Koelaitteistot on esitetty tarkemmin luvussa 4. (Laine 2013a, 2, 10–24).

3 AUTOMAATIOSUUNNITTELUN PERUSPERIAATTEITA

Automaatiojärjestelmän suunnittelu koostuu erilaisista vaiheista, alkaen järjestelmän lähtötietojen ja vaatimusten määrittelyllä ja päättyen järjestelmän toteutukseen. Automaatiojärjestelmän suunnittelua voidaan tarkastella järjestelmän suunnittelun elinkaarimallin avulla, jota käytetään erityisesti turvallisuusautomaatiojärjestelmien suunnittelussa. Tässä luvussa esitellään käyttö- ja turvallisuusautomaatiojärjestelmien eroja, suunnittelun elinkaarimallia sekä automaatio suunnittelun yleistä sisältöä.

3.1 Käyttö- ja turvallisuusautomaatiojärjestelmät

Koko automaatiojärjestelmää suunniteltaessa on tärkeää erottaa käyttöautomaation ja turvallisuusautomaation vaatimukset toisistaan, vaikka osa järjestelmistä on hyvin samankaltaisia sisältäen yleensä mittaavan instrumentin, logiikkajärjestelmän ja toimintoa toteuttavan osan. Teollisuudessa käyttö- ja turvallisuusautomaatio voidaan toteuttaa saman logiikkajärjestelmän avulla, mutta ydinvoimalaitoksilla tai muissa turvallisuuskriittisissä kohteissa tällainen ei ole säädöksen mukaan sallittua. (Goble & Cheddie 2005, 20).

Toiminnalliselta kannalta käyttö- ja turvallisuusautomaatiojärjestelmät eroavat merkittävästi, koska käyttöautomaatio pyrkii pitämään prosessin muuttujat halutuissa rajoissa jatkuvasti, mutta turvallisuusautomaatio toimii ainoastaan harvoin tapahtuvissa hätätilanteissa. Hätätilanteiden määrää pyritään pienentämään suunnittelemalla prosessit niin, että ne ovat normaaleissa käyttötilanteissa luontaisesti turvallisia, joten turvallisuusautomaatiolaitteet voivat olla hyvinkin pitkiä aikoja aktivoitumatta. Turvallisuusautomaation suunnittelussa pyritäänkin hyvin korkeaan luotettavuuteen, sillä turvallisuusautomaation virheellisiä toimintoja tai laitevikoja on vaikeampi havaita kuin dynaamisemman käyttöautomaation vikoja. (Ibid, 20–21).

Turvallisuusautomaatiolaitteet pyritään suunnittelemaan niin, että niiden vikaantuessa järjestelmä siirtyy turvalliseen tilaan. Esimerkiksi jonkin painesäiliön turvallisuusautomaatiojärjestelmän käyttämän suojausventtiilin tulisi vikaantuessaan avautua eikä jäädä kiinni-asentoon. Tällöin turvallisuustoiminto laukeaa prosessin kannalta

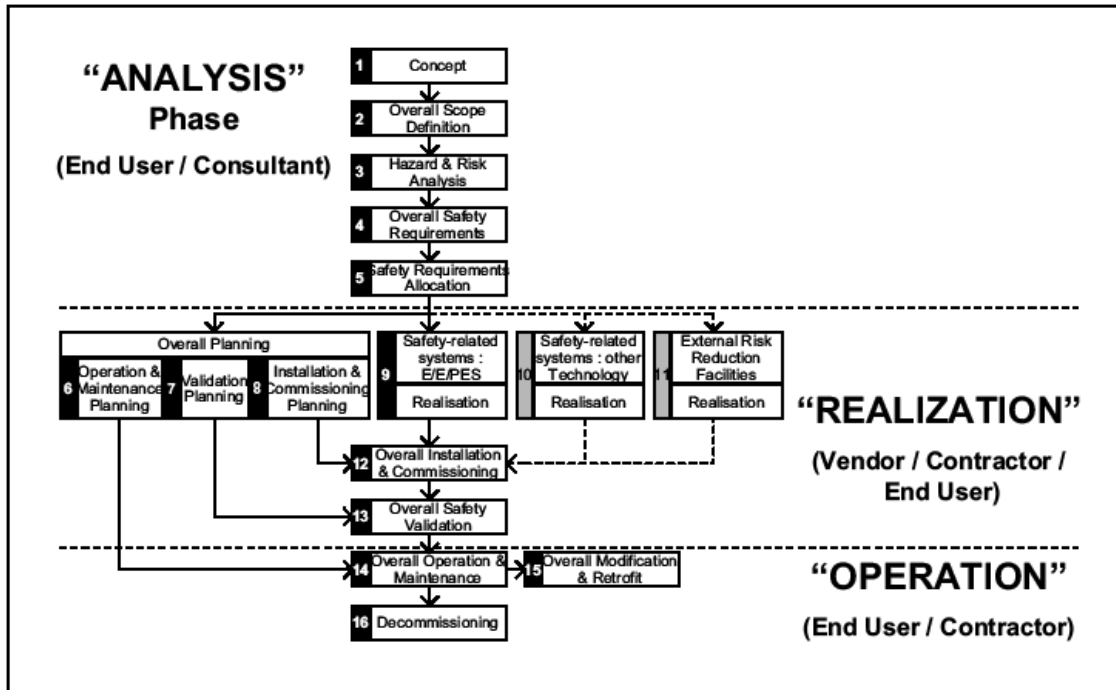
aiheettomasti, mutta olisi vaarallisempaa jättää prosessiin vikaantunut venttiili, joka ei toimisi tarvittaessa. Käyttöautomaatiolle vikaantuminen on sallitumpaa, koska se todennäköisesti huomataan nopeasti ja operaattorit pystyvät reagoimaan vaaraan välittömästi. Korkean turvallisuustason saavuttamiseksi turvallisuusautomaatiojärjestelmä on suunniteltava suunnittelun elinkaarimallin avulla. (Goble & Cheddie 2005, 21-22).

3.2 Automaatiojärjestelmän suunnittelun elinkaarimalli

Automaatiojärjestelmien suunnittelun elinkaarimalleja löytyy useista standardeista. Kuten aiemmin on mainittu, näitä suunnittelun elinkaarimalleja käytetään erityisesti turvallisuusautomaatiojärjestelmien suunnitteluun. Turvallisuusautomaatiojärjestelmän suunnittelun elinkaarimalleja löytyy International Electrotechnical Committee:n (IEC) standardeista. Näistä IEC 61508 on yleiskäyttöinen standardi, joka on tarkoitettu kaikille teollisuuden aloille käytettäväksi pohjana omille tarkemmille standardeille. IEC 61511 on prosessiteollisuuden tarpeisiin kehitetty standardi automaatioturvallisuudesta. Tässä työssä esitellään yleisstandardista IEC 61508 löytyvä turvallisuusautomaatiosuunnittelun elinkaarimalli. Lisäksi ydinturvallisuuden kannalta tärkeiden automaatiojärjestelmien suunnitteluun IEC on julkaissut standardit IEC 61513 turvallisuudelle tärkeiden järjestelmien suunnitteluun ja IEC 60880 ohjelmoitavien järjestelmien suunnitteluun. (Goble & Cheddie 2005, 3–4).

Turvallisuusjärjestelmien suunnittelun elinkaarimallin tarkoituksena on luoda työskentelytavat, joiden avulla saavutetaan laitteistojen korkea turvallisuustaso periaatesuunnittelun, varsinaisen suunnittelun, käytön ja huoltotoimenpiteiden aikana. Elinkaarimallin käytön tarkoitus on varmistaa, että turvallisuusnäkökohdat otetaan huomioon heti periaatesuunnittelun alussa, ja että niitä ei unohdeta missään vaiheessa ennen kuin turvallisuusautomaatiojärjestelmä poistetaan käytöstä. (Ibid, 5–6).

Elinkaarimalli voidaan karkeasti jakaa kolmeen päävaiheeseen: erittely/analyysi-, toteutus- ja käyttövaiheeseen. Nämä päävaiheet jakaantuvat pienempiin alivaiheisiin kuten IEC 61508 standardin elinkaarimallia esittävä kaavio kuvassa 6 näyttää.



Kuva 6. Turvallisuusautomaatiojärjestelmän suunnittelun elinkaarimalli IEC 61508:n mukaisesti (Goble & Cheddie 2005, 7).

Kuvasta nähdään, että elinkaarimallin ensimmäisessä vaiheessa toiminnot suoritetaan järjestyksessä lähtien konseptisuunnittelusta ja suunnittelukehysten yleisestä määrittelystä. Näiden vaiheiden jälkeen suunniteltavasta prosessista tulee olla yksityiskohtaista tietoa, esimerkiksi käytönaikaisista paineista, lämpötiloista, virtauksista, käytettävistä prosessi- ja hallintalaitteista sekä piirustuksia, jotta riskianalyysi voidaan tehdä. (Goble & Cheddie 2005, 6–8).

Riskianalysissä kartoitetaan kaikki prosessissa olevat turvallisuutta vaarantavat virhetilat ja niiden todennäköisyydet sekä näistä virhetiloista toteutuessaan aiheutuvat seuraukset. Tapauksesta riippuen virhetilojen todennäköisyydet ja niiden seuraukset voidaan määrittellä arvioiden perusteella, mutta nykyään käytetään yleensä analyttisiä menetelmiä tarkempien tuloksien saamiseksi. Virhetilan aiheuttamien seurauksien vakavuus ja toisaalta virhetilan todennäköisyys määrittelevät kyseiseen virhetilaan liittyvän riskin. Siten erittäin harvoin tapahtuva vakavia seurauksia aiheuttava virhetila voi olla riskiltään yhtä suuri kuin lievempiä seurauksia aiheuttava useammin tapahtuva virhetila. Näiden riskitietojen avulla määritellään, tarvitaanko menetelmiä, joilla riskiä voidaan pienentää. Jos riskiä täytyy pienentää, tulee pohtia, voidaanko riskiä vähentää prosessia muuttamalla, fyysisten

esteiden rakentamisella, hätätilanneohjeilla vai tarvitaanko prosessiin turvallisuustoimintoja. (Goble & Cheddie 2005, 8–9).

Osa turvallisuustoiminnoista voidaan hoitaa mekaanisilla tai muilla turvatoiminnoilla, esimerkiksi varoventtiileillä tai murtolevyillä. Loput turvallisuustoiminnot hoitaa turvallisuusautomaatiikka. Tämä määrittely tehdään elinkaarimallin analyysivaiheen viimeisessä osassa, jossa dokumentoidaan kaikki prosessiin tarvittavat turvallisuustoiminnot ja tarkennetaan niiltä vaadittavat ominaisuudet. (Ibid, 6, 8–9).

Seuraava päävaihe kuvassa 6 on toteutus, jossa edellisestä analyysivaiheesta poiketen toimintoja voidaan suorittaa samanaikaisesti. Ensimmäinen näistä toiminnoista on yleissuunnittelu, johon sisältyy käytön ja huollon suunnittelu, toimintojen validoinnin suunnittelu sekä laitteistokomponenttien asennuksen ja käyttöönotonsuunnittelu. Nämä suunnitteluvaiheet liittyvät sekä prosessin normaalikäytön suunnitteluun ja toteutukseen että turvallisuusjärjestelmien suunnitteluun. Tämän elinkaarimallin mukaan erityisesti turvallisuusjärjestelmien huolto, testaus ja validointi on suunniteltava tarkoin tässä vaiheessa. (Ibid, 6, 9).

Samaan aikaan yleissuunnittelun kanssa suunnitellaan ja toteutetaan yksityiskohtaisesti turvallisuusautomaatiikka ja muut turvallisuusjärjestelmät. Turvallisuusautomaatiikan suunnittelun toteutusvaiheen alussa valitaan sopivat laitteet ja komponentit mittalaitteille, logiikalle ja toimilaitteille. Lisäksi valitaan käytettävät komponentit muille turvallisuusjärjestelmille. Tässä vaiheessa voidaan laitteistoon lisätä vielä redundanttisuutta ja siten parantaa turvallisuutta. (Ibid, 9–10).

Kun suunnitteluvaiheet on suoritettu ja laitteet ja komponentit hankittu, asennetaan ne seuraavassa vaiheessa prosessiin, testataan ja otetaan käyttöön. Toteutusvaiheen viimeisessä osassa laitoksen yleinen turvallisuus validoidaan erilaisilla kyseistä teollisuuden alaa koskevilla testeillä, joissa tarkastetaan, että turvallisuusjärjestelmät toimivat oikein, ne on asennettu ohjeiden mukaisesti ja tarvittavat huolto- ja testaussuunnitelmat ovat oikein. Tämän vaiheen jälkeen laitos on käyttövalmis. (Ibid, 10–11).

Viimeinen päävaihe kuvassa 6 on käyttö. Käyttövaiheen aikana täytyy koko ajan valvoa, että turvallisuusjärjestelmät huolletaan ja koestetaan suunnitelmien ja suunniteltujen aikataulujen mukaan, jotta turvajärjestelmien piilevät viat löytyvät ajoissa. Lisäksi nämä toimenpiteet tulee dokumentoida ja varmistaa, että näiden toimenpiteiden jäljiltä järjestelmät ovat aina täydessä toimintakunnossa. Jos käytön aikana tehdään muutoksia, erityisesti turvajärjestelmiin, on muutosten suunnittelijan arvioitava muutoksen vaikutus järjestelmään ja palattava elinkaarimallin kohtaan, josta lähtien muutos alkaa vaikuttaa. Turvajärjestelmiin tehtävien muutosten on aina pidettävä turvallisuustaso vähintään samana kuin ennen muutosta. Myös laitteistojen käytöstä poisto on suunniteltava siten, että tarpeellinen määrä turvallisuusjärjestelmiä on toiminnassa, jotta käytöstäpoisto ja purkaminen voi edetä. Esimerkiksi paloilmalaitteiden tulee olla toiminnassa viimeiseen saakka. (Goble & Cheddie 2005, 11–12).

3.3 Automaatiojärjestelmän suunnittelun sisältö

Edellisessä kappaleessa automaatiojärjestelmien suunnittelua käsiteltiin erityisesti turvallisuusautomaatiojärjestelmien näkökulmasta ja elinkaarimallin avulla ajallisesti toisiaan seuraavien suunnittelutoimintojen avulla. Tässä kappaleessa käsitellään enemmän yleistä automaatio suunnittelua ja paneudutaan eri suunnitteluvaiheiden sisältöihin.

Automaatiojärjestelmän suunnittelun sisällöllisessä tarkastelussa tarkastellaan suunnittelun tuloksena syntyviä tietoja automaatiojärjestelmästä eri vaiheissa sekä näiden tietojen loogisia riippuvuuksia toisistaan. Näiden tietojen tuottamisen ajankohta ei ole niin tärkeässä asemassa kuin elinkaarimallissa. Koska eri suunnitteluvaiheiden tulokset riippuvat toisistaan, voidaan suurin osa eri suunnittelukokonaisuuksista suunnitella vain tietyssä järjestyksessä. Tämä järjestys noudattaa pääperiaatteiltaan edellä kuvattua elinkaarimallin alkuosaa eli analyysi- ja toteutusvaiheita. Tätä suunnittelukokonaisuuksien suhdetta toisiinsa ja niiden ajallista etenemistä elinkaarimallin mukaan esittää kuva 7. (SAS 2007, 18).

Elinkaari- vaihe ja etappi	Ongelma-avaruus		Ratkaisuavaruus			
	Lähtötiedot	Vaatimukset	Tiedot ja toiminnot	Teknologia- valinnat	Toteutus: SW, HW, sijoitus	Käyttö- ja ylläpitotapa
Esisuunnittelu Investointipäätös	■	■	◐	□	□	◐
Perussuunnittelu Sopimus	◐	■	■	■	◐	◐
Suunnitteluvaihe Toteutuslupa	◐	◐	◐	◐	■	■
Toteutusvaihe Toimitushyväksyntä	□	□	□	□	■	◐
Asennusvaihe Mekaaninen valmius	□	□	□	□	□	□
Toiminnallinen testaus Luovutus	□	□	□	□	□	◐

Kuva 7. Automaatiosuunnittelun sisältökokonaisuudet elinkaarimallin eri vaiheissa (SAS 2007, 19).

Kuvassa 7 on riveillä elinkaarimallin vaiheet aikajärjestyksessä ja sarakkeissa suunnittelun sisältökokonaisuudet pääosin syy-seuraussuhteen mukaisesti oikealta vasemmalle. Tosin monia kohtia voidaan ratkoa yhtäaikaisesti tai niitä täytyy suunnitella iteratiivisesti. Rivien ja sarakkeiden risteyskohtiin muodostuu suunnittelukokonaisuuksia, joiden väritys kertoo millä elinkaarimallin portaalla kyseinen suunnittelun sisältökokonaisuus vaikuttaa eniten lopulliseen järjestelmään eli milloin kyseiseen sisältökokonaisuuteen tulee kiinnittää eniten huomiota, vaikka niitä voidaan tarkentaa myöhemmin. Tummalla merkityt suunnittelukokonaisuudet ovat elinkaarimallin portaalla merkittävämpiä kuin valkoisella merkityt kokonaisuudet. (SAS 2007, 18–19).

Käytännössä kaikkien sisältökokonaisuuksien tiedot tarkentuvat suunnittelun edetessä, joten suunnittelijan on hyvä tarkastaa jokaisella elinkaarimallin portaalla kaikki sisältökokonaisuudet, eikä edetä pelkästään tummalla merkittyjä kohtia suorittaen. Jotkin syy-seuraussuhteet voivat olla kuvassa esitettyä monimutkaisempia. Lisäksi joissain tapauksissa suunnittelukokonaisuuksien suorittamisen ajankohta voi olla erilainen tai joitakin vaiheita voi jättää kokonaan suorittamatta. Tämä esitys käsitteleeikin automaatiosuunnittelun yleisiä ja tyypillisiä sisältö- ja suunnittelukokonaisuuksia. (Ibid, 18–19).

Jokainen elinkaarimallin porras jakaantuu kahteen pääosaan, ongelma- ja ratkaisuosioon tai -avaruuteen kuten kuvassa 7 on esitetty. Ongelmaosion sisältökokonaisuudet koostuvat pääasiassa automaatiojärjestelmän käyttäjien näkökulmista ja nämä tiedot tulee automaatio suunnittelijan hankkia muilta prosessin suunnitteluun osallistuvilta osapuolilta. Ratkaisuosio sisältää automaatio suunnittelun aikana syntyneet tulokset ongelmaosion muodostamiin vaatimuksiin. Kuten elinkaarimallin kohdalla jo todettiin, täytyy jokainen suunnittelukokonaisuus dokumentoida tai jo olemassa olevaa dokumenttia päivittää kun kyseinen suunnittelukokonaisuus on työvaiheena käyty läpi. Seuraavissa kappaleissa käydään automaatio suunnittelun sisältökokonaisuudet läpi. (SAS 2007, 19–20).

3.3.1 Lähtötiedot ja vaatimukset

Automaatiohankkeen lähtötiedot ja vaatimukset tulevat pääasiassa automaatio projektin tilaajalta ja ne yleensä määritellään koko projektin esisuunnitteluvaiheessa. Lähtötietojen keruu automaatiojärjestelmää varten lähtee liikkeelle valitun tuotantoprosessin ja tuotettavan tuotteen sekä prosessia käyttämään valitun henkilöstön tiedoista, mutta ennen kaikkea prosessikuvauksesta. (SAS 2007, 20).

Prosessikuvauksesta saadaan perustiedot siitä, mitä toimintoja automaatiojärjestelmän tulee hallita. Prosessikuvaus sisältää esimerkiksi PI-kaaviot ja laitteiston erilaisten ajotapojen kuvaukset. Näiden lähtötietojen perusteella voidaan määritellä automaatiojärjestelmän vaatimukset eli millaista käyttäytymistä ja palveluita järjestelmältä halutaan. Lisäksi vaatimukset voivat sisältää automatiikan suorituskykyyn, esimerkiksi mittauksien tarkkuuteen, luotettavuuteen, käytettävyyteen ja turvallisuuteen sekä järjestelmän dokumentointiin liittyviä vaateita. (Ibid, 20–21).

Konkreettisempia vaatimuksia ovat esimerkiksi mittaus- ja käyttölaitteiden määrä ja siten tarvittavat I/O-paikat, niiden mitoitus, sekä prosessia kuvaavien näyttöjen määrä. Nämä lähtötiedot ja vaatimukset tulee olla automaatio suunnittelijalla saatavilla oikeaan aikaan ja mahdollisimman oikeellisina, koska näiden tietojen muuttaminen myöhemmin aiheuttaa turhan työn tekemistä ja siten viivästystä koko projektille. Yleensä esitiedot ja vaatimukset

tarkentuvat projektin edetessä, mutta turhan työn välttämiseksi suuret linjat tulisi jäädyttää mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. (SAS 2007, 20–21).

3.3.2 Automaatiojärjestelmän tiedot ja toiminnot

Vaatimusmäärittelyvaiheen jälkeen tiedetään, mitä automaatiojärjestelmältä vaaditaan ja mitä sen tulee ohjata. Tässä seuraavassa vaiheessa alkaa automaatiojärjestelmän suunnittelijan työ, kun järjestelmän toimintalogiikka määritellään tarkemmin. Tässä vaiheessa määritellään automaatiosovelluksen tiedot ja toiminnot, laskentakaavat ja säännöt, joiden avulla automaation haluttu toiminta saadaan aikaiseksi. Kuten edellä todettiin, tässä vaiheessa siirrytään suunnittelussa tilaajan toiminnasta toimittajan toimintaan sekä yleensä esisuunnitteluvaiheesta perussuunnitteluvaiheeseen. Tästä syystä toimittajan eli suunnittelijoiden tulee laatia selkeä toiminnallinen kuvaus, jotta tilaajan edustajat voivat arvioida tehtyjä ratkaisuja. Esimerkiksi jokin tilaajan edellyttämä vaatimus saattaa vaatia useita automaatiojärjestelmän toimintoja tai yksi toiminto voi hoitaa monta vaatimusta. (SAS 2007, 21–22).

Ohjelmistotekniikan puolella, mutta myös koko automaatiojärjestelmän suunnittelussa, pyritään suunnittelemaan automaatiojärjestelmän looginen malli niin, ettei sitä sidota mihinkään tiettyyn teknologiaan. Siten suunnitelman tästä vaiheesta tulee joustavampi ja sitä voidaan käyttää hyödyksi myöhemminkin, esimerkiksi automaatiojärjestelmää uusittaessa. Jos teknologiavalintoja on kuitenkin tehty, esimerkiksi tilaajan vaatimuksesta tai käytettäessä valmISRatkaisuja, on niillä suuri merkitys suunniteltavan automaatiojärjestelmän toiminnalliseen rakenteeseen ja loogiseen malliin. (Ibid, 22).

Loogisen mallin ensimmäinen osa on laatia luettelot kaikista automaatiojärjestelmään tulevista perustoiminnoista kuten prosessiliitännöistä, säätöpiireistä ja näytöistä. Seuraavaksi määritellään käytettävät tyyppiratkaisut sekä yleiset suunnitteluperiaatteet kuten poikkeustilanteiden hallinta ja hälytysten käsittely. Lisäksi määritellään koko järjestelmän toiminnallinen arkkitehtuuri yleiseltä tasolta kohti yksityiskohtia. (Ibid, 22).

Loogisen mallin kuvauksen tarve riippuu käytettävästä ohjelmointikielestä, sillä sovelluslähtöiset ohjelmointikielet dokumentoivat sovelluksen varsin hyvin, joten toiminnallista kuvausta voidaan keventää. Kuitenkin kaikki uudet tai monimutkaiset osuudet loogisesta mallista tulee dokumentoida. Tässä suunnitteluvaiheessa tulisi varsinaisen automaatiojärjestelmän suunnittelun lisäksi aloittaa käyttö- ja huolto-ohjeiden sekä toiminnallisten testien suunnittelu. Toimintojen pitäisi olla tämän suunnitteluvaiheen jälkeen lopullisia, vaikka niihin tuleekin yleensä pieniä muutoksia ja täydennyksiä seuraavien vaiheiden edetessä. (SAS 2007, 22–23).

3.3.3 Teknologiavalinnat ja toteutus

Teknologiavalintoja voidaan tehdä suunnittelun eri vaiheissa, mutta kuten edellä todettiin, aikaisessa vaiheessa lukkoon lyödyt teknologiavalinnat rajoittavat suunnittelun mahdollisuuksia. Varsinaisesti automaatiojärjestelmään käytettävä tekniikka valitaan, kun toiminnallinen kuvaus on valmis. Valinta tehdään markkinoilla olevien laitteiden ominaisuuksien ja usein myös hinnan perusteella. Myös tilaaja voi esittää vaatimuksia, esimerkiksi että käytettävät automaatiotuotteet ovat tietyltä valmistajalta tai tiettyä tyyppiä, koska henkilöstö on niihin koulutettu. Lisäksi suunnittelijan osaaminen ja omat kokemukset vaikuttavat valintoihin. (SAS 2007, 23).

Tekniikan valinnan jälkeen siirrytään automaatiojärjestelmän toteutusvaiheeseen. Toteutusvaiheessa yhdistetään kaikki edellä mainitut sisältökokonaisuudet ja lisäksi toteutusta varten laaditaan oma toteutussuunnitelma. Toteutussuunnitelmassa kuvataan yleisesti niin laite- ja ohjelmistoarkkitehtuurit kuin yksityiskohtaisesti ohjelmoinnin, laitekoonpanon ja asennuksen tiedot. Järjestelmän kokonaisarkkitehtuurin määrittelyn ohessa määritellään myös yksityiskohtaiseen suunnitteluun käytettävät ohjeet ja standardit. Tässä vaiheessa myös automaatiojärjestelmän ohjelmistot ja käytettävät kentälaitteet yhdistetään automaatiojärjestelmäksi. Valmis toteutussuunnitelma sisältää kaiken tarvittavan ja yksityiskohtaisen tiedon automaatiojärjestelmän hankintaa, valmistusta, ohjelmointia, testausta ja lopullista asentamista varten. (Ibid, 23).

3.3.4 Käytön ja ylläpidon suunnittelu

Käytön ja ylläpidon suunnittelu on tärkeä osa automaatiojärjestelmän suunnittelua, koska oikealla käytöllä ja ylläpidolla varmistetaan järjestelmän oikea toiminta koko sen elinkaaren aikana. Käytön ja ylläpidon suunnitelma sisältää esimerkiksi tiedot järjestelmää käyttävästä organisaatiosta, erilaiset käyttö- ja ylläpito-ohjeet, käyttäjien tehtävien määrittelyt, teknisen tuen ja varaosien saatavuusarviot sekä käyttäjien koulutusmateriaalit. Käytön ja ylläpidon suunnittelu tulee ottaa alusta asti huomioon, koska käyttöhenkilökunnan määrä ja koulutustaso vaikuttavat suunniteltavaan automaatiojärjestelmään. Myös teknologiavalinnat kannattaa tehdä niin, että järjestelmän ylläpito on mahdollista koko järjestelmän elinkaaren ajan. (SAS 2007, 24).

Suunnittelun aikana tuotetaan myös käyttöohjeet ja muu ohjeistus. Käyttäjiä ja ylläpitäjiä tulisi kuulla esisuunnitteluvaiheessa pidettävissä ajotapakeskusteluissa, joissa sovitaan tarkasti automaatiojärjestelmän toimintaan, käyttöön ja ylläpitoon liittyvistä asioista. Suunnittelun valmistuttua käyttäjät ja ylläpitäjät tulisi saada mukaan tehdastestausvaiheeseen tutustumaan tulevaan automaatiojärjestelmään ja laadituista ohjeista olisi hyvä olla jonkinlaiset versiot arviointia varten, vaikka näiden testien päätarkoitus onkin testata suunnitellun järjestelmän toimivuutta. Erityisen tärkeää käyttäjien ja ylläpitäjien koulutukselle on olla mukana järjestelmän asennus-, toiminnallisen testauksen- ja kelpoistusvaiheissa, koska tällöin niin asennus- kuin suunnittelupuolen asiantuntijat ovat paikalla antamassa opastusta. Toiminnallisen testauksen vaiheessa tulee myös olla kaikkien käyttöohjeiden valmiina, mutta toimintaohjeet täydentyvät koko automaatiojärjestelmän elinkaaren ajan. (Ibid, 24).

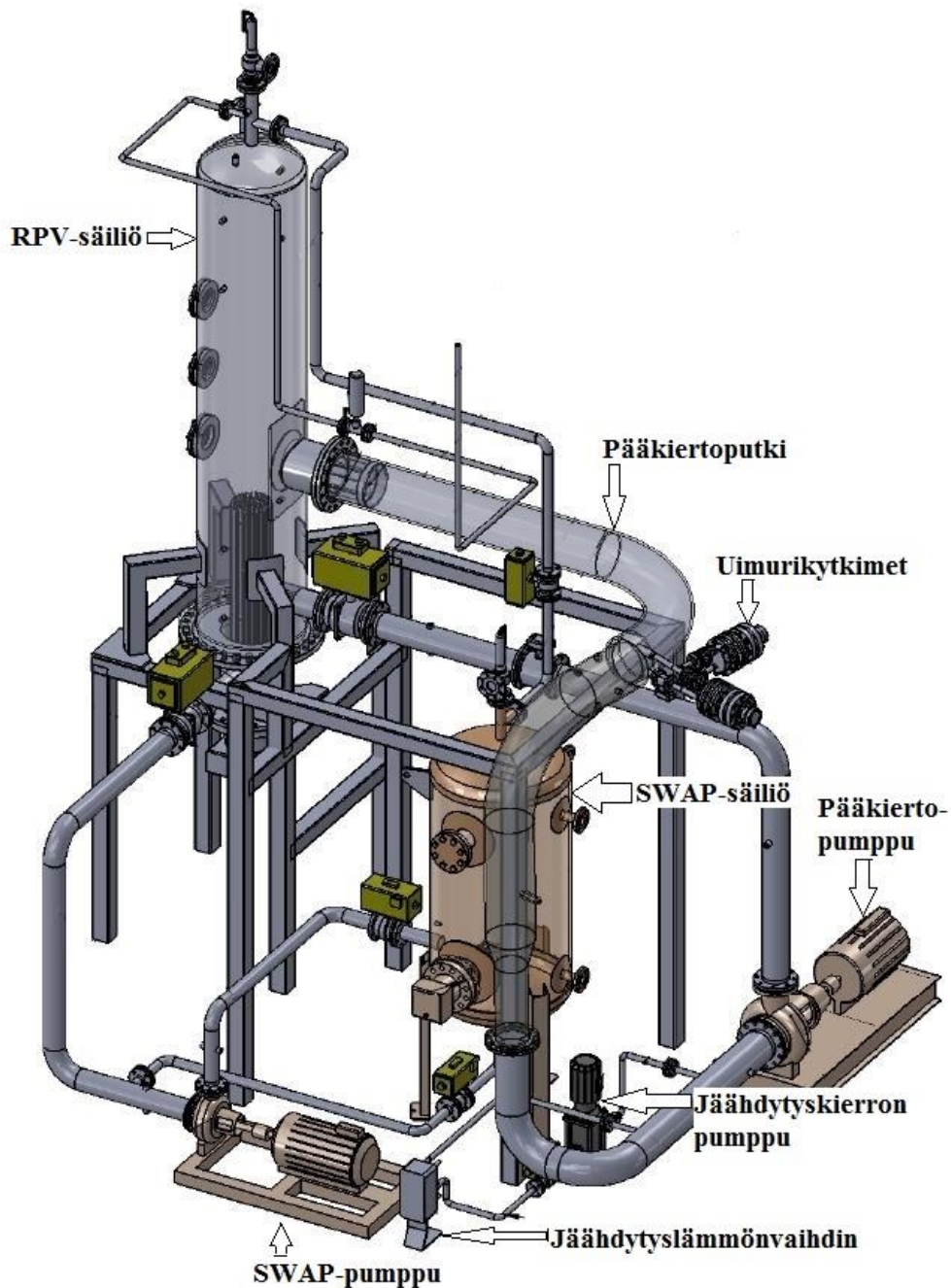
4 KOHO-KOELAITTEISTOT JA NIIDEN AUTOMAATIOJÄRJESTELMIEN VAATIMUKSET

KOHO-koelaitteistoja suunniteltiin ja rakennettiin kaksi kappaletta, matala- ja korkeapainelaitteistot. Nämä koelaitteistot esitellään tässä luvussa tarkemmin ja lisäksi niiden automaatiojärjestelmien suunnitteluvaatimukset sekä niiden perusteella tehdyt teknologiavalinnat käydään läpi.

Molempien koelaitteistojen automaatiojärjestelmien perusvaatimukset olivat riittävän monipuolinen ja nopea tiedonkeruu sekä laitteiston eri toimintojen hoitaminen eli varsinainen prosessiautomaatio. Kolmas perusvaatimus oli turvallisuus, mutta koelaitteistoihin ei vaadittu varsinaista erillistä turvallisuusautomaatiojärjestelmää, koska laitteistojen toiminnot ja erityisesti lämmöntuotto voitiin hätätilanteessa katkaista tehonsyötön tai laitteistotilan kaikki sähkötkatkaisevien hätäkatkaisijoiden avulla. Vaatimukset automaatiojärjestelmälle olivat kovemmat matalapainekoelaitteistolla, joten niitä käydään tässä kappaleessa tarkemmin läpi ja korkeapainelaitteiston vaatimuksia käsitellään suppeammin.

4.1 Matalapainekoelaitteisto

Matalapainekoelaitteisto koostuu kahdesta säiliöstä sekä niitä yhdistävistä putkistoista ja pumpuista, kuten luvun 2 valokuvasta 4 nähdään. Koelaitteiston läpileikkaus on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Matalapainekoelaitteiston suunnitelmapiirros (mukailten Laine 2011, liite 1).

Kuvassa 8 oleva RPV-säiliö vastaa reaktoripainesäiliötä, jonka pintaa tutkittavien uimurikytkimien tulee tarkkailla. Kuten luvussa 2 todettiin, uimurikytkimiä ei voi laitoksella asentaa suoraan reaktoripainesäiliön kylkeen, vaan ne täytyy asentaa reaktoripainesäiliöstä lähtevään putkeen. Uimurikytkimet on asennettu koelaitteiston pääkiertoputkeen, joka johtaa laitteiston pääkiertopumpun imupuolelle. Pääkiertoputkella ja -pumppulla tarkoitetaan tässä esityksessä ainoastaan koelaitteistojen osia, joilla ei ole

mitään vastaavuutta ydinvoimalaitoksen samannimisten komponenttien kanssa. Pääkiertopumppu syöttää pumpatun veden takaisin RPV-säiliöön lämmitysvastuksen juurelle. Tämä 150 kW:n vastus lämmittää laitteiston veden ja RPV-säiliöön muodostuva höyry paineistaa laitteen käytettävään 8 baarin paineeseen. (Laine 2011, 6-10, 17–24).

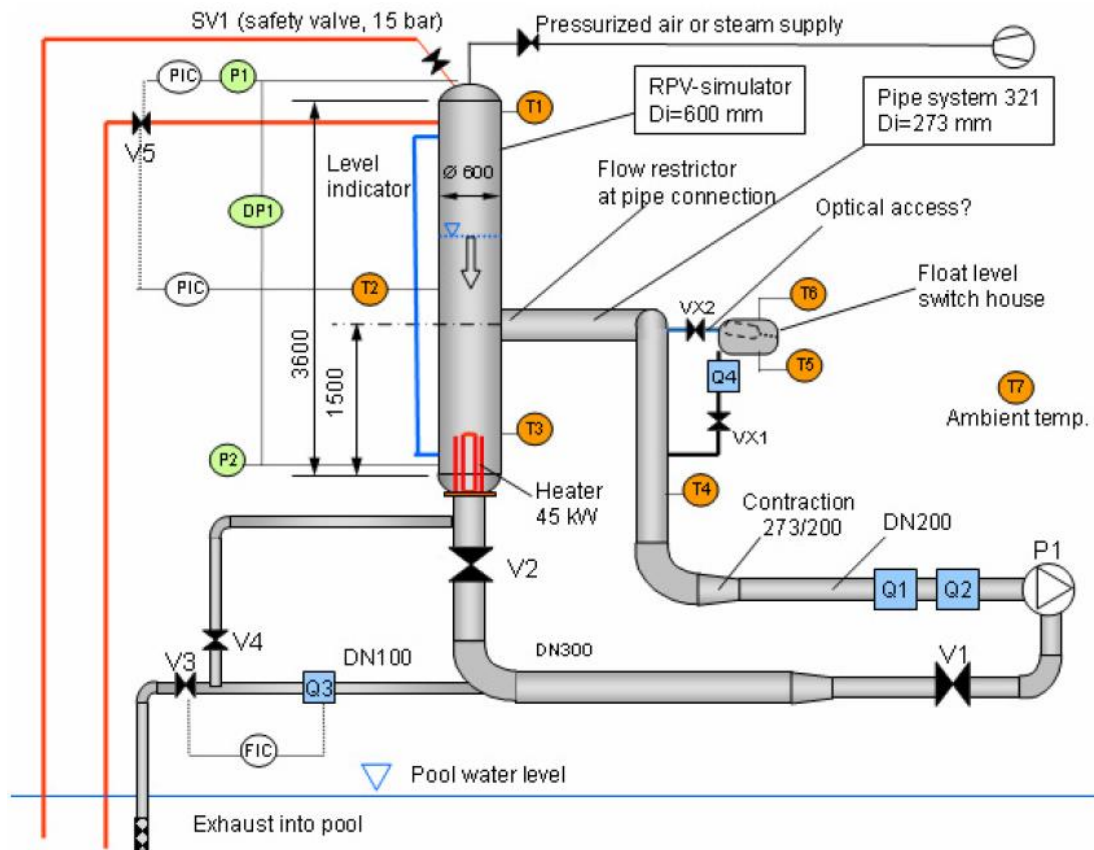
Uimurikytkimien laukaisunopeutta testaavassa pinnankorkeuden nopeassa muutoksessa vettä täytyi siirtää pois pääkierrosta. Tätä varten laitteistossa on SWAP-säiliö, johon vesi pumpataan SWAP-pumpulla. Siirtämällä osa pääkierron vedestä SWAP-säiliöön RPV-säiliön pinnankorkeutta saatiin laskettua riittävällä nopeudella, jotta kytkimien toimivuus voitiin osoittaa. SWAP-säiliössä on 45 kW:n lämmitin, jolla säiliö lämmitettiin vastaavaan lämpötilaan kuin muu osa laitteistosta. SWAP-säiliön paine on sama kuin RPV-säiliön paine, koska säiliöiden höyrytilat on yhdistetty toisiinsa. SWAP-säiliö toimi paitsi RPV-säiliöstä poistettavan veden vastaanottaja, myös höyryvarastona, koska RPV tankista poistettu vesi piti pystyä korvaamaan samalla tilavuudella höyryä, jotta laitteiston paine ei putoaisi pinnan laskun aikana.

Kuvassa 8 olevaa jäähdytyskierron pumppua käytetään pääkiertolinjan veden jäähdyttämiseen reaktorin alasajoa vastaavissa kokeissa ja se pumpkaa sivuvirtana osan pääkiertolinjan vedestä kuvassa etualalla näkyvän lämmönvaihtimen läpi. Tämän lämmönvaihtimen sekundääripuolella on laitteiston lopullinen lämpönielu. Lisäksi koelaitteistossa on erilaisia venttiilejä, joiden toimilaitteet on kuvassa 8 piirretty vihreällä. Näillä venttiileillä ohjataan vesi kulkemaan joko pelkästään pääkierrossa tai sen lisäksi SWAP-säiliöön. Lisäksi koelaitteistoon kuuluu mittausräjähteitä sekä paineilman ja merkkiaineen syöttöjärjestelmät, joita ei ole piirretty kuvaan 8. (Laine 2011, 6-10, 17–24).

4.1.2 Matalapainekoelaitteistojen automaatiojärjestelmän vaatimukset

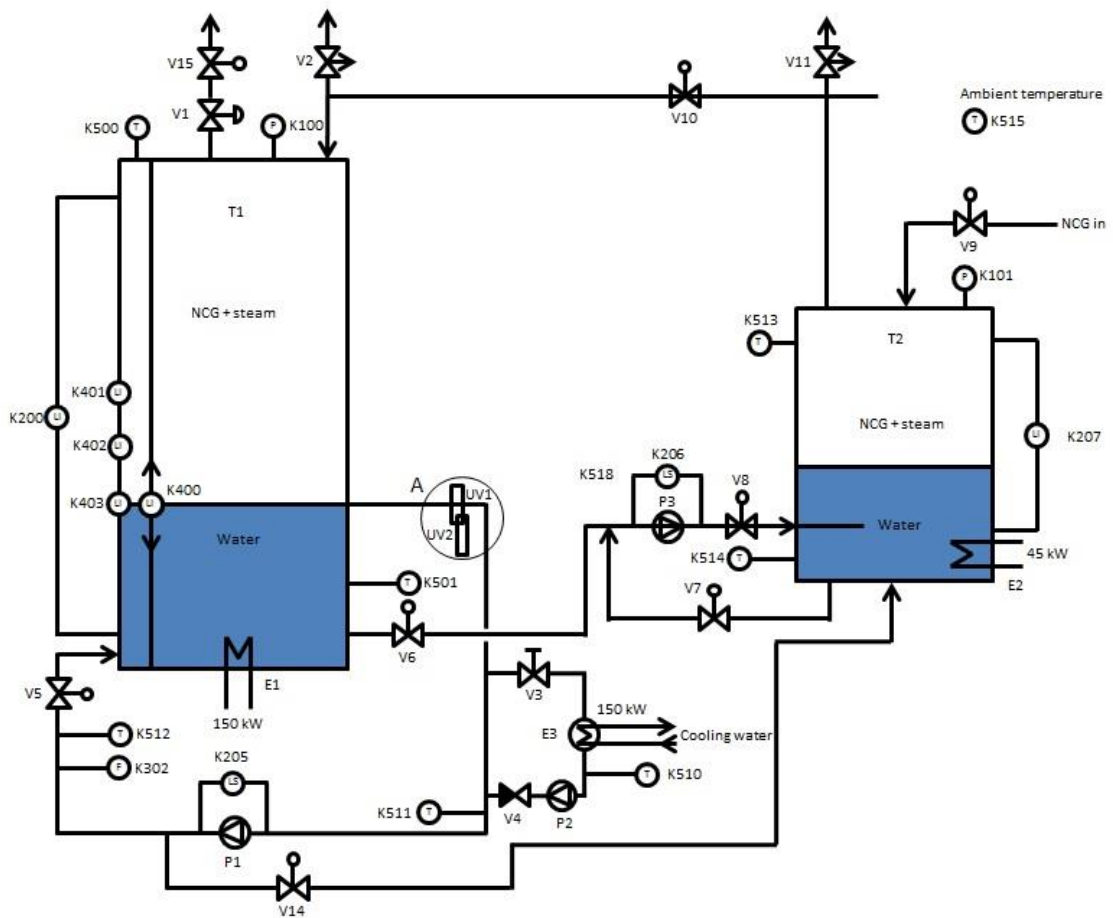
Matalapainekoelaitteiston automaatiojärjestelmän vaatimukset alkoivat muodostua tilaajalta tulleen koelaitteiston periaatteellisen laitteistokuvauksen ja siihen liittyvän PI-kaavion perusteella. Tämä PI-kaaviokuva on esitetty kuvassa 9. Lisäksi automaatiojärjestelmän tuli kyetä suorittamaan luvussa 2 esitetyt kokeet. Automaatiojärjestelmän tehtäviksi oli tilaajan toimesta määritelty erityisesti RPV-säiliön

pinnankorkeuden pudotus määrätyllä nopeudella, pääkierron virtausnopeuksien säätö sekä lämmitys- ja jäähdytysramppien ajaminen.

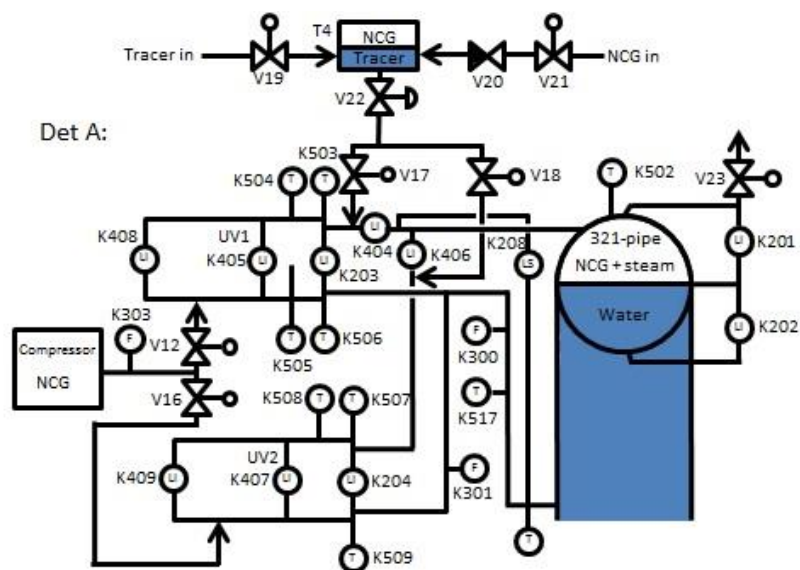


Kuva 9. Matalapainekoelaitteiston periaatteellinen PI-kaavio tilaajan näkemyksen mukaan.

Tämän periaatteellisen PI-kaavion perusteella automaatiojärjestelmän vaatimuksista voitiin päätellä, että sen tuli tallentaa ja näyttää operaattoreille näytössä monenlaista paine-, paineero-, virtaus- ja lämpötilamittausdataa sekä tietysti dataa tutkittavien uimurikytkimien toiminnasta. Näiden mittausten perusteella automaation tuli säätää osin automaattisesti ja osin käyttökonekunnan toimenpitein pumpun tuottoa, venttiilien asentoja sekä koelaitteiston painetta ja lämpötilaa lämmittimen ja paineensäätöventtiilin avulla. Lisäksi PI-kaaviossa on automaattinen kuumen veden poistojärjestelmä, jonka venttiiliä avataan virtausmittarin tiedon perusteella. PI-kaavion laitteeseen on myös suunniteltu paineilman-tai höyrönsyöttöjärjestelmä. Tämä esitetty periaatteellinen PI-kaavio ja koko koelaitteiston rakenne muuttui neuvottelujen ja suunnittelun edetessä huomattavasti, kuten voidaan nähdä lopullisesta PI-kaaviosta, joka on esitetty kuvissa 10 ja 11.



Kuva 10. Matalapainekoelaitteiston ensimmäisen version lopullinen PI-kaavio (mukaillen Laine 2012, liite 1).

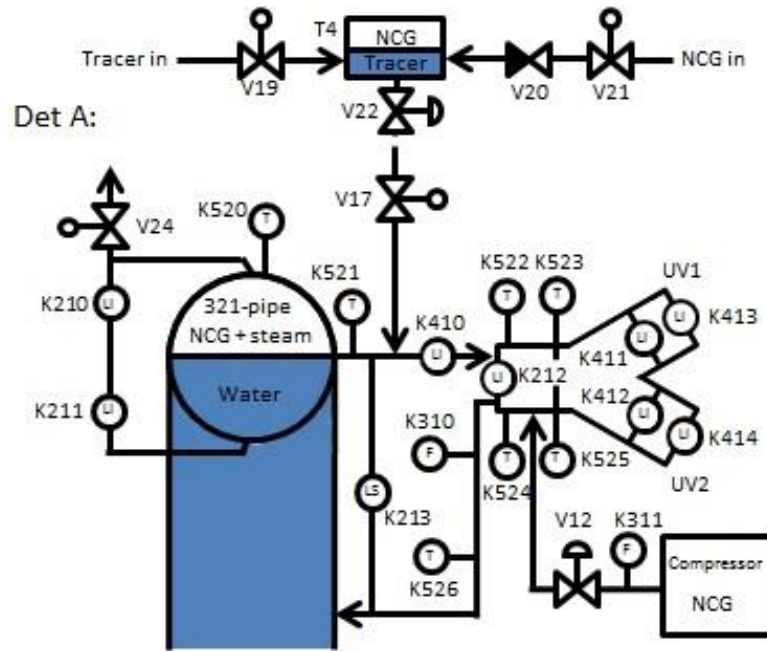


Kuva 11. Tarkennus matalapainekoelaitteen ensimmäisen version PI-kaavioon uimurikytkimien asennuspaikan läheltä (kohta A kuvassa 10) (mukaillen Laine 2012, liite 1).

Lopullisissa PI-kaavioissa mittausten määrä on huomattavasti lisääntynyt, samoin laitteistoon on lisätty automaatiojärjestelmän käyttämiä pumppuja (pääkierto-, jäähdytyspiirin ja SWAP-pumput) sekä venttiileitä. Laitteistoon on myös lisätty toinen lämmitettävä säiliö (SWAP-säiliö), jonka painetta ja lämpötilaa automaation tuli itsenäisesti säätää. Alustavan PI-kaavion paineilman syöttöjärjestelmän paikkaa on vaihdettu ja sen lisäksi laitteistoon on lisätty väriaineen syöttöjärjestelmä virtaussuuntien havainnollistamiseksi. Kuten toisessa luvussa todettiin, matalapainelaitteistolla tehtävät kokeet suoritettiin 8 bar paineessa ja 170 °C:een lämpötilassa. Turvallisuussyistä käyttöhenkilöstön oleskeluaika laitteiston sijoitushallissa tuli minimoida, joten kaikki laitteiston laitteet, joita säädetään kokeen aikana, piti liittää automaatiojärjestelmään, joko automaattisesti säätäviksi tai käyttöhenkilökunnan etäkäytettäviksi. Kuten tämän osion johdannossa todettiin, täytyi kaikki mittaukset tallentaa. Näistä tallennuksista suurin osa voitiin tehdä pienemmällä 2 Hz:n tallennustaajuudella, mutta uimurikytkimien läheisyydessä olevat mittaukset sekä erityisesti RPV-säiliön mittaukset tuli suorittaa suuremmalla 50 Hz:n taajuudella.

PI-kaavion perusteella automaatiojärjestelmä tuli sisältää 17 lämpötilamittausta (K5xx), yhdeksän pinnankorkeusmittausta (K2xx ja K4xx, PI-kaaviossa enemmän mittauksia, muut ovat näkölaseja), kaksi painemittausta (K1xx), kaksi paine-eromittausta (K2xx), tutkittavat uimurikytkimet (2 kpl) ja 3 virtausmittausta (K3xx) sekä kolme pumpun ohjausta (Px), kaksi lämmittimen ohjausta (Ex) ja 11 venttiilien ohjausta (Vxx). Näiden tietojen perusteella voitiin määrittää automaatiojärjestelmään tulevien I/O-paikkojen määräksi alustavasti 17 input-paikkaa ja 16 output-paikkaa käyttöautomaation ja hitaampien mittausten käyttöön sekä 18 input-paikkaa nopeiden mittausten käyttöön.

Matalapainekoelaitteistosta rakennettiin myöhemmin toinen uimurikytkinkammioiden osalta hieman muokattu versio. Koska peruslaitteisto säilyi samana kuin ensimmäisessä versiossa, on kuvassa 12 esitetty uuden version PI-kaavion kuvaa 11 vastaava vain uimurikytkimien asennuspaikan läheisyyden esittävä osa (kohta A kuvassa 10).

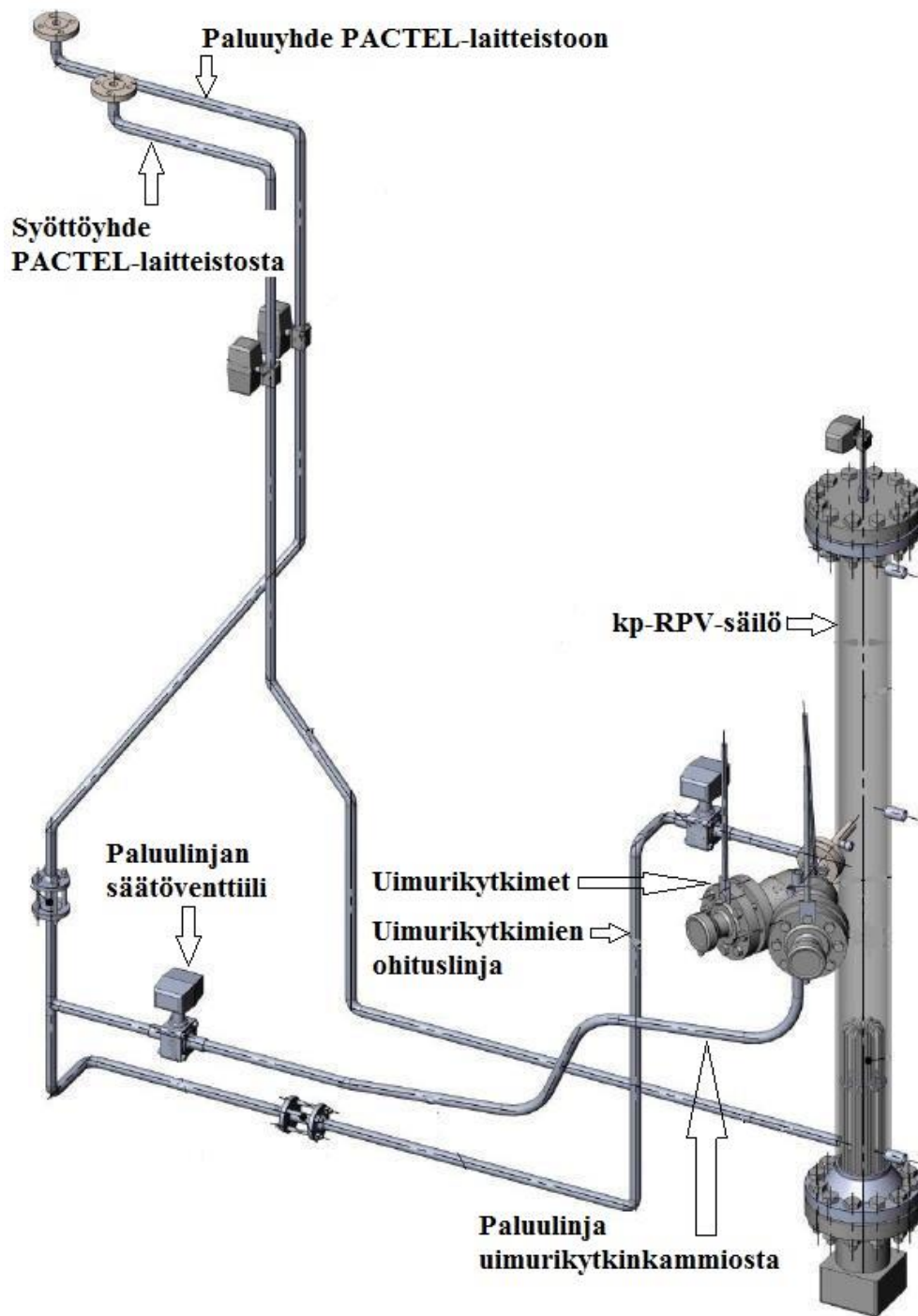


Kuva 12. Matalapainekoelaitteen toisen version PI-kaavio uimurikytkimien asennuspaikan läheltä (mukaillen Laine 2013a, liite 1).

Kuten kuvasta 12 voidaan nähdä, tämä muutos koelaitteistoon vähensi tarvittavien mittausten määrää, joten muutos ei aiheuttanut lisävaatimuksia automaatiojärjestelmälle.

4.2 Korkeapainekoelaitteisto

Korkeapainelaitteisto on matalapainelaitteistoon verrattuna yksinkertaisempi, koska se sisältää vähemmän komponentteja kuten valokuva 5 osoittaa. Lämpileikkaus koelaitteistosta on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Korkeapainekoelaitteiston suunnitelmapiirros (mukaihen Laine 2013, liite 1).

Kuvasta 13 nähdään, että korkeapainekoelaitteisto koostuu yhdestä putkimaisesta säiliöstä, tutkittavista uimurikytkimistä sekä putkistosta, joka yhdistää laitteen PACTEL-koelaitteistoon. Korkeapainekoelaitteisto yhdistyy PACTEL-laitteistoon siten, että kuvassa 13 olevat syöttö- ja paluuyhteet on yhdistetty PACTEL-laitteiston höyrystinpiiri 1:n

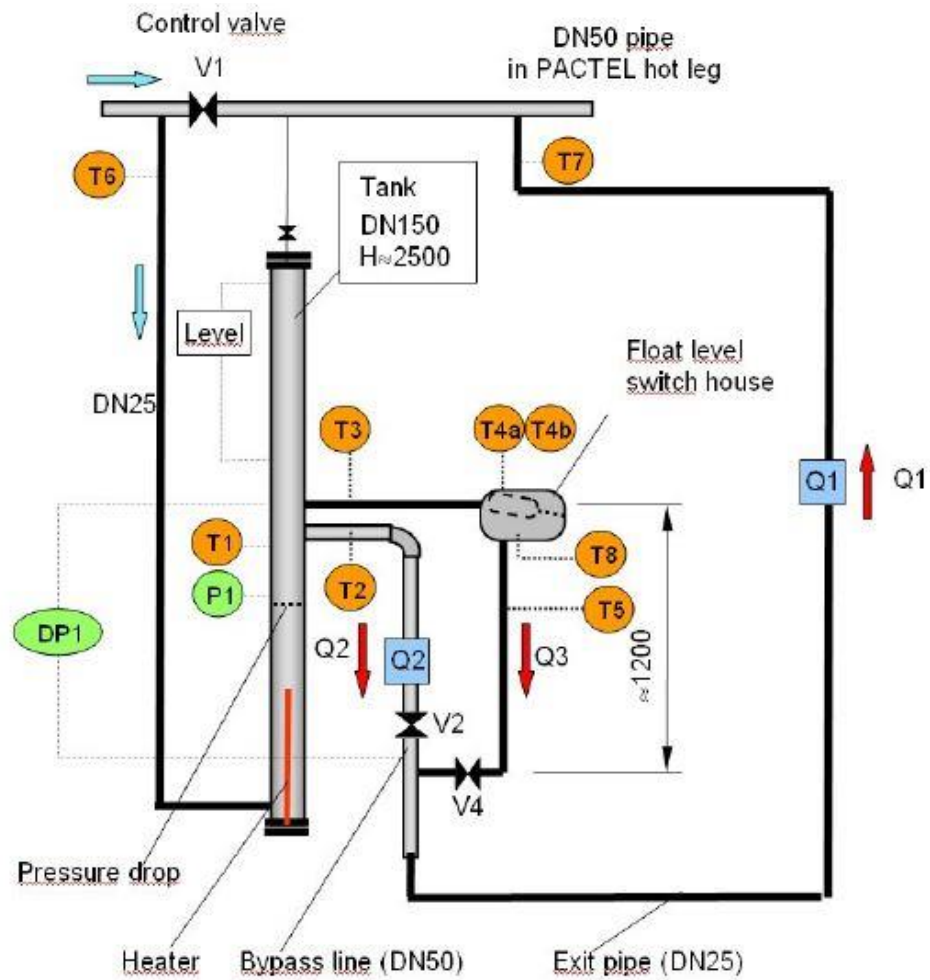
kuumahaaran putkeen. Korkeapainekoelaitteisto toimii siten PACTEL-laitteiston kiertopiirin sivupiirinä, kaikki höyrystinpiiri 1:n vesi ei käy kp-koelaitteistossa, mutta höyrystinpiirin pääkiertopumppu toimii myös korkeapainekoelaitteen pääkiertopumppuna. (Laine 2013, 6–7).

PACTEL-laitteisto on rakennettu simuloimaan Loviisan VVER-440 painevesilaitoksen termohydrauliikkaa. PACTEL-laitteistossa on 1 MW:n lämmitysvastus sydämessä ja lisäksi 13 kW lämmitystehoa paineistimessa. PACTEL-laitteiston paineistin paineistaa myös korkeapainekoelaitteiston tarvittavaan 70 bar:in paineeseen. Kuvassa 13 näkyvä syöttöyhde syöttää veden koelaitteistoon ja paluuyhde palauttaa sen höyrystinpiiriin. Tultuaan höyrystinpiiristä koelaitteistoon, vesi kulkee suoraan kp-RPV-säiliöön, joka kuvaa reaktoripainesäiliötä kuten matalapainelaitteiston RPV-säiliö. Tässä säiliössä on 62 kW:n lämmitysvastus, jolla vesi lämmitetään kokeiden aikana haluttuun 286 °C:een lämpötilaan, koska PACTEL-laitteiston kiertopiirin lämpötila on rajoitettu n. 250 °C:een, jotta höyrystimen maksimipaine ei ylitä. Lämmitysvastuksen jälkeen vesi virtaa kp-RPV-säiliön yhteestä tutkittavien uimurikytkimien kautta paluulinjaa pitkin takaisin höyrystinpiiriin. Koelaitteistossa on myös uimurikytkimien ohituslinja. Ohituslinja tarvittiin, koska tilavuusvirta uimurikytkinkammion läpi oli niin pieni, ettei käytettävissä olevilla virtausmittareilla sitä pystytty mittaamaan. Tämän vuoksi laitteisto varustettiin kokonais- ja ohituslinjan virtausmittauksilla, joiden erotuksesta saatiin kammion läpi menevä tilavuusvirta. Uimurikytkinkammionlinjan ja ohituslinjan virtauksien suhdetta säädellään varsinaiseen virtauslinjaan liitetyllä säätöventtiilillä tai ohituslinja voidaan sulkea käsikäyttöisellä sulkuventtiilillä. Näiden toimintojen lisäksi laitteistoon kuuluu mittausräjätykset sekä tyypin syöttölaitteisto, joita ei ole piirretty kuvaan 13. (Laine 2013, s.6-7, 10–12).

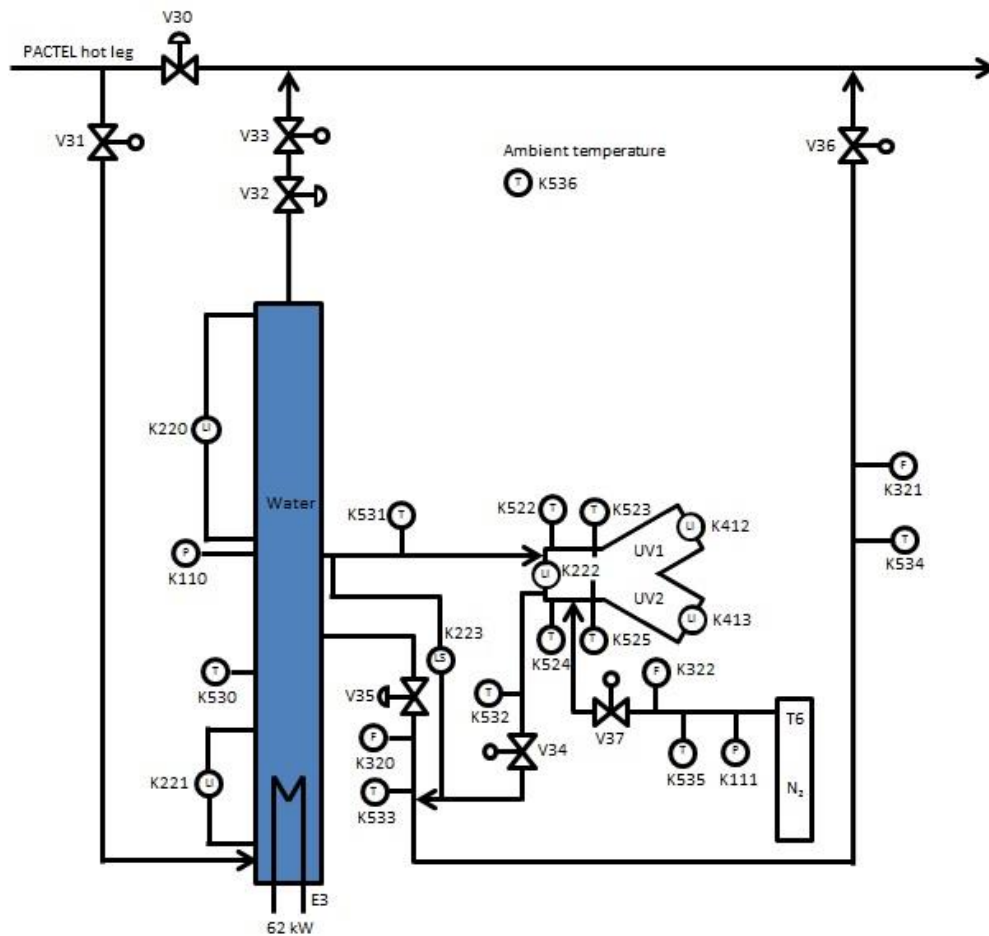
4.2.2 Korkeapainelaitteiston automaatiojärjestelmän vaatimukset

Korkeapainekoelaitteisto oli matalapainelaitteistoa yksinkertaisempi, koska sillä ei tarvinnut tehdä uimurikytkimien laukaisunopeuskokeita. Siksi tilaajan toimesta automaatiojärjestelmän tehtäviksi oli määritelty ainoastaan lämmitys- ja jäähdytysramppien ajaminen, virtausnopeuksien säätäminen ja kaasun syöttäminen uimurikytkinkammioihin.

Koelaitteiston yksinkertaisempi rakenne käy ilmi kuvasta 13 sekä selvemmin laitteiston ensimmäisessä periaatteellisessa PI-kaaviosta, joka on esitetty kuvassa 14, ja lopullisesta PI-kaaviosta, joka on esitetty kuvassa 15.



Kuva 14. Korkeapainekoelaitteiston periaatteellinen PI-kaavio tilaajan näkemyksen mukaan.



Kuva 15. Korkeapainelaitteiston PI-kaavio (mukaillen Laine 2013a, liite 2).

Kuvista nähdään että korkeapainekoelaitteen ensimmäinen suunnitteluversio oli paljon lähempänä lopullista koelaitetta kuin matalapainekoelaitteiston tapauksessa. Koska laukaisunopeuskokeita ei tehty, ei automaatiojärjestelmään tarvinnut tehdä nopeita mittauksia kuten matalapainelaitteiston automaatiojärjestelmän. Tämä laitteisto sisälsi automaatiojärjestelmään liitettäviä kohteita PI-kaavion perusteella seuraavasti: 11 lämpötilamittausta (K5xx), kaksi painemittausta (K1xx), neljä pinnankorkeusmittausta (K2xx), tutkittavat uimurikytkimet (2 kpl) ja kolme virtausmittausta (K3xx) sekä yhden lämmittimen ohjauksen (E3) ja kuusi venttiilinohtausta (Vxx). Näitä varten tarvittiin 22 input-paikkaa ja seitsemän output-paikkaa. Näiden vaatimusten lisäksi korkeapainekoelaitteiston automaatiojärjestelmän erityisvaatimuksena oli sen liittäminen PACTEL-koelaitteen automaatiojärjestelmään, erityisesti mittaus- ja automaatio-ohjelmistoon. Tämä johtui siitä, että itse laitteisto oli liitetty tähän pääkoelaitteeseen, eikä ollut erilliskoelaitteita kuten matalapainekoelaitteita.

4.3 Koelaitteistojen automaatiojärjestelmien yleiset vaatimukset

Edellä esiteltyjen lisäksi molempien koelaitteistojen automaatiojärjestelmille oli myös yleisluontoisempia vaatimuksia. Molemmille automaatiojärjestelmille oli asetettu mittaustarkkuusvaatimuksia sekä niiden tuli hoitaa koelaitteistojen turvallisuustoimintoja turvalaitteiden apuna.

4.3.1 Mittaustarkkuusvaatimukset

Koelaitteistojen mittaustarkkuuksille ei ollut annettu suoraan numeroarvoisia vaatimuksia. Sen sijaan koelaitteistoilta vaadittiin ominaisuuksia, joille oli määritelty tarkat rajat, joiden sisällä arvojen tuli olla. Tällaisia olivat esimerkiksi pinnankorkeuden ja paineen muutosnopeudet eri kokeissa. Näille oli tilaajan toimesta annettu vaatimukseksi pinnankorkeuden muutosnopeuden osalta $\pm 0,01$ m/s ja paineenpudotusnopeuden osalta $\pm 0,01$ bar/min tarkkuus. Näitä muutosnopeuksien tarkkuuksia ei suoraan pystytä mittaamaan, vaan ne täytyy laskea tietyillä ajanhetkillä mitatuista arvoista. Siten esimerkiksi pinnankorkeuden muutosnopeus täytyy laskea yhtälöllä 2.

$$v = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}, \quad (2)$$

jossa v on muutosnopeus ja s on pinnankorkeus tietyllä ajanhetkellä t . Tällaisen laskennallisen suureen virhe lasketaan virheen yleisellä etenemislakilla. Virheen yleisen etenemislain yleinen muoto on esitetty yhtälössä 3. (Juutinen 2009, 11–16).

$$\delta q = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial q}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2}, \quad (3)$$

jossa q on useiden muuttujien x_i muodostama funktio, δq on funktion kokonaisvirhe ja δx_i muuttujien virhe. Kun virheen yleistä etenemislakia sovelletaan pinnankorkeuden muutosnopeuden yhtälöön, saadaan virheelle yhtälö 4.

$$\delta v = \sqrt{\left(\frac{-1}{t_2 - t_1} \cdot \delta s_2\right)^2 + \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \delta s_1\right)^2 + \left(\frac{-(s_2 - s_1)}{(t_2 - t_1)^2} \cdot \delta t_2\right)^2 + \left(\frac{(s_2 - s_1)}{(t_2 - t_1)^2} \cdot \delta t_1\right)^2}. \quad (4)$$

Tämän yhtälön perusteella nähdään että mittalaitteiden virheillä on merkitystä kokonaisvirheeseen, joten ne täytyy saada mahdollisimman pieniksi käyttämällä mahdollisimman tarkkoja instrumentteja. Lisäksi yhtälöstä 4 nähdään, että virheet mittausten ajanhetkien määrittämisessä vaikuttavat eniten kokonaisvirheeseen, koska niillä on suurempi kerroin kuin pinnakorkeuksien virhetermeillä. Tämä pätee varsinkin käytettäessä edellisessä kappaleessa mainittuja nopeita mittauksia. Tämä yhtälö laskettiin olettaen, että laitteiston pinnankorkeuden mittaukseen käytetään kohotyypistä mittausta. Jos pinnankorkeus määritellään paine-eromittausten perusteella, täytyy yhtälöön 2 sijoittaa pinnankorkeuksien s_i tilalle $\frac{\Delta p_i}{\rho(T_i)g}$, jossa Δp_i on mitattu paine-ero, $\rho(T)_i$ on veden tiheys mitatun lämpötilan funktiona ja g on maan vetovoiman kiihtyvyys. Kun tämä versio sijoitetaan yhtälöön 3, tulee pinnankorkeuden muutosnopeuden virheen lausekkeesta monimutkaisempi ja virheeseen vaikuttaa enemmän mittalaitteiden virhetermejä, joten vaadittuun tarkkuuteen pääseminen on vaikeampaa.

Lausekkeessa 4 olevina pinnankorkeuden ja ajan virhetermeinä voidaan käyttää suoraan mittalaitteiden manuaaleissa annettuja virhetermejä. LUT:n Ydinturvallisuuden tutkimusyksikössä käytetään kuitenkin mittalaitteiden virheinä yleensä termejä, jotka ottavat huomioon koko mittausjärjestelyn virheet. Nämä virheet lasketaan variansseina käyttäen yleensä toisistaan riippumattomien muuttujien lausekkeita. Varianssi voidaan laskea kahdella tapaa, joko virheen yleisen etenemislain tuloksen neliönä, eli yhtälön 3 oikea puoli ilman neliöjuurta, tai käyttäen varianssin yleistä yhtälöä. Yleensä tiedonkeruulaitteiden varianssit lasketaan yleisellä yhtälöllä ja mitattavien suureiden varianssit virheen yleisen etenemislain neliönä. Tiedonkeruulaitteiden variansseja laskettaessa tiedetään yleensä laitteen virheen ylä- ja alarajat ($a_{y,i}$ ja $a_{a,i}$), joten varianssi $s_{x_i}^2$ voidaan laskea yksinkertaisemmalla yhtälöllä 5. Jos ylä- ja alaraja ovat muotoa $\pm a_i$, voidaan yhtälöä 5 vielä yksinkertaistaa muotoon 6.

$$s_{x_i}^2 = \frac{1}{12} (a_{y,i} - a_{y,i})^2. \quad (5)$$

$$s_{x_i}^2 = \frac{1}{3} a_i^2. \quad (6)$$

Jos mittalaitteille on annettu erilaisia virheitä, ne voidaan summata ennen neliöön korottamista yhtälössä 6. Yhdistelemällä näitä varianssien laskulausekkeita, voidaan laskea koko mittausketjun varianssi mittalaitteelta/anturilta mittauskortin kautta tiedonkeruulaitteeseen ottaen huomioon välillä tapahtuvat muunnokset sekä viimeinen muunnos virta- tai jänniteviestistä mitattavan suureen insinööriyksikköön. Jokaiselle mittaustyypille ja mittalaitteelle tulee siten omat yhtälönsä, joita ei tässä esitellä tarkemmin, koska ne on ohjelmoitu YTY:n tulostenkäsittelyohjelmaan Toolbox:iin. (Riikonen, 1–3, 21)

Tämä ohjelma laskee virheet automaattisesti kaikille mittauksille tulosten käsittelyn yhteydessä. Ohjelma sisältää YTY:n yleisimpien mitta- ja tiedonkeruulaitteiden virhetiedot. Tällä ohjelmalla saadaan esimerkiksi suoraan paine-eromittarilla mitatun pinnankorkeuden virhe, jolloin edellä esitetty pinnankorkeuden muutosnopeuden virhe voidaan edelleen laskea yhtälöllä 4. Ohjelman antamista mittausten kokonaisvirheistä tulee huomioida, että se laskee virheet 95 % luottamusvälille, jolloin virheet ovat varmuuskertoimesta johtuen kaksinkertaisia verrattuna virheen yleisellä etenemislailalla laskettuihin tuloksiin. (Ibid, 21).

4.3.2 Turvallisuusvaatimukset

Molemmat koelaitteistot ovat painelaitteita. Matalapainelaitteiston käyttöpainne 8 bar ja korkeapainelaitteiston 70 bar, niillä tuotetaan ylikuumennettua vettä yli 110 °C:ssa sekä niiden paineen ja tilavuuden tulo on yli 200 bar·l, jolloin ne kuuluvat painelaitelainsäädännön alaisuuteen. Painelaitelain (L 27.8.1999/869) 3 § sanoo, että painelaitteet eivät saa vaarantaa kenenkään terveyttä, turvallisuutta tai omaisuutta. Tämän vaatimuksen saavuttamiseksi on Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksessä painelaitteista (KTMP 30.9.1999/938) asetettu tarkempia teknisiä vaatimuksia

painelaitteille. Nämä vaatimukset löytyvät kyseisen päätöksen liitteestä 1. Päätöksen liitteen 1 mukaan painelaitteet tulee varustaa riittävillä suojalaitteilla, jos laitteen sallitut raja-arvot voivat ylittyä. Suojalaitteita ovat pääasiallisesti varolaitteet, mutta tapauskohtaisesti myös valvontalaitteet, joiden avulla turvallisuustoiminnot voidaan suorittaa automaattisesti tai manuaalisesti. Varsinaisiin varolaitteisiin kuuluvat painetta suoraan rajoittavat laitteet, kuten varoventtiilit ja murtokalvot, sekä rajoitinlaitteet, jotka korjaavat tai katkaisevat niihin liitetyt toiminnot, esimerkkinä lämpötila- tai pintakytkin. Näiden varolaitteiden tulee olla käyttökohteen perusteella riittäväksi mitoitettuja, luotettavia ja muista toiminnoista riippumattomia.

Kuten luvun johdannossa on todettu, koelaitteistoihin ei vaadita erillistä turvallisuusautomaatiojärjestelmää, koska ne ovat ainoastaan painelaitelainsäädännön alaisia. Koelaitteistojen turvallisuusjärjestelmät toteutettiin paineenrajoituksen osalta varolaitteilla, tässä tapauksessa varoventtiileillä. Lämpötilaa rajoitettiin rajoitinlaitteiden avulla eli laitteistojen vastuksiin liitettiin lämpökytkimet ylikuumenemisen estämiseksi. Lisäksi Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksen (KTMp 30.9.1999/938) mukaan suojalaitteet tulee varmentaa, joten käyttöautomaatiojärjestelmän logiikkaohjelmistoon suunniteltiin suojalaitteita vastaavat toiminnot. Näistä varmentavista, logiikkaohjelmiston suorittamista tehtävistä on lisää viidennessä luvussa.

4.4 Koelaitteistojen automaatiojärjestelmien teknologiavalinnat

Tässä kappaleessa käsitellään koelaitteistojen automaatiojärjestelmiin edellisissä kappaleissa esitettyjen vaatimusten perusteella tehtyjä teknologiavalintoja. Molemmat koelaitteistot käsitellään yhtä aikaa, koska molempiin asennettiin samankaltaisia komponentteja. Ensimmäiseksi esitetään instrumentoinnin teknologiavalinnat ja lopuksi varsinaisen automaatiojärjestelmän valinnat.

4.4.1 Lämpötilamittaukset

Vaatimusten ja PI-kaavioiden perusteella laitteistoissa on eniten lämpötilamittauksia. Osassa lämpötilamittauksia tarkkuus oli tärkeämpää kuin reagointinopeus, joten niihin

mittauksiin valittiin PT-100 tyyppiset lämpötila-anturit. PT-100-anturin toiminta perustuu platinan resistanssin muutokseen lämpötilan funktiona. Anturissa käytetään platinaa, koska sillä on laaja mitta-alue, lineaarinen vaste ja se on materiaalina suhteellisen stabiili eli resistanssi ei merkittävästi muutu ajan kuluessa. PT-100-anturin tarkkuus riippuu myös käytettävästä kytkentätavasta, paras tarkkuus saavutetaan käyttämällä nelijohdinkytkentää. Laskennallisesti PT-100 anturi on termoelementtiä tarkempi. (Korteso 1996, 19–22).

Muihin lämpötilamittauksiin, joissa reagointinopeus tai asennusympäristön vaatimukset niin vaativat, valittiin K-tyypin (eli NiCr/Ni tyyppiset) termoelementit niistä aiemmin saatujen hyvien käyttökokemusten perusteella. Termoelementin toiminta perustuu kahdesta eli metallista valmistettujen lankojen yhteen hitsatun kuumapään ja mittalaitteessa sijaitsevan kylmäpään eli avoimen pään lämpötilaeron aiheuttamaan lämpösähkömotoriseen voimaan eli jännitteeseen. Termoelementti mittaa siten lämpötilaeroa, mutta yleensä mittalaitteissa on kylmäpään kompensointi, joten sitä voidaan lämpötilamittauksiin. (Ibid, 19–22).

4.4.2 Paine-, paine-ero- ja pinnankorkeusmittaukset

Koelaitteistojen painemittauksiin valittiin Foxboro IGP-10 ja IGP-50 -sarjoihin kuuluvat painemittarit. Molemmat mittarit ovat elektronisia, joiden toiminta perustuu paineen mittarissa olevalle kalvolle aiheuttaman venymän mittaukseen. IGP-50 on kuitenkin selvästi tarkempi mittari, mutta sitä ei voi ohjelmoida YTY:n Beamex-kalibraattorilla, vaan kalibrointi täytyy suorittaa sekä kalibraattoria että tietokonetta käyttäen. Siksi IGP-50 mittareita käytettiin vain niihin mittauksiin, joissa vaadittiin erityistä tarkkuutta ja muihin käytettiin IGP-10 -sarjaa. Molemmissa mittareissa on 4-20 mA analogisignaaliulostulot sekä HART-digitaaliulostulot. Koelaitteistojen automaatiojärjestelmässä käytettiin analogista virtaviestiä. (Invensys a).

Laitteistojen pinnankorkeuden mittaus toteutettiin pääasiallisesti paine-eromittausten avulla. Paine-eromittareiksi valittiin Foxboro IDP-10 ja IDP-50 sarjoihin kuuluvat paine-eromittarit. Nämä mittarit vastaavat edellä esitettyjä painemittareita siten, että IDP-10 on hieman epätarkempi kuin IDP-50. Koska IDP-50:n kalibroinnissa oli samat ongelmat kuin

IGP-50 painemittarissakin, valittiin se ainoastaan reaktoripainesäiliötä vastaavan säiliön pinnankorkeuden mittaukseen. Muihin pinnankorkeus- sekä varsinaisiin paine-eromittauksiin valittiin IDP-10:t. Kuten painemittarienkin kohdalla, valittiin paine-eromittareidenkin kohdalla käytettäväksi analogiset virtaviestit. Paine-eromittarit liitettiin koelaitteistoihin luvussa 2 esitellyllä referenssihaaramenetelmällä. (Invensys b).

Koska matalapainekoelaitteiston RPV-säiliön pinnankorkeuden mittaus oli tärkeä, se kahdennettiin kuvan 10 PI-kaavion mukaisesti. Koska RPV-säiliössä on yhtä aikaa vettä, höyryä sekä lautumattomia kaasuja ja säiliön tila muuttuu nopeasti kokeiden aikana, on pinnankorkeuden laskenta paine-eron perusteella haasteellista. Siksi toinen pinnankorkeusmittaus toteutettiin ABB:n K-TEK AT100 kohomittarin avulla. AT100 kohomittarissa on putki, jonka sisällä on johdin, johon syötetään pulssisignaalia. Putkea ympäröi metallinen rengasmagneetilla varustettu koho, joka liikkuu veden pinnan mukana. Kohdatessaan kohon aiheuttaman magneettikentän johtimeen syötetty virtapulssi aiheuttaa johtimeen mekaanisen vääntörasituksen, joka etenee tunnetulla nopeudella kohti johtimen päätä. Mittalaitteen päässä oleva piezo-magneettinen tunnistin tunnistaa tämän vääntöjännityksen, ja jännityksen saapumisajan perusteella elektroniikka laskee kohon paikan ja siten pinnankorkeuden, jonka se antaa analogiviestinä ulos. (ABB 2012, 1).

4.4.3 Virtausmittaukset

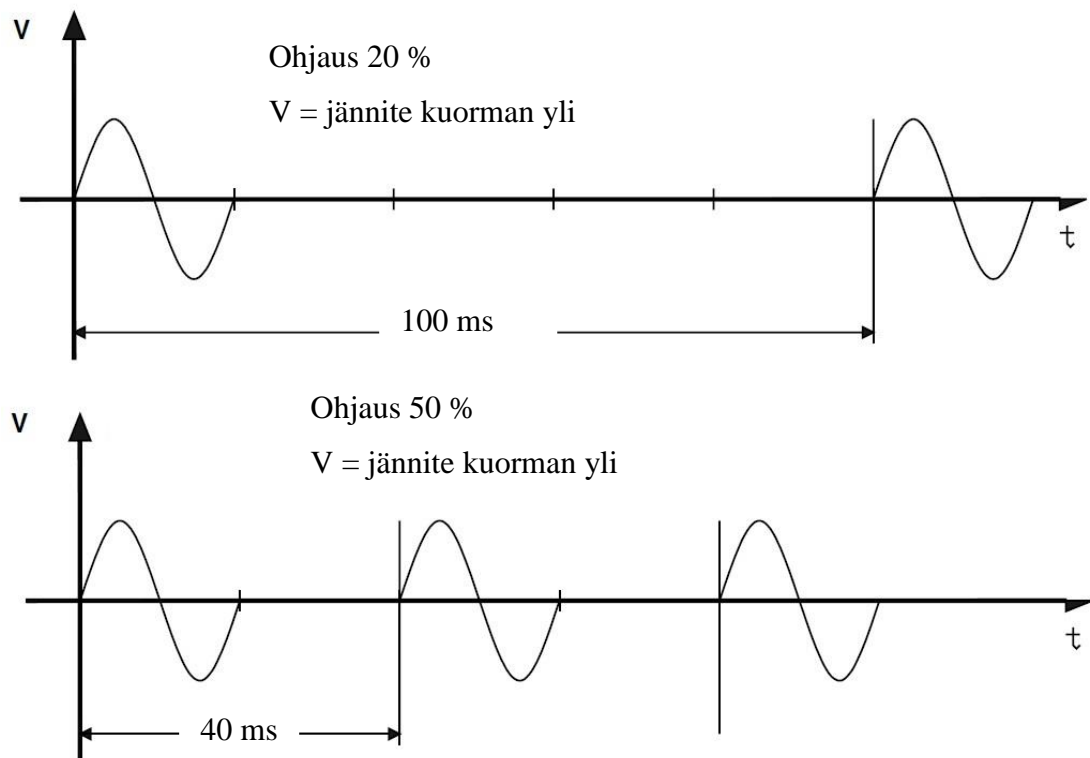
Virtausmittareiden osalta koelaitteistot poikkesivat toisistaan. Matalapainekoelaitteistoon valittiin Foxboron 8001A-WCR ja 8006A-WCR tyyppiset magneettiset virtausmittarit sekä niihin Foxboron IMT-25 lähettimet. Nämä eroavat keskenään ainoastaan koon puolesta, laitteistoon tarvittiin 25 mm mittareita ja yksi 150 mm mittari. Nämä mittarit kykenevät mittaamaan 0-10 m/s nopeudella virtaavia virtauksia kumpaankin suuntaan. Magneettinen virtausmittari mittaa tilavuusvirran luomalla magneettikentän, jonka läpi sähköä johtava aine virtaa, jolloin aineessa tapahtuu sähkömagneettinen induktio. Tällöin muodostuu virtausputken yli jännite, joka voidaan mitata. Jännite on sitä suurempi mitä suurempi on aineen virtausnopeus. Mittareista virtaustieto kulkee IMT-25 lähettimeen, joka tulkitsee virtaustiedon sille annettujen parametrien perusteella haluttuun nopeus- tai

tilavuusvirtayksikköön näyttöä varten sekä muuntaa tiedon 4-20 mA:n virtaviestiksi. (Invensys c, Ylivainio, 6).

Korkeapainekoelaitteeseen valittiin 25 mm Foxboro Model 84 vortex-tyyppiset virtausmittarit. Korkeapainelaitteessa ei voitu käyttää magneettisia virtausmittareita, koska niiden suurin käyttölämpötila on korkeintaan 204 °C, mikä oli liian vähän tälle laitteistolle (max. käyttölämpötila 286 °C). Vortex-mittarissa on virtausputken keskellä este, joka aiheuttaa jälkipuolelleen pyörteitä. Tilavuusvirta mitataan esteeseen törmäämisen jälkeen virtaukseen syntyneiden pyörteiden taajuuksien perusteella. Nämä vortex-mittarit antavat ulos sekä pulssiviestin että 4-20 mA:n virtaviestin. Automaatiojärjestelmässä päätettiin käyttää molempia viestejä, koska hyvin pienillä virtauksilla virtaus voitiin havaita pulssiviesteistä, vaikka virtaviesti ei vielä virtaukseen reagoikaan. (Invensys d, Mattar & Vignos 2010, 1–3).

4.4.4 Pumppujen, lämmitysvastusten ja venttiilien ohjaukset

Matalapainekoelaitteen lämmitysvastuksien ohjauksiin valittiin RPV-säiliön ja SWAP-säiliön vastuksille Gefran puolijohdereleet (nollapistekatkojat). Nollapistekatkojat kytkevät ja katkaisevat virran vaihtojännitteen ollessa nollassa, ja tehoa säädetään ajan suhteen. Nollapistekatkojien periaatteellinen toiminta on esitetty kuvassa 16. Puolijohdereleitä oli matalapainekoelaitteen molempia lämmitysvastuksia ohjaamassa kolme kappaletta ja korkeapainelaitteen yhtä vastusta ohjaamassa kaksi. Kaksi kappaletta on minimimäärä, kun käytetään kolmivaihevirtaa ja kolmiokytkentää. Kolmella puolijohdereleellä voidaan käyttää tähtikytkentää. (Gefran a, b, 2012, 2014).



Kuva 16. Nollapistekatkojen toimintaperiaate (mukaiillen Gefran 2012, 3).

Koelaitteistoissa on sekä säätöventtiileitä että sulkuventtiileitä, joissa oli pneumaattiset toimilaitteet ja sähköpneumaattiset ohjausventtiilit eli asennoittimet. Sulkuventtiilien asennoittimina käytettiin molemmissa koelaitteissa Asekon valmistamia solenoidiventtiilejä, jotka laskevat paineilmaa toimilaitteeseen automaatiojärjestelmän käskyjen mukaan siten että venttiili on joko täysin auki tai täysin kiinni. Näiden ohjaukseen käytettiin digitaalisignaaleita. Matalapainelaitteiston säätöventtiileistä kaksi oli varustettu vastaavilla toimilaitteilla kuin sulkuventtiilitkin, mutta niiden asennoittimina käytettiin Bürkert 8793 asennoittimia. Näitä asennoittimia ohjattiin virtaviestien avulla ja ne ohjaavat toimilaitetta kääntämään venttiiliä yhden prosentilla tarkkuudella siten että nolla prosentilla on täysin kiinni ja sata prosentilla täysin auki. Kolmanneksi matalapainelaitteiston säätöventtiiliksi valittiin Bürkert:n 8802GD-tyypin integroitu säätöventtiili, joka sisältää venttiilin lisäksi toimilaitteen ja asennoittimen. Tämä venttiili ei kuitenkaan osoittautunut täysin pitäväksi, joten sen kanssa sarjaan jouduttiin asentamaan sulkuventtiili. Korkeapainelaitteiston ainoan säätöventtiilin toimilaitetta ohjaamaan valittiin Bürkert:n 1067-tyyppinen asennoitin, joka toimii vastaavasti kuten edellä mainittu 8793. (Bürkert a, b, 2013).

Matalapainelaitteiston pumppujen ohjauksiin valittiin Siemens:n Micromaster-taajuusmuuttajat. Taajuusmuuttajia ohjattiin sekä digitaali- että analogisignaalien avulla siten, että digitaalisignaalien avulla toteutettiin pumppujen käynnistykset ja sammutukset ja analogisignaalien avulla kierrosnopeuden säätö. Lisäksi taajuusmuuttajien omaan elektroniikkaan liitettiin Safematic-virtausvahtien signaalit, jotta taajuusmuuttajat pysäyttävät pumput, jos pumppujen tiivistysvesivirtaus putoaa liian alhaiseksi.

4.4.5 Tiedonkeruu- ja prosessiohjauslaitteet

Hitaita mittauksia ja käyttöautomaatiota varten valittiin NI:n cFP-1808 kenttäpäätteet molempiin koelaitteistoihin. Kumpaankin koelaitteistoon tuli yksi kenttäpääte. Kenttäpäätteet yhdistettiin prosessia ohjaavaan tietokoneeseen UTP-verkkokaapelin välityksellä. Näihin kenttäpäätteisiin liitettiin mittaus- ja ohjauskortteja seuraavasti:

- Matalapainekoelaitteiston hitaisiin mittauksiin yksi cFP-RTD-124 –tyyppinen PT-100-anturien nelijohdin-kytkennällinen mittauskortti ja kaksi cFP-TC-120 –tyyppistä sisäisellä kylmäpääntekompensoinnilla varustettua termoelementtien mittauskorttia. Molempiin kortteihin voi kytkeä 8 mittausta / kortti.
- Matalapainekoelaitteiston käyttöautomaatioon kaksi cFP-AO-200 –tyyppistä analogista virtaohjauskorttia ja yksi cFP-DO-401 –tyyppinen digitaaliohjauskortti. Yhteen cFP-AO-200 korttiin voi kytkeä 8 ja cFP-DO-401 korttiin 16 toimilaitetta.
- Korkeapainekoelaitteen mittaus- ja automaatiokäyttöön yksi cFP-AI-111 –tyyppinen analoginen virtamittauskortti (16 mittausta), yksi cFP-TC-120 termoelementtimittauskortti, yksi yhdistetty digitaalinen mittaus/ohjauskortti cFP-cFP-DIO-550 (8 mittausta ja 8 ohjausta) sekä yksi cFP-AO-200 analoginen ohjauskortti.
- Lisäksi korkeapainelaitteen mittauksiin käytettiin yksittäisiä kanavia PACTEL-koelaitteiston automaatiojärjestelmän mittauskorteista: cFP-RTD-124, cFP-AI-112 -tyyppisestä analogisesta jännitemittauskortista (16 mittausta) ja cFP-CTR-500 tyyppisestä pulssilaskurikortista (8 pulssimittausta, 4 digitaalimittausta ja 4 pulssiohjausta).

Hitaisiin mittauksiin käytettyjen NI:n Compact FieldPoint (cFP) -mittauskorttien suurin tallennusnopeus on noin 1 S/s. Yhdessä sekunnissa ehtii kuitenkin tapahtua paljon erityisesti pinnankorkeuden pudotuskokeessa, joten matalapainekoelaitteistoon tarvittiin erillinen suurempaan tallennusnopeuteen kykenevä mittauslaitteisto.

Nopeiden mittausten käsittelyyn valittiin käyttökokemusten perusteella National Instrumentsin tiedonkeruulaite. Tässä laitteessa on PXI-6052E A/D-muunnin yhdistettynä PXI-1052 räkin kautta kahteen SCXI-1102B vahvistinmoduuliin. Kumpaankin vahvistinmoduuliin voi kytkeä 32 mittausta. Tämä tiedonkeruulaite yhdistettiin prosessia ohjaavaan tietokoneeseen valokaapelin välityksellä. Tarvittaessa laitteisto pystyy tuottamaan datavuota nopeudella 330 kS/s, mutta tässä sovelluksessa tallennustaajuudeksi valittiin 50 Hz, jolloin datavuoksi tuli 18 kanavan kanssa 900 S/s.

5 KOELAITTEISTOJEN MITTAUS- JA AUTOMAATIO-OHJELMISTOT

Tämä luku keskittyy koelaitteistojen automaatiojärjestelmien logiikkaohjelmistojen kuvauksiin. Lopuksi on lyhyt selostus molempien koelaitteistojen automaatiojärjestelmien toiminnan testauksesta sekä toiminnasta varsinaisten kokeiden aikana.

Edellisen luvun lopussa kuvattiin koelaitteistojen automaatiojärjestelmien teknologiavalintoja fyysisten laitteiden osalta. Näiden käyttämiseksi tarvitaan logiikkaohjelmistoa, joka on yksi tärkeimmistä automaatiojärjestelmän osista. Logiikkaohjelmisto tulkitsee mittausinstrumenteilta tulevan tiedon, tallentaa sen ja ohjaa prosessin kenttälaitteita. Koelaitteistojen logiikkaohjelmistot toteutettiin National Instrumentsin graafisella LabView -ohjelmointikielellä.

LabView:ssä ohjelmat rakennetaan yhdistelemällä erilaisia kuvakkeita tekstirivien sijaan. Kuvakkeet ovat joko perusfunktioita, kuten aritmeettisia tai loogisia toimintoja, tai virtuaalisia instrumentteja (vi). Vi:t ovat LabView-ohjelmia, joilla voidaan kuvata reaali maailman instrumentteja. Jokainen LabView:llä tehty ohjelma on virtuaali-instrumentti, joten jokaista luotua ohjelmaa voidaan käyttää toisen ohjelman aliohjelmana. LabView:lla rakennetaan ohjelmat kahdessa tasossa. Päätasolla (Front view) luodaan käyttöliittymä, johon sijoitetaan tarvittavat näytöt, kytkimet ja varoitusvalot. Tämä osa ohjelmistosta on operaattoreiden käytössä. Varsinainen ohjelmointi suoritetaan Block diagram eli vuokaaviotasolla. Tähän vuokaavioon laitetaan ohjelman tarvitsemat funktiot ja virtuaali-instrumentit, jotka kytketään toisiinsa virtuaalisten johtojen avulla. (National Instruments 2014).

Ohjelmaa suoritettaessa data kulkee virtuaalijohtoja pitkin kuvakkeesta toiseen, ja kuvakkeet suoritetaan kytkentäjärjestyksessä. LabView:ssä toimintojen suoritusjärjestys määräytyy siis datavirran, eikä erilaisten määritteiden perusteella. Tästä syystä johtuen LabView poikkeaa selkeästi yleisemmistä tekstiperustaisista ohjelmointikielistä. (National Instruments 2014).

5.1 Matalapainekoelaitteiston mittaus- ja automaatio-ohjelmisto

Matalapainekoelaitteen mittaus- ja automaatio-ohjelmiston, tästä eteenpäin logiikkaohjelmiston, suunnittelu eteni pääosin kuvassa 7 kuvattujen suunnittelun elinkaarimallin vaiheiden sekä sisältökokonaisuuksien mukaisesti. Kuitenkin esimerkiksi logiikka-ohjelmiston teknologiavalinta oli ennalta lyöty lukkoon edellä esitettyyn LabView-ohjelmistoon, koska tämä oli jo entuudestaan käytössä Ydinturvallisuuden tutkimusyksikössä.

5.1.1 Ohjelmiston tehtävien ja ominaisuuksien määrittely

Ensimmäisessä varsinaisessa suunnitteluvaiheessa määriteltiin lähtötietojen perusteella logiikka-ohjelmiston vaadittavat ominaisuudet ja toiminnot. Edellisessä luvussa esitellyt koelaitteiston koko automaatiojärjestelmän perustoiminnot eli tiedonkeruu, varsinainen prosessiautomaatio ja turvallisuustoiminnot päivät myös logiikkaohjelmistoon. Näitä vaatimuksia tarkennettiin ohjelmistoa suunniteltaessa.

Tiedonkeruun osalta oli jo aikaisemmin määritelty, että kaikki mittausdata tuli tallentaa. Logiikkaohjelmiston tuli muuttaa mittalaitteilta tulevat signaalit insinööriyksiköiksi ennen tallennusta, jotta tulosten tarkastelu olisi sujuvampaa ja koska osa mittauksista tuli olla käyttöliittymän näytössä operaattoreiden nähtävillä. Nopeat mittaukset tuli tallentaa sekä raakamuodossa että keskiarvoistettuna. Keskiarvoistus piti toteuttaa siten, että keskiarvoistetun mittausdatan tallennustaajuus vastasi hitaiden mittausten tallennustaajuutta, jotta tulosten käsittely nopeutuisi. Lisäksi ohjelman tuli tallentaa myös hitaat mittaukset sekä kaikki laitteiston ohjausarvot kokeiden aikana. Mittaukset tuli tallentaa siten, että eri tiedonkeruulaitteilta peräisin olevat tiedot pystyttäisiin myöhemmin synkronoimaan kellonajan perusteella tuloksia tulkittaessa. Mittausdatan määrän rajoittamiseksi logiikkaohjelmiston tuli kyetä tallentamaan nopeita mittauksia huomattavasti lyhemmissä pätkissä kuin hitaita mittauksia.

Varsinaisen käyttöautomaation osalta edellisessä luvussa on jo esitetty, että kaikki toiminnot tuli olla operaattoreiden etäkäytettävissä. Lisäksi logiikkaohjelmistolle

määriteltiin varsinaisia automaatiotehtäviä. Ohjelmiston tuli säätää sekä RPV- että SWAP-säiliöiden lämmitysvastuksia joko säiliöihin halutun lämpötilan tai paineen perusteella. Lisäksi ohjelmiston tuli säätää RPV-tankin painetta säiliön päällä olevan venttiilin avulla. SWAP-säiliön painetta ohjelmiston ei tarvinnut erikseen säätää, koska se oli yhteydessä RPV-säiliön ylätilaan. Logiikkaohjelmiston avulla täytyi SWAP-säiliö kuitenkin pystyä eristämään, jotta se voitiin paineilmalla paineistaa RPV-säiliötä korkeampaan paineeseen. Tällä tavalla SWAP-säiliöön siirretty vesi pystyttiin työntämään RPV-säiliöön ja siten takaisin pääkiertoon. Pinnanpudotuskokeita varten logiikkaohjelmiston tuli automaattisesti käynnistää SWAP-säiliöön vettä siirtävä pumppu ja avata tarvittavat venttiilit, jotta vesi pääsi RPV-säiliöstä pumpulle ja siitä eteenpäin SWAP-säiliöön.

Ohjelmiston tuli myös osata jäähdyttää koelaitteistoa automaattisesti ohjaamalla osa pääkierron vedestä lämmönvaihtimen läpi kunnes haluttu lämpötila oli saavutettu. Samoin logiikan tehtäväksi määriteltiin pääkiertopiirin massavirran säätäminen haluttuun arvoon ja sen pitäminen vakiona säätämällä pääkiertopumpun pyörimisnopeutta. Näiden tehtävien lisäksi pienempiä logiikan tehtäviä olivat merkkiaineen sekä ilman syöttäminen tutkittavien uimurikytkimien kammioihin.

Edellä mainittuja yksittäisiä käyttöautomaatioon liittyviä tehtäviä yhdistelemällä logiikkaohjelmiston piti osata ajaa laitteistoa täysin automaattisesti ennalta laadittujen parametrilistojen eli reseptien avulla. Tämä toiminto määriteltiin käytettäväksi erityisesti reaktorin ylös- ja alasajotilanteita kuvaavissa lämmitys- ja jäähdytyskokeissa.

Turvallisuustoimintoina logiikkaohjelmiston tehtäväksi määriteltiin sekä RPV- että SWAP-säiliön lämmitysvastusten sammuttaminen mikäli ennalta määritelty paine- tai lämpötilaraja ylittyisi tai pinnankorkeusraja alittuisi. Nämä rajat määriteltiin kummallekin säiliölle erikseen ja turvallisuustoiminto vaikuttaa siten vain kyseiseen säiliöön, jossa toiminnan ehdot täytyivät.

Edellä esiteltyjen vaatimusten lisäksi tilaajalta tuli seuraavat vaatimukset:

- Painetta pystyttävä säätämään välillä 2-10 bar halutulla nopeudella tarkkuuden ollessa $\pm 0,01$ bar/min

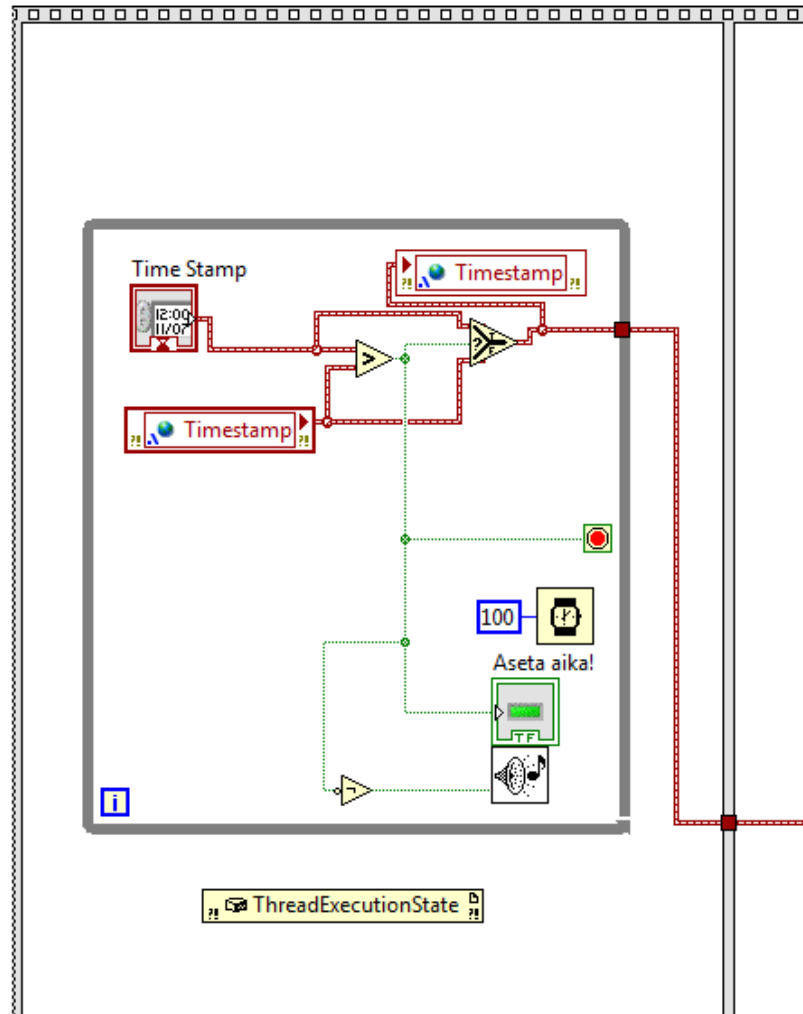
- Pääkiertoputken virtausnopeuksia pystyttävä säätämään
- RPV-säiliön pinnanpudotusnopeuden tarkkuus $\pm 0,01$ m/s
- 1 mm halkaisijaltaan olevien ilmakuplien syöttö tutkittaviin uimurikytkinkammioihin.

Näistä vaatimuksista erityisesti tarkkuusvaatimukset sekä ilmakuplien koko osoittautuivat erittäin vaikeiksi tai mahdottomiksi toteuttaa, joten niiden osalta tyydyttiin parhaaseen toteutettavissa olevaan tulokseen.

5.1.2 Ohjelmiston toteutus

Tässä kappaleessa kuvataan edellisessä kappaleessa määriteltyjen logiikka-ohjelmiston tehtävien toteutus LabView-ohjelmalla. Tässä kappaleessa esitellään ohjelmiston viimeisimmän version toteutus. Aikaisempia versioita esitellään tarvittavin osin seuraavassa kappaleessa.

Edellisessä kappaleessa määriteltiin, että kaikki tallennettava data oli myöhemmin pystyttävä synkronoimaan kellonaikojen avulla. Tästä syystä logiikkaohjelmiston suoritus alkaa toiminnolla, joka tarkastaa että ohjelmalle on annettu edellistä kertaa tuoreempi aikaleima. Tämä toiminto on esitetty kuvassa 17.



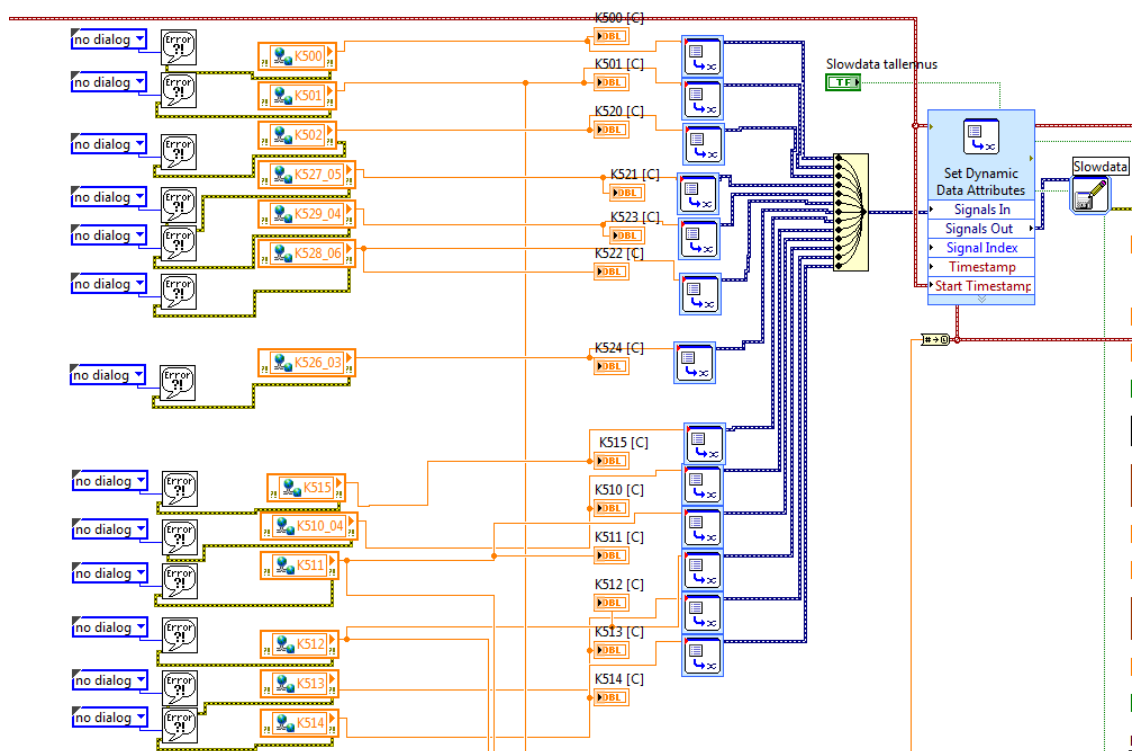
Kuva 17. Ajanhetken tarkistus mp-laitteiston logiikkaohjelmistossa.

Toiminto suoritetaan vertaamalla LabView:n ajanhetken asetuskuvakkeen antamaa arvoa muistissa olevaan edellisellä kerralla annettuun arvoon. Muistissa oleva arvo luetaan LabView:n shared variable (SV) toiminnolla. Tämä toiminto lukee ja tallentaa tietoa shared variable engine:n (SVE) avulla Koska ajanhetken asetuskuvake antaa oletusarvona nollan, on aina ohjelman käynnistyessä muistissa oleva ajanhetki suurempi kuin asetettu ja vertailu antaa Boolean algebran arvon nolla. Tämä ei anna while-silmukalle, johon toiminto on sijoitettu, lupaa pysähtyä. Tällöin ohjelma ei etene, koska ohjelmiston laatimisessa on käytetty LabView:n järjestys-rakennetta, joka näkyy kuvan 17 yläreunassa filminauhana. Lisäksi käyttöliittymän näyttöön syttyä varoitusvalo sekä myös äänimerkki ilmoittaa ajanhetken asetuksen olevan väärän. Kun käyttöliittymän puolelta asetetaan ajanhetki oikeaksi, antaa ajanhetkien suuruusvertailu arvon 1, jolloin uusi ajanhetki tallennetaan

muistiin ja while-silmukka loppuu, joten ohjelma pääsee etenemään seuraavaan vaiheeseen, joka on varsinainen logiikkaohjelmiston pääohjelma. Kuvassa 17 while-silmukan alla oleva ThreadExecutionState .dll-tiedoston lukutoiminto käynnistää aliohjelman, joka estää tietokoneen menemisen horrostilaan niin kauan kuin LabView on käynnissä.

Logiikkaohjelmiston päävaihe on sijoitettu omaan while-silmukkaansa ja se pyörii niin kauan kunnes operaattori haluaa lopettaa ohjelman painamalla stop-kytkintä. While-silmukka on asetettu LabView:n ajoitustoimintojen avulla pyörähtämään kaksi kertaa sekunnissa.

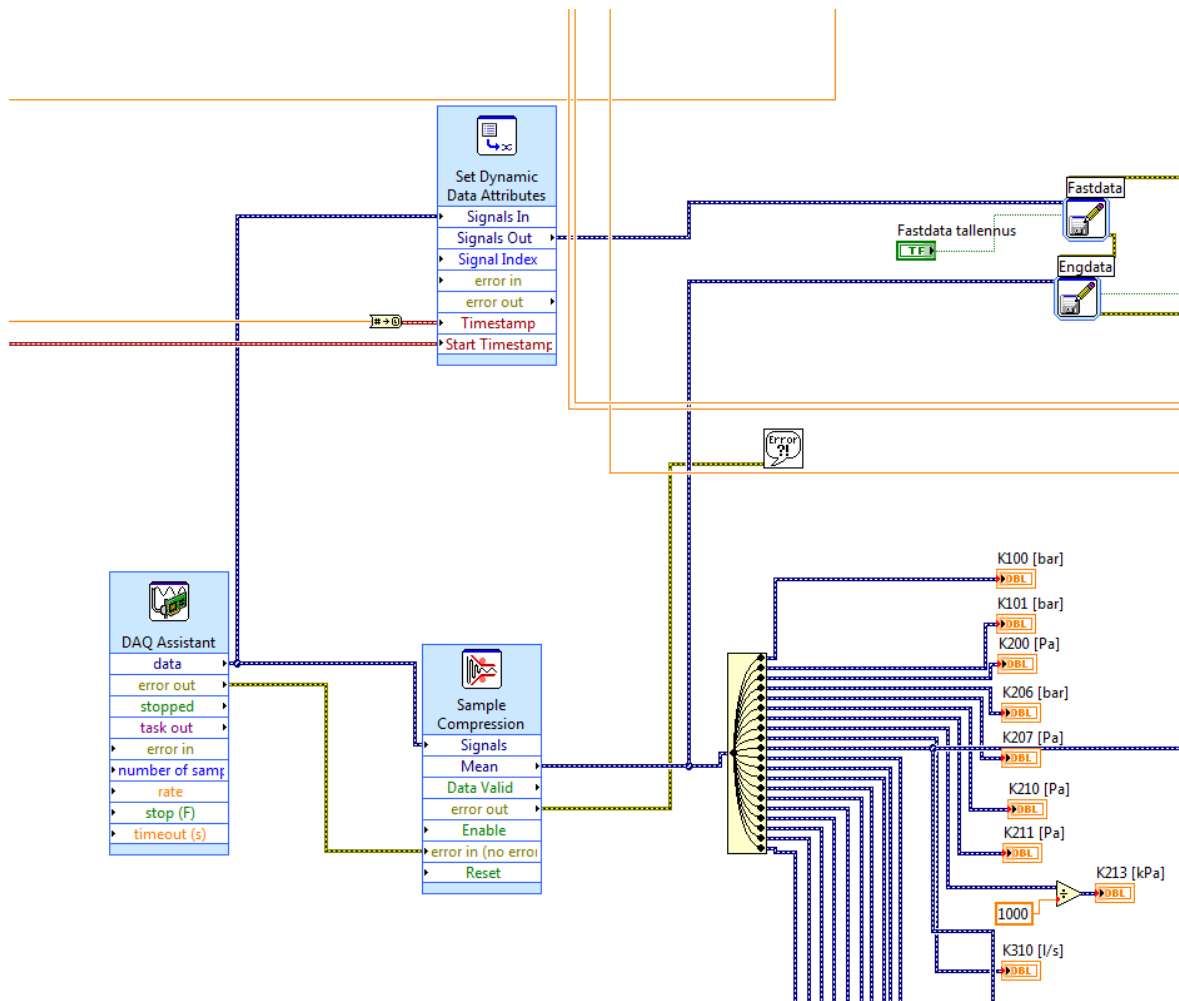
Ohjelmiston päävaihe alkaa datan lukemisella tiedonkeruulaitteilta. NI cFP-kenttäpäätteiltä tulevat tiedot eli hitaat mittaukset luetaan SVE:n avulla. Hitaiden mittausten luku- ja tallennustoiminnot on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Hitaiden mittausten luku- ja tallennus mp-laitteiston logiikkaohjelmistossa.

Kuvassa 18 SV:t ovat oransseja suorakaiteita, joissa on kaksi toisiinsa kytkettyä maapalloa. Niiden vasemmalla puolella on LabView:n virheenkäsittelytoiminnot, koska oletusarvoisesti ohjelman suoritus pysähtyy virheen tapahtuessa. Käyttöturvallisuuden vuoksi tämä ei ole suotavaa, joten nyt ohjelma käsittelee virheet siten, että ohjelman suoritus jatkuu normaalisti. Kun tiedot on luettu kenttäpääteeltä, ne siirretään sekä käyttöliittymän näyttöihin että Set dynamic data attributes (SDDA) -toimintoon, jossa kenttäpääteeltä tuleviin puhtaisiin numerotietoihin lisätään mittauksen nimi, aikaleima sekä niille annetaan suureyksikkö. Koska kaikki hitaat mittaukset ovat lämpötiloja, luettuja numerotietoja ei tarvitse erikseen muuttaa insinööriyksiköihin, sillä kenttäpääteet tekevät sen lämpötilamittauksille automaattisesti. Tämän jälkeen eri mittaustiedot yhdistetään yhdeksi datavuoksi ja siirretään toiseen SDDA-toimintoon, jossa niille annetaan mittauksen aloitusaika sekä vallitseva kellonaika, joka lasketaan pyörähtäneiden while-silmukoiden määrän perusteella. Tämän jälkeen mittaustiedot tallennetaan LabView:n Write to measurement file -tallennustoiminnolla, mikäli operaattori on asettanut tallennuksen päälle. Tallennus suoritetaan .lvm-tyyppisiin tekstitiedostoihin. Myös kaikki laitteiston ohjaustiedot tallennetaan vastaavalla tavalla.

NI PXI/SCXI-tiedonkeruulaitteelta tulevien nopeiden mittausten luku ja tallennus on esitetty kuvassa 19.



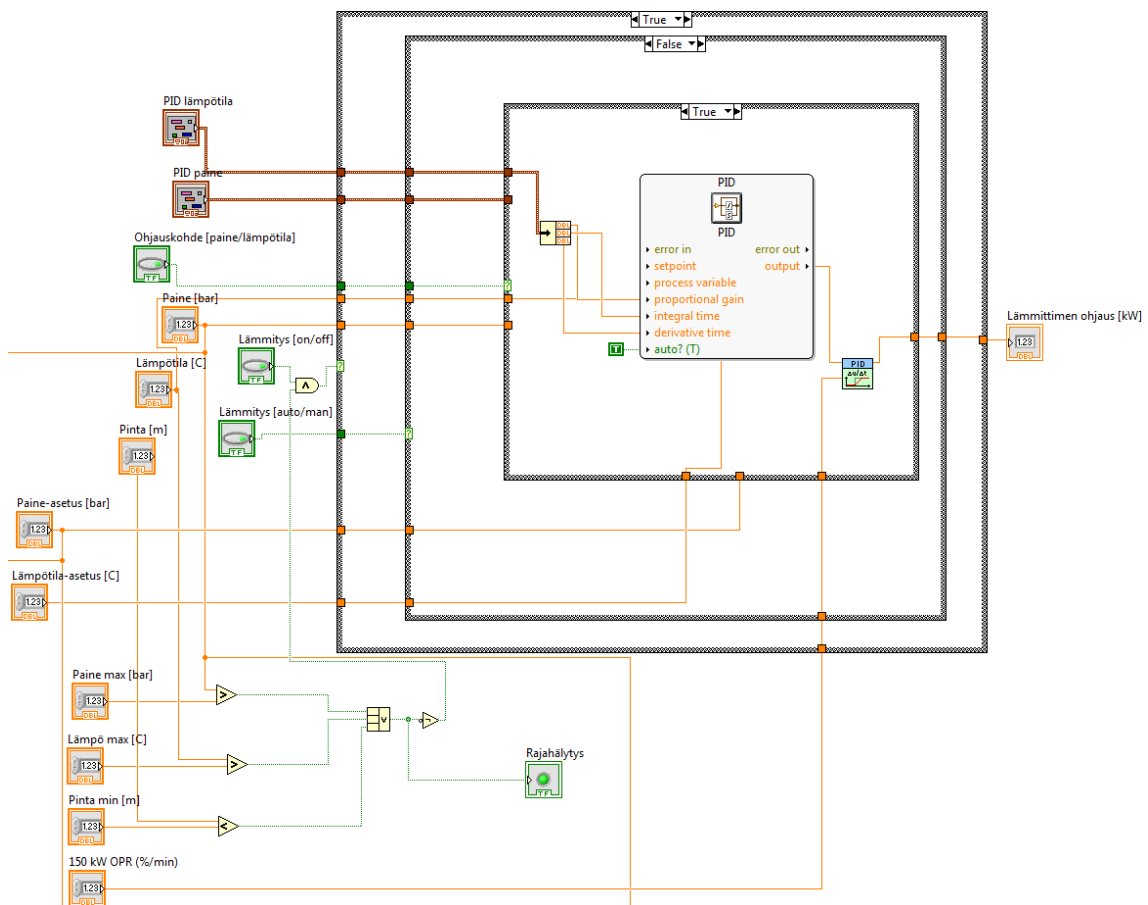
Kuva 19. Nopeiden mittausten luku ja tallennus mp-laitteen logiikkaohjelmassa.

Nopeat mittaukset luetaan LabView:n DAQ Assistant -aliohjelman avulla. Tämä aliohjelma on kehitetty juuri tällaisia tiedonkeruulaitteita varten, joten se ei toimi edellä mainittujen cFP-kenttäpäätteiden kanssa. DAQ Assistant muuttaa tiedonkeruulaitteelta tulevat jännitesignaaleja insinööriyksiköihin annettujen parametrien avulla. NI PXI/SCXI -tiedonkeruulaite mittaa vain jännitesignaaleja, joten virtaviestiä tuottavien anturien kanssa käytettiin fyysisiä shunttivastuksia, jotta virtaviesti saatiin jänniteviestiksi. DAQ Assistantilta datavuo jaetaan sekä edellä mainittuun SDDA -toimintoon, jossa datalle määritellään mittausten aloitus- ja vallitseva ajanhetki, että keskiarvoistamistoimintoon, jossa data muutetaan näyttöjä varten samalle mittausnopeudelle kuin hitaat mittaukset. Tämän jälkeen molemmat datavuot tallennetaan omaan .lvm-tiedostoihinsa. Keskiarvoistettu data tallennetaan aina kun hitaita mittauksia ja ohjaustietoja tallennetaan. Tämä tallennus on aina päällä, kun koelaitteistolla tehdään tutkimusta. Nopeita mittauksia

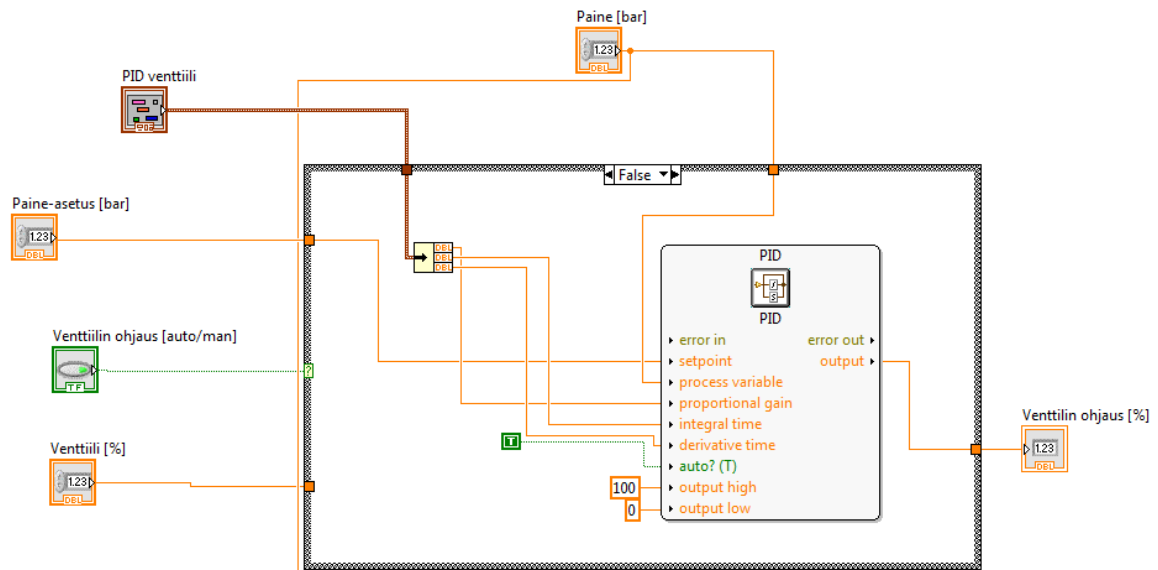
tallennetaan lyhyempiä pätkiä, jolloin operaattori on vastuussa tallennuksen oikea-aikaisesta aloittamisesta ja lopettamisesta. Tätä tallennustapaa tarvittiin pääasiassa pinnanpuodotuskokeissa.

Seuraavaksi ohjelma laskee keskiarvoistetuista nopeista paine-eromittauksista RPV-säiliön, pääkiertoputken ylä- ja alaosan sekä uimurikytkinkammioiden pinnankorkeudet. Tämä laskenta suoritetaan tehtävään laaditulla Pinnankorkeus.vi aliohjelmalla. Pinnankorkeus.vi laskee pinnankorkeuden mitatun paine-eron, säiliön pintojen maksimi- ja minimiarvojen erotuksen sekä höyryn ja veden lämpötilojen perusteella. Höyryn ja veden lämpötila-arvojen perusteella niille lasketaan tiheydet käyttäen Xsteam.vi aliohjelmaa, joka sisältää IAPWS IF-97 standardin mukaiset veden ja höyryn aineominaisuudet.

RPV-säiliön lämmittimen ohjaus sekä paineensäätö toteutettiin RPV-tank heater.vi nimisen aliohjelman avulla. Tämän aliohjelman vuokaavio on esitetty kuvissa 20 ja 21.



Kuva 20. RPV-tank heater.vi -aliohjelman lämmittimensäätöosion vuokaavio.



Kuva 21. RPV-tank heater.vi -aliohjelman paineensäätöosion vuokaavio.

Lämmittimen säätöosion pääosa rakennettiin sisäkkäisten LabView:n case-rakenteiden avulla. Näihin rakenteiden avulla voitiin määritellä vaihtoehtoisia toimintoja riippuen niihin liitettyjen kytkimien tai muiden ohjausten tilasta. Tässä ohjelmassa uloin case-rakenne liitettiin lämmittimenohjauksen pääkytkimeen, jonka avulla valittiin onko lämmitin päällä vai ei. Jos kytkin on false-tilassa, syötetään kuvan 20 oikealla näkyvään lämmittimen tehon ohjaukseen nolla. False-tila on myös kytkimen oletustila.

Jos lämmittimenohjauksen pääkytkin on true-tilassa, aktivoituu seuraava case-rakenne. Tämä rakenne on liitetty kytkimeen, jolla valitaan onko lämmittimen ohjaus manuaalinen vai automaattinen. Jos kytkin on false-tilassa (oletustila), käytetään automaattiohjausta ja true-tilassa manuaaliohjausta. Manuaaliohjaustilassa operaattori voi syöttää lämmittimelle haluamansa tehon käyttöliittymästä.

Automaattiohjaustilassa aktivoituu sisin case-rakenne. Tämä rakenne on liitetty kytkimeen, jonka avulla voidaan valita, toimiiko automaattiohjaus RPV-säiliön paineen (oletus) vai lämpötilan perusteella. Molemmat ohjaukset ovat samanlaisia ja koostuvat LabView:n PID-säätäjistä sekä tämän säätöarvon muutosnopeuden rajoittajasta. PID-säätäjän asetusarvot sekä haluttu paineen tai lämpötilan asetusarvo annetaan käyttöliittymästä. Lisäksi PID-säätäjä tarvitsee tiedon mitatusta paineesta tai lämpötilasta. PID-säätäjä laskee

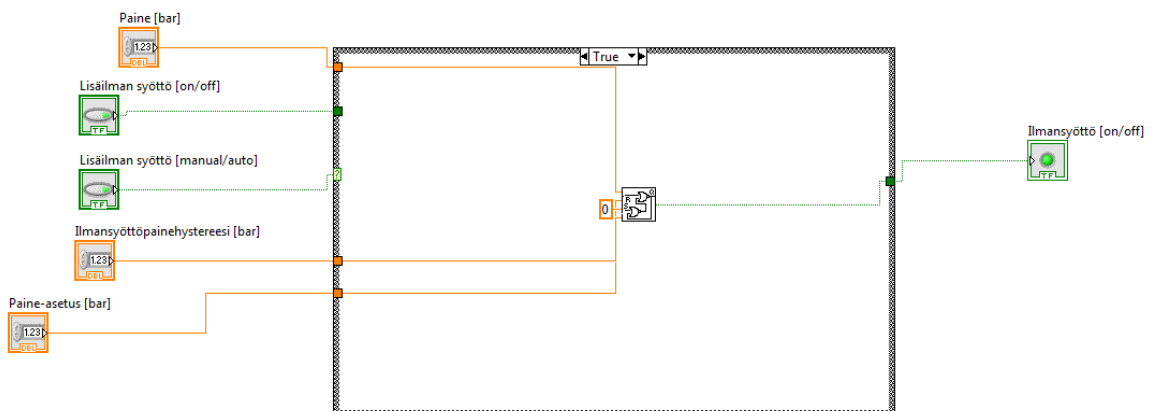
näiden tietojen avulla numeroarvon, joka vastaa lämmittimen tuottamaa lämpötehoa kilowatteina. Säätöarvon muutosnopeuden rajoittaja tarvittiin, jotta säätimen toiminta olisi rauhallisempaa käynnistystilanteissa. Rajoittajaan syötetään käyttöliittymästä haluttu muutosnopeus. Molemmat säätötavat ovat siis periaatteessa samalaisia, joten eri case-rakenteissa ainoastaan asetusarvot ja mittaustieto otetaan eri paikasta. Koska kyseessä on aliohjelma, kuvassa 20 kaikki mittaukset ja ohjaukset ovat LabView:n yksinkertaisten ohjausten ja näyttöjen muodossa. Pääohjelman puolella niihin syötetään sopivat tiedot ja arvot. Pääohjelmassa lämmittimen ohjaus -kohdasta tuleva tieto syötetään ensin tarkistustoimintoon, joka katsoo että tuleva ohjaus on nollan ja ennalta määritellyn ylärajan välissä sekä pyöristää lähimpään raja-arvoon mikäli näin ei ole. Tämän jälkeen aliohjelmasta tuleva kW-tieto muutetaan virtaviestiä vastaavaksi lukuarvoksi LabView:n skaalausohjelman avulla. Tämä lukuarvo syötetään SV:een, joka välittää sen kenttäpäänteen analogiohjauskortille. Tältä kortilta ohjaussignaali lähtee virtaviestinä lämmitintä ohjaaville puolijohdereleille.

Kuvan 20 alareunassa näkyy RPV-säiliön suojausautomaatiikka, jossa mitattua lämpötilaa, painetta ja säiliön pinnankorkeutta verrataan annettuihin maksimiarvoihin. Mikäli yksikin mittausta ylittää raja-arvon, laukeaa raja-hälytys sekä ensimmäinen case-rakenne palaa false-tilaan, jolloin lämmitin sammuu. Samalla käyttöliittymässä lämmittimen ohjauskytkin kääntyy automaattisesti tilaan false, jolloin operaattori saa tiedon turvatoiminnon aktivoitumisesta.

Kuvassa 21 oleva paineenohjausautomaatiikka on vastaava kuin edellä esitetty lämmittimen ohjaus. Case-rakenne on liitetty kytkimeen, jolla valitaan käytetäänkö automaattista vai manuaalista ohjausta. PID-säätäjälle annettiin kiinteät raja-arvot, koska venttiiliä ei voi ohjata kuin välillä 0 %–100 % eli täysin kiinni ja auki olevien tilojen välillä. Pääohjelman puolella nämä prosenttiarvot skaalattiin virtaviestiksi ja syötettiin SV:n avulla eteenpäin ohjauskortin kautta venttiilin asennoittimelle. Koska säätöventtiili ei ollut tiivis, täytyi samaan linjaan asentaa sen kanssa sarjaan sulkuventtiili. Sulkuventtiilin ohjaus toteutettiin logiikkaohjelmistossa pääohjelman puolella Set-Reset-rele -toiminnolla. Tämä toiminto laskee asetusarvon ja mittaustiedon välisen erotuksen ja vertaa sitä sille annettuihin päälle- ja poiskytkentärajoihin. Tässä tapauksessa rele-toiminto toimii ”väärinpäin” eli toiminnolle

syötetään asetusarvon kohtaan paineenohjaustoiminnolta tuleva venttiilin asentotieto prosentteina ja varsinaiseen mittauskohtaan syötetään vakioarvo nolla. Tällöin Set-reset -rele tutkii pelkkää mittaustietoa. Päällekytkentärajaksi asetettiin 2 % ja poiskytkentärajaksi 1 % eli sulkuventtiili ei aukea välittömästi kun säätöventtiili alkaa aueta ja samoin sulkeutuu hieman säätöventtiiliä aiemmin.

SWAP-säiliön toimintojen ohjauksia varten rakennettiin vastaava aliohjelma Swaptank heater.vi. Tämän aliohjelman lämmittimen säätöosio on vastaava kuin edellä esitetty RPV-säiliön säätö ja pääohjelman puolella ohjaustieto käsitellään vastaavalla tavalla virtaviestiksi ja välitetään eteenpäin. Kuten ohjelmiston tehtävien määrittely -kappaleessa todettiin, SWAP-säiliö oli normaalitilassa yhteydessä RPV-säiliön ylätilaan ja niillä oli sama paine, joten SWAP-säiliön aliohjelma ei sisällä paineen säätöosiota. SWAP-säiliön painetta voitiin kuitenkin kasvattaa tarvittaessa syöttämällä sinne paineilmaa. Tämän toiminnon säätöosio on esitetty kuvassa 22.

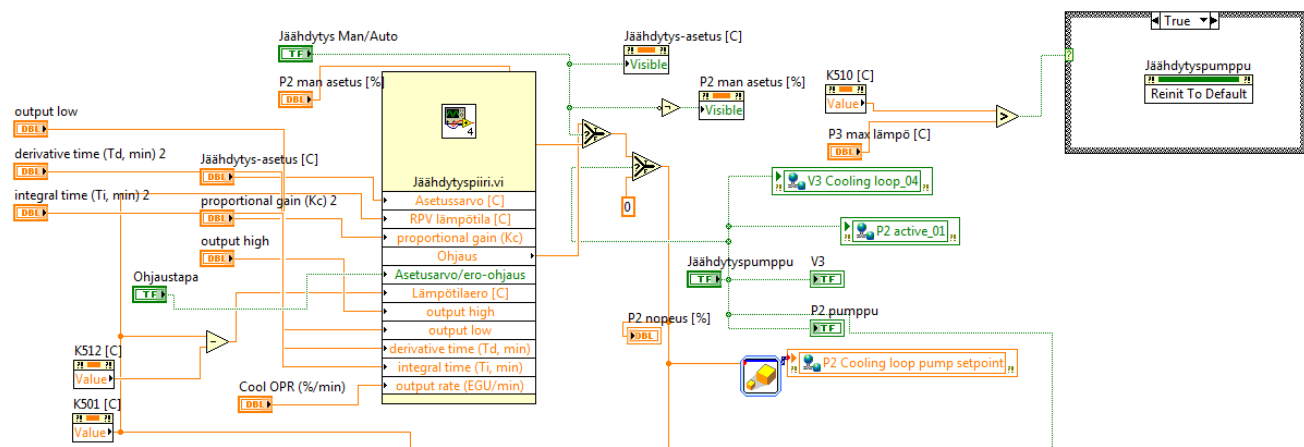


Kuva 22. Swaptank heater.vi -aliohjelman paineistuksen säätöosion vuokaavio.

Paineilman syöttö toteutettiin digitaaliviestillä ohjattavan magneettiventtiilin avulla. Tämä viesti välitettiin pääohjelmassa SV:n avulla kenttäpäänteen digitaaliohjaus/mittauskortille, joka välitti sen venttiilille. Paineilman syöttöä voitiin ohjata joko manuaalisesti tai automaattisesti. Manuaaliohjaustilassa (oletus) venttiiliä käyttöliittymästä ohjaavan kytkimen toiminta aseteltiin niin, että operaattorin pitää painaa kytkintä koko ajan, jotta venttiili olisi auki. Tämä tehtiin varotoimenpiteenä, jottei venttiili jäisi vahingossa auki. Automaattiohjaus toteutettiin edellä esitellyllä Set-Reset-rele -toiminnolla. Tässä

tapauksessa toiminto toimii oikein päin, eli mikäli asetusarvon ja mittauksen erotus on suurempi kuin päällekytkentäraja, rele toimii ja ilmansyöttöventtiili aukeaa. Toiminto jatkuu kunnes asetettu poiskytkentäraja, tässä tapauksessa laskettu erotus on nolla, saavutetaan, ja venttiili sulkeutuu.

Laitteiston jäähdytyspiirin ohjaukset toteutettiin samalla periaatteella kuin edellä esitetyt lämmittimen ohjaukset, mutta suurin osa toiminnoista toteutettiin pääohjelman puolella, kuten kuvasta 23 nähdään.



Kuva 23. Matalapainelaitteiston jäähdytyksen ohjaus.

Varsinainen automaattiohjaus on Jäähdytyspiiri.vi aliohjelmassa. Tämä aliohjelma on vastaava kuin kuvassa 20 sisimmän case-rakenteen sisällä oleva osa eli se sisältää PID-säätäjän sekä säätöarvon muutosnopeuden rajoittajan. Poikkeavana piirteenä Jäähdytyspiiri.vi sisältää case-rakenteen avulla toteutetun valinnan siitä käytetäänkö jäähdytyspiirin automatiikan ohjaukseen RPV-säiliön lämpötilaa vai säiliöstä lähtevän ja sinne palaavan veden lämpötilojen erotusta. Muutoin automatiikka toimii vastaavalla tavalla kuin edellä esitetyt lämmittimien automaattiohjaukset. Jäähdytyksen ohjauksessa manuaali- ja automaattitoiminnon välinen valinta tehdään pääohjelmassa kytkimen avulla käyttäen LabView:n valintatoimintoja. Näillä valintatoiminnoilla voidaan tällaisissa tilanteissa korvata case-rakenteita. Mikäli kytkin antaa arvon nolla eli false (oletus), on manuaaliohjaus päällä ja operaattorin syöttämä pumpun pyörimisnopeuden arvo prosentteina välitetään jäähdytyspumppu. Mikäli kytkin on asennossa 1 eli true, on automaattiohjaus päällä ja pumpun pyörimisnopeusarvo tulee Jäähdytyspiiri.vi:n PID-

säätäjältä. Sekä PID-säätäjä että manuaaliohjaus ilmoittaa pumpun pyörimisnopeuden prosentteina täydestä tehosta. Jäähdytyspiiri sisältää myös pääkytkimen, joka sekä käynnistää jäähdytyspiirin pumpun että avaa jäähdytyspiirin pääkierrosta erottavan venttiilin. Lisäksi tämä kytkin ohjaa myös toista valintatoimintoa, joka syöttää pumpun pyörimisnopeudeksi nollan, mikäli pumppua ei ole käynnistetty. Pumpun käynnistys ja venttiilin avaaminen hoidetaan digitaaliviestien avulla, mutta pyörimisnopeustieto välitetään virtaviestin avulla, joten se pitää skaalata annetuista prosenttiluvuista. Kuvan 23 oikeassa reunassa näkyy jäähdytyspiirin pumpun suojaustoiminto. Tämä sammuttaa pumpun, mikäli jäähdytyspiirin lämpötila on ennalta määriteltyä turvarajaa korkeampi. Tämä toiminto tarvittiin, koska jäähdytyspumpun suurin sallittu lämpötila oli vain 120 C. Jos lämmönvaihtimen lopullinen lämpönielu menetettäisiin, nousisi pumpun lämpötila yli suurimman sallitun lämpötilan ja pumppu voisi vahingoittua.

Logiikkaohjelmiston tuli myös osata laskea pääkiertoputkessa virtaavan veden massavirta ja säätää sen perusteella pääkiertopumppua niin, että massavirta pysyy vakiona. Massavirta lasketaan virtausmittarilta saadun tilavuusvirtatiedon ja pääkierron lämpötilatiedon avulla. Lämpötilan avulla edellä esitetty Xsteam.vi laskee veden tiheyden, jolla kerrotaan mitattu tilavuusvirta, jolloin saadaan putken massavirta selville. Koska vedellä oli kokeiden aikana pääkiertoputkessa suuri virtausnopeus, oli mahdollista että lämpötilamittausanturi vioittuisi, joten veden tiheyden laskentaan käytettävän lämpötilan vaihtaminen kesken kokeen piti olla mahdollista ilman kokeen keskeytystä. Tästä syystä laskentaan käytettävä lämpötila valitaan case-rakenteen avulla, joka sisältää kolme eri vaihtoehtoa, kaksi varsinaisessa pääkierrossa olevaa mittausta ja viimeisenä varavaihtoehtona RPV-säiliön lämpötilan. Lasketun massavirran avulla pääkiertopumpun ohjaukseen laadittu Massavirta.vi aliohjelma ohjaa pumpun pyörimisnopeutta prosentteina, mikäli automaattiohjaus on valittu käyttöön. Itse aliohjelma on vastaava kuin edellä esitelty Jäähdytyspiiri.vi sisältäen PID-säätäjän ja säätöarvon muutosnopeuden rajoittajan. Johtuen pumppujen ohjaukseen käytettävien taajuusmuuttajien ominaisuuksista, niille pitää antaa sekä digitaalimuotoinen käynnistymissignaali että analogimuotoinen pyörimisnopeustieto. Tämä pätee kaikkiin laitteiston pumppuihin, myös edellä esitettyyn jäähdytyspiirin pumppuun. Tämä digitaalisignaali saadaan kaikille pumppuille käyttöliittymän kytkimiltä, joten nämä kytkimet toimivat samalla pumppujen pääkatkaisijoina.

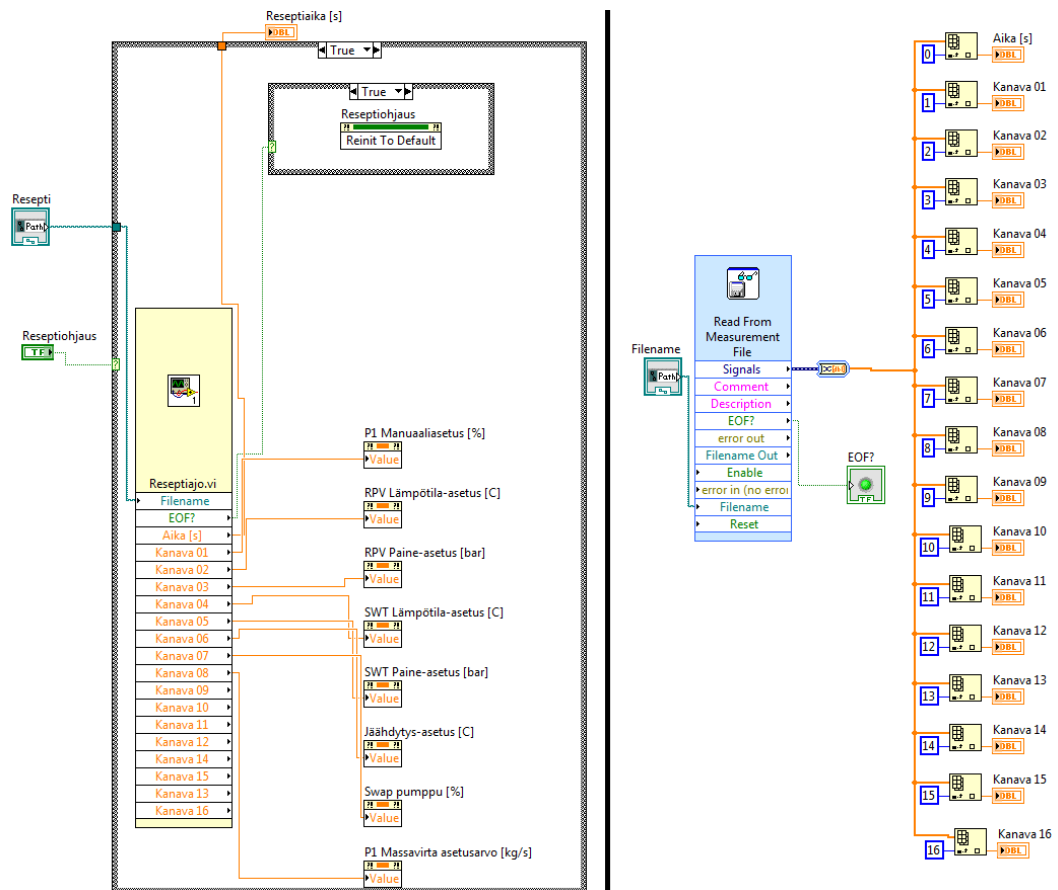
Edellä kuvattujen toimintojen lisäksi logiikkaohjelmiston tehtäviin oli määritelty kaikkien laitteiden etäkäyttö. Kaikissa edellä esitellyissä toiminnoissa oli myös manuaalikäyttömahdollisuus. Muiden tarpeellisten toimintojen, lähinnä venttiilien ohjauksien ja ilman syötön uimurikytkinkammioihin, etäkäyttö toteutettiin liittämällä käyttöliittymän kytkimet ja ohjaukset suoraan tai tarvittaessa skaalaustoimintojen avulla vastaaviin SV:hin. Nämä välittivät komennot edelleen kenttäpääteen digitaali- tai analogiohjauskorttien kautta toimilaitteille. Kaikki ohjaussignaalit tallennettiin, jotta jälkikäteen voitiin tarkistaa, mitä operaattoritoimenpiteitä oli tehty.

Viimeiseksi logiikkaohjelmistoon laadittiin muutamia kokeiden tekoa helpottavia toimintoja. Eräissä kokeissa uimurikytkinkammioihin piti syöttää väriainetta virtaussuuntien selvittämiseksi. Tätä varten ohjelmistoon laadittiin LabView:n signaaligeneraattoritoiminnon avulla osio, joka tuottaa nollan ja yhden välillä olevaa kanttiaaltoa eli säännöllistä digitaalisignaalia paineistetun väriainesäiliön venttiilin ohjaukseen. Väriaineen ruiskutusaika, taajuus ja ruiskutusventtiilin pääohjauskytkin olivat operaattoreiden hallittavissa käyttöliittymässä. Pääohjauskytkin tarvittiin, koska signaaligeneraattori toimii aina kun pääohjelma on päällä.

Pinnanpuotuskokeita varten täytyi SWAP- ja pääkiertopumpun sekä SWAP-linjan venttiilien toiminta automatisoida. Koetta suoritettaessa ja SWAP-pumpun ollessa automaattiohjauksessa, pumpun pyörimisnopeutta lisätään, kun mitattu RPV-säiliön pinnankorkeus lähestyy pääkiertoputken lähtöä, jotta tarpeeksi nopea pinnankorkeuden lasku saadaan aikaan. Tämä toteutettiin edellä mainitulla skaalausohjelmalla siten, että mitatun pinnankorkeuden saavutettua ennalta määritellyn arvon, skaalaus lisää pumpun pyörimisnopeutta ennalta määritellyn rampin mukaisesti. Koska pumppujen ei ole suotavaa pyöriä kuivana, piti logiikkaohjelmiston sammuttaa molemmat pumput kun tutkittavat uimurikytkimet laukeavat eli ylempi pääkiertoputki on tyhjä. Tämä toteutettiin case rakenteen avulla niin, että pumppujen automaattipysäytyksen ollessa päällä, molempien uimurikytkimien laukeaminen eli niiden muuttuminen true-tilaan saa aikaan pumppujen pysäytyksen. Varsinainen pysäytys toteutettiin LabView:n invoke-node toiminnolla, joka tässä tapauksessa asettaa pumppujen käynnistyskytkimet oletustilaansa eli false-tilaan, jolloin pumput sammuvat. Lisäksi pienen viiveen jälkeen sulkeutuu myös SWAP-säiliön

pääkiertolinjaan yhdistävä venttiili. Tämä viive toteutettiin LabView:n Delay signals – toiminnolla. Tällä venttiilillä on myös oma automaattiohjauksensa, joka avaa venttiilin RPV-säiliön pinnankorkeuden ollessa alle ennalta määritellyn laukaisurajan ja pitää sen auki kunnes edellä mainittu pumppujen pysäytystoiminto sulkee sen. Tämä automatiikka toteutettiin LabView:n SR bistable rele-toiminnolla, joka vastaa Set-reset-relettä. Kokeen alkaessa operaattori piti kuitenkin asettaa eri toiminnot päälle ja käynnistää SWAP-pumppu sopivalle pyörimisnopeudelle, joten tätä koetta ei automatisoitu täysin.

Reaktorin ylös- ja alasajotilanteita simuloivia kokeita varten ohjelmistoon laadittiin reseptiajo-ominaisuus, joka on esitetty kuvassa 24.



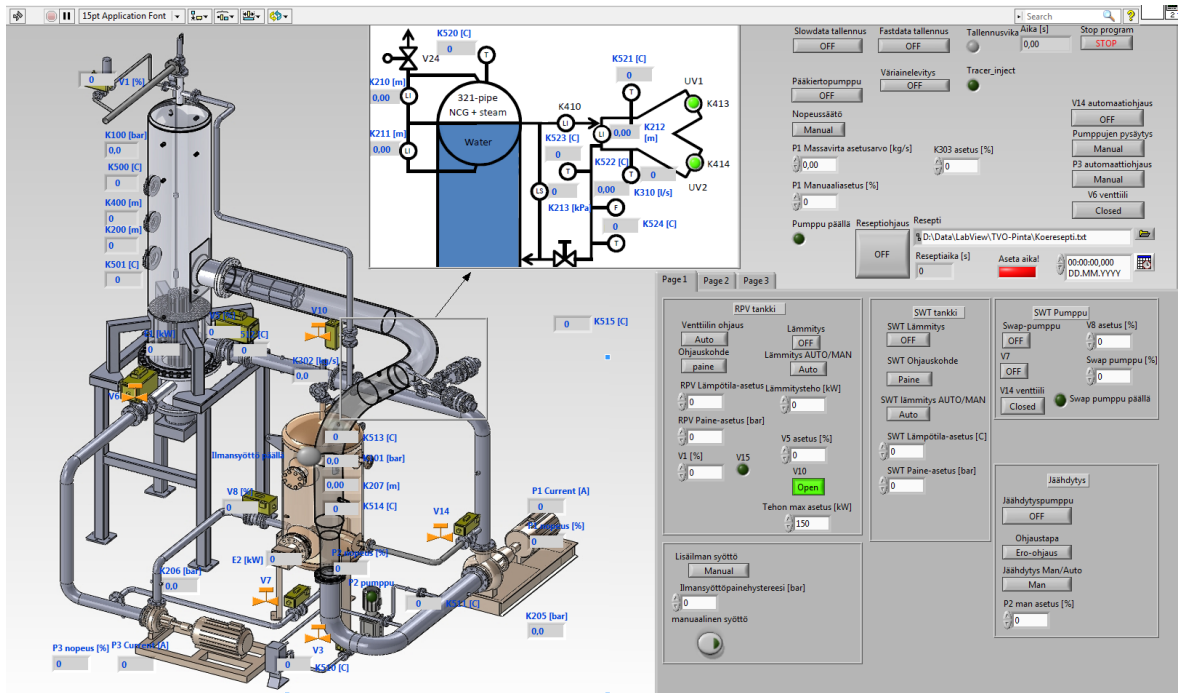
Kuva 24. Mp-laitteiston logiikkaohjelmiston reseptiajotoiminto pääohjelmassa vasemmalla ja mustan pystyviivan oikealla puolella Reseptiajo.vi:n vuokaavio.

Reseptiajon ollessa käytössä ohjelmisto ajaa laitteistoa täysin itsenäisesti. Reseptiajoa varten rakennettiin Reseptiajo.vi aliohjelma, joka on esitetty kuvassa 24 mustan

pystyviivan oikealla puolella ja varsinainen reseptiajo pääohjelmassa vasemmalla. Itse resepti on .txt-muodossa oleva tekstitiedosto, jossa on puolen sekunnin välein annettu kaikille tarpeellisille parametreille arvot, kuten esimerkiksi halutuille säiliöiden lämpötiloille ja pumppujen pyörimisnopeuksille. Pääohjelmassa syötetään käyttöliittymästä haluttu resepti aliohjelmalle. Reseptiajo.vi:n sisältämä Read From Measurement File -toiminto käy etsimässä tämän tekstitiedoston ja lukee sitä rivi kerrallaan. Parametrit saadaan ulos LabView:n dynamic data -muodossa, josta ne muutetaan numeeriseen matriisimuotoon. Tästä muodosta yksittäiset parametrit saadaan LabView:n matriisihakutoiminnolla, joka noutaa ne sen tiedon perusteella, monesko luku riviltä halutaan. Nämä tiedot otetaan ulos aliohjelmasta ja syötetään LabView:n property node -toimintojen avulla oikeisiin ohjauksiin. Käyttämällä property node:ja arvot näkyvät myös käyttöliittymässä, mutta niitä käytettäessä täytyy muistaa, että ohjelmallinen käyttö ohittaa operaattorin syöttämän arvon, eli reseptiä ei voi ohittaa operaattoritoiminnoilla ellei reseptiohjausta kytketä pois päältä. Kun reseptin kaikki rivit on luettu, Read From Measurement File -toiminto osaa tunnistaa tämän ja lähettää true-arvoisen digitaalisignaalin, joka sammuttaa reseptiajon asettamalla case-rakenteen false-tilaan. Näin laitteisto palaa operaattorin hallintaan.

Kuten tämän kappaleen alkupuolella todettiin, on pääohjelma niin kauan päällä kuin sen ympärillä oleva while-silmukka pyörii. Silmukka pysähtyy kun operaattori painaa pysäytyskytkintä. Tällöin ohjelmisto etenee viimeiseen vaiheeseen, jossa pumppujen ja lämmittimien analogi- ja digitaaliohjauksiin syötetään nollat. Tämä täytyy tehdä, koska SVE:n muistiin jää viimeinen arvo, joten ohjelmaa uudelleen käynnistettäessä voi olla mahdollista että esimerkiksi RPV-säiliön lämmitin olisi välittömästi päällä täydellä teholla. Tämän toiminnon jälkeen ohjelma sammuu.

Edellä on esitetty logiikkaohjelmiston toiminta vuokaavion avulla suunnittelijan ja ohjelman laatijan näkökulmasta. Laitteiston operaattoreille on kuitenkin tärkeämpi työkalu ohjelmiston käyttöliittymä, joka on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Mp-laitteiston logiikkaohjelmiston käyttöliittymä.

Käyttöliittymä toteutettiin käyttämällä pohjana suunnittelupiirrosta (kuva 8) sekä uimurikytkinkammioiden osalta karsittua PI-kaaviota (kuva 12). Näihin kuviin sijoitettiin kaikkien mittausten näytöt oikeille kohdille sekä myös ohjelmistosta tulevat venttiilien asentoarvot sekä pumppujen pyörimisnopeustiedot. Käyttöliittymän oikeaan laitaan on asetettu kaikki ohjaukset ryhmiteltyinä laitteittain, esimerkiksi kaikki RPV-säiliön ohjaukset löytyvät yhdestä laatikosta. Käyttöliittymässä on myös käytetty välilehtiä, joille on sijoitettu harvemmin tarvittavia säätöjä kuten eri PID-säätäjien parametrit.

5.1.3 Automaatiojärjestelmän toiminnan testaus ja varsinaiset kokeet

Automaatiojärjestelmän komponenttien toiminta testattiin ja kaikki mittalaitteet kalibroitiin niiden saavuttua toimittajilta. Myös logiikkaohjelmiston toimintoja testattiin simuloimalla eri antureilta saatavia signaaleja ohjelmallisesti, jotta nähtäisiin erityisesti turvatoimintojen ja automaatiohjausten toimivan oikealla tavalla. Kun laitteisto oli kasattu valmiiksi ja kaikki automaatiojärjestelmän komponentit olivat paikoillaan sekä kytketty kenttäpäätteisiin, aloitettiin koko laitteiston toimintaa testaavat esikokeet. Esikokeissa etsittiin automaatiojärjestelmään mahdollisesti jääneitä vikoja ja haettiin

automaattiohjauksille oikeita parametreja. Esikokeiden aikana logiikkaohjelmiston tiedonkeruupuolen kanssa oli jonkin verran ongelmia, joten ohjelmistosta tehtiin useita kehitysversioita. SV:ien avulla tuodun datan nimeäminen oli yksi ongelmista. Tätä varten kehitettiin oma aliohjelmansa, ennen kuin otettiin käyttöön edellä mainitut SDDA –toiminnot, joilla ongelma saatiin ratkaistua. Suurempi ongelma oli oikean kellon ajan saaminen datatiedostoihin, jotta tietoja voitiin myöhemmin yhdistellä. Aluksi hitaisiin mittauksiin syötettiin LabView:n oma kellon aika ja nopeiden mittausten kellonajat otettiin DAQ assistantin kautta. Näillä ei kuitenkaan saatu synkronointia eri tiedostojen välillä oikein, joten lopulta päädyttiin ohjelmistokuvaosiossa esiteltyyn versioon, jossa kaikkiin tiedostoihin syötetään sama aika, joka on laskettu sekunteina kokeen alusta.

Koelaitteiston parametrien haku osoittautui tiedonkeruun säätämistä helpommaksi. Suhteellisen nopeasti esikokeiden aloittamisen jälkeen koelaitteistoa pystyttiin ajamaan vaaditulla tavalla. Ainoastaan laitteiston jäähdytyksen automatisoinnin kanssa oli ongelmia. Lopulta päädyttiin siihen, että reaktorin jäähtymistä simuloivissa kokeissa ei käytetä jäähdytyspiirin PID-säätäjällä varustettua automaattiohjausta lainkaan. Jäähdytyspiirin pumppu asetettiin toimimaan vakionopeudella ja laitteiston liiallista jäähtymistä kompensoitiin käyttämällä RPV-säiliön lämmitysvastusta, jotta laitteiston lämpötila pysyi haluttuna.

Myös reseptiajo-ohjelmaa yksinkertaistettiin. Alun perin reseptiohjauksen tuli hoitaa enemmän tehtäviä kuin edellisessä kappaleessa on esitetty. Esikokeiden aikana kuitenkin todettiin osan hoituvan operaattoreiden toimesta ennen reseptiajon aloittamista ja osaa toiminnoista kuten eräiden venttiilien säätöä ei lopulta tarvittu.

Esikokeiden jälkeen vuorossa olivat varsinaiset kokeet. Varsinaisten kokeiden aikana tehtiin logiikkaohjelmistosta muutama kehitysversio. Näillä korjattiin joitakin löydettyjä ohjelmointivirheitä, mutta pääasiassa niitä laadittiin edeltävien kokeiden tulosten perusteella koko koelaitteistoon tehtyjen muutosten vuoksi. Nämä muutokset olivat kuitenkin automaatiojärjestelmän kannalta vähäisiä, lähinnä joidenkin mittausten muuttamista ja käyttöliittymän kuvien vaihtamista vallitsevaa tilannetta vastaaviksi. Suurempia vikoja automaatiojärjestelmässä ei kokeiden aikana montaa ollut. Suurin

ongelma oli AT100 kohomittarin vikaantumisen heti kokeiden alettua. Mittari toimi alle noin 100 °C:ssa tehtyjen esikokeiden aikana hyvin, mutta varsinaisissa täysilämpöisissä kokeissa mittari ei näyttänyt mitään. Tämä oli merkittävä ongelma, koska RPV-säiliön pinnankorkeuden tunteminen oli ehdottoman tärkeää pinnanpudotuskokeissa ja nyt jouduttiin luottamaan paine-eromittauksilla tuotettuun dataan. Ongelman yhteyttä lämpötilaan ei aluksi huomattu, koska mittari toimi jälleen laitteiston jäähtyttyä. Lopulta yhteys huomattiin ja viaksi paljastui, että valmistajalta oli tullut tilatun 232 °C:een lämpötilan kestävän mittarin sijasta vastaavan määrän Fahrenheit-asteita kestävä mittari, vaikka mittarin tyyppikilvessä toisin väitettiin. Oikea mittari saatiin vasta aivan viimeisiin kokeisiin, joista sitten saatiin luotettavaa dataa. Lisäksi lämpötilamittausanturien murtuminen ja katkeaminen laitteiston pääkiertoputkessa tuotti ongelmia yhdessä kokeessa. Seuraavaan kokeeseen logiikkaohjelmistoon lisättiin edellä esitelty mahdollisuus vaihtaa mittausta kokeen aikana, jolloin vahingoksi jäi ainoastaan kyseisen kohteen lämpötiladatan menetys.

Pienempiä ongelmia oli mittalaitteiden käynnistymisessä. Nopeiden mittausten NI PXI/SCXI-tiedonkeruulaiteen ja prosessiohjaustietokoneen välinen valokaapeliyhteys ei useinkaan tahtonut muodostua, mikäli tiedonkeruulaite oli ollut sammutettuna. Ainoaksi ratkaisuksi osoittautui laitteiden pitäminen päällä vuorokauden ympäri koko sen ajan kuin tiedettiin kokeita tehtävän. Samoin ongelmia oli cFP-kenttäpäänteen digitaalimittaus/-ohjaukortin kanssa, joka ei suostunut käynnistymään, jos kenttäpäänteen sähkököt olivat katkenneet. Muutoin kokeet menivät automaatiojärjestelmän puolesta hyvin ja tarvittavat tiedot saatiin tallennettua sekä uimurikytkimien toiminnasta halutut asiat tutkittua.

5.2 Korkeapaineoelaitteiston mittaus- ja automaatio-ohjelmisto

Korkeapaineoelaitteiston mittaus- ja automaatio-ohjelmiston suunnittelu ja toteutus toteutettiin samoin vaihein kuin edellä kuvattu matalapaineoelaitteiston ohjelmisto. Myös korkeapaineoelaitteiston logiikkaohjelmiston tekemisessä käytettiin LabView-ohjelmistoa.

5.2.1 Ohjelmiston tehtävien ja ominaisuuksien määrittely

Suurin poikkeus korkeapainekoelaitteiston logiikkaohjelmiston tehtävissä verrattuna matalapainekoelaitteiston ohjelmiston tehtäviin oli, että tämä ohjelmisto hoiti ainoastaan käyttöautomaatio- ja turvallisuustehtäviä. Koska korkeapainelaitteisto sijaitsi fyysisesti PACTEL-koelaitteiston yhteydessä, korkeapainelaitteiston NI cFP-kenttäpäätteet olivat samassa mittausverkossa PACTEL-laitteiston vastaavien kanssa. Siksi varsinaiseen tiedonkeruuseen voitiin käyttää Ydinturvallisuuden tutkimusyksikössä kehitettyä datan tallennusohjelmaa, jonka toiminta ei kuulu tähän esitykseen. Korkeapainekoelaitteiston automaatiojärjestelmä sisälsi pelkästään hitaita mittauksia. Logiikkaohjelmiston tiedonkeruu rajoittui siten niihin arvoihin, jotka tarvittiin käyttöautomaation toimintaan tai operaattoreille käyttöliittymässä esitettäväksi. Logiikkaohjelmiston tuli muuttaa mittausdata insinööriyksiköihin ja laskea pinnankorkeudet mitatuista paine-eroista. Lisäksi koelaitteiston veden virtausnopeuksien odotettiin olevan niin pieniä, että virtausmittareiden virallinen mittausalue ei välttämättä riittäisi. Tästä syystä logiikkaohjelmiston tehtäviin kuuluiin tulkita virtausmittareiden virtaviestien lisäksi pulssiviestejä, joiden mittausalue on virtaviestiä laajempi. Ohjelmiston tuli lisäksi automaattisesti osata vaihtaa ennalta määritellyn arvon perusteella virtaviestin tulkinnasta pulssiviestin tulkintaan ja ilmoittaa vaihdoksesta käyttöliittymässä operaattoreille. Mittaustavan muutoksen ilmaisu oli tärkeää, sillä valmistajan virtausmittareille antama mittaustarkkuusilmoitus oli voimassa vain virtaviestin toiminta-alueella.

Kuten matalapainekoelaitteistonkin kohdalla mainittiin, tuli myös korkeapainelaitteiston kaikki tarvittavat toiminnot olla logiikkaohjelmiston avulla operaattoreiden etäkäytettävissä. Varsinaisiin käyttöautomaation tehtäviin kuuluivat laitteiston lämmittimen ohjaus sekä laitteiston pinnankorkeuden ylärajan valvonta poistoventtiiliä ohjaamalla. Lisäksi ohjelmiston tuli osata laskea kp-RPV-säiliön pinnankorkeuden muutos tarkasti myös ajan suhteen, jotta siitä voitiin myöhemmin laskea kokeissa uimurikytkinkammioihin syötetyn typen määrä.

Edellisessä luvussa todettiin korkeapainekoelaitteiston automaatiojärjestelmän erityispiirteen olevan sen liittäminen PACTEL-koelaitteiston automaatiojärjestelmään.

Tästä johtuen korkeapainekoelaitteiston logiikka-ohjelmiston tuli ohjata myös PACTEL-laitteiston paineistimen vastuksia, vesiruiskutusta ja venttiiliä, jotta kp-laitteiston paine olisi haluttu. Samoin ohjelmiston täytyi ohjata PACTEL-laitteiston höyrystinpiirin pääkiertopumppua, jotta virtaukset kp-laitteistossa olisivat oikeat.

Täysautomatoitu reseptiajo määriteltiin tarvittavaksi ainoastaan jäähdytyskokeissa. Logiikkaohjelmiston täytyi reseptiajossa ajaa kahta laitteistoa yhtä aikaa ja sovittaa parametrit niin, että haluttu kp-laitteiston jäähdytysnopeus pysyisi mahdollisimman vakiona.

Turvallisuustoiminnoista logiikkaohjelmiston tehtäväksi määriteltiin ainoastaan kp-RPV-säiliön lämmittimen sammuttaminen, mikäli säiliön lämpötila tai paine nousisi yli sallittujen arvojen tai pinnankorkeus laskisi alle ennalta määrätyn turvarajan.

Kokeiden tilaajalta tuli edellä mainittujen lisäksi seuraavat vaatimukset:

- Uimurikytkinkammioon menevän linjan ja ohituslinjan maksimi lämpötilaero 3 °C
- Uimurikytkinkammion läpi virtaavan veden massavirtaa voitava säätää
- Paineenpudotus halutulla nopeudella tarkkuudella $\pm 0,1$ bar/min.

5.2.2 Ohjelmiston toteutus

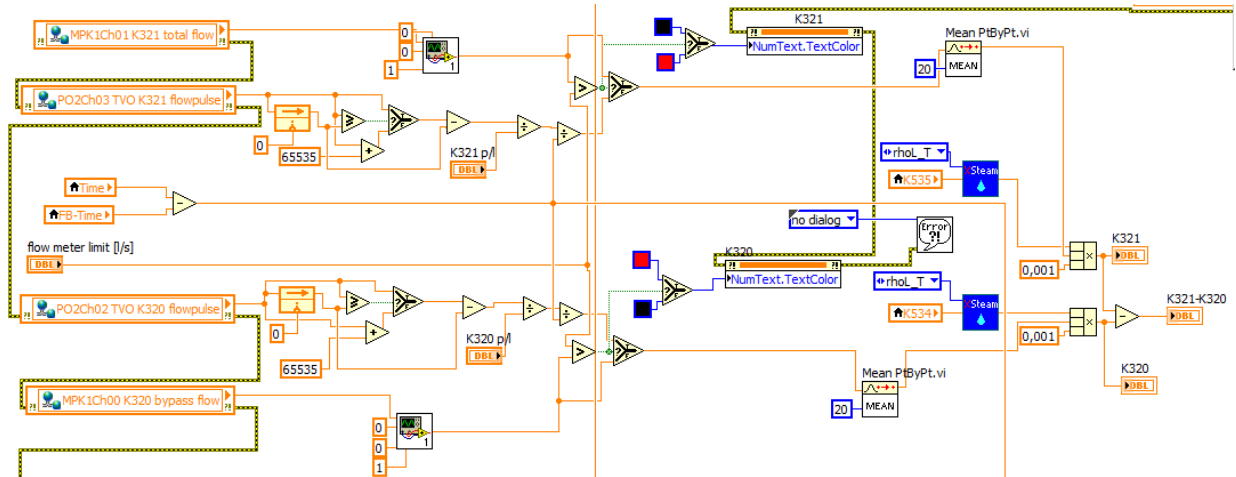
Kuten matalapainekoelaitteiston logiikkaohjelmistokin, toteutettiin korkeapainekoelaitteiston logiikkaohjelmisto NI LabView -ohjelmistolla. Kp-laitteiston ohjelmiston toteutuksesta esitetään myös ainoastaan viimeisin versio, kehitysversioista kerrotaan seuraavassa kappaleessa.

Korkeapainelaitteiston logiikkaohjelmisto sisälsi ainoastaan yhden päävaiheen, eli kaikki toiminnot oli sijoitettu yhden while-silmukan sisään, joka pyörittää kymmenen kertaa sekunnissa. Ohjelmisto käynnistyy suoraan pääohjelmaan ja operaattorin painaessa pysäytyskytkintä koko ohjelmisto pysähtyy välittömästi while-silmukan pysähtyessä.

Korkeapainekoelaitteiston logiikkaohjelmiston ei tarvinnut huolehtia tiedonkeruusta ja tallennuksesta. Myöskään ohjauskomentoja ei erikseen tarvinnut tallentaa, koska datan tallennusohjelma pystyy lukemaan sekä mittaus- että ohjauskorttien tiedot. Automaatio-osioita ja käyttöliittymän näyttöjä varten tarvittavat mittaustiedot tuotiin ohjelmaan aiemmin jo esiteltyjen SV:ien avulla. Kuten matalapainelaitteiston tapauksessakin, lämpötilamittaukset saatiin suoraan celsius-asteina. Muut mittaukset ohjelmiston piti muuttaa insinööriyksiköihin, koska NI MAX ei sitä pysty tekemään. Suurin osa muista mittauksista tuli kp-laitteiston oman kenttäpäänteen virtamittauskortilta. Nämä mittaukset ohjelma muuntaa insinööriyksiköiksi sitä varten laaditulla ShuntConverter_mA.vi aliohjelmalla. Tämä aliohjelma tarkistaa ensin, että mitattu arvo on sallittujen ääriarvojen sisällä. Tämän jälkeen aliohjelma skaalaa mitatun arvon ennalta insinööriyksikössä annettujen ylä- ja alaraja-arvojen avulla. Tässä skaalauksessa otetaan myös huomioon, että yleensä virtaviesti on välillä 4-20 mA eikä 0-20 mA. Muutamat mittaukset, jotka tulevat PACTEL-laitteiston kenttäpäänteiltä jännitemittauskorttien kautta, täytyi muuttaa insinööriyksiköihin ShuntConverter.vi aliohjelmalla. Tämä on vastaava aliohjelma kuin edellinenkin, mutta tarkoitettu jännitemittausten muuntoon.

Kuten mp-laitteiston ohjelmistonkin, myös kp-laitteiston ohjelmiston piti laskea mitattujen paine-erojen perusteella pinnankorkeuksia. Tähän laskentaan käytettiin samaa Pinnankorkeus.vi aliohjelmaa, joka on esitelty mp-laitteiston ohjelmiston kohdalla. Lisäksi ohjelmiston tuli osata laskea eräissä kokeissa laitteistoon syötetyn typen määrä kp-RPV-säiliön pinnankorkeuden laskunopeuden perusteella. Tämä toteutettiin vähentämällä vallitseva pinnankorkeuden arvo edellisen kierroksen arvosta ja jakamalla tämä kierrosten välillä kuluneella ajalla. Seuraavaksi saatu pinnankorkeuden muutos (yksikössä m/s) muutettiin tilavuusvirraksi (yksikköön l/min) kertomalla se sopivalla kertoimella, joka huomioi sekä kp-RPV-säiliön poikkipinta-alan että aikayksikön muutoksen. Lopuksi saadusta arvosta lasketaan jatkuvasti keskiarvoa siten, että lopputulos on tilavuusvirran keskiarvo koko ajalta mittauksen aloittamisesta lopetushetkeen. Tämä laskenta toimii ainoastaan pinnankorkeuden laskiessa kp-RPV-säiliössä, joten operaattorin on käynnistettävä laskenta typen syöttökokeen alkaessa.

Logiikkaohjelmiston tehtäviin oli erikseen määritelty virtausmittausten käsittely. Tähän tehtävään liittyvät toiminnot on esitetty kuvassa 26.

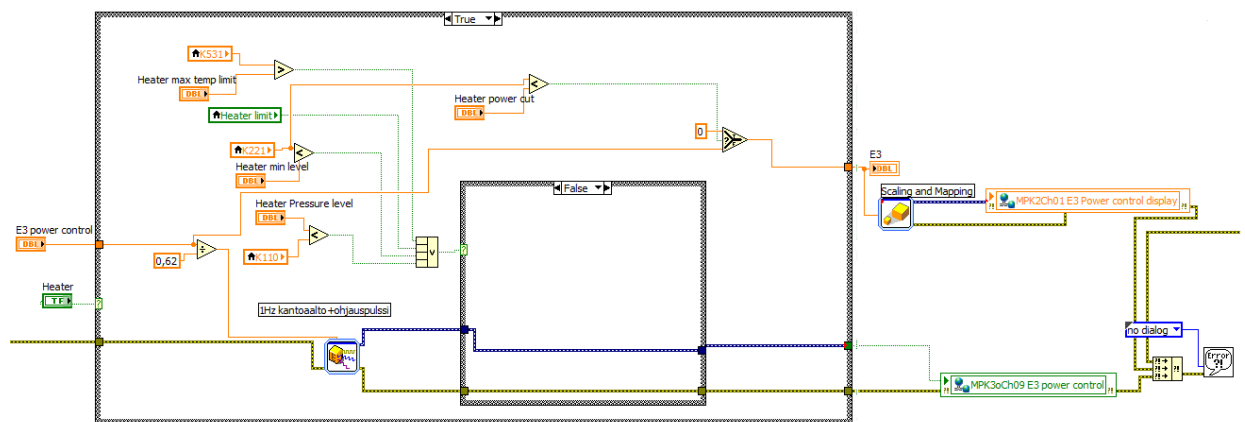


Kuva 26. Virtausmittausten käsittely kp-laitteiston logiikkaohjelmistossa.

Kuvasta 26 nähdään, että virtausmittaukset luetaan kahdella tavalla. Mittaustieto virtausmittarilta saatiin sekä virta- (virtamittauskortilta) että pulssiviestinä (pulssilaskurikortilta). Virtaviesti käsitellään insinööriyksikköön, kuten edellä on kuvattu. Pulssiviestin käsittely on hieman hankalaa, johtuen pulssilaskurikortin ominaisuudesta, että 2^{16} pulssin jälkeen kortti aloittaa laskennan uudelleen nolasta. Tästä syystä ohjelma vertaa SV:lta tulevaa tietoa edellisen kierroksen arvoon. Edellisen kierroksen arvo on tallennettu LabView:n Feedback node -toiminnon avulla. Jos nykyinen pulssimäärä on suurempi kuin edellinen, se syötetään eteenpäin. Jos ei, mitattuun pulssimäärään lisätään 65535 pulssia, joka on pulssilaskurikortin muistin maksimi, ennen laskenta aloitetaan alusta. Tämä valinta suoritetaan aiemmin esiteltyjen valintoimintojen avulla. Seuraavaksi mitatusta pulssimäärästä vähennetään edellisen kierroksen pulssimäärä, koska määrän muutos kertoo virranneen veden määrän. Tämän jälkeen erotus jaetaan virtausmittarille ominaisella pulssia/litra arvolla, jolloin saadaan mittarin läpi mennyt vesimäärä litroissa. Lopuksi tämä muutetaan tilavuusvirraksi jakamalla saatu litramäärä kahden pulssimittauksen välisellä ajalla eli koko ohjelman kahden while-silmukan pyörähdysten välisellä ajalla. Seuraavaksi ohjelma vertaa virtaviestin avulla saatua virtaustietoa ennalta määriteltyyn raja-arvoon, jonka yläpuolella virtaviestillä saatua tilavuusvirtaa voidaan pitää luotettavana. Tällöin tämä tilavuusvirta syötetään eteenpäin ja näytössä tilavuusvirta näkyy mustilla numeroilla. Jos virtaviestillä saatu tilavuusvirta on raja-arvoa pienempi, syötetään ohjelmassa

eteenpäin pulssiviestin perusteella laskettu tilavuusvirta ja tämä näytetään näytössä punaisilla numeroilla. Tämän jälkeen kumpi tahansa tilavuusvirta keskiarvoistetaan 20 mittauksen pätkissä ja muutetaan massavirraksi kertomalla $X_{\text{steam.vi}}$:llä lasketulla tiheydellä. Lopuksi lasketuista massavirroista otetaan erotus, joka kertoo uimurikytkinkammion läpi kulkevan massavirran.

Korkeapainekoelaitteiston RPV-säiliön lämmittimen perusohjauksen toteutus on esitetty kuvassa 27.



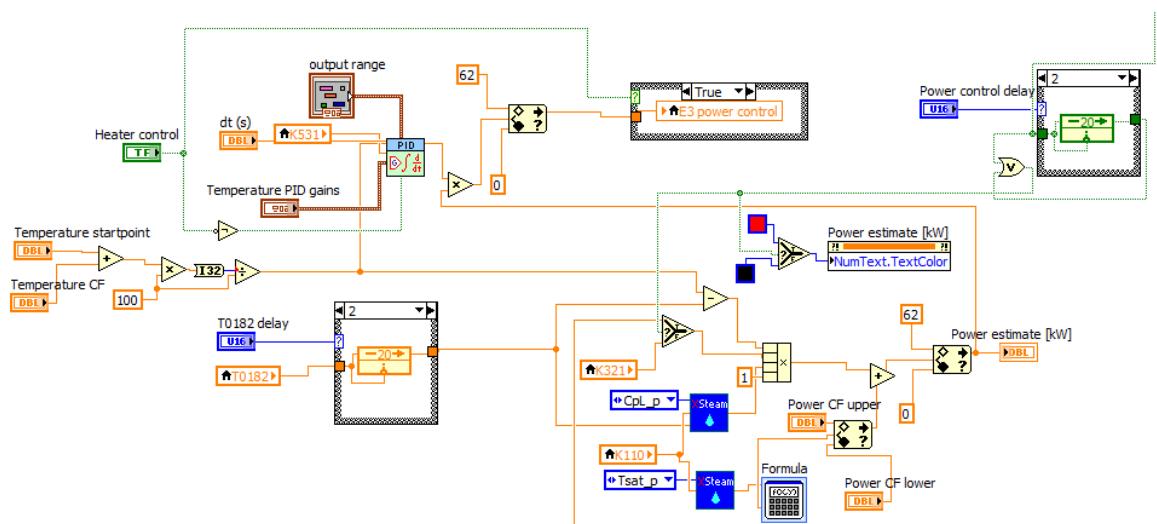
Kuva 27. Kp-laitteiston logiikkaohjelmiston RPV-säiliön lämmittimen ohjausosio.

Toisin kuin matalapainekoelaitteiston logiikkaohjelmistossa, korkeapainekoelaitteiston ohjelmistossa RPV-säiliön lämmittimen ohjaus on kahdessa eri osassa, varsinaisessa lämmittimen ohjausosassa, joka sisältää myös manuaaliohjauksen, sekä automaattiohjauksen laskentaosassa, joka esitellään myöhemmin. Kuvassa 27 lämmittimen varsinaisen ohjaus on ulomman case-rakenteen alareunassa. Kuten matalapainelaitteiston ohjelmistossakin, on tässä pääkytkin, joka täytyy olla true-asennossa, jotta lämmitin on käytössä. Varsinainen ohjaus on suoritettu vastaavalla tavalla kuin matalapainelaitteiston väriaineen syöttötoiminto, eli LabView:n signaaligeneraattori tuottaa digitaalisignaalia vastaavaa 0,25 Hz:n kantiaaltoa, jonka asennossa 1 oloaika määräytyy operaattorin syöttämän tehon perusteella. Esimerkiksi täydellä teholla (62 kW), kantiaalto on 100 % ajasta asennossa 1. Tämä digitaalisignaali syötetään SV:en, joka välittää sen digitaaliohjauskortin kautta lämmitintä ohjaaville puolijohdereleille. Lisäksi operaattorin syöttämä teho skaalataan virtaviestiksi ja syötetään SV:lla analogiohjauskortin tyhjään

kanavaan, jotta datan tallennusohjelma pystyy tallentamaan sen vaikka hidasta digitaalisignaalia ei pystytäkään näytteistämään suoraan.

Kuvan 27 case-rakenteen yläosassa ja sisemässä case-rakenteessa on lämmittimen turvallisuustoiminto. Mikäli kp-RPV-säiliön lämpötila tai paine nousee yli ennalta määritellyn turvarajan, pinnankorkeus laskee alle määritellyn turvarajan tai lämmittimen termomekaaninen lämpötilarajoitin laukeaa, menee sisempi case-rakenne true-tilaan, jossa lämmittimen operaattoreiden käyttämään ohjaustoimintoon syötetään 0 kW sekä varsinaisesti lämmitintä ohjaava digitaalisignaali pakotetaan nolaksi eli false-tilaan, jolloin lämmitin sammuu.

Lämmittimen automaattiohjaus on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28. Kp-laitteiston logiikkaohjelmiston RPV-säiliön lämmittimen automaattiohjauksen laskenta.

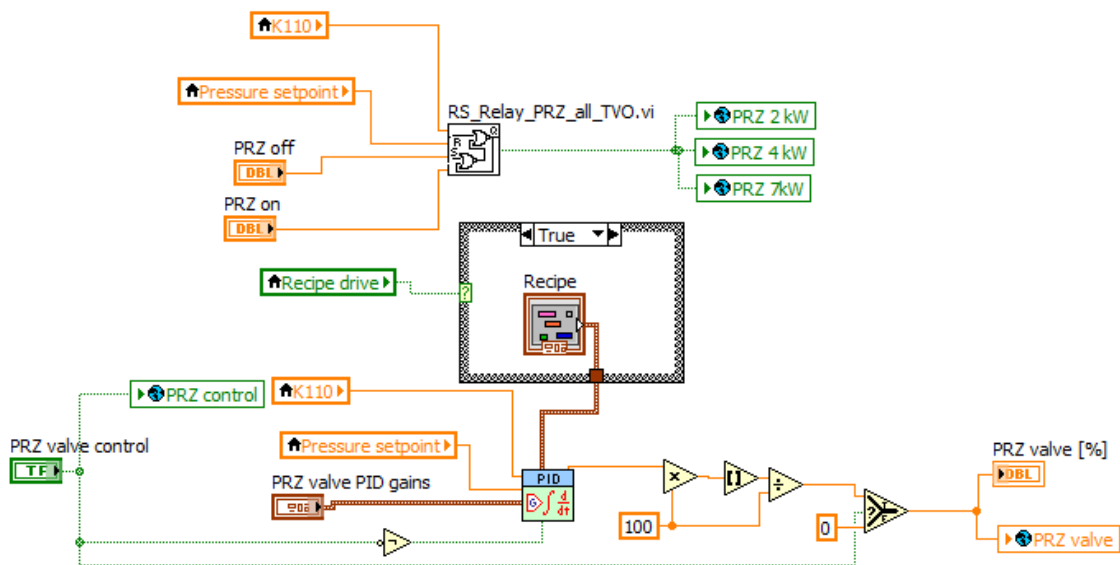
Korkeapainelaitteiston lämmittimen automaattiohjaus oli huomattavasti matalapainelaitteiston vastaavia monimutkaisempi. Automaattiohjauksen toiminta alkaa toivotun lähtölämpötilan ja lämpötilan korjauskertoimen summaamisella ja muuttamisella kokonaisluvuksi. Tällä ei normaalikäytössä ole merkitystä, mutta myöhemmin esiteltävässä reseptiajossa lähtölämpötilaksi voi tulla muitakin kuin kokonaislukuja. Saatu kokonaislukuarvo syötetään PID-säätäjään, joka laskee lämmittimelle syötettävän tehon kerrointa kp-RPV-säiliön lämpötilan perusteella. Varsinainen pyydetty lämpöteho lasketaan kuvan 28 alaosassa olevilla toiminnoilla. Pyydetty lämpöteho saadaan

laskemalla arvio, kuinka paljon koelaitteistoon tulevan veden lämmittäminen haluttuun lämpötilaan vaatii lämpötehoa. Tätä kutsutaan tehoestimaatiksi. Laskennan ensimmäisessä vaiheessa selvitetään laitteistoon PACTEL-laitteistosta tulevan veden ja edellä lasketun toivotun lähtölämpötilan erotus. PACTEL-laitteistosta tulevan veden lämpötilan mittausta voidaan tarvittaessa myöhästyttää eli käyttää reaaliaikaista vanhempia arvoja, koska matalan virtausnopeuden vuoksi lämmittimelle saapuvan veden lämpötila on mitattu merkittävästi aiemmin. Lämpötilaeron lisäksi tarvitaan veden massavirta koelaitteistossa, joka normaalitilanteessa otetaan mittaustietona, mutta kp-RPV-säiliön yläventtiilin ollessa auki käytetään virtauksen asetusarvoa. Näin siksi, että yläventtiilin avaaminen nostaa veden virtausmäärää, mikä taas nostaisi tehoestimaattia, jonka ei haluta tässä tilanteessa kuitenkaan reagoivan mitenkään. Viimeiseksi laskentaan tarvitaan veden ominaislämpökapasiteetti, joka saadaan säiliön paineen perusteella Xsteam.vi:stä. Kertomalla nämä keskenään, saadaan arvio tarvittavasta lämpötehosta. Tätä kuitenkin vielä korjataan kp-RPV-säiliön kylläisen lämpötilan avulla arvioidulla lämpöhäviöt huomioon ottavalla korjaustermillä. Tämä termi pitää olla tiettyjen raja-arvojen sisällä, joten ohjelma tarkastaa asian ennen kuin termi lisätään edellä laskettuun tarvittavan lämpötehon arvioon. Ohjelma tarkastaa tehoarvion olevan 0 ja 62 kW:n eli maksimitohon välissä ja tarvittaessa pyöristää lähempään raja-arvoon. Tämän jälkeen tehoarvio vielä korjataan PID-säätäjältä tulevalla kertoimella. Lopuksi ohjelma tarkastaa uudelleen että lämmittimen ohjaukseen syötettävä teho on edellä mainittujen raja-arvojen välissä. Laskenta toimii koko ajan, automaattiohjauksen kytkin vaikuttaa ainoastaan siihen, syötetäänkö laskettu tieto lämmittimen ohjaukseen vai ei. Oletustilassa kytkin on false-tilassa, jolloin käytetään manuaaliohjausta. Kytkimen ollessa true-tilassa automaattiohjauksen tehopyyntö syötetään LabView:n local variable:n avulla manuaaliohjauksen tehonsäätöohjaukseen.

Logiikkaohjelmiston tuli myös valvoa kp-RPV-säiliön pinnankorkeutta. Tämä suoritetaan aiemmin esitellyn Set-reset-rele-toiminnon avulla, siten että pinnankorkeuden ollessa määritellyn verran yli asetusarvon, säiliön päällä oleva venttiili avautuu ja pinnan laskiessa määritellyn verran asetusarvon alle venttiili jälleen sulkeutuu. Reletoiminto ohjaa venttiiliä property node:n avulla, mutta venttiiliä voidaan ohjata myös manuaalisesti, kun automaattiohjaus ei ole käytössä (oletus). Itse venttiilin toimilaitetta ohjataan digitaalisignaalin avulla.

Matalapainekoelaitteiston tavoin myös korkeapainekoelaitteiston kaikkien tärkeiden toimintojen tuli olla operaattoreiden etäkäytettäviä logiikkaohjelmiston avulla. Kaikissa automatisoiduissa toiminoissa oli manuaalikäyttö mahdollisuus ja loput toiminnot, lähinnä joidenkin venttiilien käyttö, toteutettiin liittämällä LabView:n ohjaustoiminnot suoraan vastaavaan SV:en.

Korkeapainelaitteiston logiikkaohjelmiston tehtäviin kuului myös tiettyjen PACTEL-koelaitteiston osien ohjaaminen, jotta kp-laitteiston tila pysyisi haluttuna. Nämä PACTEL-laitteiston osat olivat paineistin, höyrystinpiirin pääkiertopumppu sekä höyrystin. Paineistinta logiikkaohjelmiston tuli ohjata sekä sen vastusten että venttiilin avulla. Nämä ohjaukset on esitetty kuvassa 29. Lisäksi ohjelmiston tuli ohjata myös paineistimen ruiskutusta, mutta siihen palataan reseptiajotoimintojen yhteydessä.



Kuva 29. PACTEL-laitteiston paineistimen ohjaukset kp-laitteiston logiikkaohjelmistossa.

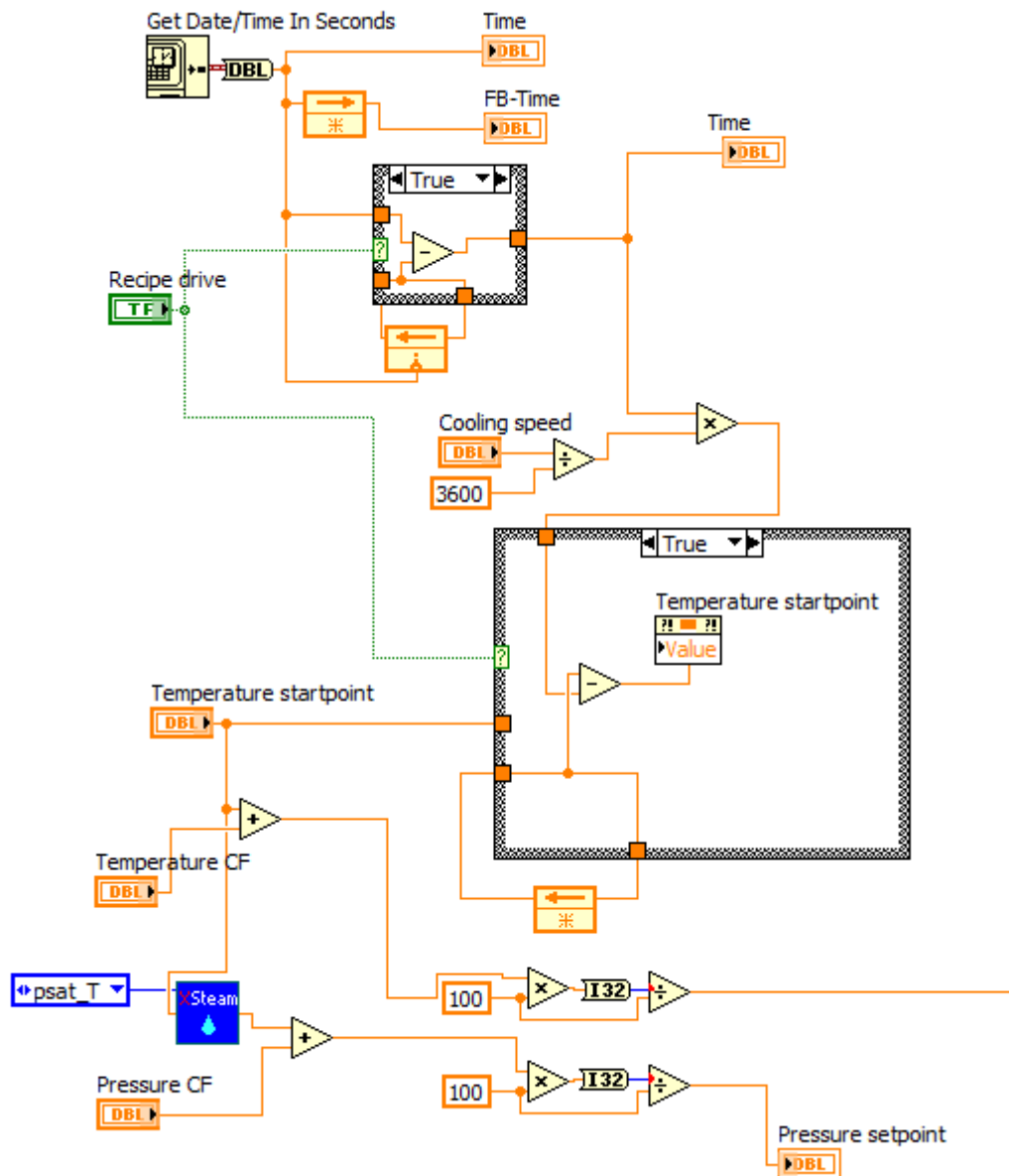
Paineistimen vastusten ohjaus toteutettiin kuvan 29 mukaisesti Set-reset-rele-toiminnolla. Paineen laskiessa alle määritellyn verran alle asetusrvon, kaikki paineistimen vastukset menevät päälle ja välittömästi paineen ollessa asetusrvossaan ne sammuvat. Paineistimen venttiiliä ohjattiin PID-säätäjän avulla kp-RPV-säiliön mitatun ja halutun paineen perusteella. Haluttu paine määritellään toisaalla ohjelmassa halutun lämpötilan perusteella lasketuksi kylläiseksi paineeksi. PID-säätäjälle määriteltiin kahdet asetusrvot, riippuen

siitä ajettiin koelaitetta ”normaalisti” vai reseptiajona. PID-säätäjän antama ohjausarvo prosentteina skaalattiin tasaluvuksi ennen eteenpäin syöttämistä. Tällä varmistettiin, että käyttöliittymässä näkyvä säätöarvo mahtuu sille varattuun ohjausnäyttöön, koska LabView oletusarvoisesti käyttää sisäisessä laskennassa 15 desimaalin tarkkuutta. Ohjauksen syöttö eteenpäin tapahtuu ainoastaan, mikäli paineistimen ohjauksen pääkytkin on true-asennossa. Paineistimen vastusten ja venttiilin varsinaiset ohjaukset olivat PACTEL-koelaitteiston omassa logiikkaohjelmistossa, joten näiden kahden ohjelmiston tuli kommunikoida keskenään. Tähän käytettiin LabView:n global variable:ja, koska ainoastaan niillä tiedon siirto ohjelmasta toiseen oli mahdollista.

Höyrystinpiirin pääkiertopumpun ohjaus toteutettiin paineistimen venttiilin ohjausta vastaavalla tavalla PID-säätäjää käyttäen. PID-säätäjä käyttää kp-laitteiston virtausmittarin mittaustietoa säätäessään pumpun pyörimisnopeutta prosentteina. Myös tämä ohjausarvo pyöristetään tasaluvuksi ennen global variable:en syöttämistä.

Höyrystimen painetta ohjelmisto säätää, mikäli säätö on omasta kytkimestään asetettu päälle. Tällöin ohjelmisto laskee lämmittimen säätöosiossa mainitun pyydetyn lähtölämpötilan korjauskertoimiseen sekä ennalta määritellyn höyrystimen ja kp-koelaitteiston sallitun lämpötilaeron välisen erotuksen. Tämä erotus muutetaan kylläisen tilan paineeksi Xsteam:vi:llä, jonka jälkeen sitä verrataan ennalta määritettyyn suurimpaan sallittuun höyrystimen paineeseen. Näistä pienempi syötetään tasaluvuksi pyöristettynä global variable:en, joka välittää tiedon höyrystimen varsinaiselle ohjaukselle PACTEL-laitteiston logiikkaohjelmistossa.

Reaktorin jäädytystä simuloivia kokeita varten logiikkaohjelmistoon lisättiin matalapainelaitteiston reseptiohjausta vastaava täysautomatoitu laitteiston ohjaus. Edellä on kerrottu halutun lämpötilan vaikuttavan varsinaisen lämmittimen automaattisäädön ohella myös paineensäädön automatiikkaan. Siksi kp-laitteiston reseptiohjaus toteutettiin laatimalla ohjelmaosio, joka ajan kuluessa muuttaa haluttua lämpötilaa. Tällöin automaattiohjaukset seuraavat perässä ja laitteisto toimii täysin automaattisesti. Haluttua lämpötilaa muokkaava ohjelmaosio on esitetty kuvassa 30.



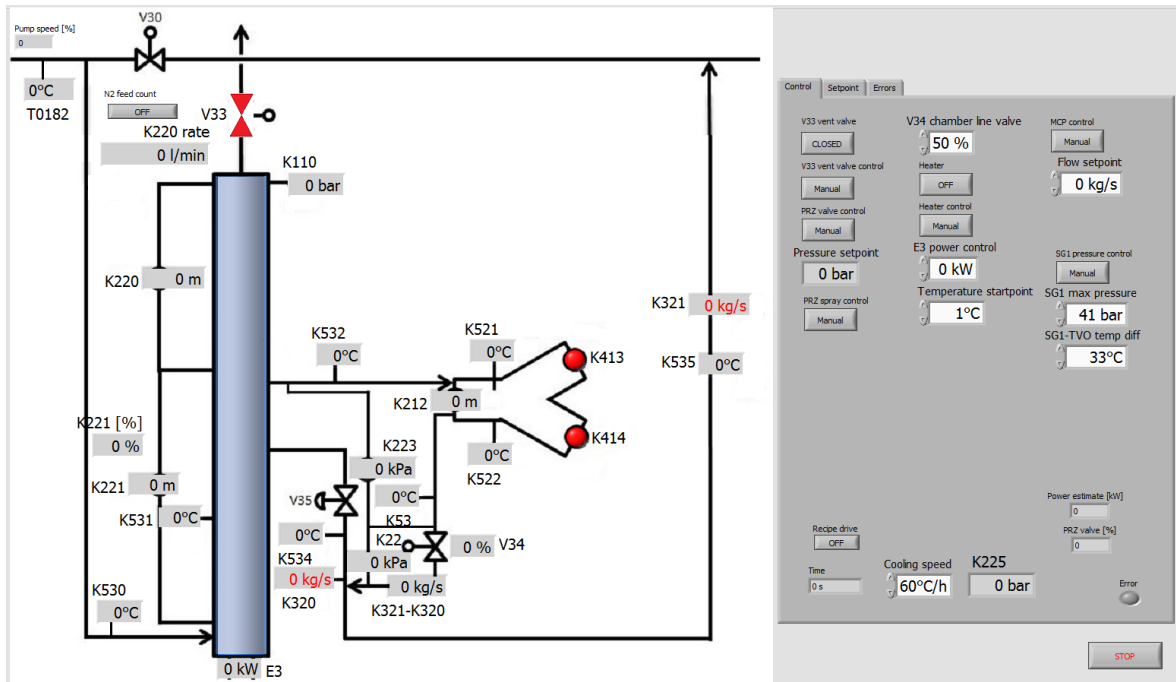
Kuva 30. Kp-laitteiston automatiikan reseptiajo-osio.

Kuva 30 sisältää myös muita edellä esitettyjä toimintoja kuten ajanhetken määrittämisen kuvan yläreunassa ja paineen asetusarvon määrittämisen halutun lämpötilan perusteella kuvan alareunassa. Varsinainen reseptiajo on kahdessa case-rakenteessa. Kuvan tilanteessa reseptiohjaus on päällä, molempien case-rakenteiden ollessa true-tilassa. Oletusarvoisesti reseptiohjaus ei ole päällä. Ylemmässä case-rakenteessa lasketaan reseptiajan käyttämä aika. Aika lasketaan ottamalla LabView:n sekuntilaskurilta vallitseva ajanhetki, josta vähennetään feedback node:en tallennettu aiempi ajanhetki. Reseptiohjauksen ollessa pois käytöstä tähän feedback node:en tallennetaan koko ajan uusi sekuntiluku.

Reseptiohjauksen käynnistyessä uutta sekuntimäärää ei enää tallenneta vaan feedback node muistaa viimeisimmän tallennetun sekuntimäärän, joten aika lasketaan vallitsevan ajanhetken ja reseptiajon aloitusajanhetken välisenä erotuksena. Tämän jälkeen laskettu sekuntimäärä kerrotaan halutulla jäähdytysnopeudella, joka muutetaan yksiköstä °C/h yksiköön °C/s ennen kertomista. Tämän jälkeen tulosta saatava lämpötila syötetään seuraavaan case-rakenteeseen. Tämä case-rakenne tallentaa feedback node:en haluttua lähtölämpötilaa jatkuvasti reseptiajon ollessa pois päältä, mutta reseptiajon ollessa päällä feedback node:sta luetaan reseptiajon aloitushetkellä ollut haluttu lähtölämpötila, josta vähennetään aiemmin jäähdytysnopeudesta laskettu lämpötila. Tällainen kelluva aloituspiste tarvitaan, jottei reseptiajon käynnistyessä syntyisi suurta askelmaista lämpötilan muutosta, koska kp-laitteen lämpötilat eivät ole yhtä vakaita kuin mp-koelaitteistossa. Tämän jälkeen joka kierroksella alkuperäisestä lähtölämpötilasta vähennetään suureneva lämpötila, jolloin laitteisto jäähtyy. Erotus syötetään property node:n avulla halutun lämpötilan ohjaukseen, jolloin se välittyy normaaleja reittejä automaattiohjauksille.

Reseptiajon paineen säädössä ilmenneiden ongelmien vuoksi ohjelmaan jouduttiin lisäämään paineistimen ruiskutuksen ohjaus. Tätä toimintoa käytetään ainoastaan reseptiajon yhteydessä. Tällöin paineistimen venttiilin ollessa yli 6,9 % auki, ruiskutetaan paineistimeen kylmää vettä vakiotilavuusvirralla. Reseptiajon aikana paineistimessa voi siten olla yhtä aikaa säätöventtiili auki sekä lämmitysvastukset ja vesiruiskutus päällä. Tähän päädyttiin, koska se oli ainut keino saada laitteiston paine pysymään oikeana reseptiajon aikana.

Lopuksi luotiin logiikkaohjelmiston käyttöliittymä, joka on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. Kp-laitteiston logiikkaohjelmiston käyttöliittymä.

Käyttöliittymän pohjana käytettiin kuvassa 15 esitettyä PI-kaaviota, johon sijoitettiin oikeille kohdille mittausten ja ohjausten näytöt. Varsinaiset ohjaukset ovat PI-kaavion vasemmalla puolella ryhmiteltyinä ohjattavien laitteiden mukaan, siten että yhteen laitteeseen vaikuttavat ohjaukset ovat allekkain. Lisäksi käytettiin välilehtiä, joille laitettiin harvemmin tarvittavat parametrit, kuten PID-säätäjien asetukset ja mahdolliset virheilmoitukset.

5.2.3 Automaatiojärjestelmän toiminnan testaus ja varsinaiset kokeet

Korkeapainekoelaitteiston automaatiojärjestelmän laitteet kokeiltiin ja mittalaitteet kalibroitiin vastaavalla tavalla kuin matalapainelaitteiston kohdalla on kerrottu. Myös korkeapainekoelaitteistolla tehtiin esikokeita ennen varsinaisia kokeita mm. oikeiden parametrien löytämiseksi. Parametrien löytäminen osoittautui huomattavasti mp-laitteistoa hankalammaksi, johtuen pääosin kp-laitteen rakentamisesta PACTEL-laitteiston yhteyteen, jolloin samoilla säätöarvoilla piti ajaa kahta laitteistoa yhtä aikaa. Erityisesti laitteiston paineensäädön kanssa oli ongelmia, varsinkin reaktorin alasajoa mallintavien jäähdytyskokeiden esikokeissa. Ensimmäinen versio reseptiajosta oli toteutettu

sovittamalla annettuun lämpötilakäyrään yhtälö, jonka mukaan laitteiston automaatiojärjestelmät säätivät lämmitintä ja paineistinta. Tämä ei kuitenkaan toiminut täysin, joten reseptiajo vaihdettiin toimimaan edellä esitellyllä tavalla. Tällä muutoksella lämpötila saatiin seuraamaan hyvin vaadittua käyrää, mutta paine pyrki alentumaan portaittain. Aluksi painetta säädettiin pelkästään paineistimen venttiiliä avaamalla, mikä ei ollut riittävää. Seuraavaksi logiikkaohjelmistoon lisättiin paineistimen vesiruiskutuksen ohjaus. Lopulta päädyttiin edellä esitettyyn ratkaisuun, jossa käytetään paineistimen venttiiliä, ruiskutusta yksinkertaistetulla ohjauksella sekä vastuksia yhtä aikaa, jotta paine seuraisi haluttua paineenalennuskäyrää. Tämä ratkaisu osoittautui toimivaksi myös varsinaisissa kokeissa.

Muutoinkin varsinaiset kokeet menivät automaatiojärjestelmän osalta hyvin. Ainoa ongelma, jota ei kokonaan saatu ratkaistua, oli jäähdytyskokeessa tapahtuva veden kiehumisen kp-RPV-säiliössä ja siitä johtuva pinnankorkeuden lasku. Säiliöstä oli laskettava kiehumisen sattuessa höyryä yläventtiilin kautta, jolloin paine laski haluttua nopeammin. Mutta yleensä tämä tapahtui vasta loppuvaiheessa koetta, jolloin suurin osa tarvittavista tuloksista oli jo saatu. Muutoin kokeista saatiin halutut tiedot tallennettua ja uimurikytkimien toimintaominaisuudet laitosolosuhteita vastaavissa lämpötila- ja paineolosuhteissa selvitettyä.

6 YHTEENVETO

Kiehutusvesilaitos-tyyppisessä ydinvoimalaitoksessa reaktoripainesäiliön pinnankorkeuden tunteminen on erittäin tärkeää, koska tässä voimalaitostyyppissä höyry tuotetaan suoraan reaktorissa. Normaalikäytön aikana reaktorin pinta pidetään vakaana syöttöveden määrää säätämällä. Häiriö- tai onnettomuustilanteissa veden syöttö reaktoriin voi keskeytyä, jolloin pinta laskee. Liian matala pinnankorkeus on erityisen vaarallista, koska se voi johtaa polttoainesauvojen paljastumiseen, lämmönsiirtokriisin ja lopulta sulamiseen. Tämän estämiseksi osa pinnankorkeuden alarajaa tarkkailevista mittauksista voi laukaista reaktorin pikasulun ja käynnistää reaktorin hätäjähdytysjärjestelmät, joten ne kuuluvat laitoksen suojausautomaatioon.

Ydinvoimalaitoksen suojausautomaatiota säätelevät STUK:n YVL-ohjeet, joiden mukaan kaikkien suojausautomaatioon liittyvien komponenttien tulee noudattaa moninkertaistus- ja erilaisuusperiaatteita. Pinnankorkeusmittaukset on yleensä toteutettu vesipatsaiden korkeuseroa havaitsevien paine-eromittausten avulla. Erilaisuusperiaate on toteutettu käyttämällä erityyppisiä ja eri valmistajien mittareita. Paine-eromittauksissa voi kuitenkin olla ongelmia erityisesti reaktorin alasajotilanteissa, jolloin mittausputkistoihin kertyvä lauhtuva kaasu voi aiheuttaa mittareiden virhenäyttämiä. Tästä syystä, ja koska erilaisuusperiaate ensisijaisesti vaatii erityyppisten mittausten käyttöä, on yhtenä mahdollisuutena esitetty uimurikytkimien käyttöä pinnankorkeuden alarajan varmistukseen.

Uutta tekniikkaa ei kuitenkaan YVL-ohjeiden mukaan voi suoraan asentaa laitokselle, vaan laitteet täytyy kelpoistaa riippumattoman tahon toimesta. Uimurikytkimien kelpoistusta varten rakennettiin LUT:n Ydinturvallisuuden tutkimusyksikön tiloihin kaksi koelaitteistoa vuosina 2011–2013. Ensimmäiseksi rakennettiin matalapainekoelaitteisto, jolla pystyttiin tutkimaan reaktorin ylös- ja alasajoa vastaavia tilanteita sekä erityisesti uimurikytkimien laukaisunopeutta pinnankorkeuden nopeassa laskussa. Tämä koelaitteisto rakennettiin erilliskoelaitteistoksi. Myöhemmin rakennetulla korkeapainekoelaitteistolla tutkittiin paineen ja lämpötilan osalta laitosolosuhteita vastaavissa olosuhteissa uimurikytkimien toimintaa reaktorin ylös- ja alasajoa vastaavissa tilanteissa. Korkeapainekoelaitteisto

rakennettiin YTY:n Loviisan painevesilaitosta simuloivan PACTEL-koelaitteiston yhteyteen höyrystinpiirin sivupiiriksi.

Näiden koelaitteistojen käyttämiseksi tarvittiin automaatiojärjestelmät. Automaatiojärjestelmien suunnittelua varten on olemassa erilaisia standardeja ja ohjeita, yleensä turvallisuus- ja käyttöautomaatiolle omansa. Yleisesti suunnittelu etenee erilaisten suunnittelun elinkaarimallien mukaisesti, joiden eri vaiheissa määritellään erilaisia suunnittelun sisältökokonaisuuksia. Suunnittelun alkuvaiheessa määritellään automaatiojärjestelmän vaatimukset, joiden perusteella tehdään teknologiavalinnat ja loogiset mallit ja lopulta toteutetaan suunniteltu järjestelmä.

Koelaitteistojen automaatiojärjestelmien suunnittelu aloitettiin määrittelemällä niiden vaatimukset. Näistä tärkeimmät olivat tiedonkeruu, käyttöautomaatio ja turvallisuustoiminnot. PI-kaavioiden perusteella vaatimuksia voitiin tarkentaa ja määrittellä tarvittavat mittausinstrumentit ja ohjauslaitteet. Näiden vaatimusten ja määrittelyiden perusteella tehtiin teknologiavalinnat ja hankittiin tarvittavat komponentit.

Automaatiojärjestelmän tärkeimpiä osia on logiikkaohjelmisto, joka prosessoi mittaustiedon ja välittää sen perusteella komennot laitteiston komponentteja ohjaaville laitteille. Logiikkaohjelmistojen suunnittelu aloitettiin määrittelemällä niiden vaatimukset, jotka perustuivat koko automaatiojärjestelmän tärkeimpiin vaatimuksiin: tiedonkeruuseen, käyttöautomaatioon ja turvallisuustoimintoihin. Lisäksi logiikkaohjelmistojen tuli suorittaa erityisiä kokeiden suoritusta helpottavia toimintoja. Logiikkaohjelmiston teknologiavalinta oli lyöty lukkoon jo aiemmin, joten tässä poikettiin suunnittelun elinkaarimallista. Ohjelmistojen toteutukseen käytettiin NI:n graafista LabView-ohjelmointikieltä.

Molemmille koelaitteistoille luotiin omat logiikkaohjelmistonsa, jotka ottivat laitteistojen erityispiirteet huomioon. Matalapainekoelaitteiston ohjelmiston tuli tallentaa kaikkien koelaitteiston mittausten tuottama data sekä ajaa erilaisia kokeita täysin automaattisesti. Korkeapainelaitteiston ohjelmiston ei tarvinnut tallentaa dataa lainkaan, mutta sen täytyi toimia yhteistyössä PACTEL-koelaitteiston logiikkaohjelmiston kanssa ja osin yksillä parametreilla ajaa molempia laitteistoja. Molempien logiikkaohjelmistojen kanssa oli

aluksi lastentauteja, mutta ennen varsinaisia kokeita tehtyjen esikokeiden avulla ne saatiin toimimaan halutusti, joskin pieniä ongelmia ilmeni myös ensimmäisissä varsinaisissa kokeissa.

Lopulta molempien koelaitteistojen automaatiojärjestelmät saatiin toimimaan halutusti ja erilaiset suunnittelu- ja ohjelmointivirheet korjattua. Siksi suurempia parannusehdotuksia niiden osalta ei voida esittää, ainoastaan kp-laitteen RPV-säiliön kiehumisongelmaan voisi testaamalla löytää ratkaisun. Kuitenkin kokeiden tilaaja on ilmoittanut, ettei uimurikytkimien kokeiluja jatketa tutkituilla konstruktiolla. Sen sijaan kokeita mahdollisesti jatketaan tulevaisuudessa uudella uimurikytkinkammiokonstruktiolla, joka vaatii täysin erilaisen koelaitteiston. Uuteen koelaitteistoon on luonnollisesti suunniteltava automaatiojärjestelmä alusta alkaen uudestaan.

LÄHTEET

ABB. 2012. Operating instruction manual OI/AT100-EN Rev. M. (Julkaisupaikka tuntematon): ABB Inc. 44 s. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 21.9.2014]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot212.nsf/veritydisplay/c0042ac5c2b66f8e85257b2500781d6a/\\$file/OI_AT100-EN_M.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot212.nsf/veritydisplay/c0042ac5c2b66f8e85257b2500781d6a/$file/OI_AT100-EN_M.pdf)

Bürkert 2013. POSITIONER 1067. (Julkaisupaikka tuntematon): Christian Bürkert GmbH & Co. KG. 158 s. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 21.9.2014]. Saatavissa: http://www.buerkert.com/products_data/manuals/MA1067-Standard-EU-ML.pdf

Bürkert a. 8793 Process controller, side controller. (Julkaisupaikka tuntematon): Christian Bürkert GmbH & Co. KG. 18 s. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 21.9.2014]. Saatavissa: http://www.buerkert.fi/products_data/datasheets/DS8793-Standard-EU-EN.pdf

Bürkert b. System 8802 Continuous Element. (Julkaisupaikka tuntematon): Christian Bürkert GmbH & Co. KG. 4 s. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 21.9.2014]. Saatavissa: http://www.buerkert.com/products_data/datasheets/DS8802-ELEMENTSYS-EU-EN.pdf

Gefran a. W211 (25-40-75-100-150-250-400-600A) Power controllers, from 1KW to 400KW. (Julkaisupaikka tuntematon): GEFRAN spa. 4 s. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 21.9.2014]. Saatavissa: [http://www.gefran.com/en/product_categories/172-static-contactors\(rc94\)/products/30-w211-monophase-solid-state-power-units-with-heat-sink-logic-control#downloads](http://www.gefran.com/en/product_categories/172-static-contactors(rc94)/products/30-w211-monophase-solid-state-power-units-with-heat-sink-logic-control#downloads) →W211 datasheet

Gefran b. W212 (25-40-75-100-150-250-400-600A) Power controllers, from 1KW to 400KW. (Julkaisupaikka tuntematon): GEFRAN spa. 4 s. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 21.9.2014]. Saatavissa: [http://www.gefran.com/en/product_categories/172-static-contactors\(rc94\)/products/29-w212-monophase-solid-state-power-units-with-heat-sink-analogue-control#downloads](http://www.gefran.com/en/product_categories/172-static-contactors(rc94)/products/29-w212-monophase-solid-state-power-units-with-heat-sink-analogue-control#downloads) →W212 datasheet

Gefran. 2012. GTT 25 / 40 / 50 / 60 / 75 / 90 / 120A Power solid state relays with analog control. (Julkaisupaikka tuntematon): GEFRAN spa. 11 s. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 21.9.2014]. Saatavissa: [http://www.gefran.com/en/product_categories/172-static-contactors\(rc94\)/products/33-gtt-monophase-solid-state-power-units-with-heat-sink-analogue-control#downloads](http://www.gefran.com/en/product_categories/172-static-contactors(rc94)/products/33-gtt-monophase-solid-state-power-units-with-heat-sink-analogue-control#downloads) →GTT datasheet

Gefran. 2014. GTS 15/25/40/50/60/75/90/120A Power solid state relays with logic control Vdc / Vac. (Julkaisupaikka tuntematon): GEFRAN spa. 11 s. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 21.9.2014]. Saatavissa: [http://www.gefran.com/en/product_categories/172-static-contactors\(rc94\)/products/36-gts-monophase-solid-state-power-units-with-heat-sink-vdc-logic-control#downloads](http://www.gefran.com/en/product_categories/172-static-contactors(rc94)/products/36-gts-monophase-solid-state-power-units-with-heat-sink-vdc-logic-control#downloads) →GTS datasheet

Goble William M., Cheddie Harry. 2005. Safety Instrumented Systems Verification: Practical Probabilistic Calculation. Research Triangle Park, USA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA). 382 s. ISBN 978-1556179099

Invensys a. Foxboro gauge selection guide. (Julkaisupaikka tuntematon): Invensys. 2 s. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 21.7.2014].
Saatavissa: http://iom.invensys.com/EN/pdfLibrary/SelectionGuide_Foxboro_Gauge_02-2014.pdf

Invensys b. Foxboro differential selection guide. (Julkaisupaikka tuntematon): Invensys. 2 s. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 21.7.2014]. Saatavissa:
http://iom.invensys.com/EN/pdfLibrary/SelectionGuide_Foxboro_Differential_04-11.pdf

Invensys c. Product Specifications: 8000A Series Compact Magnetic Flowtubes. (Julkaisupaikka tuntematon): Invensys Systems, Inc. 16 s. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 21.7.2014]. Saatavissa: http://resource.invensys.com/instrumentation/documentation/eib/pss/pss_1-6f2a.pdf

Invensys d. I/A Series 84 Series Intelligent Vortex Flowmeter datasheet. (Julkaisupaikka tuntematon): Invensys. 2 s. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 21.9.2014]. Saatavissa: http://iom.invensys.com/EN/pdfLibrary/Datasheet_Foxboro_Vortex_03-10.pdf

Juutinen Sakari. 2009. FYSP110 Fysiikan kokeelliset menetelmät. Luentomoniste. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto. 132 s.

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös painelaitteista 30.9.1999/938. [luettu sähköisessä muodossa 21.9.2014]. Saatavissa: <http://plus.edilex.fi/tukes/fi/lainsaadanto/19990938?toc=1>

Kondo K. et al. 2012. Actual Operation Control of Boiling Water Reactor. Teoksessa: Oka Y., Suzuki S., Nuclear Reactor Kinetics and Plant Control. 9. painos. Japani: Springer Japan. s.129-166 (305 s.). An Advanced Course in Nuclear Engineering. ISBN 978-4-431-54194-3. [luettu sähköisessä muodossa 21.9.2014]. ISBN 978-4-431-54195-0 (eBook).

Kortesalo Pentti. 1996. Vinkkejä lämpötilan mittauksesta. Helsinki: Sarlin Automaatio. 40 s.

Laine Jani. 2011. Description of the KOHO test rig and test programme. [tutkimusraportti]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Ydinturvallisuuden tutkimusyksikkö. 25 s. KOHO 1/2011. [luettu pdf-muodossa 21.9.2014]. Ei julkisesti saatavissa.

Laine Jani. 2012. Experiments with the KOHO test rig. [tutkimusraportti]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Ydinturvallisuuden tutkimusyksikkö. 46 s. KOHO 1/2012. [luettu pdf-muodossa 21.9.2014]. Ei julkisesti saatavissa.

Laine Jani. 2013. Description of the KOHO high-pressure test rig and test programme 2013. [tutkimusraportti]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Ydinturvallisuuden tutkimusyksikkö. 13 s. KOHO 2/2013. [luettu pdf-muodossa 21.9.2014]. Ei julkisesti saatavissa.

Laine Jani. 2013a. Experiments with the KOHO low- and high-pressure test rigs 2013. [tutkimusraportti]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Ydinturvallisuuden tutkimusyksikkö. 28 s. KOHO 3/2013. [luettu pdf-muodossa 21.9.2014]. Ei julkisesti saatavissa.

Laukkanen Jarkko. 2014. FT; instrumentointi-insinööri, TVO Oyj. Olkiluoto. Puhelinhaastattelu. 14.11.2014.

Mattar Wade, Vignos James. 2010. Vortex Shedding Tutorial. (Julkaisupaikka tuntematon): Invensys Systems, Inc. 12 s. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.9.2014]. Saatavissa: http://iom.invensys.com/EN/pdfLibrary/WhitePaper_Foxboro_VortexSheddingTutorial_01-10.pdf

Mobrey. 2012. Mobrey Product eCatalogue 2012 Edition. [www-tuotedokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon): Emerson Process Management Mobrey Ltd. 239 s. [viitattu 21.9.2014]. Saatavissa: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Mobrey%20Documents/ip0001.pdf>

National Instruments. 2014. Getting Started with LabVIEW. (Julkaisupaikka tuntematon): National Instruments. [National Instruments:n www-sivuilla]. Päivitetty 6/2014. [viitattu 21.9.2014]. Saatavissa: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361L-01/lvhowto/lv_getting_started/

Painelaitelaki 27.8.1999/869. [luettu sähköisessä muodossa 21.9.2014]. Saatavissa: <http://plus.edilex.fi/tukes/fi/lainsaadanto/19990869>

Riikonen Vesa. Mittausten Virhetarkastelu. Tekninen muistio. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Ydinturvallisuuden tutkimusyksikkö. 24 s. [luettu pdf-muodossa 21.9.2014]. Ei julkisesti saatavissa.

Sandberg Jorma (toim.). 2004. Ydinturvallisuus. Helsinki: Säteilyturvakeskus. 418 s. Säteily- ja ydinturvallisuus V. [luettu pdf-muodossa 10.11.2014]. ISBN 951-712-507-0

(pdf). Saatavissa: http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/kirjasarja/fi_FI/kirjasarja5/_files/12222632510021140/default/kirjasarjaV_ydinturvallisuus_3.pdf

Säteilyturvakeskus (STUK). 2013a. Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu, 15.11.2013. 1. painos. Helsinki: Säteilyturvakeskus. YVL B.1. ISBN 978-952-478-853-3 [luettu sähköisessä muodossa 21.9.2014]. ISBN 978-952-478-855-7 (html). Saatavissa: <http://plus.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/saannosto/YVLB-1?toc=1>

Säteilyturvakeskus (STUK). 2013b. Ydinlaitoksen sähkö- ja automaatiolaitteet, 15.11.2013. 1. painos. Helsinki: Säteilyturvakeskus. YVL E.7. ISBN 978-952-478-952-3 [luettu sähköisessä muodossa 21.9.2014]. ISBN 978-952-478-954-7 (html). Saatavissa: <http://plus.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/saannosto/YVLE-7>

Semken Scott. 2006. Instrument Documentation. Tekninen muistio. Lappeenranta: Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Ydinturvallisuuden tutkimusyksikkö. 39 s. [luettu pdf-muodossa 9.11.2014]. Ei julkisesti saatavissa.

Suomen automaatioseura ry. Automaatiosuunnittelun prosessimalli. [verkkajulkaisu]. Helsinki: Suomen automaatioseura ry. 43 s. [viitattu 21.9.2014]. ISBN 978-952-5183-34-4. Saatavissa: <http://www.automatioseura.fi/ANTI-2.pdf>

Teollisuuden Voima Oy (TVO). Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2. esite. TVO Oy. 48 s.

Tossavainen Kirsti. 2000. Ydinenergian Turvallisuusvalvonta, Vuosiraportti 1999. Helsinki: Oy Edita Ab. 49 s. STUK-B-YTO 200. ISBN 951-712-388-4. [luettu pdf-muodossa 10.11.2014]. Saatavissa: <http://www.stuk.fi/julkaisut/stuk-b/stuk-b-yto200.pdf>

Ylivainio Matti. Virtauksen mittaus. Luentomoniste. (Julkaisupaikka tuntematon): VAMK Sähkötekniikanosasto. 12 s. Mittaustekniikka/F. [luettu pdf-muodossa 10.7.2014]. Saatavissa: http://www.cc.puv.fi/~ot/ISA0501_Automaatiotekniikan%20perusteet/3-Mittaustekniikka/3f%20Virtausmittaus.pdf