

**PID-säädön ja ennustavan prosessi-  
mallipohjaisen säädön vertailu  
lämmönvaihdinprosessissa**  
**Opinnäytetyö**

Joel Tamminen

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2019  
Tekniikan ala  
Insinööri (AMK), sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma  
Automaatiotekniikka

|   |                                     |                                   |
|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Tekijä(t)<br>Tamminen, Joel   | Julkaisun laji<br>Opinnäytetyö, AMK | Päivämäärä<br>Toukokuu 2019       |
|   | Sivumäärä<br>104                    | Julkaisun kieli<br>Suomi          |
|   |                                     | Verkojulkaisulupa<br>myönnetty: x |
| Työn nimi<br><b>PID-säädön ja ennustavan prosessimallipohjaisen säädön vertailu lämmönvaihdinprosessissa</b>  |                                     |                                   |
| Tutkinto-ohjelma<br>Insinööri (AMK), sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma, automaatiotekniikka.   |                                     |                                   |
| Työn ohjaaja(t)<br>Kari Hytönen, Teppo Flyktman   |                                     |                                   |
| Toimeksiantaja(t)<br>Ari Kuisma   |                                     |                                   |
| Tiivistelmä<br><p>PID-säädin on teollisuudessa yleisimmin käytetty säädin. Jos prosessin vasteessa on pitkä viive suhteessa aikavakioon, on tavanomaisen PID-säädön virittäminen optimaaliseksi vaikeaa. Smithin prediktori on yksi ratkaisu viiveen kompensointiin. Jyväskylän Ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratorion lämmönvaihdinprosessissa tätä ilmiötä voitiin tutkia ja rakentaa demonstraatio Smithin ennustajasta, sillä prosessissa on pintalämpötilamittaus pitkällä mittausviiveellä. Tavoitteena oli mallintaa koulun lämmönvaihdinprosessi kokeellisesti, todeta mallin hyvyys, toteuttaa simulaatio prosessista, toteuttaa mahdollisimman hyvä PI-säätö ja Smithin prediktori, sekä virittää säätimet. Lopuksi säätimien toimintaa verrattiin keskenään sekä simuloituja tuloksia todellisen prosessin tuloksiin. Säätöihin päätettiin myös lisätä adaptiivinen säätöparametrien päivittäminen.</p> <p>Lämpötilan prosessimalli mallinnettiin useilla askelvastekokeilla ja Excelin kaavaansovitusta hyödyntäen. Lisäksi askelvastekokeilla mallinnettiin simulaattoria varten virtauksen prosessimalli. Säätöpiirit suunniteltiin Matlab- ja Simulink-ohjelmistoilla. Käytännön säätöpiirit ja valvomo tehtiin koulun Metso DNA järjestelmän FBCad- ja Picture Designer työkaluilla. Prosessi saatiin mallinnettua melko hyvin prosessissa esiintyviä häiriöitä lukuun ottamatta. Tuloksena saatiin aikaan melko hyvä simulaatio prosessista sekä toimiva demonstraatio Smithin prediktorista. Säätimien viritys jäi hieman kesken, sillä adaptiivisuus ei toiminut odotetusti. Smithin prediktori kompensoi viiveen hyvin JAMK:n lämmönvaihdinprosessissa. Pitkän mittausviiveen aiheuttama epästabiilisuus tavanomaisessa PID-säädössä oli huomattavissa ja Smithin prediktorilla säätöstä saatiin stabiilimpi ja nopeampi. Käytännön tulokset vastasivat aikaisempia tutkimuksia ja kirjallisuutta aiheesta. Opinnäytetyön tuloksena saatu säätöratkaisu on sovellettavissa opetuskäyttöön, sekä esimerkiksi teollisuuden prosesseihin, joihin liittyy mittausteknisiä rajoitteita.</p> |                                     |                                   |
| Avainsanat ( <a href="#">asiasanat</a> )<br>Energiatekniikka, kaskadisäätö, lämmönvaihdin, Matlab, Metso DNA, mittaus, PID-säätö, prosessimallipohjainen, Simulink, simulaattori, Smithin prediktori, vaste, viive.   |                                     |                                   |
| Muut tiedot ( <a href="#">salassa pidettävät liitteet</a> )   |                                     |                                   |

|  |  |   |
|--|--|---|
| Author(s)<br>Tamminen, Joel  | Type of publication<br>Bachelor's thesis | Date<br>May 2019<br>Language of publication:<br>Finnish |
|  | Number of pages<br>104                   | Permission for web publication: x                       |
| Title of publication<br><b>Comparison between PID control and process-model based control in heat exchanging process</b>   |  |   |
| Degree programme<br>Bachelor of Engineering, Electrical and Automation Engineering   |  |   |
| Supervisor(s)<br>Hytönen, Kari; Flyktman, Teppo  |  |   |
| Assigned by<br>Kuisma, Ari   |  |   |
| Abstract<br><p>PID controller is the most common controller used in industry. If the process has long delay time in feedback, the tuning of a basic PID controller becomes difficult. Smith predictor is the solution for compensating the delay in feedback. For studying energy technology, JAMK has laboratory giving opportunity to demonstrate Smith predictor and research the effect of feedback delay in PID controller because the heat exchanging process includes temperature measurement with a long feedback delay. The objective was to create experimentally a process model for the heat exchanging process, examine how good the process model is, design a simulation of the control loop, design a basic PI controller loop, design Smith predictor and tune controllers. Both controllers were compared as well the results of the simulator compared to the real process. Adaptive tuning parameters were added to both controllers.</p> <p>The model for temperature process was created with step response tests and using "add trendline" function in Excel. Step response tests were also used for creating a model of the flow process for the simulator. Control loops were designed using Matlab and Simulink programs. Control loops and control room pictures for the process were created using FbCAD and Picture designer tools included in Metso DNA automation system in JAMK.</p> <p>As a result, the process model of the heat exchanging process worked fine as did the created simulation (excluding simulation and modeling of disturbances that were present in process). Tuning of control was not finished, because the adaptive control did not work like expected. Smith predictor compensated the feedback delay well in heat exchanging process. The instability of the basic PI control loop caused by feedback delay was noticeable, and the control with Smith predictor was more stable and faster. The results corresponded to the earlier studies of this subject. The result of this thesis is applicable for educational purposes and real-world systems with limitations in measurements.</p> |  |   |
| Keywords/tags ( <a href="#">subjects</a> )<br>Cascade control, delay, energy technology, feedback, heat exchanger, Matlab, measurement, Metso DNA, PID control, process model based, simulator, Simulink, Smith predictor.   |  |   |
| Miscellaneous ( <a href="#">Confidential information</a> )   |  |   |

## Sisältö

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Johdanto.....                                       | 5  |
| 1.1   | Opinnäytetyön tausta.....                           | 5  |
| 1.2   | Tutkimusongelma ja tavoitteet .....                 | 5  |
| 1.3   | Tutkimusmenetelmä ja tietoperusta.....              | 6  |
| 2     | Energiatekniikan laboratorio.....                   | 7  |
| 2.1   | Säädettävän prosessin toimintakuvaus.....           | 7  |
| 2.2   | Metso DNA-automaatiojärjestelmä .....               | 9  |
| 3     | Säätötekniikan perusteet .....                      | 10 |
| 3.1   | Säätötekniikan käsitteiden määrittely .....         | 10 |
| 3.2   | Johdantoa säätötekniikkaan.....                     | 11 |
| 3.3   | Prosessin dynamiikka ja mallintaminen .....         | 13 |
| 3.4   | Säätöpiiriin sovellettavia kytkentöjä .....         | 19 |
| 3.5   | PID-säätö .....                                     | 21 |
| 3.6   | Viiveellisten prosessien säätö .....                | 24 |
| 3.7   | Adaptiivinen säätö.....                             | 26 |
| 3.8   | Säätöpiirin virittäminen.....                       | 26 |
| 4     | Opinnäytetyön toteutus ja tulokset .....            | 28 |
| 4.1   | Prosessin mallintaminen .....                       | 28 |
| 4.1.1 | Prosessikokeiden suorittaminen .....                | 28 |
| 4.1.2 | Lämpötilan laskeminen virtauksen perusteella.....   | 33 |
| 4.1.3 | Arvioidut prosessimallit.....                       | 36 |
| 4.2   | Prosessimallin <i>GT</i> hyvyyden analysointi ..... | 37 |
| 4.3   | Simulaattorin toteutus .....                        | 39 |

|  |    |
|--|----|
|  | 2  |
| 4.3.1 Simulink-mallin toteutus .....   | 39 |
| 4.3.2 C(T):n adaptiivinen vahvistuskerroin ja viritysparametrit .....                    | 43 |
| 4.3.3 Trendi .....   | 44 |
| 4.3.4 Skripti .....  | 45 |
| 4.4 Simulaattorin testaus ja tulokset .....  | 45 |
| 4.5 Säätimien toteutus Metso DNA-järjestelmään .....                                     | 48 |
| 4.5.1 Lämpötila/pääsäädinpiiri PAB01DT204 (Smith Predictor) .....                        | 48 |
| 4.5.2 Virtaussäädinpiiri pr:PAB02DT202.F .....   | 58 |
| 4.5.3 Lämpötilasäädinpiiri pr:PAB01DT201.F .....   | 59 |
| 4.6 Valvomon toteutus .....  | 61 |
| 4.7 Valvomon testaus ja tulokset .....   | 64 |
| 4.8 Säädinpiirin pr:PAB01DT201.F testaus .....   | 66 |
| 4.9 Säädinpiirin pr:PAB01DT204.F testaus .....   | 68 |
| 4.10 Säätimien viritys ja viritystulosten vertailu .....                                 | 70 |
| 5 Pohdinta .....   | 72 |
| 5.1 Opinnäytetyön tavoitteet ja niiden täytyminen .....                                  | 72 |
| 5.2 Tulosten luotettavuus .....  | 74 |
| 5.3 Jatkokehityskohteet .....  | 75 |
| 5.4 Johtopäätökset .....   | 75 |
| Lähteet .....  | 76 |
| Liitteet .....   | 78 |
| Liite 1. Höyrykehitysmoduuli .....   | 78 |
| Liite 2. Jäähdytysmoduuli .....  | 79 |
| Liite 3. Prosessin valmistelu koeajoihin .....   | 80 |
| Liite 4. Askelvastekokeet 1, <i>GT</i> :n vahvistuksen ja aikavakion selvittäminen ..... | 83 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Liite 5.  | Askelvastekokeet 1, $GT$ :n viiveen $L$ selvittämistä.....             | 85  |
| Liite 6.  | Askelvastekokeet 1. $GF$ :n aikavakion ja vahvistuksen arviointia..... | 87  |
| Liite 7.  | Askelvastekokeet 2. $GT$ :n ja $GF$ :n parametrien arviointia.....     | 89  |
| Liite 8.  | $GT$ :n mallin hyväksi toteaminen.....                                 | 91  |
| Liite 9.  | Simulink-malliin luotu lämpötilasäädin .....                           | 94  |
| Liite 10. | Simulink-malliin luotu simulaattori.....                               | 95  |
| Liite 11. | Muokatut säätöpiirit “pr:PAB01DT201.F” ja “pr:PAB01DT202.F” ..         | 96  |
| Liite 12. | Säätöpiirin pr:PAB01DT204.F” (Smithin ennustaja) FbCAD-koodi .         | 97  |
| Liite 13. | Säätimen PAB01DT204 konfigurointi .....                                | 98  |
| Liite 14. | Säätimen PAB01DT204 valvomoduulien konfigurointi .....                 | 99  |
| Liite 15. | Säätimen PAB01DT204 historiamoduulien konfigurointi.....               | 100 |
| Liite 16. | Prosessimallin mittauksen valvomoduulien konfigurointi .....           | 101 |
| Liite 17. | Häähdytysmoduulin valvomokuva muokattuna ja popup-ikkuna               | 102 |
| Liite 18. | Pop-up ikkunan testaus .....   | 103 |
| Liite 19. | Säätöpiirien viritystulosten vertailu.....                             | 104 |

## Kuviot

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Kuvio 1  | Avoin ja suljettu säätöpiiri .....                                   | 12 |
| Kuvio 2  | Parametrien selvittäminen askelvastekokein (Kuisma 2017, 61.) .....  | 17 |
| Kuvio 3  | Lohkokaavioesitys lämmönvaihdinprosessin kaskadisäädöstä.....        | 20 |
| Kuvio 4  | Lohkokaavioesitys myötäkytkennästä.....                              | 20 |
| Kuvio 5  | Smithin prediktorin periaatekuva (VanDoren 2015).....                | 26 |
| Kuvio 6  | Askelvastekokeessa 2 käyttämäni menetelmä .....                      | 32 |
| Kuvio 7  | Kaavaansovitusta varten tehty koeajo .....                           | 33 |
| Kuvio 8  | Trendeistä saatu raakadata ja raakadatatista muokattu taulukko ..... | 34 |
| Kuvio 9  | Excelin Phaku-funktion hyödyntäminen kaavaansovituksessa .....       | 35 |
| Kuvio 10 | Kaavaansovituksessa luodut kuvaajat ja taulukot .....                | 36 |

|  |    |
|--|----|
| Kuvio 11 Viiveellisen mittauksen PAB01CT207 ja prosessimallin trendien vertailu .... | 38 |
| Kuvio 12 Simulaattoriin toteutettu skripti .....                                     | 45 |
| Kuvio 13 Säädinpiirin pr:PAB01DT201.F simuloinnin tuloksena saatu trendi .....       | 46 |
| Kuvio 14 Säädinpiirin pr:PAB01DT204.F simuloinnin tuloksena saatu trendi .....       | 47 |
| Kuvio 15 Lela-lohko ja sen siirtofunktio .....                                       | 49 |
| Kuvio 16 Delay-lohko.....  | 52 |
| Kuvio 17 FbCAD:n test-toiminto.....  | 65 |
| Kuvio 18 Säädinpiirin “pr:PAB01DT201.F” testaus .....                                | 66 |
| Kuvio 19 Säädinpiirin “pr:PAB01DT204.F” testaus .....                                | 68 |
| Kuvio 20 Pop-up ikkuna Smithin prediktorina testatessa .....                         | 70 |

### **Taulukot**

|  |    |
|--|----|
| Taulukko 1 Automaatiojärjestelmissä käytettyjä signaalityyppejä.....               | 12 |
| Taulukko 2 Erilaisia laplace muunnoksia (Kuisma 2017, 20-21.) .....                | 18 |
| Taulukko 3 Ziecher-Nichols menetelmän virityskaavoja .....                         | 27 |
| Taulukko 4 Lambdan virityskaavoja .....  | 28 |
| Taulukko 5 Ensimmäisen askelvastekokeen perusteella lasketut parametrit .....      | 31 |
| Taulukko 6 Molempien askelvastekokeiden perusteella saadut parametrit.....         | 32 |
| Taulukko 7 Vahvistuskertoimen laskennallisia arvoja lambdan virityskaavoilla ..... | 72 |

# 1 Johdanto

## 1.1 Opinnäytetyön tausta

Kaikissa teollisissa prosesseissa tarvitaan erilaisia säätö- ja ohjaustoimenpiteitä. Automaattisen säädön ohjaussignaali määräytyy takaisinkytketyn mittaustiedon perusteella. (Harju & Marttinen 2000, 9.) Harjun & Marttisen (2000, 44.) mukaan teollisissa prosesseissa on käytössä useimmiten PID-säädin (Proportional-, Integral-, Derivative). Prosesseissa, joiden vasteessa on pitkä viive suhteessa aikavakioon, on tavanomaisen PID-säätöpiirin virittäminen optimaaliseksi vaikeaa. Kun viive kasvaa suureksi, prosessista tulee epästabiili. Viivettä voi syntyä esimerkiksi silloin, jos mittaus ja mitattava suure ovat pitkän välimatkan päässä toisistaan. Lisäksi huonot mittausolosuhteet voivat luoda viivettä. Esimerkiksi jos anturi on suojattu sen vahingoittumisen välttämiseksi huonojen olosuhteiden takia, voi suoja aiheuttaa viivettä, jos mitataan esimerkiksi lämpötilaa termoparilla. (Graphical Modeling of Process Dynamics: Heat Exchanger Case Study 2015; Viiveellisten systeemien säätö 2011.)

JAMK:ssa on energiatekniikan laboratorio, jossa on painevesi-, pumppaus-, höyrykehitys-, ja jäähdytysmoduuli. Jäähdytysmoduulissa on lämpötilamittaus PAB01CT207, jonka vasteessa on pitkä viive. Tämä antaa mahdollisuuden tutkia pitkäviiveisen prosessin säätöä, käyttäytymistä sekä ennustavaa prosessimallipohjaista säätöä. Työkentely-ympäristö ja prosessi esitellään tarkemmin luvussa 2.

## 1.2 Tutkimusongelma ja tavoitteet

JAMK:n energiatekniikan laboratorion lämmönvaihdinprosessi antoi mahdollisuuden tutkia viiveellisen prosessin aiheuttamaa ilmiötä PID-säätimessä, mallintaa JAMK:n lämmönvaihdinprosessi kokeellisesti, tutkia kuinka hyvin se saadaan mallinnettua, sekä toteuttaa tavanomaisen ja prosessimallipohjaisen säätöratkaisun. Opinnäytetyössä tehtiin oletus, että olemassa olevaa lämpötilamittausta HAD01CT205, jossa ei esiinny pitkää viivettä ei ole käytössä, vaan lämpötila mitataan pintamittauksella lämpövaraajan läheltä, lämmönvaihtimelta palaavan putkilinjan päältä. Koska kyseessä on mittaus putken päältä, putki aiheuttaa ns. oman aikavakion mittaukselle ja siten myös pitkän mittausviiveen.



Opinnäytetyön tarkoituksena ei ollut siis rakentaa pysyvää säätöä lämmönvaihdinprosessiin, vaan luoda demonstraatio koululle ennustavasta prosessimallipohjaisesta säädöstä.

Opinnäytetyön tavoitteet olivat

- lämmönvaihdinprosessin mallintaminen askelvastekokein
- mallin hyvyyden toteaminen
- säätöpiirien suunnittelu ja simulointi Matlab- ja Simulink-ohjelmistoilla
- mahdollisimman hyvän PID-säädön toteutus JAMK:n Metso DNA-järjestelmällä
- prosessimallipohjaisen säädön (Smithin ennustajan) toteutus JAMK:n Metso DNA-järjestelmällä
- säätimien toiminnan toteaminen
- säätimien viritys
- säätimien, todellisen prosessin ja simulaattorin vertailu
- tulosten luotettavusarviointi
- adaptiivisten säätöparametrien toteuttaminen

### 1.3 Tutkimusmenetelmä ja tietoperusta

Kanasen (2015, 39.) mukaan kehittämistutkimuksen tavoitteena on muutoksen aikaansaaminen. Lisäksi Kanasen (2015, 14-15.) mukaan kehittämistutkimuksessa tähdätään muutokseen ja se on yhdistelmä kvalitatiivista (laadullinen) ja kvantitatiivista tutkimusta (määrällinen) tai pelkästään kvalitatiivista tutkimusta. Laadullisen tutkimuksen aineistonkeruumenetelmät ovat jaettavissa sekundääri- ja primääriaineistoon. Sekundääriaineistoa ovat mm. dokumentit, kuvat ja muut tutkittavaan ilmiöön liittyvät olemassa olevat aineistot. Primääriaineistoa voivat olla esimerkiksi ilmiöön liittyvä havainnointi, haastattelut ja kyselyt. Havainnointi voi olla teknistä-, piilo-, suoraa- tai osallistuvaa havainnointia. (Kananen 2015, 76 ja kuvio 25.)'

Opinnäytetyössä käytin laadullisen tutkimuksen tiedonkeruumenetelmiä. Sekundääriaineistona käytin säätötekniikkaan ja säätimen viritykseen liittyvää kirjallisuutta, verkkolähteitä kuten eri korkeakoulujen luento/kurssimateriaaleja, alaan liittyviä teollisia artikkeleita, säätötekniikkaan liittyviä tutkimuksia ja korkeakoulujen päättö- töitä. Primääriaineistona käytin teknistä havainnointia, eli erilaisten prosessikokeiden trendien ja laskutoimitusten perusteella tehtyjä havaintoja. Opinnäytetyön kehittämisosuutena oli paremman PI-säädön ja ennustavan prosessimallipohjaisen säädön kehittäminen lämmönvaihdinprosessiin. Opinnäytetyö noudattaa täten siis kehittämistutkimuksen tyyppistä tutkimusotetta.

## 2 Energiatekniikan laboratorio

JAMK:n energiatekniikan laboratoriossa voidaan simuloida prosessiteollisuuden ympäristöä. Ympäristössä voidaan opiskella prosessitekniisiä asioita monipuolisesti, kuten lämmönsiirtotekniikkaa. Laboratoriossa on neljä liikuteltavaa moduulia: pumppausmoduuli, painevesimoduuli, höyrykehitysmoduuli (max. 75 kW) sekä jäähdytysvesimoduuli. Moduulit ovat käytettävissä joko yhdessä tai erikseen. Energiatekniikan laboratoriossa on käytössä useita automaatiojärjestelmiä ja ohjelmoitavia logiikoita, kuten MetsoDNA, Siemens S7, PCS7, ABB ja Beckhoff. Käytettäviä väylätekniikoita ovat Profibus DP, Profibus PA ja ASi. (Energiatekniikan laboratorioympäristö n.d.)

### 2.1 Säädettävän prosessin toimintakuvaus

Painevesimoduulilla saadaan aikaan nostokorkeus pumppausprosesseille, kun painesäiliöön syötettävän paineilman määrää säädetään. Painevesimoduuli paineistaa pumppausprosessin. Pumppausprosessi toimii lisävesivarastona ja syöttää veden höyrykehitysmoduulin syöttövesisäiliölle. Höyrykehitysmoduulissa on sähkötoiminen höyrykehitin, jota voidaan ajaa 15-75kW tehoilla, max 10 bar:n paineella ja max. 185°C asteisena. Mitä suuremmalla teholla höyrykehitintä ajetaan, sitä suurempi on höyryntuotanto lämmönvaihtimelle. Höyryntuotannon kasvaessa, kasvaa myös lämmitysteho. Höyrykehitysmoduulin automatisointi on toteutettu Siemensin järjestelmällä, johon emme päässeet käsiksi tämän työn aikana. Höyrykehitysmoduuli sisältää höyrykierron keskeiset komponentit. Höyrykehitysmoduuli, sen kosketusnäyttöpaneeli, lämmönvaihdin ja valvomokuva ovat kuvattuna liitteessä 1. Opinäytetyön kannalta oleelliset höyrykehitysmoduulin komponentit ja niiden positiot ovat kuvattuna seuraavassa luettelossa.

- höyrystin HAD01BB001
- lämmönvaihdin HAD01AC002 (lauhdutin)
- lauhduttimelle HAD01AC002 menevän höyryyn painemittaus HAD01CP205
- lauhduttimelle menevän höyryyn virtausmittaus HAD01CF203
- PT-100 lämpötilamittaus HAD01CT205 (sijaitsee lauhduttimelta jäähdytysmoduulille lähtevän putkistolinjan alussa joten mittausviive on pieni)
- syöttövesisäiliö LCA01BB001
- syöttövesipumppu LCA01AP101 (syöttöveden pumppaaminen höyrystimelle)
- on/off venttiili LCA01AA101 (syöttövesipumpun jälkeinen venttiili)
- lauhteenkeräin HAD01AB003

Jäähdytysmoduulissa on lämpövaraaja, jonka vettä lämmitetään ajamalla vesi höyryrakenkehitysmoduulin lauhduttimelle. Lauhduttimessa lämpötila siirtyy väliaineiden välillä (höyryrakenkehittimeltä tuleva höyry ja varaajalta tuleva vesi), minkä jälkeen lämmitetty vesi tulee paluulinjan kautta takaisin lämpövaraajalle. Harjun & Marttisen (2000, 34.) mukaan yleisimpiä säätötapoja on mitata lämmönvaihtimelta tulevan aineen (jäähdytettävän tai lämmitettävän) lämpötila lämmönvaihtimelta lähtevän linjan läheltä ja pienentää lämmittävän tai jäähdyttävän aineen virtausta tulopuolelta. Energiatekniikan laboratorion prosessissa veden lämmitystä säädetään jäähdytysmoduulin jäähdytyspumpun PAB01AP202 nopeusohjetta muuttamalla. Kun virtaus pienenee, lämpötila kasvaa ja kun virtaus kasvaa, lämpötila laskee. Valvomokuvassa on indikaattori, jossa näkyy laskennallinen lämmitysteho (kW). Lämpövaraajalta lauhduttimelle lähtevästä linjasta avataan ”on/off”-venttiili PAB01AA101, minkä jälkeen pumpu PAB01AP201 käynnistetään ja sille voidaan virtaussäätimen PAB01DT202 kautta antaa nopeusohje prosentteina (23%:sta 100%:n) käsiajolla. Kun virtaussäädin PAB01DT202 on automaattilla, sille annetaan virtauksen asetusarvo paikallisesti valvomosta (säätimen asetusarvon ollessa ”local” eli paikallisohjaustilassa).

Lämpötilan asetusarvo annetaan lämpötilasäätimelle PAB01DT201 sen ollessa automaattilla. Kun virtaussäädin on automaattilla ja remote-tilassa, se saa virtauksen asetusarvon lämpötilasäätimeltä. Kyseessä on siis kaskadisäätö, joka käsitellään myöhemmin tässä opinnäytetyössä. Remote-tila tarkoittaa sitä, että asetusarvo saadaan kaskadisäädön ”pääsäätimeltä”, eli tässä tapauksessa lämpötilasäätimeltä. Vettä voidaan jäähdyttää jäähdyttimellä PAB01AC001, johon syötetään kylmää vettä kylmävesilinjasta PAC01AA011. Kun kylmävesilinjan virtausnopeutta säädetään suuremmaksi käsiventtiilillä PAB01AA026, saadaan aikaan suurempi jäähdytysteho, samalla tavalla kuin höyryn virtausnopeus kasvattaa lämmitystehoa. Valvomokuvassa on indikaattori, jossa näkyy laskennallinen jäähdytysteho. Kylmävesilinjan virtausnopeutta voitaisiin myös säätää pumpulla PAB01AP203, mutta siinä oli taajuusmuuttajavika työtä tehdessä. Jäähdytystehoa voitaisiin myös säätää pumpun PAB01AP201 nopeusohjetta säätämällä, jolloin virtausnopeutta pienentämällä saataisiin aikaan suurempi jäähdytysteho. Tässä työssä jäähdytysteho säädeltiin pelkästään käsiventtiilillä ja pyrittiin luomaan tase lämmitystehon ja jäähdytystehon välille prosessikokeiden aikana.

Säätö piti tehdä vain varaajan lämmityspuolelle. Kuva jäähdytysmoduulista ja sen alkuperäinen valvomokuva ovat esitettynä liitteessä 2. Seuraavassa luettelossa on esiteltynä opinnäytetyön kannalta oleelliset jäähdytysmoduulin komponentit, sekä niiden positiotunnukset, jotka näkyvät liitteen 2 valvomokuvassa.

- lämpövaraaja PAB01BB001
- lämmönvaihdin PAB01AC001 (jäähdytin)
- jäähdytyspumput PAB01AP201, PAB01AP202, sekä PAB01AP203.
- on/off-venttiili PAB01BB001
- kylmävesilinja PAC01AA011
- käsiventtiili PAB01AA026
- viiveellinen lämpötilamittaus PAB01CT207 (pintamittaus)

## 2.2 Metso DNA-automaatiojärjestelmä

Energiatekniikan laboratoriossa on valvomohuone, jossa sijaitsee MetsoDNA:n automaatiojärjestelmä (nyk. Valmet DNA). Prosessin operointi tapahtuu operointipalvelimen (OPS) kautta, johon operaattorille välittyvät myös tiedot prosessin toiminnasta, kuten mittaukset ja hälytykset. Hälytyspalvelin (ALS) hakee ja ylläpitää prosessista tulevia hälytystietoja, sekä toimittaa ne operointipalvelimelle. Historiapalvelimella (Info Server) saadaan ylläpidettyä historiaa mm. mittausdatasta, prosessin toiminnasta, sen operoinnista ja hälytyksistä. Prosessinohjauspalvelimella (PCS) liitetään järjestelmä prosessiin ja huolehditaan sen ohjauksista kenttäliityntöjen välityksellä. Ohjelmien suunnittelu ja lataus järjestelmään tapahtuu suunnittelupalvelimen (EAS) kautta. Sovelluksiin tehtävät muutokset menevät järjestelmän kohdeasemille varmennuspalvelimen kautta (BU), jonka muistiin tallentuvat sovellukset. Näin häiriöiden sattuessa saadaan viallinen asema toimintakuntoon varmennuspalvelimen käynnistäessä sen ja ladatessa sille muistissa olevat sovellukset. (Valmet DNA Suunnittelukurssi 2015, 5.)

MetsoDNA-järjestelmässä on useita suunnittelu- ja operointityökaluja. Tässä opinnäytetyössä hyödynnettiin työkaluja DNAexplorer (selainympäristö sovelluksille ja tietokannoille), FbCAD (Function block CAD, jossa säätöpiirit voidaan suunnitella lohkokaaaviomuodossa), Picture designer (valvomokuvien luonti) ja DNAoperate client (operointi ja prosessin valvonta).

## 3 Säätötekniikan perusteet

### 3.1 Säätötekniikan käsitteiden määrittely

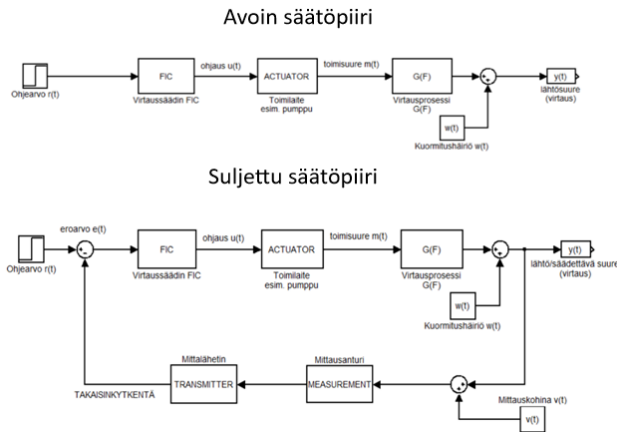
Seuraavassa luettelossa on esitelty säätötekniikkaan liittyviä käsitteitä. Käsitteiden määrittelyt perustuvat Savolaisen & Vaittisen teokseen Säätötekniikan perusteita 1997 (sivut 11-17) ja Harjun & Marttisen teokseen Säätötekniikan virityksen perusteet 2000 painos 1 (sivut 11-15).

- **Asetusarvo:** Asetusarvo (ts. ohjearvo) on säädettävälle järjestelmälle annettava säätösuureen haluttu arvo, jota säädin pyrkii ylläpitämään.
- **Dynaaminen järjestelmä:** Dynaamisessa järjestelmässä jokin järjestelmän tilasuureista ei ole vakio, vaan vaihtelee eri ajanhetkillä.
- **Eroarvo/eruelin:** Eroelin suorittaa ohjearvon ja oloarvon erotuksen, eli eroarvon laskennan.
- **Häiriö/häiriösuure:** Häiriö on tulosuure, johon ei aina voida vaikuttaa, kuten mittauksen häiriöt ja häiriöt kuormituksessa.
- **Järjestelmä:** Järjestelmä (ts. systeemi) on jokin yksikköprosessi prosessiteollisuudessa (kuten lämmönsiirrin) tai sen osa, kuten pumppu. Prosessi on monimutkainen järjestelmä, jossa tapahtuu erilaisia fysikaalisia ilmiöitä kuten virtausta ja lämmön siirtymistä.
- **Järjestelmän rajat ja ympäristö:** Järjestelmän rajoilla määrätään järjestelmään kuuluvat asiat, kuten putkilinjat, toimilaitteet ja mittaukset. sekä poissuljetaan asiat, jotka kuuluvat järjestelmän ulkopuolelle, eli ympäristöön.
- **Käskyelin:** Käskyelin muuttaa ohjesuureen vertailusuureeksi (reference input). Vertailusuureen viestin tietotyyppi ja alue pitää olla sama kuin mittasuureen, eli standardiviesti.
- **Lähtösuure:** Lähtösuureet ovat järjestelmässä esiintyvien tilasuureiden funktioita. Jokainen tilasuure = lähtösuure, sillä 1:llä kertominenkin on matemaattinen funktio ( $y=x$ ).
- **Matemaattiset mallit:** Matemaattisilla malleilla tutkitaan tulo-, tila- ja lähtösuureiden keskinäistä dynaamista käyttäytymistä. Mallit ovat yleensä yksinkertaistettuja ja ne eivät vastaa absoluuttisesti todellista prosessia.
- **Mittasuure:** Mittasuure on suure, jonka lähetin muodostaa mittausturinin antaman anturisuureen perusteella. Mittaustavasta riippuen mittasuure on jokin standardiviesti.
- **Monimuuttujajärjestelmä:** Monimuuttujajärjestelmässä tulo- tai lähtösuureita on useampia.
- **Myötähaara:** Myötähaara on säätöpiirissä eroelimen ja säädettävän suureen välinen alue, joka sisältää säätölohkon, toimilaitteen ja säädettävän järjestelmän.
- **Ohjaussuure:** Ohjaussuure on tulosuure, joka on muutettavissa järjestelmän toiminnan ja hallinnan ylläpitämiseksi. halutulla tavalla muuttaa”. Esimerkkeinä ohjaussuureista voidaan pitää vaikkapa nopeusohjetta pumppulle, tai virtaviestiä venttiilin asennoitimelle.
- **Oloarvo:** Oloarvolla tarkoitetaan säätösuureen hetkellisarvoa.
- **Signaali:** Signaali on suure, joka muuttuu ajan funktiona. Esimerkiksi mittauksen lähetin voi antaa virtaviestin, joka on mittaussignaali.

- **Suljettu ja avoin piiri:** Suljettuun piiriin tuodaan takaisinkytkentä (piiri säädöllä) ja avoimessa piirissä takaisinkytkentähaara on kytkemättä (piiri käsiohjauksella).
- **Summaimet:** Summaimet ovat lohkokaaavioesityksissä esiintyviä elimiä, joita käytetään esimerkiksi takaisinkytkennän, myötäkytkennän tai häiriön esittämiseksi. voidaan käyttää häiriön simuloimiseksi ja takaisinkytkennän esittämiseksi lohkokaaavioissa.
- **Säätöalgoritmit:** Säätöalgoritmit ovat säätimien käyttämiä menetelmiä, joilla järjestelmän säätösuure pyritään pitämään asetusarvossa ohjaussuureta muuttamalla.
- **Säätölohko:** Säätölohko antaa ohjaussuureen "u(t)" toimilaitteelle eroarvon perusteella. Ohjaussuure määräytyy sen mukaan, millaisia ohjelmointimenetelmiä säätölohkossa on käytetty. Säädin (kuten PID-säädin) muodostuu kokonaisuudessaan käskyelimestä, eroelimestä ja säätölohkosta.
- **Säätösuure:** Säätösuureella tarkoitetaan säädettävää lähtösuureta.
- **Takaisinkytkentähaara:** Takaisinkytkentähaara on säätöpiirissä säätösuureelta eroelimeen kytketty haara. Se on siis säätimelle tuleva mitta.
- **Tilasuureet:** Tilasuureita ovat järjestelmän sisällä olevat suureet, joilla saadaan tietoa järjestelmän olotilasta. Esimerkiksi virtausnopeus ja lämpötila putkistossa.
- **Tilavektori/tila:** Tilavektori/tila tarkoittaa järjestelmää, jossa esiintyy useampi kuin yksi tilasuure. Esimerkiksi huone on tila, jossa esiintyviä tilasuureita ovat mm. lämpötila ja kosteus.
- **Toimilaite:** Toimilaite muuttaa säätimen antaman ohjaussuureen toimitusmuoreksi "m(t)", joka lähetetään toimielimeen (esim. pumppu), jolla muutetaan säätösuureen arvoa.
- **Tulosuureet:** Tulosuureet ovat ympäristöstä tulevia suureita, jotka muuttavat järjestelmässä esiintyvissä tilassa ainakin yhtä tilasuureta.
- **Yksimuuttujajärjestelmä:** Yksimuuttujajärjestelmässä on vain yksi tulo- ja lähtösuure.

### 3.2 Johdantoa säätötekniikkaan

Savolaisen & Vaittisen (1997, 9.) mukaisesti säätötekniikassa tutkitaan ja kehitetään menetelmiä, joilla prosessissa olevia toimilaitteita saadaan ohjattua niin, että säätösuure pysyisi halutussa asetusarvossa. Harjun & Marttisen (2000, 44.) mukaan teollisuuden prosesseissa yleisimmin käytetty säädin on PID säädin. PID-säätimen toimintaperiaate käsitellään myöhemmin. Säätöpiirin komponentteja ovat säädettävä prosessi, sen toimilaitteet, mittausanturi, mittauslähetin ja säädin. Säätöpiirit voivat olla avoimia tai suljettuja. Avoimessa piirissä säätimelle ei tule mittausta/takaisinkytkentää. Piiri ei ole silloin säädöllä/automaatilla, vaan sitä ohjataan käsiohjauksella. Suljetussa piirissä säätimelle tuodaan takaisinkytkentä/mittaus ja se on automaattijolla. (Harju & Marttinen 2000, 13-14) Kuviossa 1 on esitettyä avoin ja suljettu säätöpiiri lohkokaaavioesityksenä.



Kuvio 1 Avoin ja suljettu säätöpiiri

Automaattinen säätöpiiri vaatii mitta- ja toimilaitteiden välisen tiedonsiirron, jonka molemmat laitteet ymmärtävät eli standardiviestijärjestelmän. Automaatiojärjestelmissä tulo- ja lähtö signaalit voivat olla esimerkiksi binäärisiä, digitaalisia, analogisia, pulsseja tai sarjavälviäviestejä. (Savolainen & Vaitinen 1997, 12; Automaatio 1, ELEC-C1210, 2. Automaation perustoiminnot ja niiden toteutus 2015, 7-8.) Taulukossa 1 on esitettyinä yleisesti käytettyjä signaaleja.

Taulukko 1 Automaatiojärjestelmissä käytettyjä signaalityyppejä

| Käytettyjä signaalityyppejä |  |                                       |
|-----------------------------|--|---------------------------------------|
| Tulot                       |  |                                       |
| Binääri ja digitaalinen     | Signaali                                 | Ominaisuuksia                         |
| Jänniteviesti               | 0/24VDC                                  | Käytetään paljon euroopassa           |
|                             | 0/48VDC                                  | Käytetään USA:ssa                     |
|                             | 120/230VAC                               |                                       |
| Kontaktitieto               | 0/5 VDC                                  | Transistori-Transistori logiikassa    |
|                             | On/Off                                   | Signaalien muodot vaihtelevia         |
| Analogiset                  | Signaali                                 | Ominaisuuksia                         |
| Virta                       | 0..20mA                                  | Hyvin yleinen                         |
|                             | 4..20mA                                  | Yleisin                               |
|                             | 10..50mA                                 | Harvemmin käytössä nykyään            |
| Jännite                     | 1..5 V                                   |                                       |
|                             | 0.. 10 V                                 | Melko yleinen                         |
|                             | -10..+10V                                |                                       |
|                             | 0..10mV                                  |                                       |
|                             | 0..100mV                                 |                                       |
| Termopari                   | tyypistä riippuen (K, T, J, R, S, tai E) | Kestää korkeita lämpötiloja           |
| Vastuslämpötilamittaus      | Pt100 (platinavastusanturi)              | Yleisin teollisuudessa                |
|                             | Ni100 (Nikkelivastusanturi)              | Rakennusautomaatioissa käytetty       |
| Lähdöt                      |  |                                       |
| Binääri ja digitaalinen     | Signaali                                 | Ominaisuuksia                         |
| Kontaktitieto               | 0/24, 0/48 VDC/AC                        | Transistoreissa                       |
|                             | 0/5 VDC                                  | Transistori-Transistori logiikassa    |
|                             | On/Off                                   | Rele, esim. tehonsyöttö               |
| Termopari                   | tyypistä riippuen (K, T, J, R, S, tai E) | Kestää korkeita lämpötiloja           |
| Vastuslämpötilamittaus      | Pt100 (platinavastusanturi)              | Yleisin teollisuudessa                |
|                             | Ni100 (Nikkelivastusanturi)              | Rakennusautomaatioissa käytetty       |
| Muita käytettyjä signaaleja | Signaali                                 | Ominaisuuksia                         |
| Tulot ja lähdöt             | Sarjavälit                               | RS232 ja RS495                        |
|                             | BCD (Binäärikoodattu desimaali)          | Binäärikanavia rinnakkain             |
|                             | Pulssit                                  | Määrä ja taajuus                      |
|                             | Pulssin leveys                           | Pulssin leveys kun signaali on päällä |
|                             | On/off                                   | Ohjaus binääriportilla                |

Aiemmin prosessiteollisuuden mittausten ja ohjausten tiedonsiirto tapahtui lähinnä 4-20mA analogisina viesteinä. Jälkeenpäin kehitys siirtyi HART-väylään, jossa analogisen signaalin lisäksi voidaan siirtää digitaalista signaalia. Nykyään HART-väylien sijaan voidaan käyttää digitaalisia kenttäväyliä. On olemassa lukuisia kenttäväylästandardeja, jotka soveltuvat eri tarkoituksiin, esimerkkeinä mm. Profibus PA, Profibus DP ja Foundation Fieldbus (FF). Kenttäväylän valinta riippuu prosessista ja kaupallisista seikoista. Osa väyläratkaisuista soveltuu esimerkiksi räjähdysvaarallisiin tiloihin ja mm. paperiteollisuuden tietyissä osaprosesseissa on rajoituksensa väyläratkaisuille. (Automaatio 1, ELEC-C1210, 4.1. Automaation kenttäväylät 2014, 12.) Tämän opinnäytteen prosessissa käytetään Profibus DP-kenttäväylää.

### 3.3 Prosessin dynamiikka ja mallintaminen

Säätötekniikassa prosessit ovat yleensä dynaamisia. Erityyppiset dynaamiset järjestelmät antavat erilaisen vasteen. Jotta erilaisia järjestelmiä voidaan vertailla, täytyy niillä olla yksikäsitteisiä mitattavia ominaisuuksia. (Savolainen & Vaittinen, 1997, 24.) Prosessin dynaamisia ominaisuuksia ovat mm. vahvistus, aikavakio, viive ja häiriöt. Prosessissa vasteessa esiintyvien aikavakioiden määrä voi vaihdella, se voi olla stabiili tai integroiva, se voi olla värähdellä, siinä voi esiintyä viivettä ja häiriöitä. Yleensä teollisuuden prosessit ovat kuvattavissa yhdellä aikavakiolla. Lämpötilan säätö on yleensä yhden aikavakion viiveellinen prosessi. (Harju & Marttinen 2000, 74-78; Kuisma 2017, 23.)

Harjun & Marttisen (2000, 14.) mukaisesti prosessista pitää luoda matemaattinen malli sen dynaamisten ominaisuuksien perusteella, jotta saadaan säätösuure reagoimaan säätöpiirissä halutulla tavalla. Matemaattinen malli voidaan luoda joko johtamalla se differentiaaliyhtälöistä (matemaattisesti), tai sitten kokeellisesti. Kokeellisesti prosessin dynaamisia ominaisuuksia voidaan tutkia erilaisin prosessikokein, jolloin mittausdataa tutkimalla saadaan tutkittua prosessin käyttäytymistä, sekä luotua sopiva prosessimalli. Tässä työssä ei differentiaaliyhtälöiden ratkaisua ei käsitellä sen tarkemmin, sillä säätötekniikassa tarkka malli prosessista ei ole välttämätön. (Harju & Marttinen, 2000, 73-74.) Harjun & Marttisen (2000, 90-96) mukaan kokeellisista menetelmistä tyypillisimpiä ovat askelvastekoe ja satunnaispulssikoe. Tässä työssä mallinnus tehtiin askelvastekokeilla, joten perehdytään vain siihen.



## Prosessikokeet ja järjestelmän dynaamiset ominaisuudet

Askelvastekoe on yksinkertainen ja yleisin menetelmä teollisuuden prosesseissa. Sitä suositellaan, jos koe on suoritettava nopeasti, siinä ei esiinny voimakasta kohinaa ja prosessia voidaan kuvata hyvin yhden aikavakion mallilla. Askelvastekoe soveltuu hyvin hitaasti käyttäytyviin prosesseihin, kuten koulun lämmönvaihdinprosessiin. Ohjaukseen tehdään askelmainen muutos ja tutkitaan vasteen käyttäytymistä ohjaukseen. Näin saadaan tutkittua, millainen prosessityyppi on kyseessä ja selvitettyä matemaattisen mallin parametreit. (Harju & Marttinen 2000, 90-96.)

Askelvastekokeella saadaan trendikuvaajan perusteella selvitettyä prosessimallin vahvistus (K), aikavakio (T) ja viive (L). Lisäksi voidaan myös testata suljetun säätöpiirin toimintaa. Kun luodaan matemaattista mallia ja halutaan tutkia prosessin käyttäytymistä, ajetaan piiriä avoimena eli käsiajolla ja muutetaan ohjausta. Automaatilla (suljettu piiri) voidaan asetusarvoa muuttamalla tutkia säätöpiirin toimintaa ja virityksen onnistumista. (Harju & Marttinen 2000, 74-79.) Vahvistuksella K kuvataan sitä, kuinka paljon prosessin säätösuure muuttuu suhteessa ohjaussuureeseen. Absoluuttinen vahvistus on määritelty kaavassa 1. (Savolainen & Vaittinen 1997, 24.) Lämmönvaihdinprosessissa parametreit selvitetään tekemällä jäähdytysmoduulin jäähdytyspumppulle PAB01P202 askelmuutos (esim. 30%:sta 50%:iin) ja seurataan virtausmittauksen PAB01CF206 ja lämpötilamittauksen PAB01CT207 vastetta muutokseen.

$$K_a = \frac{\Delta Y_a}{\Delta U_a} \quad (1)$$

missä

$K_a$  = absoluuttinen vahvistus

$\Delta Y_a$  = lähtösuureen muutos

$\Delta U_a$  = tulosuureen muutos

Absoluuttisella vahvistuksella ei kuitenkaan aina voida vertailla erilaisia tulo- ja lähtösuureita, sillä yksiköt ja mitta-alueet vaihtelevat. Tämä voidaan ratkaista käyttämällä suhteellista vahvistuskerrointa, eli lyhyemmin vahvistusta K, jolloin saadaan vertailukelpoiset kertoimet. (Savolainen & Vaittinen 1997, 24.) Vahvistus lasketaan kaavan 2 mukaisesti.

$$K = \frac{\frac{\Delta Y_a}{Y_{max} - Y_{min}}}{\frac{\Delta u_a}{u_{max} - u_{min}}} \quad (2)$$

missä

$\Delta Y_a$  = lähtösuureen muutos

$\Delta U_a$  = tulosuureen muutos

$Y_{max} - Y_{min}$  = lähdön vaihtelualue

$u_{max} - u_{min}$  = ohjauksen vaihtelualue

Kun tila/lähtösuure muuttuu, niin tapahtuu ns. varastoitumisilmiö, jolloin tulosuuretta (ohjausta) muutettaessa tila/lähtösuureen (eli mittauksen) ”varaston” täyttöaste muuttuu. Varastoituvat suureet voivat olla energia- tai ainemääräsuureita. Esimerkkeinä energiasuureesta voidaan pitää lämpöenergiaa, kun taas ainemääräsuureesta säiliöön varastoituvaa vettä. Järjestelmän rakenne vaikuttaa nopeuteen, jolla aine- ja energiavarastojen täyttöaste muuttuu. Nopeuteen vaikuttava ainevaraston rakenneominaisuus voisi olla tilavuus säiliössä ja energiavaraston tapauksessa lämpökapasiteetti. Jos puhutaan yksikapasiteettisesta prosessista, energia- tai ainevarastoja on yksi, kaksikapasiteettisen prosessissa kaksi jne. Jos energiaa tai ainetta ei varastoidu, puhutaan nollakapasiteettisesta järjestelmästä. (Savolainen & Vaittinen 1997, 25.).

Aikavakiolla T määritetään nopeus, jolla aikaisemmin mainittujen varastojen täyttöasteet muuttuvat, kun ohjausta muutetaan. Mitä pienempi aikavakio, sitä nopeammin prosessin vaste asettuu ohjausmuutoksen jälkeen loppuarvoonsa. Aikavakioiden määrä = järjestelmän kapasiteettiluku. Ratkaisevinta on selvittää suurin aikavakio. Yhden ja useamman aikavakion prosessin askelvasteet näyttävät melko samalta, mutta useammat aikavakiot voidaan huomata askelmuutoksen hetkellä. Useamman aikavakion prosessissa prosessi lähtee reagoimaan rauhallisemmin. Hallitsevin aikavakio kumoaa toisen nopeamman aikavakion, joka näkyy vain hetken askelvasteessa. (Savolainen & Vaittinen 1997, 28; Harju & Marttinen 2000, 75.)

Aikavakio T voidaan arvioida useammalla tavalla prosessin askelvasteesta. Voidaan piirtää suora, joka sivuaa vasteen jyrkintä nousukohtaa (tangentti), jolloin aikavakio saadaan tuon suoran ja vasteen lopputason leikkauspisteestä. Toinen tapa on laskea "63% säännöllä". Jos vasteen arvo kasvaa ohjausmuutoksen jälkeen, vasteen muutoksen lähtöarvoon lisätään 63% vasteen muutoksesta. Jos vaste lähtee laskuun, muutoksen lähtöarvosta vähennetään 63% vasteen muutoksesta (kaava 3). Tämän jälkeen aikavakio saadaan selvittämällä aikaväli askelvastekuvaajasta, joka kuuluu vasteen muutoksen alusta kaavalla 3 laskettuun arvoon. Prosessin asettumisajan perusteella (vaste pysyvästi  $\pm 1\%$  loppuarvosta) voi myös päätellä aikavakion, sillä asettumisaika on  $n \cdot 4 \dots 5 \cdot T$ . Aikavakio saadaan siis kaavan 4 mukaisesti. (Harju & Marttinen 2000, 80; Savolainen & Vaittinen 1997, 30-31.)

$$63\% \text{ sääntö} = \text{Offset} \pm 0.63 * \Delta Y \quad (3)$$

missä

Offset = lähtöarvo, josta vasteen muutos alkaa

$\Delta Y$  = vasteen muutos

$$T = \frac{(Y_{\text{loppu}} - Y_{\text{alku}})}{4 \dots 5} \quad (4)$$

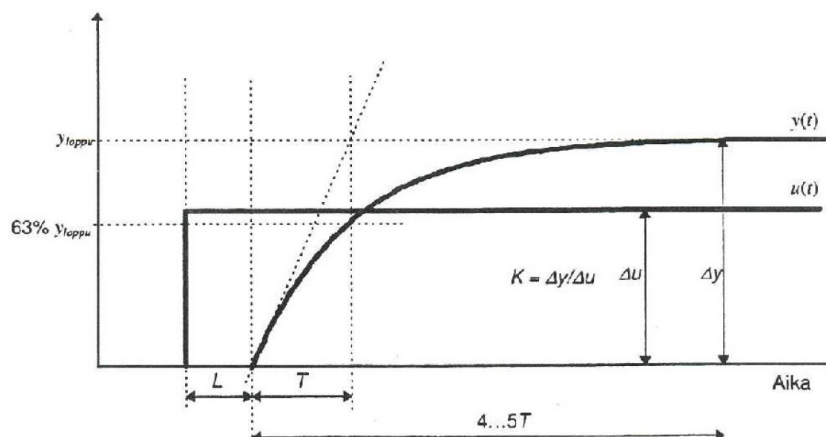
missä

$Y_{\text{loppu}} - Y_{\text{alku}}$  = vasteen asettumisaika muutoksen alusta loppuun ( $\pm 1\%$ )

Viive L on aikaväli, mikä kuuluu ohjauksen tai mittauksen muutoshetkestä siihen hetkeen, että tapahtuu ensimmäinen muutos niiden tilassa. Tekijöitä voivat olla etäisyys toimilaitteen ja mitta-anturin välillä, hidas mittaus ja signaalien suodattaminen. Viiveen pituus voi vaihdella ja sen käännteinen operaatio on ennustaminen. Viive aiheuttaa säätöpiirissä ongelmia, mutta sen kompensoimiseksi on kuitenkin olemassa menetelmiä. (Harju & Marttinen 2000, 78; Savolainen & Vaittinen 1997, 28.) Koulun prosessissa esiintyy pitkä mittausviive, sillä lämpötila mitataan putken pinnalta, jolloin siihen tulee mukaan ylimääräinen aikavakio. Viiveen aiheuttamiin ongelmiin ja viiveellisten prosessien säätöön perehdytään myöhemmin tässä opinnäytetyössä.

Prosessissa voi esiintyä häiriöitä, kuten mittauskohinaa ja kuormitushäiriöitä. Kuormitushäiriöt esiintyvät yleensä säännöllisin väliajoin ja ovat näkyvät askelmaisina muutoksina prosessin käyttäytymisessä. Esimerkkinä kuormitushäiriöstä voidaan pitää esimerkiksi prosessissa esiintyvää paineen vaihtelua. Mittauskohina taas voi johtua sähköisistä häiriöistä mitta-antureissa. Lisäksi säätöpiirissä voi esiintyä värähtelyä. Värähtelyn syy voidaan selvittää laittamalla säädin käsiajolle. Jos värähtely loppuu, se voi johtua viallisesta toimilaitteesta tai huonosti tehdystä v irityksestä. Häiriöt voidaan tässä tapauksessa korjata toimilaitteen huollolla tai säädintä virittämällä. Jos häiriö jatkuu käsiajolla, syy on jossain ulkopuolisessa lähteessä. (Harju & Marttinen 2000, 15-16.) Lämmönvaihdinprosessissa esiintyi kuormitushäiriöitä höyryntuotannossa. Kun syöttövesisäiliöstä syötetään jaksoittain (automaattinen pulssistointi) höyrystimeen lisää vettä. Lisätty vesi laskee höyrystimen veden lämpötilaa ja höyryn tuotanto laskee väliaikaisesti, jolloin lämpötila putoaa hetkellisesti.

Yleisimmät teollisuuden prosessit voidaan kuvata yhdellä aikavakiolla. Jos säädetään lämpötilaa, niin kyseessä on silloin useimmiten tällänen prosessi. (Harju & Marttinen 2000, 75; Kuisma 2017, 23.) Energiatekniikan laboratorion lämmönvaihdinprosessissa esiintyy myös viivettä, joten kyseessä on silloin yhden aikavakion viiveellinen prosessi. Prosessimallin parametrien selvittämistä askelvastekokeella yhden aikavakion viiveellisestä prosessista on havainnoillistettu kuviossa 2.



Kuvio 2 Parametrien selvittäminen askelvastekokein (Kuisma 2017, 61.)

## Laplace-muunnos ja siirtofunktio

Säätötekniikassa prosessien malleja kuvataan yleensä siirtofunktioilla  $G(s)$ , jotka perustuvat differentiaaliyhtälöihin ja niiden Laplace-muunnokseen. Laplace-muutokseen ei perehdytä tässä opinnäytetyössä tarkemmin, mutta tiivistettynä se muuttaa derivaatan kertolaskuksi ja integroinnin jakolaskuksi. Sitä voidaan käyttää funktioille, joiden arvona on 0 ennen ajanhetkeä  $t=0$ . Jos meillä on funktio  $f(t)$  sen Laplace muunnos  $F(s)$  voidaan määrittellä kaavan 5 mukaisesti integraalina. Laplace muutoksia erilaisille funktioille on esitettynä taulukossa 2. (Kuisma 2017, 20; Laplace-muunnos, 2011.)

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (5)$$

missä

$s$  = kompleksimuuttuja, joka on yleensä kompleksitasoa ja  $s$  on sen alkio.

Taulukko 2 Erilaisia Laplace muunnoksia (Kuisma 2017, 20-21.)

| Ominaisuus     | Muunnettava funktio              | Laplace-muunnos  |
|----------------|----------------------------------|--|
| Lineaarisuus   | $af(t) + bg(t)$                  | $aF(s) + bG(s)$  |
| Vaimennus      | $e^{-at}f(t)$                    | $F(s+a)$   |
| Viiästyys      | $f(t-a)u_a(t-a)$                 | $e^{-as}F(s)$  |
| Skaalaus       | $f(t/a), a > 0$                  | $aF(as)$   |
| Derivaatta     | $\frac{d}{dt}f(t)$               | $sF(s) - f(0)$   |
| n:s derivaatta | $\frac{d^n}{dt^n}f(t)$           | $s^n F(s) - (s^{n-1}f(0) + s^{n-2}f'(0) + \dots + f^{(n-1)}(0))$ |
| Integraali     | $\int_0^t f(t)dt$                | $\frac{1}{s}F(s)$  |
| Konvoluutio    | $\int_0^t f(\tau)g(t-\tau)d\tau$ | $F(s)G(s)$   |

Differentiaaliyhtälöistä etsitään prosessin syöte ja vaste, joiden perusteella luodaan prosessimalli. Laplace-muunnettu lineaarinen differentiaaliyhtälö voidaan aina esittää kaavan 6 mukaisesti. (Laplace-muunnos 2011; Kuisma 2017, 21.)

$$Y(s) = X(s)G(s) \quad (6)$$

missä

$Y(s)$  = Vasteen Laplace muunnos

$X(s)$  = Ohjauksen laplace muunnos

$G(s)$  = Siirtofunktio

Siirtofunktio määritellään siis vasteen laplace-muunnoksena jaettuna ohjauksen laplace muunnoksella. Jos prosessimalli selvitetään kokeellisesti, siirtofunktio kuvataan aikavakiomuodossa. Vaikka prosessin tarkka malli olisi epälineaarinen, voidaan säätötekniikassa monesti kuvata teollisuuden prosesseja riittävän tarkasti lineaarisilla malleilla. Kaavassa 7 on esitetty yhden aikavakion ja viiveen siirtofunktio malli. (Siirtofunktio 2011; Kuisma 2017, 21-23; Harju & Marttinen 2000, 81.)

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{Ts+1} * e^{-sL} \quad (7)$$

missä

$K$  = vahvistus

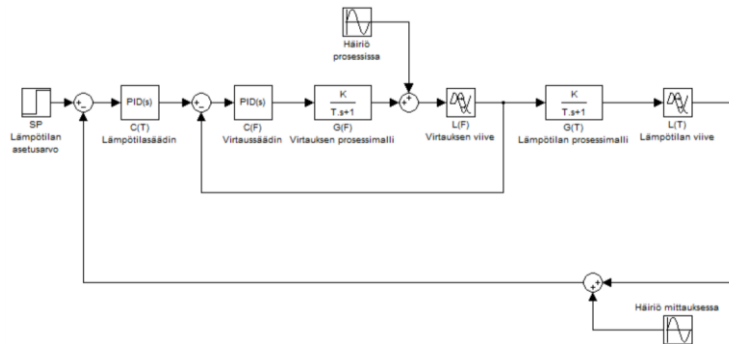
$T$  = aikavakio

$L$  = viive

$s$  = Laplace-muuttuja

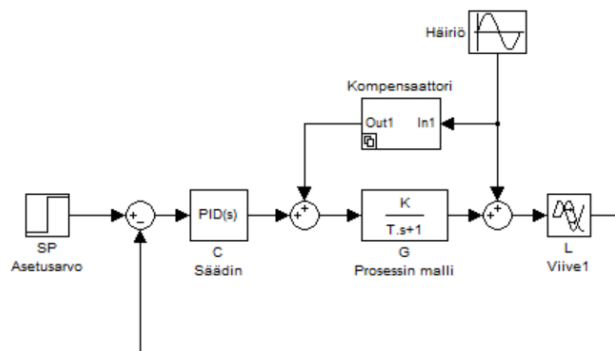
### 3.4 Säätöpiiriin sovellettavia kytkentöjä

Takaisinkytkennän lisäksi voidaan säätöpiireissä käyttää Harjun & Marttisen (2000, 23-26.) mukaisesti mm. suhdesäätöä, kaskadikytkentää ja myötäkytkentää. Kaskadikytkennässä ohjattavia suureita on useampia ja säädettäviä yksi. Kaskadikytkennässä on ylä- ja alasäädin, jotka ovat sisäkkäisissä silmukoissa. Yläsäädin toimii pääsäätimenä ja alasäädin apusäätimenä. Pääsäädin lähdöstä annetaan asetusarvo apusäätimelle (apusäädin laitetaan remotelle), joka puolestaan ohjaa toimilaitetta, jolla säädettävä suure säädetään. Kaskadikytkennän avulla säätö nopeutuu, sillä apusäädin reagoi ohjauksen muutoksiin nopeammin kuin pääsäädin. (Harju & Marttinen 2000, 23-24.) Tässä opinnäytetyössä oleellisimpia ovat kaskadi- ja myötäkytkennän käyttö. Opinnäytetyön prosessissa ohjaussuureita ovat lämpötilasäätimen antama asetusarvo virtaussäätimelle ja virtausäätimen antama nopeusohje pumppulle, kun taas säätösuurena on lämpötila. Kuviossa 3 on havainnoillistettuna lämmönvaihdinprosessissa oleva kaskadikytkentä lohkoavioesityksenä.



Kuvio 3 Lohkokaavioesitys lämmönvaihdinprosessin kaskadisäädöstä

Myötäkytkennällä voidaan korjata prosessissa esiintyviä kuormitushäiriöitä, mikäli kuormitushäiriö on mitattavissa ja voidaan käyttää siihen soveltuvaa ohjaussuuretta. Jotta häiriö voidaan kompensoida, täytyy ohjaus- ja säätösuureen viiveen olla  $\leq$  kuin häiriön ja säätösuureen välinen viive. Se korjaa ohjaussuureen, ennen kuin häiriö näkyy säätösuureessa. Sen käyttö ei muuta säätimelle tehtyä viritystä, tai tee prosessista epästabiliia. Takaisinkytketyssä piirissä myötäkytkentä tekee työstä merkittävimmän osan takaisinkytkennän toimiessa sen apuna. Myötäkytkennässä oleva kompensattori voi olla esimerkiksi lohko automaatiojärjestelmässä, joka mitatun häiriön perusteella suorittaa lisätermin laskennan ja summaa sen säätimen lähtöön. (Harju & Marttinen 2000, 25-26.) Kuviossa 4 on havainnoillistettuna myötäkytkentä lohkokaa- vioesityksenä.



Kuvio 4 Lohkokaavioesitys myötäkytkennästä

### 3.5 PID-säätö

Teollisuudessa käytetään useimmiten PID-säädintä. Sen rakenne on yksinkertainen, mutta se soveltuu kuitenkin piireihin, joissa vaikuttaa monia häiriö- ja epävarmuustekijöitä. Säätimen P-osa (Proportional) on suhdetermi, I-osa (Integral) on integroiva termi, D-osa (Derivative) on derivoiva termi. Säädintä pystytään käyttämään näiden termien yhdistelmillä prosessista riippuen. Näistä PI-säädin on yleisin, joka soveltuu suurimpaan osaan teollisuudessa käytetyissä prosesseihin. Toiminta perustuu kolmen termin yhteisvaikutukseen. Säätimen tuloksi tuodaan mittausta ja asetustarvo, josta säädin laskee eroarvon, jonka jälkeen se laskee ohjauksen säädin algoritmista riippuen. (Harju & Marttinen 2000, 44.)

Säätimen asetustarvo voidaan syöttää paikallisesti operaattorin toimesta local-tilassa (L), kaskadisäädössä pääsäätimeltä remote-tilassa (R) tai ylemmän tason säätimen antamana computer-tilassa (C). Kahden jälkimmäisen erona on se, että R:n asetustarvo muuttuu järjestelmän sisällä, kun taas C:n asetustarvo lasketaan järjestelmän ulkopuolisella tietokoneella tai vastaavalla. (Harju & Marttinen, 2000, 45.) PID-säätimellä on 3 viritysparametria, jotka ovat vahvistuskerroin, integrointiaika ja derivointiaika. Kun säädintä viritetään, nämä kolme parametria pyritään saamaan sellaiseen suhteeseen, että säätimen kokonaisohjaus vaikuttaa halutulla tavalla säädettävään prosessiin. Mitään tiettyä määrättyä suhdetta ei ole olemassa, vaan virituksen lopputulos voi olla samankaltainen erilaisilla yhdistelmillä. (Harju & Marttinen 2000, 50.)

PID-säädin voidaan toteuttaa käytännössä erilaisin rakentein. Perusrakenteita ovat ideaali-, rinnakkais-, ja sarjasäädin. Ideaalirakenne on näistä yleisin ja sen algoritmi on esitettyä kaavassa 8. (Harju & Marttinen 2000, 59-61.) Energiatekniikan laboratorion lämmönvaihdinprosessin säädössä käytetään ideaalirakenteista säädintä.

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (8)$$

missä

$u(t)$  = säätimen lähtö

$K_p$  = säätimen vahvistuskerroin



$e(t)$  = eroarvo ajanhetkellä  $t$

$T_i$  = säätimen integrointiaika

$\int e(t)dt$  = erosuureen integraali

$T_d$  = säätimen derivointiaika

$\frac{de(t)}{dt}$  = erosuureen derivaatta

Pelkässä P-säädössä ohjaussignaalin arvo riippuu täysin eroarvon suuruudesta. Lähtö on askelmainen ja askeleen koko on säätimelle määritelty vahvistuskerroin kerrottuna erosuureella. Harju & Marttinen (2000, 50.) määrittelevät vahvistuskertoimen suhdekertoimeksi ohjauksen ja eroarvon välillä. Isommalla vahvistuskertoimella prosessi reagoi ohjauksen muutoksiin nopeammin. Savolaisen ja Vaittisen (1997, 38) mukaan liian suuri vahvistuskerroin voi aiheuttaa prosessiin värähtelyä ja epästabiiliisuutta. P-säädön ongelmana on taipumus jättää pysyvää virhettä, eli asetusarvon ja mittauksen eroarvo ei saavuta nollaa. Tämä johtuu siitä, että ohjaus pysyy vakiona, jos eroarvossa ei tapahdu muutosta. Tavanomaista toimintapistettä vastaavalla vakiotasolla  $u_0$  voidaan korjata säätövirhettä pienemmäksi summaamalla se säätimen lähtöön. Vahvistuskertoimen etumerkillä saadaan vaihdettua säätimen toimisuuntaa. Käänteisessä toimisuunnassa ohjausta pienennetään, kun eroarvo kasvaa. P-säädön algoritmi on esitetty kaavassa 9. (Harju & Marttinen 2000, 45-47.)

$$u(t) = K_p e(t) + u_0 \quad (9)$$

missä

$u_0$  = tavanomaista toimintapistettä vastaava vakiotaso (bias)

I-termillä saadaan kumottua P-säädölle tyypillinen säätöpoikkeama. Sitä käytetään yleensä vain P-säädön kanssa. Toisin kuin P-säädössä, biasin sijaan käytetään erosuureen integraalilauseketta, joka muuttuu ajan funktiona. I-osan viritysparametrina on integrointiaika  $T_i$ . (Harju & Marttinen 2000, 47-48.) Integrointiaika tarkoittaa sitä aikaa, missä I-osa tekee samanlaisen muutoksen ohjaussuureeseen P-osan askelmaisen erosuureen muutoksen kanssa. Integrointi on pinta-alan laskemista, eli I-termi laskee eroarvon pinta-alaa, pyrkien saamaan sen nolaksi. Niin kauan kuin säätöpoikkeamaa

on, PI-säätö muuttaa lähtöään. Säätimen lähtö voi myös pienentyä eroarvon muuttuessa negatiiviseksi/leikatessa asetusarvon. PI-säätimen algoritmi voidaan ideaalisäätimen tapauksessa esittää kaavalla 10. Isompi integrointiaika tarkoittaa pienempää I-termi vaikutusta, kun taas pieni integrointiaika nopeuttaa ohjausta. Tämän voi päätellä siitä, että integrointiaika on kaavassa 10 muotoa  $\frac{1}{T_i}$ . (Harju & Marttinen (2000, 50.)

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right) \quad (10)$$

Jos säätimessä on integroiva termi ja toimilaitteen lähtösignaali on rajoitettu, niin ohjaussignaalin voi esiintyä integraalin kertymistä (windup). Jos eroarvo on suuri, säätimen sisällä ohjauksen I-termi kasvaa jatkuvasti, vaikka todellista ohjausta ei tapahtuisikaan esimerkiksi toimilaitteessa olevan rajoituksen vuoksi, säädin vain jatkaa sen kasvattamista. Kun erosuure menee nolaksi ja I-termi on kertynyt suureksi, se purkautuu pitkään yrittäessään integroida vastakkaismerkkistä eroarvoa, jolloin järjestelmän ohjattavuus katoaa. Tämä voidaan estää säätimien anti-windup toiminnolla, jolloin resetoitetaan integroiva osa, kun säätimen lähdön rajoitukset tulevat vastaan. (Kuisma 2017, 70.)

D-termiä voidaan käyttää joko P-säädön yhteydessä (PD-säätö) tai PI-säätimen yhteydessä (PID-säätö). Se tarkkailee erosuureen muutosnopeutta ja reagoi silloin kun muutosnopeus  $\neq 0$ . Kun ohjauksessa tapahtuu muutos, säätimen lähtöön tulee piikki. Jos D-osa olisi ideaalinen, lähdössä näkyvä piikki olisi korkea ja kapea. Viritysparametrina on derivointiaika  $T_d$ . Suuremmalla derivointiajalla saadaan suurempi vaikutus D-termille. D-termiä käyttävä säädin voidaan mieltää ennakoivaksi säätimeksi, koska lähtö muuttuu enemmän kuin eroarvon suuruus vaatisi. (Harju & Marttinen 2000, 48-50.) Kaavassa 11 on esitetty PID-säätimen algoritmi ideaalisäätimen tapauksessa.

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (11)$$

Eroarvon muutosnopeuden  $\frac{de(t)}{dt}$  sijaan saatetaan käyttää myös mittaussuureen muutosnopeutta  $= \frac{-dy(t)}{dt}$ . (Harju & Marttinen 2000, 48.)

Ideaalista derivaattoria ei voida kuitenkaan toteuttaa. Se aiheuttaa äärettömän korkean piikkiin vasteena askelmuutokseen ja vaihevasteen perusteella voidaan huomata, että vahvistus kasvaa äärettömäksi suurilla taajuuksilla. Se vahvistaisi piireissä ja mittalaitteissa esiintyvää korkeataajuisia kohinaa niin paljon, että se voisi hukata hyötysignaalin. Suodatettu derivaattori voidaan kuitenkin toteuttaa. (PID-säätimen modifikaatiot 2011; Harju & Marttinen 2000, 50-51.) D-termi voidaan suodattaa käyttämällä nopeaa alipäästösuodatusta, jossa on aikavakiotermi  $T_{df}$ . Isompi aikavakio tarkoittaa pienempää D-osan vaikutusta. Kaavassa 12 on esitettyä ideaalisen PID-säätimen algoritmi suodatetulla derivaatalla. (Harjun & Marttinen 2000, 51.)

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + D) \quad (12)$$

missä

$D$  = alipäästösuodatettu derivaatta.

Alipäästösuodatetun derivaatan  $D$  yhtälö on kaavan 13 mukainen.

$$D = T_d \frac{de(t)}{dt} - T_{df} \frac{dD}{dt} \quad (13)$$

Missä  $T_{df} = \frac{T_d}{N}$  = aikavakiotermi, eli derivointiaika jaettuna suodatuskertoimella  $N$ .

Mitä isompi suodatuskerroin, sitä pienempi D-osan vaikutus on. (Harju & Marttinen 2000, 51.)

### 3.6 Viiveellisten prosessien säätö

Joissakin prosesseissa on pitkä viiveaika, jonka takia PID-säädin itsessään ei välttämättä riitä hyvään lopputulokseen säätöpiirissä, sillä pitkä viive tekee prosessista epästabiilin. Viivellisen prosessin säädössä vahvistusta on pienennettävä, jotta järjestelmästä saadaan stabiili. (Kuisma 2017, 85-88.; VanDoren 2015)

Säätimellä on tietty asetusarvo, mutta se joutuu odottamaan pitkään mittauksen vastetta. Säädin olettaa, että vaste tulee välittömästi ja luulee, että ohjauksella ei ollut vaikutusta. Säädin alkaa kasvattamaan lähtöään, kunnes prosessin vasteessa tapahtuu muutos viiveen jälkeen, jolloin eroarvo pienenee. Tässä vaiheessa ollaan jo kuitenkin myöhässä, sillä säätimen lähtö on jo ylikompensoitunut. (VanDoren 2015.)

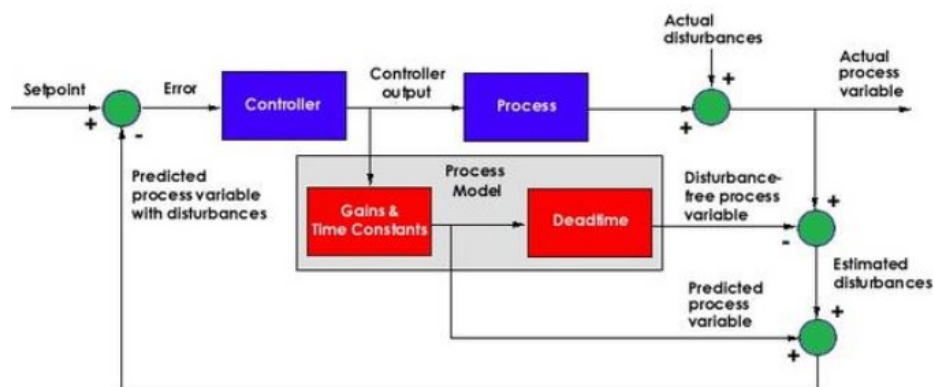
Kun säädin huomaa tehneensä liian rajun korjauksen, se alkaa seuraavaksi muuttaa lähtöä vastakkaiseen suuntaan ylikompensoidusti, jolloin säätöpiiristä tulee epästaabiili ja se alkaa värähtelemään. Se, kuinka paljon säädin ylikompensoi riippuu siitä, miten säädin on viritetty ja kuinka pitkä vaste prosessissa on. Mittaustapaa ja mittauksen paikkaa voidaan muuttaa, säätimeen voidaan koittaa erilaisia viritysparametreja tai sen vasteaikaa voidaan hidastaa. Kaikissa prosesseissa tämä ei kuitenkaan ole mahdollista. (VanDoren 2015; Kuisma 2017, 88.)

Säätöalgoritmia sanotaan prediktiiviseksi eli ennustavaksi, jos säätimen ohjaus laskeaan prosessimallin avulla. Säätöpiirissä on järjestelmän dynamiikkaa kuvaava matemaattinen malli, jonka perusteella se laskee sopivan ohjauksen järjestelmälle. Jos malli vastaa täysin todellista järjestelmää, se toimii myötäkytkettynä säätäjänä. Jos prosessin ja prosessimallin eroarvo  $\neq 0$  niin takaisinkytkentä ja myötäkytkentä vaikuttavat yhdessä säätimen toimintaan. Malliprediktiivistä säädöstä on hyötyä esimerkiksi viiveellisissä prosesseissa tai jos prosessissa esiintyy mitattavia häiriöitä. Toteutusta vaikeuttavia tekijöitä ovat vaihteleva tai tuntematon viive, vaikeasti mallinnettava prosessi ja prosessin epälineaarisuudet. (Majanne 2007) VanDorenin (2015) ja Kuisman (2017, 88) mukaisesti yksi tapa eliminoida prosessissa esiintyvä viive on käyttää Smithin prediktorin, joka on yksi tapa toteuttaa malliprediktiivinen säätö.

### **Smithin prediktori**

Smithin prediktorin keksi Otto Smith vuonna 1957. Säätöpiirin lohkokaavioesityksessä on tavanomainen myötähaara, säädin, prosessi ja häiriöt. Säätimen lähdestä viedään sisempi silmukka, jossa on matemaattinen prosessimalli, jonka tarkoituksena on luoda häiriövapaa prosessimuuttuja. Siinä käytetään säätimessä prosessin siirtofunktiomallia, joka on sarjassa arvioidun kuolleen ajan kanssa. Takaisinkytkennän sisemmässä silmukassa on mallinnettu arvio, miltä prosessimuuttuja voisi näyttää ilman häiriöitä ja kuollutta aikaa. Smithin strategiassa takaisinkytkennän jälkimmäiseen summainobjektiin tuodaan siirtofunktion lähtö ja kuollut aika ohitetaan. Näin saadaan ennustettua, miten prosessimuuttuja käyttäytyisi kuolleen ajan kuluttua. (VanDoren 2015)

Kun prosessimalli ilman häiriöitä (siirtofunktio ja kuollut aika sarjassa) vähennetään varsinaisesta prosessimuuttujasta, tuotetaan silloin ennakkolaskelma häiriöistä (ensimmäinen summainobjekti takaisinkytkennässä). Kun ennakkolaskelma häiriöistä ja ennustettu prosessimuuttuja summataan, saadaan luotua takaisinkytkentämuuttuja, joka sisältää prosessin häiriöt ilman kuollutta aikaa (VanDoren 2015). Kuviossa 5 on havainnoillistettuna Smithin prediktorin periaatekuva lohkokaavioesityksenä.



Kuvio 5 Smithin prediktorin periaatekuva (VanDoren 2015)

### 3.7 Adaptiivinen säätö

Adaptiivisesta säädöstä on hyötyä, jos prosessi on hyvin epälineaarinen. Se voidaan toteuttaa esimerkiksi taulukoimalla parametrit prosessin eri toimintapisteille, jolloin säädin saa taulukosta vaihtuvat parametrit prosessin eri toimintapisteissä. Lisäksi voidaan käyttää mm. itsevirittyvää säädintä, jolloin säätöpiiriin lisätään prosessimalli ja säätimen parametrit lasketaan jatkuva-aikaisesti säätimen ollessa online-tilassa. (Majanne 2007)

### 3.8 Säätöpiirin virittäminen

PID-säädintä virittäessä, tulee huomioida järjestelmän dynamiikka, mahdollinen epälineaarisuus prosessissa, prosessihäiriöt ja epävarmuustekijät. Säätöpiirille määritellään tavoitteet, eli halutaanko säätö noudattamaan annettua asetusarvoa vai kompensoimaan kuormitushäiriöitä. Prosessista luodaan dynaaminen malli (kuten luvun

3.3 mukaisella askelvastekokeella). Prosessin mallin hyvyys voidaan todeta mm. simuloimalla, kun verrataan prosessikokeesta saatua dataa ja simuloitua vastetta. Virittäessä tulee huomioida, kuinka hyvin säätöpiiri mukautuu mallinnusvirheisiin, häiriöihin, muuttuvaan vahvistukseen ja viiveeseen. Hyvän virityksen yleisiä vaatimuksia ovat tarkkuus, nopeus, hyvä kuormitushäiriöiden kompensointi, stabiili ohjaussignaali ja epäherkkyys mittauskohinalle. Vaatimukset vaihtelevat säädölle määriteltyjen tavoitteiden mukaisesti. (Harju & Marttinen 2000, 107-109; Kuisma 2017, 58-60.) PID-säätimen virittämistä varten on olemassa useita menetelmiä, joista tässä opinnäytetyössä käsitellään Ziegler-Nichols menetelmä ja Lambda-iritys.

Ziecher-Nichols menetelmä perustuu arvioituihin prosessimallin parametreihin  $K$ ,  $T$  ja  $L$ . Tällä viritysmenetelmällä vaste alkaa värähtelemään helposti, eikä se sovellu kovin hyvin asetusarvon seurantaan tai kuormitushäiriöiden poistamiseen. Ziecher-Nichols menetelmä ei sovi myöskään prosesseihin, joissa on merkittävä viive. (Harju & Marttinen 2000, 116; Kuisma 2017, 62.) Menetelmässä käytettävät virityskaavat ovat esitettyinä taulukossa 3.

Taulukko 3 Ziecher-Nichols menetelmän virityskaavoja

|     | $K_p$       | $T_i$ | $T_d$ |
|-----|-------------|-------|-------|
| P   | $T/(KL)$    |       |       |
| PI  | $0,9T/(KL)$ | $3L$  |       |
| PID | $1,2T/(KL)$ | $2L$  | $L/2$ |

Lambda-menetelmä on prosessimallipohjainen menetelmä. Suljetun piirin aikavakio  $\lambda$  (eli lambda) määritellään suljetun ja avoimen piirin aikavakioiden suhdekertoimena. Prosessiteollisuuden säätöpiirejä virittäessä sen arvo voidaan valita väliltä  $\lambda = 0.5...5 * T$ . Käyttäjä siis määrittelee itse, kuinka nopea säätöpiiri halutaan, jonka jälkeen lasketaan vasta viritysparametrit. Se soveltuu hyvin yhden aikavakion ja viiveen prosessille, kuten koulun lämmönvaihdinprosessiin. (Harju & Marttinen 2000, 116; Kuisma 2017, 65-66.)

Lambda-menetelmä soveltuu myös erittäin hyvin Smithin prediktorin kaltaisen säätimen viritykseen. Viive on tässä menetelmässä otettu hyvin huomioon. Säättöpiireissä tulisi käyttää lambda arvoja  $\lambda = 2 \dots 3 \cdot T$ , jotta ohjaus ei käyttäytyisi liian aggressiivisesti, eivätkä toimilaitteiden rajat tulisi vastaan. (Harju & Marttinen 2000, 116-121; Kuisma 2017, 65-66.) Taulukossa 4 on esitettyinä lambda virityskaavoja 1. aikavakion prosessille (viiveetön ja viiveellinen). Taulukon kaavoista voidaan päätellä, että mitä pienempää lambda-arvoa käytetään, sitä enemmän vahvistuskerroin kasvaa.

Taulukko 4 Lambda virityskaavoja

| Prosessin ominaisuus                              | Siirtofunktio              | Kp                         | Ti               |
|---|----------------------------|----------------------------|------------------|
| Viiveetön   | $\frac{K}{Ts + 1}$         | $\frac{T}{K\lambda}$       | T                |
| Viiveellinen, $L \sim T$                          | $\frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls}$ | $\frac{T}{K(\lambda + L)}$ | T                |
| Viiveellinen, iso aikavakio suhteessa viiveeseen. | $\frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls}$ | $\frac{T}{K(\lambda + L)}$ | $4(L + \lambda)$ |
| Viiveellinen, iso viive suhteessa aikavakioon     | $\frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls}$ | $\frac{T}{K(\lambda + L)}$ | 3L               |

## 4 Opinnäytetyön toteutus ja tulokset

### 4.1 Prosessin mallintaminen

#### 4.1.1 Prosessikokeiden suorittaminen

Opinnäytetyö alkoi prosessikokeilla (askelvastekokeet), jotta saataisiin luotua prosessimalli lämpötilalle ( $G_T$ ) ja simulaattoria varten prosessimalli virtaukselle ( $G_F$ ). Prosessin valmistelu koeajoihin tapahtui seuraavalla rutiinilla:

1. Kytkin jäähdytysmoduuliin Profibus DP – väyläkaapelin, jolla tapahtuu tiedonsiirto MetsoDNA-järjestelmän ja jäähdytysmoduulin välillä.
2. Kytkin energiatekniikan laboratorion paineilmasyötön kytkimen päälle.
3. Kun olin kytkenyt paineilmasyötön päälle, avasin jakotukista venttiilit, joilla saadaan paineilmasyöttö jäähdytysmoduulille.
4. Käynnistin höyrykehittimen siinä olevasta Siemensin kosketusnäyttöpaneelistä ja laitoin sen lämpenemään haluamalleni teholle.

5. Kun lämpötila höyrykehittimessä kohosi 100°C yläpuolelle (höyryä alkaa muodostua lauhduttimelle HAD01AC002) avasin venttiilin PAB01AA101 (ennen pumppua PAB01AP201).
6. Käynnistin pumpun PAB01AP201 ja annoin säätimelle PAB01DF202 sen ollessa käsi-ajolla nopeusohjeen, jotta saan veden kiertämään lauhduttimen kautta.
7. Laitoin käsi-ajolla jäähdytyspumpun PAB01AP202 päälle ja annoin sille nopeusohjeen, jolloin sain veden kiertämään jäähdyttimen PAB01AC001 kautta.
8. Avasin kylmävesilinjan venttiilit ja säädin käsiventtiilillä PAB01AA026 kylmän veden virtausta jäähdyttimelle siten, että laskennallinen jäähdytysteho on suunnilleen yhtä suuri, kuin lämmitysteho lauhduttimella. Varaajan lämpötilan tulisi pysyä mahdollisimman tasaisena koeajojen aikana, jotta se ei vaikuttaisi mittaustuloksiin.
9. Kun jäähdytysteho ja lämmitysteho olivat asettuneet samoihin lukemiin sekä varaajan lämpötila oli tasoittunut, aloitin askelvastekokeiden suorittamisen.
10. Kokeiden aikana pyrin tarkkailemaan, ettei lämpötilaero säiliön ja mittauksen PAB01CT207 välillä ole liian pieni. Lämpötilaeron mennessä liian pieneksi säädin jäähdytystä isommalle käsiventtiilistä PAB01AA026. Kun lämpötilaero on kasvanut riittävästi säädin jäähdytystehon lämmitystehoa vastaavaksi ja odottelin prosessin tasaantumista.

Liitteessä 3 on havainnoillistettuna prosessikokeita varten tehdyt valmistelut ja kuvankaappaukset moduuleista ajovalmiina. Askelvastekokeet ja prosessin mallintamisen tein höyrykehittimen teholla 30 kW. Askelvastekokeilla pyrin selvittämään lämpötilan prosessimallin  $G_T$  vahvistuksen  $K_T$ , aikavakion  $T_T$ , sekä viiveen  $L_T$ . Lisäksi simulaattoria varten tuli selvittää virtauksen prosessimalli  $G_F$  ja sen parametrit  $K_F$ ,  $T_F$  ja  $L_F$ . Tein 2 askelvastekoetta, joissa käytin erilaisia keinoja parametrien selvittämiseksi. Molemmissa tein 6 askelmuutosta pumpulle.

Ensimmäisessä kokeessa tein askelmuutokset 20% välein virtaussäätimen PAB01DF202 ohjaamalle pumpulle PAB01AP201 ensin 30%:sta 90%:n, jonka jälkeen 90%:sta 30%:n. Odotin aina, että prosessi tasaantuu ennen seuraavaa askelmuutosta. Kun ensimmäiset kokeet olivat suoritettu, hyödynsin MetsoDNA:n historiaseurantaa ”trace history”. Historiaseurannan trendi-ikkunaan lisäsin lämpövaraajan lämpötilamittauksen (varmistakseni, että se ei vaikuta kokeiden tuloksiin), virtaussäätimen lähdön (pumpun PAB01AP202 nopeusohje), viiveellisen lämpötilamittauksen PAB01CT207 ja virtausmittauksen PAB01CF206. Vahvistuksen  $K_T$  laskin kaavalla 14 ja vahvistuksen  $K_F$  kaavalla 15.



$$K_T = \frac{\frac{\Delta T}{T_{max} - T_{min}}}{\frac{\Delta F}{F_{max} - F_{min}}} \quad (14)$$

missä

$\Delta T$  = lämpötilan muutos

$T_{max} - T_{min}$  = lämpötilan vaihtelualue (veden kiehumispiste 100°C – huoneenlämpö 22°C)

$\Delta F$  = virtauksen muutos.

$F_{max} - F_{min}$  = virtauksen vaihtelualue ( $F_{max} = 70\text{L}/\text{min}$ ,  $F_{min} = 0\text{L}/\text{min}$ ).

$$K_F = \frac{\frac{\Delta F}{F_{max} - F_{min}}}{\frac{\Delta Ref}{Ref_{max} - Ref_{min}}} \quad (15)$$

missä

$\Delta F$  = virtauksen muutos

$F_{max} - F_{min}$  = virtauksen vaihtelualue ( $\text{max} = 70\text{L}/\text{min}$  ja  $\text{min} = 0\text{L}/\text{min}$ ).

$\Delta Ref$  = pumpun nopeusohjeen muutos.

$Ref_{max} - Ref_{min}$  = pumpun nopeusohjeen vaihtelualue ( $\text{max} 100\%$  ja  $\text{min} 0\%$ )

Aikavakiot arvioin historiaseurannasta luvun 3.3 kaavoissa 3 ja 4 esiteltujen menetelmien mukaisesti. Viiveen  $L_T$  selvitin historiaseurannasta katsomalla aikavälin virtausmittauksen PAB01CF206 muutoksesta ensimmäiseen lämpötilamittauksen PAB01CT207 muutokseen. Viiveen  $L_F$  selvitin samaan tapaan, mutta katsomalla aikavälin pumpun nopeusohjeen muutoksen alusta virtausmittauksen PAB01CF206 muutoksen alkuun. Historiaseurannan perusteella tehdyt arviot prosessimallin parametreista ovat esiteltynä liitteissä 4, 5 ja 6. Prosessimallin  $G_F$  viiveen arvontia ei ole liitteissä. Pidin sen arvona 0s, sillä historiaseurannan perusteella se oli < 0.5-1s. Taulukossa 5 on esiteltynä ensimmäisen askelvastekokeen ja historiaseurannan perusteella tehdyt arviot prosessimallien  $G_T$  ja  $G_F$  parametreista.

Taulukko 5 Ensimmäisen askelvastekokeen perusteella lasketut parametrit

| Koeajot 30kW                              |                                 |                              |                      |                        |                        |                 |                   |           |      |
|---|---------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------|-------------------|-----------|------|
| Askelmuutos<br>Pumpun nopeusohje ΔREF (%) | Virtauksen muutos<br>ΔF (L/min) | Lämpötilan muutos<br>ΔT (°C) | Skaalattu ΔREF<br>ΔX | Skaalattu ΔF<br>ΔY (F) | Skaalattu ΔT<br>ΔY (T) | Vahvistukset K  |                   | Viiveet L |      |
|   |                                 |                              |                      |                        |                        | G(T)            | G(F)              | G(T)      | G(F) |
| 30→50                                     | 21,55                           | 10,75                        | 0,2                  | 0,3                    | 0,14                   | 0,45            | 1,54              | 20        | 0    |
| 50→70                                     | 19,54                           | 3,42                         | 0,2                  | 0,3                    | 0,04                   | 0,16            | 1,40              | 30        | 0    |
| 70→90                                     | 10,68                           | 1,47                         | 0,2                  | 0,2                    | 0,02                   | 0,12            | 0,76              | 20        | 0    |
| 90→70                                     | 9,9                             | 2,35                         | 0,2                  | 0,1                    | 0,03                   | 0,21            | 0,71              | 40        | 0    |
| 70→50                                     | 18,62                           | 1,98                         | 0,2                  | 0,3                    | 0,03                   | 0,10            | 1,33              | 30        | 0    |
| 50→30                                     | 21,91                           | 10,16                        | 0,2                  | 0,3                    | 0,13                   | 0,42            | 1,57              | 52        | 0    |
|   |                                 |                              | (ΔREF/(100-0%))      | (ΔF/(70-0L/min))       | (ΔT/(100-22°C))        | ΔY (T) / ΔY (F) | ΔY (F) / ΔX (REF) |           |      |

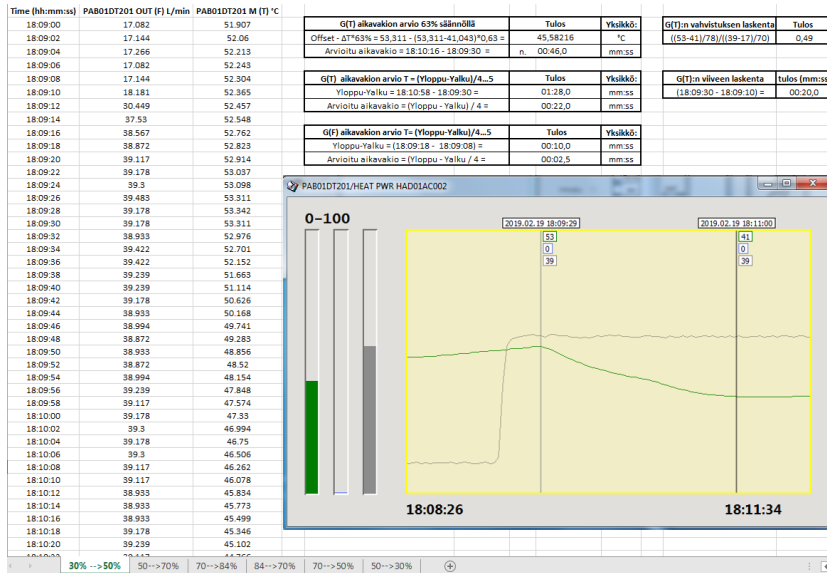
  

| Aikavakioiden laskutoimitukset 63% menetelmällä |   |  |                                    |                                    |
|---|---|--|------------------------------------|------------------------------------|
| Askelmuutokset<br>Pumpun nopeusohje (REF)       | Etsittävä lämpötilaarvo 63% menetelmällä =<br>Offset + 63*ΔT (°C) | Etsittävä virtauksen arvo 63% menetelmällä =<br>Offset + 63*ΔF (L/min) | Lämpötilan lähtöarvo<br>(T offset) | Virtauksen lähtöarvo<br>(F offset) |
| 30%→50%   | 56,6775   | 30,6565  | 63,5                               | 17,1                               |
| 50%→70%   | 50,9454   | 51,5502  | 53,1                               | 39,2                               |
| 70%→90%   | 49,8239   | 65,8084  | 50,8                               | 59,1                               |
| 90%→70%   | 50,7305   | 64,133   | 49,3                               | 70,4                               |
| 70%→50%   | 53,0374   | 47,1594  | 51,8                               | 58,9                               |
| 50%→30%   | 59,8308   | 25,6767  | 53,4                               | 39,5                               |

| Aikavakiot arvioituna kahdella eri menetelmällä (s) |                                     |                                     |                                     |                                     |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Pumpun nopeusohje (REF)                             | G(T) aikavakio 63% menetelmällä (s) | G(T) aikavakio (Yloppu-Yalku)/4 (s) | G(F) aikavakio 63% menetelmällä (s) | G(F) aikavakio (Yloppu-Yalku)/4 (s) |
| 30%→50%   | 23                                  | 20                                  | 6,0                                 | 2,5                                 |
| 50%→70%   | 21                                  | 12,5                                | 14,0                                | 5,0                                 |
| 70%→90%   | 30                                  | 32,5                                | 6,0                                 | 2,5                                 |
| 90%→70%   | 57                                  | 35                                  | 7,0                                 | 2,5                                 |
| 70%→50%   | 20,5                                | 10                                  | 6,5                                 | 2,5                                 |
| 50%→30%   | 35                                  | 17,5                                | 6,5                                 | 2,5                                 |

Toisella askelvastekokeella (höyrystimen teholla 30kW) arvioin uudelleen prosessimallin  $G_T$  vahvistuksen, aikavakion ja viiveen, sekä simulaattoria varten prosessimallin  $G_F$  aikavakion, sillä historiaseurannan perusteella saatu tulos vaikutti epärealistiselta. Hyödynsin säätimen PAB01DT201 compact-trendiä 7.5min aikavälillä, pienen 2s näytteenottovälin takia. Trendistä sai talteen virtausmittauksen PAB01CF206 arvot (säätimen lähtö seuraa virtausmittausta käsiajolla) ja lämpötilamittauksen PAB01CT207 arvot. Ohjelmaan oli muutettu tässä vaiheessa pumpun nopeusohjeen ylärajaksi 84%, joten tein askelmuutokset 30%:n ja 84%:n välillä, sekä 84%:n 30%:n välillä. Tein 20% askelmuutokset (pl. askelmuutokset 70%sta: 84%:n ja 84%:sta 70%:n). Kopioin trendi-ikkunan ja sen datan, keräsin datasta oleelliset tiedot ja tein tarvittavat laskutoimitukset. Tätä on havainnoillistettu kuviossa 6. Tulokset jokaisella askelmuutoksella ovat liitteessä 7.



Kuvio 6 Askelvastekokeessa 2 käyttämäni menetelmä

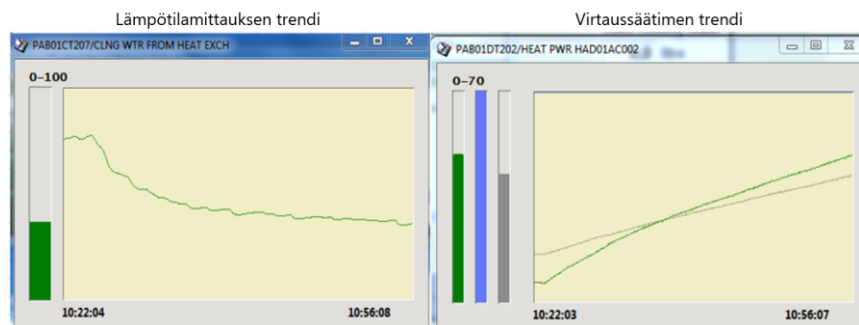
Molempien askelvastekokeiden perusteella tein taulukon 6, jossa on esitetty arviot lämpötilan prosessimallin parametreista K, T ja L, sekä niiden keskiarvot. Aikavakion kohdalla laskin vielä keskiarvon molempien aikavakion arviointimenetelmien keskiarvoista. Taulukosta huomaa prosessin epälineaarisuuden, sillä parametrien arvojen vaihteluväli on melko suuri. Varsinkin vahvistus vaihteli paljon, joten päädyimme toimeksiantajan ehdotuksesta vahvistuksen arvioimisen sijaan luomaan kaavan lämpötilan laskemiseksi virtauksen perusteella hyödyntämällä Excelin kaavaansovitusta. Tätä käsitellään luvussa 4.1.2.

Taulukko 6 Molempien askelvastekokeiden perusteella saadut parametrit

| Askelvastekokeet 1 (30kW)           |  |                                       |             |                |
|-------------------------------------|--|---------------------------------------|-------------|----------------|
| Pumpun askelmuutos                  | G(T) Aikavakioarvio (63% menetelmällä) | G(T) Aikavakioarvio (Yloppu-Yalku)/4) | G(T) Viive  | G(T) vahvistus |
| 30%--> 50%                          | 23,0                                   | 20,0                                  | 20          | 0,45           |
| 50%--> 70%                          | 21,0                                   | 12,5                                  | 30          | 0,16           |
| 70% --> 90%                         | 30,0                                   | 32,5                                  | 20          | 0,08           |
| 90% --> 70%                         | 57,0                                   | 35,0                                  | 40          | 0,21           |
| 70%-->50%                           | 20,5                                   | 10,0                                  | 30          | 0,10           |
| 50%-->30%                           | 35,0                                   | 17,5                                  | 52          | 0,42           |
| Askelvastekokeet 2 (30kW)           |  |                                       |             |                |
| Pumpun askelmuutos                  | G(T) Aikavakioarvio (63% menetelmällä) | G(T) Aikavakioarvio (Yloppu-Yalku)/4) | G(T) Viive  | G(T) vahvistus |
| 30%--> 50%                          | 46,0                                   | 22,0                                  | 20          | 0,49           |
| 50% --> 70%                         | 38,0                                   | 19,5                                  | 20          | 0,11           |
| 70% --> 84%                         | 26,0                                   | 16,5                                  | 28          | 0,10           |
| 84% --> 70%                         | 38,0                                   | 28,0                                  | 16          | 0,15           |
| 70% --> 50%                         | 36,0                                   | 28,5                                  | 22          | 0,17           |
| 50% --> 30%                         | 42,0                                   | 29,0                                  | 36          | 0,51           |
| Keskiarvot =                        | 34,4                                   | 22,6                                  | 27,83333333 | 0,25           |
| Aikavakioiden KA eri menetelmillä = |  | 28,5                                  |             |                |

#### 4.1.2 Lämpötilan laskeminen virtauksen perusteella

Prosessin epälineaarisuuden vuoksi sen käyttäytymistä päätettiin tutkia toimeksiantajan ehdotuksesta ajamalla virtaussäädintä PAB01DT202 hyvin pitkällä integrointiajalla. Asetusarvoksi asetettiin maksimi 70L/min. Näin säätimen sai ajamaan virtauksen hitaasti minimistä maksimiin, jolloin päästiin tutkimaan, miten lämpötila käyttäytyy sen suhteen. Virtauksen annettiin kasvaa n. 50L/min asti. Tämän jälkeen data kopioitiin Exceliin lämpötilamittauksen PAB01CT207 ja virtaussäätimen PAB01DT202 compact-trendeistä 30min aikavälillä. Kuviossa 7 on esiteltyä molemmat trendit.



Kuvio 7 Kaavaansovitusta varten tehty koeajo

Kopioitua raakadataa tuli n. 513 riviä molemmista trendeistä. Toimeksiantajan kanssa päätimme luoda viivakaavion (virtaus x-akselille ja lämpötila y-akselille) johon teemme kaavaansovituksen, jotta saataisiin kaava lämpötilan (y) laskemiseksi virtauksen (x) perusteella. Kaavaansovituksessa luotuaan kuvaajaan lisätään trendiviiva, joka parametroidaan siten, että se mukaillee mahdollisimman hyvin taulukosta luotua kuvaajaa. Kun sopiva trendiviiva on löydetty, saadaan kaava näkyviin kuvaajaan. Aluksi kopioitua dataa täytyi käsitellä, sillä Excel oli tulkinut mm. osan mittauksista päivämääräksi. Muokatusta datasta kerättiin oleelliset tiedot ja tehtiin erillinen taulukko, jossa olivat lämpötila- ja virtausmittauksien arvot sekä mittauksien ajanhetket.

Aluksi yritimme luoda kuvaajan kaikesta saamastamme mittausdatasta ja teimme kuvaajaan kaavaansovituksen. Kaavaansovituksella saatu kaava koodattiin taulukoon omalle sarakkeelleen. Kaavaansovituksen antama kaava antoi kuitenkin liian suuren mallivirheen. Mallivirhe laskettiin vähentämällä todellisesta lämpötilamittauksesta kaavalla laskettu lämpötila. Ongelma ratkesi, kun dataa tiivistettiin. Datan tiivistämiseksi raakadatasta muokattuun taulukkoon lisättiin sarake, johon virtausmittauksien arvot pyöristettiin 0-desimaalin tarkkuudelle (10L/min jälkeen). Raakadata ja sen perusteella muokattu taulukko on esitetty alla olevassa kuviossa 8.

| RAAKADATA |              |         |         |                |         | RAAKADATAN PERUSTEELLA MUOKATTU TAULUKKO |         |              |              |
|-----------|--------------|---------|---------|----------------|---------|--|---------|--------------|--------------|
| Time      | PAB01CT207 M | quality | Time    | PAB01DT202 OUT | quality | PAB01DT202 SP                            | quality | PAB01DT202 M | PAB01DT202 M |
| 22:40,0   | 76,719       | 0       | 22:59,0 | 23             | 0       | 70                                       | 0       | kesä.12      | 6,12         |
| 22:44,0   | 76,78        | 0       | 23:03,0 | 23             | 0       | 70                                       | 0       | kesä.12      | 6,12         |
| 22:48,0   | 76,841       | 0       | 23:07,0 | 23             | 0       | 70                                       | 0       | kesä.01      | 6,01         |
| 22:52,0   | 76,902       | 0       | 23:11,0 | 23             | 0       | 70                                       | 0       | kesä.12      | 6,12         |
| 22:56,0   | 76,993       | 0       | 23:15,0 | 23             | 0       | 70                                       | 0       | kesä.12      | 6,12         |
| 23:00,0   | 77,176       | 0       | 23:19,0 | 23.joulu       | 0       | 70                                       | 0       | kesä.43      | 6,43         |
| 23:04,0   | 77,329       | 0       | 23:23,0 | 23.23          | 0       | 70                                       | 0       | kesä.53      | 6,53         |
| 23:08,0   | 77,359       | 0       | 23:27,0 | 23.295         | 0       | 70                                       | 0       | kesä.84      | 6,84         |
| 23:12,0   | 77,359       | 0       | 23:31,0 | 23.405         | 0       | 70                                       | 0       | kesä.05      | 6,05         |
| 23:16,0   | 77,359       | 0       | 23:35,0 | 23.575         | 0       | 70                                       | 0       | heinä.57     | 7,57         |
| 23:20,0   | 77,359       | 0       | 23:39,0 | 23.525         | 0       | 70                                       | 0       | heinä.46     | 7,46         |
| 23:24,0   | 77,176       | 0       | 23:43,0 | 23.585         | 0       | 70                                       | 0       | heinä.98     | 7,98         |
| 23:28,0   | 76,963       | 0       | 23:47,0 | 23.645         | 0       | 70                                       | 0       | heinä.29     | 7,29         |
| 23:32,0   | 76,749       | 0       | 23:51,0 | 23.81          | 0       | 70                                       | 0       | 7.805        | 7,81         |
| 23:36,0   | 76,505       | 0       | 23:55,0 | 23.81          | 0       | 70                                       | 0       | 8.0491       | 8,05         |
| 23:40,0   | 76,322       | 0       | 23:59,0 | 24.maalis      | 0       | 70                                       | 0       | heinä.81     | 7,81         |
| 23:44,0   | 76,361       | 0       | 24:03,0 | 24.085         | 0       | 70                                       | 0       | elo.33       | 8,33         |
| 23:48,0   | 76,2         | 0       | 24:07,0 | 24.035         | 0       | 70                                       | 0       | elo.74       | 8,74         |
| 23:52,0   | 76,2         | 0       | 24:11,0 | 24.245         | 0       | 70                                       | 0       | elo.85       | 8,85         |
| 23:56,0   | 76,2         | 0       | 24:15,0 | 24.195         | 0       | 70                                       | 0       | elo.05       | 8,05         |
| 24:00,0   | 76,2         | 0       | 24:19,0 | 24.41          | 0       | 70                                       | 0       | elo.36       | 8,36         |
| 24:04,0   | 76,383       | 0       | 24:23,0 | 24.515         | 0       | 70                                       | 0       | elo.47       | 8,47         |
| 24:08,0   | 76,535       | 0       | 24:27,0 | 24.82          | 0       | 70                                       | 0       | 9.1478       | 9,15         |
| 24:12,0   | 76,658       | 0       | 24:31,0 | 24.835         | 0       | 70                                       | 0       | syys.88      | 9,88         |
| 24:16,0   | 76,963       | 0       | 24:35,0 | 24.725         | 0       | 70                                       | 0       | 9.453        | 9,45         |
| 24:20,0   | 77,176       | 0       | 24:39,0 | 24.885         | 0       | 70                                       | 0       | 9.514        | 9,51         |
| 24:24,0   | 77,39        | 0       | 24:43,0 | 25.095         | 0       | 70                                       | 0       | syys.71      | 9,71         |
| 24:28,0   | 77,481       | 0       | 24:47,0 | 25.145         | 0       | 70                                       | 0       | syys.71      | 9,71         |
| 24:32,0   | 77,634       | 0       | 24:51,0 | 25.195         | 0       | 70                                       | 0       | syys.92      | 9,92         |
| 24:36,0   | 77,848       | 0       | 24:55,0 | 25.245         | 0       | 70                                       | 0       | 10.063       | 10,06        |
| 24:40,0   | 77,909       | 0       | 24:59,0 | 25.huhti       | 0       | 70                                       | 0       | 10.063       | 10,06        |
| 24:44,0   | 77,939       | 0       | 25:03,0 | 25.505         | 0       | 70                                       | 0       | 10.369       | 10,37        |
| 24:48,0   | 77,939       | 0       | 25:07,0 | 25.55          | 0       | 70                                       | 0       | loka.43      | 10,43        |
| 24:52,0   | 77,848       | 0       | 25:11,0 | 25.655         | 0       | 70                                       | 0       | 10.735       | 10,74        |

Kuvio 8 Trendeistä saatu raakadata ja raakadatasta muokattu taulukko

Tiivistettyyn taulukkoon syötettiin käsin virtauksen arvot 1-50 (1 L/min välein). Vie-  
reiselle sarakkeelle haettiin Excelin Phaku-funktiolla virtauksen 1L/min muutosta vas-  
taavat lämpötila-arvot. "PHaku"-funktio määrittää muodossa [haettava arvo; haku-  
alue matriisimuodossa; palautusarvon sisältävä sarakenumero; tarkka "0" tai epä-  
tarkka "1" vastine]. Phaku-funktiossa hakualueen vasemmanpuoleinen sarake tulee  
olla oletusarvoisesti nousevassa järjestyksessä. Koska virtaus lähti jatkuvaan nousuun  
vasta 10L/min jälkeen, lämpötilat haettiin 10 L/min virtauksesta alkaen ja piti tehdä  
kompromissi lämpötilan arvioimisesta virtauksilla 1-9. Muuten funktio ei toiminut. 1  
L/min vastaavaksi lämpöarvoksi laitettiin 180°C. Lämpötilat 2-9 L/min virtauksilla ar-  
vioitiin vähentämällä aina lineaarisesti 11,4°C edeltävää virtausta vastaavasta lämpö-  
tila-arvosta. Phaku-funktion haettavaksi arvoksi määriteltiin käsin syötetyt virtauksen  
arvot 1 L/min välein 10 L/min arvosta alkaen (sarake Z kuviossa 9).

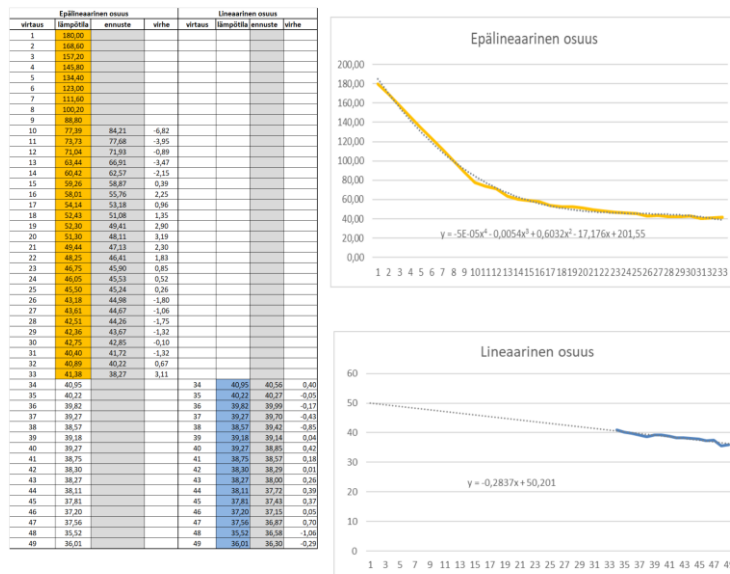
Hakualue määriteltiin taulukkomatriisina, jossa vasemmanpuoleisella sarakkeella V on pyöristetyt virtausmittausten arvot ja oikeanpuoleisella sarakkeella W lämpötilamittausten arvot. Palautusarvon sisältäväksi sarakenerumeroksi määriteltiin 2, eli hakualueen oikeanpuolimmainen sarake (lämpötilamittaus). Tätä on havainnollistettu alla olevassa kuviossa 9.

| =PHAKU(Z31;V30:W250;2;) |          |         |             |           |         |       |    |  |       |
|-------------------------|----------|---------|-------------|-----------|---------|-------|----|--|-------|
| T                       | U        | V       | W           | X         | Y       | Z     | AA |  |       |
| Aika (T)                | Aika (F) | Virtaus | pyöristetty | Lämpötila | Virtaus |       |    |  |       |
| 23:00,0                 | 22:59,0  | 6,12    |             | 77,18     | 6,12    |       |    |  |       |
| 23:04,0                 | 23:03,0  | 6,12    |             | 77,53     | 6,12    |       |    |  |       |
| 23:08,0                 | 23:07,0  | 6,01    |             | 77,36     | 6,01    |       |    |  |       |
| 23:12,0                 | 23:11,0  | 6,12    |             | 77,36     | 6,12    |       |    |  |       |
| 23:16,0                 | 23:15,0  | 6,12    |             | 77,36     | 6,12    |       |    |  |       |
| 23:20,0                 | 23:19,0  | 6,43    |             | 77,36     | 6,43    |       |    |  |       |
| 23:24,0                 | 23:23,0  | 6,53    |             | 77,18     | 6,53    |       |    |  |       |
| 23:28,0                 | 23:27,0  | 6,84    |             | 76,96     | 6,84    |       |    |  |       |
| 23:32,0                 | 23:31,0  | 6,05    |             | 76,75     | 6,05    |       |    |  |       |
| 23:36,0                 | 23:35,0  | 7,57    |             | 76,51     | 7,57    |       |    |  |       |
| 23:40,0                 | 23:39,0  | 7,46    |             | 76,32     | 7,46    |       |    |  |       |
| 23:44,0                 | 23:43,0  | 7,98    |             | 76,26     | 7,98    |       |    |  |       |
| 23:48,0                 | 23:47,0  | 7,29    |             | 76,20     | 7,29    |       |    |  |       |
| 23:52,0                 | 23:51,0  | 7,81    |             | 76,20     | 7,81    |       |    |  |       |
| 23:56,0                 | 23:55,0  | 8,05    |             | 76,20     | 8,05    |       |    |  |       |
| 24:00,0                 | 23:59,0  | 7,81    |             | 76,20     | 7,81    |       |    |  |       |
| 24:04,0                 | 24:03,0  | 8,33    |             | 76,38     | 8,33    |       |    |  |       |
| 24:08,0                 | 24:07,0  | 8,74    |             | 76,54     | 8,74    |       |    |  |       |
| 24:12,0                 | 24:11,0  | 8,85    |             | 76,66     | 8,85    |       |    |  |       |
| 24:16,0                 | 24:15,0  | 8,05    |             | 76,96     | 8,05    |       |    |  |       |
| 24:20,0                 | 24:19,0  | 8,36    |             | 77,18     | 8,36    |       |    |  |       |
| 24:24,0                 | 24:23,0  | 8,47    |             | 77,39     | 8,47    |       |    |  |       |
| 24:28,0                 | 24:27,0  | 9,15    |             | 77,48     | 9,15    |       |    |  |       |
| 24:32,0                 | 24:31,0  | 9,88    |             | 77,63     | 9,88    |       |    |  |       |
| 24:36,0                 | 24:35,0  | 9,45    |             | 77,85     | 9,45    |       |    |  |       |
| 24:40,0                 | 24:39,0  | 9,51    |             | 77,91     | 9,51    |       |    |  |       |
| 24:44,0                 | 24:43,0  | 9,71    |             | 77,94     | 9,71    |       |    |  |       |
| 24:48,0                 | 24:47,0  | 9,71    |             | 77,94     | 9,71    |       |    |  |       |
| 24:52,0                 | 24:51,0  | 9,92    |             | 77,85     | 9,92    |       |    |  |       |
| 24:56,0                 | 24:55,0  | 10      |             | 77,39     | 10,06   | 1,00  |    |  | 77,39 |
| 25:00,0                 | 24:59,0  | 10      |             | 76,96     | 10,06   | 2,00  |    |  | 73,73 |
| 25:04,0                 | 25:03,0  | 10      |             | 76,47     | 10,37   | 3,00  |    |  | 71,04 |
| 25:08,0                 | 25:07,0  | 10      |             | 76,11     | 10,43   | 4,00  |    |  | 63,44 |
| 25:12,0                 | 25:11,0  | 10      |             | 75,65     | 10,74   | 5,00  |    |  | 60,42 |
| 25:16,0                 | 25:15,0  | 10      |             | 75,13     | 10,80   | 6,00  |    |  | 59,26 |
| 25:20,0                 | 25:19,0  | 10      |             | 74,55     | 10,98   | 7,00  |    |  | 58,01 |
| 25:24,0                 | 25:23,0  | 10      |             | 74,16     | 10,98   | 8,00  |    |  | 54,14 |
| 25:28,0                 | 25:27,0  | 11      |             | 73,73     | 11,16   | 9,00  |    |  | 52,43 |
| 25:32,0                 | 25:31,0  | 11      |             | 73,27     | 11,28   | 10,00 |    |  | 52,30 |

Kuvio 9 Excelin Phaku-funktion hyödyntäminen kaavaansovituksessa

Aluksi yritimme aluksi luoda viivakuvaajan koko 1-50L/min välille, mutta emme löytäneet sopivaa trendiviivaa kaavaansovituksella, vaan saatu kaava antoi liian suuren mallivirheen. Kuvaajasta ja taulukon lämpötila-arvoista havaittiin, että lämpötila vaikuttaisi käyttäytyvän epälineaarisesti 33 L/min asti, jonka jälkeen se käyttäytyy melko lineaarisesti. Lisäsimme toisen taulukon, johon tiivistimme lineaarisen osuuden datan ja teimme taulukoista kaksi viivakuvaajaa, joista ensimmäisessä oli lämpötilan arvot 1-33 L/min virtauksilla ja toinen 34-50 L/min virtauksilla. 1-33 L/min välille tehtyyn kuvaajaan hyväksi vaihtoehdoksi osoittautui kaavaansovituksen 4. asteen polynomien trendiviiva, josta saatiin kaava  $y = -5E-05x^4 - 0,0054x^3 + 0,6032x^2 - 17,176x + 201,5$ . Linearisessa kuvaajassa hyväksi osoittautui kaavaansovituksen lineaarinen trendiviiva, josta saatiin kaava  $y = -0,2837x + 50,201$ .

Taulukkoihin tehtiin sarakkeet ennustetuille lämpötiloille, joihin kaavat koodattiin si-  
joittamalla x:n paikalle virtauksen arvot 1 L/min välein. Lisäksi mallivirheen laske-  
miseksi tehtiin oma sarakkeensa (ennustetun ja lämpötilamittauksen erotus). Kuvi-  
ossa 10 on esitettyä lopullinen versio tiivistetyistä taulukoista, taulukoiden perus-  
teella luoduista viivakuvaajista, kaavaansovituksessa käytetyistä trendiviivoista ja  
kaavaansovituksella saadut kaavat.



Kuvio 10 Kaavaansovituksessa luodut kuvaajat ja taulukot

Kuviossa 10 olevan taulukon perusteella kaavaansovituksella ennustettu lämpötila antaa suurimman mallivirheen virtauksen ollessa 10 L/min (-6.82) ja pienimmän mallivirheen virtauksen ollessa 42 L/min (0.01). Taulukon perusteella epälineaarisen osuuden (10-33 L/min) kaava antaa hieman suurempia mallivirheitä verrattuna lineaarisen osuuden (34-50 L/min) kaavaan, jonka mallivirhe on hyvin pieni.

#### 4.1.3 Arvioidut prosessimallit

Prosessimallina  $G_T$  käytin yhden aikavakion viiveellisen prosessin mallia. Vahvistuksena pidin arvoa 1, koska lämpötila oli jo etukäteen laskettu virtauksen perusteella.

Ilman kaavaansovitus oli siirtofunktion tuloksi tullut virtaus, jolloin olisi pitänyt selvittää arvio vahvistuksesta. Se ei kuitenkaan vaikuttanut hyvältä ratkaisulta, vahvistuksen suuren vaihteluvälin vuoksi. Aikavakioksi määritin keskiarvon molempien askelvastekokeiden perusteella saaduista, kahdella eri menetelmällä arvioitujen aikavakioiden keskiarvoista (ks. s. 32, taulukko 6). Viiveeksi määritin myös keskiarvon molempien askelvastekokeiden tuloksista, jotka ovat esitettyinä edellä mainitussa taulukossa. Lämpötilan prosessimallina käytin kaavan 16 siirtofunktiota.

$$G_T = \frac{1}{28s+1} * e^{-28s} \quad (16)$$

Prosessimallin  $G_F$  vahvistuksen, joka piti selvittää simulaattoria varten laskin absoluuttisen vahvistuksen kaavalla (ks. luku 3.3, kaava 1). Aikavakioksi arvioin n. 2s, jonka suurin osa prosessikokeiden tuloksista antoi arvoksi, kun laskin sen luvun 3.3 kaavan 3 mukaisesti. Käyttämällä ”63% menetelmä” (luku 3.3, kaava 2) tulos oli epärealistinen (yli 6s lukemia). Virtausmittauksen viiveen jätin huomioimatta, sillä arvot olivat keskimäärin 0.5-1s luokkaa. Kaavassa 17 on laskettu virtauksen prosessimallin vahvistus. Virtauksen prosessimalliksi määrittelin kaavan 18 mukaisen siirtofunktion.

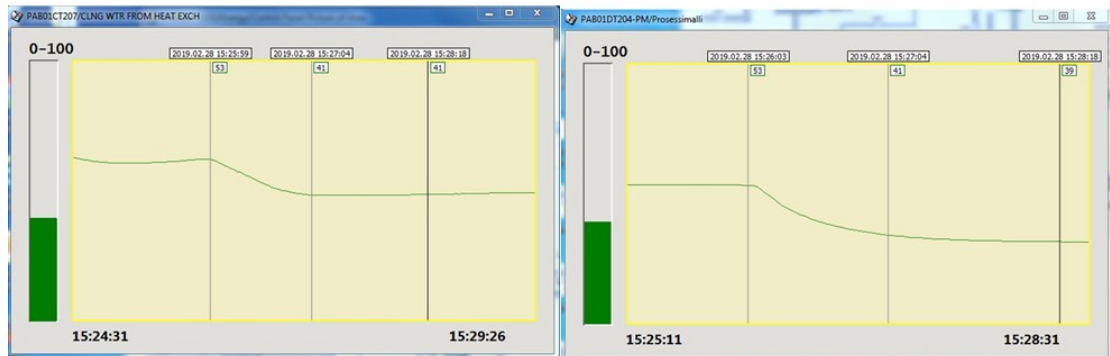
$$K_F = \frac{F_{max}}{Ref_{max}} = \frac{70}{100} = 0.7 \quad (17)$$

$$G_F = \frac{0.7}{2s+1} \quad (18)$$

## 4.2 Prosessimallin $G_T$ hyvyyden analysointi

Luomaani säädinpiiriin ”pr:PAB01DT204.F” (käsitellään luvussa 4.5.1) lisäsin am-lohkon (analoginen mittauslohko) ”PAB01DT204-PM” sekä sen valvomo-objektit, jonka tuloksi kytkin siirtofunktiota (lola) sekä viivettä (delay) simuloivien lohkojen sarjaankytkennän. Jäähdytysmoduulin valvomoon luomaani popup-ikkunan olin tässä vaiheessa jo saanut melkein valmiiksi (käsitellään luvussa 4.6). Pop-up ikkunassa oli syöttökentät prosessimallin parametreille, indikaattori mallivirheelle ja viiveellinen lämpötilamittaus PAB01CT207. Tein uudet koeajot höyrykehittimen teholla 30kW, jossa tein samanlaiset askelmuutokset, kuin aikaisemmissa prosessikokeissa. Avasin valvomosta prosessimallin mittauksen trendin ja vertasin sitä viiveellisen lämpötilamittauksen trendiin eri askelmuutoksilla kuvion 11 mukaisesti.





Kuvio 11 Viiveellisen mittauksen PAB01CT207 ja prosessimallin trendien vertailu

Trendi-ikkunoihin lisäsin hiusviivoja, joilla vertailin lämpötilamittauksien arvoja eri ajanhetkillä ja pyrin arvioimaan, kuinka hyvin prosessimallin viive ja aikavakio vastaavat todellista prosessia. Tulokset eri askelmuutoksilla ovat liitteessä 8. Trendin lisäksi seurasin valvomoon toteuttamaani indikaattoria mallivirheelle. Excelin kaavaansovituksella saadut kaavat vaikuttivat ennustivan lämpötilan melko hyvin eri askelmuutoksilla. Mallivirheet olivat suurimmillaan virtausnopeuden ollessa lähellä minimiarvoa, sillä kaavaansovituksen antama kaava antoi suurimmat mallivirheet 10-13 L/min virtauksilla, jonka huomaa kuviossa 10 esitetystä taulukosta. 50 L/min suuremmilla arvoilla ilmeni myös suurempia mallivirheitä.

Syynä tähän on luultavasti se, että kun kuvaajia luotiin kaavaansovitusta varten, virtaussäädintä ajettiin vain n. 50L/min virtausnopeuteen asti. Pumpun nopeusohjeen ollessa 84% on virtausnopeus n. 70L/min. Kaavaansovituksella saatu lämpötilan laskentakaava koodattiin siis vain max. 50 L/min virtausnopeudelle, joka selittää suuremman mallivirheen suuremmilla virtausnopeuksilla. Sopivan aikavakion ja viiveen määrittäminen prosessimalliin oli mielestäni hankalinta, sillä niissäkin oli suuri vaihteluväli askelvastekokeiden perusteella. Keskiarvo molempien askelvastekokeiden aikavakioista ja viiveistä oli mielestäni kuitenkin tarpeeksi hyvä ratkaisu lämpötilan prosessimallissa, jonka huomaa liitteen 8 trendikäyristä. Prosessimallin mittauksen trendi seuraa mielestäni lämpötilamittauksen PAB01CT207 trendiä erittäin hyvin, vaikka prosessissa esiintyviä häiriöitä ei mallinnettu prosessimalliin.

### 4.3 Simulaattorin toteutus

Prosessin mallintamisen jälkeen suunnittelin säätöpiirin Matlab-ohjelmistoa ja sen Simulink-lisäosaa hyödyntäen. Simulink-lisäosalla loin lohkokaaavioesityksen prosessissa olevan kaskadikytkennästä ja sovelsin siihen Smithin prediktorin sisemmän silmukan. Lisäksi simuloin adaptiivisen lämpötilasäätimen vahvistuskertoimen laskennan, epälineaarisen prosessin vuoksi. Matlab-ohjelman editor-työkalulla tein skriptin, jonka avulla määrittelin Simulink-mallissa käyttämiäni muuttujia.

#### 4.3.1 Simulink-mallin toteutus

##### **Ohjauksen/asetusarvon muutoksen simulointi**

Ohjauksen ja asetusarvon simuloin step-lohkolla. Sen parametreihin määrittelin alkuarvoksi muuttujan "Sp\_alku" ja loppuarvoksi muuttujan "Sp\_loppu". Asetusarvon muutoshetken määrittelin tilanteesta riippuen niin, että simuloitu prosessi tasaantuu asetusarvon alkuarvoon ennen askelmuutosta. Step-lohkon lähdön kytkin saturation-lohkoon, johon määrittelin ylä- ja alarajat tulolle ja lähdölle. Ylärajaksi asetin 100°C ja alarajaksi 22°C (veden kiehumispiste ja huoneen lämpötila). Rajoituslohkon lähdön kytkin sum-lohkoon, jolla simuloin eroarvon laskemisen lämpötilasäätimelle.

##### **Lämpötila/pääsäätimen simulointi**

Lämpötilasäätimien simuloimiseksi käytin subsystem-lohkoon itse toteutettua ideaalista PID-säädintä. Subsystem-lohkon sisälle lisäsin 4 inport-tuloporttia. Tuloportit tein eroarvolle (portti 1, "e"), vahvistuskertoimelle (portti 2, "Kp"), integrointiajalle (portti 3, "Ti") ja derivointiajalle (portti 4, "Td"). Lisäsin sum-lohkon, johon määrittelin 3 "+" tuloa, joihin kytkin eroarvon tuloportin lisäksi säätimeen toteutettujen I- ja D-termien simuloitien lähdöt. Lisäsin manual switch-kytkimet ennen I- ja D-termien simuloiteja, joiden toiseksi tuoksi laitoin eroarvon ja toiseksi tuloksi constant-lohkon vakioarvolla "0". Näin pystyin halutessani kytkeä I- ja D-termit pois käytöstä. I-termin simuloinnissa jaoin ensin eroarvon "e" integrointiajalla "Ti" divide-lohkoa hyödyntäen. Divide-lohkon lähdön kytkin integrator-lohkoon, joka suorittaa jatkuva-aikaisen eroarvon integroinnin. Näin simuloin ideaalisäätimen I-termin yhtälön ( $\frac{1}{T_i} \int e(t)dt$ ).

Suodatetun D-termin simuloin käyttämällä product-lohkoa, jolla kerroin eroarvon derivointiajalla "Td". Kytkin summauslohkon lähdön gain-lohkoon, jolla simuloin suodatuserroa (N). Suodatuserroimen lähdön kytkin integrator-lohkoon, joka simuloi suodatinta. Integrator-lohkon lähdön kytkin takaisinkytkennäksi sum-lohkon tuloon "-". D-termin lähdön kytkin saturation-lohkoon, johon määrittelin tulon ja lähdön ylä- ja alarajaksi arvot 100 ja -100. Näin sain simuloitua suodatetun D-termin yhtälön

$$(D = T_d \frac{de(t)}{dt} - T_{df} \frac{dD}{dt}).$$

Eroarvon, I-termin ja suodatetun D-termin summaavan lohkon lähdön kerroin vahvistuskertoimella "kp". Sum-lohkon lähdön kytkin toisen sum-lohkoon tuloon "-" ja tulon "+" virtauksen maksimiarvon "70" constant-vakiolla. Näin sain simuloitua käänteisen toimisuunnan säätimelle (vastaa Metso DNA:n PID-säätimen toimintoa condir-1). Käänteisen toimisuunnan lähdön rajoitin saturation-lohkolla, johon asetin lähdön ylärajaksi 70 ja alarajaksi 7 (virtauksen ylä- ja alarajat), sekä lähdön datatyyppiä reaaliluvun "double". Saturation-lohkon lähdön kytkin outport-lähtöporttiin (portti 1, out1). Näin sain simuloitua ideaalisen PID-säätimen suodatetulla derivaatalla, jossa on käänteinen toimisuunta. Tämä vastaa säätimen algoritmia  $u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + D$ .

Lisäsin I-termin resetoinnin, jolla saadaan estettyä I-termin kertyminen (vastaa toimintoa anti-windup). Toteutin resetoinnin määrittelemällä Integrator-lohkon external reset-parametrin arvoksi "rising", jolloin sain lisättyä kytkentäpisteen I-termin resetoinnille. Integroinnin resetoimiseen liittyvän logiikan toteutin kytkemällä säätimen lähdön ennen rajoituslohkoa goto-viittauslohkoon "out2" ja vastaavan from-viittauslohkon kytken kahteen compare to constant-lohkoon. Toiseen compare to constant-lohkoon määrittelin operaattoriksi "<=", vakioarvon "7" ja lähdön datatyyppiä "boolean". Toiseen määrittelin operaattoriksi ">=" ja vakioarvon "70" ja lähdön datatyyppiä "boolean". Lohkojen lähdöt kytken logical operator-lohkoon, jonka parametreista määrittelin sen OR-lohkoksi kahdella tulolla. OR-lohkon lähdön kytken integrointilohkon resetoivaan kytkentäpisteeseen. Näin integrointi pysäytetään, jos säätimen lähtö menee ylä- tai alarajalle, eikä I-osan kertymistä tapahdu.

Lopuksi lisäsin goto-viittausobjektit, johon kytkin tuloportit "e" ja "Kp", I-termin lähdön "I", sekä lähdön normaalilla ja käänteisellä toimisuunnalla. Vastaavat from-viittausobjektit kytkin mux-lohkoon, josta kytkin signaalit scope-objektiin (trendi-ikkuna), sillä halusin tarkastella eri termien vaikutuksia lähtöön ja se auttoi virheiden selvittämisessä. Lämpötilasäädin on esitettyä liitteessä 9

### **Apusäädinpiiri**

Lämpötilasäätimen lähdön kytkin sum-lohkoon, jolla simuloin apu/virtaussäätimen takaisinkytkentää. Sum-lohkon lähdön kytkin PID controller-lohkoon, jolla simuloin virtaussäädintä. Säädinlohkon parametreista määrittelin säätimen ideaaliseksi ja jatkuva-aikaiseksi PI-säätimeksi. Säätimen parametreihin määrittelin vahvistuskertoimeksi muuttujan "Kpf" ja integrointiajaksi muuttujan "1/Tif". Virtaussäätimen lähdön ylärajaksi asetin 100 ja alarajaksi 10 (pumpun nopeusohjeen maksimi 100% ja minimi 10%). Lisäksi määrittelin integroinnin pysäytysparametrin "Anti-windup method" arvoon "clamping". Näin integrointi pysäytetään, jos säätimen lähtö menee ylä- tai alarajalle. Toimintaperiaate on sama kuin itse tehdyssä säätimessä. Apusäätimen lähdön kytkin transfer fnc-lohkoon (siirtofunktio), jota käytin virtauksen prosessimallin  $G_F$  mallintamiseksi. Vahvistukseksi määrittelin muuttujan "Kf" ja aikavakioksi muuttujan "Tf". Siirtofunktion lähdön kytkin transport delay-lohkoon virtausprosessin viiveen simuloimiseksi.

Asetin viiveeksi 0s ja alkuarvoksi "Falku" muuttujan, jolloin sain määriteltyä skriptissä virtauksen alkuarvon simuloitaessa. Viivelohkon kytkin saturation-lohkoon, johon määrittelin tulo- ja lähdön minimiksi muuttujan "Falku" ja maksimiksi 70 (virtauksen maksimiarvo). Saturation-lohkon lähdön kytkin takaisinkytkentään, eli säädintä edeltävän sum-lohkon tuloon "-". Takaisinkytkennän jälkeen toteutin lämpötilan laskennan virtauksen perusteella.

### **Lämpötilan laskeminen virtauksen perusteella**

Kytkin apusäädinpiirin takaisinkytkennän compare to constant-lohkoon, johon määrittelin loogiseksi operaattoriksi ">=", vertailuarvoksi "34" ja lähdön datatyyppiä "boolean". Näin lohkon lähtö muuttuu todeksi (1) jos virtausmittaus on >34L/min. Compare to constant-lohkon lähdön kytkin Switch-lohkon keskimmäiseen tuloon 2.

Vertailulohkon tulopuolelta haarautin kytkennät virtausmittauksesta kahteen polyval-lohkoon. Polyval lohkoihin määrittelin kaavaansovituksen kaavat (lineaarinen ja epälineaarinen). Polyval lohkoon voidaan syöttää x-asteinen polynomi hakasuluissa ja pilkuilla erotettuna. Lohkossa ei käytetä potenssimerkkejä, vaan polynomin asteluku määräytyy vasemmalta oikealle laskevassa järjestyksessä. Epälineaarisen kaavan syötin lohkoon muodossa [-5e-5, -5.4e-3, +6.032e-1, -17.176, +201.55]. Lineaarisen kaavan syötin muodossa [-0.2837, +50.201].

Lineaarisen kaavan kytkin Switch-lohkon tuloon 1 ja epälineaarisen kaavan tuloon 3. Switch-objektiin määrittelin loogiseksi operaattoriksi ">=" ja kynnystasoksi "1". Tällä tavoin virtauksen ollessa alle 34L/min, switch-lohkon tulo 2 on epätosi, jolloin lähtönä on lineaarinen kaava (tulo 1). Jos tulo 2 on tosi, lähtönä on epälineaarinen kaava (tulo 3). Tällä tavoin sain simuloitua lämpötilan laskemisen virtauksen perusteella. Switch-objektin lähdön kytkin saturation-lohkoon, jonka tulon ylärajaksi asetin "100" (veden kiehumispiste). Alarajana käytin muuttujaa "Talku", jotta voin määrittellä skriptissä lämpötilan alkuarvon simuloidessa. Lähdön minimiksi ja maksimiksi asetin "22" (huoneen lämpötila) ja "100" (veden kiehumispiste). Saturation-lohkon lähdön kytkin transfer fnc-lohkoon, johon määrittelin lämpötilan siirtofunktion  $G(T)$ . Lisäksi haarautin kytkennän saturation-lohkon lähdöstä toiseen transfer fnc-lohkoon, jota käytin Smithin ennustajan prosessimallin simuloimiseksi.

Molempiin siirtofunktioihin määrittelin vahvistuksen arvoksi "1", sillä lämpötila laskettiin jo aikaisemmin virtauksen perusteella, joten vahvistusta ei tarvitse arvioida. Prosessimallin  $G_T$  aikavakioksi määrittelin muuttujan "Tt" ja Smithin ennustajan aikavakioksi muuttujan "Tt2". Kytkin molemmat siirtofunktiot transport delay-lohkoihin, että saan simuloitua lämpötilamittausten viiveet. Määrittelin prosessimallin  $G_T$  viiveeksi muuttujan "Lt" ja Smithin ennustajan viiveeksi muuttujan "Lt2". Alkuarvoiksi molemmissa viivelohkoissa määrittelin muuttujan "Talku". Molemmat viivelohkot kytkin saturation-lohkoihin lämpötilan rajoittamiseksi, samalla periaatteella kuin muutkin lämpötilan rajoituslohkot. Lisäsin manual switch-kytkimet Smithin prediktorin sisemmän silmukan lähtöihin, jotta pystyn käyttämään joko tavanomaista PID-säädöä tai Smithin ennustajaa. Kytkimien lähdöt kytkin lämpötilamittauksen takaisinkytkennän summainobjekteihin, Smithin ennustajan periaatteen mukaisesti.

Takaisinkytkennän ensimmäisen summaimen kahteen “+” tuloon kytkin lämpötilamittauksen, sekä Smithin prediktorin prosessimallin viiveen kanssa. Näin sain toteutettua mallivirheen laskennan, kun viiveellisestä mittauksesta vähennetään Smithin ennustajalla arvioitu mittausta. Smithin prediktorin siirtofunktion lähdöstä haarautin kytkennän saturation-lohkon ja manual switch-kytkimien kautta Smithin ennustajan jälkimmäisen sum-lohkon “+” tuloon. Sum-lohkon toiseen “+” tuloon kytkin viiveellisen lämpötilamittauksen. Jälkimmäisellä summaimella summataan mallivirhe ja ennuste, jolloin saadaan viiveettömänä ennustettu mittausta säätimelle ja otetaan huomioon häiriöt sekä mallivirhe. Jälkimmäisen summaimen lähdön kytkin lämpötilasäätimen eroarvoa laskevaan sum-lohkokon.

#### 4.3.2 C(T):n adaptiivinen vahvistuskerroin ja vityysparametrit

Adaptiivisen vahvistuksen toteutin kytkemällä ensin virtauksen perusteella lasketun lämpötilan goto-viittaukseen “Tcalc” ja virtausmittauksen goto-viittaukseen “F”. Kytkin vastaavat from-viittaukset divide-lohkokon, jolla jaoin ennustetun lämpötilan virtauksella. Näin sain laskettua prosessimallin  $G_T$  vahvistuksen jatkuva-aikaisesti. Lasketun vahvistuksen kytkin goto-viittaukseen “Kt” ja to workspace-lohkokon, jolla sain vahvistuksen arvot eri ajanhetkillä Matlabin työtilaan sekä vahvistuksen arvot siirrettyä vahvistuskertoimen laskentaan. Lisäsin myös scope-lohkokon, jolla pystyin tarkastelemaan vahvistuksen trendiä.

Seuraavaksi toteutin adaptiivisen vahvistuskertoimen laskennan lämpötilasäätimelle. Toteutin laskennan viiveellisen- ja viiveettömän lambda kaavoilla (kun  $T \sim L$ ) ja lisäsin manual switch-kytkimen, jolla voidaan valita kumpaa kaavaa käytetään. Laskennan toteuttamiseksi lisäämällä constant-lohkokot, joihin määrittelin prosessimallin  $G_T$  vakiot “Tt” (aikavakio), “Kt2” (vahvistus manuaalisesti skriptistä), “Lambda” (skriptissä laskettu lambda-arvo) ja “Lt” (viive). From-viittauksella “Kt” toin tiedon lasketusta vahvistuksesta vahvistuskertoimen laskentaan. Lisäsin manual switch-kytkimen, jonka toiseksi tuloksi kytkin vakion “Kt2” ja toiseksi from-viittauksella tuodun adaptiivisen vahvistuksen “Kt”. Näin sain valittua adaptiivisen ja skriptistä syötettävän vahvistuksen väliltä. Lisäsin manual switch-kytkimen, johon kytkin vakiot “Lt” ja “0”. Näin sain valittua, käytetäänkö viiveettömän vai viiveellisen lambda kaavaa.

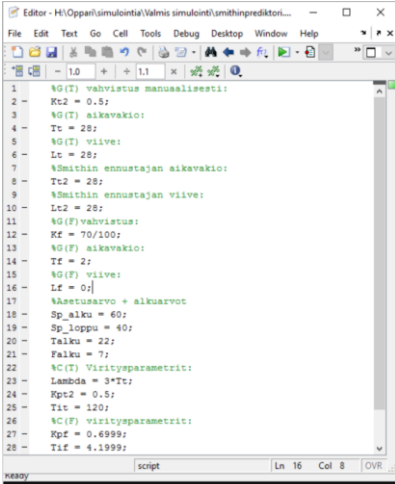
Kytkimen lähdön kytkin sum-lohkon tuloon “+” ja sum-lohkon toiseen “+” tuloon kytkin vakion “lambda”. Sum-lohkon lähdön kytkin product-lohkoon, jonka toiseksi tuloksi kytkin adaptiivisen ja skriptistä syötettävän vahvistuskertoimen valintakytkimen lähdön. Lisäsin divide-lohkon, johon kytkin vakion “Tt” ja jaoin sen product-lohkon lähdöllä. Kytkenällä voidaan siis valita kaavojen  $\frac{T}{K*(lambda+L)}$  tai  $\frac{T}{K*lambda}$  väliltä. Divide-lohkon lähdön kytkin manual switch-kytkimeen, jonka toiseen tuloon kytkin vakion “Kpt2”, jota käytin vahvistuskertoimen syöttämiseen manuaalisesti skriptin kautta. Näin sain adaptiivisuuden kytkettyä tarvittaessa päälle tai pois. Adaptiivisuuden valintakytkimen lähdön kytkin viittaukseen “kpt”, jota vastaavan from-viittauksen kytkin lämpötilasäätimen tuloon “kp”. Lisäksi vein signaalin kytkimen lähdestä scope- ja to workspace-lohkoihin, jotta voin tarkastella vahvistuskertoimen trendiä ja näen vahvistuskertoimen arvot eri ajanhetkillä Matlabin työtalasta. Integrointiajan syöttämiseksi lämpötilasäätimelle lisäsin constant-vakion “Tit”, jonka määrittelin skriptissä ja kytkin sen lämpötilasäätimen tuloon “ti”. Päädyin käyttämään itse tehtyä säädintä, sillä en keksinyt keinoa adaptiivisen vahvistuskertoimen syöttämiseksi tavanomaiseen PID controller-lohkoon.

### 4.3.3 Trendi

Säätöpiirin trendin toteutin goto-, from-, mux- ja scope-objekteilla. Asetusarvon rajoituslohkon lähdestä kytkin signaalin goto-viittaukseen “Spt”, lämpötilasäätimen lähdestä viittaukseen “CTcon”, virtaussäätimen lähdestä viittaukseen “CFcon”, virtaussäätöpiirin takaisinkytkennästä viittaukseen “F” sekä lämpötilasäätimen mittauksesta viittaukseen “T”. Mux-objektiin kytkin vastaavat from-viittaukset ja kytkin sen lähdön scope-objektiin. Näin sain säätöpiirin toiminnan kannalta oleelliset signaalit trendiin. Trendin tulkitsemisen helpottamiseksi muutin viittausobjektien taustavärit signaalien värejä vastaaviksi.

#### 4.3.4 Skripti

Matlab-ohjelman editor-työkaluun toteuttamani skriptin avulla määrittelin ja syötin muuttujat Simulink-malliin. Toteutin skriptissä lämpötilasäätimen vahvistuksen manuaalisen syöttämisen, prosessimallien parametrien määrittelyt, asetusarvon alku- ja loppuarvojen syöttämisen, virtauksen ja lämpötilan alkuarvojen syöttämisen ja säätimien viritysparametrien määrittelyt. Kuviossa 12 on esiteltyä luomani Skripti ja määrittelemäni muuttujat kommentoituna.



```

1 %G(T) vahvistus manuaalisesti:
2 - Kc2 = 0.5;
3 %G(T) aikavakio:
4 - Tc = 28;
5 %G(T) viive:
6 - Lc = 28;
7 %Smithin ennustajan aikavakio:
8 - Tc2 = 28;
9 %Smithin ennustajan viive:
10 - Lc2 = 28;
11 %G(F) vahvistus:
12 - Kf = 70/100;
13 %G(F) aikavakio:
14 - Tf = 2;
15 %G(F) viive:
16 - Lf = 0;
17 %Asetusarvo + alkuarvot
18 - Sp_alku = 60;
19 - Sp_loppu = 40;
20 - Talku = 22;
21 - Falu = 7;
22 %C(T) Viritysparametrit:
23 - Lambda = 3*Tc;
24 - Kp2 = 0.5;
25 - Tit = 120;
26 %C(F) viritysparametrit:
27 - Kpf = 0.6999;
28 - Tif = 4.1999;

```

Kuvio 12 Simulaattoriin toteutettu skripti

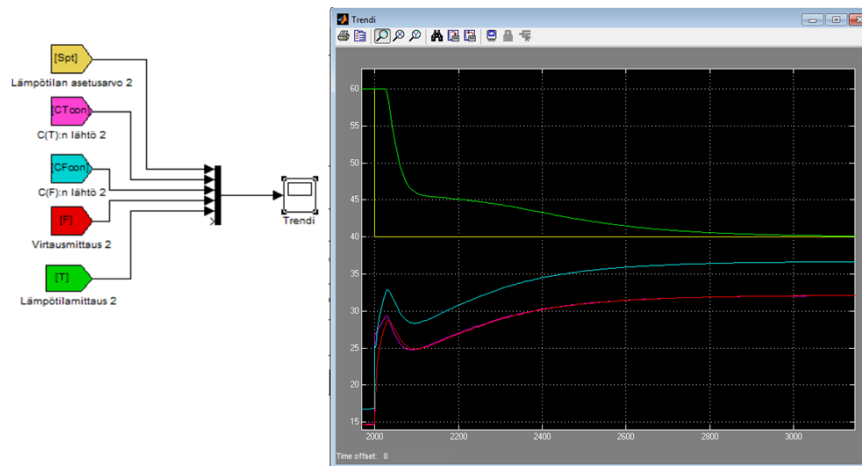
## 4.4 Simulaattorin testaus ja tulokset

### Säädinpiiriin "pr:PAB01DT201.F" simulointi

Kun simuloin säädinpiiriä "pr:PAB01D201.F", sain parhaimman säätötuloksen, kun asetin step-lohkon alkuarvoksi 60°C ja loppuarvoksi 40°C. Koitin useita eri viritysparametreja, sekä adaptiivista säätöparametrien laskentaa. Parhaimpaan tulokseen päädyin, kun en käyttänyt adaptiivista parametrien laskentaa, vaan syötin manuaalisesti skriptistä viritysparametrit  $K_p = 0.5$  ja  $T_i = 60$ . Virtaussäätimen viritysparametreiksi määrittelin skriptissä Metso DNA:n säätimen oletusarvot  $K_p = 0.69$  ja  $T_i = 4.19$ .



Asetusarvon muutoshetkeksi asetin 2000s, sillä prosessin vasteiden tasaantuminen asetusarvon alkuarvoon kesti melko kauan. Kun asetin muutoshetken myöhemmäksi, sain simulaattorilla realistisempia tuloksia. Lämpötilan prosesimallien viiveiksi "Lt" ja Lt2" asetin 28s. Kuviossa 13 on esitettyä simuloinnin tuloksena saatu säätöpiirin trendi ja trendissä esiintyvien signaalien värien merkitys.

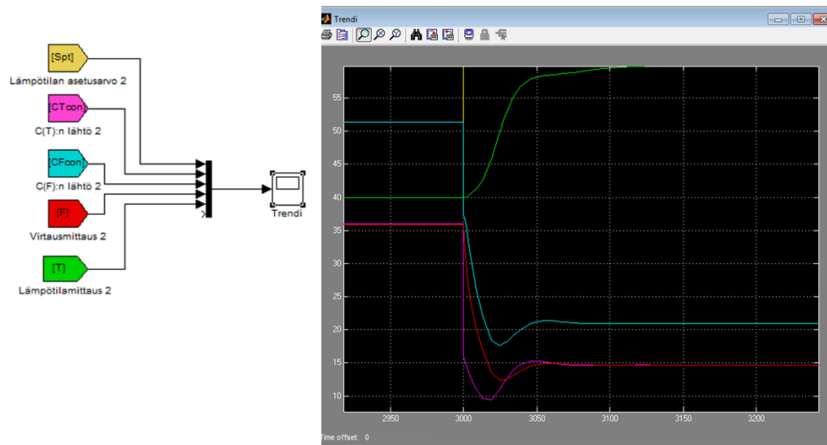


Kuvio 13 Säätöpiirin pr:PAB01DT201.F simuloinnin tuloksena saatu trendi

Trendistä totesin, että lämpötilan prosesimallin viivelohkot toimivat oikein, sillä trendiä tarkentamalla huomasin lämpötilamittauksen viiveen olevan 28s. Lämpötila- ja virtaussäätimien lähdöistä pystyi toteamaan, että vahvistuksien arvot vastasivat aseteltuja arvoja, sillä ne ovat verrannollisia eroarvon suuruuteen. I-osan vaikutus on huomattavissa, sillä säätimen lähtö korjaa eroarvoa pinta-alan verrannollisesti. Viiveen aiheuttama ilmiö tavanomaisessa PID-säädössä näkyi trendissä, sillä säädin kasvatti lähtöä ylikompensoidusti lineaarisesti ylöspäin, kunnes lämpötilan vasteessa tapahtui ensimmäinen muutos. Tämän jälkeen lämpötila- ja siten myös virtausäädin korjasivat tilannetta pudottamalla ohjausta rajusti alaspäin, jolloin vaste tasaantui hieman ja alkoi laskea rauhallisemmin. Vahvistuksen arvoa ei voinut asettaa kovin suureksi, sillä muuten vaste alkoi värähtelemään, eikä stabiloitunut. Lämpötila- ja virtaussäädin alkoivat hiljalleen kasvattamaan lähtöään eroarvon laskiessa hiljalleen asetukseen. Lämpötilasäätimen käänteinen toimitus toimi siis oikein, sillä eroarvon pienentyessä lähtö kasvoi. Lämpötilan asettumisajaksi arvioin trendin perusteella n. 18min ja 20s.

### Säädinpiirin pr:PAB01DT204.F simulointi

Säädintä PAB01DT204 simuloidessa, asetin step-lohkon alkuarvoksi 40°C ja loppuarvoksi 60°C. Koitin useita eri viritysparametreja, sekä adaptiivista säätöparametrien laskentaa. Parhaimpaan tulokseen päädyin, kun en käyttänyt adaptiivista parametrien laskentaa, vaan syötin manuaalisesti viritysparametrit  $K_p = 1$  ja  $T_i = 28$ . Virtaussäätimen viritysparametreina pidin edelleen oletusarvot  $K_p = 0.69$  ja  $T_i = 4.19$ . Asetusarvon muutoshetkeksi asetin 3000s, sillä vasteiden tasaantuminen asetusarvon alkuarvoon kesti simulaattorissa kauan, samoin kuin säädinpiiriä PAB01DT201 simuloidessa. Kuviossa 14 on esitettyä simuloinnin tuloksena saatu trendi ja signaalien värien merkitykset.



Kuvio 14 Säädinpiirin pr:PAB01DT204.F simuloinnin tuloksena saatu trendi

Trendistä huomaa, että kun lämpötilamittaus saadaan viiveettömänä Smithin prediktorin prosessimallista, lähdössä ei tapahdu ylikompensoitumista, vaan se alkaa korjaamaan säätövirhettä välittömästi eroarvoon verrannollisesti. Asettumisaika on huomattavasti pienempi ja vaste on stabiilimpi. Asettumisajaksi arvioin trendin perusteella n. 2min ja 25s. Lämpötila- ja virtaussäätimien lähdöistä pystyi toteamaan, että vahvistuksien arvot vastaavat aseteltuja arvoja, sillä ne ovat verrannollisia eroarvon suuruuteen. I-osan vaikutus on huomattavissa siitä, että säätimet lähdöt korvaavat eroarvoa sen pinta-alaan verrannollisesti.

## 4.5 Säätimien toteutus Metso DNA-järjestelmään

Säädinpiirit toteutin JAMK:n MetsoDNA-järjestelmän FbCAD-työkalulla. DNA Explorer-työkalun kautta loin uuden säätöpiiriin "pr:PAB01DT204.F", josta tein Smithin ennustajan adaptiivisilla säätöparametrien päivittämisellä. Säätöpiiriin "pr:PAB01DT201.F" (tavanomainen lämpötilan PI-säätö) lisäsin adaptiiviset säätöparametrien päivittämiset, sekä tein säädön kannalta tarvittavia muutoksia. Lisäksi tein virtauksen säätöpiiriin "pr:PAB01DT202.F" tarvittavia muutoksia.

### 4.5.1 Lämpötila/pääsäädinpiiri PAB01DT204 (Smith Predictor)

Uuteen säätöpiiriin lisäsin toisen sivun ja määrittelin pohjan koon isommaksi koosta "normal" kokoon "medium", jotta kaikki toiminnot mahtuvat varmasti piiriin. Vaihdoin paketin (PCS) arvoksi "EP01". Piirin suoritusvälin ja suoritusjärjestyksen pidin oletusarvoissa 1000ms ja 20. Sivulle 1 toteutin lämpötilan ennustamisen, smithin prediktorin rakenteen, adaptiivisen vahvituskerroimen laskennan, prosessimallin antaman mittauksen, sekä prosessimallin mittauksen valvomo-objektit.

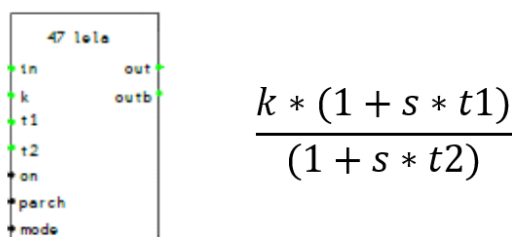
#### **Lämpötilan laskeminen virtauksen perusteella**

Aluksi toteutin vertailun, joka vertaa virtausmittausta arvoon 34 L/min. Lisäsin cmp-lohkon (2ana-1bin), jonka tuloon "a" kytkin external in continuous-tulon "pr:PAB01CF206:av" ccoa-lohkon kautta. Säädintä testatessa mittaus antoi vikabitin "48", eli mittauksessa oli epäluotettava tieto (inv) ja uudistumaton tieto (old). Ccoa-lohkoon täytyi määrittellä vikabittimaskin arvoksi "254", jotta kaikki mittauksen vikabitit maskataan. Cmp-lohkon tuloon "b" kytkin constant left-objektilla arvon "0,34.0". Cmp-lohkon parametreihin määrittelin kaavan "o=a>b;" ja kytkin sen lähdön "o" referenssipisteeseen "CMP". Ccoa- ja cmp-lohkon väliseen kytkentään lisäsin kytkentäpisteen, josta kytkin tiedon virtausmittauksesta referenssipisteelle "F". Lisäsin kaksi calc-lohkoa (2-1 ana) ja molempien kytkentäpisteisiin "a" kytkin referenssipisteet "F". Ensimmäiseen calc-lohkoon määrittelin kaavan "o=-0.00005\*a\*a\*a\*a-0.0054\*a\*a\*a+0.6032\*a\*a-17.176\*a+201.55;" (kaavansovituksen epälineaarisen osuuden kaava) ja kytkin lähdön "o" referenssipisteeseen "F1". Toiseen calc-lohkoon määrittelin kaavan "o=-0.2837\*a+50.201;" (kaavansovituksen lineaarisen osuuden kaava) ja kytkin lähdön "o" referenssipisteeseen "F2".

Lisäsin disa-lohkon (2-1 ana), jolla toteutin valinnan käytetäänkö epälineaarista vai lineaarista kaavaa. Sen kytkentäpisteeseen "in1" kytkin referenssipisteen "F1", kytkentäpisteeseen "in2" referenssipisteen "F2" ja kytkentäpisteeseen "bse" referenssipisteen "CMP". Disa-lohkon lähdön kytkin referenssipisteeseen "TMP". Eli virtausmittauksen arvon ollessa alle 34 L/min cmp-lohkon lähtö on epätosi ja disa-lohko kirjoittaa epälineaarisen osuuden kaavan referenssipisteeseen "TMP". Jos virtausmittaus ylittää arvon 34 L/min, cmp-lohkon lähdön arvo on tosi (1) ja referenssipisteeseen "TMP" kirjoitetaan lineaarisen osuuden kaava. Lähdön ja referenssipisteen "TMP" väliseen kytkentäviivaan lisäsin dot-kytkentäpisteen, josta kytkin signaalin ulkoisen rajapintaportin lähtöön "out8", jotta voin laskea vahvistuksen säädinpiirissä "pr:PAB01DT201.F"

### Smithin ennustajan siirtofunktion ja viiveen toteutus

Prosessimallin siirtofunktion toteuttamiseksi säätöpiirissä käytin lela-toimilohkoa (lead lag). Lohkossa on tulopuolella analogiset kytkentäpisteet prosessimallin siirtofunktion tulolle (in), vahvistukselle (k), siirtofunktion osoittajan aikavakiolle (t1) ja siirtofunktion nimittäjän aikavakiolle (t2). Binääritulolla "on" voidaan kytkeä siirtofunktion lähdön laskenta päälle binääriarvolla 1 ja pois arvolla 0. Binäärituloa "parch" pitää käyttää arvossa 1, että parametrit "k", "t1" tai "t2" aktivoituvat toimilohkossa niitä muutettaessa. Binääritulolla "mode" voidaan määritellä asetuksien "increment mode" (0) ja "direct mode" (1) väliltä. Lähtöpuolella on kytkentäpisteet "out" (siirtofunktion lähtö) ja "outb" (lähdön takaisinkytkentä). Kuviossa 15 on esitettyinä lela lohko ja sen siirtofunktio.



Kuvio 15 Lela-lohko ja sen siirtofunktio

Lela-lohkon kytkentäpisteeseen "on" kytkin binäärisen vakioarvon 1, että sain lähdön "out" laskennan kytkettyä päälle. Kytkentäpisteeseen "mode" kytkin binäärisen vakioarvon 1, eli valitsin direct mode-asetuksen. Direct mode-tilassa initialisointikierroksella tulo "in" luetaan ja kerrotaan vahvistuksella "k", jonka jälkeen se kirjoitetaan lähtöön "out". Seuraavilla suorituskiirroksilla lähtö "out" lasketaan suoraan tulon "in" ja lohkon määritellyn siirtofunktion perusteella. Lähdön takaisinkytkentää "outb" ei oteta huomioon. Päädyin käyttämään direct-modea, sillä se vaikutti järkevämmältä tavalta toteuttaa lämpötilan siirtofunktio tässä säätöpiirissä ja pystyin hyödyntämään tuloa "in" (increment-modessa luetaan kytkentäpistettä "conb").

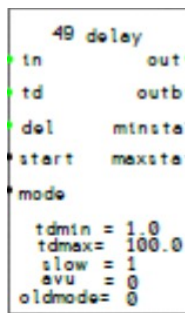
Tuloon "in" kytkin referenssipisteen "TMP" eli viittauksen lasketusta lämpötilasta. Vahvistuksen arvoksi määrittelin constant left-lohkolla 1, sillä siirtofunktion tulo pitää kertoa yhdellä, koska lämpötila on laskettu jo etukäteen virtauksen perusteella. Jos kaavaansovitus ei olisi tehty, lohkon kytkentäpisteeseen "in" olisi tullut virtausmitaus ja kytkentäpisteeseen "k" arvio prosessin vahvistuksesta, joiden perusteella lämpötilan arvo skaalattaisiin virtauksen perusteella. Kytkentäpisteeseen "t1" kytkin constant left-lohkolla arvon 0, sillä yhden aikavakion viiveellisessä prosessimallissa ei ole aikavakiota osoittajassa. Nimittäjän aikavakion kytkemisen toteutin siten, että se syötetään valvomosta ja samalla aktivoidaan lela-lohkossa. Lisäsin analogisen ulkoisen rajapintaportin tulon "in2", jolla valvomosta syötettävä aikavakio saadaan kirjoitettua piiriin. Portin alkuarvoksi määrittelin 28s, eli laskemani aikavakion keskiarvon askelvastekokeiden perusteella.

Portin "in2" kytkin small koon ccoa-lohkon kautta medium koon ccoa-lohkon tuloon "in". Kopiointilohkojen väliin laitoin kytkentäpisteen, mistä kytkin signaalin referenssipisteeseen "T". Kytkin vastaavan referenssipisteen lela-lohkon kytkentäpisteeseen "t2". Näin sain syötettyä aikavakion valvomosta lela-lohkolle. Käytin referenssipistettä "T" myös arvon kirjoittamiseksi valvomon indikaattoriin, kytkemällä sen ulkoisen rajapintaportin lähtöön "out6". Käytin medium koon ccoa-lohkoa aikavakion arvon aktivoimiseksi. Määrittelin parametrin "mode" arvoksi 5, jolloin kopiointiehto täyttyy, kun tulon arvo muuttuu parametriin "mincha" määritellyn arvon verran. Parametrin "mincha"-arvoksi asetin "0.0.1" (0.1s). Lähdön "ccout" (binäärinen lähtö, jonka arvo muuttuu todeksi kopiointiehdon täytyessä) kytkin tuloksi OR-lohkoon.

OR-lohkon lähdön kytkin referenssipisteeseen "PAR" ja vastaavan referenssipisteen kytkin lela-lohkon kytkentäpisteeseen "parch". Edellä mainitut toiminnot tein siksi, että ei tarvita esimerkiksi erillistä painonappia parametrien aktivoimiseksi, vaan ne aktivoituvat automaattisesti niitä muutettaessa.

Viiveen simuloimiseksi käytin delay-lohkoa. Delay-lohkon konfigurointiparametreihin määrittelin viiveen minimiksi (tdmin) 1s. Viivelohkon maksimiksi (tdmax) määrittelin 100s. Parametrin "slow" (ohjelman suorituskertojen väli milloin lähtöön kirjoitetaan) jätin oletusarvoon "1", jolloin tulo kirjoitetaan jokaisella ohjelman suorituskerralla. Parametrin "avu" jätin oletusarvoon "0", sillä sitä käytetään vain parametrin "slow" yhteydessä keskiarvojen laskentaan, jos sen arvo on 1. Kytkentäpisteeseen "in" kytkin lela-lohkon lähdön. Viiveen arvon syöttämisen valvomosta kytkentäpisteeseen "td" toteutin samaan tapaan kuin aikavakion syöttämisen lela-lohkoon. Lisäsin siis rajapintaportin tulon "in3", jonka alkuarvoksi määrittelin "0,28.0@" (28s). Kytkin sen small koon ccoa-lohkon kautta medium koon ccoa-lohkoon (parametrin mode arvoksi laitoin 1 ja mincha arvoksi "0,0.0" eli 0.1s), jonka lähdön "ccout" kytkin OR-lohkon toiseksi tuloksi. Delay-lohkon viivettä muutettaessa, täytyi myös lela-lohkon parch-jäsentä käyttää arvossa 1, sillä ne ovat kytkettynä sarjaan. Ccoa-lohkojen väliin laitoin kytkentäpisteen, josta kytkin signaalin referenssipisteelle "L" ja vastaavan referenssipisteen kytkin viivelohkon tuloon "td". Delay-lohkon tuloon "del" kytkin paikallisen tietopisteen "P1", johon määrittelin puskurivarauksen (dimension of data), joka on on viiveen maksimi + 1 (eli 101). Tuloon "mode" kytkin constant left-objektilla vakioarvon "1", eli laitoin delay-lohkon toimimaan direct-operation tilassa.

Direct-operation tilassa tulon "start" ollessa tosi säädön initialisointikierroksella ja normaalikierroksella, tulo "in" kopioidaan lähtöön "out" ja puskurit täyttyy tulon arvoista. Tulon arvon vaihtuessa, lähdön arvo pysyy samana kuin puskurissa, kunnes tuloon "td" määritellyn ajan päästä muuttuneet arvot kirjoitetaan puskurista lähtöön. Tuloon "start" kytkin binäärisen vakioarvon 1. Näin viivelohkon puskurille annetaan alkuarvo initialisointikierroksella, jonka jälkeen lohko automaattisesti resetoi tulon "start" nolaksi. Parametrin "oldmode" arvon jätin oletusarvoon 0, sillä sitä käytetään lohkon saamiseksi yhteensopivaksi vanhemman version "Damatic XD v2" kanssa. Kuviossa 16 on kuva viiveen simuloimiseksi käytetystä delay-lohkokosta.



Kuvio 16 Delay-lohko

### Mallivirheen laskeminen

Mallivirheen laskennan toteutin calc-lohkolla (ana 2-1), jonka tuloon "b" kytkin delay-lohkon lähdön. Lisäsin ulkoisen jatkuvan tulon "pr:PAB01CT207:av" (viiveellinen lämpötilamittaus), jonka kytkin ccoa-lohkon kautta tuloon "a". Calc-lohkoon määrittelin kaavan "o=b-a;". Ccoa-lohkon vikabittimaskin arvoksi laitoin 254 (kaikkien vikabittien maskaus). Lohko vastaa Smithin prediktorin takaisinkytkennän ensimmäistä summainlohkoa (arvioidun lämpötilan ja todellisen lämpötilan erotus). Calc-lohkon lähdöstä haarautin dot-kytkentäpisteen kautta signaalin ulkoiseen rajapintaportin tuloon "out2", jonka avulla sain luettua mallivirheen valvomoon toteutettuun indikaattoriin.

### Ennustetun lämpötilan ja mallivirheen summaus

Asetin kytkentäpisteen lela- ja delay-lohkojen sarjaankytkennän välille, josta vein signaalin toisen calc-lohkoon tuloon "a". Lisäksi haarautin kytkentäpisteellä saman signaalin ulkoiseen rajapintaportin lähtöön "out1", jonka avulla sain kirjoitettua ennustetun lämpötilan valvomoon toteutettuun indikaattoriin. Calc-lohkon tuloon "b" kytkin mallivirheen laskennan lähdön ja määrittelin lohkon kaavan "o=a+b;", jolloin lohko summaa lela-lohkon lähdön (laskettu lämpötila viiveettömänä) ja mallivirheen. Lohko vastaa siis Smithin prediktorin jälkimmäistä summainobjektia. Calc-lohkon lähdön kytkin ccoa-lohkon kautta referenssipisteeseen "smt". Referenssipistettä "smt" käytin mittauksen viemiseksi säätimelle PAB01DT204.

### Prosessimallin trendi

Lisäsin sivulle 1 am-lohkon, jotta voin seurata prosessimallin mittausta trendistä ja analysoida tarkemmin mallin hyvyttä. Haarautin delay-lohkon lähdöstä dot-kytkentäpisteellä signaalin am-lohkon kytkentäpisteeseen "av". Lisäsin mittauslohkolle valvomomoduulit (am-tyyppiset positio-, operointi- ja hälytysmoduulit) Vaihdoin mittauksen nimessä ja valvomomoduuleissa esiintyvät "TAG\_CODE" oletusarvot arvoon "PAB01DT204-PM". Positiomoduulista määrittelin valvomotunnukseksi "E1", parametriin "name text 3" määrittelin nimen "Prosessimalli", mittauksen nimimi- ja maksimialueeksi jätin oletukset "0" ja "100" ja yksiköksi määritin "°C". Operointimoduuliin määrittelin valvomotunnukseksi "E1". Hälytysmoduulista vaihdoin valvomotunnukseksi "E1", hälytysalueeksi "4" ja ilmoitusalueeksi "4". Muut parametrit jätin oletusarvoihin. Analogisen mittausmoduulin valvomomoduulien konfiguroinnit ovat esitettyinä liitteessä 16.

### Adaptiivisen vahvistuskertoimen laskeminen

Laskin ensin absoluuttisen vahvistuksen calc-lohkolla, jonka tuloon "a" kytkin referenssipisteen "TMP" ja tuloon "b" referenssipisteen "F", sekä määrittelin lohkon kaavaksi "o=a/b;", eli kaavan  $K_T = \frac{T}{F}$ . Disa-lohkoa hyödyntämällä toteutin valinnan adaptiivisen tai manuaalisesti syötetyn vahvistuksen väliltä. Disa-lohkon tuloon "in1" kytkin vahvistuksen laskennan lähdön. Tuloon "in2" kytkin ccoa-lohkon kautta ulkoisen rajapintaportin tulon "in1", johon vahvistuksen arvo voidaan kirjoittaa valvomosta ja asetin sen alkuarvoksi arvon 1.

Disa-lohkon tuloon "Bse" kytkin ccob-lohkon kautta ulkoisen rajapintaportin tulon "in4", johon kirjoitin vahvistuksen laskennan on/off-napin tilatiedon valvomosta. Disa-lohkon lähdön kytkin lim-rajoituslohkon tuloon "in". Asetin lim-lohkon ylärajaksi 10 ja alarajaksi 0 constant left-objekteilla. Näin varmistin, että vahvistus ei kasva liian suureksi ja aiheuta mahdollisia ongelmia säätöpiirissä. Lim-lohkon lähdön kytkin ccoa-lohkon kautta referenssipisteeseen "K". Lisäsin myös dot-kytkentäpisteen ccoa-lohkon ja referenssipisteen väliin, josta vedin kytkentäviivan ulkoisen rajapintaportin lähtöön "out5", jota käytin vahvistuksen arvon kirjoittamiseksi valvomoon toteutettuun indikaattoriin.



Vahvistuskertoimen  $K_p$  adaptiivisuudessa hyödynsin lambda-viritysmenetelmän viiveettömän lambda-kaavaa, kun  $T \sim L$ . Ensin laskin lambda-arvon calc-lohkolla (ana 2-1), jonka tuloon "a" kytkin ulkoisen rajapintaportin tulon "in5", johon voidaan kirjoittaa lambda-kerroin (0.5...5) valvomosta. Tuloon "b" kytkin referenssipisteen "T". Calc-lohkoon määrittelin kaavan "o=a\*b;", eli calc-lohkon lähtö vastaa kaavaa  $\lambda = 0.5 \dots 5 * T$ . Calc-lohkon lähdön kytkin toisen calc lohkon (ana 3-2) tuloon "c" ja kytkin laskentalohkojen väliin dot-kytkentäpisteen, jonka kytkin ulkoiseen rajapintaportin lähtöön "out4". Rajapintaportin lähtöä käytin lambda-arvon kirjoittamiseksi valvomon toteutettuun indikaattoriin. Tuloon "a" kytkin referenssipisteen "T" ja tuloon "b" referenssipisteen "K". Määrittelin lohkon kaavan "o=a/(b\*c);", jolloin lohkon lähtö vastaa kaavaa  $K_p = \frac{T}{(K*\lambda)}$ .

Vahvistuskertoimen laskentalohkon lähdön kytkin coa-lohkon kautta lim-rajoituslohkon tuloon "in". Määrittelin lim-lohkon ylärajaksi 6 ja alarajaksi 0. Tällä varmistin, että vahvistuskerroin ei pääse kasvamaan liian suureksi ja aiheuta ongelmia säätöpiirissä, mikäli laskennassa ilmenee ongelmia. Lim-lohkon lähdön "out" kytkin referenssipisteeseen "Kpl". Integrointiajan adaptiivisuudessa ei ollut tarvetta käyttää laskentalohkoja, sillä viiveettömän lambda-kaavan mukaan, jos  $T \sim L$  (aikavakion arvio n. 28s ja viiveen arvio n. 28s) niin  $T_i = T$  (ks. luku 3.8, taulukko 4).

Säätöpiiriin sivulle 2 lisäsin PID-säätimen, sen valvomo- ja historiamoduulit, sekä muita säädön kannalta tarpeellisia toimintoja.

### **PID-säätimen konfigurointi**

Säätimen konfiguroinnin asetin vastaavaksi säätimen PAB01DT201 kanssa. Säätimeen tein alla olevan luettelon mukaiset konfiguroinnit.

- attfm: 0 (säädin käsiajolle pakkoohjauksella)
- Mittauksen maksimiarvoksi asetin 100 ja yksiköksi °C.
- Lähdön maksimiarvon asetin arvoon 70 ja yksiköksi L/min.
- sp2u: 1 (remote-asetusarvo käyttöön säätimessä)
- track1: 0 (mittausta ei kopioida asetusarvoon "sp1" säätimen ollessa käsiajolla tai jos säätimen asetusarvo vaihdetaan local-tilaan)
- cha1: 0 (sp1-asetusarvon muutoksien aiheuttamia hyppyjä ei poisteta integraattorilla).

## Säätimen valvomoduulien konfigurointi

Positiomoduliin muutetut parametrit, kuvaukset ja arvot ovat esitettynä alla olevassa luettelossa.

- control foom identifier (valvomotunnuksen määrittely): E1
- description (piiri-ikkunassa näkyvän nimen teksti): HEAT PWR HADAC002
- operability of tag (säätimen operoitavuus): 1
- setpoint 1 operability (local-asetusarvon käyttö): 1
- operability of kp-param ja operability of ti param (parametrien  $K_p$  ja  $T_i$  operointiluvut): 1
- measurement maxim- ja measurement minim value (mittauksen maksimi- ja minimiarvo): max. 100 ja min. 0
- unit of meas val (mittauksen yksikkö): °C
- max- ja min value of contr scale (ohjauksen maksimi- ja minimiarvo: max 100 ja min. 0
- unit of control (ohjauksen yksikkö): L/min
- wd (watchdog, eli hälytys säätöhäiriöistä): 1
- operating area (operointialue): 1

Operointimoduulista asetin valvomohuoneen tunnukseksi "E1" ja muut arvot jätin oletusarvoihin. Hälytysmoduliin muutetut parametrit, kuvaukset ja niiden arvot ovat esitettynä alla olevassa luettelossa.

- position (valvomotunnus): E1
- alarm area (hälytysalue): 4
- message area (viestialue): 4
- mehh, meh, mel, mell (mittauksen rajahälytykset): 0
- wd (watchdog, eli hälytys säätöhäiriöistä): 1

## Säätimen historiamoduulien konfigurointi

Lisäsin säätöpiiriin säädinpiirin PAB01DT201 mukaisesti analogiset historiamoduulit "history2" säätimen eroarvolle "e", lähdölle "con", asetuservolle automaattilla "spa" ja mittaukselle "me". Lisäksi säätimen käsi- tai ja automaattiajon tilatiedosta "ma" lisäsin binäärisen historiamoduulin. Alla olevassa listassa on kuvattu parametrit ja niiden merkitykset, jotka määrittelin historiamoduuleihin (pois lukien oletuksena pidetyt parametrit).

- long tag name (tunnisteet historiamuuttujien nimille tietokannassa), name (pitkät historiamuuttujien nimet ja collection variable (MetsoDNA:n ajoympäristöstä haettavien tietojen tunnukset).
- prefix (positiotunnusten etuliitteet)
- database loading (valinta, siirretäänkö tiedot tietokantaan, kun käytetään "download"-latausta).

- description (historiamoduulien tarkoitus ja käyttö).
- process area (prosessialueet)
- collection group (keruuryhmien nimet)
- unit (muuttujien yksiköt)
- minimum ja max (muuttujien minimi- ja maksimiarvot)
- higher high-, high-, low- ja lower low limit (muuttujien ylemmät ylä-, ylä-, ala- ja alemmat rajarajat).
- repository (historialevykantojen nimet, joihin tieto tallennetaan)
- archiving (valinta, tallennetaanko tieto tietokantaan).
- signifance (minimiarvo muuttujan arvon muutokselle, jolloin se tallennetaan tietokantaan).
- time limit <s> (aika sekunteina, jonka kuluttua arvo tallennetaan tietokantaan, vaikka se ei olisi muuttunut).

Liitteessä 13 on kuvankaappaus säätimelle PAB01DT204 tehtystä konfiguroinnista, liitteessä 14 on kuvankaappaukset valvomoduulien konfiguroinneista ja liitteessä 15 on kuvankaappaukset historiamoduulien konfiguroinneista.

### **Adaptiivisten tai manuaalisesti syötettävien viritysparametrien valinta**

Lisäsin sivulle 2 disa-lohkon, jolla voidaan valita, käytetäänkö adaptiivista vahvistuskerrointa vai syötetäänkö arvo valvomosta manuaalisesti. Disa-lohkon tuloon "in1" kytkin referenssipisteen "Kp1" ja tuloon "in2" kytkin ulkoisen rajapintaportin tulon "in9", johon voidaan syöttää  $K_p$ :n arvo manuaalisesti valvomosta. Rajapintaportin alkuarvoksi määritin arvon 1. Disa-lohkon tuloon "bse" kytkin ulkoisen rajapintaportin tulon "in6" ( $K_p$ :n laskennan valintapainikkeen tilatieto valvomosta). Rajapintaportin tulon alkuarvoksi asetin arvon 0.

Disa-lohkon lähdön kytkin ccoa-lohkon kautta referenssipisteeseen "Kp" ja vastaavan referenssipisteen kytkin säätimen tuloon "kp" (vahvistuskerroin). Integrointiajan adaptiivisuuden valitsemiseksi lisäsin disa-lohkon, jonka tuloksi "in1" kytkin referenssipisteen "T" ja tuloksi "in2" ulkoisen rajapintaportin tulon "in10" ( $T_i$  manuaalisesti valvomosta). Rajapintaportin alkuarvoksi asetin 28s eli aikavakioiden keskiarvon. Disa-lohkon tuloon "bse" kytkin ulkoisen rajapintaportin tulon "in7" ( $T_i$ :n laskennan valintapainike valvomossa). Disa-lohkon lähdön kytkin ccoa-lohkon kautta referenssipisteeseen "Ti" ja vastaavan pisteen kytkin säätimen tuloon "ti" (integrointiaika). Molempien viritysparametrien kohdalla haarautin samasta signaalista, josta tieto menee referenssipisteille "Kp" ja "Ti" tiedon referenssipisteille "D1" ja "D2".

Kuten lela-lohkoissa, myös PID-säätimessä parch-kytkentäpistettä pitää käyttää toena (1), että muuttuneet säätöparametrit aktivoituvat säätimessä. Referenssipisteet "D1" ja "D2" kytkin medium koon ccoa-lohkojen tuloihin "in1", määrittelin lohkoihin parametrien "mode" arvoiksi 5, "mincha" arvoiksi 0.001 ja kytkin lohkojen ccout-lähdöt OR-lohkon tuloiksi. OR-lohkon lähdön kytkin PID-säätimen parch-kytkentäpisteeseen. Eli jos viritysparametrit muuttuvat arvon 0.001 verran, parch-jäsen käy arvossa 1 ja parametrit aktivoidaan.

### **Säätimen PAB01DT204 lähdön pakko-ohjauksen toteuttaminen**

Toteutin pakko-ohjauksen, joka estää säätimien samanaikaisen käytön. Lisäsin ulkoisen jatkuvan tulon "pr:PAB01DT202.F:in1" (virtaussäädinpiirin ulkoinen rajapintaportin tulo, johon kytkin valvomoon toteutetun säätimen valintanapin) ja kytkin sen ccob-lohkon kautta säätimen PAB02DT204 tuloon "fc" (pakko-ohjaus). Ulkoisen jatkuvan tulon "pr:PAB01DT201:con" kytkin tuloon "fcin" (lähtö pakko-ohjauksella).

### **Muut säätimen lähdön kytkennät**

Lisäsin säätimen lähtöpuolelle disa-lohkon, jonka tuloon "in1" kytkin referenssipisteen "F" (viittaus virtausmittaukselta PAB01CF206) ja tuloon "in2" säätimen lähdön "con" ccoa-lohkon kautta. Ccoa-lohkon lähdöstä haarautin signaalin dot-kytkentäpisteellä ulkoiseen rajapintaportin lähtöön "out3", sillä säätimen lähtö on kytkettävä johonkin, jotta FbCAD:n "check"-toiminto menee läpi. Säätimen ma-kytkentäpisteen kytkin referenssipisteeseen "A" ja vastaavan referenssipisteen kytkin Disa-lohkon bse-tuloon. Disa-lohkon lähdön kytkin lähdön takaisinkytkentään "conb" ja haarautin dot-kytkentäpisteestä saman tiedon pos-tuloo, sillä conb- ja pos-kytkentäpisteisiin suositellaan kytkettäväksi sama tieto Metson Fbcad-manuaalin mukaisesti. Näin säätimen ollessa käsiajolla, säätimen lähdön takaisinkytkentä seuraa virtausmittausta ja automaattilla säätimen lähtöä.

### **Valvomoviittauksien lisääminen**

Lopuksi lisäsin säädinpiirissä olevien ulkoisten rajapintaporttien tuloihin ja lähtöihin, sekä PID-säätimeen viittaukset, joista nähdään valvomon tunnus, joihin kytkentäpisteet ovat linkitetty. Tämän tein FbCAD:n "get references"-toiminnolla. Liitteessä 12 on esitettyinä säätöpiiriin "pr:PAB01DT204.F" tehty ohjelmakoodi kommentoituna.

#### 4.5.2 Virtaussäädinpiiri pr:PAB02DT202.F

Virtaussäädinpiiri oli toteutettu valmiiksi ja tein siihen vain muokkauksia. Virtausmittauksena on mittaus PAB01CF206. Asetusarvo annetaan "local"-tilassa valvomosta operaattorin toimesta säätimen kytkentäpisteeseen "sp1" ja "remote"-tilassa lämpötilasäätimiltä säätimen kytkentäpisteeseen "sp2". Säätimen lähtö on kytketty MetsoDNA:n skaalattuun Profibus-ulostuloon, joka muuttaa analogisen signaalin 16 bit-tikseksi (sanaksi), sillä pumpppua ohjaavaan taajuusmuuttajaan syötetään nopeusohje kyseisellä datatyypillä. Lisäsin säätöpiiriin asetusarvon valintatoiminnon sekä toiminnon, joka kytkee säätimen remote-tilaan jos toinen lämpötilasäätimistä kytketään automaatile.

##### **Asetusarvon valinta**

Tein säädinpiiriin asetusarvon valinnan hyödyntämällä disa-lohkoa. Lisäsin ulkoisen jatkuvan tulon "pr:PAB01DT201:con" (lämpötilasäätimen PAB01DT201 lähtö), jonka kytkin disa-lohkon tuloon "in1". Tuloon "in2" kytkin ulkoisen jatkuvan tulon "pr:PAB01DT201:con" (lämpötilasäätimen PAB01DT204 lähtö). Bse-tuloon kytkin rajapintaportin tulon "in1", johon kirjoitetaan tilatieto valvomon säätimen valintapainikkeesta. Kun painikkeen tila on tosi (1), valitaan säätimen PAB01DT204 antama asetusarvo ja kun se on epätosi niin säätimen PAB01DT201 asetusarvo. Disa-lohkon lähdön kytkin säätimen kytkentäpisteeseen "sp2", eli remote-tilan asetusarvoksi.

##### **Remote tilaan vaihto**

Tein säädinpiiriin myös toiminnon, joka vaihtaa virtaussäätimen automaatile jos toinen lämpötilasäätimistä laitetaan automaatile. Tämän toteutin tuomalla ulkoiset jatkuvat viittaukset "pr:PAB01DT201:ma" ja "pr:PAB01DT204:ma" OR-toimilohkon tuloksi, jonka lähdön kytkin pls-lohkon cntrl-tuloon. Pls-lohkoon määrittelin parametrin "mode" arvoksi "pulse" ja parametrin "uds" arvoksi "UP". Pls-lohkon kytkentäpisteeseen "pl" asetin constant left-objektilla vakioarvon 3. Lohkon pbout-lähdön kytkin medium koon ccos-lohkon tuloon "cnd", määrittelin ccos-lohkon parametrin "mode" arvoksi "1" (kopiointi kun cnd-tulossa havaitaan nouseva reuna, eli binääriarvo 1) ja tuloon "in" kytkin constant left-objektilla vakioarvon 2. Ccos-lohkon lähdön "out" kytkin ehdolliseen ulkoiseen lähtöön "pr:PAB01DT202:isp".

Eli kumman tahansa säätimen ollessa automaattilla, annetaan 3s pulssi ccos-lohkolle, joka kirjoittaa kokonaisluvun 2 virtaussäätimen isp-tuloon (kun isp = 2, säädin asetetaan remote-tilaan ja säädin valitsee asetusarvon "sp2").

#### 4.5.3 Lämpötilasäädinpiiri pr:PAB01DT201.F

Säädinpiirissä oli valmiiksi toteutettuna PID-lohko sekä sen valvomo-objektit ja historiamoduulit konfiguroituna. Alkuperäisen säätimeen oli toteutettu seuraavassa luettelossa olevat kytkennät.

- Kytkentäpisteeseen "me" (mittaus) oli kytketty lämpötilamittaus HAD01CT205 ulkoisella jatkuvalla tulolla (pr:HAD01CT205:av).
- Kytkentäpisteisiin "kp" ja "ti" oli kytketty alkuperäiset viritysparametrit constant left-objekteilla. (kp = "1.35" ja ti = 60).
- Kytkentäpisteeseen "sp1" (local-tilan asetusarvo) oli kytketty asetusarvoksi constant left-objektilla vakioarvo 60.
- Kytkentäpisteisiin "colmi" (lähdön minimi) ja "colma" (lähdön maksimi) oli kytketty constant left-objekteilla minimiksi 10 L/min ja maksimiksi 70 L/min
- Säätimen lähtöpuolelle oli tehty valmiiksi kytkennät, joilla säätimen lähdön takaisinkytkentä laitetaan seuraamaan virtausmittausta sen ollessa käsiajolla (samalla periaatteella, kuin luvun 4.4.1 kohdassa "säätimen lähdön kytkennät").

#### Säätimeen tehdyt muokkaukset

Vaihdoin säätimen mittaukseksi viiveellisen lämpötilamittauksen kytkemällä ulkoisen jatkuvan tulon "pr:PAB01CT207:av" säätimen kytkentäpisteeseen "ma". Tämän jälkeen aloitin toteuttamaan adaptiivista viritysparametrien päivittämistä. Säädinpiirissä oli valmiina ulkoinen jatkuva tulo "pr:PAB01CF206:av" (virtausmittaus), joka oli kytketty ccoa-lohkon kautta disa-lohkoon (aiemmin mainittua toimintoa varten, jolla säätimen lähtö laitettiin seuraamaan virtausmittausta käsiajolla). Lisäsin kytkentäpisteen ccoa-lohkon ja disa-lohkon kytkennän väliin, josta kytkin virtausmittauksen referenssipisteelle "F". Lisäsin ulkoisen jatkuvan tulon "pr:PAB01DT204.F:out8" (virtausmittauksen perusteella laskettu lämpötila säädinpiirissä "pr:PAB01DT204.F"), jonka kytkin ccoa-lohkon kautta referenssipisteeseen "TMP". Lisäsin calc-lohkon (2-1 ana), jonka tuloon "a" kytkin referenssipisteen "TMP" ja tuloon "b" referenssipisteen "F". Calc-lohkoon määrittelin kaavan "o=a/b;", eli laskin absoluuttisen vahvistuksen ( $K_T = \frac{T}{F}$ ). Calc-lohkon lähdön kytkin lim-lohkoon, johon määrittelin ylärajaksi 10 ja alarajaksi 0, estääkseni vahvistuksen arvon kasvamisen liian suureksi ja siitä mahdollisesti syntyvät ongelmat. Lim-lohkon lähdön kytkin referenssipisteeseen "K".

Toteutin lambda-arvon laskemisen lisäämällä kaksi ulkoista jatkuvaa tuloa "pr:PAB01DT204.F:in2" ja "pr:PAB01DT204.F:in5" (ulkoiset rajapintaportin tulot säädinpiirissä "pr:PAB01DT204.F", joihin kirjoitetaan valvomosta aikavakio ja lambdakerroin). Lisäsin calc-lohkon, jonka tuloon "a" kytkin valvomosta syötettävän aikavakion ja tuloon "b" kytkin valvomosta syötettävän lambdakertoimen. Calc-lohkoon määrittelin kaavan "o=a\*b;", jolloin sen lähtö vastaa kaavaa  $\lambda = 0.5 \dots 5 * T$ . Lähdön kytkin viittaukseen "LMD". Lisäsin kytkentäpisteen valvomosta syötetyn aikavakion ja laskentalohkon välille, josta haarautin kytkennän viittaukseen "T", jotta aikavakio saadaan mukaan säätimen parametrien laskentaan.

Säätimen vahvistuskertoimen  $K_p$  laskemisen toteutin käyttämällä viiveellisen lambdan kaavaa, hyödyntäen calc-lohkoa (4-1 ana). Sen tuloon "a" kytkin referenssipisteen "T", tuloon "b" referenssipisteen "K", tuloon "c" referenssipisteen "LMD" ja tuloon "d" kytkin ulkoisen jatkuvan tulon "pr:PAB01DT204.F:in3" (ulkoisen rajapintaportin tulo säädinpiirissä "pr:PAB01DT204.F", johon kirjoitetaan viive valvomosta). Laskentalohkoon määrittelin kaavan "o=a/(b\*(c+d));", joka vastaa viiveellisen lambdan kaavaa, kun  $T \sim L$ , eli  $K_p = \frac{T}{(K*(\lambda+L))}$ . Laskentalohkon lähdön kytkin viittaukseen "Kpl". Integrointiajan adaptiivisuudessa ei ollut tarvetta käyttää laskentalohkoja, sillä viiveellisen lambdan virityskaavan mukaan, jos  $T \sim L$  niin  $T_i = T$ .

Adaptiivisten tai manuaalisesti syötettävän vahvistuskertoimen valinnan toteutin lisäämällä disa-lohkon, jonka tuloon "in1" kytkin referenssipisteen "Kpl". Tuloon "in2" kytkin ulkoisen rajapintaportin tulon "in1" (valvomosta manuaalisesti syötettävä vahvistuskerroin), jonka alkuarvoksi asetin 1.35. Bse-tuloon kytkin ulkoisen jatkuvan tulon "pr:PAB01DT204.F:in6" (ulkoisen rajapintaportin tulo säädinpiirissä "pr:PAB01DT204.F", johon kirjoitetaan  $K_p$ :n laskennan valintapainikkeen tilatieto valvomosta). Disa-lohkon lähdön kytkin lim-lohkoon, jonka ylärajaksi määrittelin 6 ja alarajaksi 0, estääkseni vahvistuskertoimen liiallisen kasvamisen ja siitä mahdollisesti seuraavat ongelmat. Lim-lohkon lähdön kytkin ccoa-lohkon kautta referenssipisteeseen "kp" ja vastaavan viittauksen säätimen kytkentäpisteeseen "kp".

Integrointiajan adaptiivisuuden toteutin myös disa-lohkolla. tuloon "in1" kytkin referenssipisteen "T" ja tuloon "in2" ulkoisen rajapintaportin tulon "in2" (ulkoinen rajapintaportin tulo säädinpiirissä "pr:PAB01DT204.F", johon voidaan kirjoittaa aikavakio valvomosta) ja asetin sille alkuarvon 28. Disa-lohkon bse-tuloon lisäsin ulkoisen jatkuvan tulon "pr:PAB01DT204.F:in7" (ulkoinen rajapintaportin tulo säädinpiirissä "pr:PAB01DT204.F", johon kirjoitetaan  $T_i$ :n laskennan valintapainikkeen tilatieto valvomosta).

Kuten säädinpiirissä "pr:PAB01DT204.F" kytkin ccoa-lohkojen lähdöistä, joista meni signaalit referenssipisteille "kp" ja "ti" dot-kytkentäpisteellä samat tiedot referenssipisteille "D1" ja "D2". Kytkin edellämainitut referenssipisteet medium-koon ccoa-lohkojen tuloihin "in" ja määrittelin kopiointilohkon modeksi 5 ja laitoin mincha-parametrin arvoksi 0.001. Ccoa-lohkojen ccout-lähdöt kytkin OR-lohkon, tuloiksi ja OR-lohkon lähdön kytkin säätimen parch-kytkentäpisteeseen, jotta säätimen parametrit päivittyvät niiden muuttuessa

Lopuksi lisäsin vielä kaksi ulkoista jatkuvaa tuloa. Toisella toin säädinpiirissä PAB01DT202 käytetyn rajapintaportin tulon "in1" (säätimen valintapainike valvomossa) tiedon ccoa-lohkon kautta säätimen kytkentäpisteeseen "fc" (pakko-ohjaus). Toisella toin tiedon säätimen PAB02DT204 lähdöstä "con" ccoa-lohkon kautta säätimen kytkentäpisteeseen "fcin" (säätimen lähtö pakko-ohjauksella). Näin säädintä vaihdettaessa valvomosta, säätimen lähtö pakotetaan seuraamaan toisen säätimen lähtöä, eikä säätimiä voida ajaa samanaikaisesti.

#### 4.6 Valvomon toteutus

Loin ensin MetsoDNA:n Picture Designer-työkalulla popup-kuvan, joka saadaan aukeamaan jäähdytysmoduulin valvomokuvassa olevasta popup-ikonista erilliseksi ikkunaksi. Aluksi määrittelin picture properties-valikkoon kuvan parametrit. Määrittelin parametreihin valvomotunnukseksi "E1", moduulin nimeksi "gd:E1:14.1", sijaintitiedoksi "E1U", otsikkotekstiksi "14.1 Smith predictor", prosessialueeksi "#Energy Process EP01#PAB01", kuvan nimeksi "Control room picture", leveydeksi "33000", korkeudeksi "23000" ja kuvatyypiksi "picture". Aluksi piirsin kuvaan säätöpiirin periaatekuvan lohkokaaviomuodossa piirtotyökaluja hyödyntäen.



Smithin prediktoriin kuuluvan sisemmän silmukan havainnoillistin kuvaan piirtämällä sen katkoviivoin. Tarvittavat valvomo-objektit kopioin Picture-designerin objektikirjaistoista ja jäähdytysmoduulin valvomokuvasta.

### **Popup-ikkunan valintapainikkeet**

Kirjastosta "DNAoperatelibrary → bint" lisäsin valintapainikkeet pääsäätimen valitsemiseksi ja adaptiivisille toiminnoille (prosessimallin  $G_T$  vahvistuksen, säätimen vahvistuskertoimen ja integrointiajan laskennat päälle tai pois). Painikkeet laitoin kirjoittamaan säädinpiireihin lisäämäni ulkoisten rajapintaporttien tuloihin. Painikkeiden määrittelyssä "properties" valikon lähtötiedon tarkentimeen määrittelin säätöpiirin ja portin, johon tieto kirjoitetaan. Lisäksi määrittelin vaihtuvat painikkeiden tekstit tiiloille 0 (epätosi) ja 1 (tosi). Säätimen valintapainikkeen laitoin kirjoittamaan tuloon "pr:PAB01DT202.F:in1". Tilan ollessa "0" käytetään säätimen PAB01DT201 lähtöä eli asetusarvoa ja tilalla "1" säätimen PAB01DT204 lähtöä. Tein painikkeille myös tilatiedon mukaan muuttuva teksti. Toteutin adaptiivisten toimintojen valinnan, laittamalla painonapit kirjoittamaan säädinpiiriin pr:PAB01DT204.F ulkoisiin rajapintaporttien tuloihin. Vahvistuksen laskentapainikkeen laitoin kirjoittamaan tuloon "in4", säätimen vahvistuskertoimen laskentapainikkeen tuloon "in6" ja integrointiajan laskentapainikkeen tuloon "in7". Lisäksi tein muuttuvat tilatekstit painikkeille.

### **Säätimien valvomo-objektit**

Lisäsin valvomo-objektin säätimelle PAB01DT204 kirjastosta "DNAoperatelibrary → Pidn". Ainoa parametri, joka täytyi parametroida oli positiotunnus "tag name". Lisäksi kopioin lämpötilasäätimen PAB01DT201 ja virtaussäätimen PAB01DT202 valvomo-objektit jäähdytysmoduulin valvomokuvasta popup-ikkunaan.

### **Popup-ikkunan syöttökentät**

Kirjastosta "DNAoperatelibrary → ana" lisäsin syöttökentät lambdakertoimelle ( $0.5...5*T$ ) sekä säätimien parametreille  $K_p$  ja  $T_i$ , sillä parametrit eivät vaihtuneet säätimien piiri-ikkunoista, kun viritysparametrit syötettiin disa-lohkon kautta säätimelle. Lisäsin myös syöttökentät prosessimallin vahvistukselle  $K_T$ , aikavakiolle  $T_T$  ja viiveelle L.

Dataa kirjoitin säätöpiirien “pr:PAB01DT201.F” ja “pr:PAB01DT204.F” ulkoisten rajapintaporttien tuloihin ja luin dataa ulkoisten rajapintaporttien lähdeistä ja toimilohkojen kytkentäpisteistä. Datan kirjoittamisen toteutin määrittelemällä syöttökentän “properties” valikon lähtötiedon tarkentimeen piirin ja ulkoisen rajapintaportin tulon, johon halutaan kirjoittaa. Datan luin syöttökenttiin määrittelemällä parametri-valikon tulotiedon tarkentimeen ulkoisen rajapintaportin lähden tai kytkentäpisteen jota luetaan. Tulotiedon tarkentimeen määrittelin datalähteeksi “PCS” ja historiadata lähteeksi “historian”. Kytkentäpisteitä ja ulkoisia rajapintaportteja käyttäessä jästin syöttökentän properties-valikosta positiotunnuksen (tag name) ja positiotyyppin tyhjäksi. Syöttökenttiin ja indikaattoreihin määrittelin myös valvomo-objektin valikkopolusta “select → values → properties” desimaalien määrän (precision) ja merkkien lukumäärän (text length) sopiviksi. Mittauksien yksiköt vaihdoin objektin valikkopolusta “select → unit → properties”.

- Lambdakertoimen syöttökentän määrittelin kirjoittamaan säätöpiirin “pr:PAB01DT204.F” rajapintaportin tuloon “in5”.
- Säätimen PAB01DT204 vahvistuskertoimen syöttökentän määrittelin kirjoittamaan tuloon “pr:PAB01DT204.F:in9” ja lukemaan kytkentäpistettä “pr:PAB01DT204:kp”.
- Säätimen PAB01DT204 integrointiajan syöttökentän laitoin kirjoittamaan tuloon “pr:PAB01DT204.F:in10” ja lukemaan tuloa “pr:PAB01DT204:ti”.
- Säätimen PAB01DT201 vahvistuskertoimen syöttökentän laitoin kirjoittamaan tuloon “pr:PAB01DT204.F:in1” ja lukemaan kytkentäpistettä “pr:PAB01DT201:kp”.
- Säätimen PAB01DT201 integrointiajan syöttökentän laitoin kirjoittamaan tuloon “pr:PAB01DT204.F:in2” ja lukemaan kytkentäpistettä “pr:PAB01DT201:ti”.
- Vahvistuksen K syöttökentän määrittelin kirjoittamaan tuloon “pr:PAB01DT204:in1” ja lukemaan tuloa “pr:PAB01DT204:out5”.
- Aikavakion T syöttökentän määrittelin kirjoittamaan tuloon “pr:PAB01DT204:in2” ja lukemaan tuloa “pr:PAB01DT204:out6”.
- Viiveen L syöttökentän määrittelin kirjoittamaan tuloon “pr:PAB01DT204:in3”.

### Popup-ikkunan mittaukset

Kirjastosta “DNAoperatelibrary → ana” lisäsin indikaattorit prosessimallin mittaukselle, ennustetulle mittaukselle, mallivirheelle ja lambda-arvolle. Prosessimallin mittauksen indikaattoriin määrittelin säädinpiirissä “pr:PAB01DT204.F” olevan mittauslohkon taginimen “PAB01DT204-PM” ja positiotyypiksi laitoin “ampos” (analoginen mittaus). Määritin desimaalien määräksi 2 ja merkkien määräksi 3. Yksiköksi vaihdoin °C. Ennustetun lämpötilan luin säädinpiirin “pr:PAB01DT204.F” ulkoisen rajapintaportin tulosta “out1” (lela-lohkon lähtö eli prosessimalli viiveettömänä), määrittelin desimaalien määräksi 2 ja merkkien määräksi 5. Yksiköksi vaihdoin °C. Mallivirheen

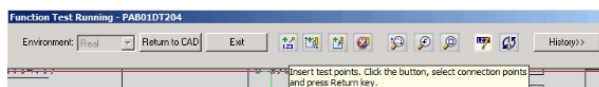
luin piirin "pr:PAB01DT204.F" ulkoisen rajapintaportin tulosta "out2" (lela- ja delay-lohkon sarjaankytkennän lähtön viiveellisen mittauksen PAB01CT207 summaus). Desimaalit, merkkien määrän ja yksikön laitoin vastaavalla tavalla kuin ennustetun lämpötilan indikaattorissa. Lambda-arvon luin säätöpiirin pr:PAB01DT204.F ulkoisesta rajapintaportin lähdestä "out4". Lisäksi kopioin jäähdytysmoduulin valvomokuvasta popup-ikkunaan viiveellisen lämpömittauksen "PAB01CT207", sekä virtausmittauksen "PAB01CF206" valvomo-objektit. Lopuksi asettelin valvomo-objektit mahdollisimman havainnoillistavasti piirtämään säätöpiirin lohkoaviomalliin, sekä lisäsin kuvaan tarpeelliset huomiotekstit. Kun olin saanut popup-ikkunan valmiiksi, tein muutoksia alkuperäiseen jäähdytysmoduulin valvomokuvaan. Poistin siellä alunperin olleen lämpötilasäätimen ja lisäsin blokkikirjastosta (DNAoperatelibary → icons) popup-ikkunan valvomo-objektin. Määrittelin sen parametrivalikosta command-parametrin toiminnoksi "openwindow". Vierestä avautuvan command arguments-valikon picture-parametriin määrittelin avattavan kuvan komennolla "display, page=gd:E1:14.1". Liitteessä 17 on esitetty muokattu jäähdytysmoduulin valvomokuva ja luomani popup-ikkuna.

#### 4.7 Valvomon testaus ja tulokset

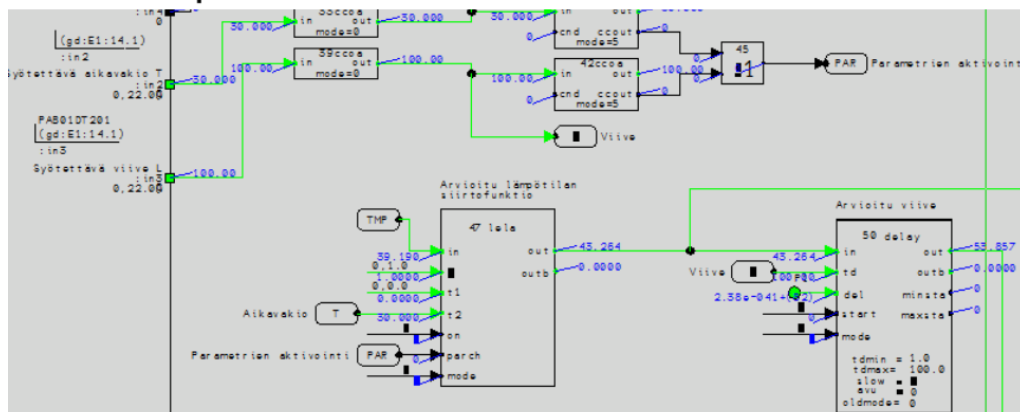
Jäähdytysmoduulin valvomonäkymästä popup-ikkunan sai aukeamaan erilliseen ikkunaan odotetusti. Popup-ikkunassa syöttökentät (lambda-kerroin, säätimien viritysparametrit, prosessimallin parametrit) toimivat oikein. Lambda-kertoimen toiminnan totesin siitä, että esim. lambdakertoimella 1 ja syötetyllä aikavakiolla 28 lambda-arvon indikaattorin arvoksi tuli 28. Säätimien viritysparametrien syöttökenttien toiminnan totesin toimiviksi, sillä syöttökentät lukivat säätimien kytkentäpisteitä ja arvot vastasivat manuaalisesti syötettyä arvoja. Adaptiivisuuden valintapainikkeiden toiminnan totesin toimivaksi seuraamalla viritysparametrien ja prosessin vahvistuksen syöttökenttiä, kun kytkin painikkeet päälle ja pois. Testasin jokaisen painikkeen erikseen. Painikkeiden ollessa päällä, vaihtelivat arvot ajotilanteesta riippuen. Kun painikkeet olivat pois päältä, viritysparametrit olivat vastaavat syötettyjen arvojen kanssa ja vahvistuksen arvona oli alkuarvoksi aseteltu vakio 1.

Prosessimallin parametrien kirjoittamisen ja lukemisen toiminnan arvioin FbCAD:n test-toiminnolla, jolloin näin niiden hetkellisarvot jatkuva-aikaisesti FbCAD:n ollessa online-tilassa. Lisäksi parametrien syöttökentät lukivat säätöpiiriin “pr:PAB01DT204:F” toteutettuja ulkoisia rajapintaporttien lähtöjä, joiden perusteella oli pääteltävissä, että syötetyt arvot aktivoituvat. Viiveen kohdalla jäi säätöpiiriin laittamatta ulkoinen rajapintaportin lähtö, mutta test-toimintoa käyttäen muutin viivettä 1s ja 100s välillä ja seurasin delay-lohkon lähtöä. Huomasin eron lähdössä viiveiden eri arvoilla ja totesin, että viive aktivoituu delay-lohkoon sitä muutettaessa. Lisäksi seurasin ajojen aikana virtauksen-, viiveellisen lämpötilan- ja prosessimallin mittauksien indikaattoreita. Ulkoisten rajapintaporttien lähdöistä luetut lämpötilamittauksen ja mallivirheen indikaattorit näyttivät realistisia arvoja testatessani niitä eri ajotilanteissa ja totesin niiden toimivan oikein. Myös lisäämäni mittaukset näyttivät realistisia arvoja. FbCAD:n testitoiminto ja kuvankaappaus testitilanteesta aikava- kion ollessa 30s ja viiveen ollessa 100s on esitettyä alla olevassa kuviossa 17.

### FbCAD:n testitoiminto



### Prosessimallin parametrien aktivoitumisen testaus



Kuvio 17 FbCAD:n test-toiminto

#### 4.8 Säädinpiirin pr:PAB01DT201.F testaus

Testasin säätimen toimintaa ilman adaptiivista säätöparametrien laskentaa, viritysparametreilla  $K_p = 1$  ja  $T_i = 60$ . Tein asetusarvon muutoksen  $60^\circ\text{C}$  lämpötilasta lämpötilaan  $40^\circ\text{C}$  ja seurasin valvomossa säätimen, lämpötilamittauksen HAD01CT205a höyryn virtausmittauksen HAD01CF203 trendejä. Trendit ovat esitetynä kuviossa 18.



Kuvio 18 Säädinpiirin "pr:PAB01DT201.F" testaus

Trendistä "HAD01CF203" huomaa, että prosessissa esiintyi höyryntuotannossa jaksottain esiintyviä häiriöitä, jotka aiheuttivat lämpötilan ajoittaista laskemista ja vaikuttivat siten säätötulokseen. Höyryn virtausmittauksen trendiin lisäsin hiusviivan ajanhetkelle 19:18:41 ja mittauksen HAD01CT205 trendiin hiusviivan samalle ajanhetkelle, jonka perusteella totesin lämpötilan ajoittaisen laskemisen johtuvan höyryntuotannon laskemisesta. Häiriöt höyryntuotannossa johtuivat siitä, että höyrykehittimeen lisätään vettä ajastetulla pulssilla (pulssin pituus riippuu höyrykehittimessä käytetystä tehosta), joka käynnistää syöttövesisäiliön pumpun LCA01AP101 ja avaa sen jälkeen on/off-venttiilin LCA01AA101. Tämän seurauksena höyrykehittimessä olevan veden lämpötila laskee, jolloin myös höyryntuotanto laskee hetkellisesti, laskien samalla lämpövaraajalle tulevan veden lämpötilaa.

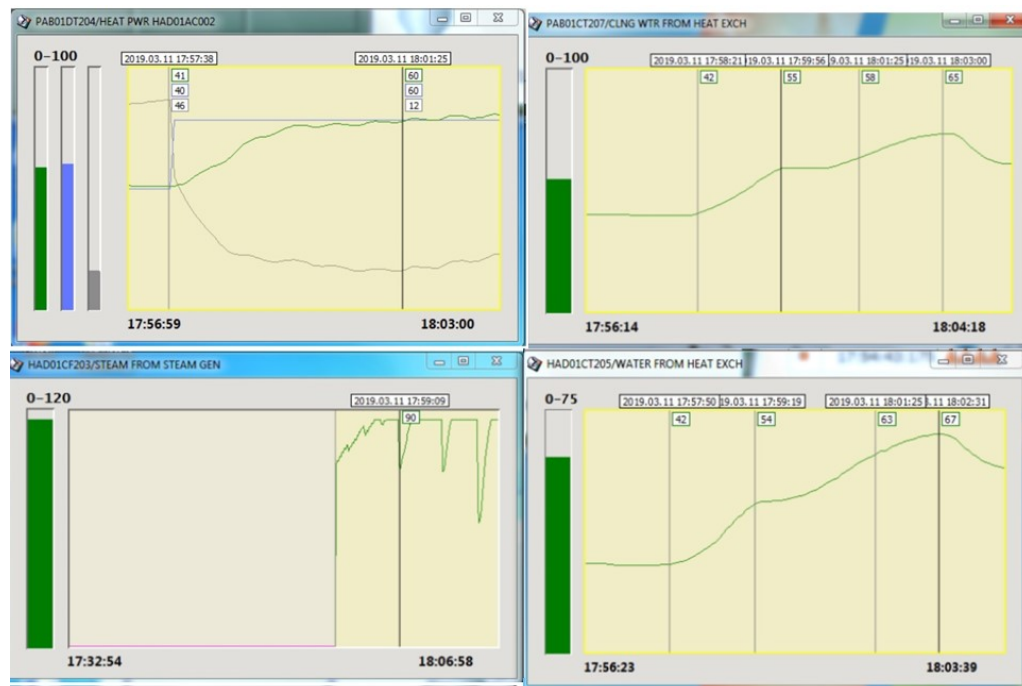
Kuviossa 18 olevan mittauksen HAD01CT205 trendin toisella hiusviivalla pyrin arvioimaan sen viivettä asetusrvon muutoshetkellä. Viive näyttäisi olevan hiusviivan perusteella n. 12s. Luultavasti se on kuitenkin paljon pienempi, sillä höyryn tuotanto vaihteli asetusrvon muutoshetkellä, jonka takia asetin hiusviivan luultavasti väärään kohtaan. Mittauksen HAD01CF203 trendissä olevan hiusviivan ja mittauksen HAD01CT205 trendin ensimmäisen hiusviivan perusteella näyttäisi, että viive on n. 1-3s. Säätimen PAB01CT201 asetusrvon muutoshetkelle zoomatusta trendistä on huomattavissa n. 34s viive mittauksen PAB01CT207 vasteessa.

Kuvion 18 trendeistä huomaa myös, että lämpötilasäädin kasvattaa ohjausta lineaarisesti ylöspäin, kunnes lämpötilamittauksen vasteessa tapahtuu ensimmäinen muutos. Tämän jälkeen lämpötila alkaa laskea hyvin nopeasti lämpötilasäätimen ohjauksen, sekä höyryntuotannon alenemisen yhteisvaikutuksesta. Lämpötilasäädin alkaa korjaamaan tilannetta laskemalla virtaussäätimen asetusrvoa ylikompensoidusti, jonka seurauksena lämpötilamittaus tasaantuu. Lämpötilan vaste pysyy pitkään tasaisena, jonka jälkeen sama ilmiö toistuu. Lämpötilasäädin alkaa taas ylikompensoimaan kasvattamalla lähtöä lineaarisesti ylöspäin, kunnes lämpötilamittaus alkaa laskemaan hyvin nopeasti ja säädin korjaa tilannetta laskemalla ohjausta ylikompensoidusti alaspäin. Lämpötilamittaus laskee asetusrvon tasolle ja säätimen lähtö stabiloituu, kunnes höyryntuotannon kasvamisen takia lämpötilan vaste nousee taas ylöspäin pitkän viiveen jälkeen. Sama ilmiö toistuu useaan kertaan.

Pitkän viiveen, säätimen ohjauksen ylikompensoinnin, sekä höyryntuotannossa esiintyvien häiriöiden takia kesti kauan, että mittauksen vaste asettui asetusrvoon ja säätimen lähtö stabiloitui. Asettumisajaksi arvioin kuvion 18 vasemmassa yläkulmassa olevan säätimen trendin perusteella n. 13min ja 43s. Oikean yläkulman säätimen trendistä, joka on zoomattu asetusrvon muutoshetkeen, näkee selkeämmin viiveen aiheuttaman säätimen lähdön ylikompensoitumisen.

#### 4.9 Säädinpiirin pr:PAB01DT204.F testaus

Säätimen toiminnan testasin ilman adaptiivista säätöparametrien laskentaa viritysparametreilla  $K_p = 1$  ja  $T_i = 28$ . Tein asetusarvon muutoksen lämpötilasta 40°C lämpötilaan 60°C. Testatessa tarkastelin säätimen, sekä mittauksien PAB01CT207, HAD01CT205 ja HAD01CF203 trendejä, jotka ovat esitettynä alla olevassa kuviossa 19.



Kuvio 19 Säädinpiirin “pr:PAB01DT204.F” testaus

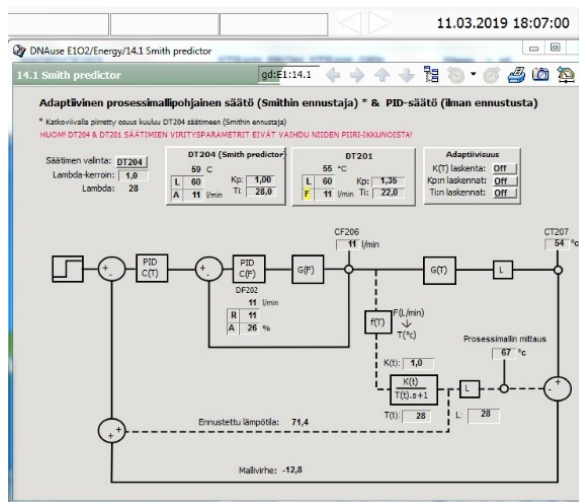
Kuviossa 19 esitetystä säätimen trendistä huomaa, että säätimen ohjaus ei ylikompensoidu kun se saa vasteen arvioidusta prosessimallista, vaan se alkaa heti korjaamaan säätövirhettä ennustetun mittauksen ja asetusarvon eroarvoon verrannollisesti. Asettumisaika on huomattavasti nopeampi, kuin tavanomaisessa PI-säädössä. Asettumisaika on säätimen trendin perusteella n. 3min ja 47s. Säätimen prosessimallissa ei tosin otettu huomioon höyryntuotannossa esiintyviä häiriöitä, joten säätimen lähtö ei kompensoi niitä. Käytetty 28s integrointiaika oli tosin liian lyhyt. Sen huomaa kun tarkastelee säätimen lähtöä. Lähtö reagoi liian nopeasti ennustetun prosessimallin mittauksen muutoksiin, eikä ole tarpeeksi stabiili.

Kuviossa 19 olevien mittauksien PAB01CT207 ja HAD01CT205 trendeihin lisäsin 4 hiusviivaa. Trendeissä olevien ensimmäisten hiusviivojen perusteella arvioin askelmuutoksen jälkeen mittauksen PAB01CT207 vasteen viiveeksi n. 43s ja mittauksen HAD01CT205 viiveeksi n. 12s. Höyryn virtausmittauksen trendissä olevasta hiusviivasta huomaa, että ajanhetkellä 17:59:09 höyryntuotanto laskee. Lämpötilamittauksien trendien toisella hiusviivalla arvioin viivettä, jonka jälkeen höyryntuotannon laskemisen vaikutus näkyy lämpötilamittauksissa. Lämpötila alkaa laskemaan 10 sekunnin päästä mittauksessa HAD01CT205. Mittauksessa PAB01CT207 lämpötilan laskeminen näkyy vasta 47 sekunnin päästä.

Kolmannella hiusviivalla vertailin prosessimallin ennustaman lämpötilamittauksen, sekä mittauksien PAB01CT207 ja HAD01CT205 välisiä lämpötilaeroja ajanhetkellä 18:01:25. Prosessimallin ja mittauksen PAB01CT207 välinen lämpötilaero oli kyseisellä ajanhetkellä n. 2°C. Prosessimallin ja mittauksen PAB01CT205 välinen lämpötilaero oli n. 3°C. Virtaus oli sillä hetkellä n. 12 L/min. Kaavaansovituksessa luotuun taulukkoon (ks. luku 4.1.2 kuvio 10) laskettu mallivirhe oli 11-13 L/min virtauksilla välillä -0.89°C ja -3.95°C, eli säätöpiiriin toteutetut laskennat vaikuttivat toimivan hyvin kyseisellä ajanhetkellä. Neljännen hiusviivan perusteella lämpötila nousi mittauksen HAD01CT205 perusteella lopulta n. 67°C lämpötilaan ja mittaus PAB01CT207 nousi 30s viiveen jälkeen n. 65°C lämpötilaan. Säätimen mittaus jäi lopuksi n. 60°C lämpötilaan. Höyryn virtausmittauksen trendistä huomaa lopussa rajun laskun höyryntuotannossa, joka pudotti lopuksi lämpötilaa reilusti.

Kuviossa 20 on esitettyä valvomon popup-ikkuna testauksen loppuvaiheessa. Kuviossa huomaa, kuinka prosessimallin mittaus (lela- ja delay-lohkon sarjaankytkennän lähtö) antaa tulokseksi 67°C, mutta höyryntuotannon laskiessa mittauksen PAB01CT207 lämpötila putosi n. 54°C lämpötilaan. Säätöpiiri laski mallivirheeksi siis -12.8°C. Ennustettu lämpötila oli samalla hetkellä n. 71.4°C, jolloin mallivirheen ja ennustetun lämpötilan summain laski säätimen mittaukseksi n. 60°C. Jos olisin saanut häiriöt mallinnettua prosessimalliin, olisi mallivirhe ollut luultavasti paljon pienempi.





Kuvio 20 Pop-up ikkuna Smithin prediktoria testatessa

#### 4.10 Säätimien viritys ja viritystulosten vertailu

Kokeilin viritää säätimet adaptiivisuuden ollessa käytössä ja erilaisilla lambdan arvoilla, mutta tässä työssä esitellään vain virituksen tulos, kun tein asetusarvon muutokset molemmilla säätimillä 40°C lämpötilasta 50°C lämpötilaan adaptiivisuuden ollessa käytössä. Molemmat säätimet viritin lambdakertoimella 1, aikavakion arvolla 28 ja viiveen arvolla 28s. Lambda-arvoksi säätöpiirit laskivat 28s niin kuin pitääkin ( $1 * T$ ). Käytin säätöpiirissä "pr:PAB01DT201.F" viiveellisen lambdan kaavoja ja säätöpiirissä "pr:PAB01DT204.F" viiveettömän lambdan kaavoja, kun  $T \sim L$ . Integrointi-ajaksi piirit laskivat 28s niin kuin pitääkin, sillä edellä mainittujen kaavojen mukaan  $T_i = T$ . Suuremmilla lambdakertoimilla vahvistuskertoimen arvo pieneni liikaa, jolloin säädöstä tuli erittäin hidas.

Säätimen PAB01DT201 asettumisajaksi arvioin n. 15min ja 36s, jonka jälkeen lämpötila oli noussut asetusarvoon ja säätimen lähtö stabiloitui. Adaptiivinen vahvistuskerron jäi n. 0.19 arvoon prosessin tasaannuttua. Säädin ei kompensoinut kovin hyvin höyryntuotannon häiriöitä, sillä niitä ei huomioitu säätöpiirissä ja  $K_p$ :n arvo jäi pieneksi prosessin saavutettua asetusarvon. Liitteessä 19 on esitettyä säätimen PAB01DT201 ja höyryn virtausmittauksen HAD01CF203 trendi, sekä pop-up-ikkunan näkymä prosessin tasaannuttua uuteen asetusarvoon.

Säätimen PAB01DT201 trendistä näkee arvioimani asettumisajan. Höyryntuotannossa esiintyvien häiriöiden aiheuttaman lämpötilan laskemisen huomaa siitä, kun vertaa trendin HA01CF203 hiusviivaa ajanhetkellä 14:19:21 ja trendin PAB01DT201 hiusviivaa ajanhetkellä 14:19:46. Pop-up ikkunnasta näkee prosessimalliin syötetyt parametrit, vahvistuksen ja vahvistuskertoimen laskennalliset arvot, sekä mittaukset prosessin tasaannuttua uuteen asetusarvoon.

Säätimen PAB01DT204 asettumisajaksi arvioin n. 13min 40s, jonka jälkeen lämpötila oli noussut asetusarvoon ja säätimen lähtö stabiloitui. Adaptiivinen vahvistuskerroin oli n. 0.36 kun prosessi oli saavuttanut asetusarvon. Häiriöitä höyryntuotannossa säädin ei kompensoinut kovin hyvin, sillä niitä ei otettu huomioon prosessimallissa ja vahvistuskerroin oli prosessin saavutettua asetusarvon niin pieni. Liitteessä 19 on esitetty säätimen PAB01DT204, viiveellisen mittauksen PAB01CT207, sekä höyryn virtausmittauksen HAD01CF203 trendi ja pop-up ikkunan näkymä prosessin tasaannuttua uuteen asetusarvoon. Arvioimani asettumisajan näkee säätimen PAB01DT204 ja mittauksen PAB01CT207 trendien kahdesta ensimmäisestä hiusviivasta. Kolmannen hiusviivan perusteella lämpötilan laskeminen ei johdu säätimen lähdöstä, vaan häiriöistä höyryntuotannosta, jotka ovat huomattavissa höyryn virtausmittauksen trendistä HAD01CF203.

Viritystulokset herättivät hämmennystä, sillä säädin PAB01D201 oli vain n. 1min 56s hitaampi tämän virityksen tuloksena. Huomasin myös virittäessäni, että välillä säädin PAB01DT201 oli nopeampi, kuin ennustava säädin PAB01DT204.  $K_p$ :n adaptiivisuus ei vaikuttanut toimivan hyvin säätöpiireissä. Syyksi selvitin lopulta väärin lasketun vahvistuksen  $K_T$  säätöpiirissä "pr:PAB01DT204.F". Laskin molemmissa säätöpiireissä vahvistuksen jakamalla säätöpiirissä "pr:PAB01DT204.F" ennustetun lämpötilan virtausmittauksella PAB01CF206, vaikka minun olisi pitänyt laskea lämpötilan ja virtauksen muutoksien suhde ja skaalata molemmat mitta-alueilleen (0-70 L/min ja 100-22 °C). Vahvistuksen laskenta antoi täten aivan liian suuria arvoja (esim. liitteessä 19 laskettu arvo on jopa 2.7). Kun käytin säätöpiireissä vahvistuskertoimen laskentaan kaavoja  $K_p = \frac{T}{K*(\lambda+L)}$  (viiveellinen lambda kun  $T \sim L$ ) ja  $K_p = \frac{T}{K*\lambda}$  (viiveetön lambda kun  $T \sim L$ ), tulee vahvistuskertoimeksi siten aivan liian pieni arvo. Vahvistuksen sekä vahvistuskertoimen indikaattorit näyttivät kyllä oikein pop-up ikkunnassa, mutta vahvistus olisi pitänyt laskea eri tavoin.

Lisäksi kun säätöpiirissä "pr:PAB01DT201.F" käytetään vahvistuksen laskennassa säätöpiiristä "pr:PAB01DT201.F" tuotua, kaavaansovituksen kaavoilla ennustettua lämpötilaa, eivät säätötulokset ole siten kovin vertailukelpoisia. Viritystulokset olisivat olleet luultavasti parempia, jos olisin käyttänyt vahvistuskertoimen laskemisessa luvun 4.1.2 taulukossa 6 laskettua vahvistuksen keskiarvoa 0.25. Kun pohdin mikä adaptiivisuudessa meni vikaan, tein taulukon 7, johon syötin lambda-kertoimen arvot 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 ja 3. Jos käytettäisiin aikavakion keskiarvoa 28.5, viiveen keskiarvoa 27.83 ja vahvistuksen keskiarvoa 0.25, saataisiin viiveettömän ja viiveellisen lambda-kaavoilla taulukon 7 mukaiset vahvistuskertoimet säätimille kyseisillä lambda-arvoilla.

Taulukko 7 Vahvistuskertoimen laskennallisia arvoja lambda virityskaavoilla

| Lambdakerroin | Lambda-arvo | Kp (viiveetön) | Kp (viiveellinen) |
|---------------|-------------|----------------|-------------------|
| 0,50          | 14,25       | 8,00           | 2,71              |
| 1,00          | 28,5        | 4,00           | 2,02              |
| 1,50          | 42,75       | 2,67           | 1,62              |
| 2,00          | 57          | 2,00           | 1,34              |
| 2,50          | 71,25       | 1,60           | 1,15              |
| 3,00          | 85,5        | 1,33           | 1,01              |

## 5 Pohdinta

### 5.1 Opinnäytetyön tavoitteet ja niiden täytyminen

Opinnäytetyön ensimmäisenä tavoitteena oli mallintaa energiatekniikan lämmönvaihdinprosessi askelvastekokein. Prosessin epälineaarisen käyttäytyminen ja prosessissa esiintyvät häiriöt tekivät mallintamisesta haastavaa. Prosessimallin ja lämpötilamittauksen PAB01CT207 välinen mallivirhe piti saada hyvin pieneksi, että Smithin ennustaja toimii oikein ja säädin saa mittaukseksi mahdollisimman realistisen arvion lämpötilasta viiveettömänä. Toimeksiantajalta sain kuitenkin hyviä vinkkejä ja uusia näkökulmia prosessin mallintamiseksi. Lämpötilan laskeminen virtauksen perusteella kaavaansovitusta hyödyntämällä, sekä arviot aikavakioiden ja viiveiden keskiarvoista osoittautuivat kuitenkin hyväksi ratkaisuksi lämpötilan ennustamiseksi.

Prosessimallissa ei otettu kuitenkaan huomioon prosessissa esiintyviä höyryntuotannon häiriöitä, jotka ilmenivät vasta työn loppuvaiheessa. Mallivirhe pysyi kuitenkin kohtuullisena tutkiessani mallin hyvyttä käsiajolla ja testatessani Smithin ennustajaa automaattilla. Mallivirheen vaihteluväli testatessa oli  $n. \pm 0.1-6.6 \text{ }^\circ\text{C}$  ja keskiarvo  $n. \pm 2.68^\circ\text{C}$  mallivirheen indikaattorin perusteella. Trendien perusteella (prosessimallin mittaus ja viiveellinen lämpötilamittaus) mallivirheen vaihteluväli oli  $n. \pm 1-5^\circ\text{C}$  ja keskiarvo  $n. \pm 2.5^\circ\text{C}$ . Tämä on huomattavissa liitteessä 8 olevasta prosessimallin mittauksen ja todellisen mittauksen trendeistä, sekä mallivirheen indikaattorista. Suurimmillaan mallivirhe oli virtauksen ollessa pienimmillään ja sen ylittäessä 50 L/min. Kaavaansovitus ei luultavasti pätenyt enää, kun virtaus oli  $>50 \text{ L/min}$ , sillä kaavaansovitus tehtiin vain 10-50 L/min virtauksille. Luvun 4.1.2 kuviossa 10 oleva taulukko selittää suuremman mallivirheen pienillä virtauksilla. 10-13 L/min virtauksilla mallivirhe on taulukon mukaan suurimmillaan, lämpötilan epälineaaraisella osuudella. 10-50L/min virtauksilla lämpötilan ennustaminen vaikutti toimivan kuitenkin erinomaisesti ja mallivirheet pysyivät pienenä.

Mallinnuksen jälkeen tavoitteena oli suunnitella ja simuloida lämmönvaihdinprosessin kaskadisäätö Smithin ennustajalla, sekä tavanomaisella PID-säädöllä Matlab- ja Simulink-ohjelmistoilla, sekä toteuttaa säätöpiirit Metso DNA:n FbCAD-työkalulla. Säätimiin päädyttiin lisäämään opinnäytetyön aikana vielä adaptiiviset viritysparametrit, prosessin epälineaarisuuden vuoksi. Simulaattorin luominen oli yksi opinnäytetyön hankalimmista osa-alueista koko opinnäytetyössä, sillä otin henkilökohtaiseksi tavoitteekseni adaptiivisten säätöparametrien simuloinnin ja toteutin simulaattoriin myös lämpötilan laskennan virtauksen perusteella. Simulaattoriin sain toimimaan mielestäni melko hyvin. Se vastasi toimintaperiaatteiltaan MetsoDNA:n toteutettuja säätöpiirejä ja sain näkymään viiveen aiheuttaman ilmiön tavanomaisessa PID-säädössä, sekä simuloitua toimivan Smithin prediktorin. Simulaattorissa huomasin joitakin puitteita. Simulaattorin vaste ei täysin vastannut todellisen prosessia, eli jokin lohkokaaavion lohkoista oli parametroitu väärin. Esimerkiksi lämpötilan arvot eivät korreloineet pumpun nopeusohjeen ja virtauksien kanssa simuloitujen ja todellisen prosessin trendien mukaan. Simuloinnin perusteella hyväksi todetut viritysparametrit eivät osoittautuneet hyviksi MetsoDNA:n säädinten kohdalla.

MetsoDNA:n luodut säätöpiirit ja luomani valvomokuva osoittautuivat toimiviksi, mutta adaptiivisuus ei toiminut oikein, sillä laskin vahvistuksen väärin, kuten totesin luvussa 4.10. Testien mukaan (ks. luvut 4.8 ja 4.9) säätimet toimivat odotetulla tavalla, kun adaptiivisuus ei ollut käytössä. Adaptiivisuus ei toiminut aivan odotuksien mukaan kummassakaan lämpötilasäätimessä. Vahvistuskerroin putosi helposti liian pieneksi, vaikka käytin lambdakerrointa 0.5, jolloin suljetun säätöpiirin pitäisi olla 2 kertaa avointa säätöpiiriä nopeampi. Näin ei käynyt ja säädöstä tuli erittäin hidaskäyttöä adaptiivisuutta käytettäessä. Syyksi selvisi väärin laskettu vahvistus, kuten luvussa 4.10 todettiin.

## 5.2 Tulosten luotettavuus

Kun arvioin prosessimallin parametreja historiaseurannasta, en ollut vielä huomannut höyryntuotannossa esiintyviä jaksollisia häiriöitä, enkä siten tajunnut lisätä historiaseurantaan höyryn virtausmittausta. Lämpötila saattoi laskea satunnaisesti pelkästään höyryntuotannon alenemisen vaikutuksesta, joka saattoi vaikuttaa varsinkin viiveen ja aikavakion arvioiden luotettavuuteen. Kaavaansovituksessa tehtiin kaavat lämpötilan laskemiseksi 10-50 L/min välille, joten kaavaansovituksella saadut kaavat eivät luultavasti päde koko virtausalueella 0-70 L/min. Testit tehtiin tosin vain höyrykehittimen teholla 30kW, joten saatu säätöratkaisu ei luultavasti toimi koko höyrykehittimen tehoalueella.

Muuten tulokset vaikuttivat luotettavilta, sillä ne tukivat opinnäytetyön viitekehityksessä käytettyä aineistoa viiveen aiheuttamien ongelmien kanssa säätöpiirissä (Kuisma 2017, 85-88; VanDoren 2015; Graphical Modeling of Process Dynamics: Heat Exchanger Case Study 2015; Viiveellisten systeemien säätö 2011). Viiveen aiheuttama säätimen lähdön ylikompensointi näkyi tavanomaista säätöpiiriä testatessa ja poistui kun testasin Smithin ennustajaa. Smithin ennustajalla säädöstä tuli odotusten mukaisesti huomattavasti nopeampi ja stabiilimpi, kuin tavanomaisella PI-säädöllä. Ilmiö näkyi sekä käytännön prosessissa, että simulaattorissa. Adaptiivisen vahvistuksen laskenta ei kuitenkaan toiminut oikein, joten viritystulokset ole siten kovin vertailukelpoisia, eikä niistä voida tehdä luotettavia johtopäätöksiä.

### 5.3 Jatkokehityskohteet

Prosessimalleissa ja prosessimallia simuloivien lohkojen parametreissa voisi olla vielä parantamisen varaa. Prosessikokeissa tulisi pyrkiä eliminoimaan häiriöt pois paremmin. Sopivilla lohkoilla ja laskentatoimenpiteillä, jotka myötäkytkettäisiin säätimen lähtöön, häiriöt olisivat varmasti simuloitavissa ja kompensoitavissa, sillä häiriö on kuitenkin mitattavissa. Koitin simuloida häiriöitä sine wave-lohkolla ja erilaisilla parametreja (kuten muuttaa amplitudia ja taajuutta), mutta simulaattorin vaste alkoi värähtelemään rajusti, ei stabiloitunut eivätkä simuloituvat häiriöt vastanneet läheskään todellisen prosessin häiriöitä. Lämpötilasäätimen "pr:PAB01DT204.F" viritys pitäisi toteuttaa toisin, käyttämällä samoja lambdaan kaavoja, mutta adaptiivisen viritysparametrien laskemisen sijaan voisi käyttää esimerkiksi vahvistuksen, aikavakion ja viiveen keskiarvoja luvussa 4.10 kuvaamaani menetelmän mukaisesti. Virityksessä lambda-kertoimina voisi koittaa arvoja väliltä 2-3, jolloin taulukon 7 perusteella tulisi luultavasti prosessille sopivampi vahvistuskerroin. Integrointiaikaa voisi pidentää. Mikäli haluttaisiin adaptiivinen säätö, voitaisiin FbCAD:n tfunc-lohkolla luoda taulukko, jossa olisi omat vahvistuskertoimen arvot säätimelle esimerkiksi eri virtauksilla.

### 5.4 Johtopäätökset

Säädintä PAB01DT201 käytettäessä säätimen lähtö ylikompensoi, kun se ei saanut vastetta välittömästi ja vasteen saatuaan se teki rajun korjauksen ohjaukseen vastakkaiseen suuntaan. Säätöpiiri käyttäytyi siis epästabiilisti viiveen takia. Smithin ennustajaa käytettäessä ongelma poistui. Säätimet toimivat siis odotusten mukaisesti. Opinnäytetyö vahvistaa sen, että vahvistusta on pienennettävä tai integrointiaikaa pidennettävä, jotta säätimen lähtö pysyy stabiilina. Smithin prediktorilla viive saatiin kompensoitua hyvin energiatekniikan laboratorion lämmönvaihdinprosessissa. Simulaattori vastasi toimintaperiaatteiltaan todellisen prosessin säätimiä. Valvomoon ja säätöpiireihin tekemäni toiminnot sain toimimaan oikein. Tuloksena saatiin toimiva sovellus, jolla pystytään demonstroimaan Smithin ennustajan toimintaa ja hyötyä viiveellisissä prosesseissa energiatekniikan laboratoriossa. Opinnäytetyötä voidaan hyödyntää jatkossa opetuskäytössä ja sitä voitaisiin soveltaa teollisuuden prosesseihin, johon liittyy mittausteknisiä rajoituksia.

## Lähteet

- Automaatio 1, ELEC-C1210, 2. Automaation perustoiminnot ja niiden toteutus. 2015. Automaatiojärjestelmien perusteita käsittelevä kurssi. Aalto-yliopisto. Viitattu 22.1.2019. [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/293726/mod\\_resource/content/1/2\\_Toiminnot\\_2015%2Bliitteet.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/293726/mod_resource/content/1/2_Toiminnot_2015%2Bliitteet.pdf)
- Automaatio 1, ELEC-C1210, 4.1 Automaation kenttäväylät. 2014. Kenttäväyliä käsittelevä kurssimateriaali. Aalto-yliopisto. Viitattu 22.1.2019. [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/293729/mod\\_resource/content/1/ELEC-C1210\\_4.1\\_automaation\\_kenttavaylat.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/293729/mod_resource/content/1/ELEC-C1210_4.1_automaation_kenttavaylat.pdf)
- Energiatekniikan laboratorioympäristö. N.d. JAMK:n energiatekniikan laboratorioympäristöä esittelevä verkkojulkaisu. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu 22.1.2019. <https://www.jamk.fi/fi/Palvelut/Testaus-ja-analysointi/Konetekniikan-palvelut/energiatekniikan-laboratorioymparisto/>
- Graphical Modeling of Process Dynamics: Heat Exchanger Case Study. 2015. Prosessinohjauksen ammattilaisten avuksi tarkoitetun Control Guru-sivuston verkkojulkaisu. Control Guru. Viitattu 15.3.2019 <https://controlguru.com/dead-time-is-the-how-much-delay-variable/>
- Harju, T. & Marttinen, A. 2000. Säätopiirin viron perusteet. 1. painos. Espoo: Control CAD Oy.
- Kananen, J. 2015. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas: miten kirjoitan kehittämistutkimuksen vaihe vaiheelta. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Kuisma, A. 2017. Sääntötekniikan perusteita, rev. 1. Jyväskylän ammattikorkeakoulun sääntötekniikan kurssimateriaali. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Laplace-muunnos. 2011. Analogisen säädön verkkokurssi, oppitunti 3, Laplace-muunnos. Aalto-yliopisto Viitattu 15.3.2019. <https://coursebackup.aalto.fi/as/Verkkokurssit/AS-74.2111/mallit/oppitunti3/laplace.html>
- Majanne, Y. 2007. Kehittyneet säätömenetelmät voimalaitossovelluksissa. Luentomateriaali. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 20.5.2019 <http://automaation.tkk.fi/attach/AS-84-3134/kehittynytsaato.pdf>
- PID-säätimen modifikaatiot. 2011. Analogisen säädön verkkokurssi, kehittyneet säätösuunnittelun menetelmät, oppitunti 12. Aalto-yliopisto. Viitattu 22.1.2019. Analogisen säädön verkkokurssi, kehittyneet säätösuunnittelun menetelmät, oppitunti 12. Aalto-yliopisto . Viitattu 22.1.2019. <https://coursebackup.aalto.fi/as/Verkkokurssit/AS-74.2111/kehittyneet/oppitunti12/PIDmod.html>
- Savolainen, J. & Vaittinen, R. 1997. Sääntötekniikan perusteita. Helsinki: Opetushallitus.

Siirtofunktio. 2011. Analogisen säädön verkkokurssi, oppitunti 3, siirtofunktio. Aalto-yliopisto. Viitattu 15.3.2019. <https://coursebackup.aalto.fi/as/Verkkokurssit/AS-74.2111/mallit/oppitunti3/siirtofunktio.html>

Valmet DNA Suunnittelukurssi. 2015. Valmet Oy:n luoma kurssimateriaali. Valmet Oy.

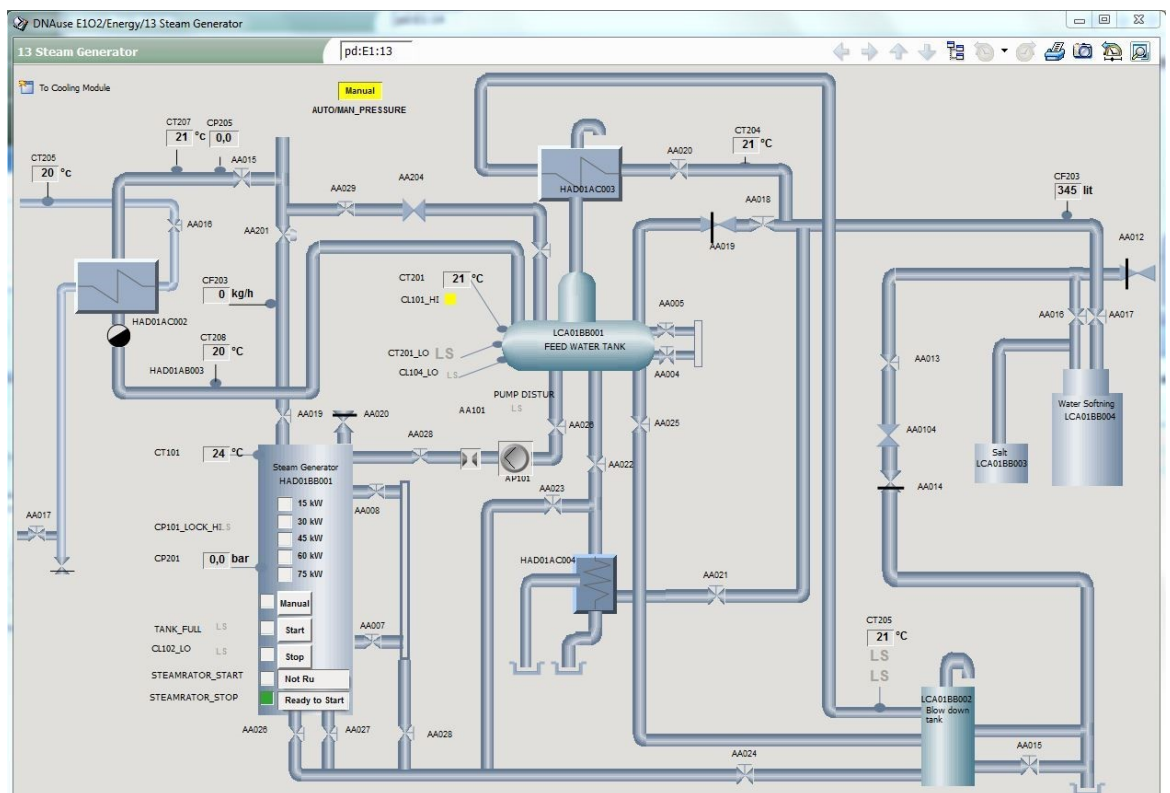
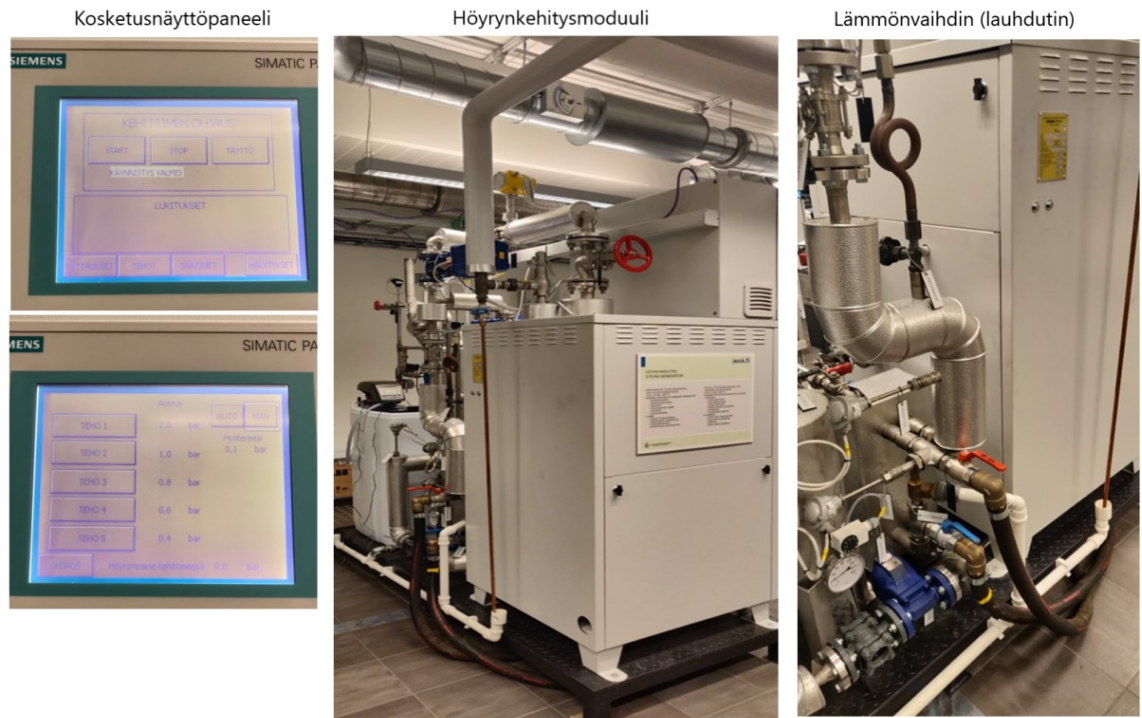
VanDoren, V. 2015. Overcoming process deadtime with smith predictor. CFE Median omistaman Control Engineering verkkosivun julkaisema tieteellinen artikkeli. CFE Media. Viitattu 22.1.2019. <https://www.controleng.com/articles/overcoming-process-deadtime-with-a-smith-predictor>

Viiveellisten systeemien säätö. 2011. Analogisen säädön verkkokurssi, oppitunti 8, viiveellisten systeemien säätö. Aalto-yliopisto. Viitattu 14.3.2019. <http://autsys.aalto.fi/pub/control.tkk.fi/Kurssit/Verkkokurssit/AS-74.2111/taajuusanalyysi/oppitunti8/viive.html>

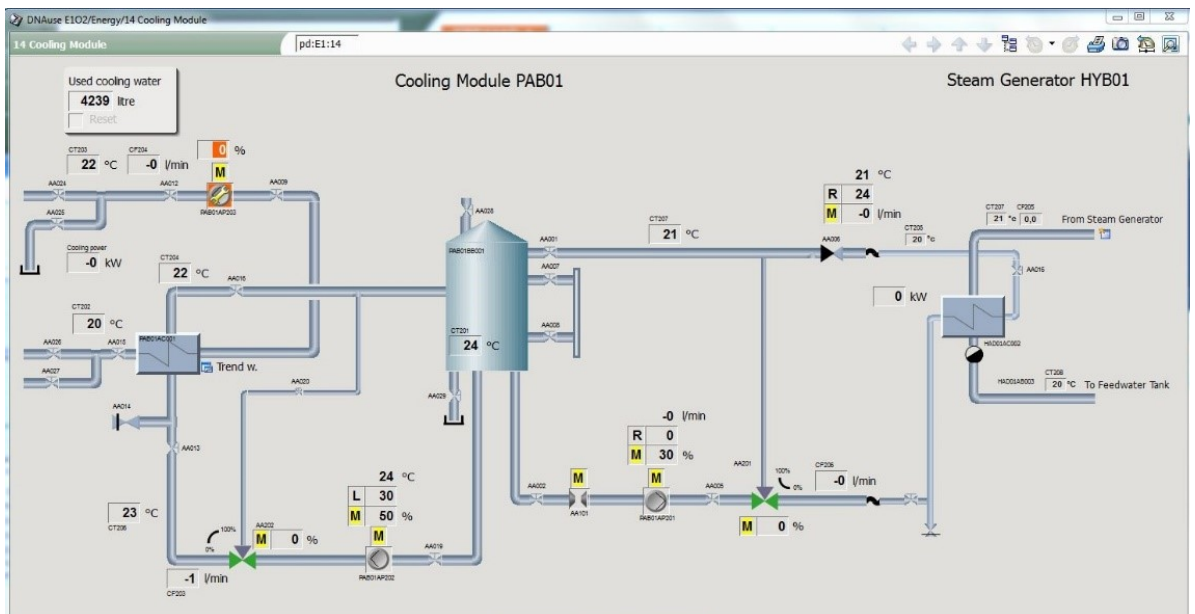


# Liitteet

## Liite 1. Höyrykehitysmoduuli



## Liite 2. Jäähdytysmoduuli



## Liite 3. Prosessin valmistelu koeajoihin

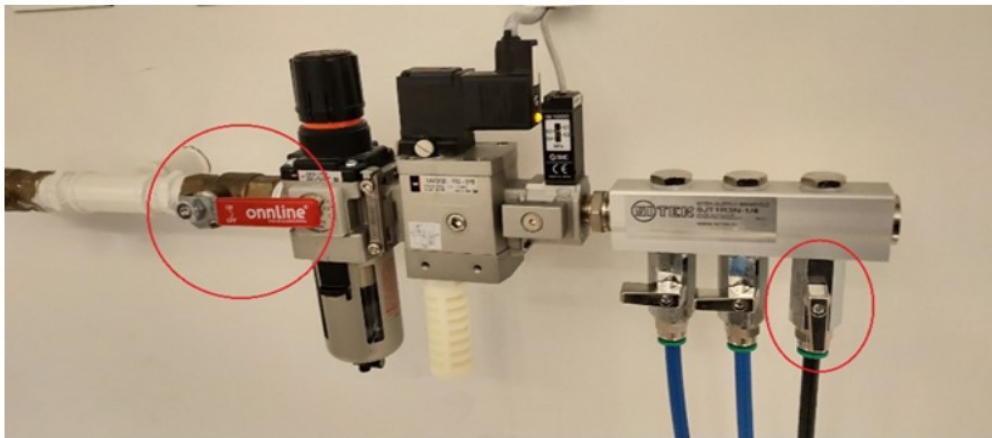
Profibus DP kytkettynä



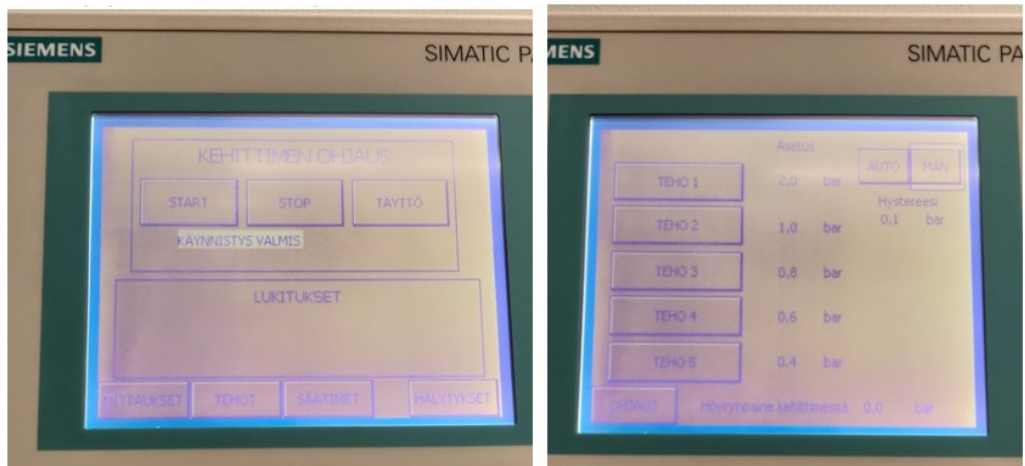
Paineilmasyötön kytkin päällä



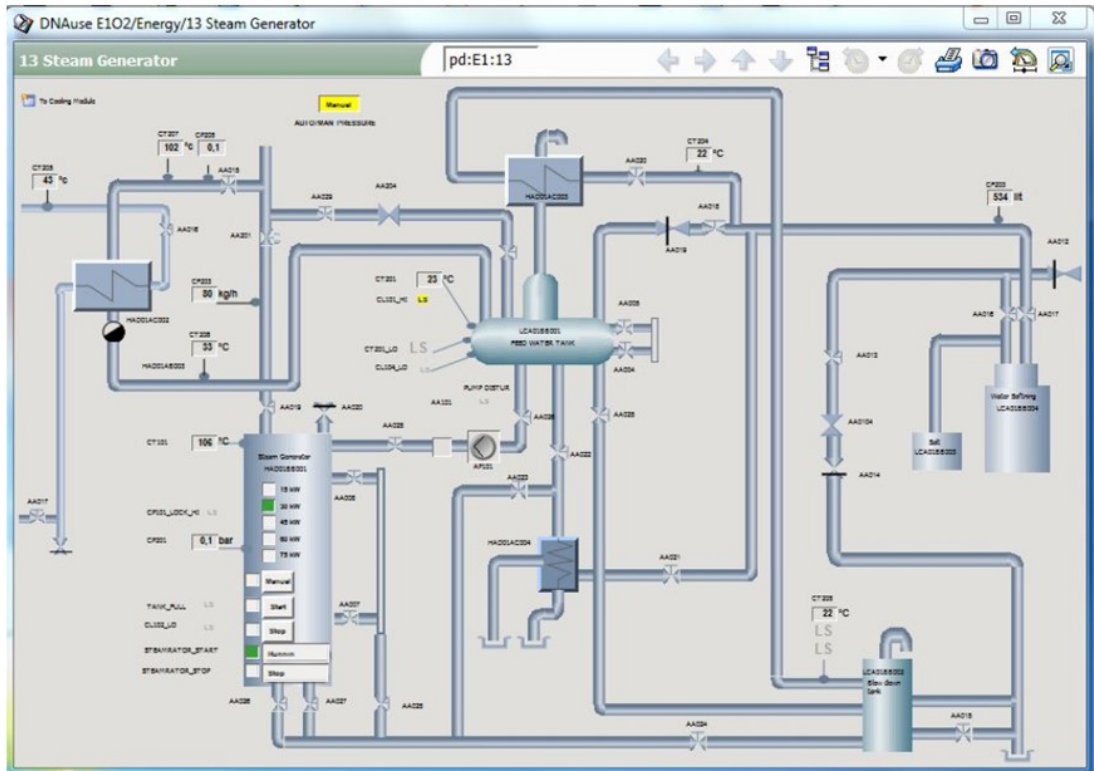
Jakotukin venttiilit avattuina



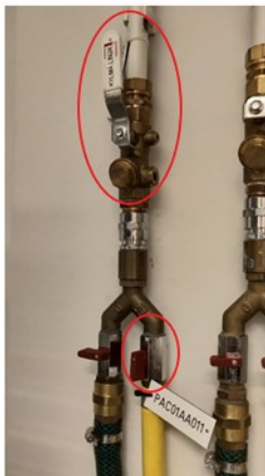
Höyrykehittimen käynnistäminen ja tehojen valinta



## Höyrykehitin lämmitettynä ja moduuli ajovalmiina



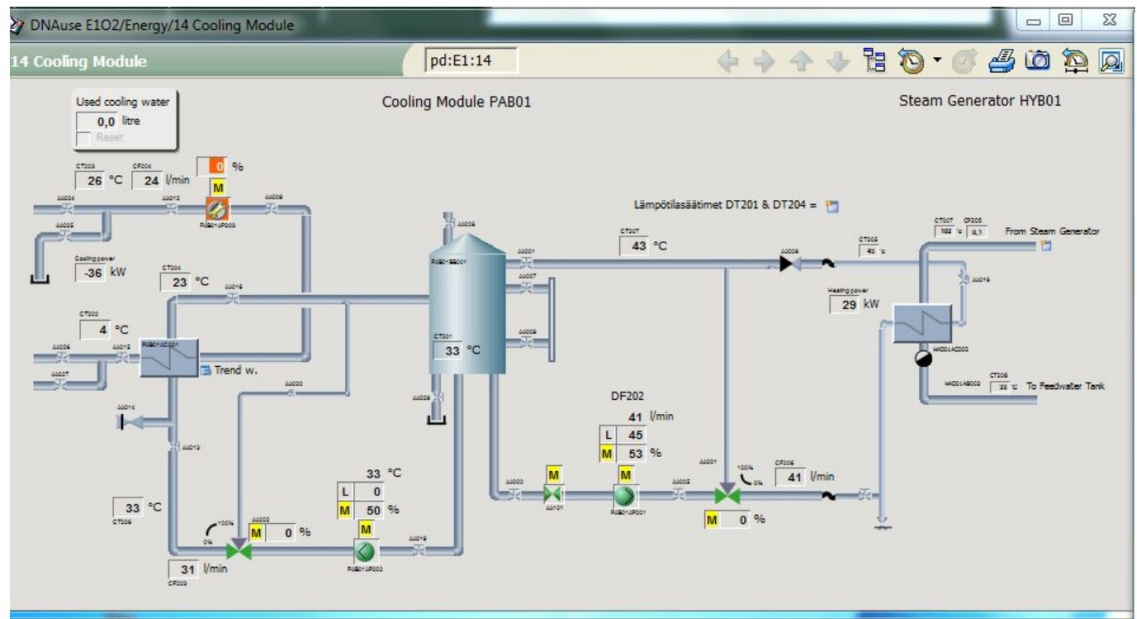
Kylmävesilinjan  
venttiilit avattuina

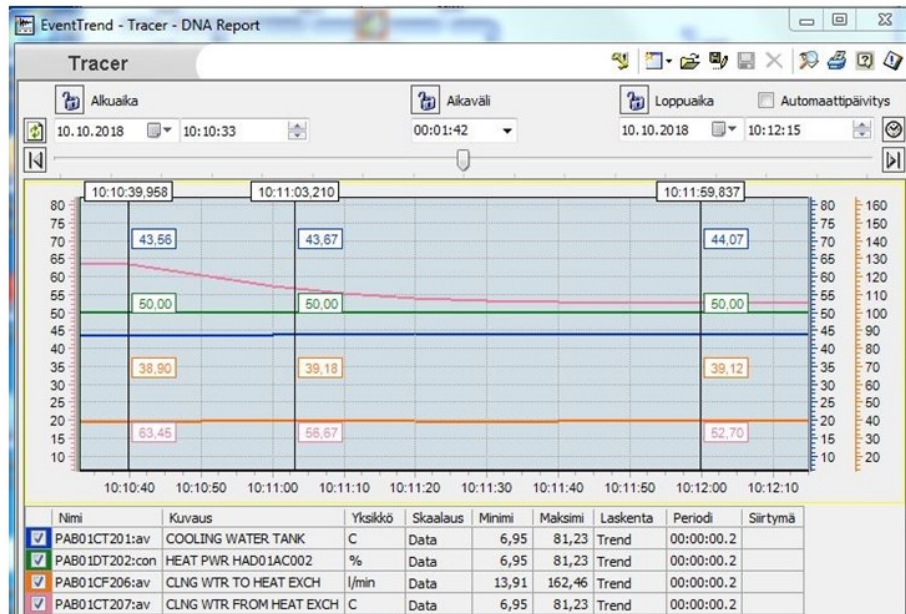


Käsiventtiili PAB01AA026 (Jäähdytystehon säätö)

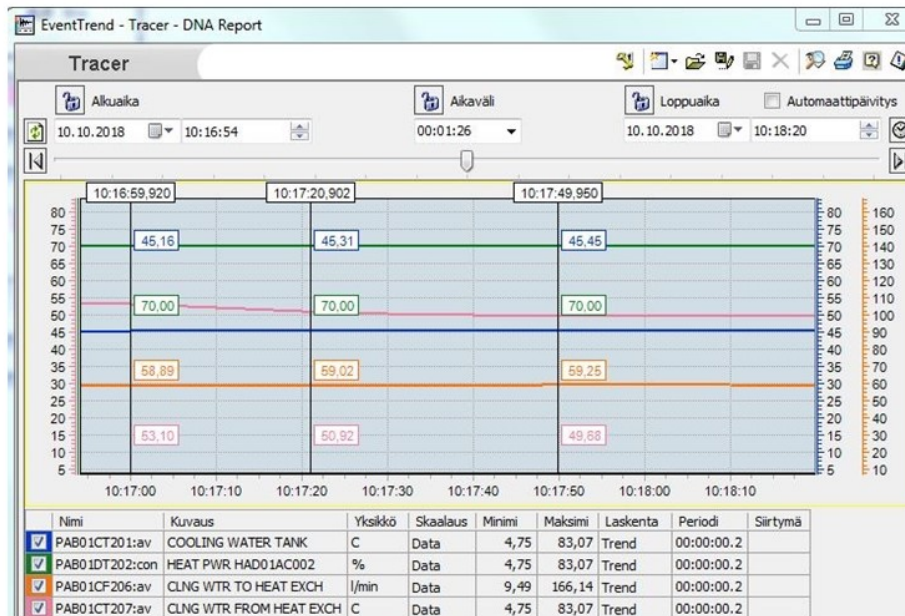


Jäähdytysmoduuli ajovalmiina prosessikokeita varten ja tasaantunut varaajan lämpötila

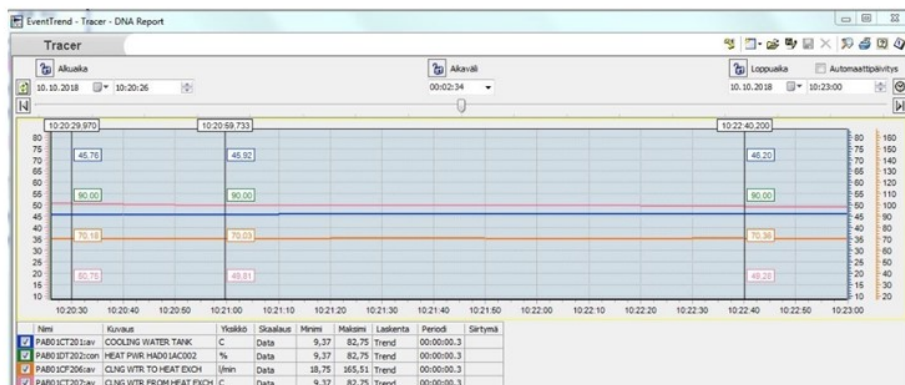


Liite 4. Askelvastekokeet 1,  $G_T$ :n vahvistuksen ja aikavakion selvittäminen.

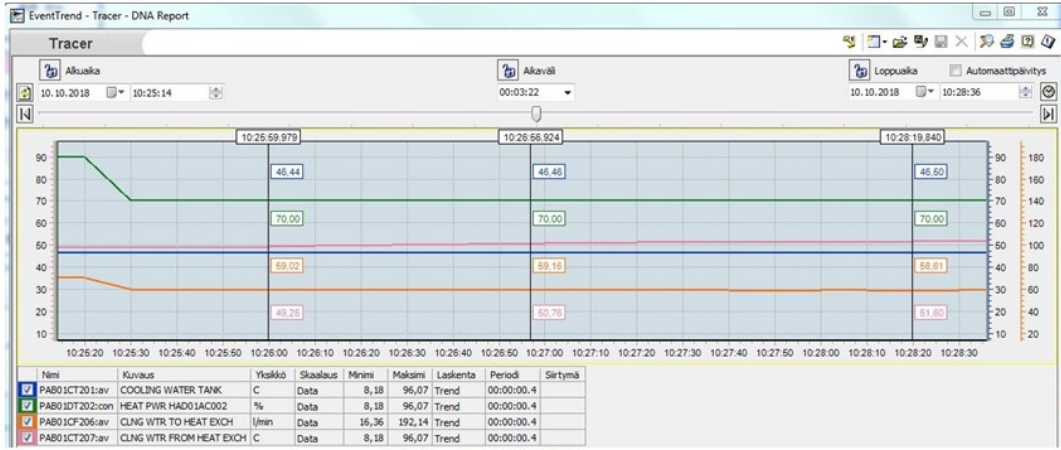
Askelmuutos 30%--&gt;50%



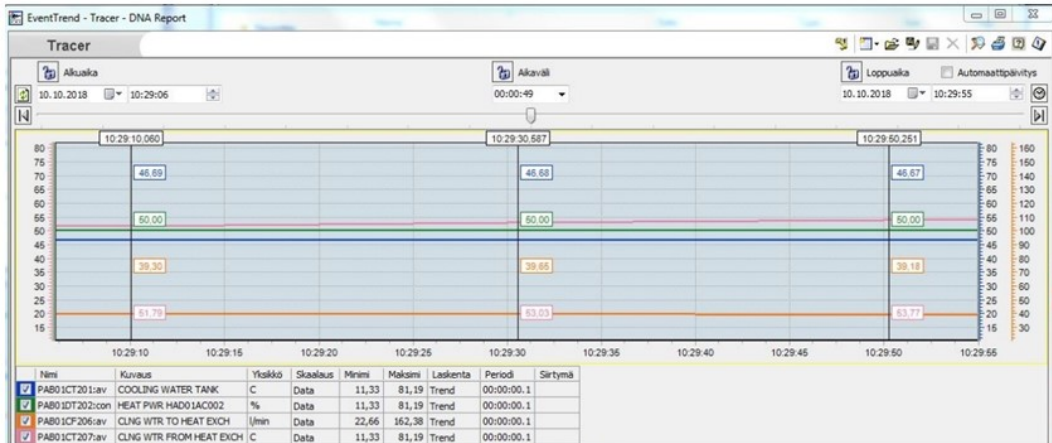
Askelmuutos 50--&gt;70%



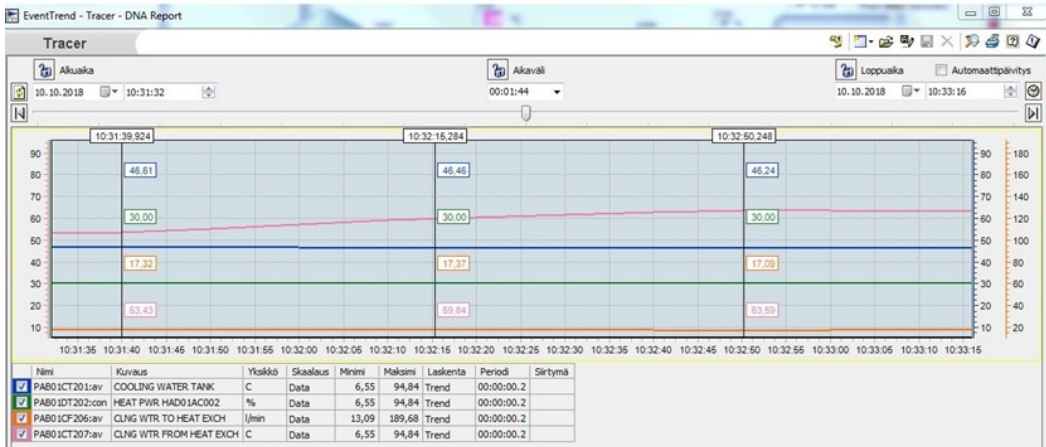
Askelmuutos 70--&gt; 90



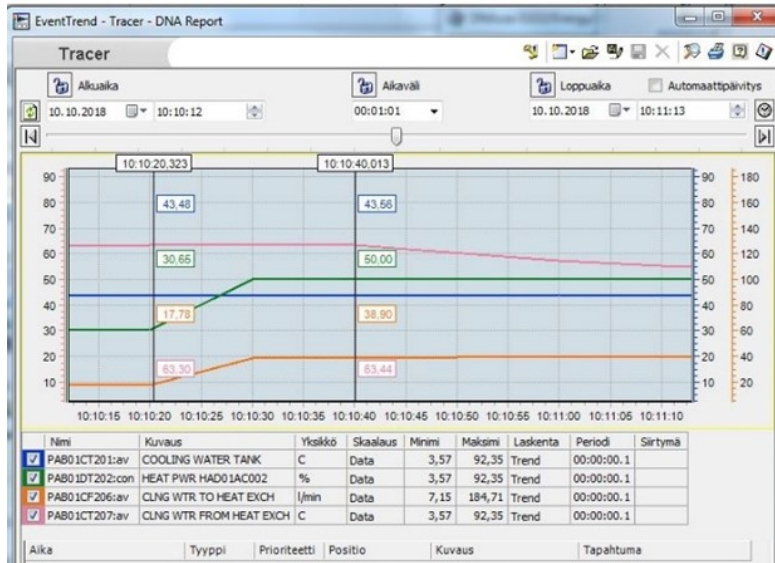
Askelmuutos 90%-->70%



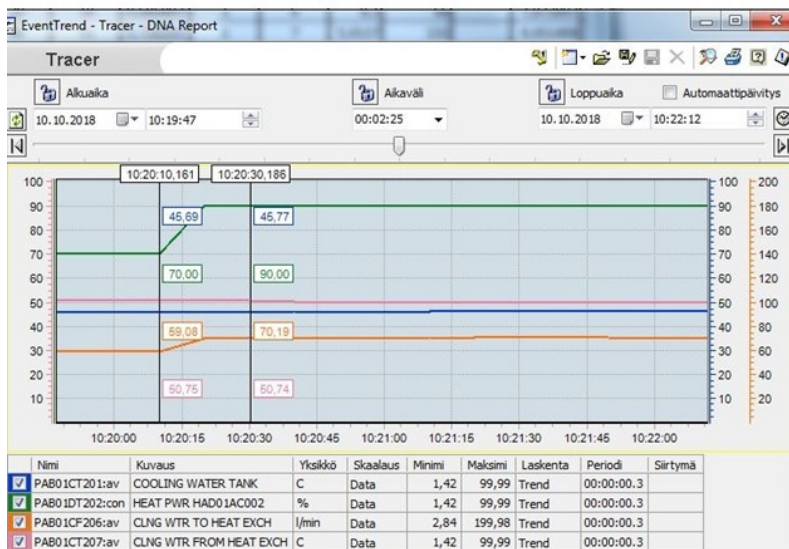
Askelmuutos 70%-->50%



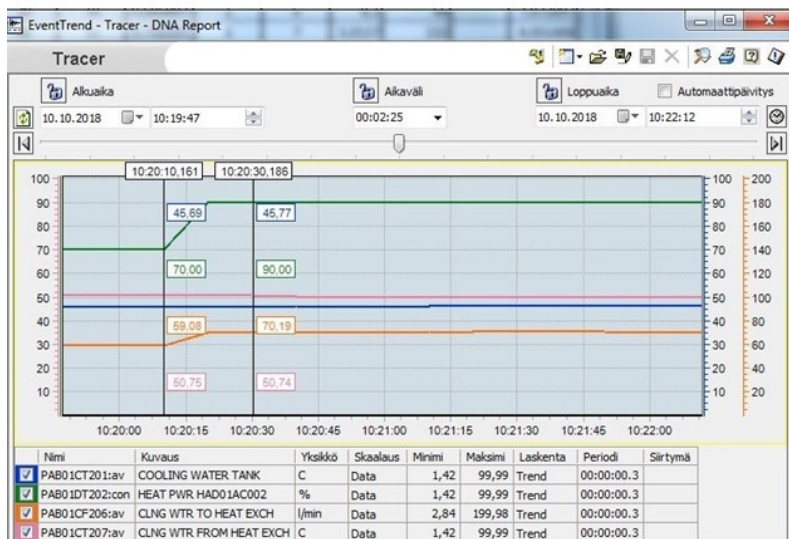
Askelmuutos 50%-->30%

Liite 5. Askelvastekokeet 1,  $G_T$ :n viiveen  $L$  selvittämistä.

Askelmuutos 30 -&gt; 50%

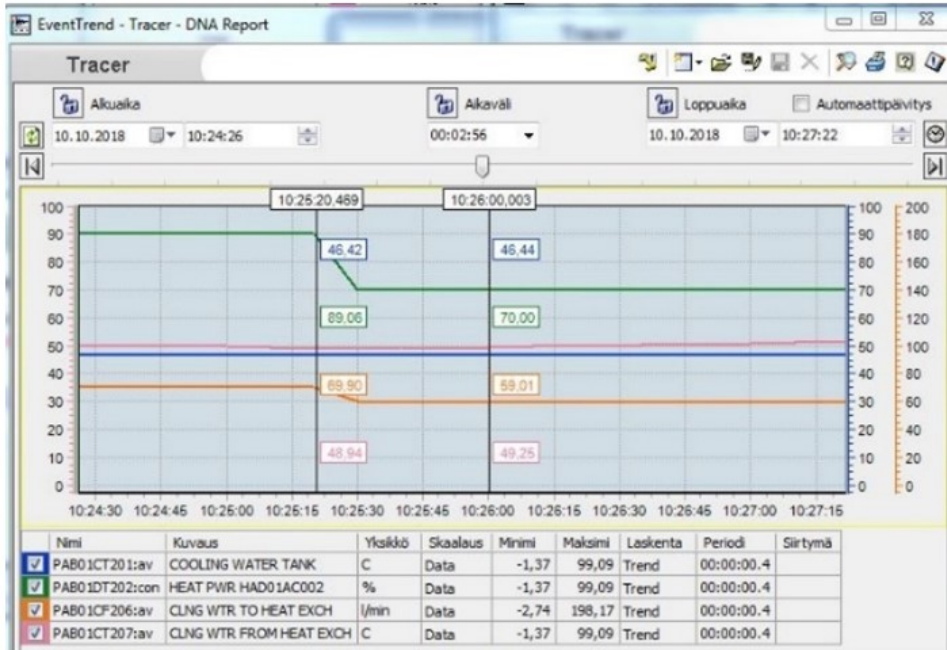


Askelmuutos 50% -&gt; 70%

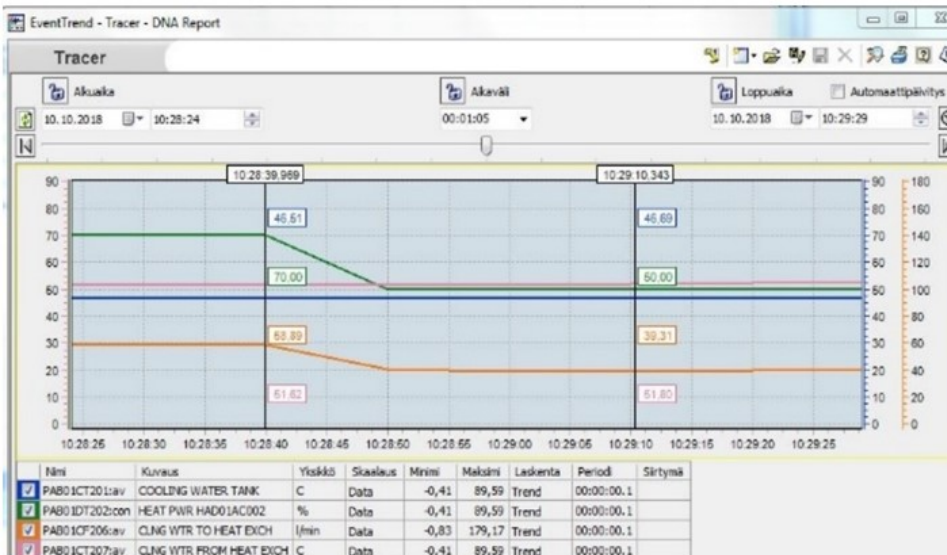


Askelmuutos 70% -&gt; 90%

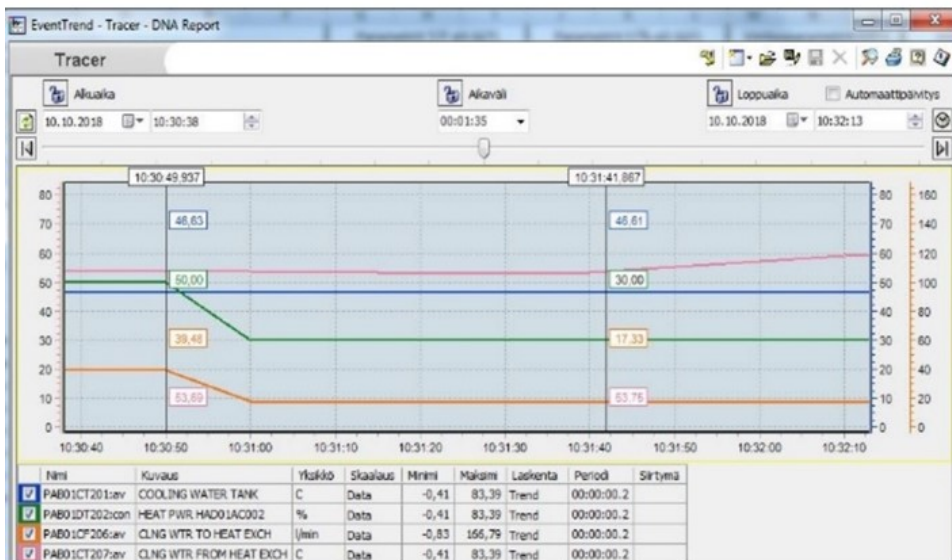




Askelmuutos 90%→70%

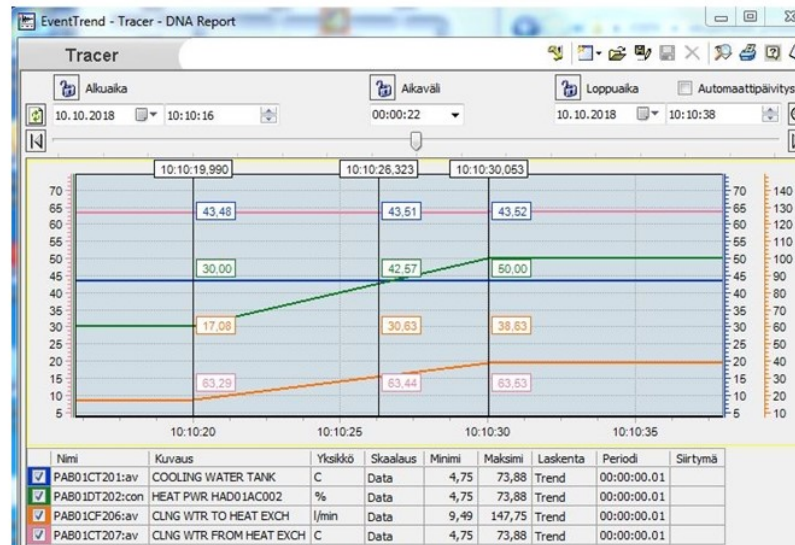


Askelmuutos 70%→50%

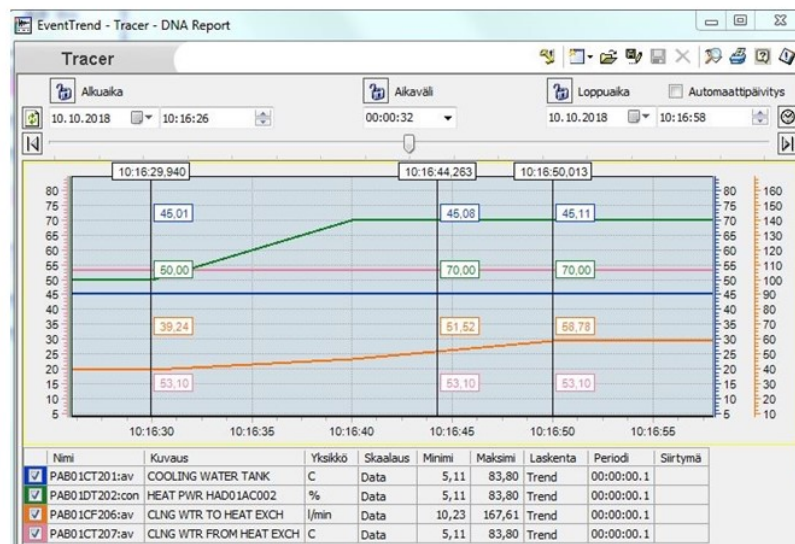


Askelmuutos 50%→30%

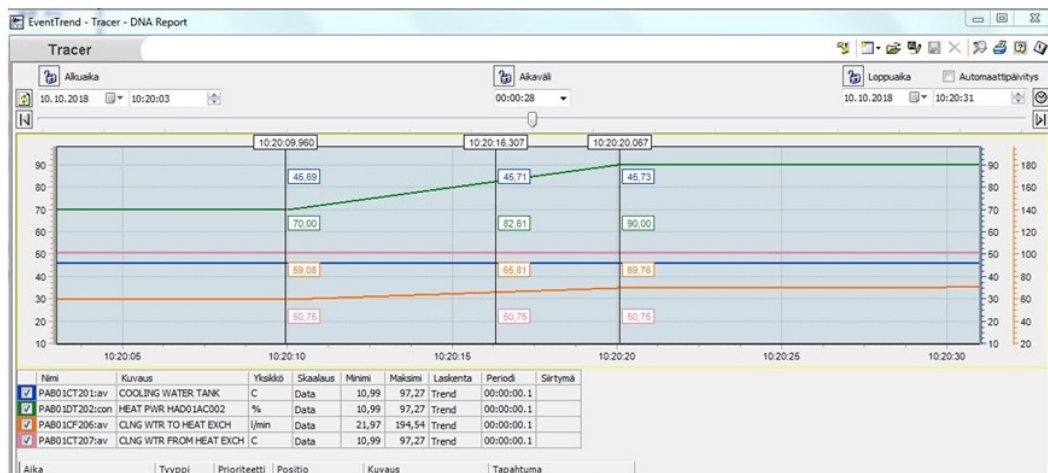
Liite 6. Askelvastekokeet 1.  $G_F$ : n aikavakion ja vahvistuksen arviointia



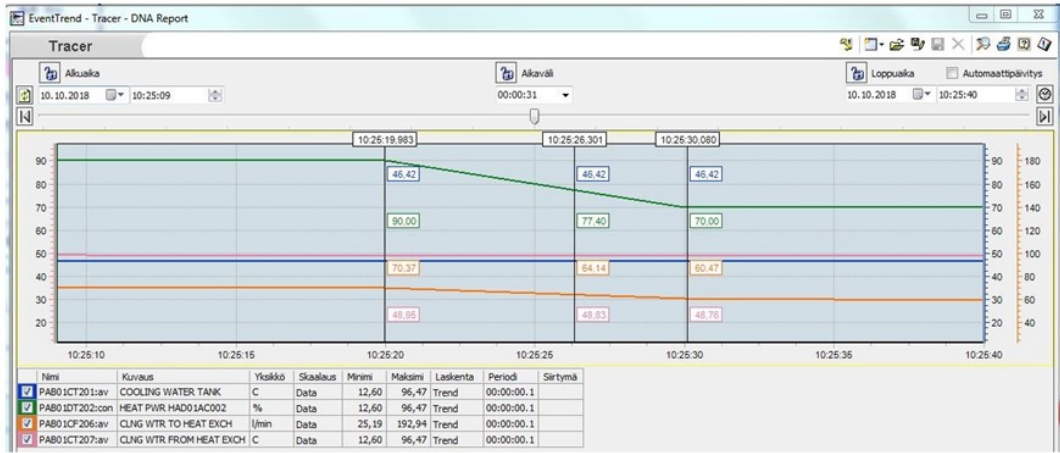
Askelmuutos 30%→50%



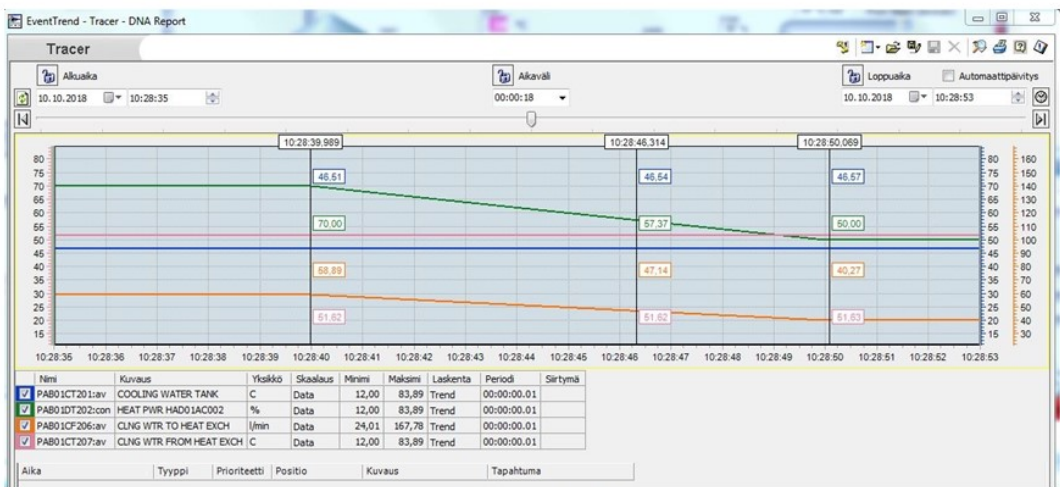
Askelmuutos 50%→70%



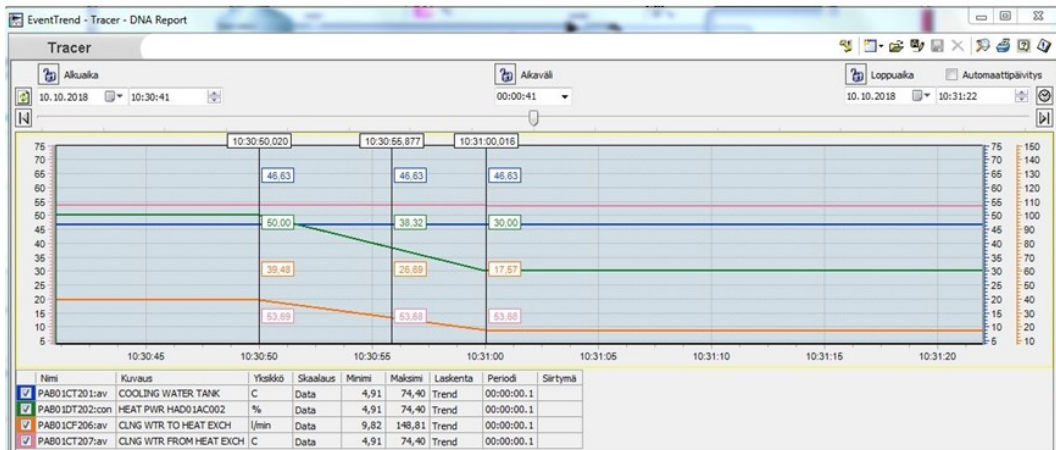
Askelmuutos 70%→90%



Askelmuutos 90%-->70%



Askelmuutos 70%>50%



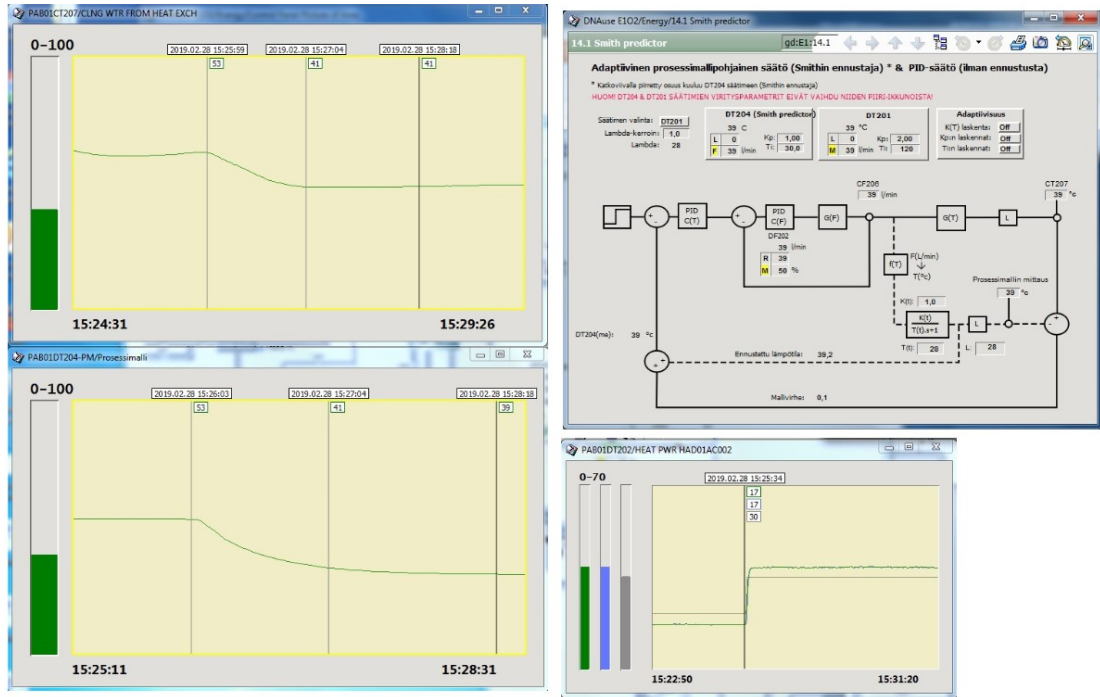
Askelmuutos 50->30%



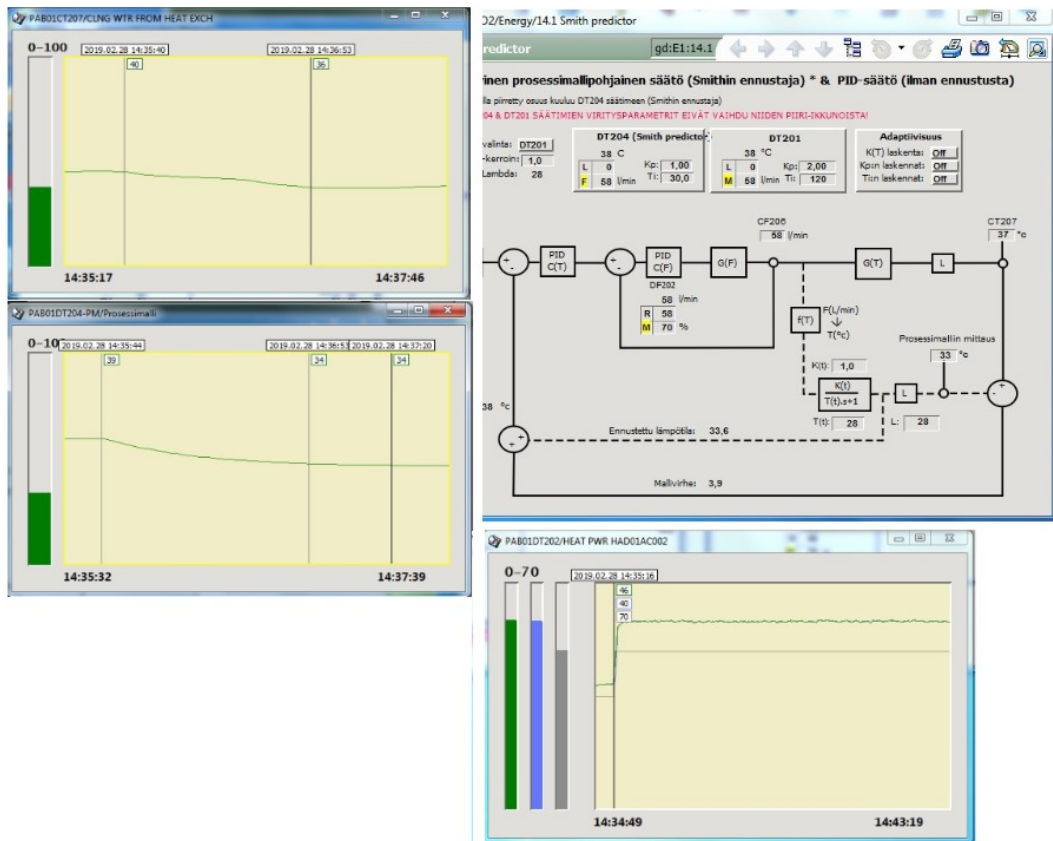


Liite 8.  $G_T: n$  mallin hyväksi toteaminen

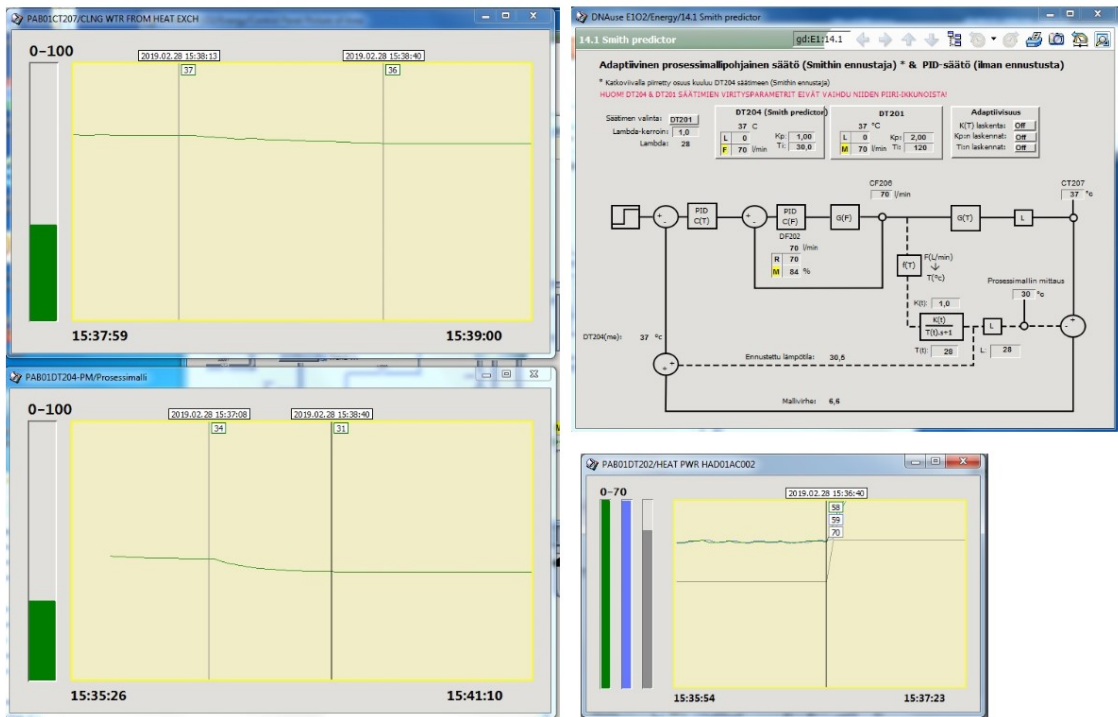
Lämpötilan vaste vs. prosessimallin laskema vaste, askelmuutos pumpulle 30% → 50%



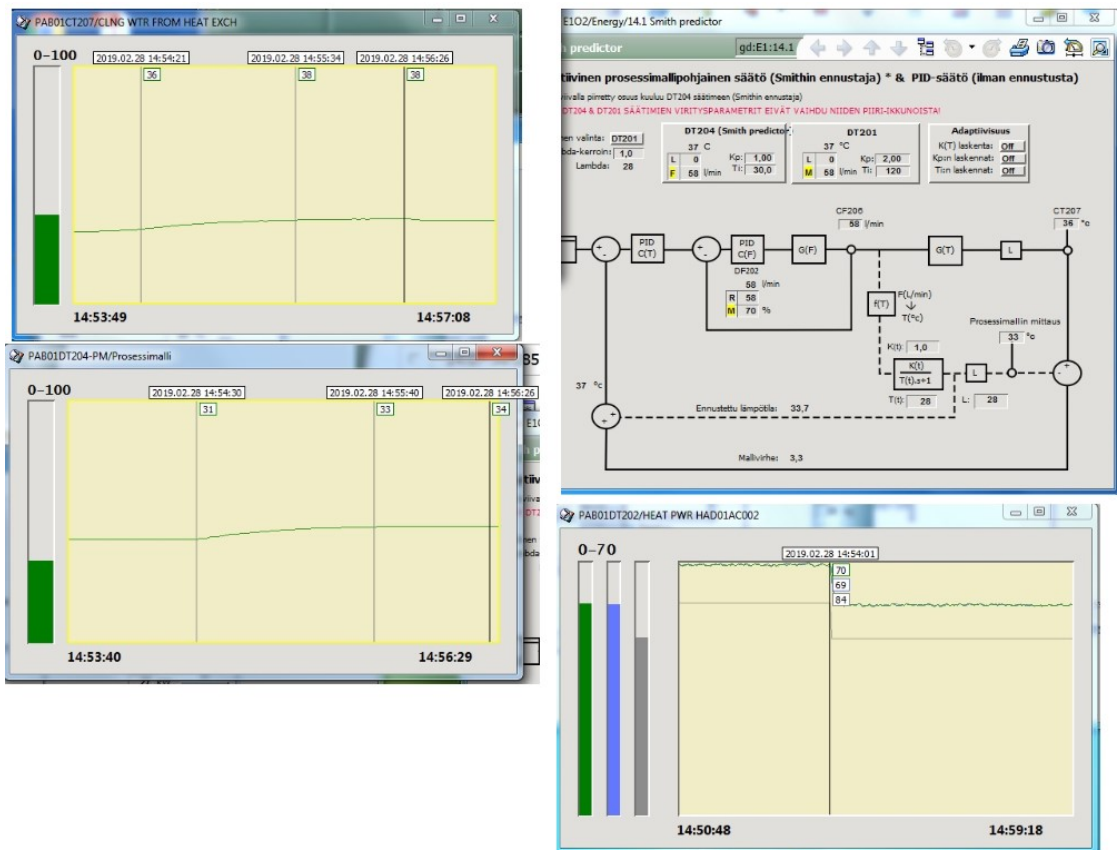
Lämpötilan vaste vs. prosessimallin laskema vaste, askelmuutos pumpulle 50% → 70%



Lämpötilan vaste vs. prosessimallin laskema vaste, askelmuutos pumpulle 70% → 84%



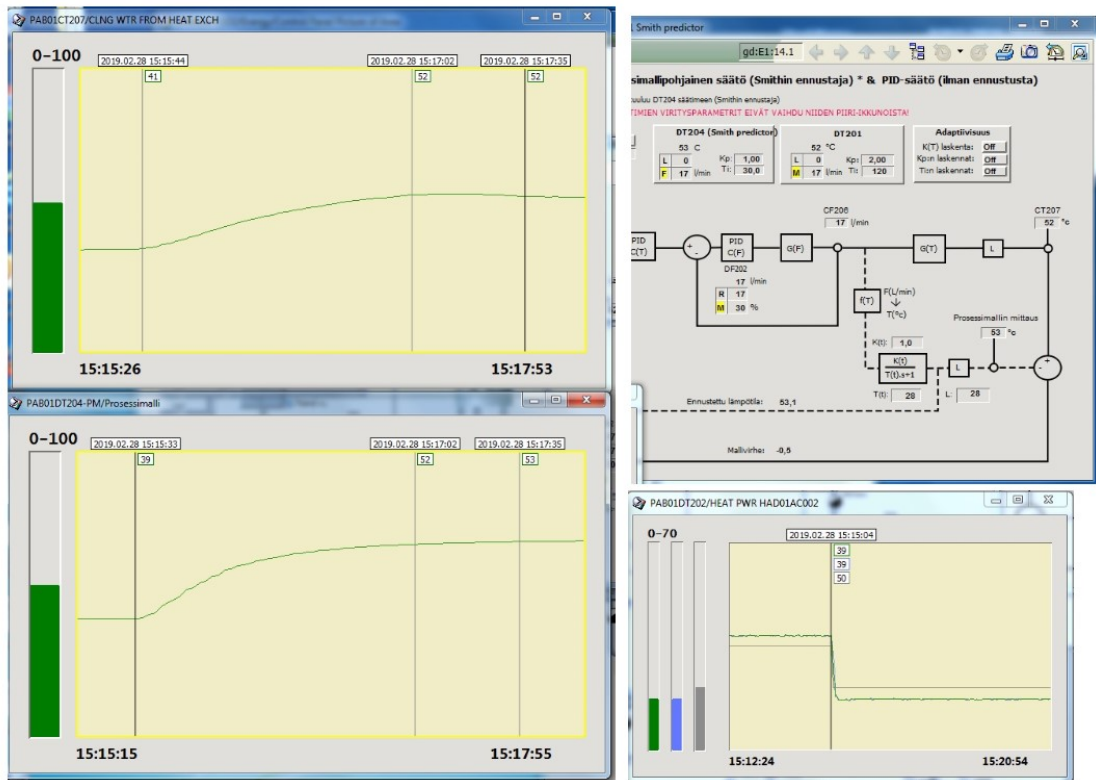
Lämpötilan vaste vs. prosessimallin laskema vaste, askelmuutos pumpulle 84% → 70%



Lämpötilan vaste vs. prosessimallin laskema vaste, askelmuutos pumpulle 70% → 50%

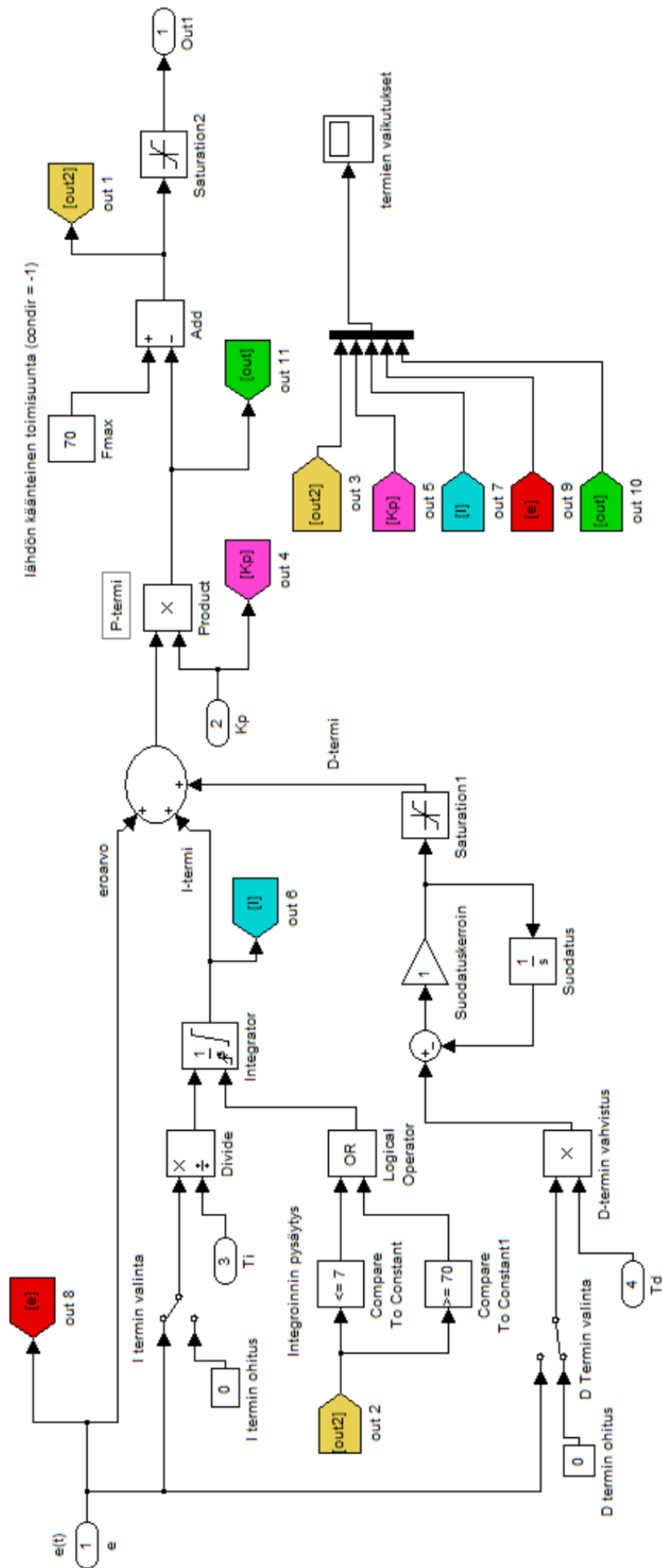


Lämpötilan vaste vs. prosessimallin laskema vaste, askelmuutos pumpulle 50% → 30%

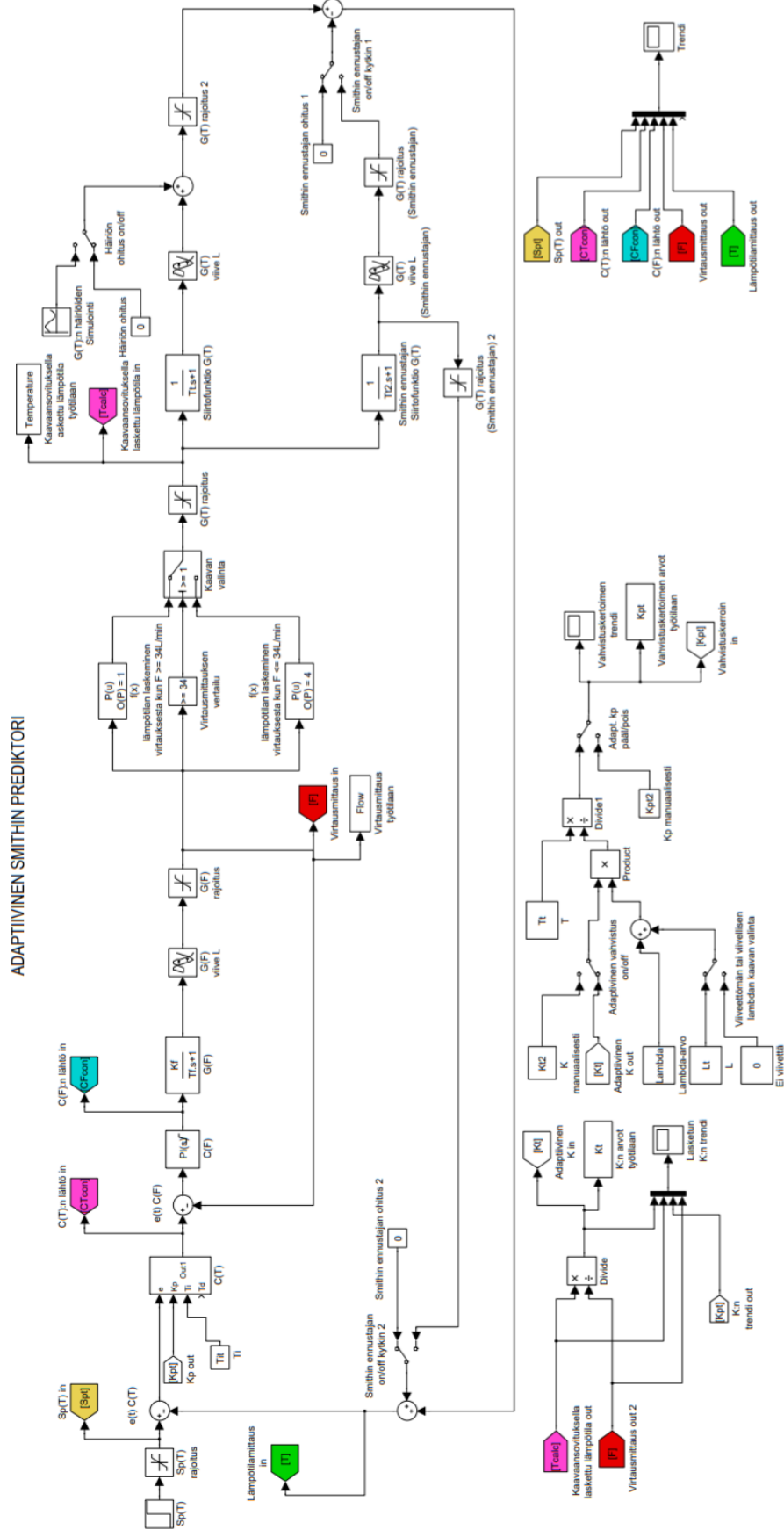




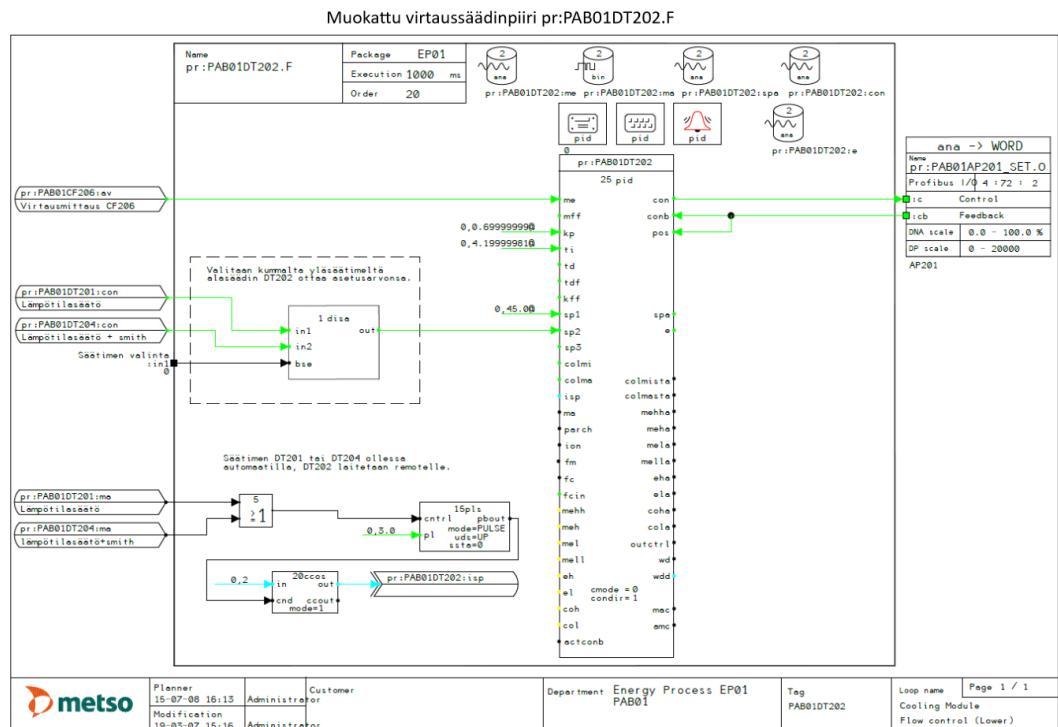
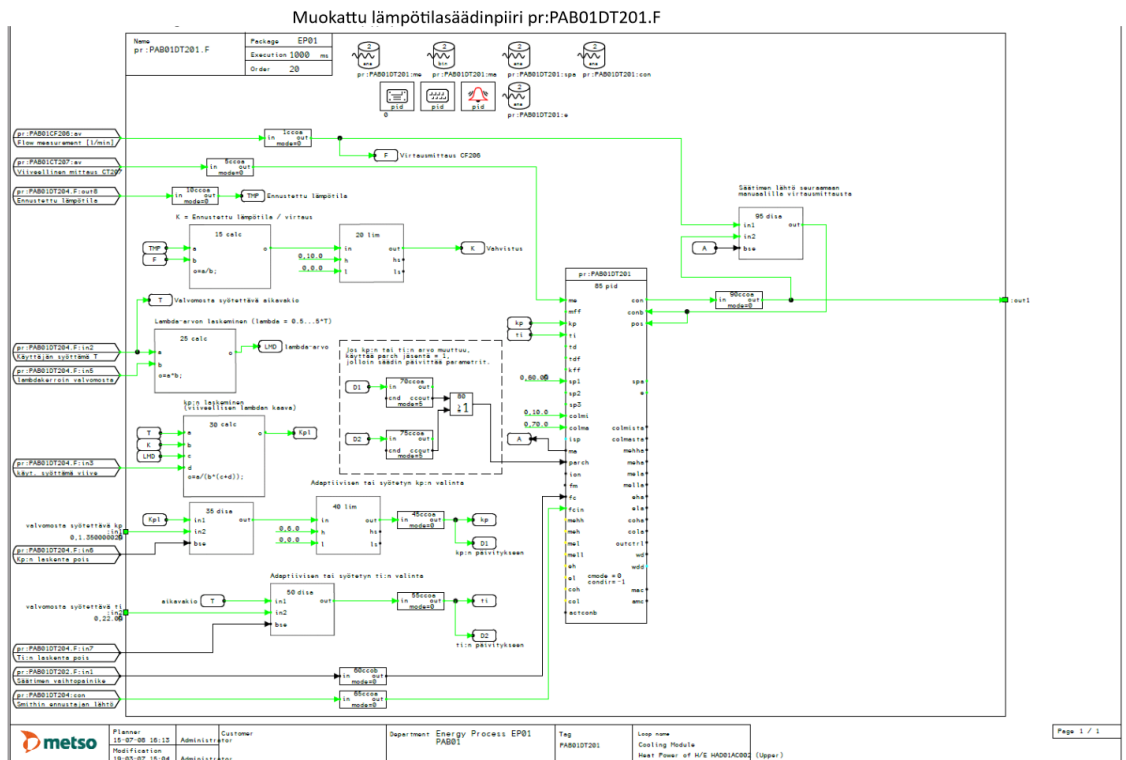
Liite 9. Simulink-malliin luotu lämpötilasäädin



Liite 10. Simulink-malliin luotu simulaattori

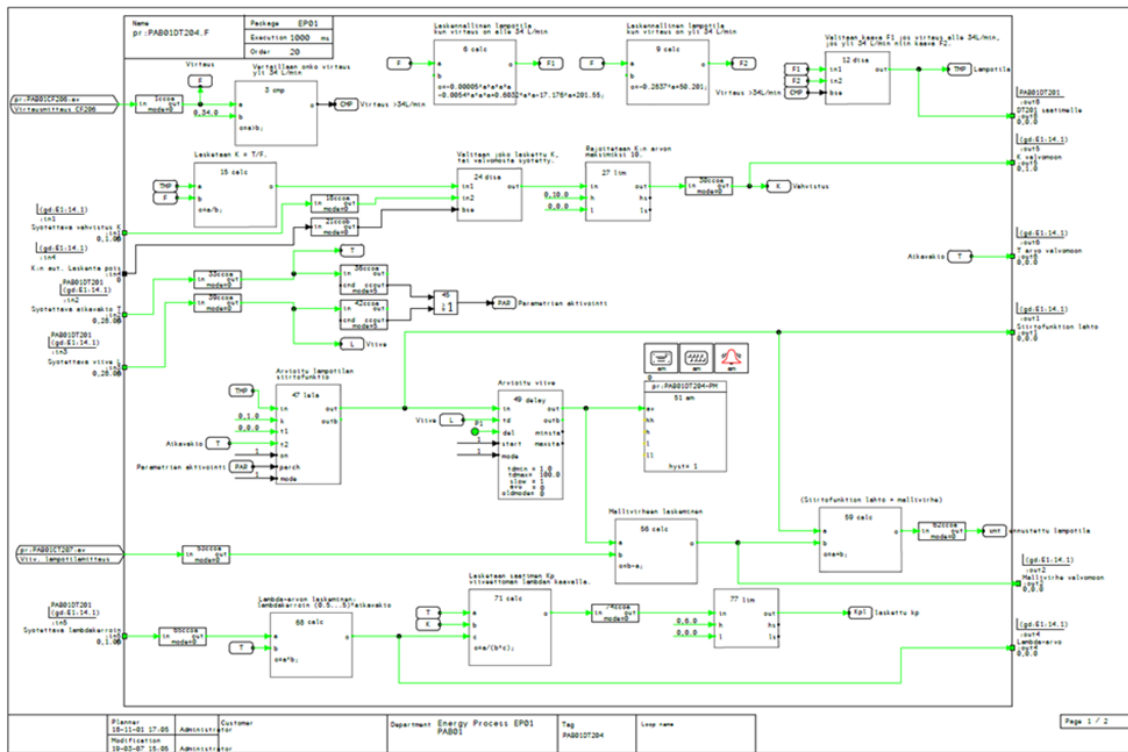


Liite 11. Muokatut säätöpiirit "pr:PAB01DT201.F" ja "pr:PAB01DT202.F"

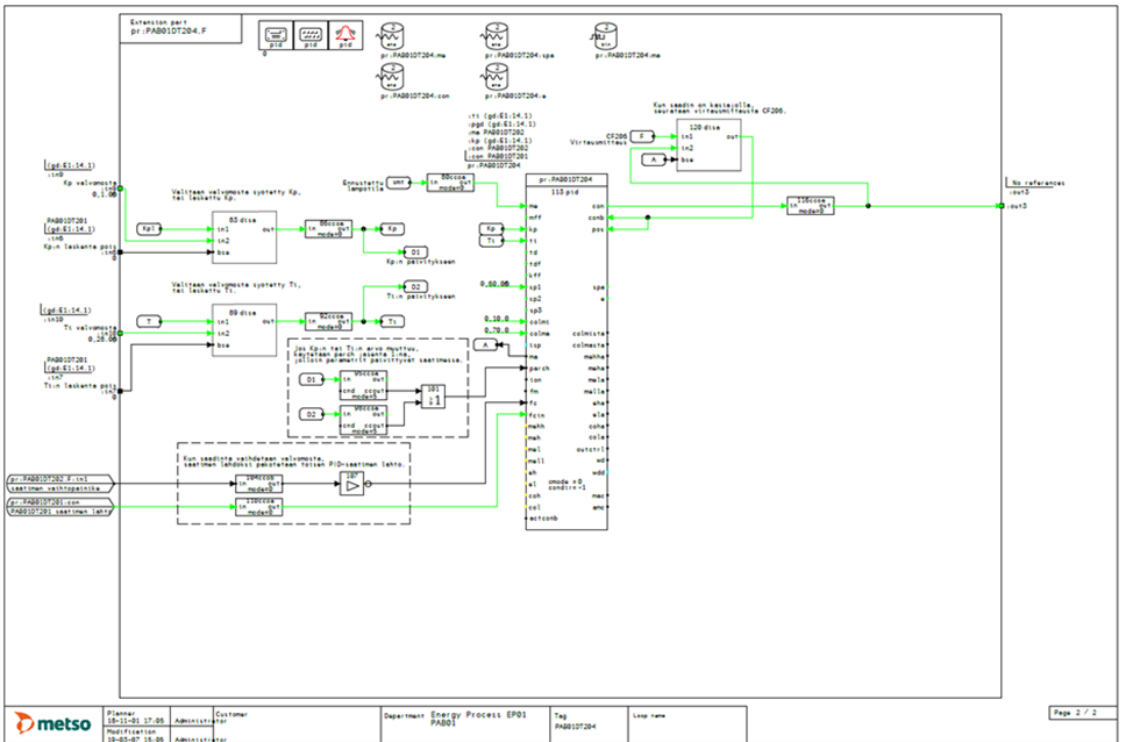


Liite 12. Säätiöpiirin pr:PAB01DT204.F” (Smithin ennustaja) FbCAD-koodi

PAB01DT204 sivu 1



PAB01DT204 sivu 2



## Liite 13. Säätimen PAB01DT204 konfigurointi

Editing attributes of PID

| Prompt                   | Value         |
|--------------------------|---------------|
| EXECUTION ORDER          | 110           |
| DIRECT ACCESS PORT NAME  | pr:PAB01DT204 |
| pu P-TERM IN USE         | 1             |
| sqv SQUARING OF P-TERM   | 0             |
| IU I-TERM IN USE         | 1             |
| deu D-TERM IN USE        | 0             |
| ffu FEEDFW. CHANNEL USED | 0             |
| parx PARAM TO INTEGRATOR | 1             |
| cmode CONTROL MODE       | 0             |
| condir CONTROL DIRECTION | -1            |
| aftfm AFTER F MAN CONTR  | 0             |
| aftfc AFTER FORCED CONTR | 1             |
| fbact MEAS FB ACTION     | 2             |
| fbmask MEAS FB MASK      | 140           |
| meme MEAS SCALE MINIMUM  | 0.0           |
| mema MEAS SCALE MAXIMUM  | 100.0         |
| ffmi FEEDFORW.LOW LIMIT  | 0.0           |
| ffma FEEDFORW.HIGH LIMIT | 1.0           |
| comi CONTROL SCALE MINIM | 0.0           |
| coma CONTROL SCALE MAXIM | 70            |
| bias OUTPUT BIAS         | 0.0           |
| conch MAX RATE OF CONT C | 1.0           |
| slow CALCUL SLOWING RATE | 1             |
| sp2u SETPOINT 2 USED     | 1             |
| sp3u SETPOINT 3 USED     | 0             |
| track1 SETPOINT 1 TRACK  | 0             |
| track2 SETPOINT 2 TRACK  | 0             |
| track3 SETPOINT 3 TRACK  | 1             |
| cha1 REM OF 1.SP CHANGES | 0             |
| cha2 REM OF 2.SP CHANGES | 0             |
| cha3 REM OF 3.SP CHANGES | 0             |
| mau MEAS ALARMS USED     | 1             |
| eau ERROR ALARMS USED    | 0             |
| coau CONTROL ALARMS USED | 0             |
| ahys ALARM HYSTERESIS    | 1.0           |

Show Formulas    Function formula:     Typehelp    pid

OK    Cancel

Liite 14. Säätimen PAB01DT204 valvomoduulien konfigurointi

Positiomoduuli

Editing attributes of -CE\_PID

| Prompt                   | Value               |
|--------------------------|---------------------|
| TAG MODULE NAME          | PAB01DT204          |
| CONTROL ROOM IDENTIFIER  | E1                  |
| NAME TEXT 1(14char)      |                     |
| NAME TEXT 2(14char)      |                     |
| NAME TEXT 3(20char)      |                     |
| TAG_CODE 1(14char)       | HEAT PWR HAD01AC002 |
| TAG_CODE 2(14char)       | PAB01DT204          |
| TAG_CODE 3(14char)       |                     |
| INFO DISP HIERARCHY CODE |                     |
| OPERATING MODULE NAME    | PAB01DT204          |
| OPERABILITY OF TAG       | 1                   |
| SETPOINT1 OPERABILITY    | 1                   |
| SETPOINT2 OPERABILITY    | 0                   |
| SETPOINT3 OPERABILITY    | 0                   |
| OPERABILITY OF KP-PARAM  | 1                   |
| OPERABILITY OF TI-PARAM  | 1                   |
| OPERABILITY OF TD-PARAM  | 0                   |
| OPERABILITY OF TDF-PARAM | 0                   |
| OPERABILITY OF KFF-PARAM | 0                   |
| MEASUREMENT MINIM VALUE  | 0                   |
| MEASUREMENT MAXIM VALUE  | 100                 |
| NO OF DEC. IN MEAS.(0-5) | 0                   |
| UNIT OF MEAS VAL.(8char) | C                   |
| MIN VALUE OF CONTR SCALE | 0                   |
| MAX VALUE OF CONTR SCALE | 70                  |
| NO OF DEC. OF CONTR(0-5) | 0                   |
| UNIT OF CONTROL (8char)  | 1/min               |
| HIERARCHY CODE OF DISPL  | 0                   |
| FM (0=,1=ALM,2=MSG)      | 0                   |
| FC (0=,1=ALM,2=MSG)      | 0                   |
| MEHH(0=,1=ALM,2=MSG)     | 0                   |
| MEH (0=,1=ALM,2=MSG)     | 0                   |
| MEL (0=,1=ALM,2=MSG)     | 0                   |
| MELL(0=,1=ALM,2=MSG)     | 0                   |
| EH (0=,1=ALM,2=MSG)      | 0                   |
| EL (0=,1=ALM,2=MSG)      | 0                   |
| COH (0=,1=ALM,2=MSG)     | 0                   |
| COL (0=,1=ALM,2=MSG)     | 0                   |
| WD (0=,1=ALM,2=MSG)      | 1                   |
| MA OPERATOR TRACKING     | 0                   |
| SP1 OPERATOR TRACKING    | 0                   |
| SP2 OPERATOR TRACKING    | 0                   |
| SP3 OPERATOR TRACKING    | 0                   |
| ISP OPERATOR TRACKING    | 0                   |
| CON OPERATOR TRACKING    | 0                   |
| MEHH OPERATOR TRACKING   | 0                   |
| MEH OPERATOR TRACKING    | 0                   |
| MEL OPERATOR TRACKING    | 0                   |
| MELL OPERATOR TRACKING   | 0                   |
| COH OPERATOR TRACKING    | 0                   |
| COL OPERATOR TRACKING    | 0                   |
| EH OPERATOR TRACKING     | 0                   |
| EL OPERATOR TRACKING     | 0                   |
| KP OPERATOR TRACKING     | 0                   |
| TI OPERATOR TRACKING     | 0                   |
| TD OPERATOR TRACKING     | 0                   |
| TDF OPERATOR TRACKING    | 0                   |
| KFF OPERATOR TRACKING    | 0                   |
| MASK OPERATOR TRACKING   | 0                   |
| OPERATING AREA(1-64)     | 1                   |

Show Formulas    Function formula:    Typehelp

OK    Cancel

Operointimoduuli

Editing attributes of -OD\_PID

| Prompt                    | Value      |
|---------------------------|------------|
| OPERATING MODULE NAME     | PAB01DT204 |
| CONTROL ROOM IDENTIFIER   | E1         |
| TAG CODE OF TAG MODULE    | PAB01DT204 |
| DIRECTORY IDENTIFIER      | pr         |
| TAG CODE OF PR.STD.DATA   | PAB01DT204 |
| TAG CODE OF ALARM DATA    | PAB01DT204 |
| SELECTION OF TEXT 1(0-6)  | 3          |
| SELECTION OF TEXT 2(0-6)  | 4          |
| NO OF DEC. IN MEAS.(0-5)  | 0          |
| NO OF DEC. OF OUTPUT(0-5) | 0          |

Show Formulas    Function formula:    Typehelp

OK    Cancel

Hälytysmoduuli

Editing attributes of -AL\_PID

| Prompt                  | Value      |
|-------------------------|------------|
| EVENT MODULE NAME       | PAB01DT204 |
| CONTROL ROOM IDENTIFIER | E1         |
| DIRECTORY IDENTIFIER    | pr         |
| ALARM AREA (1-64)       | 4          |
| MESSAGE AREA (1-64)     | 4          |
| FM (0=,1=ALM,2=MSG)     | 0          |
| FC (0=,1=ALM,2=MSG)     | 0          |
| MEHH(0=,1=ALM,2=MSG)    | 0          |
| MEH (0=,1=ALM,2=MSG)    | 0          |
| MEL (0=,1=ALM,2=MSG)    | 0          |
| MELL(0=,1=ALM,2=MSG)    | 0          |
| EH (0=,1=ALM,2=MSG)     | 0          |
| EL (0=,1=ALM,2=MSG)     | 0          |
| COH (0=,1=ALM,2=MSG)    | 0          |
| COL (0=,1=ALM,2=MSG)    | 0          |
| WD (0=,1=ALM,2=MSG)     | 1          |
| 1=0->1, 2=1->0 ALARM    | 1          |
| -ACKN.REQ.(0=OFF,1=ON)  | 1          |
| -ALARM PRIORITY (1-2)   | 2          |
| -USER (1-8)             | 1          |
| -FREE GROUPING (10x16)  | 1          |
| 1=0->1, 2=1->0 MESSAGE  | 1          |
| -ACKN.REQ.(0=OFF,1=ON)  | 1          |
| -USER (1-8)             | 1          |
| -FREE GROUPING (10x16)  | 1          |

Show Formulas    Function formula:    Typehelp

OK    Cancel

Liite 15. Säätimen PAB01DT204 historiamoduulien konfigurointi

Asetusarvo, kun säädin on automaattilla (spa)

| Prompt              | Value               |
|---------------------|---------------------|
| Name                | PAB01DT204          |
| Long tag name       | PAB01DT204.spa      |
| Prefix              |                     |
| Main tag            |                     |
| Database loading    | ON                  |
| Collection variable | pr-PAB01DT204.spa   |
| Variable type       | ana                 |
| Port                |                     |
| Description         | HEAT PWR HAD01AC002 |
| Data source         | SDNA historian      |
| History collection  | ON                  |
| Department          | NFO                 |
| Process area        | COOLING MODULE      |
| Collection group    | 105-PD-SRA-101      |
| Unit                | %                   |
| Format              | F10.3               |
| Interpolation mode  | Interpolated        |
| Minimum             | 0                   |
| Lower low limit     | 0                   |
| Low limit           | 0                   |
| High limit          | 100                 |
| Higher high limit   | 100                 |
| Maximum             | 100                 |
| Repository          | IARepos105_01A      |
| Archiving           | ON                  |
| Data compression    |                     |
| Significance        | 0.01                |
| Time limit <->      | 3600                |
| Compression type    | Interpolated        |
| Rights              |                     |
| Read grant          | +                   |
| Read deny           | -                   |
| Write grant         | +                   |
| Write deny          | -                   |
| Operate grant       | +                   |
| Operate deny        | OPERATOR            |
| Audit trail         |                     |
| Audit trail mode    |                     |

Eroarvo (e)

| Prompt              | Value               |
|---------------------|---------------------|
| Name                | PAB01DT204          |
| Long tag name       | PAB01DT204.e        |
| Prefix              |                     |
| Main tag            |                     |
| Database loading    | ON                  |
| Collection variable | pr-PAB01DT204.e     |
| Variable type       | ana                 |
| Port                |                     |
| Description         | HEAT PWR HAD01AC002 |
| Data source         | SDNA historian      |
| History collection  | ON                  |
| Department          | NFO                 |
| Process area        | COOLING MODULE      |
| Collection group    | 105-PD-E-101        |
| Unit                | %                   |
| Format              | F10.3               |
| Interpolation mode  | Interpolated        |
| Minimum             | 0                   |
| Lower low limit     | 0                   |
| Low limit           | 0                   |
| High limit          | 100                 |
| Higher high limit   | 100                 |
| Maximum             | 100                 |
| Repository          | IARepos105_01A      |
| Archiving           | ON                  |
| Data compression    |                     |
| Significance        | 0.01                |
| Time limit <->      | 3600                |
| Compression type    | Interpolated        |
| Rights              |                     |
| Read grant          | +                   |
| Read deny           | -                   |
| Write grant         | +                   |
| Write deny          | -                   |
| Operate grant       | +                   |
| Operate deny        | OPERATOR            |
| Audit trail         |                     |
| Audit trail mode    |                     |

Mittaus (me)

| Prompt              | Value               |
|---------------------|---------------------|
| Name                | PAB01DT204          |
| Long tag name       | PAB01DT204.me       |
| Prefix              |                     |
| Main tag            |                     |
| Database loading    | ON                  |
| Collection variable | pr-PAB01DT204.me    |
| Variable type       | ana                 |
| Port                |                     |
| Description         | HEAT PWR HAD01AC002 |
| Data source         | SDNA historian      |
| History collection  | ON                  |
| Department          | NFO                 |
| Process area        | COOLING MODULE      |
| Collection group    | 105-PD-MA-101       |
| Unit                | %                   |
| Format              | F10.3               |
| Interpolation mode  | Interpolated        |
| Minimum             | 0                   |
| Lower low limit     | 0                   |
| Low limit           | 0                   |
| High limit          | 100                 |
| Higher high limit   | 100                 |
| Maximum             | 100                 |
| Repository          | IARepos105_01A      |
| Archiving           | ON                  |
| Data compression    |                     |
| Significance        | 0.01                |
| Time limit <->      | 3600                |
| Compression type    | Interpolated        |
| Rights              |                     |
| Read grant          | +                   |
| Read deny           | -                   |
| Write grant         | +                   |
| Write deny          | -                   |
| Operate grant       | +                   |
| Operate deny        | OPERATOR            |
| Audit trail         |                     |
| Audit trail mode    |                     |

Säätimen lähtö (con)

| Prompt              | Value               |
|---------------------|---------------------|
| Name                | PAB01DT204          |
| Long tag name       | PAB01DT204.con      |
| Prefix              |                     |
| Main tag            |                     |
| Database loading    | ON                  |
| Collection variable | pr-PAB01DT204.con   |
| Variable type       | ana                 |
| Port                |                     |
| Description         | HEAT PWR HAD01AC002 |
| Data source         | SDNA historian      |
| History collection  | ON                  |
| Department          | NFO                 |
| Process area        | COOLING MODULE      |
| Collection group    | 105-PD-COM-101      |
| Unit                | %                   |
| Format              | F10.3               |
| Interpolation mode  | Interpolated        |
| Minimum             | 0                   |
| Lower low limit     | 0                   |
| Low limit           | 0                   |
| High limit          | 100                 |
| Higher high limit   | 100                 |
| Maximum             | 100                 |
| Repository          | IARepos105_01A      |
| Archiving           | ON                  |
| Data compression    |                     |
| Significance        | 0.01                |
| Time limit <->      | 3600                |
| Compression type    | Interpolated        |
| Rights              |                     |
| Read grant          | +                   |
| Read deny           | -                   |
| Write grant         | +                   |
| Write deny          | -                   |
| Operate grant       | +                   |
| Operate deny        | OPERATOR            |
| Audit trail         |                     |
| Audit trail mode    |                     |

Tilatieto, onko säädin käsi- vai automaattijolla (ma)

| Prompt              | Value               |
|---------------------|---------------------|
| Name                | PAB01DT204          |
| Long tag name       | PAB01DT204.ma       |
| Prefix              |                     |
| Main tag            |                     |
| Database loading    | ON                  |
| Collection variable | pr-PAB01DT204.ma    |
| Variable type       | ana                 |
| Port                |                     |
| Description         | HEAT PWR HAD01AC002 |
| Data source         | SDNA historian      |
| History collection  | ON                  |
| Department          | NFO                 |
| Process area        | COOLING MODULE      |
| Collection group    | 105-PD-MA-101       |
| Unit                | M/A                 |
| Format              | F10.3               |
| Interpolation mode  | Interpolated        |
| Minimum             | 0                   |
| Lower low limit     | 0                   |
| Low limit           | 0                   |
| High limit          | 1                   |
| Higher high limit   | 1                   |
| Maximum             | 1                   |
| Repository          | IARepos105_01D      |
| Archiving           | ON                  |
| Data compression    |                     |
| Significance        | 1                   |
| Time limit <->      | 3600                |
| Compression type    | Interpolated        |
| Rights              |                     |
| Read grant          | +                   |
| Read deny           | -                   |
| Write grant         | +                   |
| Write deny          | -                   |
| Operate grant       | +                   |
| Operate deny        | OPERATOR            |
| Audit trail         |                     |
| Audit trail mode    |                     |

## Liite 16. Prosessimallin mittauksen valvomoduulien konfigurointi

Positiomoduli

| Tag     | Prompt                   | Value         |
|---------|--------------------------|---------------|
| \$NAME  | TAG MODULE NAME          | PAB01DT204-PM |
| \$CR    | CONTROL ROOM IDENTIFIER  | E1            |
| NAME1   | NAME TEXT 1(14char)      |               |
| NAME2   | NAME TEXT 2(14char)      |               |
| NAME3   | NAME TEXT 3(20char)      | Prosessimalli |
| POS1    | TAG_CODE 1(14char)       | PAB01DT204-PM |
| POS2    | TAG_CODE 2(14char)       |               |
| POS3    | TAG_CODE 3(14char)       |               |
| INFO    | INFO DISP HIERARCHY CODE |               |
| OPTM    | OPERATING MODULE NAME    | PAB01DT204-PM |
| SCMIN   | MEASUREMENT MINIM VALUE  | 0             |
| SCMAX   | MEASUREMENT MAXIM VALUE  | 100           |
| SCPREC  | NUMBER OF DECIMALS(0-5)  | 0             |
| UNIT    | UNIT OF MEAS VAL (8char) | °C            |
| POSOP   | OPERABILITY OF TAG       | 1             |
| MEOP    | OPERABILITY OF MEAS.     | 0             |
| \$DID   | HIERARCHY CODE OF DISPL  | 0             |
| --HH    | HH(0=, 1=ALM, 2=MSG)     | 0             |
| --H     | H (0=, 1=ALM, 2=MSG)     | 1             |
| --L     | L (0=, 1=ALM, 2=MSG)     | 1             |
| --LL    | LL(0=, 1=ALM, 2=MSG)     | 0             |
| --F     | F (0=, 1=ALM, 2=MSG)     | 1             |
| --OHH   | HH OPERATOR TRACKING     | 0             |
| --OH    | H OPERATOR TRACKING      | 0             |
| --OL    | L OPERATOR TRACKING      | 0             |
| --OLL   | LL OPERATOR TRACKING     | 0             |
| --OOUT  | OUT OPERATOR TRACKING    | 0             |
| --OESTO | MASK OPERATOR TRACKING   | 0             |
| AREACP  | OPERATING AREA (1-64)    | 1             |

Value:

Properties Text Options Select block

Layer:

Color:  ByLayer Lineweight:  Default

Linetype:  ByLayer

Plot style:

Apply OK Cancel

Operatiomoduli

| Prompt                   | Value         |
|--------------------------|---------------|
| OPERATING MODULE NAME    | PAB01DT204-PM |
| CONTROL ROOM IDENTIFIER  | E1            |
| TAG CODE OF TAG MODULE   | PAB01DT204-PM |
| DIRECTORY IDENTIFIER     | pr            |
| TAG CODE OF PR.ST.DATA   | PAB01DT204-PM |
| TAG CODE OF ALARM DATA   | PAB01DT204-PM |
| SELECTION OF TEXT 1(0-8) | 3             |
| SELECTION OF TEXT 2(0-8) | 4             |
| NUMBER OF DECIMALS(0-5)  | 0             |

Show Formulas Function formula:  Typehelp

OK Cancel

Hälytysmoduli

| Prompt                  | Value         |
|-------------------------|---------------|
| EVENT MODULE NAME       | PAB01DT204-PM |
| CONTROL ROOM IDENTIFIER | E1            |
| DIRECTORY IDENTIFIER    | pr            |
| ALARM AREA (1-64)       | 4             |
| MESSAGE AREA (1-64)     | 4             |
| HH(0=, 1=ALM, 2=MSG)    | 0             |
| H (0=, 1=ALM, 2=MSG)    | 1             |
| L (0=, 1=ALM, 2=MSG)    | 1             |
| LL(0=, 1=ALM, 2=MSG)    | 0             |
| F (0=, 1=ALM, 2=MSG)    | 1             |
| 1=0->1, 2=1->0 ALARM    | 1             |
| -ACKN.REQ.(0=OFF,1=ON)  | 1             |
| -ALARM PRIORITY (1-2)   | 2             |
| -USER (1-8)             | 1             |
| -FREE GROUPING (10x16)  | 1             |
| 1=0->1, 2=1->0 MESSAGE  | 1             |
| -ACKN.REQ.(0=OFF,1=ON)  | 1             |
| -USER (1-8)             | 1             |
| -FREE GROUPING (10x16)  | 1             |

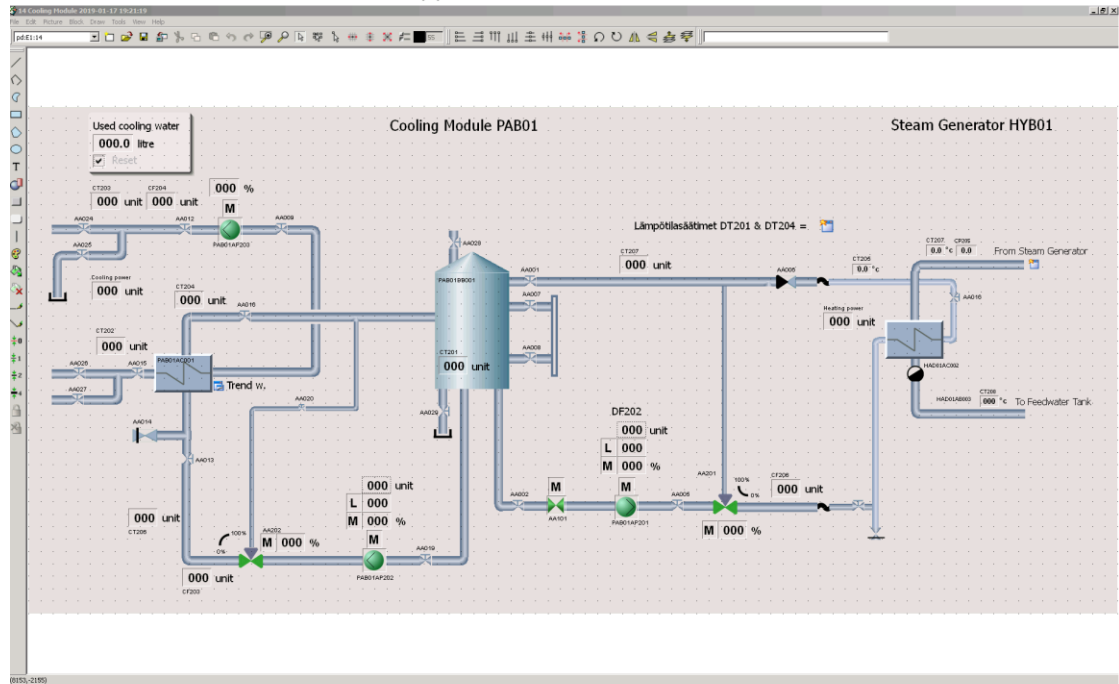
Show Formulas Function formula:  Typehelp

OK Cancel

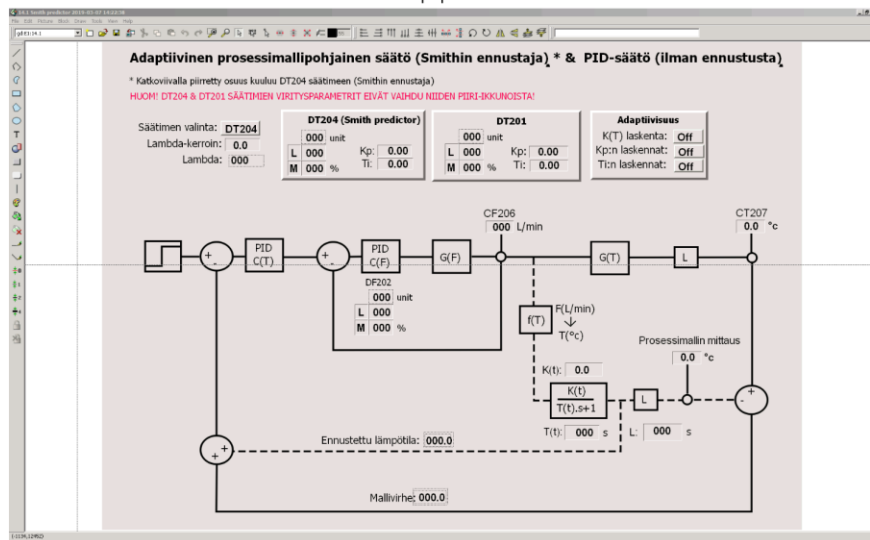


Liite 17. Häähdytysmoduulin valvomokuva muokattuna ja popup-ikkuna

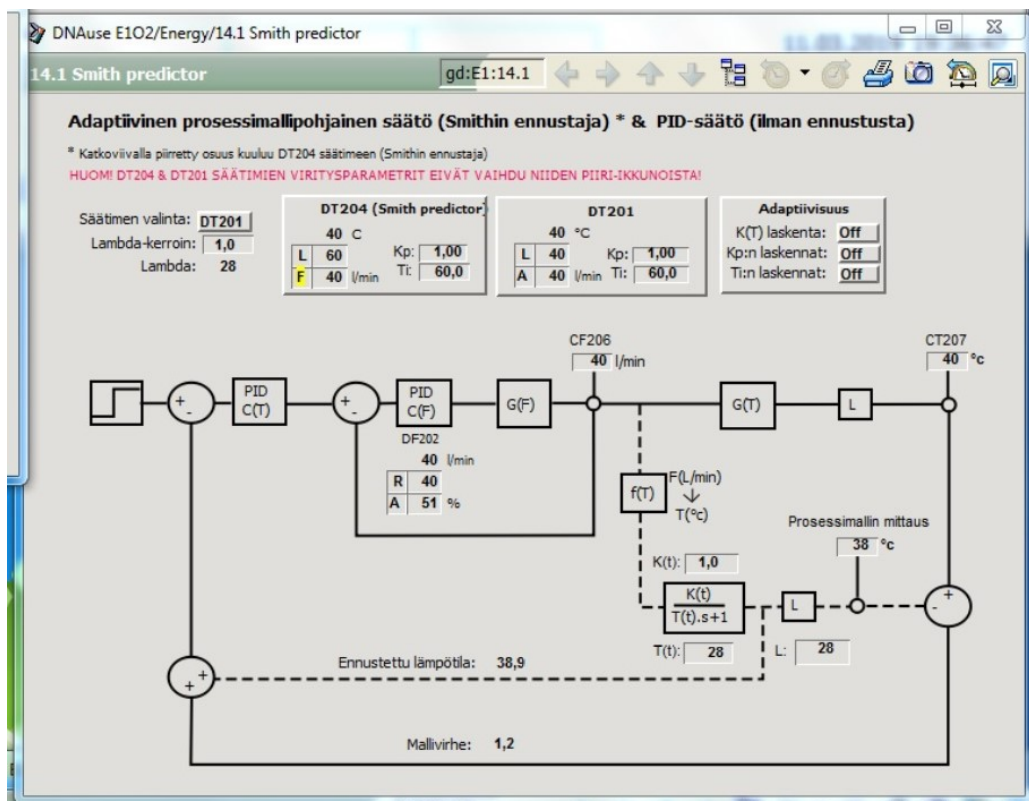
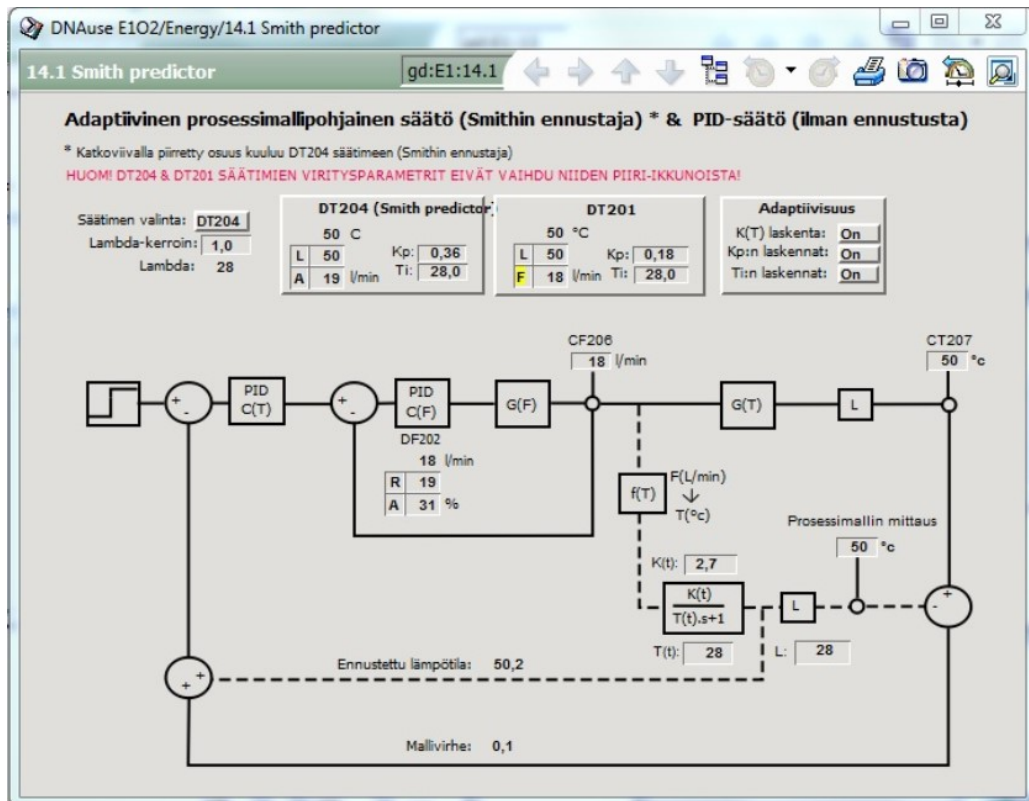
Jäähdytysmoduulin valvomokuva muokattuna



Popup-ikkuna

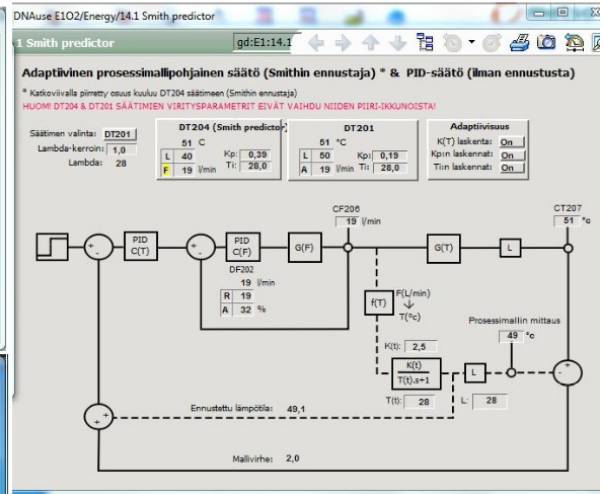
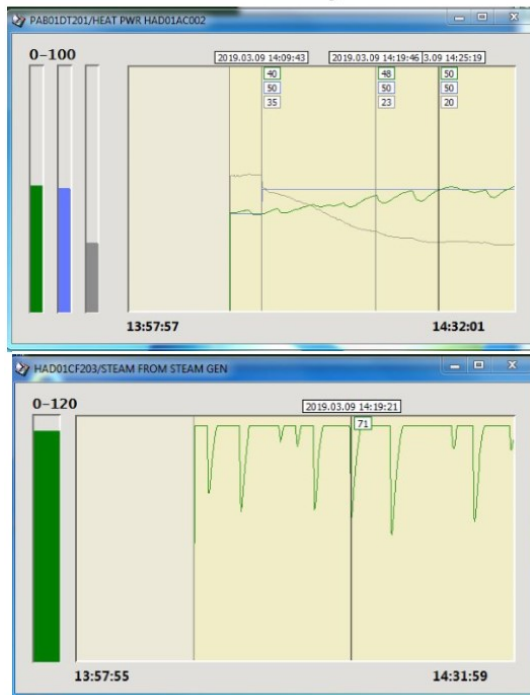


## Liite 18. Pop-up ikkunan testaus



Liite 19. Säätiöpiirin viritystulosten vertailu

Säätimen PAB01DT201 virityksen tulokset



Säätimen PAB01DT204 virityksen tulokset

