

**Maidon pastörintilaitteiston ylikuuman veden
säätöpiirin viritys**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö
Valkeakosken kampus, sähkö- ja automaatiotekniikka

kevät, 2019

Henri Stenroos

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Valkeakoski

Tekijä	Henri Stenroos	Vuosi 2019
Työn nimi	Maidon pastörintilaitteiston säätöpiirin viritys	
Työn ohjaaja/t	Sami Kuisma, Juhani Henttonen	

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyössä oli tavoitteena määrittää pastörintilaitteiston säätimelle uudet parametrit. Toimeksiantajalla, Valio Riihimäen toimipaikalla, oli selkeä tarve tutkia ja selvittää säätöpiirin uudelleen virityksen ja optimoinnin kautta, mahdollisuuksia vähentää pastörintipoikkeamia. Minkälaisiin tuloksiin päästäisiin ainoastaan säätimen viritysparameetreja muuttamalla? Tavoitteena oli myös kartoittaa ongelmakohdat ja mitä voitaisiin saavuttaa tarkemmalla mittausdatan keräämisellä.

Itse konkreettinen työ koostui kahdesta eri osa-alueesta. Ensin tehtiin mitattava analysointi lämpötilan käyttäytymisestä ja tutustuttiin huolellisesti prosessiin. Suunniteltiin säätöpiirin haluttu käyttäytyminen ja miten prosessikokeista saadaan tarvittava tieto esille. Toinen vaihe koostui itse prosessikokeista. Miten saatiin kerättyä luotettavaa dataa uusien viritysparametrien laskemiseen ja simulointiin. Sopivan ajan löytäminen tuotannon välistä ei ollut aina helppoa, ja toimintamalli piti suunnitella huolellisesti etukäteen ajan säästämiseksi.

Itse tutkimustulokset olivat hyviä. Säätöpiiri saatiin käyttäytymään haluttuun suuntaan. Viritysparametrien muutoksella oli merkittävä vaikutus säätöpiirin toimintaan. Joitakin asioita, kuten viivettä ei pystytty pelkäämään parametreja muuttamalla vaikuttamaan. Tämän asian korjaamiseen tuli kuitenkin paljon ideoita, joita jäämme työstämään.

Yhteenvedona työstä jäi mieleen, kuinka paljon opin säätöpiirien toiminnasta. Työ oli miellyttävä tehdä ja sain hienosti apua ohjausta, niin työpaikalta, kuin koulustakin. Saimme suunniteltua uutta toimintamallia lämpötilojen analysointiin, jollaista ei ennen ollut tehty. Kaiken kaikkiaan, erittäin mielenkiintoinen projekti.

Avainsanat Meijeriteollisuus, Levylämmönvaihdin, PID-säädin, Säätöpiirin viritys.

Sivut 53 sivua, joista liitteitä 13 sivua

Electrical and Automation Engineering
Valkeakoski

Author	Henri Stenroos	Year 2019
Subject	Control circuits tuning of milk pasteurization equipment	
Supervisors	Sami Kuisma, Juhani Henttonen	

ABSTRACT

Goal of this thesis project was to define new parameters for the control of pasteurization equipment's. The commissioner of the project, Valio Riihimäki branch, expressed a clear need to study and figure out the control circuit through tuning and optimization, reducing the potential for pasteurization deviations. Thus, we wanted to examine the pasteurization result by changing the tuning parameters alone. An additional goal was to survey the problem areas, and what could be achieved by a more accurate measurement data collection.

The work itself consisted of two different parts. First, we made an inclusive analysis of the temperature behavior, and we got thoroughly familiarized with the complete process. The desired behavior of the control circuit was planned, and we examined how to get the information of process tests. The second phase consisted of process tests themselves. Here the goal was to find out how to collect reliable data for calculating and simulating new tuning parameters. It was not always easy to find time for the project in between production processes, and the operating course had to be carefully planned to save time.

The research results themselves were good. The control circuit was behaved as desired direction. Changing the tuning parameters brought significant effects on the operation of the circuit. Some issues, such as the delay of the circuits were impossible to fix by just changing the parameters. We acquired, however, several ideas on how to correct this issue, and we will continue to work on this.

As a summary of the work, it can be said that I learnt a lot about the operation of control circuits. The project was pleasant to conduct, and I got some great help with guidance. We got a new operating model designed for temperature analysis, which had never been done before. A very interesting project.

Keywords control circuits tuning, dairy industry, PID-controller, plate heat exchanger

Pages 53 pages including appendices 13 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	VALIO OY.....	1
3	PROSESSITEOLLISUUDEN SÄÄTÖPIIREJÄ	2
3.1	Pinnan säätö.....	3
3.2	Lämpötilan säätö.....	4
3.3	Virtausnopeuden säätö	6
4	PID-SÄÄDIN	7
4.1	P-säätö.....	8
4.2	Integroiva säätö.....	8
4.3	Derivoiva säätö.....	9
4.4	Viritysparametrien vaikutus.....	9
4.4.1	Vahvistuskerroin (K_c)	10
4.4.2	Integrointiaika (TI)	11
4.4.3	Derivointiaika (TD).....	12
5	MAIDON PASTÖROINTILAITTEISTO	13
5.1	Levylämmönvaihdin	13
5.2	Pastörintiosaston lämmityspiirin kuvaus	15
6	PASTÖROINNIN LÄMPÖTILAN SEURANTA.....	16
6.1	MMC tehdasjärjestelmä.....	16
6.2	Lämpötila-anturit ja kalibrointi	17
6.3	Säätöventtiili	18
6.3.1	Milliampeeriviestin mittaaminen	19
7	MITTAUSDATAN ANALYSOINTI.....	20
7.1	Pastörintipoikkeamat.....	21
7.2	Yhteenvedo ja analysointi.....	21
8	PASTÖÖRIN LÄMMITYSKIERRON PROSESSIKOKEET	23
8.1	Askelvastekokeet.....	24
8.1.1	Suljettu järjestelmä	26
8.1.2	Avoin järjestelmä.....	26
8.2	Ylikuuman veden virtauksen katkaiseminen.....	27
9	SÄÄTÖPIIRIN SIMULOINTI.....	29
9.1	Prosessimalli.....	29
9.2	Simulink simulointi	30
10	SÄÄTÖPIIRIN VIRITTÄMINEN	31
10.1	Viritysmenetelmät.....	32

10.1.1 SIMC- viritys.....	32
10.1.2 Mint-viritys	34
11 TULOSTEN TARKASTELU	35
11.1 Suljetun piirin tulokset	36
11.2 Ylikuuman veden virtauksen katkaisemisen tulokset	37
12 YHTEENVETO	38
LÄHDELUETTELO.....	40

Liitteet

Liite 1	Säätöpiirin tunnuslukuja.
Liite 2	Alkuperäinen suljetun piirin askelvaste.
Liite 3	Suljetun piirin askelvaste SIMC-viritys.
Liite 4	Suljetun piirin askelvaste Mint-viritys.
Liite 5	Ylikuuman veden katkos 10 s alkuperäinen tila.
Liite 6	Ylikuuman veden katkos 10 s SIMC-viritys.
Liite 7	Ylikuuman veden katkos 10 s Mint-viritys.
Liite 8	Ylikuuman veden katkos 20 s alkuperäinen tila.
Liite 9	Ylikuuman veden katkos 20 s SIMC-viritys.
Liite 10	Ylikuuman veden katkos 20 s Mint-viritys.
Liite 11	Ylikuuman veden katkos 30 s alkuperäinen tila.
Liite 12	Ylikuuman veden katkos 30 s SIMC-viritys.
Liite 13	Ylikuuman veden katkos 30 s Mint-viritys.

1 JOHDANTO

Säätöpiirien säätö- ja viritys. Tästä aiheesta koostettiin opinnätetyön ydin. Työ tilaajana on oma työpaikkani, Valio Riihimäen tuotantolaitos. Työpaikallani tuli esiin useita ehdotuksia erilaisista aiheista, mutta päädyin säätöpiirien ja säätimien virittämiseen. Säätöpiirien virityksillä on myös taloudellisia hyötyjä, ja uuden tehtaan valmistumisen myötä kohteita on paljon.

Työn ideana ja ajatuksena on virittää ja optimoida maidon valmistuslaitteistossa, pastöroinnin lämpötilan optimaalinen säätö, sekä reagointi mahdollisiin häiriötekijöihin. Pastöroinnin lämpötila ja aika määräytyy elintarvikelain perusteella (metsätalousministeriö, 2014), joten sitä tarkkaillaan jatkuvasti, sekä lämpötilamittauksella, sekä virtausnopeuden tarkkailulla (aika s).

Olen työskennellyt pitkään meijerin tuotannossa. Pääosin maidonpakkauksessa ja tuotevalmistuksessa, joten tämä oli mieluisa ja läheinen aihe. Meijeriprosessin aikaisempi tuntemus antaa enemmän aikaa syventyä itse säätimen viritukseen.

Työn tavoitteena on tutustua säätöpiirien toimintaan, sekä syventyä tietyn prosessin osan lämpötilan säätöön perusteellisesti. Projekti vaatii paljon analysointityötä, sekä lämpötilatrendien ja mittausdatan tutkimusta. Kehittelin omalta tietopohjalta mahdollista tapaa suorittaa tehokkaammin säätöpiirien viritystä, sekä säätöä.

Tavoitteenani on optimoida säätöpiirin toimintaa, jotta se reagoisi paremmin lämpötilassa tapahtuviin muutoksiin. Raportin lopussa on yhteenveto projektin sujumisesta. Onnistutaanko tekemään säätöpiiriin parannuksia, saatiinko säätö reagoimaan häiriöihin nopeammin, ja käyttäytymään stabiilimmin. Tavoitteena näin vähentää poikkeamia pastörintiprosessissa.

2 VALIO OY

Valio Oy on vuonna 1905 perustettu, noin 5500 maitotilayrittäjän osuuskuntiansa kautta omistama yritys. Tilayrittäjät työllistävät Suomessa n. 30 000 henkilöä. Hankintaosuuskuntia on Suomessa yhteensä kuusi (6), ja ne peittävät koko Suomen pohjoisesta etelään (Valio Oy, 2019).

Valio käsittelee 79 % Suomessa tuotetusta maidosta. Tämä määrä on kokonaisuudessaan noin. 1800 milj. litraa. Suomessa myytävistä tuotteista on 100 % suomalaista maitoa.

Valiolla on yhteensä 20 tuotantolaitosta, joista 5 juustolaa, 5 tuoretuote-tehdasta, 4 jauhetehdasta, mehutehdas, voitehdas sekä hillotehdas. Virossa on juustola ja meijeri, ja Venäjällä sulatejuustotehdas. Henkilöstöä kokonaisuudessaan on yhteensä 4118 henkilöä, joista kotimaassa työskentelee 3154. Virossa 464, Venäjällä 399, Ruotsissa ja Tanskassa 52, USA:ssa 28 ja Kiinassa 21 henkilöä.

Valion yksi menestyksen salaisuuksista on tuotekehityksen ainutlaatuinen osaaminen. Uutuustuotteita kehitetään jatkuvasti ja tutkimukseen ja laadunvalvontaan käytetään miljoonia euroja vuodessa. A.I. Virtanen sai Nobelin kemianpalkintokin vuonna 1945 AIV-rehun ja AIV-voisuolan keksimisestä. Valion innovaatioilla on 350 patenttia ympäri maailman. Laktoositon maito on hyvä esimerkki, joka lanseerattiin ensimmäisenä maailmassa vuonna 2001.

Oma opinnäytetyöni tehdään Riihimäen vanhemmassa meijerissä, jossa valmistetaan tällä hetkellä perusmaitoja, kermaa sekä piimää. Reilun vuoden ajan on myös valmistettu uutta, täysin maidotonta, kaurapohjaista tuoteryhmää.

3 PROSESSITEOLLISUUDEN SÄÄTÖPIIREJÄ

Prosessiteollisuudessa käytetään paljon erilaisia säätöpiirejä, ja säätötekniikoita. Ne ovat keskeisessä asemassa prosessin toimivuuden, ja suorituskyvyn kannalta. Säätöpiirien kunto ja toiminta jää kuitenkin usein vähälle huomiolle tuotantolaitoksissa. Ammattitaitoisia säätötekniikan asiantuntijoita ei ole paljon saatavilla, joten piirien viritys ja optimointi jätetään usein huomiotta. Prosessin annetaan vaan käydä, vaikka ei parhaalla mahdollisella tavalla.

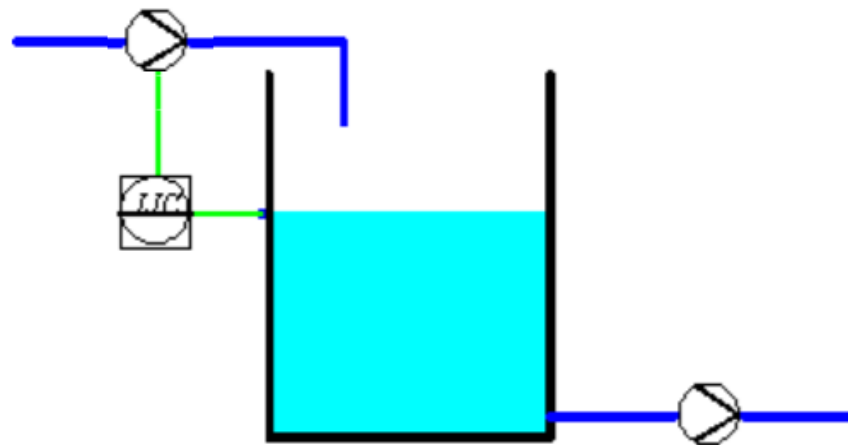
Tässä raportissa käydään pintapuolisesti läpi kolme yleistä säätötekniikan osa-aluetta, joita käytetään meijeriteollisuudessa. Muissa prosessiteollisuuksissa säätöpiirejä käytetään näiden lisäksi esim. paineen-, sakeuden-, sekoituksen- ja tislauksen säädöissä.

3.1 Pinnan säätö

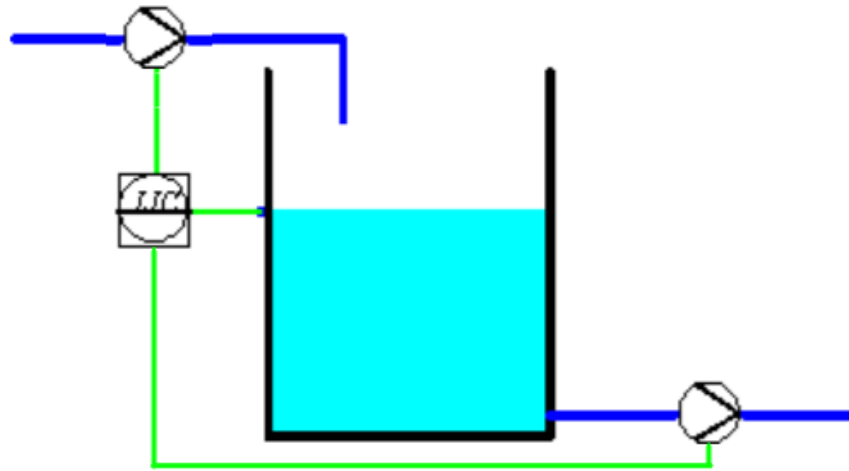
Meijeriteollisuudessa pinnansäätöä käytetään ainakin kahteen eri tarkoitukseen. Tuotevalmistuksissa, joissa tuote ajetaan isoihin säiliöihin jatkokäsittelyä varten, pinnansäätö on yksinkertainen (Kuva 1). Säiliötä täytetään ennalta määritelty määrä, kunnes säiliö tulee täyteen, tai kun tuotetta on ajettu tarvittava määrä. Säiliötä voidaan kuitenkin samaan aikaan tyhjentää, sekä purkaa. Säiliöt voidaan ajaa myös kokonaan tyhjiksi tarpeen mukaan. Tällöinkin pinnan säädössä huolehditaan kahdella yläraja-anturilla siitä, että säiliö ei täyty yli.

Toinen yleisesti käytössä oleva menetelmä on pakkauskoneen tuotesäiliön pinnan säätö (Kuva 2). Tämänlaisen säätöpiirin toiminta onkin monimutkaisempaa, koska pakkauskoneen tuotesäiliön pinnan korkeus tulisi pysyä tietyllä tasolla. Tässä säätö on monimutkaisempaa, koska säiliö täyttyy ja tyhjenee samanaikaisesti. Säädössä tärkeintä olisi kuitenkin se, että säiliö ei ainakaan pääsisi tyhjäksi, ja tuotanto sen vuoksi keskeytyisi.

Pinnan tasoa säätelee siis pumppu eikä sulkuventtiili. Oikeastaan molemmissa tapauksissa. Siirtolinjoista löytyy toki venttiilitkin, mutta pumppuja pysäyttämällä pinnankorkeutta pääasiassa säädetään.



Kuva 1. Pinnan säätö säiliön täyttötarkoituksessa. Säätöpiiri ohjaa syötöpumpun toimintaa.

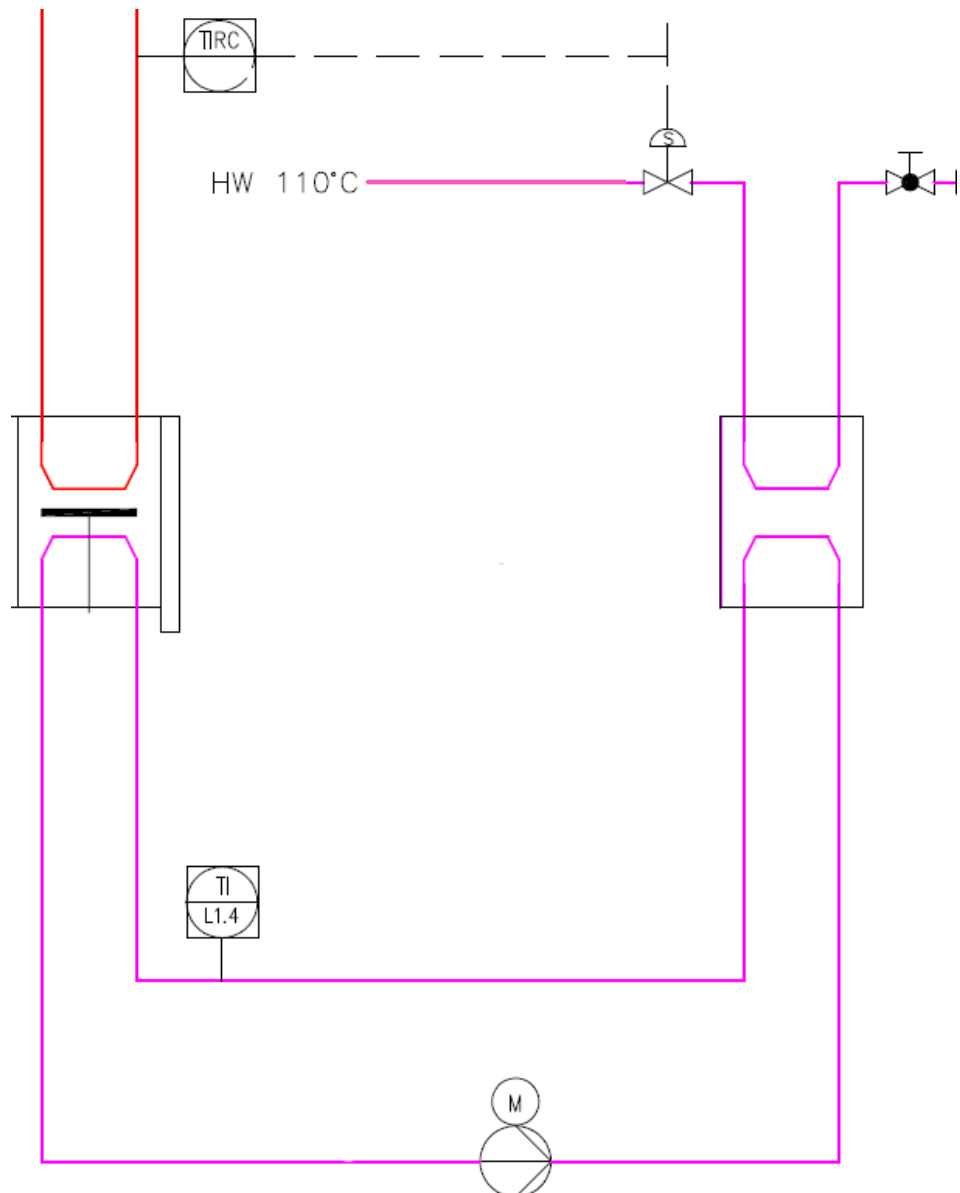


Kuva 2. Pinnan säätö, jossa säiliön pinnan taso pyritään pitämään halutulla tasolla.

3.2 Lämpötilan säätö

Erilaisia lämpötiloja säädetään paljon meijereissä. Varsinkin maidonkäsittelyprosesseissa maitoa pitää lämmittää, jotta pystytään tekemään halutut muokkaukset raakamaidon hygieniaan ja tuoteturvallisuuteen. Lämmitetty maito tulee myös jäähdyttää tiettyyn lämpötilaan lämpökäsittelyn jälkeen.

Levylämmönvaihdin (Kuva 12.) on selkeästi yleisin laite, jolla lämpötiloja muutetaan. Sitä käytetään nestemäisillä, alhaisen viskoosin tuotteilla lähes poikkeuksetta. Lämmönvaihtimeen syötetään halutuilla virtauksilla kuumaa tai kylmää vettä sen mukaan, mikä maidon lämpötila halutaan olevan. Käsittelyn levylämmönvaihdinta vielä raportin luvussa 5.1.



Kuva 3. PI-kaavio lämpötilan säätöpiiristä.

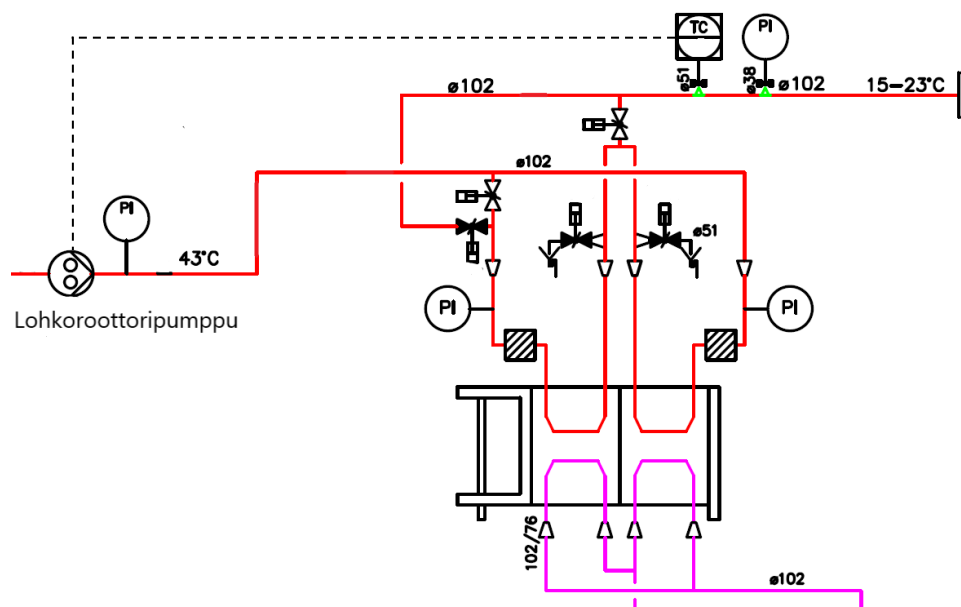
Ylikuumalla vedellä (110 °C) lämmitetään ensin toisen välivesikierron vesi. Tämä suljettu kierto lämmittää sitten itse tuotteen, kaavion vasemmassa reunassa. Tuotteen lämpötilaa mitataan, joka ohjaa säätöventtiilin toimintaa. Tuotevirta kuvataan kuvassa punaisena viivana, ja lämmityskierrot lilana.

3.3 Virtausnopeuden säätö

Virtausnopeuksia säädetään edellä mainittujen säätöpiirien lisäksi paljon meijeriteollisuudessa. Usein virtaukset liittyvät juurikin säiliöiden täyttöihin ja tyhjennyksiin. Myös lämpötilan muutoksissa erilaisissa lämmönvaihtimissa, virtausnopeudella on suuri merkitys.

Virtausnopeus vaikuttaa myös pesutuloksiin. Putkistopesuissa oikealla virtausnopeudella tavoitellaan turbulenssia putkistoon hyvän pesutuloksen saavuttamiseksi. Turbulenssi aiheuttaa mekaanista kitkaa putkistojen seinämiin, jolloin pesutulos paranee. Säiliöpesuissa, säiliön sisäpuolella olevista pesureista, pesuliuoksen tulee virrata riittävällä riittävän paineella, että säiliöiden seinämät peseytyvät kunnolla.

Virtausnopeuksien säädöissä käytössä on erilaiset pumput. Kaksi yleisintä pumppumallia ovat keskipakopumppu nestemäisille tuotteille ja vedelle, sekä lohkoroottoripumppu. Lohkoroottoria käytetään paksumman viskooseen tuotteilla kuten jogurttimassalla. Pumppuja ja niiden kierrosnopeuksia ohjataan taajuusmuuttajilla, joilla pystytään helposti säätämään pumppujen kierrosnopeuksia. Säätöpiiriin kuuluu myös pinnankorkeus- ja lämpötila-antureita, joiden mittaustuloksilla pumppujen toimintaa ohjataan (Kuva 4).

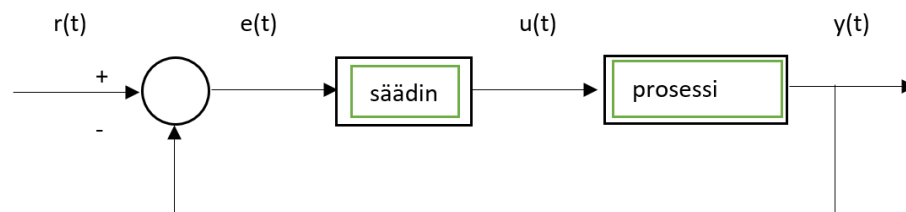


Kuva 4. PI-kaavio jogurttimassan jäähdytyksestä. Lohkoroottoripumpun kierroksia voidaan säätää halutun jäähdytystuloksen saamiseksi.

4 PID-SÄÄDIN

Yleisin teollisuudessa käytetty säädin on PID-säädin (Proportional-Integral-Derivative). Säätimen tuloksena on referenssin ja säädettävänä olevan suureen erotus. Sitä siis käytetään takaisinkytkennällä (Harju & Marttinen, Automaatioseura, 2000, s. 67).

PID-säätimen ohjaus on kolmen eri termin summa (Kuva 5). Se koostuu erosuureen suoraan verrannollisesta termistä (P-osa, vahvistus), erosuureen integraalista (I-osa, integrointiaika) ja erosuureen derivaatasta (D-osa derivointiaika). Tässä säätimessä voidaan käyttää monia eri yhdistelmiä kuten P-, PI- ja PD-säätimiä. Prosessiteollisuuden yleisin käytetty säädinrakenne on PI-säädin, jota tässä työssäkin käytetään (Harju & Marttinen, Automaatioseura, 2000, ss. 67 - 74).

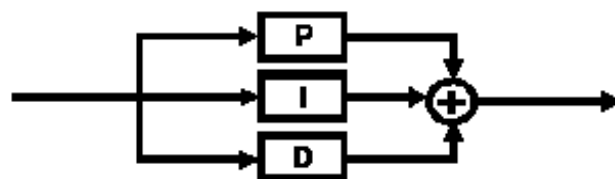


Kuva 5. Takaisinkytketyn säätöpiirin lohkokaavio.

kaava 1: PID-säätimen matemaattinen algoritmi.

$$u(t) = K_c \cdot (e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^1 e(t) dt + T_D \cdot \frac{de(t)}{dt})$$

$u(t)$ = lähdön tila
 K_c = säädön vahvistus
 $e(t)$ = erosuure
 T_I = integrointiaika
 T_D = derivointiaika



Kuva 6. PID-säätimen periaatteellinen rakenne.

4.1 P-säätö

P-säädöllä tarkoitetaan vahvistuksen (K_c) säätöä. Suuri arvo tarkoittaa nopeaa ja pienen säätövirheen säätöä, mutta säätöpiiri saattaa alkaa värähtelemään ja tekee siitä epästabiilin. Pieni arvo tekee säätöpiiristä vastavasti stabiilin, mutta säätö on hidas ja säätövirhe suuri.

P-säädölle on tyypillistä se, että säätövirhe jää pysyväksi. Asetusarvon ja mittauksen välille jää siis pysyvä ero. Prosessin vahvistus voi olla myös negatiivinen, jolloin $K_c < 0$.

kaava 2: P-säätö.

$$u(t) = K_c e(t) + u_0$$

$u(t)$ = lähdön tila

$e(t)$ = erosuure

K_c = säädön vahvistus

u_0 = ohjaussignaalin vakiotaso

4.2 Integroiva säätö

I-säätöä käytetään usein P-säädön kanssa (PI-säätö). I-säätö mahdollistaa sen, että P-säädössä oleva asentovirhe jää pois. PI-säädön muodossa on olemassa erilaisia toteutustapoja.

Aggressiivinen säätötulos saadaan vahvistusta kasvattamalla ja integrointiaikaa pienentämällä. Vastaavasti maltillinen säätötulos saadaan aikaan pienentämällä vahvistusta ja kasvattamalla integrointiaikaa.

Yleisesti virityskaavat on annettu ideaalille muodolle (Kaava 3).

Kaava 3: I-säätö

$$u(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt \right)$$

$u(t)$ = lähdön tila

K_c = säädön vahvistus

T_I = integrointiaika

P-säätöön verrattuna signaalin vakoitaso u_0 korvataan ajan funktiona muuttuvalla erosuureen integraalilausekkeella. Säätimen lähtö muuttuu niin kauan, kun poikkeama säädössä ei ole nolla. Lähtöön vaikuttava asia on siis suuruus säätöpoikkeamassa ja sen vaikutusaika.

4.3 Derivoiva säätö

D-säätöä käytetään yhdessä P-säädön, tai PI-säädön kanssa. Tämä osa reagoi erosuureessa tapahtuvaan muutosnopeuteen. Muutosnopeuden ollessa nolla, D-osan lähtökin on nolla. D-säädön tarkoituksena on vähentää värähtelyä säätöpiirissä, ja se ennakoii säätövirheen muutosta.

Prosessiautomaatiossa ei yleensä käytetä D-säätöä ollenkaan. Mittaussignaalit ovat usein kohinaisia, jolloin derivointi tuottaa myös kohinaisen ohjaussignaalin.

Signaalin todellista derivaattaa päästään vain harvoin hyödyntämään, tällöin alipäästösuodatuksen käyttö voi vähentää kohinan vaikutusta. Yleisesti käytössä oleva tapa on liittää siis derivoinnin yhteyteen nopea alipäästösuodatus.

Sähkömekaanisissa järjestelmissä D-säädölle on käyttöä, koska siellä mittaussignaalit ovat siistimpiä, eivätkä tuota kohinaa prosessiautomaation tapaan. Parhaassa tapauksessa D-säätöä käyttämällä saadaan siis säätövirhettä ennakoiva, värähtelyä vähentävä säätö aikaiseksi.

Kaava 4: D-säätö

$$T_d \frac{de(t)}{dt}$$

4.4 Viritysparametrien vaikutus

PID-säätö tapahtuu kolmen viritysparametrin vaikutuksesta. Nämä ovat siis vahvistuskerroin (K_p), integrointiaika (K_I) ja derivointiaika (K_D). Itse viritys tapahtuu näiden kertoimien oikeisiin suhteisiin. Haluttu säätötulos saadaan, kun kertoimien ja ohjausermien vaikutus viritetään oikeaan suuruuteen ja suhteeseen. Parametreille ei ole vain yhtä oikeaa suhdetta, vaan erilaisilla yhdistelmillä voidaan saada samankaltaisia tuloksia (Henttonen, 2019).

Alaotsikoissa esimerkki kolmen viritysparametrin vaikutuksesta samaan prosessimalliin (kaava 5).

Kaava 5: Prosessin malliesimerkki.

$$G(s) = \frac{1.8^{(-4s)}}{15s + 1}$$

4.4.1 Vahvistuskerroin (K_c)

Tämä on suhdekerroin, joka vaikuttaa säätimen ohjauksen ja erosuureen väliseen suhteeseen. Kerrointa suurentamalla nopeutetaan säätöpiirin käyttäytymistä. Suuri kerroin saa järjestelmän epästabiiliksi, ja pienempi kerroin säätää maltillisemmin. Pelkällä P-säädöllä ei yleensä päästä tarkalleen haluttuun lopputulokseen.

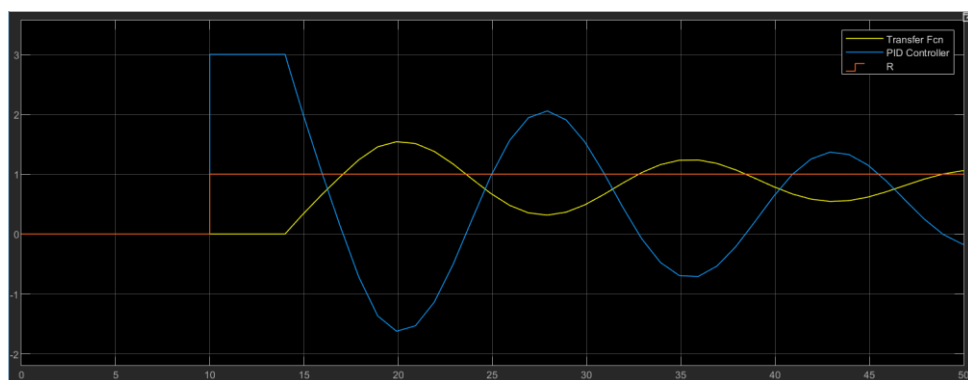
Kuvaajan selitys:

Transfer func = ohjaussignaali (erosuure)

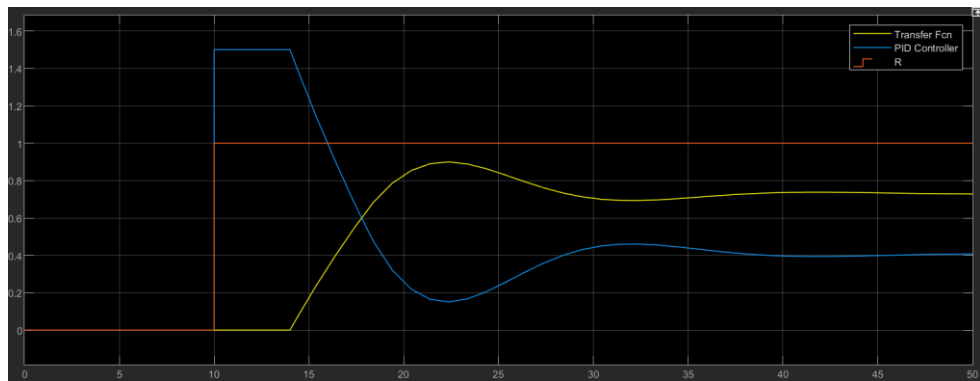
PID controller = Säätimen ohjaus

R = Asetusarvo (askel)

Suurempi vahvistuskerroin (Kuva 7.) tässä prosessin mallissa aiheuttaa selkeästi enemmän huojuntaa, kun pienempi vahvistuskerroin (Kuva 8.).



Kuva 7. Kuvaaja vahvistuskertoimen vaikutuksesta. P-osan arvona 3.



Kuva 8. Kuvaaja vahvistuskertoimen vaikutuksesta. P-osan arvona 1.5.

4.4.2 Integrointiaika (T_I)

Tämä osa käyttää hyväkseen järjestelmän historiatietoja. Erosuureen vanhoja arvoja integroiden tarkoituksena on poistaa jatkuvuustilan virhe.

Tämän parametrin suuri lukema, siis integrointiaika, saa aikaan pienen vaikutuksen. Pienempi aika saa taas aikaan suuremman muutoksen. Sopiva integrointiaika yhdessä oikean vahvistuskertoimen kanssa (PI-säätö), saa aikaan esimerkin prosessimalliin paremman vaikutuksen.

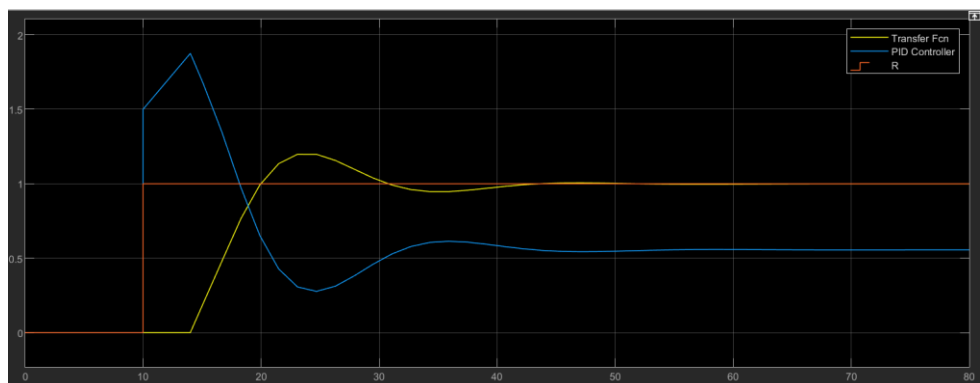
Kuvaajan selitys:

Transfer func = ohjaussignaali (erosuure)

PID controller = Säätimen ohjaus

R = Asetusarvo (askel)

Ohjaussignaali (Kuva 9.) saavuttaa halutun asetusarvon. P-osa 1.5 ja I-osa 16. Tässä on käytetty samaa prosessin mallia, mikä edellä esiteltiin. (Kaava 5.)



Kuva 9. Integrointiajan suotuisa lisäys.

4.4.3 Derivointiaika (T_D)

Derivointiaika vaikuttaa suureen muutosnopeuteen. Tätä muutosnopeutta voidaan pitää ennustuksena siitä, miten järjestelmä vaikuttaisi tulevaisuudessa. Nämä muutokset järjestelmässä havaitaan yleensä pienen ajan kuluttua.

Derivointi-parametrin suuri aika vaikuttaa voimakkaasti D-osaan, ja vastaavasti pienemmällä ajalla on pienempi vaikutus. Mikäli prosessissa on paljon viivettä, derivaattaa kannattaa suhtautua varovasti. Derivointi vaikuttaa mittauskohinaan sitä kasvattaen, joten prosessiteollisuudessa sitä harvoin käytetään. Alla kaksi kuvaa esimerkkinä derivointiajan vaikutuksesta.

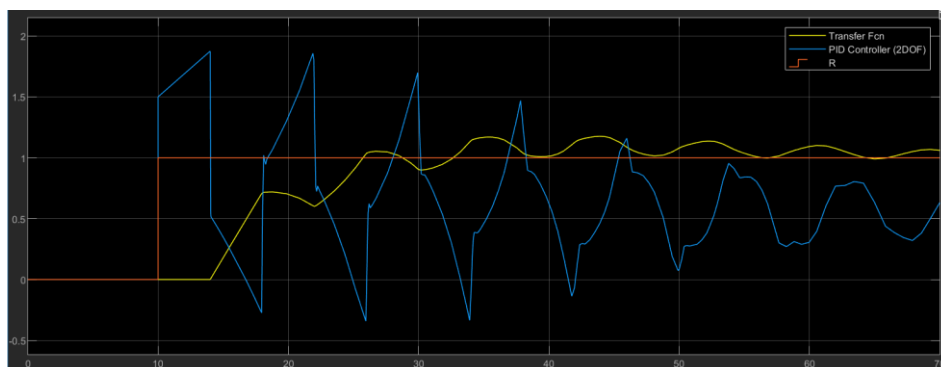
Kuvaajan selitys:

Transfer func = ohjaussignaali (erosuure)

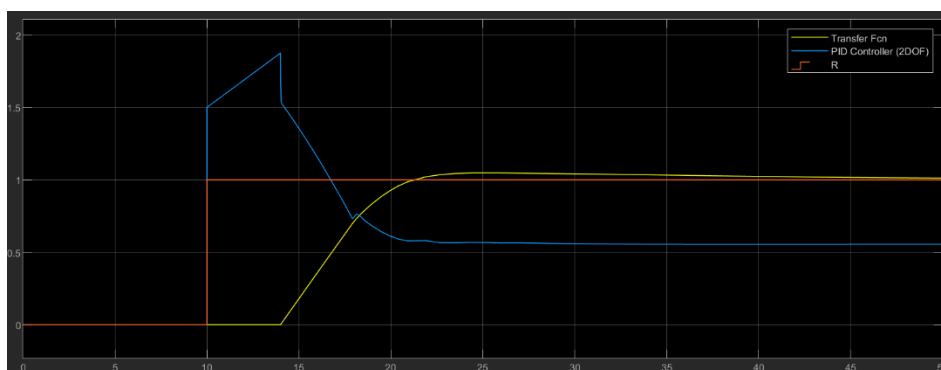
PID controller = Säätimen ohjaus

R = Asetusarvo (askel)

Liian suuri derivointiaika tekee säätöön värähtelyä (Kuva 10). P-osa 1.5, I-osa 16 ja D-osa 5. Derivointiaikaa pienentämällä saadaan aikaan suotuisampi vaikutus ohjaussignaaliin (Kuva 11). P-osa 1.5, I-osa 16 ja D-osa 1.25.



Kuva 10. Kuvaajassa lisätty D-osa säätöön.



Kuva 11. Kuvaajassa D-osaa pienennetty.

5 MAIDON PASTÖROINTILAITTEISTO

Maidon pastöroinnissa on tarkoitus tuhota mahdolliset tautia aiheuttavat mikrobit, sekä parantaa säilyvyyttä (Wikipedia, 2019). Pastörointi tapahtuu maitoa kuumentamalla vähintään 72 °C, 16 sekunniksi.

Meijeriteollisuudessa, ja varsinkin tuoretuotelaitoksissa maidon pastörointi toteutetaan levylämmönvaihtimella. Lämmönvaihtimia on paljon eri kokoisia, riippuen linjan kapasiteetista. Suuret virtausnopeudet linjastoissa vaativat järeämmät ja kooltaan isommat lämmönvaihtimet. Levypinta-alaa täytyy olla paljon, koska suuri virtausnopeus vaikuttaa lämmön siirtymiseen heikentävällä vaikutuksella.

Pastörointilaitteistoon kuuluvat oleellisesti myös kestoputkisto ja alipastörointiventtiili. Kestoputkisto on pitkä, eristetty ja edes taas etenevä putkisto, jonka pituuden määrittää tuotteen haluttu pastörointiaika. Kestoputkistolta tuote menee levylämmönvaihtimen regenerointiosastoon jäähtymään.

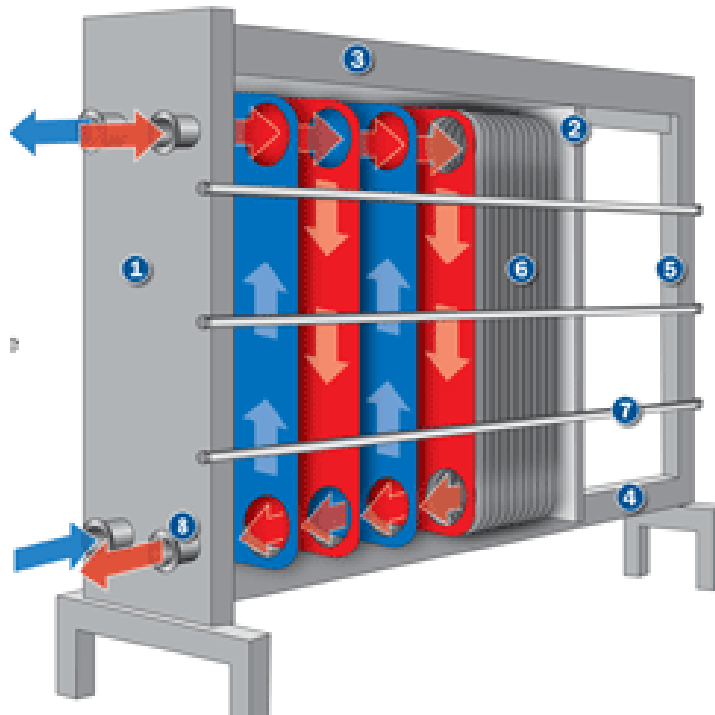
Alipastörointiventtiili ohjaa tuotteen suoraan takaisin syöttösuppilon, mikäli pastörointilämpötila syystä tai toisesta pääsee laskemaan alle sallitun.

5.1 Levylämmönvaihdin

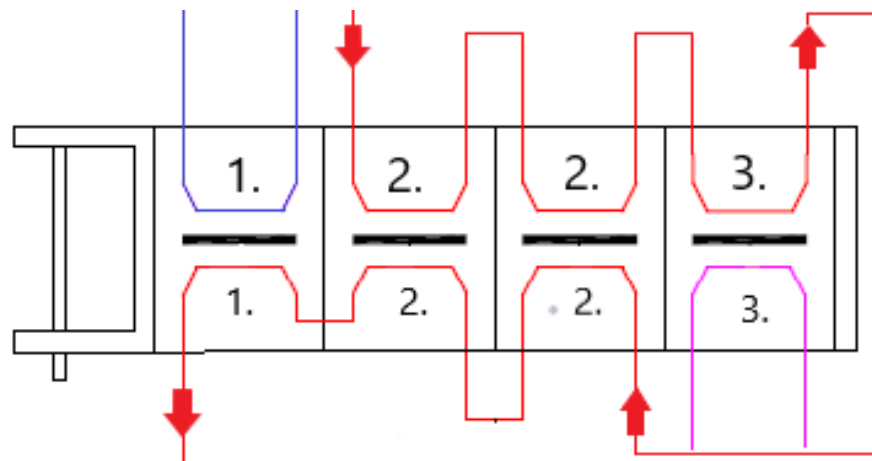
Levylämmönvaihtimen toimintaperiaate on jonkin halutun nestemäisen materiaalin lämmittäminen lämmönvaihtimen metallinlevyjen välityksellä. Levyjä on useita lämmönvaihtimen koon mukaan. Toisella puolella levyä virtaa lämmitettävä aine ja toisella puolella yleensä kuuma vesi.

Tässä aiheena olevan kuumen veden lämpötilaa säädetään vielä toisella, pienemmällä levylämmönvaihtimella, jossa ylikuumavesi (> 110 °C) lämmittää itse pastörointilevylämmönvaihtimen kuumavesikierron veden.

Levylämmönvaihdin sopii hyvin elintarviketeollisuuteen ja sen etuina on hygieenisuus, hyvä peseytyvyys, paineen tasaantumisen säätely, taloudellisuus, helppo laajennettavuus sekä huollettavuus.



Kuva 12. Levylämmönvaihtimen rakenne. Punainen kuvaa kuumaa vettä, ja sininen lämmitettävää nestettä.



Kuva 13. PI-kaavio levylämmönvaihtimesta.

Levylämmönvaihdin koostuu yleensä kolmesta eri toiminnosta /osastosta. Osastot erotellaan kuvassa (Kuva 13.) toisistaan mustalla poikkiviivalla.

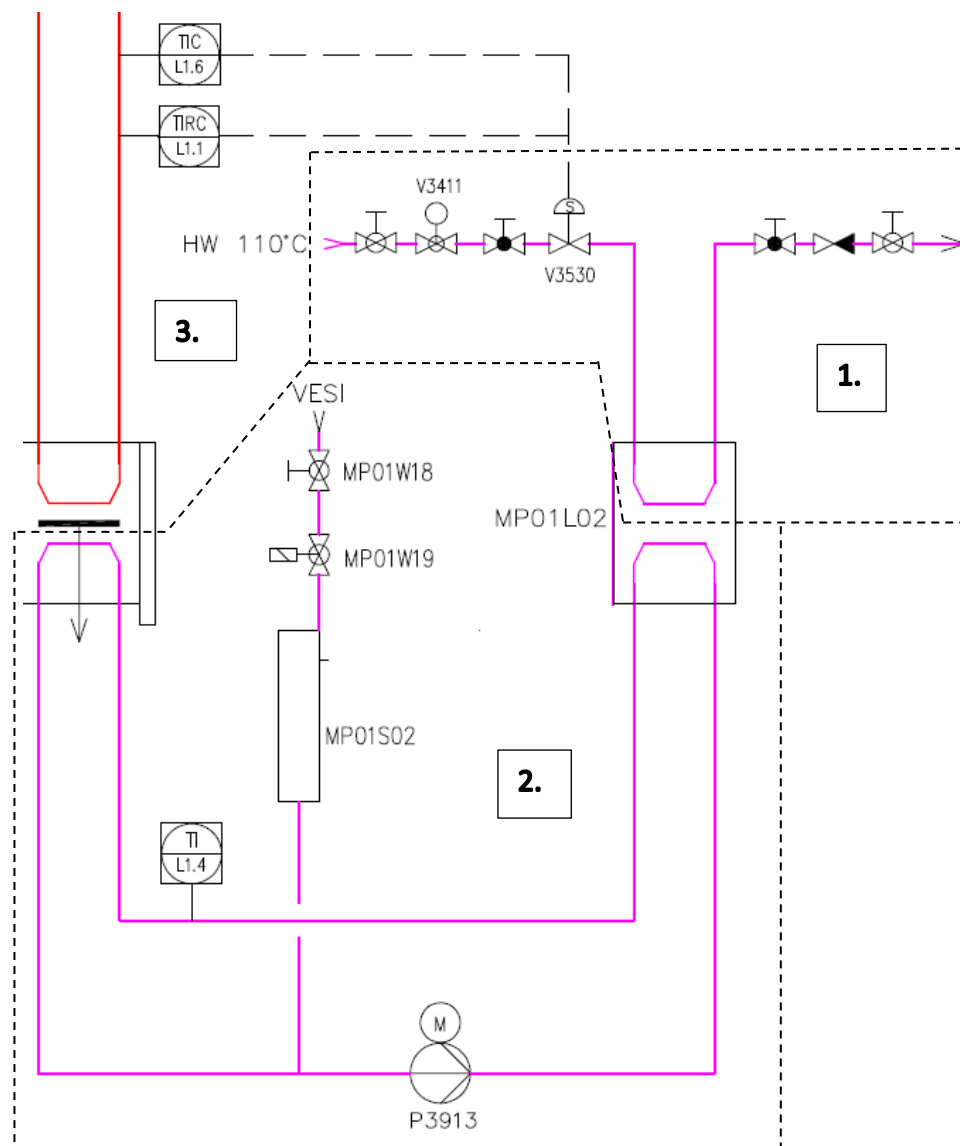
1.osasto kuvaa jäähdytysosastoa. Sininen viiva kuvastaa jäähdytysvettä, joka on tavallisesti noin 3 asteista.

2.osasto on niin sanottu regenerointiosasto, jonne kylmä neste tulee punaisen nuolen suunnasta. Yläpuolella lämmitystä tarvitseva neste lämpe-

nee kuvan alapuolella kulkevalla nesteellä. Tämä alapuolella olevan nesteen tarkoitus onkin jäähtyä, joten tämä regenerointi tuottaa energian säästöä.

3. osasto on pastörintiosasto, jossa neste kuumennetaan haluttuun lämpötilaan ennen jäähdystä. Lila värjäys tarkoittaa kuumen veden lämmityskiertoa, jonka lämpötilan säätö on tämän opinnäytetyön aiheena.

5.2 Pastörintiosaston lämmityspiirin kuvaus



Kuva 14. PI-kaavio pastörintiosaston lämmityspiiristä.

Alue 1. Ylikuuman veden kierto:

Veden virtausta säädetään säätöventtiilillä V3530. Vesi kiertää levylämmönvaihtimen läpi, jossa se lämmittää lämmityskierron veden. Säätöventtiiliä säätämällä, voidaan vaikuttaa veden virtausnopeuteen ja sitä kautta

lämmityskierron veden lämpötilaan. Ylikuumalla vedellä on kiinteistössä oma kiertonsa käyttöhyödykkeenä.

Alue 2. Välivesikierto:

Suljettu lämmityskierto (välivesi), joka kiertää levylämmönvaihtimen pastörintiosastolla. Väliveden säiliö S02 täyttää väliveden määrää kierrossa, kun se haihtuessaan hieman pienenee. Lämmityskierron aikana veden lämpötilaa ei voi säätää, vaan säätö tapahtuu ylikuuman veden säätöventtiiliä V3530 säätämällä. Keskipakopumppu P3913 tuottaa kiertoon noin 20 000 L/h virtausnopeuden, joka pysyy vakiona. Pumpun kierroksia ei voi siis muuttaa, eli pumppua ei voida käyttää säätölaitteena. Lämpötila-anturi L1.4 mittaa lämmitysvesikierron lämpötilaa, jota voidaan verrata pastörintilämpötilamittaukseen.

Alue 3. Pastörintilämpötilan mittaus:

Kuvan (14) oikeassa reunassa näkyy levylämmönvaihtimen pastörintiosasto, jossa lämpö siirtyy maitoon välivesikierron välityksellä. Kaksi peräkkäistä lämpötila-anturia mittaavat ja seuraavat pastörintilämpötilaa, ja lähettävät tiedon PID-säätimelle. Toinen antureista on varmistava, jotta laiterikon seurauksena voidaan varmistaa oikea lämpötila. PID-säädin säättää ylikuuman veden säätöventtiilin asentoa sen mukaan, millainen pastörintilämpötila on.

6 PASTÖROINNIN LÄMPÖTILAN SEURANTA

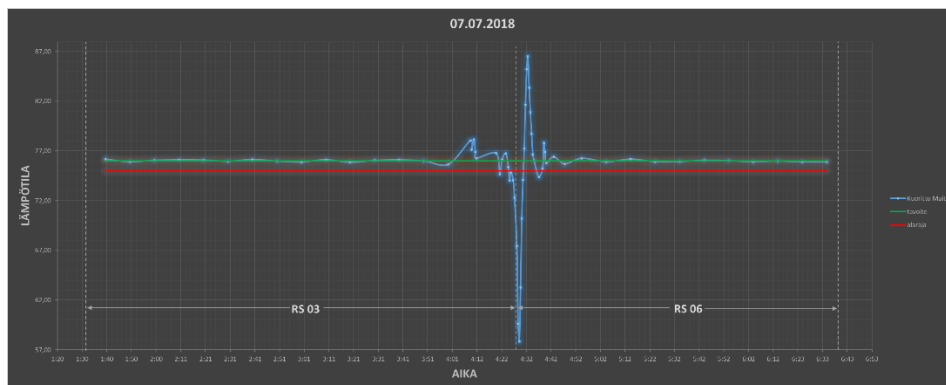
Pastörintilämpötilan seuranta kuuluu elintarvike lainsäädännön piiriin. Se kuuluu CCP (critical control point) kriittisen hallintapisteen omavalvontaan. Pastörintilämpötilaa seurataan jokaisen erän valmistuksessa ja lämpötilatrendi jää tehdasjärjestelmään muistiin. Erätietoja on mahdollista tutkia ja selvittää jälkeenpäin, jolloin jäljitettävyyks paranee merkittävästi. Jokainen valvomossa työskentelevä tuotevalmistaja tarkastaa ja kuittaa pastörintilämpötilan hyväksynnän jokaisen tuotantoerä jälkeen.

6.1 MMC tehdasjärjestelmä

Tässä tuotantolaitoksessa lämpötilan tallennukseen käytetään MMC-tehdasjärjestelmää, josta voidaan tulostaa haluttuja trendejä ja raportteja eräkohtaisesti. Lämpötilakäyrät ja trendit on helposti saatavilla tehdasjärjestelmässä. Sieltä voi hakea eräkohtaisesti tietoa, tai seurata halutun ajanjakson tilannetta.

Tätä opinnäytetyötä varten tehtiin selvitystä yhden maidonvalmistuslaitteiston pastörintipoikkeamista vuodelta 2018. Jokaisesta valmistuserästä on saatavilla dataa lämpötilamittauksista. Järjestelmä tallentaa lämpötilan kerran 10 sekunnissa, ja suodattaa pois arvot, jotka eivät ole muuttuneet yli 0,2 astetta edellisestä mittaustuloksesta.

Koska MMC:n itse muokkaama trendi on hankalasti luettavissa, eikä ole kovin selventävä, tallensin mittapisteiden arvot suoraan Excel-taulukkolaskentaan (Kuva 15), ja loin siellä kaavioita, joista on helpompi analysoida poikkeavia lämpötiloja.



Kuva 15. Esimerkki Excelillä muokatusta lämpötilakäyrästä.

6.2 Lämpötila-anturit ja kalibrointi

Maidonvalmistusprosessin lämpötilojen mittaamiseen käytössä on Pt-100 mallinen vastuslämpötila-anturi. Anturit on asennettu suoraan putkistoon, ja ne sijoitetaan suojataskuihin suojaamaan antureita. Tarkkuus antureissa on $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ($dR = 20\text{ohm.}$) Mittausdata siirretään anturilta lähettimeen, joka lukee vastuksen anturista ja muuttaa sen 4-20 mA viestiksi. Tämä milliampeeriviesti tulee kenttäväylän kautta logiikkaan, josta PID-säädin saa mitaustuloksen.

Kalibrointi hoidetaan kerran vuodessa ennakkohuolto-ohjelman mukaisesti, ja siihen käytetään Beamex FB-merkkistä kuivalohkouunia yhdessä Beamex MC-kalibraattorin kanssa (Kuva 16.). Nämä sopivat erinomaisesti teollisuuteen ja kenttäkäyttöön, koska antureita voidaan kalibroida paikan päällä suoraan tuotantotiloissa.

Kalibroitava anturi asetetaan kentällä uuniin ja kytketään se MC-kalibraattoriin. Kalibrointi tapahtuu piste pisteeltä automaattisesti, jonka jälkeen tulokset tallennetaan ja ladataan verstaalla CMX-ohjelmistoon. Kaikki kalibrointiin liittyvä tieto tallennetaan CMX-tietokantaan, josta voidaan tarvittaessa tulostaa kalibrointipöytäkirjat.

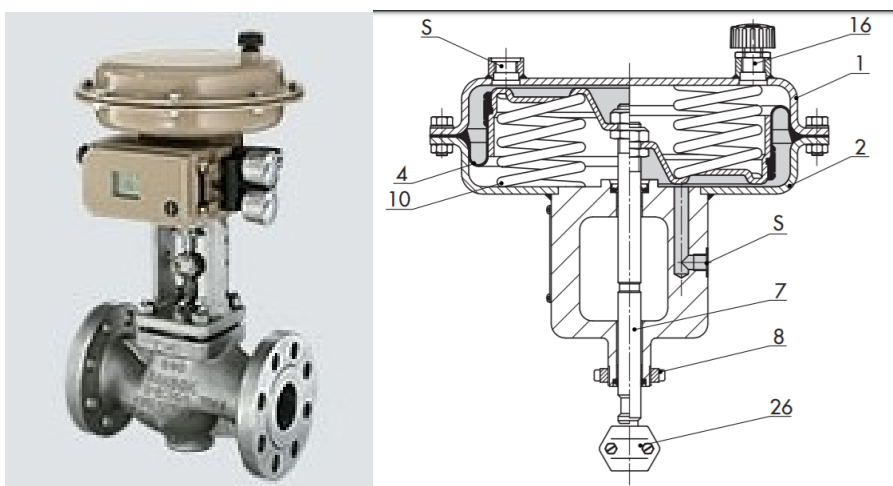


Kuva 16. Kuvassa vasemmalla kuivalohkouuni ja keskellä käytössä oleva kalibraattori.

6.3 Säätoventtiili

Koko säätöpiirin keskeisin kenttälaite on pneumaattisella toimilaitteella toimiva istukasäätoventtiili. Se säätelee lineaarisesti ylikuuman veden virtausta välivesikierron levylämmönvaihtimeen. Itse virtausta säätelevä venttiili on palloventtiili, eli veden virtausta on helppo säätää, kun vastapaine on pienempi kuin läppäventtiilillä.

Venttiilin toimilaitte on kalvotoiminen, jossa jousivoimalla säädetään venttiilikaran asentoa (Kuva 17), ja kalvon toisella puolella paineilma liikuttaa karaa toiseen suuntaan. Eli toimilaitteen työntövoima riippuu näistä kahdesta tekijästä.



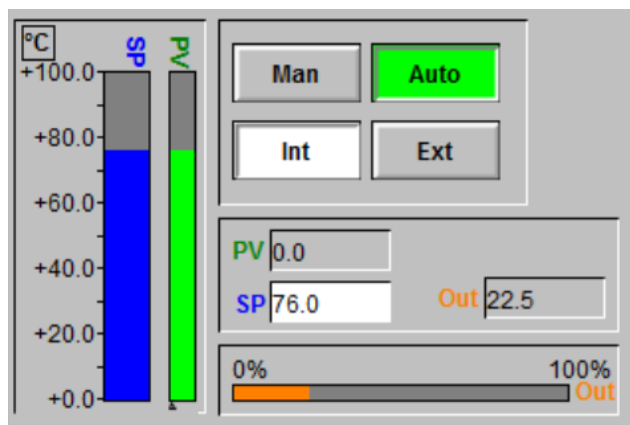
Kuva 17. Käytössä olevan Samson 3277 säätoventtiilin kuva ja toimilaitteen läpileikkaus.

Selite: (Kuva 17.) 7 = Toimilaitteen varsi
 S = Painesignaalin yhteys 8 = Rengasmutteri
 1 = Yläosan kansi 26 = Varren yhdistäjä
 2 = Alaosan kansi 16 = Tulppa
 4 = Kalvo
 10 = Jouset

Projekti aloitettiin säätöventtiilin kunnan tarkastamisella. Ensin tutkittiin säätöventtiilin kunto mekaanisesti, jonka jälkeen mitattiin milliampeeriviestin lähetys säätöä ohjaavaan logiikkaan.

PID-säätimellä venttiilin tilan säätö on rajoitettu 18 % – 80 % välille. Eli vaikka milliampeeriviesti on 4 mA, niin säätöventtiili asettuu 18 %:iin, eikä 0 %. Venttiili ei myöskään ole mekaanisesti koskaan täysin kiinni, eikä täysin auki.

Kuvassa (Kuva 18.) näkyy oranssilla vaakapalkilla säätöventtiilin asento. Manuaaliasennossa Out ikkuna aktivoituu, ja asetusarvoa voidaan muuttaa käsin.



Kuva 18. PID-säätimen ohjaussivu.

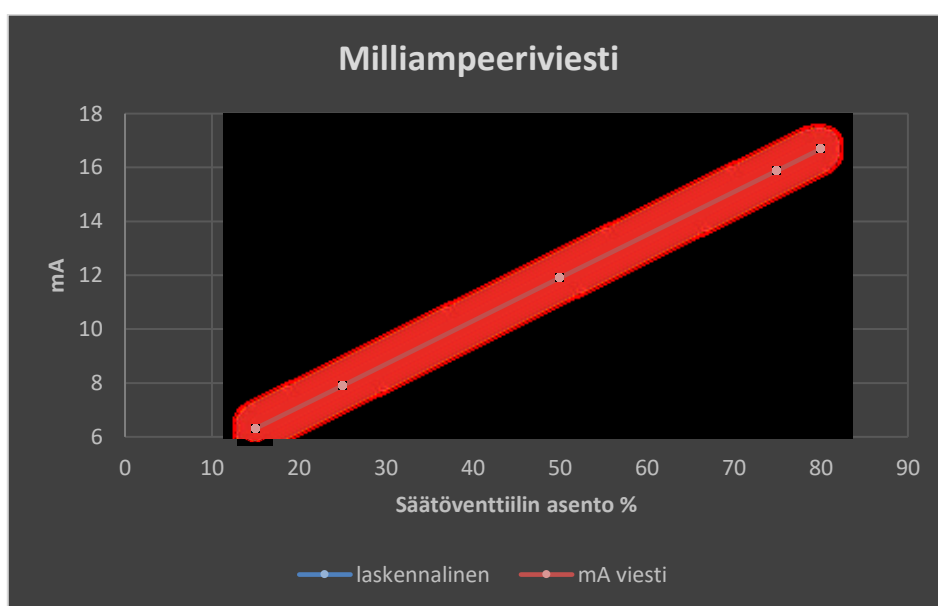
6.3.1 Milliampeeriviestin mittaaminen

Milliampeeriviesti mitattiin suoraan venttiilin toimilaitteelta. Testiin tarvittiin kaksi henkilöä, jossa toinen mittasi tuotannossa yleismittarilla virtaviestin toimilaitteelta, ja toinen muutti valvomosta venttiilin asetusarvoa manuaalisesti. Yhteensä mitattiin viisi pistettä ja saatiin kuvan (Kuva 19.) mukainen kaavio.

Taulukko 1. Säätöventtiilin milliampeeriviestit

Säätöventtiilin tarkastus:

Asetus %	mA viesti	laskennallinen	Ero
15	6,31	6,4	0,09
25	7,9	8	0,1
50	11,9	12	0,1
75	15,89	16	0,11
80	16,69	16,8	0,11



Kuva 19. Kaavio testistä. Tulos oli lineaarinen.

7 MITTAUSDATAN ANALYSOINTI

Mittausdatan analysointi oli keskeinen työvaihe tämän työn suorittamisessa. Oli mietittävä mitä dataa haluaa, ja on järkevä käyttää. Yhtenä lähtökohtana kuitenkin oli pastörintipokkeamien vähentäminen, joten aloitettiin poikkeamien tutkinta MMC-tehdasjärjestelmästä. Käytiin läpi kaikki vuoden 2018 lämpötilapokkeamat, ja eräkohtaiset muuttujat.

Poikkeama-analysoinnin jälkeen täytyi miettiä, kuinka saataisiin mittausdata visuaalisemmaksi. Koska tehdasjärjestelmän trendigrafiikka ei ole pa-

ras mahdollinen, päädyttiin tekemään omat taulukot ja kaaviot. Mittaustulosten osalta käytettiin taulukkolaskentaa. Näin päästiin paremmin perille, mistä lämpötilan muutokset oikein johtuisivat erien eri tuotantovaiheissa.

Toisena ajatuksena oli tutkia säätöpiirin vaikutusta lämpötilaan. Siitä, kuinka nopeasti säätö reagoi lämpötilan muutoksiin. Tähänkin sai paljon selkeämmän kuvan, kun käytti Excel-taulukkolaskentaa työkaluna analysoinnissa.

7.1 Pastörintipikkeamat

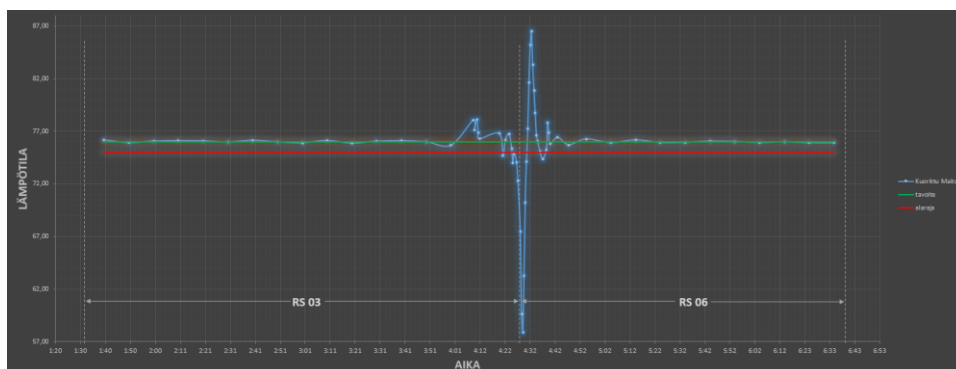
Kahlasin kaikki MP01 maidonvalmistuslaitteiston pastörintipikkeamat läpi vuodelta 2018 ja alkuvuodesta 2019. Tehdasjärjestelmä tekee tarvittaessa poikkeaman sille erälle, joka on ollut tapahtumahetkellä tuotannossa. Poikkeaman ohjausrajana on tilanne, jossa lämpötila laskee alle 75 °C. Jokaisesta alle 75 °C mittaustuloksesta tehdasjärjestelmä luo automaattisesti pastörintipikkeaman.

Kaikki poikkeamat johtuivat ns. alipastöroinnista. Poikkeama tulee myös tilanteesta, jossa lämpötila ylittää 80 astetta yli kymmeneksi sekunniksi. Näitä tapauksia ei ollut lainkaan.

Osa poikkeamista oli ns. turhia, missä järjestelmä oli jatkanut lämpötilan tallennusta, vaikka valmistuserä oli jo loppunut ja laitteisto alkanut laskemaan lämpöjä.

7.2 Yhteenveto ja analysointi

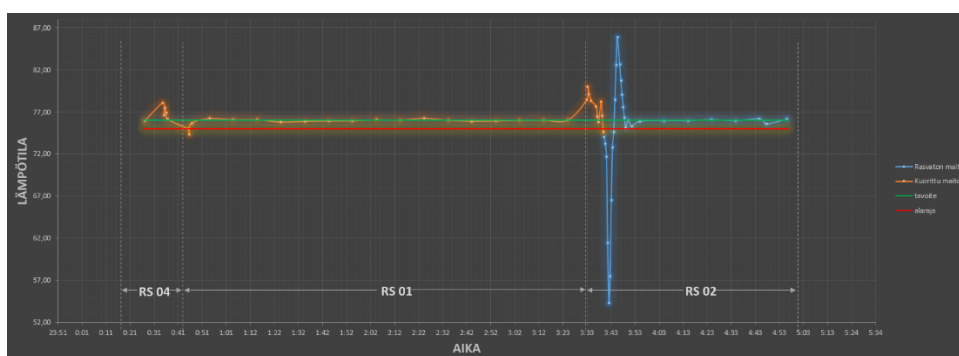
Muutamissa poikkeamissa lämpötilan notkahduksia oli tapahtunut raakamaitosiilon (RS) vaihdon yhteydessä (Kuva 20.). Tällaisissa tapauksissa todellinen syy on hankala todentaa, mutta linjastoon voi ilmeisesti päästä ilmaa, joka voi levylämmönvaihtimessa aiheuttaa lämpötilan notkahduksia.



Kuva 20. Kuva lämpötilan notkahduksesta.

Huomattiin, että maidon virtausnopeus valmistuslaitteistoon voi vaikuttaa pastörintilämpötilaan. Pastöroitavien, eri maitolaatujen tuotevaihtojen huomattiin vaikuttavan myös (Kuva 21.), jolloin lämpötilaan tuli selkeitä muutoksia.

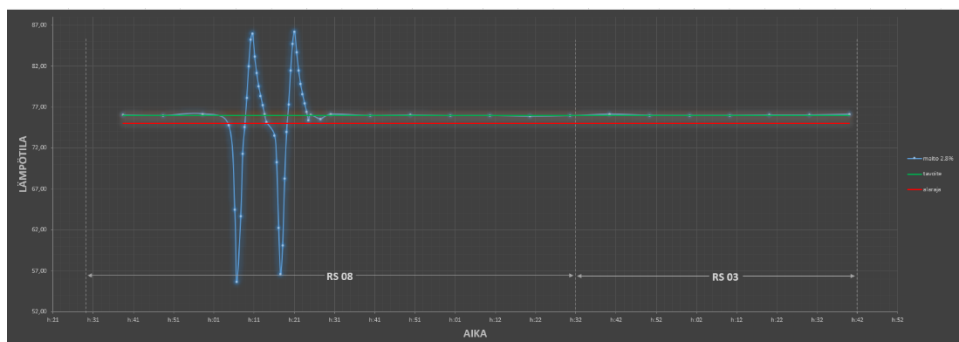
Suurimmat erot maitolaaduissa on rasvan määrässä, josta tehtiin myös erillinen tutkimus, liittyen lämmön siirtymään eri tuotteissa. Tämä meni hieman jo ohi aiheen, mutta oli kuitenkin niin mielenkiintoinen, että halusin tehdä sen. Liitteestä taulukko, josta voi katsoa tulokset. Virtausnopeutta myös muutetaan maitolaadun rasvapitoisuuden mukaan.



Kuva 21. Kuvassa tuotevaihto näkyy oranssin ja sinisen käyrän vaihtuessa.

Kolmantena syynä lämpötilan muutoksiin epäillään muutoksia ylikuuman veden linjastossa. Veden lämpötila saattaa muuttua hetkellisesti, jolloin säätöpiiri ei tällä hetkellä ehdi reagoida lämpötilan muutokseen tarpeeksi nopeasti, vaan piiri alkaa värähtelemään (Kuva 22.) ennen asettumista tavoitetilaan.

Ylikuuman veden riittävydessä saattaa olla myös vaikutusta, jos tuotannossa on monta paikkaa yhtä aikaa päällä, joka tarvitsee ylikuumaa vettä. Tällöin vesi ei vaan riitä joka paikkaan lämmittämään prosessilaitteistoja.



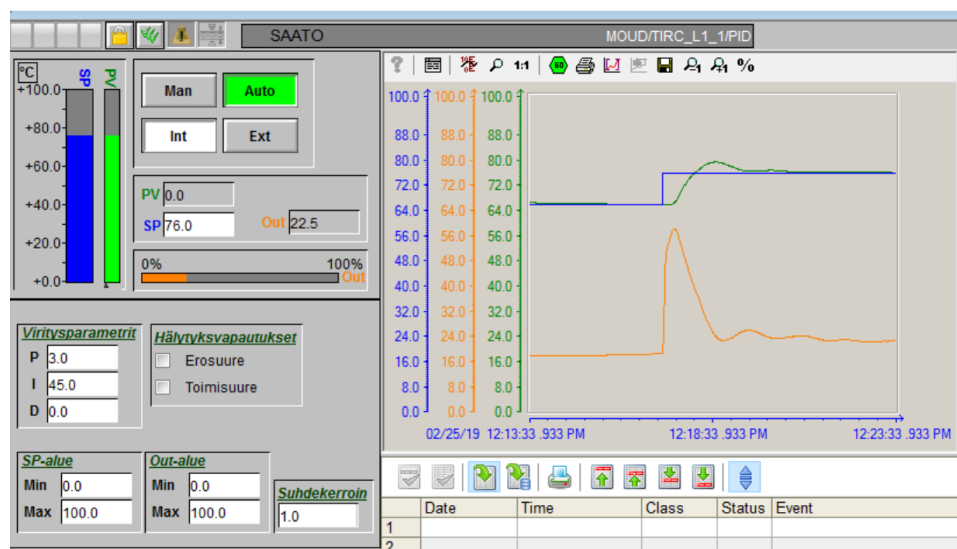
Kuva 22. Kuvassa selittämätön lämpötilan notkahdus kesken tuoteajon. Tässä epäillään lämpötilan muutosta ylikuumassa vedessä.

8 PASTÖÖRIN LÄMMITYSKIERRON PROSESSIKOKEET

Suunniteltiin tehtäväksi kolme erilaista prosessikoetta, joilla testattiin sää-
töpiirin toimintaa levylämmönvaihtimen pastörintilämpötilan saavutta-
miseksi. Nämä olivat askelvastekoe suljetulle järjestelmälle, askelvastekoe
avoimelle järjestelmälle ja miten säätöpiiri palautuu ylikuuman veden kat-
koksista.

Ensimmäinen testi tehtiin niillä samoilla parametreilla, joilla tuotanto tällä
hetkellä on käynnissä. Haluttiin saada vertailutuloksia monelta eri kantilta,
jotta voitiin luotettavasti analysoida uudet PID-säätimen virityksen jälkei-
set tulokset.

Säätimen ohjaus tapahtuu valvomosta suoraan Siemens Simatic PCS7- pro-
sessinohjausjärjestelmän käyttöliittymästä (Kuva 23).



Kuva 23. PID-säätimen ohjausikkuna.

Vasemmalla ylhäällä kuvassa näkyy SP- ja PV-arvot, joista sininen SP-palkki ja sen lukema tarkoittaa tavoiteltua lämpötilaa. Säätöpiiri pyrkii saavutta-
maan tämän arvon. Lukema (76) on siis pastöroitavan tuotteen tavoiteläm-
pötila, jota ei muuteta tavallisesti lainkaan. Vihreä PV-palkki kertoo sen
hetkisen tuotteen pastörintilämpötilan. Tieto tulee suoraan lämpötila-
anturilta ohjausjärjestelmään.

Lämpötilapalkkien vierestä, oikealta ylhäältä löytyvät valinnat manuaali- ja
automaatti ajolle. Tämä valinta vaikuttaa siihen onko järjestelmä avoin vai
suljettu. Tästä lisää kappaleessa 8.1.

Ajovalinnan alapuolella on mahdollisuus asettaa SP-arvo haluamukseen ja
manuaali ajolla oranssia Out parametria voidaan muuttaa. Tämä on siis yli-
kuuman veden säätöventtiilin ohjausvalinta.

Näiden alapuolelta löytyy vielä PID-säätimen viritysparametrien asetusikkunat. Kuten kuvasta näkyy, D-parametri ei ole värähtelyherkkyytensä vuoksi käytössä lainkaan, vaan säätöön riittävät P- ja I-parametrit. Muita parametrejä ei muutettu prosessikokeissa.

Oikealla ohjausikkunassa näkyy koordinaatisto, joka piirtää trendikuvaajaa reaaliajassa. Tämä tuotti hankaluuksia tulosten analysoinnissa, koska trendeistä ei jää mitään historiadataa muistiin. Värit täsmäävät edellä mainittuihin parametreihin. SP on sininen, PV on vihreä, ja säätöventtiilin tila Out on oranssi.

Prosessikokeiden järjestäminen ja toteutus tuottivat aluksi paljon päänvaivaa, sillä tuotannon vaikutus ja työvuorot eivät aina osu kohdalleen. Lisäksi maidon valmistuslaitteiston alipastörintiventtiilin toimintaa ei osattu ottaa huomioon. Lämpötilat seilasivat missä sattuu, kun yritimme asettaa laitteistolle alhaisempia lämpötiloja. Monen erehdyksen ja asian perusteellisen tutkinnan jälkeen huomattiin alipastörintiventtiilin vaikutus lämpötiloihin. Ohjelma on suunniteltu niin, että alipastörintiventtiili avautuu heti kun pastörintilämpötila laskee alle 76 °C:n. Tämä toiminto ohittaa kokonaan levylämmönvaihtimen jäähdytyspuolen, jolloin lämmönvaihtimen syöttösuppilon tulee vesikierrossa kuumaa vettä. Tämä ongelma sekoitti pahasti lämpötiloja ja vaikeutti prosessikokeiden suorittamista.

Ongelmaan saatiin kuitenkin ratkaisu ja lupa muuttaa prosessikokeen ajaksi alipastörintiventtiilin asetusarvoja ohjelmassa siten, että se avautuisi vasta alle 60 °C:een alapuolella. Näin päästiin tekemään suljetun järjestelmän askelvastekoetta, jossa lämpötila nostetaan 66 °C:sta, 76 °C:een.

8.1 Askelvastekokeet

Ensimmäisen askelvastekoe suljetulle järjestelmälle. Tästä selvisi vasta myöhemmin, että suunniteltu SIMC-kaavaan pohjautuva viritys esitetään avoimelle järjestelmälle, eikä suljetulle. Ajateltiin kuitenkin analysoida saadut tulokset ja verrata niitä myöhemmin säätöpiirin virityksen jälkeisiin tuloksiin. Tämä suljetun järjestelmän koe ei siis ole mitenkään oikeaoppinen, vaan erehdyksen kautta suunniteltu hyödyntämään saatua mittausdataa.

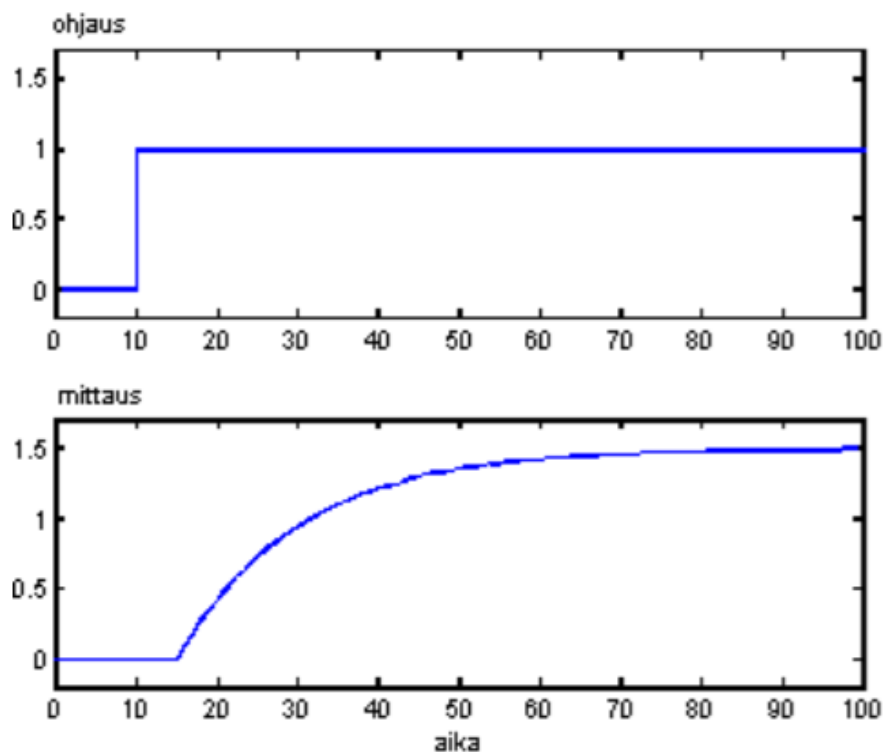
Toinen koe tehtiin avoimelle järjestelmälle. Tässä testissä säädin pidettiin käsiajolla, ja juuri tällä avoimen järjestelmän askelvasteella pystytään tekemään matemaattinen prosessimalli.

Avoimen- ja suljetun järjestelmän ero tulee siitä, että avoimessa järjestelmässä säädin ei käytä mittausdataa toimilaitteen (tässä tapauksessa sää-

töventtiili) ohjaamiseen, vaan säätö tehdään käsiohjauksella (Manual). Suljetussa järjestelmässä säädin muokkaa ohjausta mittausdatasta saadun tiedon mukaan. Säädin toimii siis automaattiohjauksella (Auto).

Askelvastekokeen tarkoituksena on syöttää järjestelmään askelmainen heuräte ja mittaamalla järjestelmän lähtö. (Harju & Marttinen, Säätöpiirin virityksen perusteet, 2000, s. 74) Tätä koetta hyödynnetään matemaattisen mallin parametreja määriteltäessä, sekä suljetun järjestelmän toiminnan testauksessa. Säätimen virityskaavoissa tarvitaan matemaattista prosessimallia.

Näissä kokeissa on kyseessä yhden aikavakion prosessi. Se on tyypillinen teollisuusprosessi. Sitä voidaan kuvata riittävästi yhdellä aikavakiolla (Kuva 24). Tällaisissa järjestelmissä on usein myös viivettä, ns. kuollutta aikaa. Kuollut aika ilmenee kuvaajassa askelmaisen jyrkän nousun, ja ohjaussignaalin reagointiin kuluneena aikana. Kaikki kokeet ennen viritystä tehtiin samoilla säätimen parametreilla, joilla säädin toimii tuotannon aikana.



Kuva 24. Esimerkki yhden aikavakion askelvasteesta.

8.1.1 Suljettu järjestelmä

Ensimmäinen askelvastekoe tehtiin suljetulle järjestelmälle. Siitä saatiin arvokasta tietoa säätöpiirin suorituskyvyn kannalta. Testistä huomaa selvästi, että vahvistus on hiukan suuri. Mittaussignaali nousee reilusti tavoitteen yli. Uusilla virityspareetreilla voidaan todennäköisesti nopeuttaa asettumisaikaa. Tämän hetkessä tuotannossa säätimen vahvistus on siis 3, ja integrointiaika 45.

Säätöpiirin suorituskyvyn arvioinnissa myös stabiilisuus on perusvaatimus. Säätöpiirin nopeutta voidaan arvioida nousuajan ja aikavakion perusteella.

Testissä määriteltiin viisi eri tunnuslukua (Liite 1):

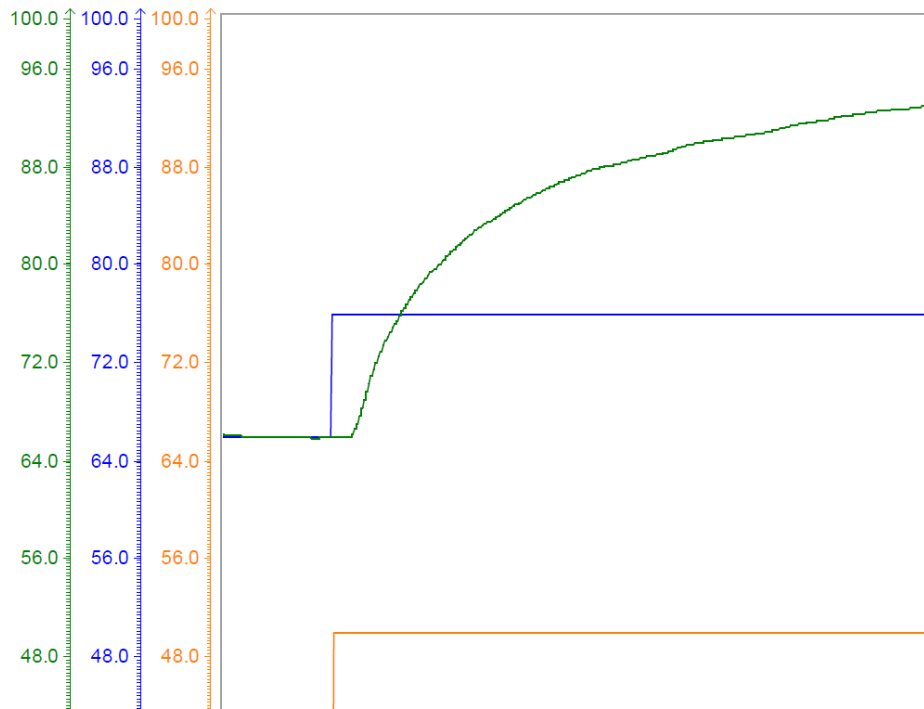
- Nousuaika.
- Huippuaika.
- Asettumisaika.
- Suljetun piirin aikavakio.
- Kuollut aika

8.1.2 Avoin järjestelmä

Avoimen järjestelmän askelvastekokeessa (Kuva 25) säädin pidettiin manuaali asennossa, jolloin säädön ulostulo ei säädä lämpötilaa. Pohtimista aiheutti säätöventtiilin tilan vaikutus lämpötilaan.

Ennen ensimmäistä koetta haluttiin nähdä säätöventtiilin käyttäytymistä säätimen automaatti tilassa. Testi osoitti, että kymmenen asteen askelvas-teessa 66 °C - 76 °C säätöventtiili avautuu vain noin puoleen kapasiteetistaan.

Vertailun vuoksi haluttiin tehdä kuitenkin kokeet säätöventtiili täysin auki, sekä 50 %:n tilassa. Tuloksissa oli vain hieman eroa, jolloin päädyttiin käyttämään askelvastekokeessa säätöventtiilin 50%:n tilaa, sen ollessa myös lähempänä automaattisäädön ominaisuutta.

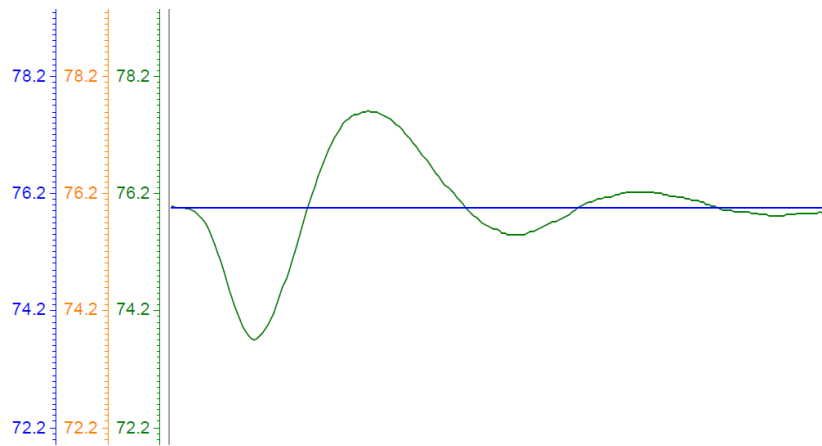


Kuva 25. Avoimen järjestelmän askelvaste.

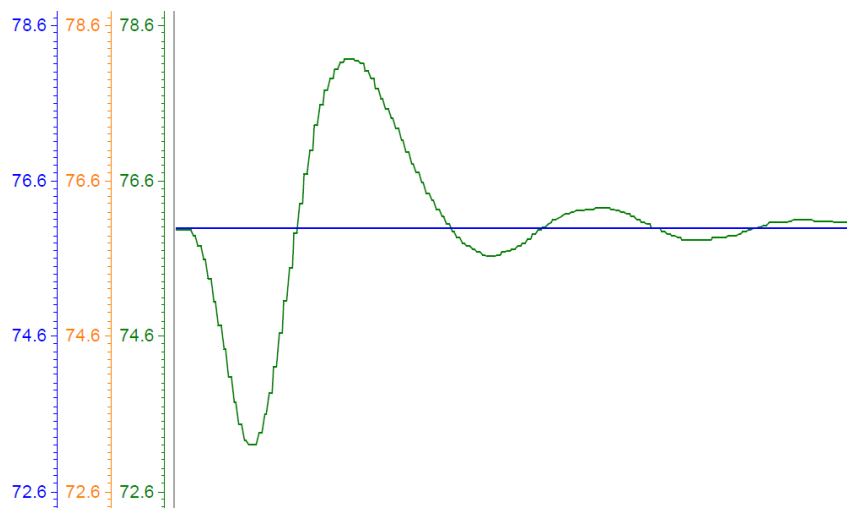
Oranssi kuvaaja tarkoittaa säätöventtiilin tilaa, joka oli testissä 50 %. Sininen kuvaaja osoittaa askelvasteen, eli lämpötilan tavoitearvon askelmaisena nousuna kymmenellä asteella. Vihreä kuvaaja on lämpötilan mittaustulos.

8.2 Ylikuumen veden virtauksen katkaiseminen

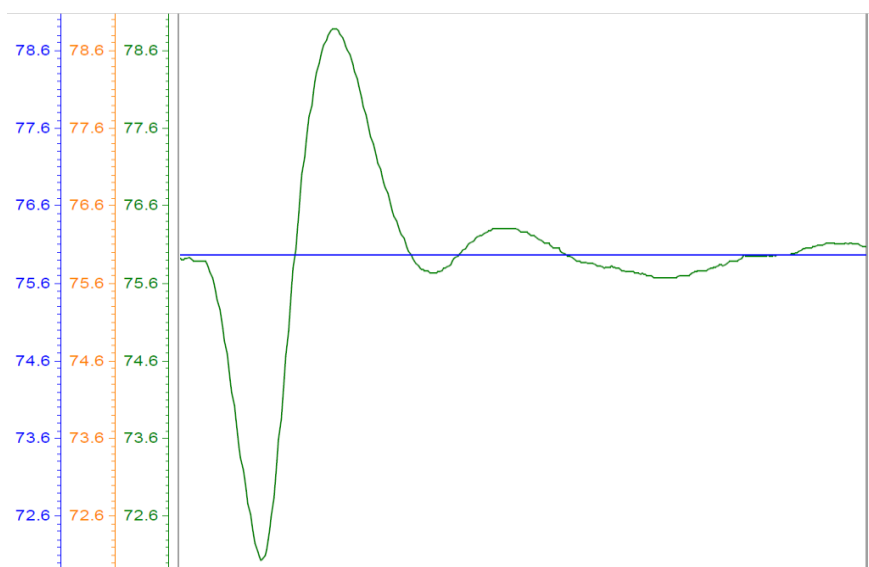
Tähän koemalliin päädyttiin tarpeen kautta, koska haluttiin testata säätöpiirin toimintaa myös ylikuumen veden kannalta. Emme voineen hallitusti muuttaa käyttöhyödykkeenä kiinteistössä olevaa yli 110 °C vettä, niinpä päätimme sulkuventtiiliä ohjaamalla tehdä eri pituisia katkoksia veden syöttöön säätöpiirin säätöventtiilille. Testattiin kolme eri vaikutusta, 10 s, 20 s, ja 30 s katkoksilla. Testistä saatiin mielenkiintoisia tuloksia, ja jo 10s katkoskin heilautti lämpötilaa jonkin verran.



Kuva 26. 10 s katkos.



Kuva 27. 20 s katkos.



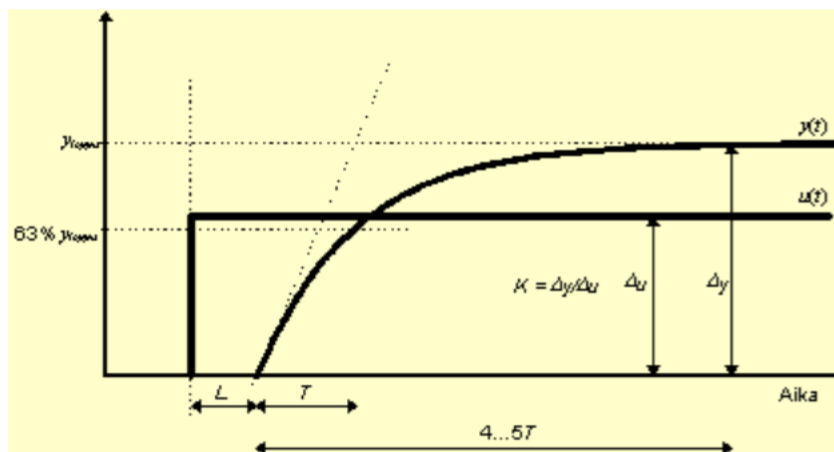
Kuva 28. 30 s katkos.

9 SÄÄTÖPIIRIN SIMULOINTI

Säätöpiirin simulointia tehtiin matlabin simulink ohjelmaa hyväksi käyttäen. Ensin piti luoda prosessimalli askelvaste kokeen tuloksia hyödyntäen. Simuloinnin etuna on helppo ja nopea viritysparametrien muuttaminen simuloituun järjestelmään. Mitä tarkemmin ja huolellisemmin prosessimalli mallinnetaan askelvastekokeesta, ja mitä paremmin se vastaa todellisuutta, sitä tarkempia simulointien tulokset ovat.

9.1 Prosessimalli

Yhden aikavakion prosessimallin määrittämiseen tarvitaan luotettava kuvaaja avoimen järjestelmän askelvastekokeesta. Käytössä oli ainoastaan PDF-tiedostoon muunnettu kuva säätimen tilasta tietyllä hetkellä. Kuvasta oli hieman hankala määrittää tarkasti parametrejä. Tarkalla työllä saatiin kuitenkin määritettyä kolme matemaattiseen prosessimalliin tarvittavaa parametria. Vahvistus, aikavakio ja kuollut aika (viive).



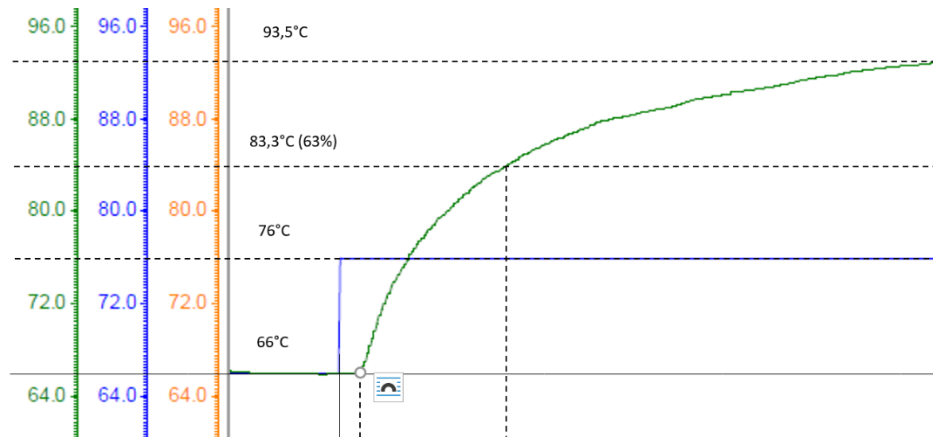
Kuva 29. Yhden aikavakion ja viiveen määrittäminen askelvastekuvasta. (Harju & Marttinen, Automaatioseura, 2000, s. 123)

Mallit ovat perinteisesti yhden aikavakion ja viiveen muodostamia siirtofunktioita. Siirtofunktion $G(s)$, joka on aikavakiomuodossa, vahvistus on K , aikavakio T ja viive eli kuollut aika on L .

Kaava 6. Prosessimallin kaava.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-sL}}{Ts + 1}$$

Yhden aikavakion ja viiveen prosessimalli esitetään ohjauksen- ja mittauksen Laplace-muunnosten suhteena siirtofunktiona. (Harju & Marttinen, Automaatioseura, 2000, s. 123)



Kuva 30. Kuvaaja, josta määriteltiin prosessimalli. Aikajana ei ole näkyvissä.

Kaava 7. Prosessimallin määrittäminen. (Kuva 29.)

$$\text{Vahvistus } K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$\text{Vahvistus } K = \frac{27.5}{10}$$

$$\text{Vahvistus } K = 2.75$$

Aikavakio T = aika $y(t)$ funktion 63 % kohdalla. Vähennetään viive.

$$\text{Aikavakio } T = 118 \text{ s}$$

Viive (kuollut aika) L = askeleen ja funktion $y(t)$ välinen aika.

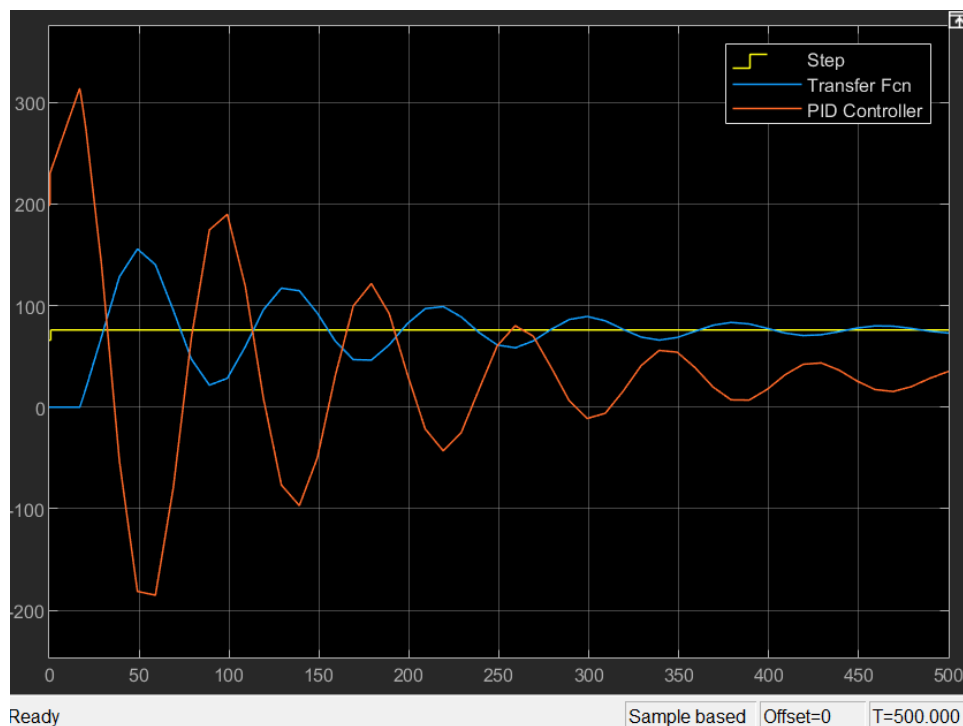
$$\text{Viive } L = 17 \text{ s}$$

9.2 Simulink simulointi

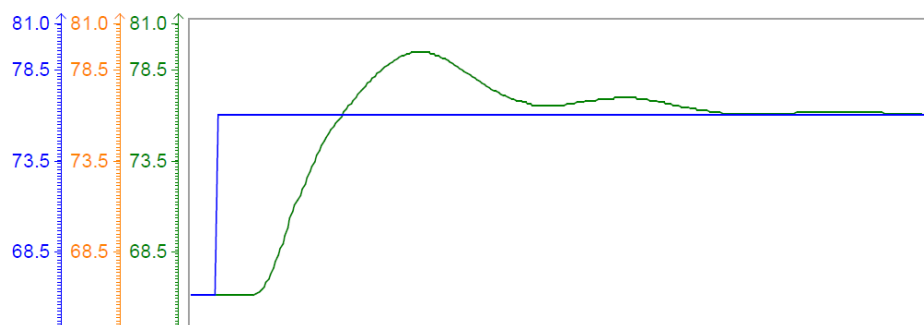
Simuloin prosessin ja PID-säätimen toimintaa matlabin simulink- nimisellä lisäosalla. Simuloinnin matematiikan kurssin aikana tutuksi tullut ohjelma oli oiva työkalu simuloinnin laatimiseen. Ohjelmaan on helppo vaihdella parametrejä ja ajaa eri simulaatiota. Kuvaajista on helppo lukea tuloksia ja säätimen käyttäytymistä.

Prosessimallin simulointi kuvaajasta (Kuva 31.) huomaa, että se ei aivan tarkalleen vastaa todellista prosessia (Kuva 32.) säätimen toiminnan osalta. Kuvia on myös vaikea vertailla, koska säätimen online- kuva on niin hankala skaalata. Kuvaan ei nyt mahtunut mukaan myöskään säätimen

ulostulon käyrä. Simulaatiossa tapahtuu selvästi enemmän huojuntaa, kuin todellisuudessa.



Kuva 31. Prosessimallin simulointi.



Kuva 32. Todellinen säätimen toiminta ennen viritystä.

10 SÄÄTÖPIIRIN VIRITTÄMINEN

Virityksen pääperiaatteet ja tarpeet tulee miettiä aina tapauskohtaisesti. Tavoitteet on hyvä olla selvillä ja se, miten periaatteella säätöpiirin halutaan toimivan. Tässä projektissa haluttiin painottaa kahta asiaa. Säätöpiirin mahdollisimman nopeaa reagointia lämpötilan romahdukseen, mutta kui-

tenkin huojunnan vähenemistä lämpötilan laskiessa äkillisesti. Kaikki mahdolliset syyt lämpötilan eivät tulleet tietoon, mutta tutkimuksia jatketaan tulevaisuudessa. Säättöpiirin halutun käyttäytymisen määrittelemisen tuli suurilta osin pastörintipoikkeamien analysoinnin kautta.

Ongelmia aiheutti identtisen prosessimallin luonti, joka olisi vastannut todellista säätimen toimintaa. Mitä paremman ja todenmukaisemman prosessimallin onnistuu luomaan, sitä helpompi on simuloida säättöpiirin toimintaa halutuilla tavoilla. Myös viive (kuollut aika) on tässä prosessissa niin pitkä (17 s-18 s), joten nopea säätimen reagointi lämpötilan muutokseen ei ole mahdollista. Jatkossa on tarkoitus suunnitella ylikuuman veden tarkempaa lämpötilan mittausta, jolloin saataisiin säädin reagoimaan nopeammin.

Ennen prosessikokeita tehtiin kattavat simuloinnit eri viritysmenetelmien pohjalta.

10.1 Viritysmenetelmät

Virityksessä päädyttiin käyttämään SIMC (Skogestad's Internal Model Control) - kaavaa, joka on mallipohjainen ja yleiskäyttöinen viritystapa PI-säätimelle. Tämä menetelmä valikoitui myös säätimen rauhallisen ja tasaisen toiminnan tavoittelemisen vuoksi. SIMC-kaava tuli koulussa tutuksi, ja se valikoitui tämän säättöpiiriin sopivaan viritykseen. Tein myös toisen mallin simuloinnin yritys-erehdys - menetelmällä, jonka nimesin MINT - viritykseksi. Näitä kahta vertailtiin viimeisissä prosessikokeissa, jotka tehtiin virityksen jälkeen.

Projektityön säättöpiiri on yksinkertainen PI-säätimen ohjaama tapahtuma. Siinä on vain kaksi viritysparameetria, joita muuttamalla koitetaan saada säättöpiiri toimimaan etukäteen määritetyllä tavalla. Tietyissä tilanteissa piiriltä odotetaan tietynlaista käyttäytymistä. Erilaiset teollisuuden säättöpiirit viritetään edelleen yritys-erehdys- menetelmällä, mutta prosessimallin mahdollisimman tarkka luonti hyödyntää paljon simulointitarkkuutta, jolloin viritystä on helppo tehdä ohjelmallisesti tuotannon ulkopuolella.

10.1.1 SIMC- viritys

Kun oli määritelty prosessimalli ja valittu viritysmenetelmä, niin oli aika laskea säätimen uudet parametrit. Prosessimallin määrittelyn (Kaava 7.) mukaan saatiin seuraavat luvut:

$K = 2.75$ (vahvistus).

$T = 118$ s (aikavakio).

$\tau = 17$ s (viive).

Kaava 8. Vahvistuksen virityskaava. (Skogestad & Grimholt, 2011, s. 24)

$$K_C = \frac{1}{K} \frac{T + \frac{\tau}{3}}{\tau + \tau_c}$$

$$K_C = \frac{1}{2,75} \frac{118 + \frac{17}{3}}{17 + 17}$$

$$K_C = 1.32$$

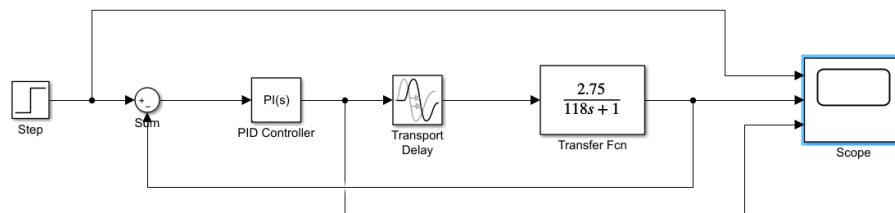
Kaava 9. Integrointiajan virityskaava. (Skogestad & Grimholt, 2011, s. 24)

$$T_i = \min\left(T + \frac{\tau}{3}, 4(\tau_c + \tau)\right)$$

$$T_i = \min\left(118 + \frac{17}{3}, 4(17 + 17)\right)$$

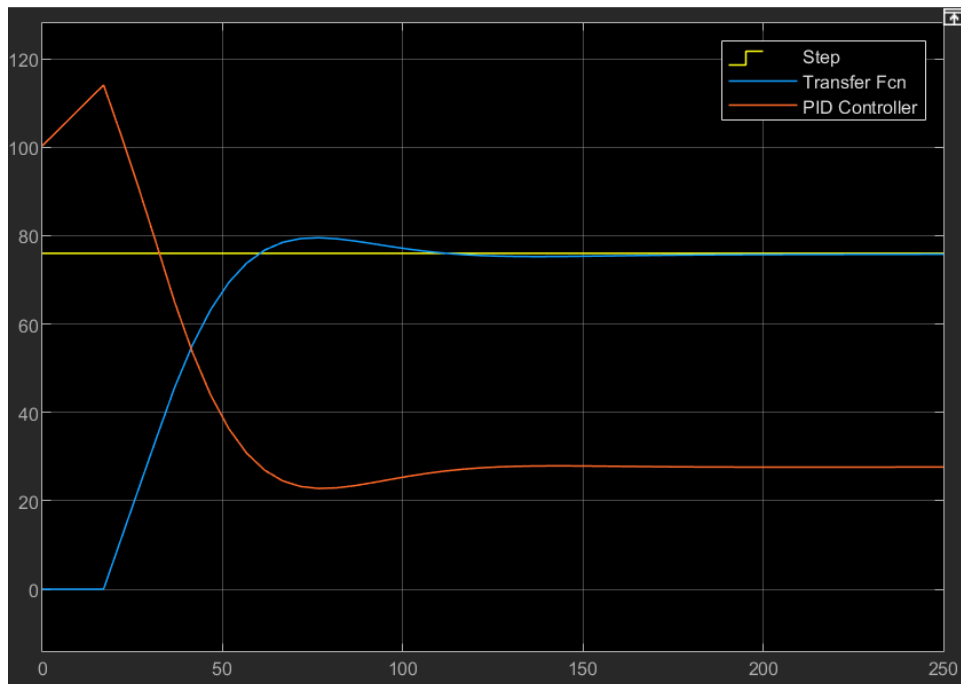
$$T_i = 124 \text{ s}$$

Simulointi tapahtui jälleen Simulink- ohjelmistolla (Kuva 33). Ohjelmaan luotiin lohkokaavio säätöpiiristä ja asetettiin komponenteille oikeat parametrit.



Kuva 33. Simulink lohkokaavio.

- Step tarkoittaa askelta, joka määriteltiin (66 – 76).
- PID controller lohkon määriteltiin viritysparametrit (P = 1.32 ja I = 124).
- Transport Delay, määritetään viive (17 s).
- Transfer Fcn on siirtofunktio, joka laskettiin prosessimallin perusteella.
- Scope näyttää kuvaajan.



Kuva 34. Simulink kuvaaja SIMC-kaavan virityksestä.

Kuvaajassa x-akseli osoittaa lämpötilaa ja y-akseli aikaa sekunneissa. Keltainen askelvaste nousee ajassa nolla, 66 asteesta 76 asteeseen. Sininen käyrä esittää mitattua lämpötilaa ja punainen on säätöventtiilin asento, eli säätimen ulostulo.

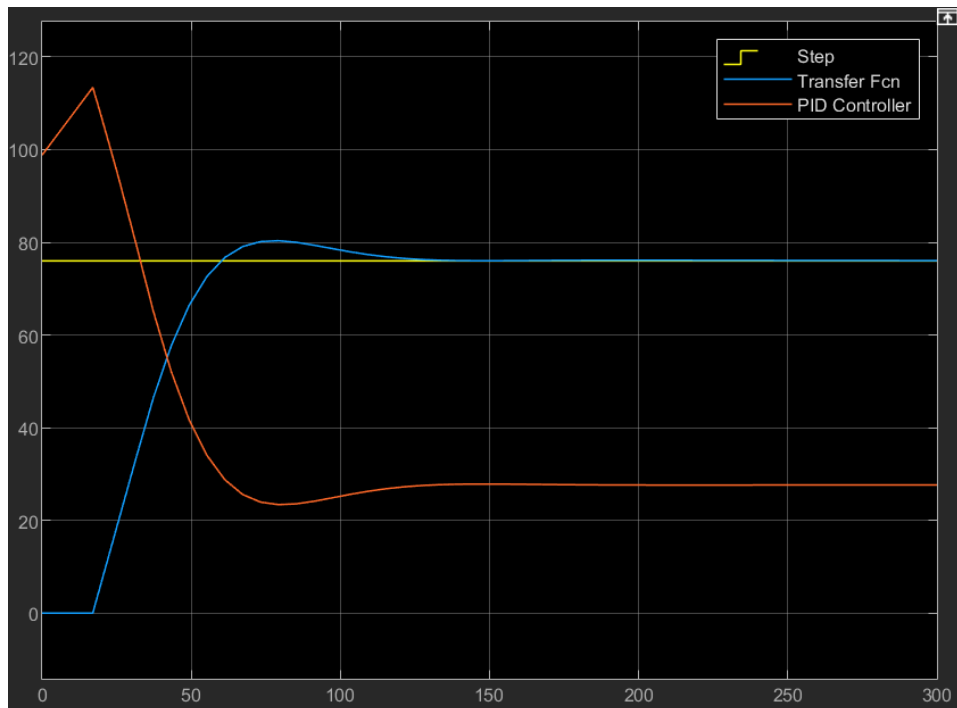
10.1.2 Mint-viritys

Tämä Mint-viritys on oma antamani nimitys itse simulinkillä kokeilemalla haetuille parametreille. Tavoitteena oli löytää parametreja muuttamalla paras viritystulos säätöpiirin haluttuun käyttäytymiseen. Lämpötilan tulisi nousta nopeasti ilman huojuntaa, ja se saisi olla hieman enemmän yli-reagoiva. Pääasia olisi, että lämpötila ei laskisi yli astetta pienten ylikuumen veden virtaushäiriöiden vuoksi. Tällöin säästyttäisi alipastörintipoikkeamilta. Virityksessä käytettiin samaa prosessimallia ja viivettä kuin SIMC virityksessäkin.

Tällä yritys-erehdys menetelmällä simuloitujen parametrin, poikkesivat kuitenkin SIMC-kaavalla lasketuista. Vahvistus ja integrointiaika, molemmat olivat hiukan pienemmät. Suurta eroa näissä ei ollut, mikä kertoo myös sen, että SIMC-kaava oli todella käyttökelpoinen tässä säätöpiirin virityksessä.

	SIMC	MINT
P	1,32	1,20
I	124	115

Taulukko 2. SIMC- ja MINT-kaavojen parametri erot.



Kuva 35. Simulink kuvaaja Mint-virityksestä.

11 TULOSTEN TARKASTELU

Simulointien jälkeen oli viimeisten prosessikokeiden vuoro. Säättöpiiri viritettiin uusilla parametreilla. Sen toiminnalle tehtiin vastaavat testit, kuin ensimmäisissä prosessikokeissa. Ensin aloitettiin suljetun järjestelmän askelvastekokeella. Siinä testattiin ja verrattiin säättöpiirin suorituskykyä (kuva 25).

Tarkastelussa oli varsinkin aikavakio, joka pysyikin pitkälti samana. Muuten alkuperäinen aggressiivisemmin toiminut säätö oli nopeampi jokaisella osalla. Viiveen, ja muutenkin aikojen tarkka mittaaminen oli haasteellista huonon PDF-tulostuksen vuoksi.

Prosessityön edetessä huomattiin, että merkityksellisempi testitulos tulee olemaan ylikuuman veden virtauksen katkomisesta. Toiset testit tehtiin samoilla menetelmillä kuin ensimmäisetkin. Ylikuuman veden virtauksen sulkuventtiiliä suljettiin käsin 10, 20, 30 sekunnin ajoiksi. Nämä tulokset uusilla viritysparameetreillä olivatkin toivotunlaisia. Säättöpiiri reagoi huojuntaan huomattavasti paremmin, vaikka ei ollutkaan yhtä aggressiivinen. Piikit tavoitelämpötilan (76 °C) molemmin puolin pienenevät huomattavasti. Oikeastaan ensimmäisen notkahduksen jälkeen lämpötila asettui hyvälle tasolle hiukan tavoitelämpötilan yläpuolelle. Ylitys oli vain noin 0,5 astetta.

11.1 Suljetun piirin tulokset

Suljettu piiri

	<i>Alkutila (s)</i>	<i>SIMC (s)</i>	<i>MINT (s)</i>
Nousuaika 10 % - 90 %	26	138	135
Kuollut aika	17	20	15
Suljetun piirin aikavakio	37	44	44
Huippuaika	85	342	336
Asettumisaika	206	294	252

Taulukko 3. Suljetun piirin prosessikokeiden tulokset.

Taulukosta huomaa nousuajan 10 % - 90 % olevan noin puolitoista minuuttia nopeampi. Tämä ei ole kuitenkaan kovin oleellinen tunnusluku, koska laitteisto lämmitetään tuotannon alussa. On yhden tekevää kestääkö se kolme vai viisi minuuttia.

Huippu- ja asettumisajatkin olivat hankala määrittää, koska piirissä ei tapahtunut juuri lainkaan huojuntaa viritysten jälkeen. Alkutilassa aggressiivisemmalla virityksellä lämpötila huojui enemmän, jolloin huippuaika ja asettumisaika olivat helpompi määrittää kuvaajassa esiintyvistä piikeistä (Liitteet 2–4).

11.2 Ylikuuman veden virtauksen katkaisemisen tulokset

Tässä testissä saatiin hyviä tuloksia. Uudet viritysparametrit vaikuttivat säätöpiirin toimintaan merkittävästi. Huojunta väheni ja säätö oli maltillisempaa, jolloin saatiin lämpötila asettumaan hyvälle tasolle huomattavasti nopeammin. Kahden eri viritystavan tuloksissa ei taasen ollut isoja eroja. Kaikki kolme eri testiä antoivat samankaltaisen tuloksen. Yritys-erehdys menetelmällä simuloinnilla saadut Mint-parametrit, olivat kuitenkin hiukan paremmat säätöpiirin halutun käyttäytymisen kannalta.

Alla olevista taulukoista ilmenee huojunnassa ilmaantuvien piikkien lämpötila erot tavoitelämpötilaan (76 °C) verrattuna. Niiden aika ja lämpötilan asettumisaika ihanne raja-arvoihin. Nämä raja-arvot arvioitiin +/- 0.25°C välille. 20s ja 30s kokeissa asettumisaikaa arvioitiin myös hyväksyttävän lämpötila eron perusteella, jolloin saatiin erinomaisia tuloksia piirin toiminnassa. Ajat on merkitty tähdellä virallisten asettumisaikojen perään. Tämä seikka tuli esille analysoidessamme 0.5°C lämpötilaylityksen vaikutusta. Totesimme näin pienen ylityksen merkityksettömäksi säätöpiirin toiminnan, ja tuotannon kannalta.

Kaikki kuvaajat testistä löytyvät liitteistä (Liite 5-13).

Ylikuuma katkos 10s

	Alkutila		Virityksen jälkeen (SIMC)		Virityksen jälkeen (MINT)	
	<i>lämpötila °C</i>	<i>aika s</i>	<i>lämpötila °C</i>	<i>aika (s)</i>	<i>lämpötila °C</i>	<i>aika (s)</i>
Piikki 1	-2.3	24	-1.35	13	-1.3	29
Piikki 2	1.6	64	0.65	54	0.3	117
Piikki 3	-0.5	116	-		-	-
Asettumis- aika	-	169	-	137	-	123

Taulukko 4. Ylikuuman veden katkos 10 s

Ylikuuma katkos 20s

	Alkutila		Virityksen jälkeen (SIMC)		Virityksen jälkeen (MINT)	
	<i>lämpötila °C</i>	<i>aika (s)</i>	<i>lämpötila °C</i>	<i>aika (s)</i>	<i>lämpötila °C</i>	<i>aika (s)</i>
Piikki 1	2.8	23	-3.05	31	-3.05	33
Piikki 2	2.15	63	0.3	94	0.35	105
Piikki 3	0.4	120	0.4	187	-	-
Piikki 4	0.25	163	-		-	-
Asettumis- aika	-	173	-	321 (94)*	-	171 (105)*

Taulukko 5. Ylikuuman veden katkos 20 s

Ylikuuma katkos 30s

	Alkutila		Virityksen jälkeen (SIMC)		Virityksen jälkeen (MINT)	
	<i>lämpötila °C</i>	<i>aika (s)</i>	<i>lämpötila °C</i>	<i>aika (s)</i>	<i>lämpötila °C</i>	<i>aika (s)</i>
Piikki 1	3.9	34	-4.2	55	-4.15	30
Piikki 2	2.9	85	0.35	159	0.55	83
Piikki 3	0.45	127	-	-	-	-
Piikki 4	0.3	166	-	-	-	-
Piikki 5	0.52	256	-	-	-	-
Asettumis- aika	-	280	-	177 (159)*	-	(83)*

Taulukko 6. Ylikuuman veden katkos 30 s

12 YHTEENVETO

Kaiken kaikkiaan projektityö oli erittäin mieluisa ja opettavainen kokonaisuus. Opin todella paljon erilaisista teollisuuden säätöpiireistä ja oman tuotantolaitoksen prosesseista. Mittaustulosten ja datan analysointiin mene enemmän aikaa, kun alkuun ajateltiin, mutta on muistettava, että tähän ei ollut valmista toimintatapaa. Selvityksen aikana tehtiin virheitä,

joista pääsee seuraavan projektin aikana jo paljon helpommalla. Järkevämpi toimintamalli alkaa jo hahmottumaan. Ajatuksissa on monta parannusideaa ja kehityskohdetta sille, kuinka säätöpiirin haluttu käyttäytyminen saadaan selville. Ei ole aivan yksinkertaista miettiä, millä tavalla säätöpiiri halutaan toimia. Mitkä sen rajoitukset ovat, ja miten rajoituksia sekä viivettä voitaisiin mahdollisesti vähentämään.

Prosessikokeet tuottivat aluksi paljon päänvaivaa. Vaikka säätöpiiri itsessään on yksikertainen, ei levylämmönvaihtimen toiminta ollut yhtä helppo. Moni asia vaikutti lämpötilaan. Alipastörintiventtiilin ohjaus lämpötilan laskiessa vaikutti tähän merkittävästi. Myös lämmönvaihtimen jäähdytyspuoli oli otettava huomioon. Vesiajolla tehdyt prosessikokeet oli suunniteltava mahdollisimman paljon maidon tuotantoajoa vastaaviksi. Vain tällä tavalla saatiin riittävän luotettavia tuloksia, jotta uusia viritysparameetreja voidaan testata myös tuoteajossa.

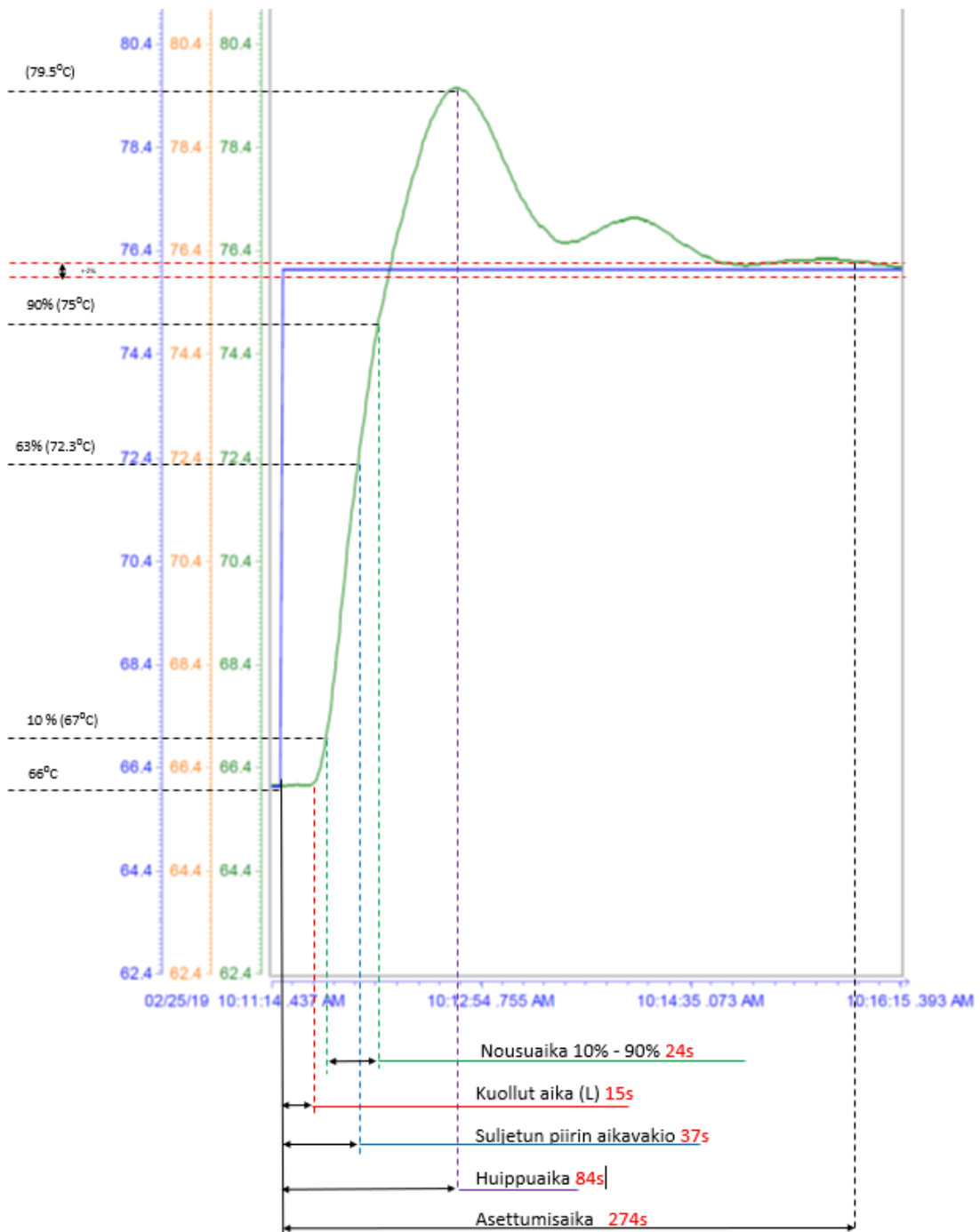
Tulevaisuus näyttää pääsimmäkö tavoitteeseen vähentää pastörintipoikkeamia. Tavoitteena oli myös suunnitella toimiva toimintamalli muidenkin säätöpiirien viritykseen ja optimointiin. Tässä mielestäni onnistuttiin hyvin. Muutama hyvä uusi ideakin säätöpiirien toiminnan testaamiseen saatiin. Ideat tulivat sen ansiosta, että säätöpiirin toiminnassa menttiin niinkin syvälle, että ymmärrys sen vaikutuksesta ja muiden prosessin osien vaikutuksesta selkeytyivät merkittävästi.

Loppulauseena haluan vielä ilmaista innokkuuteni ja mielenkiintoni tämän opinnäytetyön suorittamiseen. Löysin selkeästi sen mieleiseni osa-alueen, jonka työskentelyyn on valtavasti mielenkiintoa. Ongelmien ratkaisu ja erilaista selvityksien tekeminen ovat selkeästi ne mieluisimmat asiat. Motivaatio hyvien ohjaajien, niin koulun kuin työpaikankin puolesta, pysyi korkealla ja projekti oli mukava saattaa päätökseen.

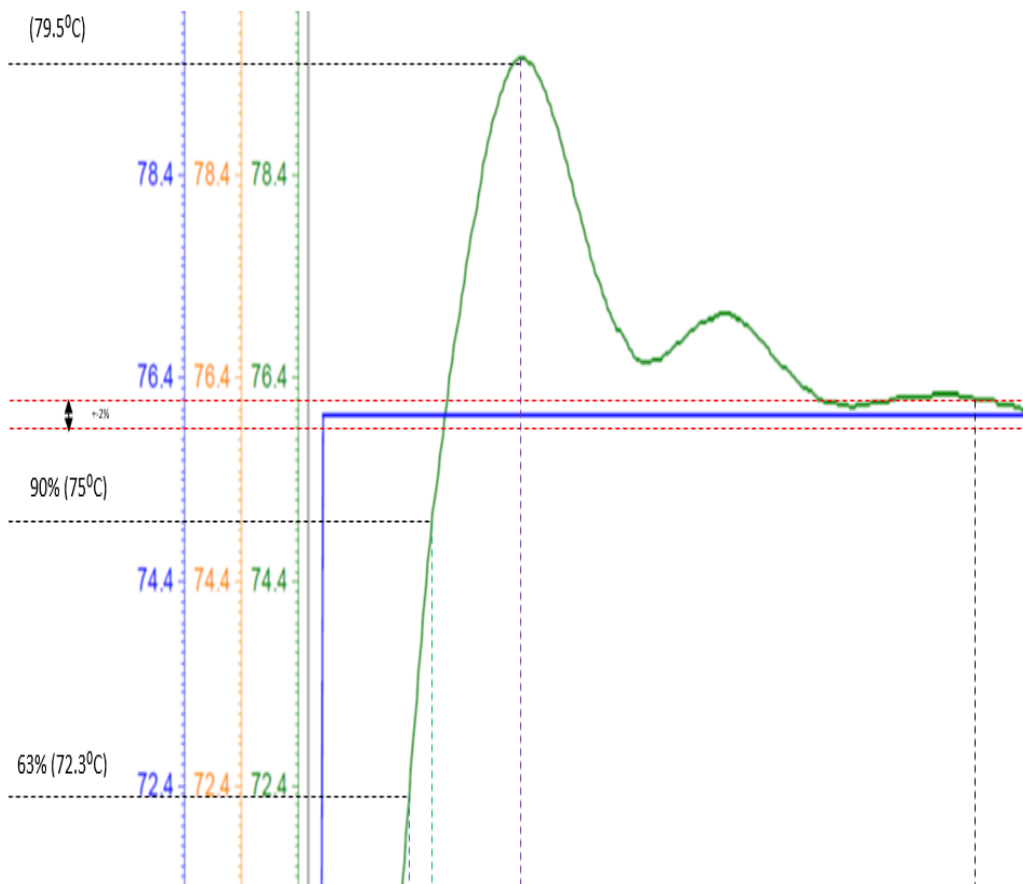
Lähdeluettelo

- Harju T. & Marttinen, A. (2000). *Automaatioseura*. Noudettu osoitteesta:
https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1367/pid_kirja_1-1.pdf
- Henttonen, J. (2019). *Hamk Moodle*. Noudettu osoitteesta Takaisinkytkentä:
https://moodle.hamk.fi/pluginfile.php/1059689/mod_resource/content/6/S%C3%A4%C3%A4t%C3%B6tekniikkaMatlab.pdf
- metsätalousministeriö, (3.10.2014). *www.finlex.fi*. Noudettu osoitteesta:
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140795?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=past%C3%B6rointi>
- Skogestad, S.;& Grimholt, C. (2011). *The SIMC method for smooth PID controller*.
Noudettu 4.5.2019 osoitteesta:
<http://folk.ntnu.no/skoge/publications/2012/skogestad-improved-simc-pid/old-submitted/simcpid.pdf>
- Valio Oy. (2019). *www.valio.fi*. Noudettu osoitteesta <https://http://www.valio.fi/yritys>
- Wikipedia*. (2019). Noudettu osoitteesta Maidon pastörinti:
https://fi.wikipedia.org/wiki/Past%C3%B6rointi#Maidon_past%C3%B6rointi

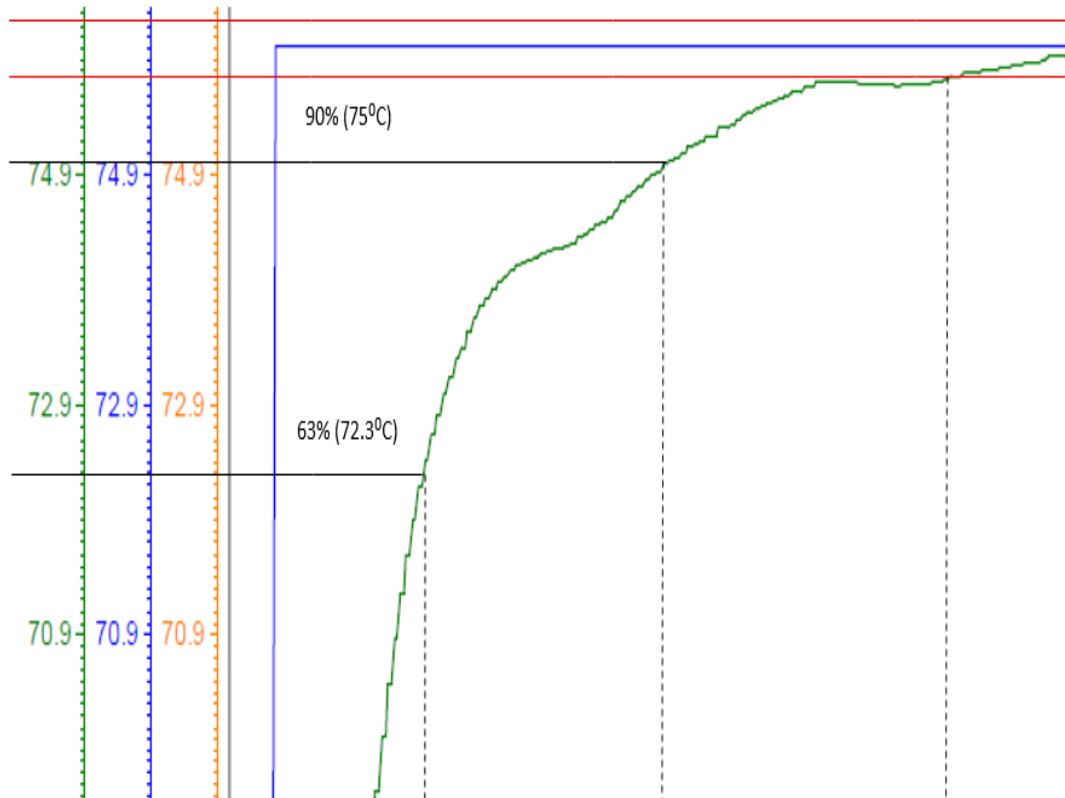
Säätöpiirin tunnuslukuja.



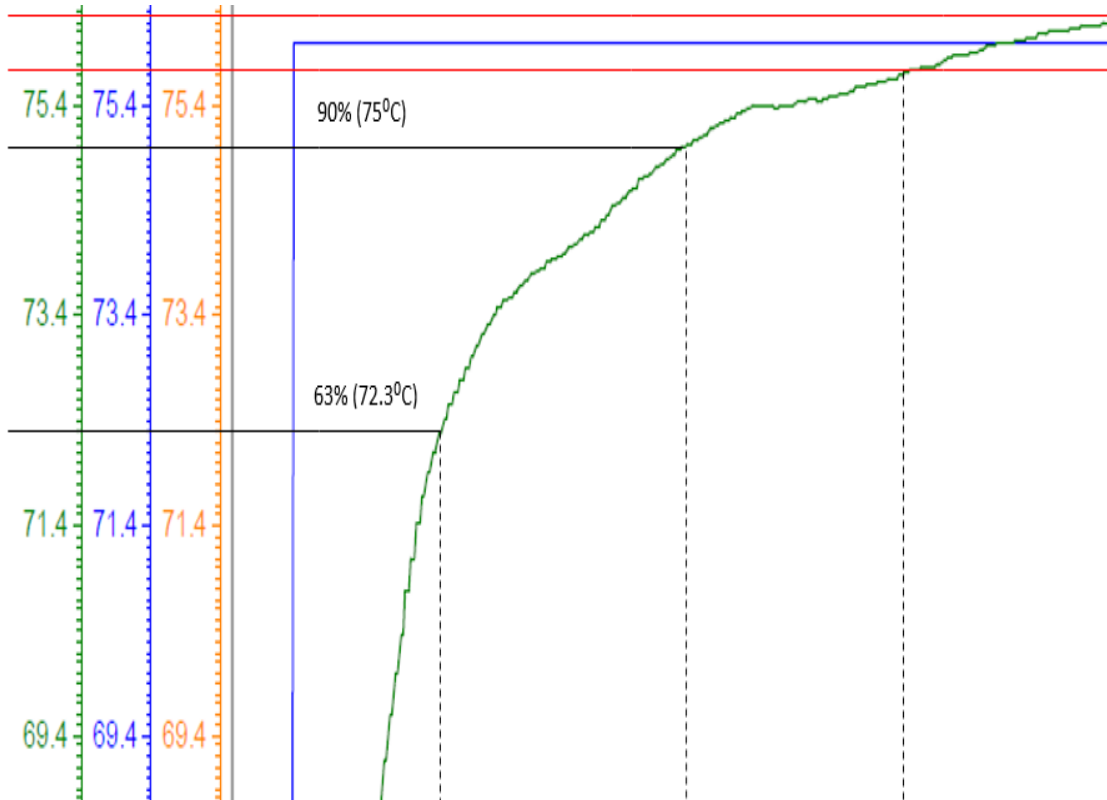
Alkuperäinen suljetun piirin askelvaste.



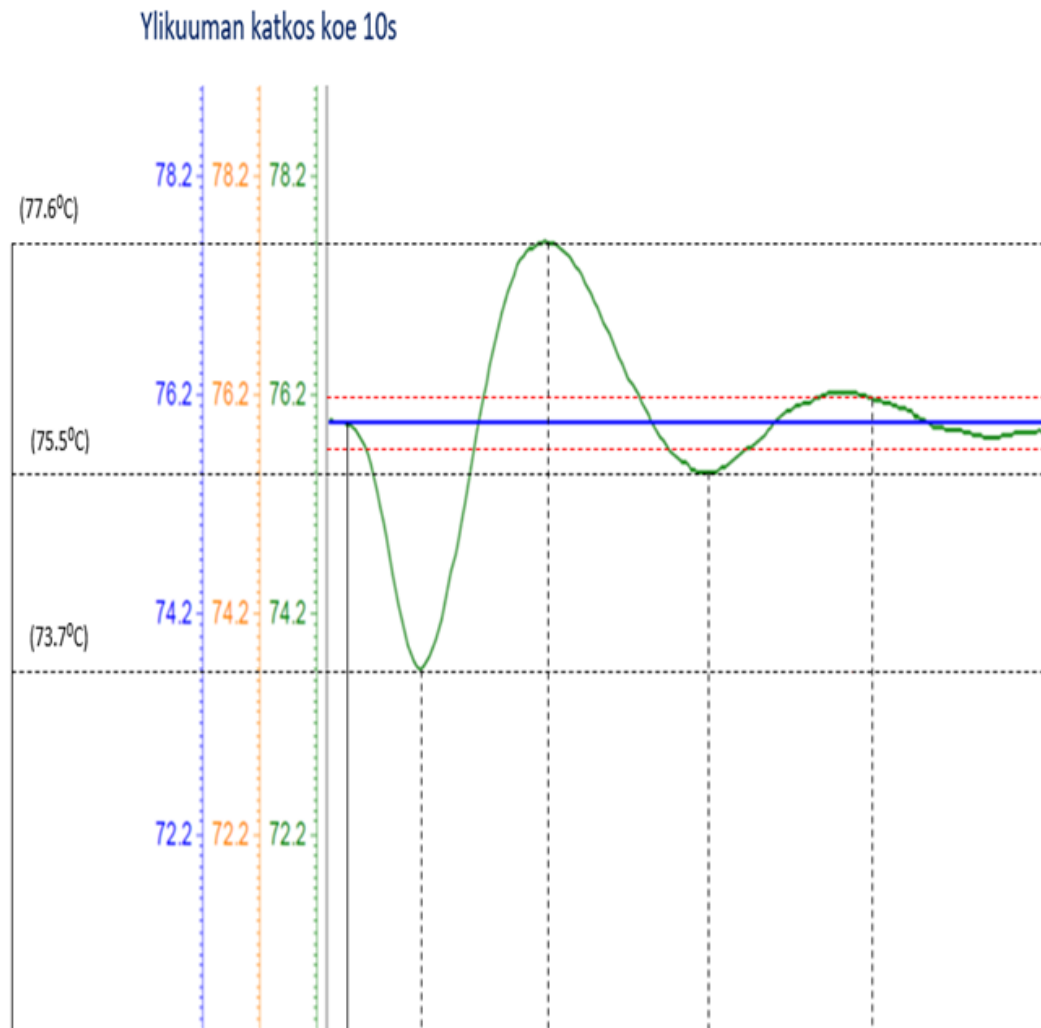
Suljetun piirin askelvaste SIMC-viritys.



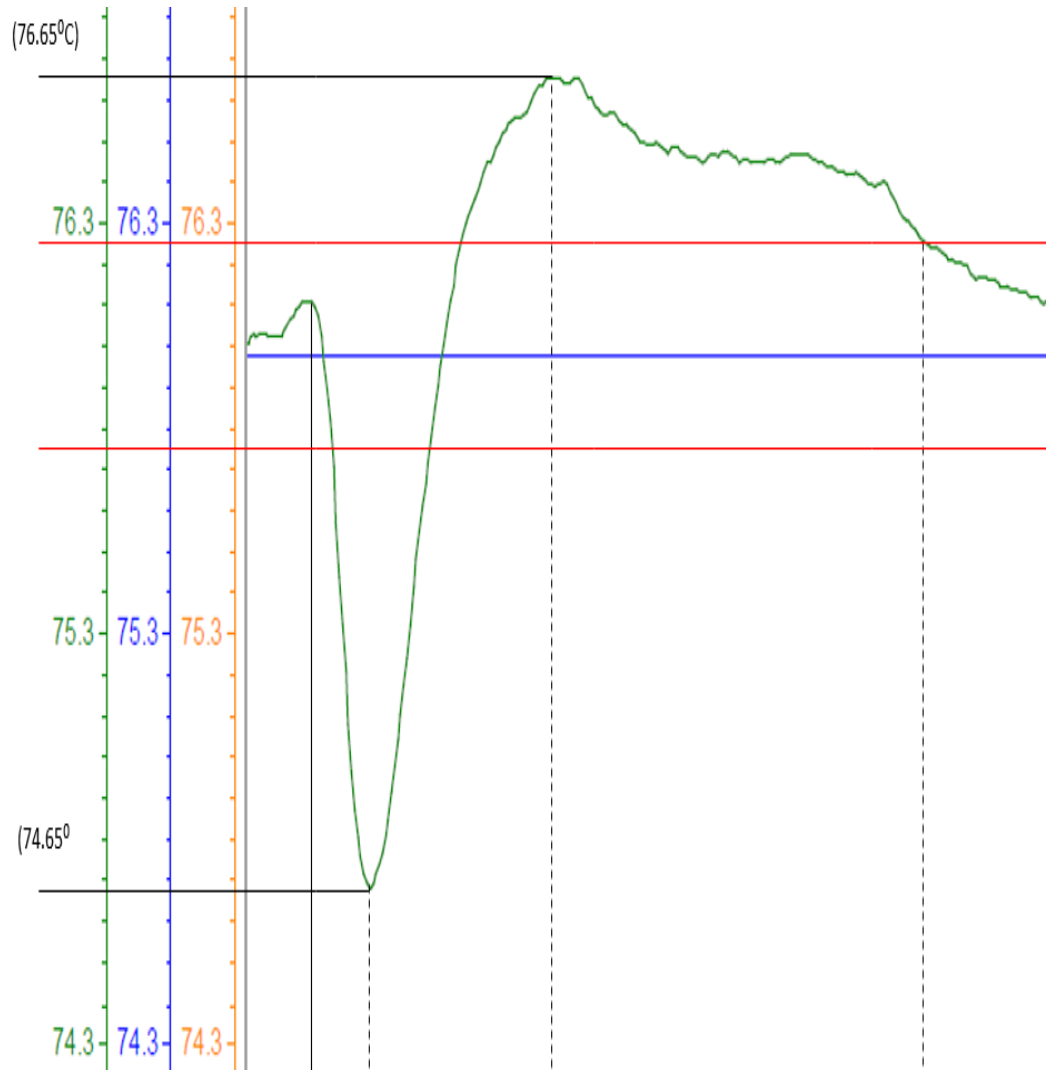
Suljetun piirin askelvaste Mint-viritys.



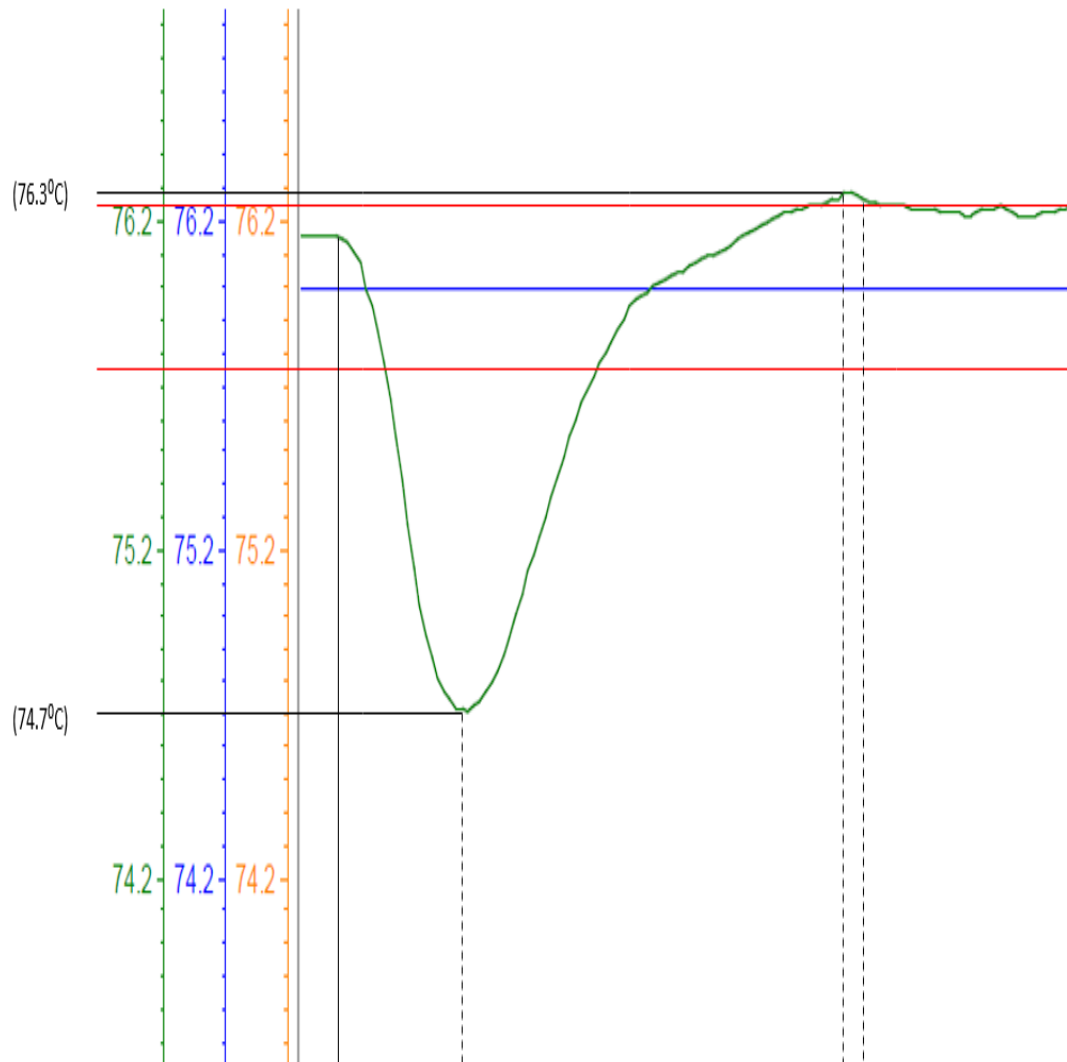
Ylikuuman veden katkos 10 s alkuperäinen tila.



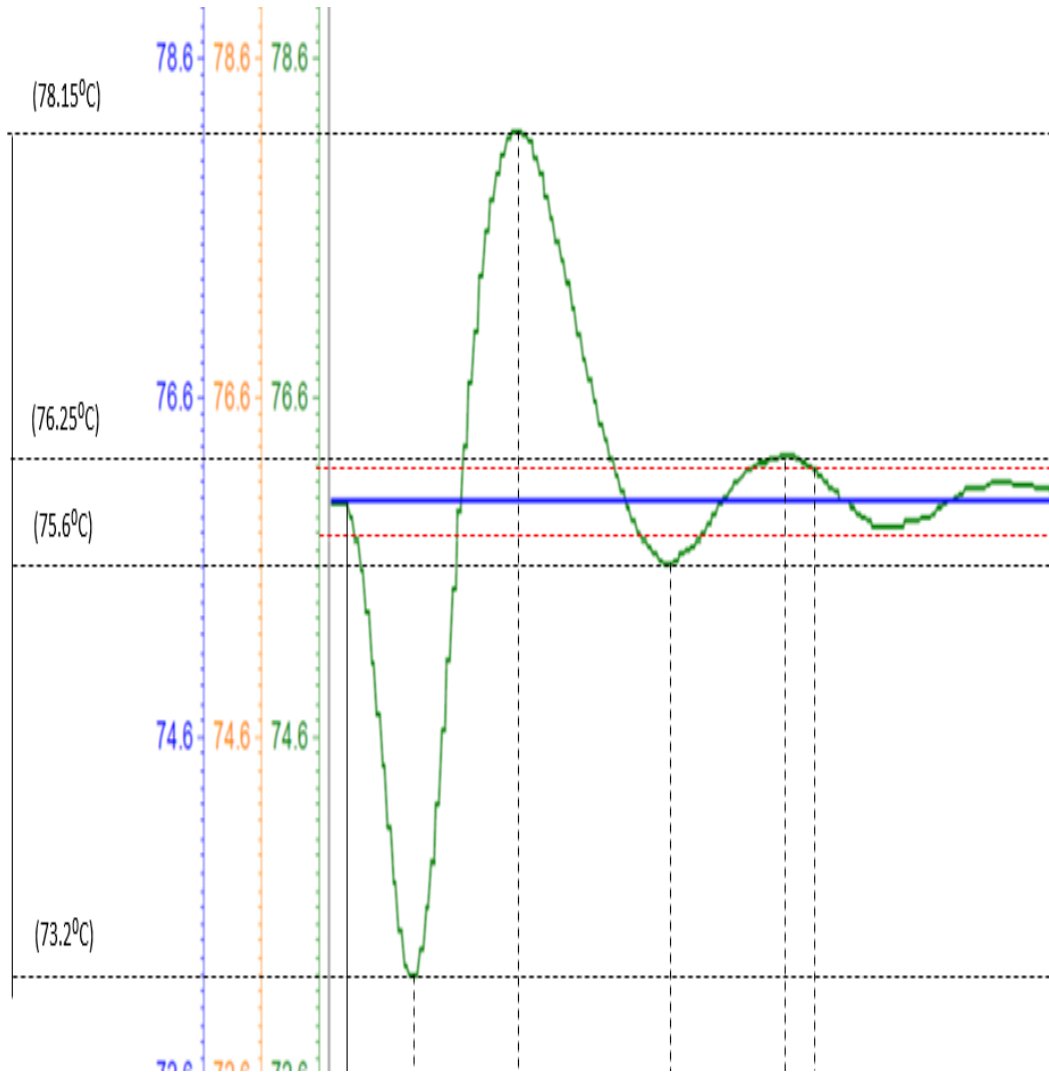
Ylikuuman veden katkos 10 s SIMC-viritys.



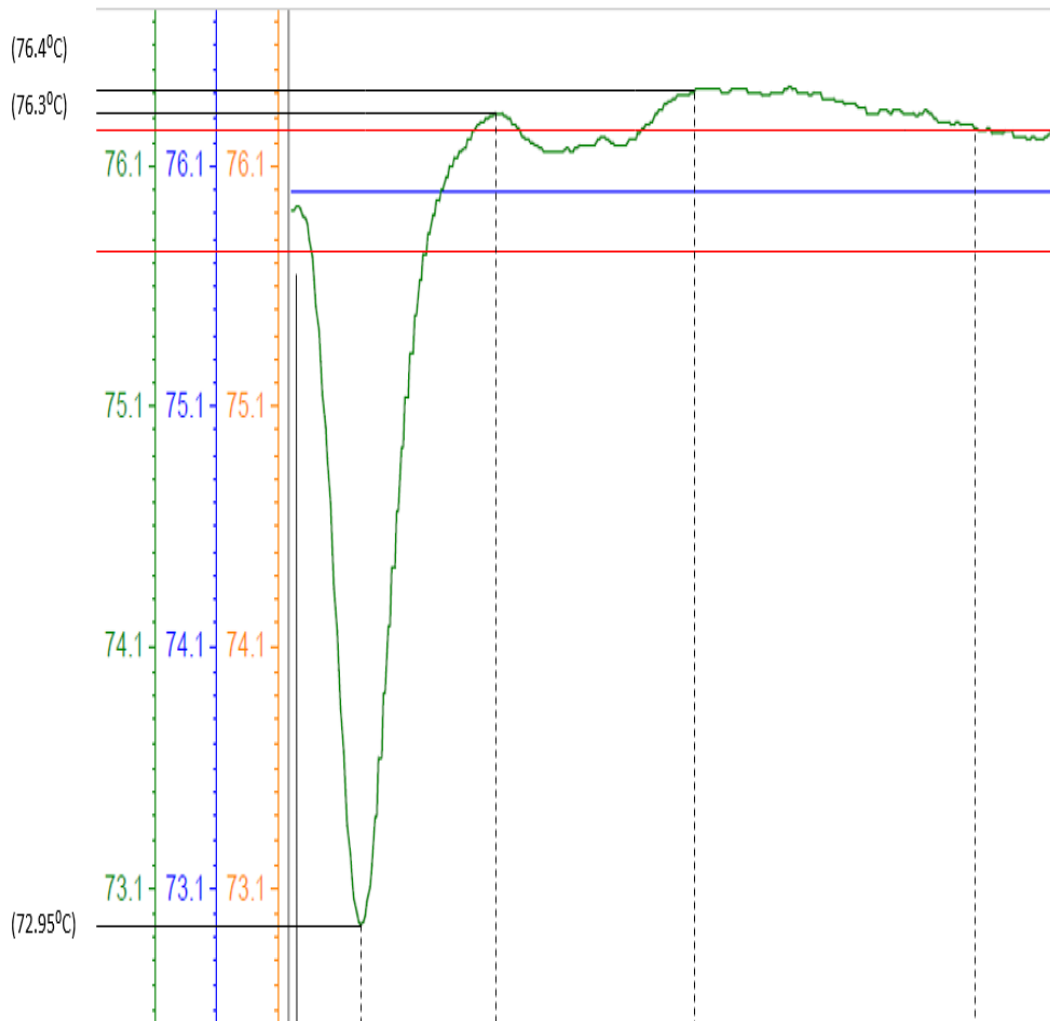
Ylikuuman veden katkos 10 s Mint-viritys.



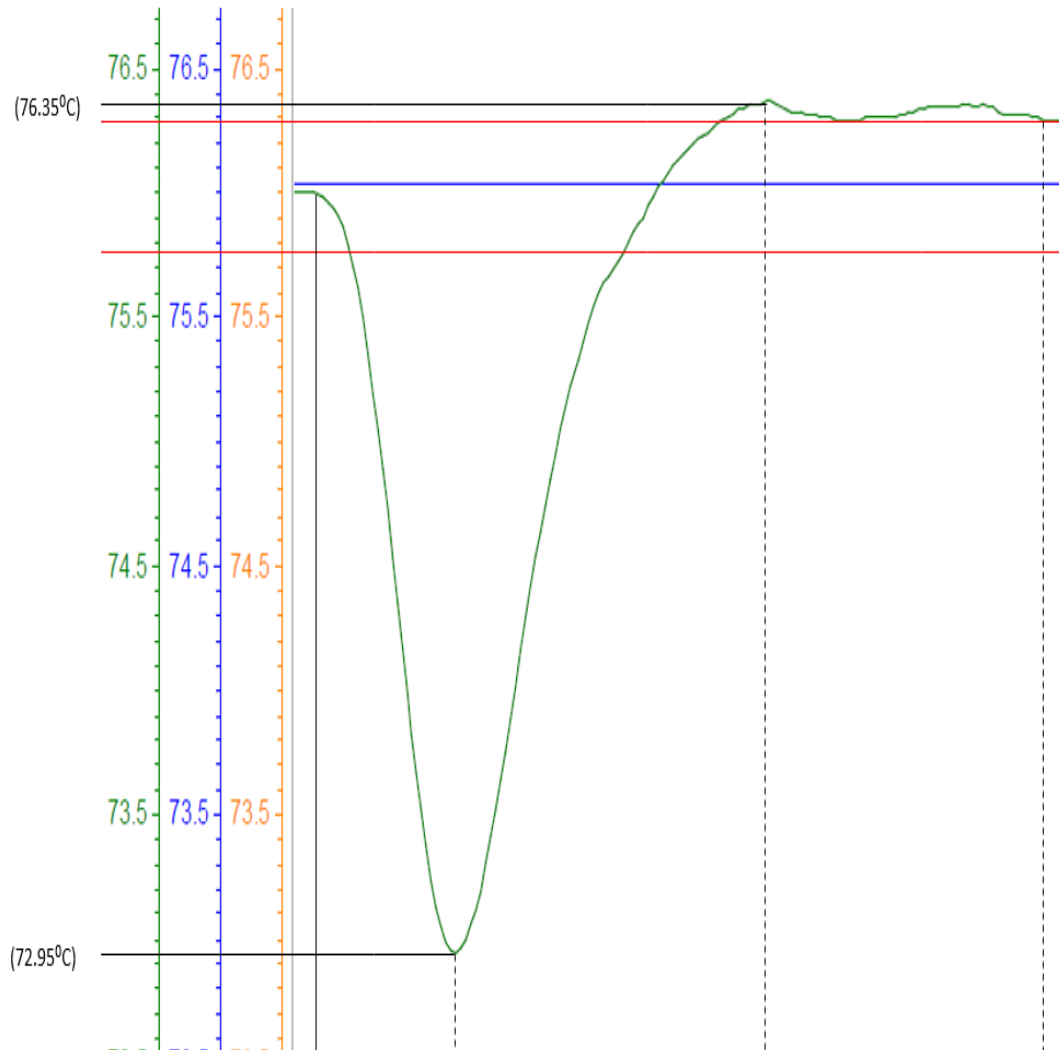
Ylikuuman veden katkos 20 s alkuperäinen tila.



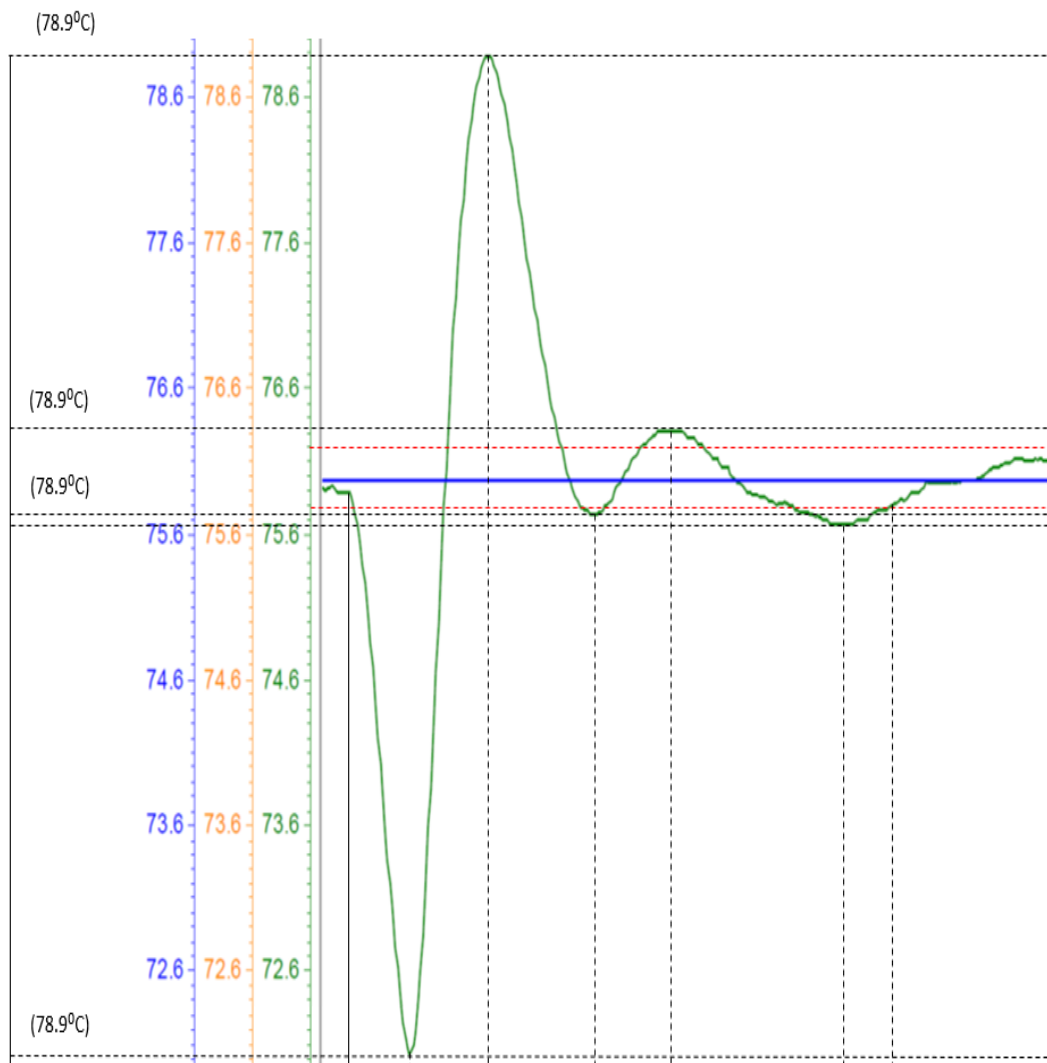
Ylikuuman veden katkos 20 s SIMC-viritys.



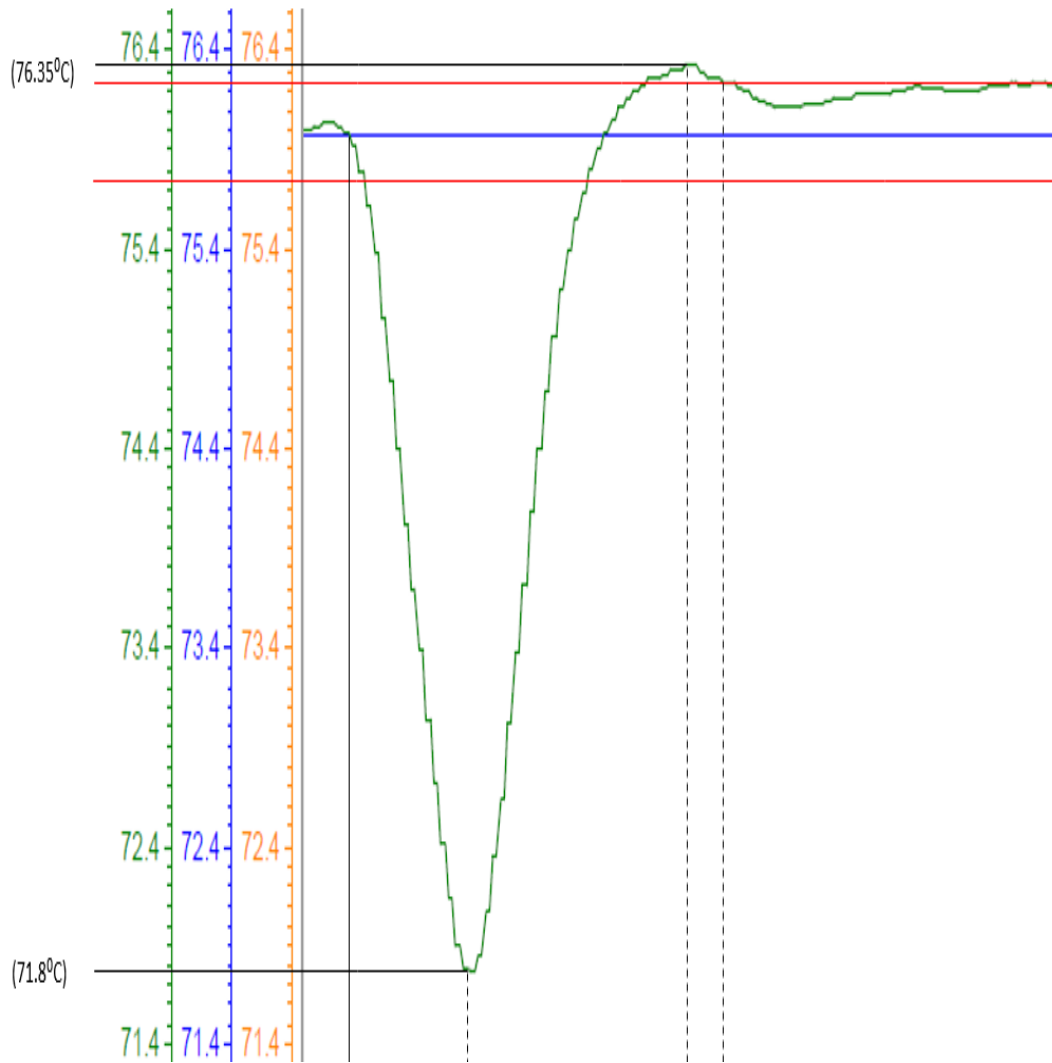
Ylikuuman veden katkos 20 s Mint-viritys.



Ylikuuman veden katkos 30 s alkuperäinen tila.



Ylikuuman veden katkos 30 s SIMC-viritys.



Ylikuuman veden katkos 30 s Mint-viritys.

