

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikan koulutus

2023

Mikko Kaunisto

Säiliön pinnankorkeuden säädön harjoituslaitteiston modernisointi



Opinnäytetyö AMK | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikan koulutus

2023 | 49 sivua

Mikko Kaunisto

Säiliön pinnankorkeuden säädön harjoituslaitteiston modernisointi

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli modernisoida Turun ammattikorkeakoulun automaatiolaboratoriossa sijaitseva vanha pinnankorkeuden säädön harjoituslaitteisto. Laitteisto on tarkoitettu opetuskäyttöön.

Harjoituslaitteisto purettiin ja siihen asennettiin uusi taustalevy. Laitteistoon tehtiin uudet säiliöt, paremmat kytkennät ja sähkönsyötöt. Lisäksi laitteiston nykyisen pinnanmittauksen rinnalle asennettiin uusi pinnanmittausanturi, mutta sitä ei saatu tässä työssä kytkettyä. Työn tietoperusta selvitettiin kirjallisuuslähteitä, valmistajien ohjekirjoja ja standardeja tutkimalla.

Lopputuloksena Turun ammattikorkeakoululle saatiin opetuskäyttöön soveltuva harjoituslaitteisto, jonka avulla opiskelijat pääsevät perehtymään säätötekniikkaan säiliön pinnankorkeuden säädön avulla.

Asiasanat:

Vesiprosessi, Säätötekniikka, PID-säätö, Yksikkösäädin, Pinnankorkeuden mittausta

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2023 | 49 pages

Mikko Kaunisto

Modernisation of the control training equipment of the tank level

The purpose of this thesis was to modernise the old training equipment for level adjustment in the Turku University of Applied Sciences automation laboratory. The equipment is intended for educational use.

The training equipment was dismantled and a new back plate was installed. The equipment was built with new tanks, better electrical connections and power supplies. In addition, a new surface measurement sensor was installed alongside the current surface measurement of the equipment, but it could not be connected. The sources of information for this work were literature sources, manufacturers' manuals and standards.

The result was a training equipment suitable for teaching at Turku University of Applied Sciences, which allows students to familiarize themselves with the control technology with the level adjustment of the tank.

Keywords:

Water process, Control technology, PID control, Unit controller, Measurement of the height of the surface

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1 Johdanto	8
2 Prosessin säätö	9
2.1 Sädön ominaisuuksia	9
2.2 Dynaamiset ominaisuudet	10
2.2.1 Vahvistus	10
2.2.2 Kapasiteetiluku	11
2.2.3 Aikavakio ja viive	12
2.3 Sädön muuttajat	13
2.4 Säätopiirit	15
3 Säätimen toiminta ja rakenne	18
3.1 PID-säätimen toiminnan periaatteet	18
3.2 P-säätö	19
3.3 Integroiva säätö	20
3.4 Derivoiva-säätö	22
4 Säätoventtiili toimilaitteena	24
4.1 Yleistä	24
4.2 Asennoittimen toimintaperiaate	24
4.3 Toimilaitteongelmat	25
4.4 Venttiilin ominaisuudet	26
5 Harjoitusprosessin instrumentointi	28
5.1 Prosessin kuvaus	28
5.2 Mittalaitteet	30
5.2.1 Painelähetin	30
5.2.2 Virtausmittari	31
5.2.3 Pinnankorkeusanturi	32
5.3 Toimilaitteet	33

5.3.1 Pumppu	33
5.3.2 Pinnankorkeuden säätöventtiili ja asennoitin	34
5.4 Kuplailuputki	36
5.5 Piirturi	37
5.6 Yksikkösäädin	38
6 Työn toteutus	40
7 Yhteenveto	47
Lähteet	48

Kaavat

Kaava 1. Vahvistuksen laskeminen. (Kippo & Tikka 2008, 116.)	10
Kaava 2. Vertoalue. (Kippo & Tikka 2008, 40.)	16
Kaava 3. Säätimen verrannollisuuskerroin. (Kippo & Tikka 2008, 40.)	17
Kaava 4. P-säätö. (Harju & Marttinen 2000, 69.)	19
Kaava 5. PI-säätö. (Harju & Marttinen 2000, 72.)	20
Kaava 6. PID-säätö. (Harju & Marttinen 2000, 73.)	22
Kaava 7. Virtausnopeuden laskentakaava.	31
Kaava 8. PID-säätäjän kaava (Valmet Automation Damatrol MC100 digitaalinen yksikkösäädin 1993, 19.)	38

Kuvat

Kuva 1. Lohkokaavio takaisinkytketystä säätöpiiristä.	9
Kuva 2. Ohjausjärjestelmän lohkokaavio.	14
Kuva 3. PID-säätimen periaatteellinen rakenne ja signaalit (Harju & Marttinen 2000, 67.)	18

Kuva 4. Integroinnin vaikutuksen kuvaaja. (Harju & Marttinen 2000, 72).	21
Kuva 5. Derivoinnin vaikutuksen kuvaaja. (Turun ammattikorkeakoulun ohjaustekniikan oppimateriaali n.d.)	23
Kuva 6. Säätoventtiilin epälinearisuudet. (Harju & Marttinen 2000, 25.)	25
Kuva 7. Venttiilin sisäisten ominaiskäyrien vaikutus. (Control valve flow characteristics n.d.)	26
Kuva 8. Prosessin PI-kaavio.	29
Kuva 9. Prosessin kytkentäkaavio.	29
Kuva 10. Endress + Hauser Cerabar S PMC 731 painelähetin.	30
Kuva 11. Kapasitiivinen paineanturi (Pihkala 2004, 30).	31
Kuva 12. Magneettisen virtausmittauksen periaate. (Endress + Hauser Promag 50 technical information n.d.)	31
Kuva 13. SICK LFP Cubic pinnankorkeusanturi.	33
Kuva 14. Bilteman kastelupumppu ja vesitankki.	34
Kuva 15. Pinnankorkeuden säätoventtiili ja asennoitin.	35
Kuva 16. Kuplailuputken toimintaperiaate.	36
Kuva 17. Endress + Hauser Ecograph piirturi.	37
Kuva 18. Damatrol MC100 yksikkösäädin.	38
Kuva 19. PID-säätäjän toiminnan lohkokaaavio. (Valmet Automation Damatrol MC100 digitaalinen yksikkösäädin 1993, 19.)	39
Kuva 20. Laitteet ja säiliöt irrotettuna taustalevystä.	40
Kuva 21. Uusi taustalevy asennettuna paikoilleen.	41
Kuva 22. Uudet kytkennät.	42
Kuva 23. Uudet sähkösyötöt.	43
Kuva 24. Modernisoitu vesiprosessilaitteisto.	45
Kuva 25. Painelähettimen sisältä irronnut johdin.	46

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Regulointi	Vakioasetusarvon säätö
PLC	Ohjelmoitava logiikka
SP	Set point, asetusarvo
PV	Present value, oloarvo
Offset-virhe	Poikkeama nolla-asennosta
PID	Proportional-Integral-Derivative
Bias	Nollasta eroava vakiotaso
Stick-slip	Kahden eri pinnan kitkan vaihtelua, jossa kitkan suuruuteen vaikuttaa pintojen epäsäännöllisyydet ja liukupintojen lämpeneminen
TDR	Time Domain Reflectometry

1 Johdanto

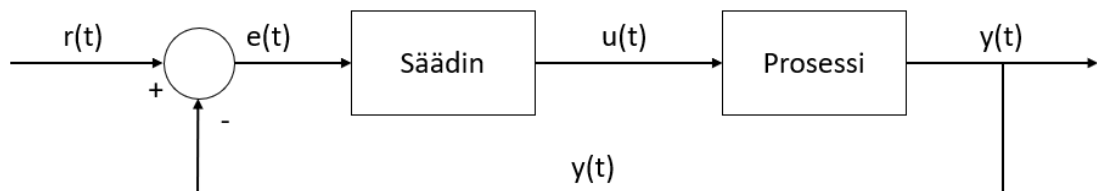
Työn tavoitteena oli kunnostaa ja modernisoida Turun ammattikorkeakoulun automaatiolaboratoriossa sijaitseva pinnankorkeuden säädön harjoituslaitteisto. Opetuskäyttöön tarkoitettujen laitteiston tarkoituksena on havainnollistaa säiliön pinnankorkeuden säätämistä yksikkösäätimen avulla. Laitteistoon oli tarkoituksena asentaa uusi taustalevy, tehdä uudet ja paremmat kytkennät toimilaitteilta säätimelle ja piirturille, asentaa uudet sähkönsyötöt, vaihtaa vanhat rappeutuneet säiliöt uusiin ja löytää uusi vaihtoehtoinen pinnankorkeuden mittaustapa nykyisen kuplailuputkiperiaatteen rinnalle. Työn aiheen valintaan päädyttiin, koska Turun ammattikorkeakoulun harjoituslaitteisto vaati modernisointia. Työn alkaessa laitteisto ei ollut ollut pitkään aikaan käytössä ja tarkoituksena on kunnostuksen ja modernisoinnin jälkeen saattaa laitteisto takaisin opetuskäyttöön soveltuvaksi. Opinnäytetyö suoritetaan osana Turun ammattikorkeakoulun konetekniikan insinöörin koneautomaation suuntautuvaa tutkintoa.

Luvussa 2. kerrotaan yleistietoa prosessin säädöstä, järjestelmien dynaamisista ominaisuuksista, säädön muuttujista ja säätöpiireistä. Luvussa 3. tutustutaan P-säätöön, integroivaan säätöön ja derivoivaan säätöön. Luvussa 4. kerrotaan säätöventtiilistä toimilaitteena. Luvussa 5. käydään läpi laitteistossa käytettävät instrumentit. Luvussa 6. kerrotaan työn toteutuksesta. Opinnäytetyö loppuu lukuun seitsemän, jossa käydään yhteenvetona läpi työn onnistumiset, haasteet ja parannusehdotukset.

2 Prosessin säätö

2.1 Säädon ominaisuuksia

Säädin on laite tai järjestelmä, joka käsittelee mittaussignaalia $y(t)$, jonka avulla se arvioi jonkin prosessin tai järjestelmän tilaa. Tämän jälkeen se vertaa tätä arvoa referenssiarvoon $r(t)$ ja laskee niiden välisen erotuksen eli poikkeaman $e(t)$. Säätimen viritysparametrien avulla säädin laskee ohjausarvon $u(t)$, joka ohjaa säätöpiirissä olevaa toimilaitetta. (Kippo & Tikka 2008, 35.) Näin säädin pyrkii korjaamaan prosessin tai järjestelmän poikkeamaa ja saavuttamaan halutun tilan tai suorituskyvyn.



Kuva 1. Lohkokaavio takaisinkytketystä säätöpiiristä.

Paikallissäädin on itsenäinen ja paikallisesti toimiva laite, joka on suoraan kytketty prosessiin. Sen tehtävänä on suorittaa mittauksia ja pitää mitta-arvo mahdollisimman lähellä referenssiarvoa ohjaamalla prosessiin vaikuttavaa toimilaitetta. Keskitetyssä säädössä käytetään tietokonepohjaista automaatiojärjestelmää, kuten PC-selainvalvomoa tai ohjelmoitavaa logiikkaa, joka valvoo ja ohjaa paikallissäätimen vertailusignaalia. Kenttäväyläjärjestelmän paikallissäätimet voivat pitää yhteyttä tietokonepohjaiseen automaatiojärjestelmään käyttämällä tietoverkkopohjaista kenttäväylää. (Kippo & Tikka 2008, 35–36.) Kenttäväylä on järjestelmä, joka mahdollistaa laitteiden välisen tiedonsiirron ja kommunikoinnin, ja se tarjoaa käyttäjälle reaaliaikaisen tiedon laitteiden tilasta ja toiminnasta. Tällä tavalla kenttäväylä mahdollistaa paikallissäätimien ja keskitetyn säätöjärjestelmän tehokkaan yhteistyön ja tiedonvaihdon.

2.2 Dynaamiset ominaisuudet

Säätötekniikka tutkii erityisesti dynaamisia järjestelmiä, joissa tilasuureet muuttuvat ajan myötä. Jotta näitä järjestelmiä voitaisiin verrata keskenään, on niille määriteltävä yksiselitteisiä ja mitattavia ominaisuuksia. Tällaisia ominaisuuksia kutsutaan usein dynaamisiksi ominaisuuksiksi.

2.2.1 Vahvistus

Prosessin vahvistus, joka merkitään symbolilla K , kertoo kuinka paljon prosessin dynaaminen vaste muuttuu, kun prosessin tulomuuttujaan tehdään askelmainen muutos. Vahvistus kuvaa siis vasteen laajuutta toimintapisteessä. Prosessin tai prosessimallin vahvistus on aina tiedettävä, jotta sitä voidaan säätää oikein. Staattinen vahvistus K ilmaisee prosessin lähtömuuttujan muutoksen suhteen tulomuuttujan muutokseen toimintapisteen läheisyydessä. Tämä tarkoittaa sitä, kuinka paljon lähtömuuttuja muuttuu, kun säätäjän lähtösignaali tai ohjaussignaali muuttuu tietyn verran tasapainotilassa. Sekä lähtö- että tulomuuttujat voidaan skaalata dimensiottomiksi ylä- ja alarajojen suhteen. On tärkeää tunnistaa prosessin vahvistus, jotta prosessia voidaan säätää optimaalisesti ja tehokkaasti. Vahvistus K lasketaan seuraavalla kaavalla. (Kippo & Tikka 2008,116.)

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{\frac{y - y_{ss}}{y_{max} - y_{min}}}{\frac{u - u_{ss}}{u_{max} - u_{min}}}$$

Kaava 1. Vahvistuksen laskeminen. (Kippo & Tikka 2008, 116.)

Jossa

K = prosessin staattinen vahvistus

y = prosessista mitattu lähtösignaali

y_{ss} = lähtösignaalin tasapainotilan arvo

y_{max} = lähtösignaalin maksimiarvo

y_{min} = lähtösignaalin minimiarvo

u = prosessin tulomuuttuja (ohjaussignaali)

u_{ss} = ohjaussignaalin minimiarvo

u_{max} = ohjaussignaalin maksimiarvo

u_{min} = tasapainotila

2.2.2 Kapasiteetiluku

Dynaamisille järjestelmille on ominaista, että tulosuureiden muutokset vaikuttavat tilasuureisiin omilla ominaisilla nopeuksillaan. Tämä johtuu siitä, että tilasuureiden muutokset ja siten myös lähtösuureiden muutokset sisältävät eräänlaisen varastoitumisilmiön. Tulosuureen muutos vaikuttaa tilasuureen varaston täyttöasteeseen, ja tällaiset varastoituvat suureet voivat olla energiaa tai ainemäärää. (Savolainen & Vaitinen 2007, 23.)

Esimerkiksi sähkömoottorin pyörimisnopeutta voidaan kasvattaa kasvattamalla jännitettä, ja tämä johtaa liike-energian sitoutumiseen moottorin pyöriviin rakenteisiin. Rakenteiden lämmittäminen puolestaan sitouttaa niihin lämpöenergiaa, ja kondensaattori voi varastoida sähköenergiaa. Säiliöön varastoituu nestettä riippuen syöttö- ja poistovirtauksien suhteesta. Näissä tapauksissa aine- tai energiavarastojen täyttöasteet muuttuvat järjestelmän rakenteesta riippuen eri nopeuksilla. Rakenteellisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi moottorin hitausmomentti, lämmitettävien rakenteiden lämpökapasiteetti, kondensaattorin kapasitanssi ja säiliön tilavuus. (Savolainen & Vaitinen 2007, 23.)

Järjestelmät voivat olla yksikapasiteettisia, joissa on yksi energia- tai ainevarasto, tai kaksikapasiteettisia, joissa on kaksi varastoa ja niin edelleen.

Nollakapasiteettinen järjestelmä puolestaan ei varastoi energiaa tai ainetta merkittävästi, kuten potentiometri tai venttiili. (Savolainen & Vaittinen 2007, 23.) Harjoituslaitteistossa mitataan yhden säiliön pinnankorkeutta kerrallaan. Säiliöitä on yhteensä neljä, ja ne ovat yhdistetty toisiinsa venttiileillä. Kun muihin säiliöihin menevät venttiilit ovat kiinni ja vettä menee vain yhteen säiliöön, kyseessä on yksikapasiteettinen prosessi, koska ainetta voi varastoitua vain yhteen paikkaan. Jos venttiileitä avataan viereisiin säiliöihin, kapasiteetiluku kasvaa ja samalla kasvaa myös aikavakio, koska ainetta varastoituu silloin useampaan säiliöön.

2.2.3 Aikavakio ja viive

Kuten jo mainittiin, dynaamisissa järjestelmissä on ominaista varastokäyttäytyminen, joka vaikuttaa järjestelmän käyttäytymiseen. Varastojen täyttöasteet muuttuvat tietyn nopeuden mukaan, ja järjestelmän aikavakio kertoo, miten nopeasti sen energia- tai ainevarastot muuttuvat, kun tulosuureessa tapahtuu muutoksia. Mitä suurempi aikavakio, sitä hitaampi järjestelmä. Jokaisella varastolla on oma aikakäyttäytymisensä, joten järjestelmän aikavakioiden lukumäärä vastaa sen kapasiteetilukua. Käytännön säätösuunnittelussa tärkeintä on määrittää merkittävin aikavakio, joka yleensä on suurimman varaston tilavuus. (Savolainen & Vaittinen 2007, 24–25.)

Jokaisella järjestelmällä on oma aikavakionsa, paitsi nollakapasiteettisilla järjestelmillä. Myös säätöjärjestelmän jokaisella osalla on oma aikavakionsa. Lisäksi toimilaitteen ja mittauksen aikavakiot ovat tärkeitä. Esimerkiksi venttiilin aikavakio kuvaa sen avautumis- ja sulkeutumisenopeutta. Jos venttiiliä käytetään säätämään prosessin virtausta, prosessin säätödynamiikka riippuu suuresti käytetyn venttiilin aikavakiosta, jota kutsutaan ohjauksen aikavakioksi. (Savolainen & Vaittinen 2007, 25.)

Järjestelmän viiveellä tarkoitetaan aikaa, joka kuluu tulosuureen muutoksesta ensimmäiseen tilan muutokseen. Kun järjestelmä on viiveetön, tulosuureen muutos aiheuttaa välittömän tilan muutoksen järjestelmässä. Viivettä saattaa

kuitenkin esiintyä säätöjärjestelmässä, ohjauksessa ja mittauksessa. Tämä johtuu siitä, että näissä järjestelmissä on useita prosesseja, joilla on oma aikavakionsa, ja ne vaativat tietyn ajan tilan muuttumiseen tulosuureen muutoksen jälkeen. Tämä voi hidastaa järjestelmän reagointia ja vaikuttaa sen suorituskykyyn. Siksi viiveitä tulisi mahdollisuuksien mukaan välttää. (Savolainen & Vaittinen 2007, 25.) Harjoituslaitteistossa on suhteellisen lyhyet viiveet.

2.3 Säädön muuttujat

Prosessin säätöjärjestelmässä vertailusignaali, jota kutsutaan myös asetusarvoksi tai set pointiksi (SP), on tavoitearvo tai laskennallinen prosessin suure, jota pyritään säätämään mahdollisimman tarkasti. Vertailusignaali asetetaan yleensä prosessin mitatulle lähtömuuttujalle, joka on oloarvo tai present value (PV) ja sitä seurataan jatkuvasti. Vertailusignaali pysyy yleensä vakiona, mikäli se liittyy tuotantonopeuden muutoksiin, jolloin kyseessä on vakioarvosäätö tai reguloiva säätö. Jos vertailusignaali muuttuu hitaasti, jatkuvasti tai seuraa ennalta määritettyä funktiota, kyseessä on seurantasäätö tai asetusarvosäätö. Jos vertailusignaali muuttuu nopeasti ajan funktiona, kuten robotiikassa, kyseessä on servosäätö. (Kippo & Tikka 2008, 36.)

Toimilaitteeseen tai prosessiin vaikuttava tulomuuttuja, $u(t)$, voi olla tulosignaali, ohjaus tai häiriö. Prosessin lähtömuuttuja, $y(t)$, on yleensä mitattavissa oleva signaali, jota pyritään säätämään mahdollisimman tarkasti asetusarvoon. (Kippo & Tikka 2008, 36.) Säätöjärjestelmässä pyritään siis saavuttamaan mahdollisimman pieni virhe vertailusignaalin ja mitatun lähtömuuttujan välillä, jotta prosessi toimii mahdollisimman tarkasti ja ennustettavasti.

Häiriömuuttuja (disturbance variable, $d(t)$) vaikuttaa prosessin lähtöön ja se voi olla esimerkiksi askelmainen tai jaksollinen kuormitushäiriö tai mittauskohina. Kuormitushäiriöitä voidaan kompensoida myötäkytkennällä ja mittauskohinaa suodattamalla. Ero suure ($E=SP-PV$, error signal, $e(t)$) ilmaisee prosessin

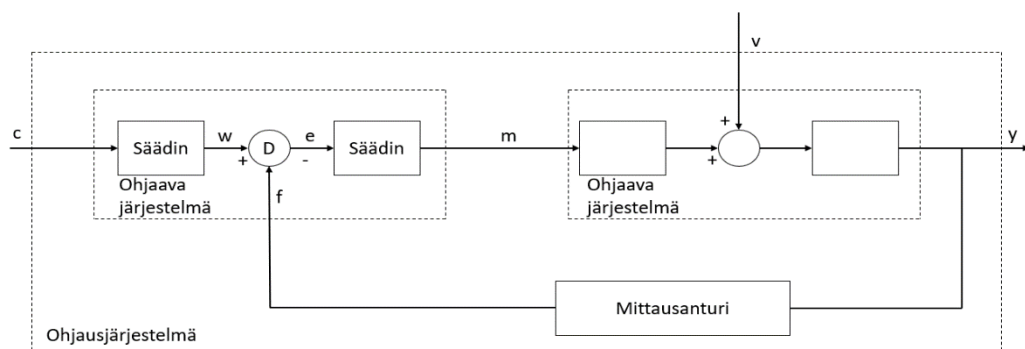
lähtömuuttujan asetusravon ja mitatun arvon erotuksen. (Kippo & Tikka 2008, 36.)

Ohjausmuuttuja (control variable, $u(t)$) tarkoittaa ajasta riippuvaa signaalia, joka vaikuttaa järjestelmään tai toimilaitteeseen. Ohjattava suure eli oloarvo on todellinen, mitattu arvo. Ohjaus voi olla esimerkiksi kytkimen asennon muutos tai laitteen käynnistäminen määräajaksi. Yleensä ohjaus tapahtuu manuaalisesti avoimella piirillä ilman takaisinkytkentää, mutta se voi olla myös automatisoitu ohjaukomentojen sarja. (Kippo & Tikka 2008, 36–37.)

Toimisuure eli säätömuuttuja ($u(t)$) on lähtömuuttuja säätöjärjestelmässä, ja samalla se vaikuttaa tulomuuttujaan säädetyin järjestelmän osalta.

Säätömuuttuja valitaan yleensä prosessin tulomuuttujista, joilla on selkeä vaikutus valittuun prosessin lähtömuuttujaan. (Kippo & Tikka 2008, 37.)

Säätimen lähtöviesti, jota kutsutaan myös ohjausviestiksi tai $u(t)$ -signaaliksi, voi olla kolmea eri tyyppiä: prosentuaalinen, analoginen (jännite- tai virtaviesti) tai pulssinleveysmoduloinen viesti. Säätimen lähdön toimisuunta voidaan määrittää negatiivisen takaisinkytkennän perusteella. Jos säätimen lähtö kasvaa, kun erosuure pienenee, säätimen vahvistus on positiivinen ja toimisuunta on suora. Jos säätimen lähtö puolestaan pienenee, kun erosuure pienenee, säätimen vahvistus on negatiivinen ja toimisuunta on käänteinen. (Kippo & Tikka 2008, 37.)



Kuva 2. Ohjausjärjestelmän lohkokkaavio.

Ohjausjärjestelmän nimityksiä standardin SFS-IEC 60050-351 mukaan: c = ohjesuure, w = vertailusuure, D = vertailuelementti, e = erosuure, m = toimisuure, v = häiriösuure, f = takaisinkytkentäsuure, y = ohjattava suure. Erilaisissa automaatiojärjestelmissä toimisuunnan valinta tapahtuu eri tavalla. Usein valinta tehdään erillisellä parametrilla ja säätimen vahvistus on aina positiivinen. (Kippo & Tikka 2008, 38.)

2.4 Säätöpiirit

Säätöpiirien tehtävä on hoitaa prosessin lähtömuuttujan mittaus, mittauksen takaisinkytkentä ja vertailu asetusarvoon. Säätöpiiri on automaatiotekniikan peruselementti. Säätöpiiriin kuuluu myös säädinyksikkö, joka määrittää erosuureen perusteella uuden ohjauksen toimilaitteelle. Kun säätöpiiri on suljettu, säädin käyttää hyväkseen takaisinkytkentää ja silloin säätö on asetettu automaattiohjaukselle. Avoimessa ohjauksessa säätimen lähtöä ohjataan käsin ja silloin takaisinkytkentä ei ole käytössä. (Kippo & Tikka 2008, 38.)

Säätöalgoritmi on matemaattinen kaava, joka hyödyntää erotusta kahden arvon välillä. Tämän lisäksi kaavassa voidaan käyttää säätöparametreja, jotka voivat painottaa integrointia tai derivointia. Joissain tapauksissa säätöalgoritmi voi perustua myös oloarvoon, eli tavoitteena olevaan arvoon. (Kippo & Tikka 2008, 38.)

Säätöparametrit ovat säätimen kertoimia, joilla säätöpiiri viritetään. Jos säätöpiiri on viritetty hyvin, se seuraa vertailusignaalin muutoksia tarkasti ja nopeasti ja kompensoi prosessiin vaikuttavia häiriötekijöitä. Jos säätöpiiri on huonosti viritetty, sen vaste värähtelee tai siihen jää poikkeama verrattuna asetusarvoon, tai muut virityskriteerit (nopeus, ylitys, asettuminen) eivät täyty. Tyypillisiä säätöparametreja ovat: säätimen verrannollisuuserroin (vahvistus), integrointiaika sekunneissa, derivointiaika sekunneissa ja derivoinnin suodatuksen aikavakiotermi. Lisäksi säädinyksikkö sisältää erilaisia määriteltäviä suureita, jotka vaikuttavat säätöpiirin toimintaa. Tällaisia suureita

ovat esimerkiksi varoitus- ja hälytysrajat, ohjaussignaalin rajoitukset, suodatus, toimisuunta, jne. (Kippo & Tikka 2008, 38–39.)

Säätöpiirin virittäminen on tärkeä prosessi, joka mahdollistaa säätimen ominaisuuksien sovittamisen prosessin tarpeisiin. Virittämisessä yleensä muokataan yksittäistä parametria, mutta sen tulisi perustua järjestelmälliseen lähestymistapaan, joka auttaa tavoitteiden saavuttamisessa. Virittämisen tavoitteita voivat olla esimerkiksi sallittu maksimiylitys prosentteina, nousuaika, huippuaika, vaimennussuhde, asettumisaika, offset-virhe, suorituskykyindeksi ja ohjaussignaalin käyttäytyminen. Näiden tavoitteiden perusteella säätimen verrannollisuuskerroin, integrointiaika ja derivointiaika määritellään oikeaan suhteeseen keskenään. Virittäminen riippuu monista tekijöistä, kuten prosessin ja toimilaitteen dynamiikasta, säätöstrategiasta, näytevälin koosta ja häiriön kompensoinnin, vertaussignaalin seurannan ja tarkkuuden painotuksesta. Usein virittämisen apuna käytetään yksinkertaisia prosessi- ja säätötekniisiä malleja. (Kippo & Tikka 2008, 39–40.)

Säätöpiirin stabiilius liittyy sen kykyyn vaimentaa värähtelyjä tai olla värähtelemättä lainkaan. Tämä ominaisuus riippuu säätöparametrien valinnasta. Jos säätöpiiri on epästabiili, tarkoittaa se, että säätöpiirin lähtösignaalin vaikutus vahvistaa sen värähtelyä. Säätöpiirin värähtely voi olla joko vaimenevaa (stabiilia), jatkuvaa tai kasvavaa (epästabiilia) (Kippo & Tikka 2008, 40.).

Vertoalue (PB) on kääntäen verrannollinen säätimen vahvistukseen. Tämä tarkoittaa, että kun säätimen vahvistus kasvaa ja säätönopeus lisääntyy, vertoalue pienenee tai kapenee. Vertoalue voidaan laskea käyttämällä seuraavaa kaavaa. (Kippo & Tikka 2008, 40.)

$$PB = \frac{1}{K_p} \frac{\text{säätöalue}}{\text{mittausalue}} 100\%$$

Kaava 2. Vertoalue. (Kippo & Tikka 2008, 40.)

Säätimen verrannollisuuskerroin, jota usein kutsutaan myös vahvistukseksi, on vakio, jonka avulla säätöpiirin lähdön arvo kasvaa suhteessa siihen, kuinka paljon eroavaisuutta (erosuure) tapahtuu. Kun verrannollisuuskertoimen arvoa suurennetaan, säätöpiirin lähdön muutosnopeus ja amplitudi kasvavat, mikä tarkoittaa, että prosessin ohjaus tehostuu. Vahvistuksen ollessa liian suuri voi kuitenkin ilmetä ongelmia. Se saattaa aiheuttaa värähtelyä säätöpiirissä ja heikentää sen stabiiliutta, mikäli eroavaisuus muuttuu nopeasti tai suuresti. (Kippo & Tikka 2008, 40.) Verrannollisuuskertoimen arvo lasketaan käyttämällä seuraavaa kaavaa.

$$K_p = \frac{100\%}{PB}$$

Kaava 3. Säätimen verrannollisuuskerroin. (Kippo & Tikka 2008, 40.)

Jossa

K_p = vahvistus

PB = Vertoalue

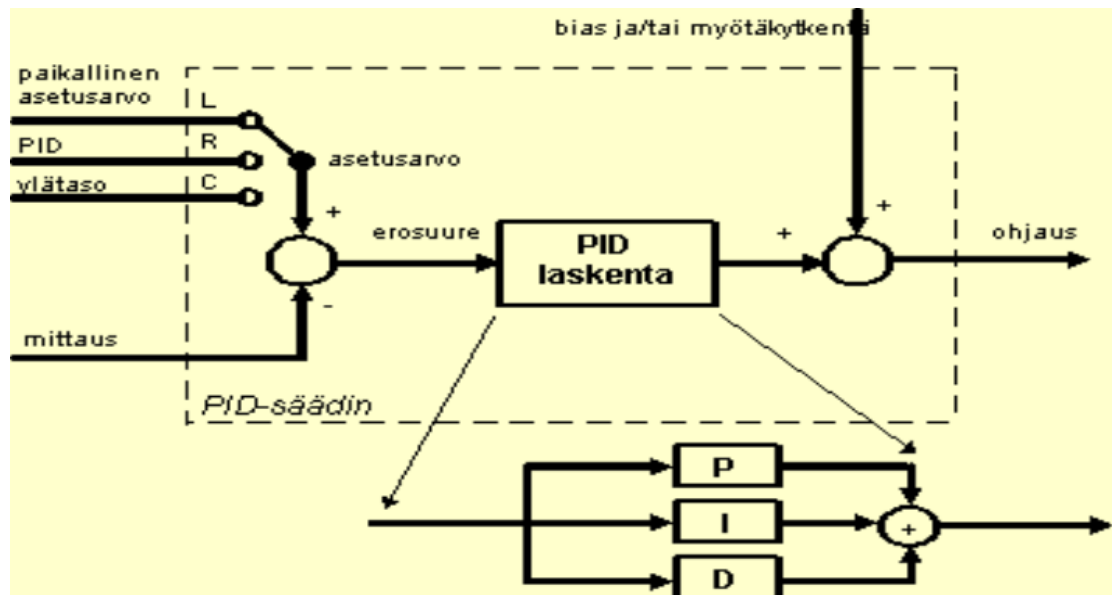
Säätöpiirin hyvän virityksen tärkeimmät vaatimukset ovat säädön tarkkuus (asentovirhe), nopeus (asetusarvon seurantakyky) ja kuormitushäiriöiden kompensointikyky. Lisäksi on tärkeää taata ohjaussignaalin rauhallinen käyttäytyminen sekä epäherkkyys mittauskohinaa ja parametrimuutoksia kohtaan. (Harju & Marttinen 2000, 149.)

Optimaalisen virityksen saavuttaminen on haastavaa, sillä erilaiset vaatimukset ja prosessin ominaisuudet tulee tasapainottaa. Tärkeimmät säätöpiirit vaativat yksityiskohtaista tarkastelua, kun taas vähemmän tärkeät piirit eivät tarvitse niin syvällistä tarkastelua, mutta nekin tulisi saada toimimaan riittävän hyvin. Prosessin analysointimahdollisuudet ovat tärkeitä optimaalisen virityksen saavuttamisessa, ja lisäksi pitkälle automatisoitu ja nopea viritysmenettely on tarpeen. (Harju & Marttinen 2000, 149.)

3 Säätimen toiminta ja rakenne

3.1 PID-säätimen toiminnan periaatteet

Yleisimmin teollisuudessa käytetty säädin on rakenteeltaan PID-säädin (Proportional-Integral-Derivate). PID-säädin toimii hyvin piireissä, joissa vaikuttaa useita epävarmuus- ja häiriötekijöitä, vaikka onkin rakenteeltaan yksinkertainen. Perusperiaatteet sen virittämiseen tunnetaan myös hyvin. PID-säätimeä voidaan käyttää useita eri yhdistelmiä, kuten P-, PI- ja PD-säätimiä. Yleisimmin käytetty säädinrakenne on PI-säädin, joka pystyy hallitsemaan tyypillisimmät teollisuusprosessit. (Harju & Marttinen 2000, 67.)



Kuva 3. PID-säätimen periaatteellinen rakenne ja signaalit (Harju & Marttinen 2000, 67.)

PID-säädin laskee ohjauksen kolmen eri osan summasta (Kuva 3.), kun säätimen syöttö on eroasema (ero asetusarvon ja mitatun arvon välillä). Ohjaussignaali, joka menee toimilaitteelle, voi sisältää tarvittaessa myötäkynnän tai vakiotason poikkeaman nolasta. Säätimen ohjaus koostuu kolmesta osasta: suhdeosasta (P), integroivasta osasta (I) ja derivoivasta osasta (D). PID-säätimeä voidaan antaa asetusarvo kolmesta eri lähteestä.

Local (L) asetusarvo on operaattorin määrittämä kiinteä arvo. Remote (R) asetusarvo on järjestelmän sisäinen muuttuva arvo, joka tulee ylemmän tason säätimen ohjauksesta. Tämä tarkoittaa kaskadisäätöä. Computer (C) on järjestelmän ulkopuolisen tietokoneen tai vastaavan laskema asetusarvo. (Harju & Marttinen 2000, 67–68.)

3.2 P-säätö

Vahvistuskerroin K_p on säätöteoriassa käytetty suhdekerroin, joka kuvaa säätimen ohjausmuutoksen ja järjestelmän erosuureen välistä suhdetta. Tämä suhde näkyy erotusmuuttujan askelmuutoksena säätimen ohjauksen perustason arvona. Vahvistuskertoimen kasvattaminen johtaa järjestelmän käyttäytymisen nopeutumiseen, sillä suurempi vahvistuskerroin tarkoittaa pienempää säätimen ohjausmuutosta, joka puolestaan aiheuttaa suuremman muutoksen järjestelmän toiminnassa. Kerroin K_p voi olla myös negatiivinen, jolloin puhutaan invertoivasta P-säädöstä. (Harju & Marttinen 2000, 76.)

P-säädössä jatkuva-aikaisen ohjaussignaalin arvo ($u(t)$) riippuu suoraan säätöpoikkeamasta ($e(t)$). Tässä yhteydessä säätöpoikkeama ilmaisee erotuksen halutun arvon ja mitatun arvon välillä. Säätimen vahvistus (K_p) määrittää, kuinka voimakkaasti säädin reagoi säätöpoikkeamaan.

Ohjaussignaalin vakiotaso (u_0) puolestaan määrittää ohjaussignaalin arvon, kun säätöpoikkeama on nolla. Matemaattisesti tämä tarkoittaa yksinkertaisia kertoja yhteenlaskutoimintoja. Kun säätöpoikkeama on nolla, säätimen lähtö on sama kuin ohjaussignaalin vakiotaso (usein nolla). Ohjaussignaalin vakiotaso valitaan siten, että halutussa toimintapisteessä ei ole säätövirhettä eli säätöpoikkeama on nolla. (Harju & Marttinen 2000, 69.)

$$u(t) = K_p * e(t) + u_0$$

Kaava 4. P-säätö. (Harju & Marttinen 2000, 69.)

Kaavasta voidaan päätellä, että mitä suuremmaksi P-säätimen vahvistus viritetään, sitä pienemmäksi pysyvä säätöpoikkeama jää. Tämä tarkoittaa, että

P-säädön avulla voidaan pyrkiä minimoimaan säätöjärjestelmän pysyvä virhe. On kuitenkin tärkeää huomata, että vahvistusta ei voida virittää mielivaltaisen suureksi. Liian suuri vahvistus aiheuttaa haitallisia vaikutuksia säätöjärjestelmään. Se voi johtaa liialliseen värähtelyyn ja jopa epästabiilisuuteen, mikä tarkoittaa, että järjestelmä ei pysty saavuttamaan toivottua tasapainotilaa vaan vaihtelee laidasta laitaan. Tämä epävakaas voi haitata järjestelmän suorituskykyä ja aiheuttaa ongelmia. Siksi P-säätimen vahvistuksen valinnassa on löydettävä tasapaino pysyvän virheen minimoimisen ja järjestelmän vakaan toiminnan välillä. (Savolainen & Vaitinen 2007, 32.)

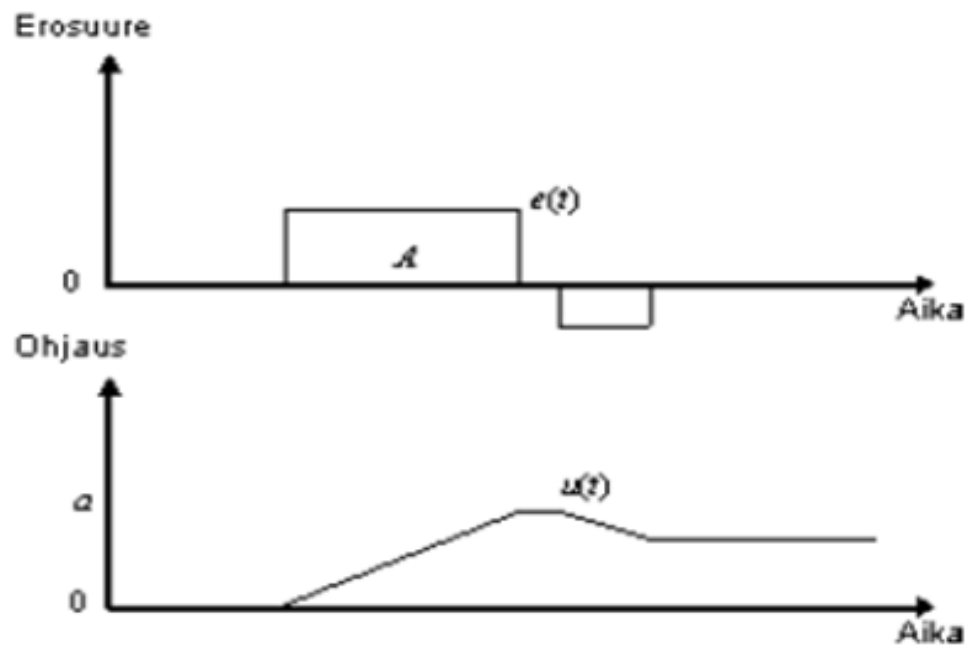
3.3 Integroiva säätö

P-säädön kanssa käytetään usein integroivaa säätöä. Integroivan osan ansiosta P-säädön asentovirhe jää pois. PI-säätimen ohjaussignaali on esitetty seuraavassa kaavassa. (Harju & Marttinen 2000, 72.)

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

Kaava 5. PI-säätö. (Harju & Marttinen 2000, 72.)

T_i on integrointiaika sekunneissa. Jos kaavaa verrataan pelkän P-säädön kaavaan, huomataan että säätimen signaalin vakiotaso u_0 on nyt korvattu ajan funktiona muuttuvalla erosuureen integraalilausekkeella. Integraalilauseke voidaan mieltää vanhojen erosuureiden summaan verrannolliseksi. Niin kauan kuin säätöpoikkeama ei ole nolla, säätimen lähtö muuttuu. Säätimen lähtöön vaikuttaa säätöpoikkeaman suuruus ja säätöpoikkeaman vaikutusaika. (Harju & Marttinen 2000, 72.)



Kuva 4. Integroinnin vaikutuksen kuvaaja. (Harju & Marttinen 2000, 72).

Matemaattisesti integrointi tarkoittaa pinta-alan laskemista. Kuvassa 4. ohjaustaso a riippuu pinta-alasta A . Kuvajassa näkyy integroivan osan vaikutus säätimen lähtöön. Kun erosuure saa askelmainen muutoksen, säätimen lähtö kasvaa lähes suoraviivaisesti, ja kulmakerroin riippuu integrointitermin vahvistuksesta. Säätimen ohjaus pysyy vakaana, kun erosuure menee nollaan. Ainoastaan negatiivisella erosuureella säätimen lähtö voi pienentyä. Kun säädettävä suure leikkaa asetusarvon, eroavaisuuden merkki vaihtuu. Kuvassa eroavaisuus on negatiivinen ja pienenee suhteessa, joten myös säätimen ohjaus pienenee hitaammin kuin kasvaa. Säätimen ohjauksessa jää perustaso, jota kutsutaan biasiksi, kun eroavaisuus lopulta menee nollaan. Tällöin integrointitermi automaattisesti tavoittelee perustason ohjausta, jossa erosuureeseen ei jää pysyvää virhettä. Tämä vastaa P-säädön vakiotasoa u_0 . Säättöpoikkeaman korjaamiseksi I-osa kasvattaa tai pienentää ohjausta niin kauan kuin eroavaisuutta esiintyy. (Harju & Marttinen 2000, 72.)

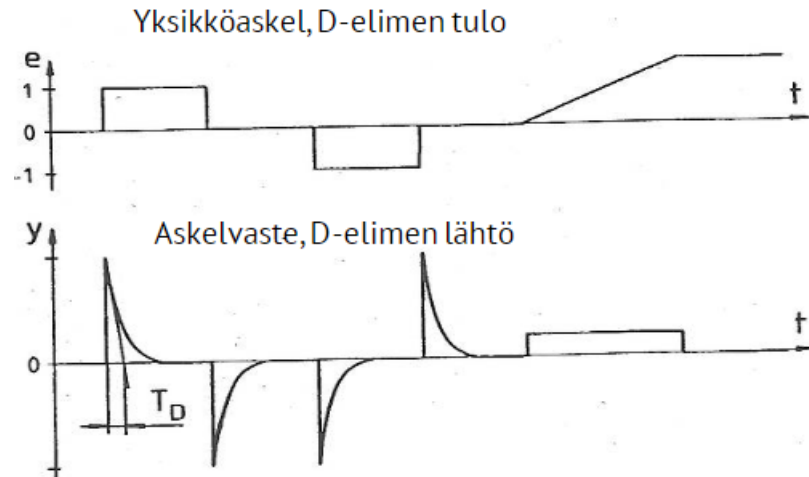
3.4 Derivoiva-säätö

Tilanteita, joissa säädöltä vaaditaan välitöntä ja voimakasta reagointia säätöpoikkeamaan esiintyy usein. Esimerkiksi, jos mittausjärjestelmä on aikavakioltaan hidas verrattuna säädettävään järjestelmään ja/tai jos mittauksessa esiintyy viivettä, säätöalgoritmi näkee myöhässä säädettävässä järjestelmässä ja sen todellisessa säätösuureessa (suure, jota mittausjärjestelmä mittaa) tapahtuvat muutokset. Pienikin häiriön aiheuttama muutos erosuureessa voi olla merkitä sitä, että säädettävässä järjestelmässä on jo ehtinyt tapahtua paljon. Tällöin säädön pitää ohjata voimakkaasti järjestelmää oikeaan suuntaan ottamalla eräänlaista ennakkoa. Ennakointi voidaan toteuttaa lisäämällä säätöalgoritmiin derivoiva termi, joka muuttaa säätimeltä lähtevää ohjausta $u(t)$ suhteessa erosuureen $e(t)$ aikaderivaattaan eli muutosnopeuteen. Jos PI-algoritmiin lisätään derivoiva termi, saadaan säätö, joka poistaa säätöpoikkeaman kokonaan ja reagoi nopeasti. PID- algoritmi voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon. (Savolainen & Vaittinen 2007, 37.)

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

Kaava 6. PID-säätö. (Harju & Marttinen 2000, 73.)

Derivoivaa säätöä voidaan käyttää P-säädön (PD-säädin) tai integroivan säädön (PID-säädin) kanssa. PID-säädön algoritmissa T_d on derivointiaika sekunneissa, joka ilmaisee karkeasti sen ajan, jonka kuluessa säätö saa eräänlaista lisävahvistusta nopean erosuuremuutoksen tapahduttua. Jos eromuutokset ovat hitaita, on derivoinnin vaikutus vähäistä. Derivaatta kuvaa suureen muutosnopeutta (d/dt). Silloin kun $de(t)/dt$ on nolla, muutoksia ei tapahdu. (Harju & Marttinen 2000, 73.) Seuraavassa kuvassa on esiteltynä derivoinnin vaikutuksen kuvaaja.



Kuva 5. Derivoinnin vaikutuksen kuvaaja. (Turun ammattikorkeakoulun ohjaustekniikan oppimateriaali n.d.)

Kuvassa 5. esitetään tilanne, jossa D-säätimeen syötetään yksikköaskel. D-säätimen lähtö nousee välittömästi rakenteelliseen maksimiin ja laskee sitten takaisin nolnaan derivointiajan T_D määräämän aikavakiokäyrän mukaisesti. Derivointiajan kasvaessa lähdön paluu nolnaan tapahtuu nopeammin. Kun muuttuja muuttuu porrastetusti (esimerkiksi pengerfunktiona), D-säätimen lähdön arvo pysyy samana niin kauan kuin muuttuja muuttuu pengerfunktiona. Lähdön arvo riippuu muuttujan muutoksenopeudesta ja derivointiajasta. (Turun ammattikorkeakoulun ohjaustekniikat ja käyttösovellukset oppimateriaali n.d.)
 Nykyään lähes kaikki sähköisesti toteutetut säätimet ja automaatiojärjestelmien säätölohkot käyttävät vähintäänkin täydellistä PID-algoritmia.

4 Säätoventtiili toimilaitteena

4.1 Yleistä

Toimilaitteyhdistelmä on merkittävä tekijä säätöpiirin suorituskyvyssä. Useiden tutkimusten mukaan jopa 30% säätöpiirin ongelmista johtuu toimilaitteivioista, kuten asennoittimen, toimilaitteen tai venttiilin vioista. Eräässä säätöventtiilien kunnonarviointiprojektissa havaittiin, että ongelmia esiintyi venttiilissä 10%:ssa tapauksista, toimilaitteessa 10%:ssa ja asennoittimessa jopa 80%:ssa tapauksista. (Harju & Marttinen 2000, 22.)

Suuri osa teollisuuden säätöventtiileistä on sähköpneumaattisia. Tämä tarkoittaa, että venttiilin toimintaa ohjaa asennoitin, joka vastaanottaa sähköisen viestin halutusta venttiilin asennosta (4-20 mA). Asennoitin toimii venttiilin sisällä asennonsäätimenä, joka mittaa venttiilin asennon. Asennoitin ohjaa paineilmaa, joka virtaa männän eri puolille ja aiheuttaa halutun liikkeen toimilaitteessa, riippuen liikesuunnasta. (Harju & Marttinen 2000, 22.)

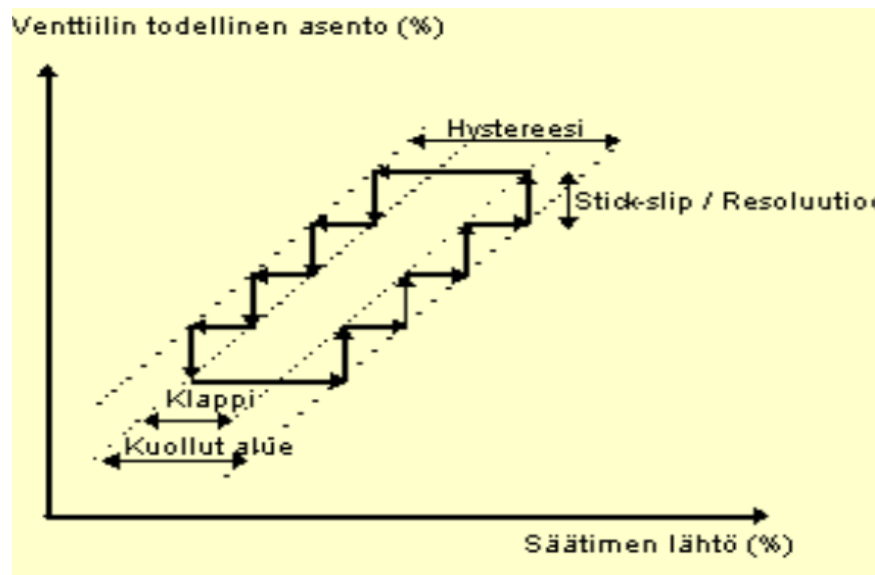
4.2 Asennoittimen toimintaperiaate

Sähköpneumaattisen asennoittimen toiminta perustuu kelan ja takaisinkytkentäjousen avulla luotuun ohjausviestiin, joka ohjaa paineilman virtausta toimilaitteessa ja sitä kautta säätää venttiilin asentoa. Kun ohjausviesti kasvaa, kelan vipu lähenee suutinta ja suutinpaine kasvaa, mikä puolestaan aiheuttaa kalvomännän ja luistiyksikön liikkeen alaspäin. Luistiyksikkö ohjaa syöttöpaineen toimilaitteen männän yläpuolelle, jolloin mäntä kääntää toimilaitteen akselin tarkasti uutta viestiä vastaavaan asentoon. Asennoitin on varustettu takaisinkytkennällä, joka kompensoi syöttöpaineen vaihtelut tehokkaasti. Asennoittimen dynamiikkaa voidaan säätää muuttamalla jousen alapään kiinnityskohtaa kelan vivulla, jolloin se voidaan sovittaa käytettävän toimilaitteeseen mukaan. Asennoittimet vaativat tietyn paine-eron venttiilin karan liikuttamiseksi, joten venttiilin alkaessa liikkua, se ottaa vähintään tietyn kokoisen

askeleen, mikä voi aiheuttaa ongelmia takaisinkytketyn säädön kannalta. (Harju & Marttinen 2000, 23.)

4.3 Toimilaitteongelmat

Alla olevassa kuvassa on esitetty säätöventtiilin tärkeimmät epälineaarisuudet. Epälineaarisuus viittaa käyttäytymiseen, joka ei ole suoraviivaista tai suoraan verrannollista. Nämä epälineaarisuudet heikentävät säätöpiirin toimintaa, erityisesti kun kohinataso on alhainen. (Harju & Marttinen 2000, 25.)



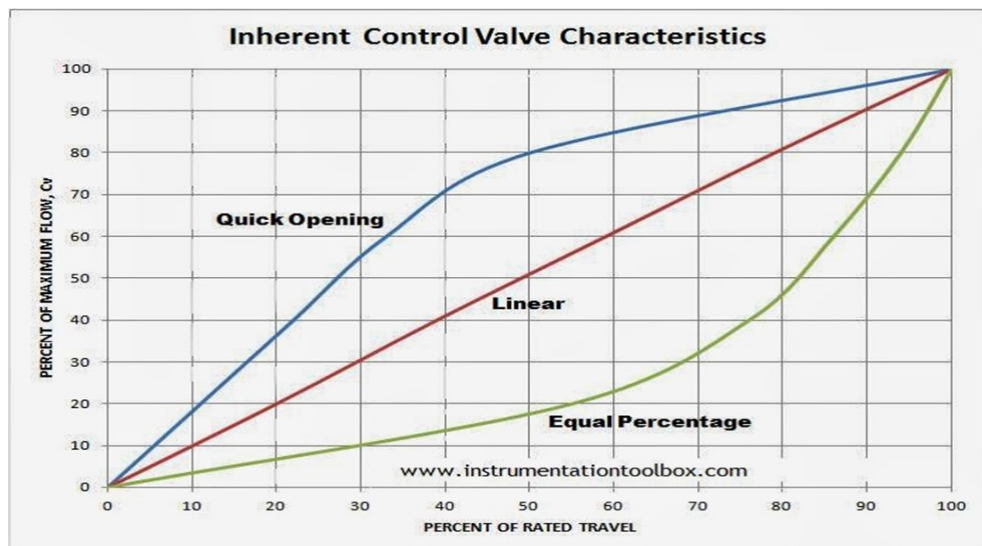
Kuva 6. Säätöventtiilin epälineaarisuudet. (Harju & Marttinen 2000, 25.)

Venttiilin kuollut alue on yleensä suurempi kuin stick-slip-askel, ja venttiilin todellinen asento riippuu siitä, mihin suuntaan se on viimeksi liikkunut. Säätöventtiilin pienin askel on yleensä noin 0,3-0,5% venttiilin toiminta-alueesta. Huonosti mitoitettu venttiili myös heikentää säädön tarkkuutta, koska venttiili toimii heikommin toiminta-alueen reunoilla kuin keskellä. Kuollut alue ja stick-slip-askel voivat aiheuttaa rajoitettua värähtelyä säätöpiireissä, jotka sisältävät I-termin. Vaikka säädön viritystä voidaan säätää poistamaan tai vähentämään I-osan vaikutusta, tämä lähestyy ongelman seurauksia eikä syyn poistamista. Venttiilin epätäydellisyyksiä huomioiva viritys pyrkii saavuttamaan suuren

vahvistuksen. Säätimen viritystä muuttamalla ei voida poistaa venttiilin stick-slip-ilmiötä. Itse asiassa joissain tapauksissa on vaikea erottaa huonosti viritetyn säätimen aiheuttamia ongelmia venttiilin epätäydellisyyksistä, koska yleensä molemmat vaikuttavat yhdessä. Toisaalta kuollutta aluetta ja stick-slipiä voi olla vaikea havaita, jos prosessin kohinataso on suuri. (Harju & Marttinen 2000, 25.)

4.4 Venttiilin ominaisuudet

Venttiilien ominaiskäyrät kuvaavat venttiilin kapasiteettikertoimen suhteellista riippuvuutta venttiilin avaumasta, kun paine-ero venttiilin yli on vakio. Ominaiskäyrät voivat olla lineaarisia, tasaprosenttisia tai pika-avaustyyppin mukaisia. Kun venttiili on asennettu prosessiputkistoon, tilavuusvirran säädön kannalta tärkeintä on venttiilin ominaiskäyrä, joka kuvaa venttiilin läpi menevän suhteellisen tilavuusvirran riippuvuutta suhteellisesta avaumasta. Venttiili tulisi mitoittaa niin, että sen ominaiskäyrä on suoraviivainen (= lineaarinen) koko säätöalueella. Tämä on tärkeää prosessisäätöjen kannalta, sillä suurin osa säätimisestä on viritetty olettaen, että prosessi käyttäytyy suoraviivaisesti koko säätöalueella. (Harju & Marttinen 2000, 28.)



Kuva 7. Venttiilin sisäisten ominaiskäyrien vaikutus. (Control valve flow characteristics n.d.)

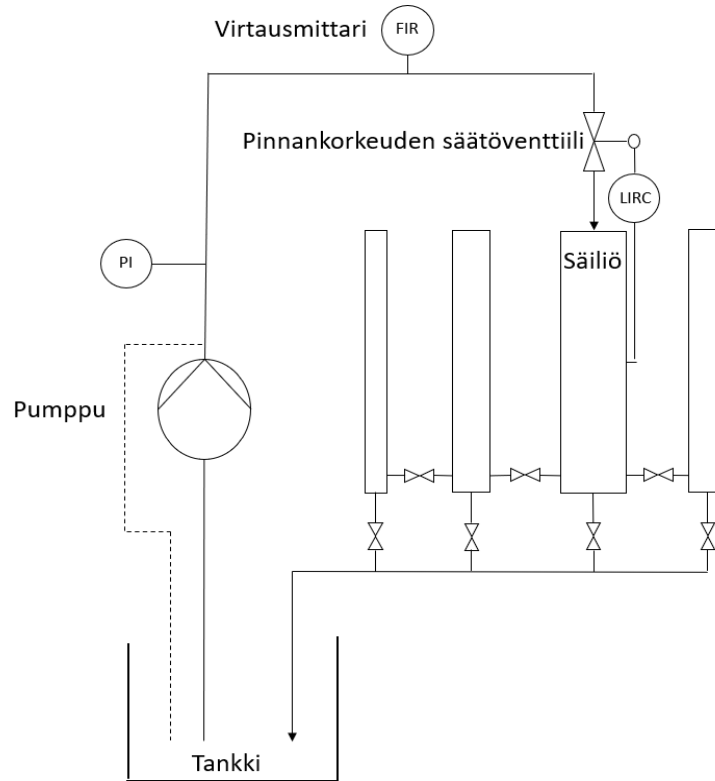
Uusien digitaalisten asennoittimien avulla voidaan parantaa venttiilien säätötulosta muokkaamalla venttiilin sisäistä dynamiikkaa. Säätöventtiilin ominaiskäyrää voidaan korjata niin, että se käyttäytyy lineaarisesti. Tämä helpottaa prosessisäätimen (PID) virittämistä ja parantaa säädön tarkkuutta. Perinteisissä asennoittimissa on käytetty erikoisohjauslevyä, jolla venttiilin epälineaarisuus on korjattu, mutta tämä on tarkoittanut epälineaarisen mittauksen käyttöä. Uusissa digitaalisissa asennoittimissa epälineaarisuuden korjaus on tehty ohjelmallisesti, mikä mahdollistaa lineaarisen mittauksen. Asennoittimia käytetään asentosäätiminä, ja niistä saadaan mittaustietona venttiilin karan asento. Vertaamalla tätä ohjaussignaaliin pystytään havaitsemaan toimilaittevikoja, osittain jopa automaattisesti. Uusien venttiilien ja asennoittimien käyttöönotossa on tärkeää tarkkailla prosessisäätimen viritystä. "Ärhäkämpä" asennoittimen viritys voi aiheuttaa ylimääräistä levottomuutta piiriin, jos venttiili on ollut aiemmin lähes jumissa ja jos prosessisäätimen viritystä ei ole tarkistettu samanaikaisesti. Siksi venttiilihuolto ja säätöpiirin viritys kulkevat käsi kädessä. (Harju & Marttinen 2000, 28.)

5 Harjoitusprosessin instrumentointi

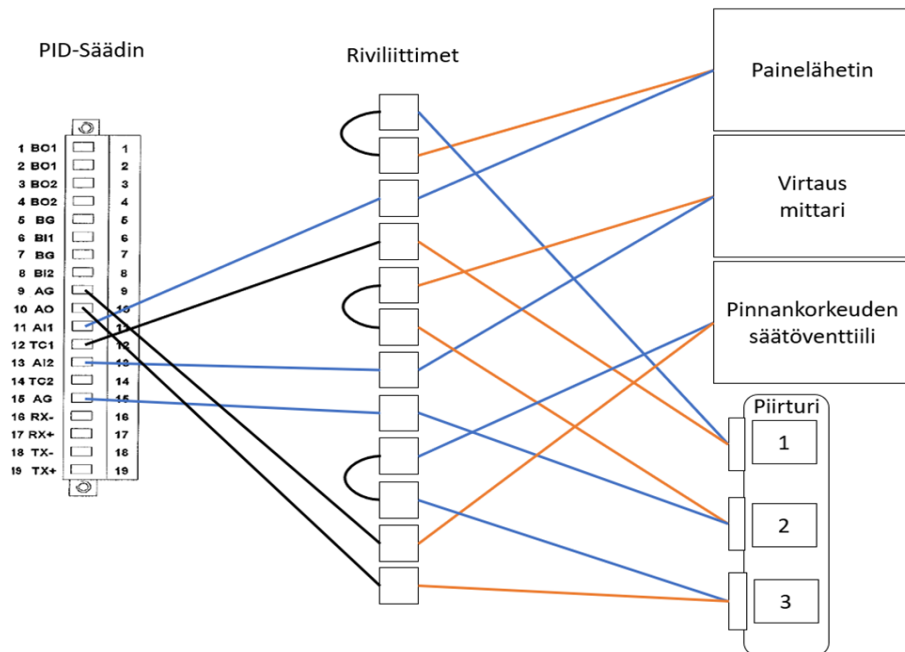
Instrumentointi on yleisnimitys laitteille ja välineille, joilla voidaan mitata ja seurata prosessin tilaa ja käyttäytymistä sekä säätää ja ohjata sitä tarvittaessa. Näihin laitteisiin kuuluvat mittausanturit, mittauslaitteet, mittamuuntimet, mittalähettimet, prosessiliitännät ja säädettävät laitteet kuten venttiilit, asennoittimet ja moottorihjaukset. (Kippo & Tikka 2008, 43.)

5.1 Prosessin kuvaus

Automaatiotekniikan laboratoriossa sijaitseva siirrettävä säiliön pinnankorkeuden mittauksen harjoituslaitteisto koostuu pumpusta, virtausmittarista, pinnankorkeuden säätöventtiilistä, säiliöistä, paineenalennusventtiilistä, kuplailuputkesta, painelähtimestä, yksikkösäätimestä ja piirturista. Vesiprosessissa pumpataan vettä prosessin alaosassa olevasta tankista virtausmittarin ja pinnankorkeuden säätöventtiilin läpi säiliöön. Säiliön pinnankorkeutta mitataan painelähtimellä, joka mittaa kuplailuputkelta tulevaa painetta. Painelähtin ja pinnankorkeuden säätöventtiili ovat yhdistetty yksikkösäätimeen. Yksikkösäädin ohjaa painelähtimeltä saatujen signaalien perusteella virtauksensäätöventtiiliä, joka puolestaan säätelee säiliön pinnankorkeutta, veden virtausta lisäämällä tai vähentämällä. Piirturi puolestaan piirtää kuvaajaa virtauksensäätöventtiilin asennosta, painelähtimen signaalista eli pinnankorkeudesta ja virtausnopeudesta. Seuraavissa kuvissa esitellään prosessin PI-kaavio ja kytkentäkaavio.



Kuva 8. Prosessin PI-kaavio.



Kuva 9. Prosessin kytkentäkaavio.

5.2 Mittalaitteet

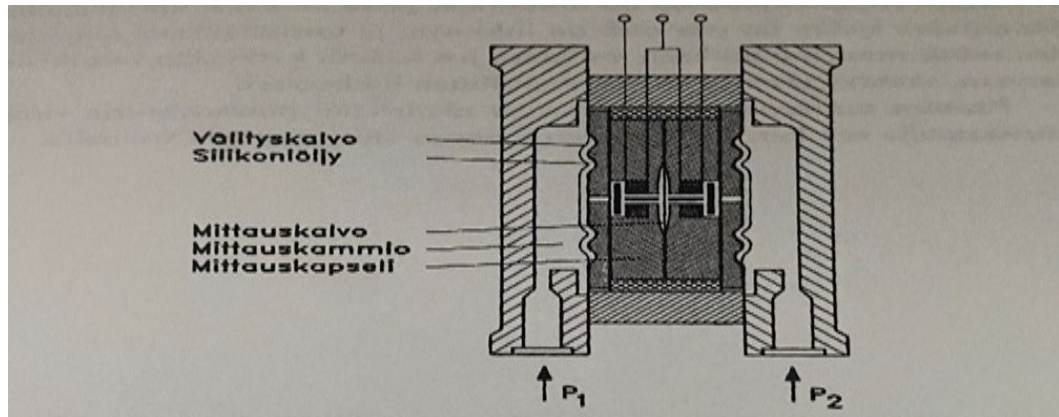
5.2.1 Painelähetin

Harjoitusprosessissa käytettävä painelähetin on Endress + Hauser Cerabar S PMC 731. Lähettimessä on kapasitiivinen, keraaminen paineanturi, jolla pystytään mittaamaan alhaisia paineita. Painelähettimen mittausalue on 0...400mbar. (Endress + Hauser Cerabar S PMC 731 technical information.) Painelähetin mittaa kuplailuputkelta tulevaa painetta. Painelähettimeltä lähtee 4...20mA analoginen viesti PID-säätimelle.



Kuva 10. Endress + Hauser Cerabar S PMC 731 painelähetin.

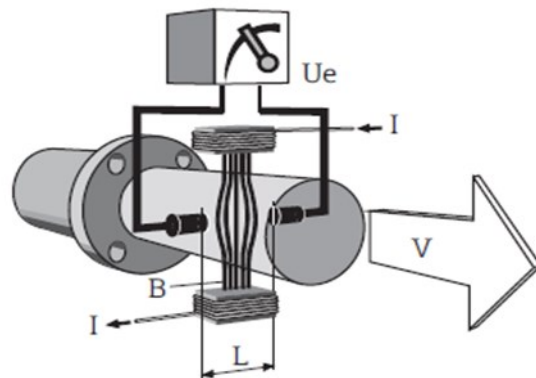
Kapasitiivisen paineanturin sisään on rakennettu differentiaalikondensaattori. Differentiaalikondensaattorin kiinteät levyt ovat painekammion seinämällä, ja liikkuvan levyn muodostaa joustava kalvo, joka on painekammion välissä. Kammioihin tuodaan mitattavat paineet paineenvälittimen avulla. Välitysnesteenä ja samalla eristeenä toimii silikoniöljy. (Pihkala 2004, 30.)



Kuva 11. Kapasitiivinen paineanturi (Pihkala 2004, 30).

5.2.2 Virtausmittari

Pumpulta tulevaa virtausta mittaa Endress + Hauser Promag 50H15 virtausmittari. Sen mittausperiaatteena on sähkömagneettinen virtausmittaus.



Kuva 12. Magneettisen virtausmittauksen periaate. (Endress + Hauser Promag 50 technical information n.d.)

Virtausnopeuden voi laskea seuraavalla kaavalla.

$$U_e = B \times L \times v$$

$$Q = A \times v$$

Kaava 7. Virtausnopeuden laskentakaava.

Jossa

U_e = indusoitu jännite

B = magneettinen induktio (magneettikenttä)

L = elektrodien etäisyys

v = virtausnopeus

Q = tilavuusvirta

A = putken poikkileikkaus

I = sähkövirta

Sähkömagneettinen virtausmittaus perustuu induktioperiaatteeseen, joka on tuttu sähkötekniikasta. Kun johdin liikkuu magneettikentässä ja leikkaa magneettikentän voimaviivoja, siihen indusoituu jännite. Tämä indusoitunut jännite voidaan mitata asentamalla elektrodit johdinputken tai kanavan sisäpuolelle tai laidoille. Magneettista virtausmittausta käytettäessä virtaavan aineen tulee olla sähköä johtavaa nestettä ($>0,5\mu\text{S}/\text{cm}$ ja virtausnopeus $> 0,5$ m/S) (Pihkala 2004, 76.)

5.2.3 Pinnankorkeusanturi

SICK:in LFP Cubic on nesteen pinnankorkeusanturi, joka käyttää TDR-tekniikkaa (Time Domain Reflectometry). Se on prosessi, jolla määritetään sähkömagneettisten aaltojen lentoaika. Lähetetyn pulssin ja heijastuneen pulssin välistä aikaeroa käytetään tasosignaalin muodostamiseen. Anturi voi lähettää tämän jatkuvana mitattuna arvona (analoginen lähtö) ja vapaasti asemoitavana kytkentäpisteenä (kytkentälähtö). (Sick LFP Cubic product family overview 2023, 2.)



Kuva 13. SICK LFP Cubic pinnankorkeusanturi.

LFP Cubic on yhteensopiva käytettäväksi käytännössä missä tahansa nesteessä. Modulaarisen anturin ansiosta anturi voidaan integroida nopeasti mihin tahansa sovellukseen. Se voidaan käyttää jopa saostumia muodostavissa ja vaahtoavissa nesteissä. Anturin intuitiivinen asennus käyttää neljää painiketta ja näyttöä, jotka varmistavat nopean ja helpon mukauttamisen sovellukseen. (Sick LFP Cubic product family overview 2023, 2.)

5.3 Toimilaitteet

5.3.1 Pumppu

Vesitankista vettä pumpataan säiliöihin Bilteman Art. 17-951 kastelupumpulla. Pumppu toimii 230V jännitteellä ja siinä on tehoa 800W. Pumppu pyörii 2850rpm ja se pumppaa vettä 60 l/min.



Kuva 14. Bilteman kastelupumppu ja vesitankki.

Pumppu on kiinnitetty vesitankin kanteen, joten siitä voidaan puhua pumppausyksiköstä. Kuvasta 14. näkyy että oikealla puolella on imulinja ja vasemalle lähtee painelinja painemittarille.

5.3.2 Pinnankorkeuden säätöventtiili ja asennoitin

Harjoitusprosessissa veden virtausta säiliöön säädetään palloventtiilillä. Palloventtiiliä liikuttaa Neles Automation Quadra-Powr QP1C jousikalvotoimilaite. Toimilaitetta säädetään Metso Automation ND800 venttiilin asennoittimella. Syöttövoimana toimilaite ja säädin käyttää paineilmaa. Syöttöpaineen tippuessa toimilaite kääntää venttiilin kiinni-asentoon.



Kuva 15. Pinnankorkeuden säätöventtiili ja asennoitin.

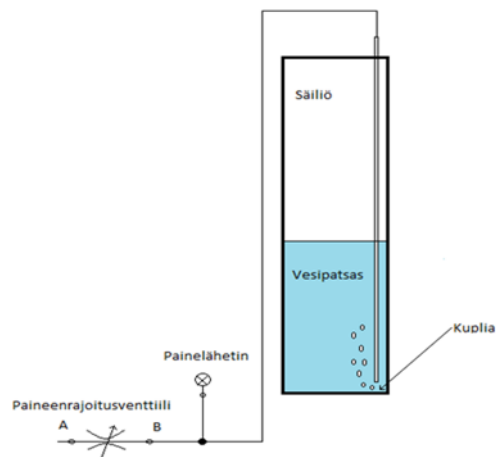
Palloventtiilissä on kiertyvä sulkuelin. Venttiilin pesä on kooltaan samankokoinen kuin sulkuelin. Pallossa on aukko, joka vastaa putken pinta-alaa. Kun venttiili on avattuna, virtaus kulkee pallossa olevan aukon läpi. Venttiili tiivistyy pallon ympärillä olevalla tiivistyspinnalla. Venttiiliä suljettaessa pallo painautuu tiivistettä vasten, samalla sulkien virtauksen venttiilin läpi. Venttiilin liittämistapoja on monia, joista yleisimmät ovat laipalliset-, hitsattavat tai kierreliitännäiset venttiilit. Yleensä putkiston pinta-ala ja pallon virtausaukko ovat samankokoisia, on myös mahdollista supistaa pallon virtausaukon kokoa. (Norokivi ym. 1980, 10–11)

Palloventtiilin sulkuelin on nimensä mukaan pallon muotoinen. Se voidaan asentaa putkistoon kummin päin tahansa, koska venttiili ei auki-asennossa aiheuta virtausvastusta. Epäpuhtaudet eivät pääse tiivisteeseen ja sulkuelimen väliin, koska pallo on jatkuvasti kosketuksissa tiivisteeseen. Kun venttiili on auki-asennossa, pallon tiivistyspinnat ovat suojassa tiivistettä vasten eikä virtaus pääse vaurioittamaan pallon ulkopintaa. (Norokivi ym. 1980, 10–11.)

5.4 Kuplailuputki

Kuplailuputki on yksinkertainen pinnankorkeuden mittausmenetelmä. Sitä voidaan käyttää ainoastaan avoimissa nestesäiliöissä ja se soveltuu erityisesti nesteille, jotka pyrkivät tukkimaan mittausputket – esimerkiksi sellumassalle ja jätevedelle. (Pihkala 2004, 94.)

Kuplailuputki on nesteeseen upotettu putki, joka ylittää mittausalueen nollakohtaan. Kun putkeen pursutetaan ilmaa, neste pakenee putkesta ja ilma kuplii vähitellen putken alapäästä kohti pintaa. Putken yläpäässä ilman paine asettuu sellaiseksi, että se pystyy pitämään putken tyhjänä. Kuplailuputken yläpäässä oleva paine ilmaisee pinnankorkeutta vastaavan hydrostaattisen paineen putken alapäästä lukien. Paine mitataan painelähtetillä. (Pihkala 2004, 94.)



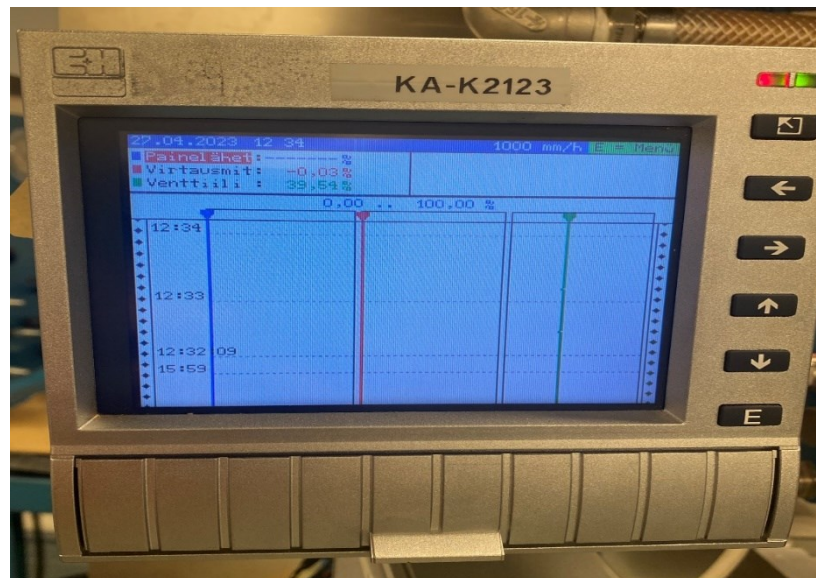
Kuva 16. Kuplailuputken toimintaperiaate.

Paineilman syöttöputkessa tarvitaan säädettävä kuristin, jolla voidaan säätää ilman virtausta sopivaksi siten, että kuplia muodostuu. Optimaalisessa tilanteessa, kun pinnankorkeus on korkeimmillaan, kuplien tulisi irrota noin puolen sekunnin välein. Liian pieni ilmavirtaus voi johtaa kuplailuputken tukkeutumiseen. Toisaalta liian suuri ilmavirtaus aiheuttaa painehäviöitä kuplailuputkessa ja mittari näyttää liian suurta lukemaa. Täten sopivan ilman

virtausnopeuden säätäminen on tärkeää, jotta kuplailuprosessi toimii luotettavasti. (Pihkala 2004, 95.) Paineilman syöttö saadaan automaatiolaboratoriossa olevasta paineilmaverkosta. Paineilma kuplailuputkelle tulee paineensäätimen kautta.

5.5 Piirturi

Endress + Hauser Ecograph on graafinen piirturi, joka visualisoi asiaankuuluvan prosessin arvot analogisten tulosignaalien kautta. Ecograph sopii hyvin sovelluksiin, kuten: laadun ja määrän seuranta vesi- ja jätevesiteollisuudessa, voimalaitosten prosessien seuranta, kriittisten prosessiparametrien näyttö ja tallennus, säiliön ja tason valvonta ja lämpötilan valvonta metallintyöstössä. (Endress + Hauser Ecograph technical information n.d.)

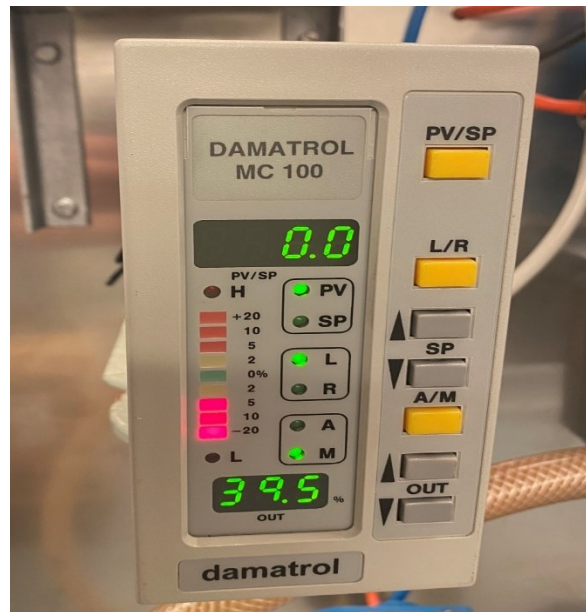


Kuva 17. Endress + Hauser Ecograph piirturi.

Vesiprosessissa piirturi visualisoi kolme eri arvoa, piirtämällä niistä erilliset kuvaajat. Piirturin tulot ovat kaikki analogisia. Tulot tulevat virtausmittarilta ja PID-säätimeltä. Säätimeltä tulevat viestit ovat pinnankorkeuden ja venttiilin asennoittimen tuloviestit.

5.6 Yksikkösäädin

Vesiprosessissa käytetty PID-säädin on Damatrol MC100. Se on digitaalinen yhden säätöpiirin yksikkösäädin, jota käytetään mm. PID-säätimenä, suhdesäätimenä tai käsisasemana.



Kuva 18. Damatrol MC100 yksikkösäädin.

Säätimen painikkeiden ja näyttöjen avulla ohjataan säätimen ja prosessin toimintaa ja valitaan säädössä käytettävät parametrit. I/O liitännät kytketään säätimen takaosan liittimiin. Säätimen vakiona kuuluva väyläliitântä mahdollistaa liittynnän pienvälvomoon tai ylemmän tason järjestelmiin, kuten DAMATICiin. Vesiprosessissa väyläliitântä ei kuitenkaan ole käytössä. Säädin on valmistettu ISO9001-laaturjestelmän vaatimusten mukaisesti ja on käynyt läpi tietokonetestauksen. (Valmet Automation Damatrol MC100 digitaalinen yksikkösäädin 1993, 2.) PID-säätjä toimii seuraavan kaavan mukaisesti.

$$OUT = KP(PV - SP) \left(1 + \frac{1}{TI} \int dt \right) + KP TD \frac{dPV}{dt}$$

Kaava 8. PID-säätäjän kaava (Valmet Automation Damatrol MC100 digitaalinen yksikkösäädin 1993, 19.)

Jossa

PV = mittausarvo

SP = asetusarvo

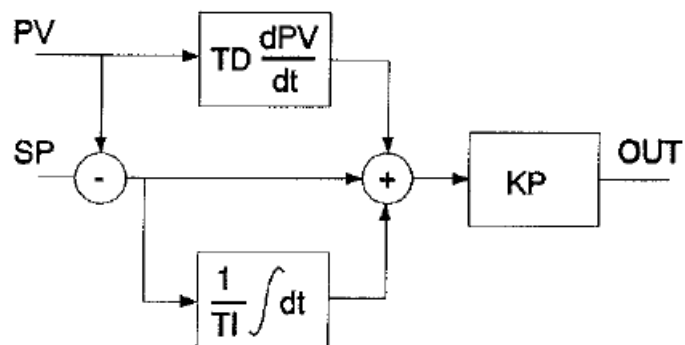
OUT = säätäjän lähtö

KP = vahvistus

TI = integrointiaika

TD = derivointiaika

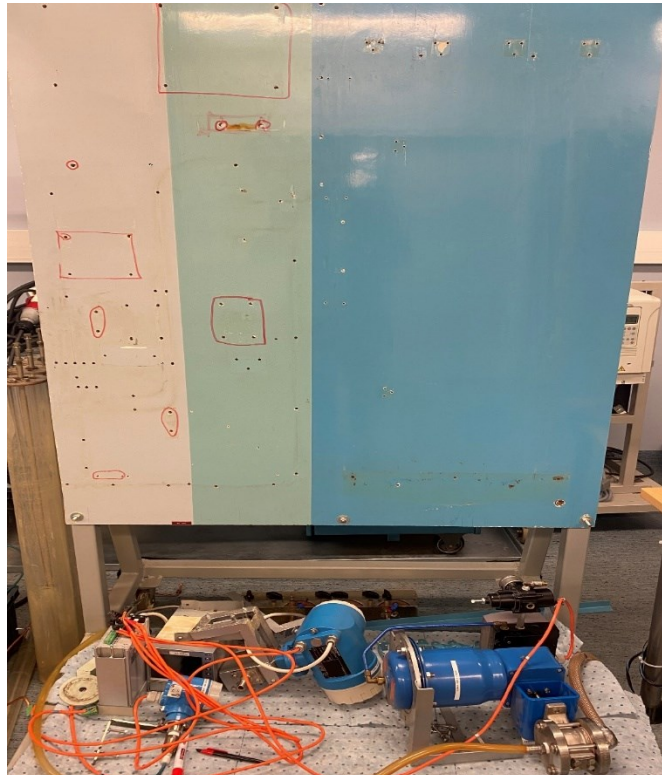
Säädin toimii P-säätäjänä, jos integrointiaika (TI) on ääretön ja derivointiaika (TD) on 0. Säädin toimii PI-säätäjänä, kun derivointiaika (TD) on 0 ja PD-säätäjänä, kun integrointiaika (TI) on ääretön. Seuraavassa kuvassa PID-säätäjän toiminta lohkokaaviona.



Kuva 19. PID-säätäjän toiminnan lohkokaavio. (Valmet Automation Damatrol MC100 digitaalinen yksikkösäädin 1993, 19.)

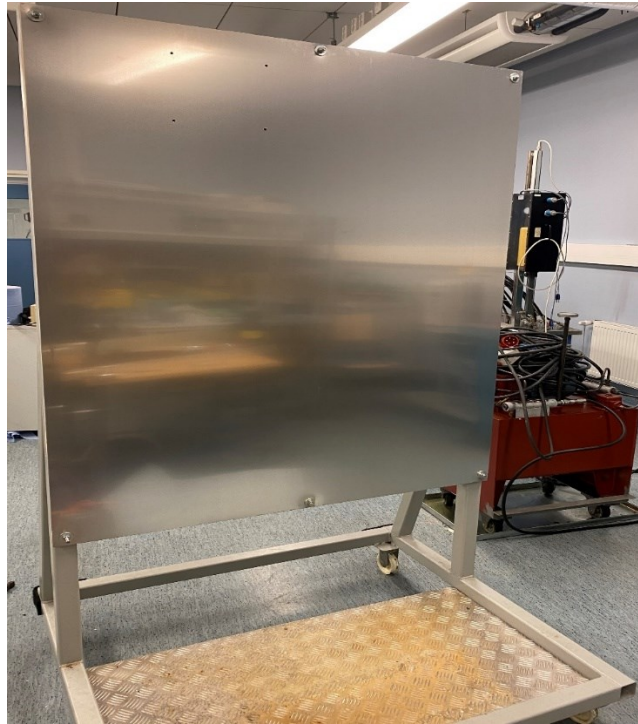
6 Työn toteutus

Harjoituslaitteisto oli ollut pitkään pois käytöstä ja se vaati kunnostusta ennen kuin sen voisi ottaa taas takaisin opetuskäyttöön. Ensimmäinen työvaihe oli purkaa laitteet ja säiliöt irti, jotta voitaisiin asentaa uusi taustalevy paikalleen. Seuraavassa kuvassa on laitteisto purettuna.



Kuva 20. Laitteet ja säiliöt irrotettuna taustalevystä.

Seuraava työvaihe oli selvittää millainen taustalevy soveltuisi parhaiten harjoitusprosessiin. Levy ei saisi ruostua ollenkaan ja sen pitäisi olla helposti työstettävä, koska siihen tullaan poraamaan monta reikää laitteiden ja säiliöiden asennusta varten.



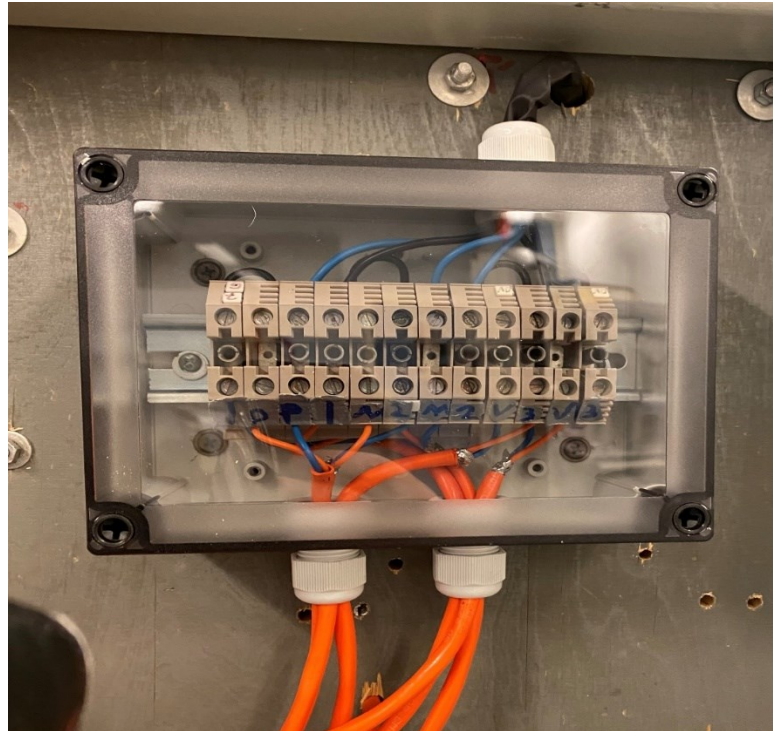
Kuva 21. Uusi taustalevy asennettuna paikoilleen.

Levyn materiaalivalinnassa pohdittiin terästä, ruostumatonta terästä ja alumiinia. Alumiini ei ruostu, se on kevyt käsitellä ja helppo työstää. Näistä syistä se valikoitui käytettäväksi materiaaliksi. Levy leikattiin Koneteknologiakeskus Turku Oy:n laserleikkurilla oikeisiin mittoihin. Levyn paksuus on 1.5 mm, leveys 1120 mm ja korkeus 1398 mm. Levy asennettiin vanhan lastulevyn päälle.

Kun levy oli valmiina paikallaan, pohdittiin olisiko järkevää sijoittaa laitteet ja säiliöt eri paikkoihin. Päädettiin asentamaan ne takaisin samoille paikoille, koska vanhassa asettelussa ei ollut mitään vikaa. Laitteiden ja säiliöiden

asentaminen vaatii paljon työtä, koska alumiinilevyyn pitää porata uudet reiät kiinnitystä varten.

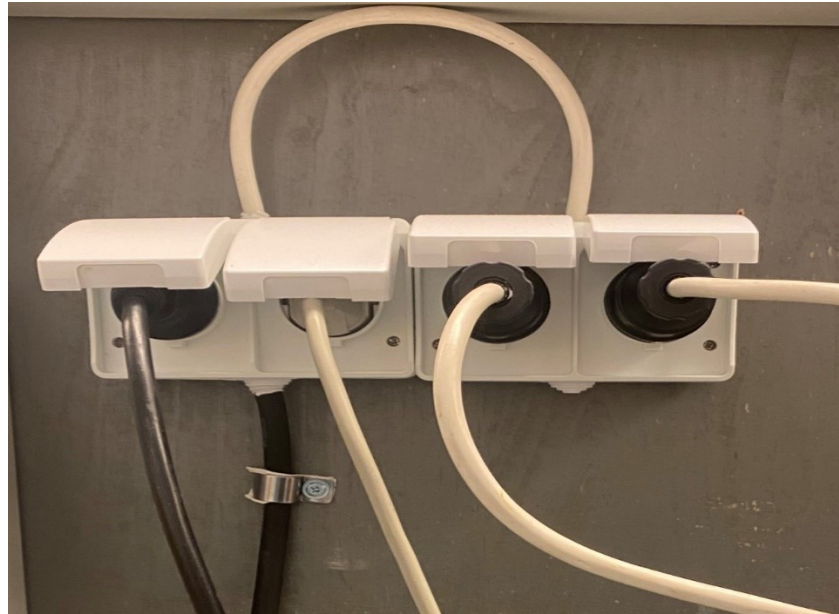
Seuraavana työvaiheena oli uusien kytkentöjen tekeminen yksikkösäätimeltä piirturille, painelähtetimelle, virtausmittarille ja pinnankorkeuden säätöventtiilille. Kytkentäkaavio on esiteltyinä kuvassa 9.



Kuva 22. Uudet kytkennät.

Töiden alkaessa johdot kulkivat levyn etupuolella laitteilta yksikkösäätimelle. Kytkennät oli tehty pienillä riviliittimillä yksikkösäätimen taakse ja ne näyttivät todella sekalaiselta. Tähän tarvittiin huomattava parannus ja päädyttiin viemään johdot laitteiden läheltä läpivientinä levyn taakse ja asentaa sinne kytkentäkotelo, joka on DIN-kiskoon asennettujen riviliittimien kanssa varusteltu. Koteloon asennettiin myös vedonpoistajat, jotka ehkäisevät liitosten irtoamista huomattavasti. Kun suurin osa johdoista ja kytkennöistä sijaitsee levyn takapuolella, ne ovat paljon paremmassa turvassa harjoitusprosessissa mahdollisesti syntyviltä roiskeilta. Kuvassa 22. kytkentäkotelon yläosasta lähtee johdot läpivientinä suoraan yksikkösäätimen taakse levyn toiselle puolelle.

Sähkötyöt jatkuvat ja seuraavaksi asennettiin pumpulle, virtausmittarille, yksikkösäätimelle ja piirturille tarvittavat uudet sähkösyötöt. Vanhat sähkösyötöt sijaitsivat levyn takaosassa ja niissä ei varsinaisesti ollut mitään vikaa, mutta päätettiin silti asentaa uudet ja paremmat sähkösyötöt ja sijoittaa ne hieman eri paikkaan.



Kuva 23. Uudet sähkösyötöt.

Koska harjoitusprosessissa käytetään vettä ja roiskumisvaara on todellinen, päätettiin parantaa hieman laitteiston sähköturvallisuutta. Levyn takaosaan vasempaan reunaan asennettiin kaksi IP44 suojattua kannellista ja maadoitettua pistorasiaa, jotka ovat roisketiiviitä. Kahteen johtoon asennettiin myös uudet IP44 suojatut ja maadoitetut pistotulpat, koska vanhat olivat huonossa kunnossa. Syöttöjohton pituudeksi valikoitui 3 metriä. Laitteistossa on pyörät alla, joten pidempi johto tarkoittaa tässä kohtaa enemmän liikkumavaraa.

Vesiprosessiin oli tilattu kuvan 13. mukainen SICK LFP Cubic pinnankorkeusanturi, jonka tarkoituksena oli tarjota kuplailuputkiperiaatteelle vaihtoehtoinen tapa säiliön pinnankorkeuden mittausta varten. Anturista lähtee 1000 mm pitkä putki, joka ylittää säiliön yläpäästä sen pohjalle. Kun säiliössä

oleva vesi koskettaa tätä putkea, anturi tunnistaa kosketuksesta pinnankorkeuden. Anturin putki on herkkä ja se on suojattu vahvemmalla koksiaaliputkella. Kuvassa 13. näkyy anturi ja koksiaaliputki mekaanisesti asennettuna kiinni säiliön kanteen. Anturin kytkennässä kohdattiin ongelma. Anturi kytkettiin kiinni yksikkösäätimeen oikealla tavalla. Kun virrat laitettiin päälle, anturiin olisi pitänyt syttyä valot, mutta mitään ei tapahtunut. Syyksi selvisi, että anturi tarvitsee toimiakseen 100mA virran ja yksikkösäätimeltä tuleva virta on vain 25mA. Jotta anturi olisi saatu toimimaan, sille olisi pitänyt asentaa ulkoinen jännitelähde. Tämä ei kuitenkaan ollut ajan rajallisuuden takia mahdollista, joten anturi jäi kytkemättä. Harjoituslaitteisto toimii onneksi ilman uutta pinnankorkeusanturia, koska pinnankorkeustieto yksikkösäätimelle saadaan yhä painelähettimeltä.

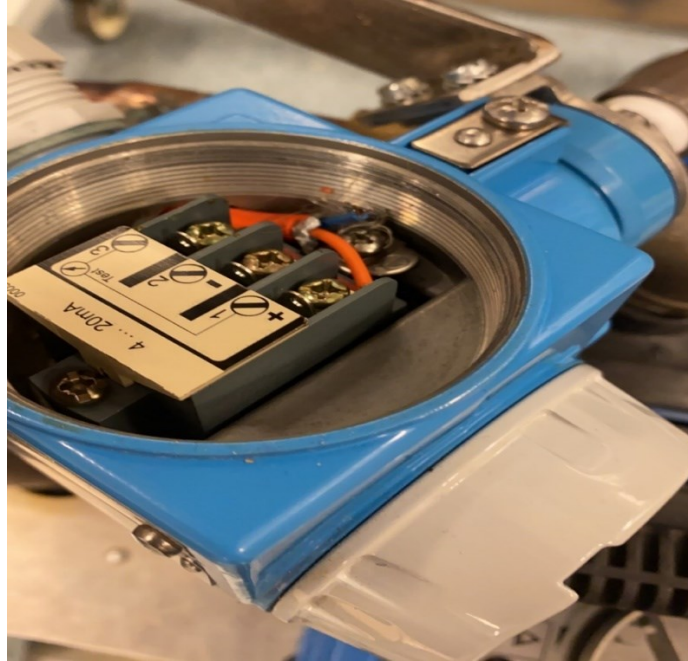
Laitteiston kunnostuksen seuraavassa vaiheessa asennettiin pumppausyksikkö paikoilleen ja samalla liitettiin paineilma- ja vesiletkut. Nyt vesiprosessilaitteisto on siinä kunnossa, että sitä päästään koekäyttämään. Seuraavassa kuvassa modernisoitu vesiprosessilaitteisto.



Kuva 24. Modernisoitu vesiprosessilaitteisto.

Kuvassa 24. oikealla näkyy uudet akryyliputkesta leikatut säiliöt. Putket toimitettiin 2000 mm pituisena ja ne leikattiin vanhojen säiliöputkien mittaisiksi, eli 1000 mm mittaan.

Kaiken piti olla valmista vesiprosessin testiajoa varten. Kun virrat laitettiin päälle, painelähettimeen ei syttynyt valo. Kaikki kytkennät testattiin yleismittarilla ja päädyttiin lopputulokseen, että painelähettimen sisältä on johdin joko irronnut tai löysällä.



Kuva 25. Painelähettimen sisältä irronnut johdin.

Jotta painelähettimen johtoihin päästäisiin käsiksi, se piti avata. Tämä onnistui helposti ja lähettimen sisältä paljastui irronnut (sininen) johdin. Johdin kytkettiin takaisin paikoilleen ja paineanturi asennettiin kiinni taustalevyyn. Seuraavassa vesiprosessin testiajossa painelähetin ja kaikki muutkin laitteet toimivat erinomaisesti.

7 Yhteenveto

Opinnäytetyö keskittyy vanhan koulutuskäytössä olleen pinnankorkeuden säädön harjoituslaitteiston kunnostukseen ja modernisointiin. Laite kunnostettiin asentamalla siihen uusi taustalevy, uudet kytkennät ja sähkönsyöttö, uudet säiliöt ja mekaanisesti uusi pinnanmittausanturi. Uuden anturin kytkentä osoittautui suunniteltua haastavammaksi, koska se vaati enemmän virtaa kuin yksikkösäädin pystyi antamaan. Ajan puutteellisuuden vuoksi uusi pinnanmittausanturi jäi kytkemättä. Vaikka uusi pinnanmittausanturi jäi kytkemättä, laitteisto saatiin toimimaan koeajossa käyttäen vanhaa painelähetintä pinnanmittaustiedon saamiseen. Uusi taustalevy, sähkötyöt ja uudet säiliöt paransivat vesiprosessilaitteiston ulkoasua huomattavasti.

Harjoituslaitteiston parissa riittäisi vielä töitä. Alun perin tarkoituksena oli saada kuplailuputkiperiaatteen rinnalle toinen pinnanmittaustekniikka.

Parannusehdotuksena vesiprosessilaitteistolle onkin saada uusi pinnanmittausanturi kytkettyä vanhan pinnanmittauksen rinnalle. Uusi anturi toisi opetuksessa varmasti esille vanhan ja uuden tekniikan eroavaisuudet. Myös paineilmaletkut ja takana olevat sähköjohdot kaipaisivat vielä pientä siistimistä. Yksikkösäätimen rinnalle voitaisiin myös asentaa PLC-logiikkajärjestelmä. Tällöin harjoituslaitteistosta tulisi nykyaikaisempi.

Opinnäytetyön suorittaminen oli minulle hyvä haaste. Sen avulla olen oppinut paljon säätö- ja anturitekniikasta sekä mekaanisesta ja sähköasennuksesta. Opinnäytetyön osa-alueet olivat hyvin monipuoliset. Vaikka en saanut laitteistoa täysin valmiiksi, jättäen mahdolliset jatkotyöt seuraavalle henkilölle, olen silti onnistunut tuomaan laitteiston takaisin koulutuskäyttöön soveltuvaksi.

Lähteet

Control valve flow characteristics n.d. Viitattu 8.5.2023.

<https://www.instrumentationtoolbox.com/2014/03/control-valve-flow-characteristics.html?m=1>

Endress + Hauser Cerabar S PMC 731 technical information n.d. Viitattu

10.4.2023. <https://bdih-prod-assetcentralapi-assetcentral-rest-srv.cfapps.eu10.hana.ondemand.com/files/DLA/4169B6A7950A0C4CE1000000A35E018/TI216PEN.PDF>

Endress+ Hauser Ecograph technical information n.d. Viitattu 10.4.2023.

https://bdih-prod-assetcentralapi-assetcentral-rest-srv.cfapps.eu10.hana.ondemand.com/files/DLA/524A8937B42F6225E1000000A35E035/TI01079REN_0213.pdf

Endress + Hauser Promag 50 technical information n.d. Viitattu 10.4.2023.

https://bdih-prod-assetcentralapi-assetcentral-rest-srv.cfapps.eu10.hana.ondemand.com/files/DLA/005056A500261ED7B6EAB9320E2DE79F/TI00047DEN_1317.pdf

Harju, T. & Marttinen, A. 2000. Sääätötekniikan koulutusmateriaali. E-kirja Finna-kirjapalvelussa. Viitattu 30.03.2023

https://turkuamk.finna.fi/Record/turkuamk_electronic.995702991705970?sid=2911813660

Itslearning. Turun ammattikorkeakoulun ohjaustekniikat ja käyttösovellukset oppimateriaali. Vaatii kirjautumisen palveluun. Viitattu 8.5.2023.

<https://turkuamk.itslearning.com/ContentArea/ContentArea.aspx?LocationType=1&LocationID=682>

Kippo, A. & Tikka, A. 2008. Automaatiotekniikan perusteet. Helsinki: Tekijät ja Edita Publishing Oy.

Norokivi, S., Härkönen, V., Uomala, V., Vilenius, M. & Tusa. J. 1980. Venttiilit teollisuusputkistoissa. Helsinki: Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus.

Pihkala, J. 2004. Prosessisuureiden mittaustekniikka. Vantaa: Tekijä ja Opetushallitus.

Savolainen, J. & Vaittinen, R. 2007. Säättötekniikan perusteita. Helsinki: Suomen robotiikkayhdistys Ry.

SFS-IEC 60050-351. Sähköteknilinen sanasto. Osa 351: Ohjaustekniikka. Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-ISO 14617-6 Kaavioissa käytettävät piirrosmerkit. Osa6: Mittaus- ja ohjaustoiminnot. Suomen standardisoimisliitto SFS.

Sick LFP Cubic product family overview. 2023. Viitattu 10.5.2023.
https://cdn.sick.com/media/familyoverview/6/66/766/familyOverview_LFP-Cubic_g249766_en.pdf

Valmet Automation Damatrol MC100 digitaalinen yksikkösäädin. 1993. Käyttäjän ohje. Viitattu 19.04.2023.