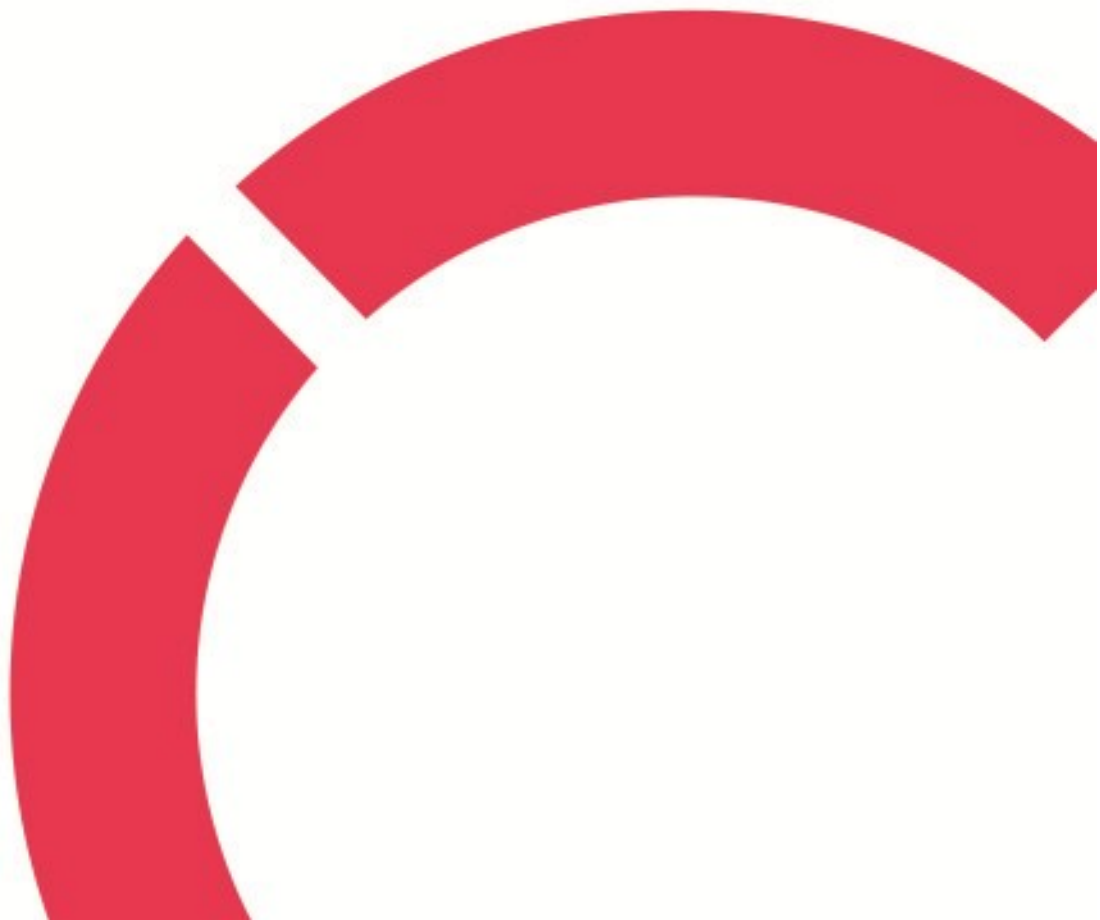


Kimmo Kuru

SAKEUSSÄÄDÖN PARANTAMINEN KUIVATUSKONEELLA

CASE STORA ENSO OY

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Huhtikuu 2025**



Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Huhtikuu 2025	Tekijä/tekijät Kimmo Kuru
Koulutus Sähkö- ja automaatiotekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi SAKEUSSÄÄDÖN PARANTAMINEN KUIVATUSKONEELLA. CASE STORA ENSO OY		
Työn ohjaaja Aki Suokko		Sivumäärä 36 + 3
Työelämäohjaaja Antti Saukkonen		
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia ja parantaa sakeussäädön tarkkuutta kuivatusprosessissa. Sakeussäädön optimointi on keskeistä prosessin tehokkuuden ja lopputuotteen laadun kannalta. Työssä keskityttiin erityisesti MCA- ja LAPA-lähettimeiden mittaustarkkuuden ja sijoittelun arviointiin sekä mahdollisiin säätöparannuksiin.</p> <p>Opinnäytetyö koostui kahdesta osasta. Ensimmäisessä osassa perehdyttiin sakeusmittausten teoriaan, sekä mittalaitteiden ja säätöjärjestelmän peruseriaatteisiin. Lisäksi tarkasteltiin mittaustulosten eroavaisuuksia ja niiden vaikutusta prosessinohjaukseen. Toisessa osassa tehtiin käytännön tutkimuksia sakeuslähettimeiden toiminnasta, analysoitiin trenditietoja ja arvioitiin erilaisten säätöparametrien vaikutusta mittaustarkkuuteen.</p> <p>Tutkimuksen tulokset osoittivat, että mittaustulosten vaihtelua ei voitu täysin poistaa pelkästään säätöparametrien hienosäädöllä. MCA-lähettimeen kalibrointi paransi jossain määrin hylkymassan sakeuden mittaustarkkuutta, mutta ei poistanut kaikkia mittausero- ja epävarmuuksia. Luotettavamman säätöratkaisun saavuttamiseksi suositellaan erillisen mittauspisteen asentamista perälaatikolle, mikä mahdollistaisi mittaustulosten tarkemman vertailun ja säätöjärjestelmän kehittämisen.</p> <p>Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Stora Enso Oy, ja opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää sakeussäätöjärjestelmien kehittämisessä sekä prosessiteollisuuden mittaustekniikan parantamisessa.</p>		
Asiasanat Kuivatuskone, LAPA, MCA, PID-säätö, QIC-mittaus		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date April 2025	Author Kimmo Kuru
Degree programme Electrical and automation engineering		
Name of thesis IMPROVING CONSISTENCY CONTROL IN THE DRYING MACHINE. CASE STORA ENSO OY		
Centria supervisor Aki Suokko	Pages 36 + 3	
Instructor representing commissioning institution or company Antti Saukkonen		
<p>The purpose aim of this thesis was to improve the accuracy of consistency control in the drying process. Optimizing consistency control is essential for process efficiency and final product quality. The study focused particularly on evaluating the measurement accuracy and placement of MCA and LAPA transmitters, as well as potential control improvements.</p> <p>The thesis consisted of two parts. The first part explored the theory of consistency measurements, the operating principles of measuring instruments, and the fundamental principles of control systems. Additionally, the discrepancies in measurement results and their impact on process control were examined. The second part involved practical investigations of the performance of consistency transmitters, analysis of trend data, and evaluation of the effects of different control parameters on measurement accuracy.</p> <p>The study results showed that measurement variations could not be entirely eliminated by merely fine-tuning the control parameters. Calibration of the MCA transmitter improved the accuracy of reject pulp consistency measurements to some extent but did not eliminate all measurement uncertainties. To achieve a more reliable control solution, it is recommended to install a separate measurement point at the headbox. This would enable a more precise comparison of measurement results and facilitate further development of the control system.</p> <p>The thesis was commissioned by Stora Enso Oy, and its findings can be utilized in the development of consistency control systems and the enhancement of measurement technology in the process industry.</p>		

<p>Key words Drying machine, LAPA, MCA, PID control QIC-measurement</p>
--

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

KAPPA

Kappaluku kuvaa lingniinipitoisuutta tai valkaisevuutta.

LAPA

Leikkausvoiman ja massan sakeuden väliseen suhteeseen perustuva mittaus.

MCA

Microwave Consistency Measurement on mikroaaltotekniikkaan perustuva mittaus.

PID

Proportional-Integral-Derivative. Suhdeosa, integroiva osa ja derivoiva osa.

PULPPERI

Mekaaninen sekoitin, jossa kiinteät materiaalit, kuten selluloosa, sekoitetaan nesteeseen muodostaen lietteen.

QCS-MITTAUS

Laadunhallintajärjestelmä, joka valvoo ja optimoi paperi- ja kartonkikoneiden prosesseja reaaliaikaisesti.

UKP

Korkea kappaluvun sellu.

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 KUIVATTAVAN MASSAN KULKU	2
2.1 Vesikierto kuivatuskoneella	3
2.2 Hylkymassakierto.....	4
2.3 Kuivatuskoneen säätöpiirit ja niiden toiminta	5
3 SAKEUSSÄÄTIMET MCA JA LAPA	6
3.1 MCA-lähetin ja sen toimintaperiaate.....	6
3.2 LAPA-lähetin ja sen toimintaperiaate	7
4 SÄÄTÖTEORIA TEOLLISUUDESSA.....	9
4.1 Säätöpiiri.....	9
4.2 Säätöpiirin toiminta ja toimilaitteiden rooli prosessisäädössä.....	10
4.3 Säätöpiirissä esiintyvät häiriöt.....	12
4.4 Takaisinkytkentä.....	13
4.5 Myötäkytkentä.....	14
4.6 Kaskadikykentä	14
4.7 Suhdesäätö	15
4.8 PID-säätö.....	16
4.9 P-säätö	17
4.10 Integroiva säätö.....	17
4.11 Derivoiva säätö	18
4.12 PID-säädön viritys.....	19
5 SÄÄDÖN OPTIMOINTI	25
5.1 Sakeuslähettimien sijainti.....	26
5.2 MCA:n säädön parantaminen	29
5.3 Laboratorio- ja online-mittausten vertailu	31
6 LABORATORIOTULOSTEN ANALYSOINTI	34
7 POHDINTA.....	36
LÄHTEET	37
LIITTEET	
KUVIOT	
KUVIO 1. Lohkokaavio prosessista, jossa palauteohjain.....	13
KUVIO 2. PID-säätimen käyttö prosessissa	19
KUVIO 3. Prosessin yksikköaskelvaste.....	21

KUVIO 4. S-käyräinen vaste	21
KUVIO 5. Suljetun piirin järjestelmä, jossa on vahvistus ohjaus.....	22
KUVIO 6. Jatkuva heilahtelu ajan kanssa P_{cr}	22
KUVIO 7. Sakeussäädin QIC-660 yksinkertaistettu piirikaavio	26
KUVIO 8. MCA:n mittaus- ja laboratoriotuloksien erotus.	

.....34

KUVAT

KUVA 1. Twin blade -anturi	7
KUVA 2. Flow through -anturi.....	7
KUVA 3. LAPA sakeusmittaus -anturi.....	8
KUVA 4. MCA asennuspaikasta	27
KUVA 5. MCA:n asennuspaikka ja toimilaite	27
KUVA 6. LAPA asennuspaikasta pystyputkessa	28
KUVA 7. LAPA leikkausvoimaan perustuva sakeusmittaus asennuspaikka	
.....	28
KUVA 8. Konesäiliön sakeussäätimestä ja säätimen parametreistä.....	29
KUVA 9. Sakeussäätimen parametrien toiminta	30
KUVA 10. Hylkymassan pumppaus koneelle, mittaukset MCA ja LAPA	30
KUVA 11. Konesäiliön sakeussäädin M1 LAPA- ja M2 MCA-mittaus.....	31
KUVA 12. Konesäiliön sakeussäädin LAPA- ja MCA-mittaus hylkymassalla	
.....	32

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Ziegler-Nicholsin viritysääntö prosessin askelvasteen perusteella (ensimmäinen menetelmä).....	20
TAULUKKO 2. Ziegler-Nicholsin viritysääntö kriittisen vahvistuksen K_{cr} ja kriittisen jakson P_{cr} perusteella (toinen menetelmä)	23
TAULUKKO 3. Laboratoriotulosten ja MCA-lähettimen mittaustulosten vertailu	32

1 JOHDANTO

Kuivatus on keskeinen yksikköprosessi selluteollisuuden tuotantoprosessissa. Sen toiminta vaikuttaa suoraan tuotannon laatuun ja tehokkuuteen. Kuivatuskoneen tehtävänä on varmistaa, että massan kuivatus vastaa tarkasti asetettuja arvoja, mikä mahdollistaa lopputuotteen tasalaatuisuuden ja markkina-kelpoisuuden.

Kuivatuskoneen toiminnassa erityisen tärkeää on massan sakeuden tarkka hallinta, sillä sakeus vaikuttaa suoraan tuotannon tehokkuuteen ja lopputuotteen laatuun. Nykyinen kuivausprosessin säädinjärjestelmä, joka hyödyntää LAPA- ja MCA-lähettimeä, aiheuttaa merkittäviä haasteita. LAPA-sakeusmittaus perustuu leikkausvoimaan pohjautuvaan mittausperiaatteeseen, jossa mittalaitteen tuntoelin havaitsee massan sakeuden ja virtauksen. MCA-lähetin on mikroaaltotekniikkaan perustuva laitteisto, joka mittaa massan sakeutta erityisesti sellu- ja paperiteollisuudessa. Mittaukset eivät aina kykene antamaan luotettavaa kuvaa todellisesta sakeudesta, mikä johtaa jopa 0,7 yksikön poikkeamiin mittauksissa. (Valmet sakeusmittaukset.)

Erityisen haastava tilanne syntyy, kun tuoreen massan joukkoon lisätään kerran kuivattua massaa hylkytornista. Hylkytornista palautetaan kuivattua massaa, joka ei poikkea tuoremassasta muuten, että se on kertaalleen kuivattu. Tämä yhdistelmä aiheuttaa konesäiliön sakeusmittauksessa merkittäviä poikkeamia, jotka vaikuttavat suoraan kuivatuskoneen säädettävyyteen ja tuotantoprosessin vakauteen. Näihin poikkeamiin ei ole toistaiseksi löytynyt toimivaa ratkaisua, mikä tekee säätötekniisten ratkaisujen kehittämistä tälle opinnäytetyölle mielekkään tavoitteen. Opinnäytetyön tekijällä on pitkä työkokemus kuivausprosessin säädöstä työn tilaajan palveluksessa.

Opinnäytetyön tarkoituksena on analysoida ja kehittää uusia ratkaisuja kuivatuskoneen säätöjärjestelmän parantamiseksi hyödyntäen Valmet DNA -järjestelmää ja laboratoriotuloksia. Samalla arvioidaan sakeussäätimen mittausten nykyistä sijoitusta ja tutkitaan, voisiko mittauksen sijainnin optimointi parantaa mittaustarkkuutta ja säätötoimintaa. Tavoitteena on pienentää mittauksissa esiintyvää virhemarginaalia ja löytää keinoja, joilla sakeuden mittaus ja hallinta saataisiin nykyistä tarkemmiksi. Vaikka tutkimuksessa hyödynnetty lähdemateriaali on osittain vanhaa, kaikki siinä esitetyt menetelmät ja periaatteet ovat edelleen käytössä. Jotta tämä työ ei paisuisi liian suureksi, rajataan MCA-sakeussäätimeen ja sen optimointiin.

2 KUIVATTAVAN MASSAN KULKU

Kuivatuskone on olennainen osa selluteollisuuden laitteisto. Koneella tuotetaan markkinoille valkaise-matonta sellua; tehtaan käynnistyksen tai muun tuotannon häiriön vuoksi keittämöltä voi tulla kappatavoitearvoista poikkeavaa massaa. Kuivatuskone on massan tasauksessa ja markkinasellun tuottamisessa olennainen tekijä, sillä sen avulla voidaan käsitellä myös häiriötilanteissa syntyvää massaa.

Keittämöltä tuleva massa, jonka sakeus on noin 11 % massasta/tilavuudesta laskettuna, johdetaan ensin suureen varastotorniin. Tornissa suoritetaan massan esilaimennus pohjalaimennuksen avulla. Tämän jälkeen massaa siirretään pumpulla tornista. Sakeussäätimen avulla massan sakeutta pienennetään noin neljään massaprosenttiin, jotta massa kulkee putkilinjassa sujuvammin ja mahdollistaa seuraavan sakeussäätimen toiminnan. Painemittaus optimoi pumpun moottorin taajuusmuuttajan toimintaa, mikä maksimoi energiätehokkuuden ja pumpun hyötysuhteen. (Knowpulp 2025.)

Massa siirtyy massansyöttösäiliöön, joka toimii lyhytaikaisena varastona. Tämä säiliö tasaa massavirtausta häiriötilanteissa ja antaa järjestelmälle pienen toimintavaran, yleensä muutaman minuutin. Massansyöttösäiliöstä massa siirtyy konesäiliöön, jossa sen sakeus pienennetään noin 2,5 prosenttiin. Konesäiliöstä massa ohjataan peränsyöttöpumpulle, jossa hyödynnetään korkeuseroa. Neliöpainoventtiilin avulla säädetään karkea massan neliöpaino, ja sakeus pienennetään noin 1,5 prosenttiin ennen massan siirtoa pesälaatikkoon ja edelleen viiraosalle. (Knowpulp 2025.)

Viiraosalla suurin osa massan vedestä poistetaan alipaineella toimivilla imupumpuilla. Märkäimulaatikoiden avulla luodaan tehokas imu, joka poistaa vettä massasta. Veden poistumiseen vaikuttaa myös massan pH-arvo, jota säädetään rikkihapolla. Näin saadaan laskettua pH-arvoa oikeaan tasoon, mikä tehostaa vedenpoistoa. Viiraosalla käytetään myös tasoimulaatikoita, jotka tarjoavat korkeampia imutehoja. Imutasot on kuitenkin optimoitava huolellisesti, jotta viiran toiminta ja puristinosan tehokkuus eivät kärsi. (Kuivatuskoneen opastusohjeet 2022.)

Viiralta massa siirtyy puristinosaan, jossa vedenpoistoa jatketaan. Kombipuristukseen kuuluu lumpuri, ensimmäinen puristin ja toinen puristin. Näiden osien tehtävä on poistaa massasta niin paljon vettä kuin mahdollista ennen kenkäpuristinta. Puristusvoima kasvaa vaiheittain, ja kombipuristimen veden-

poistokapasiteetti on 1–2 m³/s. Kenkäpuristimen tehtävänä on saavuttaa korkein mahdollinen vedenpoisto. (Kuivatuskoneen opastusohjeet 2022.) Puristusvoima, joka voi olla 1100–1500 kN/m, vastaa maksimiviihapainetta. Puristus on optimoitava tarkasti, jotta kenkäpuristimesta saadaan paras hyöty.

Kenkäpuristuksen jälkeen massa siirtyy kuivatuskaappiin, jossa haihdutetaan massasta vettä ja saadaan massa haluttuun kuiva-aine prosenttiin. Kuivatuskaapissa käytetään puhallinkuivausta.

Puhallinkuivauksessa käytettävä ilma esilämmitetään kuivauskaapista saatavalla vesihöyryllä omassa lämmönvaihtimessaan. Kuivailma johdetaan patterikenttien läpi kaapin arinatasolle, joka kelluttaa ilmavirran avulla massaa irti arinatasosta. Patterikenttöistä lämmitetään matalapainehöyryllä, jolla saadaan nostettua kuivailman lämpötilaa optimaaliseksi. Märkäilmapuhaltimet poistavat vesihöyryn kaapista, ja lämmöntalteenottojärjestelmä varmistaa energiatehokkuuden. (Kuivatuskoneen opastusohjeet 2022.)

Kuivatuskaapin jälkeen QCS-mittaus tarkistaa massan kuiva-ainepitoisuuden ja neliöpainon. QCS mittaa ja säätää kriittisiä tuotantoparametreja, kuten sakeutta, kosteutta, neliöpainoa ja profiileja, varmistuen tasalaatuisen lopputuotteen. Järjestelmä käyttää skannereita ja antureita analysoimaan arkin poikki- ja koneensuuntaisia vaihteluita, jolloin prosessihäiriöt voidaan tunnistaa ja korjata nopeasti. (Laadunvalvontajärjestelmä QCS.). Prosessin lopussa kaapin vetotela säätää massan kireyttä, joka perustuu paino mittaukseen koko kaapin matkalla. Kaikkien prosessiarvojen ollessa kohdallaan massa voidaan leikata arkeiksi ja paketoita joko vientiin tai kotimaan markkinoille. (Kuivatuskoneen opastusohjeet 2022.)

2.1 Vesikierto kuivatuskoneella

Kuivatuskoneen vesikiertoon kuuluu niin sanottu nollavesitorni, joka toimii päävesivarastona. Torni täytetään puhtaalla kemiallisesti puhdistetulla vedellä. Tästä tornista siirretään vesi kuivatuskoneen omaan viiravesisäiliöön. Viiravesisäiliön vesi käytetään massan laimennukseen koneen perälaatikolle, josta vesi otetaan suoraan konesäiliön sakeus säätöön. Viiravesisäiliön ylikaadolla saadaan suoraan ohjattua vesi ylijuuksusäiliöön. Ylijuuksusäiliö toimii vesivarastona, jota käytetään massan annostelun pohjalaimennuksessa ja samalla tulevan massan sakeussäätöön. Lämminvesisäiliö on ylijuuksusäiliön lisävesi varanto, josta saadaan lisää vettä, jos ylijuuksusäiliön pinta laskee liian alas. Lisävedenlämmönvaihdin valmistaa kemiallisesti puhdistetusta vedestä lämmintä vettä. Koneen ollessa käynnissä oma lämpimän veden tuotanto riittää yleensä kattamaan koko tarpeen hyödyntämällä kuivatuskaapissa

muodostuvaa vesihöyryn hukkalämpöä. Hukkalämpö otetaan talteen suihkuvesitorneista, joihin suihkutetaan kuivatuskaapista tulevaa vesihöyryä vastavirtaan. Seuraavaksi vesi kulkeutuu kaarisihkien kautta lämminvesisäiliöön, josta se päätyy takaisin vesikiertoon. (Kuivatuskoneen opastusohjeet 2022.)

2.2 Hylkymassakierto

Kuivatuskoneella massa ohjataan suoraan viiralta ykköspulpperiin, jossa suihkuvedet ohjaavat massan pulpperin roottoreille. Roottorit hajottavat massan, minkä jälkeen se siirretään siirtopumpulla hylkytorniin. Siirtopumpun toimintaa ohjaa sakeussäädin, joka varmistaa massan sakeuden pysymisen tavoitearvojen mukaisena. Mikäli sakeus nousee asetetun arvon yläpuolelle, ohjauspiiri lisää vesimäärää massan joukkoon, jolloin sakeus palautuu hallitulle tasolle. Sakeussäätimen ohjaus vaikuttaa myös pulpperin laimennusveden kaskadisäätöön. Kun sakeus pysyy asetetussa arvossa, säätö toimii normaalisti. Jos sakeus ylittää tavoitearvon; ohjausarvo kasvaa, minkä seurauksena kaskadisäädin nostaa pulpperin laimennuksen ohjauksen asetusarvoa. Tämä johtaa vesimäärän kasvuun pulppereissa ja sakeuden tasaantumiseen. (Piirikohtainen toimintakuvaus.)

Hylkytornista massa siirretään pumpun avulla takaisin konekiertoon massansyöttösäiliön kautta, jossa on konesäiliölle menevän massan sakeusmittaus. Näin massan sakeutta voidaan tarkkailla. Jos pulpperin sakeusmittauksia epäillään liian suuresti virheellisiksi, voidaan mittauksia verrata konesäiliön mittauksiin. Näin voidaan arvioida, onko sakeusmittaus poikkeamassa oikeasta arvosta. (Kuivatuskoneen opastusohjeet 2022.)

Pulpperi 2 toimii samalla tavalla kuin pulpperi 1, mutta massa on tässä vaiheessa huomattavasti kuivempaa. Suoraan viiralta menevän massan kuiva-aine on noin 20 % ja kaapin jälkeen pulpperiin menevän massan kuiva-aine on 88 prosentin luokkaa. Tämän takia pulpperi 2 joutuu huomattavasti suuremmalle kuormitukselle. (Kuivatuskoneen opastusohjeet 2022.)

2.3 Kuivatuskoneen säätöpiirit ja niiden toiminta

Massan siirtyessä koneelle sakeussäädin määrittää tornin pohjalaimennuksen asetusarvon. Tornista tulevan massan sakeus vaihtelee, joten kaskadisäätöpiiri mukauttaa pohjalaimennuksen vesimäärää tarpeen mukaan, jotta prosessi pysyy hallitussa tilassa.

Lisäksi massan siirtopumpulla toimiva säätöpiiri säätelee moottorin taajuusmuuttajan kierrosnopeutta siirtoventtiilin aukioloasennon perusteella. Tämä säätöpiiri toimii kaskadisäätönä, jossa massan siirtoventtiilin avautuessa yli määritetyn prosenttiosuuden, ohjaa venttiilistä saatava takaisinkytkentäsignaali siirtomoottorin taajuusmuuttajaa. Ohjausviesti määrittää pumpun kierrosnopeuden kasvun, mikä lisää massavirtausta ja pyrkii saavuttamaan asetetun virtauksen arvon. (Piirikohtainen toimintakuvaus.)

Toimintaketju käynnistyy koneen massasäiliön pinnankorkeuden mittauksesta, joka tuottaa asetusarvon massavirtaussäädölle. Säätöpiiri varmistaa, että massavirtaus pysyy tavoitearvossaan ja reagoi nopeasti mahdollisiin poikkeamiin säätötilanteessa. (Piirikohtainen toimintakuvaus.)

Suhdesäätöä käytetään koneen pulpperissa laimennusvesien määrän hallintaan, jolloin säädetään kahden muuttujan välistä suhdetta. Kaskadisäätö on erityisen tärkeä massan käsittelyssä mutta edellyttää toimiakseen asetusarvon toisesta mittauksesta. (Piirikohtainen toimintakuvaus.)

Massan siirtyessä kuivauskoneelle sakeussäädin määrittää tornin pohjalaimennuksen asetusarvon. Jos tornista tulevan massan sakeus vaihtelee, kaskadisäätöpiiri mukauttaa pohjalaimennuksen vesimäärää tarpeen mukaan, jotta prosessi pysyy hallitussa tilassa. (Piirikohtainen toimintakuvaus.)

3 SAKEUSSÄÄTIMET MCA JA LAPA

Sakeuslähettimet ovat keskeisiä mittauslaitteita prosessiteollisuudessa, erityisesti massa- ja paperiteollisuudessa, joissa massan sakeuden tarkka hallinta on olennainen osa prosessin vakautta ja lopputuotteen laatua. MCA-sakeuslähetin hyödyntää mikroaaltoihin perustuvaa mittaustekniikkaa, jossa mikroaaltosignaalin läpäisykyky ja heijastuminen massassa riippuvat sen sakeudesta. LAPA-lähetin puolestaan perustuu mekaaniseen mittausmenetelmään, jossa roottori tai laparakenteinen mittauselementti altistuu massan aiheuttamalle leikkausvoimalle. Tämä voima muuttuu mittasignaalksi, joka on verrannollinen massan sakeuteen. (Valmet mikroaaltokonsistenssin mittaus.)

3.1 MCA-lähetin ja sen toimintaperiaate

MCA on mikroaaltotekniikkaan perustuva laitteisto, joka mittaa massan sakeutta erityisesti sellu- ja paperiteollisuudessa. Tämä järjestelmä hyödyntää, mikroaaltanalyysia, mikä parantaa mittausten tarkkuutta ja herkkyyttä merkittävästi. (Valmet mikroaaltokonsistenssin mittaus.)

MCA mittaa massan sakeutta mikroalloilla, jotka ovat riippumattomia massan ominaisuuksista, kuten kuidun pituudesta, puulajista tai sekoituksesta. (Valmet mikroaaltokonsistenssin mittaus.)

MCA anturityypit ovat niin sanotut Twin blade ja Flow through. Antureille ei ole olemassa vakiintuneita termiä suomeksi, mutta edellistä voisi kutsua kaksoisteräanturiksi jälkimmäistä puolestaan läpivirtausanturiksi. kuvassa 1 on kaksoisterän muotoinen upotettava anturi, joka soveltuu suurelle putkikoolle ja korkean sähkönjohtavuuden kohteisiin. Läpivirtaus -anturi kuvassa 2 on MCA-versioiden kanssa yhteensopiva anturi, ja se korvaa tietyn putkiosan ja tarjoaa suoran integroinnin prosessiin. (Valmet mikroaaltokonsistenssin mittaus.)



KUVA 1. Twin blade -anturi (Valmet mikroaaltokonsistenssin mittaus.)



KUVA 2. Flow through -anturi (Valmet mikroaaltokonsistenssin mittaus.)

3.2 LAPA-lähetin ja sen toimintaperiaate

LAPA sakeusmittausanturi 3: kuvassa on järjestelmä, joka perustuu leikkausvoimaan pohjautuvaan mittausperiaatteeseen. Mittalaitteen tuntoelin havaitsee massan sakeuden ja virtauksen leikkausvoimaa tunnustelemalla. Teknologia tarjoaa tarkan, luotettavan ja taloudellisen ratkaisun prosessien sakeuden hallintaan. (Laittevalmistajat ja -toimittajat.)

Mittausperiaate perustuu leikkausvoiman ja massan sakeuden väliseen suhteeseen. Mittauksessa laitteen tuntoelin lapa sijoitetaan prosessiputkeen, jossa se leikkaa liikkuvaa kuituverkosta. Tämän koh-

taama leikkausvoima on verrannollinen massan sakeuteen ja virtausnopeuteen. Leikkausvoiman ja sakeuden välinen suhde noudattaa massatyypistä riippuvaa, tyypillisesti eksponentiaalista käyrää. (Laittevalmistajat ja -toimittajat.)

Magneettivastusasentoon perustuva mittausteknologia mahdollistaa leikkausvoiman havaitsemisen ilman fyysistä kontaktia mittauselementtien välillä. Magneettiliuska asennetaan vaimennussylinteriin, joka on kiinteästi yhteydessä lapaan. Leikkausvoiman aiheuttama lapan liike mitataan tarkasti anturin avulla, minkä ansiosta mittaus on herkkä ja tarkka. (Valmet sakeusmittaukset.)



KUVA 3 LAPA sakeusmittaus -anturi.

4 SÄÄTÖTEORIA TEOLLISUUDESSA

PID-säädin on yksi yleisimmistä prosessiteollisuuden säätöalgoritmeista. Se koostuu kolmesta säätökomponentista, jotka yhdessä mahdollistavat tarkan ja vakaan ohjauksen. Suhde eli P-komponentti reagoi välittömästi säätövirheen suuruuteen ja nopeuttaa järjestelmän vasteaikaa, mutta ei yksistään kykene poistamaan pysyvää säätövirhettä. Integraali-komponentti kumuloi säätövirhettä ajan suhteen ja pyrkii poistamaan pysyvän virheen, mutta voi lisätä järjestelmän heilahtelua. Derivaatta-komponentti ennakoii virheen muutoksia ja vaimentaa yliohjausta, parantaen siten järjestelmän vakautta. (Harju & Marttinen 2000, 9–11.)

PID-säätimen parametrit voidaan määrittää joko kokeellisesti tai matemaattisten menetelmien avulla. Yksi tunnetuimmista ja laajasti käytetyistä viritysmenetelmistä on Ziegler-Nicholsin virityssääntö, joka perustuu järjestelmän askelvasteeseen tai kriittiseen värähtelyyn.

Oikein säädettynä PID-säädin mahdollistaa prosessin hallinnan siten, että saavutetaan hyvä tasapaino nopeuden, tarkkuuden ja vakauden välillä. (Harju & Marttinen 2000, 9–11.)

4.1 Säätöpiiri

Säätöpiiri on järjestelmä, jossa pyritään hallitsemaan tietyn prosessin toimintaa säätimen avulla, perustuen mittaustietoon prosessin tilasta. Säätötekniikan ydin on takaisinkytkennässä. Takaisinkytkentä tarkoittaa sitä, että prosessin mittaustuloksia hyödynnetään jatkuvasti ohjauksen tarkentamiseksi. Tavoitteena on minimoida häiriöiden vaikutus ja pitää prosessin säädettävä suure mahdollisimman lähellä haluttua arvoa eli asetusarvoa.

Säätöpiirin suunnittelussa ja toiminnassa tulee huomioida, että kaikkien osien – kuten säätimen, toimilaitteen ja mittalaitteiden – on toimittava luotettavasti. Pelkkä säätöpiirin viritys ei korjaa esimerkiksi laitevikoja tai väärin suunniteltua prosessia. Ennen viritystä on tärkeää varmistaa, että järjestelmä toimii oikein, ja vasta sen jälkeen on mielekästä määrittää säätimen parametrit sopiviksi. (Harju & Marttinen 2000, 9–13.)

Teollisuudessa käytetään usein PID-säätimiä niiden yksinkertaisuuden ja tehokkuuden vuoksi. Vaikka säätötekniikka on kehittynyt vuosien varrella, PID-säädin on säilyttänyt suosionsa, sillä sen avulla voidaan hallita laajaa joukkoa prosesseja. Nykyään säätimissä hyödynnetään usein automaattisia viritystyökaluja, jotka perustuvat matemaattisiin malleihin tai prosessin vasteiden analyysiin. (Harju & Marttinen 2000, 9–13.)

Säätöpiirien käyttöön liittyy myös haasteita, kuten epästabiili käyttäytyminen. Tämä voi tapahtua, jos säätimen toiminta vahvistaa häiriöitä, johtuen mahdollisesti lopulta prosessin hallinnan menettämiseen. Tällaisen riskin vuoksi säätöpiirin suunnittelussa ja virityksessä on oltava tarkkana. (Harju & Marttinen 2000, 9–13.)

4.2 Säätöpiirin toiminta ja toimilaitteiden rooli prosessissäädössä

Toimilaite, on laite tämä vaikuttaa suoraan prosessin muuttujien, kuten lämpötilan, pinnan, pyörimisnopeuden, pitoisuuden, paineen tai jännitteen, arvoihin. Toimilaite vaikuttaa usein samanaikaisesti useaan muuttujaan. (Harju & Marttinen 2000, 13–14.)

Prosessin säädettävää suuretta mitataan anturilla. Mittausviesti siirretään anturilta säätimelle, tyypillisesti analogisena 4–20 mA signaalina tai digitaaliviestinä kenttäväylän kautta.

Säädin vertaa mitattua suuretta haluttuun arvoon eli asetusrvoon. Näiden kahden arvon erosuuretta käytetään muodostamaan ohjaussignaali toimilaitteelle, joka pyrkii muuttamaan prosessia niin, että ero pienenee. (Harju & Marttinen 2000, 13–14.)

Takaisinkytkentää käytetään säätöpiirissä, jossa säädin hyödyntää mittaustietoa prosessin käyttäytymisestä. Takaisinkytkennän avulla pyritään poistamaan häiriöiden, kuten mittauskohinan tai kuormitushäiriöiden vaikutuksia. Kun takaisinkytkentä on käytössä, piiri on suljettu, eli säätö tapahtuu automaattisesti. Jos takaisinkytkentä ei ole käytössä ja säädin toimii manuaalisesti, piiri on avoin. Takaisinkytkennän ansiosta säätöpiiri pystyy kompensoimaan prosessissa esiintyviä häiriöitä ja ylläpitämään vakaata toimintaa. Kuitenkin yksi merkittävä haaste on epästabiili käyttäytyminen, jossa piiri voi alkaa värähdellä hallitsemattomasti. Tällöin säätö ei enää toimi oikein, ja järjestelmä voi ajautua epästabiiliin tilaan. (Harju & Marttinen 2000, 13–14.)

Säätöpiirin toiminta kuvataan usein lohkokaaviolla, jossa tarkastellaan signaalien kulkua järjestelmässä. Lohkokaaviossa tulosignaali saapuu järjestelmään, ja lähdön kautta syntyy toimilaitteelle ohjaussignaali. Näin säätimen ja muiden komponenttien välinen vuorovaikutus voidaan esittää yksinkertaisessa muodossa. (Harju & Marttinen 2000, 13–14.)

4.3 Säätöpiirissä esiintyvät häiriöt

Säätöpiirin toimintaa vaikuttavat monet erilaiset häiriöt, jotka voivat heikentää säätöjärjestelmän suorituskykyä. Mittauskohina on satunnaista vaihtelua, joka voi johtua sähköisistä häiriöistä mittaussuhteissa ja ympäristöolosuhteissa. Kuormitushäiriöt ovat yleensä askelmaisia tai jaksollisia. Kuormitushäiriöt voivat johtua virtauksen tai paineen nopeasta muutoksesta prosessissa. Pinnankorkeudessa häiriöt voivat näkyä aaltoiluina, kun taas putkistovirtauksissa ne voivat ilmetä turbulenssina. Ristikkäisvaikutukset syntyvät, kun yhden säätöpiirin toiminta vaikuttaa toiseen. Mitä nopeammaksi Säätöpiiri on viritetty eli mitä suurempi sen vahvistus on, sitä merkittävämmäksi ristikkäisvaikutukset voivat kasvaa. (Harju & Marttinen 2000, 19–20.)

Lohkokaavioissa häiriöt kuvataan yleensä prosessin jälkeen, mutta joissakin tapauksissa ne voidaan kuvata myös ennen prosessia, kuten säätimen lähtöön. Tämä esitystapa on yleinen simuloinneissa, erityisesti silloin, kun häiriön tarkkaa dynamiikkaa ei tunneta. Tällöin oletetaan, että häiriön vaikutus säätävään suureeseen muistuttaa ohjaussuureen vaikutusta. Pinnankorkeuden tapauksessa tulovirtauksen muutoksen häiriön vaikutus pinnankorkeuteen voi olla samankaltainen kuin lähtövirtauksen muuttamisen vaikutus. (Harju & Marttinen 2000, 19–20.)

Säätöpiirissä havaittava värähtely voi johtua itse säätöpiiristä tai ulkopuolisesta häiriölähteestä. Värähtelyn syyn selvittämiseksi säädin asetetaan käsiohjaukselle. Jos värähtely jatkuu käsiohjauksella, on sen syynä ulkoinen häiriö, kuten toinen säätöpiiri tai laitteistovika. Tällöin voi olla tarpeen virittää toinen piiri tai tehdä prosessiin muutoksia. Jos värähtely puolestaan loppuu käsiohjauksella, ongelma liittyy tarkasteltavaan säätöpiiriin. Syynä voi olla toimilaittevika tai huono viritys. (Harju & Marttinen 2000, 19–20.)

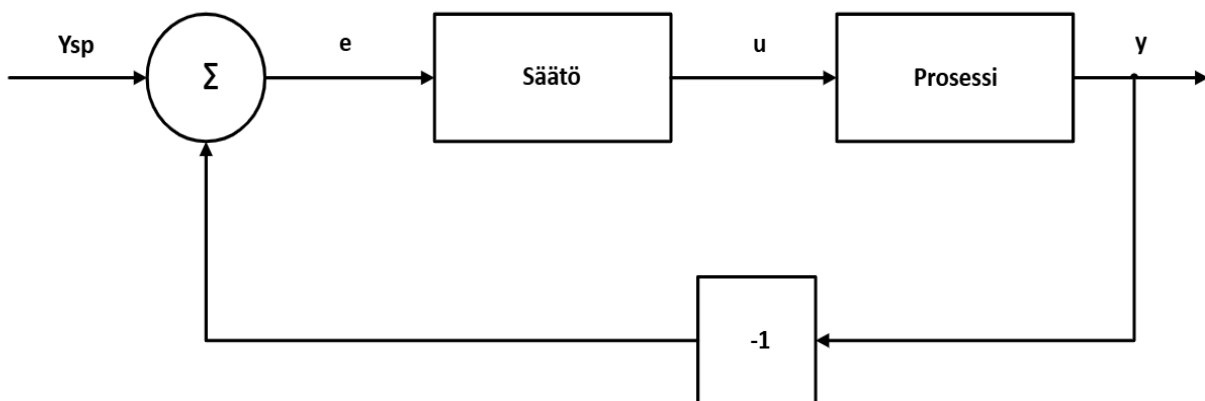
Toimilaittehuollolla voidaan parantaa säätöpiirin toimintaa, erityisesti jos laite on ollut huonokuntoinen. Toimilaitteinvestoinnin hyödyt korostuvat, kun sen yhteydessä tarkistetaan myös säätimen viritys. Pelkkä huolto voi parantaa säätöä tilapäisesti. Pitkäaikainen hyöty saavutetaan varmemmin säätimen virituksen ja toimilaitteen optimoinnin yhdistelmällä. (Harju & Marttinen 2000, 19–20.)

4.4 Takaisinkytkentä

Takaisinkytkentä on yksinkertainen, mutta tehokas periaate, joka on vaikuttanut merkittävästi prosessiteknologian kehitykseen. Sen soveltaminen on johtanut merkittäviin edistysaskeliin esimerkiksi säätötekniikassa, viestinnässä ja mittausjärjestelmissä. Takaisinkytkennän perusajatus on, että säädettävää suureta verrataan haluttuun asetusarvoon ja tämän eron perusteella säädetään ohjattavaa muuttujaa.

Negatiivinen takaisinkytkentä tarkoittaa sitä, että ohjattua muuttujaa kasvatetaan, kun prosessimuuttuja on pienempi kuin asetusarvo, ja vastaavasti pienennetään, kun prosessimuuttuja ylittää asetusarvon. Tämä varmistaa, että järjestelmä pyrkii automaattisesti kohti haluttua toimintatilaa. Negatiivinen takaisinkytkentä on esitetty lohkokaaviona kuviossa 1, jossa prosessi ja säädin muodostavat suljetun säätösilmukan. Kaaviossa oleva merkintä osoittaa myös signaalien yhteenlaskun ja suunnan, mikä vahvistaa takaisinkytkennän negatiivisen luonteen.

Takaisinkytkentäjärjestelmät ovat kiinnostavia, koska ne mahdollistavat prosessimuuttujan pysymisen lähellä asetusarvoa myös häiriöiden ja prosessin ominaisuuksien muutosten vaikutuksesta. Eräs yksinkertainen takaisinkytkennän muoto on päälle-pois-säätö, jossa ohjausmuuttuja saa suurimman arvonsa positiivisella säätövirheellä ja pienimmän arvonsa negatiivisella säätövirheellä. Vaikka tämä säätötapa voi pitää prosessimuuttujan lähellä asetusarvoa, se johtaa usein oskilloivaan eli värähtelevään käyttäytymiseen, koska järjestelmä reagoi viiveellä muutoksiin. Tämän vuoksi päälle-pois-säätöä voidaan parantaa esimerkiksi lisäämällä hystereesiä tai kuollutta aluetta, jotta vältetään jatkuva vaihtelu ohjausmuuttujassa. (Åström & Tore 1995, 60–70.)



KUVIO 1. Lohkokaavio prosessista, jossa on palauteohjain (mukaillen Åström & Tore, 1995, 60.)

4.5 Myötäkytkentä

Myötäkytkentä (*feedforward*) on säätötekniikan menetelmä, jonka tavoitteena on eliminoida häiriöiden vaikutukset ennen kuin ne ehtivät aiheuttaa ohjausvirheitä järjestelmässä. Toisin kuin takaisinkytkentä (*feedback*), joka reagoi jo syntyneisiin virheisiin, myötäkytkentä perustuu häiriöiden ennakoivaan tunnistamiseen ja kompensointiin jo ennen niiden vaikutusta prosessiin. Tämä edellyttää sekä mittauksia, joiden avulla häiriöt voidaan havaita etukäteen, että tarkkaa matemaattista mallia prosessista.

Myötäkytkentää voidaan soveltaa sekä lineaarisiin että epälineaarisiin järjestelmiin. Molemmissa tapauksissa myötäkytkentä edellyttää prosessidynamiikan tuntemista. Käytännössä myötäkytkennän suorituskyky riippuu kuitenkin olennaisesti mallin tarkkuudesta. Esimerkiksi 20 %:n mallivirhe tarkoittaa, että maksimissaan 80 % häiriöstä voidaan kompensoida, mikä heijastuu suoraan ohjausvirheisiin. Tästä syystä myötäkytkentä on yleensä herkempi mallin epävarmuuksille kuin takaisinkytkentä.

Takaisinkytkennän ja myötäkytkennän yhdistäminen mahdollistaa optimaalisen säätöratkaisun, sillä menetelmät täydentävät toisiaan. Takaisinkytkentä soveltuu erityisesti alhaisen taajuuden häiriöiden kompensointiin ja on vähemmän herkkä mallivirheille, mutta se voi aikaansaada järjestelmään epästabiiliutta. (Åström & Tore 1995, 281–283.)

4.6 Kaskadikytkentä

Kaskadisäätö on säätöstrategia, jossa useat mittaussignaalit vaikuttavat yhteen ohjausmuuttujaan. Se on erityisen hyödyllinen järjestelmissä, joissa esiintyy merkittäviä dynaamisia haasteita, kuten pitkiä viiveitä tai suuria aikavakioita, jotka voivat vaikeuttaa tarkkaa säädettävyyttä. Kaskadisäätö perustuu hierarkkiseen säätörakenteeseen, jossa ulompi ensisijainen säätöpiiri ohjaa pääprosessin muuttujaa, sisemmän toissijaisen piirin puolestaan reagoidessa nopeammin häiriöihin ja ohjaussignaaleihin.

Kaskadisäädön keskeinen etu on sen kyky parantaa järjestelmän suorituskykyä hyödyntämällä välittömästi reagoivaa mittaussignaalia, joka auttaa pitämään säädön tarkempana ja vakaampana. Sisempi säätöpiiri säätelee nopeasti muuttuvaa prosessiarvoa, mikä vähentää ensisijaisen säätöpiirin vaihtelua parantaen sen suorituskykyä.

Monimutkaisemmissa järjestelmissä voidaan käyttää useampia sisäkkäisiä säätöpiirejä, mutta useiden mittaussignaalien tuoma hyöty alenee tietyn rajan jälkeen. Jos kaikki tilamuuttujat ovat jo mitattavissa,

lisäsäätöpiirien käyttö ei enää paranna suorituskykyä, vaan tällöin kaskadisäätö vastaa niin sanottua tilapalautesäätöä. Kaskadisäädön hyödyt voidaan havainnollistaa vertaamalla järjestelmän vasteita kuormitushäiriöihin. Verrattuna perinteiseen yksisilmukkaiseen säätöön, kaskadisäätö voi merkittävästi vähentää häiriöiden vaikutuksia ja parantaa säädön tarkkuutta. (Åström & Tore 1995, 274–275.)

4.7 Suhdesäätö

Suhdesäätö on säätömenetelmä, jossa pyritään ylläpitämään kahden tai useamman prosessimuuttujan välinen ennalta määritelty suhde. Tätä säätötapaa sovelletaan erityisesti annostelu- ja sekoitusprosesseissa, joissa eri ainevirtausten suhteet vaikuttavat suoraan lopputuotteen laatuun ja prosessin tehokkuuteen. Säätötavan peruseriaatteena on, että yksi prosessisuure toimii ohjaavana muuttujana ja siihen, että muut suureet säädetään sen mukaisesti säilyttäen niiden keskinäinen suhde vakiona tai dynaamisesti säädettävänä. Suhdesäätö voi toimia joko itsenäisenä säätöratkaisuna tai olla osana kaskadikykentää, jolloin se toimii apusäätimenä pääsädölle. Viritykseltään suhdesäädin ei poikkea merkittävästi muista säätötyypeistä, mutta mikäli se on osa kaskadikykentää, on sen viritys suoritettava kaskadisäätöjen periaatteiden mukaisesti. (Harju & Marttinen 2000, 39.)

Erityisen keskeinen sovellus suhdesäädölle löytyy sellu- ja paperiteollisuudesta, jossa esimerkiksi lajitTIMEN eri massavirrat säädetään oikeassa suhteessa päävirtaukseen nähden. Lajittimessa päävirtauksesta erotellaan niin sanottu aksepti ja rejekti, joista rejektivirtaus seuraa päävirtausta tietyllä suhdelluvulla, jota pidetään suhdesäätimen asetusarvona. Tämä mahdollistaa tasalaatuisen lopputuotteen ja vähentää prosessihäiriöitä. Toinen esimerkki sellu- ja paperiteollisuudesta on konesäiliön ja sekoitussäiliön välinen suhdesäätö, jossa eri massakomponentit, kuten sellu, painehioke, TMP ja hylkymassat, annostellaan sekoitussäiliöön tarkasti määritellyssä suhteessa. Suhdesäädön avulla voidaan varmistaa, että paperilajin valmistuksessa käytettävien massavirtausten suhteet pysyvät oikeina. Suhdesäätö voidaan toteuttaa pelkästään virtausmittausten perusteella tai täydentämällä sitä sakeusmittauksilla, jolloin saadaan tarkempaa tietoa todellisista massamääristä. Suhdesäädön sovellusalue ei rajoitu ainoastaan paperiteollisuuteen. Sitä käytetään myös voimalaitosprosesseissa, kuten polttoaineen ja ilman syöttöjen hallinnassa. (Harju & Marttinen 2000, 57.)

Monissa prosessisovelluksissa suhdessäätö on integroitu osaksi kaskadikytkentää, jossa se toimii apusäätimenä pääsäätimelle. Sekoitussäiliön pinnansäätö voi toimia pääsäätimenä, joka antaa asetusravon kokonaistulovirtaukselle. Tällöin yksittäiset massavirrat säädetään suhdessäätimillä siten, että niiden keskinäiset suhteet säilyvät vakioina. Suhdessaätimien viritys on tässä tapauksessa suoritettava siten, että ne reagoivat yhtä nopeasti, jotta massan koostumus säilyy tasalaatuisena prosessin aikana. Suhdessaätö voi myös olla dynaaminen, eli suhdeluku ei ole kiinteä, vaan se voi muuttua esimerkiksi ajettavan tuotantolajin mukaan tai erillisten mittausten perusteella. Tämä mahdollistaa entistä joustavamman ja tarkemman prosessinohjauksen, mikä on erityisen tärkeää muuttuvissa prosessiolosuhteissa. (Harju & Marttinen, 2000, 57.)

4.8 PID-säätö

PID-säädin on yksi laajimmin käytetyistä säätömenetelmistä teollisuudessa. Valtaosa teollisuudessa käytössä olevista säätimistä perustuu edelleen PID-säätöön tai sen muunnelmiin. PID-säätimen suosio johtuu sen soveltuvuudesta monenlaisiin säätöjärjestelmiin, erityisesti silloin, kun prosessin matemaattisella kuvattavissa olevaa mallia ei tunneta. Kun analyttistä mallia ei ole, analyttisiä suunnittelumenetelmiä ei voida käyttää.

PID-säätimen viritys tehdään yleensä suoraan käyttöpaikalla. Tästä syystä on kehitetty useita erilaisia virityssääntöjä, joiden avulla säädintä voidaan hienosäätää tarkasti. Nykyisin on saatavilla myös automaattisia viritysmenetelmiä, ja jotkut PID-säätimet voivat säätää itseään jatkuvasti käyttötilanteen mukaan. Lisäksi on kehitetty erilaisia PID-säätimen muunnelmia, kuten PI-D- ja I-PD-säätö, joita käytetään laajasti teollisuudessa.

Käytännön sovelluksissa PID-säädin ei aina tarjoa optimaalisinta säätöä, mutta se on usein riittävän hyvä useimpiin säätötehtäviin. Säätöjärjestelmissä esiintyy usein ristiriitaisia vaatimuksia, kuten häiriöiden vaimennus ja asetusravon seuranta, joita perinteisellä yhden vapausasteen säätörakenteella voi olla vaikea täyttää samanaikaisesti. Tällöin voidaan käyttää kahden vapausasteen PID-säätöä, joka mahdollistaa itsenäiset säädöt häiriöille ja asetusravon muutoksille (Ogata 2002, 681–682). Kahden vapausasteen PID-säätö eroaa yhden vapausasteen tapauksesta, siten että siinä voidaan erikseen säätää sekä häiriöiden että asetusravon muutosten vaikutusta järjestelmään. Tämä mahdollistaa tarkemman ja joustavamman säädön, koska säätimen reagointi häiriöihin ja asetusravon muutoksiin voidaan optimoida erikseen ilman, että ne vaikuttavat toisiinsa samalla tavalla kuin yhden vapausasteen PID-säätimessä. (Ogata 2002, 703–705.)

4.9 P-säätö

P-säädin toimii siten, että ohjaussignaalin arvo riippuu suoraan erosuureesta eli asetusravon ja mitatun arvon välisestä erotuksesta. Ohjaussignaali lasketaan kaavalla 1:

$$u(t) = K_p e(t) + u_0 \quad (1)$$

jossa $e(t)$ on erosuure, K_p on säätimen vahvistus ja u_0 on ohjaussignaalin erosuureesta riippumaton vakiotaso

Kun ohjaussignaalin perusarvo u_0 määritellään oikein, säätö toimii halutussa toimintapisteessä ilman merkittävää virhettä. Jos erosuure on nolla, säätimen lähtö on sama kuin u_0 . Tämä on usein nolla, mutta kyseinen suure voi olla myös nolosta poikkeava prosessin mukaan. P-säädin perustuu yksinkertaiseen kerto- ja yhteenlaskuun, kuten kaavasta (1) voidaan päätellä. P-säätimellä on taipumus jättää järjestelmään pysyvää asento-, nopeus- tai muuta virhettä. Vaikka säätimen vahvistusta kaavassa 1 kasvatetaan, virhe pienenee rajatta mutta ei koskaan häviä kokonaan. Säätimen vahvistuksella on yläraja, minkä ylittyessä liian suuri vahvistus voi tehdä järjestelmästä epävakaan. Jos erosuureessa tulee muutoksia ja säädettävä suure ei reagoi ohjaukseen, on yleensä takaisinkytkentä pois käytöstä tällaisessa ongelmassa. Tällöin prosessin hallinta on operaattorin käsikäytössä eli manuaalinen. Tällaisessa testitilanteessa säätimen ohjaustoimintaa voidaan tarkastella. P-säätimen lähtösignaali muuttuu erosuureen muuttuessa, mutta mittaussuure pysyy vakiona, jos erosuure ei enää muutu. Tämä tarkoittaa, että P-säätimellä ei voida poistaa täysin säätövirhettä. (Harju & Marttinen. 2000, 69–70.)

4.10 Integroiva säätö

PI-säätimessä yhdistetään P-säädön ja I-säädön ominaisuudet. Tämä mahdollistaa säätöpoikkeaman eli pysyvän virheen poistamisen, mikä on P-säädön yksi merkittävä rajoitus. PI-säätimen ohjaussignaali lasketaan kaavalla 2:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right) \quad (2)$$

jossa K_p on säätimen vahvistus ja T_i on integrointi-aika sekunneissa.

Integroiva osa lisää säätimen lähtösignaalin sitä osuutta, joka kasvaa ajan myötä niin kauan kuin säätöpoikkeama ei ole nolla. Integroiva osa toimii muistina, joka ottaa huomioon kaikki aiemmat erosuureen arvot ja niiden kestoajat. säätimen lähtösignaali muuttuu koko ajan, kunnes säätöpoikkeamaa ei ole. Erosuureen saavuttaa nollan, I-osa pitää ohjaustason, jolloin saavutetaan järjestelmän tasapaino ja estetään pysyvän virheen muodostumisen.

PI-säätimen säätöpoikkeamaan tullessa äkillinen muutos, kasvaa ohjaussignaali aluksi suoraviivaisesti, ja kasvunopeus riippuu säätimen vahvistuksesta K_p/T_i . Säätöpoikkeama pienenee ja lopulta saavuttaa nollan, jolloin säätimen ohjaus vakautuu pysyvälle tasolle. Jos säätöpoikkeama muuttuu negatiiviseksi, säätimen lähtö alkaa pienentyä. (Harju & Marttinen 2000, 72.)

4.11 Derivoiva säätö

Derivoiva säätö on olennainen osa PID-säätöä, ja sitä käytetään usein yhdessä Proportional ja integroivan säädön kanssa. Tavoitteena on ennakoida järjestelmän käyttäytymistä tarkastelemalla muutoksen nopeutta säätövirheessä tai prosessin mitatussa arvossa. Derivaatan avulla säätö reagoi herkästi muutoksiin ja pyrkii nopeuttamaan järjestelmän vasteaikaa (d/dt). PID-säätimessä ohjaussignaali lasketaan kaavalla 3:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

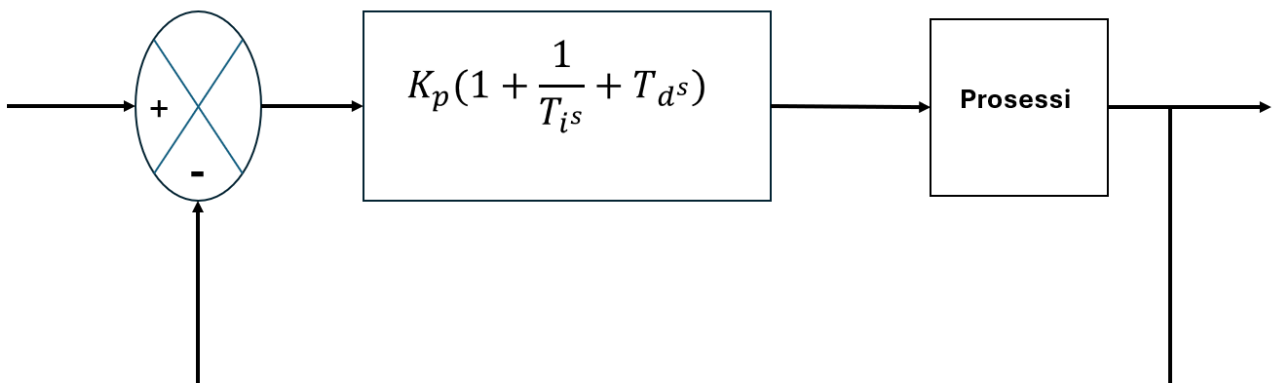
jossa kaava 3 on T_d derivointiaika on sekunneissa

Derivointiajan laskeminen voi olla haastavaa, sillä derivointiaika korostaa korkeataajuisia komponentteja, kuten mittaussignaalin kohinaa. Tämän haittavaikutuksen lieventämiseksi käytetään usein alipäästösuodatusta, jossa suodatuksen aikavakio määritellään suhteessa derivointiaikaan. Tämä vähentää derivoinnin herkkyyttä kohinalle ja pidentää ohjauksen vaikutusaikaa. Derivoivan osan käyttöä tulee harvita erityisesti prosesseissa, joissa on merkittäviä viiveitä, sillä viiveet voivat aiheuttaa järjestelmän epästabiilisuutta. Kohinansietokyky ja prosessidynamiikka määrittävät, kuinka suurta derivointiaikaa voidaan käyttää turvallisesti. Prosessiteollisuudessa sen käyttö on harvinaisempaa mittaussignaalien kohinan vuoksi. (Harju & Marttinen 2000, 71–73.)

4.12 PID-säädön viritys

PID-säätimen viritysprosessi keskittyy säätimen parametrien (K_p , T_i ja T_d) optimointiin siten, että suljetun säätöpiirin dynaaminen suorituskyky vastaa haluttuja spesifikaatioita, kuten asettumisaikaa, ylivetovaiheen amplitudia ja järjestelmän vakautta.

Mikäli prosessin matemaattinen malli on käytettävissä, voidaan soveltaa analyttisiä suunnittelumenetelmiä, jotka mahdollistavat säätimen parametrien laskennallisen optimoinnin kuviossa 2. Käytännössä monien prosessien dynaaminen käyttäytyminen on kuitenkin niin monimutkaista, ettei tarkkaa matemaattista mallia voida helposti määrittää. Tällaisissa tapauksissa PID-säätimen viritys suoritetaan kokeellisesti mittausten ja järjestelmän vasteen analyysin perusteella. (Ogata 2002, 682.)



KUVIO 2. PID-säätimen käyttö prosessissa (mukaillen Ogata 2002, 682)

Yksi laajimmin käytetyistä kokeellisista viritysmenetelmistä on Ziegler-Nicholsin virityssääntö, joka tarjoaa systemaattisen lähestymistavan PID-parametrien määrittämiseen. Menetelmä jakautuu kahteen pääasialliseen tapaan eli askelsyöteanalyysiin ja kriittisen vahvistuksen menetelmään. Askelsyöteanalyysiin perustuvassa lähestymistavassa prosessiin syötetään askelmainen muutos (Taulukko 1), ja vasteen karakteristiset muuttujat, kuten viiveaika ja aikavakio, analysoidaan kaavan 4 perusteella. Näiden perusteella määritetään säätimen parametrit, jotka mahdollistavat järjestelmän tehokkaan hallinnan. (Ogata 2002, 682.)

Askelsyöteanalyysiin perustuva menetelmä, tässä lähestymistavassa prosessiin syötetään askelmainen muutos kuvio 3 ja vasteen karakteristiset muuttujat, kuten viiveaika ja aikavakio, analysoidaan taulukon 1 perusteella. Näiden perusteella määritetään säätimen parametrit, jotka mahdollistavat järjestelmän tehokkaan hallinnan kuvion 4 mukaan.

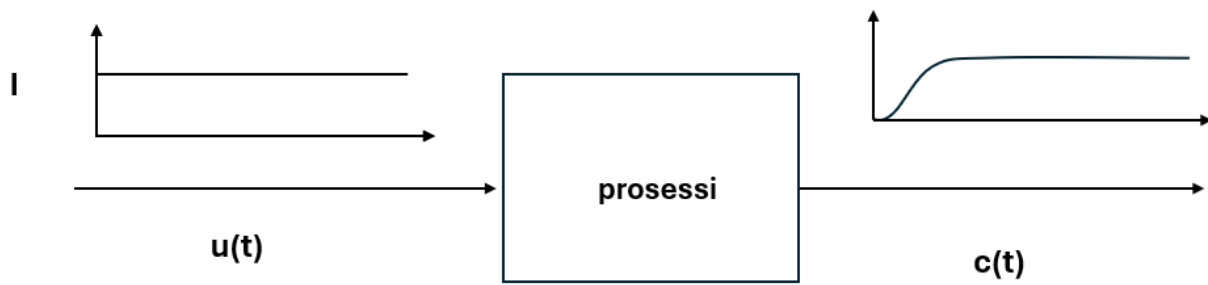
TAULUKKO 1. Ziegler-Nicholsin vityyssääntö prosessin askelvasteen perusteella (ensimmäinen menetelmä) (mukaillen Ogata 2002, 684)

Ohjaus tapa	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2\frac{T}{L}$	2 L	0,5 L

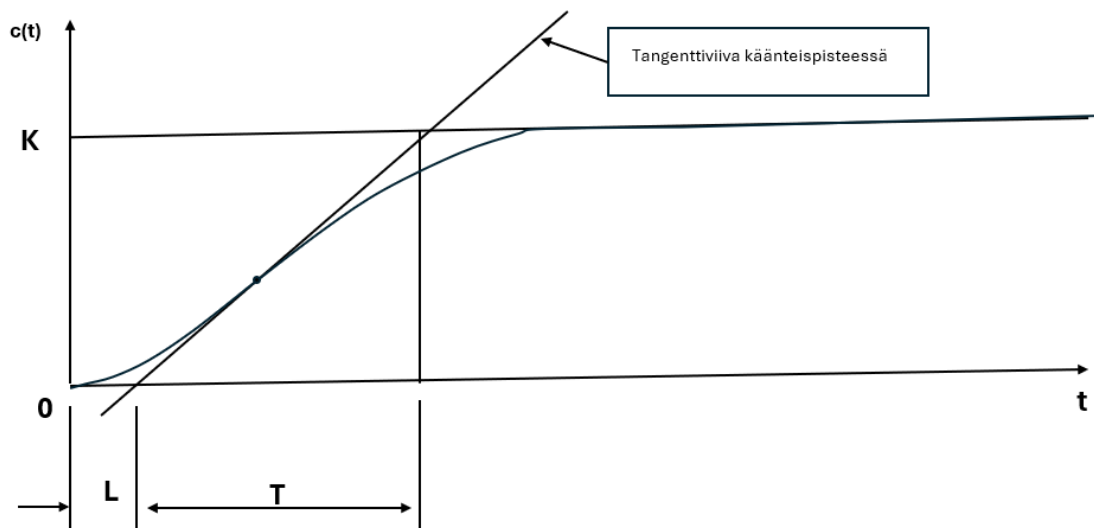
PID-säätimen parametrit voidaan määrittää Ziegler-Nicholsin ensimmäisen menetelmän mukaisesti taulukosta 1.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} T_d s \right) = 1,2T \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0,5Ls \right) = \frac{(1 + \frac{1}{L})^2}{s}, \quad (4)$$

jossa yllä olevat K_p , T_i ja T_d sijoitetaan tähän kaavaan 4, saadaan PID-säätimen siirtofunktion askelvastemenetelmälle.

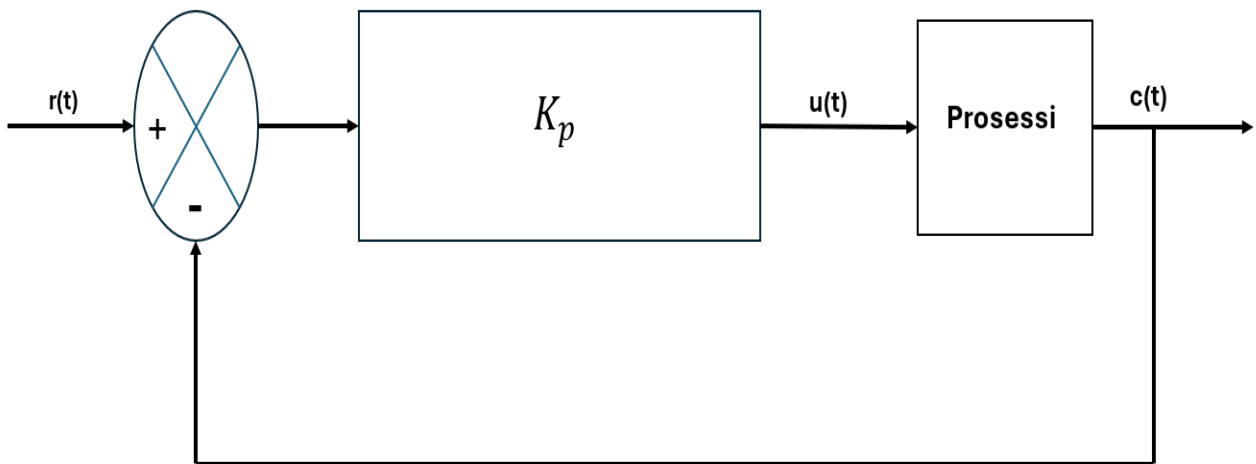


KUVIO 3. Prosessin yksikköaskelvaste (mukaillen Ogata 2002, 683)

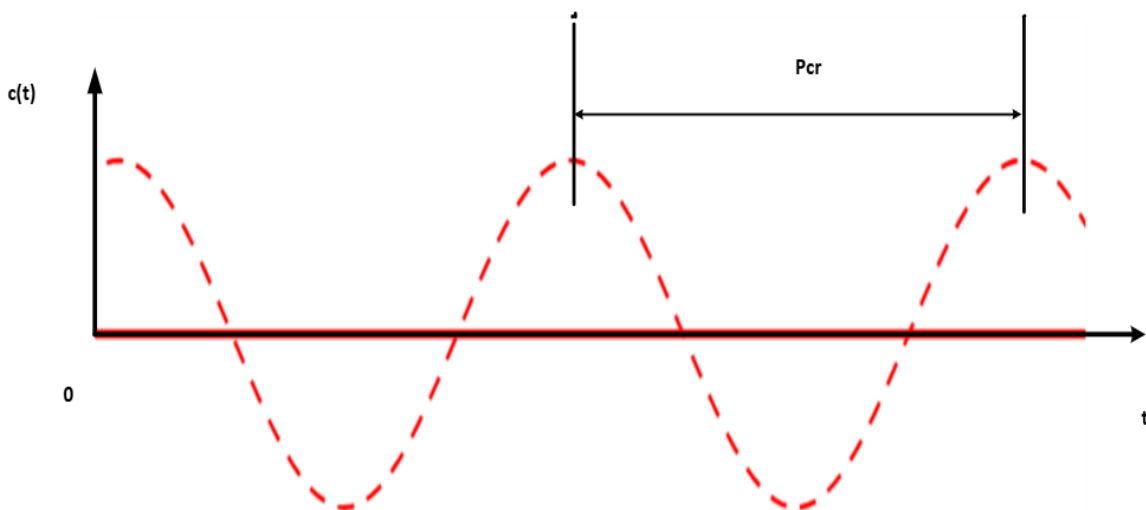


KUVIO 4. S-käyräinen vaste (mukaillen Ogata 2002, 683)

Kriittisen vahvistuksen menetelmä on yksi Ziegler-Nicholsin virityssäännön sovelluksista. Se perustuu järjestelmän kriittisen vahvistuksen (K_{cr}) ja värähtelyjakson (P_{cr}) määrittämiseen kuviot 5 ja 6. Ensimmäisessä vaiheessa järjestelmä säädetään pelkällä P-säädöllä, ja vahvistusta kasvatetaan, kunnes järjestelmä saavuttaa marginaalisen vakauden. Tämän kriittisen pisteen perusteella voidaan laskea PID-säätimen parametrit taulukon 2 avulla. (Ogata 2002, 684–685.)



KUVIO 5. Suljetun piirin järjestelmä, jossa on vahvistus ohjaus (mukaiillen Ogata 2002, 684)



KUVIO 6. Jatkuva heilahtelu ajan kanssa P_{cr} (mukaiillen Ogata 2002, 685)

TAULUKKO 2. Ziegler-Nicholsin vityssääntö kriittisen vahvistuksen K_{cr} ja kriittisen jakson P_{cr} perusteella (toinen menetelmä) (mukaiillen Ogata 2002, 685)

Ohjaus tapa	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

PID-säätimen parametrit on laskettu kaavalla 4 Ziegler-Nicholsin toisen menetelmän mukaisesti taulukosta 2.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 0,6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0,5P_{cr}s} + 0,125P_{cr}s \right) = 0,075K_{cr}P_{cr} \frac{(s + \frac{4}{P_{cr}})^2}{s}$$

Jossa PID-säätimen parametrit K_p , T_i ja T_d on laskettu askelvasteen perusteella, ne sijoitetaan yllä olevaan siirtofunktioon, jolloin voidaan analysoida suljetun piirin dynamiikkaa yhdessä prosessin siirtofunktion kanssa.

Vaikka Ziegler-Nicholsin menetelmä on laajasti sovellettu, se ei aina takaa optimaalista suorituskykyä kaikissa järjestelmissä. Menetelmän soveltaminen voi johtaa järjestelmään, jossa esiintyy merkittävää yliveltoa eli tilanteita, joissa ohjattava suure ylittää halutun asetusarvon ennen asettumista tasapainotilaan tai värähtelyä, mikä voi olla epäsuotavaa tietyissä prosessisovelluksissa. Tämän vuoksi vityksen jälkeen voidaan tarvita hienosäätöä joko manuaalisesti tai hyödyntämällä kehittyneempiä optimointialgoritmeja. Modernit PID-säätimet sisältävät usein automaattisia vitystoimintoja, jotka hyödyntävät

edistyneitä optimointimenetelmiä, kuten heuristisia algoritmeja ja koneoppimispohjaisia säätöstrategioita. Näiden avulla voidaan saavuttaa tarkempi ja sovelluskohtaisesti optimoitu säätö, joka parantaa prosessin suorituskykyä ja energiatehokkuutta. (Ogata 2002, 683–685.)

5 SÄÄDÖN OPTIMOINTI

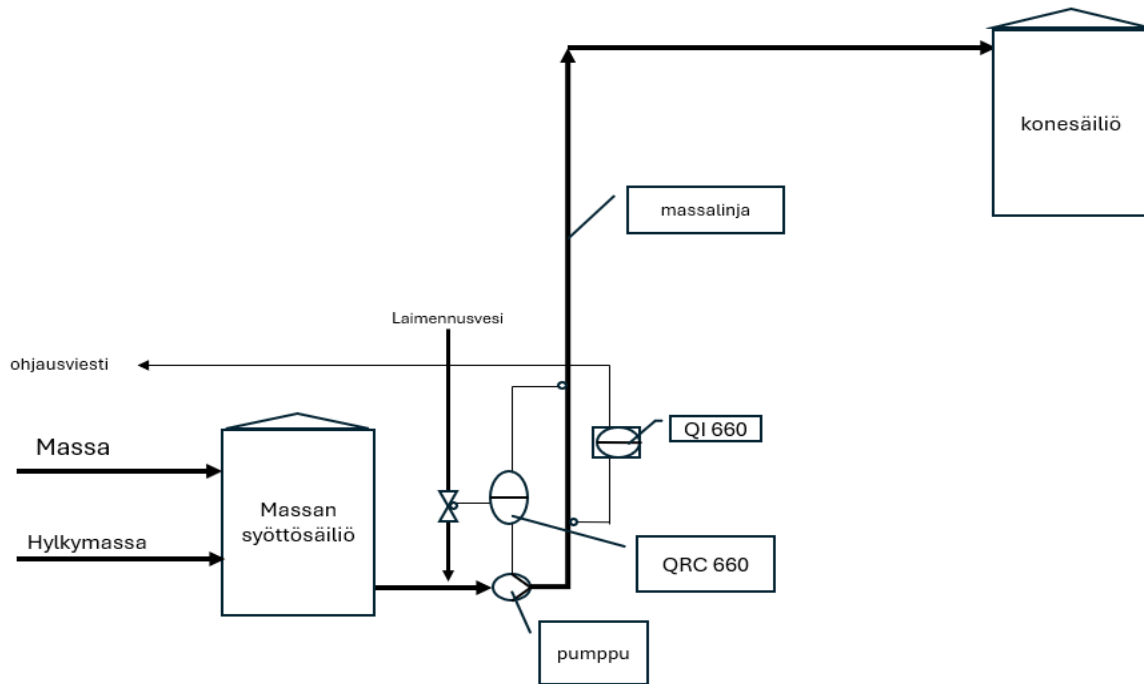
Opinnäytetyössä kehitetään kuivatuskoneen konesäiliöllä tapahtuvaa sakeussäätöä (KUVIO 6), erityisesti QIC-660-säätöpiirin osalta. Säätöjärjestelmän toiminnan tarkastelussa ja kehittämisessä hyödynnetään Valmet DNA -järjestelmää sekä laboratoriotuloksia, joiden avulla voidaan vertailla mittaustulosten tarkkuutta ja säätötoiminnan luotettavuutta.

Työ aloitettiin analysoimalla sakeussäätöön liittyviä mittauksia ja säätöpiirin toimintaa Valmet DNA:n sekä muiden prosessinhallintatyökalujen avulla. Tarkastelun keskeisenä tavoitteena on pienentää säätöpiirissä esiintyviä virhemarginaaleja ja varmistaa sakeuden tasainen hallinta tuotantoprosessin aikana. Erityisenä haasteena on hylkymassan pumppaus koneelle, jolloin MCA- ja LAPA-lähettimien mittaustulokset poikkeavat toisistaan. Tämä ero aiheuttaa säätöjärjestelmässä häiriöitä, jotka voivat vaikuttaa massan neliöpainoon ja heikentää lopputuotteen laatua.

Lisäksi työssä arvioidaan sakeuslähettimien sijaintia ja selvitetään, onko niiden nykyinen asennuspaikka optimaalinen mittaustarkkuuden ja säätötoiminnan kannalta. Mittauspisteiden sijoittelulla voi olla merkittävä vaikutus sakeusmittauksen luotettavuuteen ja sitä kautta koko säätöjärjestelmän toimintaan.

Kehitystyön tueksi suoritetaan vertailuja laboratoriotulosten ja järjestelmän mittaustietojen välillä, jotta voidaan tunnistaa mahdollisia poikkeamia ja säätötoiminnan kehityskohteita. Tulosten perusteella pyritään löytämään ratkaisuja, joilla sakeussäädön tarkkuutta ja prosessin vakautta voidaan parantaa.

Koska nykyisessä tilanteessa kummankaan lähettimen mittaustuloksiin ei voida täysin luottaa, opinnäytetyössä keskitytään erityisesti MCA-lähettimen mahdollisuuksiin. Tarkoituksena on selvittää, voitaisiinko MCA:n nollapisteen tai säätökäyrän optimoinnilla saavuttaa riittävä mittaustarkkuus, jotta se voitaisiin integroida osaksi säätöjärjestelmää luotettavana mittaustietona.



KUVIO 7 Sakeussäädin QIC-660 yksinkertaistettu piirikaavio

5.1 Sakeuslähettimien sijainti

Sakeuslähettimien asennuspaikat on valittu ja toteutettu asennusohjeiden mukaisesti, ja niiden sijainti on dokumentoitu (KUVA 4 ja 5). LAPA-lähetin on sijoitettu pystysuoraan putkiosuuteen, jossa on riittävästi suoraa putkea ennen ja jälkeen mittauspisteen (KUVA 6 ja 7). (Valmet mikroaaltokonsistenssin mittaust.)

Tämä varmistaa tasaisen virtausprofiilin ja minimoi mittaukseen vaikuttavat häiriöt, kuten pyörteilyn ja painevaihtelut. MCA-lähetin puolestaan on asennettu välittömästi pumpun jälkeen, mikä takaa riittävän paineen ja virtauksen mittauksen luotettavuuden kannalta. Tämä sijoittelu mahdollistaa sakeusmittauksen tarkkuuden optimoinnin ja varmistaa mittaussignaalin vakauden prosessin eri käyttötilanteissa. Linjastossa ei ole saatavilla parempia asennuspaikkoja, joissa mittaolosuhteet olisivat optimaalisemmat, joten lähetimet on sijoitettu optimaalisesti järjestelmän rakenteelliset rajoitukset huomioiden.



KUVA 4. MCA:n asennuspaikka.



KUVA 5. MCA:n asennuspaikka ja toimilaite.



KUVA 6. LAPA-lähetin asennuspaikassaan pystyputkessa.



KUVA 7. LAPA-sakeusmittarin asennuspaikka.

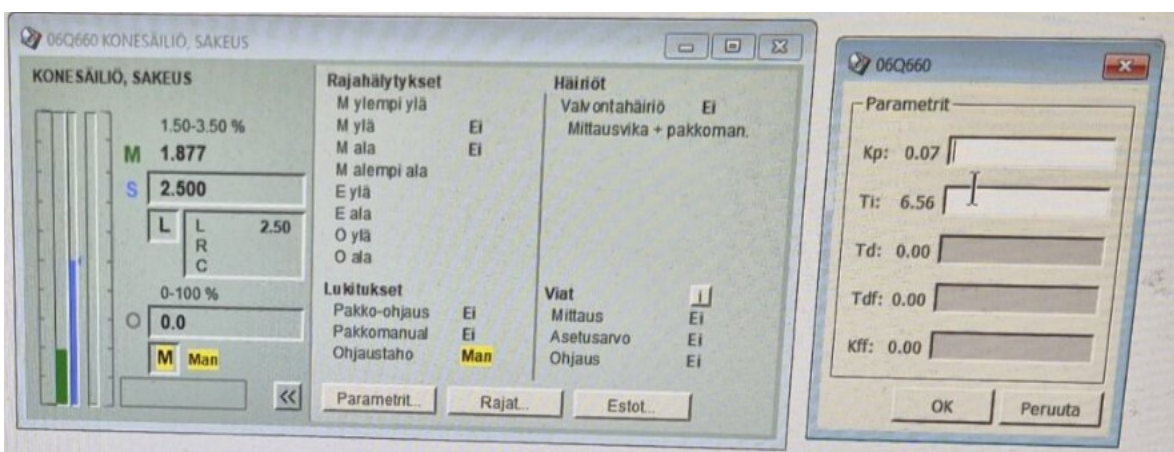
Kuvien 4–7 mukaiset asennuspaikat on valittu ja toteutettu täysin asennusohjeiden mukaisesti, eikä rakenteellisia parannuksia mittaolosuhteisiin ole mahdollista tehdä. LAPA-lähetin on asennettu linjaston parhaaseen mahdolliseen kohtaan, jossa mittaolosuhteet ovat vakaimmat, ja MCA-lähetin on sijoitettu optimaalisesti virtauksen ja paineen kannalta.

5.2 MCA:n säädön parantaminen

Tutkimuksessa havaittiin, että sakeussäätöpiirin häiriöt eivät johdu säätöparametrien (KUVA 8), kuten vahvistuksen tai integrointiajan, virheellisistä asetuksista (KUVA 9). Ongelman taustalla on mittauslaitteiden antamien sakeusarvojen epä johdonmukaisuus, erityisesti hylkymassan pumppauksen aikana. MCA- ja LAPA-lähettimien mittaustulokset eroavat toisistaan merkittävästi (KUVA 10), mikä vaikuttaa suoraan massan neliöpainon hallintaan ja aiheuttaa säätöjärjestelmän virheellisiä korjaustoimenpiteitä.

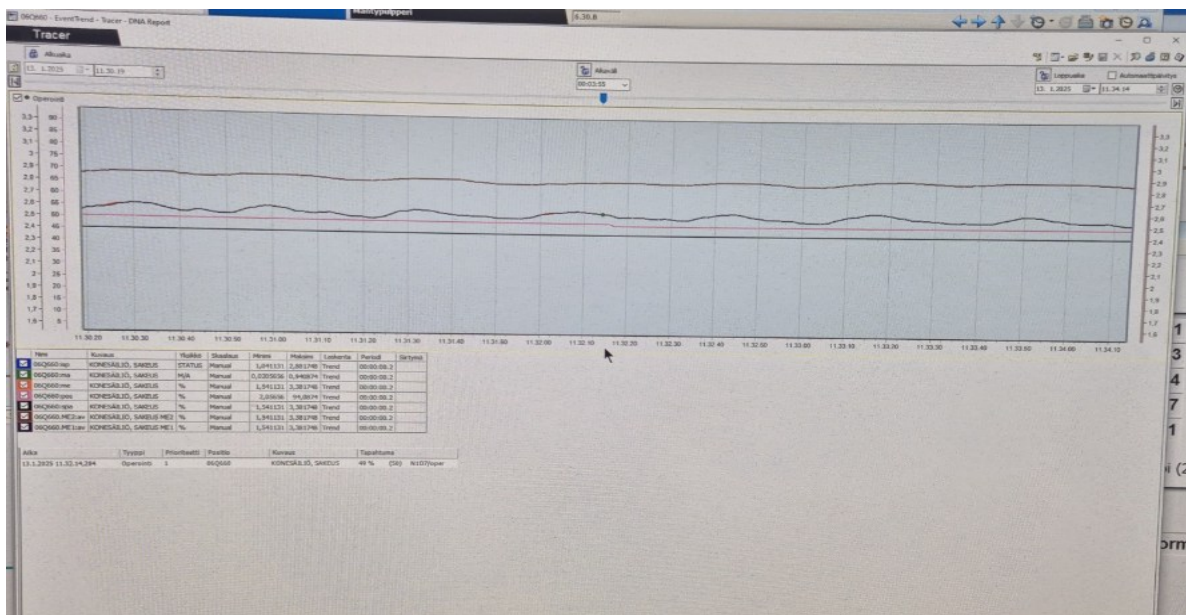
LAPA-lähetin antaa sakeudesta matalamman arvion mittausperiaatteensa vuoksi. MCA-lähetin puolestaan indikoi sakeuden olevan korkeampi kuin todellisuudessa on. Tämä ero johtaa tilanteeseen, jossa prosessinsäätö ei pysty varmistamaan luotettavaa sakeuden hallintaa, koska kummankaan lähettimen mittaustulos ei vastaa riittävän tarkasti prosessin todellista tilaa. Erityisesti hylkymassan kierrätyksen yhteydessä esiintyy tilanteita, joissa mittaustulokset poikkeavat toisistaan niin paljon, että säädön optimointi vaikeutuu. Kyseinen tilanne on esitetty kuvassa 18 josta voidaan trendin perusteella tulkita tilanne.

Mittapisteet on asennettu prosessiin valmistajan ohjeiden mukaisesti, ja niiden sijaintia voidaan näin ollen pitää optimaalisena. Tästä syystä ainoaksi mahdolliseksi ratkaisuksi jää joko MCA-lähettimen nollapisteen keinotekoinen säätäminen tai vaihtoehtoisesti uuden säätökäyrän luominen, joka kompensoi mittauseron. Näiden tekijöiden tarkempi analyysi on keskeistä sakeussäätöjen kehittämisessä ja prosessin luotettavuuden parantamisessa.

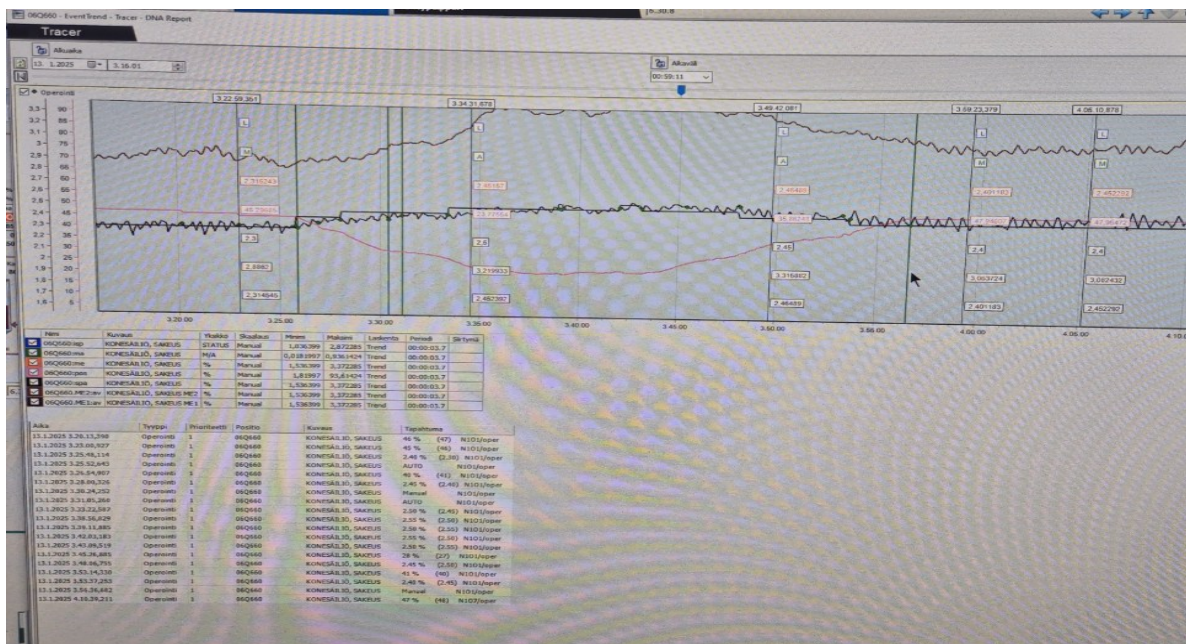


KUVA 8. Konesäiliön sakeussäätimestä ja säätimen parametrit.

Sakeussäädin toimi optimaalisesti vahvistuskertoimen K_p ollessa 0,07 ja integraaliajan T_i ollessa 6,56 sekuntia Vahvistuskertoimen määrittää säädön reagointinopeuden prosessin muutoksiin ja integrointiaika puolestaan vaikuttaa säätimen kykyyn korjata pysyviä virheitä. Näillä parametreilla säädin saavutti vaakaan toimintapisteen ilman merkittäviä heilahteluja tai viiveitä, mikä osoittaa säätöarvojen soveltuvuuden prosessin nykyisiin olosuhteisiin.



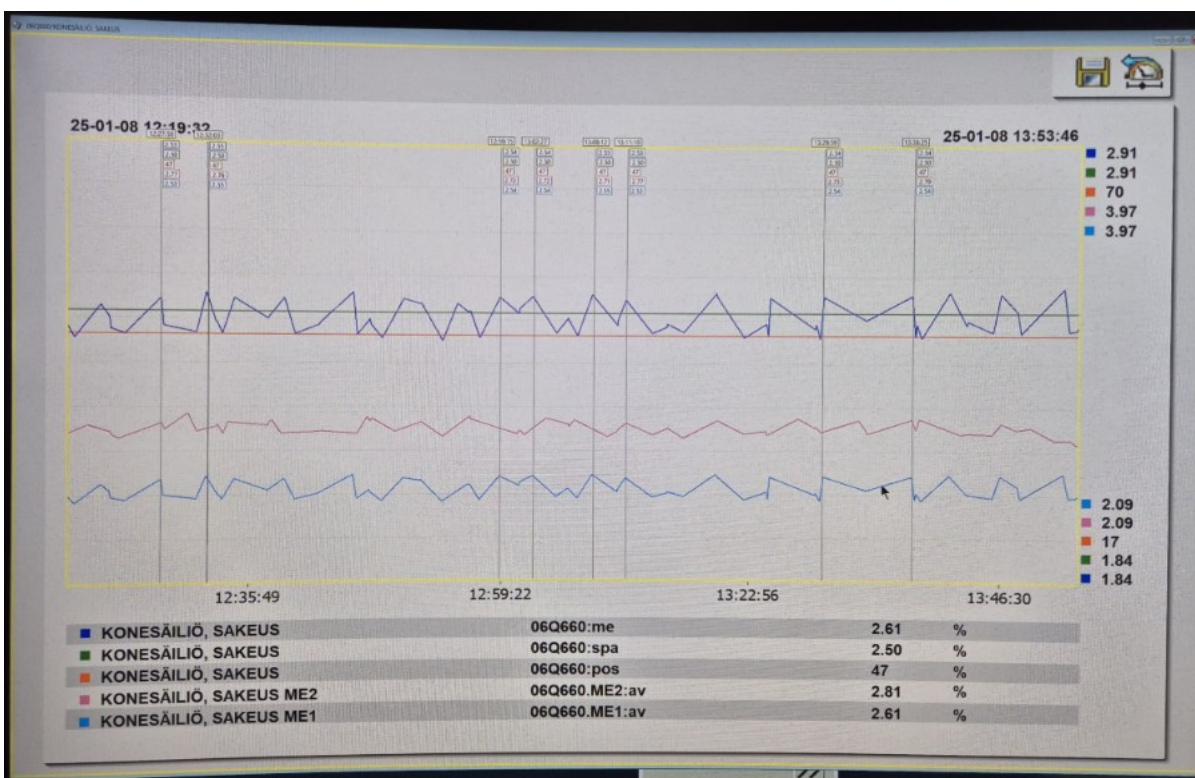
KUVA 9. Sakeussäätimen parametrien toiminta.



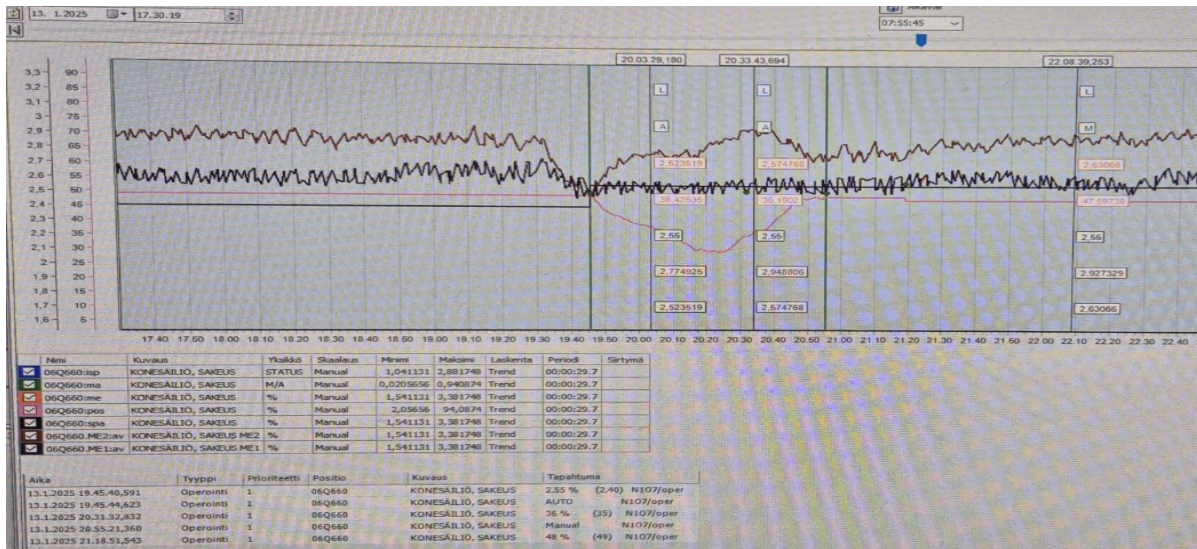
KUVA 10. Hylkymassan pumppaus koneelle, mittaukset MCA ja LAPA.

5.3 Laboratorio- ja online-mittausten vertailu

Mittauksissa tarkasteltiin sakeusmittareiden suorituskykyä sekä niiden tuottamien arvojen luotettavuutta kuivatusprosessissa. Erityisesti MCA- ja LAPA-lähettimien antamia mittaustuloksia vertailtaessa keskenään havaittiin, että niiden välillä esiintyi merkittäviä eroja tietyissä olosuhteissa. Tavoitteena oli arvioida nykyisen mittausjärjestelmän tarkkuutta ja selvittää mahdollisia parannuskeinoja sakeuden hallintaan. Online-mittauksista saadut arvot osoittivat, että MCA-lähetin antoi puhtaalla hylkymassalla järjestelmällisesti virheellisiä tuloksia. Tämä voi vaikuttaa sakeuden hallintaan ja heikentää prosessin säätötarkkuutta. LAPA-lähettimen mittaukset puolestaan olivat vakaampia, mutta myös niiden suorituskyvyssä havaittiin vaihtelua eri olosuhteissa. Kuvassa 11 havainnollistetaan sakeussäätimen moitteetonta toimintaa tilanteessa, jossa massassa ei ole hylkymassaa.



KUVA 11 Konesäiliön sakeussäädin M1 LAPA- ja M2 MCA-mittaus.



KUVA 12 Konesäiliön sakeussäädin LAPA- ja MCA-mittaus hylkymassalla.

Kuvassa 12 nähdään, kuinka hylkymassa vaikuttaa sakeussäätimien toimintaan LAPA-online-mittaus alkaa näyttämään sakeuden pienenevän, kun taas MCA-online-näyttöä osoittaa sakeuden nousevan.

Laboriomittauksilla varmistettiin online-lähettimeen mittaustulosten tarkkuus ja arvioitiin mahdollisia poikkeamia eri prosessiolosuhteissa. Mittaukset suoritettiin MCA-lähettimeen mittaamiin näytteisiin, mutta LAPA-lähettimeen mittauksia ei suoraan verrattu laborioritulosiin, koska siitä ei otettu erillisiä näytteitä.

Tulokset osoittivat, että laboriomittauksissa ei havaittu merkittäviä poikkeamia MCA-lähettimeen tuottamiin arvoihin verrattuna. Tämä viittaa siihen, että mittausjärjestelmä on lähtökohtaisesti luotettava, mutta hylkymassan kierrätyksen aikana havaittu poikkeama voi liittyä prosessimuuttujiin eikä mittausvirheeseen.

TAULUKKO 3. Laborioritulosien ja MCA-lähettimeen mittaustulosten vertailu.

Aika	06Q-660 1 sakeus Lab %	06Q-660 1 Online %	06Q-660 1 Lab- Online %	06Q-660 2 Lab %	06Q-660 2 Online %	06Q-660 2 Lab- Online %	Hylkymassan osuus Prosentteina	Mittaus
20.2.2025	2.39	2.78	-0.39	2.83	2.83	0.00	50%	A
12.2.2025	2.57	2.58	-0.01	2.92	2.64	0.28	50%	B
3.3.2025	3.19	2.95	0.24	3.35	2.96	0.39	100%	C
3.3.2025	2.74	2.73	0.01	2.67	2.75	0.08	50%	D
3.3.2025	2.27	2.56	-0.29	2.47	2.57	-0.10	0%	E

Laboratoriomittaukset ja MCA-lähettimen mittaustulokset olivat pääosin yhteneviä ilman merkittäviä systemaattisia poikkeamia. MCA:n mittaustarkkuus pysyi vakaana eri hylkymassaosuuksilla, kun taas LAPA-lähettimen tarkkuutta ei voitu suoraan arvioida laboratoriotulosten perusteella.

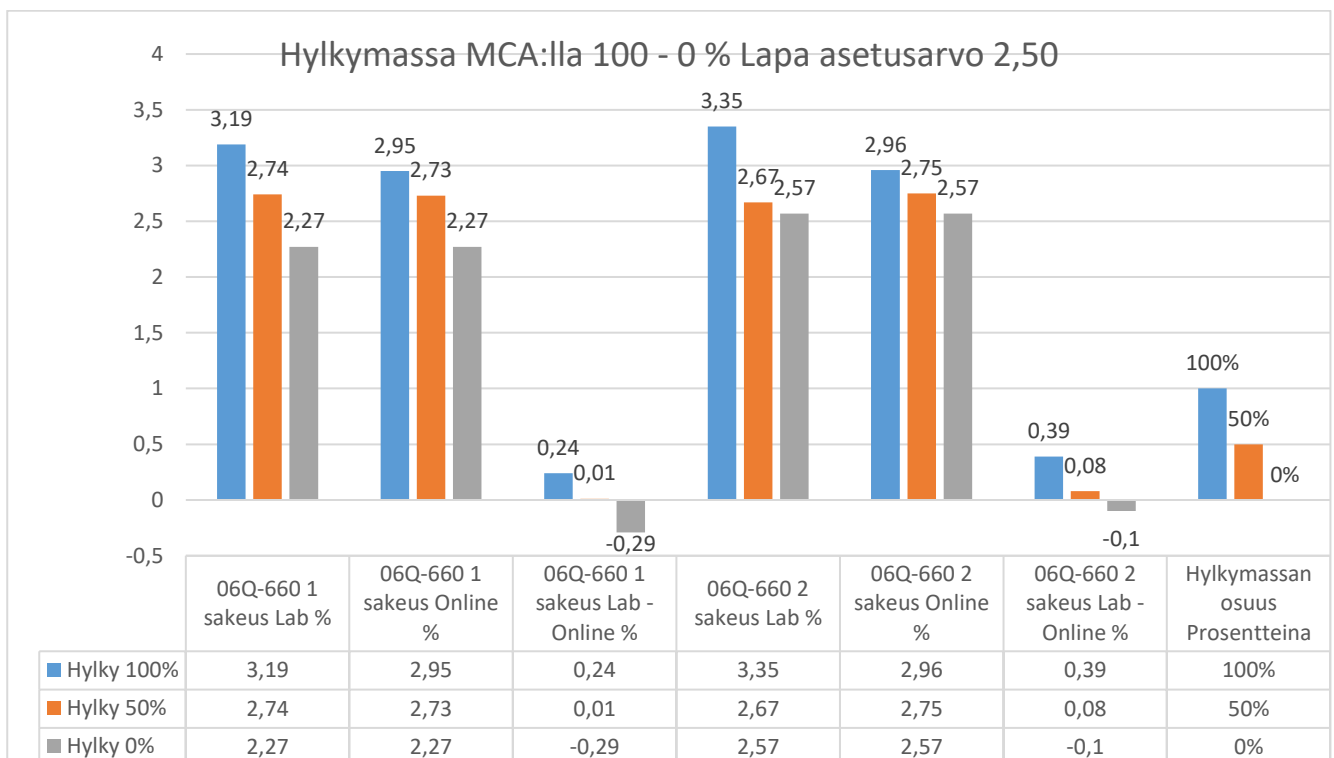
Mittausdata osoitti, että D-mittauksessa laboratoriomittaukset ja online-mittaukset antoivat hyvin yhdenmukaisia tuloksia, poikkeamien ollessa välillä $-0,01 \dots 0,28$ yksikköä. Sen sijaan C- mittauksessa havaittiin suurempia poikkeamia: laboratoriotulos oli 3,35 %, kun taas online-mittaus näytti 2,96 %, mikä tarkoittaa 0,39 yksikön eroa. Tämä osoittaa, että korkeilla hylkymassaosuuksilla online-mittauksen tulos oli laboratoriotuloksiin verrattuna matalampi.

E-mittauksessa havaittiin päinvastainen ilmiö, jossa online-mittaustulos oli systemaattisesti korkeampi kuin laboratoriotulos. Online-mittaus antoi arvon 2,56 %, kun taas laboratoriotulos oli 2,27 %, mikä tarkoittaa 0,29 yksikön eroa.

Mahdolliset erot mittaustuloksissa voivat johtua prosessiolosuhteista, kuten virtauksen vaihteluista ja massan koostumuksesta, jotka vaikuttavat mittauslaitteiden tarkkuuteen. Jatkotutkimuksissa olisi suositeltavaa tarkastella erityisesti korkeiden hylkymassaosuuksien mittaustarkkuutta ja selvittää, onko online-mittauksen kalibroinnissa tarvetta säätötoimenpiteille.

6 LABORATORIOTULOSTEN ANALYSOINTI

LAPA-mittaus oli asetettu 2,5 %:n sakeudelle, mutta laboratoriomittauksissa saadut tulokset poikkesivat tästä merkittävästi. MCA-lähetin antoi sakeudelle lähes oikean arvon, mutta mittauksissa ei onnistuttu täysin toistamaan todellista sekoittumista. MCA:n mittaustuloksiin voidaan tässä tapauksessa suhtautua suuremmalla luottamuksella, sillä sen toiminta oli huomattavasti vakaampaa verrattuna LAPA-lähettimeen. Kumpikaan mittausmenetelmä ei kuitenkaan tarjoa täysin luotettavaa tulosta, mikä korostaa mittausepävarmuuden hallinnan merkitystä.



KUVIO 8 MCA:n mittaus- ja laboratoriotuloksien erotus

Laboratoriotulosten perusteella 100-prosenttisen hylkymassan sakeus oli keskiarvoltaan 3,25, kun taas MCA-lähetin näytti 2,95 ja LAPA-lähettimeen asetusarvo oli 2,5. Näin ollen mittaustuloksissa havaittiin jopa 0,75 yksikön poikkeama laboratoriomittauksiin verrattuna. Sen sijaan 50-prosenttisen hylkymassan kohdalla online-mittauksen ja laboratoriomittausten välillä ei havaittu merkittävää eroa. MCA-lähetin näytti arvoksi 2,74, kun taas laboratoriotulos oli 2,7, mikä osoittaa mittausten olevan tässä ta-

pauksessa tarkempia ja keskenään yhdenmukaisia. Tämä viittaa siihen, että mittauserot korostuvat erityisesti 100-prosenttisella hylkymassalla, kun taas osittaisella hylkyosuudella tulokset ovat yhdenmukaisempia.

Tilanteessa, jossa hylkymassaa ei ollut lainkaan online-mittaus pysyi lähellä asetuspistettä, näyttäen arvon 2,56. Laboratoriotulos oli kuitenkin 2,37, mikä osoittaa, että mittaus antoi sakeammalta vaikuttavan arvon kuin mitä todellisuudessa oli. Tästä huolimatta puhtaalla massalla MCA- ja LAPA-lähetimet antoivat keskenään yhtenevät mittaustulokset. Tämä viittaa siihen, että poikkeamat ovat merkittävämpiä erityisesti hylkymassan ollessa mukana prosessissa.

7 POHDINTA

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että nykyiset sakeusmittalaitteiden asennuspaikat ovat mittaustarkkuuden kannalta suositeltavia. Niiden muuttamisella ei todennäköisesti saavutettaisi merkittävää parannusta järjestelmän toimintaan. Lisäksi havaittiin, että säätöparametrien, kuten vahvistuksen ja integrointiajan, muuttaminen ei vaikuttanut merkittävästi mittaustulosten tarkkuuteen, vaan ainoastaan hetkelliseen vaihteluun. Tämä viittaa siihen, että prosessin mittaustulokset aaltoilevat luonnollisen prosessidynamiikan mukaisesti, eikä säätöalgoritmin hienosäätö tarjoa ratkaisevaa parannusta sakeuden hallintaan.

MCA-lähettimen mittauskäyrän toimintaperiaatetta ei voitu tässä tutkimuksessa kattavasti selvittää, mutta havaintojen perusteella se antoi poikkeavia tuloksia erityisesti hylkymassan mittauksessa. Tämä viittaa mahdollisiin mittausteknisiin rajoituksiin tai kalibrointiin liittyviin epävarmuustekijöihin, jotka voivat vaikuttaa säätöjärjestelmän toimintavarmuuteen. Tästä syystä olisi suositeltavaa suorittaa lisätutkimuksia MCA-lähettimen kalibroinnin ja mittaustarkkuuden osalta eri prosessiolosuhteissa.

Tulosten perusteella yksi mahdollinen kehitysehdotus on lisätä sakeusmittaus perälaatikon paluukiertoon. Tämä mahdollistaisi sakeuden mittaustulosten vertaamisen eri prosessin vaiheissa ja tarjoaisi lisätietoa mittauseroista. Erillisen mittauspisteen asentaminen perälaatikolle voisi parantaa prosessin kokonaisvaltaista ymmärrystä ja tarjota arvokasta tietoa sakeuden hallinnan kehittämiseksi. Sen sijaan uuden säätökäyrän luominen ei vaikuta tässä vaiheessa tarpeelliselta, sillä mittaustuloksissa havaitut vaihtelut liittyvät ensisijaisesti mittaolosuhteisiin säätöparametrien sijaan.

Jatkossa olisi hyödyllistä kehittää automaattisia kalibrointimenetelmiä, jotka mukautuvat prosessin vaihteluihin ja varmistavat mittaustulosten luotettavuuden eri käyttötilanteissa. Lisäksi kehittyneemmät signaalinkäsittelymenetelmät voisivat auttaa kompensoimaan mittaustulosten poikkeamia ja siten parantaa sakeussäätöjärjestelmän kokonaisvaltaista suorituskykyä. Mittausjärjestelmän toimintaa tulisi myös tarkastella laajemmassa prosessikontekstissa, esimerkiksi analysoimalla sakeusmittausten, virtausnopeuden, lämpötilan ja muiden prosessiparametrien välisiä yhteyksiä. Prosessinohjauksen kehittäminen jatkuu työn valmistumisen jälkeenkin, ja saadut tutkimustulokset tarjoavat pohjan tuleville optimoitointitoimenpiteille.

LÄHTEET

Harju, T. & Marttinen, A. 2000. *Säätötekniikan koulutusmateriaali*. Saatavissa: https://www.automatioseura.fi/site/assets/files/1426/pid_kirja_1-1.pdf. Viitattu 9.1.2025.

Knowpulp 2025. Sellu- ja paperitekniikan oppimisympäristö. Saatavissa: http://www.knowpulp.com.ezproxy.centria.fi/extranet/suomi/kps/ui/process/fiberline/finitishing/2_drying_machine/ui.htm. Viitattu 10.1.2025.

Kuivatuskoneen opastusohjeet.2022. Sisäinen lähde: Stora Enso. Viitattu 16.1.2025.

Kupi-työohjeet – Oulu – Oppimisympäristö I Stora Enso. Sisäinen lähde: Viitattu 5.2.2025.

Piirikohtainen toimintakuvaus Stora Enso. Sisäinen lähde: Viitattu 5.2.2025.

Laitevalmistajat ja -toimittajat – Oulu – Oppimisympäristö I Stora Enso. Sisäinen lähde: Viitattu 5.2.2025.

Ogata, K. 2002. *Modern control engineering*. Fourth edition. New Jersey: Prentice Hall.

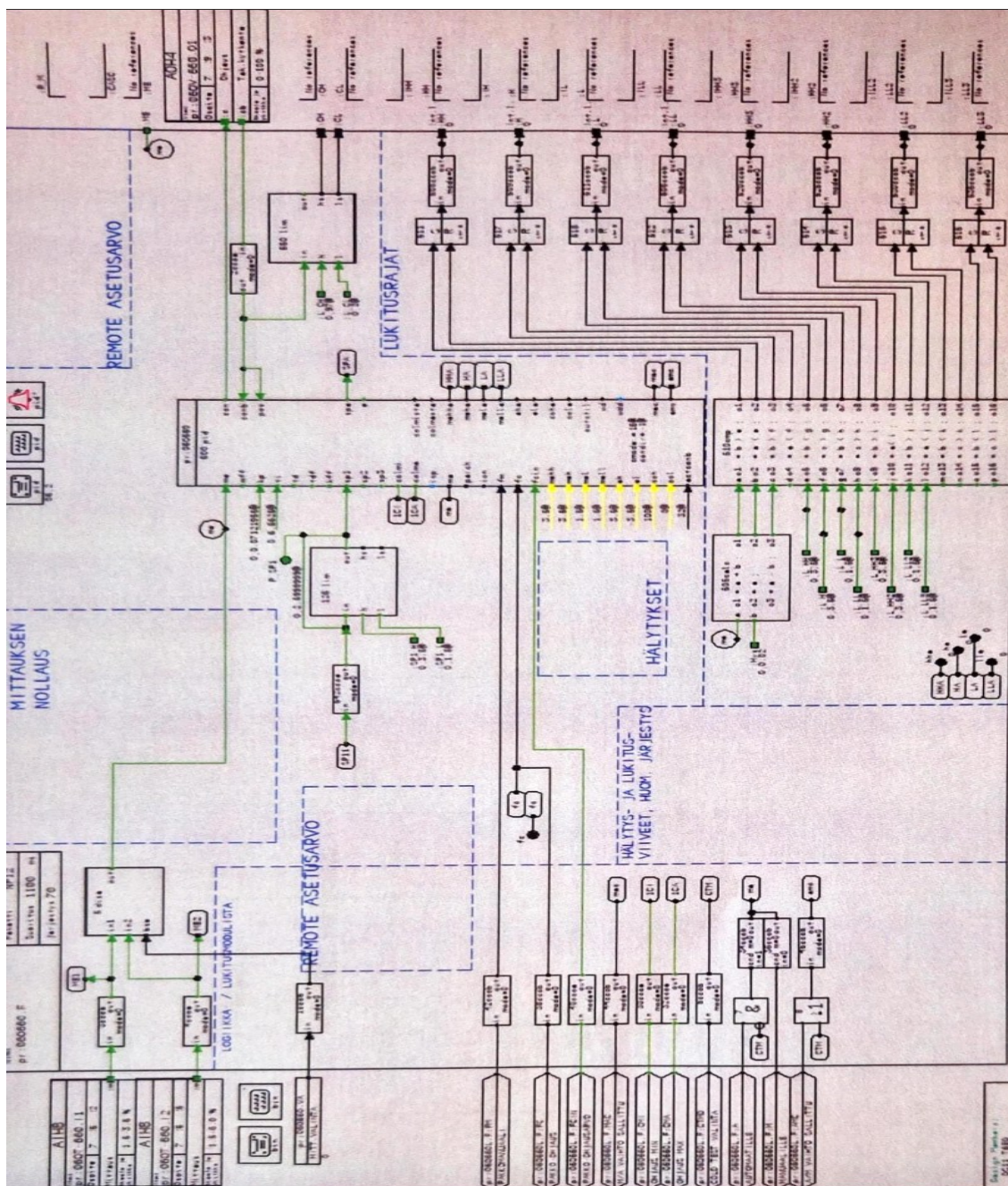
Valmet IQ-laadunhallintajärjestelmä. Laadunvalvontajärjestelmä QCS. Saatavissa: <https://www.valmet.com/automation/quality-management/quality-control-system-qcs/scanners/> Viitattu 13.2.2025.

Valmet mikroaaltokonsistenssin mittaus. MCA. Saatavissa: [Valmetin mikroaaltokonsistenssin mittaus - Valmet MCA](#) Viitattu 14.2.2025.

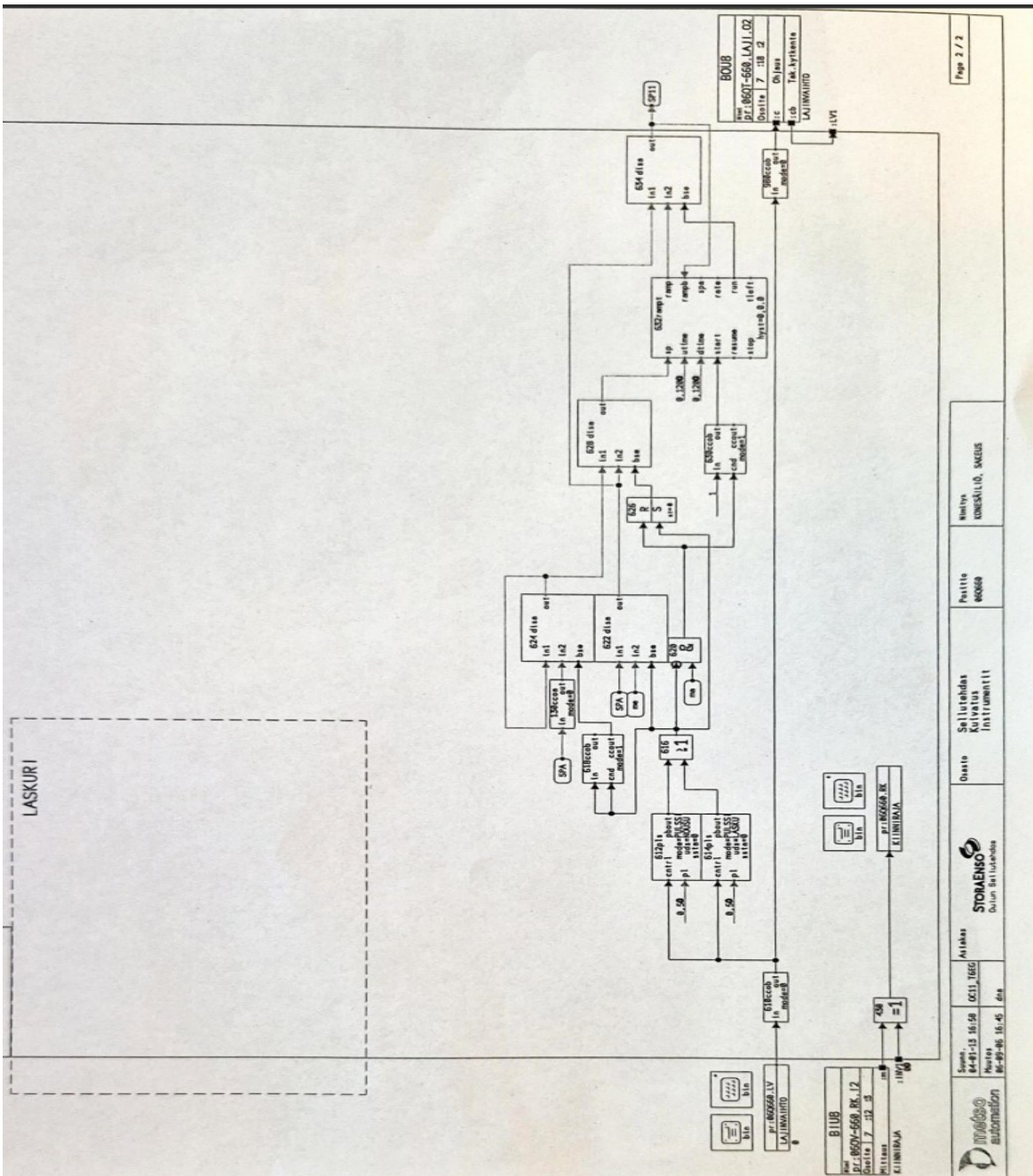
Valmet sakeusmittaukset. Sisäinen lähde: Valmet. Viitattu 5.2.2025.

Åström, K. & Tore, H. 1995. *PID Controllers, Theory, Design, and Tuning*. Research Triangle Park, North Carolina: ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society.

Ohjelmakaavio



Ohjelmakaavio



	Alttas Oulun Bioliikela	Quato Salilubdas Kuvatus Instrumentit	Poistio 80668	Muutos KONEKILIO, SAKES
--	----------------------------	--	------------------	----------------------------

BLUB
 PL 867-568, PK 12
 Oulu, Finland
 Puhelin: 08-315 1659
 Faksi: 08-315 1658
 E-posti: info@blub.fi

BLUB
 PL 867-568, LAJI OY
 Oulu, Finland
 Puhelin: 08-315 1659
 Faksi: 08-315 1658
 E-posti: info@blub.fi