



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU  
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Lauri Laitinen

---

## **WSA-rikkihappolaitoksen automaatio suunnittelu Andritz Oy:lle**

Opinnäytetyö

Kevät 2021

SeAMK, Tekniikan yksikkö

Automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Automaatiotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Sähköautomaatio

Tekijä: Lauri Laitinen

Työn nimi: WSA-rikkihappolaitoksen automaatio suunnittelu Andritz Oy:lle

Ohjaaja: Jyri Lehto

Vuosi: 2021

Sivumäärä: 65

Liitteiden lukumäärä: 0

---

Tämä opinnäytetyö on tehty toimeksiantona Andritz Oy:lle. Toimeksiantaja on lisännyt toimittamiinsa tuotteisiin laitoksen, joka tuottaa rikkihappoa sellutehtaalla syntyvistä vahvoista rikkipitoisista hajukaasuista. Samanlaisella tekniikalla olevia rikkihappolaitoksia ei ole vielä ennen yhdistetty sellutehtaan prosessiin. Tämän työn aiheena on WSA-rikkihappolaitoksen automaatio suunnittelu pääsäästöjen osalta.

Täysin uudenlaisen laitoksen pääsäästöjen automaatio suunnitteluun kuuluu pääsäästöjen määrittäminen ja niiden periaatesäästökaavioiden suunnittelu. Pääsäästöjä ohjaaville säästöpiireille on luotava toimintakaaviot, joiden perusteella automaatiojärjestelmän sovellusohjelmisto voidaan luoda.

Työssä perehdyttiin WSA-rikkihappolaitoksen tarkoitukseen sekä toimintaan. Lisäksi käytiin läpi prosessilaitosten automaatio suunnitteluun liittyvää teoriaa. Lopuksi esitettiin määritellyt pääsäädöt sekä niille suunnitellut säästöpiirien säätimet ja ohjaukset.

Työn tuloksena laitoksen pääsäädöt saatiin määritettyä ja niiden periaatesäästökaaviot suunniteltua. Laitoksen vesi- ja höyryjärjestelmän, polttimeen ja savukaasupesurin osalta toimintakaaviot saatiin valmiiksi sovellusohjelmiston luomista varten. Suunnitteluprojektin laajuudesta johtuen toimintakaaviot jouduttiin rikkihapon valmistusprosessin osalta jättämään hyvin yksinkertaisiksi, mutta niiden kehittämistä jatketaan opinnäytetyön jälkeen.

Toimeksiantajan toiveiden mukaan tästä työstä jätetään julkaisematta rikkihapon valmistusprosessiin liittyvät pääsäästöjen määrittelyt ja säästöpiirien toimintojen kuvaukset sekä työhön liitetyt periaatesäästökaaviot ja toimintakaaviot, sillä ne sisältävät liike- ja ammattisalaisuuksia. Työssä esiteltiin vain vesijärjestelmän ja savukaasupesurin pääsäädöt sekä säästöpiirien toiminta.

<sup>1</sup> Asiasanat: rikkihappolaitos, säädin, säätö, prosessiautomaatio

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Automation Engineering

Specialisation: Electrical Automation

Author: Lauri Laitinen

Title of thesis: Engineering the Automation of a WSA Sulfuric Acid Plant for Andritz Oy

Supervisor: Jyri Lehto

Year: 2021

Number of pages: 65

Number of appendices: 0

---

This thesis was made as an assignment for Andritz Oy. The client has added to their product catalog a plant that produces commercial grade sulfuric acid from the sulfurous gas streams of kraft pulp mill. Plants with similar technology have never before been adapted to a kraft pulp process. The topic of the thesis was the automation engineering concerning the main controls of a sulfuric acid plant.

The automation engineering of the main controls in a completely new kind of plant involved the defining of the main controls and then designing the principle control diagrams. The main controls consist of multiple control loops that are used to control the process. The functions of the control loops are described in graphical functional diagrams which are also used to develop the software of the automation system.

The thesis studied the purpose and process of a WSA sulfuric acid plant. Subsequently, the theory of process automation was presented. Finally, the definitions of the main controls and the functions of the control loops were presented.

As a result, the definitions and principle control diagrams for the main controls were designed. The functional diagrams for a water- and steam system, burner and scrubber were completed so that the development of software could begin. Due to the time restrictions of this thesis and the engineering project being large and time-consuming, the design of the functional diagrams of the sulfuric acid production process had to be left very simple.

The client requested that the definitions of the main controls and the function descriptions of control loops concerning the sulfuric acid production process would not be published, because they involve trade secrets. Also the principle control diagrams and functional diagrams in appendices were not published for the same reason. Only the definitions of the main controls and functions of the control loops concerning water system and scrubber were presented in public thesis.

<sup>1</sup> Keywords: sulfuric acid plant, controller, control, process automation

# SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä .....	2
Thesis abstract .....	3
SISÄLTÖ .....	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo .....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	8
1 Johdanto .....	10
1.1 Työn tausta.....	10
1.2 Työn tavoite.....	10
1.3 Työn rakenne .....	11
1.4 Yritysesittely .....	12
2 MÄRKÄ RIKKIHAPPOLAITOS (WSA).....	13
2.1 Rikkihappo.....	14
2.2 Rikkihapon käyttö sellunvalmistuksessa .....	15
2.3 WSA-prosessi.....	16
2.3.1 Poltin .....	17
2.3.2 Katalyyssi.....	18
2.3.3 Lauhdutus .....	19
2.3.4 Hapon jäähdytys .....	20
2.4 Yleiset laitoksien prosessit .....	20
2.4.1 Vesi- ja höyryjärjestelmä .....	20
2.4.2 CNCG-kaasujen käsittely .....	23
2.4.3 Hiukkasten poisto.....	24
3 AUTOMAATIOSUUNNITTELUN LAATU JA ELINKAARI.....	25
4 PROSESSIAUTOMAATIO JA SÄÄDÖT .....	28
4.1 Mittausten käsittely .....	29
4.1.1 Suodatus.....	30
4.1.2 Virtausmittausten käsittely .....	30
4.1.3 Höyrylieriön pinnanmittauksen käsittely .....	33

4.2	PID-Säädin .....	35
4.3	Kuormitushäiriöiden sekä ristikkäisvaikutusten poisto.....	38
4.4	Kaskadikytkentä .....	40
4.5	Split-range -kytkentä .....	41
4.6	Ohjaukset ja lukitukset .....	42
4.7	Toimilaitteiden ohjaukset ja säädöt .....	42
4.7.1	Venttiilit .....	43
4.7.2	Pumput .....	44
5	PÄÄSÄÄTÖJEN SUUNNITTELU .....	46
5.1	Siemens COMOS.....	47
5.2	Käytetyt toimilohkot .....	48
5.3	Säätöjen ja ohjausten yleiset periaatteet.....	53
5.4	Syöttöveden painesäätö.....	54
5.5	Höyrylieriön pinnansäätö.....	55
5.6	Savukaasupesurin säätö .....	57
6	TYÖN ETENEMINEN JA TULOKSET .....	59
7	YHTEENVETO .....	61
	LÄHTEET .....	63

## Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. WSA-Laitos (Forest BioFacts 2021c).....	16
Kuva 2. Esimerkki prosessilaitoksen vesi- ja höyryjärjestelmästä.....	23
Kuva 3. Automaatiojärjestelmän elinkaarimalli (perustuu Ajo yms., [viitattu 27.2.2021], 17)..	26
Kuva 4. Höyrylieriö (perustuu Halttunen ym. 2007, 101).....	34
Kuva 5. PID-säädin lohkokaaavana esitettynä.....	35
Kuva 6. Yksinkertainen myötäkytkentä lohkokaaavana esitettynä. ....	39
Kuva 7. Kaskadikytkentä, lämpötilan säädin toimii yläsäätimenä virtauksen säätimelle. ....	40
Kuva 8. Kuvan 7 kaskadikytkentä lohkokaaavana esitettynä.....	41
Kuva 9. Venttiilien tyypillisimmät ominaiskäyrät (Knowpulp 2021f).....	43
Kuva 10. COMOS-projektin tietokannassa olevan säätöpiirin rakenne.....	47
Kuva 11. Esimerkki COMOS-ohjelmistolla tehdystä toiminnosta. ....	48
Kuva 12. AIND-lohko. ....	48
Kuva 13. PID-lohko.....	49
Kuva 14. MOT1DIR-lohko.....	50
Kuva 15. MANL-lohko.....	51
Kuva 16. SEQUENCE-lohko.....	51
Kuva 17. VALVE_1-lohko. ....	52
Kuva 18. ALARM- ja INTERL-lohkot.....	52

Kuvio 1. CNCG-kaasun koostumus (Forest biofacts 2021a).....	14
Kuvio 2. Vedenkulutus sulfaattisellutehtaalla (Knowpulp 2021b). ....	21
Taulukko 1. CNCG-kaasun määriä eri lähteistä (Forest biofacts 2021b). ....	13

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>ADt</b>	Air dry ton. 10 % kosteutta sisältävän sellun painoa kuvaava yksikkö.
<b>CNCG</b>	Concentrated non-condensable gas. Vahva hajukaasu. Sisältää suuria pitoisuuksia rikkiyhdisteitä ja orgaanisista aineita.
<b>DNCG</b>	Dilute non-condensable gas. Laimea hajukaasu. Koostuu suurilta osin ilmasta, jossa on rikin ja orgaanisten aineiden jäämiä.
<b>DCS</b>	Distributed control system. Hajautettu ohjausjärjestelmä, jota käytetään suurien prosessilaitosten automaatiojärjestelmänä.
<b>IEC 61131</b>	Standardi, joka käsittelee ohjelmoitavia logiikkaohjaimia. Standardissa määritellään periaatteelliset säännöt ja elementit ohjelmoitaville logiikoille ja niiden ohjelmointikielille.
<b>Lähtösignaali</b>	Säätöjärjestelmän säätimen laskema signaali, jota käytetään ohjaamaan toimilaitetta tai antamaan asetusarvo alasäätimelle.
<b>Kaskadikytcentä</b>	Säätötekniikan kytkentä, jossa prosessia säädetään apusuureen kautta. Apusuuretta ohjaava säädin saa asetusarvon prosessia ohjaavalta säätimeltä.
<b>Myötäkytkentä</b>	Säätötekniikan kytkentä, jossa prosessin ohjaamiseen vaikuttavat tunnetut häiriöt pyritään poistamaan summaamalla prosessin ohjaukseen mitattu tai laskennallinen termi.
<b>Nollakanta</b>	Termi, jota käytetään prosessilaitostoitimuksissa kuvaamaan valmiin laitoksen mallia, jota hyödynnetään samanlaisten laitosten suunnittelussa.
<b>PID-kaavio</b>	Piping and Instrument Diagram. Kaavio, jossa esitetään prosessin putket, laitteisto ja prosessia hallitsevat instrumentit.
<b>SO<sub>2</sub></b>	Rikkidioksidi.



<b>Split-range -kytkentä</b>	Säätötekniikan kytkentä, jossa yhden säätimen lähtösignaalilla ohjataan kahta tai useampaa toimilaitetta.
<b>Säätimen viritys</b>	PID-säätimelle asetetaan viritysparametrit $K_P$ , $K_I$ ja $K_D$ sen mukaan, miten nopeasti säätimen halutaan ohjaavan säädettävää prosessia.
<b>Takaisinkytkentä</b>	Säädettävän suureen mittaukselta saatava informaatio suureen tilasta, jota käytetään säätimen lähtösignaalin laskentaan.
<b>Toimintakaavio</b>	Kaavio jolla esitetään säätö- tai ohjauspiirin toiminta graafisesti loogisia toimilohkoja hyödyntäen.
<b>UEL</b>	Upper explosive limit. Korkein kaasun pitoisuus, jolloin kaasu palaa sytyttäessä.
<b>Viive</b>	Säätötekniikassa käytetty termi, jolla kuvataan aikaa, joka kuluu säädettävän järjestelmän tulosuureen muutoksesta ensimmäiseen lähtösuureen muutokseen.
<b>WSA-prosessi</b>	Wet gas sulfuric acid. Märkä rikkihappoprosessi. Prosessi, jonka avulla rikkipitoisista kaasuista voidaan valmistaa rikkihappoa.

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tausta

Tämä opinnäytetyö toteutettiin toimeksiantona Andritz Oy:lle. Yritys toimittaa yksittäisiä laitoksia sekä kokonaisia tehtaita sellu- ja paperiteollisuuteen. Andritz Oy on lisännyt tarjoamiinsa tuotteisiin WSA-laitoksen eli märkärikkihappolaitoksen. WSA-laitoksessa tuotetaan rikkihappoa sellun valmistusprosessista syntyvistä väkevistä hajukaasuista. WSA-laitoksia on käytetty eri teollisuuden aloilla ennenkin, mutta sellutehtaan prosessiin niitä ei ole vielä koskaan yhdistetty. Rikkihapon valmistukseen käytettävät prosessilaitteet toimittaa Haldor Topsoe A/S, jonka kanssa toimitaan yhteistyössä projektin ajan.

Täysin uudelle laitosteknologiaalle on määriteltävä pääsäädot. Pääsäädot kuvaavat, kuinka prosessin keskeisimpiä kokonaisuuksia hallitaan. Pääsäädoille luodaan periaatesäätökaaviot, joiden avulla prosessin ohjaamista voidaan kuvailla asiakkaille, ja joita käytetään pohjana tulevilla toimitusprojekteilla. Pääsäädot suunnitella ohjattavaan prosessiin on perehdyttävä tarkoin, etenkin kun kyseessä on täysin uudenlainen prosessilaitos.

Toimeksiantaja on jo saanut ensimmäisen WSA-laitostilauksen. Osana uuden toimitettavan laitoksen automaattisuunnittelua pääsäädoille luodaan myös graafiset toimintakaaviot, joilla kuvataan yksityiskohtaisemmin säätöpiirien toimintaa. Ensimmäisen laitoksen valmiiden suunnitelmien perusteella suunnittelujärjestelmän tietokantaan tullaan luomaan laitoksen nollakanta, jota käytetään pohjana tulevilla projekteilla.

## 1.2 Työn tavoite

Työn tavoitteena on laatia WSA-laitoksen periaatesäätökaaviot sekä suunnitella laitoksen automaattisten säätöpiirien toiminta pääsäätojen osalta. Lisäksi työssä tutkitaan WSA-laitoksen toimintaa sekä prosessilaitosten automaatiojärjestelmiä. Tutkimuksessa ei käsitellä instrumentointia tai turva-automaatiojärjestelmiä.

### 1.3 Työn rakenne

Työn ensimmäisessä osassa käydään läpi työn tausta, tavoite ja rakenne sekä esitellään työn toimeksiantaja.

Toisessa luvussa perehdytään teoriassa WSA-laitoksen toimintaan. Luvussa perehdytään yleisesti rikkihappoon, sen käyttöön sellun valmistuksessa sekä WSA-laitoksen tuomiin etuihin väkevien hajukaasujen hävittämisessä. Luvussa käydään läpi rikkihapon tuottamisen sekä laitoksen toiminnan kannalta keskeiset osaprosessit.

Kolmannessa luvussa selvitetään automaatio suunnittelun laatuun ja laadunvalvontaan vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi käydään läpi tavanomainen automaatio suunnittelun elinkaari.

Neljännessä luvussa tutustutaan prosessiteollisuuden automaatiojärjestelmiin automaatio- ja säätösuunnittelun kannalta oleellisilta osilta. Osiossa perehdytään tarkemmin mittaustulosten käsittelyyn sekä prosessiautomaation säätötekniikkaan ja siihen vaikuttaviin ilmiöihin. Luvussa käydään myös lyhyesti läpi automaatiojärjestelmän ohjausmenetelmät tähän työhön soveltuvilta osilta.

Viidennessä luvussa esitellään suunnittelutyöhön käytetty ohjelmisto sekä suunnittelutyön tuloksena syntyneet pääsäätöjen määrittelyt ja säätöpiirien toiminnot. Tässä julkisessa työssä tässä luvussa ei esitellä rikkihapon valmistusprosessiin liittyviä pääsäätöjen määrittelyjä ja säätöpiirien toimintoja, sillä ne sisältävät ammatti- ja yrityssalaisuuksia. Työssä esitellään vain vesijärjestelmän ja savukaasupesurin pääsäädot sekä säätöpiirien toiminta.

Kuudennessa luvussa kerrotaan työn etenemisestä sekä käydään läpi työn tulokset.

Viimeisessä luvussa käydään läpi opinnäytetyö kokonaisuutena. Luvussa myös pohditaan suunnittelutyön onnistumista ja työtä tehdessä esiin nousseita tärkeitä asioita täysin uuden laitoksen suunnittelussa. Lopuksi käsitellään suunnittelutyön etenemistä tästä työstä eteenpäin ja työn tuloksien hyödyntämistä toimeksiantajayrityksessä.

## 1.4 Yritysesittely

Andritz OY on kansainvälinen sellu- ja paperiteollisuuden järjestelmien, palveluiden ja laitteistojen toimittaja. Andritz Oy on itävaltalaisen Andritz AG:n tytäryhtiö. Andritz AG:n pääkonttori sijaitsee Grazissa Itävallassa ja sillä on toimipisteitä ympäri maailmaa yli 40 eri maassa. Andritz AG työllistää yhteensä n. 27 800 henkilöä. Andritz-yhtiöt toimivat sellu- ja paperiteollisuuden lisäksi monilla eri teollisuuden aloilla, kuten vesivoima-, metalli-, teräs sekä jätteenkäsittelyteollisuudessa. (Andritz 2021a.)

Andritz Oy:llä on toimipaikkoja ympäri Suomea muun muassa Varkaudessa, Lahdessa, Kotkassa, Lappeenrannassa sekä Tampereella. Suomen pääkonttori sijaitsee Helsingissä. Andritz Oy työllistää yli 1400 henkilöä. Lisäksi sen omistuksessa on neljä tytäryhtiötä Suomessa: Andritz Hydro Oy Tampereella, Andritz Fabric and Rolls Oy Keravalla, Savonlinna Works Oy Savonlinnassa sekä Warkaus Works Oy Varkaudessa. Yhtiö on alun perin muodostunut vuonna 2002 Andritz AG:n ostamista Ahlström Machinery Oy:stä sekä Kone Wood Oy:stä. Andritz Oy:n liikevaihto oli vuonna 2019 698,2 miljoonaa euroa. (Andritz 2021a.)

## 2 MÄRKÄ RIKKIHAPPOLAITOS (WSA)

Selluteollisuudesta aiheutuvia ilmaan suuntautuvia päästöjä on vähennetty merkittävästi viimeisten vuosikymmenten aikana. Hajurikkiyhdisteet ovat vähentyneet lähes merkityksettömiksi tehokkaiden keräily- ja käsittelyjärjestelmien ansioista. Selluteollisuuden hajurikkiyhdistepäästöt ovat vähentyneet 97 % tuotantoon suhteutettuna vuodesta 1992 ja uusia päästövähennystoimenpiteitä kehitetään jatkuvasti. (Blomfel 2020.)

Kemiallinen sellunvalmistus yhdistetään usein epämiellyttäviin hajuihin, jotka johtuvat hajukaasuista (NCG-kaasut). Laitoksen työntekijöiden sekä laitosten lähialueiden asukkaiden negatiiviset tuntemukset ovat yksi suurimmista kannustimista hajukaasujen käsittelyn kehittämiseen. (Forest BioFacts 2021a.)

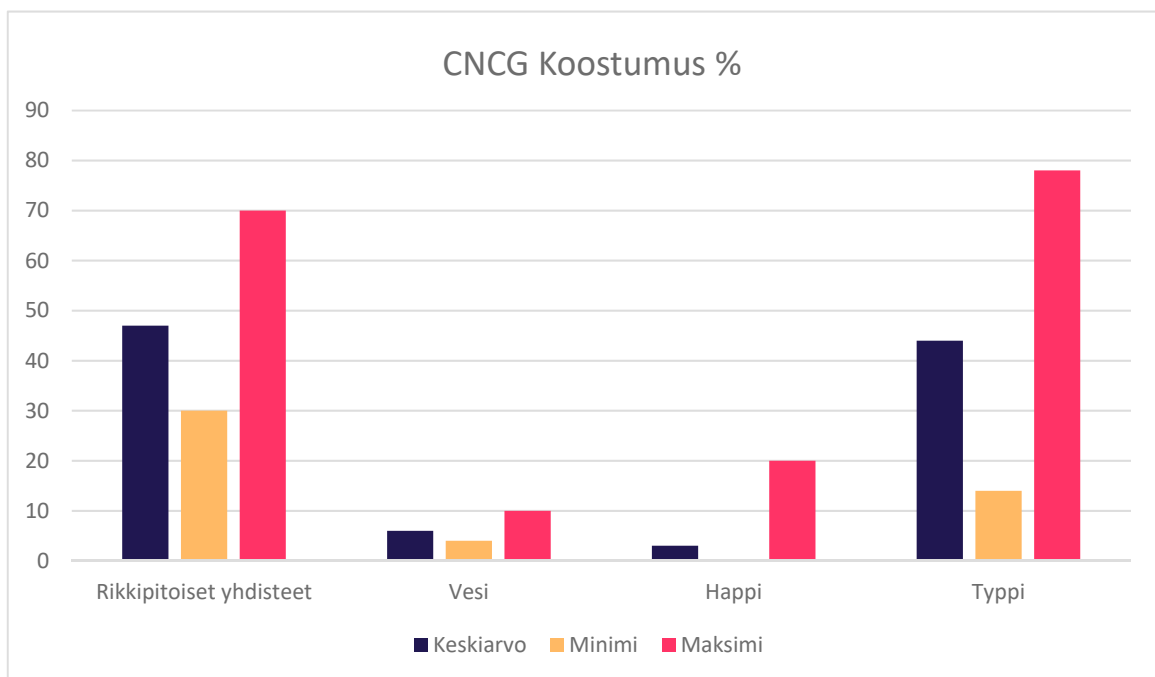
Hajukaasujen päästöt voidaan jakaa väkeviin (CNCG) ja laimeisiin (DNCG) hajukaasuihin. Väkeviä hajukaasuja syntyy kuitulinjalla tapahtuvassa sellun keitossa, sekä haihduttamalla tapahtuvasta mustalipeän käsittelystä (ks. taulukko 1). Laimeita hajukaasuja syntyy lähes kaikissa prosesseissa, joissa käsitellään lipeää. Rikkipitoiset hajukaasut koostuvat rikkivedystä, metyylimerkaptaanista, dimetyylisulfidista ja dimeetylidisulfidista. (Seppälä ym. 1991, 183.)

Taulukko 1. CNCG-kaasun määriä eri lähteistä (Forest biofacts 2021b).

Lähde	Kg S/ADt	Nm3/ADt
Keittäminen	0,1 - 0,4	1,0 – 4,5
Stripper	0,5 - 1,0	15 - 25
Haihduttamo	0,4 - 0,8	1 - 10
Musta lipeän lämpökäsittely	2 – 3	1,5 - 3
Metanolin käsittely	0,5 – 2,0	1 – 2

CNCG-kaasut ovat myrkyllisiä sekä räjähdysherkkiä. Ne sisältävät rikkiyhdisteiden lisäksi korkeita pitoisuuksia tärpättikaasuja, metanolia ja muita yhdisteitä, jotka antavat CNCG-kaasulle niiden ominaisen hajun. Sellutehtaalla CNCG-kaasut on yleensä hävitetty polttamalla meesauunissa, soodakattilassa tai erillisellä polttimella. (Knowpulp 2021d.) Nykyaikaisissa laitoksissa täytyy olla hajukaasujen käsittelyjärjestelmä. Väkevien hajukaasujen käsittelyyn käytettävän järjestelmän on oltava toimintavalmiina 99 % ajasta. (Forest BioFacts 2021a.)

Kuvio 1. CNCG-kaasun koostumus (Forest biofacts 2021a).



Haldor Topsoe A/S kehitti WSA-teknologian 1970-luvun lopulla. WSA (Wet gas sulfuric acid) eli märkärikkihappoprosessissa väkevistä hajukaasuista voidaan valmistaa rikkihappoa käsittelemällä ne polttamalla, katalyysillä sekä kondensaatiolla. 99,9 % CNCG-kaasun sisältämästä rikistä (ks. kuvio 1) voidaan muuttaa rikkihapoksi. CNCG-kaasun käsittely ja rikin kerääminen WSA-laitoksessa vähentää myös tehtaalla syntyvän lentotuhkan määrää. Olosuhteitten salliessa WSA-laitos kykenee tuottamaan myös huomattavia määriä ylikuumennettua höyryä, jota voidaan hyödyntää niin WSA-laitoksella kuin koko sellutehtaassa. (Andritz 2021b.)

## 2.1 Rikkihappo

Rikkihappo eli  $\text{H}_2\text{SO}_4$  on kemianteollisuuden tärkein kemikaali ja sitä tarvitaan lähes kaikkialla prosessiteollisuudessa. Se on väritön, raskas ja öljymäinen neste. Sen sulamispiste on 10,4

°C ja kiehumispiste 279,6 °C. Rikkihappo on vahva happo, joka reagoi erittäin herkästi eri aineiden kanssa. Rikkihappo kykenee liuottamaan metalleja, ja lisäksi se on tehokas kuivausaine. Rikkihappo reagoi kiivaasti veden kanssa ja reaktio on voimakkaasti eksoterminen. Rikkihapon joutumista kosketuksiin ihon kanssa on vältettävä, sillä rikkihappo syövyttää ihoa ja aiheuttaa palovammoja. (Hänninen ym. 2018, 118.)

Rikkihapon valmistus tapahtuu kontaktimenetelmällä. Menetelmän ensimmäisessä vaiheessa synnytetään rikkidioksidia joko polttamalla puhdasta rikkiä tai pasuttamalla rikkipitoista malmia. Seuraavaksi rikkidioksidi hapetetaan rikkitrioksidiksi kontaktilaitteessa. Rikkidioksidin muuttaminen rikkitrioksidiksi vaatii katalyytin käyttöä sekä 400–500 °C lämpötilan. Lopuksi rikkitrioksidi reagoi veden kanssa, jolloin syntyy rikkihappoa. Kaupallinen rikkihappo on usein laimennettu 93–95 %:n vahvuiseksi. (Hänninen ym. 2018, 118.)

## **2.2 Rikkihapon käyttö sellunvalmistuksessa**

Rikkihappo on ominaisuuksiltaan väkevä ja termisesti stabiili happo. Väkevänä epäorgaanisena aineena sillä on hapettava vaikutus. Näiden ominaisuuksien ansiosta rikkihapolla on monia käyttökohteita selluntuotannossa. (Knowpulp 2021a.)

Rikkihappoa käytetään massan pH-arvon säätöön valkaisuprosessissa, jossa valkaisukemikaalien tehokkuus on riippuvainen massan sopivasta pH-arvosta (Knowpulp 2021a).

Kloorioksidia käytetään sellunvalkaisuun ja se on epästabiliutensa takia valmistettava käyttökohteen läheisyydessä. Kloorioksidia voidaan valmistaa pelkistämällä natriumklooraattia voimakkaasti rikkihappoisessa liuoksessa. (Knowpulp 2021a.)

Happohydrolyysissä lehtipuusellusta poistetaan valkaisun kannalta ongelmalliset heksenuronihapporyhmät käsittelemällä lehtipuusellun kemiallinen massa rikkihapolla. Rikkihappokäsittelyllä voidaan myös parantaa valkaisutehokkuutta. (Knowpulp 2021a.)

Havupuiden sulfaattikeitossa muodostuu rasvahappojen natriumsuoloja eli suopaa. Suovan poistaminen prosessista on prosessin toimivuuden kannalta välttämätöntä. Puhdistetusta ja homogenisoidusta suovasta voidaan rikkihapolla käsittelemällä erottaa syntynyt raaka

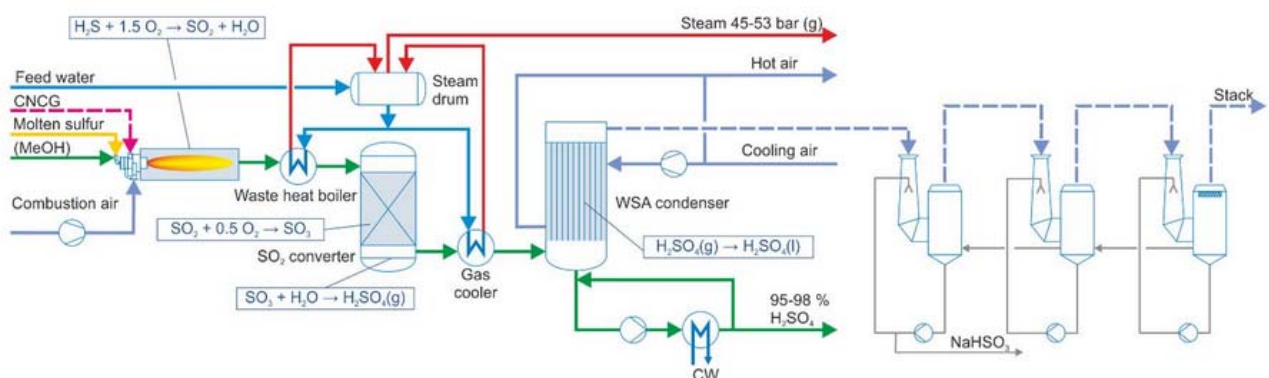
mäntyöljy. Mäntyöljyllä on monia eri käyttökohteita mm. maali-, lakka- ja painoväriteollisuudessa ja se on teollisen sellunkeiton tärkein sivutuote. (Knowpulp 2021a.)

## 2.3 WSA-prosessi

Rikkihapon valmistus sellutehtaan WSA-laitoksessa (ks. kuva 1) alkaa prosessikaasun esilämmittämällä sopivaan lämpötilaan katalyyysiä varten. Mikäli prosessiin tuleva rikkipitoinen syöte ei ole puhdasta rikkiä, täytyy syöte hapettaa polttamalla, jonka jälkeen prosessikaasu viillennetään oikeaan lämpötilaan. Katalyyysimuunnos rikkidioksidista rikkitrioksidiksi tapahtuu  $\text{SO}_2$ -muuntimessa. Muunnoksen jälkeen prosessikaasu jäähdytetään ja rikkitrioksidi reagoi vesihöyryn kanssa muodostaen kaasumaista rikkihappoa. Lopuksi prosessikaasu muutetaan nestemäiseksi rikkihapoksi lauhduttamalla. (Andritz 2021b.)

Prosessikaasun jäähdytyksessä, lauhdutuksessa sekä katalyyysissä muodostuva lämpö kerätään talteen ja sitä voidaan käyttää esimerkiksi polttoilman lämmittämiseen, höyryn ylikuumenemiseen sekä se voidaan syöttää laitoksen höyryjärjestelmään (Haldor Topsoe 2021b).

Koko prosessi polttimolta lauhdutukseen suoritetaan hapon kastepisteen lämpötilan yläpuolella, jolloin ei ole vaaraa rikin tiivistymisestä kesken prosessin. Tämän takia prosessin laitteisto voidaan rakentaa standardimateriaaleista ilman korroosion riskiä. (Andritz 2021b.)



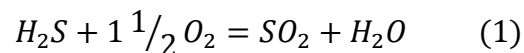
Kuva 1. WSA-Laitos (Forest BioFacts 2021c).



### 2.3.1 Poltin

Sellutehtaan WSA-riikkihappolaitoksessa CNCG-kaasusta sekä apupolttoaineista luodaan rikkidioksidipitoista prosessikaasua polttamalla kaasu poltinkammiossa. Apupolttoaineena voidaan käyttää esimerkiksi metanolia, kiinteää rikkiä ja nestekaasua. Palamiseen tarvittava ilma kerätään ulkoilmasta ja se toimitetaan polttimelle erillisellä polttoilmapuhaltimella. Palamisilman virtauksen säätämisellä on tärkeä rooli polttimen toiminnan kannalta, sillä oikeilla säädöillä lämpötila poltinkammiossa saadaan nostettua lähes 1000 °C:een asti. Lisäksi palamisilman säädöllä huolehditaan syntyvän prosessikaasun happipitoisuudesta ja palamisprosessin riittävästä hapen saannista. Apupolttoaineita, kuten metanolia ja nestekaasua, voidaan käyttää polttimen tasaisen palamisprosessin ylläpitämiseen, kun taas puhdasta rikkiä käyttämällä voidaan lisätä rikkihapon tuottoa. (Forest BioFacts 2021c.)

Poltinkammiossa tapahtuva rikkipitoisen polttoaineen oksidointi rikkidioksidiksi on kuvattu kaavassa (1).



(Andritz 2021b).

Kaasupolttimet jaetaan usein polttoaineen ja palamisilman sekoitussuhteiden perusteella kahteen poltintyyppiin: atmosfääripolttimiin sekä puhallinpolttimiin. Atmosfääripolttimessa palamiseen tarvittava ilma imetään ympäristöstä kattilan vedon sekä polttokaasun virtauksen avulla. Puhallinpolttimessa palamisilma sekoitetaan poltettavaan kaasuun puhaltimen avulla. Teollisuudessa käytetään lähes aina puhallinpoltinta sen hyötysuhteen sekä tarkkojen säätämisominaisuuksien takia. Puhaltimen avulla tulipesään saadaan säädettyä palamisen kannalta optimaaliset virtausolosuhteet sekä painetaso. Puhallinpoltin saadaan toimimaan pienilläkin ilmakertoimilla. (Raiko ym. 1995, 378–379.)

Kaasupolttimissa on hyvät säätöominaisuudet, säädöt on helppo automatisoida ja niillä voidaan saavuttaa hyvä säätösuhde. Kaasupolttimen säädettävyyys riippuu pääosin polttimen rakenteesta sekä valvontalaitteiden laadusta. Suurin säätöaluetta rajoittava tekijä on palamisen stabiiliuden heikkeneminen. Palamisen stabiiliuteen voidaan vaikuttaa polttimen palopään muotoilulla, kaasusumuttimien rei'ityksellä sekä palamisilman hallitulla puhaltamisella poltinkammioon. (Raiko ym. 1995, 378–380.)

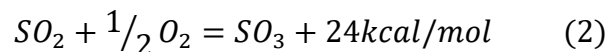
Palamisilmajärjestelmän tehtävä on jakaa palamiseen tarvittava ilma polttimeen tulipesään niin, että saadaan optimoitua polton tehokkuus (Huhtinen 2008, 40–42). Tarvittava ilmamäärä on suhteessa polttimeen syötettävien polttoaineiden määrään sekä haluttuun syntyneiden savukaasujen happipitoisuuteen (Halttunen ym. 2007, 178–179).

Täydelliseen palamiseen tarvittavan ilmamäärän sekä palamisesta syntyvien savukaasujen määrän ja pitoisuuksien laskemiseksi tarvitaan tarkat tiedot polttoaineen sekä palamisilmana käytettävän ilman koostumuksesta. Polttoaineet muodostuvat yhdestä tai useammasta palavasta komponentista, joiden reaktioyhtälöitä tarkastelemalla voidaan laskea polttoilman teoreettinen, eli stökiometrinen ilmantarve. Polttoaineen osien reaktioyhtälöiden avulla voidaan myös laskea palamisessa syntyvien reaktiotuotteiden määrä. Käytännössä stökiometrinen ilmamäärää ei riitä polttoaineen täydelliseen palamiseen. Todellisen ja stökiometrisen ilmamäärän suhdetta kuvaamaan käytetään ilmakerrointa ( $\lambda$ ). Joissain tapauksissa käytetään niin sanottua yli-ilmakerrointa, joka kuvaa polton stökiometrisen ilmamäärän ja todellisen ilmamäärän erotuksen suhdetta teoreettiseen ilmamäärään ( $\lambda-1$ ). (Raiko 1995, 30–33.)

### 2.3.2 Katalyyysi

Poltinkammiossa syntyvä prosessikaasu johdetaan hukkalämpökattilaan, jossa se viilennetään sopivaan lämpötilaan katalyyysiä varten. Hukkalämpökattilassa olevan prosessikaasun lämpötilaa säädetään kattilan sisäistä ohituskanavaa hyödyntäen. Kattilassa vapautuva lämpö kerätään talteen höyrynä. (Forest BioFacts 2021c.)

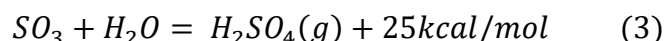
Prosessikaasu hapetetaan SO<sub>2</sub>-muuntimessa katalyyysillä. SO<sub>2</sub>-muuntimessa on yksi tai useampi muunnosvaihe, eli peti, joka on täytetty muunnokseen tarvittavalla katalyytillä. Rikkidioksidin hapettuminen rikkitrioksidiksi on esitetty kaavassa (2).



(Forest BioFacts 2021c.)

Pedissä syntyvä reaktio on kemiallinen tasapainoreaktio. Se on riippuvainen prosessikaasun lämpötilasta sekä pitoisuudesta. Tästä syystä prosessikaasun lämpötilan säätäminen on tärkeää ennen jokaista petiä. Prosessikaasu tulee SO<sub>2</sub>-muuntimen ensimmäiselle pedille hukkalämpökattilalta 410–430 °C lämpötilassa. Korkean muunnosasteen saavuttamiseksi

prosessikaasua jäähdytetään lämmönvaihtimella petien välissä. Viimeisen pedin jälkeen rikkitrioksidipitoinen prosessikaasu jäähdytetään 260–290 °C lämpötilaan ja se kostutetaan vesihöyryllä rikkihappohöyryksi. Rikkitrioksidipitoisen prosessikaasun yhdistyminen vesihöyryyn on esitetty kaavassa (3).



(Forest BioFacts 2021c.)

Kemiallisen reaktion tasapainoasemaan voidaan vaikuttaa muuttamalla olosuhteita, joissa reaktio tapahtuu. Jos tasapainossa olevan reaktion olosuhteita, kuten lämpötilaa tai aineen pitoisuutta, muutetaan reaktion tasapainoasema pyrkii kumoamaan muutokset. Esimerkiksi lämpöä tuottavan reaktion lämpötilaa laskemalla edistetään reaktiota, mutta lisätään reaktioon kuluvaa aikaa. Käytännön prosesseissa tämä ongelma on ratkaistu katalyyttiä hyödyntämällä. (Hänninen ym. 2018, 99.)

Katalyyssissä kemiallista reaktiota nopeutetaan käyttämällä katalyyttiä. Katalyytin avulla pyritään löytämään reaktiotie, jonka aktivointienergia on pienempi kuin katalysoimattoman reaktion. Katalyytti regeneroituu reaktion aikana, eli ideaalisessa reaktiossa katalyytti pystyy kierrättämään reaktiota loputtomasti. Todellisuudessa katalyytit kuluvat joko hajoamisen tai myrkyttymisen takia. Teknologisesti tärkeät katalyytit ovat nesteitä tai kiinteiden aineiden pintoja. Jos katalyytti ja reaktioon osallistuvat lähtöaineet ovat samassa olomuodossa, puhutaan homogeenisestä katalyyysistä, ja jos reaktioon osallistuu useita olomuotoja, puhutaan heterogeenisestä katalyyysistä. Rikkihapon valmistus on heterogeeninen katalyyssi. Heterogeenisessä katalyyysireaktiossa kaasumainen lähtöaine absorboituu katalyytin pintaan ja muuttuu reaktiotuotteeksi. Muunnoksen jälkeen reaktiotuote irtaoo katalyytin pinnalta. (Hänninen ym. 2018, 277–281.)

### 2.3.3 Lauhdutus

SO<sub>2</sub>-muuntimelta prosessikaasu johdetaan lauhduttimelle. Lauhduttimessa prosessikaasu johdetaan pystysuoriin lasiputkiin. Lasiputkissa olevaa prosessikaasua jäähdytetään viileää ulkoilmaa puhaltamalla, jolloin rikkihappokaasu tiivistyy lasiputkien sisäpinnalle nesteeksi ja valuu lauhduttimen pohjalle. Valmis rikkihappo kerätään lauhduttimen pohjalta ja johdetaan jäähdytyskiertoon. Lauhduttimelta lähtevässä kaasusta voi vielä löytyä pieniä määriä

rikkidioksidia. Rikkipäästöjen minimoimiseksi lauhduttimelta lähtevät savukaasut johdetaan vielä savukaasupesuriin. (Forest BioFacts 2021c.)

Jäähdytykseen käytettävä ilma lämpenee lauhduttimessa yli 200 °C lämpötilaan ja sitä voidaan hyödyntää jäähdytysilman lämmittämiseen sekä laitoksen muihin lämmitystarpeisiin kylminä vuodenaikoina. (Forest BioFacts 2021c.)

### **2.3.4 Hapon jäähdytys**

Rikkihappo poistuu lauhduttimelta noin 240 °C lämpötilassa, jonka jälkeen se jäähdytetään 70 °C lämpötilaan varastointia varten. Jäähdyttäminen tapahtuu kahdessa vaiheessa. Ensin kuuma happo yhdistetään järjestelmässä kiertävään jo jäähdytettyyn happoon ja johdetaan happosäiliöön. Happosäiliöstä happo pumpataan vesijäähdytteisen lauhduttimen läpi. Lauhduttimen jälkeen happovirrasta osa johdetaan varastoitavaksi ja loput jätetään jäähdytyskiertoon yhdistettäväksi taas kuumaan happoon. (Haldor Topsoe 2021a.) Jäähdyttämisen jälkeen valmis rikkihappo voidaan pumpata tehtaan rikkihappojärjestelmään tai se voidaan varastoida myytäväksi (Forest BioFacts 2021c).

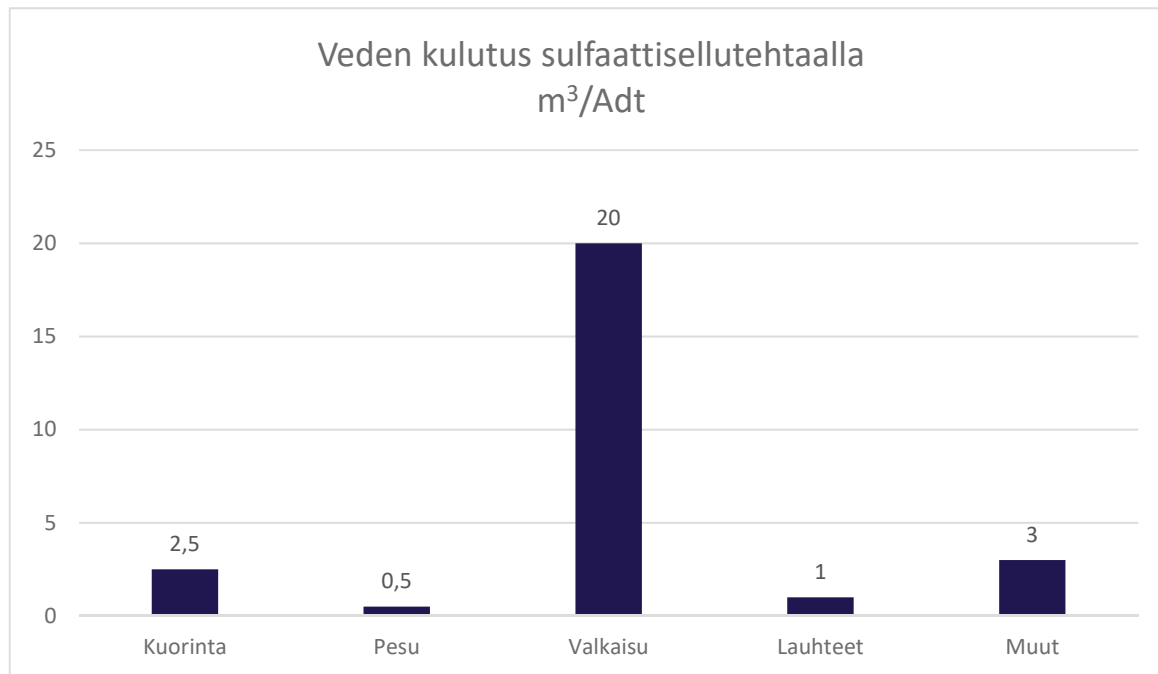
## **2.4 Yleiset laitoksien prosessit**

Kuten muutkin selluteollisuuden prosessilaitokset, myös WSA-laitos tarvitsee toimiakseen lähes jokaiselta prosessilaitokselta löytyviä yleisiä osaprosesseja ja järjestelmiä. Tällaisia ovat esimerkiksi vesi- ja höyryjärjestelmä sekä laitoksella syntyvien päästöjen käsittely. (Forest BioFacts 2021c).

### **2.4.1 Vesi- ja höyryjärjestelmä**

Sellutehtaat rakennetaan yleisesti vesistöjen rannoille, koska puhtaan raakaveden saanti on tehtaalle elintärkeää (ks. kuvio 2). Vedenkulutusta sellutehtailla on onnistuttu laskemaan merkittävästi kierrättämällä vettä. Esimerkiksi valkaisuprosesseissa käytettävää vettä voidaan hyödyntää prosesseissa, joissa veden laatuvaatimukset eivät ole niin korkeat. Joissain prosesseissa vesikiertoja on saatu kokonaan suljettua. Sama vesilitra voi kiertää tehtaalla jopa 15 kertaa. Isoimmat syyt veden käytön tehostamiselle ovat kustannussyyt sekä

ympäristömääräykset. Vettä käytetään mm. lämmitys ja jäähdytys sovelluksissa, pumppujen tiivistämiseen sekä massan pesemiseen. (Knowpulp 2021b.)



Kuvio 2. Vedenkulutus sulfaattisellutehtaalla (Knowpulp 2021b).

Prosessilaitoksella olevan höyryjärjestelmän tehtävä on tuottaa ja toimittaa oikean paineista ja oikeassa lämpötilassa olevaa prosessihöyryä sitä tarvitseville prosesseille. Laitoksen höyryjärjestelmä on usein jaettu kahteen tai kolmeen eri paineessa olevaan osaan: korkeapaine-, välipaine- ja matalapaineverkkoon. Oikeanlaisen höyryn toimittamiseksi verkoissa on höyrymuuntoventtiilit, eli reduktioventtiilit, joilla saadaan pudotettua höyrynpaine prosessien vaatimalle tasolle. Paine pudotetaan oikealle tasolle kuristamalla virtausta venttiilillä, jonka jälkeen höyryn lämpötila pudotetaan oikealle tasolle ruiskuttamalla höyryn virtauksen sekaan vettä. Veden ruiskutuksen takia höyrymäärä lisääntyy reduktion yhteydessä. (Huhtinen ym. 2008, 70.)

Laitoksen prosesseissa käytettävää vettä säilytetään syöttövesisäiliössä. Syöttövesisäiliöön ohjataan lämmönsiirtimiltä tulevat puhtaat lauhteet sekä tarvittava puhdistettu lisävesi. Vesi säilytetään syöttövesisäiliössä kiehumispisteessä, joka on yleensä 110–140 °C. Korkeasta lämpötilasta huolimatta vesi ei ala kiehua, sillä syöttövesisäiliössä ylläpidetään ilmanpainetta korkeampaa painetta. Syöttövesisäiliöstä vesi johdetaan höyrylieriölle syöttövesipumppujen avulla. (Knowpulp 2021b.) Syöttövesisäiliössä olevan veden lämmitykseen sekä syöttövesisäiliön paineistukseen käytetään muualla laitoksen prosessissa syntyvää höyryä.

Vettä lämmittämällä saadaan vedessä olevien korroosiota aiheuttavien kaasujen pitoisuudet laskettua nolleen. Hapen poistaminen on syöttöveden säilyttämisen lisäksi syöttövesisäiliön keskeinen tehtävä. (Huhtinen ym. 2008, 23.)

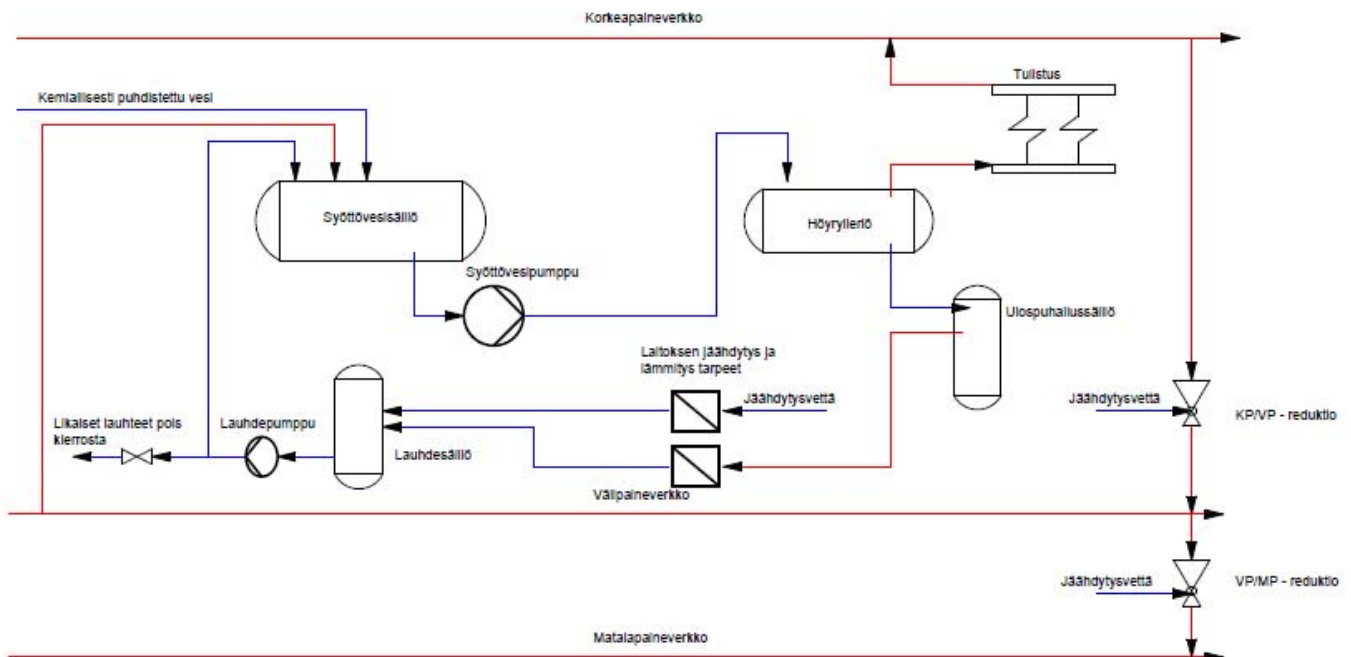
Höyrylieriössä vesi erotetaan höyrystä. Höyrylieriöstä höyry johdetaan laitoksen höyryjärjestelmään ja vesi lasketaan takaisin kiertoon. Höyry voidaan myös tulistaa ennen johtamista laitoksen höyryjärjestelmään. (Knowpulp 2021b.) Laitoksen kattilaveteen kulkeutuu jatkuvasti pieniä määriä haihtumattomia suoloja syöttöveden mukana. Epäpuhtauksien aiheuttamien ongelmien ehkäisemiseksi lieriöstä ulospuhalletaan jatkuvasti vettä, jonka määrä vastaa noin 1–2 % höyryn tuotannosta. Ulospuhallettava vesi johdetaan ulospuhallussäiliöön. Ulospuhallussäiliössä ylläpidetään matalampaa painetta kuin höyrylieriössä, jonka takia osa lieriöltä tulevasta vedestä höyrystyy. Säiliössä syntynyttä höyryä voidaan hyödyntää laitoksen lämmitystarpeisiin, koska epäpuhtaudet jäävät veteen. (Huhtinen ym. 2008, 40.)

Prosesseissa syntyneet lauhteet kerätään usein lauhdesäiliöön, josta ne pumpataan lauhdepumpuilla takaisin syöttövesisäiliöön. Palaavien prosessilauhteiden laatua valvotaan jatkuvasti mittauksilla. (Huhtinen ym. 2008, 42.) Mikäli prosessissa syntyvää lauhdevettä halutaan uudelleen kierrättää vesijärjestelmässä, tulee sen myös täyttää lisävedellä asetetut tarkat vaatimukset. Usein suojakemikaalien annostuksesta huolimatta lauhteisiin pääsee muodostumaan orgaanisia aineita ja korroosiotuotteita kuten erilaisia metallipitoisia yhdisteitä. Korroosiotuotteet voidaan poistaa lauhdevedestä erilaisilla lauhteen suodatusmenetelmillä, mutta osa lauhteista joudutaan ohjaamaan pois vesikierrosta. (Knowpulp 2021c.)

Suurilta osin suljettujen vesikiertojen käyttäminen laitoksissa kasvattaa jäähdytyksen tarvetta. Jäähdytysvetenä käytetään usein puhdistettua raakavettä. Raakavesi puhdistetaan tehtaalla joko kemiallisesti tai mekaanisesti. Jäähdytyskäytössä jo lämmennyt vettä pyritään hyödyntämään uudestaan muissa prosesseissa. Jäähdytysvedet, joita ei käytetä muissa prosesseissa, palautetaan yleensä takaisin vesistöön sellaisenaan, sillä normaalissa tilanteessa niihin ei ole päässyt jätteitä. Jäähdytysvesien laatua valvotaan ennen vesistöön palautusta erilaisilla mittauksilla. (Knowpulp 2021b.)

Vesi- ja höyryjärjestelmien korroosion hallinta aiheuttaa erityisiä vaatimuksia kierrossa olevan veden laadulle. Tämän takia laitoksella käytettävä kattilavesi on kemiallisesti puhdistettu ja siitä on poistettu metalli-ioneja ja happea. (Knowpulp 2021b.)

Vesi- ja höyryjärjestelmästä poistetaan lähes aina kovuussuolat fosfaattikäsittelyllä. Fosfaattikäsittelyssä vesi- ja höyrykiertoon annostellaan vesiliukoista fosfaattia, joka sitoo vedessä olevat kovuussuolat hienojakoiseksi lietteeksi, joka poistetaan kierrosta. Näin estetään kovuussuolojen saostuminen lämmönsiirtopinnoille. (Knowpulp 2021b.) Kuvassa 2 on esitetty esimerkki prosessilaitoksen vesi- ja höyryjärjestelmästä.



Kuva 2. Esimerkki prosessilaitoksen vesi- ja höyryjärjestelmästä.

### 2.4.2 CNCG-kaasujen käsittely

Prosessilaitoksella syntyvät väkevät CNCG-kaasut kerätään erillään laimeista DNCG-kaasuista, tarkoituksena on estää CNCG-kaasujen laimentuminen ylemmän räjähdysvaarallisen tason (UEL) alapuolelle. CNCG-kaasujen laimentumisen estämisellä mahdollistetaan niiden käyttö polttoaineena. Räjähdysvaaran takia CNCG-kaasujen käsittelyssä on vältettävä kipinäointia, tämän takia CNCG-kaasun kuljettamiseen käytetään höyryejektoreja tai tyhjiöpumppuja. Kaasun takaisinvirtauksen estämiseksi kaasua kuljetetaan vesilukkojen läpi. (Forest BioFacts 2021a.) CNCG-kaasun keräilyputkistot on rakennettava siten, että vuotoilman pääsy putkistoon on estetty. Lisäksi putkistot on varustettava turvallisuuslaitteilla kuten pisaranerottimilla ja liekinestimillä. Putkistot ovat myös maadoitettava staattisen sähköön varalta. (KnowPulp 2021d.)

### 2.4.3 Hiukkasten poisto

Prosessilaitokselta poistuvien savukaasujen hiukkasten poistoon on monia erotintyypppejä, kuten sähkösuodattimet, dynaamiset erottimet, kuitusuodattimet sekä pesurit (Halttunen 2007, 49).

Sähkösuodattimessa savukaasut varataan sähköisesti kuljettamalla ne suodattimen ionisointivöhykkeen läpi, jonka jälkeen varautuneet hiukkaset erotetaan kaasuvirrasta voimakkaassa sähkökentässä (Halttunen 2007, 49). Hiukkaset irrotetaan sähkösuotimen keräyslevyiltä mekaanisesti ravistamalla tai huuhtomalla (KnowPulp 2021d).

Yleisin dynaaminen erotusmenetelmä on sykloni. Syklonissa pölypitoinen kaasu saatetaan pyörivään liikkeeseen, jolloin pölyhiukkaset sinkoutuvat syklonin seinille ja valuvat alas kerättäväksi. Kuitusuodattimissa kaasut johdetaan suodatinkankaan läpi. Suodatinkankaaseen kertynyt pöly poistetaan kangasta ravistamalla paineilmapulsseilla tai ultraäänellä. (Halttunen ym. 2007, 49.)

Savukaasupesurissa kaasuihin sekoitetaan pieniksi pisaroiksi hajotettua pesunestettä. Sekoituksessa pölyhiukkaset muodostavat veden kanssa kasvavia pisaroita, jotka erotetaan kaasuvirrasta pisananerottimilla. (Halttunen ym. 2007, 49.) Pesurissa pölyn sitomiseen käytettävä pesuliuos lämpee ja savukaasut jäähtyvät. Joissain tapauksissa savukaasupesurin ensisijainen tehtävä onkin tuottaa lämmintä prosessivettä ja vasta toissijaisena poistaa jäännöspöly savukaasuista. Pesurin jälkeen puhdistetut ja jäähdytetyt savukaasut johdetaan ulos savupiipusta. (KnowPulp 2021d.)

Savupiipun tehtävä on luoda luontaista vetoa ja jakaa savukaasut laajalle alueelle. Luonnolliseen vetoon vaikuttaa ulkoilman ja piipussa olevien savukaasujen tiheyksien ero, piipunkorkeus sekä virtausvastus. Piipun korkeudelle asetetaan alaraja, että sieltä tulevat savukaasut ehtivät laimentua ennen joutumista asutusalueelle ja kasvustoihin. Alarajaan vaikuttaa savukaasun päästöt, päästörajat, päästöpitoisuus ympäristössä, sekä lähellä sijaitsevien rakennusten korkeus. (Halttunen ym. 2007, 138–139.)



### 3 AUTOMAATIOSUUNNITTELUN LAATU JA ELINKAARI

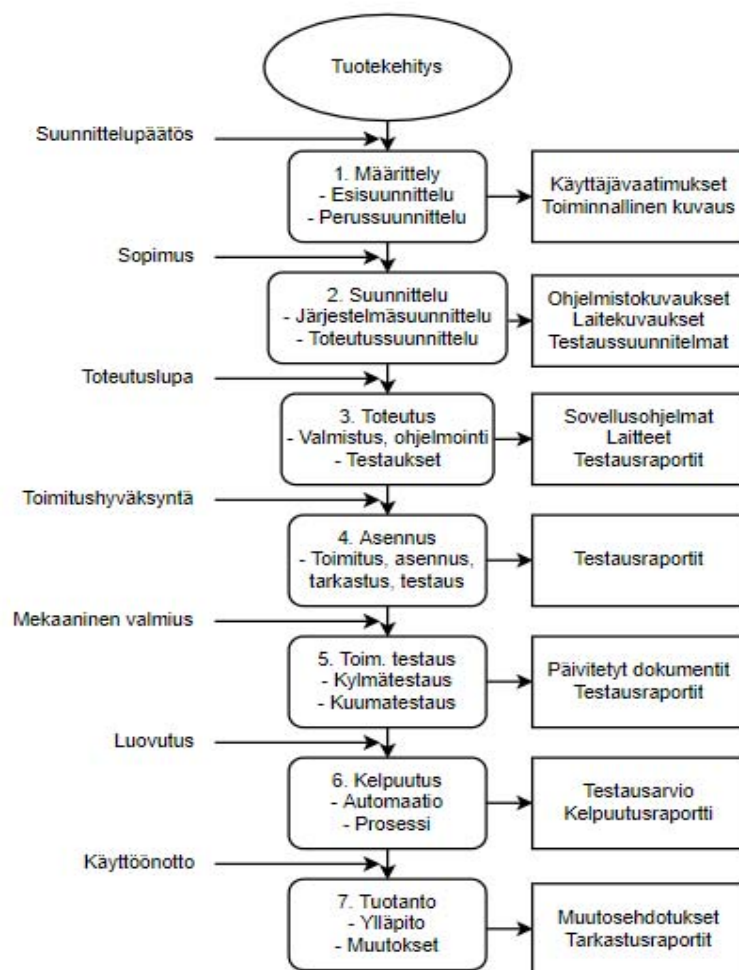
Tuottavuus, laatu, turvallisuus ja ympäristöystävällisyys ovat keskeisiä vaatimuksia prosessiteollisuuden tuotannossa. Automaatio on noussut keskeiseen osaan näiden vaatimusten täyttämässä. Jatkuvasti monimutkaistuvat tuotantoprosessit sekä kasvavat vaatimukset asettavat myös automaation laadulle suuria paineita. (Ajo yms., [viitattu 27.2.2021], 5–6.)

Automaatiossa osa laatuominaisuuksista voidaan luokitella pakollisiksi, jos niiden puuttuminen aiheuttaa asiakkaassa tyytymättömyyttä. Automaatiojärjestelmän suunnittelu pelkästään asiakkaan vaatimusten mukaan ei aina riitä, sillä osa tarpeista voi lisätä asiakkaan tyytyväisyyttä myöhemmin, vaikka asiakas ei olisikaan osannut määritellä tarvetta hankintavaiheessa. Haasteena onkin molemmille osapuolille sopivan laatutason löytäminen. Useilla tuotannon aloilla vaatimuksia laadun osalle tulee myös viranomaisten taholta. (Ajo yms., [viitattu 27.2.2021], 6–7.)

Suunnittelussa lähtökohtana on oltava prosessin sekä loppukäyttäjän tarpeet. Prosessin kannalta kriittisten toimintojen ja ominaisuuksien tunnistaminen on keskeisessä osassa suunnittelua, sillä käyttäjän tarpeiden tyydyttämiseen luodut toiminnot lisäävät aina kustannuksia. Toimintojen suunnittelussa onkin oleellista hyötyjen ja kustannusten vertailu. Oikein määritellyt toiminnot, toteutuksen suorituskyky, käyttövarmuus sekä järjestelmän tietoturva ovat edellytyksenä automaatiosta saatavalle hyödyille. (Ajo yms., [viitattu 27.2.2021], 8–11.)

Automaation laatu perustuu suunnittelun systemaattisiin toimintatapoihin sekä valvontaan ja lopputuloksen testaamiseen. Kattava dokumentointi, ennakkosuunnitelmat sekä suunnittelun rinnalla etenevät laadunvarmistustoimet ovat keskeisiä toimenpiteitä suunnittelun laadun varmistamiseksi. Monimutkaisten järjestelmien suunnittelussa hallittujen laadunvarmistustoimenpiteiden merkitys kasvaa. Suunnittelussa laadunvarmistuksella tarkoitetaan toimintaa, jolla pyritään osoittamaan, että laatuvaatimukset täyttyvät. Laadunvarmistustoimia suorittavan tahon pitäisi olla riippumaton tarkastettavan kohteen suunnittelijasta tai toteuttajasta, toimija voi olla esimerkiksi erillinen organisaatio tai ryhmä. Pienissä yrityksissä myös tarkastettavasta projektista riippumattomat suunnittelijat voivat tarkistaa dokumentteja. (Ajo yms., [viitattu 27.2.2021], 23–24.)

Usein monimutkaisten järjestelmien kohdalla suunnitteluprosessin merkitys kasvaa testaamisen kustannuksella. Tästä syystä on määritelty erilaisia elinkaarimalleja, joiden ympärille järjestelmän suunnittelun tulisi rakentua. Vaativien automaatiojärjestelmien suunnitteluun yleisesti käytetyn elinkaarimallin vaiheet ovat nähtävissä kuvassa 3. Automaatiojärjestelmä voidaan luokitella vaativaksi, jos prosessiin sisältyy vaaratekijöitä, tuotannossa on suuret laatuvaatimukset tai järjestelmän hankintahinta on suuri. (Ajo yms., [viitattu 27.2.2021], 16–17.)



Kuva 3. Automaatiojärjestelmän elinkaarimalli (perustuu Ajo yms., [viitattu 27.2.2021], 17).

Määrittelyvaiheessa automaatiojärjestelmän toiminnot ja vaatimukset kuvataan käyttäjän kannalta mahdollisimman tarkasti. Määrittelyvaihe voidaan jakaa kahteen osaan: esisuunnitteluvaiheeseen ja perussuunnitteluvaiheeseen. Esisuunnittelussa asiakas määrittelee järjestelmän vaatimukset ja luo kelpuutussuunnitelman. Esisuunnitteluvaiheessa myös arvioidaan järjestelmän hyödyt sekä kustannukset. Perussuunnittelussavaiheessa

luodaan prosessin ajotapojen, toimintojen ja toteutusperiaatteiden kuvaukset. Onnistuneen määrittelyvaiheen lopputulos on allekirjoitettu toimitussopimus. (Ajo yms., [viitattu 27.2.2021], 18.)

Suunnitteluvaihe alkaa sopimuksen solmimisen jälkeen. Suunnitteluvaiheessa tarkennetaan perussuunnitteluvaiheessa tehtyjä suunnitelmia siten, että järjestelmän toteutus voidaan aloittaa. Suunnitteluvaiheessa vastuu on suurilta osin järjestelmän toimittajalla. (Ajo yms., [viitattu 27.2.2021], 19.)

Toteutusvaiheessa automaatiojärjestelmän toimittaja valmistaa, kokoaa ja testaa järjestelmän. Toteutusvaiheen aikana järjestelmälle suoritetaan erilaisia katselmuksia ja testauksia. Toteutusvaiheen keskeinen osa on tehdastestit (FAT, Factory acceptance testing), joiden onnistuttua asiakas ja toimittaja solmivat toimitusluvan. Toimitusluvan saatuaan toimittaja voi alkaa siirtää järjestelmää asennuspaikalle. (Ajo yms., [viitattu 27.2.2021], 19.)

Asennusvaiheessa testattu järjestelmä kuljetetaan ja asennetaan kokonaisuudessaan asiakkaan tiloihin. Asennusvaiheen päätteeksi suoritetaan piirikohtainen laitteistotestaus, jossa todennetaan järjestelmän toiminta sekä suunnitelmien mukaisuus. Laitteistotestauksen jälkeen voidaan aloittaa toiminnallinen testaus, joka koostuu kylmä- ja kuumetestauksesta. Kylmätestauksessa laitoksen osaprosessit ja yksittäiset piirit testataan vaarattomia prosessiaineita käyttämällä. Kuumetestaus suoritetaan kylmätestauksen jälkeen todellisilla prosessissa käytettävillä kemikaaleilla. Kuumetestauksessa testataan prosessin laajempien kokonaisuuksien toiminta. Testauksien jälkeen järjestelmä on valmis luovutettavaksi asiakkaalle. (Ajo yms., [viitattu 27.2.2021], 20–21.)

Kelpuutusvaiheessa asiakas osoittaa projektin dokumentaation sekä mahdollisten lisätestien avulla, että järjestelmä on suunniteltu ja toteutettu vaatimusten mukaisesti. Automaation loppukelpoisuus osoittaa prosessia ohjaavan teknisen järjestelmän kelpoisuuden, eikä se kohdistu itse tuotantoon. Prosessikelpuutusvaiheessa osoitetaan prosessissa syntyvien tuotteiden vastaavan vaatimuksia. Kun kelpuutusvaihe on suoritettu hyväksytysti, siirrytään tuotantovaiheeseen. Tuotantovaiheessa järjestelmää käytetään niiden tuotteiden valmistukseen mihin se on suunniteltu. Automaatiojärjestelmän elinkaari jatkuu myös tuotantovaiheessa järjestelmän ylläpidon sekä mahdollisten muutosten myötä. (Ajo yms., [viitattu 27.2.2021], 18–23.)

## 4 PROSESSIAUTOMAATIO JA SÄÄDÖT

Lähes kaikki teolliset prosessit tarvitsevat ainakin jossain määrin säätöjä. Olivatpa ne sitten operaattorin manuaalisesti tekemiä toimenpiteitä tai automaattisen säätimen tekemiä ohjauksia. (Savolainen & Vaittinen 2007, 13.) Prosessilaitoksen säätötehtävät voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen: säätöön, ohjaukseen sekä optimointiin. Säädön tavoitteena on saada mitattava tai laskennallinen prosessisuure tiettyyn asetusarvoon. Ohjaukset ovat yksittäisiä toimenpiteitä, joiden toteutumista operaattori yleensä valvoo ainakin jossain määrin. Optimointi on säädöille optimaalisten asetusarvojen määrittäminen kehittyneiden prosessimallien perusteella. (Halttunen ym. 2007, 147.)

Säätöjärjestelmien tärkeimmät tehtävät prosessiteollisuudessa ovat prosessin muutoksiin ja säädettävän prosessin ulkopuolisiin häiriöihin mukautuminen ja niiden vaikutusten eliminointi. Tämä johtuu siitä, että prosessin säädettävät suuret ovat usein riippuvaisia toisistaan tai vallitsevista oloista, esimerkiksi ulkoilman lämpötilasta. Säätöjärjestelmää suunnitellessa tietämys säädettävästä prosessista on oltava mahdollisimman laaja. Prosessin käsittelyn yksinkertaistamiseksi prosessit voidaan jakaa pienempiin osiin, eli osaprosesseihin, jotka taas voivat sisältää säätöpiirejä. (Savolainen & Vaittinen 2007, 13–15.)

Säätöpiirit voidaan jakaa avoimiin ja suljettuihin piireihin. Suljetussa säätöpiirissä prosessia ohjaavan säätimen ohjaussignaali perustuu säädettävän suureen mittauksen takaisin lähettämän informaation, eli takaisinkytkennän ja säädettävän suureen asetusarvon väliseen erotukseen. Avoimessa järjestelmässä järjestelmää ohjataan ilman takaisinkytkentää. (Savolainen & Vaittinen 2007, 13–15.)

Säätöjärjestelmät ovat lähes aina dynaamisia. Järjestelmä on dynaaminen, jos sen suuret muuttuvat ajan suhteen. Dynaamisen säätöjärjestelmän suunnittelussa huomioon otettavia asioita ovat järjestelmässä esiintyvät aikavakio ja viive. Järjestelmän aikavakio voidaan määrittellä kuvaamaan sitä aikaa, missä tulosuureen muutoksesta on katettu 63 %. Järjestelmän viive taas vastaa aikaa, mikä kuluu tulosuureen muutoksesta ensimmäiseen lähtösuureen muutokseen. Järjestelmän toimilaitteilla ja mittauksilla voi myös olla omat aikavakiionsa ja viiveensä, jotka on otettava huomioon suunnittelussa. (Savolainen & Vaittinen 2007, 22–23.)

Prosessilaitoksien pääautomaatiojärjestelmänä käytetään yleensä digitaalista hajautettua automaatiojärjestelmää eli DCS-järjestelmää. DCS toteuttaa suurimman osan laitoksen säädöistä, valvonnasta ja ohjauksista. (Halttunen ym. 2007, 185.) Koko laitoksen automaatiota ei aina toteuteta yhdessä ainoassa järjestelmässä, vaan laitoksen toimintojen toteutus voidaan jakaa itsenäisiin osaprosessikohtaisesti hajautettuihin prosessiasemiin. Prosessiasemat sijaitsevat yleensä automaatiotilassa, mutta niiden I/O-yksiköt voidaan hajauttaa kauemmas laitoksella oleviin tiloihin ja liittää prosessiaseman keskusyksikköön kenttäväylää hyödyntäen. (Halttunen ym. 2007, 191.)

Automaatiojärjestelmän konfiguroinnin pohjana on usein graafisilla symboleilla esitetyt periaatteelliset säätökaaviot, joilla kuvataan säätöjärjestelmän toimintaa. Periaatteelliset säätökaaviot laaditaan perussuunnitteluvaiheen aikana. (Halttunen ym. 2007, 197.)

#### **4.1 Mittausten käsittely**

Säädettävän prosessin ymmärtämiseen sekä tarkkaan säätämiseen tarvitaan tarkkoja mittaustietoja. Vasta kun prosessi tunnetaan, sitä voidaan ohjata säätöjen avulla haluttuun tilaan. Mittauksilla voidaan myös varmistaa prosessin turvallisuus niin ihmiselle kuin ympäristölle. Säädettävän järjestelmän oikean toiminnan ja laadun varmistamiseksi joudutaan käyttämään usein mittauksia, jotka eivät ole prosessin säätöjen kannalta välttämättömiä. Erilaisilla mittauksilla voidaan myös valvoa laitteiden ja instrumenttien elinkaaren vaiheita. (Aalto university 2015, 2–6.)

Teollisuuden mittauslähettimissä yleisimmin käytetty standardiviesti on 4–20 mA:n virtaviesti, joka muodostetaan lähettimessä kuvaamaan mitattavan suureen muutoksia. Automaatiojärjestelmässä analoginen virtaviesti muunnetaan digitaaliseen muotoon, jonka jälkeen se suodatetaan signaalissa esiintyvän kohinan tai häiriöiden vähentämiseksi. Suodatettu signaali skaalataan ja muutetaan laskentayksiköiksi. Mittaustarkkuuden parantamiseksi mittaussignaali tulisi skaalata mahdollisimman tarkasti mitattavan suureen muutosalueelle. Mittausten käsittelyyn kuuluu myös erilaiset mittaussignaalin jalostukseen kuuluvat toiminnot, kuten mittauksen lineaarisointi, mielekkyyden tarkistus ja ristikkäisvaikutusten kompensointi. On tapauksia, jolloin mittaussignaali ei ole lineaarisesti verrannollinen mitattavan suureen muutoksiin. Mikäli näiden suureiden epälineaarisuus tunnetaan, voidaan mittaussignaali muuntaa laskukaavoilla lineaariseen muotoon. Jos

mittaussignaalin epälineaarisuus ei ole täysin tunnettu tai mittaussignaalin muuntamiseen tarvittava kaava olisi liian monimutkainen, voidaan mittaussignaalin epälineaarisuus kompensoida vertaamalla signaalin arvoa taulukoituihin arvoihin. (Aalto university 2015, 2–6.)

#### 4.1.1 Suodatus

Signaalin suodattamisen tarpeellisuus ja laajuus on otettava huomioon automaatiojärjestelmää suunnitellessa. Signaalin suodatus voidaan suorittaa mittauslähettimessä, automaatiojärjestelmän I/O-kortilla, ristikytkennässä tai automaatiojärjestelmän ohjelmassa algoritmilla. Häiriöiden aiheuttamat äkilliset nousut signaalissa moninkertaistuvat PID-säätimen derivoivassa osassa ja voivat näin aiheuttaa suuria ongelmia prosessin säätämisessä sekä säätimen virittämisessä. Mittaussignaalin häiriöiden poisto vähentää myös jatkuvia muutoksia säätimen ohjaussignaalisissa ja poistaa häiritsevät huiput mittauksien trendikuvaajista. Datan suodatuksella voi olla myös negatiivisia puolia. Liian tehokkaalla suodatuksella voidaan menettää informaatiota nopeasti muuttuvissa prosesseissa sekä prosessiin vaikuttavat äkilliset häiriöt voivat vääristyä tai jäädä kokonaan huomaamatta. Signaalin suodattaminen myös lisää aina mittauksen käsittelyn viivettä. Signaaleiden suodattamiseen on useita eri menetelmiä, joita voidaan hyödyntää erilaisten häiriöiden, kuten kohinan tai poikkeamien poistamiseen tai vähentämiseen. (Hrankowsky, Alford & Rhinehart., [viitattu 20.1.2021].) Signaalin suodattamisen erilaisiin menetelmiin ei tässä työssä keskitytä, koska periaatesuunnittelun kannalta on oleellista tietää suodatuksen käytön hyödyt ja haitat järjestelmälle.

#### 4.1.2 Virtausmittausten käsittely

Useimmat virtausmittarit ilmoittavat virtauksen tilavuusvirtana. Mikäli virtaus halutaan ilmoittaa massavirtana (kg/h) tarvitaan tietoa virtaavan aineen tiheydestä. Tieto virtaavan aineen tiheydestä on tarpeen myös kaasujen virtaamista mitattaessa, sillä kaasut puristuvat kokoonpaineen vaikutuksen alla. Kaasujen virtausta mitattaessa onkin otettava huomioon kaasun kokoonpuristumisen takia muuttuneen tiheyden vaikutus kaasun virtausmäärään. Ideaalikaasun tilanyhtälöä hyväksikäyttämällä saadaan laskettua kaasun tiheys standardiolosuhteissa. Laskelma kaasun tiheydelle  $\rho$ , hyödyntämällä mitattua lämpötilaa  $T_2$  ja mitattua painetta  $p_2$  on esitetty kaavassa (4).

$$\rho = \rho_0 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} \quad (4)$$

, missä  $\rho_0$  = ilmakehän paine, 101,325 kPa

$p_1$  = referenssi paine

$T_1$  = referenssi lämpötila. (Halttunen ym. 2007, 87–88.)

Ideaalikaasuyhtälö ei täysin päde reaalikaasuilla. Yhtälöön voidaan lisätä reaalikaasun kokoonpuristuvuusluku  $K$ . Kaavassa (5) on esitetty kaasuyhtälö reaalikaasuille.

$$\rho = \rho_0 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2 K} \quad (5)$$

(Halttunen ym. 2007, 87–88.)

Virtauksen mittausta voidaan suorittaa myös paine-eroa hyödyntämällä, jolloin mittaus perustuu virtauksen kuristamiseen kuristuselimellä ja kuristuselimessä muuttuvan paineen mittaamiseen. Myös paine-eroon perustuvassa virtausmittauksessa virtaavan aineen tiheys on otettava huomioon. Kun kuristuselin on mitoitettu käyttäen virtaavan aineen tiheyttä  $\rho_1$  lämpötilassa  $T_1$  ja paineessa  $p_1$ , voidaan paine-eroa  $\Delta p$  vastaava massavirtaus laskea kaavalla (6).

$$Q_{m1} = \frac{1}{4} \alpha \epsilon \pi D^2 \beta^2 \sqrt{2 \Delta p \rho_1} \quad (6)$$

, missä  $\alpha$  = purkauserroin

$\epsilon$  = laajennustekijä

$\beta$  = putken ja kuristuselimen halkaisijasuhde. (Halttunen ym. 2007, 87–88.)

Kun lämpötila vaihtuu mitattuun arvoon  $T_2$  ja paine arvoon  $p_2$ , voidaan hyödyntää tiheyden laskentaan käytettyä kaavaa (4) ja laskea muuttuneessa tilanteessa olevaa paine-eroa vastaava massavirta kaavalla (7).

$$Q_{m2} = \frac{1}{4} \alpha \in \pi D^2 \beta^2 \sqrt{2 \Delta p \rho_1 \frac{T_1 P_2}{T_2 P_1}} \quad (7)$$

(Halko ym. 1990, 102-103.)

Kun tiedetään, että paine-ero  $\Delta p$  on sama kummassakin kaavassa (6) ja (7), massavirtauksien yhtälö kuristuselimen molemmissa kohdissa voidaan kirjoittaa kaavassa (8) esitettyyn muotoon.

$$Q_{m2} = Q_{m1} \sqrt{\frac{T_1 P_2}{T_2 P_1}} = r_k Q_{m1} \quad (8)$$

, missä  $r_k$  = korjauskerroin. (Halko ym. 1990, 102-103.)

Korjauskertoimella  $r_k$  voidaan yksinkertaisesti korjata virtausmittauksilla saatuja tuloksia todellisuutta vastaavaksi. Kaava (8) soveltuu myös tulistetun höyryn virtauksen korjaamiseen. (Halko ym. 1990, 103.)

Paineen vaikutus nesteiden tiheyteen on merkityksetön. Lämpötilan suuret muutokset sen sijaan voivat vaikuttaa nesteiden tiheyteen. Tästä syystä nesteiden virtausta mitattaessa on lämpötilan vaikutus otettava huomioon. Kun tiedetään nesteen tiheys  $\rho_1$  lämpötilassa  $T_1$ , voidaan laskea nesteen tiheys  $\rho_2$  lämpötilassa  $T_2$  kaavalla (9).

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{1 + \gamma(T_2 - T_1)} \quad (9)$$

, missä  $\gamma$  = lämpötilakerroin. (Halko ym. 1990, 102-103.)

Paine-eroon perustuvissa virtausmittauksissa myös nesteiden paine-eroa  $\Delta p$  vastaava massavirtaus  $Q_{m1}$  voidaan laskea kaavalla (6). Mitattua lämpötilaa  $T_2$  vastaavan tiheyden  $\rho_2$  avulla voidaan laskea massavirtaus  $Q_{m2}$  hyödyntämällä kaavaa (10).



$$Q_{m2} = \frac{1}{4} \alpha \in \pi D^2 \beta^2 \sqrt{2 \Delta p \rho_1 \frac{\rho_1}{1 + \gamma(T_2 - T_1)}} \quad (10)$$

(Halko ym. 1990, 102–103.)

Kun tiedetään, että paine-ero  $\Delta p$  on sama kummassakin kaavassa (9) ja (10), voidaan nesteen virtauksen korjauskero  $r_n$  määrittää kaavalla (11).

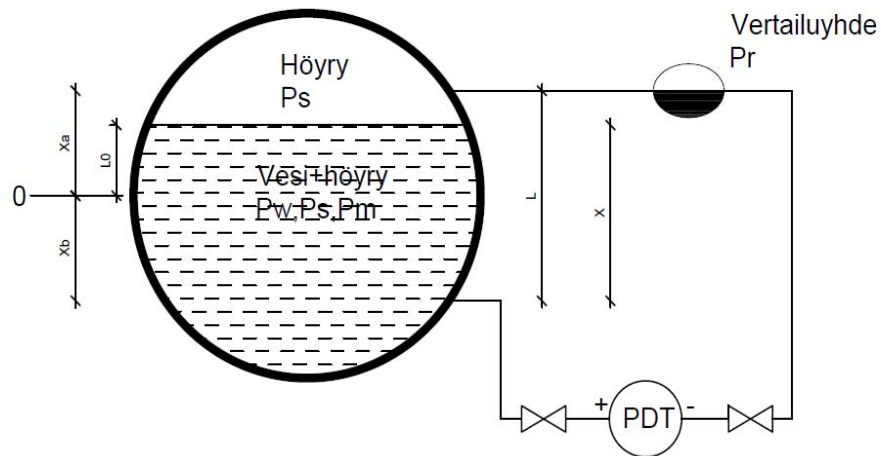
$$Q_{m2} = Q_{m1} \frac{1}{1 + \gamma(T_2 - T_1)} = Q_{m1} r_n \quad (11)$$

(Halko ym. 1990, 102–103.)

Paine-eroon perustuvissa virtausmittauksissa mittaussignaali ei ole suoraan lineaarisesti verrannollinen virtaukseen. Virtaus on verrannollinen paine-eron neliöjuureen, tällöin mittaussignaali voidaan lineaarisoida yksinkertaisesti neliöjuurimuunnoksella. Tällaisia virtausmittareita ovat mm. venturi- sekä pitot-putket. Juurtaminen voidaan suorittaa joko mittauslähettimessä tai automaatiojärjestelmän sovellusohjelmistossa. Juuritettu signaali on epätarkka lähellä 0-pistettä. Tästä syystä monissa säätösovelluksissa juurretun mittaussignaalin tippuessa alle 4 %:iin, ohjaussignaali katkaistaan kokonaan häiriöiden ehkäisemiseksi. (Knowpulp. 2021e.)

#### 4.1.3 Höyrylieriön pinnanmittauksen käsittely

Höyrylieriön liian alhainen pinta voi aiheuttaa häiriöitä laitoksen höyrykierrossa, kun taas liian korkea pinta häiritsee veden erottumista höyrystä. Pinnankorkeus mitataan usein lieriön ala- ja yläpäässä sijaitsevien mittausyhteiden väliseen paine-eroon perustuvalla menetelmällä. Höyrylieriössä mitattavan nesteen muodostavat veden neste- sekä höyryfaasit. Veden lämpötilan ja paineen vaihteluista johtuvat veden ja höyryn suhteiden muutokset tekevät pinnankorkeuden mittaamisesta haastavaa. Mittayhteiden välinen paine-ero johtuu siis pinnankorkeuden lisäksi myös kylläisen veden sekä höyryn tiheydestä. Höyrylieriön pinnanmittauksen kriittisyyden takia siihen on liitettävä kompensointi, joka ottaa huomioon veden ja höyryn tiheyksien muutokset. (Halttunen ym. 2007, 100.)



Kuva 4. Höyrylieriö (perustuu Halttunen ym. 2007, 101).

Kuvan 4 mukaisen lieriön todellinen pinnankorkeus voidaan laskea käyttämällä kaavaa (12).

$$L_o = \frac{\left(\frac{\Delta p}{g} - p_s X - p_r X\right)}{(p_w - p_s)} - Xb \quad (12)$$

, missä  $p_s$  = kylläisen höyryn tiheys lieriön paineessa

$p_w$  = kylläisen veden tiheys lieriön paineessa

$p_r$  = lauhteen tiheys vertailuyhteessä. (Halttunen ym. 2007, 100–104.)

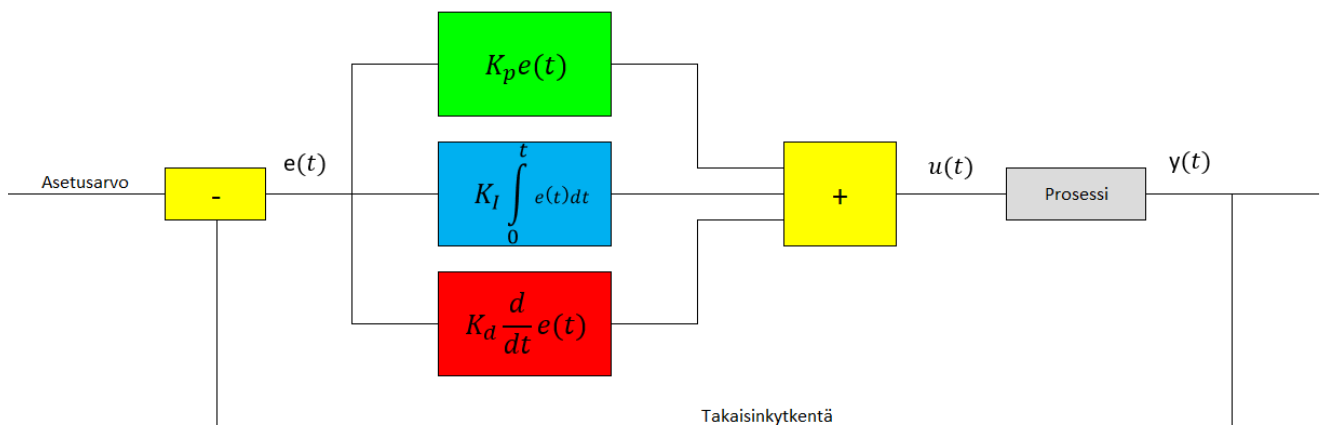
Lieriön paine mitataan lähes aina, joten paineen mittaustietoa voidaan hyödyntää kylläisen veden tiheyden arviointiin. Veden tiheyden arvioinnin suhteellinen virhe on 1 %. Veden tiheys voidaan arvioida kaavaa (13) käyttäen.

$$p_w = 0,13452 + 4,9167 \cdot 10^{-3} \cdot p_d - 1,051 \cdot 10^{-9} \cdot p_d^2 + 4,8022 \cdot 10^{-12} \cdot p_d^3 + 1,288 \cdot 10^{-16} \cdot p_d^4 \quad (13)$$

, missä  $p_d$  = lieriön paine, kPa. (Halttunen ym. 2007, 100–104.)

## 4.2 PID-Säädin

PID-säädin on teollisuudessa yleisimmin käytetty säädinrakenne. PID-säätimen tulona on säätimelle määritetyn asetusarvon, sekä säädettävän prosessisuureen mittauksesta saadun takaisinkytkennän erosuure. Säädin laskee ohjaussignaalin käsittelemällä erosuureen kolmella termillä ja summaamalla tulokset. Termit ovat proportionaali termi (P), integroiva termi (I) sekä derivoiva termi (D). Virittämisen helpottamiseksi ja säätöjärjestelmän yksinkertaistamiseksi PID-säätimestä voidaan käyttää myös yksinkertaisempia rakenteita, kuten P-, PI- ja PD-säätimiä. (Harju & Marttinen 2000, 67.) Ideaalinen PID-säätimen rakenne on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. PID-säädin lohkokaaavana esitettynä.

P-säätö on PID-säätimen perusta. P-kirjain tulee sanasta proportionaalinen eli suhteellinen. P-säätö muuttaa säätimen ulostulon ohjaussignaalia verrannollisesti erosuureeseen nähden eli lähtösignaalin arvo riippuu suoraan erosuureen arvosta. P-säätöä viritettäessä säädetään viritysparametria  $K_P$ , jota kutsutaan myös vahvistukseksi. Kaavassa (14) esitetään P-säädön algoritmi ohjaussignaali  $u(t)$ :

$$u(t) = K_P e(t) + u_0 \quad (14)$$

, missä  $K_P$  = vahvistus

$u_0$  = lähtösignaalin asetettu vakiotaso hetkellä  $t = 0$

$e(t)$  = erosuure. (Savolainen & Vaittinen 2007, 31.)

Kaavasta (14) huomataan, että P-säädössä lähtösignaali pysyy vakiona niin kauan, kun erosuureessa ei tapahdu muutosta. Voidaan myös todeta, että erosuureen saavutettua arvon nolla, lähtösignaalin arvoksi tulee lähtösignaalin vakiotaso  $u_0$ . Tämän takia pelkässä P-säädössä säädettävän suureen arvo jää lähes aina pienemmäksi kuin säätimen asetusarvo, eli säätimeen jää pysyvää säätöpoikkeamaa. Lähtösignaalin vakiotaso  $u_0$  määrittää siis säätimen lähtösignaalin silloin kun erosuureen arvo on nolla. Pysyvää säätöpoikkeamaa voidaan pienentää valitsemalla ohjaussignaalin vakiotaso  $u_0$  toimilaitteen nimellistä toimintapistettä vastaavaksi. (Harju & Marttinen 2000, 69.)

Säätimen vahvistuksella voidaan valita koko säätimen toimisuunta. Jos säätimen ohjaussignaalin halutaan kasvavan erosuureen kasvaessa, eli toimisuunta on suora, asetetaan vahvistuksen arvo positiiviseksi. Mikäli ohjaussignaalin halutaan pienenevän erosuureen kasvaessa, vahvistuksen arvo asetetaan negatiiviseksi, tällöin puhutaan invertoivasta säädöstä. (Harju & Marttinen 2000, 69.)

Pysyvästä säätöhäviöstä huolimatta pelkkä P-säätö on yksinkertaisuutensa takia käyttökelpoinen monissa sovelluksissa. P-säätöä käytettäessä on varmistettava, ettei pienestä säätöhäviöstä ole haittaa säädettävälle prosessille. (Savolainen & Vaittinen 2007, 33.)

I-termi on erosuureen aikaintegraalista riippuva termi, joka jää nollasta poikkeavaksi vielä erosuureen asetuttua nollaksi. Integroiva termi alkaa laskea erosuureen ja positiivisen aika-akselin väliin jäävää pinta-alaa heti erosuureen saadessa nollasta eriävän arvon. Tämä mahdollistaa ohjaussignaalin muutoksen myös erosuureen jäädessä nollaksi. PI-säätimen ohjaussignaaliin vaikuttaa siis erosuure sekä erosuureen vaikutusaika. I-termi korvaa P-säädössä esiintyvän lähtösignaalin vakioarvon  $u_0$ , poistaen samalla pysyvän säätöhäviön. Integroivan termin vaikutusta säätimen lähtösignaaliin säädetään muuttamalla integrointikerrointa  $K_I$ . Kaavassa (15) on esitetty PI-säädön algoritmi lähtösignaalille  $u(t)$ .

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \quad (15)$$

, missä  $K_I$  = integrointikerroin

$dt$  = ajan muutos hetkellä  $t$ . (Savolainen & Vaittinen 2007, 34–36.)

Digitaalisen PI- ja PID-säätimen suunnittelussa on otettava huomioon WindUp-ilmiö, joka voi syntyä, jos säätimen ohjaama toimilaite saavuttaa fyysisen rajansa. Tällöin toimilaite saattaa pysyä rajoituksessaan riippumatta prosessin tilasta säätimen I-termin yhä jatkaessa ohjauksen kasvattamista. Tässä tapauksessa I-termin aiheuttaman lähtösignaalin palaaminen normaaliin tilaan vaatisi erosuureen arvon olevan negatiivinen pitkän ajan. (Harju & Marttinen 2000, 89.) Teollisissa säätimissä integrointi voidaan pysäyttää, jos säätimen lähtösignaali on saavuttanut minimi- tai maksimiarvonsa tai kun kaskadisäädön (ks. 4.4) alasäädin ajautuu laitaan (Halttunen ym. 2007, 197).

I-termi voidaan myös ilmoittaa integrointiaikavakion  $T_I$  avulla. Integrointiaikavakion yksikkö on aikayksikkö ja se ilmoittaa karkeasti ajan, jossa järjestelmässä oleva erosuure poistetaan. Integrointiaikavakion  $T_I$  suhde kertoimiin  $K_P$  ja  $K_I$  on esitetty kaavassa (16).

$$T_I = \frac{K_P}{K_I} \quad (16)$$

(Savolainen & Vaittinen 2007, 34–35.)

D-termi muuttaa lähtösignaalia erosuureen aikaderivaattaan, eli muutosnopeuteen nähden. D-termillä voidaan lisätä säädön reagoimisnopeutta järjestelmässä tapahtuviin muutoksiin ja häiriöihin. D-termin kykyä ohjata ohjaussignaalia voimakkaasti oikeaan suuntaan voidaan hyödyntää järjestelmissä, joissa esiintyy suuria mittausviiveitä. PID-säätimen derivoivan termin antaman ennakoivan lisävahvistuksen osuutta lähtösignaaliin voidaan säätää muuttamalla derivointikerrointa  $K_D$ . PID-säätimen algoritmi lähtösignaalille  $u(t)$  on esitetty kaavassa (17).

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (17)$$

, missä  $K_D$  = derivointikerroin. (Harju & Marttinen 2000, 73.)

I-termin tavoin, myös D-termi voidaan esittää aikavakion avulla. Derivointiaikavakio  $T_D$  ilmaisee, miten nopeassa ajassa ohjaussignaali saa lisävahvistusta erosuuremuutoksen tapahduttua. Integrointiaikavakion tapaan myös derivointiaikavakion yksikkö on aikayksikkö. Derivointiaikavakion  $T_D$  suhde kertoimiin  $K_P$  ja  $K_D$  on esitetty kaavassa (18).

$$T_D = \frac{K_D}{K_P} \quad (18)$$

(Savolainen & Vaitinen 2007, 36.)

Korvaamalla integrointi- ja derivointikertoimet niiden aikavakioilla saadaan toinen yleisesti käytetty PID-algoritmin muoto. Aikavakioita  $T_I$  ja  $T_D$  hyödyntävä PID-algoritmi on esitetty kaavassa (19).

$$u(t) = K_P(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{d}{dt} e(t)) \quad (19)$$

(Savolainen & Vaitinen 2007, 36–38.)

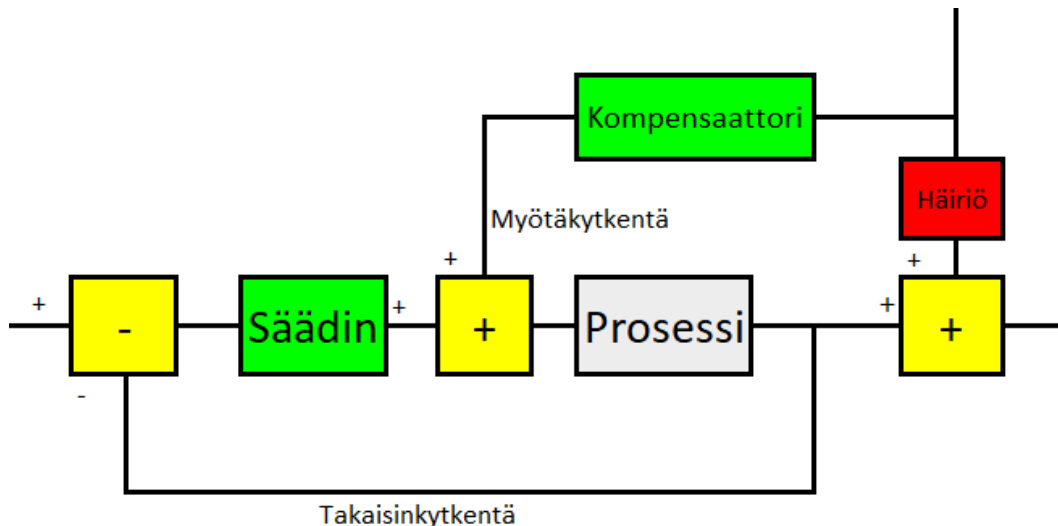
Savolaisen ja Vaittisen (2007, 38) mukaan kaikki nykyiset sähköisesti toteutetut ohjausjärjestelmät sekä ohjelmallisten automaatiojärjestelmien säätölohkot sisältävät täydellisen PID-algoritmin. Säätimen algoritmia voidaan tarvittaessa yksinkertaistaa asettamalla esimerkiksi integrointi- tai derivointikerroin nolaksi.

### 4.3 Kuormitushäiriöiden sekä ristikkäisvaikutusten poisto

Harjun ja Marttisen (2000, 19) mukaan säätöpiiriin vaikuttavia kuormitushäiriöitä ovat esimerkiksi sykkivät painevaihtelut, epätasaisuudet pinnanmittauksessa tai turbulenssi putkistovirtauksissa. Heidän mukaansa myös toiset säätöpiirit voivat vaikuttaa säädettävään prosessiin, tällöin puhutaan prosessin ristikkäisvaikutuksista. Ristikkäisvaikutuksista aiheutuvat häiriöt voivat olla merkittäviä niille säätöpiireille, joita ohjaava säädin on viritetty nopeaksi tai niissä käytetään suurta vahvistusta.

Kuormitushäiriöiden aiheuttamia ongelmia prosessin säätämiseen voidaan poistaa myötäkytkennällä. Myötäkytkennässä toimilaitteen ohjaukseen summataan termi, jolla pyritään kompensoimaan prosessin säätöön vaikuttavat häiriöt. Myötäkytkennän käyttö vaatii sen, että käytössä on soveltuva ohjaussuure ja häiriö voidaan mitata tai sen vaikutus prosessiin tiedetään tarkasti. Yksinkertaisin ja yleisin tapa myötäkytkennän toteuttamiseen on lisätä vakioarvoinen kompensoattorilohko, joka laskee säätimen ohjaussuureeseen lisättävän termin häiriönsuureen mittauksen perusteella. Tarkemman kompensoinnin saavuttamiseen on myös

mahdollista käyttää kompensattorina monimutkaisempia toimilohkoja tai laskentaa. Hyvin toteutetussa myötäkyytkentää hyödyntävässä piirissä myötäkyytkentä tekee suurimman osan säädön muutoksista ja takaisinkytkentä toimii piirissä apuna. Piiriä voidaan myös säätää pelkkää myötäkyytkentää käyttämällä, mutta tällöin menetetään takaisinkytkennän mahdollistama tarkkuus sekä tieto säädettävän prosessin tilasta. (Harju & Marttinen 2000, 36.) Kuvassa 6 on esitetty lohkokaaaviona häiriön kompensointi myötäkyytkentää hyödyntäen.

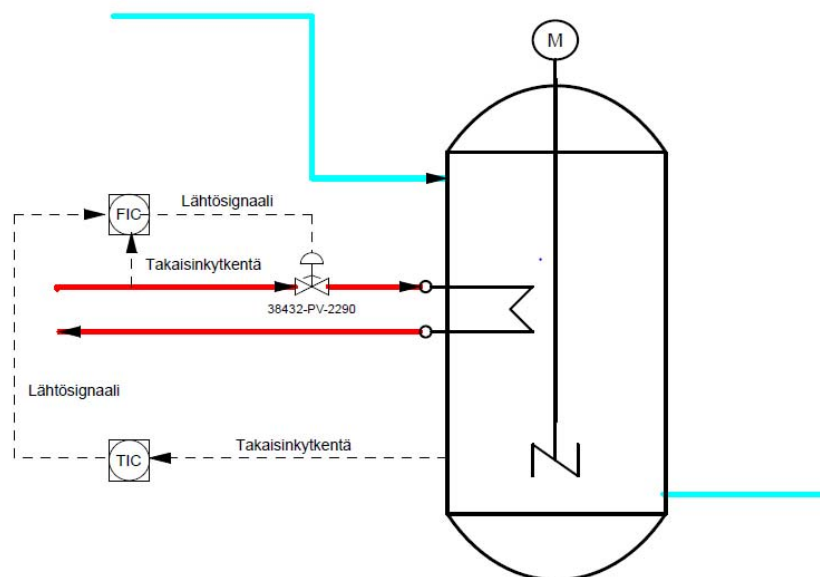


Kuva 6. Yksinkertainen myötäkyytkentä lohkokaaaviona esitettynä.

Prosessissa esiintyvien häiriösuureiden sekä ristikkäisvaikutuksien aiheuttamien häiriöiden poisto on usein hankalampaa kuin kuormitushäiriöiden poisto. Niihin reagoiminen vakioparametrisella PID-säädöllä pakottaa usein tyytymään kompromisseihin, kuten säädön virittämisen erittäin hitaaksi tai säätöalueen asettamisen kapeaksi. Parhaimmassakin tapauksessa vakioparametrisella PID-säädöllä päästään vain välttäviin lopputuloksiin. Nykyisten automaatiojärjestelmien suuret laskentatehot mahdollistavat näiden ongelmien ratkaisemisen hyödyntämällä kehittyneitä säätömenetelmiä. Säätömenetelmää on yleensä kuvattu kehittyneeksi, mikäli sen ohjausten laskentaan käytetään prosessia kuvaavia malleja. Mallien suorituskykyyn vaikuttaa kuinka hyvin mallit kuvaavat todellista säädettävää prosessia. Monimutkaiseen tai epälineaariseen prosessiin hyvin soveltuvan mallin pohjalta tehdyllä säätömenetelmällä saavutetaan huomattavasti parempi lopputulos kuin perinteisellä vakioparametrisella PID-säätimellä. Kehittyneiden säätömenetelmiä hyödyntämällä voidaan kompensoida häiriösuureet ja prosessissa esiintyvät ristikkäisvaikutukset jo ennen kuin ne ehtivät vaikuttaa säädettävään prosessiin. (Henttonen ym. 1992, 1.)

#### 4.4 Kaskadikytcentä

Kaskadikytcentässä kaksi säätölohkoa on sijoitettu peräkkäin siten, että varsinaiset säätöpiirit ovat sisäkkäin. Ulompi säätöpiiri vastaa prosessin tai säädettävän järjestelmän säädöstä ja sisempi säätöpiiri vastaa järjestelmän ohjaussuureen säädöstä. Varsinaisen suureen ohjaus toteutetaan siis apusuureen kautta. Kaskadikytcentässä ulompi säätö vertaa säädettävän suureen mittausta sille annettuun asetusarvoon ja antaa näiden erosuureen perusteella asetusarvon sisemmälle säädölle. Sisemmän säädön erosuure muodostuu ulommalta säädöltä saadun asetusarvon sekä säädettävän järjestelmän ohjaussuureen mittauksesta. Sisempi säätöpiiri antaa tämän erosuureen perusteella ohjausviestin toimilaitteelle, jolla ohjataan säädettävää järjestelmää. (Savolainen & Vaitinen 2002, 33–34.) Kuvassa 7 on esitetty esimerkki kaskadikytcentästä, jossa sekoitussäiliön lämpötilaa ohjataan lämmitykseen käytettävän höyryn virtausta säätämällä.

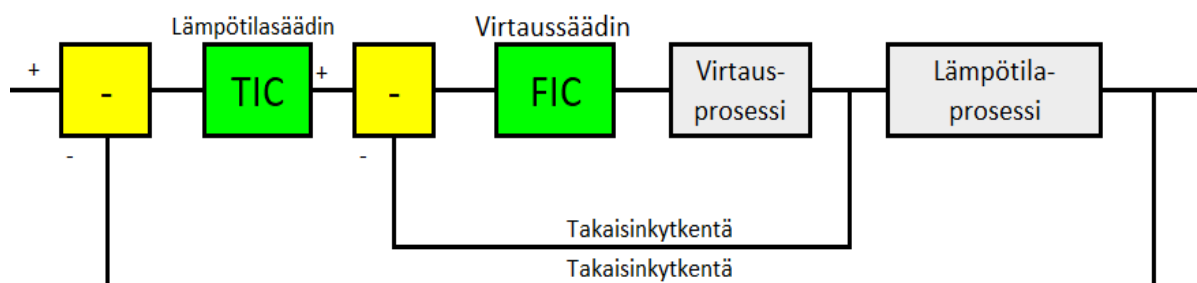


Kuva 7. Kaskadikytcentä, lämpötilan säädin toimii yläsäätimenä virtauksen säätimelle.

Uloimman säätöpiirin säätimen, eli yläsäätimen lähtö kytketään sisemmän säätöpiirin säätimen, eli alasäätimen tuloksi. Alasäädin saa siis asetusarvon yläsäätimeltä, näin ollen apusäätimen asetusarvo on lähes jatkuvasti muuttuva suure (ks. kuva 8). (Savolainen & Vaitinen 2002, 34.)



Kaskadisäädön yleisin käyttökohte ovat tarkkaa tai nopeaa säätämistä vaativat järjestelmät, joihin summautuu ulkoisia häiriöitä. Näissä tapauksissa aläsäädin pyrkii kompensoimaan häiriöt ennen kuin ne ehtivät vaikuttaa prosessiin tai säätöjärjestelmään. Mikäli tällaiseen kaskadisäätöjärjestelmän ohjaussuureeseen vaikuttaa häiriö, aläsäädin huomaa sen ohjaussuureen mittauksen avulla. Aläsäädin muuttaa toimilaitteelle menevää ohjaussignaalia niin, että ohjaussuure palautuu ulommalta järjestelmältä saatuun ohjearvoon. Kaskadijärjestelmän aläsäädin on viritettävä nopeammaksi kuin yläsäädin, että aläsäädin ehtii reagoimaan ulkoisiin häiriöihin ennen kuin ne vaikuttavat säädettävän järjestelmän suureen. (Savolainen & Vaittinen 2002, 33–35.)



Kuva 8. Kuvan 7 kaskadikytkentä lohkokaaavana esitettynä.

#### 4.5 Split-range -kytkentä

Split-range -kytkennässä säätimen lähtösignaali on jaettu ohjaamaan kahta toimilaitetta. Yleensä split-range -kytkentää käytetään venttiilien ohjaamiseen. Kytkennässä lähtösignaali voidaan jakaa monella eri tavalla, mutta kaikista yleisin tapa on jakaa signaali kahteen yhtä suureen osaan, joista kummallakin osalla ohjataan eri toimilaitetta. Esimerkiksi venttiilien ohjauksessa yleinen tapa on jakaa signaali niin, että signaalin ollessa 50 %, molemmat venttiilit ovat joko kokonaan auki tai kiinni. Kahden toimilaitteen ohjaamisella yhdellä säätimellä saavutetaan useissa tapauksissa yksinkertaisempi järjestelmän rakenne sekä parempi lopputulos kuin kahdella säätimellä ohjattaessa. Split-range -kytkennän voi suorittaa muuttamalla toimilaitteiden hyväksymän virta- tai jänniteviestin aluetta. Esimerkiksi standardilla 4–20 mA:n virtaviestillä toimivien toimilaitteiden hyväksymät alueet asetettaisiin 4–12 mA:n ja 12–20 mA:n alueisiin. Prosessilaitosten automaatiojärjestelmissä kuitenkin on

yksinkertaisempaa suorittaa jako sovellusohjelmistossa ja käyttää kummallekin toimilaitteelle omaa virta- tai jänniteviestiä. (Control Automation, [viitattu 22.3.2021].)

#### 4.6 Ohjaukset ja lukitukset

Yleisimmät prosessiautomaatiossa käytetyt ohjaustyyppit ovat sekvenssiohjaus, kriteeriohjaus sekä vaihtoautomaatiikka. Sekvenssiohjauksia hyödynnetään käynnistys- ja pysäytysohjelmissa. Kriteeriohjauksella hallitaan siihen liitettyä laitetta erilaisten määriteltyjen ohjauskriteerien mukaan. Vaihtoautomaatiikkaa käytetään varalaitteen käynnistämässä laitteiden häiriötilanteissa. Vaihtoautomaatiikka voi myös sisältää kriteeriohjauksia. Automaatiojärjestelmän ohjaussovellusten konfiguraation pohjaksi on usein luotu graafisia logiikkasymboleita hyödyntäen lukitus- ja sekvenssikaaviot, jotka luodaan perussuunnitteluvaiheen aikana. (Halttunen ym. 2007, 197–198.)

Lukitukset ja suojaukset ovat loogisia toimintoja, joilla pyritään estämään operaattorien tai automaation tekemät virheelliset ohjaukset. Lisäksi niitä voidaan käyttää pakottamaan ohjauksia tiettyihin arvoihin silloin kun prosessilla on mahdollisuus mennä vaaralliseen tilaan. (Aalto university 2015, 16.) Epätoivottujen tai vaarallisten toimintojen toteuttaminen prosessissa estetään lukituksilla. Lukitukset estävät operaattoria tai automaatiota ohjaamasta toimilaitteita väärässä järjestyksessä tai väärään aikaan. Suojauksilla pyritään estämään laitevauriot sekä varmistamaan prosessin turvallisuus. Suojausjärjestelmä hyödyntää mittausviestien raja-arvoja sekä binäärianturien viestejä vaaratilanteiden havaitsemiseen. Vaaratilanteen mahdollisuuden havaitessaan suojausjärjestelmä voi ohjata sulkutoimilaitteita tai sammuttaa prosessilaitteita. (Majanne & Välsuo 2007, 11–12.) Lukitusten ja suojausten on oltava varmatoimisia ja niiden on toteuduttava mahdollisimman nopeasti määrätyn prosessin tilan muodostumisen jälkeen (Aalto university 2015, 16).

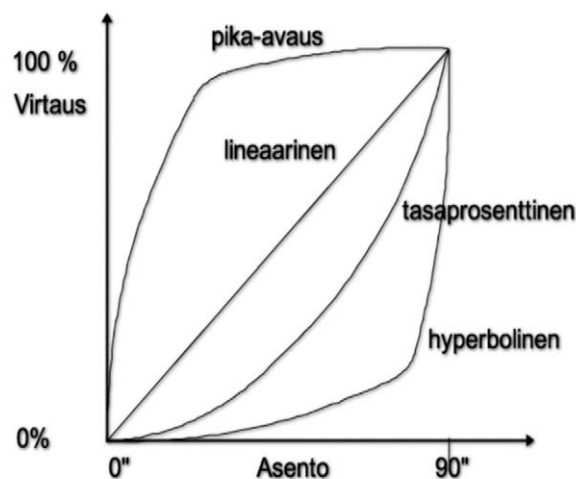
#### 4.7 Toimilaitteiden ohjaukset ja säädöt

Automaattisessa säätöpiirissä osaprosessin säädettävää suuretta hallitaan toimilaitteella, jota ohjataan säätimen lähtösignaalilla (Harju & Martinen 2000, 67). Säätötekniikan kannalta järjestelmän toimilaitteet voidaan jakaa  $T_1$ - ja I-toimilaitteisiin. I-toimilaite, eli integroiva toimilaite, varastoi säädettävää suuretta ajan suhteessa.  $T_1$ -toimilaitteella ei ole varastoivaa ominaisuutta ja se palaa alkutilaansa ohjaussignaalin hävitessä, kun taas integroiva toimilaite

jää saavuttamaansa tilaan. Integroiva toimilaite voi olla esimerkiksi säiliön pinnankorkeuden säätämiseen tarkoitettu venttiili.  $T_1$ -toimilaite taas voi olla puhallusilman tilavuusvirtauksen säätöön tarkoitettu venttiili. Toimilaitteen luokittelu ei siis riipu toimilaitteen tyypistä vaan siitä, miten toimilaitteen ohjaamaa prosessia tarkastellaan. (Savolainen & Vaittinen 2007, 56–57.) Toimilaitteena prosessiautomaation säätöpiirissä käytetään yleensä säätöventtiiliä tai pumppua. (Knowpulp 2021g).

#### 4.7.1 Venttiilit

Venttiilin säätämiseen vaikuttaa keskeisesti venttiilin ominaiskäyrä (ks. kuva 9). Ominaiskäyrä kuvaa virtauksen käyttäytymistä venttiilin asentoon verrattuna. Kuvassa 9 näkyvistä ominaiskäyristä virtaussäätöön parhaiten soveltuva on tasaprosenttinen käyrä, kun taas paineen säätämiseen soveltuu parhaiten lineaarinen ominaiskäyrä. Lineaarisen ominaiskäyrän omaava venttiili on helpoin säätää, koska silloin venttiilin vaikutus säätöpiiriin on kaikissa toimipisteissä sama. (Knowpulp 2021f.) Eri venttiilityyppien säätämisestä puhuttaessa mainitaan myös usein venttiilin säätösuhde. Jos venttiilillä on korkea säätösuhde se tarkoittaa, että venttiili soveltuu hyvin niin pienien kuin suurienkin virtausmäärien säätämiseen. (Knowpulp 2021g.) Säätöventtiilin aukeamaa ohjataan asennoittimella, joka ohjaa venttiiliä auki tai kiinni automaatiojärjestelmältä saatavan virtaviestin mukaan (Knowpulp 2021f).



Kuva 9. Venttiilien tyypillisimmät ominaiskäyrät (Knowpulp 2021f).

#### 4.7.2 Pumput

Säätötekniikan keinoilla pumpun synnyttämän virtauksen säätämiseen on kaksi tapaa: virtauksen kuristaminen ja pyörimisnopeuden muuttaminen. Kuristussäätö on näistä säätötavoista yksinkertaisin. Siinä pumpun painepuolen putkea kuristetaan venttiilillä, jolloin putkivastus kasvaa ja virtausmäärä pienenee. Kuristussäätö ei ole taloudellinen säätötapa, sillä putkea kuristettaessa pumpulla tuotetaan suurempi paine kuin mitä nesteen siirtämiseen tarvittaisiin. Pumpun tuottama ylimääräinen paine muuttuu kuristamiseen käytetyssä venttiilissä lämmöksi. (Huhtinen ym. 2008, 140–143.) Pumpun pyörimisnopeuden muuttaminen on suoraan verrannollinen pumpun tuottaman virtauksen määrän muutokseen. Pyörimisnopeuden muuttaminen on taloudelliselta kannalta kuristussäätöä kannattavampi säätömenetelmä, sillä silloin virtaukseen ei synnytetä painehäviöitä. Pumppujen pyörimisnopeuden säätö toteutetaan usein taajuusmuuttajan avulla niiden tarjoaman korkean hyötysuhteen sekä ohjelmointimahdollisuuden takia. (Halttunen ym. 2007, 133–146.) Nämä kaksi säätötapaa voidaan myös yhdistää. Näin toimitaan esimerkiksi joidenkin voimakattiloiden syöttöveden säädössä, jolloin kuristusventtiilin asentoa muuttamalla hallitaan pieniä ja nopeita muutoksia virtauksessa ja pumpun pyörimisnopeutta muuttamalla hallitaan suuria ja hitaita muutoksia. (Halttunen ym. 2007, 152.) Pumppujen säätämiseen käytetyt keinot soveltuvat myös puhaltimien säätämiseen (Halttunen ym. 2007, 144–145).

Pumppujen ja venttiilien säätämisessä on otettava huomioon kavitaatio. Pumpuissa kavitaatiota tapahtuu, jos jossain pumpun juoksupyörän osassa virtaus kasvaa liian suureksi, joka aiheuttaa imupuolen paineen laskemisen. Tällöin paine laskee alle höyrystymislämpötilan ja virtaukseen syntyy höyrykuplia. (Halttunen ym. 2007, 133.) Venttiileissä voi niin ikään syntyä kavitaatiosta johtuvia ongelmia, kun virtauksen paine pienenee venttiilin kuristuskohdassa ja venttiilin sisällä syntyy höyrykuplia (Knowpulp 2021f). Molemmissa tapauksissa näiden höyrykuplien romahtaminen aiheuttaa paineiskun, joka kuluttaa toimilaitetta. Kavitaation aiheuttama paineisku vastaa vasaran iskua metallia vasten. Tämä mekaaninen rasitus jatkuu taukoamatta kavitaation ajan ja ennen pitkää aiheuttaa metallin pinnan särkymisen. (Huhtinen ym. 2008, 147.)

Tietyissä puhallintyypeissä paine-eron kasvaminen liian suureksi virtaukseen nähden aiheuttaa sakkaamista. Sakkaus aiheuttaa virtauksen irtoamisen puhaltimen siivestä ja tämä taas aiheuttaa voimakkaan värähtelyn sekä paine-eron ja virtauksen hetkellisen putoamisen.

Sakkaus on puhaltimelle erittäin kuluttavaa ja tästä syystä puhaltimet pitäisi pyrkiä säätämään mahdollisimman kauas sakkausalueesta. (Halttunen ym. 2007, 141–142.)

## 5 PÄÄSÄÄTÖJEN SUUNNITTELU

Tässä luvussa käsitellään suunnittelutyön toteutus. Ensin esitellään yleisesti suunnittelutyön tavoitteet. Sitten esitellään suunnitteluun käytetty ohjelmisto ja työssä käytetyt standardoiduista toimilohkoista poikkeavat toimilohkot. Sen jälkeen kuvataan säätimien ja moottoriohjaimien yleiset toimintaperiaatteet. Lopuksi esitellään suunnittelutyön tuloksena syntyneet pääsäättöjen määrittelyt sekä pääsäättöjä ohjaavien säätöpiirien toiminta.

Suunnittelutyön päätavoite oli määritellä toimeksiantajalle uutena tuotteena tulleen WSA-laitokselle pääsäädöt sekä suunnitella pääsäädöille periaatteelliset säätökaaviot. Säätökaaviot tullaan liittämään laitokselle luotuun nollakantaan, jota tullaan hyödyntämään tulevaisuudessa samanlaisten laitosten toimitusprojekteissa. Säätökaavioita voidaan myös käyttää selventämään laitoksen toimintaa asiakkaille ja alihankkijoille. Pääsäädöt kuvaavat laitoksen toiminnan ja tuotannon kannalta keskeisimpien prosessikokonaisuuksien säätöjä. Pääsäädöt koostuvat useista säätöpiireistä, joita käytetään hallitsemaan prosessikokonaisuuksien pienempiä osaprosesseja.

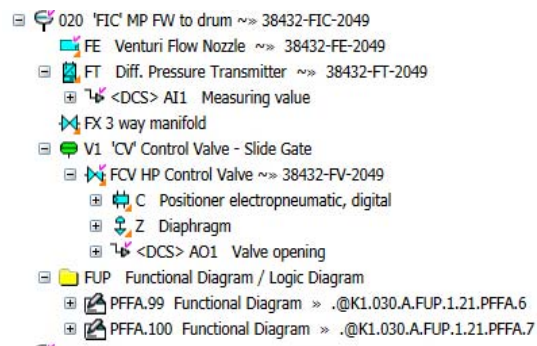
Työn toisena tavoitteena oli suunnitella pääsäättöjen säätöpiireille graafiset toimintakaaviot. Toimintakaaviot kuvaavat säätöpiirin toimintaa yksityiskohtaisemmin ja niitä hyödynnetään automaatiojärjestelmän sovellusohjelmiston luomisessa. Valmiilla toimintakaavioilla voidaan myös selventää laitoksen säätöpiirien toimintaa operaattorille. Toimintakaaviot suunnitellaan kaikille pääsäättöjen säätöpiireille sekä pääsäättöjen säätämiseen käytettävien toimilaitteiden ohjauksille.

Toimeksiantajan toiveiden mukaan tästä työstä jätetään julkaisematta rikkihapon valmistusprosessiin liittyvät pääsäättöjen määrittelyt ja säätöpiirien toimintojen kuvaukset sekä työhön liitetyt periaatesäätökaaviot ja toimintakaaviot, sillä ne sisältävät liike- ja ammattisalaisuuksia. Julkaistavassa työssä esitellään vain vesijärjestelmän ja savukaasupesurin pääsäädöt sekä säätöpiirien toiminta.

Suunnittelutyö tehtiin käyttämällä Siemens COMOS –suunnittelujärjestelmää.

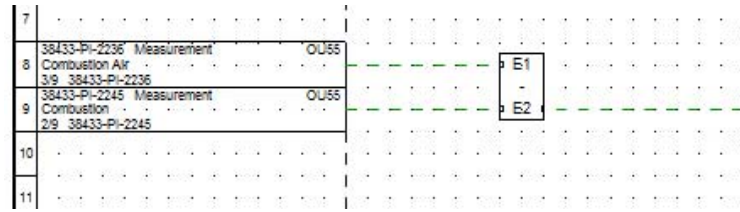
## 5.1 Siemens COMOS

Siemens COMOS on Siemens AG:n ylläpitämä objekti- ja tietokantapohjainen suunnitteluohjelmisto. Sitä käytetään pääasiassa tehtaiden ja prosessilaitosten suunnitteluun. Ohjelmistolla voidaan suorittaa laitoksen automaatio-, prosessi- sekä sähkösuunnittelu ja se mahdollistaa kaikkien tehtaan elinkaaren vaiheiden suunnittelun. COMOS-ohjelmistossa eri alojen suunnittelijat pystyvät työskentelemään projektin parissa yhtäaikaaisesti ja tehdyt muutokset näkyvät muille suunnittelijoille lähes saman tien. Kuvassa 10 on esimerkki tietokannan puurakenteesta, jossa jokaisen säätöpiirin alle voidaan lisätä kaikki säätöpiiriin liittyvät suunnitteluobjektit ja dokumentit. (Siemens AG, [viitattu 22.3.2021].)



Kuva 10. COMOS-projektin tietokannassa olevan säätöpiirin rakenne.

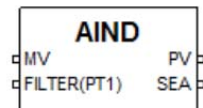
Piirien toimintojen kuvaaminen tapahtuu graafisien toimintakaavioiden, eli FUP-kaavioiden avulla. Suunnitteluohjelmiston valmiista kirjastoista löytyy IEC 61131 -standardoidut toimilohkot ja kirjastoon on myös tarvittaessa mahdollista luoda omia toimilohkoja. Toiminnossa tarvittavat signaalit luodaan tietokantaan kyseisen toiminnon kaavion alle, josta valitsemalla ja tuomalla niitä voidaan hyödyntää myös muiden toimintojen kaavioissa. Toimintakaavioissa pystytään ilmaisemaan, mitkä tiedot kyseisestä kaaviosta halutaan näyttää valvomon käyttöliittymässä. Ohjelmisto suorittaa jatkuvaa laaduntarkkailua, kuten mahdollisten ristiriitaisten kytkentöjen merkitsemisen punaisella värillä. Suunnitteluobjektia, esimerkiksi signaalia, poistettaessa ohjelmisto huomauttaa, mikäli kyseistä signaalia on käytetty jossain muussa dokumentissa. Kuvassa 11 on esitetty kahden painemittauksen välisen paine-eron laskeminen. (Siemens AG, [viitattu 21.2.2021].)



Kuva 11. Esimerkki COMOS-ohjelmistolla tehdystä toiminnosta.

## 5.2 Käytetyt toimilohkot

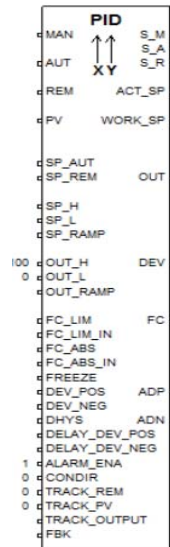
Toimeksiantajan COMOS-kirjastoon on luotu monia erilaisia IEC 61131 –standardista poikkeavia graafisia toimilohkoja. Luodut toimilohkot kuvaavat usein käytettyjä tai monimutkaisia toimintoja, joiden esittäminen standardilohkoilla olisi sekavaa ja työlästä. Luodut toimilohkot vastaavat usein kokonaan tai osittain järjestelmävalmistajien sovellusohjelmistoista löytyviä lohkoja. Tässä luvussa esitellään pääsääntöjen suunnittelussa tarvittuja toimilohkoja sekä selitetään ne toimilohkojen parametrit, tulot ja lähdöt, joita on käytetty suunnittelutyössä.



Kuva 12. AIND-lohko.

**AIND.** Tämä kuvaa signaalin käsittelyyn liittyviä toimintoja. Mittauslähettimeltä tuleva signaali muutetaan laskentayksiköiksi. Suodatuksen taso määritellään FILTER-liittimeen tässä lohossa aikana, mutta sovellussuunnittelijan on sovellettava se järjestelmätoimittajan suodatusmenetelmään. SEA-liitin tulee aktiiviseksi mittalaitteen häiriön aikana.

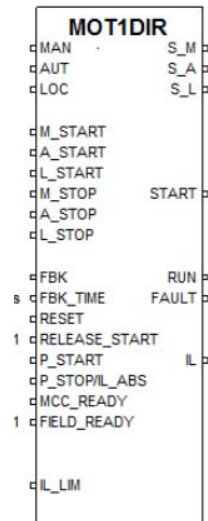




Kuva 13. PID-lohko.

**PID.** Tällä loholla kuvataan PID-tyyppisen säätimen toimintaa (ks. 4.2). Säätimellä on kolme käyttötilaa, jotka voidaan asettaa aktiiviseksi käsin tai ohjelmisto voi asettaa ne aktiiviseksi tiettyjen ehtojen täytyttyä. Säätimen asetusarvolle sekä lähtösignaalille voi asettaa maksimi- ja minimirajoitukset. Säätimen käyttötilat sekä toiminnot on esitetty alla:

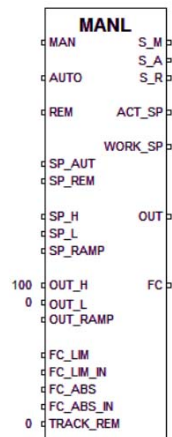
- MAN-tila, käsikäyttö. Operaattori asettaa lähtösignaalin manuaalisesti valvomon käyttöliittymästä. Säätimen PID-algoritmi ei ole aktiivisena.
- AUTO-tila, automaattikäyttö. Operaattori asettaa asetusarvon manuaalisesti valvomon käyttöliittymästä. Säädin muuttaa lähtösignaalia PID-algoritmia hyödyntäen.
- REM-tila, kaskadikäyttö/etäkäyttö. Asetusarvo saadaan toiselta säätimeltä tai automaatiojärjestelmän suorittamasta laskennosta. Säädin muuttaa lähtösignaalia PID-algoritmia hyödyntäen.
- FC\_ABS, pakotus/lukitus/suojaus. Ollessa aktiivisena säätimen lähtö pakotetaan toteuttamaan FC\_AB\_IN-liittimeen asetetun arvon. Säätimen integrointi on pysäytetty pakotuksen aikana. FC\_ABS-toiminto on säätimen korkeimman prioriteetin toiminto, eli se on aina asetettavissa aktiiviseksi.
- FREEZE, lähdön jäädytys. FREEZE-toiminnon ollessa aktiivisena säätimen erosuure saa arvon nolla, jolloin säätimen sisäinen laskenta pysähtyy. Toiminnon poistuessa säädin saa taas todellisen erosuureen ja säätimen sisäinen laskenta käynnistyy siihen perustuen.
- TRACK\_OUTPUT, signaalin seuraus. Ollessa aktiivisena säätimen lähtösignaali seuraa FBK-liittimeen kytkettyä arvoa.



Kuva 14. MOT1DIR-lohko.

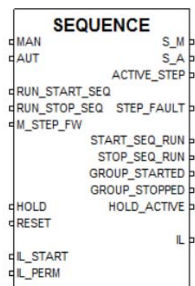
**MOT1DIR.** Tämä lohko kuvaa yhteen suuntaan toimivan moottorin käynnistys- ja pysäytystoimintoja. Lohkolla on kolme käyttötilaa, jotka voidaan asettaa aktiiviseksi käsin tai ohjelmisto voi asettaa ne aktiiviseksi määritettyjen ehtojen täytyttyä. Käyttötilat ovat MAN, AUTO ja LOC. Käyttötilojen ollessa aktiivisena vain niille merkityt pysäytys- ja käynnistysliittimet ovat käytettävissä. Lohkon muut toiminnot on esitetty alla:

- P\_STOP, suoja seis. Ollessaan aktiivisena pakottaa moottorin pysähtymään ja estää uudelleen käynnistämisen. Käytetään suojaus- ja lukitussovelluksissa. P\_STOP-toiminto on lohkon korkeimman prioriteetin toiminto, eli se on aina asetettavissa aktiiviseksi.
- FAULT, häiriö. FAULT-tila sammuttaa moottorin ja estää moottorin käynnistymisen. Voidaan palauttaa kytkemällä signaali RESET-liittimeen. Lohko asetetaan FAULT-tilaan, jos:
  - FBK-liittimeen ei tule takaisinkytkentäsignaalia moottorin käynnistyskäskestä FBK\_TIME-liittimeen asetetun ajan kuluessa.
  - Moottoriohjauskeskuksen valmiutta valvovaan MCC\_READY-liittimeen ei tule takaisinkytkentäsignaalia.
  - Kentälaitteiden (esim. taajuusmuuttaja, turvakytin) valmiutta valvovaan FIELD\_READY-liittimeen ei tule takaisinkytkentäsignaalia.



Kuva 15. MANL-lohko.

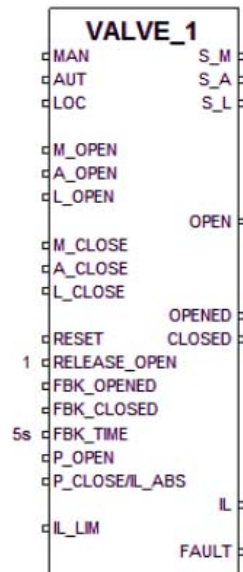
**MANL.** Tämä lohko kuvaa käsiasemaa, jota voidaan käyttää asentoon ajettavien pneumaattisten venttiilien asennon ja taajuusmuuttajien nopeusohjeen ohjaamiseen. Lohkon toiminnot ja tilat vastaavat PID-lohkoa ilman PID-algoritmia. Lohkojen eroavaisuus tulee AUTO- ja REM-tiloissa, jolloin tämän lohkon asetusarvo muutetaan suoraan lähtösignaaliksi.



Kuva 16. SEQUENCE-lohko.

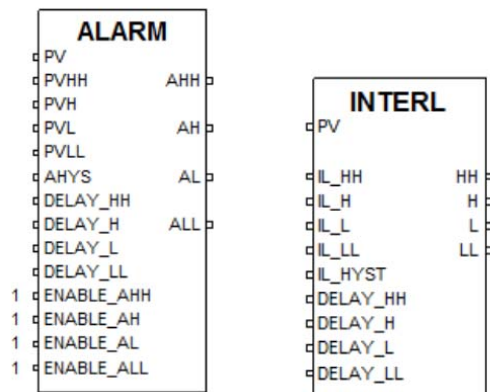
**SEQUENCE.** Tämä lohko kuvaa sekvenssin ohjaamisen toimintoja. Lohkolla on kaksi käyttötilaa, jotka voidaan asettaa aktiiviseksi valvomon käyttöliittymästä. Lohko myös antaa tietoa sekvenssin tilasta. Lohkon käyttötilat sekä toiminnot on esitetty alla:

- MAN-tila, käsiaskellus. Sekvenssi etenee, kun askelkohtaiset etenemisehdot ja mahdollinen asetettu odotusaika täyttyvät ja operaattorin antama askelluslupa M\_STEP\_FW-liittimeen on voimassa.
- AUT-tila, automaattiaskellus. Sekvenssi käynnistyy, kun RUN\_START\_SEQ-liitin saa signaalin. Sekvenssi etenee automaattisesti askelkohtaisten etenemisehtojen ja mahdollisen odotusajan täytyessä.
- STEP\_FAULT, häiriö. Lohko asetetaan FAULT-tilaan jos sekvenssin ollessa AUT-tilassa sekvenssin askeleen ehdot eivät täyty askeleeseen asetetun aikarajan (control time) aikana. Voidaan palauttaa kytkemällä signaali RESET-liittimeen.



Kuva 17. VALVE\_1-lohko.

**VALVE1.** Tämä lohko kuvaa kaksitoimisen sulkuventtiilin ohjaamisen toimintoja. Lohkon toiminnot ja tilat vastaavat MOT1DIR-lohkon toimintaa. Lohkojen eroavaisuus on FAULT-tilan aktivoimisessa. Lohko asetetaan FAULT-tilaan, mikäli FBK\_OPENED ja FBK\_CLOSED liittimiin tulevat tilatiedot venttiilin auki- ja kiinniasennon rajakytkimiltä eivät vastaa venttiilille annettua komentoa.



Kuva 18. ALARM- ja INTERL-lohkot.

**ALARM ja INTERL.** Näillä lohkoilla kuvataan hälytys- (ALARM) ja lukitus (INTERL) -toimintoja. Lohkoille voidaan asettaa kaksi ylä- ja alaraja-arvoa (H, HH ja L, LL). Mittausarvon ylittäessä tai alittaessa asetetun raja-arvon, raja-arvoa vastaava lähtösignaali asettuu aktiiviseksi. Raja-arvoille voidaan asettaa ehtoja ENABLE\_-liittimien avulla. Raja-arvoille voidaan asettaa viive, asettamalla arvo (aikayksikkö) raja-arvoa vastaavaan DELAY\_-liittimeen.

### 5.3 Säättöjen ja ohjausten yleiset periaatteet

Jos ei toisin mainita, seuraavaksi lueteltuja periaatteita sovelletaan kaikissa tässä luvussa kuvailluissa säätimissä. Periaatteet perustuvat toimeksiantajan määritelmiin sekä yleisesti hyväksi havaittuihin menetelmiin.

- Säätimen asetusarvon, lähtösignaalin ja takaisinkytkennän arvot esitetään valvomon käyttöliittymässä.
- Säätimen tilojen vaihto tapahtuu valvomon käyttöliittymästä pulssisignaaleilla.
- Säätimen saa jatkuvasti pakottaa vain MAN-tilaan ja MAN-tilaan siirtyminen on oltava aina mahdollista. AUTO- ja REM-tiloihin siirtyminen on tapahduttava pulssisignaaleilla.
- Säätimen asetusarvo voidaan asettaa manuaalisesti valvomon käyttöliittymästä AUTO-tilassa ja lähtösignaali voidaan asettaa manuaalisesti valvomon käyttöliittymästä MAN-tilassa.
- Säätimen lähtösignaali on 0–100 %
- Säätimen tilan vaihto on tapahduttava sysäyksettömästi, eli tilaa vaihdettaessa säädin ottaa asetusarvokseen viimeisimmän aktiivisena olleen asetusarvon.
- Säädin on aktiivinen silloin, kun se säätää lähtösignaalia asetusarvon ja takaisinkytkennän perusteella, eikä sen toimintoja ole estetty (AUTO- tai REM-tila).
- Jos säätimen asetusarvo ilmoitetaan tulevan ulkoisesta lähteestä (esim. laskettu asetusarvo), säätimen tila normaalissa ajossa on REM-tila. Jos säätimelle ei ole ilmoitettu ulkoista asetusarvoa, säätimen tila normaalissa ajossa on AUTO-tila.

Jos ei toisin mainita, seuraavaksi lueteltuja periaatteita sovelletaan kaikissa tässä luvussa kuvailluissa moottoriohjaimissa. Periaatteet perustuvat toimeksiantajan määritelmiin sekä yleisesti hyväksi havaittuihin menetelmiin. Mikäli moottorinohjain ei poikkea millään tavalla seuraavaksi luetelluista periaatteista, ohjaimen toimintaa ei tässä työssä kuvailla.

- Ohjaimen tilojen vaihto sekä häiriön kuittaus tapahtuvat valvomon käyttöliittymästä pulssisignaaleilla.
- Ohjaimen tila, häiriö ja käyntitieto esitetään valvomon käyttöliittymässä.
- Moottori voidaan ohjata käyntiin manuaalisesti valvomon käyttöliittymästä ohjaimen ollessa MAN-tilassa.
- LOC-tilaa käytetään vain mahdollisten paikallisohjauksien toteuttamiseen.
- Ohjain saa takaisinkytkentänä moottorin käyntitiedon.
- FBK\_TIME-liittimeen asetettu takaisinkytkentäaika on viisi sekuntia.
- Ohjain saa moottorinohjauskeskukselta sekä käytetyltä taajuusmuuttajalta takaisinkytkennän.

#### 5.4 Syöttöveden painesäätö

Säädön tehtävä on syöttövesiventtiilin yli vaikuttavan paine-eron hallitseminen pumpun tuottamaa painetta muuttamalla niin, että venttiili on kaikilla kuormilla hyvällä säätöalueella sekä, että venttiilin aiheuttaman painehäviö olisi mahdollisimman pieni. Painetta hallitaan muuttamalla syöttövesipumpun pyörimisnopeutta. Säädöllä pyritään estämään myös pumpun liian alhaisen paineen muodostamat ongelmat, sekä pitämään pumppu taloudellisella toiminta-alueella.

Laitoksella on kaksi syöttövesipumppua, joista vain toinen on kerrallaan käynnissä ja toinen on varalla. Syöttöveden virtauksen varmistamiseksi pumput on varustettu vaihtoautomaatiikalla, joka käynnistää varalla olevan pumpun automaattisesti käynnissä olevan pumpun vikaantuessa.

**Syöttöveden painesäädin.** Säädin antaa asetusarvon syöttövesipumpun nopeudensäätöpiirille, jonka lähtösignaalilla ohjataan pumpun taajuusmuuttajaa. Säädin saa takaisinkytkennän syöttövesiventtiilin molemmiin puolin olevien painemittauksien erotuksesta.

Pumpun paineen laskeminen liian alhaiseksi estetään vertaamalla pumpun tuottamaa painetta pumpun valmistajan toimittamiin painekäyriin, joissa on ilmoitettu pumpun pyörimisnopeutta vastaava minimipainearvo. Mitatun paineen laskiessa lähelle toimittajan ilmoittamaa minimipainetta, säätimen lähtösignaalin pieneneminen estetään rajoittamalla lähtösignaalin minimiarvoa. Lähtösignaalin minimiarvon rajoittamista hyödynnetään myös pumppujen käynnistyessä vaihtoautomaatiikan aikana.

Molempien syöttövesipumppujen ollessa pysähtyneenä, säätimen lähtösignaali lukitaan arvoon 0 %. Jos käynnissä olevan pumpun nopeussäädin ei ole REM-tilassa, tämän säätimen integrointi lopetetaan asettamalla lähtösignaali seuraamaan nopeussäätimen lähtösignaalia. Molempien edellä mainittujen toimintojen aktivoitumiseen ehtojen täytyttyä on asetettu viiden sekunnin viive. Viiveen tarkoitus on pitää säädin aktiivisena käynnissä olevan pumpun manuaalisen tai vaihtoautomaatiikan suorittaman vaihdon aikana.

**Pumppujen ohjaus ja vaihtoautomaatiikka.** Syöttövesipumpuilla ei ole paikallisohtausta, eli ne voidaan pysäyttää ja käynnistää manuaalisesti vain valvomon käyttöliittymästä. Pumppu lukitaan, eli se pysäytetään sekä sen käynnistyminen estetään, jos

- pumpun suodattimen paine-ero nousee yli asetetun arvon.
- pumpun tuottama paine on liian alhainen.
- syöttövesisäiliön pinnankorkeus on liian alhainen.

Vaihtoautomaatiikka käynnistää varalla olevan syöttövesipumpun, mikäli toiminnassa oleva pumppu vikaantuu tai se on lukittu edellä listatuiden syiden takia. Vaihtoautomaatiikan toiminnan ehtona on, että toinen pumpuista on asetettu varalle. Operaattorin on valittava varalle asetettava pumppu valvomon käyttöliittymästä. Pumpun varalle asettamisen ehtona on, että pumppu ei ole käynnissä ja se ei ole lukittuna tai häiriötilassa. Varalle asetettaessa pumppu vaihtuu AUTO-tilaan, jolloin sitä ei voida enää ohjata käsin.

## 5.5 Höyrylieriön pinnansäätö

Säätö koostuu lieriön pinnankorkeuden säätöpiiristä ja syöttöveden virtauksen säätöpiiristä. Säätöpiirien tehtävä on ylläpitää höyrylieriössä sopiva pinnankorkeus höyrylieriön ja koko laitoksen vesi- ja höyryjärjestelmän toiminnan varmistamiseksi. Lieriöstä poistuu jatkuvasti höyryä laitoksen ja tehtaan tarpeisiin. Lieriössä olevaa vettä ulospuhalletaan ja hyödynnetään

laitoksen jäähdytyssovelluksissa. Lieriön pinnankorkeutta säädetään muuttamalla lieriön syötettävän veden virtauksen määrää. Lieriön pinnankorkeuden säätämiseen käytetään yleisesti hyväksi havaittuja menetelmiä, eli yksi- ja kolmipistesäätöjä. Säättämismenetelmä voidaan valita automaatiojärjestelmän käyttöliittymästä.

Yksipistesäädössä lieriön ajatellaan olevan vain säiliö, jonka pinnankorkeuden säätö perustuu ainoastaan pinnankorkeuden mittaukselta saatavaan takaisinkytkentään. Yksipistesäätöä voidaan käyttää laitoksen käyttöönotossa höyrylieriön täyttämiseen tai jos lieriöstä ei voida jostain syystä syöttää höyryä laitoksen höyryjärjestelmään. Kolmipistesäädössä hyödynnetään lieriön pinnankorkeudenmittauksen lisäksi lieriöön virtaavan veden sekä lieriöstä ulos virtaavan höyryn mittauksia. Kolmipistesäädössä jatkuvat muutokset höyryjärjestelmään syötettävän höyryn virtauksessa kompensoidaan myötäkytkennän avulla.

**Pinnankorkeuden yksipistesäädin.** Yksipistesäädin ohjaa lieriön pinnankorkeutta pakottamalla syöttöveden virtauksen säätimen lähtösignaalin seuraamaan tämän säätimen lähtösignaalia. Säätimeen asetettava asetusarvo on rajattu pinnankorkeuden ylä- ja alarajahälytyksiin. Mikäli yksipistesäätö ei ole valittuna, säätimen integrointi pysäytetään pakottamalla lähtösignaali seuraamaan syöttöveden virtaussäätimen lähtösignaalia.

Turva-automaatiojärjestelmän käskemä syöttövesijärjestelmän lukitus lukitsee säätimen lähtösignaalin arvoon 0 %.

**Pinnankorkeuden kolmipistesäädin.** Kolmipistesäätimen lähtösignaali antaa asetusarvon syöttöveden virtauksen säätimelle, eli se toimii yläsäätimenä virtaussäätimelle. Mikäli syöttöveden virtauksen säädin ei ole REM-tilassa, tämän säätimen integrointi pysäytetään pakottamalla lähtösignaali seuraamaan syöttöveden virtaussäätimen lähtösignaalia.

Turva-automaatiojärjestelmän käskemä syöttövesijärjestelmän lukitus lukitsee säätimen lähtösignaalin arvoon 0 %.

Lieriön pinnankorkeuden keskeisestä vaikutuksesta koko laitoksen toimintaan johtuen, pinnankorkeus mitataan kolmella eri paine-eroon perustuvalla mittauksella. Mittaukset käsitellään kompensointikaavalla (9). Molemmat pinnankorkeuden säätimet saavat takaisinkytkennän näistä mittauksista.



**Syöttöveden virtaussäädin.** Säädin ohjaa syöttöveden virtausta kuristavaa venttiiliä. Kolmipistesäädön tullessa aktiiviseksi tämä säädin asetetaan REM-tilaan, jolloin asetusarvo muodostuu kolmipistesäätimen ulostulon sekä siihen myötäkytketyn lieriöstä ulos virtaavan höyryn virtausmittauksen arvosta. Yksipistesäädön ollessa aktiivisena virtauksen säädin asetetaan seuraamaan yksipistesäätimen lähtösignaalia. Säädin saa takaisinkytkennän syöttövesiputkessa sijaitsevalta virtausmittaukselta. Mittauksesta saatu arvo kompensoidaan käyttämällä kaavaa (11).

Turva-automaatiojärjestelmän käskemä syöttövesijärjestelmän lukitus lukitsee säätimen lähtösignaalin arvoon 0 %. Myös molempien syöttövesipumppujen ollessa pysähtyneenä yli viiden sekunnin ajan, säätimen lähtösignaali lukitaan arvoon 0 %. Viiden sekunnin viiveellä estetään säätimen lukitseminen syöttövesipumppujen vaihtoautomaatiikan aikana. Höyrylieriön pinnan alittaessa ennalta asetetun arvon säätimen lähtösignaalia lähdetään hallitusti laskemaan määritellyllä nopeudella kohti arvoa 0 %.

## 5.6 Savukaasupesurin säätö

Asiakkaalle toimitettavassa laitoksessa rikkijäämien poisto lauhduttimelta poistuvasta puhtaasta kaasusta toteutetaan savukaasupesurin avulla. Savukaasupesurin säätö koostuu pesuliuoksen pH-säätöpiiristä, pesurin pinnankorkeuden säätöpiiristä, pesuliuoksen lämpötilan säätöpiiristä sekä pesuliuoksen tiheyden säätöpiiristä. Säätojen tehtävä on pitää pesuriin ruiskutettavan liuoksen laatu tasaisena. Pesuriin ruiskutettava liuos ohjataan takaisin pesurikiertoon, jossa sitä jäähdytetään ja käsitellään tarpeen mukaan. Kierrossa ylläpidetään tarvittavaa painetta vakionopeuksisen pesuripumpun avulla.

Pesuliuoksen emäksisyys vaikuttaa sen kykyyn sitoa prosessikaasuun jääneet rikkipäästöt. Kiertävän pesuliuoksen pH-arvoon vaikutetaan sekoittamalla lipeää kiertoon.

Pesuliuosta jäähdytetään kuljettamalla se vesijäähdytteisen lauhduttimen läpi. Pesuriin ruiskutettavan liuoksen lämpötilan on oltava riittävän alhainen savukaasujen riittävän jäähdytyksen saavuttamiseksi.

Prosessikaasun ja pesuliuoksen yhdistyessä syntyy natriumsulfaattia. Natriumsulfaatin aiheuttamaa pesuliuoksen tiheyden muutosta hallitaan sekoittamalla kiertoon laimennusvettä.

Pesurin kierron hyvän toiminnan takia kierrossa on oltava sopiva määrä pesuliuosta. Kierrossa olevan liuoksen määrää hallitaan säätämällä pesuriin kertyvän liuoksen pinnankorkeutta. Pesuriin kertyvä ylimääräinen liuos ohjataan valkolipeälaitoksen jätevedenkirkastamolle käsiteltäväksi.

**pH-säädin.** Säädin ohjaa veden sekaan sekoitettavan lipeän virtausta kuristavaa säätöventtiiliä. Säädin saa takaisinkytkennän pesuriin ruiskutettavan pesuliuoksen linjassa sijaitsevalta pH-mittaukselta.

Säätimen lähtösignaali lukitaan arvoon 0 %, kun pesurin pumppu ei ole käynnissä. Säädin asetetaan aktiiviseksi pumpun käynnistyessä.

**Pesurin pinnankorkeussäädin.** Säätimen lähtösignaalilla ohjataan jätevesisäiliöön johtavassa linjassa olevaa säätöventtiiliä. Säädin saa takaisinkytkennän pesurissa sijaitsevalta pinnankorkeuden mittaukselta.

Säätimen lähtösignaali lukitaan arvoon 0 %, kun pesurin pumppu ei ole käynnissä. Säädin asetetaan aktiiviseksi pumpun käynnistyessä.

**Pesuveden tiheyssäädin.** Säädin ohjaa pesurilta tulevan veden sekaan sekoitettavan laimennusveden virtausta kuristavaa säätöventtiiliä. Säädin saa takaisinkytkennän pesurilta palaavan veden linjassa sijaitsevalta tiheyden mittaukselta.

Säätimen lähtösignaali lukitaan arvoon 0 %, kun pesurin pumppu ei ole käynnissä. Säädin asetetaan aktiiviseksi pumpun käynnistyessä.

**Jäähdytysveden lämpötilasäädin.** Säädin ohjaa lauhduttimelta takaisin jäähdytyskiertoon palaavan veden virtausta kuristavaa säätöventtiiliä. Säädin saa takaisinkytkennän pesuriin ruiskutettavan veden linjassa sijaitsevalta lämpötilan mittaukselta.

Säätimen lähtösignaali lukitaan arvoon 0 %, kun pesurin pumppu ei ole käynnissä. Säädin asetetaan aktiiviseksi pumpun käynnistyessä.

## 6 TYÖN ETENEMINEN JA TULOKSET

Suunnittelutyö aloitettiin päätavoitteen osiolla. Alkuvaiheessa perehdyttiin laitetoimittajien toimittamiin PID-kaavioihin sekä prosessikuvauksiin. Laitetoimittajan dokumenttien perusteella muodostettiin käsitys rikkihapon valmistusprosessista kokonaisuutena. Kokonaisuuden selvittyä oli siitä helppo eritellä keskeisimmät säädettävät osiot pääsäädoiksi, joista jokaiselle suunniteltaisiin omat periaatesäätökaaviot.

Periaatesäätökaavioiden suunnittelu aloitettiin vesi- ja höyryjärjestelmän osalta, sillä siitä toimeksiantajalla oli muiden tuotteiden osalta kokemusta ja näiden tuotteiden säätökaavioita voitaisiin käyttää pohjana tässä työssä. Myös polttimeen ja palamisilman osalta voitiin osittain hyödyntää muille tuotteille luotuja kaavioita. Polttimeen ja palamisilman säätämisen tiedettiin eroavan ainakin jonkin verran muiden tuotteiden sovelluksista, joten näiltä osin kaaviot tehtiin vielä hyvin yksinkertaisiksi. Poltintoimittajan kanssa pidetyn palaverin jälkeen saatiin parempi käsitys polttimeen toiminnasta, jolloin säätökaavioista saatiin tehtyä jo paljon yksityiskohtaisemmat. Rikkihapon valmistusprosessin osalta periaatesäätökaaviot tehtiin tässä vaiheessa pitkälti laitetoimittajalta saatujen dokumenttien perusteella. Käytetyistä dokumenteista suurimpaan osaan nousivat säätämiseen käytettävät laskukaavakokoelmat sekä säätökuvaukset, joissa oli kerrottu periaatteellisella tasolla, kuinka prosessia suositellaan säädettäväksi. Laskukaavojen tutkiminen ja vertaaminen säätökuvaukseen toi esille yksityiskohtia siitä, kuinka pääsäätojen tulisi toimia. Tässä vaiheessa pääsäädot oli saatu määriteltyä ja periaatesäätökaaviot olivat senhetkisten tietojen mukaan suunniteltu.

Asiakkaalle toimitettavan laitoksen suunnitteluprosessin edettyä perussuunnitteluvaiheeseen periaatesäätökaavioiden suunnittelu keskeytettiin ja alettiin työstää laitoksen säätöpiireille graafisia toimintakaavioita. Myös toimintakaaviot tehtiin alkuun toimeksiantajan muiden tuotteiden sekä laitetoimittajan antamien kuvausten ja kaavojen perusteella. Toimintakaavioiden suunnittelu pakotti ajattelemaan prosessia yksityiskohtaisemmin sekä harkitsemaan siinä vaikuttavia ristikkäisvaikutuksia. Oli myös päätettävä, mitkä toiminnot suoritetaan automaattisesti ja mitkä jätetään operaattorin harkinnan varaan. Vähäisen kokemuksen takia varsinkin rikkihapon valmistusprosessia ohjaavien säätimien automaatiotaso päätettiin jättää tässä vaiheessa matalaksi ja säätimien rakenne yksinkertaiseksi. Prosessisuunnittelijoiden ja poltintoimittajien kanssa pidettyjen palaverien pohjalta saatiin vesi- ja höyryjärjestelmän, savukaasupesurin sekä polttimeen toimintakaaviot

suunniteltua jo paljon pidemmälle. Palavereissa sekä poltintoimittajan dokumenttitoimituksessa tulleiden tietojen perusteella päivitettiin myös periaatesäätökaaviot.

Täysin uudenlaisen laitoksen suunnittelussa suurin ongelma oli vähäinen kokemus prosessin käyttäytymisestä sekä laitoksen toiminnasta. Oli myös epäselvää, mitkä prosessin ohjaamiset kannattaisi jättää operaattorin huolehdittavaksi ja mitkä pyrittäisiin suorittamaan automaattisesti. Epävarmuuksista huolimatta pääsäädot saatiin määritettyä jo projektin alkuvaiheessa ja pääsäättöjen periaatesäätökaaviot saatiin valmiiksi. Periaatesäätökaavioihin tullaan luultavasti tekemään vielä muutoksia suunnitteluprosessin edetessä. Laajasta projektista ja tämän opinnäytetyön aikataulun rajoituksesta johtuen toimintakaaviot saatiin suunniteltua rikkihapon valmistusprosessin osalta vasta alustavalle tasolle. Polttimen, vesi- ja höyryjärjestelmän ja savukaasupesurin osilta toimintakaaviot saatiin valmiiksi automaatiojärjestelmän sovellusohjelmiston luomista varten. Muiden toimintakaavioiden kehittämistä jatketaan sovellusohjelmiston luomiseen asti. Toimintakaavioita tullaan vielä kehittämään sovellusohjelmiston valmistumisen jälkeen tehdastesteissä sekä laitoksen käyttöönotossa tehtyjen muutoksien perusteella.

## 7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä WSA-rikkihappolaitoksen rakenteeseen ja toimintaan sekä perehtyä prosessilaitoksen automaatio suunnittelun kannalta keskeisiin aiheisiin. Suunnittelutyö koostuu laitoksen pääsäättöjen määrittelystä, pääsäättöjen periaatesäättökuvien suunnittelusta sekä säätöpiirien alustavien toimintakaavioiden suunnittelusta. Työ suoritettiin toimeksiantona Andritz Oy:lle. Tietopohjan lähtöaineistona hyödynnettiin toimeksiantajan koulutusmateriaalia sekä prosessi-, automaatio-, ja säätötekniikan kirjallisuutta. Suunnittelutyön tukena käytettiin laitetoimittajalta saatua aineistoa sekä dokumentteja toimeksiantajan aikaisemmista projekteista.

Työssä saavutettiin osittain työlle asetetut tavoitteet. Laitoksen pääsäädöt on määritelty ja niiden periaatteelliset säätökaaviot on suunniteltu. Aikataulusta johtuen rikkihapon valmistusprosessin osalta graafiset toimintakaaviot saatiin suunniteltua vasta alustavalle tasolle ja säätimien osalta on vielä jouduttu turvautumaan hyvin yksinkertaisiin ratkaisuihin. Toimintakaavioiden valmistumista rajoittivat myös niukat lähtötiedot ja vielä vähäinen kokemus kyseisen laitoksen toiminnasta. Suunnitteluprosessin edetessä tullaan järjestämään eri alojen suunnittelijoiden ja laitetoimittajien yhteisiä ajotapapalavereita, joiden perusteella toimintakaavioita saadaan kehitettyä pidemmälle. Vesi- ja höyryjärjestelmän, savukaasupesurin sekä polttimeen toimintakaaviot sen sijaan saatiin suunniteltua paljon pidemmälle ja yksityiskohtaisemmiksi. Tämä johtuu suurilta osin siitä, että toimeksiantajalla oli paljon enemmän kokemusta näiden prosessien osalta, sillä rikkihappolaitoksella ne ovat hyvin samanlaisia kuin toimeksiantajan muissa tuotteissa. Täysin uuden prosessin suunnittelu on haastavaa ja edes ennalta tuttujen osaprosessien kaikkia yksityiskohtia ei voida ennakoida vielä perussuunnitteluvaiheessa. Tästä syystä toimintakaavioita tullaan kehittämään koko kyseisen laitoksen suunnitteluprosessin ajan aina käyttöönottoon asti.

Työtä tehdessäni huomasin, kuinka tärkeää eri alojen suunnittelijoiden välinen kommunikointi ja sujuva tiedon välittäminen on isoissa suunnitteluprojekteissa. Huomasin myös, kuinka iso vaikutus prosessin tuntemisella ja etenkin prosessiin vaikuttavien fysikaalisten ilmiöiden tuntemisella on myös automaatio suunnitteluun.

Toimeksiantaja tulee hyödyntämään työtä tulevaisuudessa vastaavanlaisien laitosten suunnittelussa. Periaatesäättökaavioiden avulla voidaan selventää asiakkaille ja alihankkijoille laitoksen toimintaa kokonaisuutena. Asiakkaalle suunniteltavan laitoksen toimitusprojektin

suunnitteluvaiheen päätyttyä toimintakaavioiden pohjalta luodaan sovellusohjelmisto, jonka toiminta todennetaan tehdasteisteissä. Valmiin laitoksen käyttöönotossa sovellusohjelmistoon tullaan tekemään vielä muutoksia, jotka usein johtuvat prosessin käyttäytymisestä ja säätimien virityksestä. Valmiin laitoksen pohjalta luodaan nollakanta, jota käytetään pohjana tulevissa projekteissa. Nollakantaa tullaan kehittämään vielä pitkään laitoksen valmistumisen jälkeen tehdasteisteissä ja käyttöönotossa kertyneen tietämyksen ja kokemusten perusteella, jotta tulevaisuudessa voidaan tarjota asiakkaille entistä paremmin toimivia tuotteita.

## LÄHTEET

- Aalto university. 2015. Automaation perustoiminnot ja niiden toteutus. [Verkkosivu]. Aalto university. [Viitattu 8.2.2021]. Saatavilla: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/293726/mod\\_resource/content/1/2\\_Toiminnot\\_2015%2Bliitteet.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/293726/mod_resource/content/1/2_Toiminnot_2015%2Bliitteet.pdf)
- Ajo, R., Hakonen, S., Harju, H., Järvi, J., Kaskes, K., Lenardic, E., Niukkanen, E., Nurminen, T., Ritala, P., Tolppanen, M. & Tommila, T. Ei päiväystä. Laatu automaatiossa: parhaat käytännöt. [Verkkosivu]. Suomen automaatioseura. [Viitattu 27.2.2021]. Saatavilla: <https://www.automatioseura.fi/site/assets/files/1426/laatuautomaatiossa.pdf>
- Andritz. 2021a. [Verkkosivu]. Andritz AG. [Viitattu 20.3.2021]. Saatavilla: <https://www.andritz.com/group-en/about-us>
- Andritz. 2021b. Andritz offers the Wet gas Sulfuric acid(WSA) process for kraft mills. [Verkkosivu]. Andritz AG. [Viitattu 16.1.2021]. Saatavilla: <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/pulp-production/kraft-pulp/wet-gas-sulfuric-acid>
- Blomfel, F. Ilmastopäästöjä vähennetty tehokkaasti. 2.12.2020. [Verkkojulkaisu]. Metsäteollisuus. [Viitattu 16.1.2021]. Saatavana: <https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/ilmapaastoja-vahennetty-tehokkaasti>
- Control Automation. Ei päiväystä. Split-range Control. [Verkkojulkaisu]. Control Automation. [Viitattu 22.3.2021]. Saatavilla: <https://control.com/textbook/control-valves/split-ranging/>
- Forest BioFacts 2021a. NCG Destruction. [Verkkoalusta]. Forest BioFacts – oppimisympäristö. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavilla: Vaatii lisenssin <https://forestbiofacts.com/energy-and-biofuels/production-processes-recovery-and-energy/ngc-destruction/>
- Forest BioFacts 2021b. Malodorous gases control in kraft pulp mill. [Verkkoalusta]. Forest BioFacts – oppimisympäristö. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavilla: Vaatii lisenssin <https://forestbiofacts.com/environmental-control-and-management/environmental-control/air-emission-treatment/malodorous-gases-control-in-a-kraft-pulp-mill/>
- Forest BioFacts 2021c. Sulphuric acid production out of NCG. [Verkkoalusta]. Forest BioFacts – oppimisympäristö. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavilla: Vaatii lisenssin <https://forestbiofacts.com/pulping-and-biorefining/kraft-pulping/recovery-of-cooking-chemicals-and-by-products/sulphuric-acid-production-out-of-cncg-concentrated-non-condensable-gases/>
- Haldor Topsoe. 2021a. Sulfuric acid cooling system. [Verkkosivu]. Haldor Topsoe A/S. [Viitattu 15.3.2021]. Saatavilla: <https://www.topsoe.com/products/equipment/sulfuric-acid-cooling-system?hsLang=en>

- Haldor Topsoe. 2021b. Sulfuric acid / Wet gas sulfuric acid (WSA) [Verkkosivu]. Haldor Topsoe A/S. [Viitattu 16.1.2021]. Saatavilla: <https://www.topsoe.com/processes/sulfuric-acid/wet-gas-sulfuric-acid-wsa>
- Halko, P., Härkönen, S., Lähteenmäki, I. & Välimaa, T. 1990. Teollisuuden mittaustekniikka. 1990. Helsinki: Valtion painatuskeskus
- Halttunen, J., Hoffren, H., Jalkanen, J-P., Joronen, T., Juslin, K., Kettunen, A., Kirmanen, J., Koskelainen, L., Koukkunen, T., Kovács, J., Lautala, P., Leed, H., Majanne, Y., Markkula, E., Mononen, J., Mäkilä, J., Ollikainen, T., Paljakka, M., Peltonen, A., Suhonen, T., Tullenheimo, T., Turunen, P., Uddfolk, J. & Viskari, T. 2007. Voimalaitosautomaatio. Helsinki: Suomen automaatioseura.
- Harju, T. & Marttinen, A. 2000. Säättötekniikan koulutusmateriaali. [Verkkojulkaisu]. Suomen automaatioseura. [Viitattu 16.1.2021]. Saatavilla: [https://www.automatioseura.fi/site/assets/files/1426/pid\\_kirja\\_1-1.pdf](https://www.automatioseura.fi/site/assets/files/1426/pid_kirja_1-1.pdf)
- Henttonen, J., Huhtelin, T., Jussila, T., Ketonen, M., Kurki, J., Lautala, P., Leppäkoski, J., Lieslehto, J., Majanne, Y., Nieminen, H., Raiskila, P., Silvennoinen, E., Suikkanen J., Tuomivaara, S., Veijola, R., Vilkkio, M. & Zilliacus, P. 1992. Kehittyneiden säätömenetelmien soveltaminen prosessiteollisuudessa. Helsinki: Suomen automaatioseura Oy.
- Hrankowsky, B., Alford, J. & Rhinehart, R. Data filtering in process automation systems. Ei päiväystä. [Verkkojulkaisu]. International society of automation. [Viitattu 20.1.2021] Saatavilla: <https://www.isa.org/intech-home/2018/july-august/features/data-filtering-in-process-automation-systems>
- Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Helsinki: Otava
- Hänninen H., Karppinen, M., Leskelä, M. & Pohjakallio, M. 2018. Tekniikan kemia. Helsinki: Otava
- Knowpulp. 2021a. Rikkihappo (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). [Verkkoalusta]. KnowPulp – oppimisympäristö. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavilla: Vaatii lisenssin <https://www.knowpulp.com/>
- Knowpulp. 2021b. Raaka-aineet. [Verkkoalusta]. KnowPulp – oppimisympäristö. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavilla: Vaatii lisenssin <https://www.knowpulp.com/>
- Knowpulp. 2021c. Materiaali- ja energiatase. [Verkkoalusta]. KnowPulp – oppimisympäristö. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavilla: Vaatii lisenssin <https://www.knowpulp.com/>
- Knowpulp. 2021d. Soodakattila. [Verkkoalusta]. KnowPulp – oppimisympäristö. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavilla: Vaatii lisenssin <https://www.knowpulp.com/>



- Knowpulp. 2021e. Perusmittaukset. [Verkkoalusta]. KnowPulp – oppimisympäristö. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavilla: Vaatii lisenssin <https://www.knowpulp.com/>
- Knowpulp. 2021f. Kenttälaitetekniikka. [Verkkoalusta]. KnowPulp – oppimisympäristö. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavilla: Vaatii lisenssin <https://www.knowpulp.com/>
- Knowpulp. 2021g. Venttiilit. [Verkkoalusta]. KnowPulp – oppimisympäristö. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavilla: Vaatii lisenssin <https://www.knowpulp.com/>
- Majanne, Y. & Välisuo, M. 2007. Voimalaitosprosessien ohjaus. [Koulutusmateriaali]. Tampere university of technology. [Viitattu 16.1.2021]. Saatavilla: <http://automation.tkk.fi/attach/AS-84-3134/voimalaitosohjaus.pdf>
- Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. & Hupa, M. 1995. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Teknillisten Tieteiden Akatemia.
- Savolainen, J. & Vaittinen, R. 2007. Säättötekniikan perusteita. Helsinki: Suomen robotiikkayhdistys.
- Seppälä, M., Klemetti, U., Kortelainen, V-A., Lyytikäinen, J., Siitonen, H. & Sironen, R. 1999. Kemiallinen metsäteollisuus 1: Paperimassan Valmistus. Helsinki: Opetushallitus
- Siemens AG. Ei päiväystä. COMOS – Making data work. [Verkkosivu]. Siemens AG. [Viitattu 22.3.2021]. Saatavilla: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/plant-engineering-software-comos.html>
- Siemens AG. Ei päiväystä. Operating Manual. [Käyttöohje]. Siemens AG. [Viitattu 21.2.2021]. Saatavilla: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/156/102422156/att\\_48545/v1/Logical\\_enUS\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/156/102422156/att_48545/v1/Logical_enUS_en-US.pdf)