

Ferrosulfaatin annostelun automatisointi

Sonja Mäkinen

OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2019

Automaatioteknologian koulutus
Ylempi AMK

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Automaatioteknologian koulutus, ylempi AMK

MÄKINEN, SONJA:
Ferrosulfaatin annostelun automatisointi

Opinnäytetyö 61 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Marraskuu 2019

Tämä tutkimus käsittelee ferrosulfaatin annostelun automatisointia Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla. Tavoitteena oli optimoida biologisille suodattimille parempi toiminta, parantaa puhdistustulosta, vähentää prosessinhoitajien työkuormaa ja kemikaalikustannuksia laitoksella. Fosforin poistaminen on prosessin ja luonnon kannalta tärkeää rehevöitymisen estämiseksi. Poisto tapahtuu saostamalla fosfori rautapohjaisen ferrosulfaatin avulla.

Työssä haettiin sopivaa säätötapaa ferrosulfaatin annostelun automatisointiin mallinnusta ja simulointia hyödyntäen. Mittausdataa haettiin Valmet DNA -automaatiojärjestelmästä, ja siirrettiin Matlabiin. Tämän pohjalta prosessia mallinnettiin System Identification Toolboxin avulla. Tavoitteena oli löytää hyvä prosessimalli, jonka avulla voitaisiin vertailla kolmea eri säätötapaa keskenään Simulink-ohjelman avulla. Valitut säätötavat olivat takaisinkytketty säätö, ennakoiva säätö ja Smith-prediktori.

Työn aikana päädyttiin lopputulokseen, että puhtaasti matemaattisen mallinnuksen käyttäminen kemiallisen ja biologisen prosessin yhdistelmän kuvaamiseen on haastavaa. Saadut prosessimallit eivät olleet riittävän hyviä, joten säätömenetelmien vertailua ei voitu aloittaa Simulinkilla. Mallinnuksen yhteydessä ilmeneviä ongelmia olivat mm. viiveen suuruus, prosessimallin vaillinaisen kyky kuvata tarpeeksi hyvin todellisuutta sekä se, että suodattimille tulevaan fosfaattiin vaikuttaa muitakin suureita kuin ferrosulfaatin summavirtaus. Prosessiin vaikuttavat ulkoiset häiriötekijät eivät ole mitattavissa tai ne eivät ole tiedossa. Mikäli askelvastekokeiden pituutta olisi voitu pidentää, tulokset olisivat voineet olla parempia.

Edellä mainittujen ongelmien vuoksi säätötapojen vertailun toteuttaminen ei olisi tuottanut toimivaa säätöratkaisua. Tutkimuksessa ehdotetaan toista menetelmää säätötavan valintaan tai säätötavan määrittämistä suoraan tunnettujen kemiallisten ja biologisten ilmiöiden perusteella. Prosessin parempi ymmärtäminen ja tarvittavien suureiden mittaaminen olisi hyödyllistä, jotta saadaan riittävä data sekä mallinnusta että säätöä varten. Tämä vaatii mm. viiveen selville saamista, uusien vaikutussuhteiden löytymisen ja yhteistyötä laitoksen prosessin ohjauksesta vastaavien ja sen kemian ja mikrobiologian ilmiöt tuntevien kanssa.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Master's Degree Programme in Automation Technology

MÄKINEN, SONJA:
Automation of Ferrous Sulphate Dosing

Master's thesis 61 pages, appendices 0 pages
November 2019

This study examines the possibility of automating the ferrous sulfate dosing at the wastewater treatment plant in Viikinmäki, Finland. The aim of the study was to optimize the biological filtration process, improve the filtration, and to reduce workload and chemical costs. The removal of phosphates from waste water is important due to the impact on both process control and the environment to prevent eutrophication. The removal is done by coagulating the phosphates with ferrous sulfate.

Modelling and simulation were used to identify a suitable control method for automatic dosing of ferrous sulphate. Measurable data was retrieved from Valmet DNA control system and transferred to Matlab. With the available data, the process was modelled with System Identification Toolbox. The aim was to generate a good process model to use Simulink for evaluating three different control methods. The methods selected for comparison were feedback control, feedforward control and the Smith predictor.

The conclusion of the research was that the use of this type of mathematical modelling for a biological-chemical process is challenging. The created process models were not accurate enough to allow control method analysis with Simulink. Among the issues encountered during the modelling were: substantial process feedback delay, inaccuracy of the process modelling, and lack of measurable data on other variables affecting the phosphate concentration in addition to sum flow of ferrous sulphate. These additional process variables are either not measured or known at this time. Lengthening the duration of step response tests could have yielded better results.

It is recommended that either an alternative approach should be considered for analysing the control method, or the control should be implemented on basis of known chemical and biological processes. This recommendation calls for better understanding of the process and measurement of all the potential variables to ensure sufficient data for both process modelling and control. This would require identifying the process feedback delay mechanism, interaction of different process variables and cooperation with the persons in charge of the process and with knowledge of the chemistry it involves.

Key words: waste water treatment plant, modelling, Matlab, ferrous sulphate, System Identification Toolbox

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Työn tavoite ja tutkimuskysymys	7
1.2	Tutkimuksen rajausta	9
1.3	Tutkimuksen tärkeys yrityksen kannalta	9
1.4	Tutkimuksen rakenne	10
2	TUTKIMUSMENETELMÄT	11
2.1	Tutkimusstrategia ja -menetelmä	11
2.1.1	Konstruktivisen tutkimuksen ydinpiirteet	11
2.1.2	Konstruktivisen tutkimuksen hyödyt	12
2.1.3	Konstruktivisen tutkimuksen haitat	13
3	TEOREETTINEN TAUSTA	14
3.1	Jätevedenpuhdistus	14
3.1.1	Ferrosulfaatin annostelu	16
3.1.2	Suodatinlaitos	18
3.1.3	Biologinen suodatus	20
3.1.4	Poistopumppaamo	24
4	SÄÄTÖTAVAT	26
4.1	Takaisinkytketty säätö	26
4.1.1	Yleistä	26
4.1.2	PID-säätö	27
4.2	Ennakoiva säätö	28
4.3	Smith-prediktori	29
5	PROSESSIMALLIN LUOMINEN	31
5.1	Mallinnuksen käyttö	31
5.2	Yleistä mallintamisesta	31
5.2.1	Staattinen malli	33
5.2.2	Dynaaminen malli	34
5.2.3	Mitä oikeastaan on ohjaus?	35
5.3	Käytetyt ohjelmat	36
5.3.1	Matlab	36
5.3.2	Simulink	37
5.3.3	System Identification Toolbox	37
5.4	Mallinnus ja simulointi	38
5.5	Matlab vertailu	41
5.6	Haasteet	45
5.6.1	Viive	45

5.6.2	Mittaukset	46
5.6.3	Virtaus	47
6	TULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI.....	51
6.1	Tutkimuskysymyksiin vastaaminen	51
6.2	Toimenpidesuositukset	56
6.2.1	Ferrosulfaatin annostelun automatisoinnin toteutus	56
6.2.2	Mallinnuksen hyödyntäminen tulevaisuudessa.....	57
7	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	58
	LÄHTEET	60

LYHENTEET JA TERMIT

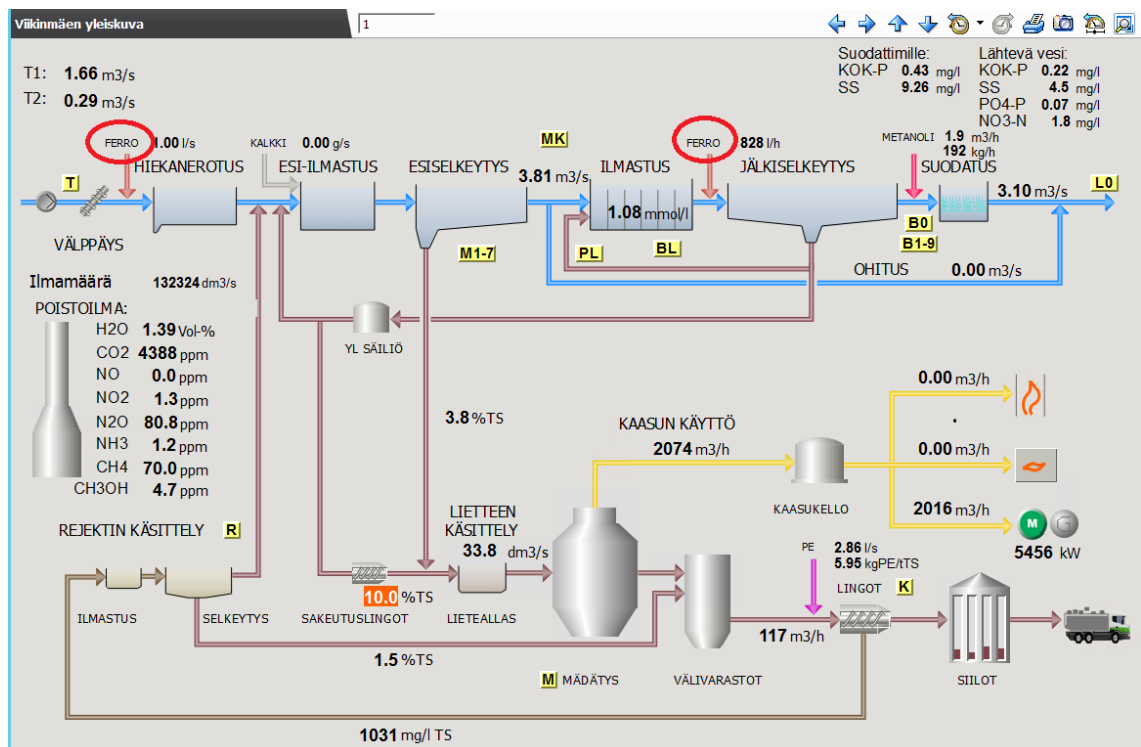
DN-suodatin	denitrifikaatiobakteerien toimintaan perustuva suodatusmenetelmä
ferrosulfaatti	rautapitoinen kemiallinen yhdiste
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut
KOK-N	kokonaistyyppi
KOK-P	kokonaisfosfori
kuollut aika	aika, joka kuluu sisääntulon muutoksesta ulostulon reagoimiseen
Laplace-muunnos	integraalimuunnos
malli	matemaattinen kaava
NH ₄ -N	ammoniumtyppi
NO ₃	nitraatti
NO ₃ -N	nitraattityppi
OP	ortofosfaatti
PID	proportional-integral-derivative-säädin
PO ₄	fosfaatti
PO ₄ -P	fosfaattifosfori (liukoinen fosfori)

1 JOHDANTO

1.1 Työn tavoite ja tutkimuskysymys

Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla puhdistetaan noin 800 000 ihmisen jätevedet. Puhdistamo on valmistunut vuonna 1994 ja se on louhittu kallioon Helsingin Viikinmäkeen. Puhdistettu jätevesi johdetaan kalliotunnelia pitkin avomerelle, noin 8 km päähän rantaviivasta. Jätevesi puretaan Katajaluodon edustalle yli 20 metrin syvyyteen. Puhdistamolle tulevasta jätevedestä noin 85 prosenttia on yhdyskuntajätevettä ja 15 prosenttia teollisuusjätevettä. (HSY 2017)

Fosforin poistaminen on prosessin ja luonnon kannalta tärkeää rehevöitymisen estämiseksi. Poisto tapahtuu saostamalla fosfori rautapohjaisen ferrosulfaatin avulla. Ferrosulfaattia syötetään kahteen otteeseen: prosessin alkupäähän ennen hiekanerotusta sekä loppupäähän ennen jälkiselkeytystä. Kuvassa 1 näkyy ferro-teksteillä kohdat, joihin ferrosulfaattia syötetään.



KUVA 1. Viikinmäen prosessin yleiskuva (Valmet 2019)

Puhdistamolla on tarve automatisoida fosforin saostuskemikaalin annostelu, mikä helpottaa prosessinhoitajien työtä, vähentää kemikaalikustannuksia ja parantaa puhdistustulosta. Tärkeimpänä kaikesta, Itämereen päätyy vähemmän rehevöittävää fosforia. Saostus tehdään tällä hetkellä manuaalisesti.

Tehtävä on etsiä automaatiotekniikan avulla ratkaisu ferrosulfaatin annostelun automatisointiin ja verrata valittuja säätömenetelmiä keskenään mallinnusta hyödyntäen. Prosessin syvempi asiantuntemus saadaan laitoksen projektipäälliköltä Anna Kuokkaselta, sekä tuotannon esimieheltä Kim Nymanilta.

Automaatiojärjestelmä ja sen automatisoidut prosessit ovat edellytys jätevedenpuhdistamon toiminnalle. Automaatio mahdollistaa laitoksen käytön suhteellisen pienellä henkilömäärällä. Joissakin puhdistusprosessin vaiheissa on käytetty enemmän automatiikkaa kuin toisissa. Tästä esimerkkinä prosessin alkupään erittäin haastavat tulopumppujen vuorottelulogiikat, johon voidaan verrata poistopumppaamoja, joka toimii hieman yksinkertaisemmalla logiikalla perustuen virtaamaan ja pinnankorkeuden mittauksiin.

Työn tarkoitus on selvittää sopivin säätötapa ferrosulfaatin annosteluun sen 2. annostelupisteessä.

Tutkimuskysymykset:

- Saadaanko Matlab ja Simulink-ohjelmistolla luotua prosessia hyvin kuvaava matemaattinen malli ilman saostuksen kemian ja suodatinten bakteerien toiminnan teoreettista kuvaamista?
- Kuinka hyvin saadaan luotua biologista prosessia kuvaava matemaattinen malli?
- Millä valituista säätötavoista saadaan optimaalisin tulos ferrosulfaatin annostelussa?
- Minkälaisia haasteita ilmenee?

1.2 Tutkimuksen rajaus

Työstä rajataan pois seuraavat asiat:

- Säättösovelluksen teko Valmet DNA:lla
- Ferrosulfaatin 2. annostelupisteen käyttöönotto ja käytännön testaus
- Ferrosulfaatin 1. annostelupisteen säätö (annostelu ennen hiekanerostusta)
- Toimintakuvaus

Säättösovelluksen tekeminen Valmet DNA -järjestelmään veisi liian paljon aikaa käytettävissä oleviin resursseihin nähden. Myöskään ferrosulfaatin 1. annostelupisteen säätämistä ei toteuteta tässä työssä, koska viive annostelupisteestä mitauspisteeseen on liian pitkä. Toimintakuvauksen tehdään myöhemmin ja se on rajattu pois tästä työstä. Työn tutkimusosuuden ollessa laaja, myös säättösovelluksen teko, käyttöönotto ja testaukset tehdään vasta tämän työn jälkeen.

1.3 Tutkimuksen tärkeys yrityksen kannalta

Tutkimuksella on merkittävä rooli HSY:n kannalta. Tavoite on saada edelleen parannettua jo valmiiksi hyvää puhdistustulosta, optimoida suodatin toimimaan paremmin sekä vähentää työkuormaa operaattoreilta. Projekti vastaa tiukentuneisiin ympäristövaatimuksiin, jotka luultavasti tulevat kiristymään tulevaisuudessa. HSY:llä on tehty monia kehitystehtäviä prosessiin liittyen, joiden avulla on saatu pienennettyä Itämereen kohdistuvaa fosfori- ja typpikuormaa. Näitä ovat esimerkiksi Valmet DNA:lle tehty autokalibrointityö sekä monet muut teknisiä insinöörityöt.

Automaatiotekniikan ja lähemmin prosessiautomaation kehittämistä ei ole juurikaan tehty HSY:n toimipisteissä. Työllä on selkeä tarve ja tarkoitus. Säättöjen optimoinnilla ja suunnittelulla voidaan saada lisää säästöjä niin energiankulutuksen kuin ympäristönäkökulmien kannalta katsoen.

1.4 Tutkimuksen rakenne

Työ koostuu johdannosta, teoreettisesta taustasta, tutkimusosasta, säätötekniikan teoriasta, prosessimallin luomisesta sekä tuloksista ja johtopäätöksistä. Johdannossa esitellään työn tausta, tavoitteet, työn rajaus ja tutkimusmenetelmä. Teoreettisessa taustassa käydään läpi koko prosessia ja tarkemmin loppupään biologisen suodattimen toimintaa. Säätötekniikan teoriaosuus kattaa työssä käytetyt eri säätömenetelmien kuvauksia.

Tutkimusosuudessa käydään läpi Matlab tai Simulink -ohjelman historiaa ja perusteluita ohjelman käytölle. Miten Matlab tai Simulink taipuu vaativiin prosessi-teollisuuden tarpeisiin? Tuleeko vastaan sellaisia asioita, joita ohjelma ei voi tehdä? Pystyykö Matlab tai Simulink ottamaan huomioon biologiset näkökulmat?

Tuloksissa perehdytään työssä saavutettuihin asioihin puhdistustuloksen ja säätötekniikan kannalta. Niissä annetaan kehitysideat, joiden avulla päästään parempaan puhdistustulokseen. Johtopäätöksissä kootaan yhteen menetelmät ja kehityskohteet, missä Matlabia tai Simulinkia voisi käyttää hyödyksi. Lopuksi arvioidaan kriittisesti, mikä työssä onnistui ja mitä voisi jatkossa kehittää lisää.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä kappaleessa käydään läpi tarkemmin tutkimusmenetelmiä, sen hyötyjä ja haittoja sekä käytettyjä työkaluja.

2.1 Tutkimusstrategia ja -menetelmä

Tutkimusmenetelmäksi työn lähtökohdat huomioiden valittiin konstruktiiivinen tutkimus, sillä tarkoitus on toteuttaa prosessin simulointi ja mallinnus ennen käyttöönottoa ja näin löytää oikea säätömenetelmä. Kehitystehtävän tavoitteena on tarjota yritykselle ratkaisu ferrosulfaatin annostelun automatisointiin. Työ lähentelee tutkimuksellista kehittämistä, koska työssä etsitään myös ratkaisu ongelmaan sekä siinä tutkitaan eri vaihtoehtoja.

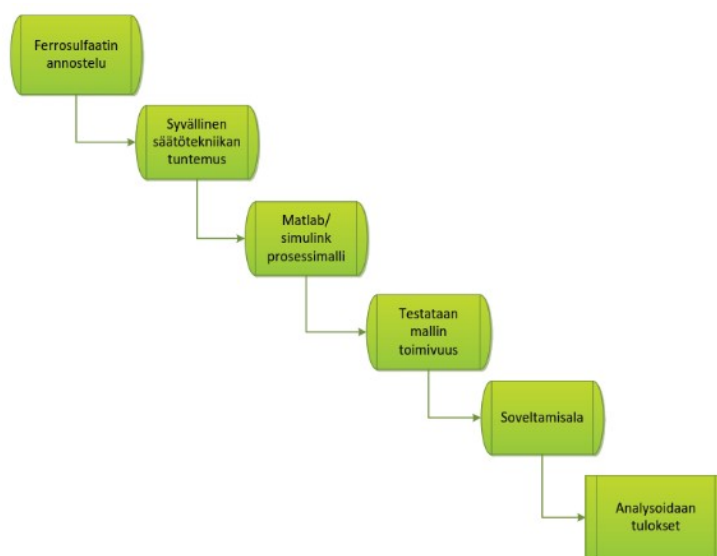
Konstruktiiivinen tutkimus pitää sisällään suunnittelua, käsitteellistä mallintamista sekä mallien testaamista ja toteuttamista. Tutkimus soveltuu konkreettisiin tuotoksiin, kuten mallin ja suunnitelman tekoon. (Oppariapu n.d.)

Keskeisenä työkaluna on Matlab ja ohjelman sisäinen apuohjelma Simulink sekä System Identification Toolbox. Työkalujen avulla on mahdollista matemaattisesti lähestyä ongelmaa. Työkalujen avulla on mahdollista lähestyä ongelmaa matemaattisesti. Ohjelma valittiin työn tarkoitukseen sopivammaksi sekä sen tunnettavuuden että kiinnostavuuden takia. Konstruktiiivisen tutkimuksen avulla pyritään ratkaisemaan reaali maailman ongelma luomalla jokin uusi konstruktio. (Metodix 2001)

2.1.1 Konstruktiiivisen tutkimuksen ydinpiirteet

Tavanomaisessa konstruktiiivisessä tutkimuksessa on jokin ongelma, johon haetaan ratkaisua. Tutkimus vaatii syvällisen teoreettisen ja käytännön osaamisen hankkimisen biologisen prosessin toiminnasta sekä eri säätömenetelmistä. Tut-

kimuksessa testataan ratkaisut sekä niiden toimivuus sekä osoitetaan konstruktiivisen tutkimuksen oikeudellisuus. (Oppariapu n.d.) Kuviossa 1 esitellään konstruktiivisen tutkimuksen rakenne.



KUVIO 1. Konstruktiivinen tutkimus

2.1.2 Konstruktiivisen tutkimuksen hyödyt

Konstruktiivisessa tutkimustavassa on monia etuja. Tutkijan näkökulmasta kyseinen menetelmä luo mahdollisuuksia päästä käsiksi mielenkiintoisiin tutkimuskohteisiin. Organisaation näkökulmasta katsoen etuna on saada kriittiset ongelmat ratkaistuksi. (Metodix 2001)

Konstruktiivinen tutkimus kaventaa tutkijoiden ja käytännön henkilöiden välistä kuilua. Täten on oleellista, että käytännön toimijoiden ja akateemisten tutkijoiden välinen vuorovaikutus, tietämyksen ja ideoiden vaihto, kuuluu tutkimusprosessiin. (Metodix 2001)

Tärkeää prosessissa on saada tutkija ja käyttöhenkilöstö sitoutumaan kehitysprojektiin. (Metodix 2001) Ferrosulfaatin annostelun prosessitietämys sekä käytännön kokemukset auttavat työn suorittamisessa. Kuten professori Kari Lukka (2001) toteaa ”on tärkeää antaa tutkijalle ja tutkimusprosessiin raaka-aineeksi kaikki merkityksellinen data sekä paras osaamisen.”

Professori Kari Lukka (2001) väittää, että konstruktivisen tutkimuksen merkittävään vaatimukseen aikaisemman tiedon testausta. Konstruktivisessa tutkimuksessa kehitetty ratkaisumallin toteutettavuus ja käytännön toimivuus testataan syvästi mallinnusta hyödyntäen. Menetelmä poikkeaa teoreettisen mallin suunnittelusta laboratorio-olosuhteissa tai haastateltavien kuuntelemisesta. (Metodix 2001)

2.1.3 Konstruktivisen tutkimuksen haitat

Konstruktiviseen tutkimukseen liittyy myös haittoja, joista tutkijan tulisi olla tietoinen. Riskeinä mainitaan kohdeorganisaation projektiin sitoutuminen, sillä tulokset heikkenevät, jos käytännön ongelman merkittävyys ei olekaan riittävää. (Metodix 2001)

Tutkimusta täytyy pitää todellisena projektina, jolla on määritelty aikakehys ja joka edellyttää intensiivistä yhteistyötä yrityksen eri asiantuntijoiden kanssa. Tutkijan kadotessa kuvasta liian usein, on tuloksena luultavasti pieleen mennyt projekti. (Metodix 2001) Näiden syiden takia tutkimuksessa pidetään säännöllisesti yhteyttä prosessin asiantuntijoihin mm. projektipäällikkö Anna Kuokkaseen ja tuotannon esimieheen Kim Nymaniin.

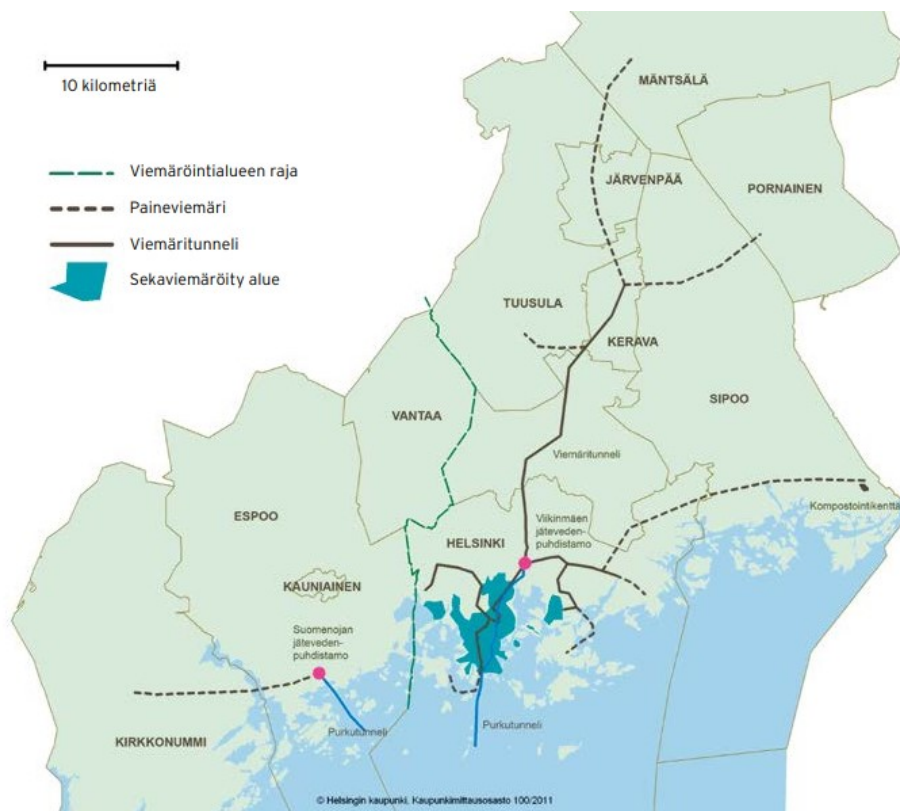
Ongelmia syntyy, jos tutkijalla ei ole kykyä sitoutua innovatiiviseen kehitystyöhön. Tutkijan tulee siis pystyä olemaan tarvittaessa kriittinen ja tuoda tutkimuksessa saavutettuja hyötyjä esille. (Metodix 2001)

3 TEOREETTINEN TAUSTA

Teoreettinen tausta pitää sisällään teoriaa Viikinmäen jätevedenpuhdistuksen toimintaperiaatteesta, nykyisestä tavasta hoitaa ferrosulfaatin toisen pisteen annostelu, biologisesta suodattimista, viemäröintialueesta sekä suodatinlaitoksen toiminnasta.

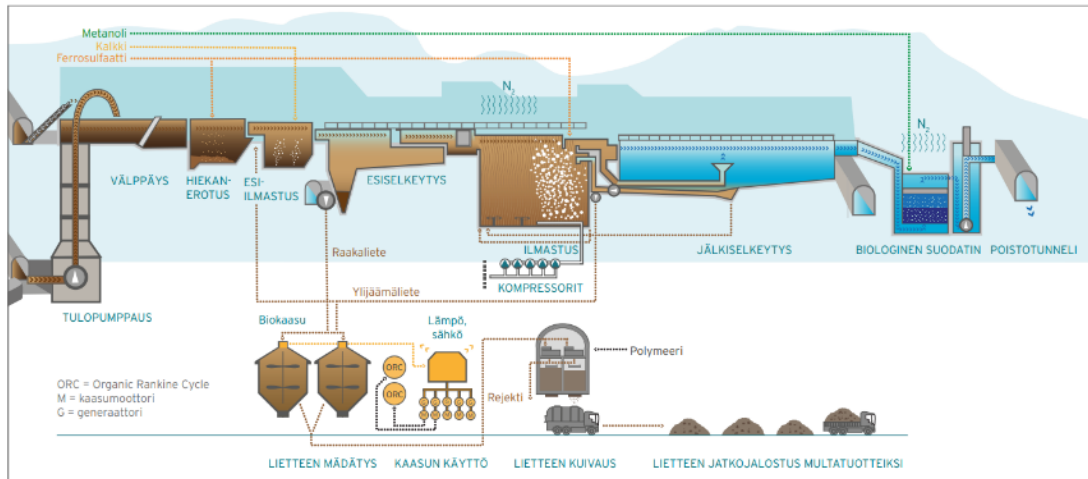
3.1 Jätevedenpuhdistus

Viikinmäen jätevedenpuhdistamo on Pohjoismaiden suurin. Siellä puhdistetaan Helsingin lisäksi myös Vantaan keski- ja itäosien, Keravan, Tuusulan, Järvenpään ja Sipoon asukkaiden sekä teollisuuden jätevedet. (HSY 2017) Kuvasta 2 ilmenee pääkaupunkiseudun viemäröintiverkosto ja Viikinmäen jätevedenpuhdistamon sijainti. ”Puhdistamon kokonaisvirtaama vuorokaudessa on noin 270 000 kuutiometriä, ja jätevettä puhdistetaan vuodessa keskimäärin 100 miljoonaa kuutiometriä” (HSY 2017).



KUVA 2. Pääkaupunkiseudun viemäröintialue (HSY 2017)

Laitoksen puhdistusprosessi perustuu aktiivilietemenetelmään, ja se sisältää kolme vaihetta: mekaanisen, biologisen ja kemiallisen puhdistuksen (kuva 3). Mekaanisessa vaiheessa välillä erotellaan yli 1 cm halkaisijaltaan suuremmat esineet pois. Fosforia poistetaan jätevedestä saostamalla se ferrosulfaatin avulla. Typenpoistoa tehostetaan denitrifikaatiobakteerien avulla biologisilla suodattimilla. (HSY 2017)



KUVA 3. Viikinmäen jätevedenpuhdistamon prosessikaavio (HSY 2017).

Taulukossa 1 esitellään puhdistustulokset pääkaupunkiseudulla. Voidaan havaita, että puhdistustulos on erittäin hyvä: kokonaisfosforin osalta 97 % ja kokonaistypen osalta 91 %.

TAULUKKO 1. Jätevedenpuhdistus pääkaupunkiseudulla 2018 (Kuokkanen 2019a)

Viikinmäki	BOD _{7ATU}	BOD _{7ATU}	Kok.P	Kok.P	Kok.N	COD _{Cr}	COD _{Cr}
	mg/l	poistoteho %	mg/l	poistoteho %	poistoteho %	mg/l	poistoteho %
LUPAMÄÄRÄYS	≤10*	≥95*	≤0,30*	≥95*	≥80**	≤75*	≥85*
Vuosi 2018	4,6	99	0,16	97	91	43	93
I/2018	4,6	98	0,16	97	90	45	93
II/2018	4,9	99	0,17	97	91	45	94
III/2018	4,3	98	0,16	97	88	40	93
IV/2018	4,5	98	0,16	98	94	42	93

Puhdistusprosessissa syntyvän lietteen orgaaninen aines hyödynnetään mädättämällä lietettä, ja myös mädätyksessä syntyvä biokaasu käytetään hyödyksi.

Kaasun avulla saadaan tuotettua energiaa laitoksen tarpeisiin, minkä seurauksena laitos on omavarainen lämmön suhteen. Sähkön omavaraisuusaste on hieman pienempi, noin 97 %. (HSY 2017)

3.1.1 Ferrosulfaatin annostelu

Ferrosulfaatin annostelun pääasiallinen tarkoitus on muuttaa liukoinen fosfori kiintoainemuotoon, jolloin se on poistettavissa kiintoaineen mukana jälkiselkeytyksessä sekä osittain myös biologisessa suodatuksessa. (Kuokkanen 2019a)

Nykyinen ferrosulfaatin ohjaustapa perustuu jatkuvatoimisiin- ja laboratoriomittauksiin sekä käyttökäytännön arvioon siitä, mihin suuntaan fosfori-typin suhde etenee. Ferrosulfaatin annostelua muutetaan suodatukseseen tulevan veden nitraattityypin ($\text{NO}_3\text{-N}$) ja suodatukseseen tulevaan ja lähtevään fosfaattiin ($\text{PO}_4\text{-P}$) perustuen. Mikäli suodattimelle tulevan nitraattityypin määrä on alhainen, ferrosulfaatin määrää lisätään. Jos taas nitraattityypin määrä on korkea, ferrosulfaatin määrää vähennetään. (Nyman 2019)

Tutkitaan kuvaa 4, josta ilmenevät suodattimille tulevat ja lähtevät mittaukset. Mikäli fosfaatin ($\text{PO}_4\text{-P}$) määrä on korkealla ja trendi näyttää olevan noususuhtainen, lisätään ferrosulfaattia. Toimitaan päinvastoin, mikäli liukoinen fosfori on matalalla suodattimille tulevassa ja suodattimilta lähtevässä vedessä. (Nyman 2019)

Laitoksen tehokkuus 20.5.6.3

PITOISUUDET	Tuleva	Lähtevä	Lupaehto
$\text{NO}_3\text{-N}$	11.6 mg/l	0.8 mg/l	
KOK-P	0.30 mg/l	0.14 mg/l	< 0,3 mg/l
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.18 mg/l	0.05 mg/l	
SS	4.72 mg/l	2.6 mg/l	< 15 mg/l

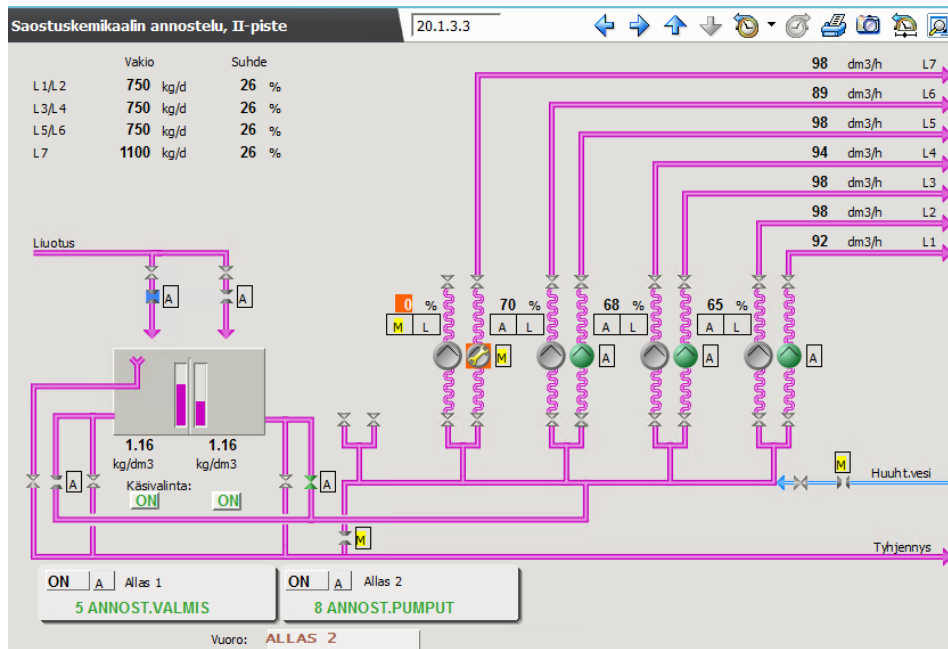
KUORMAT	Tuleva	Lähtevä
$\text{NO}_3\text{-N}$	2863 kg/d	208 kg/d
KOK-P	74.4 kg/d	33.9 kg/d
$\text{PO}_4\text{-P}$	45.6 kg/d	11.5 kg/d
Virtaama	2.86 m ³ /s	2.88 m ³ /s

Tuleva $\text{PO}_4\text{-P}/\text{NO}_3\text{-N}$ suhde: 0.016
 Lähtevä tuleva $\text{PO}_4\text{-P}/\text{NO}_3\text{-N}$ suhde: 0.013

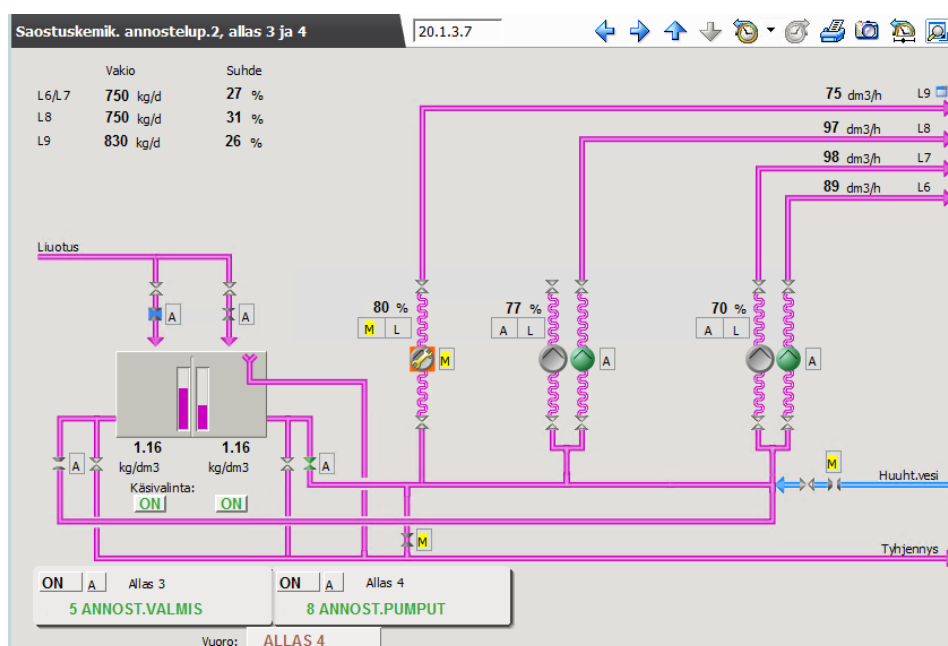
DN Suodatus

KUVA 4. Laitoksen tehokkuus (Valmet 2019)

Nykyisessä ohjaustavassa tutkitaan liukoisen fosforin määrää ($\text{PO}_4\text{-P}$). Kokonaisfosforin (KOK-P) määrään ei voida suoraan vaikuttaa, sillä se on riippuvainen kiintoaineesta. Liukoisen fosforin määrän muutos vaikuttaa kokonaisfosforin määrään saman verran. Jos liukoinen fosfori putoaa $0,10 \text{ mg/l}$, kokonaisfosfori putoaa likimain saman verran $0,10 \text{ mg/l}$. (Nyman 2019) Käyttökäytöstö tekee ferrosulfaatin kg/d annosmuutokset kuvien 5 ja 6 mukaisista näytöistä.

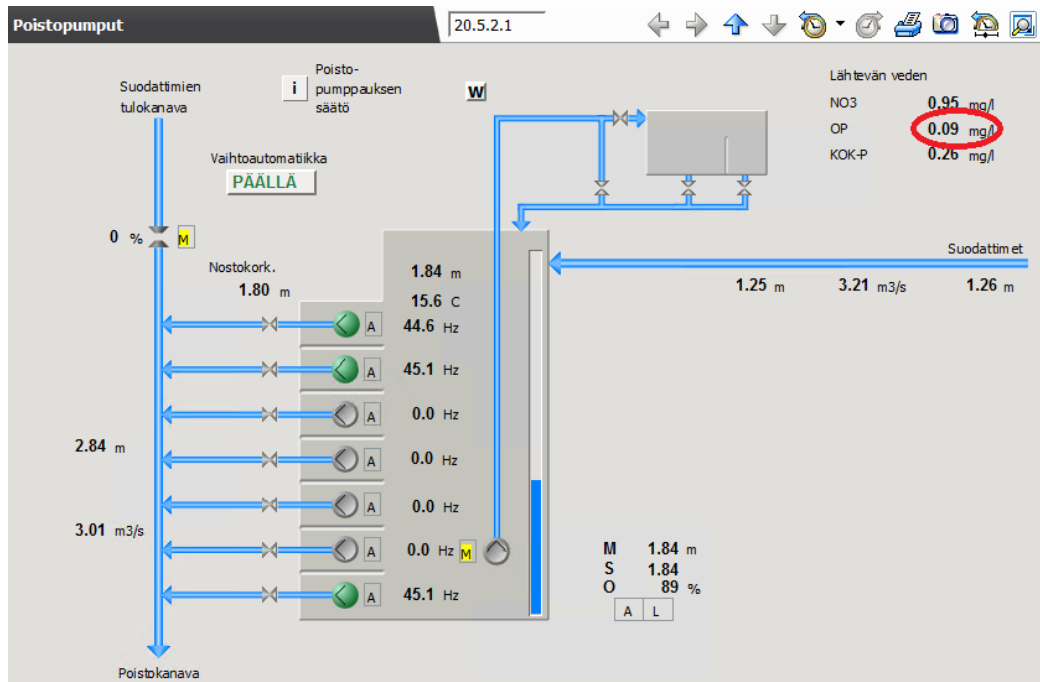


KUVA 5. Ferrosulfaatin 2. annostelupiste (Valmet 2019)



KUVA 6. Ferrosulfaatin 2. annostelupiste (Valmet 2019)

Lopuksi tarkkaillaan, että lähtevän veden fosfaattipitoisuus ei laske liian alas (kuva 7). Mikäli pitoisuus on liian pitkään alhaalla, on vaarana, että suodatin liimoittuu ja polystyreenipalloja voi kulkeutua pesun mukana pesuvesialtaisiin. Näiden tietojen pohjalta päätellään mihin suuntaan fosfaatti/nitraattisuhde on muuttumassa ja arvioidaan annostuksen muutoksen tarve. (Nyman 2019) Ferrosulfaatin annostelussa on varmistettava samanaikaisesti riittävä fosfori suodattimille ja mahdollisimman alhainen fosfori lähtevässä vedessä (Kuokkanen 2019a).

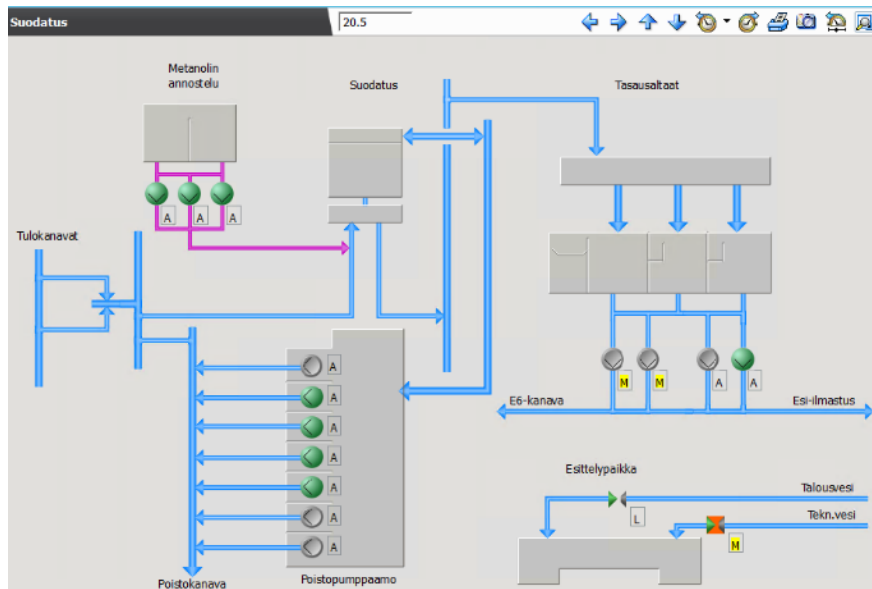


KUVA 7. Poistopumppaamo (Valmet 2019)

3.1.2 Suodatinlaitos

Suodatinlaitos otettiin käyttöön vuonna 2004 parantamaan edelleen hyvää puhdistustulosta ja vastaamaan kiristyneisiin puhdistusvaatimuksiin. Kuvassa (kuva 8) on esitetty kaikki suodatinlaitoksen prosessit, jotka voidaan jakaa seuraaviin osiin:

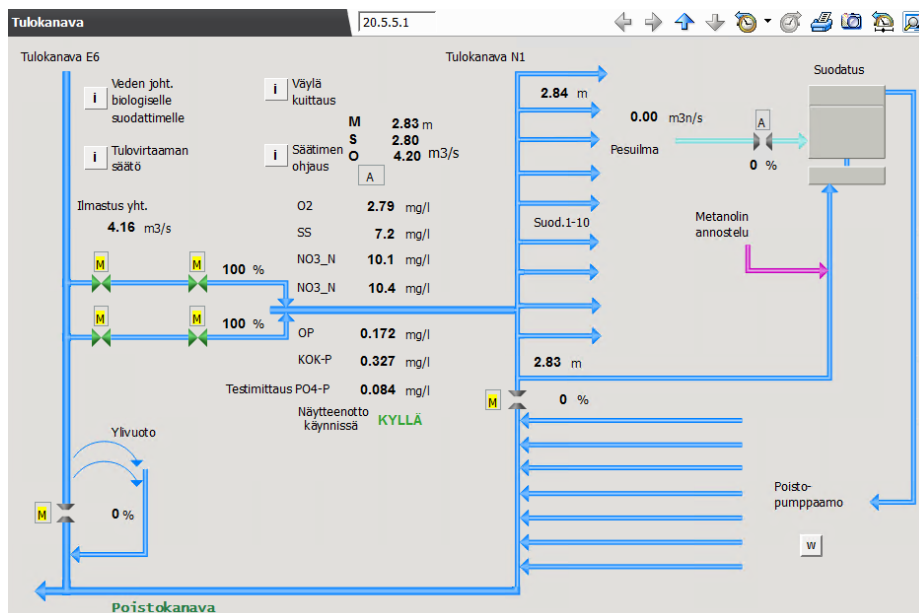
- Biologinen suodatus
- Metanolin varastointi ja syöttö
- Pesuvesien tasausaltaat



KUVA 8. Suodatinlaitos (Valmet 2019)

Alla olevassa kuvassa 9 on suodatinlaitoksen tulokanava, jossa näkyvät työn kannalta tärkeimmät mittaukset:

- KOK-P mg/l (Q6005K)
- NO₃-N mg/l (Q6001)
- PO₄-P mg/l (Q6201)



KUVA 9. Suodatinlaitoksen tulokanava (Valmet 2019)

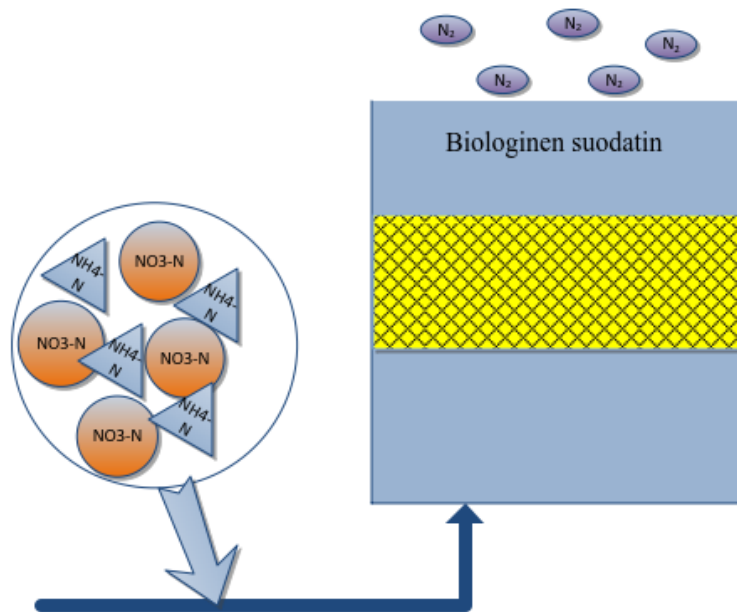
3.1.3 Biologinen suodatus

Biologinen suodatus sijoittuu loppupäähän jätevedenpuhdistusprosessia. Kuvassa 10 on biologinen suodatinlaitos, jossa erilliset suodatinsolut ovat nähtävissä. Vaiheen tarkoituksena on tehostaa aktiivilieteprosessilla käsitellyn jäteveden typenpoistoa. Anna Kuokkanen sanoo (Kuokkanen 2019b), että suodattimien toiminta perustuu denitrifikaatiobakteerien toimintaan ja nitraattityppi toimii hapen korvikkeena hapettomissa oloissa. Biologinen suodattimen suodatinmassa toimii bakteerin kasvualustana. Metanolia syötetään bakteereille hiilenlähteeksi eli ravinnoksi, jonka avulla jätevedessä oleva typpi vapautuu typpikaasuksi (Kuvio 1). Suodattimet tarvitsevat myös fosforia. (Kuokkanen 2019b)



KUVA 10. Biologiset suodatinlaitteet

Jälkiselkeytetty jätevesi johdetaan biologisen suodatinmassan läpi alhaalta ylöspäin kuten ilmenee kuviosta 2. Suodatinmassa, joka koostuu polystyreenipalloista, on korkeudeltaan noin 3 metriä. (Kuokkanen 2019b) Kuvassa 11 esitellään kyseiset pallot demo -laitteessa. Suodatinmassan päällä on vettä noin metrin verran ja kansi pitää pallot solussa, joten pallot eivät näy pinnalta katsottuna.



KUVIO 2. Biologisen suodatinsolun toimintaperiaate



KUVA 11. Polystyreenipallot demo -laitteessa

Suodattimille tulevassa vedessä on nitraattityppeä ($\text{NO}_3\text{-N}$) noin 10 - 15 mg/l, hieman ammoniumtyppeä ($\text{NH}_4\text{-N}$) ja kiintoainemuotoista tyypeä. Suodattimilta poistuu kaasuna ilmaan tyypeä (N_2). Lähtevään veteen jää pieni määrä nitraattityppeä ($\text{NO}_3\text{-N}$) noin 0,5 – 2,0 mg/l ja ammoniumtyppeä ($\text{NH}_4\text{-N}$). (Kuokkanen 2019b)

Suodattimille tulevan veden laatu vaihtelee vuorokauden sisällä ja eri vuodenaikoina sekä virtaamien vaihdellessa. Talvella tyypillisesti nitraattitypen pitoisuus on korkeampi ja korkeilla virtaamilla puolestaan pitoisuus voi laskea mutta kiintoainemuotoisen typen määrä nousta. (Kuokkanen 2019b)

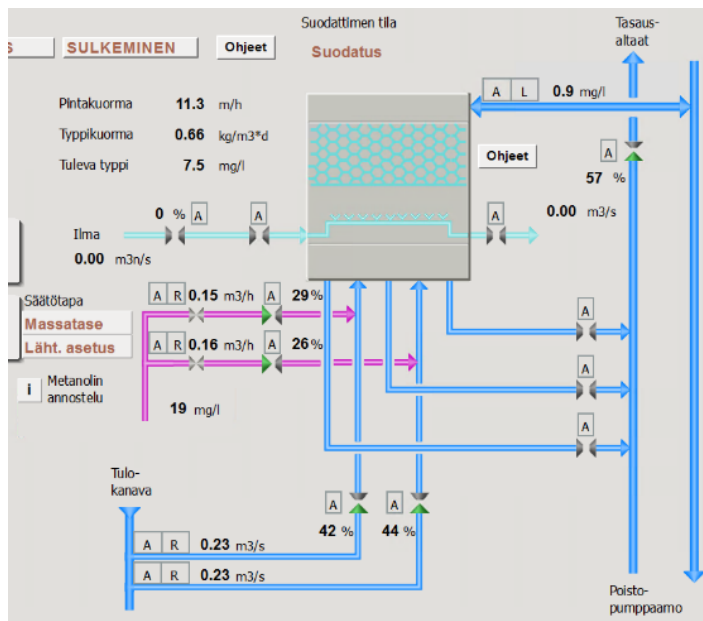
Suodattimille tulevassa jätevedessä fosfori on liukoisena mutta lähinnä fosfaattimuotoisena (PO₄-P), jonka vaihteluväli on 0,20 - 0,40 mg/l sekä kiintoainemuotoisena fosforina niin, että kokonaisfosforin vaihteluväli on keskimäärin 0,30 - 0,70 mg/l. Lähtevän veden fosfaattipitoisuuden (PO₄-P) vaihteluväli on 0,05 - 0,20 mg/l ja kokonaisfosfori 0,15 - 0,34 mg/l. Fosforin pitoisuudet suodatukseen tulevassa vedessä siis vaihtelevat. Muutamissa poikkeustapauksissa tulevan veden fosfaatti on ollut korkeampi kuin 0,40 mg/l.

Suodattimille tuleva vesi johdetaan poikittaisesta jakokanavasta, josta se jaetaan kaikkien käytössä olevien solujen kesken. Denitrifikaatiobakteerien toiminnan mahdollistamiseksi suodatinsolun tulevan veden putkeen annostellaan laimennettua (enintään 10 %) metanoli-vesiseosta. Metanolin määrä annostellaan suodatinsolukohtaisesti. (Suodatinsolujen pesu -toimintaselostus. n.d.) Alla olevassa taulukossa 2 esitetään biologisen suodatinlaitoksen perustietoja.

TAULUKKO 2. Biologisen jälkisuodattimen maksimivirtaamat ja mitat (Kuokkanen 2019a)

Suure	Mitoitusarvo
Tulovirtaama, max	20 000 m ³ /h
Tulovirtaama/solu, max	2 000 m ³ /h
Pinta-ala yht.	1 440 m ²
Suodatusmassan korkeus	3 m
Tilavuus yht.	4 320 m ³
Pesuvesialtaat, tilavuus	3 x 700 m ³
Metanoliaaltaat, tilavuus	2 x 200 m ³
Ilmamäärä	1 600 m ³ /h
Lukumäärä	10 kpl

Kuvassa 12 esitellään biologinen suodatinsolu Valmet DNA -automaatiojärjestelmän näkökulmasta. Kyseisiä soluja löytyy laitokselta 10 kappaletta.



KUVA 12. Biologinen suodatinsolu (Valmet 2019)

Suodatinsolu tukkeutuu välillä, jolloin puhdistus on tarpeellinen. Tämä tehdään vuoroin ilmalla, vuoroin kierrätetyllä vedellä. Pesuissa poistuvat vedet johdetaan tasausaltaisiin, joista likaisimmat osat pumpataan laitoksen alkupäähän esi-ilmastukseen ja puhtaampi osa palautetaan biologisille suodattimille. Pesuja on kahdenlaisia: lyhyempiä minipesuja, jotka aktivoituvat tukkeutumisasteesta, jolle automaatiojärjestelmä laskee tukkeutumisprosentteja ja pidempiä pesuja, jotka käynnistyvät ajastetusti esimerkiksi kerran päivässä. Mikäli pesu ei auta toivotulla tavalla ja tukkeutumisprosentti nousee, siitä seuraa hälytys (kuva 13). (Suodatin-solujen pesu -toimintaselostus. n.d.)

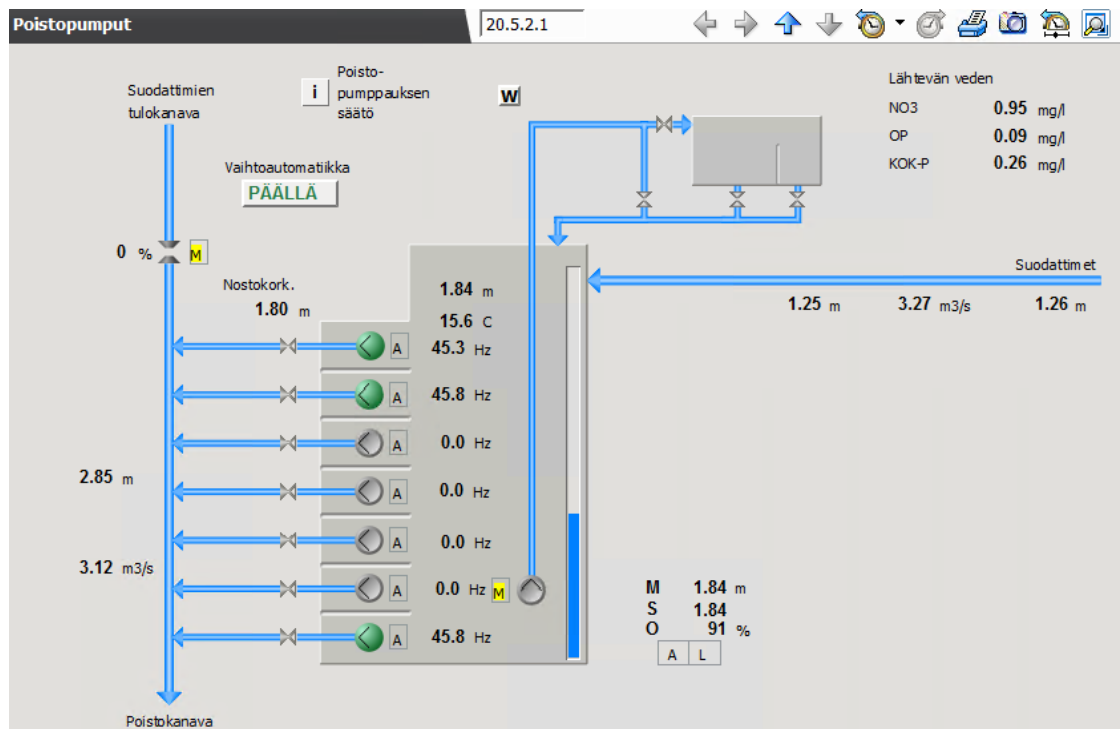
KUVA 13. Hälytysrajat (Valmet 2019)

3.1.4 Poistopumppaamo

Suodatuksen läpi mennyt vesi johdetaan poistopumppaamolle, josta se pumpataan poistotunneliin. (HSY 2017) Poistopumppaamon kautta laitoksella käsitelty vesi johdetaan Katajaluodon edustalle. Kuvassa 14 esitellään poistopumppaamo: laitoksella on yhteensä 7 poistopumppua, joita ajetaan pinnankorkeuden mukaan.

Suodattimilta tuleva vesi tulee kuvassa 14 oikealta kohdassa ”suodattimet” ja päätyy altaaseen, josta pumput pumpaavat vedet poistokanavaan, jossa ovat seuraavat mittaukset:

- NO₃ mg/l (Q6008)
- OP mg/l (Q6201)
- KOK-P mg/l (Q6201K)



KUVA 14. Poistopumput (Valmet 2019)

Kuvassa 15 ilmenee aiemman valvomoikkunan mukainen kuva asennetuista pumpuista. Poistopumput ovat uppopumppuja, joten ne eivät näy pinnalle. Pois-

topumput lisättiin biologisen suodatuksen valmistumisen jälkeen, koska suodattimet rakennettiin alemmaksi kuin poistokanava. Täten pumpput nostavat suodattimilta tulevan veden vain poistokanavaan, noin 1,5 m ylemmäksi.



KUVA 15. Poistopumput

Mikäli poistopumppaamo ei ole käytössä esim. sähkökatkon sattuessa, menee laitos ohituksena mereen. Ohituksessa vesi on kulkenut alkupään prosessin läpi, mutta se viedään poistokanavaan ennen biologisia suodattimia. Tämän seurauksena puhdistustulos heikkenee.

4 SÄÄTÖTAVAT

Säätötavat pitävät sisällään kehittämistehtävässä tutkittavia säätötapoja, jotka valittiin simuloitavuuden ja tunnettavuuden näkökulmasta.

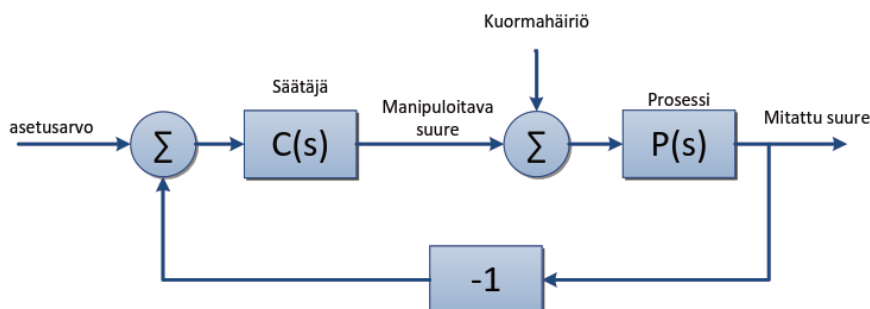
4.1 Takaisinkytketty säätö

4.1.1 Yleistä

Takaisinkytketyn säädön yksi ensimmäisiä käyttökohteita oli pinnankorkeuden säätö venttiilin ohjaukseen perustuen. Jos pinnakorkeus laskee, pintaan kiinnitetty kytkin vaihtaa asentoon. Toisaalta jos pinnakorkeus nousee, venttiili aukeaa ja virtaava aine pääsee säiliöön. Tätä peruseriaatetta käytetään edelleen mm. keittimissä ja vessan huuhtelemisessa (Morris 2001, 1)

Takaisinkytketty säätö esiintyy jokapäiväisen elämän sovelluksissa. Esimerkkejä ovat huoneen lämpötilaa säätelevä termostaatti, tai monimutkaisemmat sovellukset, jotka ylläpitävät satelliittien kommunikaatiota. Sitä käytetään ratkaisevassa osassa useissa insinöörijärjestelmissä. (Morris 2001, s xi)

Takaisinkytketyn säädön tarkoitus on saada mitattu suure samaksi asetusravon kanssa tai mahdollisimman lähelle sitä. Kuviossa 3 on esitetty takaisinkytketyn säädön vuokaavio. (Airikka 2019a) Kuormahäiriö häiritsee prosessia pyrkien muuttamaan säädettävää suureta (kuvio 3). Kuormahäiriöinä ovat virtaus, viive, sekä muita suureita, jotka kaikki eivät ole mitattavissa.



KUVIO 3. Takaisinkytketyn säädön vuokaavio (Airikka 2019a, muokattu)

Säätötapaa voidaan pitää ”itsekorjaavana”, koska järjestelmän mittauksia käytetään korjaamaan lähtöjä. (Morris 2001, 1) Ennakoivaa säätöä voidaan käyttää epävakaaan järjestelmän muuttamisessa vakaaksi. (Morris 2001, 3)

Häiriöt on mahdollista poistaa takaisinkytketyllä säädöllä. Joissain tilanteissa on mahdollista mitata häiriöitä ennen kuin ne vaikuttavat prosessiin. (Åström & Hägglund 2006, 154) Biologisessa suodatuksessa ilmeneviä häiriöitä ovat mittausvirheet, viive ja virtaus. Näistä mitattava suure on virtaus. Mittausvirheet ovat tiedossa kullekin anturille. Luonnollisesti häiriöitä voidaan yrittää poistaa ennen kuin säädin ehtii tehdä muutoksia (Åström & Hägglund 2006, 154).

Mahdollisesti myös pelkkä PD-säätö voisi toimia tässä tapauksessa koska se soveltuu professori Jan Miklesin mukaan prosesseihin, joissa on integroivaa vaikutusta tai suuria viiveitä. (Mikles 2007, 276) Ferrosulfaatin annostelussa on pitkä viive, minkä pohjalta PD-säätö voisi sopia käytettäväksi.

4.1.2 PID-säätö

Prosessiteollisuudessa varmasti eniten käytetyin säätötapa on PID-säätö. Tästä samaa mieltä ovat automaatioalan pioneerit: Karl J Åström, Tore Hägglund, Jan Mikles ja Miroslav Fikar.

PID-säätimessä on yhdistettynä kolme eri säädintä: P, I ja D. Näistä jokaisella on oma tehtävänsä ja siksi niille annetaan omat viritysparametrit. Tämän säätötavan suurin riski liittyy prosessin epästabiiliuteen, mikäli säädintä ei ole viritetty hyvin. (Airikka 2019a)

PID-säätö koostuu kolmesta osasta, jotka ovat:

- P= vahvistuskerroin
- I=integrointiaika
- D=derivointiaika

Takaisinkytketty säätö on tärkeä tekniikka, jota hyödynnetään laajasti prosessiteollisuudessa. Säättöavan edut ovat:

- Korjaavat toiminnat, jotka tapahtuvat heti kun mitattava suure eroaa asetusarvosta riippumatta lähteestä ja häiriön tyypistä
- Tarvitsee vain pienen määrän tietoa prosessista, jota ohjataan
- Monesti käytetty PID-säädin on karkea ja monikäyttöinen. Mikäli prosessisuureet muuttuvat, riittää todennäköisesti uudelleenviritys (Seborg & Edgar 2004, 388)
- Takaisinkytkettyä säätöä käytetään laitoksella mm. metanolin annostelussa ja ilmastuksessa

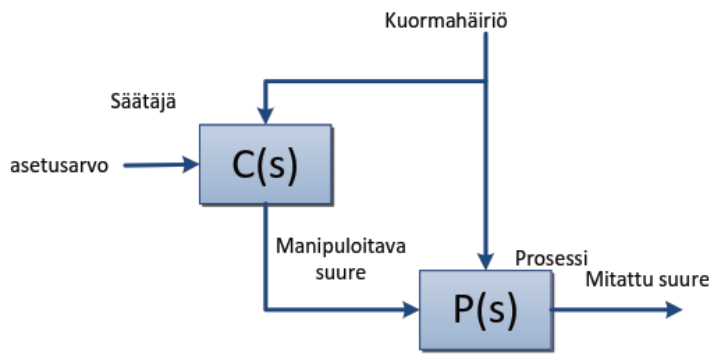
Säättöavan haittoja puolestaan ovat:

- Ei korjaavia toimenpiteitä ennen kuin poikkeamia havaittu
- Ei tarjoa ennakoivaa ohjausta mittavirheisiin tai tunnettuihin häiriöihin (Seborg & Edgar 2004, 388)

4.2 Ennakoiva säätö

Ennakoivaa säätöä ei käytetty laajalti prosessiteollisuudessa ennen 1960-lukua. Sen jälkeen säätöä on käytetty mm. höyrystimissä, kattiloissa ja jätteenkäsittelylaitoksissa. (Seborg & Edgar 2004, 389)

Täytyy muistaa, että säättötappaa käytetään aina takaisinkytketyn säädön kanssa. Takaisinkytketty säätötappa vaatii asetusarvojen muutosten seurantaan tukahduttamaan mittamattomia häiriöitä. Mittamattomia häiriöitä esiintyvät aina oikeissa prosesseissa. (Brosilow 2002) Kuviossa 4 esitellään yksinkertaistettu vuokaavio ennakoivasta säädöstä.



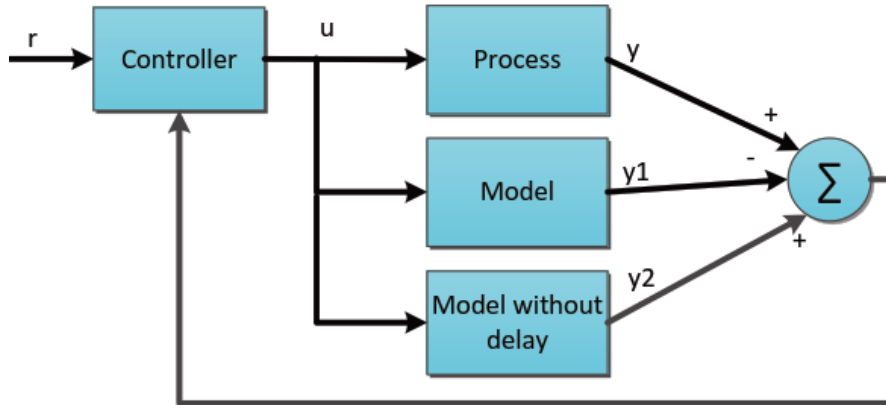
KUVIO 4. Ennakoiva säätö (Seborg & Edgar 2004, 389)

Mikäli häiriöt vaikuttavat prosessiin takaisinkytketyssä säädössä, on oleellista mitata prosessin ulostulo, jotta korjaavia toimenpiteitä voidaan suorittaa manipuloidulla sisääntulolla. Kuitenkin on suositeltua mitata häiriöt ja näin ollen muuttaa sisääntuloa ennen kuin prosessin ulostulo muuttuu. (Bequette 2003, 324) Prosessissa ei kuitenkaan ole mittausta häiriöille, joten niitä ei saada mukaan.

4.3 Smith-prediktori

Smith-prediktori-säätö kehitettiin vuonna 1957 ja se kantaa keksijänsä, Otto Smithin, nimeä. Säätörakenne suunniteltiin viiveellisten prosessien säätöön yhdessä PI-säätimen (proportional- integration) kanssa. Viiveelliset prosessit ovat hankalia ohjattavia perinteiselle PID-säätimelle, jolloin säätötulos ei välttämättä ole paras mahdollinen. Smith-prediktorin säätörakenne on melko yksinkertainen. (Airikka 2019b)

Smithin säätörakenne esitellään kuvassa 16. Kaikki lohkot sisältävät matemaattisen mallin eli siirtofunktioimallin. Kuvassa "r" on käyttäjän asettama asetusarvo, jota prosessin mittauksen "y" halutaan seuraavan. "Controller" viittaa säätimeen, joka Smith-prediktorin yhteydessä yleensä on PI-säädin. Säädettävä prosessi on kuvassa "Process". Lähtö "u" on säätimen laskema lähtö prosessin ohjaukselle. "Model" viittaa prosessimalliin, joka kuvaa tarkkailtavaa prosessia. "Model without delay" on edellä mainittu prosessimalli ilman viivettä. Näin ollen ajatellaan säädön prosessimallin olevan viiveetön. (Airikka 2019b) Havaitaan, että Smith eroaa tavallisesta PID-säädöstä siten, että tässä on lisänä "Model-" ja "Model without delay-" ja summalohkot.



KUVA 16. Smith-prediktori säätörakenne

Prosessimalli sisältää viivetermin, joka on syy sille miksi Smith-prediktorin tarvitaan. Smith-prediktorin toiminta perustuu PID-säätimen laskeman ohjauksen viemiseen muillekin lohkoille kuin prosessille. Prosessinmallin luoma lähtö y_1 sisältää viiveen. Tämä lähtö " y_1 " ja prosessinlähtö y summataan erimerkkisinä kuvassa 16, mikä ideaalilanteessa tarkoittaa signaalien erotuksen olevan nolla. "Model without delay" -lohkon lähtö " y_2 " viedään summauslohkoon ja sen kautta säätimelle. Näin ollen säädin näkee prosessin viiveen verran etukäteen tai säädin ajattelee prosessin olevan viiveetön. (Airikka 2019b) Smith-prediktorisäätöä ei ole käytössä jätevedenpuhdistuksessa, mutta on tulevaisuudessa mahdollinen säätötapa.

5 PROSESSIMALLIN LUOMINEN

Kappaleessa käydään läpi mallintamiseen liittyviä asioita kuten yleistä mallintamisesta sekä tässä työssä käytettyjä sovelluksia Matlab, Simulink ja System Identification Toolbox.

5.1 Mallinnuksen käyttö

Yleisesti ottaen on monia eri syitä, miksi mallinnusta käytetään. Joissain tapauksessa halutaan oppia ymmärtämään kemiallista prosessia paremmin tai parantamaan niiden ohjausta. Tämän vuoksi prosessista tehdään dynaaminen malli. Usein prosessimalleja käytetään prosessin suunnitteluun, operaattorien koulutukseen, turvallisuuteen tai prosessin ohjaukseen. (Bequette 2003, 32) Tässä tapauksessa keskitytään prosessin ohjaukseen.

Otetaan esimerkiksi takaisinkytketty säätöjärjestelmä, jota käytetään pitämään prosessin muuttujat halutussa arvossa. Yleensä ennen monimutkaisen säätöalgoritmin ajamista automaatiojärjestelmään, se testataan simuloimalla (Bequette 2003, 32). Tässä käytetään Simulink-ohjelmaa, jolla voidaan testata prosessin mallia.

Säädön haluttu tarkkuus ja prosessin lopputuloksen kompleksisuus riippuvat viimeiseksi käytetystä prosessimallista. Tavallisesti monimutkaisemmat prosessit vaativat paljon dataa, jolla malli luodaan. Tämän seurauksena malliin pitää määrittää enemmän parametreja. (Bequette 2003, 32)

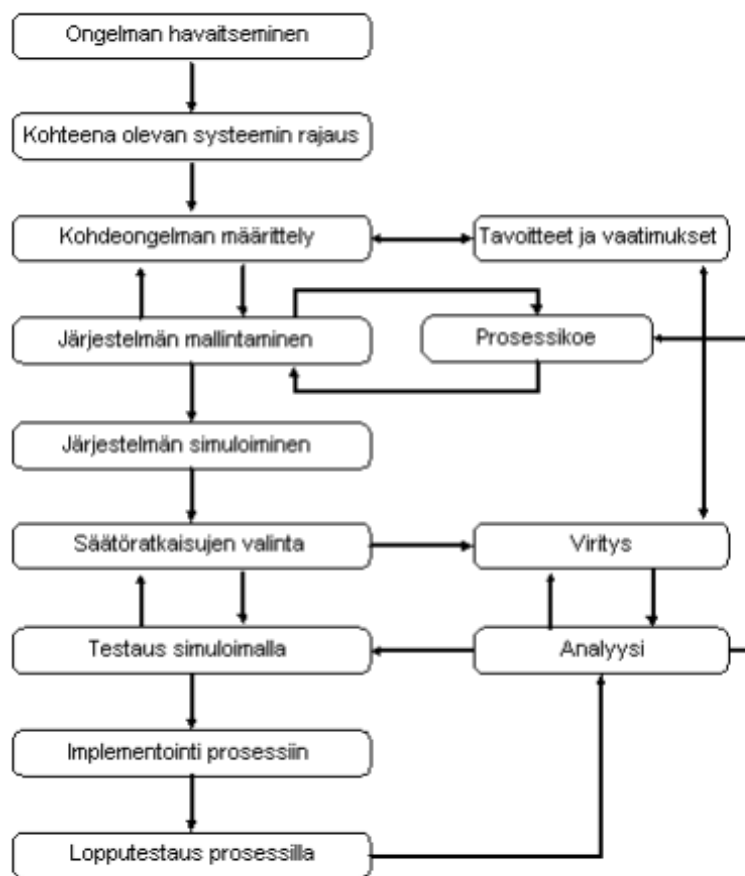
5.2 Yleistä mallintamisesta

Tekniikassa mallinnuksella tarkoitetaan matemaattisesti luotua kaavaa sille, miten prosessi tai asia käyttäytyy. ”Jotta säädettävä suure saadaan käyttäytymään halutulla tavalla erilaisissa asetusarvon ja kuormitushäiriöiden muutostilanteissa, on prosessin käyttäytyminen tunnettava. Toisin sanoen meillä täytyy olla jonkinlainen kuvaus järjestelmästä, (matemaattinen) malli prosessista”, kertovat DI

Timo Harju ja TkL Arto Marttinen säätötekniikan koulutusmateriaalissaan (Automaatioseura 2000). Täältä pohjalta luodaan malli prosessille ja sen käyttäytymiselle. Mitä paremmin malli kuvaa todellisuutta, sitä paremmat edellytykset on säädön onnistumiselle. Vastaavasti jos mallinnus poikkeaa todellisuudesta, säätö ei toimi halutulla tavalla.

Mallinnuksessa puhuttu tulo- ja lähtösignaalien välinen riippuvuussuhde voi olla staattinen tai dynaaminen. Staattisessa mallissa jokainen ulostulon arvo on täysin määritelty viimeisimmän tulosignaalin mukaan. Dynaamisessa mallissa taas lähtösignaali on riippuvainen aiemmista mittauksista eli historia vaikuttaa lähdön arvoon. (Automaatioseura 2000, 11) Tässä työssä malli on dynaaminen, koska halutaan edellisten mittausten vaikuttavan tulevaan arvoon.

Kuvassa 17 esitellään lohkokaavio säätöongelman ratkaisemiselle. Aluksi havaitaan jokin ongelma, jota lähdetään rajaamaan ja määrittelemään. Lopuksi säätöratkaisu testataan prosessissa.



KUVA 17. Säätöongelman ratkaisuvaiheet (Automaatioseura 2000, 148)

5.2.1 Staattinen malli

Lähdettäessä selvittämään prosessin käyttäytymistä, on helpointa lähteä liikkeelle prosessin staattisesta käyttäytymisestä (Åström & Hägglund 2006, 13). Tarkastellaan esimerkkinä kuvaa auton nopeuden muutoksesta (kuva 18). Mallissa y-akselin arvolla t on jokin riippuvuus x-akselin km/h arvoon. Tästä voidaan muodostaa kaava, jonka avulla saadaan yhtälön muut arvot laskettua (Åström & Hägglund, 13).



KUVA 18. Nopeuden muutos ajan t funktiona

Kuvasta 18 käytetään nimitystä staattinen malli tai staattinen prosessikäyttäytyminen. Hägglund kehottaa kirjassaan aloittaa jokaisen prosessitutkimuksen staattisesta mallista (Åström & Hägglund 2006, 13). Mallia voidaan testata monella eri tavalla mm. askelvastekokeella, jossa sisääntulo pidetään vakiona ja tämän jälkeen mitataan vakaan tilan ulostulo. Tämä toimenpide antaa yhden näkökulman prosessin luonteesta. (Åström & Hägglund 2006, 13)

Toinen menettelytapa on tehdä suljetun piirin koe, jossa ulostulo pidetään vakiona takaisinkytketyllä säädöllä ja vakiotilan arvo sisääntulossa mitataan. Jälkimmäiseen vaihtoehtoon tulee olla päätettynä prosessin staattinen malli. Dataa voidaan ottaa myös online-mittauksista vakaaseen malliin (Åström & Hägglund 2006, 13)

Tietenkään aina ei voida suorittaa kokeita prosessille kuten yllä on kuvattu. Pienet muutokset ovat yleensä sallittuja mutta prosessin saattaminen sen ääriarjoihin ei ole suotavaa. (Åström & Hägglund 2006, 13) Biologisen suodattimen ajaminen toiminnan ääriarjoille ei ole suotavaa, sillä biologinen prosessi saattaa vahingoittua, tai koko prosessi saattaa jopa kuolla. Prosessin uudelleenkäynnistys vie aikaa, minkä seurauksena mereen pääsee yhä enemmän typpeä ja fosforia. Näin ollen puhdistustulos heikkenee.

5.2.2 Dynaaminen malli

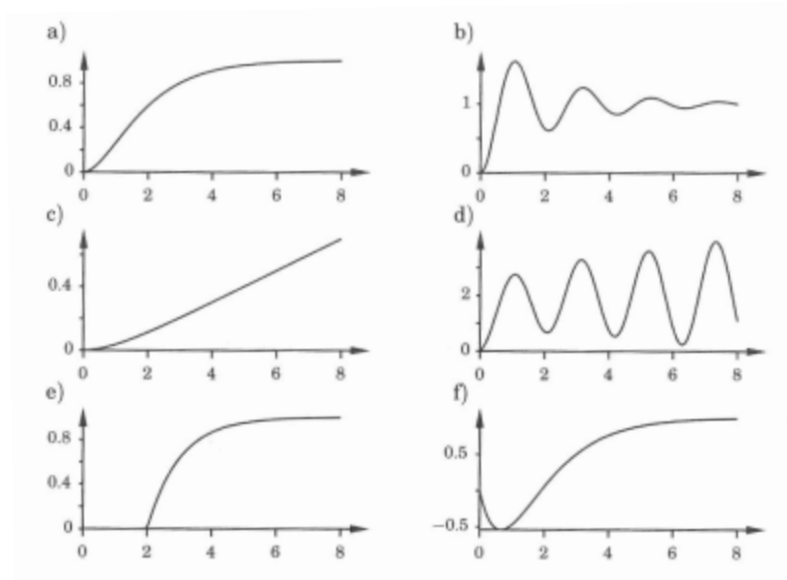
Dynaamisessa mallissa sisääntulolle ja ulosmenolle on jokin suhde, mutta se on häilyvä. Luonnollisesti on huomattavasti haastavampaa luoda prosessista dynaaminen kuin staattinen malli. Tietenkin tämä on olennaista, kun ollaan tekemisissä ohjausongelmien kanssa (Åström & Hägglund 2006, 14) Ferrosulfaatin annostelusta muodostuu dynaaminen malli, koska halutaan edellisillä mittauksilla olevan merkitystä tulevaan ohjaukseen.

Kuvasta 19 ilmenevät yleisimmät prosessiohjauksen askelvasteet:

- a) Prosessin ulostulo muuttuu monotonisesti uuteen arvoon. Tämä on myös yleisin vaste prosessin ohjauksessa.
- b) Ulostulo heilahtelee lopullisen arvonsa molemmin puolin. Tämä ei ole niin yleinen prosessiteollisuudessa.

Yleisesti ottaen a) ja b) ovat molemmat vakaita, kun taas c) ja d) ovat epävakaita.

- c) Integroidut prosessit mm. pinnankorkeuden säätö. Tyypillistä tälle ohjaukselle on siinä esiintyvä säiliö ominaisuus.
- d) Myöskin integroitu prosessi mm. huonelämpötilan säätö
- e) Järjestelmässä on pitkä viive, joka on seurausta mm. pitkistä välimatkoista.
- f) Vedenpinnan taso käyttäytyy yleisesti ottaen näin. Aluksi pinnankorkeus laskee halutun tason alle ja sitten vasta nousee. (Åström & Hägglund 2006, 15)



KUVA 19. Avoimen järjestelmän askelvasteet (Åström & Hägglund 2006, 14)

5.2.3 Mitä oikeastaan on ohjaus?

Termiä "ohjaus" käytetään jokapäiväisessä elämässä, kun viitataan toimintaan tuottaa haluttu lopputulos. (Tewari 2002, 1) Yleisesti ajatellaan, että auton vakionopeuden säätö on ohjaustoimenpide. Tavallaan se on sitä, mutta vakionopeudensäätimen ollessa päällä käyttäjä antaa asetusrvon säätimelle, jonka mukaan säädin korottaa auton nopeutta tai hidastaa sitä. Ohjausta on oikeastaan kaikilla, väittää Ashiq Tewari (2002, 1).

Ohjauksessa käytetään tuloja ja lähtöjä. Tulot ovat mittauksia tai tilatietoja, joiden perusteella ohjaus muodostetaan. Lähdöt taas ovat niitä ohjauspisteitä, joilla säädetään ulkoisia toimilaitteita esimerkiksi venttiilin tilaa. (Tewari 2002, 1)

Mallin tulisi vastata oikeaa prosessia laajalla mittausalueella ja selviytyä monesta eri tilanteesta, jotta käyttöön otettava säädinratkaisu toimisi optimaalisesti. Mallin luomisella on eniten merkitystä lopputuloksen kannalta. Vaihe vie myös aikaa kaikkein eniten. Mikäli kuitenkin havaitaan mittauksia, joita ei ole mallinnuksessa käytetty tulee automaatiojärjestelmään ohjelmoida toiminto, jolla säätötapa vaihtuu automaattisesti prosessin kannalta edullisemmaksi.

Sekä Matlabista että Simulinkista on kummastakin tullut yleisimpiä analyysi- ja moderneja säätö-suunnitteluohjelmia teollisuudessa. (Tewari 2002, 1) Mallinnuksella voidaan optimoida mm. prosesseja ja saada energiansäästöä.

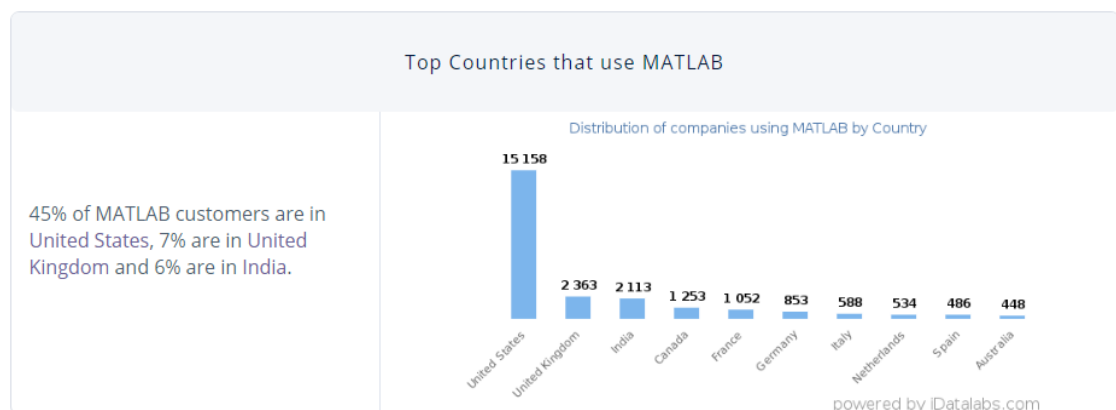
5.3 Käytetyt ohjelmat

5.3.1 Matlab

Matlab on The MathWorks -yhtiön ohjelmisto, joka on tarkoitettu numeerinen laskeentaa varten. Matlabissa käytetään siihen tarkoitettua ohjelmointikieltä. Clever Moler kehitti ohjelman opiskelijoiden apuvälineeksi 1970-luvulla, jonka jälkeen se levisi muidenkin yliopistojen ja tutkijoiden käyttöön. (Moler 2018)

Matlabia ja sen työkalupaketteja käytetään opetukseen ja kehitykseen eri tekniikan aloilla yli 5 000 korkeakoulussa ja yliopistossa maailmanlaajuisesti. (Mathworks 2018) Matlabia käyttää noin 32 000 yritystä maailmanlaajuisesti. Suurimmat käyttäjät ovat Yhdysvalloista ja IT-alalta. Useimmiten sitä käytetään 10 - 50 hengen yrityksissä, joilla on 1 - 10 M\$:n liikevaihto. Tunnetuimpien käyttäjien joukkoon kuuluvat yritykset Adobe Inc, Carl Zeiss Ag, ja Johns Hopkins University. (Enlyft n.d.)

Kuten kuvasta 20 havaitaan, että ohjelmiston käyttö on yleisintä Yhdysvalloissa. Ohjelmiston käyttö on kuitenkin maailmanlaajuisia.



KUVA 20. Suosituimmat Matlabin käyttäjämaat (Enlyft n.d.)

5.3.2 Simulink

Simulink on lohkodeigrammiympäristö simulointia ja mallipohjaista suunnittelua varten. Ohjelma tukee järjestelmätason suunnittelua, simulointia ja automaattista koodin generointia. (Getting Started with Simulink n.d) Simulinkissa on myös kattavat työkalut prosessiautomaation tarpeisiin. Ohjelmasta löytyy mm. PID-säätimet (proportional-integration-derivation control), viive-lohkot ja erilaiset herätteet. Ohjelma ymmärtää myös Laplace -muunnokset ja siirtofunktiot. Tarkemmin ottaen siirtofunktiolla voidaan matemaattisesti kuvata lineaarisen järjestelmän sisään- ja ulostulon riippuvuuden suhdetta. Laplace -muutokset ovat integraalimuunnoksia.

5.3.3 System Identification Toolbox

Työssä käytetään System Identification Toolboxia, jonka avulla mallin luominen ja simulointi helpottuu huomattavasti. Työkalu piirtää myös kaaviot. System Identification Toolboxin on luonut alan pioneeri Lennart Ljung Lundin yliopistosta. Hän on tunnettu mm. matemaattisesta mallintamisesta, ohjaustekniikasta ja automaattiosäädöistä.

Siirtofunktiomalleilla kuvataan sisään- ja ulostulojen suhdetta järjestelmässä. Mallin asteella kuvataan osoittajan potenssin astetta. Nimittäjän potenssilla tarkoitetaan mallin napoja ja osoittajan potenssilla viitataan mallin nollisiin. (Ljung 2019b, 5-2)

Jatkuva-aikainen siirtofunktio on malliltaan kaavan 1 mukainen:

$$Y(s) = \frac{\text{num}(s)}{\text{den}(s)} U(s) + E(s) \quad (1)$$

, jossa $Y(s)$, $U(s)$ ja $E(s)$ ovat ulostulon, sisäänmenon ja häiriön Laplace muutoksia. $\text{Num}(s)$ ja $\text{den}(s)$ viitataan nollien ja napojen polynomeihin. Näiden avulla voidaan määrittää sisääntulon ja ulosmenon suhde. (Ljung 2019b, 5-2)

Prosessimalleilla kuvataan järjestelmien dynamiikkaa monilla eri aloilla ja mallit soveltuvat monenlaisiin eri tuotantoympäristöihin. Näiden mallien hyöty on siinä, että ne ovat yksinkertaisia sekä tukevat siirtoviiveen kuvaamista ja mallin kertoimet ovat helppo kuvata navoilla ja nollilla. (Ljung 2019b, 5-2)

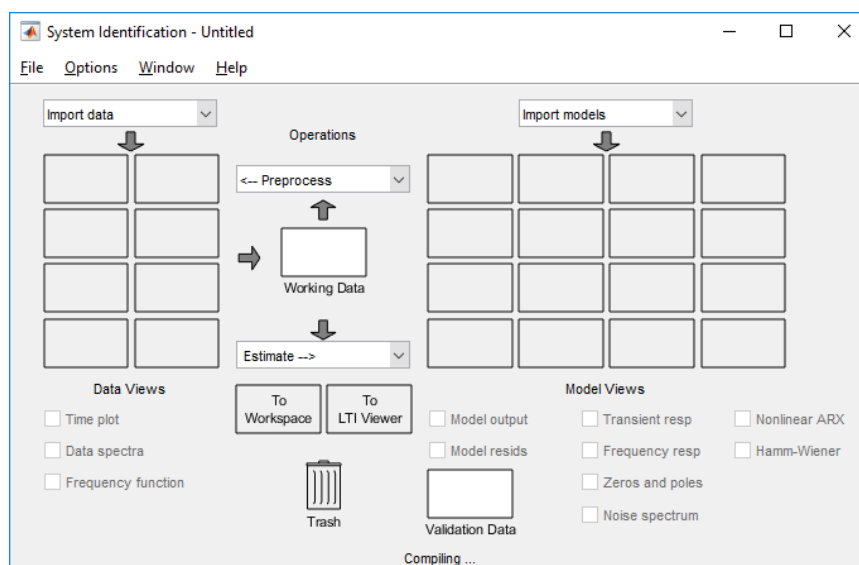
5.4 Mallinnus ja simulointi

Ennen kuin voidaan tehdä mitään System Identification Toolboxin avulla, pitää data saada siirrettyä Matlabiin. Datasta pitää myös analysoida sen laatu. (Ljung 2019b, 146) Tämä on tärkeää, jotta saadaan muodostettua mahdollisimman hyvä malli kuitenkin käsittelemättä dataa liikaa.

Ljung toteaa, että dataa pitää tutkailla ennen sen käsittelyä joillain seuraavista toimenpiteistä:

- Onko puuttuvia tai virheellisiä arvoja? Esimerkki tällaisesta voi olla jokin aukko datassa tai mittauksia, jotka eivät sovi muuhun dataan
- Siirtymät tai signaalitasojen liukuminen mm. matalataajuiset häiriöt
- Suuritaajuiset häiriöt järjestelmädynamiikan taajuusvälin yläpuolella (Ljung 2019b, 146)

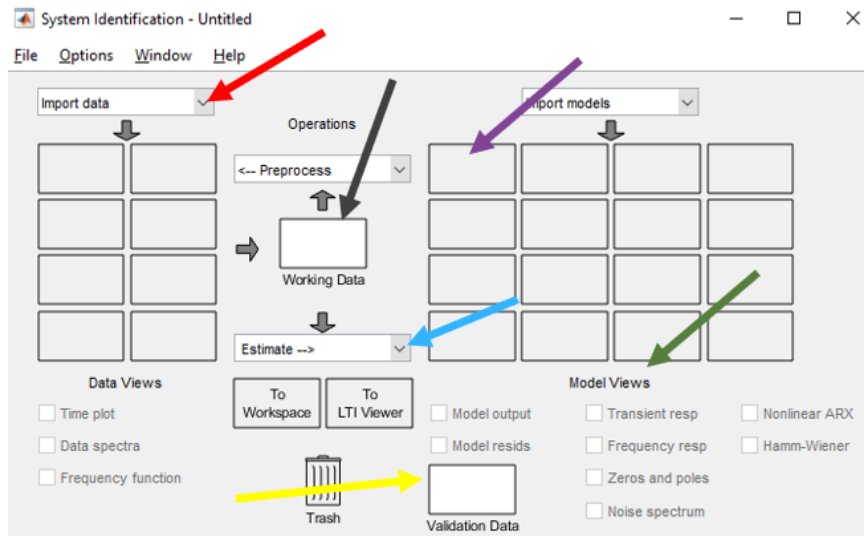
System Identification Toolboxin avataan Matlabin komentorivin kautta. Kuvassa 21 esitellään työkalun perusnäkö.



KUVA 21. System Identification Toolboxin perusnäkö

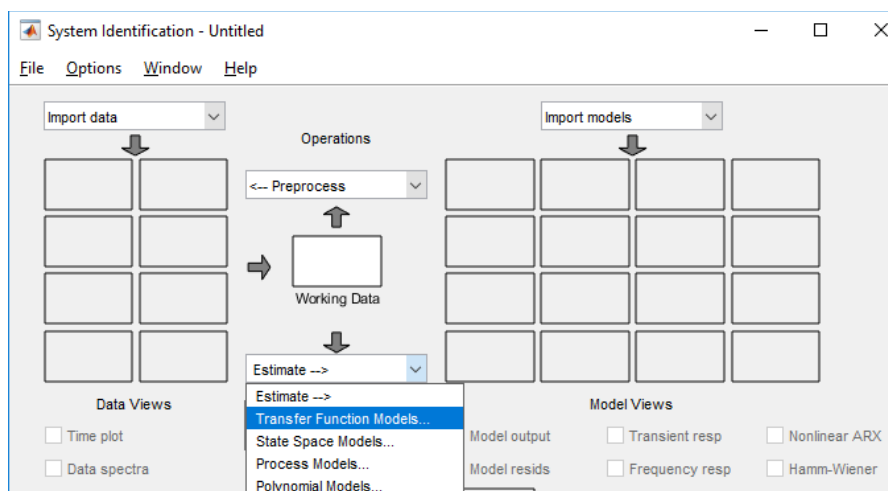
Kuvassa 22 esitellään tarkemmin nuolien värien merkitykset:

- Punainen= datan lataus, mittaus esim. Q6005 data ja F1620 data
- Sininen= Mallit mm. prosessimallit, siirtofunktiomallit, staattiset mallit
- Musta= Data, jota käsitellään
- Vihreä= Mallin näkymät
- Keltainen=validointi data
- Violetti=Prosessimalli



KUVA 22. System Identification Toolbox aloitusnäky

Ohjelma tekee mallit Estimate -monivalintarivin takaa (kuva 23). Vaihtoehtoja on useita, joista tässä työssä käytetään siirtofunktiomallia koska se on tunnetuimmasta päästä.



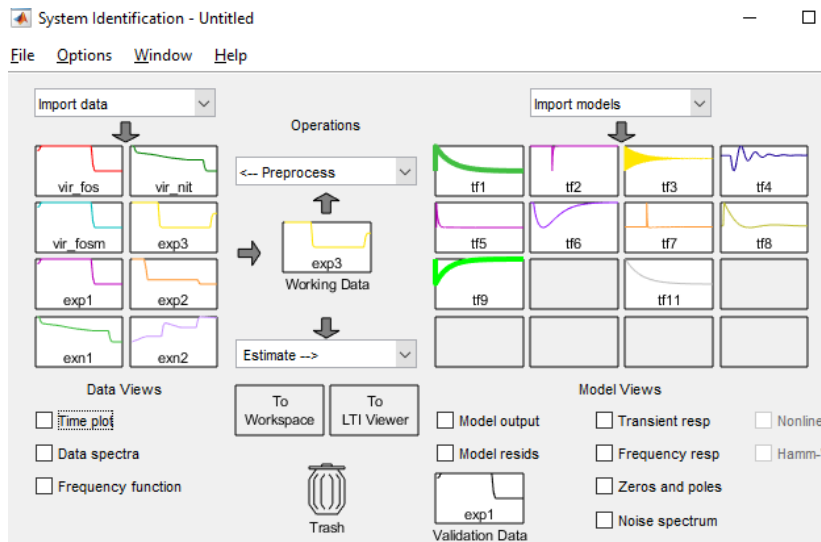
KUVA 23. Prosessimallin tekeminen

Ohjelmalla tehtiin useita eri siirtofunktiomalleja ferrosulfaatin annostelun 2. pisteen summavirtauksen (F1620) ja suodattimille tulevan fosfaatin (Q6005) sekä nitraattiin (Q6001) perustuen. Tiedetään, että suodattimille tulevan fosfaatin arvoon vaikuttaa ferrosulfaatin summavirtaus. Ohjeistuksena professori Ljung painotti, että työkalulla edetään ns. yrityksen ja erehdyksen kautta (Ljung 2019a & Ljung 2019b). Hänellä ei myöskään ollut esittää yhtä ainoaa ja oikeaa tapaa edetä ongelman kanssa. Täten tehtiin useita kokeita ja testauksia, jotta löydettäisiin juuri sopiva malli prosessille.

Dataa haettiin tätä työtä varten vuodesta 2017 lähtien. Mallinnusta varten valittiin eheitä ja hyvälaatuisia aikasarjoja, eli mittauskatkot ja -häiriöt minimoitiin. System Identification Toolboxiin piti tiedon hakuvaiheessa syöttää haettavan datan mittausväli. Datan mittausväliksi valikoitui 1 min. Aikaväleinä testattiin myös 5 min ja 10 min, mutta data ei ollut niin hyvää kuin 1 min data. Yhden minuutin aikaväli osoittautui mallinnusta varten parhaaksi vaihtoehdoksi, koska prosessin ilmiöt ja mittausarvojen vaihtelut tulivat siinä parhaiten esille.

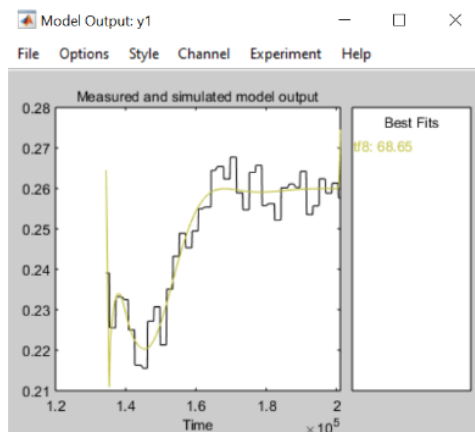
Kuvasta 24 havaitaan ferrosulfaatin summavirtauksen (F1620) ja fosfaattipitoisuuden mallinnukset. Mittauksien välille tehtiin 5 prosessimallia, jotka kaikki olivat siirtofunktiomalleja vaihtelevilla navoilla ja nolilla. Mallit sisältävät seuraavat siirtofunktiot:

- 2 napaa, 0 nollaa
- 2 napaa, 1 nolla
- 2 napaa, 2 nollaa
- 3 napaa, 1 nolla
- 3 napaa, 2 nollaa



KUVA 24. Ferrosulfaatin askelvastekokeen mallinnukset

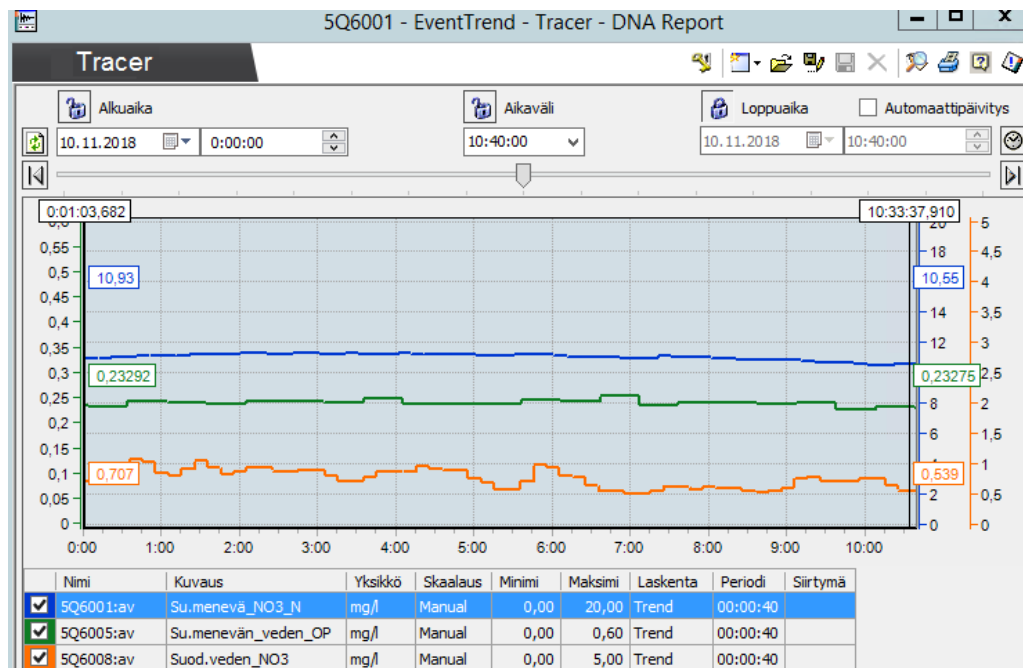
Ohjelmasta voitiin tulostaa mallien ulostulo eli istuvuus validointidataan nähden. Kuvaan 25 esitellään kuvan 24 prosessimallin tf8 mallin istuvuus validointidataan nähden. Validointidata käytettiin ferrosulfaatin askelvastekokeen alkuosaa exp1.



KUVA 25. Ferrosulfaatin askelvastekokeen mallinnustulokset (F1620 ja Q6005 välille)

5.5 Matlab vertailu

Testataan miten Matlab esittää saman datan, joka haetaan Valmet DNA:sta. Tällä toimenpiteellä varmennetaan näiden kahden ohjelman yhtenäisyys. Valitaan aikaväliksi lokakuu vuodelta 2018. Kuvassa 26 selviää, mitkä arvot ovat Valmet infosta saatavilla.



KUVA 26. Lokakuun 2018 mittaukset (Valmet 2019)

Haetaan Valmet Infosta positioiden Q6001 ja Q6008 mittausdata lokakuulta 2018. Siirretään data Matlabiin ja lasketaan kaavalla 2 lähtevä fosfaatti kuvaan 27 ja piirretään Q6001 arvot ylempään kaaviokuvaan. Tehdään koe Matlabilla ja lasketaan sama tulos sekä suodattimen kuluttama fosfaattimäärä kaavalla 2.

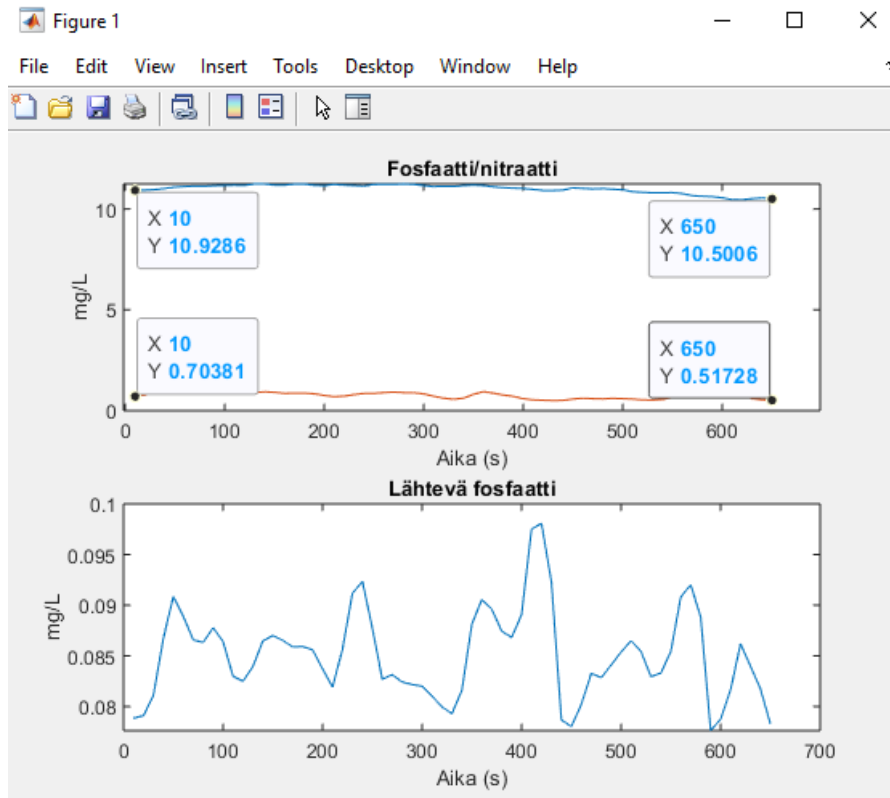
$$\text{Kulutettu fosfaatti} = Q6005 - (Q6001 - Q6008) * 0,015 \quad (2)$$

, jossa

Q6005= suodatinlaitokselle tulevan veden fosfaatti

Q6001= suodatinlaitokselle tulevan veden nitraatti

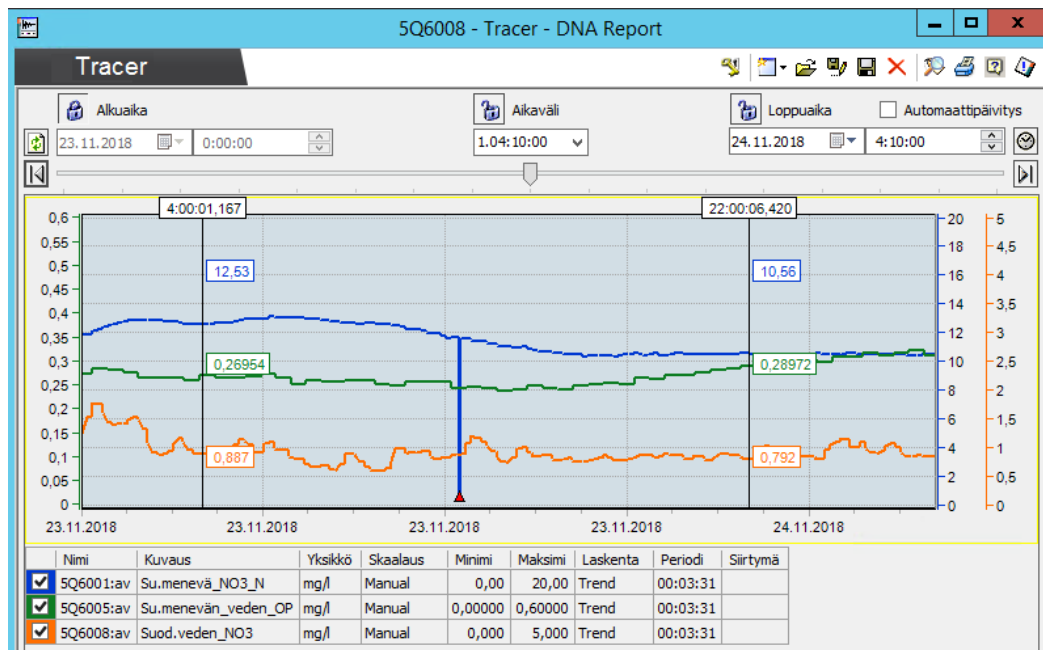
Q6008= lähtevän veden nitraatti



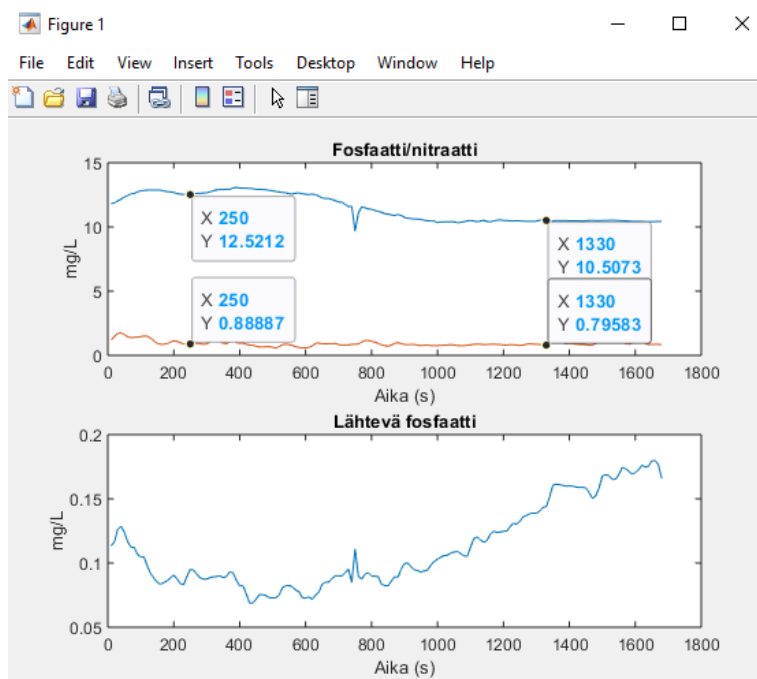
KUVA 27. Matlabin kuvaajat lokakuun 2018 mittauksista

Havaitaan, että kuvien 26 ja 27 arvot vastaavat lähes toisiaan pienimpiä kymmenyksiä lukuun ottamatta. Huomataan, että suodatin on kuluttanut fosfaattia eri määriä lokakuun aikana, mikä osittain selittyy prosessin biologisuudella.

Tehdään toinen kokeilu aiempaa vastaavilla järjestelyillä. Nyt tarkastelujaksona on yksi päivä 23 - 24.11.2018. Kuvassa 28 selviää Valmetin piirtämä kuvaaja kyseiseltä aikaväliltä, kun kuva 29 esittää Matlabin version samasta asiasta. Tässä kokeessa lisättiin samalla datapisteiden määrä, jotta nähdään Matlabin suoriutuvan tehtävästä.



KUVA 28. 23.-24.11.2018 mittaukset (Valmet 2019)



KUVA 29. Matlabin kuvaajat 23-24.11.2018 mittauksista (Valmet 2019)

Tarkastellaan kuvia 28 ja 29. Havaitaan, että yhteneväisyys löytyy. Matlabin arvot vastaavat lähes täysin Valmetin dataa. Tämä on hyvä pohja lähteä tarkastelemaan dataa Matlab ympäristössä.

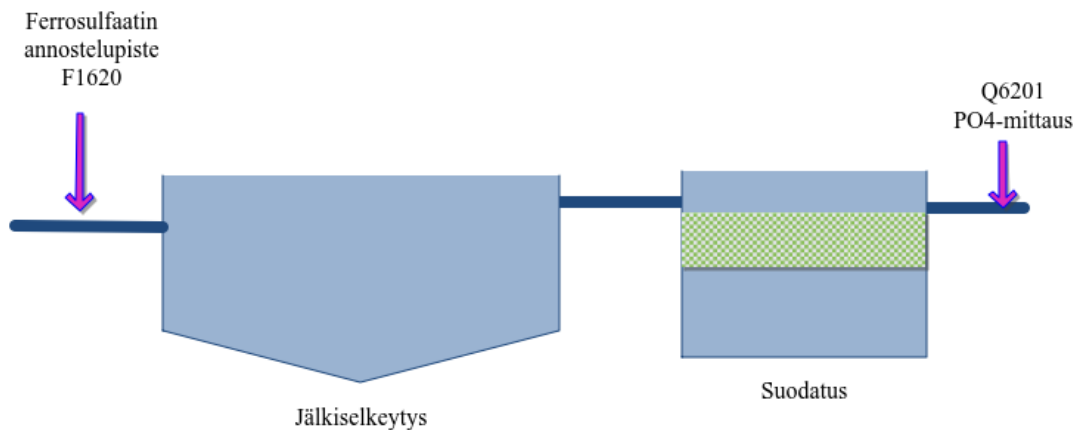
5.6 Haasteet

Häiriöitä ja viiveitä esiintyy prosessissa, jotka vaikuttavat prosessimallin luomiseen ja näin ollen myös suurimpia häiriöitä pyritään ottamaan huomioon tässä työssä.

5.6.1 Viive

Mallinuksessa esiintyviä ongelmista yksi on viive, jonka suuruus voidaan ohjella syöttä. Vaihtoehtoisesti ohjelman voidaan antaa laskea viive itse.

Viive on tärkeä huomioida, sillä prosessi on erittäin hidas. Viive ferrosulfaatin annostelupisteestä fosfaatin mittauspisteeseen (Q6201) on arviolta 9 h (kuva 30) ja on riippuvainen virtaamasta.



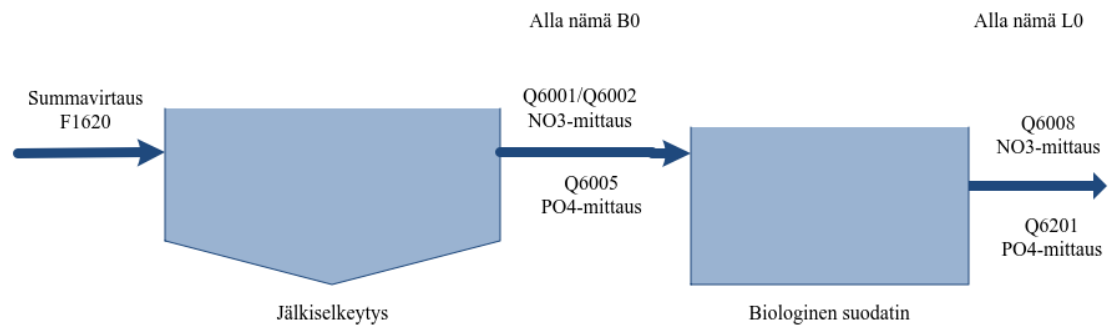
KUVA 30. Annostelu- ja mittauspisteiden fyysiset sijainnit

Lisähaasteena täytyy muistaa, että pääosa kemikaalista lähtee kierrätyslietteen mukana ilmastuksen alkuun ja osa menee suoraan jälkiselkeytykseen. (Kuokkanen 2019b)

Jan Miklesin mukaan PID-säätötapa ei sovellu käytettäväksi ferrosulfaatin annostelussa koska se sisältää pitkiä viiveitä. (Mikles 2007, 276)

5.6.2 Mittaukset

Mittauksien mittausvirheet aiheuttavat virhettä lopullisessa säädössä. Kuvassa 31 esitellään työssä tarpeellisten mittausten fyysiset sijainnit biologiseen suodatimeen nähden. Kaikki mittaukset ovat Profibus DP-laitteita eli tiedonsiirto tapahtuu väyläprotokollaa käyttäen.



KUVA 31. Käytettävien mittausten sijainnit

Taulukossa 3 esitellään nitraatti- ja fosfaattimittaukset positioineen, mitkä sijaitsevat suodatinlaitoksella. Taulukkoon on koottu vain oleellimmat mittaukset työn kannalta.

TAULUKKO 3. Nitraatti ja fosfaattimittaukset suodatinlaitoksella

Positio	Tuleva/lähtevä	Valmistaja	Laitetyyppi	Mittausalue	Tarkkuus	Mittausvirhe	Näytteenottoväli
Q6001	B0 Tuleva	Dr Lange	Nitratrax plus SC LXG169	0 - 200 mg/L	0,1 mg/L		10 s
Q6005	B0 Tuleva	Dr Lange	Phosphax Sigma LPG341.5210020	0,01 – 1,0 mg/L		± 2%	10 min
Q6002	B0 Tuleva	SC1000	Nitratrax plus SC LXG417	0,00 – 50,00 mg/L	0,1 mg/L		10 s
Q6008	L0 Lähtevä	SC1000	Nitratrax plus SC LXG417.00.50000	0,01 – 1,0 mg/L	0,01 mg/L		
Q6201	L0 Lähtevä	Dr Lange	Phosphax sigma LPG341.52.10000	0,01 – 1,0 mg/L	0,01 mg/L		

Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää autokalibroituja arvoja. Kuvassa 32 esitellään autokalibrointien operointi-ikkuna. ”Autokalibroinnilla tarkoitetaan automaattisesti tapahtuvaa kalibrointikäyrän määrittämistä. Autokalibroinnilla analysaattorien tulokset voidaan virittää vastaamaan tarkkoja, mutta harvemmin tehtäviä laboratoriotuloksia.”, kertoo diplomityöntekijä Miikka Jokelainen (Jokelainen 2010, 35).

Autokalibrointi 20.7.12

	Online	Kalibroitu	Valinta
BL1 MLSS	4.64	3.94	Analys.
BL2 MLSS	5.08	4.47	Analys.
BL3 MLSS	5.56	5.25	Analys.
BL4 MLSS	3.65	3.51	Analys.
BL5 MLSS	3.89	3.64	Analys.
BL6 MLSS	3.97	3.91	Analys.
BL7 MLSS	4.29	3.87	Analys.
BL8 MLSS	3.79	3.55	Analys.
BL9 MLSS	3.76	3.25	Analys.

	Online	Kalibroitu
B1 Alk	1.24	1.29
B2 Alk	1.13	1.02
B3 Alk	1.07	1.33
B4 Alk	0.79	0.86
B5 Alk	1.07	1.05
B6 Alk	1.11	1.39
B7 Alk	1.27	1.14
B8 Alk	1.28	1.39
B9 Alk	1.27	1.07

	Online	Kalibroitu
RL TS	3.17	2.92
MädS TS	0.02	0.02
RES TS	12.9	8.37
SyL1 TS	1.19	1.36
SyL2 TS	0.71	0.71
SyL3 TS	2.20	2.20
SyL4 TS	2.21	2.16

	Online	Kalibroitu
B0 NO3-N	5.76	5.83
B0R NO3-N	5.63	5.51
L0 NO3-N	1.20	1.25
MK SS	126	126
MK NH4-N	59.3	62.0

	Online	Kalibroitu
T1 SS	0.00	0.00
T2 SS	530	600
M1 SS	135	249
M3 SS	104	103
B0 SS	13.9	18.0
L0 SS	8.50	9.05

	Online	Kalibroitu
T1 PO4-P	0.00	0.00
B0 kok-P	0.59	0.47
B0 PO4-P	0.21	0.11
L0 kok-P	0.38	0.25
L0 PO4-P	0.11	0.04
B0 pH	4.00	5.71
B0 Alk.	0.00	1.47
T1 Sähkönj.	982	942

	Online	Kalibroitu
B NO3-N	0.00	6.72
B NH4-N	0.00	14.4

	Online	Kalibroitu
T1 Alkaliteetti		5.19

Java
Vertailukuvaajat

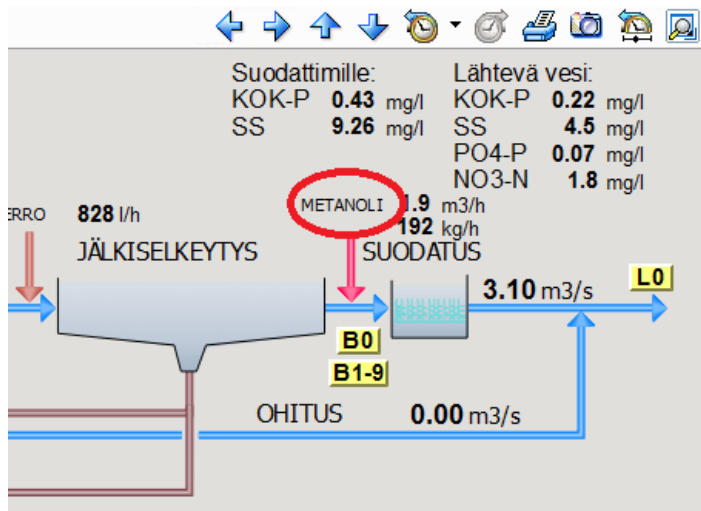
KUVA 32. Autokalibroidut arvot (Valmet 2019)

Autokalibroinnista hyötyihin lukeutuu parantunut luotettavuus hälytyksiin. Rekursiivisella laskennalla on poistettu analysointimittausten ryömintä ja siirtymät. (Jokelainen 2010, 36)

5.6.3 Virtaus

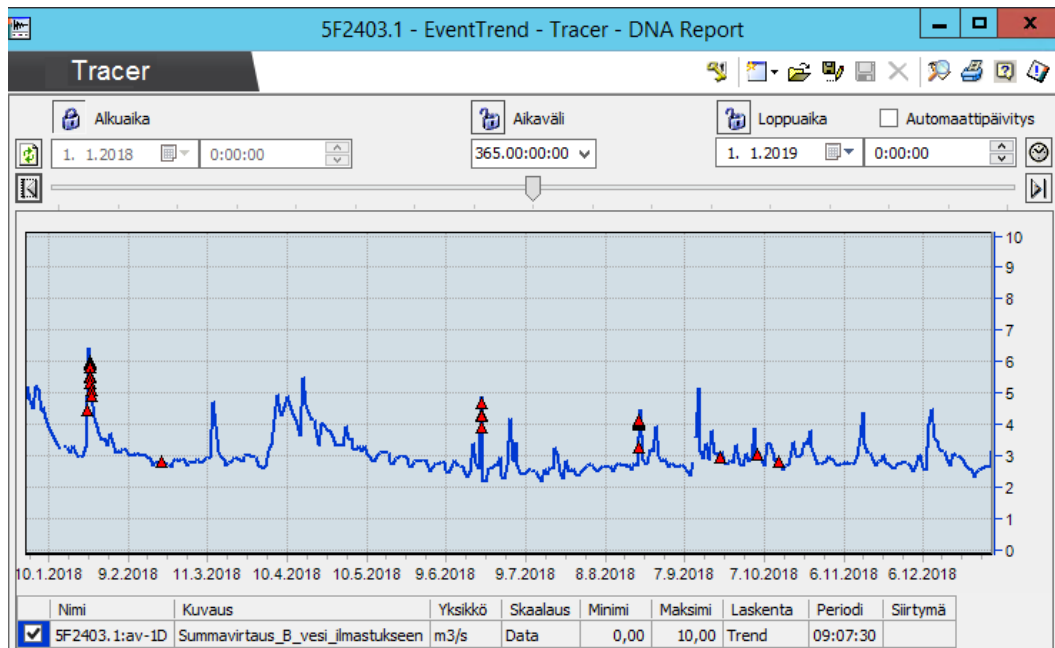
Yksi häiriötekijöistä on virtaus, jonka suuruutta ei pystytä arvioimaan. Laitokselle tulevan veden virtausta mitataan tulopumppujen jälkeen ultraäänien kulkuun perustuvilla virtausmittareilla. Mittauksen kanssa on ollut ongelmia ja sen toimintavarmuus ja mittaustarkkuus eivät ole hyviä. Laitokselta poistuvan veden mittaus toimii sen ollessa toimintatavaltaan sähkömagnetismiin perustuva. Virtausta on hankala käyttää mallinluomisen yhteydessä, koska se mitataan vasta kun vesi lähtee laitokselta.

Vertaillaan hieman poistovirtaamia. Otetaan tarkasteluun ilmastuksesta lähtevän veden virtausmittaus (F2403.1), joka sijaitsee ennen biologisia suodattimia metanoli -tekstin kohdassa kuvassa 33. Tässä kohtaa mitattaessa havaitaan myös kierrätetty vesi, joka on jo kerran mennyt suodattimien lävitse.



KUVA 33. Virtausmittarin F2403.1 sijainti ennen suodatusta (Valmet 2019)

Vuodenaikainen virtaama vaihtelee 2 - 7 m³/s välillä kuten kuvasta 34 ilmenee. Kuvaan otettiin päiväkeskiarvot, jotta kuvaajasta saisi paremmin selvää. Jos trendiin olisi otettu mittausdataa 10 sekunnin välein ns. raakadatalla kuva olisi ollut hankala luettava.



KUVA 34. Poistopumppaamon tulovirtaus vuorokausi keskiarvolla vuonna 2018 (Valmet 2019)

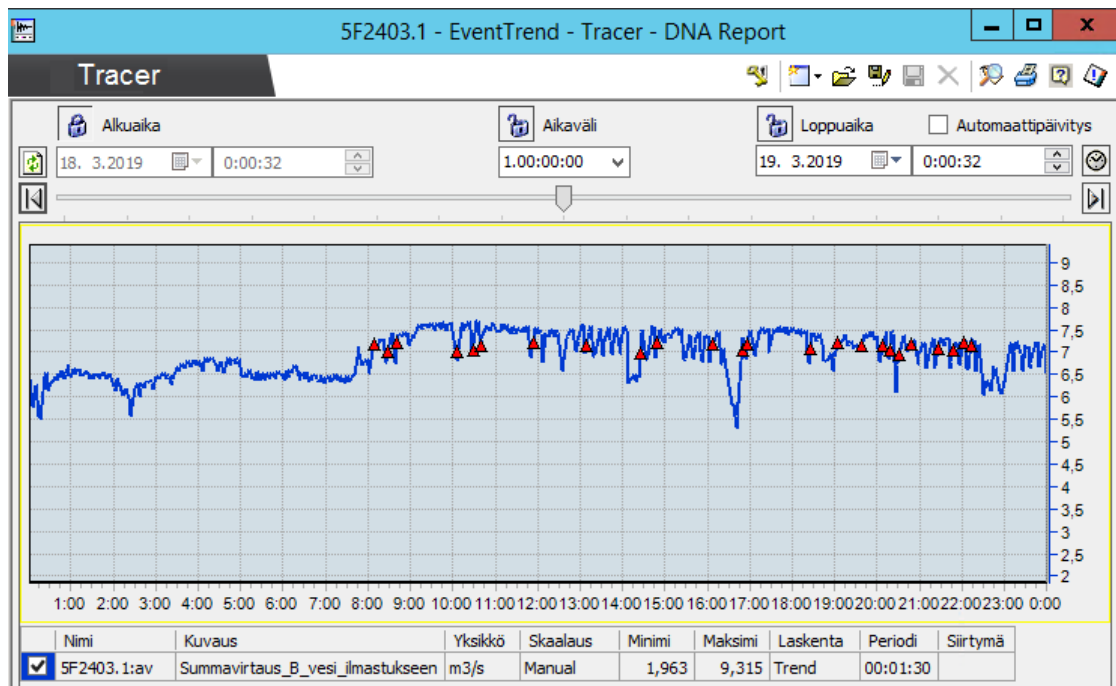
Kevään suuret virtaukset johtuvat lumien sulamisvesistä, joka ilmenee kuvasta 35. Torstaista lähtien vuorokauden keskilämpötila on noussut plussan puolelle, minkä seurauksena lumi sulaa vedeksi ja osa siitä päätyy viemäriin. Laitoksen virtaamissa sulamisveden vaikutus näkyi muutaman päivän viiveellä.

SU 1.4	MA 2.4	TI 3.4	KE 4.4	TO 5.4	PE 6.4	LA 7.4
Tod. lämpötilä 1°/-3°	Tod. lämpötilä 1°/-1°	Tod. lämpötilä 3°/-3°	Tod. lämpötilä 2°/-1°	Tod. lämpötilä 5°/1°	Tod. lämpötilä 3°/1°	Tod. lämpötilä 3°/1°
Hist._keskiarvo 4°/-4°	Hist._keskiarvo 4°/-3°	Hist._keskiarvo 4°/-3°	Hist._keskiarvo 4°/-3°	Hist._keskiarvo 5°/-3°	Hist._keskiarvo 5°/-3°	Hist._keskiarvo 5°/-3°
SU 8.4	MA 9.4	TI 10.4	KE 11.4	TO 12.4	PE 13.4	LA 14.4
Tod. lämpötilä 3°/2°	Tod. lämpötilä 5°/0°	Tod. lämpötilä 6°/0°	Tod. lämpötilä 2°/0°	Tod. lämpötilä 4°/-1°	Tod. lämpötilä 5°/1°	Tod. lämpötilä 4°/2°
Hist._keskiarvo 5°/-2°	Hist._keskiarvo 6°/-2°	Hist._keskiarvo 6°/-2°	Hist._keskiarvo 6°/-2°	Hist._keskiarvo 6°/-2°	Hist._keskiarvo 6°/-1°	Hist._keskiarvo 7°/-1°

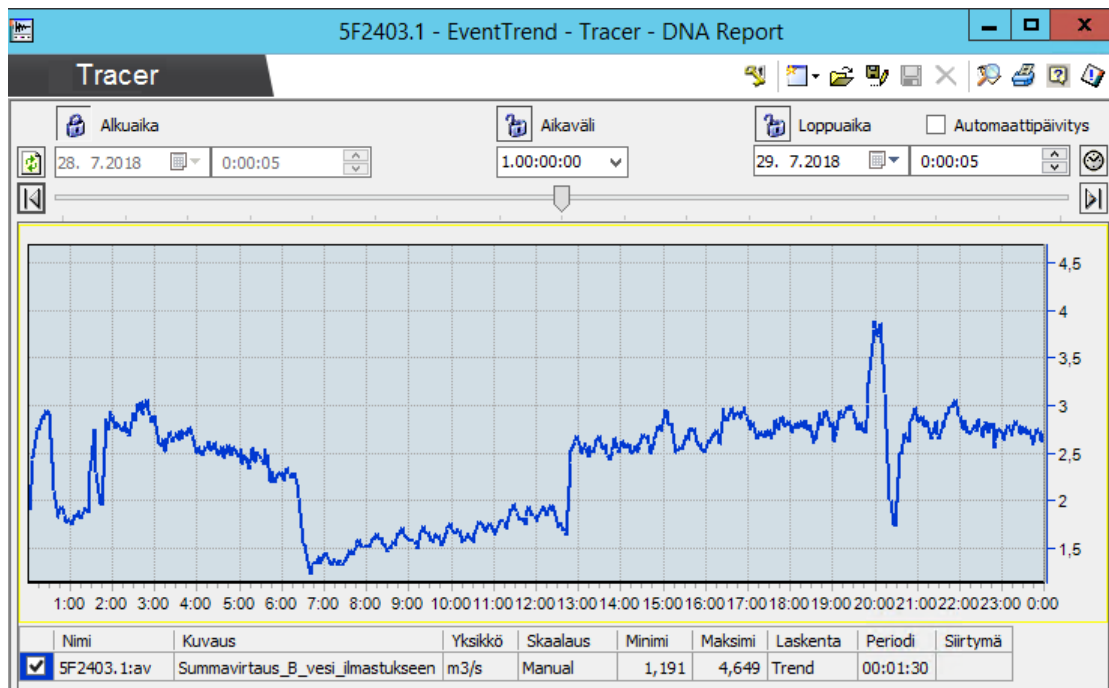
KUVA 35. Helsingin lämpötilat vuonna 2018 (AccuWeather. n.d.)

Kesään mennessä virtaamat pienevät, koska ulkolämpötila nousee ja maaperä kuivuu. Syksyllä vesimäärät ovat vaihtelevia johtuen sademäärästä. Puhdistamolalle kulkeutuvan sadeveden määrä kasvaa, koska Helsinki on sekaviemäroity alue eli sadevedet johdetaan suoraan viemäriin.

Verrataan hieman vesimääriä kevään sulamisvesien ja kesän lämpimien säiden välillä. Kuvassa 36 esitellään kevään päiväkohtainen virtaama ja kuvassa 37 kesän päiväkohtainen virtaama.



KUVA 36. 18.3.2019 päivävirtaama raakadatatista (Valmet 2019)



KUVA 37. 28.7.2018 päivävirtaama raakadatatista (Valmet 2019)

Havaitaan, että 18.3.2018 laitoksen virtaama on ollut lähes yhtäjaksoisesti yli 5,5 m³/s kun taas 28.7.2018 virtaama on jäänyt alle 4 m³/s. Eron selittää suurelta osin kevään sulamisvedet. Viime vuoden heinäkuu oli lämmin, minkä vuoksi vesimäärätkin jäivät pienemmäksi.

6 TULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI

Kappaleessa käydään läpi saatuja tuloksia, vastataan tutkimuskysymyksiin sekä kerrotaan kehityskohteet ja toimenpidesuositukset.

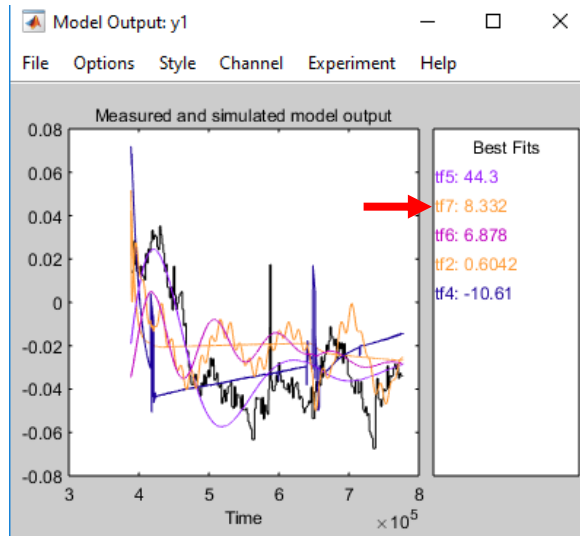
6.1 Tutkimuskysymyksiin vastaaminen

Säätötavan valintaan on useita erilaisia ohjeistuksia. Yleensä paras ohjaus on yksinkertaisin, esimerkiksi P-säätö. Sitä voidaan käyttää, mikäli hyväksytään pysyvä erosuure. Yleensä P-säätöä käytetään painesäädöissä tai pinnankorkeusäädöissä. (Mikles 2007, 276) Fosforityppisuhde on kuitenkin suhteena tärkeä, joten pysyvää erosuuretta ei hyväksytä. Pelkkä P-säätö ei siis sovellu tähän tarkoitukseen.

Mallinnusta ja simulointia käyttäen ei pystytty valitsemaan sopivaa säätötapaa, koska prosessimallien istuvuus oli heikko. Istuvuuden heikkouden taustalla on mm. häiriöt, jotka eivät ole tiedossa ja vaikuttavat suodattimille tulevaan fosfaattipitoisuuteen. Esimerkiksi tulevan jäteveden orgaanisen aineen pitoisuus ja koostumus vaikuttavat fosforin biologiseen sitoutumiseen, eikä sitä mitata jatkuvatoimisesti (Kuokkanen, 2019c). System Identification Toolboxin avulla saadaan luotua prosessimalleja, mutta ei tähän käyttötarkoitukseen sopivia. Prosessimallin vastaavuus todellisuuteen oli parhaimmillaankin 77 %, joka ei ole riittävä käyttötarkoitukseen. Ei riitä, että vain yhden mallin vastaavuus todellisuuteen on 77 %, vaan niitä tulee olla enemmän. Näin ollen säätötavan valintaa ei pystytä toteuttamaan kyseisten työkalujen avulla. Mahdollisesti suodattimille tulevaan fosfaattiin vaikuttaa jokin häiriö tai mittaus kuin ferrosulfaatin 2. pisteen annostelun summavirtaus.

Tutkimuksessa tehtiin kokeita esimerkiksi nostamalla siirtofunktioiden astetta ja seuraamalla sen vaikutusta prosessimallin lopputulokseen. Lennart Ljung kertoo, että prosessimallin aste pitää päättää, joten maksimi määrä napoja oli 3 ja nolliä 2 kappaletta (Ljung 2019b, 353). Prosessimallin tf7 sopivuus jäi heikoksi, vaikka

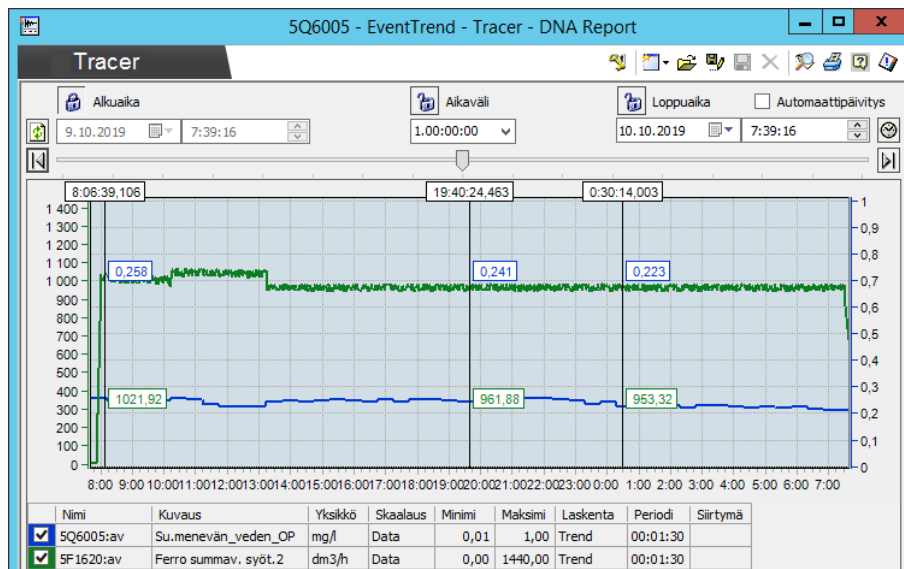
siirtofunktiossa oli napoja 10 ja nollia 9 kappaletta (kuva 38). Nämä asiat puoltavat teoriaa siitä, että fosfaattipitoisuuteen vaikuttaa muitakin asioita, kuin vain ferrosulfaatin summavirtaus.



KUVA 38. Mallien ulostulo System Identification Toolboxissa

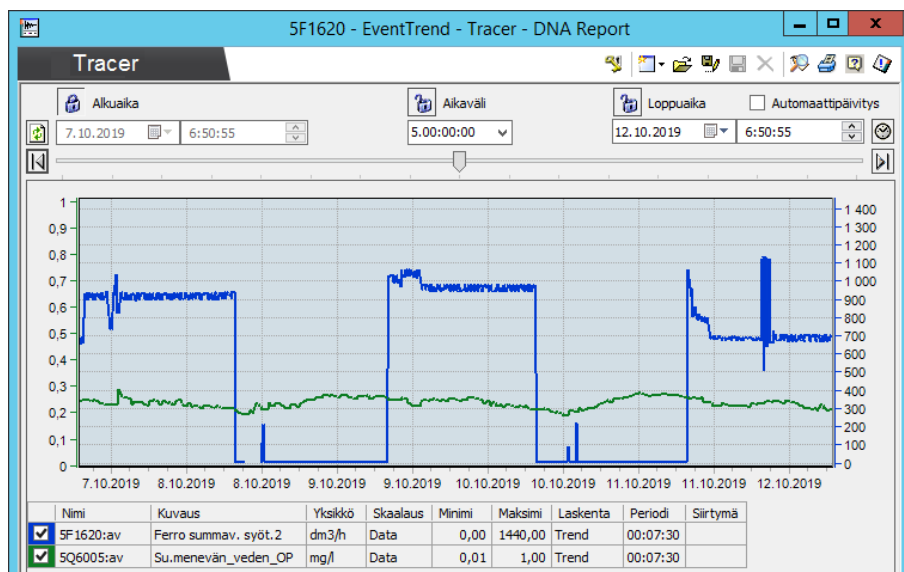
Kehittämistehtävässä ilmeni haasteita löytää kuormahäiriöt, jotka vaikuttavat suodattimille tulevaan fosfaattipitoisuuteen ferrosulfaatin summavirtauksen lisäksi. Ilmastuksesta lähtevän veden summavirtauksen arvoa koitettiin mallintaa suhteessa suodattimille tulevaan fosfaattipitoisuuteen nähden, mutta mallinnustulokset jäivät edelleen heikoiksi, noin 20 %. Laitteissa esiintyvät mittausvirheet eivät selitä prosessimallien huonoa istuvuutta. Niillä on oma osuutensa, mutta se on marginaalinen mallin lopputuloksen kannalta.

Alun perin tiedossa oleva haaste oli viive, jonka pituutta yritettiin määrittää ferrosulfaatin annostelun askelvastekokeilla. Kokeissa ferrosulfaatin annostelua muutettiin askelmaisesti maksimiarvoon ja syötön annettiin olla täysillä päivän ajan. Tämän jälkeen tehtiin askelvastekoe toiseen suuntaan, eli pysäytettiin ferrosulfaatin annostelu päiväksi. Kyseistä viivettä ei kuitenkaan saatu selville suoraan ferrosulfaatin askelvastekokeista, kuten kuvasta 39 huomataan. Fosfaattipitoisuuden taso lähtee laskuun puoli yhdeltä yöllä, eikä kyseisen kuvan perusteella pystytä varmasti sanomaan viiveen pituutta. Kirjallisuuden mukaan takaisinkytketty säätötapa vaatii viiveen määrittämisen.



KUVA 39. Fosfaattipitoisuuden (sininen viiva) ja ferrosulfaatin summavirtauksen (vihreä viiva) vertailu ferrosulfaatin askelvastekokeesta (Valmet 2019)

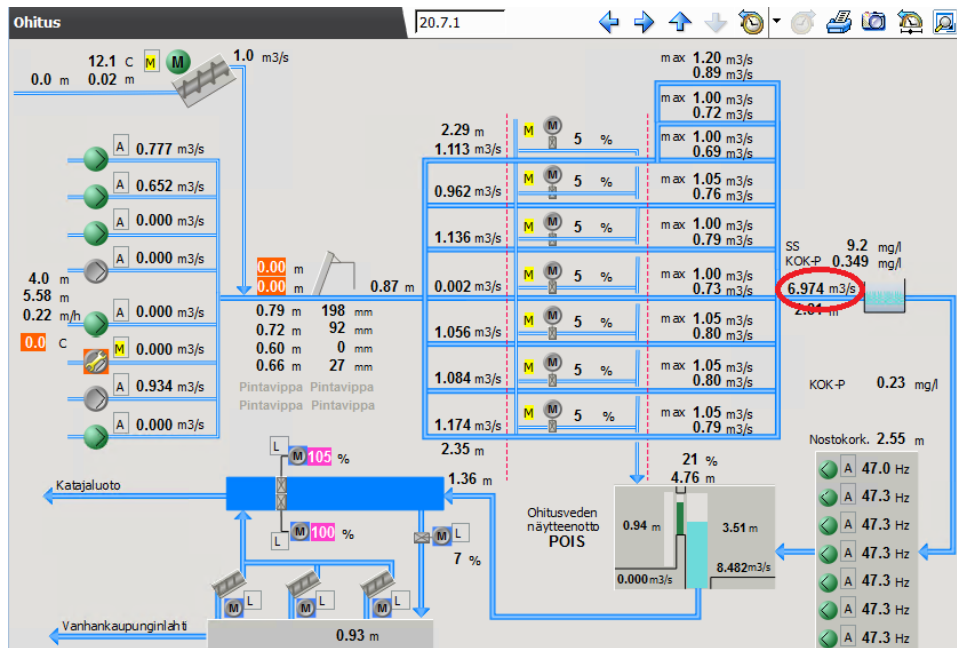
Kuvasta 40 nähdään fosfaattipitoisuuden päiväkohtaiset vaihtelut, joten pelkätään ferrosulfaatin annostelun suurempi muutos ei yksinään selitä fosfaattipitoisuuden nousua tai laskua.



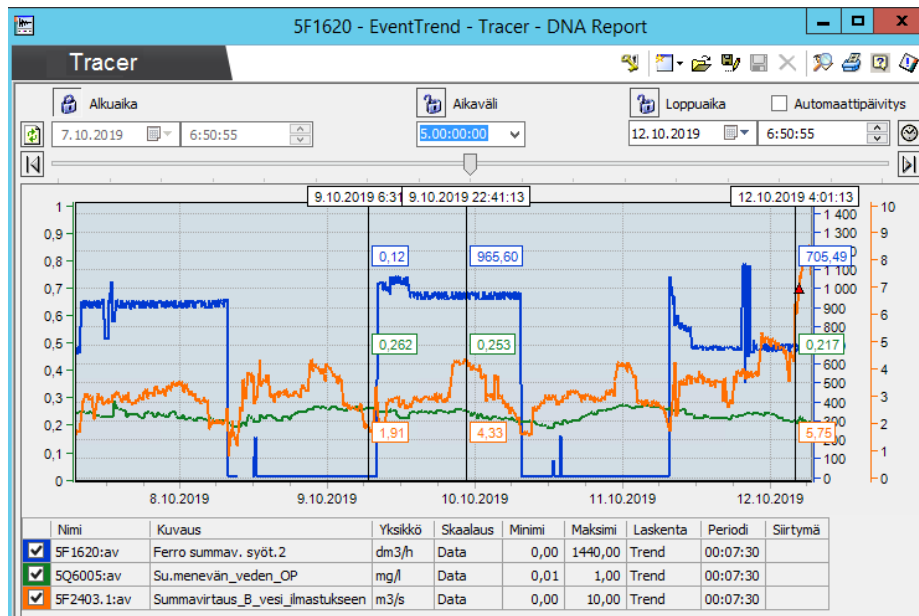
KUVA 40. Ferrosulfaatin askelvastekokeet lokakuu 2019 (Valmet 2019)

Mikäli vielä vertailun kohteeksi otetaan ilmastuksesta lähtevän veden määrä, tulee prosessimallin selvittäminen monimutkaisemmaksi. Ilmastuksen läpitullut vesimäärä nimittäin kulkee suoraan biologisille suodattimille. Kuvasta 41 selviää, missä kohtaa prosessi ilmastuksen lähtevän virtaaman (F2403.1) mittauspiste si-

jaitsee. Askelvastekokeiden aikainen virtaaman määrä ilmastuksen jälkeen selviää kuvasta 42. Kyseistä kuvasta havaitaan, että virtaus on vaihdellut 1,9 - 5,0 m³/s ja lähtenyt nousuun kokeen loppuvaiheessa 12.10.2019. Kyseisen virtaaman muutokset aiheuttavat ongelmia mallinnuksessa sekä ovat laimentaneet fosfaattipitoisuutta vedessä.

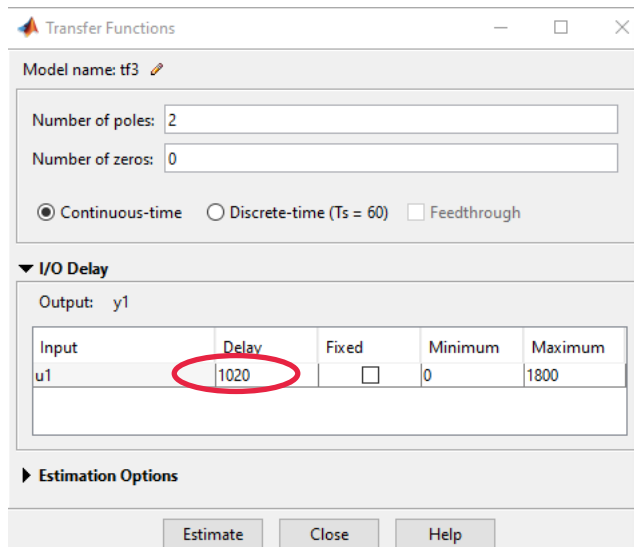


KUVA 41. Ohituskäytön kuva (Valmet 2019)



KUVA 42. Ferrosulfaatin askelvastekokeet ilmastuksen virtaamalla lokakuu 2019 (Valmet 2019)

Siirtofunktion mallinnuksessa havaittiin ohjelman määrittävän viiveen pituudeksi 1 020 s kuten kuvasta 43 havaitaan. Siirtofunktion asteen noustessa viive muuttui hieman pidemmäksi, mutta ei yli 1 200 sekuntiin. Projektipäällikkö Kuokkasen (2019c) mukaan kyseinen viive on merkittävästi lyhyempi kuin jäteveden viipymä jälkiselkeytsaltaassa, eikä siten mahdollinen.



KUVA 43. Mallinnettavan siirtofunktion määrittelyjä

Esimerkiksi ennakoiva säätötapa vaatii hyvin soveltuvan prosessimallin, jotta kyseisestä säätötavasta saadaan sen tehokkuus irti. (Rohani 2017, 225) Tehdyistä mallinnoista huolimatta prosessimallin istuvuus jäi oletettua heikommaksi, joten ennakoiva säätötavan vertailu Simulink-ohjelmassa saatujen tuloksien pohjalta ei ole asianmukaista.

Tutkimuksessa vertailtiin Matlabin avulla ferrosulfaatin 2. pisteen annostelun summavirtauksen ja suodattimille tulevan fosfaatin korrelaatiota ferroaskelvastekokeiden mittauksilla ja vuoden ensimmäinen kvartaalin 2018 mittausdatalla. Suurin osa ferrosulfaatin annostelussa tehdään prosessin alkupäässä ennen hiekanerostusta, josta viive on mittauspisteisiin pidempi kuin 2. pisteestä. Näiden kahden mittauksen välinen korrelaatio on heikko ferrosulfaatin askelvastekokeiden mittauksilla, -0,2703. Vuoden 2018 ensimmäisen kvartaalin datalla korrelaatio näyttää parantuvan, 0,4750. Tämä selittyy sillä, että prosessia ajetaan tilanteessa ns. normaalisti eikä koeluontoisesti niin kuin askelvastekokeissa. Myöskin laitokselle tuleva fosforikuorma vaihtelee, näin ollen ferrosulfaatin annostus ei korreloi suoraan käsitellyn jäteveden fosfaattipitoisuuteen, vaan fosfaattipitoisuus

voi kasvaa ferrosulfaatinannostuksen kasvattamisesta huolimatta. Mainittakoon vielä, että korrelaatio on huono, kun se lähentelee nollaa, joten korrelaatio 1 viittaa täydelliseen korrelaatioon.

6.2 Toimenpidesuosituks

6.2.1 Ferrosulfaatin annostelun automatisoinnin toteutus

Ferrosulfaatin annostelun automatisointiin ehdotetaan ferrosulfaatin 2. pisteen annostelun toteutusta kemiallisen saostuksen toiminnan ja DN-suodatuksessa tapahtuvan fosforin kulutuksen perusteella. Näin ollen automaatiojärjestelmään ohjelmoidaan periaatteet, joiden perusteella käyttäjät tekevät ferrosulfaatin annostelun muutoksia. Kyseisiä muutoksia ovat fosfaattipitoisuuden muutosta vastaava ferrosulfaatin teoreettinen tarve ja DN-suodatuksen teoreettinen fosforin kulutus. (Kuokkanen, 2019c) Viiveen pituuden ollessa pitkä, voidaan hyödyntää Smith-prediktor

Smith-prediktor, joka on toteutettavissa Valmet DNA-automaatiojärjestelmään. Sopiva viive voidaan hakea testaamalla tai käyttämällä mitattuun virtaamaan perustuvaa viiveen laskentaa.

Ferrosulfaatin annostelun automatisointiin suositellaan toisena vaihtoehtona ratkaisun etsimistä eri menetelmällä. Annostelua voidaan yrittää uudelleen mallintaa, mikäli pimennossa olevia häiriöitä saadaan selville. Tämä vaatii viiveen selville saamista, ja biologisten ilmiöiden teorian hyödyntämistä sekä häiriöiden mitaamista.

Vaihtoehtoisesti lähestymistapaa voidaan vaihtaa laittamalla kukin säätötapa vuorollaan annostelemaan ferrosulfaattia prosessiin. Tämän jälkeen päätetään, mikä valituista säätömenetelmistä toimii parhaiten käytännön kokeessa ja pidätetään siinä.

6.2.2 Mallinnuksen hyödyntäminen tulevaisuudessa

Puhtaasti matemaattista mallinnusta ja simulointia voidaan jatkaa muualla jätevedenpuhdistuksessa, joissa syy- ja seuraussuhteet ovat selkeämmät. Näissä tilanteissa tulee tietää säädettävään suureeseen vaikuttavat muut mittaukset ja häiriöt, jolloin prosessimallin istuvuus on mahdollista saada paremmaksi. Sopiva kohde mallinnuksen hyödyntämiselle voisi olla laitoksen suurimmat yksittäiset energiankuluttajat eli ilmastuskompressorit. Näiden kompressoreiden energiankulutusta on mahdollista pienentää, optimoimalla kompressorin ylläpitämän paineen ja ilmaventtiilien asennot nykyisen vakio-paineen ylläpidon sijasta.

Ehdotetaan lisäksi kehitettävän yhteistyötä prosessipuolen henkilöstön sekä sähkö- ja automaatioasiantuntijoiden kanssa. Kun laitoksella saadaan yhdistettyä eri alan asiantuntijat, saadaan jätevedenpuhdistuksesta tehtyä energiatehokkaampi ja optimoidumpi prosessi.

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Simuloinnin ja mallinnuksen hyödyntäminen ferrosulfaatin annostelun automatisoinnissa ei tuottanut toivottua tulosta. Näitä menetelmiä hyödyntäen mallista ei saatu riittävän hyvää, minkä pohjalta oltaisiin voitu vertailla säätötapoja keskenään.

Tutkimuksen aikana perehdyttiin säätötekniikkaan ja siirtofunktioiden käyttöön. Prosessimallin löytäminen perustuu pitkälle yritykseen ja erehdykseen. Mallinusta ei voida lopettaa näin ollen muutaman kokeilun jälkeen, vaan sitä tulee testata laajasti eri näkökulmista. Tämän takia suodattimille tulevaan fosfaattiin nähden kokeiltiin muita mittauksia, joilla saattaisi olla jotain vaikutusta fosfaattipitoisuuteen.

Mallinnuksessa testattiin dataa vuodesta 2017 lähtien aina tämän vuoden loka-kuuhun asti. Datan mittausväliä muutettiin 10 minuutista yhteen minuuttiin ja koitettiin saada mallia paremmaksi. Mittausvälin lyhentäminen paransi mallien sopivuutta. Aluksi mallinnettava data oli keskiarvotettua mutta myöhemmin se vaihdettiin todelliseen arvoon. Todellisen arvoon muuttamisen myötä ongelmaksi muodostui mittauksista puuttuvat arvot. Suuri osa suodattimille tulevan fosfaatin mittauksista tai ferrosulfaatin summavirtaaman arvoista puuttui, koska vedestä otettiin näyte kerran 10 minuuttiin. Näillä arvoilla ei myöskään voinut lähteä mallintamaan prosessia.

Näiden vaiheiden jälkeen kokeiltiin MIMO-mallia, jossa on useampi sisään- ja ulostulo. Prosessimallien tulos oli edelleen heikko, alle 40 %. Edellä mainittujen kokeiden jälkeen mallinnettiin siirtofunktioita vaihtamalla validointidata erilaiseksi. Tämäkään ei auttanut mallin määrittämisessä. Usein prosessimallin tulokset olivat istuvuudeltaan 40 - 60 %. Mittausdatan arvojen hakeminen maksimiarvoina tai todellisena arvoina ei muuttanut tulosta parempaan.

Ferrosulfaatin askelvastekokeista huomattiin, että ferrosulfaatin 2. annostelupisteen annostelu voi olla pois päivän ilman suurempia ongelmia. Käsityksenä on ollut, että prosessi ei selviäisi näin pitkiä aikoja ilman ferrosulfaattia. Mikäli askel-

vastekokeiden pituutta oltaisiin voitu pidentää, tulokset olisivat voineet olla parempia. Näiden testauksien ja tutkimuksen pohjalta ei voida valita mitään kolmesta säätötavasta ferrosulfaatin annosteluun. Näin ollen annostelu on syytä toteuttaa perustuen ferrosulfaatin teoreettiseen tarpeeseen ja keskimääräiseen kuluutukseen DN-suodatuksessa. Tämän jälkeen säädön toimintaa seurataan sopivien säätöparametrien ja rajojen määrittämiseksi.

LÄHTEET

AccuWeather. n.d. Helsingin säätiedot huhtikuu 2018. Luettu 10.7.2019.
<https://www.accuweather.com/fi/fi/helsinki/133328/month/133328?monyr=4/01/2018>

Airikka, P. Automaatiotekniikan lehtori. 2019a. 2-Takaisin kytketty ohjaus -opetusmateriaali kurssilta Automaatiotekniikka ja sähkökäytöt. Luento 18.3.2019. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tampere.

Airikka, P. Automaatiotekniikan lehtori. 2019b. Säätorakenteet. Sähköpostiviesti. pasi.airikka@tamk.fi. Luettu 30.7.2019.

Automaatioseura. Julkaistu 2000. Säätotekniikan koulutusmateriaali. Luettu 17.6.2019. https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1367/pid_kirja_1-1.pdf

Bequette, W. 2003. Process Control, Modeling, Design, and Simulation. Prentice Hall.

Brosilow, C. 2002. Techniques of Model-Based Control. Prentice Hall.
<https://learning.oreilly.com/library/view/techniques-of-model-based/013028078X/?ar>. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu 11.11.2019.

Enlyft. n.d. Companies using MATLAB. Luettu 31.5.2019. <https://enlyft.com/tech/products/matlab>

HSY. Päivitetty 9.8.2017. Viikinmäen jätevedenpuhdistamo. Luettu 22.8.2019.
<https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/vesihuolto/jatevedenpuhdistus/Viikinmaki/Sivut/default.aspx>

Jokelainen, M. 2010. Jätevedenpuhdistamon on-line analysaattorien autokalibrointi. Automaatio- ja systeemitekniikan laitos. Aalto yliopisto. Diplomityö.

Kuokkanen, A. projektipäällikkö. 2019a. Haastattelu 9.4.2019.

Kuokkanen, A. projektipäällikkö. 2019b. Haastattelu 11.7.2019.

Kuokkanen, A. projektipäällikkö. 2019c. Kommentit opinnäytetyöhön. Sähköpostiviesti. anna.kuokkanen@hsy.fi. Luettu 19.11.2019

Ljung, L. 2019a. Introduction to System Identification video. <https://se.mathworks.com/videos/introduction-to-system-identification-81796.html>

Ljung, L. 2019b. System Identification Toolbox. Mathworks. Luettu 16.9.2019.
https://se.mathworks.com/help/pdf_doc/ident/ident.pdf

MathWorks. n.d. Getting Started with Simulink. Luettu 17.5.2019
<https://se.mathworks.com/help/simulink/getting-started-with-simulink.html>

Metodix. 2001. Kari Lukka: Konstruktiivinen tutkimusote. Luettu 17.5.2019. <https://metodix.fi/2014/05/19/lukka-konstruktiivinen-tutkimusote/>

Mikles, J. 2007. Process Modelling, Identification, and Control. Springer.

Moler, C. MathWorks. 2018. A Brief History of MATLAB. Luettu 17.5.2019. <https://se.mathworks.com/company/newsletters/articles/a-brief-history-of-matlab.html>.

Morris, K. 2001. Feedback Control. Harcourt academic press.

Nyman, K. Tuotannonesimies. 2019. Haastattelu 9.5.2019.

Oppariapu. n.d. Konstruktiivinen tutkimus. Luettu 14.6.2019. <https://oppariapu.wordpress.com/konstruktiivinen-tutkimus/>.

Rohani, S. 2017. Coulson and Richardson's chemical engineering: Volume 3B, Process control. Fourth edition. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Seborg, D. & Edgar, T. 2004. Process Dynamics and Control. WILEY

Suodatinsolujen pesu toimintaselostus. n.d. Valmet DNA. Luettu 25.3.2019.

Tewari, A. 2002. Modern control design with Matlab and Simulink. John Wiley & Sons, LTD.

Valmet DNA -automaatiojärjestelmä. 2019. Viikinmäen jätevedenpuhdistamo.

Åström, K. & Hägglund, T. 2006. Advanced PID Control. ISA.