



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **Valusenkan liikusulkimen säätöpiirin optimaalinen viritys**

Olli Laiho

PROSESSITEKNIikka

Diplomityö

Lokakuu 2020



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **Valusenkan liikusulkimen säätöpiirin optimaalinen viritys**

Olli Laiho

Ohjaajat: Jari Ruuska, Aki Sorsa, Esa Puukko ja Marko Petäjäjärvi

PROSESSITEKNIikka

Diplomityö

Lokakuu 2020

# TIIVISTELMÄ

## OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Prosessitekniikka		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Olli Laiho		Työn ohjaaja yliopistolla Jari Ruuska, Aki Sorsa	
Työn nimi Valusenkan liukusulkimen säätöpiirin optimaalinen viritys			
Opintosuunta Automaatiotekniikka	Työn laji Diplomityö	Aika Lokakuu 2020	Sivumäärä 61 s.
<b>Tiivistelmä</b> <p>Työn tavoitteena oli tutkia Outokummun Tornion tehtaan sulaton 2-linjan liukusulkimen säädön kehityspotentiaalia välialtaan painovaihtelujen minimoimiseksi. Välialtaan pienemmällä painohajonnalla haluttiin tehostaa kuonasulkeumien poistoa välialtaassa. Liukusulkimen säädön kehityksen yhteydessä tutkittiin myös mahdollisuutta vähentää liukusulkimen liikekertoja kulumisen vähentämiseksi. Tämän lisäksi tarkasteltiin muita mahdollisia välialtaan painovaihteluihin vaikuttavia tekijöitä.</p> <p>Työn alussa käytiin läpi terässulaton 2 linjan toimintaa ja tarkempaan tarkasteluun otettiin senkka-aseman, välialtaan ja liukusulkimen toiminta.</p> <p>Työssä tarkasteltiin aiempia samaan aihepiiriin liittyviä tutkimuksia ja niissä tehtyjä havaintoja, joista saatiin apua tässä työssä esiteltäisiin parannusehdotuksiin. Työn teoriaosuudessa käytiin läpi mallinnusta, yleistä säätöpiireihin liittyvää teoriaa ja tässä työssä käytetyn Smith-prediktorin toimintaa.</p> <p>Kokeellisessa osuudessa tehtaalta saatua prosessidataa analysoitiin, minkä avulla luotiin kuva olemassa olevan prosessin käyttäytymisestä ja siihen liittyvän automaatiojärjestelmän toiminnasta. Tämän pohjalta kehitettiin useampi simulointimalli ja vaihtoehtoinen säätöratkaisu käyttäen Smith-prediktoria välialtaan painon ohjauksessa. Luoduilla simulointimalleilla simuloitiin ensisijaisesti välialtaan painoa, mutta myös liukusulkimen liikkeitä.</p> <p>Simulointien perusteella vaihtoehtoisella säädinratkaisulla saataisiin vähennettyä välialtaan painovaihteluja. Liukusulkimen liikekertoja saatiin simuloinneissa vähennettyä kasvattamalla sen minimiliikettä ilman, että välialtaan painovaihtelu olisi kasvanut. Liukusulkimen toiminnasta kuitenkin havaittiin, että sen nykyinen liike ei vastannut säätimen asettamia asetusarvoja halutulla tavalla, joten sen mekaaninen toimivuus on syytä varmistaa ennen mahdollisia muutoksia automaatiojärjestelmään. Simulointien osalta tulokset ovat suuntaa antavia ja prosessikokeisiin ei työssä ollut mahdollisuutta tulosten todentamiseksi.</p>			
Muita tietoja			

# ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Process Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Olli Laiho		Thesis Supervisor Jari Ruuska, Aki Sorsa	
Title of Thesis Optimal tuning of the ladle slide gate control system			
Major Subject Automation Engineering	Type of Thesis Master's Thesis	Submission Date October 2020	Number of Pages 61
<b>Abstract</b> <p>In this thesis, the aim was to study development potential of the slide gate control in order to minimize tundish weight variations at Outokumpu steel factory in Tornio. With smaller tundish weight variation, the desire was to improve removal of slag occlusions in the tundish. Possibility to reduce slide gate movements was also studied to reduce slide gate wear. In addition, other possible factors affecting tundish weight variations were studied.</p> <p>First the smelter production line 2 manufacturing process was introduced and then ladle station, tundish and slide gate operations were more closely looked at. Previous studies and their findings about the subject were examined which helped in this thesis when making suggestions for the improvements. Theory about modelling and control systems and how they link to this study were presented on the theory part of this thesis as well as the working principle of Smith predictor was explained.</p> <p>Process data was acquired from the factory for analysis which helped studying the behavior and the automation system of the process. This served as a basis for creating multiple simulation models and an alternative control system using Smith predictor to control tundish weight. Simulation models were used primarily to simulate tundish weight, but they were also used to simulate movement of the slide gate.</p> <p>Based on simulation results, the alternative control system provided decrease in tundish weight variation. Reduction of slide gate movements was achieved by increasing minimum movement of the slide gate without increasing tundish weight variation. It was also noticed that slide gate movement was not corresponding to the values set by the controller in the current system, which would require attention before any other implementations to the automation system. The results concerning simulations in this thesis are only indicative and there was no opportunity for process experiments to confirm these results.</p>			
Additional Information			

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty yhteistyössä Outokummun Tornion terästehtaan kanssa 02.12.2019 – 16.10.2020 välisenä aikana. Työssä haluttiin parantaa nykyistä sulaton välialtaan toimintaa ja optimoida senkan liukusulkimen liikkeitä.

Haluan kiittää Outokumpua diplomityöpaikasta ja työn ohjaajia kaikesta tuesta työhön liittyen. Ohjaajina työssä toimivat yliopistolta Jari Ruuska ja Aki Sorsa, sekä Outokummulta Esa Puukko ja Marko Petäjajarvi. Kiitokset myös muulle Outokummun henkilöstölle, jotka auttoivat työhön liittyvissä asioissa.

Oulussa 16.10.2020      Olli Laiho

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	7
2 Ruostumattoman teräksen valmistus.....	8
2.1 Ruostumattoman teräksen valmistus yleisesti.....	8
2.2 Terässulatto .....	8
2.3 Jatkuvalu.....	9
2.4 Jatkokäsittely.....	10
2.5 Senkka-aseman prosessit.....	10
2.5.1 Valusenkät .....	11
2.5.2 Kuonan hallinta valusenkan tyhjennyksessä .....	12
2.5.3 Liukusuljin.....	12
2.5.4 Liukusulkimen hallinta kuonan minimoimiseksi.....	13
2.5.5 Lämpötilan hallinta .....	13
2.5.6 Terässulan koostumus ja seostus .....	14
2.6 Laadunhallinta.....	14
3 välialtaan painon ja kokillin pinnankorkeuden tutkimukset .....	15
3.1 Design study for continuous caster tundish weight control and ladle steel flow estimate.....	15
3.2 Control design and implementation in continuous steel casting.....	15
3.3 Robust nonlinear adaptive mould level control for steel continuous casting.....	16
3.4 Molten steel level control based on an adaptive fuzzy estimator in a continuous caster.....	16
3.5 Periodic disturbances reduction in the continuous casting process by means of a modified smith predictor .....	17
3.6 Control issues in continuous casting of steel .....	17
3.7 Kirjallisuuskatsauksen hyödyntäminen tässä työssä .....	17
4 Mallinnus .....	18
4.1 Mallien karakteristiikka .....	18
4.2 Mallinnettava systeemi ja sen tavoitteet .....	19
4.3 Mallien käyttö .....	20
4.4 Simuloinnin hyödyntäminen .....	21
5 säätöjärjestelmät.....	23

5.1 Avoin ja suljettu säätöpiiri .....	23
5.2 Säädin.....	24
5.3 Säätimen viritys.....	26
5.4 Viiveet ja säädinmallit.....	26
5.5 Smith-prediktori .....	27
6 kokeellinen osa.....	28
6.1 AMEPA ja Vortex.....	28
6.2 Käytössä oleva mittaustieto.....	28
6.2.1 Mittausdatan analysointi.....	29
6.3 Olemassa oleva välialtaan painoa ohjaava järjestelmä .....	31
6.4 Välialtaan mallinnus.....	32
6.5 Simulointi.....	33
6.6 Virheet ja niiden käsittely .....	33
6.6.1 Sulan teräksen tiheys .....	33
6.7 Käytetyt simulointimallit .....	34
6.7.1 Simulointi 1: Smith-prediktorin hyödyntäminen säädössä.....	34
6.7.2 Simulointi 2: Säätöratkaisu ilman Smith-prediktoria .....	37
6.7.3 Simulointi 3: Simulointimalli liukusulkimen liikkeestä.....	37
6.7.4 Simulointi 4: Simulointi liukusulkimen liikkeen rajoittamisesta .....	39
6.8 Muut huomiot.....	39
6.8.1 Huomiot simulointimalliin liittyen .....	41
7 Lopputulokset.....	43
7.1 Simulointien tulokset .....	43
7.2 Johtopäätökset ja suositukset .....	51
8 YHteenveto .....	52
9 Lähdeluettelo.....	53

# 1 JOHDANTO

Työssä tutkittavana oli Outokummun terästehtaan linjan 2 välialtaan säätöpiirin optimointi. Välialtaassa esiintyi pinnankorkeuden vaihtelua enemmän kuin tehtaalla olisi haluttu, lisäksi liukusulkimen toimintaa haluttiin parantaa, jotta sen käyttöikää voitaisiin kasvattaa. Tavoitteena oli minimoida välialtaan pinnankorkeuden vaihtelut ja tutkia mahdollisuutta vähentää liukusulkimen liikekertoja. Välialtaan pinnankorkeuden vaihteluja haluttiin minimoida, jotta voitaisiin käyttää väliallasta suuremmilla painotavoitteilla ja edesauttaa jatkuvavalua minimoimalla siihen kohdistuvat paineen vaihtelut.

Työssä kuvataan terässulaton toimintaa ja välialtaan ja liukusulkimen merkitys sulaton toimintaan. Välialtaan painon säätimelle tutkitaan säätöä parantavia vaihtoehtoja ja pyritään pidennettyä liukusulkimen liikkeitä niin, että saataisiin parannettua sen käyttöikä. Lisäksi työssä käydään läpi muita kohteeseen vaikuttavia tekijöitä säädön ohella. Työssä tarkastellaan olemassa olevan järjestelmän toimintaa ja simulointien pohjalta tehdään parannusehdotuksia nykyiseen järjestelmään.



## **2 RUOSTUMATTOMAN TERÄKSEN VALMISTUS**

### **2.1 Ruostumattoman teräksen valmistus yleisesti**

Outokummun Tornion terästehdas valmistaa ruostumatonta terästä kierrätysteräksestä ja ferrokromista. Tehdas koostuu ferrokromilaitoksesta, terässulatosta, kuumavalssauksesta ja kylmävalssauksesta. Ruostumattomaksi teräkseksi kutsutaan terästä mihin on lisätty kromia, mikä suojaa sitä korroosiolta. Ruostumattomat teräkset voidaan jakaa austeniittisiin, ferriittisiin ja martensiittisiin teräksiin. Niiden pitoisuudet mm. kromin, hiilen ja nikkelin osalta vaihtelevat, joten ne eroavat toisistaan ominaisuuksiltaan ja käyttötarkoituksiltaan.

Outokummun terästehtaan erikoisuutena on sen omistama läheinen kromikaivos Kemissä. Kromikaivokselta saatava rikastettu kromimalmi kuljetetaan Tornion terästehtaalalle, jossa ferrokromilaitoksella kromimalmista saadaan sulaa ferrokromia. Ferrokromi saadaan siirrettyä terässulatolle suoraan sulassa muodossa, joten näin säästyy huomattavasti energiaa ja päästään parempaan tuotantotehokkuuteen. Tehtaan kapasiteetti on 1,6 miljoonaa tonnia vuodessa ja ruostumaton kierrätysteräs toimii tehtaan pääraaka-aineena.

### **2.2 Terässulatto**

Terässulatto koostuu kuvan 1 mukaisesti kahdesta linjasta, jossa linjalla 1 raaka-aineena käytetään sulaa ferrokromia ja kierrätysterästä ja linjalla 2 ainoastaan kierrätysterästä. Linjalle 1 ferrokromin tehdas tuottaa itse, jonka ansiosta se saadaan käyttöön valmiiksi sulassa muodossa. Panoskooltaan linjat eroavat siten, että linjalla 1 se on noin 95 tonnia ja linjalla noin 150 tonnia. Tässä työssä kuitenkin keskityttiin linjan 2 toimintaan.



Kuva 1. Terässulaton prosessikaavio.

Linjan 2 prosessi alkaa lajittelemalla kierrätysteräs romupihalla, josta kierrätysteräs siirretään panostuskoreilla valokaariuuniin. Valokaariuunissa kierrätysteräs sulatetaan ja siihen lisätään kuonanmuodostajia ja seosaineita, kuten ferrokromia.

Valokaariuunilta sula teräs siirretään AOD-konvertterille, jossa suurin osa hiilestä poistetaan mellotuksessa. Siinä happea, argonia ja typpeä puhalletaan seokseen, jolloin teräksessä oleva hiili, pii ja kromi hapettuu. Kuonaan hapettunut kromi kuitenkin pelkistetään lopuksi takaisin terässulaan. Tässä vaiheessa eri pitoisuudet, kuten hiili, pii ja kromi pyritään saamaan mahdollisimman lähelle lopullisia pitoisuuksia. Lisäksi kuonanmuodostajia lisätään nopeuttamaan kuonan muodostumista.

Sula teräs siirretään seuraavaksi senkka-asehalle, jossa lopullinen koostumus ja lämpötila täsmätään ja varmistetaan teräksen sulkeumapuhtaus optimaalisella sekoituksella.

Valusenkan tyhjennyksessä terässula lasketaan senkoista ensin välialtaaseen, josta se virtaa valuputkea pitkin kokilliin ja jatkuvavaluun. Väliallas toimii puskurivarastona senkan ja valun välillä ja mahdollistaa tasaisemman valun ja siten tasaisemman laadun.

### 2.3 Jatkuvavalu

Jatkuvavalussa teräksen virtausta kokilliin säädetään välialtaan stopparilla, jotta teräksen pinnankorkeus kokillissa saadaan pidettyä mahdollisimman tasaisena. Stopparilla voidaan tarvittaessa tukkia valuputki kokonaan, jolloin terästä ei pääse valuun ollenkaan. Kokilli toimii muottina teräsaihioille, ja se myös määrittää valettavan teräsaihion koon. Aihion saadessa oikean muotonsa sitä jäähdytetään sen kulkiessa

tukirullaston läpi. Lopullinen jäähdytys tapahtuu rullaston jälkeen ja lopuksi se leikataan oikeaan mittaan.

Välialtaan painolla ja sen muutoksilla on suora vaikutus jatkuvavaluun ja kokillin pinnankorkeuden hallintaan. Välialtaan pinnankorkeuden paremmalla hallinnalla paine kokilliin saadaan pidettyä tasaisena, joka mahdollistaa tasaisemman virtauksen kokilliin. Pinnankorkeuden hallintaan liittyy aina myös riski välialtaan tulvimiselle ja liialliselle tyhjenemiselle. Tulviessaan sula teräs aiheuttaisi huomattavia vahinkoja lähiympäristölle ja henkilöille. Liiallinen välialtaan tyhjeneminen taas altistaa huonolaatuisemmalle teräkselle ja kuonan sekoittumiselle valettavaan teräkseen.

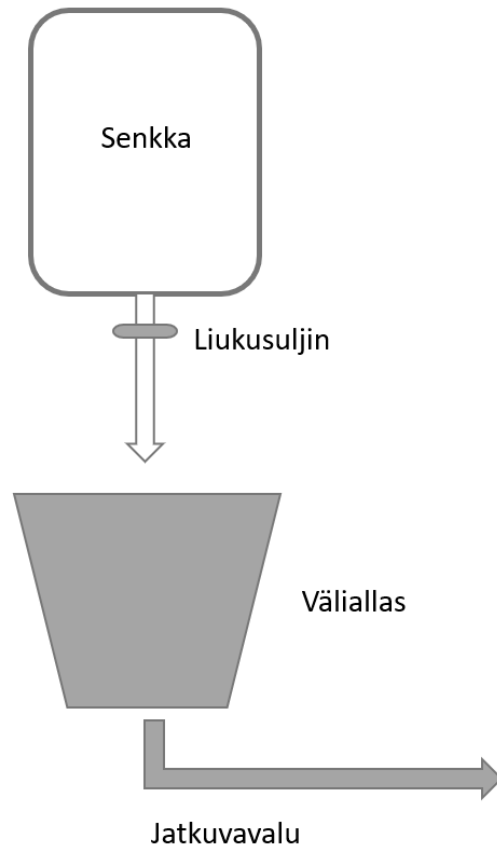
## **2.4 Jatkokäsittely**

Valetut aihiot jatkokäsitellään kuuma- ja kylmävalssaamalla. Kuumavalssauksessa 200 mm paksut aihiot ohennetaan eli valssataan 2.5 – 8.5 mm paksuisiksi kuumanauhoiksi. Kuumavalssaus koostuu aihiohehkutuksesta, jossa aihio kuumennetaan 1250 Celsius-asteeseen ja useasta valssausvaiheesta, jossa teräslevyä ohennetaan vetämällä ja puristamalla se isojen rullien lävitse. Levyn kulkiessa eri valssaimien ja valssausvaiheiden lävitse, materiaalin paksuus pienenee ja pituus kasvaa, ja lopuksi levystä saadaan ohutta teräsnauhaa, joka rullataan kelalle ja jäädytetään.

Kylmävalssausprosessissa valssaimilla teräs käsitellään asiakkaan tilaamaan paksuuteen ja peruspintaan. Hehkutuksella varmistetaan mekaaniset ominaisuudet. Jälkikäsitteilyillä kuten hionta, harjaus, katkaisu ja halkaisu voidaan asiakkaan tilaus viimeistellä.

## **2.5 Senkka-aseman prosessit**

Senkka-aseman prosessien lähempi tarkastelu on esitetty kuvassa 2. Aseman pääkomponentit ovat valusenkka, liukusuljin ja väliallas.



Kuva 2. Yksinkertaistettu kuvaus senkan tyhjennykseen liittyvästä prosessista.

### 2.5.1 Valusenkat

Valusenkat ovat isoja teräksisiä astioita, jotka on vuorattu sisältä tulenkestävillä tiilillä. Tornion terässulaton 2-linjalla sulan teräksen määrä senkassa on noin 150 tonnia. Vuoraus kuluu ajan myötä, joten se on uusittava säännöllisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että valusenkkoja täytyy olla useita, jotta voidaan varmistaa senkkojen saatavuus ja että ne ovat kunnossa olevia. Senkka-aseamalla senkkoja pidetään lämmitettyinä siten, ettei sulan teräksen kaato senkkaan aiheuta niin suurta lämpötilashokkia, että se voisi vaurioittaa vuorausta. Senkka-aseamalla senkat sijaitsevat senkkakarusellessa, johon saa nostettua kaksi senkkaa samanaikaisesti. Siinä toinen senkoista on tyhjennyksessä, jonka aikana karusellin toiseen päähän voidaan valmistella seuraava senkka tyhjennystä varten.

### 2.5.2 Kuonan hallinta valusenkan tyhjennyksessä

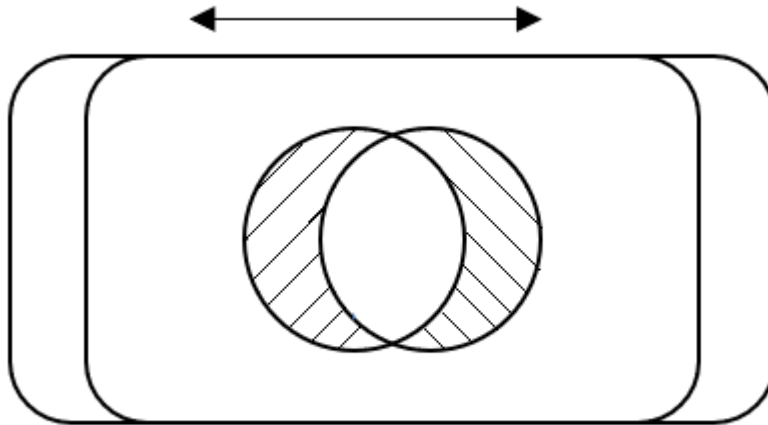
Teräksen valmistuksen aikana kuonaa muodostuu terässulan pinnalle hapettumisen ja lisättyjen kuonanmuodostajien seurauksena. Sulassa kuonan tehtävänä on toimia lämmöneristeenä ja poistaa haitallisia aineita terässulasta. Senkka-asemalla kuonaa poistetaan senkan pinnalta siihen tarkoitettun metallilevyn avulla, koska kuonan ollessa liian kauan sulan pinnalla, siitä voi vapautua haitallisia aineita takaisin terässulaan.

Vaikka kuonan muodostuminen on edesauttava tekijä sulatusprosessissa, kuonaa ei kuitenkaan lopputuotteeseen haluta. Näin ollen on tärkeää, että valutettaessa senkan sisältöä välialtaaseen kuonan pääsy välialtaaseen saadaan minimoitua. Kuona kulkeutuu aina terässulan pinnalle (kuonan tiheys on pienempi kuin terässulan), joten laskettaessa sula senkan pohjasta, kuona saadaan jätettyä senkkaan ja se voidaan hyödyntää muihin tarkoituksiin.

### 2.5.3 Liukusuljin

Senkan pohjassa on kuvassa 3 esitetty säädettävä liukusuljin, jonka tehtävänä on säädellä terässulan virtausta välialtaaseen. Liukusuljin koostuu kahdesta tulenkestävästä reiällisestä levystä, jotka ovat toisiaan vasten senkan pohjassa. Levyistä ylempi pysyy paikallaan ja alempi levy liikkuu hydraulisylinlerin avulla niin, että liukusuljin on joko auki, osittain auki tai kiinni. Aukiasennossa levyjen reiät ovat vastakkain, eikä virtaus rajoitu. Osittain auki ollessa alemmaa levyä liikutetaan siten, että reiät eivät ole enää täysin vastakkain. Sulkimen ollessa kiinni alemmaa levyä liikutetaan niin pitkälle, ettei terästä pääse reiästä läpi ollenkaan. Liukusuljin on säädetty liikkumaan välialtaan painon mukaan niin, että välialtaan paino pysyy mahdollisimman lähellä sille asetettua asetusarvoa. Liukusulkimen kanssa samassa yhteydessä on kuonantunnistusjärjestelmä AMEPA, joka mittaa kuonan määrän virtauksessa ja sulkee liukusulkimen automaattisesti kuonan määrän ylittäessä sille asetetun rajan.

Liukusuljinten käyttöikä on hyvin rajoitettu kovan kulumisen takia ja ne vaihdetaan kahden-kolmen sulatuksen välein. Kulumista levyissä esiintyy sulkimen reiän ympärillä, levyn halkeiluna ja liukupinnan kulumisena. Prosessin kannalta on erittäin tärkeää, että suljin kestää senkan tyhjennyksen ajan. Liukusulkimet tarkistetaan joka käyttökerran jälkeen odottamattomien vaurioiden varalta.



Kuva 3. Havainnollistava kuva liukusulkimesta.

#### 2.5.4 Liukusulkimen hallinta kuonan minimoimiseksi

Sulaton 2-linjalla on 1-linjasta poiketen automaattinen kuonantunnistusjärjestelmä AMEPA. Järjestelmässä on mittausanturi, joka koostuu kahdesta käämistä kaatokanavan ympärillä. Toiseen käämiin syötetään vaihtovirta, jolloin saadaan indusoitua magneettikenttä, joka aiheuttaa jännitteen toisessa käämissä. Näin ollen jännitteen muutoksesta järjestelmä tietää kuinka paljon kuonaa virtaus sisältää. Kuonan määrän ylittäessä asetetun rajan, järjestelmä sulkee liukusulkimen kokonaan. Tämän avulla kuonan pääsy välialtaaseen saadaan minimoitua ja vastaavasti maksimoitua sulan teräksen saanti senkasta. (AMEPA, Lyhyt opastus, 2002)

#### 2.5.5 Lämpötilan hallinta

Senkassa oleva terässula pääsee usein jäähtymään ennen valua kuljetuksista, odotuksista sekoituksesta ja seosaineista johtuen. Pelkästään sulan pitäminen senkassa laskee terässulan lämpötilaa jopa useamman asteen minuutissa. Näin ollen pitkään vuoroaan odottavan senkan sula voi jäähtyä useita asteita. Sekoituksessa käytettävä argonpuhallus myös jäähdyttää sulaa, mutta se auttaa tasaamaan lämpötilaa eri osissa sulaa. Sulan jäähtymisen takia sitä voidaan lämmittää senkka-asemalta löytyvän valokaariuunin avulla. Hyvällä lämpötilan hallinnalla varmistetaan se, että senkasta valutettava terässula ei muuta välialtaan lämpötilaa ja samalla valu ei kärsi lämpötilan muutoksista.

### **2.5.6 Terässulan koostumus ja seostus**

Oikean koostumuksen saamiseksi terässulasta otetaan näyte, jonka perusteella sulaan lisätään seosaineita. Tarkoituksena on lisätä puuttuvia seosaineita ja poistaa epäpuhtauksia, kuten rikkiä ja happea. Tarvittavia seosaineita voidaan lisätä esimerkiksi syöttämällä jauhetta sisältävää metallilankaa. Sulaa sekoitetaan senkan pohjasta puhallettavan argonin avulla seosaineiden sekoittumisen varmistamiseksi ja sulkeumien poistamiseksi.

Sulkeumat eli oksidit, sulfidit ja silikaatit halutaan poistaa sulasta, sillä ne alentavat teräksen laatua ja voivat aiheuttaa ongelmia valuprosessissa. Kaikkia sulkeumia ei kuitenkaan saada poistettua, mutta niiden määrään ja kokoon voidaan vaikuttaa, esimerkiksi juuri kaasuhuhtelulla ja langan syötöllä.

## **2.6 Laadunhallinta**

Teräksen loppulaadulla on suuri merkitys sen menekkiin ja siitä saatavaan hintaan. Korkea ja tasainen laatu parantaa mainetta, asiakastytyvääisyyttä ja auttaa luomaan uskollisia asiakkaita. Teräksen laatuun voidaan vaikuttaa monessa eri vaiheessa koko valmistusprosessin ajan. Laadun osalta tarkastetaan sen fysikaalisia ja mekaanisia ominaisuuksia, kuten kemiallinen koostumus, mahdolliset rakennevirheet ja pinnan ominaisuudet. Useat teräslajit ovat standardisoitu ominaisuuksien ja koostumuksen osalta, joten näin sekä valmistaja että asiakas tietävät kyseisen teräksen ominaisuudet standardin perusteella.

Sulatolla teräksen laaduille on asetettu tietyt pitoisuuksien raja-arvot, jotka tarkistetaan säännöllisesti mittaamalla terässulan pitoisuuksia. Kuonapuhtaus on yksi oleellinen teräksen laatuun vaikuttava asia, johon senkka-asemalla vaikutetaan minimoimalla sulkeumat. Työn kohteena olevan säädön on tarkoitus edesauttaa jatkuvavaluprosessia, sillä sen toimivuuteen yhtenä asiana vaikuttaa välialtaalta tuleva paine. Jatkuvavalun aikana aihioon voi muodostua virheitä, joten välialtaan paremmalla painonhallinnalla pyritään pienentämään mahdollisia häiriöitä.

### **3 VÄLIALTAAN PAINON JA KOKILLIN PINNANKORKEUDEN TUTKIMUKSET**

Kirjallisuuskatsauksessa käytiin läpi aiempia vastaavaan aihepiiriin liittyviä tutkimuksia. Monet vastaavista tutkimuksista käsittelivät jatkuvavalun kokillin pinnankorkeuden hallintaa, mutta yksi tutkimuksista kuitenkin käsitteli tämän työn tapaan välialtaan painovaihtelujen minimointia ja liukusulkimen liikkumiskertojen vähenemistä.

Kokillin pinnankorkeutta käsittelevät tutkimukset otettiin tähän mukaan, sillä kokillin pinnankorkeuden hallintaan liittyy oleellisesti välialtaan pinnankorkeuden hallinta. Kuten jo kappaleessa kaksi mainittiin, välialtaan pinnankorkeuden pysyessä tasaisena, tasainen paine saavutetaan välialtaalta kokilliin, joka edesauttaa kokillin pinnankorkeuden hallinnassa.

#### **3.1 Design study for continuous caster tundish weight control and ladle steel flow estimate**

Cockerell *et al.* (1997) tutkimuksessa selvitettiin mm. miten saadaan vähennettyä välialtaan painovaihtelua. Tutkimuksessa kehitettiin kaksi eri vaihtoehtoa säädön toteuttamiseksi, joista toinen oli pitkälti aikaisemmin käytössä ollutta vastaava PD-säädin ja toinen oli tulo- ja lähtövirtausten tasaamiseen perustuva kaskadisäädin. Kehitetty kaskadisäädin hyödynsi pääasiallisesti lähtövirtausta tulovirtauksen säätämiseen. Teräsvirtauksen parempaan estimointiin käytettiin Kalman-suodinta, joka vanhasta järjestelmästä poiketen hyödynsi myös liukusulkimen auki – kiinni käskyjä. Tuloksena uudella kaskadisäätimellä saatiin tasaisempi välialtaan paino, liukusulkimen liikkumiskertojen vähentyminen, sekä teräsvirtauksen tarkempi estimointi.

#### **3.2 Control design and implementation in continuous steel casting**

Graebe *et al.* (1995) tutkivat samantyyppistä ongelmaa, mutta poiketen Tornion sulaton järjestelmästä, liukusuljin sijaitsi välialtaan pohjassa. Kyseisessä työssä keskityttiin pääasiallisesti parantamaan kokillin pinnankorkeuden hallintaa. Liukusuljin välialtaan pohjassa on toiminnaltaan kuitenkin samanlainen ja sen aukon epälineaarisuudet



vaikuttivat teräksen virtaukseen samanlaisesti. Olemassa oleva säätöratkaisu tarjosi kehnon suorituskyvyn kokillin pinnankorkeuden hallintaan, eikä liukusuljin toteuttanut annettuja asentokäskyjä halutulla tavalla. Liukusulkimen toimintaa saatiin parannettua asentamalla toinen korkean kaistanleveyden säädin liukusulkimen asentoa ohjaavaan säätöpiiriin. Tutkimuksessa kehitettiin kolme vaihtoehtoista säädintä, joista parhaat tulokset kokillin pinnanvaihtelujen ja liukusulkimen liikkeiden osalta saavutettiin käyttämällä epälineaarista kaskadisäätöä. Sen avulla saatiin kokillin pinnankorkeuden vaihtelut vähennettyä halutulle tasolle.

### **3.3 Robust nonlinear adaptive mould level control for steel continuous casting**

Välialtaan painon pitäminen tasaisena auttaa erityisesti kokillin pinnankorkeuden hallintaa jatkuvavalussa. Kokillin pinnankorkeuden hallintaan liittyy monia haasteita ja siihen liittyen tehty useita tutkimuksia.

Yero *et al.* (2018) ehdottivat robustia epälineaarista PI-säädintä, missä hyödynnetään uutta NPI-RR-metodia. Tarkoituksena oli saavuttaa hyvä kompromissi robustisuuden ja häiriöiden vaimentamisen suhteen, sekä optimoida tasapaino häiriöiden vaimennuksen ja säädön helppouden välillä. Tuloksena hyödynnettiin vahvistuksen taulukointia käyttävää adaptiivista systeemiä, sumeaa logiikkaa ja online-identifiointia kompensoimaan stopparin tukkeutumisesta tai kulumisesta ja välialtaan painosta aiheutuvia häiriöitä.

### **3.4 Molten steel level control based on an adaptive fuzzy estimator in a continuous caster**

Lee *et al.* (2009) keskittyivät työssään pääasiassa valettavan teräksen paisumisesta ja kutistumisesta aiheutuvien häiriöiden ehkäisemiseen. Paisumista ja kutistumista teräksessä tapahtuu, kun teräsaihion eri osat jäähtyvät eri vauhdilla. Nämä ilmiöt vaikuttavat suoraan kokillin pinnankorkeuteen, kun valettava teräs liikkuu hieman ylös- alas suunnassa. Työssään he käyttivät adaptiivista sumeaa estimaattoria ja PID-säädintä. Estimaattorin avulla pystyttiin määrittämään kompensaatiosignaali, jolla paisumisesta ja kutistumisesta aiheutuvat häiriöt saatiin mitätöityä.

### **3.5 Periodic disturbances reduction in the continuous casting process by means of a modified smith predictor**

Jabri *et al.* (2009) tekemässä työssä haluttiin vähentää kokillin pinnankorkeuden vaihteluita. He keskittyivät paisumis- ja kutistumisilmiön tuoman häiriön minimointiin. Työssään he päätyivät käyttämään säädössä Åströmin muokattua Smith-prediktoria, jonka häiriön vaste saatiin kytkettyä irti asetusarvon vasteesta ja näin ollen se voitiin optimoida monipuolisemmin.

### **3.6 Control issues in continuous casting of steel**

Furtmueller *et al.* (2008) ennustivat aihion liikkeen vaikutuksia kokillissa, jonka avulla he pystyivät kompensoimaan sen aiheuttamia pinnankorkeuden vaihteluita kokillissa. Liikkeen ennustamisessa käytettiin hyväksi jatkuvavalun rullaston moottorin toimintaa. Tuloksena saatiin selkeästi pienempi pinnankorkeuden vaihtelu.

### **3.7 Kirjallisuuskatsauksen hyödyntäminen tässä työssä**

Edellä esitetyissä tutkimuksissa tuli esille monia kehitettyjä säätöratkaisuja, joita käytettiin apuna tässä työssä tutkittaessa vaihtoehtoisia säätöratkaisuja. Tutkimukset antoivat myös viitteitä siitä, mitkä tekijät prosessissa vaikuttavat säädön hyvyyteen ja toimintaan. Myös liikusulkimen toimintaan liittyvää tietoa saatiin kahdesta eri työstä. Tutkimuksissa esitettyjä muita säätöratkaisuja voidaan tarvittaessa hyödyntää tässä prosessissa myöhemmin. Tässä esitetyistä tutkimuksista sai samalla osviittaa mahdollisista prosessille saavutettavista parannuksista ja niiden suuruusluokasta.

## 4 MALLINNUS

Mallinnuksen tarkoituksena on kuvata prosessin erityispiirteitä matematiikan keinoin ja näin helpottaa ongelman ymmärtämistä. Prosessin mallinnuksessa ongelma muunnetaan matemaattisen muotoon ja ratkaisua pyritään soveltamaan käytännössä. Malleja voidaan luoda kuvaamaan tiettyä prosessiominaisuutta tai prosessin tilaa. Ne auttavat prosessin tutkimuksessa ja kehityksessä, sen suunnittelussa ja sen operoinnissa. Luotua mallia voidaan hyödyntää ymmärtämään järjestelmän toimintaa ja sen käyttäytymistä. Luodut mallit ovat oleellinen osa simuloitaessa systeemiä.

### 4.1 Mallien karakteristiikka

Prosessien mallinnuksessa käytettävät mallinnusperiaatteet voidaan yleisesti jakaa kolmeen osaan: teoreettiset mallit, empiiriset mallit ja niiden yhdistelmästä koostuviin malleihin. Malleihin ja mallinnukseen liittyy aina virhettä ja epävarmuuksia. Näitä tulee yleisesti, kun mallinnettavasta systeemistä ei tiedetä tarpeeksi. Ongelmana kuitenkin on, että vaikka kaikki tarvittava tiedettäisiin, se tekisi mallista liian monimutkaisen, joten malli ei ole koskaan täydellinen kuvaus todellista systeemistä.

Teoreettisissa malleissa käytetään hyväksi fysikaalisia ja kemiallisia ilmiöitä. Ne luodaan teorian pohjalta ja ne antavat hyvän fysikaalisen kuvan prosessista. Näissä niin kutsutuissa ”white-box” malleissa ei käytetä prosessista saatavaa mittausdataa ollenkaan. Kyseisiä malleja voidaan käyttää laajasti esimerkiksi laitoksen suunnittelussa, mutta niiden luominen on usein vaativaa. (Hangos ja Cameron 2001, s.11)

Empiiriset mallit tai myös nimellä ”black-box” kulkevat mallit ovat kokeelliseen dataan perustuvia malleja. Ne eivät anna yhtä laajaa kuvaa prosessista kuin teoreettiset mallit, mutta niiden luominen on huomattavasti helpompaa. Empiiriset mallit eivät yleensä hyödynnä ilmiöiden peruseriaatteita. Niitä käytetäänkin laajasti tilanteissa, missä prosessin ilmiöitä ei tunneta tai ymmärretä riittävän hyvin. Pienille prosesseille kyseinen metodi voi olla helppo ja edullinen ratkaisu, kun taas suurille prosesseille kyseinen mallinnusperiaate voi osoittautua niin kalliiksi, ettei sitä ole järkevää käyttää. (Hangos ja Cameron 2001, s.11)

Yleisimmin käytetty mallinnus on kuitenkin teoreettisen ja empiirisen mallinnuksen sekoitus ”grey-box” mallinnus. Siinä malli luodaan hyödyntäen tietämystä fysikaalisista ilmiöistä ja kerättyä prosessidataa. Grey-box mallilla voidaan myös ekstrapoloida, toisin kuin black-box mallilla. (Hangos ja Cameron 2001, s.11)

## 4.2 Mallinnettava systeemi ja sen tavoitteet

Prosessisysteemi koostuu tuloista, lähdöistä ja niiden välissä olevasta systeemistä. Systeemi kuvaa yleisesti tarkasteltavaa kohdetta, johon vaikuttaa siihen syötettävä tulosuure. Systeemin käyttäytymistä kuvaa siitä lähtevä lähtösuure. Tulosuure on muuttuja, jota voidaan tarvittaessa muuttaa, jotta lähtösuure saadaan pidettyä halutussa arvossa. Lähtömuuttuja on täten kontrolloitu muuttuja. Tulosuureiden lisäksi systeemiin kohdistuu myös häiriöitä, jotka ovat ympäristön aiheuttamia ja ne ovat pääasiassa kontrolloimattomia. Systeemin toiminnan kannalta on tärkeää, että muuttujista saadaan jatkuvasti oikeaa tietoa, joten myös niitä mittaavien laitteiden on oltava kunnossa. Systeemi voi olla joko dynaaminen tai staattinen. Dynaamisessa systeemissä on mukana aikariippuvuus ainakin jonkin suureen osalta.

Prosessisysteemi pitää sisällään fysikaaliset ja kemikaaliset prosessit. Mallinnettava prosessisysteemi määritetään asettamalla sille tulot, lähdöt ja rajat. Prosessisysteemi yleensä täsmennetään vuokaavion avulla, joka määrittää rajat yhdessä tulojen ja lähtöjen kanssa. Mallia muodostettaessa voidaan hyödyntää fysikaalisia aineen -ja energian säilymlakeja. Yhtälöt muodostetaan jonkin tasapainoehdon avulla. (Hangos ja Cameron 2001, s.21)

Mallintamiselle asetetaan tavoitteet, joita sillä halutaan saavuttaa. Tämä määrittää pitkälti mallin monimutkaisuuden ja tarkkuuden, kuinka hyvin se vastaa oikeaa prosessia. Mallin tarkoituksen on kuvata kohdejärjestelmää mahdollisimman hyvin, mutta monesti tarkka kuvaus voi olla erittäin haastavaa. Mallissa joudutaan usein käyttämään joitain oletuksia, jotka vaikuttavat mallin paikkansapitävyyteen. Prosessin säädössä sille pyritään löytämään tuloarvo, joka tuottaa prosessiin halutun vasteen ja lähtöarvon. (Hangos ja Cameron 2001, s.22)

### 4.3 Mallien käyttö

Mallia muodostettaessa on tärkeää, ettei mallista tehdä liian monimutkaista. Kaikkia todellisuuden pieniä yksityiskohtia ei malliin voida koskaan sisällyttää, joten tasapaino tarkkuuden ja monimutkaisuuden välillä on tärkeää, kuin myös siihen tarvittavien resurssien käyttö. Mallille määritellään sen tavoitteet ja käyttötarkoitus. Riippuen käyttötarkoituksesta mallia pyritään yksinkertaistamaan tietyillä oletuksilla ja sitä kautta saavuttamaan parempi laskentatehokkuus. Liian yksinkertainen malli taas johtaa helposti arvaamattomiin vahinkoihin, jos joitain tärkeitä seikkoja prosessista on jätetty huomioimatta.

Mallien käytöllä on systeemiä tutkittaessa useita etuja verrattuna todelliseen tilanteeseen. Mallia voi käyttää saamaan tietoa prosessin käyttäytymisestä häiritsemättä todellista prosessia ja käyttämättä siihen aikaa, rahaa ja materiaaleja. Prosessista saadaan mallin avulla tietoa jo ennen laitoksen rakennusta. Operaattori voi saada tietoa prosessista ja mahdollisista vaara- ja häiriötilanteista ilman oikean prosessin operointia, joka voi auttaa säästymään vahingoilta ja materiaalimenetyksiltä. Säätojärjestelmän implementointi edellyttää tietoa prosessin toiminnasta, jotta se voidaan kalibroida ja testata ennen käyttöönottoa. Tämä vaihe voidaan toteuttaa liittämällä säätojärjestelmä luotuun malliin ja tutkia, että toimiiko se suunnitellusti. (Russano ja Avelino 2019. s.39)

Kokonaismassatase koostuu systeemiin tulevasta massasta, siitä poistuvasta massasta ja sinne jäävästä massasta. Kokonaismassatase on yksinkertaisesti:

$$\text{massavirtaus sisään} - \text{massavirtaus ulos} = \text{kertymä systeemiin.} \quad (1)$$

Kaavamuodossa kokonaismassatase voidaan kirjoittaa:

$$\frac{d[\rho * V(t)]}{dt} = \rho_{in} * F_{in}(t) - \rho_{out} * F_{out}(t) \quad (2)$$

Yllä  $\rho$  on tiheys,  $V$  on tilavuusvirtaus ja  $t$  on aika. Alaindeksit *in* ja *out* viittaavat tulo- ja lähtövirtauksiin. Yleensä tiheys pysyy samana ( $\rho = \rho_{in} = \rho_{out}$ ), joten malliksi saadaan

$$\frac{dV(t)}{dt} = F_{in}(t) - F_{out}(t). \quad (3)$$

Kokonaismassataseita voidaan kirjoittaa vain yksi systeemiä kohden. (Luyben 1996, s.17–18)

Komponenttitaseessa jotain komponenttia voi muodostua tai hävitä systeemissä reaktion seurauksena. Komponenteille tase määritellään seuraavasti:

$$\begin{aligned} & \textit{komponentin määrä systeemiin} - \textit{komponentin määrä systeemistä} + & (4) \\ & \textit{komponentin muodostuminen reaktiossa} = \\ & \textit{komponentin määrän muutos systeemissä.} \end{aligned}$$

Jokaiselle systeemin komponentille voidaan kirjoittaa komponenttitase erikseen. (Luyben 1996, s.20)

Energiatase kuvaa systeemin energiavirtoja. Se koskee konvektiolla tai diffuusiolla tapahtuvia sisäisen- ja kineettisen energian virtauksia, sekä potentiaalienergian virtauksia. Energiatase voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\begin{aligned} & \textit{systeemiin tuleva energia} - \textit{systeemistä lähtevä energia} + & (5) \\ & \textit{lämpöenergian lisäys systeemiin} - \textit{systeemin tekemä työ} = \\ & \textit{energiamäärän muutos aikayksikössä.} \end{aligned}$$

(Luyben 1996, s.23)

#### 4.4 Simuloinnin hyödyntäminen

Usein prosessiin suunniteltuja muutoksia ei pysty eikä ole edes järkevää testata käytännössä, joten sen sijasta turvaudutaan tietokonesimulaatioihin. Vaikka simulointi ei koskaan vastaa todellista prosessia, sen avulla pystytään testaamaan ja tutkimaan prosessista monia asioita. Simuloinnissa voidaan muodostaa samanlaiset olosuhteet usealle eri simulaatiolle ja niitä voidaan vertailla keskenään tasapuolisesti. Simuloinneilla saadaan oleellista tietoa prosessin käyttäytymisestä ja prosessimuuttujien lukuarvoista, mitä voidaan hyödyntää tehdasteisteissä.

Simulointi toimii yhdistävän tekijänä prosessin tutkimukselle suunnittelulle ja operoinnille. Tutkimusvaiheessa simuloinnilla voidaan minimoida kokeelliset testikerrat. Simuloinnilla voidaan testata systeemin käyttäytymistä ja joissain

tapauksissa niitä voidaan hyödyntää tehdasteissä sellaisenaan. Suunnittelussa simulointia hyödynnetään minimoimaan energian tarve, ehkäisemään hukkamateriaalit ja mitoittamaan laitteet. Lisäksi taataan turvallisempi toimintaympäristö ottamalla hallittavuus huomioon jo heti alkuvaiheessa. Operoinnissa simulaatiolla voidaan selvittää laitteiston suorituskykyä ja tehdä tarvittaessa korjaustoimenpiteitä.

## 5 SÄÄTÖJÄRJESTELMÄT

Säätöjärjestelmä koostuu säädettävästä systeemistä, tulosta ja lähdöstä. Säätöjärjestelmäksi kutsutaan systeemiä, kun lähtösignaalia ohjataan muuttamalla tulosignaalia. Tavoitteena on ylläpitää haluttu tulos tai arvo. Systeemi on yhdistelmä raja-arvoja sisältäviä komponentteja, jotka tuottavat lähtöarvon siihen syötettävien tuloarvojen perusteella.

Systeemien kuvaamiseen käytetään usein lohkokaavioesitystä, jossa systeemin eri komponentteja kuvataan eri lohkoilla ja niiden välisiä riippuvuuksia niiden välille asetetuilla nuolilla. Lohkokaavio usein sisältää myös erilaisia summauslohkoja, sekä jakaantumispisteitä, joista kyseinen arvo menee useammalle lohkolle. Vaikka systeemi voidaankin kuvata vain yhdellä lohkoilla, niin paremman kuvauksen aikaansaamiseksi on hyvä käyttää useampaa lohkoa systeemin kuvaukseen. Tällaisia lohkoja voivat olla esimerkiksi prosessi, säädin, häiriöt ja muut systeemiin vaikuttavat arvot.

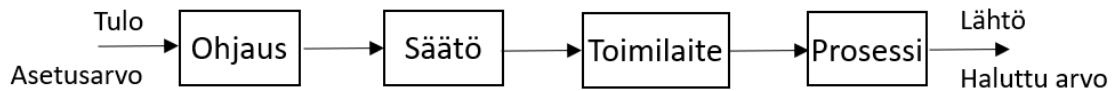
### 5.1 Avoin ja suljettu säätöpiiri

Säätöjärjestelmiä on sekä avoimia että suljettuja. Avoimessa systeemissä lähtöarvolla ei ole mitään vaikutusta tuloarvoon. Lähtöarvo siis riippuu tuloarvon asetusarvosta. Jokin toimilaitte siten tekee tarvittavan säädön prosessiin, jonka jälkeen prosessi antaa uuden lähtöarvon. Avoimet systeemit ovat suhteellisen yksinkertaisia ja edullisia ratkaisuja, joskin epätarkkuus voi muodostua ongelmaksi korjaustoimien puutteen takia. Kuvassa 4 on esitetty avoin säätöpiiri.

Suljetussa systeemissä, eli takaisinkytketyssä systeemissä säädettävän suureen lähtöarvo mitataan, syötetään takaisin ja verrataan tuloarvoon. Vertailu tuottaa erosuureen, josta säädin määrittää toimilaitteen toimenpiteen. Toimilaitteet vaikuttavat suoraan systeemin toimintaan ja näitä ovat esimerkiksi venttiilit, pumput ja turbiinit. Suljetut systeemit ovat tavallisesti avoimia monimutkaisempia ja kalliimpia, mutta ne tarjoavat tarkemman säädön. (Bolton 2002 s.5) Kuvassa 5 on esitetty suljettu säätöpiiri.

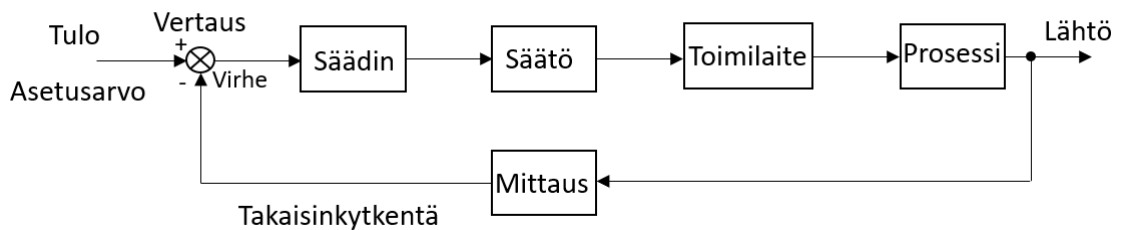


### Avoim säätöpiiri



Kuva 4. Avoim säätöpiiri.

### Suljettu säätöpiiri



Kuva 5. Suljettu eli takaisinkytketty säätöpiiri.

## 5.2 Säädin

Prosessissa säädinten tehtävänä on säädellä prosessin tulosuuretta perustuen mitattuun arvoon ja asetusrvoon. Säätimen tulosuureena on mitatun arvon ja asetusrvon välinen eroisuus, jonka perusteella säädin tekee tarvittavat toimenpiteet prosessin tulosuureeseen. Eroisuus saadaan kaavalla:

$$e(t) = y_{aa}(t) - y_m(t), \quad (6)$$

jossa  $e(t)$  on erosignaali,  $y_{aa}(t)$  on määritetty asetusrvo ja  $y_m(t)$  on mitattu arvo. (Russano ja Avelino 2019, s.114)

PID-säädin on teollisuudessa yleisimmin käytetty säädintyyppi. Se koostuu kolmesta eri säätöparametrasta, Proportional, Integral ja Derivative. Säätimen P-osa, eli suhdetermi, riippuu nykyhetken virheestä, I-osa, eli integroiva termi, riippuu kertyneistä virheistä ja D-osa; eli derivoiva termi, ennustaa tulevia virheitä perustuen edellisiin virhelukemiin. Säädin summaa nämä termit, josta muodostuu säätimen ohjaus prosessille. Säätimen tavoitteena on saada eroisuus nolaksi.

PID-säädintä voidaan myös käyttää P-säätimenä, PI-säätimenä tai PD-säätimenä, jolloin vain kyseiset termit ovat käytössä. PID-säätimen tarvittavat termit riippuvat aina tilanteesta.

P-termin suuruus riippuu suoraan erosignaalin arvosta ja voidaan esittää muodossa:

$$p(t) = K_p e(t), \quad (7)$$

jossa  $K_p$  on vahvistuksen arvo.

Vahvistusta voidaan muuttaa ja se samalla määrittää säädön herkkyyden suhteessa erosuureen arvoon. Vahvistus voi olla joko positiivinen tai negatiivinen. Vahvistuksen ollessa negatiivinen; erosuureen kasvaessa säätimen lähtö pienenee ja erosuureen pienentyessä säätimen lähdön arvo kasvaa. P-säädössä on tavallista, että säädin ei pysty eliminoimaan erosuuretta kokonaan, jolloin päädytään pysyvän tilan poikkeamaan. Pysyvän tilan virhe on mahdollista poistaa resetoimalla säädin, jolloin määritetään operaattorin toimesta uusi asetusarvo. Integroivan termin lisäyksellä pysyvän tilan poikkeama eliminoituu automaattisesti, jonka vuoksi se on yleisemmin käytetty vaihtoehto. P-säädölle on kuitenkin käyttökohteita varsinkin, jos säädön ei tarvitse olla erityisen tarkka. (Russano ja Avelino 2019, s.115)

Integroiva termi pitää nimensä mukaisesti sisällään integraalin erosuureesta ajan suhteen ja voidaan esittää muodossa:

$$p(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (8)$$

jossa  $K_i$  on integrointivahvistus ja  $\tau$  on integrointiaika tai nollausaika.

I-termin lisäyksellä päästään eroon pysyvän virheen tilasta, joka muodostuu lähes poikkeuksetta käytettäessä pelkkää P-säätöä. Yksistään integroivan termin käyttö on hyvin harvinaista ja se liitetäänkin P-termin lähes poikkeuksetta, sillä muuten erosuuren poisto voi kestää hyvin kauan. PI-säädön heikkoutena on sen tapa tuottaa värähtelevää signaalia, joka heikentää säädön stabiilisuutta. Värähtelyä voidaan yrittää poistaa virityksellä, mutta mikäli värähtely on voimakasta, värähtelyä poistava derivoiva termi voidaan lisätä. (Russano ja Avelino 2019, s.116)

Derivoiva termi pyrkii ennustamaan virhettä ja korjaamaan sitä jo sen muodostuessa ottamalla huomioon edellisten erosuureiden muutokset seuraavasti:

$$p(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (9)$$

jossa  $K_d$  on derivointivahvistus.

Derivoivaa termiä ei koskaan käytetä yksin, sillä säätimen lähtö pysyy samana, mikäli erosuure ei muutu. Derivoivan termin haittapuolena on sen epästabiloiva vaikutus systeemiin, jos systeemissä esiintyy jatkuvaa kohinaa ja siksi D-termiä käytettäessä signaalia yleensä suodatetaan. (Russano ja Avelino 2019, s.117)

PID-muodossa termit yhdistetään ja säätimen yhtälöksi saadaan:

$$p(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (10)$$

### 5.3 Säätimen viritys

Säädin täytyy virittää, jotta se saadaan toimimaan halutulla tavalla. Hyvin viritetty säädin asettuu nopeasti eikä se jää värähtelemään. Säätimen virityksessä P-, I- ja D-termien arvoja muutetaan, jotta saadaan haluttu vaste aikaiseksi. Säätimen toiminnalle on erilaisia vaatimuksia, joista säädön stabiilisuus on kaikista tärkein. Jokainen säätökohde poikkeaa toisistaan, joten myös säätimen haluttu toiminta voi poiketa tapauskohtaisesti paljonkin. Yleisesti hyvin viritetty säädin on nopea ja stabiili. Parametrien määrittämiseen yleisimmin käytetyt empiiriset menetelmät ovat Ziegler-Nicholsin suljetun piirin taajuusvastemenetelmä ja avoimen piirin askelvastemenetelmä. (Bolton 2002, s.148)

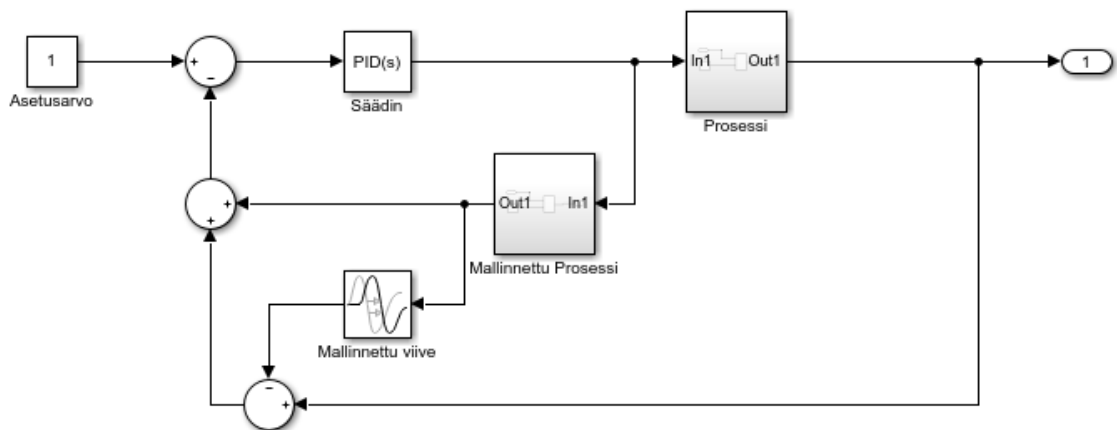
### 5.4 Viiveet ja säädinmallit

Viiveet prosessissa aiheuttavat haasteita säädön toiminnallisuuteen. Viive tarkoittaa, että säädin joutuu tekemään säätötoimenpiteen perustuen vanhaan informaatioon. Tässä työssä tarkasteltavassa prosessissa viiveeksi arvioitiin noin kaksi sekuntia. Viivettä esiintyy matkaviiveenä ja toimilaitteviiveinä. Toimilaitteviivettä voivat aiheuttaa esimerkiksi välitys säätöventtiileissä tai epäpuhtaudet. Viiveen takia prosessille

kehitettiin vaihtoehtoinen säätöratkaisu perustuen Smith-prediktoriin, joka auttaa viiveellisen prosessin säädössä. Se mahdollistaa viiveettömän prosessin virityksen.

## 5.5 Smith-prediktori

Viiveellisessä prosessissa säädin odottaa viiveen verran ennen säätötoimenpidettä. Smith-prediktorissa viive ja prosessin dynamiikka erotetaan toisistaan mallinnuksen avulla. Normaaliin takaisinkytkentään lisätään viiveetön prosessimalli ja erillinen viivelohko. Smith-prediktorista saadaan kaksi lähtöä. Toinen on prosessin mallinnettu lähtö ja toinen on prosessin viiveellinen lähtö. Lopputuloksena mallinnettu prosessin lähtö vähennetään varsinaisen prosessimuuttujan arvosta, jolloin saadaan arvio prosessin ja mallin välisestä poikkeamasta. Summatessa tämä poikkeama ja viiveettömän prosessin arvo, takaisinkytkennälle saadaan arvo, joka pitää sisällään häiriöt, mutta ei prosessiviivettä. Kuvassa 6 on esitetty havainnollistava kuva Smith-prediktorin rakenteesta. (Hang 2009, s.109-112)



Kuva 6. Smith-prediktori. Piirretty mukailen lähteestä (MathWorks 2020).

## 6 KOKEELLINEN OSA

Työn kohteena olleen säädön parantamisen tarkoituksena oli minimoida välialtaan painovaihtelut ja vähentää samalla liukusulkimen liikekertoja. Välialtaan painovaihtelun minimoimisen tavoitteena tehtaalla on pystyä käyttämään väliallasta suuremmilla painotavoitteilla ja sitä myötä saavuttaa myös parempi sulkeumapuhtaus välialtaassa. Liukusulkimen liikekertoja pyrittiin vähentämään ilman suurempaa kasvua välialtaan painovaihteluihin ja samalla liikekertojen vähentämisellä pyrittiin liukusulkimen käyttöiän pidentämiseen.

Kokeellinen osa sisälsi tehdasdatan analysointia, jonka pohjalta esitettiin erilaisia prosessin toimivuuteen vaikuttavia tekijöitä. Työssä kehitettiin vaihtoehtoinen säätöratkaisu, jota testattiin useammalla eri simulaatiomallilla. Näihin perustuen tehtiin prosessin parannusehdotukset.

### 6.1 AMEPA ja Vortex

Työn alussa tutkittiin mahdollisia senkan vortex-tapauksia, joissa senkan tyhjennyksen loppuvaiheessa muodostuu pyörreilmiö, jonka vuoksi sulan pinnalla olevaa kuonaa pääsee välialtaaseen enemmän kuin normaalisti. Tarkoituksena oli kerätä liukusulkimen dataa vortex-ilmiön esiintyessä ja selvittää, että voisiko liukusulkimen liikkeillä olla vaikutusta ilmiön syntymiseen. Vortex-tapauksia etsittiin datasta, mutta ne osoittautuivat hyvin harvinaisiksi tai datan perusteella ei pystytty aina sanomaan, että oliko tällaisesta ilmiöstä kyse. Näin ollen todettiin, että kyseinen ilmiö on niin harvinainen, ettei sen tutkimusta sisällytetty tähän työhön.

### 6.2 Käytössä oleva mittaustieto

Prosessista oli käytössä dataa vuorokauden ajalta, joka piti sisällään 18 senkan tyhjennystä. Datasta kävi ilmi senkan paino, valunopeus, välialtaan paino, välialtaan lämpötila, sekä liukusulkimen asento ja sen liikekerrat. Käytössä olevan data oli sekuntidataa, jota täydennettiin lineaariapproksimaatiolla puuttuvien datapisteiden osalta. Myös puuttuvat aikaleimat eri datasarjojen osalta täydennettiin, jotta eri datasarjojen aikaleimat saatiin täsmäämään toistensa kanssa. Datasta poimittiin 18 tapauksesta datan perusteella parhaat tapaukset. Vertailemalla dataa eri

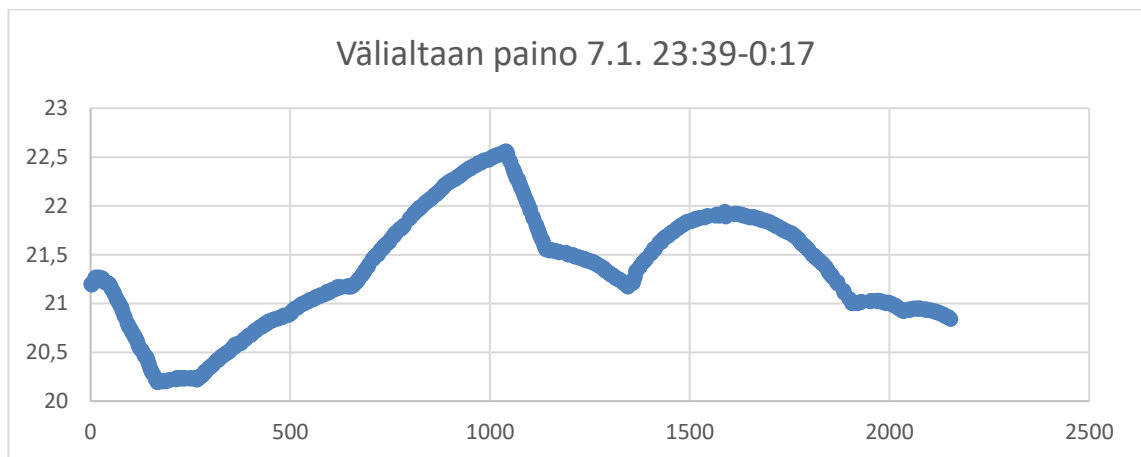
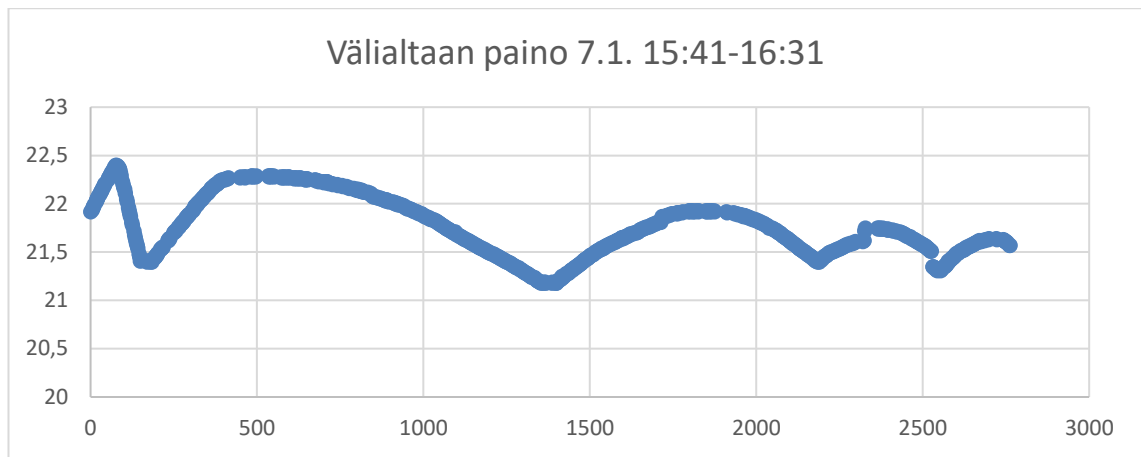
senkantlyhjennyksien osalta pystyttiin minimoimaan satunnaisvirheet eri tyhjennyksien osalta. Datassa oli lisäksi havaittavissa selkeitä virheellisiä arvoja, jotka jätettiin huomioimatta.

Varsinaista virtausmittausta ei tehtaalla ole käytössä senkan ja välialtaan osalta, joten nämä arvot määritettiin saatavilla olleiden data-arvojen perusteella. Massavirtaus senkasta välialtaaseen saatiin laskemalla senkan painonmuutos sen tyhjennyksen aikana. Massavirtaus välialtaasta pois saatiin kokillin mittojen, valunopeuden ja teräksen tiheyden avulla. Valunopeus ja kokillin koko oletettiin oikeiksi, joiden perusteella sulan teräksen tiheyden arvo saatiin määritettyä senkan painonmuutoksen ja välialtaan painonmuutoksen avulla. Teräksen tiheys on verrannollinen sen lämpötilaan, joten sen todellista tiheyden arvoa ei ollut saatavilla.

Liukusulkimen avauman pinta-alan arvo saatiin laskettua liukusulkimen levyn reiän mittojen ja levyn asennon perusteella.

### **6.2.1 Mittausdatan analysointi**

Käytössä olevasta mittausdatasta selvitettiin aluksi prosessin käyttäytymistä ja selvitettiin alkutilanne välialtaan painovaihtelujen ja liukusulkimen liikkeiden osalta. Datasta eriteltiin jokainen senkan tyhjennyksen jakso niin, että voitiin tehdä vertailua eri tyhjennyskertojen osalta. Senkkojen vaihtojen ajalta olevaa dataa ei koettu oleelliseksi tämän työn osalta. Välialtaan painodatasta selvitettiin, kuinka paljon sen paino vaihteli sen asetusarvoon nähden. Datasta (kuva 7 a ja b) kävi ilmi, että painovaihtelut eri tyhjennysten osalta vaihteli suuresti, joka viittasi jonkinlaiseen ongelmaan nykyisessä järjestelmässä. Tiedossa ei ollut välialtaan painon asetusarvoa, mutta datasta käytettiin painovaihtelujen tutkintaan sen saamia minimi- ja maksimiarvoja ja niiden erotusta jokaista tyhjennystä kohden.



Kuva 7 a ja 7 b. Esimerkki välialtaan painovaihtelujen erosta.

Suurin vaihtelu minimi- ja maksimiarvojen välillä oli 2,37 tonnia ja pienin 1,22 tonnia, eli eroa syntyi lähes tuplasti näiden välillä. 18 senkan tyhjennyksen keskiarvoksi saatiin 1,74 tonnia. Työn tarkoituksena oli saavuttaa edellä esitettyjä arvoja pienempi painovaihtelu.

Liukusulkimen liikkumisen osalta käytettiin myös dataa jokaisen senkan tyhjennyksen ajalta. Myös tästä datasta kävi ilmi, että tyhjennysten väliset erot olivat suuria, eikä varsinaista yhteyttä kyetty löytämään liukusulkimen liikekertojen ja välialtaan painovaihtelujen suuruuden välille. Liukusulkimen liikekerrat senkan tyhjennysten ajalta vaihtelivat 42 kerrasta 153 kertaan, joka tarkoittaa lähes nelinkertaista määrää pienimpään arvoon nähden. Liikemäärien keskiarvoksi saatiin 89 liikekerta. Työssä pyrittiin selvittämään syitä liukusulkimen suurille liikekerroille ja tarjoamaan ratkaisuja niiden vähentämiseksi.

Datasta tutkittiin myös valunopeuden mahdollista vaikutusta edellä oleviin arvoihin, sillä välialtaan lähtövirtaus määräytyy valunopeuden mukaan. Lähes jokaisessa tapauksessa valunopeus pysyi hyvin tasaisena ja muutokset nopeudessa olivat pääsääntöisesti askelmaisia muutoksia, jotka tapahtuivat kerran tai kahdesti tyhjennysjakson aikana. Monessa tapauksessa valunopeus pysyi samana koko tyhjennyksen ajan. Vertaillen dataa valunopeuden, välialtaan ja liukusulkimen välillä, ei pystytty löytämään yhteyttä näiden välille. Vaikka valunopeus pysyi samana, niin liukusuljin saattoi silti tehdä voimakasta liikettä sekä välialtaan painossa saattoi esiintyä keskiarvoa suurempia painovaihteluja.

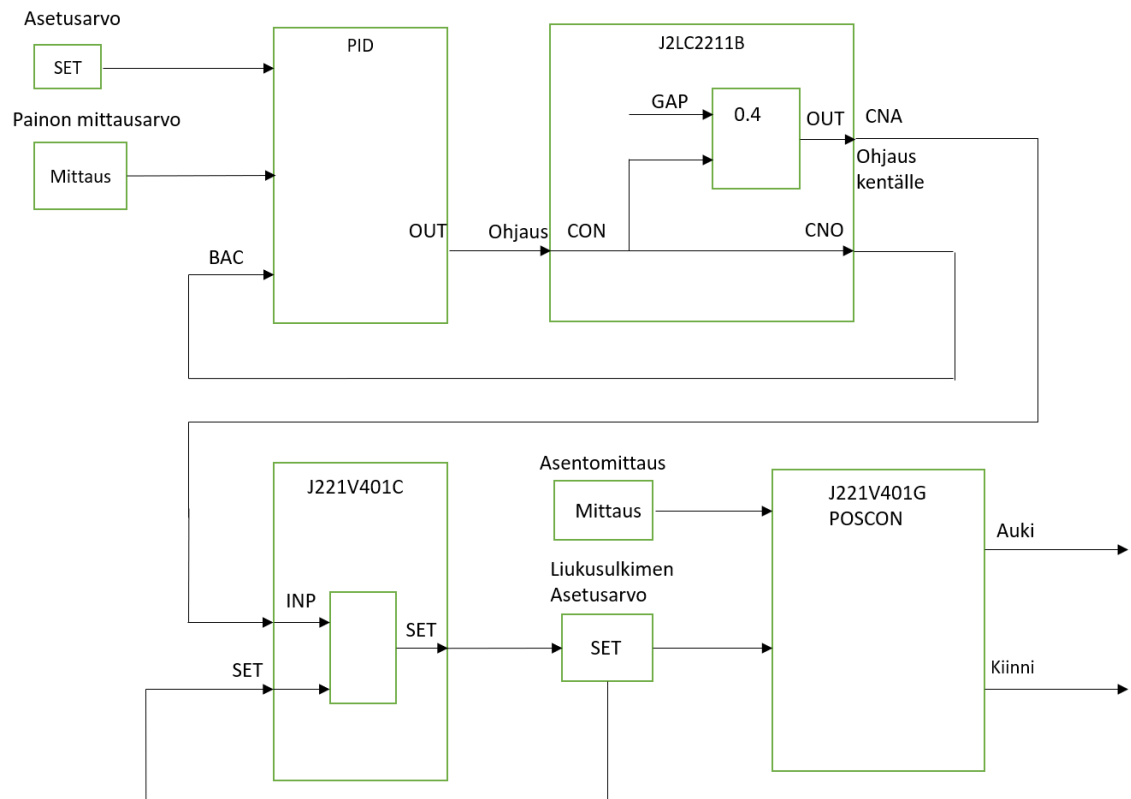
### **6.3 Olemassa oleva välialtaan painoa ohjaava järjestelmä**

Olemassa olevaa systeemiä haluttiin lähteä parantamaan, sillä nykyisellään välialtaan painossa esiintyi paljon vaihteluja, eikä niiden perimmäistä syytä täysin tiedetty. Samalla myös virtausta rajoittava liukusuljin teki huomattavan paljon liikkeitä, joka ei ollut optimaalista levyjen kulumisen kannalta.

Nykyisessä automaatiiosysteemissä välialtaan painoa ohjaa PID-säädin ja prosessin viiveeksi arvioitiin kaksi sekuntia. Välialtaalle määritetään ensin painotavoite, jonka arvon säädin pyrkii pitämään mahdollisimman tarkasti. Säädin saa välialtaan painon mittausravon, vertaa sitä asetettuun painotavoitteeseen ja antaa ohjauskäskyn eteenpäin. Välialtaan PID-säätimen ohjausarvo määrittää liukusulkimen asetusarvon, mutta vain kun sen arvo muuttuu yli 0,4 % edelliseen arvoon verrattuna. Liukusulkimen uusi asetusarvo syötetään liukusulkimen ohjaukseen käytettävälle Poscon-lohkolle, joka pääättelee tarvittavan ohjaussuunnan ja -ajan. Poscon-lohko tarvittaessa ohjaa liukusuljinta auki tai kiinni. Tarvittava ohjaus ja sen suunta määräytyy asetusarvon ja mittausarvon erotuksesta, jota verrataan asetettuun GAP-arvoon. Liukusulkimen asennon korjaus tehdään vain, kun erotuksen arvo on asetettua GAP-arvoa suurempi. Ero suure lasketaan säätövälikillä CCY, joka on ennalta asetettu arvo sekunteina. Ohjaus toteutetaan tietyn ajan pituisilla auki ja kiinni käskyillä. Poscon ei hyödynnä liukusulkimen asentomittausta takaisinkytkentänä asennonkorjauksessa, eikä varmistaakseen että liukusuljin on liikkunut haluttuun asetusarvoon. Järjestelmän eräänä kysymysmerkkinä on Posconin tietämättömyys siitä, onko liukusuljin liikkunut asetusarvoon vai ei. Käytännössä liukusulkimen levy ei välttämättä toteuta halutusti



kaikkia asennonkorjauksia siihen kohdistuvan kovan paineen takia. Kuvassa 8 on esitetty olemassa olevan systeemin toimintaperiaate.



Kuva 8. Nykyinen välialtaan painoa ohjaavan automaatiojärjestelmän toimintakaavio.

## 6.4 Välialtan mallinnus

Välialtan mallinnuksen perustana oli sen kokonaismassatase. Sen osalta tutkittiin senkasta välialtaaseen ja välialtaasta jatkuvavaluun virtaavan teräksen massaa, jossa tulovirtauksen suuruus riippuu liikusulkimen asennosta ja senkan painosta ja lähtövirtauksen suuruutena käytettiin valunopeudesta saatua arvoa.

$$\frac{dm(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \quad (11)$$

jossa  $m$  on senkan massa,  $Q$  on massavirtaus ja

$$m(t) = \rho_{teräs} * V(t) \text{ ja} \quad (12)$$

$$Q(t) = \rho_{teräs} * F(t) \quad (13)$$

## 6.5 Simulointi

Matlab<sup>®</sup>:ia ja Simulink<sup>®</sup>:ia hyödynnettiin kuvaamaan systeemin toimintaa. Simulinkissa tarkasteltava prosessi rakennettiin lohkokaaavio muotoon, joka on yksinkertainen esitys prosessin toiminnasta ja siinä olevien eri komponenttien välisistä yhteyksistä. Simulink:iin tehdyllä mallilla pystyttiin havainnollistamaan välialtaan massavirtaukset ja vertaamaan niitä välialtaan painonmuutoksiin. Simulointiympäristö ei vastaa todellista tehdasympäristöä, joten sen antamat tulokset eivät suoraan takaa toimivuutta aidossa tilanteessa. Simulink antaa hyvän mahdollisuuden testata eri vaihtoehtoja, josta voidaan tehdä jonkinasteisia johtopäätöksiä niiden mahdollisesta toimivuudesta tehdasympäristössä. Sen jälkeen Simulinkissa voitiin simuloida säätimen toimintaa massavirtauksia apuna käyttäen. Säätimen virityksen apuna käytettiin Simulinkin AutoTune-ominaisuutta, jossa ohjelma määrittää P-, I- ja D-arvot automaattisesti.

## 6.6 Virheet ja niiden käsittely

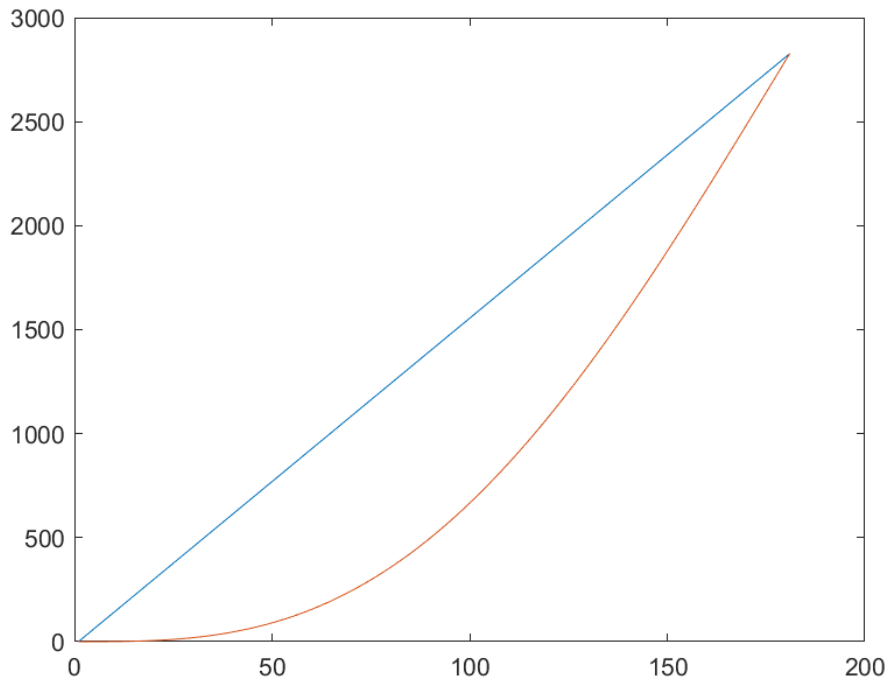
Mittausvirhettä sisältyy kaikkiin mittauksiin, mutta sen merkityksellisyys riippuu virheen suuruudesta. Kumuloituessaan myös pienet virheet voivat yhdessä aiheuttaa merkittävän virheen. Mahdollisia virhelähteitä löytyi työn edetessä joitain, jotka osaltaan vaikuttavat lopputuloksen tarkkuuteen.

### 6.6.1 Sulan teräksen tiheys

Sulalle teräkselle määritetty laskennallinen tiheys riippui senkan ja välialtaan painomittauksen oikeellisuudesta. Tiheyden arvoja määritettäessä senkkahaarukka A:lle ja B:lle saatiin toisistaan poikkeavia arvoja. Toiselle haarukalle laskennallisten tiheyksien keskiarvoksi saatiin  $7,35 \text{ t/m}^3$  ja toiselle  $6,71 \text{ t/m}^3$ . Välialtaan painomittaus oletettiin oikeaksi ja jommankumman senkkahaarukan mittaus virheelliseksi. Todellinen sulan teräksen tiheys on tuntematon ja sen arvo riippuu teräksen lämpötilasta.

Liikusulkimen asentodatasta näkyi, että se liikkuu pahimmillaan noin 2 % verran, silloin kun sen täytyisi pysyä paikallaan. Lisäksi liikusulkimen ohjausarvoon nähden data näytti liikusulkimelle systemaattisesti noin 1 % verran pienempää aukeamaa, joka voisi selittyä kalibroitierolla. Liikusulkimen avaumalle käytössä ollut ominaiskäyrä oli

kuvassa 9 näkyvä sininen suora, kun todellisuudessa sen ominaiskäyrä noudattaa kuvassa 9 näkyvää oranssia käyrää. Tästä aiheutuva virhe on noin 30–55 % riippuen liukusulkimen asennosta.



Kuva 9. Liukusulkimen avaumaa kuvaavat käyrät. Kuvassa sininen on käytössä oleva ja oranssi on laskettu ja todellisuutta vastaava.

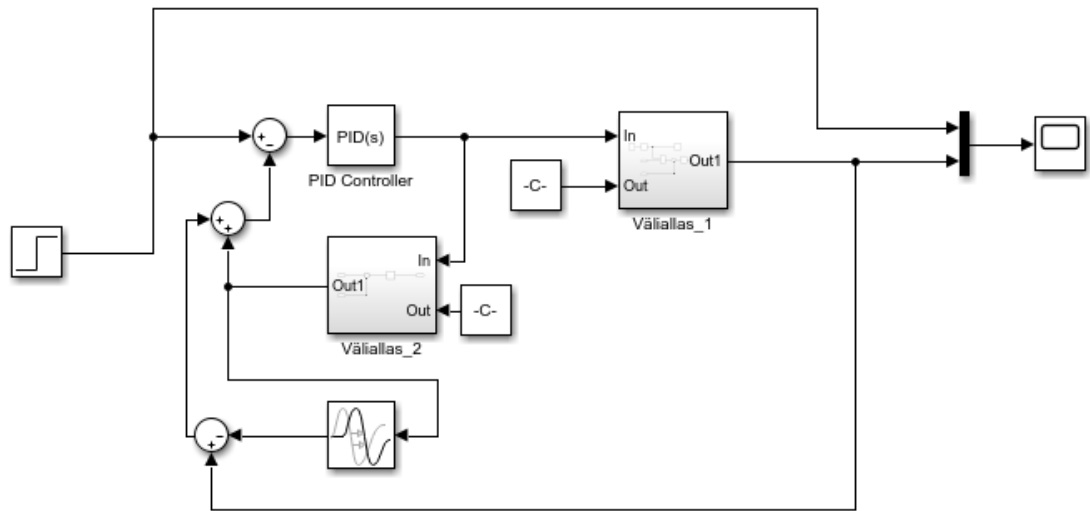
## 6.7 Käytetyt simulointimallit

Työssä hyödynnettiin simulointiympäristöä, sillä testit tehdasympäristössä eivät olleet mahdollisia tässä työssä. Välialtaan painonhallintaa varten tehtiin kaksi eri simulaatiomallia ja vertailumalli käyttäen perinteistä säätöratkaisua. Simulaatiomalleissa hyödynnettiin välialtaan massatasetta, jossa tulovirtaus oli senkasta välialtaaseen tuleva teräksen määrä ja lähtövirtauksena käytettiin jatkuvavalun läpi kulkevaa teräksen määrää. Kaikissa simuloinneissa välialtaan painon asetusarvoon tehtiin sama askelmainen muutos, jotta säätöratkaisun toimivuutta voitiin paremmin arvioida.

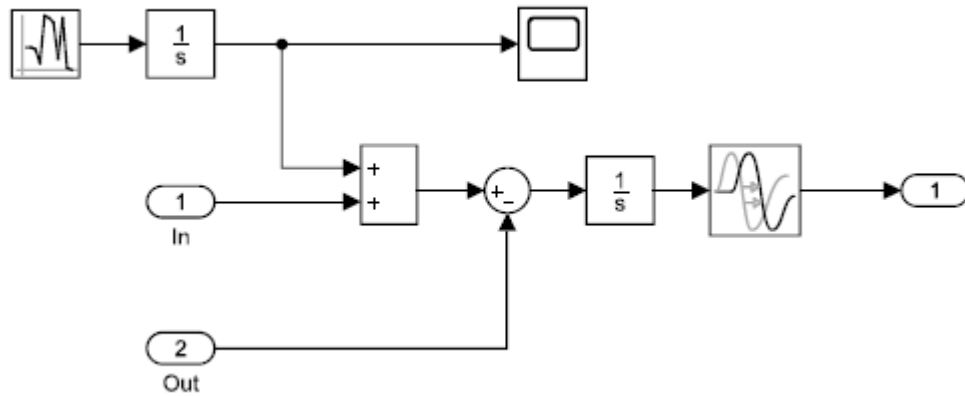
### 6.7.1 Simulointi 1: Smith-prediktorin hyödyntäminen säädössä

Kuvan 10 mukainen simulointimalli rakennettiin hyödyntäen Smith-prediktoria. Smith-prediktori valikoitui käytettäväksi juuri prosessissa esiintyvän viiveen takia ja sen

mahdollistaman viiveettömän prosessin virityksen vuoksi. Mallissa asetusarvosta vähennetään takaisinkytkennästä saatu painon arvo, joka syötetään PID-säätimelle. Säädin määrittää tämän arvon perusteella uuden tulovirtauksen arvon Väliallas\_1-lohkolle. Väliallas\_1-lohkolle määritettiin lähtövirtaudelle vakioarvo 0,044992736 t/s, joka oli datan perusteella prosessissa yleisesti esiintyvä arvo. Tätä arvoa käytettiin myös Väliallas\_2-lohkon lähtövirtauksessa. Väliallas\_1-lohkolta lähtee välialtaan painon arvo takaisinkytkentä PID-säätimelle. Tästä painon arvosta vähennetään ensin prosessin mallilla ennustettu lähtöarvo ja sen jälkeen lisätään viiveettömän ja prosessimallin arvo. Simulaattorissa todellista prosessia kuvaa Väliallas\_1-lohko ja Smith-prediktorissa käytettävää viiveetöntä prosessimallia kuvaa Väliallas\_2-lohko.

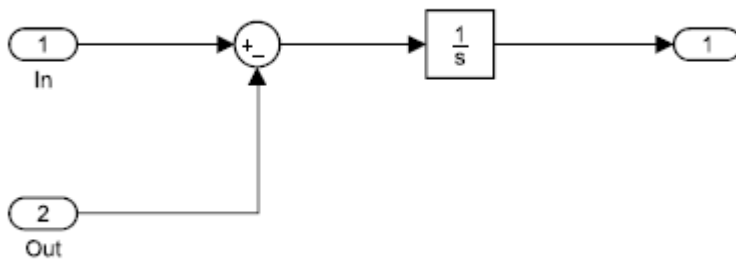


Kuva 10. Smith-prediktorin hyödyntäminen säätöpiirissä.



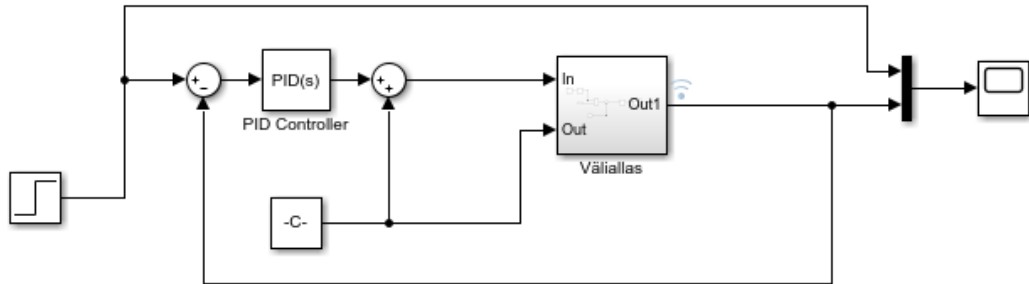
Kuva 11. Väliallas\_1.

Kuvassa 11 on esitetty Väliallas\_1-lohko, joka koostuu tulo- ja lähtövirtauksista, prosessiviiveestä ja lisätystä satunnaisvirheestä. Satunnaisvirhettä lisättiin kuvaamaan todellista prosessia paremmin ja jotta nähtäisiin kuinka säädin reagoi mahdollisiin häiriöihin. Kuvan 12 Väliallas\_2 lohko on hyvin yksinkertainen ja se koostuu vain tulevasta ja lähtevän virtauksen erotuksesta.



Kuva 12. Väliallas\_2.

### 6.7.2 Simulointi 2: Säättöratkaisu ilman Smith-prediktoria



Kuva 13. Säättöpiiri ilman Smith-prediktoria.

Vertailuna Smith-prediktorin sisältävälle mallille luotiin perinteinen säättöratkaisu, joka ei sisällä Smith-prediktoria. Kuvan 13 säättöratkaisussa takaisinkytkennän arvo menee suoraan Väliallas-lohkolta takaisin säätimelle.

### 6.7.3 Simulointi 3: Simulointimalli liikusulkimen liikkeestä

Todellisuudessa välialtaan painon hallinta tapahtuu liikusuljinta liikuttamalla, joten sitä varten kehitettiin kuvan 14 mukainen simulointimalli 3, joka myös samalla kertoo liikusulkimen asennon muutoksista. Kehitetyn mallin pohjana toimii jo aiemmin rakennettu Smith-prediktoria hyödyntävä malli. Tässä käytetyssä mallissa PID-säädin ohjaa välialtaan painoa muuttamalla liikusulkimen avaumaprosenttia virtausmäärän sijasta. Säätimen ulostuloarvot on rajoitettu välille -20 ja 20, johon lisätään vielä vakioarvo 80, joka antaa liikusulkimen toiminta-alueen 60 – 100 %. Säätimen määrittämä liikusulkimen asento muutetaan Matlab-funktiolohkon avulla liikusulkimen avauman pinta-alaksi ja sitä kautta on arvioitu datan perusteella virtausmäärä kyseisellä avauman pinta-alalla. Matlab funktio muuttaa ensin PID-säätimeltä saadun liikusulkimen avaumaprosentin liikusulkimen liikematkaksi kaavalla

$$liike = \left( \frac{u}{100} * 150 \right) - 90, \quad (14)$$

jossa  $u$  on avaumaprosentti, 150 on liikusulkimen kokonaisliikem matka (mm) ja 90 vähennetään, sillä ensimmäisten 90 mm matkalla liikusuljin ei vielä avaudu.



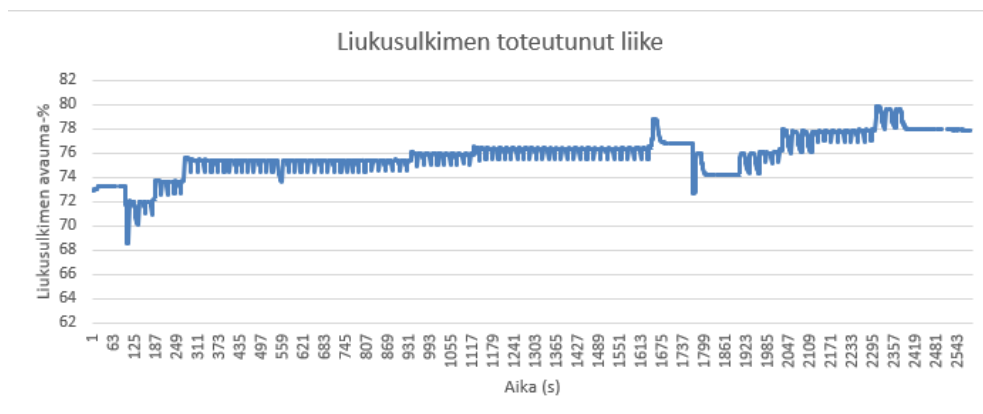
#### **6.7.4 Simulointi 4: Simulointi liukusulkimen liikkeen rajoittamisesta**

Edellä mainittua säädintä muokattiin vielä lisäämällä säätimen jälkeen lohko, jonka tarkoituksena oli pitää liukusulkimen asento edellisessä asennossa, mikäli säätimeltä saatavan uuden arvon muutos edelliseen arvoon oli tarpeeksi pieni. Lohkossa käytettiin muutoksen suuruusarvona tehtaalla käytössä ollutta 0,4 % ja verrokkiarvoa 1,0 %. Eli ensimmäisessä tilanteessa liukusulkimen asento muuttuu vain, kun muutos edelliseen arvoon on suurempi kuin 0,4 % ja toisessa tapauksessa 1,0 %. Suurempaa arvoa kokeiltiin, jotta nähtiin voiko liukusulkimen liikkeiden määrää vähentää tällä tavoin vaikuttamatta liikaa välialtaan painon muutokseen.

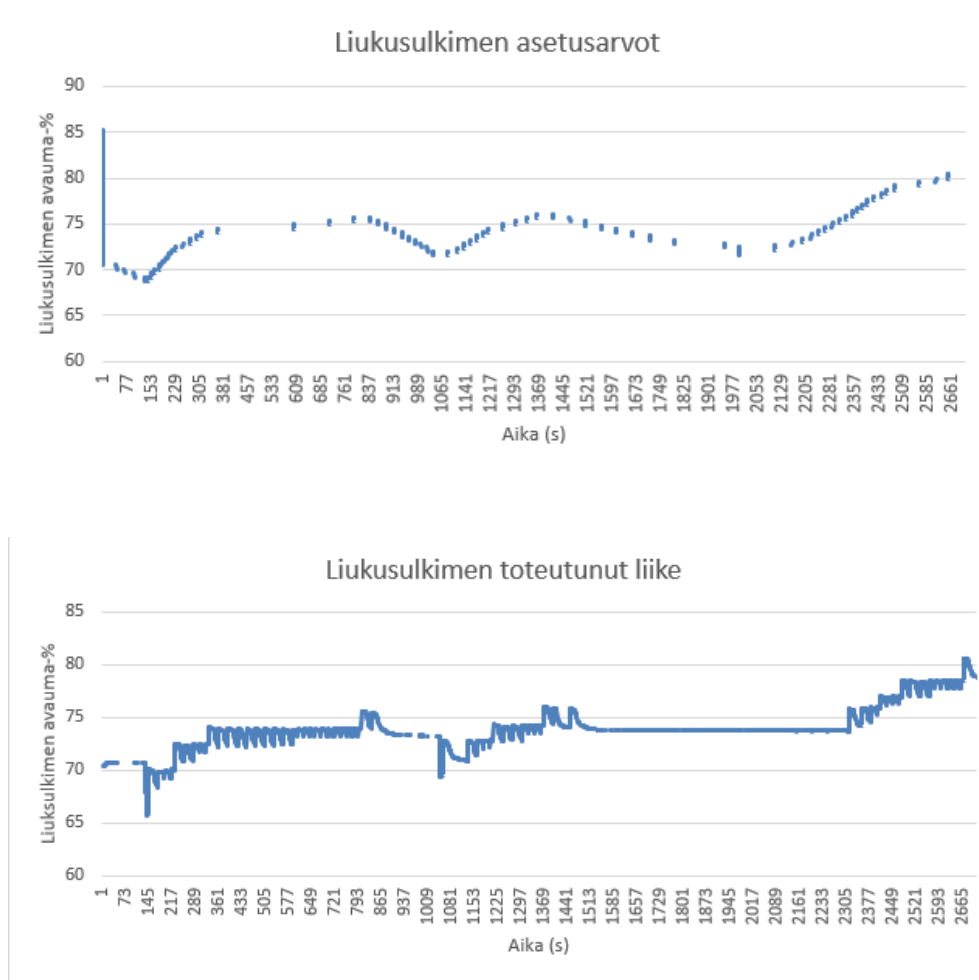
### **6.8 Muut huomiot**

Kuvissa 15 ja 16 on tehtaalta saatua dataa, jossa oli liukusulkimen ohjausarvot ja toteutuneet arvot. Datasta kävi ilmi, että ilman uutta ohjausarvoa liukusuljin saattoi tehdä 1 – 2 % suuruista edestakaista liikettä, samalla kun ohjausarvon muutos on kerralla 0,4 %. Kuvista 15 ja 16 nähdään, kuinka liukusulkimen mitattu liike eroaa selvästi varsinkin kuvan keskivaiheilla ohjausarvoista. Mikäli kyseinen liike on todellista liikettä, eikä mittauskohinaa, niin sen vaikutus 0,4 % nähden on jo huomattava. Datasta havaittiin, että liukusulkimen avautuessa sillä oli tapana tehdä voimakasta auki – kiinni liikettä ja sitä kiinni ajettaessa se saattoi pitää tietyn arvon pitkän aikaa ennen kuin lopulta arvossa tapahtui iso nytkäys. Kuvissa 15 ja 16 esimerkki edestakaisesta liikkeestä (15a ja 16a) ja mittausarvot (15b ja 16b) toteutuneesta liikkeestä, joka ei vastaa ohjausarvoja halutulla tavalla. Liukusulkimen käyttäytymiseen voi olla monia syitä, mutta syynä siihen voisi olla, ettei nykyisessä liukusuljinta liikuttavassa hydraulikkasysteemissä riitä teho tekemään tarvittavia korjauksia johtuen sulan teräksen ja kitkan aiheuttamista vastuksista tai nykyinen lineaarinen liukusulkimen avaumaa kuvaava yhtälö ei vastaa todellista tilannetta tarpeeksi hyvin.





Kuvat 15a ja 15b. Liikusulkimen asennon asetusarvoja ja toteutuneita arvoja.



Kuvat 16a ja 16b. Liukusulkimen asennon asetusarvoja ja toteutuneita arvoja.

### 6.8.1 Huomiot simulointimalliin liittyen

Simulaattorissa liukusulkimen vaikutus virtausmäärään sisältää useita epävarmuustekijöitä. Senkasta tulevan teräksen virtaukseen ei ole olemassa mittausta, joten siihen liittyy useita epävarmuutta aiheuttavia seikkoja. Datasta ei kyetty löytämään riippuvuuksia senkan painon muutoksen ja liukusulkimen avauman pinta-alan välille. Näin ollen tässä määritetyt virtauksen arvot ovat suuntaa antavia. Kyseiset arvot voidaan määrittää paremmin, mikäli on olemassa enemmän dataa, josta riippuvuudet voidaan havaita. Senkan tulovirtauksen määrittämiseen hyödynnettiin dataa senkan painosta ja sen muutoksesta. Painosta saatava data ei kuitenkaan ollut tarpeeksi tarkkaa, jotta siitä olisi pystynyt tekemään hyviä johtopäätöksiä, kuinka nopeasti terästä poistuu senkasta milläkin liukusulkimen asennolla.

Muutettaessa laskettua liukusulkimen avauman pinta-alaa virtausmääräksi, hyödynnettiin datasta kerättyjä pisteitä virtausmäärän arvioimiseksi. Dataa

hyödynnettiin siten, että sieltä poimittiin jaksoja, jossa liukusulkimen asento oli pysynyt hyvin tasaisena ja sen jakson ajalta laskettiin hetkellisistä senkan painon muutoksista keskiarvo. Yhdessä pisteessä liukusuljin oli lähes kokonaan auki ja toisessa liukusuljin oli sen yleisessä toimintapisteessä. Näitä pisteitä hyödynnettiin arvioitaessa virtausmäärä liukusulkimen avauman pinta-alan perusteella.

Suurin epävarmuustekijä liittyy kuitenkin senkan hydrostaattisen paineen muutokseen sen tyhjennyksen aikana. Paine senkassa laskee tyhjennyksen aikana siten, että loppuvaiheessa tarvitaan suurempi liukusulkimen avauma saman virtausmäärän saavuttamiseksi kuin tyhjennyksen alussa. Ilmiöllä on tässä suuri vaikutus, mutta sitä ei simuloinnissa voitu hyödyntää datan puutteellisuuden vuoksi.

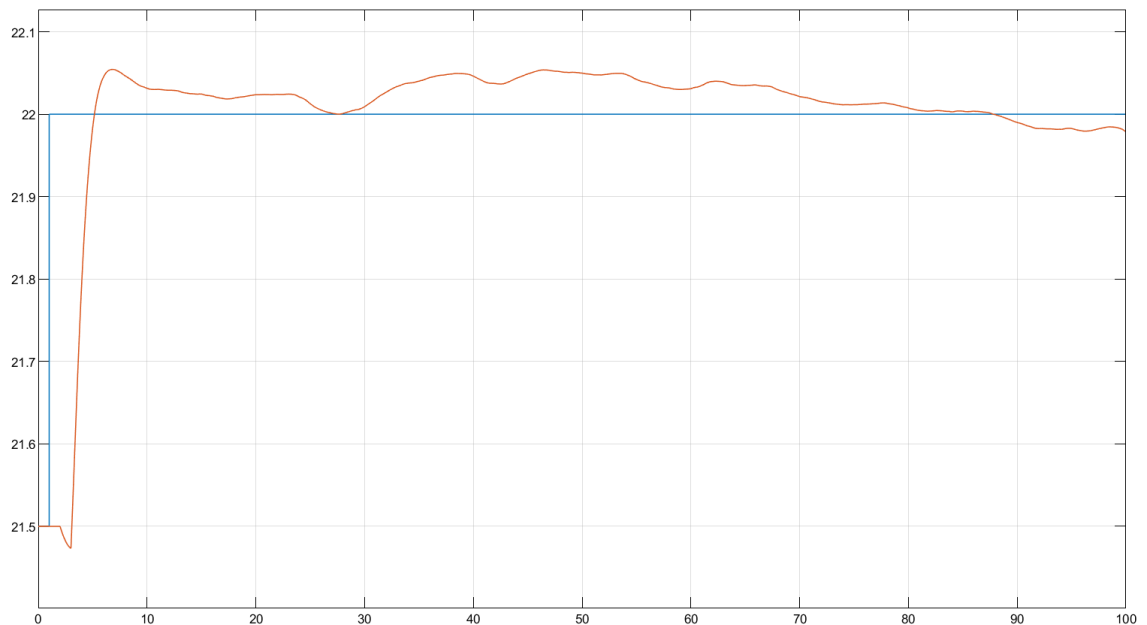
## 7 LOPPUTULOKSET

### 7.1 Simulointien tulokset

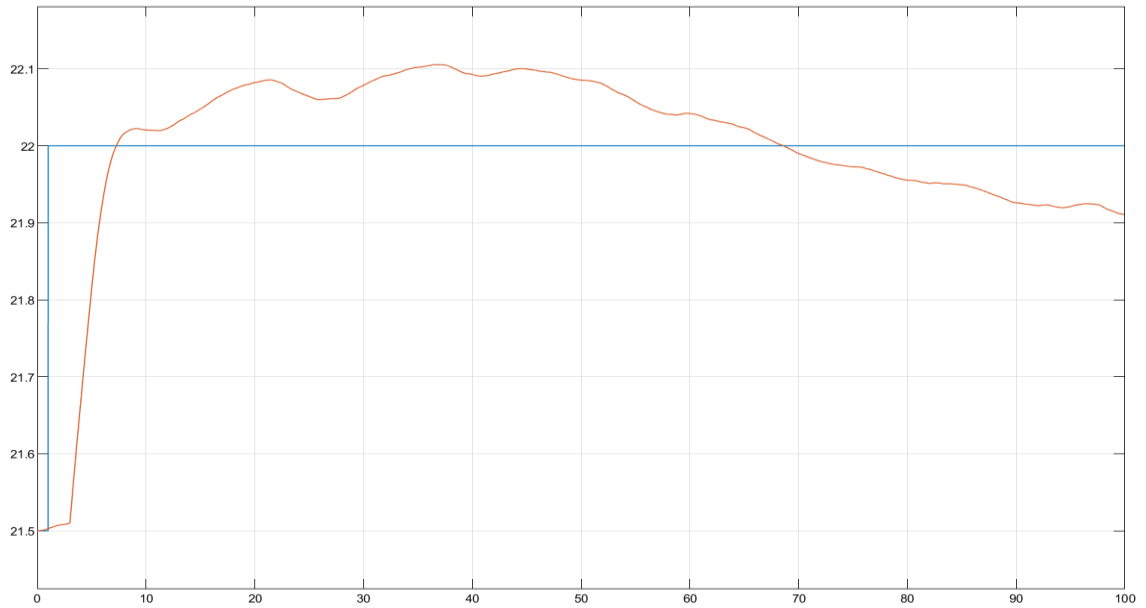
Simulointien tuloksina saatiin seuraavat kuvat, joissa sininen viiva kuvaa välialtan painon asetusarvoa ja oranssi viiva välialtan toteutunutta painoa.

#### Simuloinnit 1 ja 2.

Kuvat 17 ja 18 kuvaavat simuloinneista 1 ja 2 saatuja tuloksia. Kuvista voidaan nähdä, että välialtan paino pysyy tasaisempana Smith-prediktorin hyödyntävässä säätöratkaisussa. Kuvassa 17 välialtan paino saavuttaa asetusarvon nopeammin ja painon vaihtelu on vähäisempää kuin verrokkina toimineessa kuvan 18 simulointi 2:ssa.



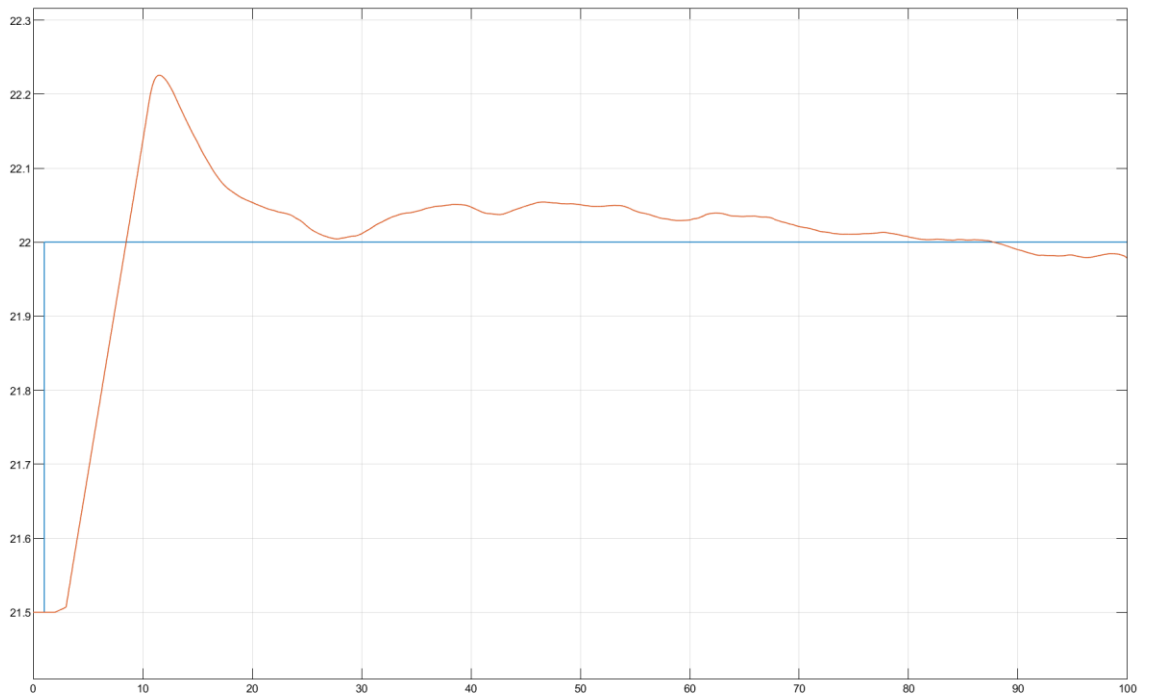
Kuva 17. Simuloitu välialtan paino Smith-prediktorin käyttäen.



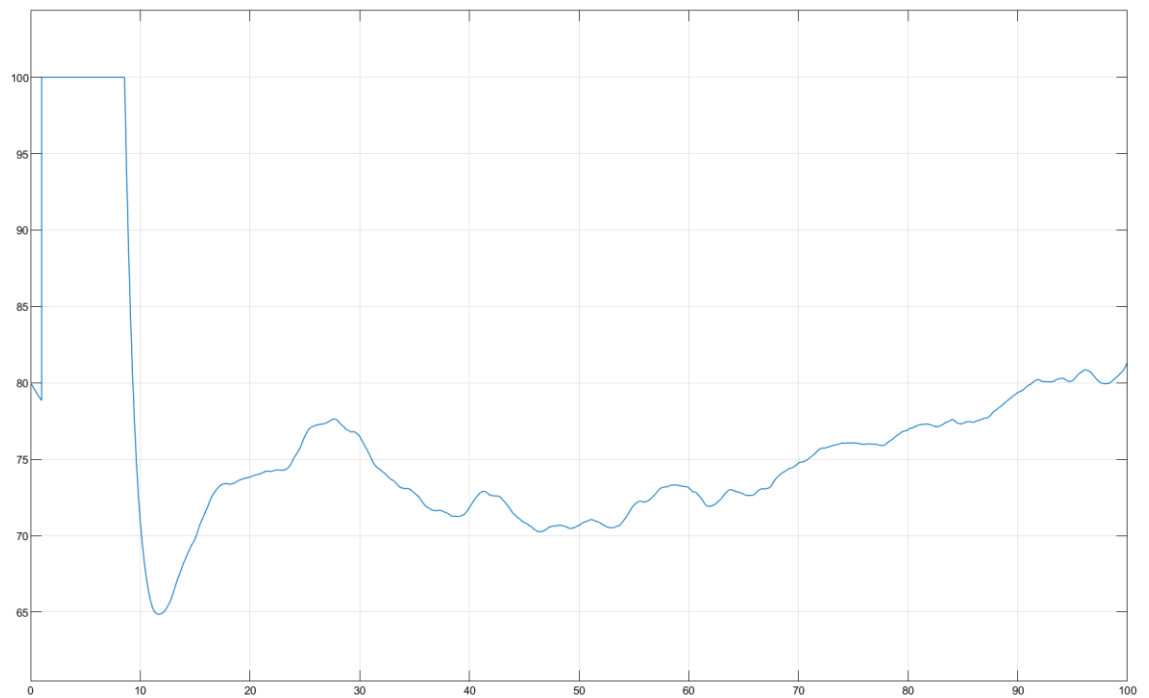
Kuva 18. Simuloitu välialtan paino ilman Smith-prediktoria.

### Simulointi 3 Smith-prediktorilla.

Simuloinnissa 3 simuloitiin välialtan painon lisäksi myös liukusulkimen asentoa. Simuloinnille 3 saatiin välialtan painoa esittävä kuva 19 ja liukusulkimen asentoa esittävä kuva 20. Välialtan paino saadaan pysymään huomattavan tasaisena alun ylityksen jälkeen, eikä tämän lisäksi suurempia poikkeamia asetusravosta esiinny missään vaiheessa simulointia. Kuvassa 20 liukusulkimen liike pysyi rauhallisena ja pääasiallinen avauma-% oli hyvin lähellä datasta saatuja arvoja.



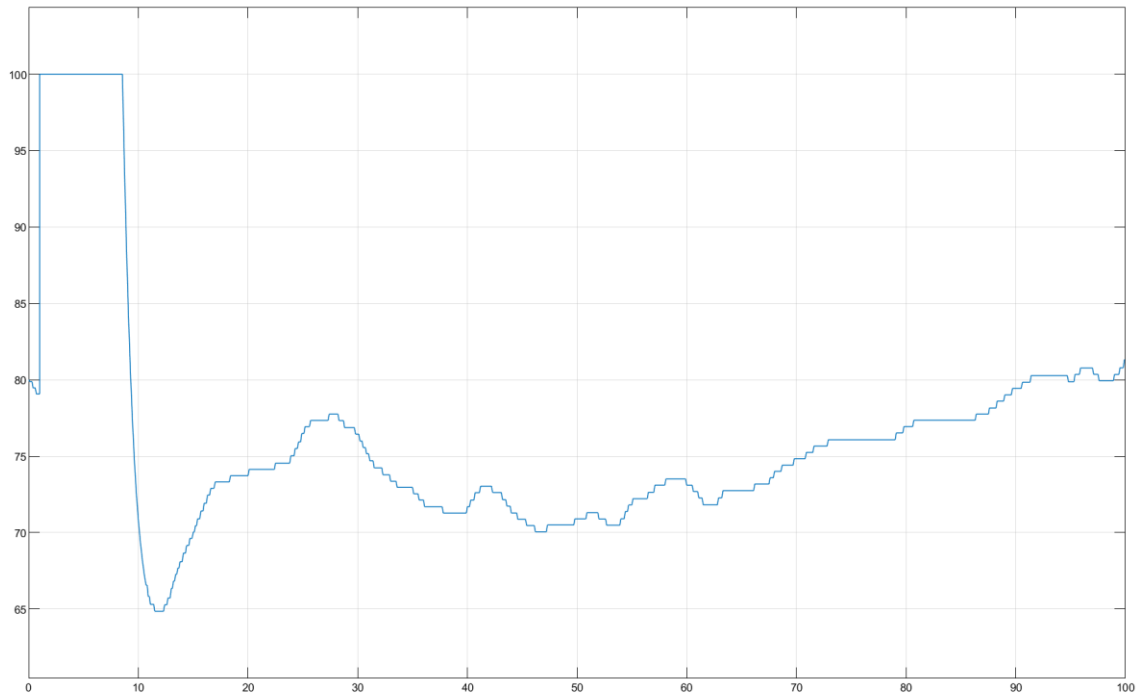
Kuva 19. Simuloitu välialtaan paino liikusulkimen avauma-% säädettäessä.



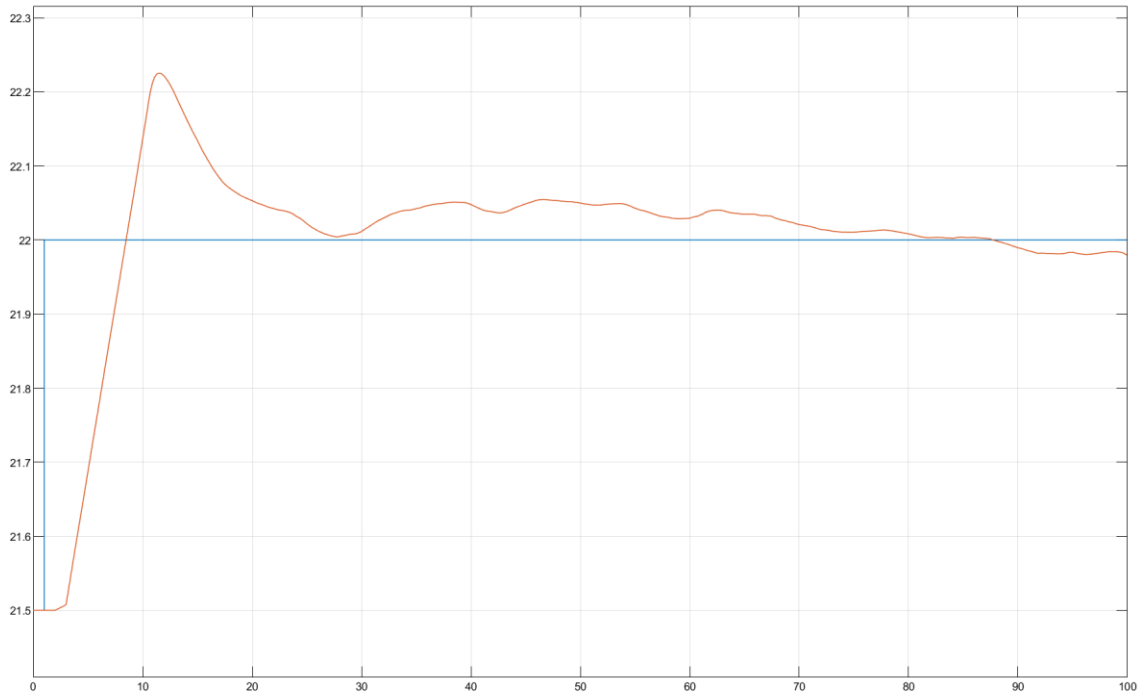
Kuva 20. Simuloitu liikusulkimen avauma-%.

#### Simulointi 4 Smith-prediktorilla.

Simuloinnin 4 tuloksena saatiin kuvat 21–24. Kuvissa 21 ja 22 on kuvattu liukusulkimen asentoa ja välialtaan painoa liukusulkimen minimiliikkeen ollessa 0,4 %. Välialtaan paino näyttää pysyvän samanlaisena kuin simuloinnissa 3; liikerajoituksesta huolimatta. Myös liukusulkimen liike on hyvin samanlainen simuloinnin 3 kanssa.



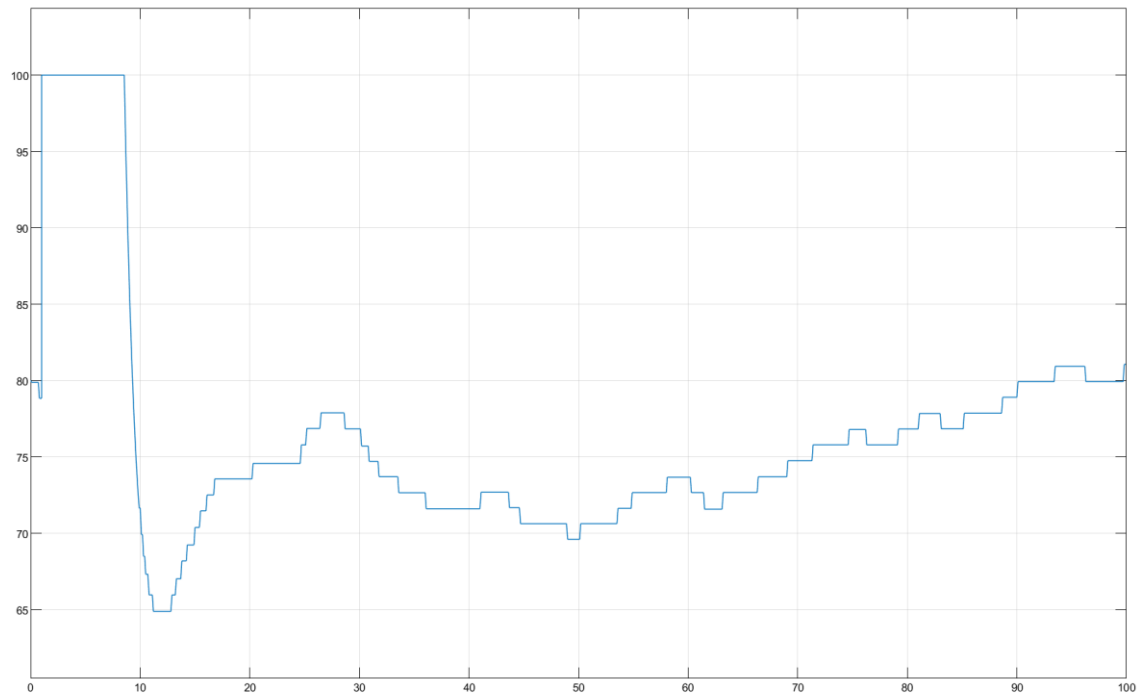
Kuva 21. Liukusulkimen simuloitu asento vähimmäisliikkeen ollessa 0,4 %.



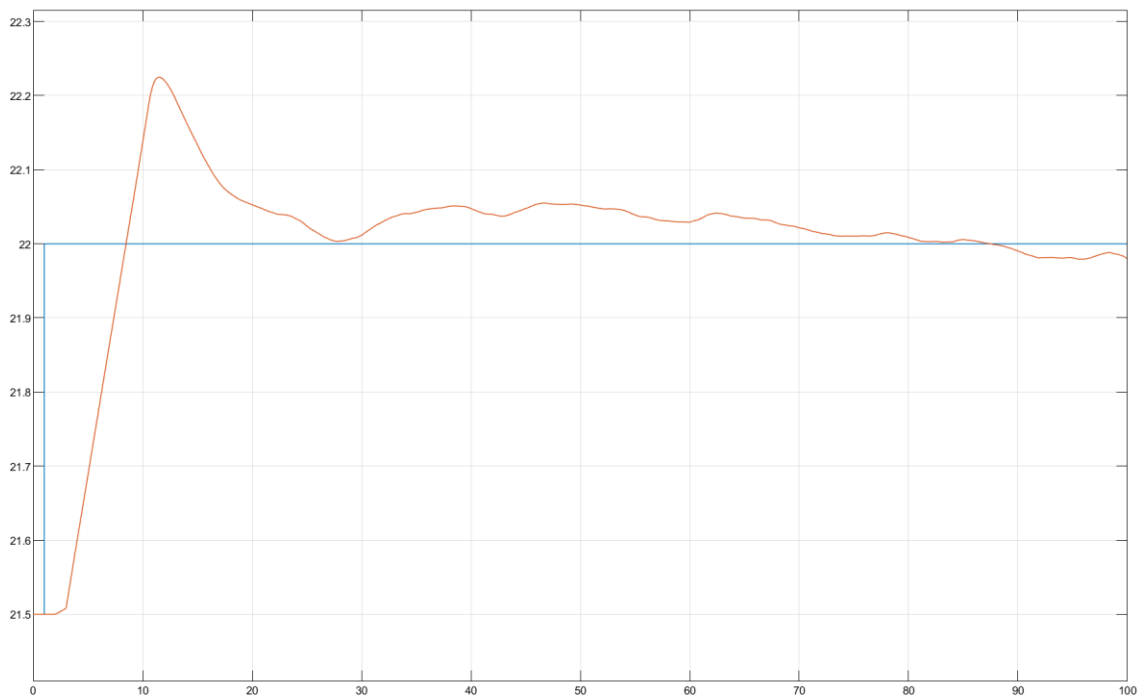
Kuva 22. Välialtan paino asetusarvoon verrattuna liikusulkimen vähimmäisliikkeen ollessa 0,4 %.

Simulointi 4:n toista osaa esittää kuvat 23 ja 24, joissa liikusulkimen minimiliike on rajoitettu 1,0 %:iin. Välialtan paino pysyy tässäkin tapauksessa samanlaisena simuloinnin 3 kanssa. Liikusulkimen liikekertoja saatiin vähennettyä ilman, että vaikutettiin välialtan painoon.





Kuva 23. Liukusulkimen simuloitu asento vähimmäisliikkeen ollessa 1,0 %.



Kuva 24. Välialtan paino asetusravoon verrattuna liukusulkimen vähimmäisliikkeen ollessa 1,0 %.

Välialtan painolle saatiin simuloinneista taulukon 1 mukaiset tunnusluvut ja säädön suorituskykyä on tarkasteltu taulukossa 2.

Taulukko 1. Välialtaan painoon liittyviä arvoja.

	Suurin poikkeama asetusarvosta	Keskihajonta
Simulointi 1	0,0543	0,0205
Simulointi 2	0,1024	0,0592
Simulointi 3	0,2256	0,0458
Simulointi 4		
Muutos 0,4 %	0,2252	0,0457
Muutos 1,0 %	0,2248	0,0456

Vaikka simulointi ei vastaa todellista tilannetta, niin simuloinneilla saavutettiin selkeästi parempia tuloksia verrattuna olemassa olevaan systeemiin. Nykyisellä systeemillä parhaassa tapauksessa poikkeama asetusarvosta oli senkan tyhjennyksen aikana 0,9 tonnia ja huonoimmassa tapauksessa 1,52 tonnia. Näihin arvoihin verrattuna kaikista simuloinneista saadut lukemat olivat merkittävästi parempia. Nykyisen systeemin parhaaseen tapaukseen verrattuna parannusta tuli simuloinnista riippuen 0,6744–0,8457 tonnia, joka tarkoittaa 75–94 %. Lisäksi olemassa olevan systeemin painovaihtelut saattoivat aika-ajoin tehdä suuria poikkeamia asetusarvoon nähden. Simuloinneilla tätä ilmiötä ei havaittu, vaan painovaihtelut olivat hyvin maltillisia ilman selviä poikkeamia asetusarvosta.

Erot simulointien 1 ja 2 välillä olivat kuitenkin suhteellisesti pieniä verrattuna tämänhetkiseen todelliseen tilanteeseen, joskin tässä simuloinnissa säädettiin suoraan tulovirtausta, eikä otettu huomioon liikusulkimen vaikutusta. Tämän simuloinnin tarkoitus olikin tarkastella Smith-prediktorin vaikutusta säätöön, ilman suuria epävarmuustekijöitä. Simuloinneista saatujen tunnuslukujen perusteella Smith-prediktoria hyödyntämällä voitaisiin kuitenkin saavuttaa tasaisempi välialtaan paino

verrattuna tavalliseen PID-säätöön. Taulukosta 2 näkyy, että simuloinnilla 1 saavutettiin parempi nousuaika ja pienempi maksimiylitys.

Taulukko 2. Säädön tunnuslukuja.

	Nousuaika (s)	Maksimiylitys (%)	Asettumisaika (s)
Simulointi 1	1,51	0,247	68,7914
Simulointi 2	3,01	0,466	88,9568
Simulointi 3	4,47	1,025	69,0332
Simulointi 4			
Muutos 0,4 %	4,47	1,024	68,9555
Muutos 1,0 %	4,47	1,022	68,8698

Simuloinnin 3 tarkoituksena oli vastata todellisen prosessin tapaa ohjata välialtaan tulovirtausta, eli liukusulkimen asento määrittää tulovirtauksen suuruuden. Simuloinnissa välialtan paino pysyi alun ylityksen jälkeen simulointien 1 ja 2 tasolla ja keskihajonta oli simuloinnissa 3 jopa parempi kuin mitä simuloinnissa 2 saavutettiin. Eroa syntyi varsinkin simulointiin 1 nähden, johtuen siinä tehtävien muunnosten seurauksena ja niihin sisältyvästä suuremmasta virheestä. Olemassa olevaan systeemiin verrattuna välialtan paino pysyi selkeästi tasaisempana ja poiketen nykyisestä systeemistä, suuria painon ylityksiä tai alituksia ei ilmennyt ollenkaan painon ylittäessä asetusarvon enintään 0,23 tonnilla. Liukusulkimen osalta simuloinneissa ei esiintynyt samanlaista edestakaisin liikettä, kuten nykyisellä järjestelmällä oli tapana.

Simulointien 3 ja 4 erot jäivät häviävän pieniksi, eikä taulukkojen 1 ja 2 perusteella ollut vaikutusta sillä, että oliko liukusulkimen vähimmäisliike rajoittamaton, 0,4 % rajoituksella vai 1,0 % rajoituksella. Simulointien perusteella välialtan painovaihtelu ei

kasvaisi, vaikka liikusulkimen vähimmäisliikettä kasvatettaisiin ja sitä myötä liikusulkimen liikkumiskertoja vähennettäisiin nykyisestä.

Kirjallisuuskatsauksen tutkimuksissa välialtaan painovaihteluja saatiin tasoitettua ja samalla myös liikusulkimen liikekertoja vähennettyä. Simulointitulokset kuitenkin poikkeavat todellisesta tilanteesta siinä määrin, että suora vertailu aiempiin tutkimuksiin on haastavaa. Liikusulkimen osalta tulokset näyttävät aiemman tutkimuksen tavoin siltä, että liikusulkimen liikekertoja pystyttäisiin vähentämään vaikuttamatta negatiivisesti välialtaan painovaihteluihin.

## **7.2 Johtopäätökset ja suositukset**

Simulointien ja datan analysoinnin perusteella näyttäisi siltä, että välialtaan painonhallintaa voisi parantaa useammalla eri tavalla. Simuloinnit osoittivat, että hyödyntämällä Smith-prediktoria säädössä voitaisiin saavuttaa parempi välialtaan painonhallinta. Suurin huomio kiinnittyi kuitenkin siihen, että nykyisellään liikusuljin ei datan perusteella pysty toteuttamaan säätimen antamia asetuskäskyjä kovinkaan tarkasti. Näin ollen myös nykyisellä säätöratkaisulla voitaisiin saavuttaa parempia tuloksia, mikäli toimilaite pystyisi toteuttamaan asetusarvon säätimen haluamalla tavalla.

Liikusulkimen liikemääriä pystyttäisiin simulointien perusteella vähentämään kasvattamalla sen vähimmäisliikemäärää kerralla. Tämän ehtona on kuitenkin se, että liikusuljin saadaan liikkumaan asetusarvoonsa nykyistä tilannetta paremmin. Lisäksi tässä työssä esitetyt simuloinnit tulisi vielä vahvistaa prosessikokeiden muodossa, jotta todellinen ero verrattuna olemassa olevan systeemiin selviää.

## 8 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli minimoida välialtan painon vaihteluja ja vähentää liikusulkimen liikekertoja ensisijaisesti parantamalla nykyistä välialtan painoa ohjaavaa säätöä. Väliallasta haluttiin käyttää suuremmilla painotavoitteilla sulkeumapuhtauden edistämiseksi ja liikusulkimen liikekertojen vähentämisellä tavoiteltiin liikusulkimen levyjen pidempää käyttöikää. Kirjallisuudesta löytyi muutamia saman aihepiirin tutkimuksia, mutta juuri samaa asiaa käsittelevät tutkimukset olivat harvassa.

Olemassa olevan prosessin datasta tutkittiin välialtan ja liikusulkimen käyttäytymistä, jonka pohjalta prosessia pyrittiin parantamaan. Datan pohjalta tehtiin erikoisia löytöjä niin välialtan painovaihtelujen, kuin liikusulkimen liikkeidenkin osalta ja huomattiin ettei liikusulkimen liikkeet vastanneet sen asetusarvoja kovinkaan hyvin. Olisikin tärkeää saada liikusuljin liikkumaan asetusarvojen mukaisesti ennen suurempia muutoksia säätöön. Nykyisen järjestelmän viive oli kaksi sekuntia, minkä vaikutusta säädön hyvyyteen pyrittiin minimoimaan käyttämällä säädössä Smith-prediktorilla. Välialtan painolle, sekä liikusulkimen käyttäytymiselle rakennettiin useampi eri simulointimalli, joiden perusteella Smith-prediktorilla saatiin parannettua välialtan painon hallintaa. Lisäksi simulointien pohjalta liikusulkimen liikekertoja voitaisiin vähentää kasvattamatta välialtan painovaihteluja ja näin ollen mahdollisesti pidentää liikusulkimen levyjen käyttöikää.

Työssä ei ollut mahdollisuutta tehdastesteihin, joten mahdolliset saavutettavat parannukset prosessissa ovat vain suuntaa antavia ja perustuvat vain simulointituloksiin. Olemassa olevan automaatiojärjestelmän toimintaperiaatteen selvittämisessä oli pieniä epäselvyyksiä ja kaikkia siihen liittyviä tekijöitä ei pystytty selvittämään. Lisäksi datasta tulisi löytää riippuvuudet senkan painon muutoksen ja liikusulkimen asennon välille paremman tarkkuuden saavuttamiseksi.

## 9 LÄHDELUETTELO

Bolton, W., 2002 Control Systems. Oxford: Newnes. ISBN 9780750654616

Cockerell, R. A., Graebe S. F., Elsey, G., Crissafulli, S. & Goodwin, G. C., 1997. Design study for continuous caster tundish weight control and ladle steel flow estimate. Kyongju: IFAC.

Furtmueller, C. & del Re, L., 2008. Control issues in continuous casting of steel. Teoksessa: Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control. Seoul: IFAC, S. 700-705. ISBN 9781605607580.

Graebe S.F, Elsey, G. & Goodwin, G. C., 1995. Control design and implementation in continuous steel casting.

Hangos, K. M. & Cameron, I. T., 2001. Process Modelling and Model Analysis. San Diego: Academic Press. ISBN 9780121569310

Hang C. C., 2009. Smith Predictor and Its Modifications. Control Systems, Robotics and Automation, Vol II, S. 109-112.

Jabri, K., Mouchette, A., Bèle, B., Godoy, E. & Dumur, D., 2009. Periodic Disturbances Reduction in the Continuous Casting Process by Means of a Modified Smith Predictor. Teoksessa: Proceedings of the 6th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Vol 2. Milan: ICINCO, S. 110-115. ISBN 978-989-674-001-6

Lee, D., You, B., Sim, T., Kim, M., Lee, J. & Lee, J., 2009. Molten Steel Level Control Based on an Adaptive Fuzzy Estimator in a Continuous Caster. ISIJ International, 49 (8) S. 1174–1183

Luyben, W.L., 1996. Process Modelling, Stimulation and Control for Chemical Engineers. Singapore: McGraw-Hill.

MathWorks, 2020. Smith Predictor Controller [verkkodokumentti]. MathWorks.  
Saatavissa:  
<https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/smithpredictorcontroller.html> [viitattu  
16.10.2020]

Russano, E., Avelino, E. F., 2019. Introduction to Process Control. Ashland: Arcler  
Press. ISBN 9781773616124

Yero G. G., Mendoza, M. R. & Albertos, P., 2018. Robust nonlinear adaptive mould  
level control for steel continuous casting. IFAC PapersOnLine 51-25. S. 164–170.