



# Haihduuttamon strippauskolonnin säätö- tekniikan kehittäminen

Tuukka Roivainen

Opinnäytetyö

Toukokuu 2023

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikka

**Roivainen, Tuukka**

## **Haihduuttamon strippauskolonnin säätötekniikan kehittäminen**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2023, 54 sivua

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### **Tiivistelmä**

Metsä Fibren Äänekosken biotuotetehtaan haihduttamon strippauskolonni haluttiin automatisoida optimaalisemman likaislauhteen puhdistamisen saavuttamiseksi. Strippausmenetelmällä puhdistettua lauhdetta voidaan hyödyntää tehtaan prosesseissa uudelleen, mikä on erityisen tärkeää selluteollisuudessa, jossa vedenkäyttö on aina ollut runsasta. Kaikki säästetty vesi parantaa tehtaan resurssi- ja kustannustehokkuutta ja täten työ myös edesauttaa YK:n Agenda2030 -hankkeen toteutumista kohtien 6 ja 9 osalta, jotka liittyvät vedenkäyttöön ja resurssitehokkuuteen.

Opinnäytetyön tavoitteena oli muokata strippauskolonnin suhde- ja virtaussäätöön liittyviä säätöpiirejä niin, että kolonnin säätimet pystyvät tarpeen mukaan säätämään lisää höyryä kolonniin tai ohjaamaan ylimääräistä höyryä siitä pois venttiilien avulla. Säätötekniikan kehittämisellä haluttiin päästä haluttuun syötetyn höyryn ja likaislauhteen suhteeseen kolonnissa, jolloin syötetty lauhde puhdistuu ihanteellisesti.

Kehittämistutkimus aloitettiin testaamalla tuorehöyryn syöttämisen vaikutusta strippauskolonnin toimintaan ja erityisesti höyryn ja likaislauhteen suhteen arvoon. Testien perusteella kolonnin toimilaitteille (höyryventtiileille) määritettiin tarvittavat ohjaukset, joilla suhteen asetusarvo saavutettaisiin. Kehittäminen jatkui päivitettyjen säätöpiirien lataamisella ohjauksjärjestelmään ja täten osaksi oikeaa prosessia.

Strippausprosessin ajo automaattiohjauksella havainnollisti sen vaikutusta ympäröivään prosessiin sekä päinvastoin. Näiden vaikutusten perusteella säätöpiirien muutoksia tehtiin useampaan kertaan. Stripatun lauhteen puhtautta mitattiin sekä johtokykymittauksen että laboratoriossa analysoitujen näytteiden tuloksilla ja niitä verrattiin aikaisempiin mittaustuloksiin.

Työn tuloksena strippauskolonnin säätötekniikka saatiin kehitettyä niin, että automaattiohjauksella kolonni pyrkii saavuttamaan suhdesäätimen asetusarvon säätämällä höyrynsyöttöä. Muutosten myötä kolonnissa puhdistettu stripattu lauhde on keskimäärin puhtaampaa kuin ennen. Näin ollen suurempi määrä likaislauhdetta voidaan käyttää uudelleen sekundäärilauhteena. Opinnäytetyön tavoitteet saavutettiin halutulla tavalla ja halutussa aikataulussa. Työn kokonaishyödyt ja -vaikutukset nähdään kuitenkin pidemmällä aikavälillä, kuten myös strippausprosessin optimoinnin tarpeellisuus.

### **Avainsanat (asiasanat)**

strippauskolonni, likaislauhde, säätöpiiri, johtokyky

### **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

**Roivainen, Tuukka**

### **Improving the control engineering of an evaporation plant's stripping tower**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2023, 54 pages

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

#### **Abstract**

The stripping tower of Äänekoski bioproduct mill's evaporation plant needed automatization to achieve more optimal purification of foul condensate. Condensate purified by the stripping method can be reused in various processes of the mill. This is especially important in the pulp industry which has always demanded an abundant amount of water. All water that can be saved and reused improves the resource and cost efficiency of the mill. The work also contributes to accomplishing UN's Agenda2030 for parts 6 and 9 which are related to water usage and resource efficiency.

The objective of the thesis was to modify the control loops related to the stripping tower's ratio and flow controls so that the controllers of the tower can control more steam into the tower or lead excess steam elsewhere via valves when needed. Achieving the desired ratio of steam and foul condensate in the tower was done by improving the control engineering. This leads to ideal purification of the condensate fed to the tower.

The development study began by testing how the feeding of live steam affects the tower's function and especially the ratio of steam and foul condensate. Controls needed for the steam valves to reach the set point of the ratio were defined based on the tests. The development continued by uploading the updated control loops to the control system and thus as a part of the real process. Operating the stripping process based on automation illustrated its effect on the surrounding process and vice versa. Changes to the control loops were made several times based on these effects. The purity of stripped condensate was measured by conductivity measurement and from samples analyzed in the laboratory. The results were compared with earlier measurements.

As result of the thesis, the control engineering of the stripping tower was improved to the point where it strives to reach the set point of the ratio controller by adjusting the steam feed. Because of the changes, the stripped condensate purified in the tower is cleaner on average than before. Therefore, a higher amount of foul condensate can be reused as secondary condensate. The objectives were achieved on schedule and as desired. However, the complete benefits and effects of the thesis will be seen in a longer time span, just like the necessity of optimizing the stripping process as well.

#### **Keywords/tags (subjects)**

stripping column, foul condensate, control loop, conductivity

#### **Miscellaneous (Confidential information)**

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>3</b>
1.1	Työn taustatekijät.....	3
1.2	Lähtötilanne ja tavoitteet.....	4
1.3	Tutkimusmenetelmä .....	5
1.4	Toimeksiantaja .....	6
<b>2</b>	<b>Talteenotto.....</b>	<b>6</b>
2.1	Haihduuttamo .....	7
2.1.1	Mustalipeä .....	7
2.1.2	Haihduuttamon tehtävät .....	8
2.1.3	Haihduutusprosessi.....	8
2.1.4	Vierasaineiden poisto .....	11
2.2	Soodakattila.....	12
2.2.1	Soodakattilan tehtävät .....	12
2.2.2	Soodakattilan rakenne .....	12
2.2.3	Polttoprosessi .....	13
2.3	Kaustisointi ja meesanpoltto.....	14
2.3.1	Kaustisoinnin ja meesanpolton tehtävät .....	14
2.3.2	Viherlipeän valmistus ja käsittely .....	14
2.3.3	Kaustisointiprosessi .....	15
2.3.4	Valkolipeän erotus ja meesan käsittely .....	16
2.3.5	Meesanpoltto .....	17
2.4	Biotuotetehtaan sivutuotteet .....	18
2.4.1	Tärpätti ja mäntyöljy.....	18
2.4.2	Rikkihappo ja muut sivutuotteet .....	19
<b>3</b>	<b>Lauhteet .....</b>	<b>20</b>
3.1	Primäärilauhde .....	20
3.2	Sekundäärilauhde.....	21
3.3	Likaislauhde.....	21
3.3.1	Likaislauhteen keräily haihduuttamalla.....	22
3.3.2	Likaislauhteen käsittely.....	23
3.4	Lauhteen puhdistaminen .....	24
<b>4</b>	<b>Strippauskolonni.....</b>	<b>25</b>
4.1	Strippauskolonnin rakenne .....	25
4.2	Puhdistusprosessi.....	27

<b>5</b>	<b>Säätöautomaatio</b>	<b>29</b>
5.1	Säätöpiiri	29
5.2	Säätömenetelmät	30
5.2.1	Yksi-, kaksi- ja kolmipistesäätö	30
5.2.2	Suhdesäätö	31
5.2.3	Kaskadisäätö	31
5.3	Säätimet ja säätimen viritys	33
5.3.1	Parametrisäätimet ja viritysparametrit	33
5.3.2	Virittäminen ja hystereesi	34
<b>6</b>	<b>Toteutus ja tulokset</b>	<b>37</b>
6.1	Säätötekniikan kehittäminen	37
6.2	Saavutetut tulokset	47
<b>7</b>	<b>Pohdinta</b>	<b>48</b>
7.1	Tulosten arviointi ja työn haasteet	48
7.2	Luotettavuuden arviointi ja eettisyys	50
7.3	Jatkotoimenpiteet ja kehitysehdotukset	52
	<b>Lähteet</b>	<b>53</b>

## Kuviot

Kuvio 1.	Sulfaattiselutehtaan talteenottokierrot	7
Kuvio 2.	Yksi- ja kolmivaiheisen mustalipeän haihdutuksen periaate	9
Kuvio 3.	Haihduuttamon virtauskaavio	22
Kuvio 4.	Strippauskolonni ja venttiilipohja	26
Kuvio 5.	Strippauskolonnin likaislauhdelahteet	27
Kuvio 6.	Viritysparametrien vaikutus säädössä	34
Kuvio 7.	Hystereesi virhelähteenä	35
Kuvio 8.	Likaislauhteen palautuskierron sekä höyry-/likaislauhdesuhteen laskenta	37
Kuvio 9.	Matalapainehöyryn syöttötesti käsiajolla ja testin historiatrendi Valmet DNA:sta	39
Kuvio 10.	Strippauskolonnin automaattiajon toisen testin historiatrendi	40
Kuvio 11.	Stripperiin vaikuttavat höyryvirrat ja -venttiilit	41
Kuvio 12.	Strippauskolonnin automaattiajon historiatrendi 31.3. aamuna	42
Kuvio 13.	Strippauskolonnin höyryventtiilien historiatrendi 3.4. aamuna	44
Kuvio 14.	Yksiköiden pesusekvenssien vaikutus strippaukseen (historiatrendi)	45
Kuvio 15.	Tuorehöyryventtiilin käyttäytyminen viritysten jälkeen	46
Kuvio 16.	Stripatun lauhteen mittaustulokset marraskuu 2022–huhtikuu 2023	48

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn taustatekijät

Sellun valmistuksessa vedenkäyttö on aina ollut runsasta, vaikka sitä onkin vuosien saatossa saatu vähennettyä. Kaikki vesi, joka saadaan uudelleenkäytettyä tai muuten hyödynnettyä tehokkaammin kuin aikaisemmin palvelee sekä tehdasta että ympäröivää maailmaa energiatehokkuuden ja kestäväen kehityksen näkökulmista, jotka ovat yksiä suurimmista ajankohtaisista teemoista työn tekohetkellä. Tämä ja muut samankaltaiset ajankohtaiset ilmiöt ovat myös osittain tämän tutkimustyön taustalla. Tutkimus edesauttaa esim. YK:n kestäväen kehityksen Agenda2030 -raportin tavoitteiden 6 ja 9 toteutumista, jotka liittyvät muun muassa kestäväen vedenkäyttöön ja teollisuuden sekä resurssitehokkuuteen (Kestäväen kehityksen globaali toimintaohjelma Agenda2030 n.d.).

Sellun keitossa ja mustalipeän haihduttamisessa muodostuu paljon aisteja ärsyttäviä ja terveydelle haitallisia yhdisteitä erilaisten kaasujen ja nesteiden muodossa. Kun höyry ja sen mukana kulkevat hajukaasut lauhtuvat, syntyy epämiellyttävän hajuista likaislauhdetta. Lauhteen likaisuuden ja haitallisuuden takia sitä ei missään nimessä voida poistaa prosessista tai hyödyntää sellaisenaan, minkä vuoksi likaislauhteelle on suunniteltu puhdistusmenetelmiä, jotta sitä voidaan käyttää prosessissa uudelleen. Näistä menetelmistä yksi on lauhteen puhdistaminen strippauskolonnissa, joka on opinnäytetyön keskiössä.

Pitkälle automatisoidussa ja suuressa tehtaassa, kuten Äänekosken biotuotetehtaassa, prosessien automatisointi helpottaa huomattavasti niiden hallintaa sekä operointia. Modernin automaatiotekniikan ansiosta yksi operaattori pystyy esim. valvomaan kaikkia haihduttamon osaprosesseja ja toimilaitteita valvomosta käsin. Operaattoria tarvitaan, sillä monet asiat pitää kuitenkin suorittaa ihmisen toimesta ja esim. vikatilanteissa prosesseja ajetaan yleensä operaattorin toimesta manuaaliohjauksella. Prosesseissa kannattaa hyödyntää automaatio- ja säätötekniikkaa, sillä näin voidaan muun muassa parantaa tuotantoa ja optimoida resurssien käyttöä. Osittain näistä syistä myös strippauskolonni haluttiin automatisoida. Automatisoinnilla voidaan myös yhtenäistää yrityksen sisäistä linjaa prosessin ajossa operaattorikohtaisten ajotapojen vaihtelun vähentyessä.

Työn taustalla oli siis monia syitä liittyen prosessin optimointiin, resurssitehokkuuteen ja siten taloudelliseen kannattavuuteen. Työ hyödyttää siis toimeksiantajaa, mutta laajemmin myös ympäröivää ilmastoja, kun likaislahdekuorman vähenemisen kautta myös ympäristön kuormitus vähenee. Opinnäytetyön anti lukijoille on se, että sen teoriaosuudessa läpikäydään perusteellisesti talteenottolinjasta, säätöautomaatiosta sekä lauhdeista ja niiden puhdistamisesta. Tutkimuksellinen osuus havainnollistaa käytännön läheisen tutkimuksen vaiheita ja toteutusta.

## 1.2 Lähtötilanne ja tavoitteet

Kehittämiskohde eli strippauskolonni oli muutoin pitkälle automatisoitu prosessilaitte, mutta höyryn ja likaislahde syöttö ei ollut automatisoitu niin, että se olisi toiminut optimaalisella tavalla. Optimaalisella tavalla tarkoitetaan yksinkertaisesti sitä, kuinka suuri höyryvirtaus tarvitaan syötetävän likaislahde puhdistamiseen. Strippauskolonnin säätötekniikan kehittämisellä pyrittiin pääsemään tilanteeseen, jossa kolonni on täysin automatisoitu prosessinajotilanteessa sekä höyry/likaislahde -suhde on halutulla tasolla.

Ilman edellä mainitun suhdeluvun automaattista optimointia lauhde voidaan puhdistaa onnistuneesti, mutta etenkin resurssi- ja kustannustehokkuus kärsivät tästä. Jos höyryä käytetään liikaa verrattuna likaislahdeeseen, varmistetaan lauhde puhtaus, mutta höyryä kulutetaan liikaa. Tällaista tilannetta ei haluta varsinkaan silloin, kun syöttöhöyryssä käytetään myös tuorehöyryä. Höyryn syöttämisessä pyritään ensisijaisesti käyttämään vain haihdutinyksiköstä saatavaa toisiohöyryä. Jos taas höyryä syötetään liian vähän, likaislahdetta ei yksinkertaisesti saada tarpeeksi puhtaaksi. Tässä tilanteessa strippauskolonnista poistuva lauhde ohjataan puhtaan sekundärlahde säiliön sijasta vuotolipeäsäiliöön. Silloin voisi sanoa, että prosessia on ajettu turhaan, josta aiheutuu myös turhia käyttökustannuksia.

Työn tavoitteeksi asetettiin tarpeellisten säätöpiirien muodostaminen strippauskolonnille. Näiden säätöpiirien ansiosta sitä voitaisiin operoida automaattijolla suhde- ja virtaussäätimien avulla niin, että ohjausjärjestelmä osaa automaattisesti tarvittaessa syöttää lauhdeeseen lisää höyryä tai johtaa ylimääräistä höyryä siitä pois. Tämän lisäksi työssä tutkittiin, minkälaista lauhdetta automatisoinnin jälkeen kolonnista saadaan höyry/likaislahde -suhteen ollessa optimaalisempi.

### 1.3 Tutkimusmenetelmä

Opinnäytetyössä tavoitteena oli kehittää toimeksiantajan tehtaan strippauskolonnin toimintaa. Työssä kehitettiin siis olemassa olevaa prosessia, joten opinnäytetyön tavoite saavutetaan parhaiten käyttämällä tutkimus- tai kehittämistyömenetelmistä kehittämistutkimusta. Opinnäytetyö on tutkimuksellista kehittämistoimintaa, sillä käytettävä menetelmä on kehittämistutkimus. Kehittämistutkimuksessa käytetään monia eri tutkimusmenetelmiä kehittämiskohteen mukaan, mutta siihen kuuluu aina tutkimuksen ja kehittämisen yhdistelmä (Kananen 2012, 19). Kananen mukaan opinnäytetyöhön pitää aina liittyä tutkimuksellisuutta, joka ilmenee kehittämistutkimuksessa muun muassa kehittämistyön dokumentoinnin ja uuden tiedon tuottamisen muodossa (mts. 20–21).

Tutkimuksessa käytettiin laadullisen ja määrällisen tutkimuksen menetelmiä, sillä kehitystutkimuksella ei omia lähestymistapojaan ole. Kananen (2012) kuvaileekin kehittämistutkimusta laadullisen eli kvalitatiivisen ja määrällisen eli kvantitatiivisen tutkimuksen sekoituksena. (Mts. 25–26). Tutkimuksessa käytettiin sekä kvalitatiivisen että kvantitatiivisen tutkimuksen lähestymistapoja muun muassa ongelmanratkaisussa, tulosten keräämisessä sekä tulosten analysoinnissa.

Määrällinen tutkimus tutkii ilmiötä olemassa olevien teorioiden tai mallien avulla. Tulokset ovat objektiivisiä lukuja ja niitä voidaan kerätä sekä analysoida erilaisilla tilastollisilla menetelmillä. (Mts. 31–32.) Kvantitatiivisen tutkimuksen mukaisesti tutkimuksen kehittämiskohteelle oli teoriaan perustuva tavoitearvo, johon höyry/lauhde -suhteessa haluttiin päästä. Tämän saavuttamiseksi mitattiin ja analysoitiin suhteeseen suoraan tai epäsuoraan vaikuttavia suureita ja niiden lukuarvoja määrällisen tutkimusotteen mukaisesti.

Laadullinen tutkimus tutkii ilmiötä sanallisesti, eikä tulosten saamiseen tai analysointiin käytetä tilastollisia, eksakteja, menetelmiä. Tulokset ovat subjektiivisia ja vaihtelevat tutkijan mukaan. (Mts. 29–30.) Kvalitatiivinen tutkimusote ilmeni muun muassa tutkimukseen liittyvien resurssien prioriteettikysymyksissä: halutaanko höyryä säästää mahdollisimman tehokkaasti lauhteen puhdistuksen kustannuksella vai mieluummin käyttää höyryä esim. niin, että lauhde puhdistuu varmasti aina, kun mahdollista? Tämän lisäksi kvalitatiivinen ote ilmeni säätöpiirien lukitus- ja ohjausehtoja määritettäessä.

## 1.4 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Metsä Fibre Äänekosken biotuotetehtas. Metsä Fibre on yksi viidestä Metsä Groupin konserniin kuuluvasta tytäryhtiöstä ja Äänekosken tehdas on yksi Fibren neljästä sellu- tai biotuotetehtaasta. Tehtaan päätuotteita ovat valkaistu havu- ja koivusellu. Metsä Fibre on tehnyt viime vuosina tehokasta tulosta ja yrityksen liikevaihdon tähänastinen huippu saavutettiin vuonna 2022, joka oli noin 3,1 miljardia euroa. Vertailukelpoinen liiketulos oli 846 miljoonaa euroa. (Metsä Group vuosikertomus ja kestävyysraportti 2022.)

Nimensä mukaisesti tehtaalla tuotetaan sellun lisäksi myös muita biotuotteita. Näitä tuotteita ovat mäntyöljy, rikkihappo, tärpähti, bioenergia, tuotekaasu sekä biokaasu ja -pelletit. Äänekosken tehdas on kapasiteettiä 1,3 miljoonaa tonnia sellua vuodessa. Kapasiteetista 800 000 tonnia on havusellua, joka on yksittäiselle tehtaalle eniten maailmassa. Tämä luku tullaan tosin ohittamaan yrityksen toisen rakenteilla olevan biotuotetehtaan, Kemin biotuotetehtaan, toimesta. Vuonna 2017 valmistunut Äänekosken tehdas on hyvin moderni ja energiatehokkuudeltaan korkealla tasolla: sivuvirtoja hyödynnetään kaiken tehtaan vaatiman energian kattamiseen ja soodakattilan avulla tehdas sähköomavaraisuusaste on 240 %, joka mahdollistaa ylimääräisen sähkön myynnin. Tehtas työllistää 240 henkilöä. (Äänekosken biotuotetehtas n.d.)

## 2 Talteenotto

Talteenottolinja on sulfaattisellun valmistamisessa kuitulinjan jälkeisten prosessien ryhmä. Talteenoton eri prosessien tehtävänä on jalostaa kuitulinjan hukavirran eli pesulipeän avulla polttoainetta ja sitä polttamalla tuottaa sähköä ja lämpöä, sivutuotteita, lauhdetta sekä valmistaa lisää sellun keitossa käytettävää valkolipeää. Luvussa läpikäydään syvemmin lähinnä ne menetelmät ja käytännöt, joita myös toimeksiantajan tehtaalla käytetään.



Kuvio 1. Sulfaattisellutehtaan talteenottokierrot (KnowPulp 2023)

Kuvio 1 havainnollistaa sulfaattisellutehtaan kemikaalien talteenottokierroja ja prosessien sijoittamista toisiinsa nähden. Kuviossa esitetyt osaprosessit muodostavat talteenotto-osaston, lukuun ottamatta massaosastoon kuuluvaa kuidutusta.

## 2.1 Haihduttamo

### 2.1.1 Mustalipeä

Sellun keitossa käytetty kuuma valkolipeä (NaOH) irrottaa puuhakkeen kuiduista ligniiniä ja uuteaineita. Ligniini ja muut aineet, kuten rikki- ja natriumpohjaiset kemikaalit, reagoivat valkolipeän kanssa. Reaktiosta syntyvää mustaksi värjäytyneitä lipeää kutsutaan mustalipeäksi ja se johdetaan ruskean massan pesusta haihduttamolle. (KnowPulp 2023.)

Mustalipeä on hyvä energialähde poltettuna. Energiatehokasta polttoa varten siitä täytyy kuitenkin poistaa runsaasti vettä, sillä keittämöltä saatava mustalipeä on kuiva-ainepitoisuudeltaan hyvin laihaa, noin 15–16 prosenttista, ja tästä syystä sitä kutsutaan laihamustalipeäksi tai pesulipeäksi. Nykyaikaisilla haihdutusmenetelmillä mustalipeä saadaan haihdutettua jopa 80–85 prosentin kuiva-ainepitoisuuteen. (Mt.)

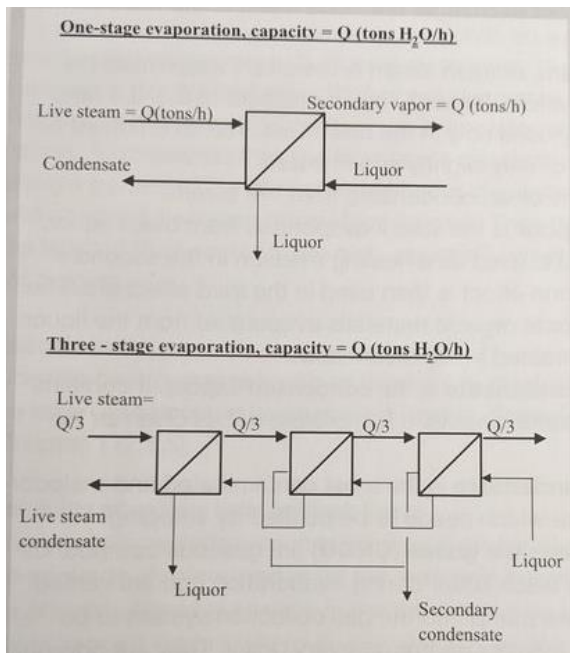
### 2.1.2 Haihduttamon tehtävät

Haihduttamon päätehtävänä on veden haihduttaminen mustalipeästä soodakattilalla polttoa varten. Haihduttamisprosessi sekä sivuprosessit pyritään hyödyntämään niin tehokkaaksi kuin mahdollista, sillä haihduttamo on yksi suurin höyryn kuluttaja sellutehtaassa. (KnowPulp 2023.) Edellä mainitun tehokkaan polton lisäksi mustalipeää haihdutetaan siksi, ettei soodakattilalle voida syöttää kuiva-ainepitoisuudeltaan alle 55 prosenttista mustalipeää sulavesiräjähdyksvaaran takia (Parviainen ym. 2008, 104).

Toinen haihdutusprosessin tärkeä tehtävä on mahdollisimman puhtaan lauhteen talteen ottaminen. Haihduttamo liittyy olennaisesti myös biotuotetehtaalla tuotettavien sivutuotteiden valmistukseen, joita ovat tärpätti, metanoli sekä suovasta valmistettava mäntyöljy. (KnowPulp 2023.)

### 2.1.3 Haihdutusprosessi

Yleisin sellutehtaiden haihdutustyyppi on monivaihehaihduttamo. Monivaihehaihduttamossa on monta haihdutinyksikköä sarjaan asennettuna, jolloin syötettävä höyryn lämpöenergia käytetään tehokkaasti moneen kertaan. Yksiköt nimetään numeroilla, esim. 1–6, tosin 1-yksiköitä on yleensä useampi, esim. 1A–1C. Nimeämisjärjestys perustuu syötettävän höyryn tarpeeseen, eli ensimmäinen yksikkö vaatii eniten höyryä ja viimeinen vähiten. Ensimmäiseen yksikköön syötettävä höyry on tuorehöyryä, jonka paine ja lämpötila ovat korkeimmat. (KnowPulp 2023.) Tarve johtuu mustalipeän kiehumispisteennoususta, jonka arvo nousee kuiva-ainepitoisuuden kasvaessa. Kiehumispisteennousu kuvaa nesteen kiehumispistettä verrattaessa veden kiehumispisteeseen. Esim. 70 % kuiva-ainepitoisuuden omaava mustalipeä kiehuu 18 °C korkeammassa lämpötilassa kuin vesi, paineen ollessa vakio. (Parviainen, Jaakkola & Nurminen 2008, 39.) Mustalipeän sisältämä vesi kiehuu ja höyry poistuu yksikön huipun poistoputkesta seuraavan yksikön sisään (KnowPulp 2023). Seuraavassa yksikössä edelliseltä yksiköltä saatu toisiohöyry pystyy höyrystämään vettä tässäkin yksikössä vallitsevan paineen ollessa pienempi ja täten haihduttamiseen tarvittava lämpötila on pienempi sekä paineen että edellä mainitun kiehumispisteennousun takia.



Kuvio 2. Yksi- ja kolmivaiheisen mustalipeän haihdutuksen periaate (Parviainen ym. 2008, 42)

Monivaihehaihduttamon vaiheiden tehokkuutta havainnollistaa kuvio 2. Kuvioista nähdään, että haihduttimien lämpöpinta on jaettu kahteen osaan, höyry- ja lipeäosaan. Ainoastaan ensimmäisiin yksiköihin (1A, 1B, jne.) syötetään tuorehöyryä, joka on yleensä matala- ja/tai välipainehöyryä (mt.). Lämpöpintojen erottamisen ansiosta tuorehöyry ei ole kosketuksissa lipeän kanssa, joten sen lauhtuessa saadaan talteen puhdasta lauhdetta. Seuraaville yksiköille kulkeva höyry on lipeän vedestä höyrystynyttä höyryseosta, sekundärihöyryä, josta muodostuu lauhtuessaan sekundääri- tai likaislauhdetta. Jos haihduttamalla käytettäisiin vain yhtä haihdutinyksikköä, saataisiin kilosta (kg/s) tuorehöyryä kilo lipeästä haihdutettua sekundärihöyryä. Jos yksiköitä on kaksi, saadaan kilosta tuorehöyryä kaksi kiloa sekundärihöyryä. Määrät ovat teoreettisia, sillä muun muassa lämpöväiöiden takia haihdutuskapasiteetti on oikeasti alhaisempi. (Parviainen ym. 2008, 42–43.)

Haihdutinyksiköitä on monia erityyppisiä, mutta nykyisin käytetään yleensä joko putkia tai lamelleja sisältäviä "falling-film" -tyyppin yksiköitä. Idea ja nimitys perustuu siihen, että lipeä haihduttimessa valuu alaspäin lämpöpinnolla. Lamellilämmönvaihtimia hyödyntävissä haihdutinyksiköissä lipeä valuu lamellien ulkopinnoilla höyryn virratessa lamellien sisällä. Haihdutinyksiköiden rakenne vaihtelee hieman sen mukaan, miten poistolauhteita halutaan käsitellä. Sellutehtaissa, joissa lipeä haihduttaessa vapautuu metanolia ja syntyy likaislauhdetta, on suositeltavaa käyttää haihdu-

tinyksiköitä, joilla lauhteiden erotus puhtaampiin ja likaisempiin jakeisiin onnistuu. Tällöin Parviaisen ja muiden (2008) mukaan höyry syötetään yksikön alaosan lamellipakettiin, mikä ylöspäin virtatessaan puhdistaa alas valuvaa lauhdetta. Puhtaampi lauhde, sekundäärilauhde, poistetaan yksikön alaosasta ja likaisempi, likaislauhde, poistetaan yksikön yläosasta. Höyryn kiehuttamasta lipeästä haihtunut höyry ja hajukaasut nousevat yksikön yläosan pisananerottimelle, jossa lipeäpisarot erotetaan höyrystä. Pisananerotuksella saadaan yksiköstä talteen puhtaampaa sekundäärihöyryä ja -lauhdetta. (Mts. 48–49.)

Monivaihehaihduttamossa höyry ja mustalipeä voivat virrata samaan tai käänteisiin suuntiin (Mts. 45). Muun muassa Äänekosken tehtaalla käytetään käänteistä virtausmenetelmää. Mustalipeä virtaa siis viimeiseltä yksiköltä ensimmäiselle, kun taas höyry virtaa ensimmäiseltä viimeiselle yksikölle. Lipeä ei kuitenkaan virtaa suoraviivaisesti yksiköiden läpi, vaan sitä pitää tai ainakin kannattaa käsitellä hieman haihdutusprosessin aikana. Myös tehokkaampaa haihdutusta varten pesulipeää voidaan esikäsitellä sekoittamalla se esimerkiksi 2-yksiköltä saatavan lipeän kanssa säiliössä syöttölipeäksi. Näin viimeiseen haihdutinyksikköön syötettävä mustalipeä saadaan jo valmiiksi 18–22 prosentin kuiva-ainepitoisuuteen, pesulipeän 15–16 prosentin sijasta. (KnowPulp 2023.)

Mustalipeän ominaisuudet vaihtelevat hieman kuitulinjalla käytettävän puulajin mukaan. Etenkin havupuun käyttö vaikuttaa suuresti myös haihduttamon toimintaan. Tämä johtuu siitä, että havupuulajit sisältävät paljon suopaa, joka monimutkaistaa haihdutusprosessia. Toisaalta suopa on sivutuotteena valmistettavan mäntyöljyn raaka-aine ja sen onnistunut talteenotto on taloudellisista syistä tärkeää. Kun mustalipeää on haihdutettu parissa yksikössä, se johdetaan välilipeäsäiliöön, jossa sille tehdään suovanerotus. Suopa on tiheydeltään kevyempää kuin lipeä, joten suopa nousee pinnalle. Suopa erotetaan lipeästä kuorimalla se niin, että pinnan noustessa tarpeeksi korkealle, ylikaatoputki kuljettaa suopaa suovankeräyssäiliöön. (Mt.)

Suovanerotuksen jälkeen välilipeä syötetään seuraavaan yksikköön ja haihdutusprosessi jatkuu. Mustalipeään voidaan myös sekoittaa soodakattilasta poistettua tuhkaa, joka nostaa entisestään sen kuiva-ainepitoisuutta. Tuhkan sekoitus suoritetaan ennen haihdutusprosessin kannalta viimeistä yksikköä ja se varastoidaan vahvamustalipeäsäiliöön. Ensimmäisen yksikön (1A) jälkeen

mustalipeä on valmista poltettavaksi soodakattilassa ja sen kuiva-ainepitoisuus on 80–85 %. Tätä lipeää kutsutaan polttolipeäksi. (Mt.)

#### 2.1.4 Vierasaineiden poisto

Sellutehtaiden kemikaalikierrot sisältävät monia kemikaaleja. Prosesseihin kulkeutuu kuitenkin suuri määrä myös muita kemikaaleja, joita näissä ei tarvita. Osa näistä ei itsessään aiheuta ongelmia prosesseissa, vaan ne ovat inerttikemikaaleja ja kierroissa vain ylimääräistä kuormaa. Osa kemikaaleista ovat kuitenkin haitallisia kemikaalikierrossa ja ne halutaan poistaa prosesseista. Näiden niin kutsuttujen vierasaineiden poistaminen vain tähän tarkoitukseen suunnitelluilla laitteilla on nykyaikainen ilmiö. Tämän taustalla ovat tiukentuneet tavoitteet ympäristöpäästöissä sekä tehtaiden kiertojen tehokkaampi sulkeminen, joiden takia vierasaineiden poisto ei onnistu enää ilman siihen tarkoitettuja laitteita tai menetelmiä. Ennen vierasaineet poistui kierroista tehokkaammin muun muassa suurempien pesuhäviöiden ja ulospuhallusten kautta. (KnowPulp 2023.)

Lipeäkierron vierasaineita ovat muun muassa kalium, kloori, alumiini ja pii. Ne liukenevat valkolipeään ja kulkeutuvat valkolipeään valmistuksesta sellun keiton kautta haihduttamolle. Tuhkakierroin sulkemisen mahdollistamiseksi sellutehtailla soodakattilan tuhkaa sekoitetaan haihduttamon vahvamustalipeään, joka on yksi osatekijä polttolipeän korkean kuiva-ainepitoisuuden (80–85 %) saavuttamisessa. Menetelmä kuitenkin kasvattaa vierasaineiden pitoisuutta mustalipeässä entisestään, jonka vuoksi tuhkasta on alettu poistaa näitä haitallisia komponentteja. Etenkin klooria ja kaliumia halutaan poistaa lipeästä, sillä ne aiheuttavat tukkeumia, korroosiota ja lentotuhkan sulamispisteen laskua soodakattilalla. (Mt.) Kaikkea klooria ja kaliumia ei ole mahdollista eikä myöskään tarvetta poistaa, vaan tavoitteena on saada niiden pitoisuudet turvalliselle tasolle soodakattilaa ajatellen (Haihduttamon käyttö- ja huolto-ohje 2016).

Kaliumia ja klooria poistetaan muun muassa kloorinpoistolaitoksen avulla. Myös ARC-laitoksena (Ash ReCrystallization) tunnetulla osaprosessilla puhdistetaan tuhkaa uudelleen kiteyttämällä sitä. Osa soodakattilan sähkösuodintuhkasta johdetaan tuhkaruuvien kautta tuhkan liuotussäiliöön, jossa se liuotetaan sekundäärilauhteeseen niin, että koko muodostuva liuos on nestemäistä. Liuos johdetaan haihduttamalla sijaitsevan ARC-laitoksen kiteyttimeen, jossa liuosta (uudelleen) kiteytetään takaisin tuhkaksi. Kiteytin on periaatteeltaan haihdutinyksikön tapainen paineastia, jossa tuhkaliuosta kierrätetään ja nestettä haihdutetaan, jolloin liuokseen alkaa muodostua myös kiinteitä

komponentteja, tuhkakiteitä. Tuhkaliuos johdetaan kiteyttimeltä selkeyttimeen, jossa pyritään mahdollisimman tehokkaasti erottamaan neste tuhkakiteistä. Näin saadaan poistettua tuhkasta neste, joka sisältää tuhkan kloori- ja kaliumkomponentit. Kiteet pumpataan tuhkalingolle, jossa ne pestään ja tuhka pudotetaan lingolta tuhkasekoitussäiliöön ja ohjataan sen kautta vahvalipeäsäiliöön. Puhdistettu tuhka on lähes kokonaan natriumsulfaattia ja -karbonaattia. (Mt.)

## **2.2 Soodakattila**

### **2.2.1 Soodakattilan tehtävät**

Soodakattila on tärkeä osa sellutehtaiden tuotannon ja taloudellisen kannattavuuden tukija, ja sitä kutsutaankin usein sellutehtaan ”sydämeksi”. Soodakattilan tehtävänä on kemikaalien regenerointi siten, että niitä voidaan hyödyntää uudelleen keittoprosessissa. Tähän regenerointiin lukeutuu etenkin natriumsulfaatin muuttaminen hapettomaksi natriumsulfidiksi. Tämän lisäksi soodakattilan muihin tehtäviin kuuluu sähkön ja höyryn tuottaminen tehtaalle. Soodakattilalla saadaan käytännössä aina tuotettua sähköä yli tehtaan oman tarpeen ja ylimääräinen sähkö myydään eteenpäin. (KnowPulp 2023.)

Haihduttamolta saatavaa polttolipeää poltettaessa aiemmin luvussa mainitut keittokemikaalit vapautuvat lipeästä ja ne otetaan talteen jatkokäsittelyä varten. Polttoaineen orgaanisen aineen palaessa vapautuvaa lämpöä otetaan talteen siirtämällä se kattilaveteen, jota kiehuttamalla saadaan tuotettua höyryä tehtaan moniin tarpeisiin. (Mt.) Puupohjaisen mustalipeän hyödyntäminen soodakattilan polttoaineena tukevat myös tehtaan omavaraisuutta sekä ympäristöystävällisyyttä.

### **2.2.2 Soodakattilan rakenne**

Tulipesä on nelikulmainen, korkea kattila, jonka seinät koostuvat lukuisista rinnakkaisista putkista. Kattilan yläosassa sijaitsee katosta roikkuvat tulistimet ja niitä lämpösäteilyltä suojaavat verhoputket. Höyrylieriö sijaitsee erillään kattilan yläpäässä. Kattilaosan jälkeen löytyvät syöttöveden esilämmittimet eli ekonomaiserit tai ekot. Myös palamisilmalle on yleistä käyttää esilämmitintä, jota kutsutaan luvoksi. Soodakattiloista löytyy myös tulipesän pohjalta sulakouru, jonka kautta lipeän poltosta jäljelle jäänyt sula johdetaan liuotinsäiliöön. (KnowPulp 2023.)

Soodakattilan rakenne muistuttaa siis paljon tavanomaista höyrykattilaa, jonka polttoaineena käytetään fossiilisia polttoaineita. Soodakattilan ero höyrykattiloihin on tyypillisesti se, että soodakattilan käyttölämpötila on alhaisempi. Soodakattiloiden päänhöyryn lämpötila on tyypillisesti noin 480 °C, höyrykattiloissa 540 °C. Syitä valitulle alhaisemmalle lämpötilalle ovat parempi korroosion ehkäisy, korkeampi käytettävyys sekä halvempien materiaalien käytön mahdollistaminen. Merkittävin muutos nykyisten soodakattiloiden rakenteessa on ollut 1990-luvulla yleistynyt siirtymä kaksilieriörakenteesta yksilieriöiseen. Yksilieriörakenteen tuomia etuja ovat muun muassa suurempi paineensietokyky ja kapasiteetti sekä luotettavampi vedenkierto. Se on myös turvallisempi ja sen käytettävyys on paremmalla tasolla kuin kaksilieriökattilalla, jonka rakenteelliset ominaisuudet aiheuttivat tukkeutumista ja likaantumista. (KnowPulp 2023; Vakkilainen 2008, 87–89.)

### 2.2.3 Polttoprosessi

Polttolipeä syötetään soodakattilan tulipesään lipeäsuuttimilla. Suuttimet on sijoitettu tasaisesti rinnakkain kattilan jokaiselle seinälle tyypillisesti noin 6 metrin korkeudelle tulipesän pohjasta. Lipeä halutaan ruiskuttaa tulipesään pieninä pisaroina, mikä mahdollistetaan valitulla lipeäsuuttimella. Suutintyyppejä on erilaisia, mutta yleisin niistä on lusikkasuutin. Lipeäruiskun virtaus kohdistetaan optimaalisessa kulmassa lusikkamaista suutinta vasten, mikä hajottaa lipeävirran pieniksi, keskiarvohalkaisijaltaan noin 2–3 millimetrin kokoisiksi pisaroiksi. (Mts. 98.) Pisarakoon hallinta on tärkeää, koska sen avulla ehkäistään pisaroiden päätymistä savukaasujen mukana tulistimille. Lipeäpisarat lämpöpinnoille päästessään tukkivat kattilaa ja niiden sisältämä rikkivety voi aiheuttaa korroosiota tulistimissa. (KnowPulp 2023.)

”Pisarapolton” ideana on, että lipeäpisarasta haihdutetaan vettä tulipesän lämpötilan avulla ennen kuin pisara ehtii tippumaan kecoon. Pisara paisuu hieman lähes välittömästi kattilaan saapuessaan ja se kuivuu noin 95 %:n kuiva-ainepitoisuuteen. (Vakkilainen 2008, 99–100.) Kuivumisen jälkeen tapahtuu pyrolyysi, jossa osa lipeäpisanan orgaanisista aineista alkaa palamaan. Pyrolyysivaiheessa pisarasta vapautuu orgaanisia yhdisteitä sekä rikki-, natrium- ja typpikomponentteja eri kaasujen muodossa. Nämä muodostuneet yhdisteet palavat heti vapautuessaan pisanan ympärillä saaden pisanan paisumaan entisestään, tilavuudeltaan jopa noin 20–30-kertaiseksi. Pyrolyysin jälkeen pisara tippuu kecoon, jossa jäljelle jäänyt orgaaninen aines palaa ja samalla tapahtuu kemikaalien

regeneroinnin kannalta tärkeä rikin pelkistyminen. Rikin pelkistyessä happi vapautuu natriumsulfaattista hiilimonoksidin tai -dioksidin muodossa jättäen jäljelle haluttua natriumsulfidia. Tätä viimeistä polton osaprosessia nimitetään kaksin (COx) palamiseksi. (KnowPulp 2023.)

Kaksin palamisen jälkeen jäljelle jää sulaa, joka sisältää lähinnä natriumsulfidia, -karbonaattia sekä pelkistymätöntä -sulfaattia (Vakkilainen 2008, 102). Sula pyritään poistamaan nopeasti, ettei sulfidin hapettumisen estävä hiili pala loppuun. Erittäin kuuma sula johdetaan tulipesän pohjalta vesijäähdytteisten sularännien avulla liuotussäiliöön. Sulan sisällön arvioinnin avulla voidaan mitata soodakattilalle tärkeää reduktioastetta, joka kuvaa natriumsulfidin määrää -sulfidin ja -sulfaatin summaan verrattuna. Moderneissa soodakattiloissa reduktioasteessa päästään noin 95 %:n luokkaan. (KnowPulp 2023.)

## **2.3 Kaustisointi ja meesanpoltto**

### **2.3.1 Kaustisoinnin ja meesanpolton tehtävät**

Kaustisointi on sellutehtaassa tärkeä, sillä sen avulla soodakattilasta talteen otetut kemikaalit hyödynnetään valmistamalla niistä uutta lipeää keittämölle. Kaustisoinnin tehtävänä on tuottaa mahdollisimman runsas määrä kuumaa ja vahvaa valkolipeää, mahdollisimman alhaisella natriumkarbonaattipitoisuudella. Tämän lisäksi kaustisoinnin toisena tehtävänä on ottaa talteen prosessissa käytettävää kalkkia ja erottaa sekä puhdistaa se meesauunissa polttoa varten. (Arpalahti, Engdahl, Jäntti, Kiiskilä, Liiri, Pekkinen, Puumalainen, Sankala, Vehmaan-Kreula, Halinen, Kapanen, Kottila, Lankinen, Lintunen, Näsänen, Toropainen & Parviainen 2008, 144.)

Meesanpolton tehtävänä on kalkin regenerointi, joka tarkoittaa meesan eli kalsiumkarbonaatin muuttamista takaisin poltetuksi kalkiksi eli kalsiumoksidiksi. Näin kaustisointia varten saadaan tuotettua lisää valkolipeän valmistukseen tarvittavaa kalkkia. Kaustisointi ja meesanpoltto muodostavatkin keskenään tehtaan sisäisen kalkkikierron. (KnowPulp 2023.)

### **2.3.2 Viherlipeän valmistus ja käsittely**

Kaustisointiin kuuluu monta osaprosessia. Ensimmäinen näistä on viherlipeän valmistus ja käsittely. Viherlipeää muodostuu soodakattilalta sulaa vastaanottavassa liuotussäiliössä, johon lisätään

sulan lisäksi prosessista palautettua laihavalkolipeää. Laihavalkolipeän käytöllä minimoidaan veden lisäämisen tarve. Liuotussäiliö sisältää siis lähinnä natriumkarbonaattia, -sulfidia, -sulfaattia sekä -hydroksidia (lipeä), jotka yhdessä muodostavat viherlipeää. Viherlipeän väkevyyttä mitataan kokonaisalkalin (TTA) arvolla, mikä on Arpalahden ja muiden mukaan tyypillisesti 140–180 g NaOH/l. Tätä suurempi kokonaisalkalin arvo voi aiheuttaa ongelmia muun muassa sakan erotuksessa. (Arpalahti ym. 2008, 134.)

Liuotussäiliöstä viherlipeä pumpataan tasaussäiliöön, jossa sen ominaisuudet, kuten tiheys ja lämpötila, saadaan tasoitettua. Seuraavaksi viherlipeä puhdistetaan erottamalla siitä sakka, joka on peräisin soodakattilan sulasta. Sakka voidaan poistaa käyttämällä joko suodatinta tai selkeytintä ja on tärkeää, että se saadaan poistettua tehokkaasti, sillä sakka pilaa tuotteen. Sakka pestään, kuivataan ja poistetaan prosessista. Pesuvesi ja sakasta irtoava natrium sekoittuvat laihalipeäksi, joka johdetaan edellä mainittuun liuotussäiliöön. Viherlipeä pumpataan viherlipeäjähdyttimeen, jossa sitä jäähdytetään kaustisointia varten. (Mts. 135–140.) Alipaineisessa jäähdyttimessä viherlipeää kiehutetaan, jolloin siitä saadaan poistettua vesihöyryä (Mts. 146). Viherlipeän käsittelyllä on sen puhdistamisen lisäksi tarkoitus säätää kokonaisalkalin arvoa ennen kaustisointia tasolle 165–175 g NaOH/l. Korkeampaa kokonaisalkalin arvoa ei haluta, koska silloin kaustisointivaiheessa muodostuu pirsoniittia, joka voi aiheuttaa tukoksia. (KnowPulp 2023.)

### 2.3.3 Kaustisointiprosessi

Jäähdytetty viherlipeä pumpataan kalkin sammutukseen. Sammuttimeen lisätään viherlipeän lisäksi meesakalkki- tai ostokalkkisiilosta saatavaa poltettua kalkkia ja tavoitteena on sekoittaa aiheet keskenään varsinaista kaustisointiprosessia varten. Sammuttimessa poltettu kalkki eli kalsiumoksidi reagoi viherlipeän veden kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia eli sammutettua kalkkia. Kaustisointireaktio alkaa jo sammuttimessa ja siinä sammutinreaktion kalsiumoksidi reagoi viherlipeän natriumkarbonaatin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia eli meesaa ja natriumhydroksidia eli valkolipeää. Viherlipeän jäähdytys ennen sammutusreaktiota on tärkeää, sillä eksotermisessä reaktiossa vapautuva lämpö voi aiheuttaa kiehumista sammuttimessa. Toisaalta lämpötila ei saa olla liian alhainenkaan, jotta reaktion nopeus säilyy riittävänä. (Arpalahti ym. 2008, 145–146.)

Sammuttimesta kalkkimaito (meesa ja valkolipeä) johdetaan kaustisointisäiliöihin. Kaustisointisäiliöiden tarkoituksena on varastoida kalkkimaitoa niin pitkään, kunnes kaustisointireaktio on valmis eli saavuttanut tasapainon. Sammuttimilta tullessaan reaktiosta on jäljellä enää kolmasosa, mikä kuitenkin vie eniten aikaa. Säiliöitä on muutama sarjaan kytkettyinä ja kaustisointiaika vaihtelee valkolipeän erotusmenetelmän mukaan puolestatoista tunnista kolmeen tuntiin. Kalkkimaito virtaa ylhäältä alaspäin monikammioisen säiliön läpi, jonka jälkeen se pumpataan seuraavaan säiliöön ja viimeiseltä säiliöltä valkolipeän erotukseen. (Mts. 147–148.)

### **2.3.4 Valkolipeän erotus ja meesan käsittely**

Valkolipeän erotuksen tarkoituksena on erottaa valkolipeä ja meesa toisistaan. Valitulla erotusmenetelmällä pyritään suorittamaan erotus niin, että saataisiin puhdasta valkolipeää ihanteellisesti ilman yhtään jäännösmeesaa. Erotusmenetelmänä käytetään joko selkeyttämistä tai suodattamista, kuten viherlipesän sakan erottamisessakin. Yleisesti käytetty menetelmä tänä päivänä on paineistettu kiekkosuodatin, mutta myös muita erotuslaitteita käytetään, kuten sukka- ja rumpusuodattimia. (Arpalahti ym. 2008, 151.) Valkolipeästä erotettu meesa johdetaan meesan pumpaussäiliöön, jossa se sekoitetaan veden kanssa nestemäiseksi ja pumpataan varastosäiliöön (KnowPulp 2023).

Tehokasta meesanpolttoa varten meesan varastosäiliöstä pumpattava kalkkimaito kuivataan ennen polttoprosessia. Kalkkimaito myös pestään, sillä meesa sisältää vesiliukoisia alkali- eli natriumyhdisteitä, jotka voivat aiheuttaa muun muassa tukoksia meesauuniin. Pesu ja kuivaus voidaan suorittaa yhtä aikaa käyttämällä meesasuoatinta, joka nykyisin toteutetaan käyttämällä kiekko- tai rumpusuodatinta. (Arpalahti ym. 2008, 154–155.)

Suodattimen jälkeen meesan kuiva-ainepitoisuus on noin 75–80 %. Meesa halutaan kuitenkin vielä kuivemmaksi, lähes 100-prosenttiseksi kuiva-ainepitoisuudeltaan. Tähän päästään käyttämällä lämpökuivausta, joka nykyisin toteutetaan uunia edeltävällä kuivausosalla. Meesasuoattimen jälkeinen syöttöruuvi syöttää meesaa uunin syöttöpään savukaasukanavaan ja savukaasuvirran mukana sykloniin. Osa kosteammasta meesasta tippuu kuitenkin kanavaa pitkin suoraan uunin syöttöpäähän. (KnowPulp 2023.) Kuumat savukaasut (500 °C) kuivaavat meesan, joka ohjataan

syklonin pohjalta meesauunin syöttöruuville. Savukaasut jatkavat matkaansa syklonin huipulta kanavan kautta sähkösuodattimelle, jossa kaasut puhdistetaan. Savukaasujen mukana kulkeutunut jäännösmeesa ohjataan suodattimen pohjalta uunin syöttöruuville. (Arpalahti ym. 2008, 164–165.)

### 2.3.5 Meesanpoltto

Meesan kuivaamisen jälkeen on aika regeneroida se takaisin kalsiumoksidiksi, poltetuksi kalkiksi. Meesauuni on pitkä (yleensä 100–140 m) putki, joka pyörii tyypillisesti 1–1,7 kierrosta minuutissa. Uuni asennetaan hieman kallelleen vaakatasoon nähden, niin, että syöttöpää on polttopäätä ylemmänä. Meesa saadaan siis kuljetettua eteenpäin uunissa kaltevuuden sekä pyörimisen ansiosta. (Arpalahti ym. 2008, 163–164.) Savukaasut sen sijaan virtaavat uunissa vastavirtaan, eli polttopäästä syöttöpäähän (Mts. 161). Suurten käyttölämpötilojen vuoksi uunin eristämiseen käytetään tiilivuorausta. Meesauunin polttopään keskivaiheilla on poltin, jolla uunin polttoilmaa lämmitetään. Polttimessa voidaan hyödyntää polttoaineena muun muassa sellutehtaan sivutuotteinakin saatavaa metanolia tai mäntyöljyä. (KnowPulp 2023.)

Kalkin regenerointi uunissa tapahtuu yksinkertaisesti lämmittämällä palamisilma tarpeeksi suureen lämpötilaan, jotta kalsinointireaktio tapahtuu. Uunin syöttöpäässä meesa vielä kuivuu, kun savukaasun (500 °C) lämpöä siirtyy siihen konvektiolla. Kuivausta lukuun ottamatta lämmönsiirto tapahtuu uunissa säteilemällä. Meesauunin keskellä sijaitsevassa polttovyöhykkeessä (n. 1100 °C) polttimella kuumennettu savukaasuvirta muuttaa lämpöenergian avulla kalsiumkarbonaatin kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Tämä kalsinoitumisreaktio alkaa jo noin 800 °C:n lämpötilassa, mutta korkeampi lämpötila nopeuttaa prosessia. Korkeampaa lämpötilaa käytetään myös uunin huonon lämmönjohtavuuden takia. (Arpalahti ym. 2008, 163–164.) Polttoprosessi ei ole täydellinen eikä sitä halutakaan sellaiseksi, sillä yksi kalkin laatukriteeri on jäännöskarbonaatin määrä, joka halutaan tasolle 1–3 % (KnowPulp 2023). Lisäksi Arpalahden ja muiden (2008, 173) mukaan alhaisempi jäännöskarbonaattipitoisuus tekee kalkista kovempaa ja kaustisoinnissa huonommin reagoivaa sekä polttoprosessi uunissa vaatii korkeampaa reaktiolämpötilaa.

Meesan kalsinoimisen jälkeen palamistuotteena saatu kalkki jäähdyytetään polttopään sektori- tai satelliittijäähdyttimessä. Uunin palamisilma johdetaan sektorijäähdyttimen läpi uunin polttopäähän savukaasupuhaltimen avulla. Jäähdyttimessä kuuma kalkki lämmittää ilmaa, jolloin mahdollistetaan sekä palamisilman esilämmitys että kalkin jäähdytys samanaikaisesti. (Mts. 166.) Kalkki

poistetaan jäähdyttimen purkauspäässä raekoon perusteella joko seulalevyjen tai kalkin pudotuskuilun ja murskaimen kautta kalkkikuljettimelle ja lopulta meesakalkkisiiloon. Koska meesan polttoprosessista saatava kalkin määrä ei vastaa syötetyn meesan määrää, kaustisointia varten täytyy kalkkia hankkia muualtakin. Tämä ”vaje” korvataan ostokalkin eli ostetun valmiin kalsiumoksidin avulla. (KnowPulp 2023.)

## **2.4 Biotuotetehtaan sivutuotteet**

### **2.4.1 Tärpätti ja mäntyöljy**

Tärpätti on yksi sellutehtaan helpoimmin syntyvistä sivutuotteista, sillä sen muodostavia pihkasta haihtuvia aineita, terpeenejä, saadaan talteen havuhakkeen höyrytys- ja keittovaiheessa. Terpeenikaasut lauhdutetaan ja tuotteena saadaan raakatärpättiä. (KnowPulp 2023.) Tärpättiä saadaan myös erottamalla sitä metanolin nesteyttämiseen käytettävästä likaisesta lauhteesta tärpättidekantterissa sekä kuorimalla sitä likaislauhdesäiliön sisältämän lauhteen pinnasta säiliön tärpätti-osaan (Haihduttamon käyttö- ja huolto-ohje 2016). Sellutehtaat eivät yleensä jalosta tärpättiään, vaan raakatärpätti myydään sellaisenaan eteenpäin jalostettavaksi (KnowPulp 2023).

Mäntyöljy on yksi taloudellisesti tärkeimmistä sellutehtaan sivutuotteista. Mäntyöljyä tuotetaan suovasta tai saippuasta, jota saadaan havu- ja koivupuun pihkan uuteaineena. Sulfaattikeittoprosessissa pihkan sisältämät rasvat ja hartsihapot reagoivat keitossa käytetyn nesteen kanssa aiheuttaen niiden saippuoitumisen. Suopa (saippua) liukenee lipeään, joka johdetaan keittoprosessista haihduttamolle haihdutettavaksi. Veden haihtuessa lipeästä, lipeän sisältämä suopa erottuu sen pinnalle paremmin. Suopaa erotetaan lipeästä muutamaankin otteeseen eri vaiheiden mustaliipeäsäiliöissä (esim. laihalipeä- ja välilipeäsäiliö), joissa suopa kuoritaan lipeän pinnalta ylikaatona. Lipeän kuiva-ainepitoisuus vaikuttaa suovan erotukseen, jonka vuoksi sitä kuoritaan yleensä sekä laiha- että välilipeäsäiliöistä. (Mt.)

Suopaa palstoitetaan rikkihappoa käyttämällä. Huonosaantoisen suovan palstoitukseen tarvitaan enemmän rikkihappoa, joten suovan mustaliipeä-, kalsium- ja kuitupitoisuudet pyritään pitämään hallitulla tasolla, sillä korkeat pitoisuudet huonontavat saantoa. Palstoituksessa suovan sisältämät hapot vapautuvat natriumkomponenteista rikkihapon vaikutuksesta ja vapautuneisiin happoihin

liukenee muita orgaanisia yhdisteitä. Reaktiotuotteena syntyy raakamäntyöljyä. Palstoitettu mäntyöljy sisältää paljon epäpuhtauksia, kuten rikkihappoa, kuituja ja ligniiniä, mitkä pitää pestä öljystä pois. Öljyn pesussa käytetään kuumaa vettä ja pesun jälkeen öljy kuivatetaan esim. seisottamalla sitä korkeassa lämpötilassa (110–120 °C) tai lämmittämällä sitä lämmönvaihtimilla. (Mt.)

#### **2.4.2 Rikkihappo ja muut sivutuotteet**

Rikkihappoa biotuotetehtaalla tuotetaan hyödyntämällä rikkiä sisältäviä hajukaasuja, joita saadaan muun muassa keittämöltä, suovan palstoituksesta ja klooridioksidin valmistuksesta (KnowPulp 2023). Äänekosken tehtaalla väkeviä hajukaasuja kerätään myös haihduttamon tyhjöjärjestelmästä, metanolilaitokselta ja likaislahdesäiliöstä (Haihduttamon käyttö- ja huolto-ohje 2016). Nykyaikainen tapa on johtaa väkevät hajukaasut rikkihappolaitoksen väkevien hajukaasujen polttouuniin. Kaasut poltetaan, sillä ne ovat märkiä kaasuja eli sisältävät myös jonkin verran nestettä ja polttoprosessissa niistä saadaan muodostettua rikkidioksidia (SO<sub>2</sub>). Rikkidioksidi hapetetaan rikki-trioksidiksi (SO<sub>3</sub>) katalyyttisessä muuntimessa katalyyttiaineen avulla. Rikkitrioksidi ohjataan savukaasujen lauhduttimeen, jossa se veden kanssa reagoi muodostaen kaasumaista rikkihappoa (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Lopuksi kaasumainen rikkihappo jäädytetään nestemäiseen olomuotoon, jonka jälkeen se on valmiina hyödynnettäväksi käyttökohteisiinsa. (KnowPulp 2023.)

Muita biotuotetehtaan sivutuotteita ovat biokaasu ja -pelletit, tuotekaasu sekä bioenergia. Bioenergialla viitataan soodakattilalla tuotettavaan sähköön ja tehdasintegraatin tuottamaan lämpöenergiaan, joiden ylimäärää tarjotaan muille lähiympäristön tehtaille ja asukkaille hyödynnettäväksi. Tehtaan tuottama lämpö ja sähkö ovat biopohjaisesti tuotettuja, sillä tehtaan energia tuotetaan käyttämättä fossiilisia polttoaineita. (Äänekosken biotuotetehdas n.d.)

Biokaasua ja -pellettejä tuotetaan tehtaan oman jätevedenpuhdistamon puupohjaisista lietteistä. Pellettejä voidaan hyödyntää voimalaitosten biokattiloissa ja biokaasua kulkuneuvojen polttoaineena. Tuotekaasua biotuotetehtaalla hyödynnetään vain omaan tarpeeseen mahdollistamaan tehtaan tuotanto käyttämättä fossiilisia polttoaineita. Sitä tuotetaan puunkäsittelyssä syntyvää kuorta kaasuttamalla. (Mt.)

### 3 Lauhteet

Lauhde on vesihöyrystä lauhdutettua vettä. Se on siis vettä, jonka olomuoto on muuttunut kaasusta nesteeksi. Lauhduttaminen voidaan toteuttaa esim. jäähdyttämällä ja/tai kasvattamalla höyryyn painetta. Kummallakin tavalla pyritään saamaan höyryyn lämpötila kiehumispisteeseen ja sen alapuolelle, jotta höyry lauhtuu nesteeksi ja myös pysyy sellaisena.

Sellutehtaalla höyryyn lauhdutus tehdään lämmönsiirtimissä, joissa virtaa esim. viileää raakavettä. Raakavesi on vesistöistä otettua vettä, josta on mekaanisella puhdistamisella erotettu mm. hiekka ja muut partikkelit. Raakavesi viilentää lämmönsiirtimeen johdettua höyryä, joka lauhtuu vedeksi. Tällaista lämmönsiirrintä kutsutaan lauhduttimeksi. Lauhduttimien jäähdytysvetenä käytettävä raakavesi johdetaan tehtaan lämmin- (n. 45–50 °C) tai kuumavesisäiliöön (n. 75–80 °C), sillä lauhdutusprosessi vapauttaa paljon lämpöenergiaa. Lauhduttimista poistuva lauhde on sen puhtauden mukaan joko primääri-, sekundääri- tai likaislauhdetta. Lauhduttimien jäähdytysaineena käytetään myös mustalipeää, jolloin lauhdutin toimii samalla myös lipeän esilämmittimenä. Esilämmitys on tärkeää tehokkaamman haihdutuksen saavuttamiseksi. (KnowPulp 2023.)

#### 3.1 Primäärilauhde

Primäärilauhde on lauhteista puhtainta ja täten myös arvokkainta. Primäärilauhdetta saadaan lauhduttamalla soodakattilalta saatavaa tuorehöyryä, joka on erittäin puhdasta, sillä soodakattilan kattilavesi on kemiallisesti puhdistettua. Tuorehöyryä lauhtuu haihduttamon ykkösyksiköissä, jotka ovat ainoat tuorehöyryä käyttävät haihdutinyksiköt. (KnowPulp 2023.)

Äänekosken biotuotetehtaalla primäärilauhdetta kerätään 1-yksiköiden lisäksi kahdesta muusta yksiköstä. 1-yksiköiltä saatava puhtaampi lauhde ohjataan ensin yksiköiden omiin pinta-astioihin. Pinta-astioissa säilytetään haluttu pinnankorkeus ja sen ylläpitämiseksi lauhdetta pumpataan astioista eteenpäin. Kahdelta toisiohöyryä käyttävältä yksiköltä primäärilauhdetta saadaan niiden erilisistä lamellipaketeista, joihin paisutetaan lauhdetta paisunta-astioista, joihin 1-yksiköiden primäärilauhteet on johdettu. Lauhde palautetaan yksiköiltä paisunta-astioiden jälkeiseen lauhdelinjaan ja kaikilta em. yksiköiltä kerätty lauhde päätyy lopulta yhteen paisunta-astiaan, josta lauhde johdetaan joko primäärilauhteena turbiinilaitokselle tai sekundäärilauhteena sekundääri-

lauhdesäiliöön. Toisiohöyryä käytettäessä tulee huomioida, ettei lauhteen puhtaudelle ole samantasaista taetta kuin tuorehöyryn kanssa. Tämän takia edellä mainitun kaltainen jaottelu puhtauden mukaan on tehty. Toisiohöyryn käytön vuoksi yksiköistä saatava lauhde voi olla liian likaista primäärilauhteeksi, jolloin johtokykymittauksen perusteella lauhde ohjataan sekundäärilauhdesäiliöön. (Haihduttamon käyttö- ja huolto-ohje 2016.)

### 3.2 Sekundäärilauhde

Sekundäärilauhdetta syntyy toisiohöyryn lauhtuessa nesteeksi. Toisiohöyryä käytetään kaikissa haihdutinyksiköissä 1-yksiköitä lukuun ottamatta ja se sisältää jonkin verran mustalipeästä haihtuneita orgaanisia yhdisteitä. Toisiohöyryn lauhtuessa nämä likaiset yhdisteet jäävät myös sekundäärilauhteeseen. (Parviainen ym. 2008, 41.) Sekundäärilauhteen puhtaus on kuitenkin sillä tasolla, että sitä voidaan hyödyntää prosesseissa sellaisenaan eikä sitä tarvitse ohjata jätevesiin tai puhdistaa esim. strippaamalla. Tehdaskohtaisesti on tyypillistä, että sekundäärilauhde jaotellaan eri ja-keiksi johtokyvyn perusteella. Tyypillinen nimeämisperiaate on esim. "A- ja B-lauhde" tai "1- ja 2-lauhde". Jotkut toimijat voivat myös pitää puhdistamista vaativaa likaisinta lauhdetta sekundäärilauhteena ja nimetä sen samalla periaatteella, esim. "C-lauhde". (KnowPulp 2023.) Tässä työssä periaate on se, että puhdistamista vaativaa lauhdetta kutsutaan likaislauhteeksi.

Äänekoskella sekundäärilauhteet on jaettu kahteen eri laatujaakeseen. Sekundäärilauhde 1 kerätään 1-yksiköiden jälkeisistä keskivaiheen haihdutinyksiköistä, sekundäärilauhde 2 viimeisistä yksiköistä ja pintalauhduksista. Sekundäärilauhdetta kerätessä yksiköstä saatava puhtaampi lauhde johdetaan paisunta-astiaan, jossa osa lauhteesta paisutetaan seuraavaan yksikköön ja osa seuraavaan paisunta-astiaan. Sekundäärilauhteen 1 keräyksessä käytetään myös kahta kanavastripperiä, joissa lauhde puhdistuu ennen sen johtamista yksikköön. Lopulta lauhdet pumpataan viimeisistä paisunta-astioista sekundäärilauhdesäiliöön 1 ja 2. Primäärilauhteen keruun tapaan myös sekundäärilauhteet voidaan tarvittaessa johtaa vuotolipeäsäiliöön. (Haihduttamon käyttö- ja huolto-ohje 2016.)

### 3.3 Likaislauhde

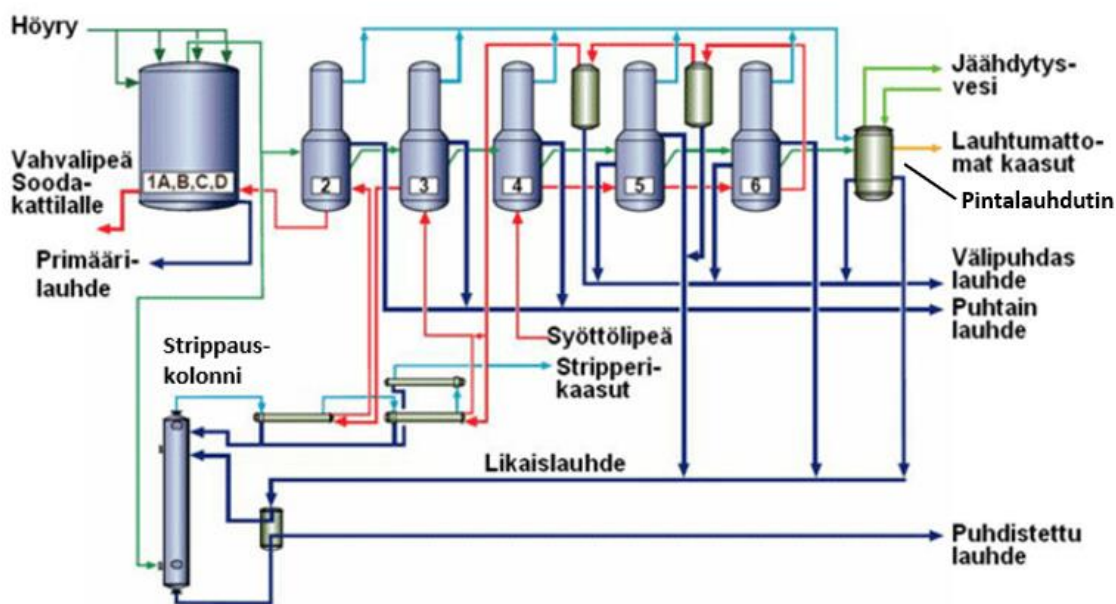
Likaislauhde sisältää sekundäärilauhteen tapaan mustalipeän orgaanisia yhdisteitä ja likaislauhdetta voidaankin pitää myös likaisena sekundäärilauhdejakeena. Erona sekundäärilauhteeseen on

se, että likaislauhde sisältää näitä likaavia aineita niin paljon, ettei sitä voida enää hyödyntää sellaisenaan prosesseissa. Tämä johtuu siitä, että likaislauhteeseen liuennut mustalipeä sisältää paljon terveydelle haitallisia aineita, kuten orgaanisia rikkiyhdisteitä, tärpättikomponentteja ja metanolia. Parviaisen ja muiden mukaan haihduttamalla ja keittämöllä syntyvän likaislauhteen metanolipitoisuus on noin 3000–6000 mg/l ja orgaaninen rikkiyhdistepitoisuus 250–500 mg/l. (Parviainen ym. 2008, 54–55.) Lauhteen johtokyvyn arvolla (mS/m) mitataan sen likaisuuden tasoa.

### 3.3.1 Likaislauhteen keräily haihduttamalla

Sellu- tai biotuotetehtaiden haihduttamoilla likaislauhdetta syntyy loppupään haihdutinyksiköissä, sillä höyryn virtaussuunta on ensimmäisiltä yksiköiltä viimeisiin päin. Lipeän virratessa vastavirtaan höyryn kanssa, loppupään yksiköiden lipeää ei ole käsitelty yhtä paljon kuin alkupäässä, joten näissä yksiköissä käsiteltävä lipeä sisältää eniten metanolia ja orgaanisia rikkiyhdisteitä. Haihdutusprosessissa veden lisäksi myös nämä yhdisteet haihtuvat likaisen hönkähöyryn muodossa.

## Tyypillinen 6-vaiheinen mustalipeähaihduttamo



Kuvio 3. Haihduttamon virtauskaavio (KnowPulp 2023)

Kuvio 3 havainnollistaa etenkin lauhteiden virtaamista haihduttamon yksiköissä ja muissa astioissa. Esimerkkikuvion haihduttamo on samankaltainen Äänekosken biotuotetehtaan haihdutta-

mon kanssa, jossa likaislahdetta muodostuu loppupään haihdutinyksiköiden integroiduissa jälkilauhduttimissa sekä yksiköiden erillisissä paisuntapaketeissa. Viimeiseltä haihdutinyksiköltä lauhduttamattomaksi jäänyt höyry ohjataan haihdutusjärjestelmän viimeiseen osaan, pintalauhduttimeen. Pintalauhduttimessa kaikki jäljelle jäänyt höyry lauhdutetaan nestefaasiin. Haihduttamon ajotilanteessa myös pintalauhduttimelta saatava lauhde on likaislahdetta. (Haihduttamon käyttö- ja huolto-ohje 2016.)

Kaikki haihdutinyksiköissä syntyvä likaislahde johdetaan edellä mainittujen yksiköiden jälkilauhduttimista ja paisuntapaketeista sekä pintalauhduttimelta likaislahteen paisunta-astiaan. Paisunta-astiassa likaislahde paisutetaan ja muodostunut hönkähöyry johdetaan kahden loppupään yksikön väliseen höyryputkeen, jossa höyry virtaa yksiköistä jälkimmäiseen. (Mt.) Hönkää hyödyntämällä saavutetaan alhaisempi höyrynkulutus, mikä taas parantaa höyryjärjestelmään liittyvää energiatehokkuutta (Energiatehokas höyry- ja lauhdejärjestelmä 2015).

Paisunta-astian likaislahdetta kerätään astian pohjasta pumppaamalla se joko likaislahde- tai vuotolipeäsäiliöön. Säiliön valinnan voi tehdä valvomosta käsin manuaalisesti tai käyttää automaattista asetusta, jossa automaatiojärjestelmä tekee säiliön valinnan likaislahteen mitatun johtokyvyn arvoon perustuen. Johtokykymittauksen ylittäessä asetetun raja-arvon, säiliövalintana on vuotolipeäsäiliö, sillä lipeän johtokyky on suurempi kuin lauhdeiden. Likaislahteen paisunta-astiassa ylläpidetään haluttua pinnankorkeutta pintasäädöllä, jossa säätöpiiri laskee astiaan sisään tulevan lauhteen määrää ja ohjaa pumpun pumppaustehoa niin, että pinnankorkeuden arvo pysyy halutussa asetusarvossa. (Haihduttamon käyttö- ja huolto-ohje 2016.)

Haihduttamalla sijaitsevaan likaislahdesäiliöön kerätään likaislahdetta haihdutinyksiköiden lisäksi myös muualta. Näitä lauhteen lähteitä ovat massatehtaan likaislahde, väkevien hajukaasujen keräilysteemi ja vesilukkoastia sekä laimeiden kaasujen pesuri. (Mt.)

### **3.3.2 Likaislahteen käsittely**

Likaislahdetta pitää käsitellä likaislahdesäiliössä sen sisältämän tärpätin takia. Säiliö on jaettu kahteen osaan tärpätinpoistoa varten. Nämä osat ovat suuri likaislahdeosa sekä tilavuudeltaan lauhdeosaan verrattuna todella pieni tärpättiosa. Tärpätinpoisto toteutetaan sellutehtaiden li-

peäsäiliöillekin ominaisella tavalla, kuorinnalla. (Haihduttamon käyttö- ja huolto-ohje 2016.) Tärpätti on tiheydeltään kevyempää nestettä (n. 900 kg/m<sup>3</sup>) kuin vesi (n. 1000 kg/m<sup>3</sup>) ja tämän vuoksi nousee säiliössä pinnalle (Tärpätti 2022). Likaislauhteen jäädessä tärpätin alapuolelle, voidaan tärpätti poistaa kuorimalla se ylikatona. (Haihduttamon käyttö- ja huolto-ohje 2016.)

Kuorinta on yksinkertainen menetelmä, jolla saadaan eri tiheydet omaavat jakeet erotettua toisistaan. Likaislauhteen tapauksessa tärpätin ja lauhteen erottuminen toisistaan tiheyden perusteella ei ole kuitenkaan täydellistä ja siksi pinnalta poistettava tärpättiosuus sisältää myös jonkin verran lauhdetta. Pinnan noustessa tarpeeksi korkealle likaislahdeosassa, alkaa tärpättiä sisältävää lauhdetta tulvimaan säiliön tärpättiosaan. Tärpättiosasta tärpättilauhdepumppu pumppaa tätä tärpättipitoista lauhdetta metanolilaitoksen tärpättidekantterille jatkokäsiteltäväksi. Molempien säiliön osien pintoja mitataan ja tärpätin kuorimiselle on tehty myös sekvenssi, joka ohjaa kuorintaprosessia automaattisesti. (Mt.)

### 3.4 Lauhteen puhdistaminen

Sellun valmistukseen liittyy suuri määrä erilaisia höyry- ja vesijakeita vaativia prosesseja esimerkiksi sellunkeittoon ja haihduttamiseen liittyen. Lauhteiden puhdistaminen on tärkeä osa sellutehtaan vesitaseen vähentämistä, kun lauhteita hyödynnetään prosessissa uudelleen jätevesiin johtamisen sijaan.

Lauhteen puhdistaminen strippaamalla noudattaa desorptioprosessia, joka on tunnetumman absorptioprosessin päinvastainen tapahtuma. Desorptio on erotusmenetelmä, jossa jokin aine siirtyy nesteestä kaasuun. Strippauksen periaate muistuttaa myös paljon tislauksprosessia, jossa kaksi toisiinsa liuenutta nestettä erotetaan toisistaan höyrystämällä helpommin haihtuva eli alhaisemman kiehumispisteen omaava neste kaasufaasiin, toisen aineen pysyessä nesteenä. Tässä tapauksessa nestefaasina säilyvä ”pohjatuote” on lauhdevesi ja höyryfaasiin muuttuva ”tisle” on lauhteeseen lienneet hajukaasukomponentit. (Pihkala 2018, 128–129.) Pihkalan määrittelemän tislauksen tavoin myös strippauksessa tisle eli kaasumaiset metanoli-, rikki- ja tärpättikomponentit lauhdetaan uudelleen nestemäiseksi (likaislahde), jotka palautetaan strippauskolonniin puhdistettavaksi. Osa kaasuista säilyy lauhtumattomina ja ne johdetaan edelleen lauhdutettaviksi ja lopulta metanolin nesteytykseen. Tästä tarkemmin luvussa 4.2.

Sekä tislausta että absorptiota ja täten myös strippausta voidaan toteuttaa käyttämällä pohja- tai täytekappalekolonneja. Molemmissa kolonneissa hyödynnetään höyryn ja nesteen vastavirtausta: neste syötetään kolonnin yläosaan ja se virtaa painovoiman mukaisesti alaspäin samalla, kun alaosaa syötetty höyry virtaa kolonnissa ylöspäin sisällä vallitsevan paine-eron takia. Tällöin faasien virtaussuunnat ovat alusta alkaen sekä optimaaliset että luonnolliset. Pohjakolonneissa neste johdetaan tasaisesti kolonnin vaakasuorille tasoille/kerroksille, joissa höyry läpäisee nestepinnan höyrystäen siitä helposti irtoavia komponentteja. Pohjakolonnit voidaan jakaa edelleen seulapohja- ja kellopohjakolonneiksi. Seulapohjakolonneissa kolonnin tasoissa on reikiä, joiden läpi höyry virtaa sellaisella virtausnopeudella ja paineella, ettei neste pääse virtaamaan reikien läpi. Kellopohjissa reikiin yhdistetään jonkinlainen kappale (esim. venttiili), joka estää nesteen pääsyn reikään ja höyry kierrätetään tämän kappaleen kautta nesteen pintaan kohtisuorasti. (Mts. 132–133.)

Täytekappalekolonneissa nestettä höyrystetään täyteainekappaleiden avustamana. Täytekappalekerroksia voi olla monia ja keskenään erilaisia samassa kolonnissa ja pienien kappaleiden kerroksessa kappaleet voivat olla hyvinkin epätasaisena kasana, jonka läpi neste ja höyry pääsevät kuitenkin virtaamaan kappaleiden muodon takia. Kappaleita on monia erimuotoisia, esim. reiällinen sylinteri ja niiden materiaalina käytetään syöpymistä kestäviä materiaaleja, kuten metallia, muovia tai keraamia. (Mts. 133–135.) Lauhteiden puhdistamiseen käytetään selluteollisuudessa lähinnä yksinomaan strippausta ja strippauslaitteena jonkinlaista pohjakolonnia.

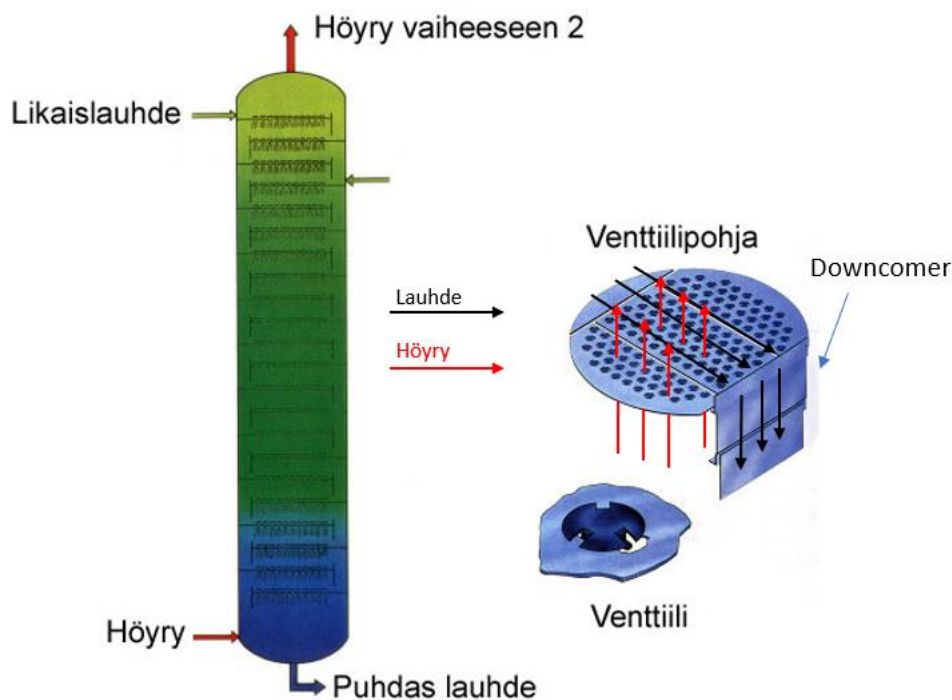
## **4 Strippauskolonni**

Likaislauhteen keräilyn jälkeen sen puhdistaminen tapahtuu haihduttamalla sijaitsevassa strippauskolonnissa. Strippauskolonni on korkea tornimainen painesäiliö, jossa likaislauhdetta puhdistetaan sekundäärilauhteeksi höyryn avulla. Toimeksiantajan haihduttamalla käytettävä strippauskolonni on venttiilipohjatyypinen. Se lukeutuu siis edellisessä luvussa mainittuun kellopohjakolonnien ryhmään.

### **4.1 Strippauskolonnin rakenne**

Kolonnin sisällä on monta venttiilipohjaista välitasoa, joiden läpi kolonnin alaosaan syötetty höyry virtaa ylöspäin kohti kolonnin huippua yläosaan syötetyn lauhteen valuessa vastavirtaan, kohti ko-

lonnin pohjaa. Höyry virtaa venttiilipohjien reikien läpi. Venttiilin päässä on hattu, joka estää nesteen pääsyn venttiiliin. Höyry kiertää tämän hatun kautta suoraan puhdistettavaa nestettä vasten lämmittäen sitä. Lauhdepinta alkaa kuplia höyryvirran poistuessa venttiilistä ja lauhteen lämmetessä siitä irtoaa sen lianaineita eli metanolia, tärpättikomponentteja ja rikkimolekyylejä. Irtoaminen tapahtuu termisen desorption ansiosta, kun edellä mainitut yhdisteet muuttuvat kaasufaasiin, lauhteen vesimolekyylien pysyessä nestemäisinä. Ilmiö johtuu irtoavien aineiden vettä alhaisemmista kiehumispisteistä. (Seader, Henley & Roper 2010, 208.)



Kuvio 4. Strippauskolonni ja venttiilipohja (KnowPulp 2023)

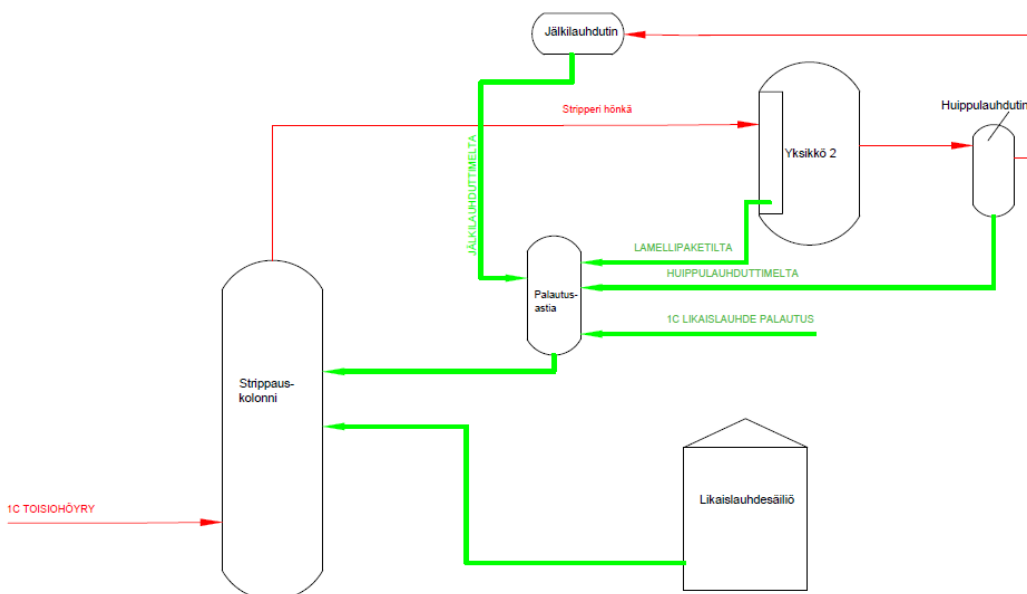
Lauhde kolonnissa jatkaa matkaansa venttiilipohjan toiselle puolelle, josta se valuu alemmalle pohjalle. Tämä niin sanottu ”downcomer” -osuus pohjien tai tasojen välillä on erotettu pystypaneelilla venttiilipohja -osuudesta niin, ettei kaasu pääse downcomeriin. (Mts. 208.) Prosessi etenee samalla tavalla venttiilipohjan tasolta seuraavalle, joita on yleensä noin 20–24 kappaletta noin 50 cm välein (Parviainen ym. 2008, 54). Venttiilipohjien lukumäärästä ja niiden välisistä etäisyyksistä voi päätellä, että kolonni on yli 10 m korkea, joka antaa osviittaa sen koosta. Kuvio 4 esittää strippauskolonnin ja venttiilipohjien rakennetta sekä lauhteen ja höyryn virtaamista niissä.

Strippauskolonnin pohjasta poistettua puhdistettua lauhdetta kutsutaan stripatuksi lauhteeksi ja sen puhtaus riippuu etenkin kolonniin syötettävän höyryn ja likaislauhteen suhteesta. Strippauskolonneille yleinen haluttu suhteen arvo on 20 % (höyryvirtaus jaettuna likaislahdevirtaus) tai yli, jotta metanolin erotuksen tehokkuus on 95 %. Tällöin stripattu lauhde on puhtaudeltaan sekundaarilauhteen 1 tasoista ja sen metanolipitoisuus on noin 100–300 mg/l. (Mts. 55.)

## 4.2 Puhdistusprosessi

Likaislahdesäiliöstä likaislahde pumpataan kuitusuodattimen ja esilämmittimen läpi strippauskolonniin. Likaislauhteen kuitusuodattimia on kaksi kappaletta rinnakkain asennettuna. Toinen kuitusuodattimista on varalla toisen suodattimen häiriötilanteiden, kuten tukkeutumisen tai vuodon, varalta. Näin on saatu parannettua syöttöjärjestelmän käyttö- ja toimintavarmuutta. Kuitusuodattimiin on liitetty paine-eromittaus, jolla suodattimien puhtautta voidaan seurata. Likaislauhteen esilämmittimessä hyödynnetään strippauskolonnista ulosvirtaavaa lämmintä, puhdistettua lauhdetta. (Haihduttamon käyttö- ja huolto-ohje 2016.)

Likaislahdesäiliön puhdistettava lauhde syötetään strippauskolonnin neljännelle venttiilipohjalle, ylhäältä alas laskettuna. Virtausta ohjataan joko virtaussäätimen tai likaislahdesäiliön pintaohjauksen avulla. (Mt.)



Kuvio 5. Strippauskolonnin likaislahdelähteet

Strippaukseen ohjataan likaislauhdetta myös muista lähteistä. Nämä lähteet ovat haihduttamon 2-yksikön stripperin lamellipaketti, 1C-yksikön palautusastia, strippauskolonnin huippulauhdutin sekä jälkilauhdutin (ks. kuvio 5). Stripperin lamellipaketin lauhtumattomat kaasut ohjataan huippulauhduttimeen ja huippulauhduttimessa lauhtumattomaksi jääneet kaasut ohjataan edelleen jälkilauhduttimeen. Jälkilauhduttimen lauhtumattomat kaasut, jotka ovat kaikista väkevimpiä hajukaasuja, ohjataan metanolikoloniin metanolin nesteytystä varten. Lauhduttimien ja lamellipaketin lauhtuneet kaasut eli likaislauhteet sekä yksikön 1C palautusastian likaislahde ohjataan likaislauhteen palautusastiaan. Astiasta ne pumpataan pintasäädön ohjaamana strippauskoloniin, ylimmälle venttiilipohjalle. Tästä palautuskierron likaislauhteesta osa johdetaan metanolilaitokselle. (Mt.)

Strippauskolonnin alaosaan syötettävä höyry on haihduttamon 1C-yksiköstä saatavaa toisiohöyryä. Tarvittaessa toisiohöyryn lisäksi koloniin voidaan syöttää tuoretta matalapainehöyryä tai pelkästään matalapainehöyryä. (Mt.) Seaderin ja muiden (2010, 213) mukaan strippauksen optimaalisissa olosuhteissa käyttöpainne on pieni ja -lämpötila suuri. Teoriaa tukee ainakin se, että toimeksi-antajan strippauskolonnissa hyödynnetään edellä mainittuja matalapainehöyryjä. Höyry virtaa kolonnissa ylös venttiilipohjien läpi ja kuljettaa mukanaan myös höyrystyneet hajukaasut. Kolonnissa väkevöityneet strippauskaasut poistetaan kolonnin huipulta ja poistoputki johtaa ne edellä mainittuun haihdutinyksikön stripperin lamellipakettiin. Strippauskolonnissa jo puhdistetun likaislahdeen hajukaasuista saadaan siis edelleen lauhdutettua likaislauhdetta, jota ohjataan uudelleen koloniin puhdistettavaksi. Tästä tulee edellisessä kappaleessa mainittu palautuskierron nimitys. (Haihduttamon käyttö- ja huolto-ohje 2016.)

Kolonnissa puhdistettu stripattu lauhde pumpataan pintasäädön ohjaamana kolonnin pohjalta. Lauhde johdetaan luvun alussa mainitun esilämmittimen lämmönvaihtimien läpi, jonka jälkeen se ohjataan joko sekundäärilauhdesäiliöön 1 tai vuotolipeäsäiliöön. Valinta tehdään joko operaattorin toimesta tai automaattisesti johtokykymittaukseen perustuen. Pieni osa stripatusta lauhdeesta ohjataan likaislahdesäiliöstä koloniin syötettävän likaislahdeputkilinjaan ennen lämmönvaihtimia. (Mt.)

## 5 Säätöautomaatio

Kappaleen tarkoituksena on havainnollistaa ja auttaa lukijaa ymmärtämään, mitä työn tutkimuksellisessa osuudessa käytettävät termit ja teoriat tarkoittavat. Lisäksi siinä käydään läpi myös muita säätöautomaation liittyviä perusasioita.

### 5.1 Säätöpiiri

Säätöpiiri on automaatiotekniikkaan liittyvä tehtävien tai toimenpiteiden ryhmä, millä päästään haluttuun tavoitteeseen eli asetusarvoon. Säätöpiirin avulla säädettävää prosessia tai osaprosessia ohjataan siis toimimaan halutulla tavalla. Säätöpiirin muodostaa toimilaitte, säädin, mittauslähetin ja -anturi. (Harju & Marttinen 2000, 13.) Mittausanturi tarkastelee ja mittaa suuretta, mittauslähetin muuttaa anturin mittatiedon mittaviestiksi eli lukuarvoksi ja lähettää sen säätimelle. Säädin ohjaa toimilaitetta mittaviestin perusteella verraten sitä asetusarvoon ja pyrkii saamaan erotuksen nollassi. (Jansson 2000, 11; Harju & Marttinen 2000, 13.) Myöhemmin luvussa läpikäytävän PID-säätimen lisäksi yleisesti käytettyjä säätimiä ovat erilaiset ohjelmoitavat logiikat (PLC) (Keinänen & Sumujärvi 2019, 11).

Janssonin (2000) mukaan säätöön kuuluu aina takaisinkytkentä, joka erottaa säädön ja ohjauksen käsitteet toisistaan. Takaisinkytkentä toteutetaan asentamalla säätöpiiriin anturi, joka mittaa säädettävän suureen oloarvon. Säädin mittaa asetusarvon ja oloarvon erotusta, jonka avulla ohjaus tarvittaessa muuttuu. Takaisinkytkennän avulla haluttuun asetusarvoon päästään nopeasti prosessin muuttuvissakin olosuhteissa. (Jansson 2000, 11.) Säätöpiirin automaatti- ja käsiohjaukset (manuaali) erottaa toisistaan juuri takaisinkytkentä: säätimen ollessa automaattiohjauksella takaisinkytkentä on päällä ja käsiohjauksessa ei, jolloin kyseessä on ohjaus eikä säätö (Harju & Marttinen 2000, 13–14).

Säätöpiireissä komponentit yhdistetään toisiinsa sekä fyysisesti kentällä että digitaalisesti ohjausjärjestelmässä. Suuremmissa prosesseissa, joihin liittyy monia säätöpiirejä, käytetään laajempaa tietokonepohjaista ohjausjärjestelmää. Tämä hajautettu ohjausjärjestelmä (DCS) mahdollistaa lukuisten prosessien säätöjen muuttamisen nopeasti ja vaivattomasti valvomosta, joka voi sijaita fyysisesti hyvinkin kaukana prosessitilasta. (Gillis 2023.) Aiemmin mainitut ohjelmoitavat logiikat tai muut säätimet siis ohjaavat säätöpiirin toimilaitteita ja säätöpiirit kokonaisuudessaan ovat osa

DCS-järjestelmää. DCS-järjestelmää taas ohjataan tavallisesti tietokoneilla Ethernetin kautta. Myös järjestelmän etäohjaus internetin välityksellä on mahdollista. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 248.)

## 5.2 Säätoimenetelmät

### 5.2.1 Yksi-, kaksi- ja kolmipistesäätö

Säätöpiirin säätoimenetelmän käyttö vaihtelee laajasti riippuen muun muassa säädettävästä suureesta sekä prosessista ja prosessiaineista. Esimerkkinä voisi käyttää pinnankorkeuden säätöä. Säädettävä suure on siis pinnankorkeus. Ohjattaviin suureisiin vaikuttaa etenkin se, mitä ainetta mitataan. Jos kyseessä on yksinkertainen vesisäiliö, ohjattavia suureita ovat syöttö- sekä ulosvirtaus ja säädön toimilaitteina säätöventtiili täyttöön ja/tai syöttövesipumppu. Tässä tilanteessa säätoimenetelmäksi riittäisi yksipistesäätö. Yksipistesäätö mittaa pinnankorkeutta, jonka avulla säädin laskee mittauksen ja asetusarvon erotuksen. Tarvittaessa säädin ohjaa syötettävän veden virtausta arvoltaan suuremmaksi tai pienemmäksi tilanteen mukaan, jotta asetusarvoon päästäisiin. Käytännössä säädin siis avaa tai sulkee syöttöveden säätöventtiiliä tai vaihtoehtoisesti nostaa tai laskee syöttövesipumpun tehoa. (Kovács & Mononen 2007, 154–155.)

Kaksipistesäätö on yksipistesäätöä kätevämpi menetelmä tilanteessa, jossa säiliön ulosvirtaus vaihtelee epäsäännöllisesti. Kaksipistesäätöä käyttämällä syöttövirtaa säädetään sekä pinnankorkeus- että ulosvirtausmittauksen avulla (mts. 155). Harju ja Marttinen (2000, 42) tarkentavat, että tässä tilanteessa pinnankorkeus- ja syöttövesivirtaussäätimen välillä on kaskadikytkentä, jossa pinnankorkeussäätimen ohjaus annetaan alasäätimenä toimivan virtaussäätimen asetusarvoksi. Kaskadikytkentää käydään läpi tarkemmin luvussa 5.2.3. Molemmat säätoimenetelmät ajavat asiansa tässä yksinkertaisessa esimerkissä, jossa prosessiaineena on neste, joka ei muuta olomuotoaan. Tilanne kuitenkin muuttuu monimutkaisemmaksi, kun tarkasteltava säätökohde on esimerkiksi höyrykattilan lieriö, joka sisältää sekä nestemäistä vettä että vesihöyryä.

Pienetkin lämpötilan tai paineen erot muuttavat höyryn ja nesteen määrää lieriössä, jolloin myös pinnankorkeus muuttuu. Ulosvirtaava aine on nyt vesihöyryä ja sisään syötettävä aine vettä. Säätoimenetelmäksi kannattaa tällä kertaa valita kolmipistesäätö. Kolmipistesäädössä käytetään samoja säätimiä kuin kaksipistesäädössä, mutta piiriin lisätään myös syöttöveden virtausmittaus (mts. 42). Syöttöveden virtaussäätimeen tuodaan siis sekä syöttöveden että ulos virtaavan höyryn

virtausmittausten ja pinnankorkeuden säätimen ohjauksen arvot, joiden perusteella säädin ohjaa syöttövesiventtiiliä. Kovács ja Mononen (2007) mainitsevat kolmipistesäätöön kuuluvan kolmen edellä mainitun mittauksen lisäksi vain virtaussäätimen. Myöhemmin he kuitenkin esittävät myös säätötavan, jossa pinnankorkeuden säädin on mukana. Tämän ”modifioidun kolmipistesäädön” etuna on heidän mukaansa se, ettei yhden virtausmittauksen (höyry tai syöttövesi) virhe aiheuta lieriön pinnankorkeuden tasapainotilan virhettä. (Kovács & Mononen 2007, 155–156).

### 5.2.2 Suhdesäätö

Suhdesäätö on yleinen ja ajatukseltaan yksinkertainen säätömenetelmä, jota hyödynnetään lukuisissa prosesseissa, joissa kahden tai useamman aineen virtaukset vaikuttavat suoraan toisiinsa. Esimerkkinä voisi käyttää yksinkertaista annosteluprosessia, jossa kaksi nestettä sekoitetaan keskenään. Nesteet X ja Y halutaan sekoittaa niin, että X:n osuus lopullisessa liuoksessa on 20 %. Tavoitteeseen päästään käyttämällä kahta virtaussäädintä; molempien nesteiden annostelupiirille omansa. Nesteen X säätimelle annetaan haluttu asetusarvo, esim. 2 l/s, jota virtausanturi mittaa. Nesteen Y virtaussäätimelle ei anneta omaa asetusarvoa, vaan säädin kytketään nesteen X virtausanturiin. Anturin antama viesti (2 l/s) kerrotaan ennalta lasketulla suhdeluvulla, tässä tapauksessa luvulla 4, jolloin nesteen Y virtauksen asetusarvoksi saadaan 8 l/s. Lopullisessa liuoksessa on siis 20 % nestettä X. Virtaus voi vaihdella, mutta suhde pysyy samana kytkennän ansiosta. (Jansson 2000, 99.)

Harju ja Marttinen (2000) kuitenkin lisäävät, että suhdeluku voi myös muuttua prosessin aikana. Tällöin suhdelukua voidaan muuttaa esim. prosessiaineen mukaan tai vallitsevien olosuhteiden muuttuessa. Jälkimmäisessä tilanteessa suhdesäätö vaatii muitakin mittauksia ja säätimiä, joiden mukaan suhdeluku muuttuu. Tällaista suhdesäätöä käytetään yleensä prosessin laadun varmistamiseksi, esim. mittaamalla edellä mainitun esimerkin liuoksen sakeutta tai joidenkin aineiden pitoisuuksia. (Harju & Marttinen 2000, 28.)

### 5.2.3 Kaskadisäätö

Monimutkaisien prosessien säätötekniikkaa ei välttämättä voida luoda tai optimoida käyttämällä vain yhtä säädintä. Tällaisten prosessien säätöpiireissä kannattaa harkita kaskadisäädön mahdolli-

suutta, jossa haluttua suuretta säädetään vähintään kahdella eri säätimellä, jotka kytketään toisiinsa. Säätimien välille syntyy kaskadikytkentä, jolla pyritään nopeuttamaan säätöpiirin ohjauskykyä, jotta asetusarvo saavutettaisiin nopeammin etenkin muuttuvissa olosuhteissa tai poikkeustilanteissa. Säättösuuretta ohjaavaa säädintä kutsutaan pää- tai yläsäätimeksi ja ohjaussuuretta ohjaavaa säädintä apu- tai alasäätimeksi. (Jansson 2000, 102; Harju & Marttinen 2000, 23.)

Ainoastaan pääsäätimelle annetaan asetusarvo, eli säädettävän suureen tavoitearvo. Apusäädin saa asetusarvonsa pääsäätimen ohjauksen eli lähtöviestin mukaan, joten apusäätimen asetusarvo on siis muuttuva arvo. Jos ja kun säätöpiiriä halutaan ohjata automaattisesti, asetetaan pääsäädin automaattiohjaukselle, jolloin säätöpiiri ohjaa mittauksiin perustuen toimilaitteita niin, että asetusarvoon päästään. Kaskadisäädön apusäädin kytketään automaattiasetuksen lisäksi myös ohjaustilaan ”remote”. Kytkentää ei välttämättä tarvitse aina suorittaa itse, sillä optimaalinen kaskadisäätöpiiri rakennetaan toimimaan niin, että pääsäätimen mennessä automaattille, apusäätimen tila vaihtuu automaattisesti remote-tilaan. (Harju & Marttinen 2000, 23–24.)

Kaskadisäätöä voidaan hyödyntää esimerkiksi lauhduttimen säätöpiirissä. Säättösuureeksi valitaan lauhduttimesta poistuvan lauhteen lämpötila. Lauhduttimessa höyryä jäähdytetään lauhteeksi jollakin jäähdyttävällä aineella, kuten esim. viileällä vedellä. Pienempi jäähdytysvesivirtauksen arvo johtaa suurempaan lauhteen lämpötilaan ja liian korkealla lämpötilalla höyry ei enää lauhdu. Lämpötilan asetusarvoon päästään siis säätämällä jäähdytysveden virtausta, joten se valitaan ohjaussuureeksi. Virtausmittauksen lähtöviesti viedään apusäätimenä toimivaan virtaussäätimeen, joka ohjaa jäähdytysvesiventtiiliä. Virtaussäädin on kytketty pääsäätimeen eli lämpötilasäätimeen, johon lämpötilamittauksen viesti tuodaan. Lämpötilasäädin antaa mittauksen ja säätimelle annetun asetusarvon välisen eroarvon perusteella virtaussäätimelle ohjauksen, joka taas toimii sen asetusarvona. Virtaussäädin ohjaa venttiiliä niin, että säättösuureen asetusarvoon päästään eli lämpötilasäätimen lähettämä eroarvo on nolla. (Jansson 2000, 102–103.)

Edellä mainitussa esimerkissä virtauksen arvo vaikuttaa suoraan lämpötilan arvoon. Ilman virtaussäädintä, prosessin muuttunut tilanne huomattaisiin vasta lämpötilamittauksen arvosta, jonka jälkeen piiri lähtisi ohjaamaan venttiiliä. Virtaussäädintä käyttämällä apusäätimenä, päästään virtaukseen vaikuttamaan lähes välittömästi, kun myös virtauksen arvoa mitataan. Prosessi pystyy

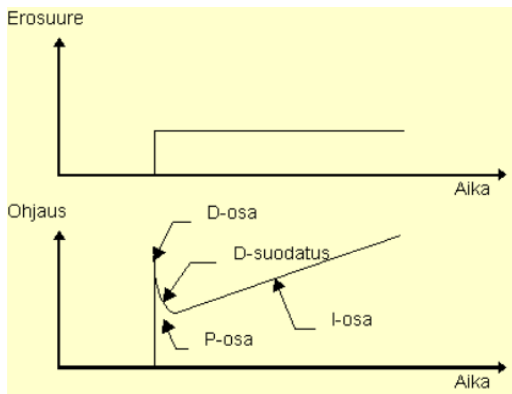
täten nopeammin mukautumaan olosuhteiden vaihteluihin, mikä onkin kaskadisäädön suurin etu. (Mts. 102.)

## 5.3 Säätimet ja säätimen viritys

### 5.3.1 Parametrisäätimet ja viritysparametrit

Teollisuusprosesseissa käytetään edelleen paljon melko yksinkertaista PID-säädintä. Kirjaintunnukset tulevat säätötermeistä: vahvistus-/suhdetermi P, integrointitermi I sekä derivointitermi D. Vaikka PID-säädin onkin säätimistä puhuttaessa kenties kaikista yleisin, ei se aina ole paras vaihtoehto ja säätöpiirin luonteen mukaan käytetään myös säätimiä, joissa kaikkia näitä termejä ei ole. Näitä säätimiä ovat P-, PI- ja PD-säädin. (Jansson 2000, 82; Harju & Marttinen 2000, 44.) Kaikilla termeillä on omat tavoitteensa: vahvistusermillä pyritään poistamaan virhe ja integrointitermillä pysyvä virhe, derivointitermillä taas nopeutetaan vastetta (Harju & Marttinen 2000, 52).

Kaikkiin edellä mainittuihin termeihin liittyy omat viritysparametrit, joita PID-säätimessä on siis kolme. Parametrit ovat vahvistuskerroin ( $K_p$ ), integrointiaika ( $T_i$ ) sekä derivointiaika ( $T_d$ ). Vahvistuskerroin on säätimeen liittyvän erosuureen ja ohjauksen välinen suhdeluku. Suuremmalla vahvistuskertoimen arvolla säädin reagoi eroarvon muutokseen nopeammin, jolloin myös järjestelmä toimii nopeammin. Vahvistuskertoimen etumerkillä voidaan määritellä säätimen toimituunta. Jos säätimen toimituunta on suora, sen ohjaus kasvaa erosuureen kasvaessa ja tällöin vahvistuskertoimen arvo on plusmerkkinen ( $K_p > 0$ ). Käänteisellä toimituunnalla säätimen ohjaus pienenee erosuureen arvon kasvaessa, jolloin vahvistuskerroin on miinusmerkkinen ( $K_p < 0$ ). Tyypillistä kuitenkin on, että säätimen toimituunta valitaan erikseen, jolloin vahvistuskertoimelle ei anneta miinusmerkkisiä arvoja, vaan valinta kääntää (tai jättää kääntämättä) etumerkin plussaksi. (Mts. 47.)



Kuvio 6. Viritysparametrien vaikutus säädössä (Harju & Marttinen 2000, 52)

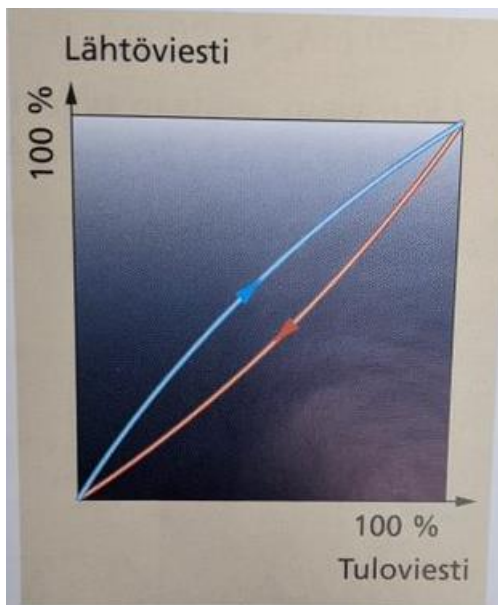
Integrointiajalla vaikutetaan järjestelmän ohjauksen kasvunopeuteen. Integrointitermin perusteella säätimen ohjausta kasvatetaan tai pienennetään niin, että asetusarvo saavutetaan tasaisella ohjausmuutoksella. Ohjauksen kuvaajassa tämä näkyy vakiokulmakertoimena P- ja D-termien vaikutuksen jälkeen (ks. kuvio 5). Integrointitermin vaikutus pienenee pidemmällä integrointiajalla, koska termin kaavassa käytetään integrointiajan käänteislukua ( $1/T_i$ ). (Mts. 50–52.)

Derivointiaikaa käyttämällä järjestelmä ennakoii eroosuureen muutosnopeutta, jolloin järjestelmä ei jää odottamaan prosessista saatavia mittaustietoja ohjauksen muuttamiseen vaan säädin alkaa kompensoimaan eroosuureen arvon muutosta jo sen muodostumisvaiheessa. Suuremmalla derivointiajalla myös ennakoinnin vaikutus on suurempi. Derivointiajan käyttäminen ei ole suositeltavaa, jos säädettävään prosessiin liittyy viivettä. Jos mittaussignaalit sisältävät kohinaa, derivointitermin käyttäminen vahvistaa olemassa olevaa kohinaa ja säädin saattaa käyttäytyä epäihanteellisella tavalla. Tällöin derivointiosa jätetään usein säätimestä pois kokonaan ja tämä on yleistä esim. prosessiteollisuudessa, jossa mittaussignaaleihin liittyy aina kohinaa. (Mts. 50.)

### 5.3.2 Virittäminen ja hystereesi

Säätöpiirin virittämisessä on otettava huomioon etenkin säädettävä suure, koska esim. pinnankorkeus on säädössä hitaasti muuttuva suure, kun taas virtaus on nopeasti muuttuva (Harju & Marttinen 2000, 32). Tämä näkyy myös virityksessä: tyypillisesti pinnankorkeuden PI-säätimessä käytetään suurta integrointiajan arvoa ja melko suurta vahvistuskerrointa, kun taas virtaussäätimessä (PI) käytetään pientä vahvistuskerrointa sekä integrointiajan arvoa. (Mts. 128.)

Säätimen virittäminen suoritetaan tyypillisesti kahdella eri tavalla: laskemalla parametrien arvot teoreettisiin menetelmiin perustuen tai ihanteellisten parametrien etsiminen yritys ja erehdys -menetelmällä (mts. 114). Arvojen testaamisessa on kuitenkin hyvä tietää, millaisella tasolla virtausparametrien arvot tulisi suunnilleen olla, sillä etenkin hitaiden prosessien (esim. pintasäätö) virittäminen tällä tavalla voi viedä paljon aikaa, vaikka kokemusta virittämisestä olisikin. Myös molempia menetelmiä voidaan tarvittaessa hyödyntää, esim. kokeilemalla laskennallisia parametreja ja tarvittaessa arvojen hienosäätämisen yritys ja erehdys -periaatteella.



Kuvio 7. Hystereesi virhelähteenä (Jansson 2000, 53)

Hystereesillä tarkoitetaan mittauselimen virhettä, jossa tulo- ja lähtöviestien arvot eroavat toisistaan tuloviestin arvon muuttumissuunnan mukaan. Mitattava toimilaite voisi esimerkiksi olla säätöventtiili, jonka tulo- ja lähtösignaalien arvoja seurataan kuviossa 7. Venttiiliä avattaessa 0–100 %, lähtö- ja tulosignaalien arvojen pitäisi teoreettisesti ja ideaalisti muodostaa lineaarinen eli suoraan verrannollinen kuvaaja. Kuitenkin hystereesin takia venttiilin realistista avautumista kuvaa sininen kuvaaja, joka on hieman kaareva. Kuvaajasta nähdään, että venttiilin avaamisen lähtöviestin arvo on suurempi kuin tuloviestin arvo kaikkialla, paitsi pisteissä 0 ja 100 %. Venttiilin sulkeutessa ilmiö on päinvastainen eli lähtöviestin arvo on pienempi kuin tuloviestin arvo (punainen kuvaaja). (Jansson 2000, 53; Harju & Marttinen 2000, 18–19.)

Hystereesillä voidaan tarkoittaa myös säätöpiiriin liitettävää tahallista ominaisuutta, jolla vähennetään piirin reagointinopeutta mittausrvojen muutoksiin. Bishop (2011) esittää hystereesin lämmitysjärjestelmään liittyen, mutta sitä voi soveltaa lukuisissa muissakin järjestelmissä. Normaalisti, kun järjestelmän säätimelle annetaan asetusarvo, toimilaite/-laitteet pyrkivät säätämään säästösuureen mittausrvon asetusarvoon ja säätäminen loppuu, kun se saavutetaan. Säätäminen alkaa jälleen, jos mittausrvo poikkeaa asetusarvosta, joka ei aina ole suotavaa, sillä mittausrvo voi vaihdella asetusarvon ympärillä tiuhaan mm. häiriöiden, mittausvirheiden tai muuttuneiden olosuhteiden takia. Tällöin piirissä voidaan hyödyntää hystereesiä, joka tarkoittaa säätöpiirin ominaisuutta, jolla säädön päälle kytkemisen arvo on määritelty pienemmäksi tai suuremmaksi kuin asetusarvo, jossa säätö kytkeytyy pois päältä. (Bishop 2011, 19.)

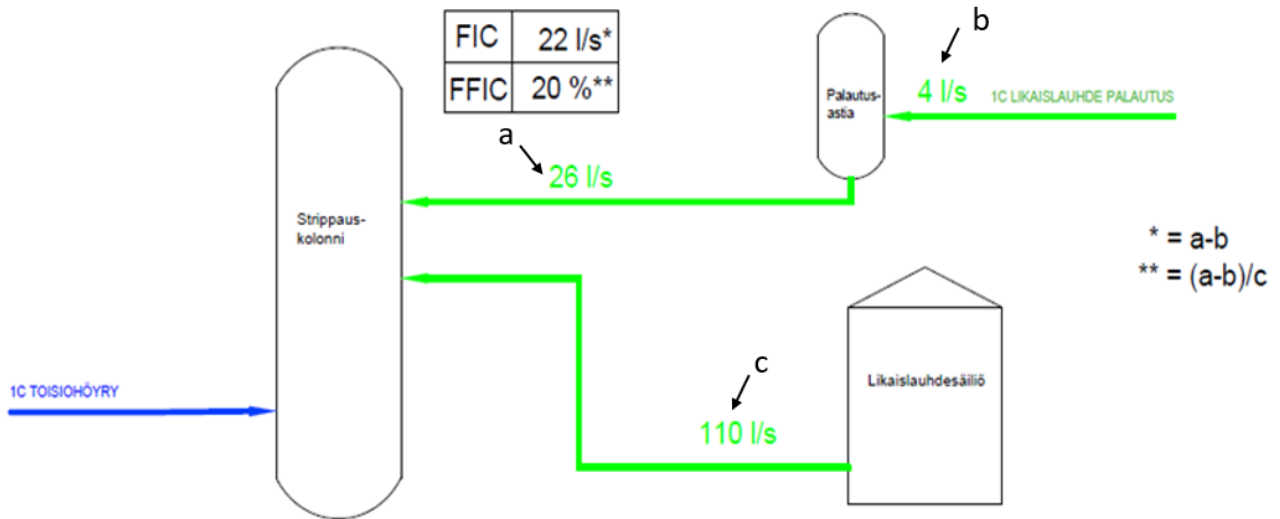
Hystereesiä käyttämällä säätimen mittausrvolle annetaan asetusarvoon liittyvä alue, jolloin säätötoimenpiteitä ei tehdä. Esimerkkinä voidaan käyttää Bishopin tapaan lämpötilaan liittyvää ilmastointijärjestelmää: Käyttäjä antaa termostaatille asetusarvon 20 °C. Jos lähtötilanteen sisälämpötila on esim. 18 °C, toimilaite alkaa säätämään eli lämmittämään tilaa ja pitää säädön päällä niin pitkään, kunnes asetusarvo saavutetaan. Hystereesin avulla säädin alkaa suorittamaan lämmitystoimenpidettä asetusarvon saavuttamisen jälkeen uudestaan vasta silloin, kun lämpötila on laskenut esim. <19 °C. Vastaavasti jäädytystoimenpide alkaa, kun asetusarvo on ylitetty yli yhdellä celsiusasteella, eli mittausrvon noustessa >21 °C. Tässä tapauksessa hystereesin suuruus on 2 °C. (Mts. 19.)

Hystereesiä voidaan siis käyttää myös tarkoituksellisesti hyväksi säätöpiirissä. Sen avulla voidaan vähentää säätöön liittyvien toimilaitteiden kytketymistä päälle ja pois nopeissa sykleissä. Yleensä näin myös laitteiden käyttöikä on pidempi, sillä edellä mainitun kaltainen ”räpsiminen” aiheuttaa paljon kuormitusta etenkin mekaanisille toimilaitteille, kuten venttiileille. Työn tutkimus-/toteutusosassa hystereesillä tarkoitetaan juuri tätä haluttua, säätöhystereesiä, eikä aiemmin mainittua mittauselimen virheeseen liittyvää hystereesiä.

## 6 Toteutus ja tulokset

### 6.1 Säättötekniikan kehittäminen

Työtä lähdettiin toteuttamaan kartoittamalla strippauskolonnin nykytilannetta tutustumalla olemassa oleviin säätöpiireihin sekä likaislahdevirtauksen arvoihin eri paikoissa. Säättöpiireistä tarkasteltiin muun muassa niiden lukituksia, ohjauksia ja mittauksia sekä niiden kytkentöjä laitteisiin tai muihin piireihin. Tarkastelussa auttoi jokaiselle säätöpiirille tehtävät toimintakuvaukset, joissa selostetaan sanallisesti kyseisen säätöpiirin toiminta, hälytykset, lukitukset, muihin piireihin toimitettavat tiedot sekä muutoshistoria.



Kuvio 8. Likaislahteen palautuskierron sekä höyry-/likaislahdesuhteen laskenta

Säättöpiirin suhdesäädön tavoitteena on syöttää höyryä niin, että strippauskolonnissa saavutetaan haluttu höyry-/likaislahdesuhde, vaikkei sisään virtaavaa höyryä suoranaisesti mitatakaan. Höyryvirtaus mitataan likaislahteen palautuskierron määrällä, joka lasketaan palautusastian likauslahteen virtauksen ja yhden ykkösyksikön palautusastiaan virtaavan likaislahdevirtauksen erotuksesta (ks. kuvio 8). Höyryn ja likaislahteen suhde saadaan likaislahteen palautuskierron ja likaislahdesäiliöstä virtaavan likaislahdevirtauksen suhteesta, jonka laskettu arvo on virtauksen suhdesäätimen (FFIC) mittausarvo.

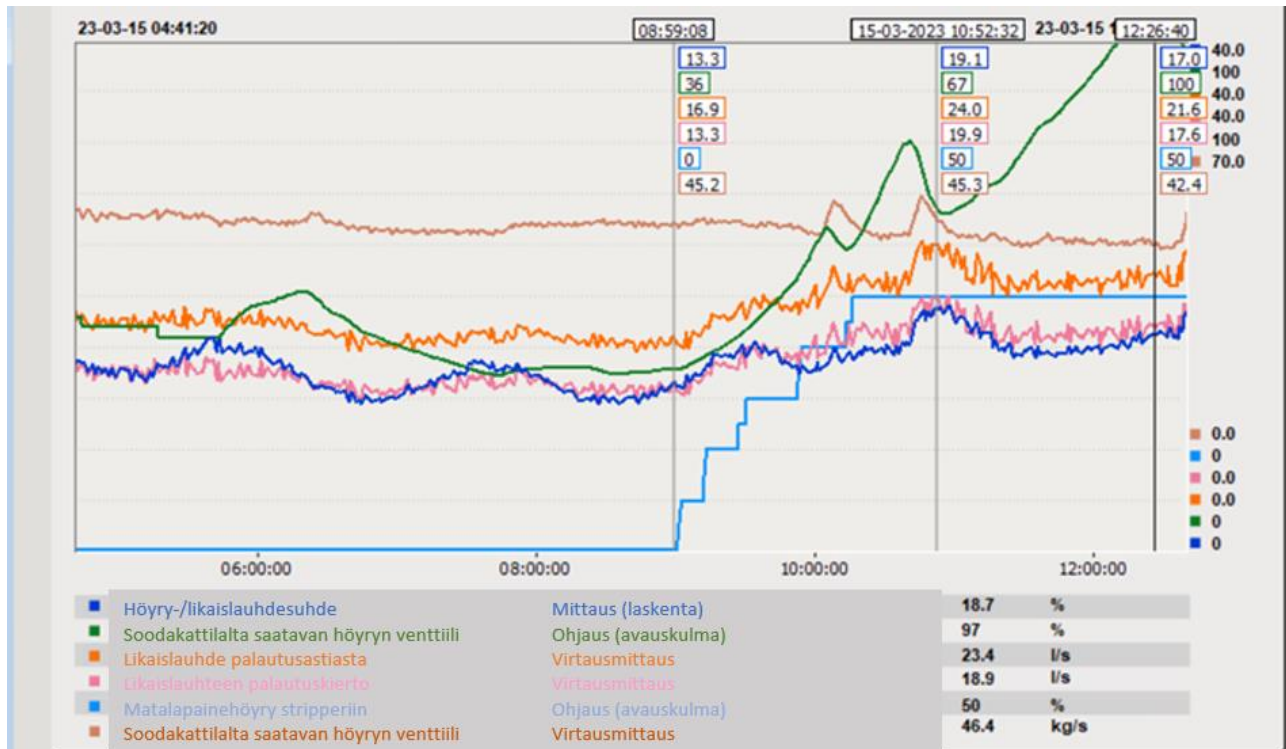
Työn käytännön osuus eli säätöpiirin muodostaminen muuttui työn aikana olemassa olevien, vanhojen säätöpiirien, päivittämiseksi. Strippauskolonniin liittyviä piirejä tarkasteltaessa huomattiin, että edellytykset säätötekniikan kehittämiseen vanhoja piirejä hyödyntämällä on. Strippauskolonni olisi ollut mahdollista asettaa automaattiohjaukselle ennen työn aloittamistakin, mutteivat silloiset säätöpiirit olisi hyödyttäneet prosessin ajamista. Ainut säätö, joka pystyttiin alkuperäisillä piireillä saamaan aikaan, oli toisiohöyryventtiilin avaaminen toiseen haihdutinyksikköön päin (tosin ei-halutulla tavalla). Venttiiliä avaamalla 1C-yksiköltä saatavaa toisiohöyryä syötetään vähemmän strippauskolonniin, kun osa höyrystä johdetaan sen avulla 2-yksikköön.

Höyryvirtausmittauksen puuttuminen hankaloitti työn toteutusta, sillä säätöpiirin taustatietojen hankkiminen simuloinnilla ja oikean prosessin käsiajotestauksella oli haastavaa. Tämä johtui siitä, ettei etukäteen tiedetty, kuinka kauan tuorehöyryn syöttämisen jälkeen kestäisi siihen, että kasvatettu höyryvirtaus näkyisi likaislauhteen palautuskierron mittauksessa. Aika haluttiin selvittää alun perin siksi, jotta saataisiin hahmotettua viivettä tuorehöyryn syöttämisen vaikutuksesta palautuskiertoon.

Käsiajotestaus aloitettiin valvomossa niin, että tuorehöyryventtiiliä avattiin ohjauskulmaan 10 %, jonka jälkeen seurattiin likaislauhteen (palautusastiasta sekä haihduttimesta 1C) virtausmittausten arvoja. Noin 10 minuutin tuloksettomien odotusten jälkeen venttiiliä avattiin 10 % lisää eli asentoon 20 %. Avausta jatkettiin lopulta 40 prosenttiin asti saamatta haluttuja tuloksia. Ainut muutos testauksessa oli kasvaneet paineen arvot strippauskolonniin menevässä putkilinjassa sekä haihduttimessa 1C. Havainnosta heräsi epäily siitä, että höyry on lähtenyt virtaamaan väärään suuntaan eli yksikölle 1C eikä strippauskolonnin sisään.

Pohdinnan ja haihduttamon Valmet DNA-kuvien selaamisen jälkeen huomattiin tärkeä havainto: soodakattilalta haihduttamolle tulevan matalapainehöyrylinjan säätöventtiili oli ollut asennossa 100 % koko ajan, mikä tarkoitti sitä, ettei matalapainehöyryä haihduttamolle ollut mahdollista saada sillä hetkellä enempää. Matalapainehöyryn virtausmäärä koko haihduttamolle oli siis käytännössä vakio, jonka takia strippauskolonnin tuorehöyryventtiilin avauksella ei ollut vaikutusta syötettävän höyryn määrään. Höyryllä oli ainoastaan hieman erilainen kulkureitti, mikä näkyi haih-

dutinyksikön paineen nousuna. Syynä matalapainehöyryn vajeelle oli se, että käynnissä oli koivu-ajajakso. Koivuajajakso on aina havujakson jälkeen, jolloin haihduttamo on likaantunut ja täten vastaanottaa höyryä huonommin. Myös painetaso on tällöin haihduttamalla korkeampi.



Kuvio 9. Matalapainehöyryn syöttötesti käsiajolla ja testin historiatrendi Valmet DNA:sta

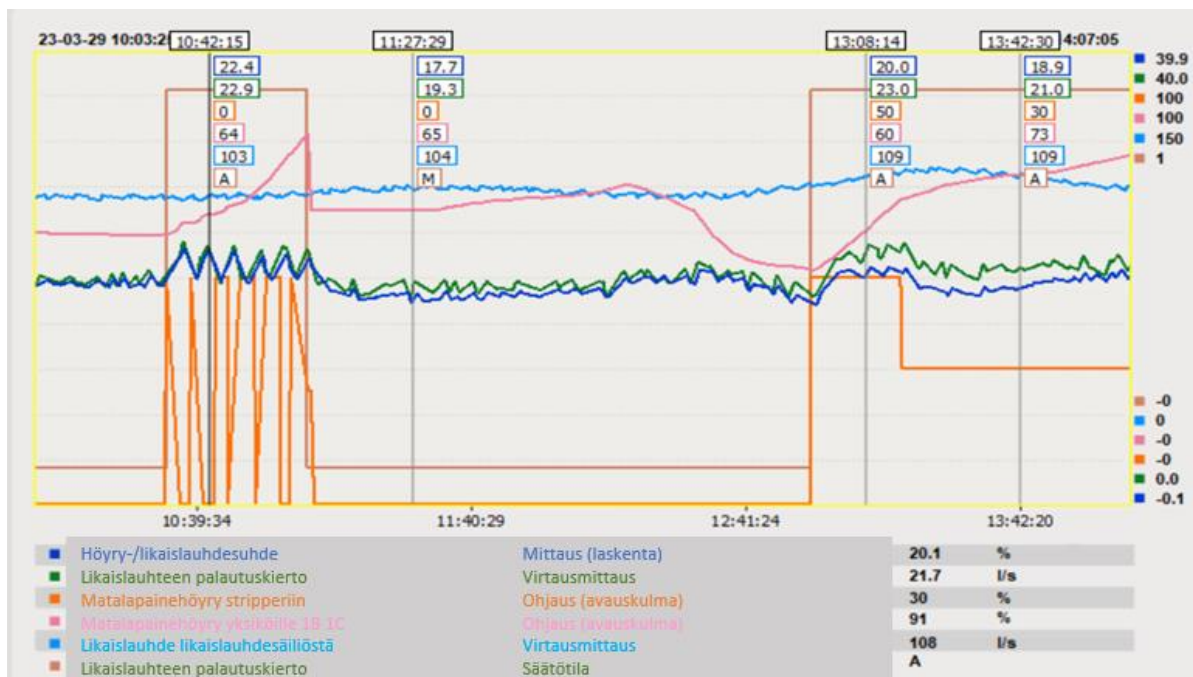
Seuraava testi tehtiin vasta, kun tehtaalla ajettiin havusellua. Kuvio 9 esittää testauksen aikaista historiatrendiä, josta nähdään tarkasteltujen suureiden arvojen muuttuminen. Testiä aloitettaessa tarkistettiin matalapainehöyryventtiilin asento, joka oli 36 %. Testi aloitettiin (klo 9) jälleen avaamalla strippauskolonnin tuorehöyrylinjan venttiili asentoon 10 %. Venttiilin avaamista jatkettiin portaittain, kunnes saavutettiin asento 50 %. Vaikutuksia höyryn lisäämisestä odotettiin ja testissä saavutettiin virtaussuhteen arvo 19,1 % noin kahden tunnin kuluttua. Ennen testiä suhde oli 13,3 %, kuten kuviossa näkyy.

4,5 tuntia siitä, kun venttiili oli asetettu asentoon 50 %, suhde nousi yli suhdesäätimen asetusarvon (21 %) arvoon 23 %. Trendejä tutkimalla huomattiin, että tämä ei kuitenkaan johtunut siitä, että likaislauheen palautuskierron määrä olisi kasvanut vaan siitä, että likaislauhesäiliöstä virtaavan likaislauheen virtauksen arvo oli laskenut välille 85–90 l/s (vrt. aikaisempaan 100–110 l/s).

Virtaussuhteen laskentaperusteen mukaan suhdesäätimen (FFIC) arvo kasvaa, jos palautuskierron määrä kasvaa ja/tai virtaus likaislauhesäiliöstä pienenee (ks. kuvio 8).

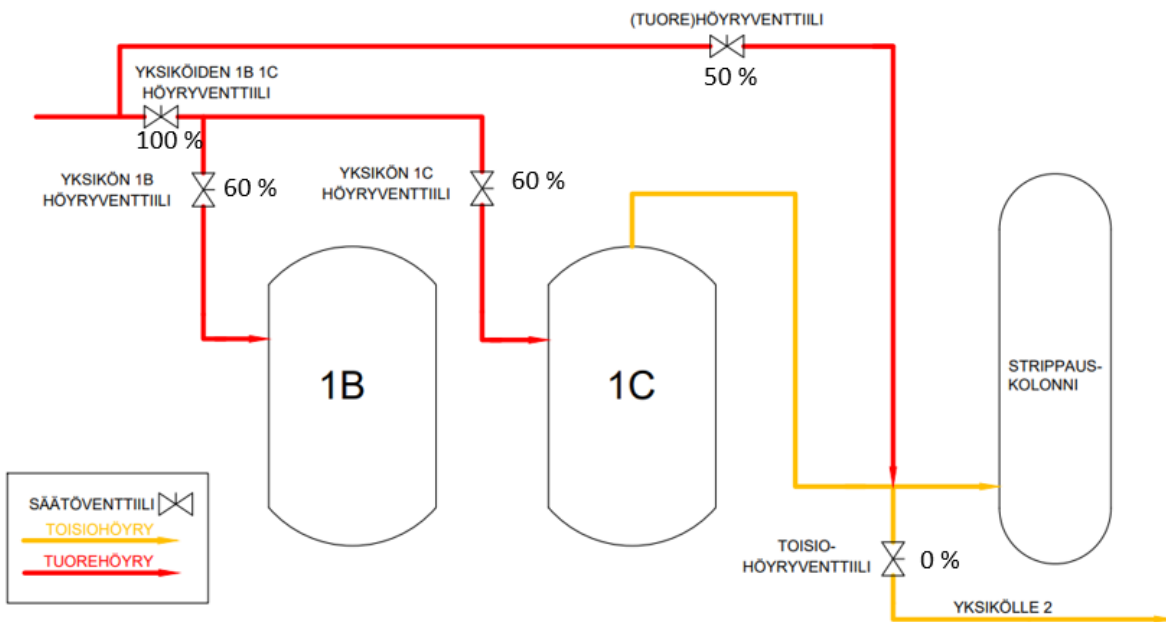
Oikeita säätöpiirejä, joita käytetään tehtaan valvomon tietokoneilla, ei lähdetä suoraan muuttamaan. Virheelliset muutokset voisivat häiritä prosessin ajoa suurestikin, joten kaikki suuremmat ohjelmamuutokset tehdään simulointipiireillä demotilassa. Simulointipiirit ovat kopioita oikeista piireistä, jotka siirretään demotilan tietokoneille, joissa niitä voi testailta tekemättä mitään toimenpiteitä oikeilla tehdaslaitteilla. Pienemmät muutokset, kuten piirin arvojen muutos ym. hienosäätö tehtiin työssä oikeisiin piireihin ja päivitettiin suoraan oikeaan prosessiin.

Ensimmäiset muutokset tehtiin matalapainehöyryventtiilin piiriin, joka haluttiin saada toimimaan automaattisesti niin, että se avautuisi silloin, kun suhdesäätimen mittaesarvo on asetusarvon alapuolella. Tällöin höyryä saadaan syötettyä strippauskolonniin suuremmalla virtauksella ja paineella, joka kasvattaa suhdelukua. Säätöpiirin toimilohkoja ja niiden kytkentöjä muokkaamalla saatiin määritettyä venttiilin avautuminen suhdesäätimen eroarvoon perustuen. Sen lisäksi piti miettiä, onko sellaisia tilanteita, joissa venttiilin avaamista ei haluttaisi, vaikka suhdesäätimen mittaustaus olisikin alle asetusarvon.



Kuvio 10. Strippauskolonnin automaattiajon toisen testin historiatrendi

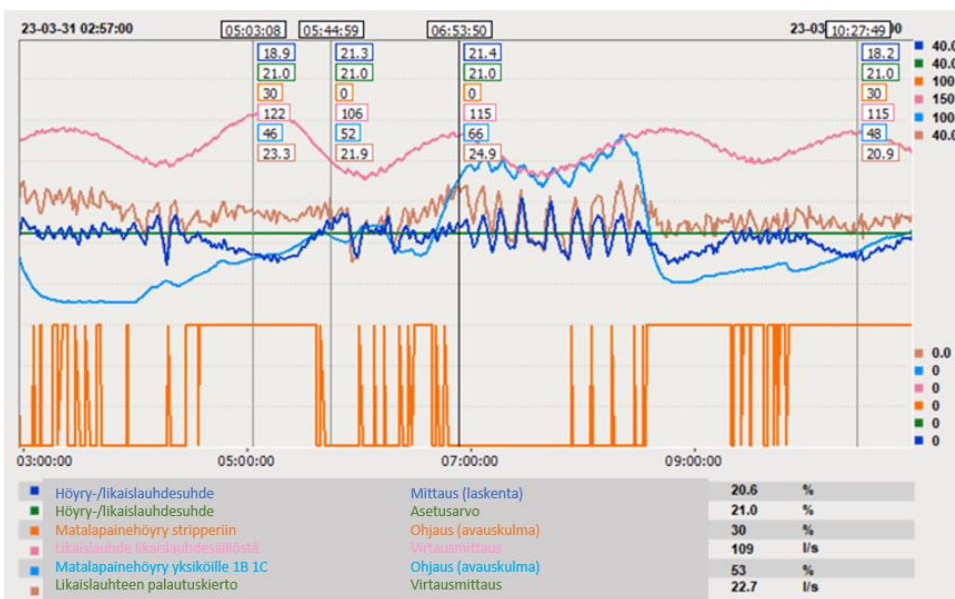
Säädön testausta jatkettiin toisena päivänä. Testin alkutilanteessa oltiin jälleen asetusarvon alapuolella, joten tuorehöryventtiili lähti heti aukeamaan, kun säätimet asetettiin automaatile. Tuorehöyryn syötön avulla asetusarvo saavutettiin, jolloin venttiili sulkeutui ja avautui pian uudestaan arvon laskiessa (ks. kuvio 10). Pian huomattiin kuitenkin, että yksiköille 1B ja 1C tuorehöyryä säättävä venttiili lähti avautumaan, kunnes operaattori asetti virtaussäätimen manuaalille (tuorehöryventtiili stripperiin sulkeutui), ettei haihduttamon yksiköiden ajoon tulisi ongelmia. Johtopäätös tästä tapahtumasta on se, että syötettävä höyryvirtaus ei riitä edellä mainituille yksiköille. Niiden automaattinen höyrynpyyntitarve kasvaa, jonka seurauksena höyryventtiilin ohjausarvo kasvaa, muttei höyryä saada lisää strippauskolonnin ryöstäessä sitä samasta putkilinjasta ennen venttiiliä.



Kuvio 11. Stripperiin vaikuttavat höyryvirrat ja -venttiilit

Tilannetta pohdittiin ja haihduttamon DNA-näyttöjä tutkittiin, kunnes tehtiin taas uusi tärkeä havainto, tällä kertaa liittyen yksiköiden 1B ja 1C omiin matalapainehöyryventtiileihin. Kuvio 11 kuvaa strippauskolonniin vaikuttavia höyrylinjoja ja niiden säätöventtiilejä. Molempien yksiköiden höyryventtiilit olivat olleet koko ajan samassa asennossa (60 %), vaikka ne olivat automaattiohjauksella. Tämä johtui taas siitä, että niiden asentoa ohjaavat primäärilauhdeastioiden pintasäätimet olivat manuaaliohjauksella. Venttiilien ohjaus toimii automaattisesti vain silloin, kun myös säädin on automaattilla. Lauhdeastioiden pinnan ylläpitäminen oli operaattorin mukaan suoritettu

manuaaliohjauksella käytännössä tehtaan startista lähtien (vuodesta 2017), sillä astioiden automaattiajo ei ollut aikanaan toiminut ilmeisesti virheellisten mittaustoimilaitteiden takia. Venttiilien vakioasento aiheutti höyrylinjan aiemman venttiilin automaattisen aukeamisen, koska strippauskolonnin tuorehöyryventtiilin avautuessa yksiköiden 1B ja 1C tuorehöyryventtiilin täytyy myös avautua, jotta yksiköille tarvittava höyryvirtaus säilyisi vakiona. Yksiköiden omien tuorehöyryventtiilien (juuri ennen yksikköä) säilyessä vakioasennossa, ei höyryä voi mennä yksiköihin tarvittavaa määrää, koska osa höyrystä menee strippauskolonniin. Myös näiden venttiilien tulisi avautua, jotta yksiköt saisivat tarvittavan höyryvirtauksen määrän.



Kuvio 12. Strippauskolonnin automaattiajon historiatrendi 31.3. aamuna

Kuvion 12 historiatrendi havainnollistaa hyvin eri tilanteita stripperin automaattiajossa. Kolme ensimmäistä ajanhetkeä osoittavat kolme eri tilannetta höyry-/lauhdesuhteessa: ensimmäisellä ajanhetkellä ollaan suhteen asetusarvon alapuolella (18,9 %), vaikka palautuskiertovirtaus on hyvällä tasolla (23,3 l/s). Tämä johtuu siitä, että lauhdevirtaus likaislahdesäiliöstä on tällä hetkellä ollut huipussaan (122 l/s). Toisella ajanhetkellä palautuskierron virtaus on pienempi (21,9 l/s), mutta suhteessa oli päästy asetusarvon yläpuolelle (21,3 %), koska virtaus likaislahdesäiliöstä oli pienentynyt (106 l/s). Kolmannella ajanhetkellä suhde oli jälleen asetusarvon yläpuolella (21,4 %), mutta tällä kertaa myös lauhdevirtaus säiliöstä oli suuri (115 l/s). Tilanteessa suhteen hyvä arvo saavutettiin suuren palautuskiertovirtauksen ansiosta (24,9 l/s).

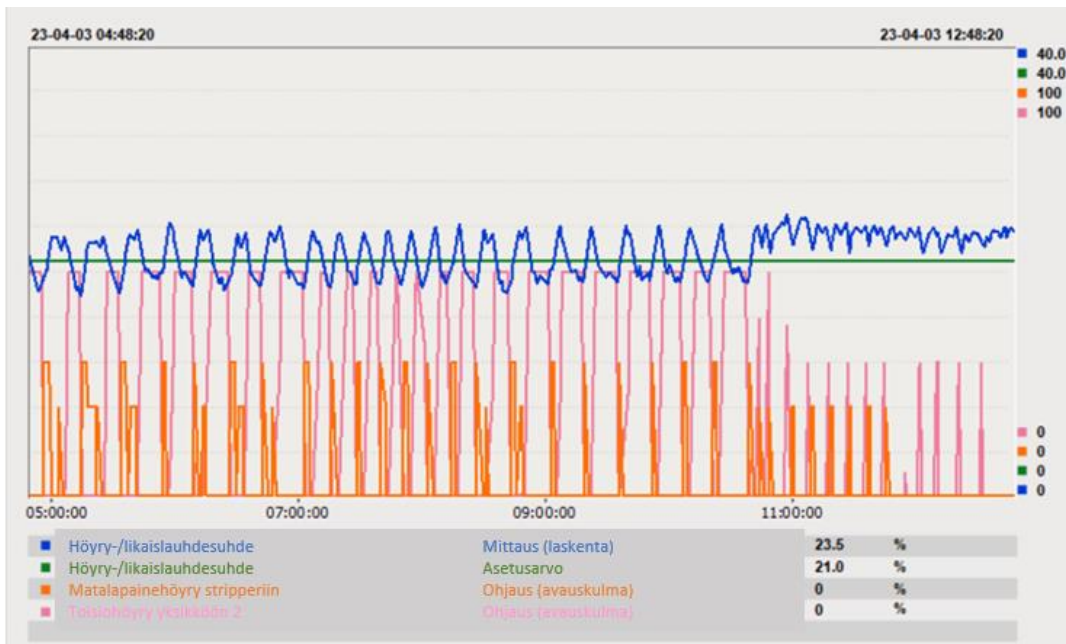
Trendistä voidaan myös havaita, että höyryventtiili haihduttimille 1B ja 1C ei tällä kertaa avautunut liikaa missään testauksen vaiheessa, toisin kuin aikaisemmin. Uusi yksiköiden ajotapa mahdollisti tämän. On tärkeää tosin huomata, että myös tässä tilanteessa käytettiin stripperin höyryventtiilin avauskulman arvoa 30 %. Toisin sanoen yhtenä testauksen tuloksena saatiin selville, että yksiköiden uusi ajotapa mahdollistaa stripperin automaattiajon ainakin avauskulman arvolla 30 %.

Seuraavaksi kehitystoimenpiteeksi asetettiin stripperin höyryventtiilin asentojen optimointi. Kuvion 12 trendistä nähdään, että kaikilla ajanhetkillä höyryventtiilin avautuminen ja sulkeutuminen tapahtui silloin, kun haluttiinkin (suhteen asetusarvon mukaisesti). Epäideaalia oli kuitenkin se, miten venttiili avautui ja sulkeutui: suhteen arvon liikkua asetusarvon molemmiin puolin lyhyellä aikavälillä, näkyi trendissä ikävännäköisiä piikkejä. Tämän takia venttiilin haluttiin käyttäytyvän maltillisemmin.

Tuorehöyryventtiilin ohjauksiin tehtiin seuraavat muutokset: Venttiilin avauskulman lisäksi säätöpiiriin lisättiin kaksi muuta ohjausarvoa venttiilin avautumiselle, 20 % ja 30 %. Venttiilin ohjaus on 30 % silloin, kun suhdesäätimen arvo on alle 1 % yli ja alle 3 % alle asetusarvon (eroarvo  $-1-3$  %), jos lähtötilanteessa suhde on alle asetusarvon. Jos suhteen arvossa alitetaan eroarvo  $-1$  % (suhteen arvo nousee yli 1 % asetusarvon yläpuolelle) ja eroarvo myöhemmin nousee tämän yli, ei säädin ohjaa venttiiliä 30 % auki. Venttiili aukeaa vasta, kun eroarvo ylittää 0,5 %, eli suhteen arvossa ollaan yli 0,5 % asetusarvon alapuolella.

Avauskulmaohjaus toimii nyt tilanteessa, jossa asetusarvon eroarvo on yli 3 %. Avauskulman arvo voidaan muuttaa operaattorin haluamaksi. Ajatuksena on, että säädössä käytetään avauskulmaohjausta silloin, kun suhteen arvo on reilusti ( $>3$  %) alle asetusarvon. Tällöin avauskulman arvoksi tulisi käytännössä antaa yli 30 %. Myöhempien testien avulla avauskulman uudeksi arvoksi määriteltiin 40 %.

Säädin muuttaa venttiilin ohjausarvoksi 20 % silloin, kun suhteen arvo on  $1-2$  % yli asetusarvon. Ohjaus toimii vain silloin, kun säädön lähtötilanteessa suhdearvo on asetusarvon alapuolella ( $>0,5$  %). Jos suhteen arvo ylittää asetusarvon yli 2 prosenttiyksiköllä, venttiili sulkeutuu. Seuraavan kerän venttiili avautuu edellä mainitussa tilanteessa; kun asetusarvo alitetaan yli 0,5 prosenttiyksiköllä. Venttiilin ohjaukselle on siis säätöpiirissä määritelty tällainen hystereesi.

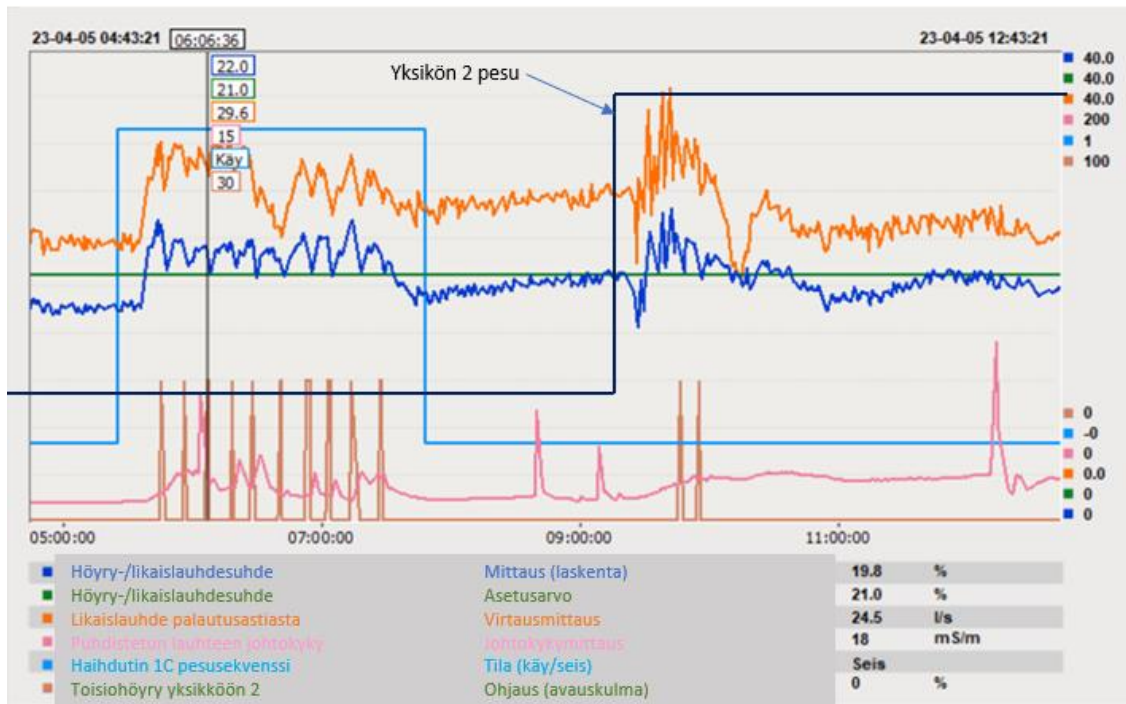


Kuvio 13. Strippauskolonnin höyryventtiilien historiatrendi 3.4. aamuna

Ennen toisiohöyryventtiilin ehtojen muokkausta, tilanne koivuajojaksolla oli kuvion 13 kaltainen. Toisio- ja tuorehöyryventtiilit ajoivat "kilpaa" vuorotellen toisiaan auki ja kiinni. Toisiohöyryventtiili avautui ja sulkeutui, kun suhdesäätimen mittaus vaihteli asetusarvonsa molemmin puolin, koska myös suhdesäätimen mittausarvo teki samaa. Tilannetta, jossa höyry-/likaislauhde -suhteessa päästiin toistuvasti yli hystereesin ylärajan (23 %), ei testissä ollut ennen nähty. Tämä tilanne havainnollisti toisiohöyryventtiilille tarvittavia avautumisen ja sulkeutumisen lisäehtoja.

Uusien ehtojen avulla virtaussäädin ei voi antaa ohjaustietoa toisiohöyryventtiilille, ellei suhteen mittausarvossa olla hystereesin yläpuolella (>23 %, kun asetusarvona 21 %) ja tuorehöyryventtiili on kiinni. Ohjausarvo voi olla automaattiajolla suurimmillaan 30 % (venttiilin avautumisen rajoituksen verran). Piiriin lisättiin myös 5 min viive: jos molemmat edellä mainitut ehdot täyttyvät, odottaa piiri vielä 5 minuuttia, ennen kuin ohjaustieto annetaan venttiilille. Ehtojen arvot voivat muuttua viiveen aikana ja peruuttaa sen, mikä ei haittaa, koska periaate venttiilin avaamiselle on seuraavanlainen: toisiohöyryventtiilillä halutaan ajaa höyryä takaisin yksiköllä 2 silloin, kun stripperin suhdesäätimen arvo on asetusarvon yläpuolella yksikön 1C toisiohöyryvirtauksen vaikutuksesta. Tilanteessa, jossa tuorehöyryä on käytetty suhteen asetusarvon saavuttamiseksi, ei voida absoluuttisesti kertoa, milloin tuorehöyryn vaikutus palautuskiertovirtaukseen ja sitä kautta suhteeseen loppuu sen jälkeen, kun tuorehöyryventtiili sulkeutuu.

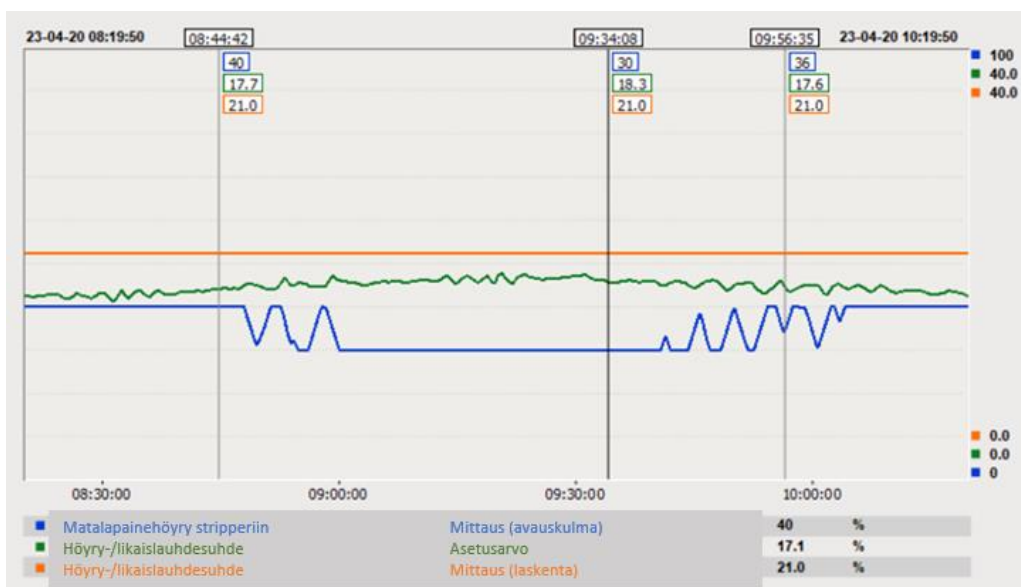
Kuitenkin kuvion 13 historiatrendin perusteella voidaan huomata, että tuorehöyryventtiiliä käyttämällä suhteen arvo ylittää asetusarvon (ja hystereesin), jonka jälkeen toisiohöyryventtiili avautuu. Avautumisen jälkeen suhde laskee jälleen alle asetusarvon, joten toisiohöyryventtiili käytännössä päästää tuorehöyryventtiilin avulla saatua tuorehöyryä, vaikkeivat venttiilit yhtä aikaa auki olekaan. Tästä syystä toisiohöyryventtiiliin asetettiin viive. Myös sen avautumiskulmaa rajoitettiin 50 prosentista 30 prosenttiin.



Kuvio 14. Yksiköiden pesusekvenssin vaikutus strippaukseen (historiatrendi)

Toisiohöyryventtiilin ehtoja muokattiin edelleen uusien testitulosten valossa. Kuvion 14 trendistä huomataan, että suhteen sekä palautuskiertovirtauksen arvot olivat koholla tarkasteluvälillä, jolloin toisiohöyryventtiili oli avautunut ja sulkeutunut suhteen arvon vaihtelun seurauksena. Muiden arvojen trendien avulla huomattiin, että myös puhdistetun lauhteen johtokykyarvojen arvot olivat normaalia korkeammat. Lopulta syyksi löydettiin haihdutinyksikön 1C pesu, jonka pesusekvenssin käyntitieto on myös näkyvillä trendissä. Pesun aikana edellä mainittujen suureiden arvot ovat olleet koholla. Myös muiden yksiköiden pesuilla oli sama vaikutus. Tästä syystä toisiohöyryventtiiliin säätöpiiriin lisättiin se, että venttiilin ohjausarvoksi asetetaan 0 % yksiköiden 1A, 1B, 1C tai 2 pesusekvenssin ollessa käynnissä.

Historiatrendeistä voidaan havaita, että etenkin tuorehöyryventtiilin avautumis- ja sulkeutumisliikkeitä ovat edelleen nopeita. Säättöpiirin säätimet, joiden mukaan ohjaus venttiilille annetaan, ovat liikkeissään (arvojen vaihtelu) myös nopeita, joka trendeissä näkyy terävinä ja ailahtelevaisina käyrinä (trendeissä likaislauhteen palautuskierron ja höyry-/likaislauhdesuhteen mittauksen kuvaajat). Sekä säätimiä että tuorehöyryventtiiliä haluttiin saada toimimaan rauhallisemmin. Virtaussäätimen laskennallisen mittauksen arvojen vaihtelua lähdettiin rauhoittamaan muuttamalla säätimen säätöpiirin suodatusta. Käytännössä säätimen suodatusta ei muutettu, vaan sellainen asetettiin säätimelle, koska suodatusta ei ollut aikaisemmin ollenkaan, ainakaan ohjausjärjestelmän puolella (suodatus voi olla myös mittauslähettimessä). Virtaussäätimen asetettiin 10 sekunnin suodatusaika, jolla säätimen mittaukseen saadaan viivettä.



Kuvio 15. Tuorehöyryventtiilin käyttäytyminen viritysten jälkeen

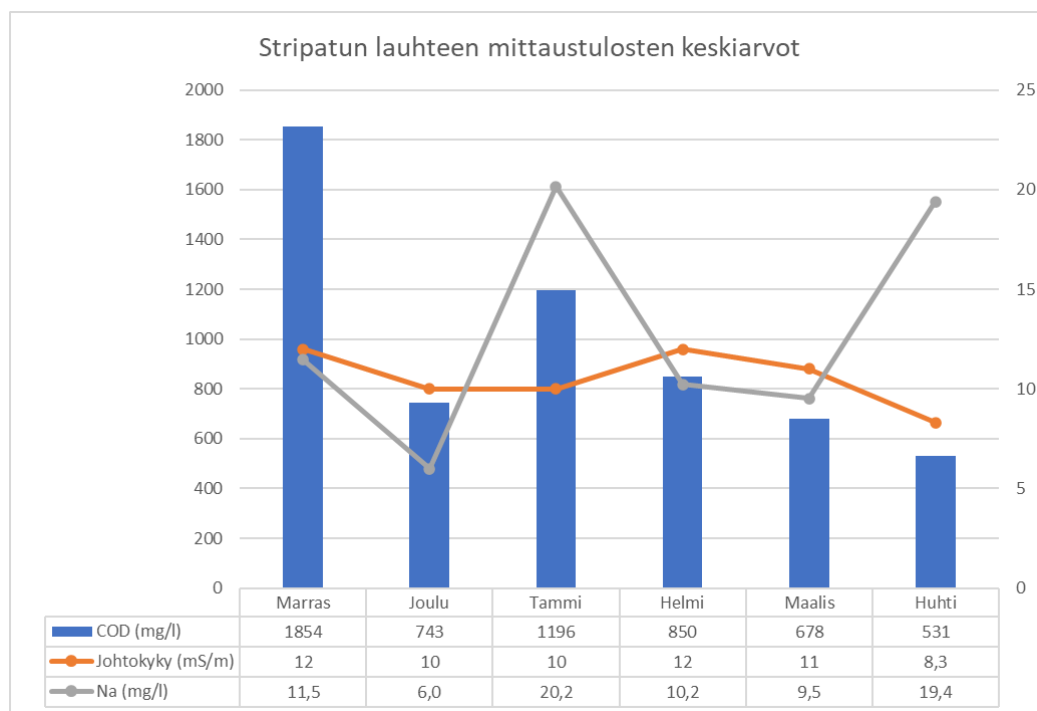
Venttiilien toimintaa lähdettiin rauhoittamaan myös säätimien virityksen kautta. Molemmat säätimet ovat PI-säätimiä, joten viritettävät parametrit olivat vahvistuskerroin ( $K_p$ ) ja integrointi-aika ( $T_i$ ). Molemmissa säätimissä käytettiin samoja arvoja: vahvistuskerrointa 0,5 ja integrointi-aikaa 20 s. Sekä toimeksiantajan asiantuntijan että Harjun ja Marttisen (2000, 128) mukaan virtaussäätimessä käytetty vahvistuskerroin oli melko suuri ja ihanteellisempi arvo voisi olla luokkaa 0,1 ja tähän arvoon vahvistuskerroin muutettiin. Integrointi-aikaa ei muutettu, koska sen arvo oli virtaussäätimelle tyyppillinen. Myös suhdessäätimen parametrit (vahvistuskerroin) muutettiin vastaamaan virtaussäätimen parametrien arvoja. Kuitenkin lähteiden antamat parametrien arvot ovat vain

suuntaa antavia eivätkä täten yksinään riitä takaamaan säätimen optimaalista käyttäytymistä. Viritysparametrit ovat suorassa suhteessa prosessin dynamiikkaan, joka siis määrittää niiden optimaaliset arvot. Säätimiä lähdettiin kuitenkin testaamaan edellä mainituilla parametreilla.

Kuvion 15 historiatrendi osoittaa, että viritysten jälkeen tuorehöyryventtiili käyttäytyi nyt rauhallisemmin: venttiilin ohjaus reagoi suhdesäätimen arvojen muutokseen maltillisemmin ja ohjaus on enemmän portaattoman säätöventtiilin kaltainen, vaikka venttiilille on määritetty vain tietyt ohjauskulmat säätöpiireissä. Tilanne on nyt ihanteellisempi myös venttiilien käyttöiän puolesta: venttiili ei kulu niin nopeasti, kun se ei ”sahaa” tiettyjen avauskulmien välillä äkillisesti.

## 6.2 Saavutetut tulokset

Virityksen jälkeen strippauskolonnin säätötekniikka oli optimoitu niin hyvin, kuin senhetkisillä tiedoilla ja taidoilla pystyttiin. DNA-järjestelmän tilastotietoja tarkastelemalla suhdesäätimen mittausarvo on jo kasvanut säätöjen kehittämisen myötä, sillä maaliskuussa suhdesäätimen mittauksen keskiarvo oli 19 % ja huhtikuussa 19,7 % (säätimen asetusarvolla 21 %). Helmikuussa, ennen säätöjen muutoksia, vastaava luku oli vain 17,4 %. Mahdollisten muutosten tarve selviää tarkastelemalla stripperin toimintaa pidemmällä aikavälillä. Opinnäytetyön päätavoitteen voi täten todeta saavutetuksi, mutta työssä tarkasteltiin myös säätöjen kehittämisen vaikutusta stripatun lauhteen puhtauteen.



Kuvio 16. Stripatun lauhteen mittaustulokset marraskuu 2022–huhtikuu 2023

Stripatun lauhteen puhtautta arvioitiin mittaamalla sen johtokykyä sekä strippauskolonnin mitausanturilla että laboratoriossa analysoitavilla näytteillä. Näytteistä, joita kerättiin huhtikuussa kolmesti viikossa (normaalisti kerran viikossa), mitattiin laboratoriossa myös kemiallisen hapenkulutuksen (COD) ja natriumin arvot. Kuvioista 16 voidaan havaita, että COD:in ja johtokyvyn arvot olivat huhtikuussa alhaisimmat viimeisen kuuden kuukauden aikana. Natriumin määrä oli kuitenkin kasvanut merkittävästi helmi- ja maaliskuuhun verrattuna.

## 7 Pohdinta

### 7.1 Tulosten arviointi ja työn haasteet

Vaikka työn aihetta voisi aluksi pitää melko suppeana ja yksioikoisena, ei se sitä tässä tapauksessa kuitenkaan ollut. Se olisi voinut sitä olla, jos kyseessä olisi ollut muusta prosessista erillään oleva lauhteen puhdistusjärjestelmä ja strippauskolonni. Mutta suurin osa työn monimutkaisuudesta ja tutkimuksellisuudesta muodostuivat ympäröivän prosessin, mustalipeän haihduttamisen, takia. Koska toimeksiantajan strippauskolonnissa hyödynnetään haihdutinyksikön toisiohöyryä pääasiallisena höyrynlähteenä, vaikuttaa haihdutusprosessin tilanne suoraan myös strippauksen toimintaan

hyvässä ja pahassa. Työn edetessä ilmaantuneet haasteet toivat työhön siis paljon syvyyttä sekä sen tekijälle päänvaivaa.

Työn tavoitteena oli kehittää strippauskolonnin säätötekniikkaa suhdessäätöön liittyvien säätöpiirien muokkaamisella ja tämän avulla tehostaa likaislauhteen puhdistamista. Molempiin tavoitteisiin työssä päästiin, muttei ehkä siinä määrin, mitä ainakin itse opinnäytetyöntekijänä olisin toivonut. Jos höyryn virtausta olisi voitu mitata, säätö olisi voitu tehdä paljon yksinkertaisemmin ja säätö luultavasti saavuttaisi asetusarvonsa (ja pysyisi siinä) tehokkaammin. Tekijälle yllätyksenä tuli myös työssä mainitut poikkeustilanteet, jotka estävät tuorehöyryn syötön strippaukseen, jolloin myöskään säätöpiiri ei voi suorittaa toista kahdesta säätötoimenpiteestään. Arvioin kuitenkin, että stripperin säätötekniikka kehitettiin niin hyväksi, kuin se työn tekohetkellä oli mahdollista.

Stripatun lauhteen luulisi puhdistuvan luonnollisesti paremmin nyt, kun strippauksessa käytetään säännöllisesti myös tuorehöyryä toisiohöyryn lisäksi. Edellisessä luvussa raportoidut laskeneet johdokyvyn ja kemiallisen hapenkulutuksen arvot myös viittaavat tähän suuntaan. Kuitenkin natriumin kasvanut määrä sai miettimään, löytyykö sille järkevää selitystä. Tämän takia analysoin laboratorion huhtikuun mittaustuloksia myös sekundäärilauhteista (jakeet 1 ja 2).

Sekundäärilauhteiden mittaustuloksissa oli yhtäläisyyksiä stripatun lauhteen tuloksiin: natriumin määrä oli huhtikuussa molemmissa jakeissa noin kaksinkertainen maaliskuun arvoon verrattuna, aivan kuten stripatussa lauhteessakin. Sekundäärilauhteet ja suurin osa strippauksessa puhdistettavasta likaislauhteesta syntyvät haihdutinyksiköissä. Natrium on siis kulkenut yksiköistä lauhteesaan likaislauhteen mukana strippaukseen, joten sen kohonneet arvot mittaustuloksissa eivät tule työn kehittämistoimenpiteiden seurauksena.

Työtä vaikeutti myös se, ettei strippauskolonniin ole asennettu syötetyn höyryn virtausmittausta, vaan syöttövirtaus mitataan edellisessä luvussa mainitun palautuskierron virtausmäärän mukaan. Tämä aiheuttaa sen, että syötetyn tuorehöyryn vaikutusta ei nähdä suoraan, vaan vasta palautuskierron määrän kasvaessa. Kierto ei ole muutenkaan yksinkertainen, koska stripperin poistohöyry kulkee monen eri lauhduttimen läpi ja osa siitä palautuu monen mutkan kautta strippaukseen. Tä-

män vuoksi tuorehöyryventtiiliin ei voitu asettaa oikeanlaista ja optimaalista säätöä höyryvirtaukseen perustuen. Sen sijaan säätö piti suorittaa tietyillä venttiilin ohjauksikulmilla suhdessäätimen mittausarvoon perustuen.

Tämän lisäksi stripperin tuorehöyrylinjan sijainti (haara samasta linjasta kuin matalapainehöyry kahdelle haihdutinyksikölle) on kaukana optimaalisesta tuorehöyryn syöttämiseen, sillä haihduttamon yksiköiden likaisuus ja siitä aiheutuva heikentynyt höyryn vastaanottokyky vaikuttaa negatiivisesti myös strippaukseen. Kyseisen putkilinjan matalapainehöyryä käytetään ensisijaisesti kahden haihdutinyksikön höyrynsyöttöön. Jos yksiköt vaativat kaiken putkilinjassa virtaavan höyryn, täytyy strippauskolonniin menevän höyrylinjan venttiili sulkea. Jos strippauskolonnille olisi oma tuorehöyrylinjansa suoraan soodakattilalta, höyryä voitaisiin syöttää strippaukseen silloinkin, kun haihduttamon tilanne höyryn vastaanottamisen suhteen on huono.

Edellä mainituista syistä säädöllä ei kaikissa tilanteissa välttämättä päästä säädön tavoitteeseen eli suhdessäätimen asetusarvoon. Säädön venttiilien ohjaus tiettyihin avauskulmiin mahdollistaa sen, että säädön avulla asetusarvo voidaan saavuttaa, mutta takeita tälle tai säätötoimenpiteen kestolle ei ole. Kuitenkin säädön avulla tuorehöyryä syötetään stripperiin enemmän tai vähemmän, jolloin likaislauhteen puhdistaminen on tehokkaampaa kuin ennen säätöjen kehittämistä. Myös työn tulokset osoittivat, että ainakin seurannan ajan asetusarvoon ja sen yli päästiin säätötoimenpiteillä melko säännöllisesti.

## **7.2 Luotettavuuden arviointi ja eettisyys**

Sellun tuotannon periaatteet ja menetelmät ovat pysyneet lähes samoina 2000-luvulla ja eri lähteitä aiheesta löytyy runsaasti. Pidän tähän liittyviä lähteitäni luotettavina, sillä molemmat on tehty lukuisten alan ammattilaisten toimesta. Myös oma kokemukseni ja tietoni alasta vahvisti luotettavuutta lähdevalintoihini liittyen. Tikan toimittama kirja sisältää tämän työn tarpeisiin tarvittavat tiedot menetelmistä ja laitteista, mutta 15 vuodessa hyötysuhteet, kapasiteetit ja muut luvut alalla ovat kuitenkin muuttuneet. Tämän takia oli tarpeellista käyttää myös ajankohtaisesti päivitettyä lähdeä (KnowPulp).

Strippaukseen, faasien erottamiseen ja erotuslaitteistoihin halusin kerätä lähdetietoa monista eri lähteistä, sekä kotimaisista että kansainvälisistä, sillä taustatietoni näistä olivat vähäiset. Lauhteen

strippaus yksinään on melko suppea ja monille tuntematon käsite, jonka takia aihetta myös verrattiin muihin samankaltaisiin menetelmiin. Myös toimeksiantajan haihduttamon käyttö- ja huolto-ohjeen hyödyntäminen oli tarpeen ymmärtämään juuri toimeksiantajan tehtaalla käytetyn prosessin. Muita, avoimia lähteitä, käytettiin kuitenkin niin paljon kuin mahdollista, jotta tutkimuksen eettisyys ja läpinäkyvyys pysyisi hyvällä tasolla. Käyttämäni lähteet eivät siis vain referoi samaa asiaa eri tavoin, vaan antavat tietoa samankaltaisista, mutta kuitenkin hieman eri asioista.

Säätöautomaatioon liittyvät lähteet tukivat ja lisäsivät tekijän tietoa aiheesta ja olivat keskeisimpiä kehittämistutkimuksen käytännön osuudessa. Muiden työhön liittyvien teemojen tavoin myös tämän osion tietoperustan muodostamisessa käytettiin eri lähteitä, joiden informaatioita verrattiin keskenään. Säättö- ja automaatiotekniikka on todella laaja aihe ja sisältää paljon teoksia, joita on rajattu hyvinkin tarkasti. Tämän takia säätöön tai automaatioon liittyviä lähteitä työssä oli paljon, joka taas mahdollisti laajemman sekä eri näkökulmia sisältävän käsityksen muodostamisen aiheesta. Harjun ja Marttisen teos sisältää eniten tietoa työn tavoitteisiin ja tutkimukseen liittyen, minkä takia siihen on viitattukin työn eri vaiheissa useampaan kertaan.

Tutkimuksessa käytetyn aineiston ja raportoinnin perusteella siinä noudatettiin hyvää tieteellistä käytäntöä. Aineisto koottiin lukuisista ja monipuolisista lähteistä ja suurin osa niistä on kirjallisuuslähteitä, joiden luotettavuus on korkealla tasolla. Opinnäytetyöhön liittyi salassa pidettäviä tietoja, joiden takia kaikkia yksityiskohtia, kuten edellä mainittua käyttö- ja huolto-ohjetta, ei työssä jaettu eikä niihin liittyviä salassa pidettäviä asioita ole referoitu tai muulla tavoin raportoitu. Täten tutkimus suoritettiin eettisesti ilman, että siitä aiheutuisi toimeksiantajalle esim. kilpailukyvyyn heikkenemistä. Samalla työ toteutettiin kuitenkin niin, että se on informatiivinen ja antaa hyödyllistä tietoa lukijoilleen.

Työn tuloksia voi pitää luotettavina, sillä kehittämistyön aikana tehtyjen säätömuutosten vaikutukset ovat nähtävissä työn lukuisissa trendikuvioissa. Historiatrendi on tehokas tapa monitoroida prosessin toimintaa eri tilanteissa, koska siinä näkyy lähes välittömästi päivittyvät suureiden nykyiset arvot sekä aiemmin mitatut arvot. Tämän takia trendeistä on helppoa myös päätellä muutoksilla saavutettuja tuloksia. Tulokset ovat myös linjassa sekä toistensa että teorian kanssa: suhdessäädön mittausarvoa saatiin kasvatettua, jolloin myös stripattu lauhde puhdistui paremmin.

### 7.3 Jatkotoimenpiteet ja kehitysehdotukset

Jatkotoimenpiteeksi ehdottaisin säädön ja suhdearvon seuraamista pidemmällä aikavälillä, etenkin tehtaan kevätseisakin jälkeisenä aikana, sillä seisakki vaikuttaa varmasti haihduttamon ja muiden strippaukseen liittyvien prosessien toimintaan jollain tavalla. Jos suhteen arvossa ei saavuteta asetusarvoa tarpeeksi usein, kannattaisi myös likaislahdesäiliön virtaussäädön hyödyntämistä harkita suhdesäätimen arvon tasoittamiseen. Likaislahdesäiliöstä likaislahde ohjataan strippauskolonniin pintasäädön avulla, jolloin pintasäädin on säätöpiirin pääsäädin ja virtaussäädin aläsäädin. Jos virtaussäädintä käytettäisiin pääsäätimenä, mahdollistaisi se likaislahteen tasaisen virtausarvon kolonniin, jolloin myös höyryn ja likaislahteen suhdetta olisi helpompi säätää.

Tämän ehdotuksen haasteena on se, että virtaukselle ei ole mahdollista antaa yhtä asetusarvoa, joka olisi kaikissa tilanteissa likaislahteen varastoinnin kannalta ideaali. Likaislahdesäiliön kannalta pinnan pitäminen vakiona on parempi säätö, strippauksen kannalta taas ei. Säätötapaa pitäisi siis harkita kriittisesti ja miettiä, voisiko esim. virtaussäädölle antaa tilanteen mukaan eri asetusarvoja, joka tasoittaisi virtausta ilman, että säiliön pintamittauksen arvo kasvaisi tai laskisi liian paljon.

Jos pidemmällä aikavälillä suhdesäädön mittauksen keskiarvo jää asetusarvon alapuolelle, voisi tuorehöyryventtiilin ohjauskulmien arvoja kokeilla kasvattaa. Myös avauskulman arvon muuttamista kannattaisi testata, jos suhteen arvo ei vaikuta kasvavan tarpeeksi arvon ollessa alhaisella tasolla. Tämä muutos ei vaatisi uusia toimenpiteitä tai investointeja, sillä sen toteutus vaatisi ainoastaan muutamien arvojen muuttamista DNA-järjestelmässä.

Työn jälkeisiksi kehitysehdotuksiksi voisi siis määrittää strippauskolonniin tulevan höyryn virtausmittauksen asentamisen ja strippauskolonnin oman tuorehöyrylinjan suunnittelun ja rakentamisen. Putkilinjan rakennuttaminen olisi luultavasti melko suuri investointi eikä täten ehkä kannattava toimenpide ainakaan tässä vaiheessa. Virtausmittauksen asennus olisi säädön optimoinnin kannalta suuri etu ja suosittelen toimeksiantajaa ainakin harkitsemaan sitä esim. kannattavuuslaskennan kautta. Uuden tutkimuksellisen opinnäytetyön tekeminen tähän työhön ja em. kehityskoh-teisiin liittyen olisi ehkä tarpeetonta, sillä työn aihe ja varsinkin tutkimusosa voisi jäädä todella suppeaksi.

## Lähteet

Arpalahti, O., Engdahl, H., Jantti J., Kiiskilä, E., Liiri, O., Pekkinen, J., Puumalainen R., Sankala, H., Vehmaan-Kreula, J., Halinen, E., Kapanen, J., Kottila, M., Lankinen, M., Lintunen, T., Näsänen, H., Toropainen, T. & Parviainen, K. 2008. White liquor preparation. Julkaisussa Papermaking Science and Technology. Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy. 2<sup>nd</sup> edition. Helsinki: Paperi ja Puu, 124–193. Toim. P. Tikka.

Bishop, O. N. 2011. Electronics - Circuits and Systems. 4. painos. Italia: Newnes. Viitattu 21.4.2023. <https://janet.finna.fi>. ProQuest Ebook Central.

Energiätehokas höyry- ja lauhdejärjestelmä. 2015. Koulutusmateriaali Motivan verkkosivujen tiedostoarkistossa. Viitattu 30.1.2023. [https://www.motiva.fi/files/10350/Energiätehokas\\_hoyry-ja\\_lauhdejarjestelma\\_VERKKOKOULUTUSAINEISTO\\_2015.pdf](https://www.motiva.fi/files/10350/Energiätehokas_hoyry-ja_lauhdejarjestelma_VERKKOKOULUTUSAINEISTO_2015.pdf).

Gillis, A. 2023. Distributed control system (DCS). Artikkelit TechTargetin verkkosivuilla. Viitattu 3.5.2023. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/distributed-control-system>.

Haihduksen käyttö- ja huolto-ohje. 2016. Metsä Fibren sisäinen dokumentti.

Harju, T. & Marttinen, A. 2000. Säättöpiirin virityksen perusteet. Espoo: Control CAD.

Jansson, E. 2000. Säättö- ja mittaustekniikka. Iisalmi: IS-Vet.

Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä: kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Keinänen, T. & Sumujärvi, M. 2019. Automaatiotekniikka. Helsinki: Sanoma Pro.

Kestävän kehityksen globaali toimintaohjelma Agenda2030. N.d. Raportti Kestävän kehityksen verkkosivuilla. Viitattu 28.3.2023. <https://kestavakehitys.fi/agenda-2030>.

KnowPulp. 2023. Sellutekniikan ja automaation oppimisympäristö. Versio 21.0. Viitattu 16.2.2023. <https://www.knowpulp.com/>.

Kovács J. & Mononen J. 2007. Voimalaitoksen pääsäättöpiirit. Julkaisussa Voimalaitosautomaatio. 2. painos. Helsinki: Suomen Automaatioseura ry, 147–183. Toim. T. Joronen, J. Kovács & Y. Manjane.

Metsä Group vuosikertomus ja kestävyysraportti 2022. Metsä Groupin sähköinen raportti. <https://www.metsagroup.com/globalassets/metsa-group/documents/investors/financial-reporting/vuosikatsaus-fi/metsa-group-vuosikertomus-ja-kestavyysraportti-2022.pdf>.

Parviainen, K., Jaakkola, H. & Nurminen, K. 2008. Evaporation of black liquor. Julkaisussa Papermaking Science and Technology. Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy. 2<sup>nd</sup> edition. Helsinki: Paperi ja Puu, 36–84. Toim. P. Tikka.

Pihkala, J. 2018. Prosessitekniikka: prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit. 3. painos. Helsinki: Opetushallitus.

Seader, J. D., Henley, E. & Roper, D. 2010. Separation Process Principles. 3. painos. Yhdysvallat: John Wiley & Sons, Inc.

Tärpätti. 2022. Osa onnettomuuden vaaraa aiheuttavien aineiden ohjeita Työterveyslaitoksen verkkosivuilla. Viitattu 6.2.2023. <https://www.ttl.fi/ova/tarpatti>.

Vakkilainen, E. 2008. Recovery boiler. Julkaisussa Papermaking Science and Technology. Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy. 2<sup>nd</sup> edition. Helsinki: Paperi ja Puu, 85–121. Toim. P. Tikka.

Äänekosken biotuotetehdas. N.d. Julkaisu Metsä Groupin verkkosivuilla. Viitattu 5.4.2023. <https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/sellun-tuotanto/aanekosken-biotuote-tehdas/>.