



Kaustisoinnin ja meesauunin ajo-ohjeiden ja näytteenoton päivitys

Alexi Holma

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2023
Biotuotetekniikan tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Biotuotetekniikan tutkinto-ohjelma

HOLMA, ALEKSI:

Kaustisoinnin ja meesauunin ajo-ohjeiden ja näytteenoton päivitys

Opinnäytetyö 67 sivua, joista liitteitä 4 sivua
Toukokuu 2023

Opinnäytetyö on tehty Stora Enso Kaukopään sellutehtaan kemikaalien talteenottolinjalle. Opinnäytetyön aihe syntyi toimeksiantajan järjestelmästä puuttuvien prosessien ajo-ohjeiden ja näytteenottokäytäntöjen päivitystarpeesta. Työn tarkoituksena oli laatia prosessivaiheille selvät ja yksiselitteiset ajo-ohjeet sekä pohdita näytteenottokäytäntöjen kehitysmahdollisuuksia. Kemikaalien talteenotto on laaja kokonaisuus ja sisältää monia erilaisia prosessivaiheita, minkä vuoksi opinnäytetyössä käsiteltävä alue on rajattu kaustisointiin ja meesauuneihin.

Opinnäytetyön ensimmäisen osion tavoitteena oli tuottaa ajo-ohjeet kaustisoinnille ja meesauuneille. Ohjeet painottuvat ennen muuta prosessin laatuun ja hallintaan vaikuttaviin tekijöihin. Työn toisen osion tavoitteena oli pyrkiä kehittämään kaustisoinnin ja meesauunialueen näytteenottokäytäntöjä niin, että toimintatavat olisivat tulevaisuudessa mahdollisimman järkeviä.

Opinnäytetyön tuotoksena syntyi toimeksiantajan toiveiden mukaiset ajo-ohjeet kaustisoinnille ja molemmille meesauuneille. Ohjeissa esitetään prosessivaiheille optimaaliset laatuarvot ja käyttöarvojen muuttamisen vaikutus prosessin tilaan. Valmiit ajo-ohjeet ladattiin sellaisenaan Stora Enson liiketoimintajärjestelmään. Ohjeet ovat luottamuksellista tietoa, minkä vuoksi ne puuttuvat opinnäytetyön julkisesta versiosta (liitteet 1–3).

Näytteenottokäytäntöjä pohdittiin ja tarkasteltiin monesta näkökulmasta. Aiheesta keskusteltiin Stora Enson käyttöhenkilökunnan ja toimihenkilöiden sekä Valmetin asiantuntijoiden kanssa. Tuotoksena syntyi Stora Ensolle toimitettu, mahdollisia tulevaisuudessa toteutettavia parannuksia koskeva raportti, joka esitettiin opinnäytetyöseminaarissa. Tämän lisäksi opinnäytetyön aikana korjattiin selkeät puutteet näytteisiin liittyvästä järjestelmästä.

Opinnäytetyön tuotosten ansiosta toimeksiantaja sai käyttöönsä valmiit ajo-ohjeet, jotka ovat aikaisemmin puuttuneet järjestelmästä. Ajo-ohjeita kuitenkin vielä puuttuu muilta kemikaalien talteenoton prosessivaiheilta, joten työtä riittää tulevaisuudessakin. Näytteenottokäytäntöjen päivityksen yhteydessä nousi esille monia parannusehdotuksia. Opinnäytetyötä voidaan käyttää pohjana tuleville muutoksille kohti tehokkaampaa toimintaa.

Asiasanat: kemikaalikierto, kaustisointi, meesauuni, ajo-ohje, näyte

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Bioproduct Engineering

HOLMA, ALEKSI:

Update of Causticization and Lime Kiln Operating Instructions and Sampling

Bachelor's thesis 67 pages, appendices 4 pages
May 2023

The thesis was commissioned by the chemical recovery line of Stora Enso Kaukopää pulp mill. The purpose of this thesis was to update the missing process operating instructions and sampling practices. The thesis focused specifically on the causticizing and the lime kiln area.

The first part of the thesis aimed to produce operating instructions for the causticizing and the lime kiln, with a primary focus on the process quality and control. The second part aimed to improve the sampling practices in the causticizing and lime kiln area to ensure more effective operations.

The result of the thesis consisted of the desired operating instructions for the causticizing and the lime kilns. The instructions indicate optimal quality values and the impact of changing the operating parameters on the process state. The finalized operating instructions were uploaded to Stora Enso's system, so they are not included in the public version of the thesis (Appendices 1-3).

The sampling practices were discussed with Stora Enso's staff and experts from Valmet. The outcome was a report on potential future improvements. Significant deficiencies in the sampling system were also fixed during the thesis.

The operating instructions that arose from this thesis can be also used as a model for other missing instructions in the chemical recovery line. The update of the sampling practices resulted in many suggestions for improvement and can be used as a basis for future changes.

Key words: chemical cycle, causticizing, lime kiln, operating instruction, sample

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	STORA ENSO OYJ	7
3	SULFAATTISELLUN VALMISTUS JA KEMIKAALIKIERTO	8
	3.1 Sulfaattisellun valmistus	8
	3.2 Kemikaalikierto	10
	3.3 Haihuttamo	11
	3.4 Soodakattila	11
	3.5 Kaustisointi	13
	3.5.1 Viherlipeän käsittely	16
	3.5.2 Kalkin sammutus ja kaustisointireaktio	18
	3.5.3 Valkolipeän ja meesan suodatus	21
	3.6 Meesauuni	23
	3.6.1 Meesankäsittely	24
	3.6.2 Meesanpoltto	26
	3.6.3 Savukaasut	29
4	PROSESSISTA OTETTAVAT NÄYTTEET	31
	4.1 Kemikaalikierron näytemääritykset yleisesti	31
	4.2 Kaustisoinnin näytemääritykset	32
	4.3 Meesauunin näytemääritykset	33
5	KAUSTISOINNIN OPEROINTI	35
	5.1 Kaustisoinnin hallinta yleisesti	35
	5.2 Kaustisoinnin laatutavoitteet	36
	5.3 Viherlipeän hallinta	38
	5.4 Sammuttajan hallinta	38
6	MEESAUUNIN OPEROINTI	41
	6.1 Meesauuniin hallinta yleisesti	41
	6.2 Meesansyötön hallinta	41
	6.3 Meesanpolton hallinta	42
	6.4 Savukaasujen hallinta	44
7	AJO-OHJEIDEN MÄÄRITYS	46
	7.1 Lähtökohdat ajo-ohjeiden määrittämiselle	46
	7.2 Kaustisoinnin ajo-ohje	46
	7.3 Meesauunin ajo-ohje	48
8	NÄYTEMÄÄRITYSTEN PÄIVITYS	49
	8.1 Lähtökohdat näytemääritysten päivittämiselle	49
	8.2 Lähtötilanne	49

8.3 Tehdyt muutokset.....	51
8.4 Kehitysmahdollisuudet	53
8.4.1 Käyttöhenkilökunnan näytemääriyksien poistaminen	54
8.4.2 Laboratorionäytteiden lisääminen.....	55
8.4.3 Meesan ja kalkin laadunvalvonnan kehittäminen.....	56
YHTEENVETO.....	59
LÄHTEET.....	61
LIITTEET	64
Liite 1. Kaustisoinnin ajo-ohje	64
Liite 2. Meesauuni 3:n ajo-ohje	65
Liite 3. Meesauuni 4:n ajo-ohje.....	66
Liite 4. Ohje lipeälinjan laboratorionäytteiden ottamiseen	67

1 JOHDANTO

Metsä- ja kemianteollisuudessa jokaisella prosessivaiheella on hyvä olla oma ajo-ohjeensa, sillä ne kertovat optimaaliset laatu- ja käyttöarvot, sekä kuinka prosessiin voidaan vaikuttaa käyttöarvoja säätämällä. Ajo-ohjeiden sisältö on tiivis ja informatiivinen, joten niiden ymmärtäminen vaatii prosessin kokonaiskuvan ja laitteiden toiminnan hallitsemista. Ajo-ohjeiden pääpaino on siis prosessin hallintaan ja laatuun liittyvissä tekijöissä.

Sellutehtaan kemikaalikierron toiminta perustuu kemiallisiin reaktioihin ja aineiden erilaisiin pitoisuuksiin. Tämän vuoksi prosessista on otettava paljon näytteitä erilaisin tavoin, jotta laatu saadaan pidettyä optimaalisena. Näytteiden on kuitenkin aina tuotettava prosessille jonkinlaista lisäarvoa, jotta niitä on järkevää analysoida. Kemikaalikierron näytteenotto koostuu automaattisista analysointilaitteista, laboratorioanalyseistä ja käyttökäytännön tekemistä näytemäärittämisestä. Näiden näytteiden avulla hallitaan ja seurataan tuotannon laatua sekä tehokkuutta. Näytteenottokäytäntöjä on järkevää päivittää tietyin väliajoin pohtimalla, ovatko kaikki näytteet tarpeellisia vai tarvitaanko joitakin näytemäärittämiä mahdollisesti lisää. Näin toiminta säilyy tehokkaana ja lisäarvoa tuottavana.

Opinnäytetyön ensimmäisen osion tarkoituksena on tuottaa Stora Enso Kaukopään tehtaiden kaustisointi- ja meesauuniprosesseille ajo-ohjeet. Toisessa osiossa on tarkoituksena pohtia ja selvittää näytteenottokäytäntöjen kehittämismahdollisuuksia. Ajo-ohjeet ladataan Stora Enson liiketoimintajärjestelmään, josta käyttökäytännön pääsee lukemaan ja perehtymään niihin. Näytteenottokäytäntöjen kehitys- ja parannusmahdollisuuksia toimeksiantaja voi toteuttaa haluamallaan tavalla ja aikataululla, sillä rajallisen aikamäärän vuoksi ei kaikkia muutoksia ehditä toteuttamaan opinnäytetyön aikana. Tarkoituksena on kuitenkin korjata selvät puutteet näytemäärittämiin liittyen työtä suorittaessa.

2 STORA ENSO OYJ

Stora Enso on maailmanlaajuinen pakkaus, biomateriaali, puutuote ja paperiteollisuuden toimittaja. Stora Enson liikevaihto vuonna 2022 oli 11,7 miljardia euroa ja se työllistää noin 21 000 henkilöä. (Stora Enso n.d.a.)

Imatran tehtaat on perustettu vuonna 1935 ja koostuu Kaukopään (kuva 1) ja Tainionkosken tehdasyksiköistä. Imatran tehtailla työskentelee 1050 henkilöä. Yhdessä Kaukopään ja Tainionkosken yksiköt muodostavat yhden maailman suurimmista kuluttajakartonkitehtaista. Vuosittainen kapasiteetti Imatralla on 1200 000 tonnia kuluttajakapakkauskartonkia, 1300 000 tonnia sellua ja 455 000 tonnia muovipäälystettä. (Stora Enso n.d.b.)

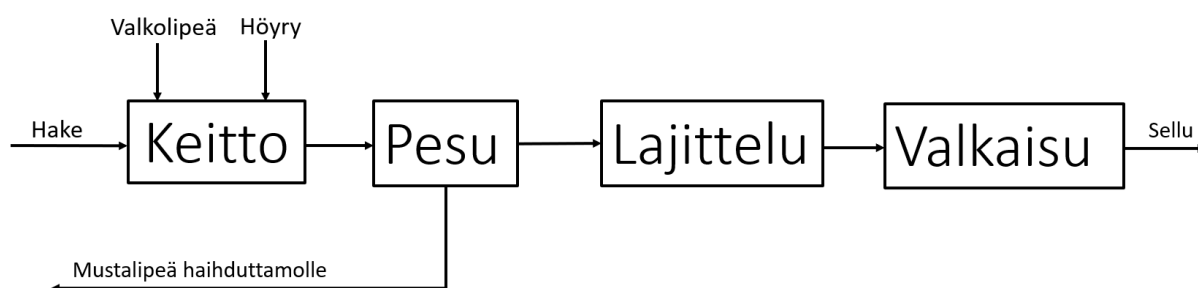


KUVA 1. Stora Enso Imatran Kaukopään tehtaat (Elka 2015).

3 SULFAATTISELLUN VALMISTUS JA KEMIKAALIKIERTO

3.1 Sulfaattisellun valmistus

Sellua käytetään monissa erilaisissa tuotteissa, kuten paperin ja kartongin pääraaka-aineena. Sulfaattisellu, eli kemiallinen massa on nykyään yleisin sellumasnan valmistusmenetelmä. Sulfaattisellun tarkoituksena on poistaa puun kuituja sitova ligniini kemikaalien ja lämmön avulla. Tyypillisesti sulfaattikeiton saanto on 46–53 %, riippuen onko kyseessä lehti- vai havupuu. Kemiallinen sellunvalmistus sisältää paljon erilaisia prosessivaiheita, mutta yksinkertaistetusti prosessi voidaan esittää kuvion 1 lohkokaaavion mukaisella tavalla. (KnowPulp versio 21.0, 2023a.)



KUVIO 1. Sulfaattisellun valmistuksen lohkokaaavio (Fardim 2011, 203–204).

Prosessi alkaa puun käsittelystä, jossa puut kuoritaan ja haketetaan. Haketus on tärkeää, jotta sulfaattikeittoon saadaan luotua optimaaliset olosuhteet. Hakepalojen on oltava riittävän ohuita ja tasapaksuja, jotta keittokemikaalit pääsevät imeytymään hakkeeseen tehokkaasti. (Seppälä ym. 2001, 30–31.)

Keitto on prosessivaihe, jossa sellunvalmistuksen tärkein reaktio tapahtuu. Reaktoriin, eli keittimeen syötetään hake ja keittokemikaali, jonka jälkeen nostetaan lämpötila 150–170 °C. Keittokemikaalin ja lämpötilan vaikutuksesta puun ligniini liukenee ja puukuidut vapautuvat. Sulfaattikeiton keittokemikaalina käytetään valkolipeää (kuvio 2), joka on natriumhydroksidin ja natriumsulfidin seos. Keiton aikana natriumhydroksidi pilkkoo ligniiniä ja natriumsulfidin tehtävä on nopeuttaa reaktiota sekä pienentää selluloosan liukenemistä keittoprosessin aikana. Keittoprosessin reaktiotuotteena saadaan sellua ja mustalipeää. Mustalipeä koostuu

epäorgaanisista keitossa käytetyistä kemikaaleista ja orgaanisesta puuhakkeesta liuenneesta aineksesta. (Fardim 2011, 203–204.)



Aine	Määrä [g / litra]
Natrium	78,0
K	14,1
S _{tot}	22,4
Cl _{tot}	1,7
S ²⁻	18,0
(yhdisteitä, sis. mainitut alkuaineet:)	
NaOH	88,2
Na ₂ S	41,8
Na ₂ CO ₃	40,3
Na ₂ SO ₃	0,1
Na ₂ S ₂ O ₃	8,99
Na ₂ SO ₄	0,5
Kokonaisalkali, g NaOH/l	161,6
Aktiivinen alkali, g NaOH/l	131,2
Tehollinen alkali, g NaOH/l	109,8

KUVIO 2. Valkolipeän koostumus (KnowPulp versio 21.0, 2023f).

Sellu ja mustalipeä erotetaan toisistaan pesemällä. Pesulla on kaksi tarkoitusta, puhdistaa sellumassa ja mustalipeän talteenotto, sillä mustalipeä on arvokas sivuvirta sellun tuotannossa. Optimaalinen sellun pesu pienentää valkaisukemikaalien tarvetta ja parantaa prosessin ajettavuutta. Pesussa pyritään käyttämään mahdollisimman vähän pesunestettä, jotta mustalipeän kuiva-ainepitoisuus ei laskisi liian alas. Liian alhainen mustalipeän kuiva-ainepitoisuus heikentää kemikaalien talteenotto-prosessin tehokkuutta. (KnowPulp versio 21.0, 2023b.)

Sellumassa sisältää vielä pesun jälkeen epäpuhtauksia, kuten hiekkaa, tikkuja, roskia tai muita kiinteitä sellumassaan kuulumattomia partikkeleita. Näiden epäpuhtauksien erottamiseen käytetään lajittelua, jossa sellumassa jaetaan akseptiin ja rejektiin. Lajittamon tarkoitus on siis poistaa sellumassaan kuulumattomat epäpuhtaudet mahdollisimman tehokkaasti niin, että kuituhäviöt olisivat mahdollisimman pieniä. (Seppälä ym. 2001, 110.)

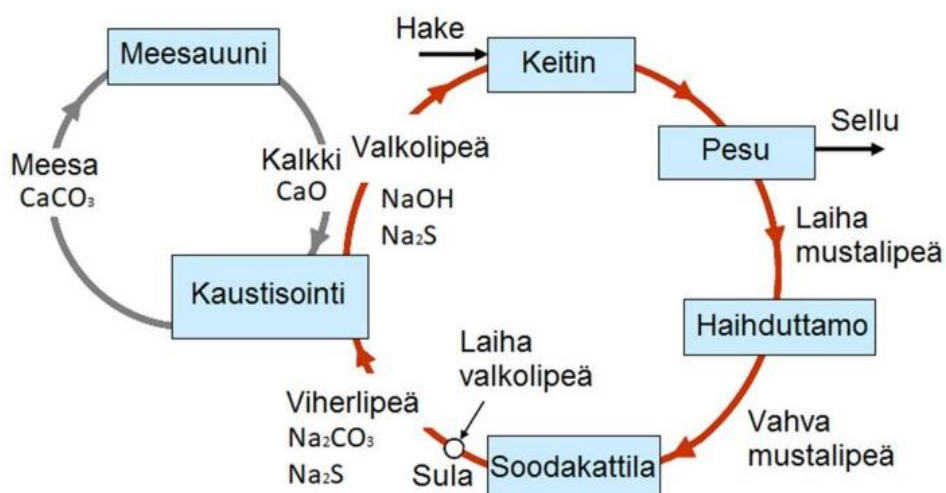
Useimmat sellusta valmistettavat lopputuotteet vaativat puhtaan valkoisen värin. Ilman valkaisua sellu on väriltään ruskeaa sen sisältämän jäännösligniinin vuoksi. Kaikkea ligniiniä ei saada poistettua sellun pesussa, sillä kaikki ligniini ei liukene sellun keitossa ja tämän vuoksi sellumassa sisältää vielä pesuvaiheen jälkeenkin ligniiniä. Valkaisu prosessivaiheessa sellusta poistetaan jäännösligniiniä ja nostetaan sellun vaaleutta kemiallisin menetelmin. Valkaisu ei kuitenkaan aina ole

pakollista, sillä myös ruskeaa sellua voidaan käyttää tietyissä lopputuotteissa. Paljon ligniiniä sisältävä sellu on haastavaa valkaista, jonka vuoksi sellun riittävä pesu on tärkeää. (Bajpaj 2016, 26.)

3.2 Kemikaalikierto

Sulfaattisellun valmistus vaatii toimiakseen rinnalleen kemikaalikierron. Sulfaattikeitossa käytettävät keittokemikaalit ovat arvokkaita, jonka vuoksi ne on otettava mahdollisimman tehokkaasti talteen ja käytettävä uudelleen. Kemikaalikierron tavoitteena on muuntaa käytetyt keittokemikaalit uudelleen käytettävään muotoon, tuottaa lämpöenergiaa ja estää haitallisten kemikaalien päätyminen ympäristöön. Kemikaalikierto siis mahdollistaa taloudellisesti kannattavan ja ympäristöystävällisen selluntuotannon. (Bajpai 2008, 22.)

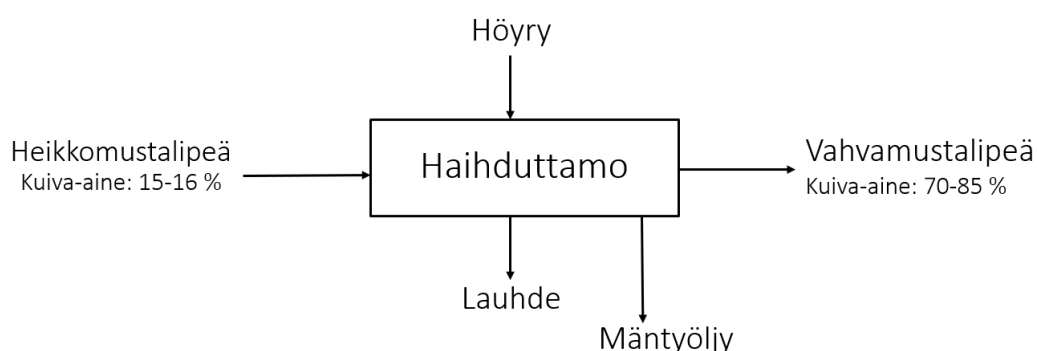
Kemikaalikierto on laaja kokonaisuus ja sisältää monia eri vaiheita. Kuviossa 3 on esitetty kemikaalikierron kokonaisuus ja sen prosessivaiheet. Kemikaalikierto alkaa sellun pesusta tulevan laihamustalipeän käsittelyllä haihuttamalla. Haihuttamolta saadaan vahvamustalipeää, joka voidaan polttaa soodakattilassa. Poltossa mustalipeän orgaaninen aines palaa pois ja jäljelle jää epäorgaaniset kemikaalit, josta saadaan viherlipeää. Viherlipeää prosessoidaan kaustisoinnissa ja saadaan tuotettua valkolipeää sellun tuotannon tarpeisiin. Kemikaalikierto muodostaa siis yhdessä sellun tuotannon kanssa jatkuvatoimisen ja suljetun kemikaalikiertoympeyrän, jossa kemikaalit muuttavat jatkuvasti muotoaan. (Seppälä ym. 2001, 145.)



KUVIO 3. Kemikaalikierron kokonaisuus (Tran & Vakkilainen 2016, muokattu).

3.3 Haihduuttamo

Sulfaattisellun valmistuksessa sellusta erotettu mustalipeä pumpataan haihduuttamolle. Haihduuttamolle tulevaa mustalipeää kutsutaan laihamustalipeäksi tai heikkomustalipeäksi, sillä sen kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti noin 15–16 %. Jotta mustalipeä voidaan polttaa soodakattilassa, on siitä haihduutettava pois paljon vettä. Haihduuttamon tärkein tehtävä on siis nostaa mustalipeän kuiva-ainepitoisuutta mahdollisimman paljon, kuten kuvion 4 lohkokaaviossa on esitetty. Haluttu kuiva-ainepitoisuus on riippuvainen tehtaasta ja sen laitteistosta, mutta nykypäivänä kuiva-ainepitoisuus on 70–85 % välillä. (KnowPulp versio 21.0, 2023c.) Haihduutettavan veden määrä vuorokauden aikana on suuri. Esimerkkinä 750 t/vrk sellua tuottava tehdas haihduuttaa vettä haihduuttamalla 7000 t/vrk (Sepälä ym. 2001, 147).



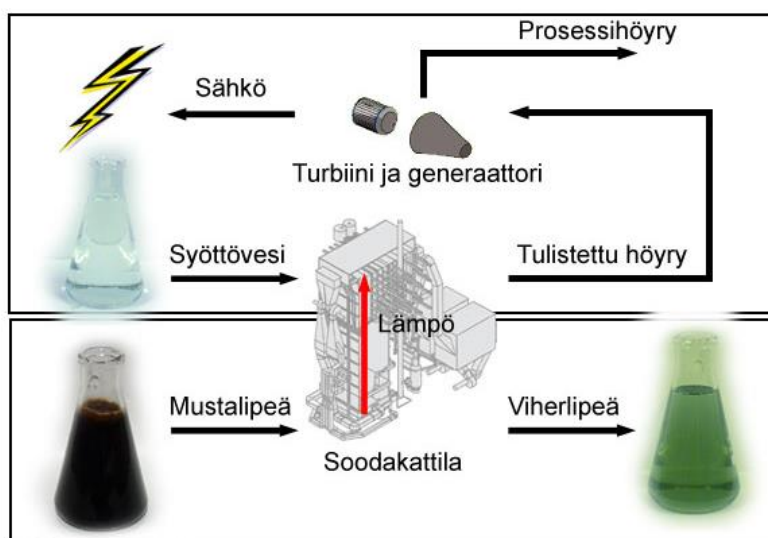
KUVIO 4. Haihduuttamon toimintaperiaate (Bajpai 2017, 40, muokattu).

Veden haihduuttamisen lisäksi haihduuttamolla on huomioitava mustalipeän sisältämien sivuvirtojen talteenotto, joista tärkeimmät ovat suopa, metanoli ja tärpätti (KnowPulp versio 21.0, 2023c.) Erityisesti suovan tehokas talteenotto on tärkeää, sillä paljon suopaa sisältävä mustalipeä aiheuttaa ajettavuusongelmia haihduuttamalla. Suopa on myös arvokas sivuvirta ja siitä tuotetaan sellutehtailla raakamäntyöljyä. (Tikka 2008, 360.)

3.4 Soodakattila

Soodakattilalla on kaksi päätehtävää, mustalipeän sisältämien keittokemikaalien talteenotto ja mustalipeän orgaanisen aineksen polttaminen, josta saadaan tuotettua höyryä ja sähköä (kuvio 5). Näiden kahden päätarkoituksen vuoksi

soodakattilan rakenne on monimutkainen ja sen toiminta eroaa merkittävästi tavallisia polttoaineita käyttävistä höyrykattiloista. Suomessa soodakattilat tuottavat hieman vajaan kolmanneksen lämmön ja sähkön yhteistuotannosta, eli n. 6,1 TWh lämpöä ja sähköä vuodessa. Tämä tekee mustalipeästä suomen tärkeimmän biopolttoaineen ja soodakattiloista merkittävimmän uusiutuvan energian tuottajan. (Soodakattilayhdistys n.d.)



KUVIO 5. Soodakattilan toimintaperiaate (KnowPulp versio 21.0, 2023d).

Suurin osuus mustalipeän kuiva-aineesta on orgaanista aineesta, kuten ligniiniä, hiilihydraatteja ja uuteaineita. Kuviossa 6 on esitetty tyypillinen analyysi mustalipeän kuiva-aineen sisältämistä epäorgaanisista aineista. (KnowPulp versio 21.0, 2023d.)

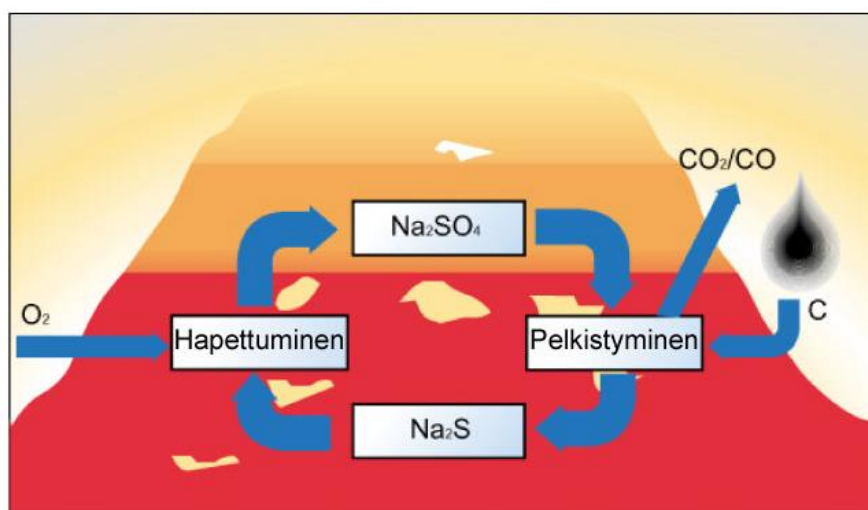


Aine	Määrä [% kuiva-aineesta]
Na	19.3
K	3.34
S _{tot}	5.50
Cl _{tot}	0.41
C	31.9
O	36.14
H	3.33
N	0.08
(Yhdisteitä, sis. mainitut alkuaineet:)	
NaOH	1.1
CO ₃ ²⁻	6.2
Na ₂ SO ₃	0.1
Na ₂ S ₂ O ₃	2.13
Na ₂ SO ₄	1.23
S ²⁻	1.93
Lämpöarvo, HHV MJ/kg ka 12,74	

KUVIO 6. Analyysi mustalipeän epäorgaanisista yhdisteistä (KnowPulp versio 21.0, 2023d).

Mustalipeän epäorgaaniset aineet natrium ja rikki vapautuvat, kun orgaaninen aines palaa soodakattilan tulipesässä. Polttotapahtumassa vapautuu merkittävä määrä lämpöenergiaa, joka käytetään höyryn ja sähkön tuotantoon. Syntynyt lämpöenergia siirretään soodakattilan kattilaveteen, jolloin vesi höyrystyy. Syntynyt korkeapaineinen höyry jaetaan koko tehtaan prosessien tarpeisiin. Soodakattilan höyryntuotantolaitteisto on täysin erillinen prosessi, ja sillä ei ole vaikutusta kemikaalien talteenottoon. (KnowPulp versio 21.0, 2023d.)

Mustalipeän epäorgaaniset kemikaalit otetaan soodakattilassa talteen ja syntyy viherlipeää. Mustalipeän sisältämä rikki pelkistyy soodakattilassa kuvion 7 mukaisesti natriumsulfidiksi, joka on toinen sellunkeitossa tarvittava kemikaali. Kaikki rikkiyhdisteet eivät kuitenkaan pelkisty ja reaktion täydellisyyttä seurataan reduktioasteella, joka on tyypillisesti yli 90 %. Epäorgaaniset kemikaalit muodostavat soodakattilan pohjalle sulakeon, jossa pelkistymisreaktio tapahtuu. Kemikaalisula kerätään sulakourujen kautta talteen liuotussäiliöön, jossa sula laimennetaan heikkovalkolipeällä ja syntyy viherlipeää. (Tran & Vakkilainen 2016.)

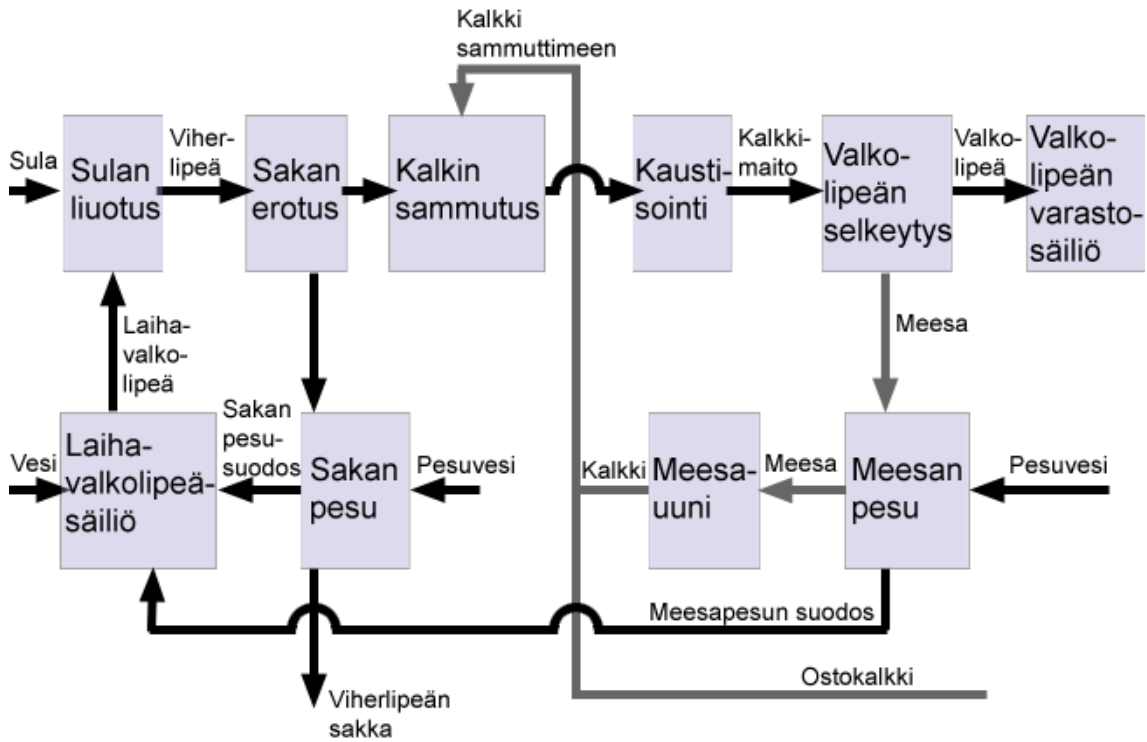


KUVIO 7. Soodakattilassa tapahtuva pelkistymisreaktio (KnowPulp versio 21.0, 2023d).

3.5 Kaustisointi

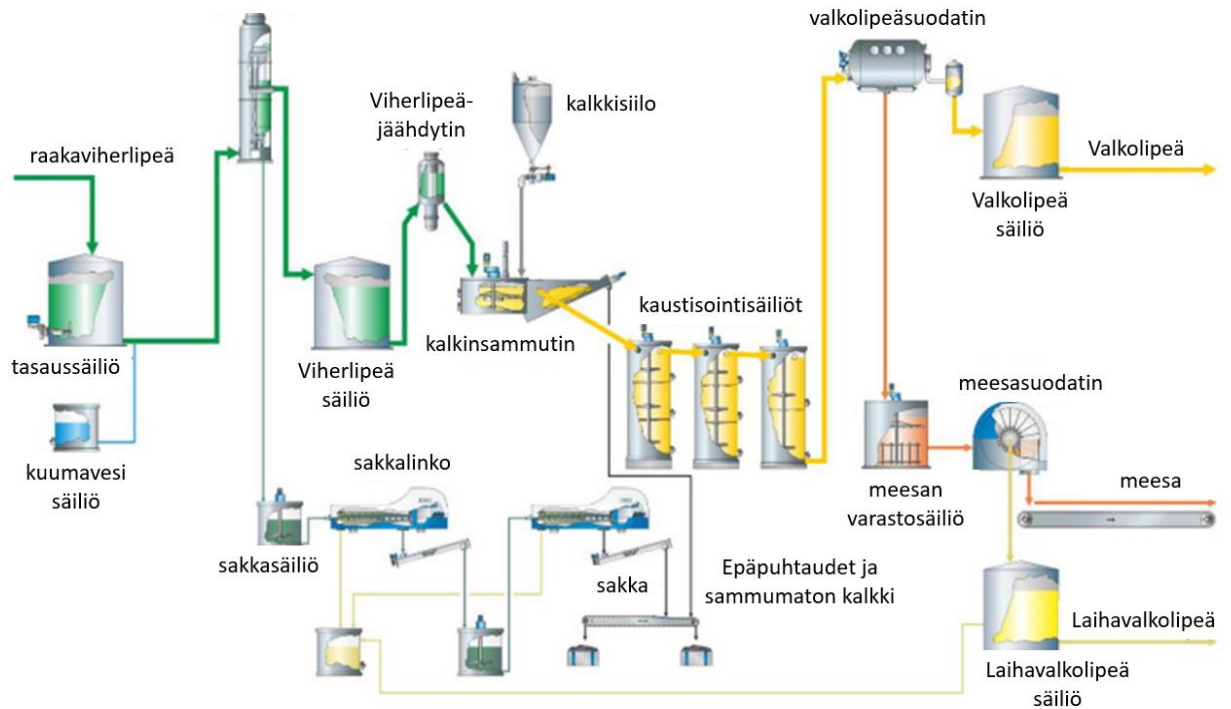
Kaustisoinniksi kutsutaan prosessivaihetta, jossa soodakattilalta tuleva viherlipeä prosessoidaan valkolipeäksi. Kaustisoinnin tarkoituksena on tuottaa puhdasta, kuumaa ja riittävän väkevää valkolipeää, jossa on mahdollisimman vähän sellun

keitossa reagoimattomia kemikaaleja, eli inerttiä kuormaa. Kaustisoinnin on tuotettava sellun tuotannon tarvitsema määrä valkolipeää, jotta kemikaalikierto pysyy tasapainossa. Nykyaikaisen yhden kaustisointilinjan tuotantokapasiteetti on 10000–12000 m³ valkolipeää vuorokaudessa. (Tikka 2008, 124–125.) Kuvion 8 lohkokaaviossa on esitetty kaustisoinnin ja meesauunin muodostama kokonaisuus prosessivaiheineen.



KUVIO 8. Lohkokaavio valkolipeän valmistuksesta (KnowPulp versio 21.0, 2023e).

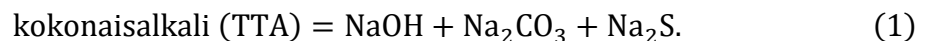
Kaustisointi sisältää monia yksikköprosesseja ja laitteita, kuten kuviosta 9 voidaan huomata. Prosessivaiheet voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen, viherlipeän käsittelyyn, kalkin sammutukseen ja valkolipeän suodatukseen. Viherlipeän käsittely sisältää vaiheet raakaviherlipeäsäiliöstä viherlipeäjähdyttimelle sekä sakan käsittelyyn. Kalkin sammutus prosessivaihe sisältää kalkinsammutuksen ja kaustisointisäiliöt. Valkolipeän suodatus sisältää loput kuvion 9 prosessivaiheista. (KnowPulp versio 21.0, 2023e.) Näiden prosessivaiheiden toimintaa tarkastellaan syvemmin tässä luvussa omien otsikoidensa alla.



KUVIO 9. Kaustisoinnin yksikköprosessit ja laitteet (KnowPulp versio 21.0, 2023e, muokattu).

Kaustisoinnin toiminta perustuu kemiallisiin reaktioihin ja aineiden pitoisuuksiin, jonka vuoksi on tuotannon laatua seurattava jatkuvasti. Tärkeimmät seurattavat tekijät kaustisoinnissa ovat kokonaisalkali, kaustisointiaste, aktiivinen alkali ja sulfiditeetti. Nämä käsitteet on oltava hallussa, jotta kaustisoinnin toimintaa voidaan tarkastella syvällisemmin. (KnowPulp versio 21.0, 2023f.)

Kokonaisalkali ilmoittaa titrautuvien natriumyhdisteiden yhteismäärän (TTA) ja se on tärkeä seurattava tekijä etenkin viherlipeää käsiteltäessä. Kokonaisalkali koostuu natriumhydroksidista (NaOH), natriumkarbonaatista (Na₂CO₃) ja natriumsulfidista (Na₂S), eli se noudattaa kaavaa 1. Kokonaisalkalin yksikkö on g/l.



Kaustisointiasteella seurataan kaustisointireaktion tehokkuutta, eli se ilmoittaa kuinka suuri osa natriumkarbonaatista on saatu muunnettua natriumhydroksidiksi. Kaustisointiaste noudattaa kaavaa 2.

$$\text{kaustisointiaste \%} = \frac{\text{NaOH}}{(\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3)} \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Aktiivinen alkali kertoo tuotetun valkolipeän väkevyyden, eli kuinka paljon valkolipeässä on sellunkeitossa reagoivia kemikaaleja. Näin ollen aktiivialkali on natriumhydroksidin ja natriumsulfidin yhteismäärä ja noudattaa kaavaa 3. Aktiivisen alkalin yksikkö on g/l.

$$\text{aktiivinen alkali} = \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}. \quad (3)$$

Sulfiditeetti ilmoittaa natriumsulfidin määrän valkolipeässä, eli kertoo kuinka suuri määrä aktiivisesta alkalista on natriumsulfidia. Sulfiditeetti noudattaa näin ollen kaavaa 4. (KnowPulp versio 21.0, 2023f.)

$$\text{sulfiditeetti \%} = \frac{\text{Na}_2\text{S}}{(\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S})} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

3.5.1 Viherlipeän käsittely

Ennen varsinaista kaustisointireaktiota on viherlipeä käsiteltävä, jotta viherlipeästä saadaan tasalaatuista. Soodakattilalta tuleva raakaviherlipeä sisältää kiintoainesta, eli sakkaa tyypillisesti noin 600–2000 mg/l. (Bajpai 2008, 78.) Viherlipeäsakka koostuu liukenemattomista yhdisteistä, mm. noesta ja muista epäpuhtauksista ja se on pyrittävä poistamaan viherlipeästä mahdollisimman tehokkaasti. Sakanpoiston lisäksi viherlipeän käsittelyssä säädetään viherlipeän lämpötila ja kokonaisalkali halutulle tasolle. Viherlipeän kokonaisalkali pidetään mahdollisimman korkeana, mutta liian suuri alkalipitoisuus voi muodostaa putkistoja tukkivaa pirssoniittia. Tästä syystä viherlipeän kokonaisalkali pidetään tyypillisesti 165–175 g/l tasolla. (KnowPulp versio 21.0, 2023g.)

Kuviossa 10 on esitetty tyypillisen viherlipeän koostumus. Viherlipeän tärkeimmät komponentit ovat natriumkarbonaatti (Na_2CO_3), natriumsulfidi (Na_2S), ja natriumhydroksidi (NaOH). Kaustisoinnin tarkoitus on muuttaa mahdollisimman paljon natriumkarbonaattia natriumhydroksidiksi. Natriumsulfidi kulkee kaustisointiprosessin läpi muuttumattomana, eli inerttinä aineena. Viherlipeän

natriumhydroksidipitoisuus on peräisin heikkovalkolipeästä, johon soodakattilan kemikaalisula laimennetaan. (KnowPulp versio 21.0, 2023g.)

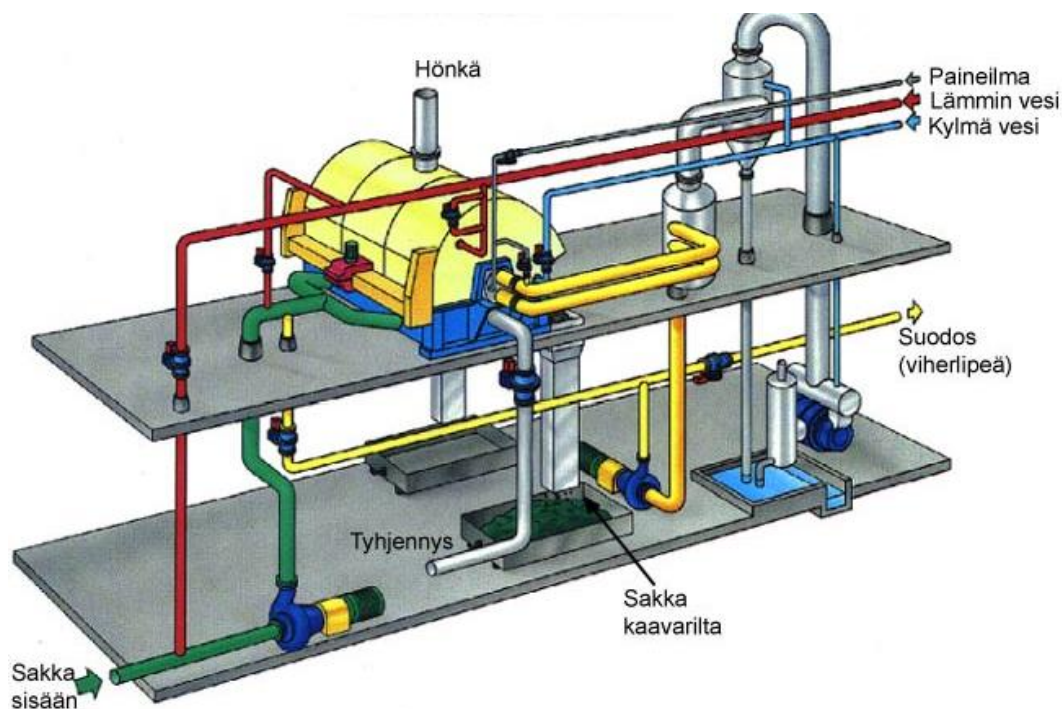


Aine	Määrä [g / litra]
Natrium	90,8
K	14,5
S _{tot}	24,1
Cl _{tot}	1,9
S ²⁻	19,1
(yhdisteitä, sis. mainitut alkuaineet:)	
NaOH	18,8
Na ₂ S	42,7
Na ₂ CO ₃	134,9
Na ₂ SO ₃	1,41
Na ₂ S ₂ O ₃	7,08
Na ₂ SO ₄	8,7
Kokonaisalkali, g NaOH/l	165.2
Aktiivinen alkali, g NaOH/l	62.7
Tehollinen alkali, g NaOH/l	40.7

KUVIO 10. Viherlipeän koostumus (KnowPulp versio 21.0, 2023g).

Soodakattilalta tulevan viherlipeän laatu tasataan tasaussäiliössä, jossa lämpötila ja virtaus tasoittuvat. Tasaussäiliöstä viherlipeä pumpataan sakan erotukseen, joka voidaan toteuttaa selkeyttämällä tai suodattamalla. Selkeyttäminen on perinteinen erotusmenetelmä, jossa sakka laskeutuu raskaampana komponenttina selkeyttimen pohjalle ja puhdas viherlipeä otetaan talteen selkeyttimen yläosasta. Viherlipeän suodattaminen on selkeyttämistä tehokkaampi tapa erottaa sakka viherlipeästä ja suodattamalla päästäänkin todella alhaiseen viherlipeän kiintoainepitoisuuteen. Viherlipeäsuodatuksessa viherlipeä suodatuu suodatuselementtien läpi paine-eron vaikutuksesta. (KnowPulp versio 21.0, 2023g.)

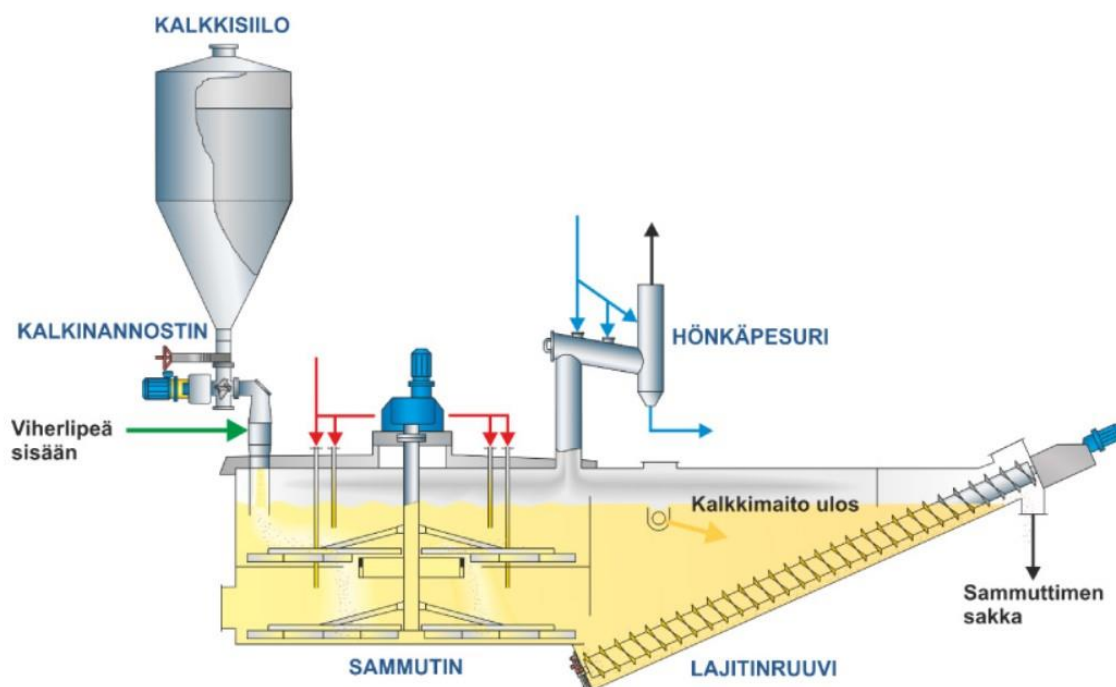
Viherlipeästä erotettu sakka sisältää vielä alkalipitoisuuksia, joten sakka on pestävä ja kuivattava, ennen sen poistamista prosessista. Precoat-imurumpusuodin (kuvio 11) on yleisin tapa käsitellä viherlipeäsakkaa. Suodin tekee suodatinkankaan pinnalle precoat-kerroksen meesasta, jonka päälle muodostuu sakkakerros. Sakkakerros pestään pesusuihkuilla ja pesuvesi suotautuu precoat-kerroksen ja suodatinkankaan läpi paine-eron vaikutuksesta. Suotimen pinnalle jäävä sakkakerros poistetaan suotimelta kaavarilla. Sakan käsittelyyn on myös muita ratkaisuja, esimerkiksi nykyaikaista viherlipeäsuodatusta käytettäessä ei sakkaa tarvitse enää pestä, vaan mekaaninen sakan kuivaus riittää. (Sanchez 2007.)



KUVIO 11. Precoat-imurumpusuodatin viherlipeäsakan pesuun ja kuivaukseen (KnowPulp versio 21.0, 2023g).

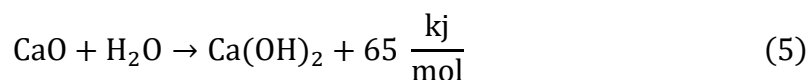
3.5.2 Kalkin sammutus ja kaustisointireaktio

Kalkin sammutuksessa kaustisointireaktio saa alkunsa. Viherlipeän joukkoon syötetään kalkkia, joka toimii apukemikaalina valkolipeän valmistuksessa. Viherlipeä ja kalkki syötetään kuvion 12 mukaiseen laitteeseen, jota kutsutaan sammuttajaksi. Sammuttaja koostuu kahdesta osasta, sammuttimesta ja lajitinruuvista. Lajitinruuvin tehtävä on poistaa kalkin mukana tullutta hiekkaa ja muita kiinteitä partikkeleita. (Tikka 2008, 147.)



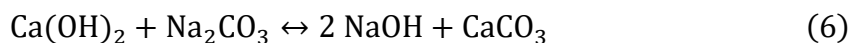
KUVIO 12. Kalkin sammutin (KnowPulp versio 21.0, 2023h).

Sammuttajaan syötettävä kalkki reagoi välittömästi viherlipeän sisältämän veden kanssa. Kalkki siis sammutetaan, josta tulee myös prosessivaiheen nimi. Sammutettu kalkki reagoi viherlipeän kanssa, jonka tuotoksena viherlipeästä saadaan valkolipeää. Sammuttajassa tapahtuu kaksi reaktiota, kalkin sammuminen ja kaustisointireaktio. Ensimmäinen reaktio viherlipeän ja kalkin välillä on kaavan 5 mukainen. Reaktio alkaa välittömästi, kun kalkki ja viherlipeä pääsevät kosketuksiin ja vaatii noin 10–20 minuuttia toteutuakseen. (Tikka 2008, 147.)



Kalkin, eli kalsiumoksidin (CaO) reagoidessa veden (H_2O) kanssa syntyy kalsiumhydroksidia (Ca(OH)_2), eli sammutettua kalkkia. Reaktio on eksotermiäinen, jonka vuoksi sammuttimeen syötettävän viherlipeän lämpötila ei saa olla liian korkea. Liian korkea lämpötila aiheuttaa sammuttajan kiehumisen, joka luo haasteita prosessin hallinnassa ja aiheuttaa turvallisuusriskin. (Tikka 2008, 129–147.)

Kalkin sammutusreaktiossa muodostunut kalsiumhydroksidi mahdollistaa kaustisointireaktion. Kalsiumhydroksidi reagoi viherlipeän natriumkarbonaatin kanssa kaavan 6 mukaisesti.



Reaktiotuotteena saadaan natriumhydroksidia (NaOH) ja kalsiumkarbonaattia (CaCO₃). Natriumhydroksidi on sellunkeitossa reagoiva kemikaaliyhdiste ja kalsiumkarbonaatti on reagoimatta kalkkia, eli meesaa. Valkolipeän ja meesan seosta kutsutaan kalkkimaidoksi. (Tikka 2008, 129.)

Kaustisointireaktio on hidas ja vaatii paljon aikaa halutun lopputuloksen saavuttamiseksi. Reaktiosta noin 70 % tapahtuu sammuttajassa, jonka vuoksi reaktiota jatketaan kaustisointisäiliöissä (kuvio 13). Kaustisointisäiliöiden tarkoitus on antaa reaktiolle aikaa tapahtua. (Tikka 2008, 147.) Kaiken viherlipesän sisältämän natriumkarbonaatin ei ole kuitenkaan mahdollista muuttua natriumhydroksidiksi luontaisen kemikaalitasapainon vuoksi. Natriumkarbonaatin muuntumista natriumhydroksidiksi seurataan kaustisoitumisasteella, jonka on käytännössä mahdollista olla korkeintaan 85 %. (Grace & Tran 2009.)



KUVIO 13. Kaustisointisäiliöt (KnowPulp versio 21.0, 2023h).

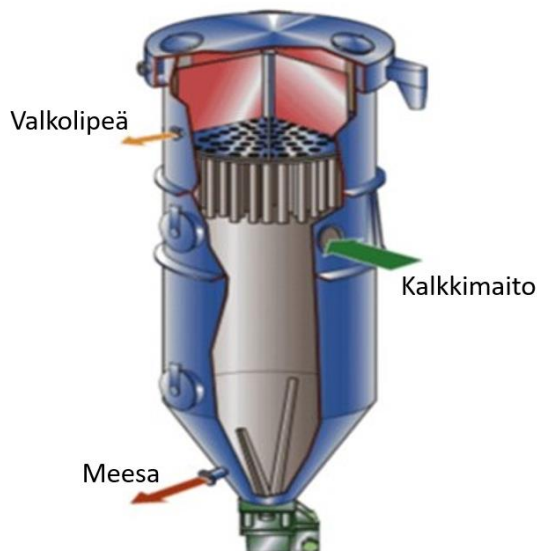
Kaustisoinnin toimivuuden kannalta on tärkeää pitää kalkkimaidon seassa olevan reagoimattoman kalkin määrä mahdollisimman pienenä. Tämän vuoksi kaustisointisäiliöt koostuvat erillisistä kammioista, jotka mahdollistavat tasaisen reaktion natriumkarbonaatin ja kalsiumhydroksidin välillä. Kalkkimaito kulkee omalla painollaan kaustisointisäiliöstä toiseen, joten pumppuja ei tarvita. Kaustisointisäiliöiden määrä ja koko on riippuvainen tarvittavasta reaktioajasta, joka on normaalisti noin 2,5 tuntia. (Tikka 2008, 148.)

3.5.3 Valkolipeän ja meesan suodatus

Kaustisointireaktion jälkeen syntyneet lopputuotteet, valkolipeä ja meesa, on erotettava toisistaan. Valkolipeän suodatus on tärkeä prosessivaihe, jotta saadaan tuotettua laadukasta ja puhdasta valkolipeää. Meesapitoisuus valkolipeässä on pidettävä mahdollisimman pienenä. Valkolipeästä erotettu meesa on myös suodatettava, jotta meesan sisältämät alkalipitoisuudet saadaan talteen. Suodatettu valkolipeä varastoidaan valkolipeäsäiliöihin, josta se pumpataan sellun keittoon. Meesa varastoidaan meesasäiliöön, jonka jälkeen se poltetaan meesauunissa. (KnowPulp versio 21.0, 2023i.)

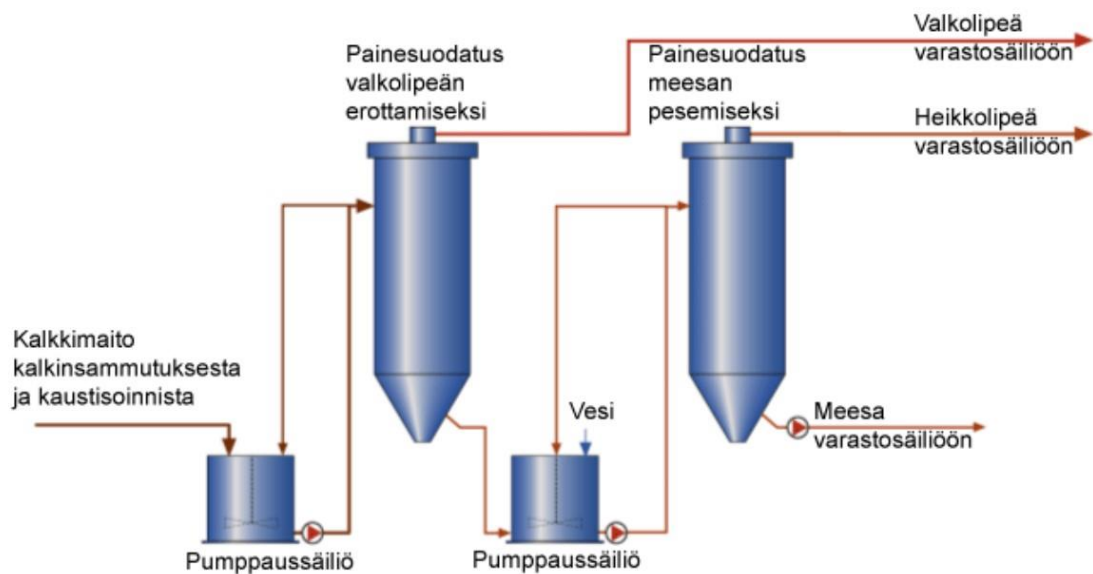
Valkolipeän ja meesan erottamiseksi on olemassa monia erilaisia laiteratkaisuja, mutta menetelmät voidaan jakaa karkeasti selkeyttämiseen ja suodattamiseen. Valkolipeän selkeyttämisessä toimintaperiaate on sama kuin viherlipeselkeyttämisessä ja se on luotettava sekä vakaa erotusmenetelmä. Selkeyttäminen ei kuitenkaan ole kovinkaan tehokas erotusmenetelmä ja sen vuoksi nykyaikaisissa tehtaissa käytetään suodatusmenetelmää. Yleisimmät suodatusmenetelmät ovat painesuodatin ja paineistettu kiekkosuodin. (Tikka 2008, 149–151.)

Painesuodatin, eli ecofilter, (kuvio 14) yleistyi valkolipeän erottamismenetelmänä 1970-luvun energiakriisin aikana. Ecofilterillä saadaan aikaan tehokas ja hyvä suodatustulos, valkolipeän kiintoainepitoisuuden pysyessä alle 20 mg/l. Kalkkimaito syötetään pumppaussäiliöstä paineelliseen ecofilteriin kuvion 15 mukaisella tavalla. Ecofilterissä on reiitetyt suodatinputket, joiden ympärillä on suodatinsukat. Valkolipeä suodattuu ecofilterin sukkien läpi paineettomaan yläosaan meesan jäädessä suodatinsukkien pinnalle. (Tikka 2008, 150.)



KUVIO 14. Ecofilter yksikkö (KnowPulp versio 21.0, 2023i, muokattu).

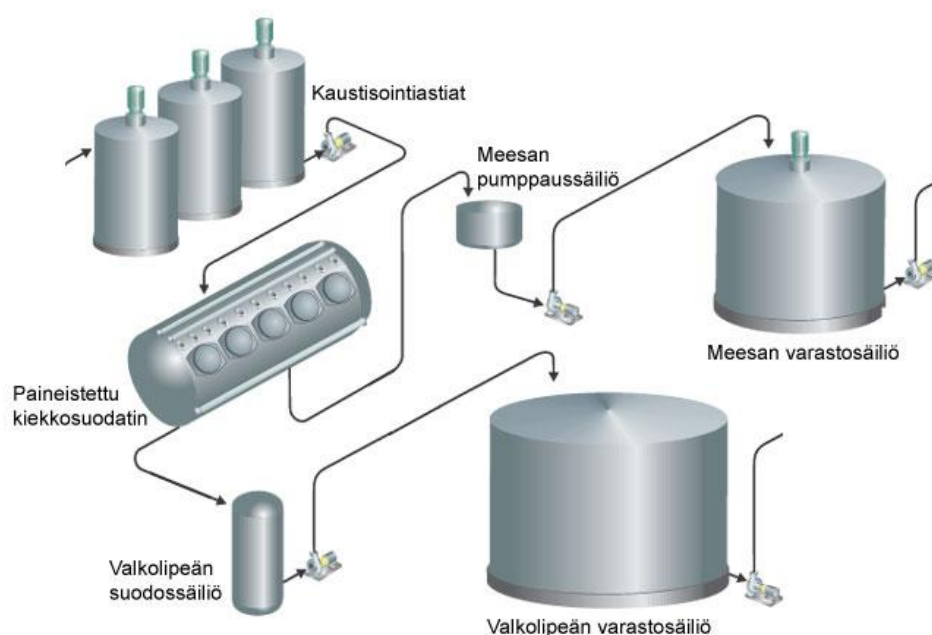
Ecofilterin toiminnassa oleellinen asia on säännölliset suodatusjaksot. Suodatin-sukkien pinnalle kertynyt meesa irrotetaan avaamalla syöttöyhteen venttiiliä 3–5 sekunniksi, jolloin yläosaan suodattunut valkolipeä virtaa takaisin pumppaussäiliöön samalla irrottaen sukien pinnalle kertyneen meesan. Tämä toistetaan 3–5 minuutin välein automaattisen sekvenssin avulla. Meesa poistetaan ecofilterin pohjan kautta meesan pumppaussäiliöön, jossa se laimennetaan 33–40 % kuiva-ainepitoisuuteen. (KnowPulp versio 21.0, 2023i.)



KUVIO 15. Valkolipeän erotus ja meesan pesuprosessi (KnowPulp versio 21.0, 2023i).

Pumppaussäiliöön laimennettu meesa sisältää vielä alkalipitoisuuksia, jonka vuoksi on suoritettava meesan pesu. Näin saadaan alkaliyhdisteet talteen ja tuotettua heikkovalkolepää soodakattilan sulan liuottamiseen. Meesan suodatus tapahtuu samanlaisella menetelmällä kuin valkolepään suodatus ensimmäisessä ecofilterissä. Painesuodatusmenetelmää käytettäessä tarvitaan siis kaksi ecofilteriä, ensimmäinen valkolepälle ja toinen meesalle. (Tikka 2008, 150.)

Kiekkosuodin on nykyaikaisin menetelmä valkolepään ja meesan erotukseen. Kiekkosuotimen toiminta perustuu ecofilterin tavoin paine-eroon ja suodatuselementteihin. Kiekkosuodin koostuu useista suodinkiekoista, joiden ympärillä on suodatinkangas. Valkolepää suodattuu paine-eron vaikutuksesta suodatinkankaan läpi ja meesa jää kiekon pinnalle. Meesa pestään suotimessa kuumalla vedellä ja poistetaan kiekon pinnalta kaavarilla. Kiekkosuodin erottaa siis valkolepään ja pesee meesan yhtäaikaaisesti samassa laitteessa (kuvio 16). (KnowPulp versio 21.0, 2023i.)



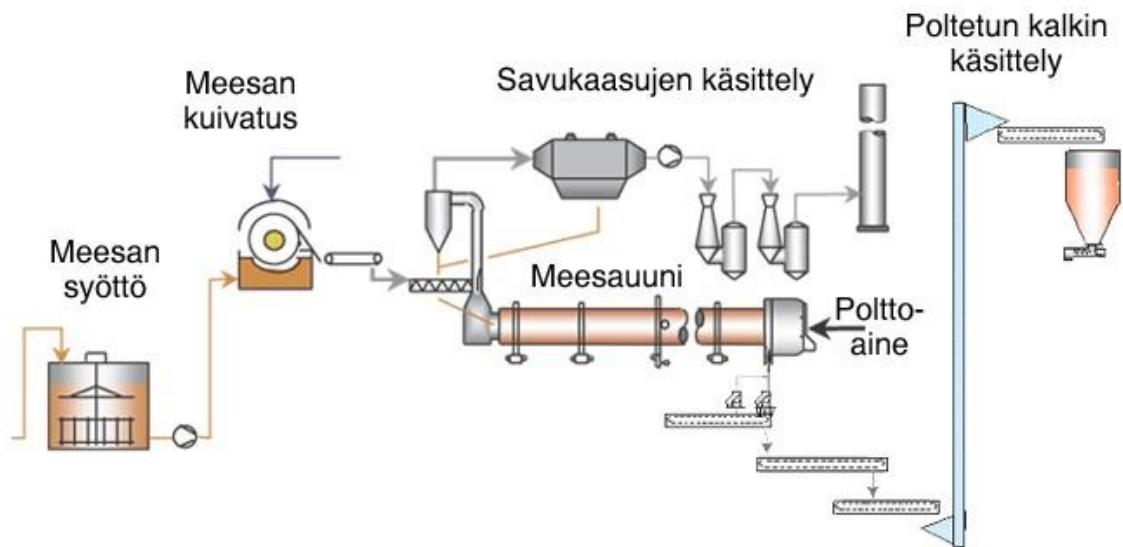
KUVIO 16. Valkolepään suodatus ja meesan pesu kiekkosuotimella (KnowPulp versio 21.0, 2023i).

3.6 Meesauuni

Meesauuni on tärkeä ja oleellinen osa kemikaalikiertoa ja yhdessä kaustisoinnin kanssa se muodostaa kalkkikierron. Meesauunissa kaustisointiprosessin aikana

syntynyt kalsiumkarbonaatti, eli meesa, poltetaan ja saadaan kalkkia. Meesa siis regeneroidaan takaisin kalkiksi, jotta se voidaan käyttää uudelleen kaustisoinnissa. Meesanpoltto tarvitsee korkean lämpötilan, jonka vuoksi meesauunin kuluttaa paljon polttoainetta. (Seppälä ym. 2001, 167.)

Meesan muuntaminen kalkiksi sisältää erilaisia prosessivaiheita, kuten kuviosta 17 voidaan huomata. Näin ollen meesauuni voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen, meesan käsittelyyn, meesanpoltoon ja savukaasujen käsittelyyn. Prosessi alkaa meesan käsittelystä, jossa meesa pestään ja kuivataan. Tämän jälkeen meesa syötetään uuniin, jossa meesa poltetaan korkeassa lämpötilassa ja lopputuotteena saadaan poltettua kalkkia. Kalkki varastoidaan siiloon, jonka jälkeen se on valmis käytettäväksi uudestaan kaustisoinnissa. Prosessissa syntyneet savukaasut käsitellään sähkösuodattimilla, jotta ympäristöön ei päädy hiukkaspäästöjä. (KnowPulp versio 21.0, 2023j.)



KUVIO 17. Meesauunin osaprosessit (KnowPulp versio 21.0, 2023j).

3.6.1 Meesankäsittely

Meesa koostuu suurimmaksi osin kalsiumkarbonaatista, mutta sisältää myös epäpuhtauksia. Tyypillisesti meesa on 95 % kalsiumkarbonaattia ja 5 % epäpuhtauksia, kuten taulukon 1 arvoista voidaan huomata. Meesan epäpuhtauksien määrä riippuu monesta tekijästä ja jokaisella tehtaalla on meesassa erilaiset pitoisuudet epäpuhtauksia. Tran (2007) kertoo epäpuhtauksien määrän olevan

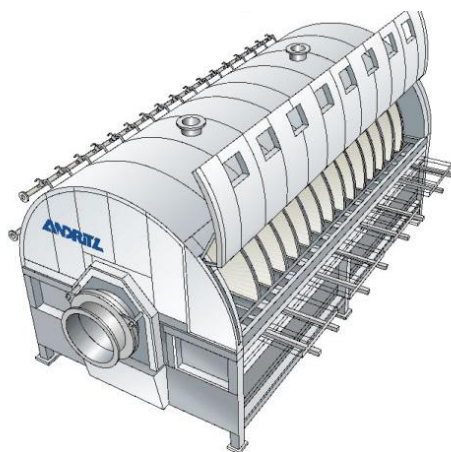
riippuvainen ostokalkin määrästä, kaustisoinnin toiminnasta, meesan käsittelystä ja uunin poltto-olosuhteista. (Tran 2007.)

TAULUKKO 1. Tyypillinen meesan koostumus (Tran 2007).

yhdiste	CaCO ₃	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
keskiarvo painoprosentti %	95	1,04	0,5	0,14	0,05	0,86	1,14	0,09	0,91

Kaustisoinnilta tullessaan meesa sisältää alkalipitoisuuksia ja sen kuiva-ainepitoisuus on noin 35–25 %. Näin ollen on meesa puhdistettava ja kuivattava, ennen kun se voidaan syöttää meesauuniin. Puhdistus ja kuivaus tehdään meesa-suodattimella. Meesa-suodattimen jälkeen alkalipitoisuus on pieni ja kuiva-ainepitoisuus noin 75–80 %. (KnowPulp versio 21.0, 2023k.)

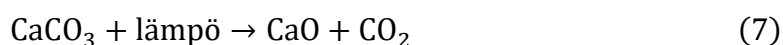
Meesan suodatukseen voidaan käyttää rumpu- tai kiekkosuodinta. Rumpusuodin on perinteinen menetelmä ja toimii samalla periaatteella kuin sakkasuodinkin. Pyörivän rummun suodatinkankaan pinnalle muodostuu meesakerros, jonka läpi neste suotautuu paine-eron vaikutuksesta. Meesa jää kankaan pinnalle ja kerätään talteen kaavarilla. Kiekkosuodin on uudempi menetelmä meesan suodatukseen ja sen toimintaperiaate on samanlainen kuin rumpusuotimellakin. Eroavaisuutena on se, että rummun tilalla on monta erillistä kiekkoa (kuvio 18), jonka ansiosta suodatuskapasiteetti on merkittävästi suurempi kuin rumpusuotimella. (KnowPulp versio 21.0, 2023k.)



KUVIO 18. Kiekkosuodin meesan pesuun ja kuivaukseen (KnowPulp versio 21.0, 2023k).

3.6.2 Meesanpoltto

Meesauuni on meesanpolttoprosessissa käytettävä päälaitte, joka on sylinterin muotoinen 20–150 metriä pitkä uuni. Meesauuni on halkaisijaltaan 2–4 metriä ja se on lievästi kalteva horisontaalisesti. Uunilla on sitä pyörittävä käyttömekanismi, jotta uuniin syötetty meesa kulkeutuu uunin läpi. (Seppälä ym. 2001, 167.) Kalsiumkarbonaatin muuntaminen kalsiumoksidiksi vaatii korkean lämpötilan, jotta reaktio on mahdollinen. Kaavassa 7 on esitetty meesauunin sisällä tapahtuva reaktio.



Kalsiumkarbonaatti (CaCO_3) hajoaa korkean lämpötilan vaikutuksesta kalsiumoksidiksi (CaO) ja hiilidioksidiksi (CO_2). (KnowPulp versio 21.0, 2023l.)

Meesauunin polttopäässä on poltin, jossa poltetaan maakaasua, öljyä tai muuta soveltuvaa polttoainetta. Prosessissa syntyy savukaasuja, jotka virtaavat kohti meesauunin syöttöpäätä savukaasupuhaltimella tuotetun alipaineen vaikutuksesta. Meesa ja savukaasut virtaavat uunissa siis vastakkaisiin suuntiin ja savukaasut lämmittävät meesan reaktiolämpötilaan. Lämmönsiirto meesauunissa perustuu säteilyyn, pois lukien syöttöpään alkuosa, jossa lämpöä siirtyy meesaan enimmäkseen kosketuslämmönsiirtona. (KnowPulp versio 21.0, 2023l.)

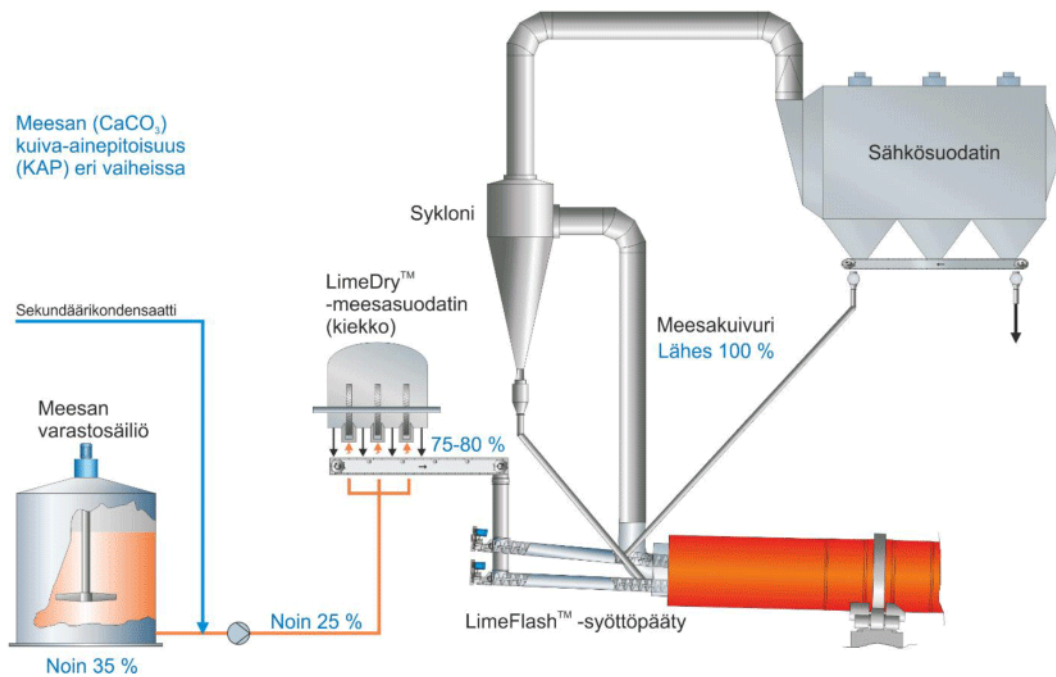
Meesauunin polttoprosessissa käytetään primääri- ja sekundääri-ilmaa, joilla tuotetaan polttoprosessille optimaaliset olosuhteet. Valtaosa meesauunin palamisilmasta on sekundääri-ilmaa, sillä primääri-ilmaa käytetään lähinnä liekin muotoiluun. Sekundääri-ilman määrää säädetään savukaasupuhaltimella ja primääri-ilman määrää primääri-ilmapuhaltimella. Ilmavirtaus on pyrittävä pitämään kuitenkin mahdollisimman pienenä, jotta uunin lämpötila säilyy optimaalisena. Ilmämäärää säädetään savukaasujen happipitoisuuden perusteella, joka on tyypillisesti 1,5–2,5 % uunin syöttöpäädystä. (KnowPulp versio 21.0, 2023m.)

Meesauuni jakaantuu neljään erilaiseen vyöhykkeeseen, sillä meesa reagoi erilaisesti uunin eri osissa. Nämä vyöhykkeet ovat kuivaus-, lämmitys-, poltto- ja loppukäsittelyvyöhyke. Kuivausvyöhykkeellä uuniin syötetystä meesasta poistuu

kaikki jäljellä oleva kosteus. Lämmitysvyöhykkeellä meesa lämpenee kohti reaktiolämpötilaa, mutta itse reaktiota kalsiumoksidiksi ei vielä tapahdu. Kun meesa on lämmennyt 850 °C lämpötilaan uunissa, alkaa polttovyöhyke. Polttovyöhykkeellä tapahtuu reaktio, jossa kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi. Uunin polttopään lämpötila pidetään normaalisti noin 1100 °C lämpötilassa, jotta saavutetaan riittävän suuri reaktionopeus. (KnowPulp versio 21.0, 2023l.)

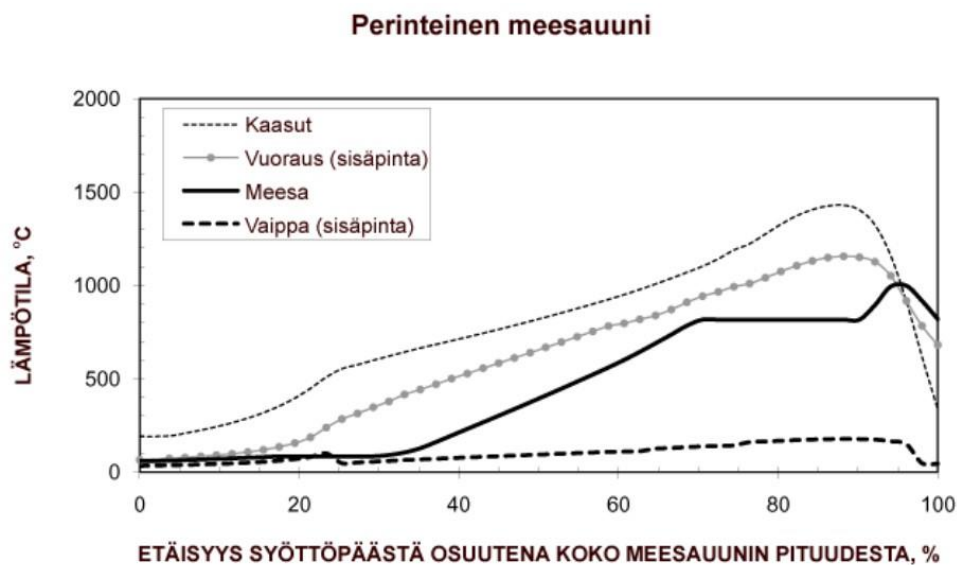
Meesauunit voidaan jakaa perinteisiin- ja LMD (lime mud dryer) -meesauuneihin. Ero näiden uunien välillä on meesansyötössä ja uuniin syötettävän meesan kuiva-ainepitoisuudessa. Perinteisessä meesauunissa meesa syötetään uuniin suoraan meesasuoitimelta, jolloin meesan kuiva-ainepitoisuus on noin 75–80 %. Meesan kuivattamiseksi perinteisessä meesauunissa käytetään syöttöpäädysssä metalliketjuja, jotka tehostavat lämmönsiirtoa savukaasujen ja meesan välillä. Uunin metalliketjuja kutsutaan ketjuvyöhykkeeksi. (Tikka 2008, 164.)

LMD-uunissa käytetään kuvion 19 mukaista meesakuivuria. Meesa ohjautuu savukaasuvirtauksen mukana sykloniin, jolloin meesan kuiva-ainepitoisuus nousee kuumien savukaasujen vaikutuksesta. Syklonissa meesa tippuu syklonin pohjalle, josta se syötetään uuniin ja savukaasut poistuvat syklonin yläosan kautta sähkösuodattimelle. Meesakuivurilla voidaan saavuttaa lähes 100 % meesan kuiva-ainepitoisuus, minkä vuoksi LMD-uunissa ei tarvita erillistä ketjuvyöhykettä. (Tikka 2008, 164.)

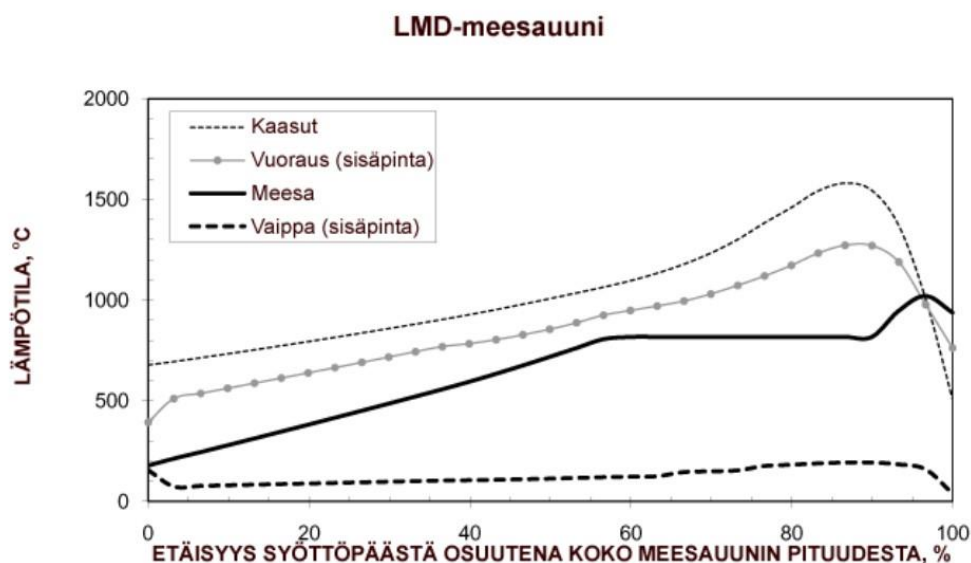


KUVIO 19. Meesan kuiva-ainepitoisuudet eri vaiheissa LMD-uunin syötössä (KnowPulp versio 21.0, 2023k).

Kuvista 20 ja 21 voidaan vertailla perinteisen ja LMD-meesauunin erilaisia lämpötilaprofiileja. Perinteisessä uunissa meesa kuivuu uunin alkuvaiheessa, ennen kun meesan lämpötila alkaa nousta. LMD-uunissa vuorostaan meesan lämpötila lähtee nousemaan välittömästi, koska syötettävän meesan kuiva-ainepitoisuus on jo lähes 100 %. Lämpötilaprofiileista huomataan myös, että meesan lämpötila ei nouse reaktiovaiheen aikana. (Tikka 2008, 164.)



KUVIO 20. Perinteisen meesauunin lämpötilaprofiili (KnowPulp versio 21.0, 2023l).



KUVIO 21. LMD-uunin lämpötilaprofiili (KnowPulp versio 21.0, 2023l).

Meesauunista poistuva kuuma kalkki jäähdytetään uunin polttopäässä olevalla jäähdyttimellä. Jäähdytys tehdään uunin palamisilmalla, jolloin kalkin sisältämä lämpö saadaan osittain talteen siirtämällä lämpöä uunin käyttämään palamisilmaan. Jäähdyttimessä kalkki ja ilma virtaavat vastakkaisiin suuntiin, eli jäähdytin toimii vastavirtaperiaatteella. Ilma virtaa jäähdyttimeen uunin toisessa päässä olevan savukaasupuhaltimen luoman alipaineen, eli imun vaikutuksesta. Jäähdyttimen jälkeen hienorakeinen kalkki tippuu suoraan kalkkikuljettimelle ja karkeammat rakeet ohjataan kalkkimurskaimen läpi. Näin saadaan tuotettua mahdollisimman samankokoisia kalkkirakeita, jotka reagoivat hyvin kaustisoinnissa. (KnowPulp versio 21.0, 2023l.)

3.6.3 Savukaasut

Polttoprosessissa syntyneet savukaasut sisältävät hienojakoista meesaa, joten savukaasut on puhdistettava sähkösuodattimilla. Savukaasut ohjataan sähkösuodattimille savukaasupuhaltimella, joka on sähkösuodinten jälkeen. Sähkösuodattimet keräävät meesapölyn talteen ja palauttavat sen takaisin meesauniin. Tietyillä tehtailla meesapölyä on myös mahdollista kerätä omaan silloonsa. Tämä on tehokas tapa poistaa kalkkikierrosta epäpuhtauksia, sillä fosfori rikastuu kalkkikiertoon ja saadaan poistettua prosessista meesapölyn mukana. (KnowPulp versio 21.0, 2023n.)

Meesauunin tuottamia ilmapäästöjä on tärkeä seurata, jotta ilmastoon ei päädy haitallisia pitoisuuksia tai hiukkasia. Savukaasuista seurataan etenkin haisevia rikki- (TRS), rikkidioksidi- (SO_2), hiilimonoksidi- (CO), typen oksidi- (NO_x) ja hiukaspäästöjä. Päästöpitoisuuksia mitataan ja analysoidaan jatkuvatoimisilla mittareilla. Päästöpitoisuuksiin vaikuttaa käytännössä kaksi tekijää, meesan laatu ja uunissa käytettävä polttoaine. (Tikka 2008, 178.)

4 PROSESSISTA OTETTAVAT NÄYTTEET

4.1 Kemikaalikierron näytemääritykset yleisesti

Kemiallisessa massanvalmistuksessa prosessinäytteiden ottaminen on tärkeää tuotannon laadun, tehokkuuden ja ympäristövaikutusten kannalta. Prosessinäytteitä analysoimalla varmistetaan prosessin optimaalinen toiminta ja mahdolliset ongelmat voidaan havaita ja ratkaista nopeasti. Prosessinäytteet yhdessä on-line mittauksien kanssa muodostavat kokonaisuuden, jolla tuotanto ja laatu pysyvät hallinnassa. (Levlin & Söderbjelm 1999, 12.)

Kemiallisissa prosesseissa automaattiset, eli on-line mittaukset, ovat tärkeitä prosessin tehokkuuden ja laadunvalvonnan kannalta. Automaattiset mittaukset mahdollistavat tarkan ja luotettavan prosessin valvonnan, mikä on erityisen tärkeää prosesseissa, joissa pienet muutokset voivat vaikuttaa suuresti lopputuotteen laatuun. Mittauksien avulla saadaan tarkkaa ja reaaliaikaista tietoa prosessin kemiallisesta tilasta, lämpötilasta ja kemiallisten aineiden määrästä sekä pitoisuuksista. Näiden mittauksien avulla operaattori ja prosessinohjausjärjestelmä säätää prosessin parametrejä. (Fardim 2011, 710–711.)

Laboratorionäytteiden ottaminen ja analysointi muodostaa yhden tärkeän osan kemiallisen prosessin valvonnasta. Vaikka automaattiset on-line mittaukset ovatkin prosessin hallinnan peruste, laboratorionäytteet mahdollistavat syvällisemmän analyysin prosessin kemiallisesta tilasta. Laboratorionäytteiden avulla voidaan määrittää tarkasti ja luotettavasti tiettyjen aineiden määrät ja pitoisuudet prosessissa sekä varmistaa on-line mittauksien luotettavuutta. Laboratorionäytteiden avulla myös kalibroidaan on-line mittauksia. (Levlin & Söderbjelm 1999, 12.)

Näytteiden ottaminen ja analysointi on tärkeää myös ympäristön kannalta. Sellun valmistuksessa käsiteltävät kemikaalit ja syntyvät yhdisteet ovat haitallisia ympäristölle, jonka vuoksi on prosessin jätevesien ja savukaasujen pitoisuuksia seurattava jatkuvasti. Riittävällä näytteiden ottamisella varmistetaan, että kemikaalit

pysyvät kontrolloidusti prosessissa ja eivät pääse aiheuttamaan ympäristölle haitallisia vaikutuksia. (Tikka 2008, 178.)

4.2 Kaustisoinnin näytemääriykset

Kaustisoinnista otetaan säännöllisesti näytteitä viherlipeästä, kalkkimaidosta ja valkolipeästä. Näytteet analysoidaan ABC-titraatiomenetelmällä noudattaen SCAN 30:85 standardia, joka on yleisin sellutehtailla käytetty titrausmenetelmä. Analyysillä saadaan laskettua absoluuttiset arvot natriumhydroksidille, natriumsulfidille ja natriumkarbonaatille. Näiden arvojen perusteella lasketaan kokonaisalkalin, aktiivisen alkalin, kaustisointiasteen ja sulfiditeetin arvot. (KnowPulp versio 21.0, 2023o.)

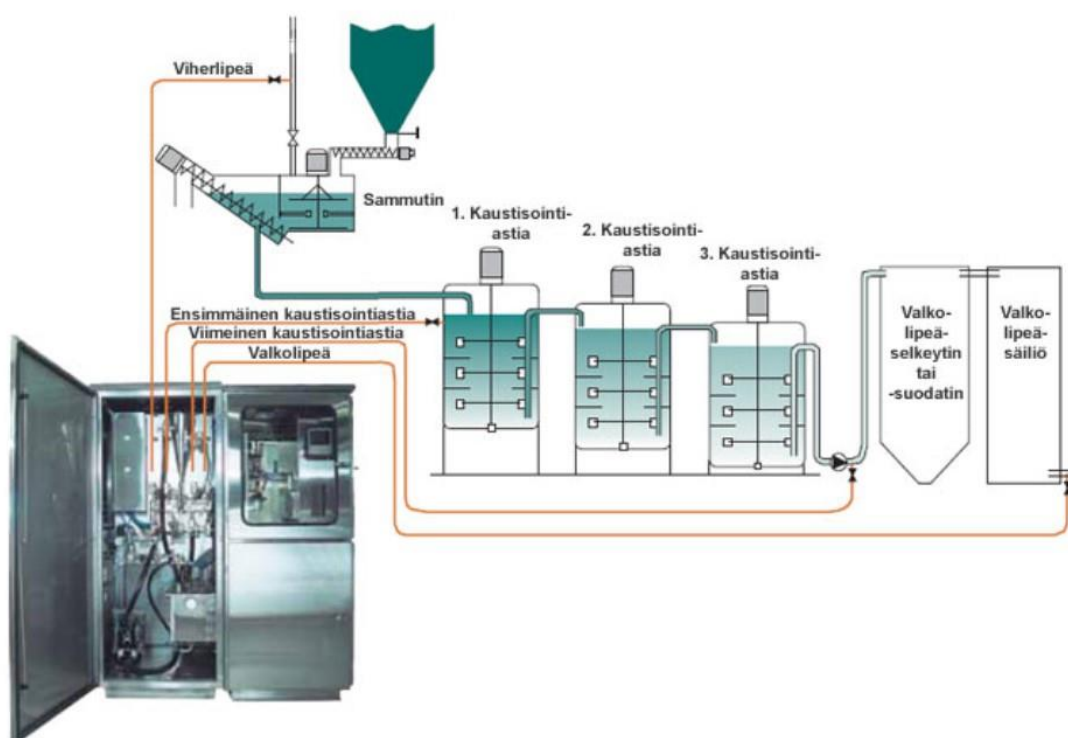
Lipeänäytteiden titraaminen on välttämätöntä kaustisoinnin optimaalisen hallinnan kannalta. Laboratoriotitrauksia ei voida kuitenkaan määrittää kovinkaan tihein aikaväleihin, joka tekee prosessin hallinnasta haastavaa pelkkien laboratorioanalyysien perusteella. Prosessin tila voi siis muuttua merkittävästi näytteiden oton välisenä aikana. Tämän vuoksi automaattiset alkali analysaattorit ovat yleistyneet sellutehtailla, sillä niiden avulla saadaan jatkuvasti reaaliaikaista tietoa prosessista. Analysaattori auttaa tehtaita optimoimaan prosessia ja vähentämään kustannuksia, kun prosessia voidaan hallita mahdollisimman tarkasti. (Bajpai 2017, 94–95.)

Analysaattori on suunniteltu mittaamaan kemiallisten prosessien tärkeitä parametreja, kuten esimerkiksi natriumhydroksidin pitoisuutta sellunvalmistuksen eri vaiheissa. Analysaattori on hyödyllinen erityisesti kaustisoinnin hallinnassa, sillä sen avulla voidaan seurata tärkeitä kemiallisia prosessiparametreja, jotka vaikuttavat valkolipeätuotannon laatuun ja tehokkuuteen. Analysaattorin toiminta perustuu laboratorioanalyysien tavoin ABC-titraatiomenetelmään. (KnowPulp versio 21.0, 2023o.)

Analysaattori koostuu näytteenottojärjestelmästä, titrausjärjestelmästä ja elektrooniikkayksiköstä, joka suorittaa mittausten laskennan ja tallennuksen. Analysoijan toiminta on automatisoitu, mikä mahdollistaa mittauksen suorittamisen nopeasti ja luotettavasti. Se on myös helposti integroitavissa

prosessinohjausjärjestelmään, mikä helpottaa kemiallisen prosessin säätämistä ja optimointia. (KnowPulp versio 21.0, 2023o.)

Analysaattori ottaa automaattisesti näytteitä vuorotellen viherlipeästä, kalkkimaidosta ja valkolipeästä. Kuviossa 22 on esitetty tyypilliset näytteenottokohdat. Analysaattori määrittää näytteistä kokonaisalkalin, aktiivisen alkalin, kaustisointiasteen ja sulfiditeetin arvot, jotka analysaattori lähettää automaatiojärjestelmään. Näytteen ottamisen jälkeen analysaattori huuhtelee automaattisesti näytteenottolinjan, jonka ansiosta linjat pysyvät puhtaina ja eivät pääse tukkeutumaan. Näytteiden otto taajuus on riippuvainen ohjelmoidusta sekvenssistä, mutta analysaattori kykenee tekemään analyysin 8 minuutin välein. (Valmet 2023.)



KUVIO 22. Alkalianalysaattorin tyypilliset näytteenottokohdat (KnowPulp versio 21.0, 2023o).

4.3 Meesauunin näytemääritykset

Meesa- ja kalkkinäytteet ovat meesauunin toiminnan edellytys. Näytteillä seurataan tuotannon laatua ja varmistetaan meesauunin optimaalinen toiminta. Meesauunin laadun seuranta on tärkeää, sillä huonolaatuisesta meesasta ei voida tehdä

laadukasta kalkkia. Kalkkinäytteiden perusteella vuorostaan hallitaan meesauunin yleistä toimintaa. (KnowPulp versio 21.0, 2023.)

Poltetun kalkin laatua seurataan jäännöskarbonaatin ja kaustisointivoimamääri-tyksien avulla. Erityisesti jäännöskarbonaatin arvo on tärkeä, sillä sen avulla hallitaan ja säädetään meesauunin toimintaa. Jäännöskarbonaatti kertoo, kuinka paljon poltetussa kalkissa on jäljellä karbonaattia, eli se määrä kalkkia, joka ei ole hajonnut oksidimuotoon. Kaustisointivoima kertoo kalkin reaktiivisuudesta, eli kuinka hyvin se reagoi kalkin sammutusreaktiossa. (KnowPulp versio 21.0, 2023m.)

Uuniin syötettävän meesan laatua seurataan säännöllisesti määrittämällä kuiva-aine- ja natriumpitoisuus sekä vapaan kalkin määrä. Meesan korkea natriumpi- toisuus kertoo heikosta meesan pesusta, joka aiheuttaa monenlaisia ongelmia meesauunin toiminnassa. Vapaalla kalkilla tarkoitetaan kalsiumoksidin määrää meesassa. (KnowPulp versio 21.0, 2023m.) Meesan kuiva-ainepitoisuus on tärkeä laatuarvo meesassa, sillä mitä korkeampi kuiva-ainepitoisuus on, sitä pie- nempi on meesauunin energiankulutus. Kuiva-ainemääriyksien avulla voidaan optimoida meesasuoitimen toimintaa ja huomata häiriöt prosessissa. (Bajpai 2008, 93.)

5 KAUSTISOINNIN OPEROINTI

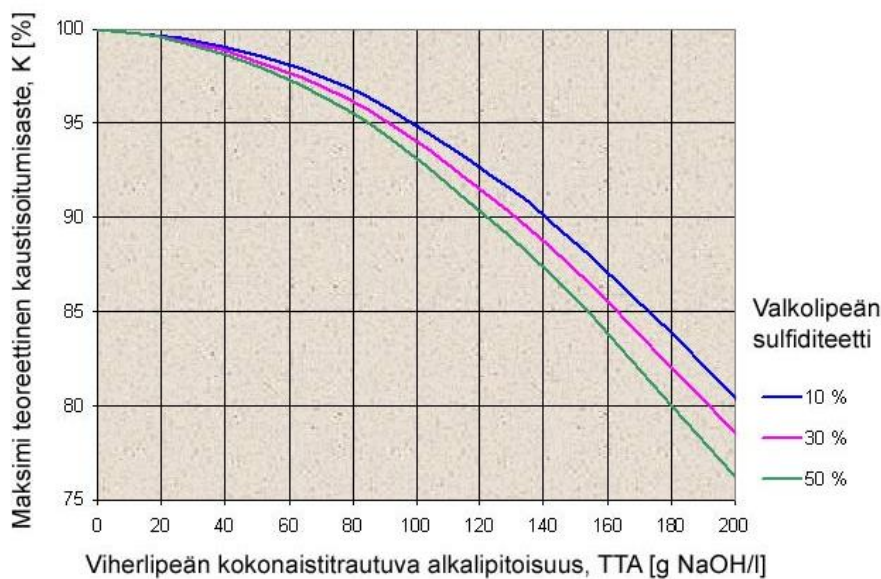
5.1 Kaustisoinnin hallinta yleisesti

Kaustisoinnin optimaalisen toiminnan kannalta on tuotanto pyrittävä pitämään mahdollisimman tasaisena ja muutokset on tehtävä rauhallisesti. Kaustisointireaktion vaatiessa paljon aikaa, on kaustisoinnin hallinta manuaalisesti haastavaa muuttuvissa tuotantotilanteissa. Tämän vuoksi kaustisointi sisältää nykyaikaisissa tehtaissa paljon automaatiota, joka helpottaa merkittävästi prosessin hallintaa. Hyvin optimoitu kaustisointi lisää sellun tuotannonkapasiteettia ja pienentää pullonkauloja kemikaalikierrossa. (Bajpaj 2008, 87.)

Kaustisoinnin tuotantoa ohjataan viherlipeävirtauksella ja -tiheydellä sekä kalkin määrällä. Sellun tuotanto määrittää kaustisoinnin tuotantonopeuden, sillä kaustisoinnin on tuotettava sellun keiton tarvitsema määrä valkolipeää. Kaustisoinnin tuotantokapasiteettia säädetään viherlipeävirtauksella sammuttajaan. Kalkin määrä suhteutetaan viherlipeä virtauksen mukaisesti ja tiheydellä hienosäädetään prosessia. (KnowPulp versio 21.0, 2023p.)

Viherlipeän kokonaisalkali ja kaustisointiaste ovat tärkeimmät seurattavat tekijät kaustisointiprosessissa. Kaustisointiaste halutaan pitää mahdollisimman lähellä teoreettista maksimiarvoaan, joka saadaan selville Goodwinin käyrästä. Viherlipeän kokonaisalkali ja sulfiditeetti vaikuttavat kaustisointiasteeseen, kuten kuvista 23 voidaan huomata. Kun tiedetään viherlipeän kokonaisalkali ja sulfiditeetti, voidaan laskea teoreettinen maksimi kaustisointiasteelle. Teoreettisesta kaustisointiasteen maksimi arvosta vähennetään kuitenkin aina 1–3 % marginaali, eli pidetään kaustisointiaste hieman teoreettisen maksimiarvonsa alapuolella. Marginaalia käytetään, jotta ei tapahdu ylikalkitusta. Kaustisointiaste ei voi nousta laskennallista maksimiarvoaan korkeammaksi. (KnowPulp versio 21.0, 2023e.)

Goodwinin käyrät



KUVIO 23. Goodwinin käyrä (KnowPulp versio 21.0, 2023e).

5.2 Kaustisoinnin laatutavoitteet

Kaustisoinnissa kiertävien kemikaalien laatua ja pitoisuuksia on seurattava säännöllisesti, jotta prosessi pysyy hallinnassa. Laatua seurataan erityisesti viherlipeästä, kalkkimaidosta ja valkolipeästä. (KnowPulp versio 21.0, 2023p.) Taulukossa 2 on esitetty tärkeimmät seurattavat tekijät näille kemikaaleille.

TAULUKKO 2. Kaustisoinnin kemikaalien tärkeimmät seurattavat tekijät (KnowPulp versio 21.0, 2023p).

viherlipeä	kokonaisalkali, tiheys, sulfiditeetti, sakkapitoisuus, lämpötila
kalkkimaito	kaustisointiaste, lämpötila
valkolipeä	aktiivinen alkali, sulfiditeetti, kaustisointiaste, kiintoainepitoisuus

Viherlipeän laatu on pidettävä tasaisena, jotta voidaan tuottaa laadukasta valkolipeää. Viherlipeän tärkein seurattava tekijä on kokonaisalkali, eli viherlipeän väkevyys. Viherlipeän tiheys on suoraan verrannollinen kokonaisalkalin kanssa, joten tiheyden kasvaessa kasvaa myös kokonaisalkali. Näin ollen tiheyden avulla seurataan kokonaisalkali tasoa. Viherlipeän sakkapitoisuus on myös tärkeä seurattava laatutekijä. Taulukossa 3 on esitetty käsitellyn, eli sammuttajaan syötettävän viherlipeän tyypillisiä laatuarvoja. (Tikka 2008, 134–140.)

TAULUKKO 3. Käsitellyn viherlipeän tyypilliset laatuarvot (Tikka 2008, 134).

Kokonaisalkali	140–180 g NaOH/l
Tiheys	1,12–1,2 kg/l
Sakkapitoisuus	alle 100 mg/l
Lämpötila	80–90 °C

Viherlipeän kokonaisalkalitaso on riippuvainen tehtaasta ja sen laitteistosta, mutta lähtökohtaisesti kokonaisalkali halutaan pitää mahdollisimman korkeana. Korkea viherlipeän kokonaisalkali mahdollistaa väkevän valkolipeän valmistuksen. Viherlipeän kokonaisalkali ei kuitenkaan saa olla liian korkealla tasolla, sillä liian vahva viherlipeä muodostaa putkiin kerrostumaa, eli pirssoniittia sekä hankaloittaa viherlipeäsakan erotusta. (KnowPulp versio 21.0, 2023p.) Sammuttajaan syötettävän viherlipeän sakkapitoisuus halutaan mahdollisimman pieneksi ja kiintoainepitoisuus ei saisi olla yli 100 mg/l. Viherlipeän lämpötila halutaan pitää 80–90 C välillä, jotta sammutin ei päädy kiehuvaan tilaan ja normaalisti tämä vaatii viherlipeän jäähdystä. (Tikka 2008, 134–140.)

Kalkkimaidosta seurataan erityisesti kaustisointiastetta, joka kertoo reaktion etenemisestä ja täydellisyydestä. Kaustisointiaste on sammuttajan toiminnassa tärkein määräyty, sillä sen avulla pidetään kaustisoinnin tuotanto tasapainossa. Toinen tärkeä seurattava tekijä on lämpötilaero viherlipeän ja sammuttajan välillä. Lämpötilaero kertoo kalkin sammutusreaktiosta ja se on suoraan yhteydessä kaustisointiasteeseen. Sammuttajaan syötettävän viherlipeän lämpötila pyritään pitämään noin 85 asteessa ja sammuttajan lämpötila 100–102 asteessa. (KnowPulp versio 21.0, 2023h.)

Suodatetun valkolipeän tärkeimmät laatuarvot on esitetty taulukossa 4. Taulukon arvot ovat suuntaa antavia, sillä ne vaihtelevat tehtaasta riippuen. Kiintoainepitoisuus on kuitenkin arvo, joka halutaan aina mahdollisimman pieneksi. Laadukas valkolipeä sisältää alle 20 mg/l kiintoainesta, eli meesaa. Mikäli kiintoainepitoisuus nousee tätä korkeammaksi, pääsee meesaa kertymään valkolipeäsäiliöihin ja sitä kautta sellun keittoon. (Tikka 2008, 131–150.)

TAULUKKO 4. Valkolipeän tyypilliset laatuarvot (Tikka 2008, 131–150).

aktiivinen alkali	140 g NaOH/l
sulfiditeetti	40 %
kaustisointiaste	80 %
kiintoainepitoisuus	alle 20 mg/l

5.3 Viherlipeän hallinta

Viherlipeä käsittelyn tärkein tehtävä on tasata kokonaisalkali, jotta sammuttajaan syötettävän viherlipeän laatu pysyy tasaisena. Kokonaisalkalin säätö tapahtuu niin, että soodakattilan liuottajassa asetetaan kokonaisalkalille asetusarvo, joka on hieman korkeampi kuin sammuttajaan syötettävän viherlipeän kokonaisalkali. Näin viherlipeän kokonaisalkalissa säilyy pieni säätövara liuottajan ja sammuttajan välillä. Liuottajan jälkeen viherlipeän kokonaisalkalia voidaan vain laskea, ei nostaa. (KnowPulp versio 21.0, 2023p.)

Viherlipeän kokonaisalkalin säätöön käytetään heikkovalkolipeää. Kokonaisalkalin ollessa liian korkea, lisätään heikkovalkolipeä laimennusta. Vastaavasti laimennusta vähennetään, jos kokonaisalkali on liian alhainen. Kokonaisalkalia seurataan analysaattorin titrausanalyyseillä ja tiheysmittauksilla. (KnowPulp versio 21.0, 2023p.)

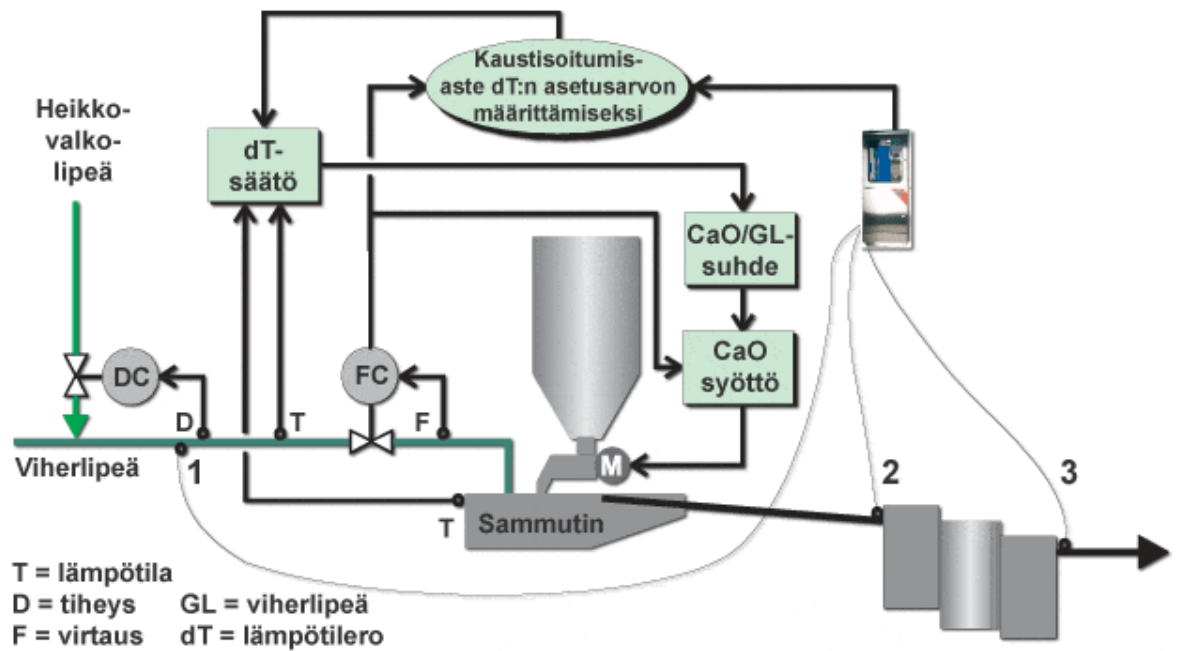
5.4 Sammuttajan hallinta

Sammuttimen toimintaa hallitaan lipeän ja kalkin välisellä suhteella. Koko kemikaalikierron toiminnan kannalta on tärkeää löytää optimaalinen lipeä/kalkki suhde kuhunkin tuotantotilanteeseen sopivaksi. Viherlipeän määrällä sammuttajaan säädetään tuotannon määrä ja kalkilla kaustisointiaste sopivaksi. Lisäämällä kalkkia kaustisointiaste nousee ja päinvastoin. On oltava kuitenkin tarkkana, ettei kaustisointiaste nouse liian korkeaksi ja tapahdu ylikalkitusta. Kaustisointiaste ei voi nousta maksimiarvoaan korkeammaksi, joten kaikki ylimääräinen kalkki jää reagoimatta. Riittävän suuren marginaalin käyttö kaustisointiasteessa on siis tärkeää, jotta vältetään ongelmilta. Reagoimaton kalkki luo haasteita valkolipeän suodatuksessa ja luo turhaa kuormaa meesauunille, mikä vuorostaan lisää uunin energian kulutusta. (Tikka 2008, 159.)

Sammuttajaan syötettävän kalkin määrää säädetään kaustisointiasteanalyysin perusteella. Mikäli kaustisointiaste on alle tavoitearvon, lisätään kalkin määrää. Vastaavasti kalkin määrää vähennetään, jos kaustisointiaste on liian lähellä maksimiarvoaan. Tämän vuoksi on tärkeää määrittää kaustisointiaste riittävän usein kalkkimaidosta ja valkolipeästä, jotta tiedetään mihin suuntaan prosessia on tarve säätää. (KnowPulp versio 21.0, 2023p.)

Lähtökohtaisesti lipeä/kalkki suhteen säätöön käytetään kaustisointiasteen tuloista, mutta säätöperusteena voidaan käyttää myös lämpötilaa. Sammuttajaan syötettävän viherlipeän ja sammuttajan välinen lämpötilaero kertoo kalkinsammutusreaktiosta ja on yhteydessä kaustisointiasteen arvoon. Lämpötilaeron kasvaminen tarkoittaa kaustisointiasteen nousua ja lämpötilaeron pienentyminen kaustisointiasteen laskua. Lämpötilaeroa ei kuitenkaan voida käyttää lipeä/kalkki suhteen säätöperusteena, jos sammutin on kiehuva tilassa, eli yli 104 asteessa. Sammuttajan kiehuminen voi johtua esimerkiksi ylikalkituksesta tai viherlipeän kasvaneesta lämpötilasta. (Tikka 2008, 158–159.)

Analysaattorin analyysien ja lämpötilaeron yhdistelmällä voidaan kaustisointiaste pitää tarkasti halutussa asetusarvossaan. Analysaattorin määrittämät absoluuttiset kaustisointiasteen arvot ovat tärkein lipeä/kalkki suhteen säätöperuste, mutta lämpötilaeron avulla voidaan seurata prosessin tilaa analyysien välisenä aikana. Tämä mahdollistaa nopean reagoinnin kalkin tai viherlipeän mahdollisiin laatu-poikkeamiin huonontamatta tuotettavan valkolipeän laatua. (KnowPulp versio 21.0, 2023p.) Kuviossa 24 on esitetty kaustisointiasteen ja lämpötilaeron mittaukset ja säätöperiaate sammuttimen toiminnassa.



KUVIO 24. Sammuttajan säätö (KnowPulp versio 21.0, 2023p).

6 MEESAUUNIN OPEROINTI

6.1 Meesauuniin hallinta yleisesti

Meesauunin tärkein tehtävä on tuottaa kaustisoinnin tarpeisiin laadukasta kalkkia mahdollisimman pienellä polttoaineen kulutuksella ilmastopäästöt huomioiden. Polttoainetta on käytettävä riittävästi laadukkaan kalkin tuottamiseksi, mutta liiallinen polttoaineen kulutus lisää merkittävästi käyttökustannuksia. Meesauunin operointi on haastava työtehtävä, sillä sen hallinnassa on otettava huomioon monia erilaisia tekijöitä. (KnowPulp versio 21.0, 2023m.)

Tuotannon tarve säädetään vastaamaan kalkin kulutusta lisäämällä tai vähentämällä meesansyöttöä meesasuoitimelle, josta se kulkeutuu uuniin. Meesauunia operoidessa tärkein muistettava asia on meesan pitkä viipymäaika uunissa, joka on noin 4–5 tuntia. Näin ollen syöttöpäädyn prosessihäiriö tai laatumuutos näkyy polttopäädyssä vasta viipymäajan jälkeen. (KnowPulp versio 21.0, 2023m.)

6.2 Meesansyötön hallinta

Meesansyöttövirtaus ja laatu on pidettävä mahdollisimman stabiilina, jotta meesauunin on mahdollista tuottaa laadukasta kalkkia. Meesansyötön hallinta on näin ollen tärkeimpiä asioita meesauunin toiminnassa. Meesan laatu on riippuvainen monesta eri tekijästä ja se on jokaisella tehtaalla hieman erilainen, mutta lähtökohtaisesti uuniin syötettävältä meesalta vaaditaan seuraavien tavoitearvojen täyttymistä:

- Kuiva-ainepitoisuus yli 80 %
- Jäännösalkali alle 0,3 %
- Vapaa kalkki alle 1 %. (KnowPulp versio 21.0, 2023m.)

Meesan kuiva-ainepitoisuus halutaan pitää korkeana, mielellään yli 80 %. Korkean meesan kuiva-ainepitoisuuden lisäksi erityisen tärkeää on tasaisuus, sillä vaihtelut kuiva-aineessa häiritsevät uunin toimintaa ja heikentävät poltetun kalkin laatua. Meesan jäännösalkali on pidettävä mahdollisimman pienenä, mielellään alle 0,3 % pitoisuudessa. Korkeajäännösalkalinen meesa aiheuttaa uunin sisällä

renkaan ja ylisuurten kalkkipallojen muodostumista sekä TRS-päästöjen kasvamisen. (Tikka 2008, 166.)

Meesan laatuvaatimukset asettavat meesasuoitimen toiminnalle kovat tavoitteet. Heikosti pesty meesa näkyy välittömästi jäännösalkalitason nousussa, joten meesan riittävä pesu on tärkeää. Meesasuoitin on pidettävä mahdollisimman tassaissa ajossa, sillä meesauuni on todella herkkä äkillisille tuotannon muutoksille. (Bajpai 2017, 101–102.) Meesan syöttötiheys pidetään normaalisti aina samassa arvossaan (n. 1.250 kg/l) ja tuotantokapasiteettia säädetään meesasuoitimen syöttövirtausta muuttamalla. Muutokset syöttövirtaukseen on kuitenkin aina tehtävä pienin askelin, sillä muutokset näkyvät uunin polttopäässä vasta läpimenoajan kuluttua. (KnowPulp versio 21.0, 2023m.)

6.3 Meesanpolton hallinta

Meesanpolttoprosessissa on pyrittävä pitämään poltto-olosuhteet mahdollisimman stabiilina. Poltetun kalkin laatu halutaan pitää seuraavien tavoitearvojen mukaisena:

- Jäännöskarbonaatti 1,5–2,5 %
- Kaustisointivoima 85–95 %. (Tran 2007.)

Optimaalinen kalkin jäännöskarbonaattipitoisuus on 1,5–2,5 %, jolloin kalkki on laadukasta ja polttoaineen käyttö on optimaalista (Tran 2007). Jäännöskarbonaatin ollessa yli 4 %, on kalkki huonolaatuista ja tarkoittaa liian pientä meesanpolttoa. Jäännöskarbonaatin ollessa alle 1 %, on meesauuni vuorostaan liian kuuma. Kalkin ylipolttaminen heikentää kalkin laatua, sillä kalkin kiderakenne muuttuu ja syntyy kovaksi poltettua, huonosti reagoivaa kalkkia. (Tikka 2008, 173–174.)

Kaustisointivoima kasvaa jäännöskarbonaatin pienentyessä tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen se kääntyy laskuun. Tämän vuoksi jäännöskarbonaatti ei saa olla alle 1 %, koska myös kaustisointivoima laskee siinä tilanteessa. Alhainen kaustisointivoima kertoo kalkissa olevan mukana paljon inerttiä ainesta, eli kuollutta kuormaa. (KnowPulp versio 21.0, 2023m.)

Meesauunin lämpötilaprofiili on tärkeimpiä hallittavia asioita meesanpoltossa ja se on tärkeää pitää vakaana. Meesan lämpötilan mittaaminen uunin sisällä on käytännössä mahdotonta, jonka vuoksi lämpötilaprofiilia seurataan savukaasujen ja kalkin lämpötilan perusteella. Syöttöpäädyn lämpötila mitataan savukaasuista ja polttopäädyn lämpötilaa kalkista kalkkipyrometrillä. Kalkin lämpötila polttopäässä on tyypillisesti 1100 °C, mutta se vaihtelee jonkun verran kuormituksen muuttuessa. (Imeläinen & Loukiala 2005.)

Käytännössä meesauunin syöttö- ja polttopään lämpötilaero halutaan pitää mahdollisimman suurena, eli polttopää kuumana ja syöttöpääty kylmänä. Syöttöpäädyn savukaasujen happipitoisuus on lämpötilan rinnalla tärkeä seurattava arvo ja sen avulla säädetään uunin ilmamäärää. (Imeläinen & Loukiala 2005.) Imeläisen ja Loukialan (2005) mukaan meesanpolttoon ja uunin lämpötilaprofiiliin voidaan vaikuttaa seuraavilla tekijöillä:

- Polttoaineen määrä
- Ilmamäärä, eli veto
- Primääri-ilma
- Uunin kierrosnopeus.

Meesauunin polttopäädyn lämpötila säädetään kohdilleen poltetun kalkin jäännöskarbonaatin perusteella. Jäännöskarbonaatin ollessa liian korkea, nostetaan uunin lämpötilaa polttoainetta lisäämällä. Vastaavasti polttoainetta vähennetään, jos jäännöskarbonaatti on liian pieni. Liian korkea polttopäädyn lämpötila tarkoittaa turhaa polttoaineen kulutusta ja voi myös vaurioittaa polttopäädyn muurauksia. (KnowPulp versio 21.0, 2023m.)

Uunin ilmamäärä, eli veto halutaan pitää mahdollisimman pienenä, jotta uunin lämpötilous säilyy hyvänä. Ilmamäärä ei kuitenkaan saa olla liian pieni, jotta savukaasuissa ei pääse esiintymään hiilimonoksidia, eli häkää. Ilmamäärä vaikuttaa savukaasujen happipitoisuuteen ja tyypillisesti happipitoisuus halutaan pitää 1,5–2,5 % välillä. Vetoa lisäämällä happipitoisuus nousee ja päinvastoin. Vetoa saadaan lisättyä nostamalla savukaasupuhaltimen kierroksia, joka lisää syöttöpäädyn alipainetta. (KnowPulp versio 21.0, 2023m.) Primääri-ilman tehtävä on muokata meesauunin liekki optimaaliseksi ja sen avulla voidaan vaikuttaa jonkin verran uunin lämpötilajakaumaan (Imeläinen & Loukiala 2005).

Meesauunin kierrosnopeudella voidaan vaikuttaa meesan viipymäaikaan uunissa ja normaalisti se on 1–1,5 r/min välillä. Kierrosnopeutta kasvattamalla meesan viipymäaika uunissa pienenee ja päinvastoin. Kierrosnopeus on siis kääntäen verrannollinen viipymäaikaan. Käytännössä kierrosnopeus säädetään suuremmaksi isolla kuormalla ja pienemmäksi pienemmällä kuormalla. (KnowPulp versio 21.0, 2023m.)

6.4 Savukaasujen hallinta

Savukaasujen lämpötilan avulla voidaan seurata meesauunin prosessitapahtumia. Normaalissa ajotilanteessa savukaasujen lämpötila LMD-uunin syöttöpäädissä on 500–550 °C, mutta lämpötila on riippuvainen monista eri tekijöistä. Lämpötilaan vaikuttavat mm. meesan laatu ja määrä sekä savukaasujen happipitoisuus. Savukaasujen syöttöpäädyn lämpötilan muutos kertoo yleensä muuttuneesta meesan kuiva-ainepitoisuudesta, sillä meesan kuiva-ainepitoisuuden laskeessa laskee myös savukaasujen lämpötila. Tämän kaltaisessa tilanteessa on syöttöpäädyn lämpötilaa nostettava lisäämällä ilmamäärää tai polttoainetta. Ilmamäärän, eli vedon, kasvattaminen siirtää polttopään lämpötilaa syöttöpäättyyn ja auttaa hetkellisesti syöttöpään lämpötilan hallintaan. Mikäli lämpötila kuitenkin laskee reilusti, on lisättävä polttoainetta. (KnowPulp versio 21.0, 2023m.)

Tikka (2008) korostaa savukaasujen päästöpitoisuuksien seuraamisen tärkeyttä, sillä niille on jokaisella tehtaalla määritelty tarkat luparajat. Päästöjä seurataan jatkuvatoimisilla mittauksilla ja säännöllisillä analyyseillä. Heikko meesan laatu ja uunin toiminnan häiriöt näkyvät nopeasti lisääntyneissä päästöpitoisuuksissa. Taulukossa 5 on esitetty tyypillisiä tavoitearvoja meesauunin savukaasujen päästöpitoisuuksille. (Tikka 2008, 178.)

TAULUKKO 5. Savukaasujen päästöpitoisuus suositukset (Tikka 2008, 180).

hiukkaset	alle 150 mg/m ³ n
TRS	alle 10 ppm
SO ₂	alle 30 ppm
NO _x	50–200 ppm
CO	alle 45 ppm

Hiukkaspäästöille on määritelty jokaisella tehtaalla omat rajansa, mutta ne on käytännössä aina pidettävä alle 150 mg/m³n. Sähkösuodattimet ovat tehokkaita hiukkaspäästöjen hallinnassa, joten normaalisti niiden kanssa ei synny ongelmia. TRS-päästöt on tärkeää pitää hallinnassa ja mahdollisimman pieninä. Syöttöpään häiriöt, mm. meesan nouseva alkalipitoisuus aiheuttaa välittömästi TRS-päästöjen nousemista. Tämän vuoksi meesan riittävä pesu ja kuiva-ainepitoisuuden tasaisuus ovat tärkeitä hallittavia tekijöitä. (Tikka 2008, 178–180.)

NO_x-pitoisuuksien määrä on riippuvainen käytetystä polttoaineesta, sillä öljyä käytettäessä NO_x-päästöt ovat hieman korkeampia kuin maakaasulla. Primääriilmamäärä on yhteydessä NO_x-pitoisuuksiin ja sitä optimoimalla voidaan vähentää NO_x-päästöjä merkittävästi. Primääriilmamäärää pienentämällä pienenevät myös NO_x-päästöt ja toisinpäin. (Tikka 2008, 180.)

Korkea CO, eli häkä pitoisuus on seurausta huonosta meesauunin polttoaineen palamisesta. Polttoaineen palamisen ongelmat aiheutuvat polttoaineen ja ilman sekoittumisen haasteista. Normaalissa tilanteessa kun uunin ilmansaannissa ei ole ongelmia, pysyvät myös häkäpitoisuudet alhaisina. (Tikka 2008, 179–180.)

7 AJO-OHJEIDEN MÄÄRITYS

7.1 Lähtökohdat ajo-ohjeiden määrittelykselle

Stora Enso Imatran tehtaiden talteenottolinjalta löytyy monenlaisia käyttöohjeita alas- ja ylös ajoihin sekä laitteiden yleiseen toimintaan liittyen. Prosessien varsinaiset ajo-ohjeet kuitenkin puuttuvat, josta syntyi tämän opinnäytetyön ensimmäinen osio. Ajo-ohjeiden tarkoitus on kertoa prosessilta vaadittavat laatuavoitteet ja kuinka niihin päästään käyttöarvoja muuttamalla. Kemikaalien talteenottolinjan ollessa laaja kokonaisuus, on ajo-ohjeiden määrittely rajattu kaustisointiin ja meesauuneihin.

Opinnäytetyön tuotoksena syntyi kolme ajo-ohjetta, kaustisoinnille, meesauuni 3:lle ja meesauuni 4:lle. Sisältö pohjautuu aikaisemmissa luvuissa esitettyyn teoriaan, jota on sovellettu toimeksiantajan prosesseille sopivaksi. Tuotetut ajo-ohjeet ladattiin Stora Enson liiketoimintajärjestelmään, jonka vuoksi ne luokitellaan luottamukselliseksi aineistoksi. Ajo-ohjeet ovat tämän opinnäytetyön salattuina liitteinä (liitteet 1–3) ja tässä luvussa on käsitelty ohjeiden sisältöä yleisellä tasolla.

Ajo-ohjeiden pääpaino on prosessin optimaalisissa laatu- ja käyttöarvoissa. Ajo-ohjeet on tehty käyttöhenkilökunnalle, jotka ymmärtävät prosessin kokonaisuuden ja laitteiden toiminnan. Prosessien toimintakuvaukset on jätetty pois, sillä niistä on tehty jo omat käyttöohjeet. Rakenne ja sisältö pyrittiin pitämään mahdollisimman tiiviinä ja informatiivisena. Ajo-ohjeiden laatimisessa käytettiin hyödyksi Stora Enson liiketoimintajärjestelmästä ja DNA-automaatiojärjestelmästä löytyvää informaatiota. Prosessia ohjaavat operaattorit olivat myös arvokas tiedonlähde.

7.2 Kaustisoinnin ajo-ohje

Kaustisoinnin varsinainen ajo-ohje on liitteenä 1. Ohje on jaettu kolmeen pääluokkaan, jotta ohje on mahdollisimman selkeä ja helposti luettava. Jokaisessa pääluvussa käsitellään kyseisen osa-alueen laatuvaatimukset ja käyttöarvot, joilla

voidaan vaikuttaa laatuarvoihin. Nämä kolme päälukua ovat:

- viherlipeän käsittely
- sammutus ja kaustisointi
- valkolipeän- ja meesan suodatus.

Viherlipeän käsittely osiossa, eli liitteen 1 ensimmäisessä pääluvussa käsitellään viherlipeän laatuvaatimukset, joista tärkeimmät ovat kokonaisalkali ja tiheys. Viherlipeän sakkapitoisuus on myös tärkeä laatuarvo ja se halutaan pitää mahdollisimman pienenä. Osiossa käydään läpi myös sakkasuotimen käyttöarvot ja sen toiminnalta tavoiteltavat laatuarvot, joita ovat prosessista poistettavan sakan kuiva-ainepitoisuus ja jäännösalkali. Prosessista poistettavan sakan kuiva-ainepitoisuus halutaan mahdollisimman korkeaksi ja jäännösalkali mahdollisimman pieneksi.

Sammutus ja kaustisointi osiossa, eli liitteen 1 toisessa pääluvussa käsitellään kalkin sammutus ja kaustisointireaktiolta haluttu lopputulos, jota mitataan kaustisointiasteella. Laatutavoitteissa on esitetty myös sammutajaan syötettävän viherlipeän ja kalkin laatuvaatimukset, jotka ovat tärkeitä halutun lopputuloksen aikaansaamiseksi. Laatuvaatimuksien lisäksi osiossa käsitellään prosessin käyttöarvojen vaikutus kaustisointiasteeseen.

Valkolipeän- ja meesansuodatus osiossa, eli liitteen 1 kolmannessa pääluvussa on esitetty suodatusvaiheen läpäisseen valkolipeän laatuvaatimukset. Valkolipeän laatua seurataan vaikuttavalla alkalilla, sulfiditeetilla, kiintoainepitoisuudella ja kaustisointiasteella. Suodatusvaiheen käyttöarvoista tärkeimpiä ovat meesan tiheysarvot, joten niitä on painotettu ajo-ohjeessa. Valkolipeänsuodatus toimii optimaalisesti, kun tiheysarvot ovat hallinnassa ja vältetään äkillisiä tuotannon muutoksia. Suodattimien toiminnan perustuessa paine-eroon, on paineen merkitystä korostettu ohjeen lopussa. Paine-eron avulla seurataan suodattimien, eli ecofilttereiden toimintaa, sillä kasvava paine-ero kertoo kasvaneesta suodatusvastuksesta. Käytännössä paine-ero halutaan siis pitää mahdollisimman pienenä ja taseisena.

7.3 Meesauunin ajo-ohje

Meesauuni 3:n ja 4:n ajo-ohjeet ovat hyvin samankaltaisia, sillä samat periaatteet pätevät molempien uunien toiminnassa. Meesauuni 3:n ollessa perinteinen meesauuni ja meesauuni 4:n ollessa LMD-uuni, syntyi ohjeisiin kuitenkin jonkin verran eroavaisuuksia. Meesauunien ajo-ohjeet jaettiin kolmeen pääluokkaan, jotka ovat:

- meesansyöttö
- meesanpoltto
- savukaasujen käsittely.

Meesansyöttö osiossa, eli liitteiden 2 ja 3 ensimmäisessä pääluvussa on esitetty meesan laatuvaatimukset, eli tavoiteltava kuiva-ainepitoisuus, jäännösalkali, ja vapaan kalkin määrä. Ohjeessa käsitellään kuinka näiden laatuarvojen muuttuminen vaikuttaa uunin toimintaan ja kuinka ne saadaan pidettyä hallinnassa käyttöarvoja säätämällä.

Meesanpoltto osiossa, eli liitteiden 2 ja 3 toisessa pääluvussa on esitetty polteulta kalkilta vaadittavat laatuvaatimukset, eli jäännöskarbonaattipitoisuudelta ja kaustisointivoimalta tavoiteltavat arvot. Ohjeessa on painotettu erityisesti polttoaineen ja ilmamäärän vaikutusta laatuarvoihin. Käyttöarvoissa on esitetty käyttöarvot lämpötilalle ja paineelle uunin syöttö- ja polttopäässä, sekä uunin tyypillinen kierrosnopeus.

Savukaasujen käsittely osiossa, eli liitteiden 2 ja 3 kolmannessa pääluvussa käsitellään sähkösuodattimien optimaaliset käyttöarvot, jotka liittyvät paineeseen ja lämpötilaan. Paineen ja lämpötilan avulla voidaan seurata meesauunin toimintaa ja huomata mahdolliset ongelman aiheuttajat. Esimerkiksi syöttöpäädyn alipaineen kasvaessa ohjeessa mainittua rajaa suuremmaksi, on uuniin mahdollisesti muodostunut rengas. Savukaasujen päästöpuhtaus ovat myös tärkeä seurattava tekijä, joten sitä on painotettu ohjeen lopussa.

8 NÄYTEMÄÄRITYSTEN PÄIVITYS

8.1 Lähtökohdat näytemäärittysten päivittämiselle

Säännöllinen ja riittävä näytemääritys kaustisointi- ja meesauuniprosessista on välttämätöntä prosessin hallinnan ja laadun ylläpitämisen kannalta. Näytteiden määritys ja tulkitseminen muodostavat tämän opinnäytetyön toisen osion, jossa käsitellään Stora Enso Kaukopään tehtaiden kaustisointi- ja meesauuni alueen näytteenottokäytäntöjä. Tarkoituksena oli tutkia ja perehtyä nykyisiin näytteenottokäytäntöihin ja pohtia, miten nykyistä toimintaa olisi mahdollista kehittää.

Eri tehtailla on erilaisia tapoja ja käytäntöjä näytteiden ottamiseen, jonka vuoksi tässä opinnäytetyön osiossa on haettu näkökulmia myös muiden tehtaiden käytännöistä ja toimintatavoista aiheeseen liittyen. Stora Enso Imatran tehtaiden lisäksi näkökulmia saatiin Stora Enso Enocellin ja Heinolan tehtailta. Aiheesta keskustelu muiden toimijoiden kanssa tuo esille aina uusia näkökulmia, joiden pohjalta molemmat osapuolet voivat saada uusia ideoita toiminnan kehittämiseksi ja parantamiseksi. Näkökulmia ja ideoita haettiin myös Valmetin kemikaalientalteenotto-prosessin asiantuntijoilta. Valmetin kanssa pidetystä palaverista nousi esille monia mielenkiintoisia ajatuksia, joita on käytetty hyödyksi tässä osiossa.

Tämän opinnäytetyö osion kokonaistuotoksena syntyi toimeksiantajalle tehty kirjoitus nykyisistä näytteenottokäytännöistä ja mahdollisista kehitysmahdollisuuksista tulevaisuudessa. Nykyisistä käytännöistä ilmeni myös selviä puutteita, jotka korjattiin opinnäytetyön aikana.

8.2 Lähtötilanne

Kaukopään kaustisointiprosessista otettavat näytteet koostuvat AlkaliR-analysaattorin, käyttöhenkilökunnan ja tehtaan oman laboratorion määrityksistä. Kuten aikaisemmin on jo kerrottu, niin AlkaliR-analysaattori määrittää prosessista jatkuvatoimisesti näytteitä ja on tärkeä työkalu prosessin hallinnassa. Käyttöhenkilökunnan ja laboratorion näytemäärityksiä käytetään analysaattorin toiminnan tukemiseksi. Taulukossa 6 on kaustisoinnin tämänhetkinen toimintamalli näytteiden

ottamiseen. Liitteessä 4 on tarkempi toimeksiantajan määrittämä ohje laboratoriönäytteiden ottamiseen. Liite luokitellaan kuitenkin luottamukselliseksi aineistoksi, joten se on jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

TAULUKKO 6. Nykyinen kaustisoinnin toimintamalli näytteiden määrittämiseen.

analysointi tapa	kuinka usein	näyte
analysointilaboratorio	jatkuvatoimisesti	viherlipeä kalkkimaito valkolipeä
käyttöhenkilökunnan titraukset	kerran vuorossa (12 h vuoro)	viherlipeä kalkkimaito valkolipeä
laboratorio	2 kertaa viikossa (tiedetyt näytteet useammin)	viherlipeä valkolipeä viherlipeäsakka

Käyttöhenkilökunnan näytemäärittäykset ovat prosessihenkilöiden omia titrauksia viherlipeästä, kalkkimaidosta ja valkolipeästä. Titraukset suoritetaan samalla tavalla kuin laboratoriomittauksetkin, eli ABC-titraatiomenetelmällä. Titrauksista määritetään prosessin hallinnan kannalta tärkeät tekijät, eli samat määrittäykset mitkä analysointilaboratorionkin tekee. Käyttöhenkilökunnan titrauksia on käytetty prosessin hallitsemiseksi ennen analysointilaboratorion, mutta ne on koettu tarpeelliseksi vielä nykyisessäkin toimintamallissa. Tarkoituksena on tukea analysointilaboratorion toimintaa ja ylläpitää käyttöhenkilökunnan titraustaitoja.

Meesauunin näytteidenotto koostuu käyttöhenkilökunnan jäännöskarbonaattimäärittäyksistä ja laboratorioreaktiivisuudesta. Jäännöskarbonaattimäärittäyksiä käytetään uunin polttoprosessin hallintaan, jonka vuoksi niitä määritetään 2 kertaa vuoron aikana. Meesan ja kalkin laboratorioreaktiivisuudella seurataan yleistä laatua kaksi kertaa viikossa. Taulukossa 6 on toimintamalli meesauunin näytemäärittäyksistä.

TAULUKKO 7. Nykyinen meesauunien toimintamalli näytteiden määrittämiseen.

analysointi tapa	kuinka usein	näyte	määrittäminen
käyttöhenkilökunnan määrittäminen	2 kertaa vuorossa (12 h vuoro)	kalkki	jäännöskarbonaatti
laboratorio	2 kertaa viikossa	kalkki	kaustisointivoima
laboratorio	2 kertaa viikossa	meesa	kuiva-ainepitoisuus liukoinen alkali vapaa kalkki

8.3 Tehdyt muutokset

Näyttemäärittämissä käytännöistä löytyi selviä puutteita, jotka korjattiin opinnäytetyön aikana. Puutteita oli erityisesti järjestelmässä, josta laboratorioanalyysien tuloksia tarkastellaan. Osa näyttemäärittämisistä puuttui analyysisivulta kokonaan, eli näytteitä on otettu ja analysoitu, mutta niiden tulokset eivät olleet analyysisivulla nähtävillä. Tämä johtui järjestelmässä olevasta ongelmasta, sillä analyysien tulokset syötettiin laboratorioissa järjestelmään, mutta ne eivät kuitenkaan päivittyneet analyysisivulle. Näin ollen puuttuvien analyysien tuloksia ei olla myöskään seurattu. Seuraavien analyysien tulokset puuttuivat:

- sammuttaja 1 viherlipeän sakkapitoisuus
- sammuttaja 2 viherlipeän sakkapitoisuus
- sakkasuotimelle pumpattavan sakan kiintoainepitoisuus
- sakkasuotimelta poistettavan sakan alkalipitoisuus.

Kuviossa 25 on analyysisivun päivitetty versio, jossa tehdyt muutokset on ympäröity punaisella. Nyt analyysisivulta löytyvät aikaisemmin mainittujen puuttuvien analyysien tulokset. Viherlipeän sakkapitoisuutta on tärkeää seurata, jotta voidaan varmistua riittävästä viherlipeäsakan poistosta. Aikaisemmin kun analyysien tulokset ovat puuttuneet, ei viherlipeän sakkapitoisuudesta ole ollut tarkkaa tietoa. Tämä pätee myös sakan kiintoaine- ja alkalipitoisuus tuloksien kohdalla, eli niidenkin tuloksia ei olla aikaisemmin voitu seurata. Muutoksien jälkeen sakkasuotimen toimintaa on mahdollista seurata tarkemmin, kun analyysien tulokset

ovat nähtävillä. Analyysien avulla voidaan optimoida sakkasuotimen toimintaa ja näin ollen alkalihäviöt voidaan minimoida.

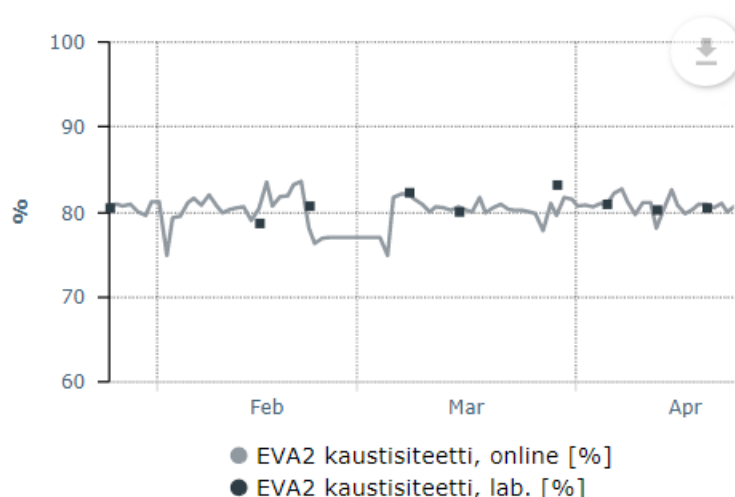
Kaustisointilaitoksen analyysit

Time stamp	EVA1					EVA2					EVI						
	SAKKA	VAIK. ALK.	KOK. ALK.	SULF.	KAUST.	SAKKA	VAIK. ALK.	KOK. ALK.	SULF.	KAUST.	SK5 SAKKA	SK6 SAKKA	SAMM1 SAKKA	SAMM2 SAKKA	KS3 SAKKA (pumpulta)	KS3 SAKKA kuiva-aine	SAKKA liuk. alkali (kaavarilta)
	mg/l	gNa2O/l	gNa2O/l	%	%	mg/l	gNa2O/l	gNa2O/l	%	%	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	g/l	%	%
28.03.2023 07:00											76		6	0			
29.03.2023 07:00						0	118,1	132,8	38,1	83,3					21	35,1	3,2
04.04.2023 07:00											86		30	5			
05.04.2023 07:00						0	115,6	132,5	37,5	81,0					17	29,3	5,0
11.04.2023 07:00											44	114	18	54			
12.04.2023 07:00						0	109,3	126,0	37,2	80,4					26	42,6	2,0
14.04.2023 07:00											20	0	21	10			
18.04.2023 07:00											42	198	16	18			
19.04.2023 07:00						0	110,2	126,3	39,1	80,6					50		0,5
21.04.2023 07:00											342	540	44	35			
24.04.2023 07:00	0	117,6	135,8	39,3	79,7												
minimum	0	117,6	135,8	39,3	79,7	0	109,3	126,0	37,2	80,4	20	0	6	0	17	29,3	0,5
maximum	0	117,6	135,8	39,3	79,7	0	118,1	132,8	39,1	83,3	342	540	44	54	50	42,6	5,0
average	0	117,6	135,8	39,3	79,7	0	113,3	129,4	38,0	81,3	112	169	23	20	28	35,7	2,7

KUVIO 25. Kuvakaappaus kaustisoinnin päivitetystä analyysisivusta (Stora Enso – SYKE raportointijärjestelmä 2023).

Alkalianalysointilaitoksen ja laboratoriomittausten tuloksia on aikaisemmin ollut hieman hankala verrata keskenään, sillä ne eivät ole löytyneet järjestelmän samalta sivulta. Tähän ratkaisuna luotiin valkolipeän laatuarvoille kuvaajat, jossa analysointilaitoksen ja laboratoriomittausten tulokset ovat samassa kuvaajassa. Kuvaajat luotiin valkolipeän kokonaisalkalille, aktiiviselle alkalille, kaustisointiasteelle ja sulfiditeille. Kuviossa 26 on esitetty esimerkki kaustisointiasteen kuvaajasta. Kuvaajassa harmaa viiva edustaa analysointilaitoksen tuloksia ja mustat pisteet laboratoriomittauksia. Kuvassa kaustisointiaste on nimetty kaustisiteetiksi.

EVA2 kaustisiteetti



KUVIO 26. Analysaattorin ja laboratoriomittausten kuvaajat valkolipeän kaustisointiasteelle (Stora Enso – SYKE raportointijärjestelmä 2023).

Analysaattorin ja laboratoriomittausten tuloksia on helppo verrata keskenään kuvaajien avulla. Näin voidaan heti huomata mahdolliset poikkeamat tuloksien välillä, jotka voivat johtua esimerkiksi analysaattorin toiminnan häiriintymisestä. Analysaattorin toiminnan luotettavuutta on näin ollen helpompi seurata. Kun katsotaan kuvaajaa 26, voidaan huomata pieniä poikkeamia analysaattorin ja laboratoriomittausten välillä. Tämä johtunee kuitenkin siitä, että aikaisemmin laboratoriomittausten ajankohdaksi on ilmoitettu aina kello 7 aamulla, vaikka näyte olisi otettu jo aiemmin. Tähän ratkaisuna on näytteenottamiseen ohjeistettu, että näyteastioihin kirjoitetaan tarkat kellonajat, kun näyte otetaan. Näin ollen laboratorionhenkilökunta pystyy kirjaamaan näytteelle järjestelmään tarkan ajankohdan, kun näyte on otettu. Tämä mahdollistaa luotettavan vertailun analysaattorin ja laboratoriomittausten välillä.

8.4 Kehitysmahdollisuudet

Opinnäytetyön aikana tuli ilmi monia kehitys- ja parannusmahdollisuuksia näytteenottokäytäntöihin liittyen. Toimintakäytäntöjen muuttaminen on kuitenkin pitkä prosessi ja vaatii erillisiä palaverieita, jossa mahdollisista muutoksista päätetään. Tämän vuoksi näytteenottokäytäntöjen kehitysmahdollisuuksia on pohdittu tässä opinnäytetyön osiossa vain teoreettisesti ja toimeksiantaja voi käyttää tätä työtä pohjana tuleville muutoksille haluamallaan tavalla.

Työn aikana syntyi kolme erilaista toiminnankehitysmahdollisuutta. Nämä kehitysmahdollisuudet ovat käyttöhenkilökunnan näytemääriyksien poistaminen nykyisestä toimintamallista, laboratorionäytteiden lisääminen ja meesan ja kalkin laadunvalvonnan kehittäminen. Näitä kehitysmahdollisuuksia on käsitelty tarkemmin tässä luvussa omien otsikoidensa alla.

8.4.1 Käyttöhenkilökunnan näytemääriyksien poistaminen

AlkaliR-analysaattorin määrittämät titraustulokset ovat luotettavin tapa ohjata kaustisointia ja laboratoriomääriyksisiä käytetään laadunseurantaan yleisellä tasolla. Laboratoriomittauksia voidaan myös verrata analysaattorin tuloksiin, jolloin voidaan varmistua analysaattorin luotettavuudesta. Käyttöhenkilökunnan itse titraamat näytteet eivät vuorostaan kuulu enää nykyaikaisten sellutehtaiden toimintatapoihin, jonka vuoksi ne olisi syytä jättää pois myös Kaukopään tehtaalta. Käyttöhenkilökunnan titrauksien lopettamiselle on monta perusteltua syytä, joita ovat muun muassa työtaturman riski, luotettavuus ja lisäarvon tuottaminen.

Kaustisoinnin kemikaalit, eli viher- ja valkolipeä, ovat voimakkaasti ihoa syövyttäviä ja voivat muodostaa vaarallisia kaasuja happojen kanssa reagoidessaan. Näytteitä käsiteltäessä on oltava huolellinen ja suojavarusteet on oltava kunnossa, mutta tästä huolimatta kemikaaleja käsiteltäessä on aina olemassa vaara saada kemikaalia iholle. Manuaalisesti titrattaessa kemikaalit voivat myös kärytä ja aiheuttaa haitallisia pidempiaikaisia vaikutuksia titrausta suorittavalle henkilölle. Kemikaaleja titrattaessa on olemassa siis välitön ja pidempiaikainen työtaturman riski. Lopettamalla käyttöhenkilöiden säännölliset titraukset, voidaan tämä työtaturman riski eliminoida täysin.

Analysaattorin tekemien analyysien on todettu olevan luotettavampia kuin manuaaliset käyttöhenkilökunnan tekemät titraukset. Analysaattori tekee titrauksen aina samalla tavalla, mutta käyttöhenkilökunnan titrauksissa voi olla eroavaisuuksia henkilöstä riippuen. Kaustisointiaste on tärkein seurattava tekijä sammuttajien toiminnassa ja erityisesti sen määrittämisessä voi olla merkittäviäkin eroavaisuuksia analysaattorin ja käyttöhenkilön titrauksien välillä. Kun käyttöhenkilökunta ottaa kalkkimaitonäytteen, niin se jatkaa reaktiotaan vielä näyteastian

sisällä. Näytteen ottamisen ja titraamisen välillä kuluu aina jonkin verran aikaa ja näin ollen kaustisointiasteen arvo on ehtinyt hieman muuttua alkuperäisestä. Analyysointin ottamissa näytteissä ei tämän kaltaista viivettä ole, vaan saadut kaustisointiasteen tulokset ovat luotettavia.

Analyysointin tehdessä analyysijä jatkuvatoimisesti, eivät käyttökäyttöhenkilöiden titraukset tuota prosessin hallinnan kannalta merkittävää lisäarvoa. Käyttöhenkilöiden tekemien titrauksien ideana on käytännössä vain ylläpitää käyttöhenkilöiden titraustaitoja tilanteita varten, jossa analyysointin ei ole käytössä. Tilanteissa, jossa analyysointin on syystä tai toisesta pois käytöstä, prosessia voidaan ohjata sammuttajan lämpötilaeron avulla. Lämpötilaero on luotettava tapa ohjata prosessia, kunhan sammutin ei ole kiehuessa tilassa. Viherlipeäjähdyttimen ansiosta sammuttajan kiehuminen on kuitenkin epätodennäköistä.

Käyttöhenkilökunnan määrittämissä näytteissä on hyvänä puolena se, että näytteitä voidaan määrittää tilanteesta riippumatta. Analyysointin voi aika ajoin viikantua, jolloin se ei pysty tekemään näytteistä määrittämiä. Ei ole kuitenkaan järkevää käyttää aikaa ja resursseja työtehtävään, joka ei tuota juurikaan lisäarvoa prosessille. Käyttöhenkilöiden titrauksien lopettaminen vapauttaisi työntekijöiden aikaa muille työtehtäville ja samalla voitaisiin eliminoida yksi riskitekijä.

8.4.2 Laboratorionäytteiden lisääminen

Soodakattiloiden liuottajien raakaviherlipeästä määritetään kokonaisalkali jokainen arkipäivä, mutta myös sammuttajan viherlipeästä olisi tulevaisuudessa järkevää määrittää kokonaisalkali laboratoriossa. Liuottajan ja sammuttajan viherlipeällä on eri kokonaisalkali, joten liuottajan tuloksia ei voida suoraan verrata sammuttajan viherlipeään. Tällä hetkellä sammuttajan viherlipeästä määritetään laboratoriossa sakkapitoisuus kaksi kertaa viikossa, joten samasta näytteestä olisi helppoa tehdä myös kokonaisalkalimääritys. Kokonaisalkalin määritys olisi hyödyllinen erityisesti tilanteessa, jossa käyttöhenkilökunnan omat titraukset jäisivät pois. Näin kokonaisalkalitason kehitystä pystyttäisiin seuraamaan ja vertaamaan tuloksia analyysointin tekemiin arvoihin.

Meesanlaadun seuraamista voisi tehostaa entisestään tulevaisuudessa. Meesa-näytteitä toimitaan laboratorioon tällä hetkellä kaksi kertaa viikossa, joten näytemääritysten välissä kuluu paljon aikaa. Meesa-näytteitä olisi järkevää määrittää ainakin kolme kertaa viikossa, jotta mahdolliset laatupoikkeamat voitaisiin havaita nopeammin. Meesauunit ovat erittäin herkkiä meesan laatupoikkeamille ja lisänäytemääritykset toisivat lisäarvoa havaitsemalla ongelmat meesasuoitimien toiminnassa nykyistä nopeammin. Tämä vuorostaan auttaa ehkäisemään meesauuniin syntyviä ongelmia, kuten esimerkiksi ylimääräistä energian kulutusta tai meesa- ja kalkkirenkaiden muodostumista.

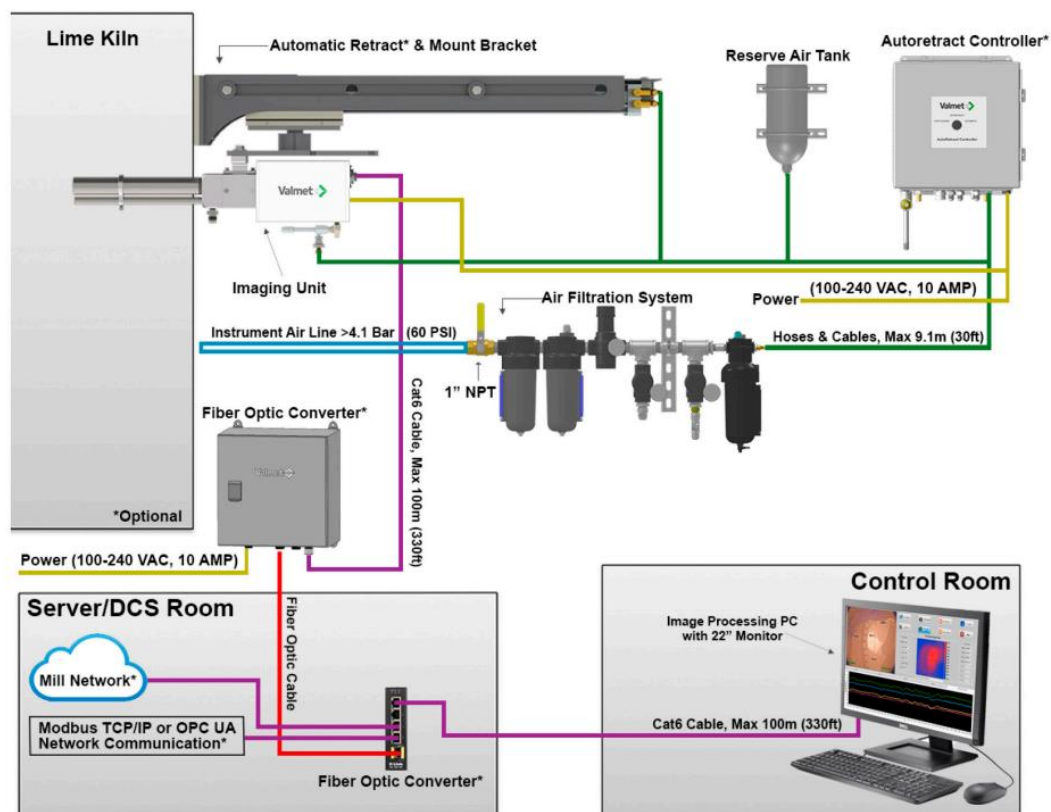
8.4.3 Meesan ja kalkin laadunvalvonnan kehittäminen

Meesa- ja kalkkinäytteiden avulla hallitaan ja optimoidaan meesauunin toimintaa. Tällä hetkellä meesan kuiva-ainepitoisuutta saadaan mitattua luotettavasti vain laboratorioanalyysillä, mutta laboratorioanalyysijä ei voida kuitenkaan käyttää tuotannon optimoinnin säätöperusteena. Jäännöskarbonaattianalyysijä kalkista voidaan tehdä vain kaksi kertaa 12 tunnin työvuoron aikana, jotta käyttöhenkilökunnan työaikaa riittää muillekin työtehtäville. Meesan kuiva-ainepitoisuuden ja kalkin jäännöskarbonaatin seurantaan on olemassa kuitenkin uusia laiteratkaisuja, jotka mahdollistaisivat prosessin tarkemman seurannan. Tässä luvussa käsitellään Valmetin kehittelemiä uusia laiteratkaisuja ja kuinka niitä voitaisiin hyödyntää Kaukopään meesauuneilla.

Meesan kuiva-ainepitoisuuden seurantaan olisi suositeltavaa käyttää Valmetin kehittelemää on-line mittausta, jotta kuiva-ainepitoisuuden vaihteluihin voitaisiin reagoida nykyistä nopeasti. Tällä hetkellä molemmilla meesauuneilla kuiva-ainepitoisuusmittaus löytyy, mutta mittaus ei ole kovinkaan tarkka ja on vain suuntaa antava. Tämän vuoksi nykyisiä mittauksia ei voida käyttää tarkkaan laadunseurantaan. Valmetin talteenottolinjan analysaattoreiden ja kehittyneiden prosessisäätöjen liiketoimintapäällikkö Timo Laurila kommentoi meesan kuiva-ainepitoisuusmittausta seuraavasti "Laboratoriomittausten ongelmana on se, että näytteitä otetaan niin harvoin, ettei mittaustietoa voida käyttää tehonsäädössä. Se on mahdollista vain jatkuvatoimisella mittauksella". Valmetin kehittämällä jatkuvatoimisella meesan kosteusmittauksella meesan kuiva-ainepitoisuudesta saataisiin tarkkaa ja reaaliaikaista tietoa. Mittaus on mahdollista liittää uunin

automaatiojärjestelmään, joka säätää ja optimoi uunin energiankulutusta. (Valmet 2018.) Yhdessä laboratorionäytteiden ja hyvin optimoidun on-line mittauksen avulla voidaan parantaa uunin normaalia toimintaa ja saavuttaa merkittäviä energiasäästöjä.

Kalkin laadun seurantaan Valmet on kehittänyt meesauuniin kameran ja optimointijärjestelmän, jonka avulla voidaan seurata uunista poistuvan kalkin jäännöskarbonaattipitoisuutta. Kalkin lämpötilan ja jäännöskarbonaatin välillä on voimakas korrelaatio, johon kameran toiminta perustuu. Kuviossa 27 on esitetty kameran ja järjestelmän muodostama kokonaisuus. Kamera mittaa uunin kynnyksen yli poistuvan kalkin lämpötilaa, jonka se lähettää prosessinhallintajärjestelmään. Järjestelmä analysoi lämpötilan arvoa ja ennustaa sen perusteella mihin suuntaan jäännöskarbonaatti on kehittymässä. Kameran ja järjestelmän avulla voidaan siis seurata jäännöskarbonaatin kehitystä reaaliajassa ja reagoida muutoksiin nopeasti.



KUVIO 27. Valmetin meesauunikamera ja optimointijärjestelmän muodostama kokonaisuus (Valmet 2019).

Kamerajärjestelmä ei kuitenkaan korvaa jäännöskarbonaattianalyysijä, vaan sen tarkoitus on auttaa jäännöskarbonaatin kehityksen seuraamista näyteanalyysien välisenä aikana. Tämä mahdollistaisi optimaalisen meesauunin toiminnan, kun laatu poikkeamiin voidaan reagoida nopeasti. Kun jäännöskarbonaatti saadaan pidettyä tarkasti halutulla tasolla, säästyy polttoainetta ja laatu pysyy tasaisena. Meesauuni on suuri fossiilisen polttoaineen kuluttaja, joten on pienelläkin muutoksella suuri vaikutus kustannuksiin ja hiilidioksidipäästöihin. Uuden tekniikan mahdollistamia päivityksiä on syytä pohtia tulevaisuudessa, sillä meesan ja kalkin laadun tarkempi seuranta parantaisi tuotannon laatua ja tasaisuutta, sekä pienentäisi polttoainekustannuksia.

YHTEENVETO

Opinnäytetyön ensimmäisen osion tuotoksena toimeksiantaja sai käyttöönsä ajo-ohjeet kaustisoinnille ja meesauuneille, jotka ladattiin Stora Enson liiketoimintajärjestelmään. Liiketoimintajärjestelmästä käyttöhenkilökunta pääsee lukemaan ja perehtymään niihin. Työn tuotos toimii myös hyödyllisenä materiaalina työntekijöiden työperehdytystarkoituksiin. Ajo-ohjeet sisältävät luottamuksellisia laatu- ja käyttöarvoja, jonka vuoksi ne ovat tämän opinnäytetyön salattuina liitteinä (liitteet 1–3). Kaustisoinnin ja meesauunien ajo-ohjeita voidaan käyttää myös mallina kemikaalien talteenottolinjan muille puuttuville ajo-ohjeille.

Työn toisen osion tuotoksena näytteenottokäytännöistä korjattiin selvät puutteet ja pohdittiin toiminnan kehitysmahdollisuuksia tulevaisuudessa. Järjestelmään lisättiin puuttuvat näytesarakkeet, josta käyttöhenkilökunta tarkastelee laboratoriomittausten tuloksia. Järjestelmään luotiin myös uudet kuvaajat, josta nähdään automaattianalysaattorin ja laboratoriomittausten määrittämät valkolipeän laatuarvot samasta kuvaajasta. Uusien kuvaajien avulla voidaan helposti tarkastella poikkeamia analysaattorin ja laboratoriomittausten välillä. Korjauksien ja muutoksien myötä laboratorionäytemäärittämisestä on enemmän hyötyä ja tuloksia on helpompaa vertailla keskenään kuin ennen.

Työssä esitettyjen näytemäärittämiskehitysmahdollisuuksien pohjalta toimeksiantaja voi kehittää toimintaansa nykyaikaiseen ja tehokkaampaan suuntaan. Osa muutoksista on suhteellisen helppo ja nopea toteuttaa, mutta osa vaatii investointeja. Käyttöhenkilökunnan näytemäärittämiskeinojen pois jättäminen säännöllisistä työtehtävistä olisi järkevää ja se olisi myös helppoa toteuttaa. Meesan ja kalkin laadunvalvonnan kehittäminen vuorostaan vaatisi suhteellisen isoja investointeja, mutta niistä saatavat hyödyt olisivat myös merkittäviä. Näiden kehitysmahdollisuuksien toteuttamista on syytä pohtia tulevaisuudessa, sillä niiden avulla on mahdollista parantaa prosessin toimintaa ja hallintaa merkittävästi.

Opinnäytetyön suorittaminen vaatii syvällistä perehtymistä kaustisointi- ja meesauuniprosesseihin, jonka johdosta esille nousi monia mahdollisia kehityskohteita tulevaisuudessa. Erityisesti selvittäessä oikeita laatu- ja käyttöarvoja ajo-

ohjeisiin, tuli ilmi kuinka tiettyjen prosessivaiheiden käyttöarvoja olisi syytä optimoida tulevaisuudessa. Esimerkkinä on meesauunin tarvitsema ilmamäärä, joka olisi syytä tarkistaa ja optimoida mahdollisimman hyvän energiatalouden aikaansaamiseksi. Sopivien käyttöarvojen löytäminen meesauunille vaatii paljon selvitystä ja koeajoja, joten siinä itsessään olisi aihe toiselle opinnäytetyölle.

LÄHTEET

Bajpai, P. 2008. Chemical recovery in pulp and papermaking. Leatherhead: Pira International.

Bajpai, P. 2017. Pulp and paper industry: chemical recovery. Amsterdam: Elsevier.

Elka. 2015. Kaukopään tehtaot 80 vuotta. Viitattu 25.1.2023. <https://www.elka.fi/aikakone/index.php/2015/09/17/kaukopaan-tehtaot-80-vuotta/>

Fardim, P. 2011. Chemical pulping part 1, fibre chemistry and technology. 2. painos. Helsinki: Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy.

Grace, T. ja Tran, H. 2007. The effect of dead load chemicals in the kraft pulping and recovery system. Viitattu 27.2.2023. https://www.researchgate.net/publication/289853467_The_effect_of_dead_load_chemicals_in_the_kraft_pulping_and_recovery_system

Imeläinen, H. & Loukiala, M. 2005. Lime kiln optimisation: Managing the inputs to stabilise the outcome. Viitattu 6.3.2023. <https://search.informit.org/doi/pdf/10.3316/informit.582186594175624>

KnowPulp versio 21.0. 2023a. AEL / Proledge Oy. Sellun keiton periaate. Viitattu 21.1.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/general/2_cooking/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023b. AEL / Proledge Oy. Pesu-tiivistelmä. Viitattu 21.1.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/general/3_washing/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023c. AEL / Proledge Oy. Haihdutuksen tarkoitus ja periaate. Viitattu 27.1.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/general/8_evaporation/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023d. AEL / Proledge Oy. Soodakattila-tiivistelmä. Viitattu 4.2.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/recovery_boiler/1_general/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023e. AEL / Proledge Oy. Kaustisointi-tiivistelmä. Viitattu 28.1.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/general/10_causticizing/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023f. AEL / Proledge Oy. Keittokemikaalit. Viitattu 10.2.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/cooking/1_process/3_chemicals/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023g. AEL / Proledge Oy. Viherlipeän käsittely. Viitattu 29.1.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/causticizing/1_green_liquor_handling/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023h. AEL / Proledge Oy. Kaustisointi. Viitattu 4.2.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/causticizing/3_causticizing/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023i. AEL / Proledge Oy. Valkolipeän erotus ja meesan pesu. Viitattu 5.2.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/causticizing/4_white_liquor_filter/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023j. AEL / Proledge Oy. Meesauuni-tiivistelmä. Viitattu 9.2.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/lime_kiln/0_general/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023k. AEL / Proledge Oy. Meesan käsittely. Viitattu 11.2.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/lime_kiln/1_lime_preparation/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023l. AEL / Proledge Oy. Meesauuni. Viitattu 13.2.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/lime_kiln/2_lime_kiln/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023m. AEL / Proledge Oy. Meesauunin hallinta. Viitattu 16.3.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/lime_kiln/8_control/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023n. AEL / Proledge Oy. Meesauunin savukaasujen käsittely. Viitattu 3.3.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/lime_kiln/4_flue_gas/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023o. AEL / Proledge Oy. Alkalimittaukset kaustisoinnissa. Viitattu 19.3.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/causticizing/9_measurements/frame.htm

KnowPulp versio 21.0. 2023p. AEL / Proledge Oy. Kaustistamon hallinta. Viitattu 25.3.2023. Vaatii käyttöoikeuden. http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/causticizing/8_control/frame.htm

Levlin, J. & Söderbjelm, L. 1999. Pulp and paper testing. Helsinki: Fapet Oy.

Sanchez, D. 2007. Reconstituting principles and practice. Viitattu 24.1.2023. <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/2-1.pdf>

Seppälä, M. Klemetti, U. Kortelainen, V. Lyytikäinen, J. Siitonen, H. Sironen, R. 2001. Paperimassan valmistus. 2. painos. Helsinki: Opetushallitus.

Soodakattilayhdistys. 2021. Soodakattila. Viitattu 25.3.2023. <https://soodakattilayhdistys.fi/yhdistys/>

Stora Enso. n.d.a. Tietoja Stora Ensosta. Viitattu 25.1.2023. <https://www.storaenso.com/fi-fi/about-stora-enso>

Stora Enso. n.d.b. Imatran tehtaat. Viitattu 25.1.2023. <https://www.storaenso.com/fi-fi/about-stora-enso/stora-enso-locations/imatra-mill>

Stora Enso – SYKE raportointijärjestelmä. 2023. KS3 analyysisivu. Näyttökuva. Saatavilla rajoitetusti.

Tikka, P. 2008. Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy. 2. painos. Helsinki: Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy.

Tran, H. 2007. Lime kiln chemistry and effects on kiln operations. Viitattu 5.2.2023. <https://www.researchgate.net/publication/290320968> Lime kiln chemistry and effects on kiln operations

Tran, H. & Vakkilainen, E. 2016. The kraft chemical recovery process. Viitattu 27.1.2023. <https://www.researchgate.net/publication/267565045> THE KRAFT CHEMICAL RECOVERY PROCESS

Valmet. 2023. Valmet Recovery Liquor Analyzer. Automation solutions. Viitattu 9.2.2023. <https://www.valmet.com/automation/analyzers-measurements/analyzers/recovery-liquor-analyzer/>

Valmet. 2019. HD visible camera and thermal sensor for lime kilns. Automation solutions. Viitattu 4.4.2023. <https://www.valmet.com/automation/analyzers-measurements/boiler-diagnostics/furnace-visible-imaging-system/visible-thermal-imaging-system/>

Valmet. 2018. Valmetin uusi jatkuvatoiminen ratkaisu parantaa meesan kosteusmittausta. Viitattu 14.4.2023. <https://www.valmet.com/fi/media/uutiset/lehdistotiedotteet/2018/valmetin-uusi-jatkuvatoiminen-ratkaisu-parantaa-meesan-kosteusmittausta/>

LIITTEET

Liite 1. Kaustisoinnin ajo-ohje

Luottamuksellinen aineisto poistettu

Liite 2. Meesauuni 3:n ajo-ohje

Luottamuksellinen aineisto poistettu

Liite 3. Meesauuni 4:n ajo-ohje

Luottamuksellinen aineisto poistettu

Liite 4. Ohje lipeälinjan laboratorionäytteiden ottamiseen

Luottamuksellinen aineisto poistettu