

LAPPEENRANNAN–LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A1101 Energiatekniikan diplomityö

Tuure Kukka

SOODAKATTILAN PALAMISEN OPTIMOINTI

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen

DI Kari Luostarinen

Ohjaaja: DI Tiia Finér

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Tuure Kukka

Soodakattilan polton optimointi

Diplomityö

2019

100 sivua, 52 kuvaa, 5 taulukkoa, 3 liitettä

Työn tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen, DI Kari Luostarinen

Työn ohjaaja: DI Tiia Finér

Hakusanat: soodakattila, palamisen optimointi, mustalipeä, likaantuminen, päästöt
Keywords: recovery boiler, black liquor, optimization of combustion, fouling, emissions

Tämä diplomityö on tehty Stora Enson Imatran tehtaiden voimalaitokselle. Työssä tutkittiin soodakattilan tulipesäprosessia, joka vaikuttaa merkittävästi lämpöpintojen likaantumiseen sekä syntyviin päästöihin. Työn tavoitteena on tutkia ja löytää parhain ajotapa tehtaan pienemmälle soodakattilalle, jossa on ollut ongelmia erityisesti likaantumisen takia käytettävyydessä ja rikki- ja typenoksidipäästöjen hallinnassa. Lisäksi tiukentunut ympäristölupa typenoksidipäästöjen osalta luo haasteita pysyä uusissa päästöluissa.

Soodakattilan tulipesän toimintaan voidaan usein parantaa ilmajärjestelmää ja mustalipeän ruiskutusta säätämällä. Tulipesän toiminnan lisäksi likaantumiseen sekä rikki- ja typenoksidipäästöihin vaikuttaa mustalipeän koostumus. Mustalipeän korkea sulfiditeetti edesauttaa happamien sulfaattien syntymistä, jotka aiheuttavat likaantumisongelmia keittoputkiston ja ekonomaiserin alueella. Korkeat kalium- ja klooripitoisuudet mustalipeässä kasvattavat likaantumis- ja korroosioriskiä lämmönsiirtopinnoilla.

Kirjallisuuden, data-analyysien sekä koeajojen perusteella soodakattilalle luotiin uusi ajomalli, jossa parannettiin ilmajakoa, optimoitiin yli-ilman määrä sekä rakennettiin uusi pisarankoon hallinta. Uudella ajomallilla saatiin parannettua soodakattilan tulipesän toimintaa, joka voitiin havaita parantuneesta reduktioasteesta sekä madaltuneista rikkidioksidi- ja typenoksidipäästöistä.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Degree Program in Energy Technology

Tuure Kukka

Optimization of the combustion process in recovery boiler

Master's Thesis

2019

100 pages, 52 figures, 5 tables, 3 appendixes

Examiners: Professor Ph.D. (Tech.) Esa Vakkilainen, M.Sc. (Tech.) Kari Luostarinen
Työn ohjaaja: M.Sc. (Tech.) Tiia Finér

Keywords: recovery boiler, black liquor, optimization of combustion, fouling, emissions

This master's thesis was done for Stora Enso Imatra mills' power plant. In the thesis, recovery boiler furnace process, which has a significant impact on fouling and emissions, was studied. The aim of this thesis was to research the best firing parameters in the mills' smaller recovery boiler, which has been causing serious problems in fouling and sulfur emission control. The tightening environmental permits for nitrogen oxide emissions create challenges in staying within the new emissions limits.

The furnace operation can often be improved by adjusting the black liquor spraying and the air system. The black liquor composition also has a major effect on fouling and sulfur and nitrogen oxides emissions. The high sulphidity of black liquor contributes to the formation of acid sulphates in flue gas, which cause fouling problems in the boiler bank and economizers' surface. High levels of potassium and chlorine in black liquor increase the risk of fouling and corrosion on heat transfer surfaces.

The new firing parameters were created by using material from literature, collected data and systematic experiments. The new model has improved air distribution, optimized excess air volume and a built-in droplet size management system. The changes improved furnace operation, which could be detected by improved reduction rates and reduced sulfur dioxide and nitrogen oxide emissions.

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	8
2 Imatran tehtaat	9
3 Soodakattila yleisesti	10
3.1 Kemikaalien talteenotto.....	11
4 Soodakattilan vesi-höyrykierto	14
4.1.1 Syöttövesisäiliö	14
4.1.2 Verholämmönsiirrin	15
4.1.3 Ekonomaiseri	15
4.1.4 Höyrylieriö ja dolezal.....	16
4.1.5 Kattilaputket ja tulipesä	18
4.1.6 Keittoputkisto.....	19
4.1.7 Tulistimet	19
5 Polttolipeäjärjestelmä	21
5.1 Sekoitussäiliö.....	21
5.2 Polttolipeäpumput ja lipeän esilämmittimet.....	22
5.3 Lipeäruiskut.....	23
6 Palamisilmajärjestelmä	24
6.1 Ilmajako Suomalaisissa soodakattiloissa.....	24
6.2 Primääri-ilma.....	25
6.3 Sekundääri-ilma.....	26
6.4 Tertiääri-ilma.....	27
6.5 Vertikaali- ja monitasoilmajärjestelmä	27
7 Mustalipeän palaminen	28
7.1 Mustalipeän ominaisuudet.....	28
7.2 Pisaroituminen.....	30
7.3 Palamisen vaiheet.....	31
8 Soodakattilan kemialliset prosessit	34
8.1 Rikin ja natriumin tase	34
8.2 Reaktiot tulipesässä	37
9 Soodakattilan savukaasupäästöt	39
9.1 Kiintoaine	39
9.2 Rikkidioksidi	39
9.3 Pelkistyneet rikkiyhdisteet	40
9.4 Hiilimonoksidi.....	41
9.5 Typpioksidit.....	41
10 Kattilan likaantuminen	44

10.1	Likaantumismekanismit	44
10.2	Savukaasujen hiukkaset.....	44
10.3	Tulipesän alaosan toiminnan vaikutus likautumiseen	46
10.4	Lämpöpintojen likaantuminen.....	47
10.4.1	Tulistimen likaantuminen	47
10.4.2	Keittoputkiston ja ekonomaiserien likaantuminen.....	51
10.5	Likaantumisen havainnointi	52
10.6	Likaantumisen estäminen	53
10.6.1	Soodakattilan nuohous	54
10.6.2	Carryoverin ja palamisen hallinta	55
10.6.3	Mustalipeän ominaisuudet	55
10.6.4	Vesipesu ja kylmänuohous.....	56
11	Soodakattilan optimointi	57
12	Ongelman kuvaus	58
12.1	Soodakattila 5 (SK5)	59
13	Soodakattilan säädettävyyden haasteet	60
13.1	Ilmajako.....	60
13.2	Palamisilmapuhaltimet ja ilmakehanavisto.....	62
13.3	Polttolipeän laatu	63
13.4	Sulfiditeetti	64
13.5	Polttolipeäjärjestelmä	65
13.6	Savukaasu analysointori ja savukaasujen happianturit.....	67
14	Kokeellinen osa	69
14.1	Data-analyysit ennen koeajoja.....	69
14.2	Lähtötilanne.....	71
14.3	Koeajot	73
14.3.1	Ensimmäinen koeajosarja	74
14.3.2	Koeajojen toinen osa	78
14.4	Uudet reseptit	80
14.4.1	Happitavoite	80
14.4.2	Ilmareseptit.....	81
14.4.3	Pisarakoon hallinta	82
14.4.4	Muut säätömuutokset	84
14.5	Reseptien vaikutukset soodakattilan käytettävyyteen	84
14.6	Lipeä- ja tuhka-analyysit	88
15	Suosituks	90
15.1	Sulfiditeetin hallinta	90
15.2	Palamisilmajärjestelmän uusinta	90
15.3	Mittauslaitteiden toimintavarmuus.....	92
15.4	Sekoitus säiliön uusinta	93
16	Yhteenveto	94
	Lähdeluettelo	96

LIITE 1. Monimuuttuja-analyysi ensimmäisistä koeajosarjoista

LIITE 2. Koeajojen sähkösuodintuhkanäytteet

LIITE 3. koeajojen polttoliipeänäytteet

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

T lämpötila [°C]

Alaindeksit

BL mustalipeä

ESP sähkösuodin

Lyhenteet

Adt kuivattu sellutonni

BL mustalipeä

CTMP kemikuumahierresellu

EMU laiha mustalipeä

EPE pesulipeä

HO haihduttamo

IPS intermediate size particles

ka kuiva-aine

prim primääri

sek sekundääri

SNCR selective non-catalytic reduction

tert tertiääri

1 JOHDANTO

Soodakattilalla on tärkeä rooli sulfaattiselutehtaan keittokemikaalien talteenotto-prosessissa ja energiantuotannossa. Pitkät ja keskeytymättömät ajojaksot huoltoseisokkien välissä luovat haastavat olosuhteet soodakattilan käytettävyydelle. Yleisin soodakattilan käytettävyyttä rajoittava tekijä on lämpöpintojen likaantuminen. Pitkälle edennyt likaantuminen aiheuttaa kattilan savukaasukanavan tukkeutumista, joka voi rajoittaa kattilan kapasiteettia tai pahimmassa tapauksessa johtaa jopa ennen aikaiseen pesuseisokkiin. Alentunut tai keskeytetty tuotanto soodakattilalla rajoittaa kokoselutehtaan tuotantoa, mikä aiheuttaa suuria rahallisia menetyksiä. Myös kiristyvät päästöluvut luovat tiukemmat raamit soodakattilan käytölle, mikä pakottaa kehittämään prosessia ja investoimaan uusiin järjestelmiin.

Soodakattilan tulipesän toiminta ja mustalipeän koostumus vaikuttavat suuresti lämpöpintojen likaantumiseen sekä liiallisten päästöjen syntymiseen. Työn tarkoituksena on löytää parhain mahdollinen ajotapa eri kuormilla Imatran tehtaiden vanhalle 1987 vuonna käyntiin lähteneelle soodakattilalle. Tutkittavan soodakattilan suurimpina ongelmina ovat tulistimien tukkeutuminen ajojakson loppupuolella sekä korkeat rikkipäästöt tulipesästä. Myös kiristyneet lupaehdot NO_x-päästöjen osalta luovat paineita prosessin kehittämiseen. Soodakattilan poltettavan mustalipeän matala kuiva-ainepitoisuus sekä vanhanaikainen ilmajärjestelmä itsessään aiheuttavat haasteita likaantumisen ehkäisemisessä ja päästöjen hallinnassa.

Työssä perehdytään aluksi soodakattilan keittokemikaalien talteenotto ja energiantuotanto prosessiin. Pohjatietona kokeellista osaa varten työssä esitellään tulipesän toimintaan vaikuttavia tärkeimpiä tekijöitä sekä tulipesän toiminnan vaikutuksia likaantumiseen ja savukaasupäästöihin. Uutta ajotapaa lähdettiin selvittämään analysoimalla soodakattilalta kerättyjä vanhoja mittaustietoja sekä suoritettiin systemaattiset koeajot. Saatujen havaintojen pohjalta poltonohjaukseen rakennettiin uusi happitavoite, ilmaresepti ja pisarakoon hallinta.

2 IMATRAN TEHTAAT

Stora Enson Imatran tehtaot ovat Suomen suurin kartongin tuottaja. Imatran tehtaot kuuluvat Consumer Board -divisioonaan. Tehtailla on kaksi tuotantoyksikköä, Kaukopää ja Tainionkoski. Vuosituotanto on noin miljoona tonnia vuodessa erilaisia nestepakkaus, elintarvike- ja graafisia kartonkeja sekä joustopakkauspapereita. Kartongin ja paperin raaka-aineet saadaan tehtaalle itse valmistetusta sellusta sekä kemikumahierteestä (CTMP). Imatran tehtaon kartongin ja paperin tuotannosta vastaavat neljä kartonkikonetta, yksi paperikone sekä neljä kalvopäälylystyskonetta. (Stora Enso 2018)

Kartonki- ja paperikoneiden raaka-aineena käyttämä sellu tehdään Tainionkosken sekä Kaukopään sulfaattisellutehtaissa. Tainionkosken sellutehdas tuottaa valkaisuamatonta mäntysellua 200 000 t/a eräkeitossa. Kaukopäässä toimivalla sellutehtaalla tuotetaan kahdella jatkuvatoimisella vuokeittimellä valkaistua mänty- ja koivusellua. Sellutehtaan tuotannot ovat männyllä 250 000 t/a ja koivulla 650 000 t/a. Molempien sellutehtaiden kemikaalien talteenottaminen huolehditaan keskitetysti Kaukopäässä. (Stora Enso 2018)

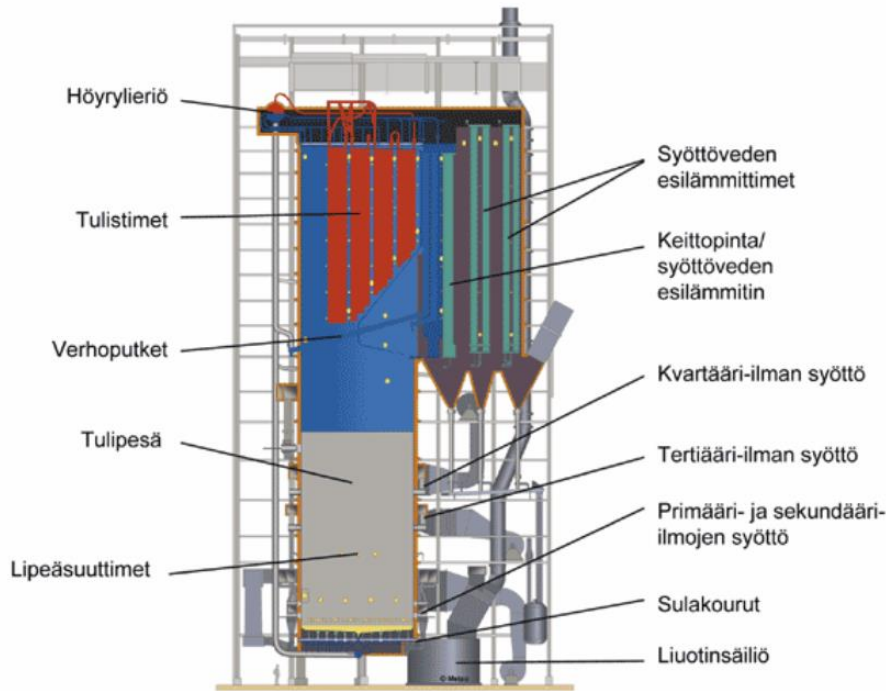
3 SOODAKATTILA YLEISESTI

Soodakattilan rooli on polttaa sulfaattisellu keiton sivutuotteen syntyvä mustalipeä. Sulfaattiselluliproessi on yleisin kemiallisen sellun valmistustapa. Sulfaattikeitossa puuhaketta keitetään valkolipeässä, jonka vaikuttavina pääaalkaaleina ovat natriumhydroksidi NaOH ja natriumsulfidi Na₂S. Keitossa valkolipeä liuottaa ligniiniä, joka sitoo puun kuituja toisiinsa. Keiton jälkeen syntyneestä massasta pestään keittokemikaalit pois. Jäljelle jäänyttä pesuliuosta kutsutaan laihamustalipeäksi. (Tran & Vakkilainen 2008)

Keittämöltä saadun mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on noin 15 %, joka ei lämpöarvoltaan ole polttoon kelpavaa. Kuiva-ainetta nostetaan ennen polttoa haihduttamalla, jossa siitä poistetaan ylimääräinen vesi. Haihduttamon jälkeen tehtaan mukaan kuiva-aine nousee 60 – 85 %:iin, jota kutsutaan vahvamustalipeäksi. Sulfaattiselluliproessin etuina on arvokkaiden keittokemikaalien jatkuva talteenotto, mitä kutsutaan kemikaalikierroksi. Soodakattilalla on kaksi varsinaista pääroolia: keittokemikaalien muuttaminen uudelleen käytettävään muotoon ja orgaanisen aineksen palamisesta johtuva lämmön talteenotto. Kaksoisrooli tekee soodakattilan käytön keskimääräistä haastavammaksi sekä kattilan rakenteen mutkikkaammaksi, jos niitä verrataan normaaleita polttoaineita polttaviin voimalaitoskattiloihin. (Raiko et al. 2002, 522 – 523)

Mustalipeä polttoaineena eroaa normaaleista voimalaitoskattiloissa poltettavista polttoaineista huonon lämpöarvon sekä suuren tuhkan määrän osalta. Suurimpia eroja muihin voimalaitoskattiloihin nähden on suurempi tulipesä sekä matalammat höyryn arvot. Höyryn tuotanto on soodakattiloille toissijaista, joten tuotantoa ilmaistaan mustalipeän kuiva-aineen vuorokautisena polttokapasiteettina. Viimeisten vuosikymmenten aikana suurin muutos soodakattiloiden kehityksessä on kasvanut tuotanto ja tämän kautta kasvanut kattilan koko. Esimerkiksi 1980 -luvun alussa 1700 tka/d kuormaa pidettiin maksimina soodakattiloilla. Nykyään kuitenkin uusimpien soodakattiloiden tuotanto voi olla yli 6000 tka/d. Tuotannon kasvuun on vaikuttanut moni tekijä, kuten mustalipeän kuiva-aineen nousu, ilmajärjestelmien kehitys, parantunut palamisen hallinta tietokone- ja automaatiojärjestelmien kehityksen mukana sekä parantunut stabiilisuus tulipesässä. Myös kasvaneet sellutehtaiden tuotannot ovat ajaneet

kattiloiden kokoa suuremmaksi. (Knowpulp 2019) Kuvassa 1 on esitelty tyypillinen moderni yksilieriörakenteinen soodakattila.



Kuva 1. Tyypillinen moderni yksilieriöinen soodakattila (Knowpulp 2019)

3.1 Kemikaalien talteenotto

Soodakattila on osana sulfaattisellutehtaan jatkuvaa kemikaalikiertoa. Mustalipeän sisältämien natrium- ja rikkiyhdisteiden talteenottaminen alkaa soodakattilan tulipesässä. Tulipesässä tapahtuva rikin pelkistymistä kutsutaan reduktioksi, missä natriumsulfaatti reagoi mustalipeän orgaanisen hiilen kanssa muodostaen natriumsulfidia. Soodakattilan toiminnan ja koko lipeän talteenoton yksi tärkeimmistä mittareista on reduktioaste, jolla kuvataan natriumsulfaatin pelkistymistä natriumsulfidiksi. Ideaalitalanteessa natriumsulfaatti pelkistyisi täydellisesti natriumsulfidiksi, mutta todellisuudessa hyvä reduktioaste vaihtelee 95 – 98 % välillä. Reduktioaste lasketaan viherlipeästä seuraavalla kaavalla 3.1, jossa natriumsulfaatin ja natriumsulfidin määrä ilmaistaan mooleina. (Vakkilainen 2005, 5-8 & Knowpulp 2019)

$$\text{Reduktioaste} = \frac{Na_2S}{Na_2S + Na_2SO_4} \quad (3.1)$$

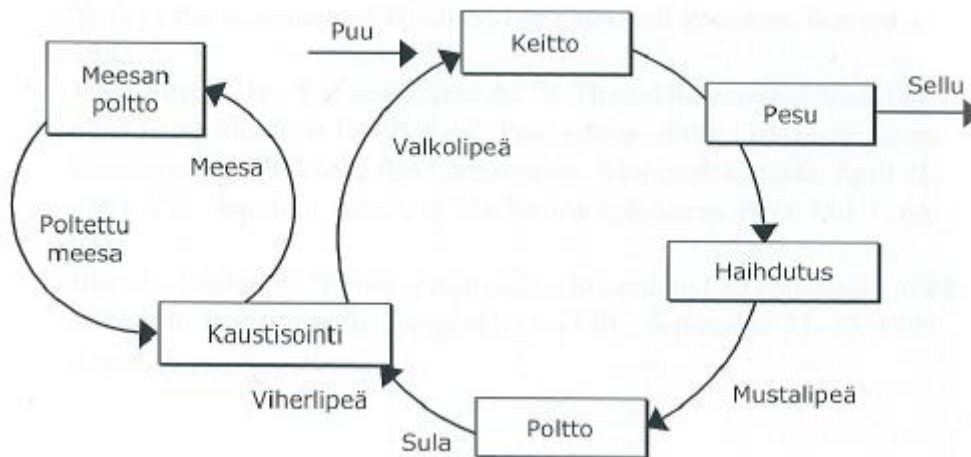
Soodakattilalta saatava sula sisältää pääasiassa natriumkarbonaattia Na_2CO_3 ja natriumsulfidia. Natriumkarbonaatin muuntamista keittoon sopivaksi natriumhydroksidiksi NaOH kutsutaan kaustisoinniksi. Kaustisointiin kuuluu kaksi erilaista reaktiota. Meesauuneilta saatava poltettu kalkki eli kalsiumoksidi CaO reagoi aluksi viherlipeän veden kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mitä kutsutaan sammutusreaktioksi. Tämän jälkeen tapahtuu kaustisointireaktio, jossa kalsiumhydroksidi reagoi natriumkarbonaatin kanssa muodostaen natriumhydroksidia ja meesaa eli kalsiumkarbonaattia CaCO_3 . Kaustisoinnin jälkeen kalkkimaidosta erotetaan meesa ja valkolipeä toisistaan, jonka jälkeen valkolipeä palautetaan sellunkeittoon keittokemikaaliksi. Kaustisointireaktiossa natriumkarbonaattia ei saada täydellisesti muutettua natriumhydroksidiksi. Kaustisoinnin onnistumista mitataan kaustisointiasteella, mikä on tyypillisesti 80 – 83 % välillä (Tran et al. 2008). Kaustisointiaste lasketaan kalkkimaidosta seuraavalla kaavalla 3.2, jossa natriumkarbonaatin ja natriumhydroksidin määrä ilmaistaan mooleina. (Knowpulp 2019)

$$\textit{Kaustisointiaste} = \frac{\textit{NaOH}}{\textit{Na}_2\textit{CO}_3 + \textit{NaOH}} \quad (3.2)$$

Valkolipeän keitossa vaikuttavien natriumhydroksidin ja natriumsulfidin määrän suhdetta kuvataan sulfiditeetillä. Yleisesti sulfiditeetillä mitataan kemikaalikierron rikin ja natriumin suhdetta. Rikin ja natriumin määrän lisäksi sulfiditeettiin vaikuttaa talteenoton kaustisointi- sekä reduktioaste. Sulfaattiselutehtaan sulfiditeetti on yleensä 35 – 45 %. Sulfiditeetti lasketaan viherlipeästä seuraavalla kaavalla 3.3, jossa natriumhydroksidin ja natriumsulfidin määrä ilmaistaan mooleina.

$$\text{Sulfiditeetti} = \frac{Na_2S}{Na_2S+NaOH} \quad (3.3)$$

Sulfiditeetti kasvu parantaa havusellutehtailla saantoa aina 40 %:iin asti, mutta koivusellutehtaalla saanto ei enää parane 15 % jälkeen (Knowpulp 2019). Sulfiditeetti vaikuttaa oleellisesti soodakattilan käytettävyyteen, mikä aiheuttaa korkealla sulfiditeetillä rikkipäästöjen syntymisen tulipesässä. (Vakkilainen 2005, 5-9) Kuvassa 2 on esitetty sulfaattiselutehtaan kemikaalikierto.



Kuva 2. Sulfaattiselutehtaan kemikaalikierto (Raiko et al. 2002, 522)

4 SOODAKATTILAN VESI-HÖYRYKIERTO

Soodakattilat ovat aina luonnonkiertokattiloita, joiden tyypilliset tuorehöyryn arvot ovat 480 °C ja 85 bar. Korkeampia tuorehöyryn lämpötilan arvoja ei yleensä käytetä, koska korkeampi lämpötila nostaa myös korroosiovaaraa kattilan seinäputkissa sekä tulistimissa. Korkeammat lämpötilat ja paine vaativat kalliimpia materiaaleja lämmönsiirtopinnoilla sekä matalampia kalium- ja klooripitoisuuksia mustalipeässä. Tuorehöyryn lämpötilan ja paineen nostaminen vaatii myös tulistinkapasiteetin nostoa. Korkeammat paineet nostavat myös kattilan paineenkestovaatimuksia. Uusissa kattiloissa tuorehöyryn lämpötila on 520 °C ja paine 104 bar. Soodakattilan vesi-höyry kierto alkaa syöttövesisäiliöstä, josta syöttövesi pumpataan aluksi ekonomaiserille. Syöttöveden lämpötila nousee ekonomaiserissa lähelle kiehumapistettä. Ekonomaiserista syöttövesi ohjataan lieriöön, josta kylläinen vesi laskeutuu kattilan laskuputkia pitkin kattilan pohjalla olevaan jakokammioon. Jakokammioista kylläinen vesi jakautuu pohjaputkille ja seinäputkille, joissa kylläinen vesi alkaa höyrystymään ja tiheyserojen ansiosta vesi-höyryseos nousee keittoputkiston kautta takaisin lieriöön. Lieriöstä höyry ohjataan kattilan tulistimille, jonka jälkeen tulistettu höyry johdetaan turbiinin läpi prosessihöyryn- ja energiantuotantoon. (Knowpulp 2019 & Vakkilainen 2005, 2-7)

4.1.1 Syöttövesisäiliö

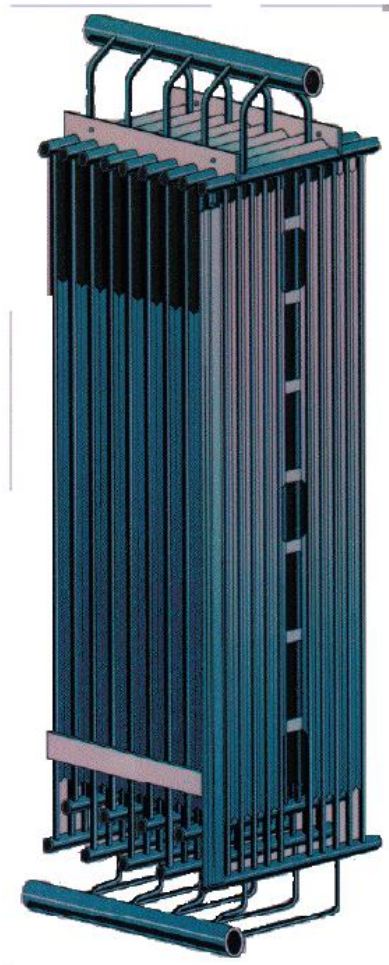
Syöttövesisäiliö toimii kattilaveden varastointisäiliönä, josta syöttövesi pumpataan syöttövesipumpulla ekonomaiserin läpi lieriöön. Soodakattilat ovat yleensä varusteltu kahdella sähköllä toimivalla syöttövesipumpulla sekä häiriötilanteita varten höyryllä toimivalla turbiinipumpulla. Syöttövesipumpuilla nostetaan veden paine höyryn painetta suuremmaksi putkistossa tapahtuvien painehäviöiden takia. Syöttövesisäiliössä veden lämpötila pidetään kiehumapisteessä, joka on paineen mukaan 110 – 140 °C. Kattilan syöttövetenä käytetään puhdistettua lisävetä ja lauhdetta, jotka ohjataan syöttövesisäiliön päällä olevaan kaasunpoistimeen. Yleisin kaasunpoistin on levykaasunpoistin, jossa vesi valuu ryöppylevyjen läpi. Kaasunpoistimen alaosaan syötettävä matalapainehöyry nostaa valuvan veden kiehumapisteeseen, jolloin kaasut alkavat poistua vedestä. (Knowpulp 2019)

4.1.2 Verholämmönsiirrin

Moni soodakattila on varusteltu verholämmönsiirtimellä, varsinkin vanhemmat kattilat. Verholämmönsiirrin on osana höyrystintä ja sijaitsee yleensä nokan kohdalla halkoen koko tulipesän. Verhon tarkoituksena on suojella ensimmäistä tulistinta liian kuumilta savukaasuilta ja estää palamattomien hiukkasten nousun tulistimille. Verho vähentää myös tulipesän lämpösäteilyä ensimmäisille tulistimille, sekä matalammat lämpötilat tulistimilla vähentävät korroosioriskiä. Verho aiheuttaa myös turvallisuusriskin, koska tulistimilta tippuvat tuhkerrostumat voivat aiheuttaa verhon repeämisen. Repeäminen aiheuttaa veden putoamisen suoraan kekkoon, jolloin voi tapahtua sularäjähdyks. Verho on yleinen pohjoismaalaisissa soodakattiloissa. Verhottomissa kattiloissa ensimmäinen tulistin on nokan takana suojassa tulipesän lämpösäteilyltä. (Vakkilainen 2005, 2-3)

4.1.3 Ekonomaiserit

Ekonomaiserin tehtävänä on nostaa syöttöveden lämpötila lähelle kylläisen tilan lämpötilaa. Savukaasujen lämpötila keittoputkiston jälkeen on matalampi, mikä heikentää lämmönsiirtoa savukaasuista syöttöveeseen. Heikomman lämmönsiirron takia ekonomaiserin koko on suurempi muihin soodakattilan lämmönsiirtopintoihin verrattuna. Ekonomaiserit suunnitellaan pitämään savukaasujen jatkuva lämpötila yli 150 °C, millä varmistetaan happokastepisteen yläpuolella pysyminen. Matalammat lämpötilat aiheuttavat korroosiota sähkösuotimessa. Ekonomaiserit ovat joko vaaka- tai pystysuuntaisia lämmönsiirtimiä. Nykyaikaiset ekonomaiserit suunnitellaan yleensä pystysuuntaisiksi lämmönsiirtimiksi, joissa savukaasut kulkevat putkien suuntaisesti ja putkissa virtaava vesi kulkee savukaasuihin nähden vastaiseen suuntaan. Ekonomaiserilta tuleva syöttövesi ohjataan höyrylieriöön. (Adams et al. 1997, 355) Kuvassa 3 esitetään tyypillinen pystysuuntainen ekonomaiserit.

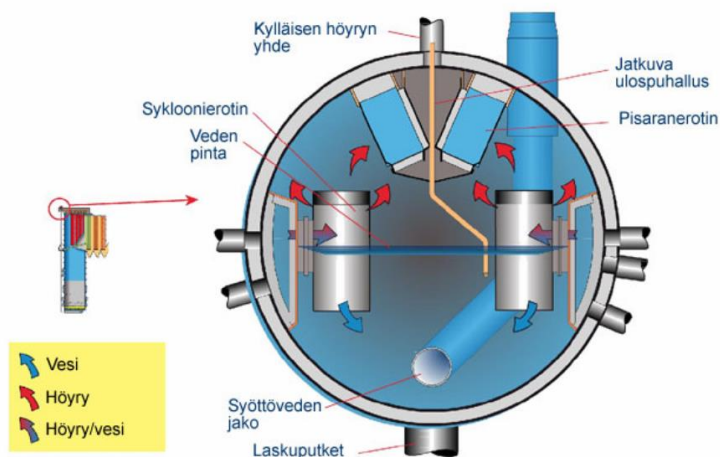


Kuva 3. Pystysuuntainen rinnakkaisvirta ekonomaiseri (Vakkilainen 2005, 6-15)

4.1.4 Hörylieriö ja dolezal

Nykyaikaiset soodakattilat rakennetaan yksilieriöisenä, mutta vielä 1990-luvun alkuun asti oli tapana rakentaa kaksilieriökattiloita. Kaksilieriökattiloissa lieriöitä yhdistävät putket muodostavat keittopinnan ja savukaasut virtaavat kohti suorasti putkiin nähden. Yksilieriörakenteisissa kattiloissa on monia etuja verrattuna vanhaan kaksilieriörakenteiseen kattilaan, jonka seurauksena vanhoja kaksilieriörakenteisia kattiloita on alettu modernisoimaan yksilieriörakenteisiksi (Vakkilainen 2005, 2-5). Nykyaikaisen yksilieriökattilan etuja ovat luotettavampi vesikierron hallinta, parantunut turvallisuus ja korkeampi käytettävyys. Yksilieriöinen kattila mahdollistaa korkeamman kapasiteetin sekä paineen. Myös yksilieriökattilan rakentaminen on halvempaa ja nopeampaa, koska putkiliitoksia on vähemmän kuin kaksilieriörakenteissa. (Knowpulp 2019)

Höyrylieriön tehtävänä on erotella höyrystimeltä tuleva kylläisen veden ja höyryn seos toisistaan. Höyrylieriöön tulee myös ekonomaiserilta tuleva kylläinen syöttövesi. Soodakattilat ovat luonnonkiertokattiloita, joissa höyryn erotus kylläisestä vedestä tapahtuu painovoimaisesti tiheuserojen avulla. Nousuputkia pitkin tuleva kylläisen veden ja höyryn seos erotellaan sykloonierottimessa, jossa kylläinen vesi jää lieriön pohjalle ja höyry nousee lieriöstä pisaranerotimen läpi tulistimille. Kylläinen vesi jatkaa alaosasta takaisin höyrystimelle. (Huhtinen, 2000, 117) Höyrylieriö on esitetty kuvassa 4.



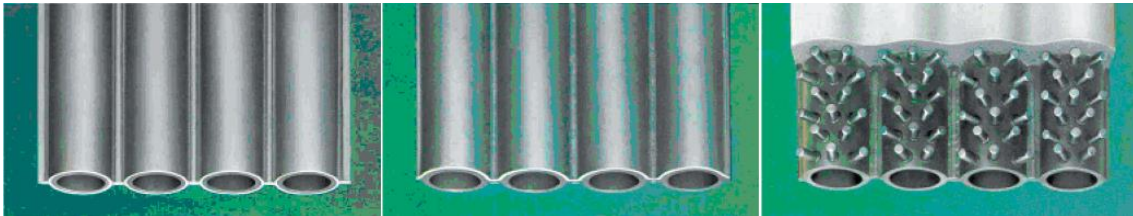
Kuva 4. Höyrylieriön rakenne (Knowpulp 2019)

Osa soodakattiloista on varusteltu pintalauhduttimella eli ns. dolejalilla. Pintalauhduttimessa ekonomaiserilta tulevalla syöttövedellä lauhdutetaan lieriöltä tulevaa kylläistä höyryä ja syntyvää lauhdetta käytetään tulistuksessa ruiskutusjäähdytykseen. Pintalauhduttimella pystytään takaamaan mahdollisimman puhdas ruiskutusvesi. Kattilan vesikemian ollessa hyvällä tasolla pintalauhdutin ei ole tarpeellinen. (Vakkilainen 2005, 7-11)

4.1.5 Kattilaputket ja tulipesä

Lieriöstä kylläinen vesi laskeutuu päälaskuputkia pitkin kattilan pohjalla, joista se jakautuu kattilan pohja- ja seinäputkille. Yleensä soodakattiloissa etu- ja takaseinäputkisto muodostaa myös pohjaputkiston. Kattilan seinäputkissa tapahtuu suurin osa kylläisen veden höyrystymisestä. Höyrystymätön osa kylläisestä vedestä jatkaa höyrystymistä kattilan keittoputkistossa. (Vakkilainen 2005, 7-9)

Suurin osa tulipesän alaosissa tapahtuvissa kattilavuodoissa sijaitsee pohjasta alle kolme metrin korkeudessa pohjasta. Nykyajan kaikissa kattiloissa käytetään pohja- ja seinäputkina membraanirakennetta. Kuvassa 5 esitetty kattilassa käytettäviä membraanirakenteita. Oikeanpuolimmaisessa kuvassa membraanirakenteinen putkisto on varusteltu tapeilla, jotka parantavat korroosiokestävyyttä. Tällainen rakenne vaatii suurempia huolto- ja kunnossapitotöitä. Keskimmäisessä kuvassa membraani putkisto on päällystetty korroosion kestävällä materiaalilla tulipesän puolelta. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty soodakattiloissa eniten käytetty vaihtoehto, jossa kaikki putken ulkopinnat ovat combound -suojattua. Combound -suojattu putkisto on myös kaikista kallein vaihtoehto. (Vakkilainen 2005, 11-13)



Kuva 5. Soodakattilan pohja- ja seinäputkien vaihtoehtoisia rakenteita. (Vakkilainen 2005, 11-13)

Soodakattilan pohjan suojaus tulipesän kuumilta lämpötiloilta on tärkeää, minkä takia veden nopeus putkistossa tulee olla yli 0.5 m/s ja pohjan tulee olla 2.5 - 4.0° kalteva. Näillä vältytään putkistoon jääviä höyrykuplia, jotka muuten aiheuttaisivat heikompaan lämmönsiirtoa ja nostaisivat putkien lämpötilaa aiheuttaen korroosiota. Sula-aukkojen korko pidetään yleensä 200 – 300 mm päästä pohjasta, jotta jähmettynyt sula suojaa pohjaa liian kuumilta lämpötiloilta. Tulipesän yläosan ylimmästä ilmatasosta ylöspäin putkimateriaalina käytetään hiiliterästä, joka on kustannustehokasta eikä ole enää altis

hapen aiheuttamalle korroosiolle. Tästä tasosta alempana käytetään nykypäivänä compound -pinnoitettua putkea, mikä kestää paremmin korroosiota ja tulipesän olosuhteita. Tällä hetkellä kestävimältä compound -materiaalilta vaikuttaa Sanicro 38, jossa on hyvä korroosio- ja lämpöstressikestävyys. (Vakkilainen 2005, 11-4 – 11-5)

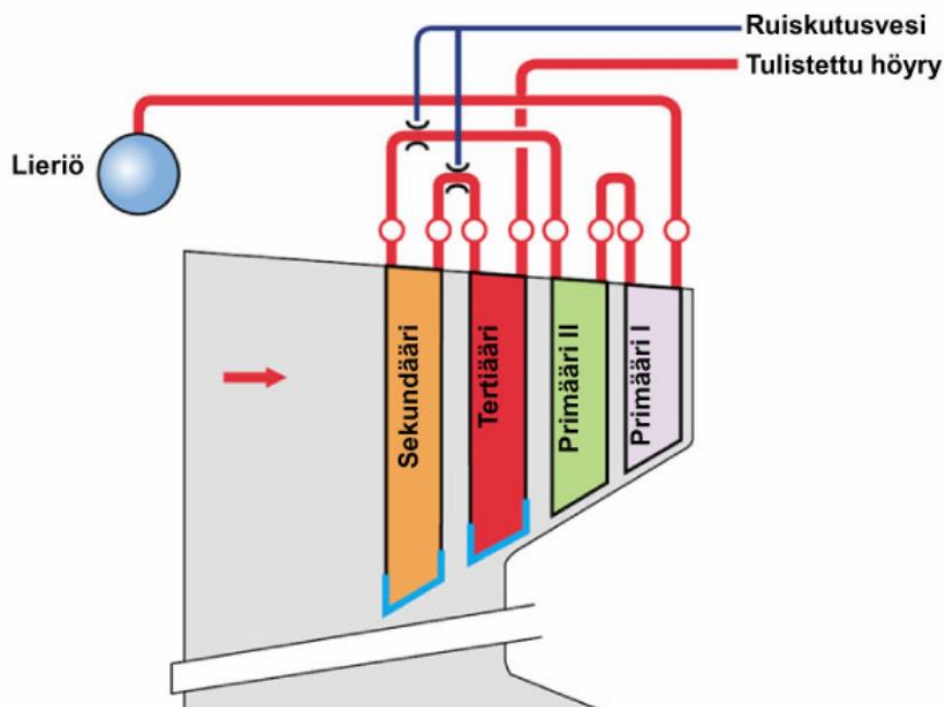
4.1.6 Keittoputkisto

Keittoputkisto on osa soodakattilan höyristintä, joka sijaitsee tulistimien ja ekonomaiserin välissä. Suurin osa veden höyrystyksestä tapahtuu kattilan seinäputkissa tulipesässä ja vain noin 10 – 25 % höyrystyksestä tapahtuu keittoputkistossa. Keittoputkiston rakenne sekä savukaasujen virtaus keittoputkistossa riippuu kattilan suunnitelluista lieriöiden määrästä. Vanhoissa kaksilieriö-kattiloissa savukaasut kulkevat kohtisuorasti keittoputkistoa nähden ja putket kulkevat lieriöiden välissä. Modernit keittoputkistot ovat pystysuuntaisia toisiinsa evitettyjä putkia, joissa savukaasut kulkevat putkien kanssa samansuuntaisesti. Savukaasujen sisääntulolämpötila on tavallisesti 540 – 600 °C. Tulistimien jälkeisen matalamman lämpötilan vuoksi tarvitaan suurempi lämmönsiirtopinta, minkä seurauksena putket sijaitsevat lähellä toisiaan sekä putket ovat evitetty toisiinsa. Putkien evityksillä saadaan myös vähennettyä putkistoon kohdistuvaa lämpörasitetta. Tiheämpi rakenne vaikeuttaa putkiston aukipysyvyyttä, koska virtausnopeudet savukaasuissa kasvavat ja nuohouksen tehokkuus huononee. (Adams et al. 1997, 352 - 353 & Vakkilainen 2005, 6-2, 6-14 – 6-15)

4.1.7 Tulistimet

Tulistimien tehtävänä on nostaa kylmän höyryn lämpötilaa haluttuun pisteeseen. Tulistus on yleensä jaettu moneen vaiheeseen ja isoissa soodakattiloissa tulistimia on neljästä kuuteen kappaletta. Tulistusvaiheita soodakattilan mukaan on kahdesta neljään. Esimerkiksi kolmivaiheinen neljällä tulistimella varustetun soodakattilan höyryn tulistus on esitelty seuraavana. Ensimmäisenä kylmä höyry menee tulistettavaksi primääritulistimille, jotka ovat lähimpänä keittoputkistoa. Tämän jälkeen höyry ohjataan sekundääritulistimille, joka sijaitsee lähimpänä tulipesää. Sekundääritulistimelta höyry menee tertiääritulistimille, josta tuorehöyry on valmis turbiinille. Jokaisen tulistusvaiheen välissä on ruiskutusjäähdytys, jossa höyryn lämpötilaa säädellään syöttövesisäiliöstä

tulevalla syöttövedellä ja/tai pintalauhduttimelta tulevalla lauhdutetulla höyryllä. Ruiskutusvedellä säädellään höyryn lämpötilaa jokaisen tulistusvaiheen välissä, jotta tuorehöyryn lämpötila pysyy mahdollisimman vakiona. (Knowpulp 2019 & Vakkilainen 2005, 6-2, 7-9) Kuvassa 6 on esitetty tyypillinen tulistimien rakenne soodakattilassa.



Kuva 6. Tyypillisen soodakattilan tulistimet ja tulistusvaiheet. (Knowpulp 2019)

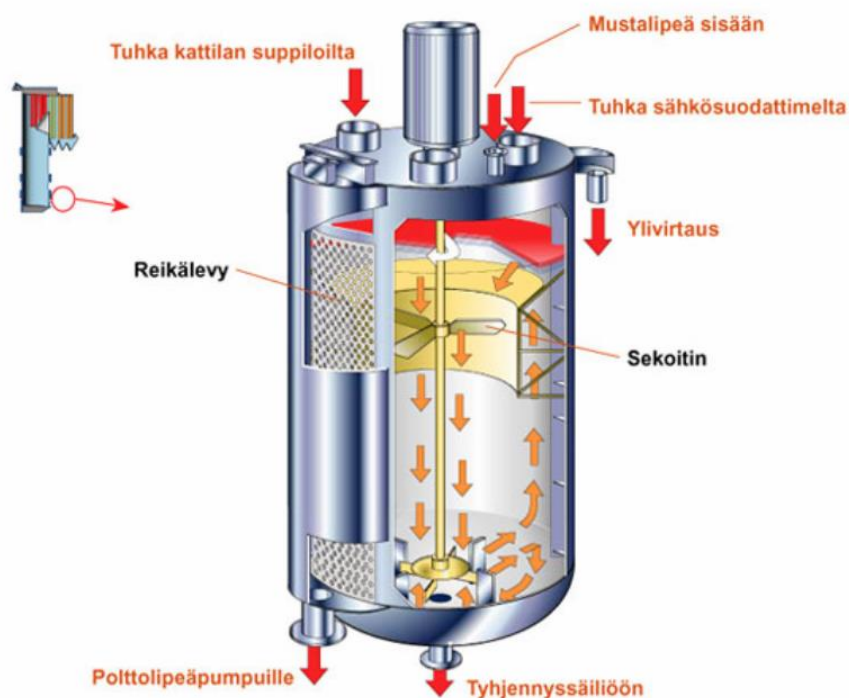
Tulistimet voidaan jakaa konvektio- tai säteilylämmönsiirtopintoihin riippuen sijainnista soodakattilassa. Tulipesän säteilylämmönsiirrolle alttiita tulistimia kutsutaan säteilytulistikiksi. Nämä kyseiset säteilytulistikit sijaitsevat lähimpänä tulipesää. Pääasiassa lämmönsiirto tapahtuu myöhemmillä tulistikilla konvektion avulla, jolloin niitä kutsutaan konvektiotulistikiksi. Soodakattilan tulistikien putkien sijoittelut ovat muihin lämmönsiirtopintoihin verrattuna väljemmät, koska savukaasujen lämpötilat ovat korkeampia ja tuhka on tahmeampaa. Tulistikien putkipaneelien väli on tavallisesti 300 – 400 mm. Osassa soodakattiloissa tahma-alueen ulkopuolella olevat tulistikit ovat tiheämmin sijoitettuna kattilaan. Paneelien etäisyyden kasvattaminen pienentää tukkeutumisriskiä, mutta nostaa samalla soodakattilan investointikustannuksia. (Vakkilainen 2005, 6-12 – 6-13)

5 POLTTOLIFEÄJÄRJESTELMÄ

Soodakattilan polttolifeäjärjestelmään kuuluvat tavallisesti sekoitussäiliö, polttolifeäpumput, polttolifeän esilämmittimet sekä polttolifeäruiskut. Soodakattilan polttolifeäjärjestelmä voidaan jakaa ilmanpaineiseen tai paineelliseen järjestelmään. Moderneissa ja korkeata kuiva-ainetta polttavissa soodakattiloissa käytetään paineistettua polttolifeäjärjestelmää. Paineistetussa järjestelmässä haihduttamolta ohjataan noin 50% kuiva-aineesta oleva vahvalifeä tuhkan sekoitussäiliöön, josta polttolifeä palautetaan väkevöitäväksi haihduttamolle. Viimeisessä haihdutusvaiheessa mustalifeän kuiva-aine nostetaan jopa yli 80 % kuiva-aineeseen, jolloin polttolifeän säilöntä vaatii höyryllä paineistetun säiliön. Paineistetusta polttolifeäsäiliöstä polttolifeä pumpataan lipeän esilämmittimen kautta lipeäruiskuille polttoon. Ilmanpaineissa polttolifeäjärjestelmässä vahvalifeä syötetään tuhkan sekoitussäiliöön, josta saatava polttolifeä pumpataan lipeän esilämmittimen kautta suoraan ruiskujen kautta polttoon. (Knowpulp 2019)

5.1 Sekoitussäiliö

Haihduttamolta vahvalifeä ohjataan sekoitussäiliöön, jossa vahvalifeän sekaan syötetään soodakattilan suppiloilta sekä sähkösuotimilta tuleva lentotuhka. Kuuma tuhka tulee sulkusyöttimien läpi kuljettimia pitkin sekoitussäiliöön, jossa pyörivän sekoittajan avulla tuhka saadaan sekoittumaan vahvalifeän sekaan. Vahvalifeän ja tuhkan seosta kutsutaan yleisesti polttolifeäksi. Polttolifeä pumpataan sekoitussäiliön imuosasta, joka on erotettu sekoitusosasta sihtilevyllä. Sekoituksesta syntyy hönkiä, jotka nykypäivänä kiristyneiden ympäristölupien takia syötetään soodakattilalle polttoon palamisilman mukana. Hönkien poiston tarkoituksena on pitää sekoitussäiliö tarpeeksi suuressa alipaineessa, jotta höngät eivät kulkeudu tuhkan pudotusputkille. Sekoitussäiliötä voi olla soodakattilan mukaan kaksi, jolloin säiliöt voivat olla rinnan tai sarjaan kytkettyinä. Sekoitussäiliöt ovat varusteltu ylikaato- ja tyhjennysputkilla, joista lipeä tavallisesti menee tyhjennyssäiliöön. (Knowpulp 2019) Kuvassa 7 on havainnollistettu sekoitussäiliötä.



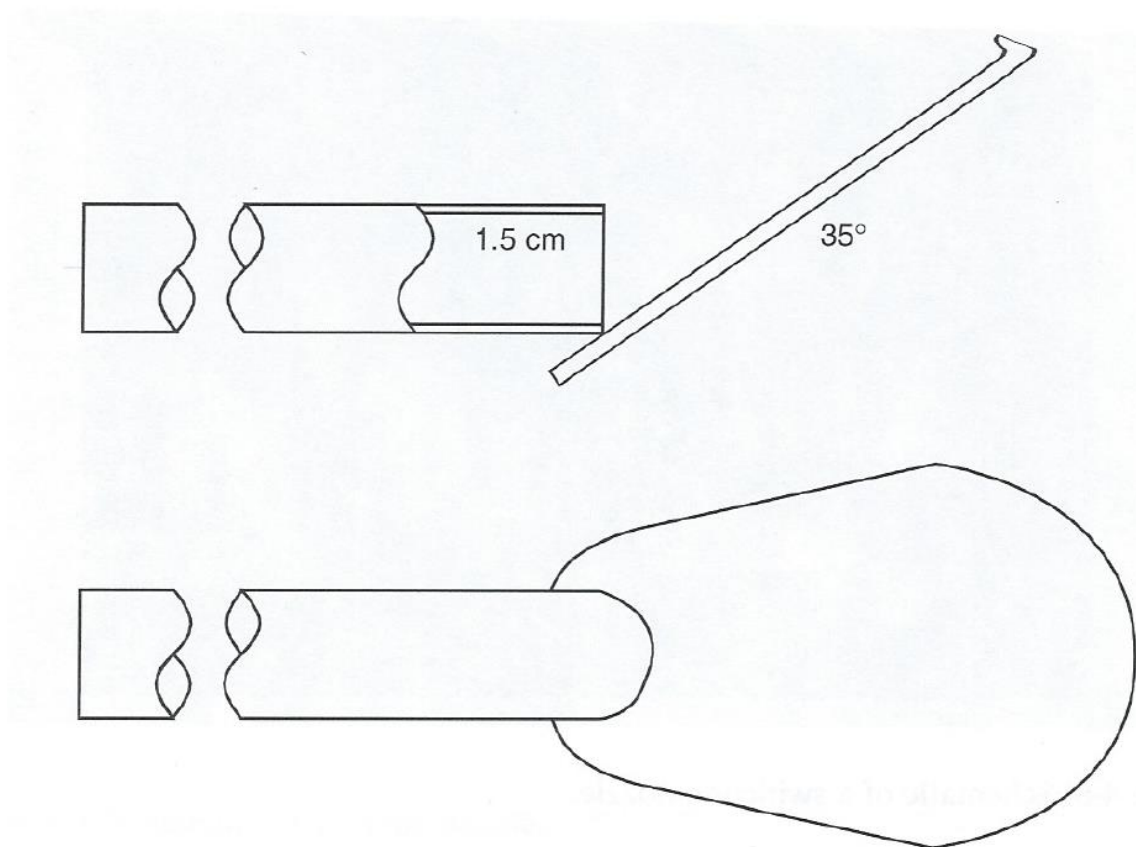
Kuva 7. Sekoitussäiliön rakenne (Knowpulp 2019)

5.2 Polttoliipeäpumput ja lipeän esilämmittimet

Soodakattilan polttoliipeäpumput ovat erikoisvalmisteisia keskipakopumppuja, jotka ovat tehty haponkestävästä materiaalista. Häiriötilanteiden takia pumppuja on kaksi rinnakkain, joista toinen pumppu on varalla. Polttoliipeäpumppujen jälkeen ovat lipeän esilämmittimet. Energiataloudellisista syistä mustalipeä varastoidaan ruiskutuslämpötilaa matalammassa lämpötilassa. Polttoliipeän lämpötilaa voidaan nostaa suoralla tai epäsuoralla lipeän esilämmittimellä. Tavallisesti suorassa esilämmittimessä polttoliipeän sekaan ohjataan suuttimien läpi 10 – 14 bar välipainehöyryä. Epäsuorassa lämmittimessä lipeän lämpötila nostetaan putkilämmönvaihtimella, jossa höyry ja lipeä eivät sekoitu keskenään. Epäsuorassa lämmittimessä käytetään matalapainehöyryä, joka on 3 – 5 bar paineessa. Epäsuoraa lipeän esilämmitintä voidaan käyttää vain alle 75 % kuiva-aineessa (Vakkilainen 2005, 10-2). Polttoliipeän esilämmittimillä ruiskutuslämpötila nostetaan tavallisesti 115 – 130 °C:een. Ruiskutuslämpötilalla on suuri merkitys lipeän viskositeettiin, joka vaikuttaa pisaran muodostumiseen. Ruiskutuslämpötila on tärkeä säätösuure soodakattilan palamisen hallinnassa. (Knowpulp 2019)

5.3 Lipeäruiskut

Lipeäruiskut sijaitsevat yleensä kattilan jokaisella seinällä noin 6 – 8 metriä pohjan yläpuolella. Yleensä ruiskut sijoitetaan mahdollisimman symmetrisesti kattilaan, jotta keonhallinta ja palaminen ovat stabiilia (Vakkilainen 1996). Lipeäruiskuissa voidaan käyttää monentyyppisiä erilaisia suuttimia, mutta yleisin käytössä oleva suutintyyppi on lusikkasuutin. Lusikka suuttimessa lipeän virtaus osuu putkeen hitsattuun lusikkalevyyn, jossa pisaroituminen tapahtuu. Lusikkasuuttimessa muodostuu ohut viuhka, joka hajoaa suuriksi ja epäsäännöllisen kokoisiksi tippoiksi. Suuttimen mallit ja koot vaihtelevat hyvin laajalti soodakattilan mukaan. Lipeäruiskun suuttimessa pisaran muodostumiseen vaikuttavat monet tekijät, kuten lipeän viskositeetti, suuttimen koko, suuttimen malli ja ruiskutusaine. (Miikkulainen et al. 2009 & Knowpulp 2019) Kuvassa 8 on esitetty tyypillinen lusikkasuutin.



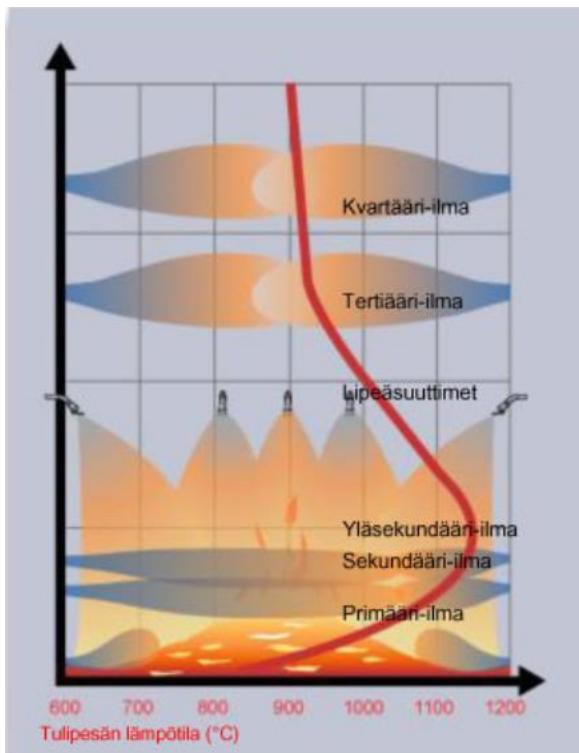
Kuva 8. Soodakattilan lusikkasuutin (Adams et al. 1997, 105)

6 PALAMISILMAJÄRJESTELMÄ

Soodakattilan palamisilmajärjestelmän tehtävänä on varmistaa mustalipeän täydellinen palaminen sekä minimoida päästöt. Tehokkaalla ja tasaisella palamisilman syötöllä varmistetaan myös kuuma tulipesä, korkea reduktio sekä minimi carryoverin määrä. Palamisilma otetaan tyypillisesti kattilarakennuksen yläosasta ja syötetään monesta eri tasosta tulipesään. Soodakattilaan palamisilma jaetaan tavallisesti kolmeen: primääri-, sekundääri- ja tertiääri-ilmaan. Normaalisti voimalaitoksista poiketen soodakattilassa ei ole palamisilman esilämmitintä eli luvoa savukaasujen korkean tuhkapitoisuuden vuoksi. Primääri- sekä sekundääri-ilmat lämmitetään epäsuorasti höyryllä lämmönvaihtimessa. Palamisilman esilämmitys nostaa kattilan tulipesän lämpötilaa sekä parantaa lämmönsiirtoa höyryntuotannossa. Tertiääri-ilmaa ei soodakattiloissa lämmitetä paremman ilman tunkeutuvuuden takaamiseksi. Yleensä jokaisella palamisilman tasolla on oma palamisilmapuhallin sekä oma kanavistonsa. Soodakattiloissa palamisilmaa tavallisesti syötetään $3.6 - 4.0 \text{ m}^3\text{n/kgka}$. (Vakkilainen 2005 7-2 – 7-5)

6.1 Ilmajako Suomalaisissa soodakattiloissa

Suomessa olevien soodakattiloiden ilmajaot ovat riippuvaisia poltettavan lipeän kuiva-aineesta sekä kattilan iästä. Primääri-ilman osuus uusissa kattiloissa vaihtelee 20 – 25 %, mutta vanhemmissa kattiloissa osuus on hieman suurempi. Korkeilla kuiva-ainepitoisuuksilla tulipesän lämpötila saadaan itsessään tarpeeksi suureksi, joten primääri-ilman tarve on luonnollisesti pienempi. Alhaisella primääri-ilman osuudella vaikuttaa myös olevan positiivinen vaikutus reduktioasteen nousuun. Niukempi primääri-ilman määrä parantaa keon alueen pelkistäviä olosuhteita. Sekundääri-ilman osuus kattiloissa vaihtelee tavallisesti 45 – 55 %. Soodakattiloiden kuiva-aineen noustessa myös tertiääri-ilman osuus kasvaa ja tertiääri-ilman osuus vaihtelee 10 – 25 % kattilan mukaan. (Juvonen 2004, 61 – 63) Kuvassa 9 on esitetty modernin soodakattilan palamisilmojen syöttö sekä lämpötilaprofiili tulipesässä.



Kuva 9. Ilmatasot ja lämpötilaprofiili tulipesässä. (Knowpulp 2019)

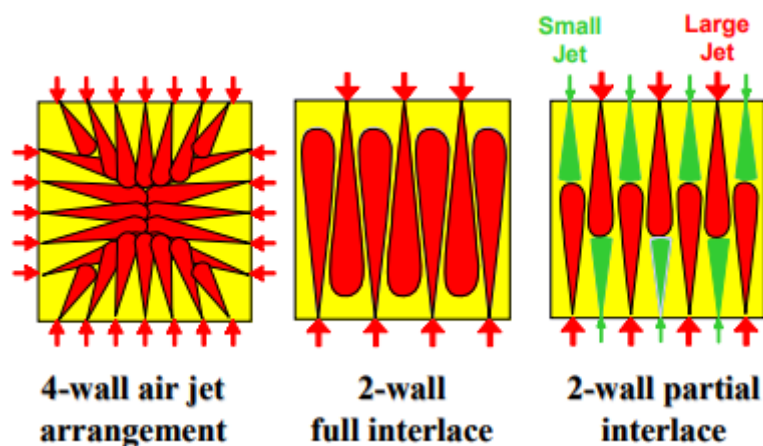
6.2 Primääri-ilma

Primääri-ilmaa syötetään tasaisesti kattilan jokaiselta seinältä, missä ilmarekisterit sijaitsevat tavallisesti noin 1 – 1.5 metrin korkeudessa pohjasta. Primääri-ilmalla varmistetaan keon reuna-alueiden riittävä hapen määrä, hallitaan keon muotoa sekä estetään keon kasaantuminen seinille. Primääri-ilman tehokas vaikutusalue on noin metrin päästä seinästä ja ilmarekisterit ovat suunnattu puhaltamaan noin 10 – 45° alaviistoon (Vakkilainen 2005, 7-5) Primääri-ilman kanaviston paine pidetään tavallisesti 0.8 – 1.5 kPa. Primääri-ilman liian suuri paine tai virtaus aiheuttaa pystysuuntaisia virtauksia, jotka vaikeuttavat pisaran päätymistä keoon. Toisaalta liian matalalla virtauksella tai paineella hapen määrä keossa romahtaa aiheuttaen keon jäähtymistä ja sula saattaa nousta ilma-aukkoihin. (Vakkilainen 1996 & Knowpulp 2019)

6.3 Sekundääri-ilma

Sekundääri-ilmalla on palamisilmoista suurin merkitys soodakattilan tulipesän hallintaan. Päätaivoitteita ovat saada palamisilman happea keon keskiosaan, polttaa keosta haihtuvia pyrolyysikaasuja ja polttaa keon koksia. Tehokkaasti palavat pyrolyysikaasut säteilevät kekoon, mikä nostaa samalla keon lämpötilaa ja tehostaa rikin pelkistymistä. Sekundääri-ilmalla pidetään myös keon koko sopivana. Sekundääri-ilm-aukot sijaitsevat 1 – 2 metriä primääri-ilm-aukkojen yläpuolella ja kanavapaine on tyypillisesti 3 – 5 kPa, mutta suuremmissa kattiloissa kanavapaineet voivat olla suuremmat. Liian suurella sekundääri-ilman virtauksella lipeäpysarat karkaavat savukaasujen mukana tulipesän yläosaan ja tulistimille. Tehoton sekundääri-ilman virtaus kasvattaa kekoa ja kylmentää keon keskiosaa. (Vakkilainen 1996 & Knowpulp 2019)

Sekundääri-ilman syöttö kattilaan voidaan toteuttaa muutamalla eri tavalla. Vanhemmissa soodakattiloissa on yleensä käytössä neljän seinän malli, missä ilmaa syötetään jokaiselta kattilan seinältä ja ilmarekisterit ovat vastakkaisilla seinillä peilikuvana. Yleensä neljän seinän mallissa tulipesän keskiosaan muodostuu ylöspäin suuntautuva kaasuvirtauksen nopeushuippu, joka vie helposti ylöspäin puoliksi palaneita lipeäpysaroita (Raiko et al. 2002, 533). Nykyaikaisessa ja moderneissa kattiloissa on käytössä kahden seinän osittaisesti tai täysin limittäinen malli (Wessel 2015). Kuvassa 20 on havainnollistettu erilaisia sekundääri-ilman malleja.



Kuva 10. Sekundääri-ilman syöttömalleja soodakattiloissa. Vasemmalla neljän seinän malli, keskellä kahden seinän täysin limittäinen malli ja oikealla kahden seinän osittaisesti limittäinen malli (Wessel 2015)

6.4 Tertiääri-ilma

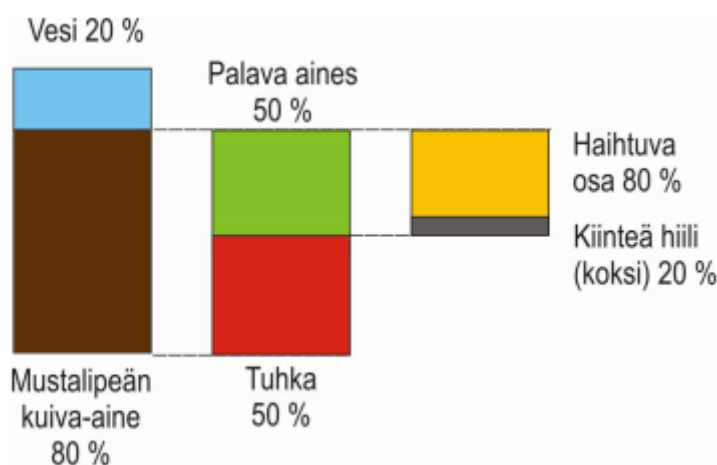
Tertiääri-ilma syötetään kattilaan noin 8 metrin korkeudesta pohjan yläpuolelta (Knowpulp 2019). Tertiääri-ilman tehtävänä on viimeistellä palamiskelpoisten kaasujen loppuun palaminen sekä tasoittaa savukaasujen virtausta ennen tulistimia. Yleensä tertiääri-ilmarekisterit sijaitsevat kattilan etu- ja takaseinällä lomittain toisiinsa nähden. Lomittainen ilmansyöttö parantaa ilmojen sekoittuvuutta ja tasoittaa savukaasujen virtausta. Soodakattilan koon mukaan ilmarekistereiden jako voi olla 3 + 2 tai 4 + 3. Yleensä etuseinän puolella on yksi ilma-suutin enemmän. Kanavapaineet sekundaari-ilman tavoin vaihtelee 3 – 5 kPa välillä. (Vakkilainen 2005, 7-5 & Vakkilainen 1996)

6.5 Vertikaali- ja monitasoilmajärjestelmä

Nykyaikaiset palamisilmajärjestelmät soodakattiloissa rakennetaan monitasoilmajärjestelmäksi tai kattilavalmistajan mukaan vertikaali-ilmajärjestelmäksi. Molemmilla edellä mainituilla järjestelmillä tarkoitetaan käytännössä samaa asiaa, missä sekundaari- ja tertiääri-ilmatasojen määrä on vertikaalisuunnassa kasvatettu useampaan. Esimerkiksi sekundaari-ilma syöttö on jaettu ylä- ja alasekundaariin, missä ilmatasot sijaitsevat päällekkäin ja ilman syöttö tapahtuu limittäisellä syötöllä molemmilla tasoilla etu- sekä takaseinällä. Ilma-aukkojen määrä on myös vähentynyt vanhempien ilmajärjestelmiin nähden. Tässä mallissa sekundaari-ilman tunkeutuvuus keon keskiosalle paranee sekä ilmat sekoittuvat tehokkaammin. Esimerkiksi tertiääri-ilman syöttö kattilavalmistajan mukaan on voitu jakaa ala- ja ylätertiääri-ilmatasoon tai tertiääri- ja kvartääri-ilmatasoon. Sekundaari-ilman syötön tavoin ilmarekisterit sijaitsevat etu- ja takaseinällä limittäin toisiinsa nähden. Kuvassa 19 on havainnollistettu juuri edellä mainittu esimerkkitapaus. Moneen tasoon vaiheistetulla ilman syötöllä saavutetaan merkittävästi alhaisemmat NO_x -päästöt. Myös yleisesti palamisilmojen sekoittuvuus paranee sekä savukaasujen virtausnopeudet hidastuvat, mikä vähentää lipeäpisaroiden karkailun kattilan yläosaan. (Knowpulp 2019 & Vessel 2016)

7 MUSTALIPEÄN PALAMINEN

Mustalipeä on nestemäinen soodakattilan polttoaine, jota syntyy sulfaattisellukeittoprosessin sivutuotteena. Polttoaineena mustalipeän tyypillisiin ominaisuuksiin kuuluvat korkea vesi- ja tuhkapitoisuus sekä heikko lämpöarvo. Polttoon syötettävän mustalipeän tehollinen lämpöarvo vaihtelee tehtaan mukaan 12 – 13 MJ/kgka. (Raiko et al. 525 – 526) Kuvassa 9 on esitelty mustalipeän perusominaisuuksia.



Kuva 11. Mustalipeän perusominaisuudet (Alakangas et al. 2016, 110)

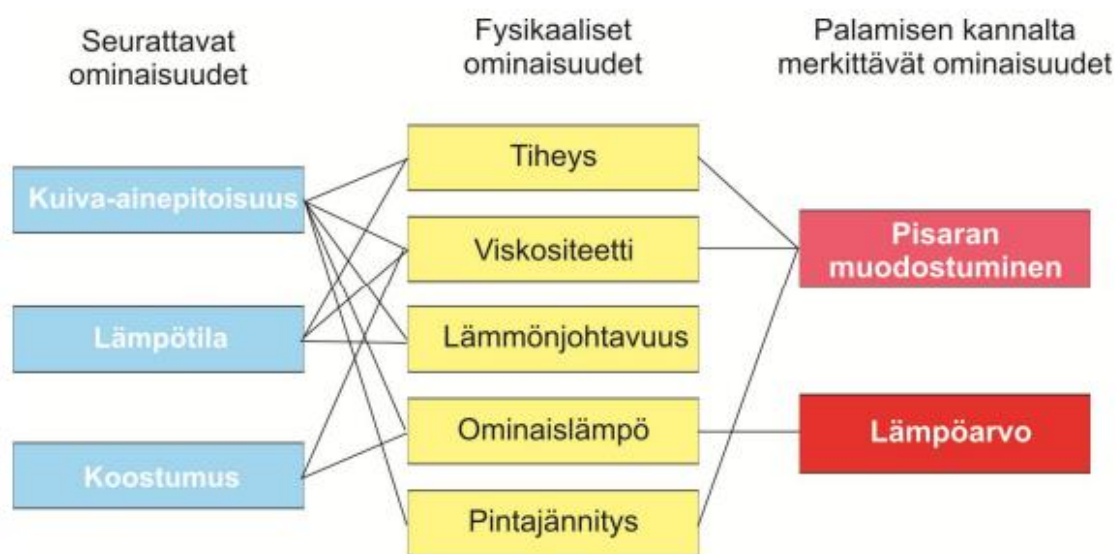
7.1 Mustalipeän ominaisuudet

Mustalipeä on nestemäinen soodakattilan polttoaine, jota syntyy sulfaattisellukeittoprosessin sivutuotteena. Keitosta saatavan mustalipeän kuiva-aineen osuus sisältää epäorgaanisen aineksen lisäksi puun sidosainetta ligniiniä, hiilihydraattipohjaisia karboksyylihappoja sekä vähäisissä määrin uuteainefraktiota. Mustalipeän kemialliset ominaisuuksiin vaikuttavat keitossa käytettävien kemikaalien määrät, puu raaka-aineen laatu (havu- ja lehtipuu), erilaiset keittotavat (jatkuvatoiminen vuokeitin tai eräkeitimet) sekä prosessivesien kierrätysaste. (Alakangas et al. 2016, 109) Havu- ja koivusellun keitossa saatavan mustalipeän tyypilliset alkuaine koostumukset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Mänty- ja koivusellun tuotannosta saatavan mustalipeän alkuainekoostumus kuiva-aineessa painoprosentteina. (Alakangas et al. 2016, 113)

	Mänty		Koivu	
	Tyypillinen	Vaihteluväli	Tyypillinen	Vaihteluväli
Hilli, C	35,0	32–37	32,5	31–35
Vety, H	3,6	3,2–3,7	3,3	3,2–3,5
Typpi, N	0,1	0,06–0,12	0,2	0,1–0,2
Happi, O	33,9	33–36	35,5	33–37
Natrium, Na	19,4	18–22	19,8	18–22
Kalium, K	1,8	1,5–2,5	2,0	1,5–2,5
Rikki, S	5,5	4–7	6,0	4–7
Kloori, Cl	0,5	0,1–0,8	0,5	0,1–0,8
Inertti aines	0,2	0,1–0,3	0,2	0,1–0,3
Summa	100		100	

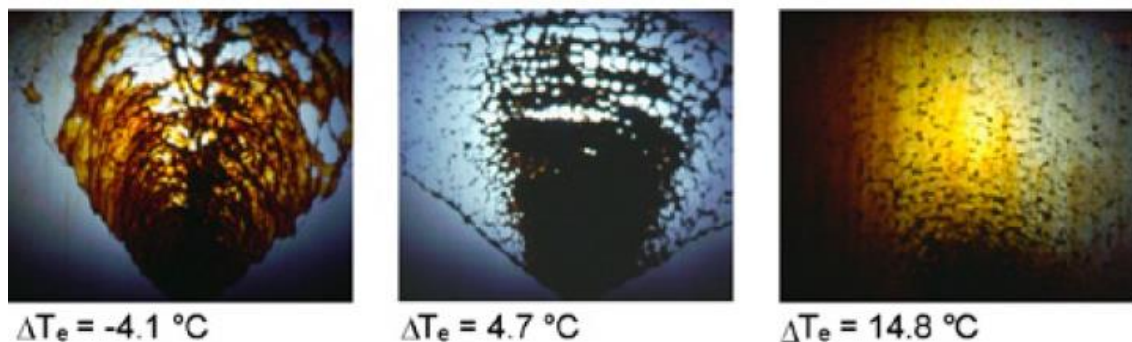
Mustalipeän polttoon vaikuttavat kemiallisten ominaisuuksien lisäksi monet fysikaaliset ominaisuudet, jotka riippuvat mustalipeän koostumuksesta, lämpötilasta sekä kuiva-ainepitoisuudesta. Käytännön kannalta merkittävin mustalipeän fysikaalinen ominaisuus on viskositeetti, joka vaikuttaa haihduttamalla lämmönsiirtoon ja haihdutusnopeuteen sekä myös poltossa pisaran muodostumiseen ruiskuilla. Mustalipeän viskositeettiin vaikuttavat vahvasti mustalipeän kuiva-aine sekä lämpötila. Haihduttamolta saatavan vahva mustalipeän viskositeetti on erityisen korkea. Viskoosin ominaisuuden takia vahvamustalipeä tulee lämmittää vähintään 100 °C:een, jotta lipeä saadaan pumpattavaan sekä poltossa pisaroituvaan tilaan. Mustalipeän juoksevuuden varmistamiseksi viskositeetin taso tulee olla alle 0.5 Pas. Viskositeettiin vaikuttavat myös lipeän esikäsitely (lämpökäsittely, esihapetus) ja koostumus. Korkeassa lämpötilassa pitkään seisovan vahvamustalipeän viskositeetti laskee. Koostumuksien vaihtelu vaikuttaa myös viskositeetin käyttäytymiseen sekä varsinkin korkeilla kuiva-aineilla lipeät eivät ole enää newtonisia nesteitä. Pisaran muodostumiseen ruiskuilla vaikuttaa myös lipeän pintajännitys. Mustalipeän pintajännityksen tarkka mittaaminen on varsin hankalaa ja yli 60 % kuiva-ainepitoisuuksissa mittaustuloksia ei ole saatavilla. Mustalipeän kuiva-aineen ollessa 20 – 60 % pintajännitys on noin puolet veden pintajännityksestä. (Raiko et al. 2002, 527 – 529) Kuvassa 12 on esitetty mustalipeän fysikaalisten ominaisuuksien riippuvuussuhteita seurattuihin ominaisuuksiin sekä palamisen kannalta merkittäviin ominaisuuksiin



Kuva 12. Mustalipeän fysikaalisten ominaisuuksien riippuvuussuhteet seurattuihin ominaisuuksiin sekä palamisen kannalta merkittäviin ominaisuuksiin. (Alakangas et al. 2016, 115)

7.2 Pisaroituminen

Polttoliipeän pisaroitumista ruiskuilla voidaan hallita ruiskutusaineella sekä suuttimen geometrialla, mutta suurin vaikutus on polttoliipeän lämpötilalla. Nämä vaikuttavat pisaran nopeuteen ruiskussa sekä pisaran syntymismekanismiin, joilla on suuri merkitys lopullisen pisarakokoon sekä ruiskun synnyttämän polttoliipeäviuhkan muotoon. Lipeän ilmanpaineellinen kiehumapiste on riippuvainen kuiva-ainesta, joka vaikuttaa viskositeettiin ja käytettävään lipeän ruiskutuslämpötilaan. Matalilla kuiva-ainepitoisuuksilla (<75 %) ruiskutuslämpötila on yleensä alle tai muutaman asteen yli ilmanpaineellisen kiehumapisteen. Pisaran muodostumismekanismit voidaan jakaa aaltohajoamiseen (wavy-sheet disintegration), reikiintymishajoamiseen (perforation) tai flashing-hajoamiseen (flashing). Yleisimmät hajoismekanismit matalalla kuiva-ainella perustuu juuri aalto- sekä reikiintymishajoamiseen. Korkeilla kuiva-aineilla (>75 %) ruiskutuslämpötila pidetään useita asteita yli kiehumapisteen, jotta lipeän viskositeetti on tarpeeksi matala eikä aiheuta ongelmia lipeävirtauksessa. Flashing-hajoaminen kiihdyttää lipeän ruiskutus nopeutta, rikkoo syntyneen viuhkan nopeammin pisaroiksi sekä pienentää pisarakokoa. (Miikkulainen et al. 2009) Kuvassa 13 on esitetty polttoliipeä viuhkan hajoismekanismit.



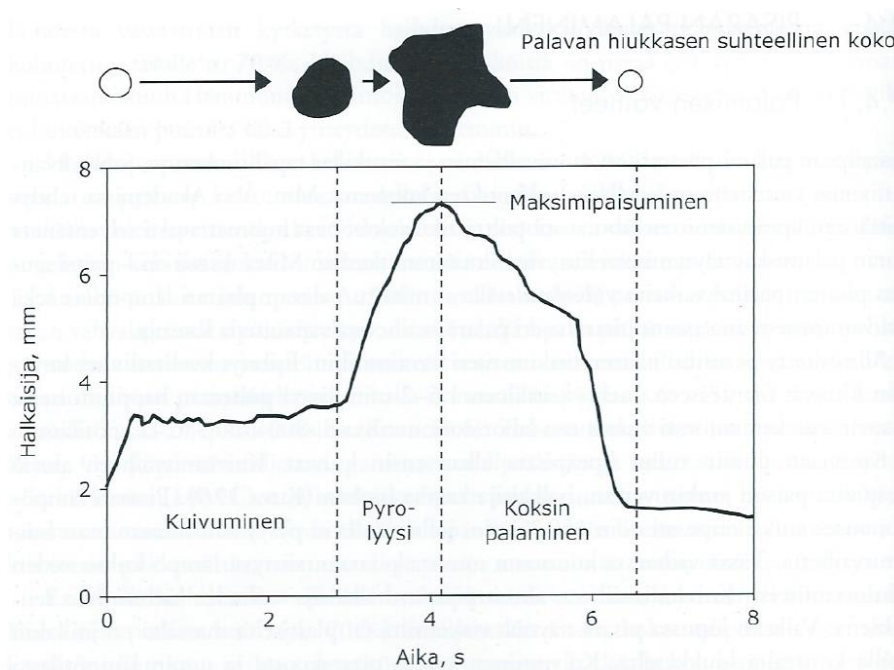
Kuva 13. Polttoliipeä viuhkan hajoamismekanismit ja lämpötilaerot polttoliipeän kiehumispisteeseen. Vasemmalla aaltohajoaminen, keskellä reikiintymishajoaminen ja oikealla flashing-hajoaminen (Miikkulainen et al. 2009)

Vasemmassa kuvassa on esitetty aaltohajoaminen, joka tapahtuu alle lipeän kiehumapisteen. Pisara muodostuu aallon hajoamisen yhteydessä. Keskimmissä kuvassa on esitetty reikiintymishajoaminen, joka tapahtuu hieman kiehumapisteen yläpuolella. Reikiintymishajoamisessa lipeäviuhkaan muodostuu reikiä pintajännitysvoimien seurauksena ja reikien ympärille muodostuu paksumpi kerros lipeää. Tämän seurauksena muodostuu pisaroita. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty flashing-hajoaminen, jossa ruiskutuslämpötila on reilusti yli kiehumapisteen. Flashing-hajoamisessa lipeän vesi paisuu höyryksi äkillisesti ja muodostaa pisaran heti suuttimen jälkeen. Flashing-hajoaminen voi tapahtua jo suuttimessa tai suuttimen jälkeen. (Miikkulainen et al. 2009)

7.3 Palamisen vaiheet

Mustaliipeän palaminen on hyvin samanlainen kuin monilla muilla kiinteillä ja nestemäisillä polttoaineilla. Palaminen voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen: kuivuminen, pyrolyysi ja koksipalaminen. Lipeäruiskulta tulevan pisaran koko vaihtelee karkeasti 0.5 – 5 mm välillä. Pisaran tulee olla tarpeeksi suuri, jotta pisarat eivät karkaa savukaasujen mukana aiheuttaen likaantumista ja tukkeutumista. Vastaavasti pisaran tulee myös tarpeeksi, että kuivuminen tapahtuu suurimmalta osin ennen kekoa. Palamisen yhteydessä mustaliipeäpisara turpoaa huomattavasti enemmän muihin polttoaineisiin verrattuna. Toinen muista polttoaineista poikkeava ominaisuus on tuhkan

matala sulamislämpötila. (Adams et al. 1997 131 – 132) Kuvassa 14 on esitetty palamisen eri vaiheet.



Kuva 14. Mustalipeä pisaran palamisen vaiheet (Raiko et al. 2002, 536)

Mustalipeäpisaroiden palamisprosessi alkaa ruiskuista matkalla pohjalle. Ensiksi lipeäpisara alkaa kuivamaan tulipesän lämmön ansiosta. Pisaran lämpötila nousee aluksi noin $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, mutta koko kuivumisvaiheen lämpötila pysyy suhteellisen vakiona. Pisaran koko vaihtelee kuivamisvaiheessa veden höyrystymisen ansiosta. Kuivuminen kestää tulipesän lämpötilasta ja pisarakoosta riippuen tyypillisesti $0.5 - 3$ sekuntia. Kuivumisen jälkeen pisara alkaa rajusti turpoamaan, joka kertoo pyrolyysin alkaneen. Pyrolyysissä pisara palaa hapellisessa tilassa kirkkaalla keltaisella liekillä, kun siitä vapautuu erilaisissa termisissä prosesseissa kevyitä hiilipitoisia kaasuja. Pyrolyysivaiheessa noin 30% mustalipeän massasta vapautuu kaasutilaan ja kestää pisarakoon sekä lämpötilan mukaan $0.5 - 2$ sekuntia. Myös epäorgaanisia keittokemikaaleja haihtuu pyrolyysivaiheessa. Rikkiä vapautuu tyypillisesti noin $20 - 40\%$, mutta myös natriumia vapautuu pieni osa. (Raiko et al. 2002, 535 – 536)

Koksinpalaminen alkaa, kun haihtuvat aineet ovat vapautuneet kokonaan. Pisarasta on enää jäljellä lähinnä hiiltä sekä epäorgaanisia suoloja. Palavan pisaran koko alkaa

pienenemään hiilen palamisen yhteydessä eikä näkyvää liekkiä ole enää. Koksipalamisen loppuvaiheessa pisaran hiilirakenne murtuu ja hiukkanen muuttuu äkkinäisesti sulapisaraksi. Koksen palamisaikaan vaikuttaa olennaisesti alkuperäisen pisaran koko, tulipesän lämpötila, ympäröivä happipitoisuus sekä pyrolyysivaiheen paisunta. Ympäröivällä hapella on suuri merkitys koksipalamisen nopeuteen. Esimerkiksi tyypillisen 2mm pisaran koksen palaminen kestää noin 2 – 5 sekuntia ilmassa, mutta 5 % happipitoisuudessa palaminen kestää useita kymmeniä sekunteja. (Raiko et al. 2002, 536 – 537)

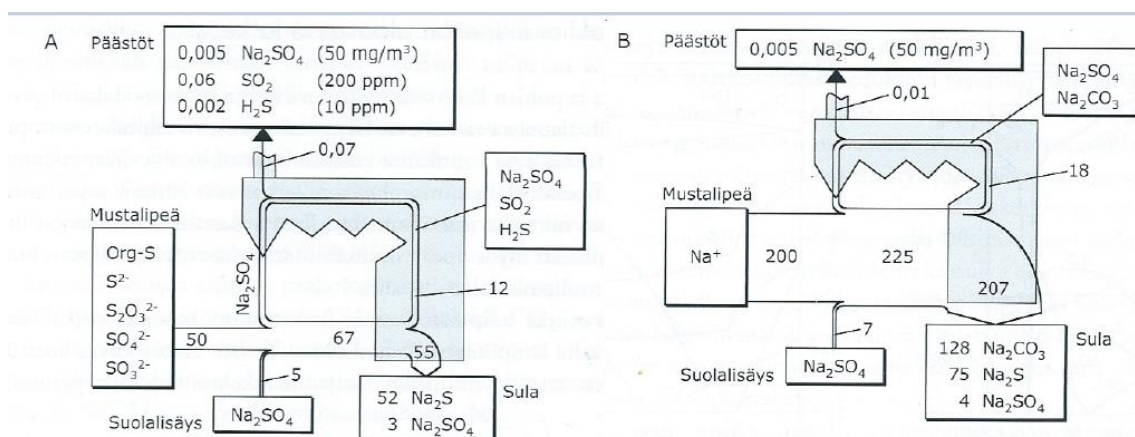
Koksen palamisen lopussa sulapisara koostuu enää epäorgaanisista aineista, lähinnä natriumista ja rikistä. Pisaraan jäävä rikki muodostaa lähes kokonaan natriumsulfidia. Sulan natriumia on tavallisissa lipeissä enemmän kuin rikkiä, joten jäljelle jäänyt natrium muodostaa koksen palamisen loppuvaiheessa natriumkarbonaattia. (Raiko et al. 2002, 537 – 538)

8 SOODAKATTILAN KEMIALLISET PROSESSIT

Tässä kappaleessa perehdytään soodakattilassa tapahtuviin kemiallisiin prosesseihin.

8.1 Rikin ja natriumin tase

Rikin ja natriumin määrä lipeässä vaihtelevat merkittävästi tehtaasta ja prosesseista riippuen. Kattilan tulipesässä tapahtuvien kemiallisten prosessien kannalta hyödyllisenä parametrina voidaan pitää lipeän kokonaisrikin ja natriumin moolisuhdetta S/Na₂. Lipeän rikin ja natriumin suhdetta ei voida reaaliaikaisesti mitata, joten koko talteenottokierron natrium ja rikin suhdetta mitataan sulfiditeetillä. Sulfiditeetin avulla voidaan päätellä suurpiirteisesti soodakattilaan syötettävän lipeän natriumin ja rikin suhdetta. Ihanteellisessa tilanteessa mustalipeän kaikki rikki- ja natriumyhdisteet muodostaisivat sulaa pelkästään natriumkarbonaattia sekä natriumsulfidia. (Raiko et al. 2002, 540) Kuvassa 15 on esitetty natriumin ja rikin kierto soodakattilassa.

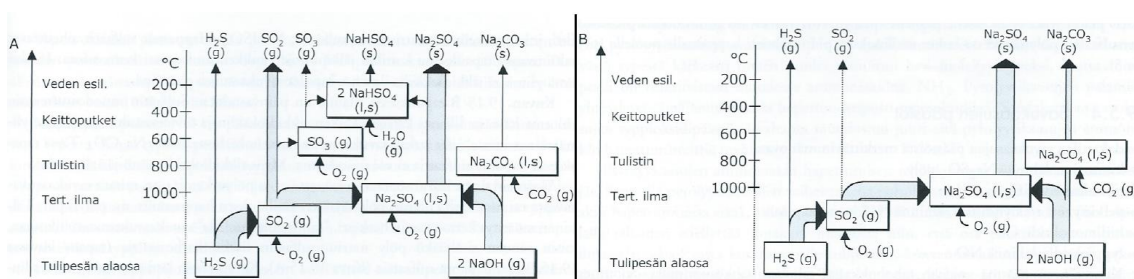


Kuva 15. Rikin (A) ja natriumin (B) virrat soodakattilassa. Luvut kuvaavat kilogrammana virtoja, kun kattilaan syötetään tonni kuiva-ainetta. (Raiko et al. 2002, 541)

Ensinnäkin sulakeossa tapahtuvassa rikin reduktiossa eivät kaikki yhdisteet muutu halutuksi natriumsulfidiksi, vaan osa jää natriumsulfaatiksi. Merkittävä osa natriumista ja rikistä kulkeutuu savukaasujen mukana savukaasukanavaan. Pääasiassa näitä ovat natriumsulfaattipöly sekä erilaiset rikkipitoiset kaasut. Nämä savukaasujen mukana kulkevat yhdisteet aiheuttavat kattilan likaantumista sekä korroosio-ongelmia, joita käydään myöhemmin työssä läpi. Lentotuhka erottuu pääasiassa soodakattilan suppiloihin tai sähkösuodattimiin. Lentotuhka palautetaan sekoitussäiliön kautta takaisin lipeän sekaan. Lentotuhkan osuus kierrossa vaihtelee tyypillisesti 5 – 12 % soodakattilan

syötettävän lipeän kuiva-aineeseen nähden (Vakkilainen 2005, 7-19). Edellä mainitussa kierrossa lipeän natriumista on noin 10 % ja vastaavasti savukaasuihin siirtyy noin 20 – 40 % rikistä. Natriumista ja rikistä pieni osa poistuu savukaasupäästöjen mukana. Savukaasupäästöjen suuruuteen vaikuttavat olennaisesti käytössä olevien puhdistuslaitteiden tehokkuus sekä prosessiolosuhteet. (Raiko et al. 2002, 540 – 541)

Tulipesän alaosa savukaasujen mukana karkaavista rikkiyhdisteistä tärkeimmät ovat rikkivety H_2S ja karbonyylisulfidi COS sekä natriumin osalta höyrymuodossa oleva natrium ja natriumhydroksidi. Tulipesän alaosan lämpötilalla on suuri vaikutus karkaavien rikin ja natriumin määrään. Lämpötila vaikuttaa oleellisesti myös rikin ja natriumin määrän suhteeseen savukaasuissa. Esimerkiksi kylmässä tulipesässä rikkiyhdisteiden määrä savukaasuissa kasvaa, mikä voi johtua lipeän huonosta lämpöarvosta. Toisaalta kuumempi tulipesä indikoi höyrystyvän natriumin määrään savukaasuissa, mikä kasvattaa erotettavan lentotuhkan määrää. Toinen merkittävä vaikutus rikin ja natriumin määrään savukaasuissa on poltettavan lipeän sulfiditeetillä eli S/Na_2 -suhteella. Kuvassa 16 on havainnollistettu periaatekuvana tärkeimmät rikin ja natriumin reaktiot tulipesässä ja savukaasuissa, missä lähtöaineina ovat natriumhydroksidi ja rikkivety.

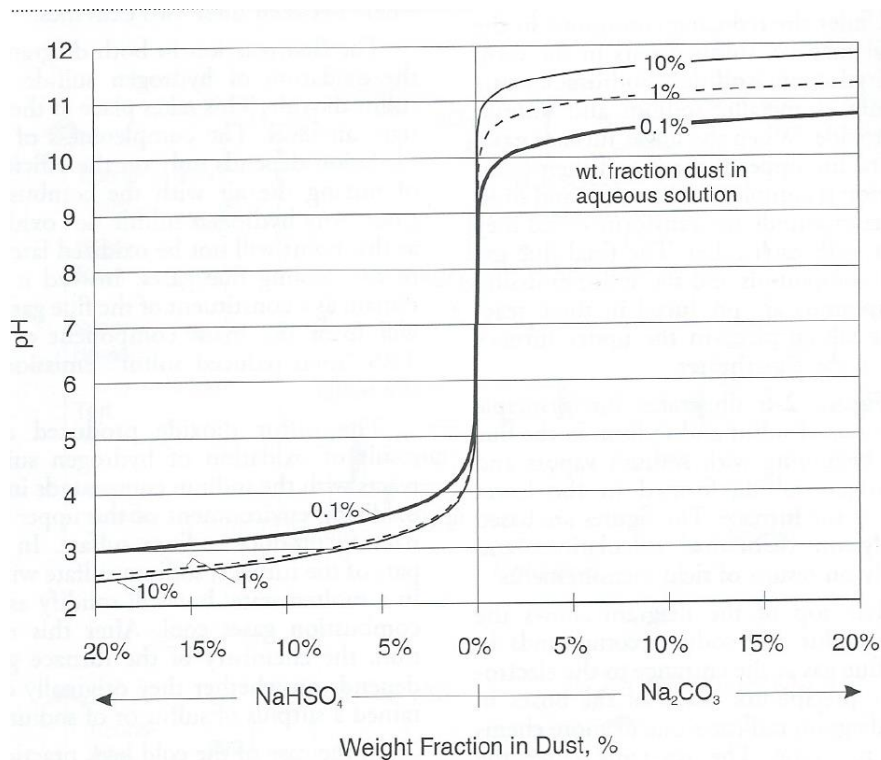


Kuva 16. Rikin ja natriumin tärkeimmät reaktiot tulipesässä ja savukaasuissa. Tilanteessa A tulipesä on kylmä ja lipeän sulfiditeetti on korkea. Tilanteessa B tulipesä on kuuma ja lipeän sulfiditeetti on matala. (Raiko et al. 2002, 545)

Tilanteessa A tulipesä on kylmä ja syötettävän lipeän sulfiditeetti korkea. Tilanteessa B taas täysin vastainen tilanne, missä tulipesä on kuuma ja sulfiditeetti matala. Molemmissa tilanteissa rikkivety hapettuu ensimmäiseksi tertiääri-ilman avulla rikkidioksidiksi SO_2 . Hapettumisen täydellisyys on riippuvainen ilmojen sekä savukaasujen sekoittumisesta. Savukaasujen jäähtyessä hapettumista ei enää tapahdu ja jäljelle jäänyt osa muodostaa

pääkomponentin soodakattilan pelkistyneille rikkipestöille. Muodostunut rikkidioksidi reagoi savukaasujen natriumyhdisteiden kanssa muodostaen natriumsulfaattia. Tästä eteenpäin tilanne on riippuvainen ylimääräisistä rikistä ja natriumista. Tilanteessa A käytännössä katsoen kaikki natriumyhdisteet ovat muodostaneet sulfaattia ja jäljelle jää ylimääräinen rikkidioksidi. Rikkidioksidi aiheuttaa jäähtyessään usein ongelmia, josta osa hapettuu edelleen rikkitrioksidiksi SO_3 . Natriumsulfaatti muodostaa rikkitrioksidin kanssa tahmeaa natriumvetysulfaattia NaHSO_3 . Happamat sulfaatit ovat sulassa muodossa ja ovat erityisen tarttuvia matalammissa lämpötiloissa. Tämä aiheuttaa ongelmia varsinkin keittoputkiston ja ekonomaiserin alueella (Adams et al. 1997, 271 – 273) Tilanne B on täysin päinvastainen, koska kaikki rikkidioksidi muodostaa natriumsulfaattia ja jäljelle jää ylimääräistä natriumia. Ylimääräinen natrium muodostaa savukaasuissa hiilidioksidin kanssa natriumkarbonaattia eikä happamia sulfaatteja synny. Tilanteet ovat ääripäitä tulipesän toiminnasta, joten todellisuudessa kattilat käyttäytyvät tältä väliltä. (Raiko et al. 2002, 544 – 546)

Sähkösuodattimilta saatavasta lentotuhkanäytteestä voidaan yksinkertaisella tavalla päätellä tulipesän alaosan toimintaa sekä savukaasujen pitoisuuksia. Lentotuhka sekoitetaan veteen, jonka jälkeen veden happamuus mitataan. Natriumkarbonaatti muodostaa veteen sekoittaessa emäksisen liuoksen, kun taas natriumvetysulfaatti voimakkaasti happaman. Tyypillisesti lentotuhkan pH arvot soodakattiloissa vaihtelevat 7 – 11.5 välillä. Optimaalinen lentotuhkan pH:n arvo on 10 – 11 välillä. Alle 10 pH:n lentotuhka indikoi happamien sulfaattien syntymisestä savukaasuihin. Myös liian korkea pH:n arvo voi osoittaa korkeaa karbonaattipitoisuutta, mikä voi aiheutua suuresta carryoverin määrästä. Korkea pH:n arvot kertovat myös matalista SO_2 päästöistä. (Adams et al. 52 – 53) Kuvassa 17 on havainnollistettu karbonaatin ja happamien sulfaattien määrän vaikutusta lentotuhkan pH:n arvoon.



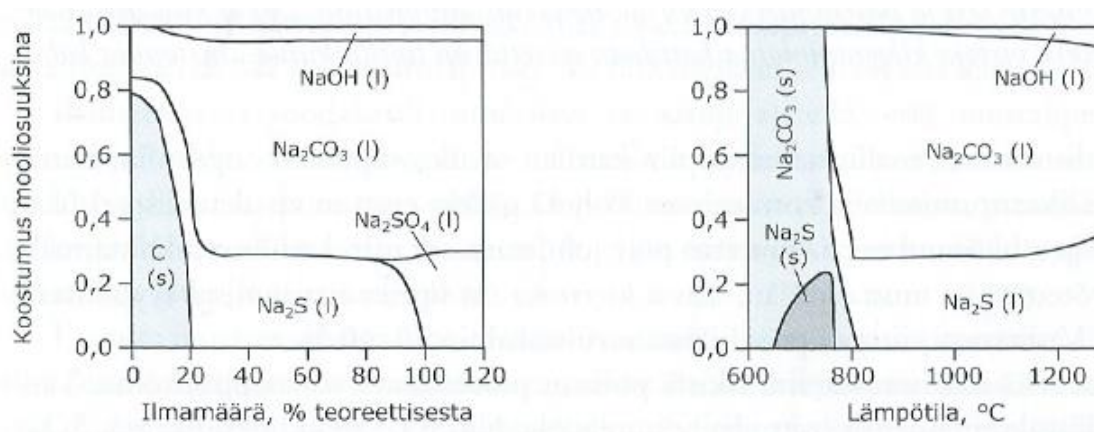
Kuva 17. Natriumvetysulfaatti ja natriumkarbonaatti pitoisuuden vaikutus lentotuhkan pH:n arvoon eri pitoisuuksilla vesiliuoksessa. (Adams et al. 1997, 52)

8.2 Reaktiot tulipesässä

Tulipesän alaosan olosuhteet sekä keon toiminta ovat ratkaisevassa asemassa soodakattilan talteenotto-prosessin onnistumisessa. Tulipesän alaosan olosuhteisiin vaikuttavat lipeän ruiskutus sekä ilmarekistereistä syötettävien ilmojen suhteet. Myös lipeän ominaisuuksilla on suuri vaikutus palamis- ja talteenotto-prosessiin. Rikin reduktio eli natriumsulfaatin pelkistyminen natriumsulfidiksi tapahtuu sulakeossa niukkahappisissa olosuhteissa. Natriumsulfaatti reagoi sulakeon vapaan hiilen kanssa muodostaen natriumsulfidia, hiilidioksidia CO₂ ja häkää CO. Vapaiden hiilten loputtua natriumsulfidi hapettuu helposti takaisin natriumsulfaatiksi. Teoriassa täydellinen reduktio olisi mahdollinen, mutta rajoittavana tekijänä vastaan tulee reduktioreaktioiden rajallinen nopeus eli kinetiikka. Reduktio reaktiot ovat esitelty seuraavana. (Raiko et al. 2002, 542 – 543 & Vakkilainen 2005, 4-6)



Korkea reduktioaste saavutetaan, kun keon pinnalla on riittävästi palamatonta koksia. Lipeän ja ilmansyöttö tulisi hoitaa siten, että pisaran osuessa keoon koksen palamisvaihe on vielä kesken. Pelkistymisnopeuteen vaikuttaa myös oleellisesti keon lämpötila. Noin 50 – 60 °C nosto keon lämpötilassa nopeuttaa noin kaksinkertaiseksi pelkistymisnopeuden. Helpoin keino keon lämpötilan ja reduktion parantamiseksi on kuiva-ainepitoisuuden nosto. Kuvassa 18 on havainnollistettu ilmamäärän sekä lämpötilan vaikutus sulakeon teoreettiseen koostumukseen. Ilmamäärän kasvaessa lähelle teoreettista palamiseen tarvittavaa ilmamäärää natriumsulfidi alkaa hapettumaan takaisin natriumsulfaatiksi. Lämpötilan noustessa yli 800 °C kiinteä natriumsulfidi ja natriumkarbonaatti alkaa muuttumaan juoksevaksi sulaksi. (Raiko et al. 2002, 542 – 543)



Kuva 18. Teoreettinen sulan koostumus ilmamäärän ja lämpötilan funktiona. (Raiko et al. 2002, 542)

9 SOODAKATTILAN SAVUKAASUPÄÄSTÖT

Soodakattilan savukaasupäästöihin voidaan kategorisoida kattilan iän, lipeän kuiva-ainepitoisuuden sekä kuormituksen mukaan. Savukaasupäästöjen täydellinen eliminointi on mahdotonta, mutta asianmukaisella kattilan muotoilulla sekä tehokkailla ajotavoilla voidaan minimoida haitallisten päästöjen karkaaminen ilmaan. Tässä kappaleessa esitellään merkittävimmät savukaasupäästöt soodakattiloissa sekä keinoja minimoida päästöjä.

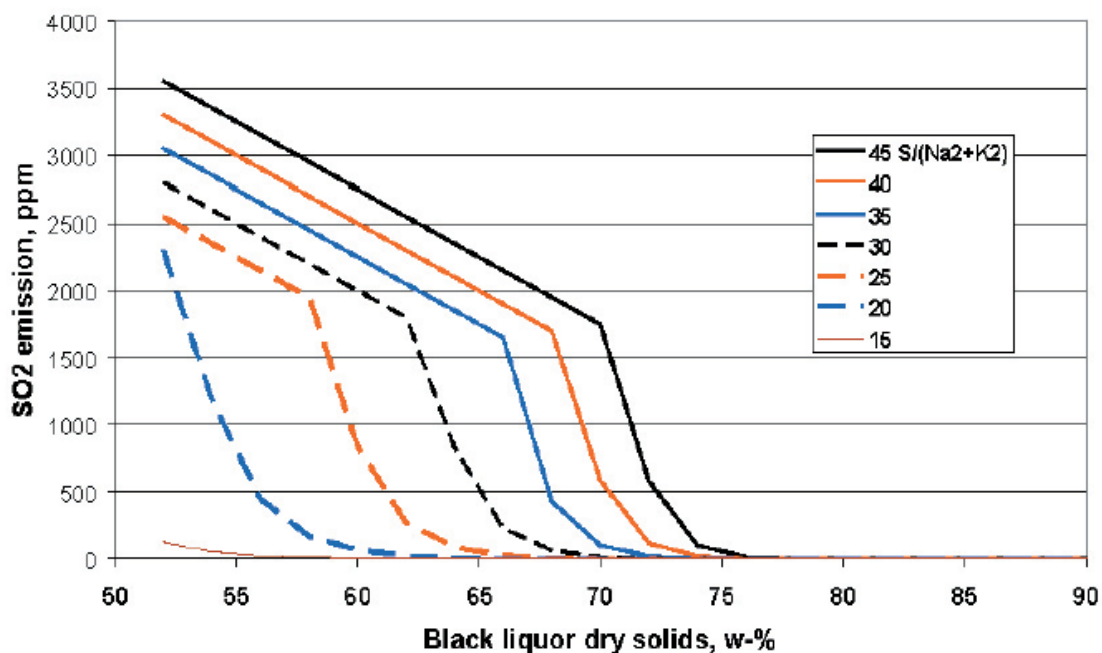
9.1 Kiintoaine

Kiintoaine- tai pölypäästöillä tarkoitetaan pieniä partikkeleja, jotka ovat sekoittuneet savukaasujen sekaan. Soodakattiloissa pölypäästöt sisältävät pääasiassa natriumsulfaattia. Kiintoainepäästöt aiheuttavat eniten ongelmia urbaaneissa ympäristöissä. Varsinkin pienimmät partikkelit imeytyvät veren sekaan keuhkojen kautta. Nykyaikaisissa soodakattiloissa kiintoainepäästöt ovat hyvin pieniä sekä reilusti viranomaisten antamien raja-arvojen alapuolella. Soodakattiloissa tulipesästä karkaaviin kiintoainepäästöihin vaikuttaa suuresti kattilan kuorma. Korkeammalla kuiva-ainepitoisuudella tulipesän alaosan lämpötila kasvaa, joka nostaa myös natriumin ja kloorin vapautumista savukaasuihin. Tämän seurauksena myös pölypäästöt kasvavat. Kiintoainepäästöjä voidaan tehokkaasti hallita sähkösuodattimilla. Moni soodakattila on sähkösuodattimien lisäksi varusteltu savukaasupesurilla, joka vähentää entisestään pölypäästöjä. (Vakkilainen 2005, 12-8 & Raiko et al. 2002, 546)

9.2 Rikkidioksidi

Rikkidioksidi on merkittävä tekijä happosateisiin. Se myös ärsyttää silmiä ja hengitysteitä. Rikkidioksidi voi kulkea pitkiäkin matkoja ilmassa ja kasvattaa astman sekä keuhkosairauksien riskiä. Rikkidioksidi päästöihin voidaan tehokkaasti vaikuttaa soodakattilan ajotavoilla. Tulipesän alaosan korkea lämpötila sekä tasainen poltto luovat optimaaliset olosuhteet minimoida rikkidioksidipäästöjä. Osittain kylmäksi jäävä tulipesä voi aiheuttaa voimakkaita rikkidioksidipäästöjä. Lipeän sulfiditeetillä on myös vaikutus rikkidioksidin syntymiseen. Päästöjä voidaan hallita savukanavan jälkeisellä savukaasupesurilla. Lipeän sulfiditeetin kasvaessa samalla kasvavat myös rikkidioksidipäästöt. Matalilla kuormilla ajettaessa kattilaa tulipesän alaosan lämpötila

laskee, jolloin samalla myös rikkidioksidipäästöt nousevat. (Vakkilainen 2005, 12-10 & Raiko et al. 2002, 546) Kuvassa 19 on havainnollistettu sulfiditeetin sekä lipeän kuiva-ainepitoisuuden merkitystä syntyviin rikkidioksidipäästöihin



Kuva 19. Lipeän sulfiditeetin ja kuiva-ainepitoisuuden vaikutus syntyviin rikkidioksidipäästöihin (Vakkilainen 2005, 12-11)

Lipeän kuiva-aineella on suuri merkitys savukaasujen rikkidioksidipitoisuuteen. Poltettavan lipeän kuiva-ainepitoisuuden nosto yli 75 % vaikuttaa olennaisesti syntyviin rikkidioksidipäästöihin. Käytännössä katsoen tällöin ei synny ollenkaan rikkidioksidia, vaan kaikki rikki sitoutuu tulipesän sulaan tai savukaasujen pölyihin. (Raiko et al. 2002, 546)

9.3 Pelkistyneet rikkiyhdisteet

Pelkistyneet rikkiyhdistepäästöt eli ns. TRS-päästöt koostuvat hajua aiheuttavista rikkivedyistä, metyylimerkaptaneista, dimetyylisulfideista ja dimetyylidisulfideista. Suurin syy näiden päästöjen vähentämiseen on parantaa paikallista ympäristöä. TRS-päästöjen syntyminen soodakattilassa johtuu yleensä kylmästä sulakeosta sekä huonosta ilmojen sekoittumisesta tulipesässä. TRS-päästöt hapettuvat rikkidioksidiksi, mikä vaatii

kuumaa tulipesän lämpötilaa sekä tehokasta palamisilmojen sekoittumista. (Vakkilainen 2005, 12-1, 12-2)

9.4 Hiilimonoksidi

Hiilimonoksidin syntyminen johtuu palamisen epätäydellisyydestä. Hiilimonoksidin pitoisuus savukaasuissa kasvaa voimakkaasti, kun mustalipeää poltetaan erittäin pienellä yli-ilman määrällä. Hapen määrä savukaasuissa korreloi suoraan hiilimonoksidin määrään. Korkeammalla happimäärällä sekä paremmalla ilmojen sekoittumisella saadaan pienemmät hiilimonoksidipäästöt. Typenoksidi- ja TRS-päästöt kasvavat vähentämällä hiilimonoksidipäästöjä. Tyypillisesti soodakattiloita ajetaan 0 – 300 ppm hiilimonoksidipäästöillä savukaasuissa, jotta typenoksidi ja TRS-päästöt olisivat matalammat. Vähäinen yli-ilman määrä vähentää myös savukaasun lämpöhäviöitä. Moderneissa soodakattiloissa hiilimonoksidipäästöt eivät ole riippuvaisia kattilan kuormasta tai poltettavan lipeän kuiva-ainepitoisuudesta. Liian lyhyt viipymäaika tulipesässä voi aiheuttaa epätäydellistä palamista pienemmissä modernisoiduissa soodakattiloissa, mikä voi nostaa hiilimonoksidipäästöjä. (Vakkilainen 2005, 12-3)

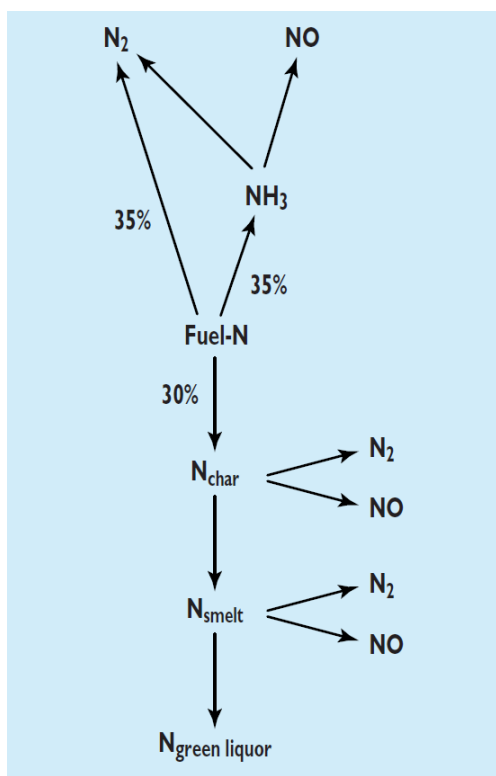
9.5 Typpioksidit

Typpioksidipäästöt ovat typpioksidi NO, typpidioksidi NO₂ ja dityppioksidi N₂O. NO ja NO₂ kutsutaan yleisesti NO_x:ina. Dityppioksidin määrä soodakattilan päästöissä on merkityksetön. NO_x -päästöt edistävät happosateiden syntymistä muodostaen veden kanssa happamia yhdisteitä. Typpioksidit edesauttavat myös alailmakehän otsonin ja savusumun syntymistä. Tyypillisesti soodakattilan NO-pitoisuus savukaasuissa on 40 – 120 ppm välillä. Palamisprosesseissa NO_x -päästöistä noin 90 % muodostuu typpioksidista. Soodakattilan NO_x -päästöt ovat alhaisia verrattuna muiden polttoaineiden polttoon. (Adams et al. 1997, 226 – 227)

Soodakattilan NO_x -päästöjen muodostuminen tapahtuu pääasiassa mustalipeän orgaanisesta sidotusta tyyppistä. Soodakattilan tulipesän matalan lämpötilan takia palamisilmasta syntyvien termisten NO_x-päästöjen osuus ei ole merkittävä. Mustalipeän orgaaninen typpi on peräisin keittämöllä käytettävästä hakkeesta. Hakkeen sisältämään typen määrä on riippuvainen käytössä olevasta puulajista. Esimerkiksi mäntyselun valmistuksesta saatavan mustalipeän typpipitoisuus on pienempi kuin koivuselun, joka

voidaan huomata taulukosta 1. Tyypillisesti mustalipeän kuiva-aineesta noin 0.05 – 0.20 % sisältää typpeä. (Janka et al. 1997)

Noin kaksi kolmasosaa mustalipeän sisältämästä tyypestä vapautuu pyrolyysikaasujen mukana. Tästä noin puolet muuntuu suoraan molekyylylitypeksi ja noin toinen puolikas reaktiivisena ammoniakkinä NH_3 . Ammoniakki hapettuu helposti typpioksidiksi ja pyrolyysikaasujen ammoniakki muodostaa suurimman osan soodakattilan NO_x -päästöistä. Pyrolyysikaasujen mukana vapautuva typpi on riippuvainen lämpötilasta sekä pisaran viipymäajasta ennen sulakekoa. Aikaa tai lämpötilaa kasvattamalla vapautuvan typen määrä kasvaa. Jäljelle jäänyt kolmannes tyypestä siirtyy kekkoon, josta suurin osa siirtyy sulan mukana ulos kattilasta. (Janka et al. 1997) Kuvassa 20 on esitelty mustalipeän typen pääreaktiot.



Kuva 20. Mustalipeän sisältämän typen tärkeimmät reaktiot soodakattilassa. (Janka et al. 1997)

Koksijäännökseen palamisen yhteydessä sulaan jäänyt typpi muuttuu natriumsyanaatiksi NaOCN . Muodostuneen natriumsyanaatin määrä on lähes yhtä suuri kuin soodakattilan NO_x -päästöt. Syanaatti muuntuu liuotimessa sekä viherlipeänkäsittelyssä edelleen

ammoniakkisi, joka voi aiheuttaa päästöongelmia esimerkiksi hajukaasujen poltossa. (Raiko et al. 2002, 547)

Soodakattilan NO_x-päästöjä voidaan vähentää monella eri keinolla. Tulipesän alaosan lämpötilalla on suuri merkitys typenoksidien muodostumiseen. Soodakattilan tulipesän alaosan lämpötila on riippuvainen vahvasti kuormituksesta sekä mustalipeän kuiva-ainepitoisuudesta. Alhaisemmilla lämpötiloilla typenoksidien muodostuminen vähenee, mutta toisaalta kattilan rikkidioksidipäästöt kasvavat sekä höyryn ja sähkön tuotanto heikkenee. Pienentämällä savukaasujen jäännöshapen määrää saadaan samalla vähennettyä syntyviä NO_x -päästöjä, mutta samalla kasvavat myös savukaasujen CO - pitoisuus. (Suhr et al. 2015, 309 – 313)

Palamisilman vertikaalinen vaiheistus on taloudellinen ja tehokas keino vähentää syntyviä typenoksidipäästöjä. Tertiääritason yläpuolelle tuotu ylimääräinen palamisilmataso vähentää pyrolyysikaasuissa vapautuvan ammoniakkin hapettumista typpioksidiksi, jolloin ammoniakki muuntuu molekyylitypeksi tehokkaammin. Palamisilman vaiheistuksella eli ns. vertikaali-ilmajärjestelmällä voidaan saavuttaa jopa 30 % vähennys NO_x -päästöihin verrattuna vanhaan kolmesta tasosta syötettävään ilmajärjestelmään. Muita kaupallisia typenoksidipäästöjen vähentämiskeinoja ovat SNCR -menetelmä tai erillinen savukaasujen NO_x -pesuri. SNCR-menetelmässä tulipesän yläosaan osaan injektoidaan ammoniakkia tai ureaa ((NH₂)₂CO)), mikä reagoi typpioksidin ja/tai typpidioksidin kanssa muodostaen molekyylityppeä. Menetelmällä voidaan saavuttaa noin 60 % vähennys NO_x-päästöihin. Menetelmä on kuitenkin kallis investointi ja myös kasvattaa korroosio- ja tukkeutumisriskiä. NO_x-pesurissa typpioksidi muutetaan ensiksi hapettimen avulla typpidioksidiksi, jonka jälkeen typpidioksidi pelkistetään molekyylitypeksi. Hapettimena voidaan käyttää esimerkiksi klooridioksidia ClO₂ tai otsonia. NO_x-pesurilla voidaan saavuttaa noin 60 – 70% vähennys typenoksidipäästöihin. Investointikustannukset voivat olla tapauskohtaisesti jopa matalat. Esimerkiksi, jos tehtaalla on klooridioksidin valmistuslaitos valmiina. Myös pesurin käyttökustannukset ovat kohtuulliset. NO_x-pesurilla ei ole vaikutusta soodakattilan käytettävyyteen eikä operointiin, mikä on suuri etu tässä menetelmässä. (Janka et al. 1997)

10 KATTILAN LIKAANTUMINEN

Mustalipeä sisältää paljon epäorgaanisia kemikaaleja, jotka luovat käytännön haasteita savukaasukanavan lämpöpintojen likaantumiselle. Savukaasujen mukana tulipesästä karkailee merkittäviä määriä höyrystyneitä alkaleja sekä pieniä sula- ja lipeäpisaroita. Nämä aiheuttavat nykypäivänäkin merkittäviä käytettävyyteen vaikuttavia likaantumis- ja tukkeutumisongelmia soodakattiloissa. Kattilan lämpöpintojen likaantuminen pienentää vapaata savukaasujen virtauspinta-alaa, mikä kasvattaa savukaasujen virtausnopeutta sekä painehäviöitä lämpöpintojen poikki. Painehäviöt vaikeuttavat kattilan käytettävyyttä, mikä yleensä vähentää kattilan kapasiteettia. Likaantuminen voi johtaa tilanteeseen, jossa savukaasupuhaltimet eivät pysty tuottamaan tarpeeksi suurta paine-eroa sekä virtausta. Tällöin kattilan kuormaa joudutaan laskemaan tai ajamaan kattila ennenaikaisesti alas vesipesuja varten. (Vakkilainen 2005, 8-1 – 8-2)

10.1 Likaantumismekanismit

Tuhkan tarttuminen savukaasukanavassa on vahvasti riippuvainen tuhkan koostumuksesta sekä lämpötilasta. Tuhkan tarttuminen voidaan periaatteessa jakaa kolmeen eri tarttumis- ja kovettumismekanismiin. Soodakattilan kuumimmissa savukaasukanavan osissa tarttuminen tapahtuu tuhkan ollessa osittain sulanutta, mikä tekee tuhkasta tarttuvaa. Kylmemmissä savukaasukanavan osissa kiinteän tuhkan tarttuminen tapahtuu sintraantumalla. Kiinteästä tuhkasta voi tulla tarttuvaa kattilan kylmemmissä savukaasukanavan osissa, jos savukaasuissa on korkea rikkidioksidipitoisuus. Tällöin rikkidioksidi muodostaa happamia sulfaatteja, mitkä tekevät niistä erittäin tarttuvia. (Skrifvars et al. 1997)

10.2 Savukaasujen hiukkaset

Soodakattilan savukaasujen hiukkaset voidaan jakaa tulipesästä karanneisiin lipeäpisaroihin (carryover), keskikokoisiin hiukkasiin (ISP, Intermediate size particles) ja alkalihöyryistä kondensoituneisiin pienhiukkasiin (fume). (Salmenoja 2014)

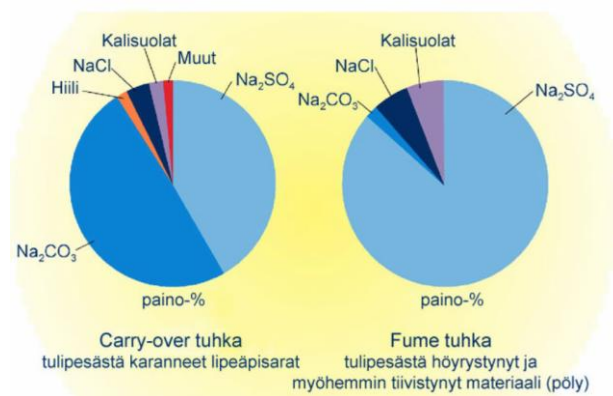
Carryover -hiukkaset ovat tulipesästä savukaasuvirtauksen mukana karanneita palaneita tai palavia hiukkasia. Carryover -hiukkaset ovat tyypillisesti 100 – 1000 µm kokoisia. Carryoverin määrään vaikuttaa olennaisesti pisarakoko. Pienet pisarat karkaavat

todennäköisemmin savukaasujen mukana lämmönsiirtopinnoille. Modernilla ilmajärjestelmällä varustetussa soodakattilassa carryover -hiukkasten määrä on 2 – 4 g/m³n. Carryoverin määrä on riippuvainen palamisilmajärjestelmästä sekä ilmojen syötöstä. Vanhempien soodakattiloiden carryoverin määrä on savukaasuissa 5 – 8 g/m³n, mikä johtuu tavanomaisemmasta palamisilmajärjestelmästä. Palavat carryover -hiukkaset sammuvat heti nokan jälkeen, koska savukaasujen lämpötila tipahtaa nopeasti. Tämä tarkoittaa, että hiiltä jää vielä palamatta carryover -hiukkasista niiden tarrauduttua lämmönsiirtopinnoille. Palamattomien carryover -hiukkasten suuri määrä voidaan havainnoida keittoputkiston lentotuhkasta, mikä aiheuttaa mustia pisteitä tuhkaan. Täysin palanneissa carryover -hiukkasissa soodakattilan nokan reduktiotaso on korkea ja sisältävät natriumsulfidia. Vaikka palaminen on tapahtunut aikaisessa vaiheessa, sulfidin muuttuminen sulfaatiksi on hidas reaktio carryover -hiukkasissa. Täysin palaneita carryover -hiukkasia voidaan esimerkiksi havainnoida nuohoimen suutinputkista, missä ne näkyvät punaisina tai vaaleanpunaisina pisteinä. Nykyaikaisissa korkean kuiva-aineen soodakattiloissa hiilipitoisuudet ovat todella matalia. Palaneen carryover -hiukkasen koostumus muistuttaa hapettunutta pohjasulaa. Carryover kerrostumat sisältävät pääasiassa natriumsulfaattia sekä natriumkarbonaattia. Kaliumia ja klooria carryover -hiukkaset sisältävät esimerkiksi vähemmän kuin alkalihöyryistä kondensoituvissa pienhiukkasissa. (Salmenoja 2014 & Vakkilainen 2005, 8-8)

Keskikokoiset hiukkaset (IPS) ovat carryover -hiukkasia pienempiä, mutta alkalihöyryistä kondensoituneita pienhiukkasia suurempia. Niiden koko on 1 – 100µm. IPS -hiukkasten muodostuminen ei ole kovin tarkkaan tunnettua, mutta niiden uskotaan muodostuvan tulipesässä pisaroiden palamisen sekä sulakeossa tapahtuvan koksipalamisen yhteydessä. Myös lämmönsiirtopinnoilta irtoavat pienet sintraantuneet fume -hiukkaset muodostavat IPS -hiukkasia. (Vakkilainen 2005, 8-8 – 8-9)

Fume -hiukkaset muodostuvat, kun tulipesässä höyrystyneet alkalit tiivistyvät savukaasujen viiletessä savukaasukanavassa. Toinen mekanismi hiukkasten tiivistymiseen on höyrystyneiden alkalien reaktiot keskenään, jolloin reaktiotuotteen höyrystymispiste on korkeampi kuin lähtöaineilla. Esimerkiksi natriumhydroksidi reagoi rikkidioksidin kanssa muodostaen natriumsulfaattia. Natriumsulfaatilla on korkeampi höyrystymispiste kuin rikkidioksidilla ja natriumhydroksidilla. Tiivistyneet alkalihöyry

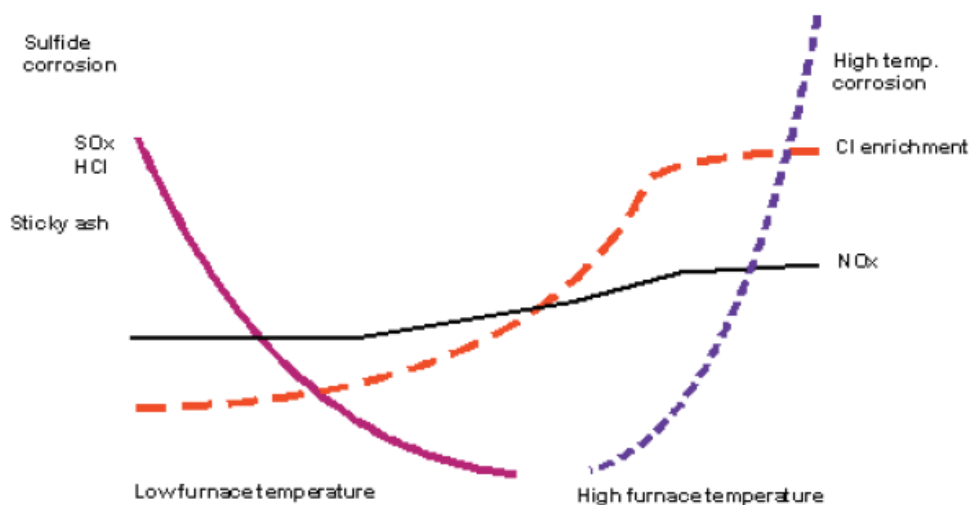
hiukkaset ovat tyypillisesti 0.5 – 1.0 µm. Tiivistynyt pöly (Fume) sisältää pääasiassa natriumsulfaattia ja natriumkarbonaattia. Natriumkarbonaatti pitoisuus on pienempi kuin carryover -hiukkasissa, mutta se sisältää enemmän kaliumin ja kloorin yhdisteitä. (Vakkilainen 2005, 8-6 & Salmenoja 2014) Kuvassa 21 on esitetty carryover ja fume tuhkan koostumuksia.



Kuva 21. Carryover- ja fume -tuhkan tyypillinen koostumus. (Knowpulp 2019)

10.3 Tulipesän alaosan toiminnan vaikutus likaantumiseen

Tulipesän alaosan toiminnalla on valtava merkitys soodakattilan likaantumiseen ja korroosioon. Tulipesän matalat lämpötilat kasvattavat TRS- ja rikkidioksidipäästöjä tulipesästä. Korkeat rikkidioksidipäästöt aiheuttavat happamien sulfaattien syntymistä, mitkä edesauttavat varsinkin ekonomaiserin likaantumista. Korkeat rikkipäästöt aiheuttavat tulipesän alaosassa korroosiota. Lämpötilan kasvaessa tulipesässä rikkidioksidipäästöt vähenevät, mutta samalla NO_x -päästöt ja kloorin rikastuminen savukaasuissa kasvaa. Kuumemmilla lämpötiloilla natriumin ja kloorin vapautuminen tulipesästä savukaasuihin kasvaa ja nostavat tiivistyvän pölyn määrää. Kuumen tulipesän seurauksena syntyvä natriumkarbonaatti tekee tuhkasta helposti irtoavan lämmönsiirtopinnoilta. Kloorin rikastumisen kasvaminen kasvattaa keittoputkiston tukkeutumista sekä tulistimien korroosiota. Kuvassa 22 on esitetty tulipesän lämpötilan vaikutus savukaasujen SO₂- ja NO_x-päästöihin sekä kloorin rikastumiseen. (Vakkilainen 2005, 9-11 – 9-12)



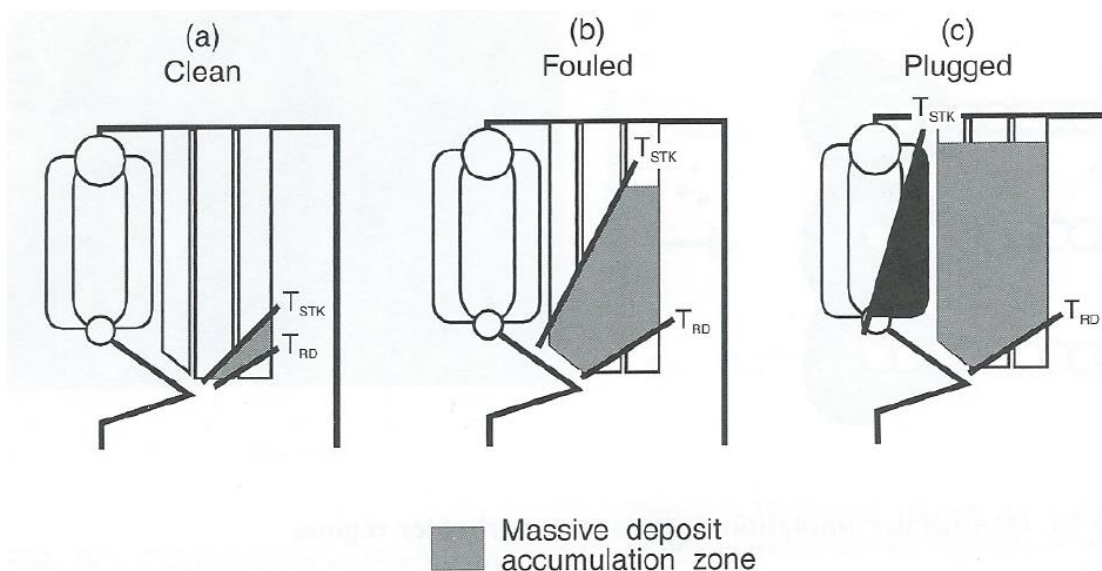
Kuva 22. Tulipesän lämpötilan vaikutus savukaasujen SO_2 - ja NO_x -päästöihin sekä kloorin rikastumiseen. (Vakkilainen 2005, 9-11)

10.4 Lämpöpintojen likaantuminen

10.4.1 Tulistimen likaantuminen

Tulistimien kerrostumat aiheutuvat savukaasujen mukana lämpöpintoihin iskeytyvistä carryover partikkeleista, jotka ovat osittain sulassa muodossa. Kerrostuman syntyminen ja paksuus on riippuvainen carryover -tuhkan sulamisominaisuuksista, joihin vaikuttaa carryover partikkelien koostumus sekä lämpötila. Lentotuhkan sulan määrän osuutta kuvataan lämpötilan T alaindeksillä. Ensisulamispisteessä T_0 tuhkan ensimmäinen partikkeli on sulassa muodossa. Lämpötilan kasvaessa sulan määrän osuus kiinteistä lisääntyy. Lämpötilan ollessa tarpeeksi suuri saavutetaan täydellinen sulamispiste T_{100} , jolloin tuhkan on täysin sulafaasissa. Tuhka alkaa tarttumaan lämmönsiirtopinnoille, kun sulafaasin määrän osuus kasvaa yli 15 %. Tätä lämpötilaa kutsutaan tahmalämpötilaksi T_{15} . Alemmissa lämpötiloissa tuhkapartikkelit kimpoavat pois lämmönsiirtopinnoista. Tuhkan saavuttaessa tahmalämpötilan T_{15} kerrostuman paksuus kasvaa niin pitkään, kunnes lämpötila nousee yli kuonautumislämpötilan T_{70} . Kuonautumislämpötilassa T_{70} tuhkan sulafaasin osuus saavuttaa 70 %, jolloin kerrostuman ulkopinnassa oleva tuhka alkaa valumaan pois ja kerrostuma ei enää kasva paksuutta. (Skrifvars et al. 1997)

Verhoputkiston ja ensimmäisten tulistimien alaosassa savukaasujen lämpötila on yli 800 °C, joka on enemmän kuin tuhkan kuonautumislämpötilan T_{70} . Näissä lämpötiloissa carryover partikkelit ovat pääasiassa sulafaasissa, jolloin tuhka muodostaa putkien päälle maksimissaan noin 10-15mm paksun kovan kerroksen. Ensimmäisten tulistimien keskikohdassa savukaasut ovat jo jäähtyneet noin 700 – 800 °C, jolloin tuhkan kuonaantumislämpötila saavutetaan ja tuhka alkaa kiinnittymään tulistimen pinnoille. Kerrostuman kasvaessa lämmönsiirto huononee, jolloin savukaasujen lämpötila nousee kasvattaen samalla tuhkan tahma-alueen kokoa. Kerrostuma voi pahimmassa tapauksessa tukkia kokonaan tulistimien välit, jos nuohous on tehotonta tai väärälle alueelle kohdistettua. Tulistimien pitkälle edennyt likaantuminen voi johtaa keittoputkiston tukkeutumiseen, jos savukaasujen lämpötila nousee keittoputkiston sisääntulossa tahma-alueelle. (Adams et al. 1997, 267 – 268) Keittoputkiston sisääntulolämpötila saa maksimissaan olla 625 – 700 °C, mutta korkeilla kalium- ja klooripitoisuuksilla on suositeltua pitää lämpötila 565 – 625°C (Vakkilainen 2005, 6-15) Kuvassa 23 on havainnollistettu tulistimien likaantumisesta johtuvaa tahma-alueen kasvamista ja tukkeutumista.



Kuva 23. Tulistimien likaantumisesta johtuva tahma-alueen kasvaminen ja tukkeutuminen. (Adams et al. 1997, 268)

Tuhkan sulamiskäyttäytymiseen vaikuttaa oleellisesti tuhkan vierasaineet, joista merkittävimmät ovat kloori- ja kaliumpitoisuus. Klooria ja kaliumia tulee

kemikaalikiertoon käytettyjen vesien, raaka-aineiden sekä ostokemikaalien mukana. Ne rikastuvat kemikaalikiertoon liukoisuutensa vuoksi. Klooria tulee pääasiassa puusta sekä valkaisussa käytetyistä klooriyhdisteistä, jos valkaisun vesiä kierrätetään massan pesussa ja pesuvedet päätyvät kemikaalikiertoon. Kalium on pääsääntöisin peräisin puusta. Esimerkiksi lehtipuussa on paljon kaliumia. Puiden hakkuupaikalla on myös merkitystä kaliumin määrään. Kaliumin ja kloorin rikastumiseen kemikaalikierrrossa on vaikuttanut jätevirtojen tehokas palautus kemikaalikiertoon. Klooripitoisuus avoimessa prosessissa vaihtelee 0.1 – 0.5 % välillä kuiva-aineesta ja vastaavasti kaliumpitoisuus 1 – 3 % välillä kuiva-aineesta. (Vakkilainen 2002 & Raiko et al. 2002, 552)

Kalium ja kloori vaikuttavat oleellisesti tuhkan sulamiskäyttäytymiseen. Kalium ja kloori höyrystyvät kaasutilaan tulipesän alaosassa niiden ominaisen korkean höyrönpaineen avulla. Kaliumin ja kloorin höyrönpaine on selvästi natriumia sekä muita yhdisteitä korkeampi, joten ne rikastuvat savukaasuissa lentotuhkaan. Tyypillisesti kalium saa rikastumiskertoimeksi 1 – 2.5 ja kloori vastaavasti 0.3 – 6. Rikastumiskertoimen laskeminen kloorille ja kaliumille on esitetty seuraavissa yhtälöissä 5.1 ja 5.2. (Vakkilainen 2002)

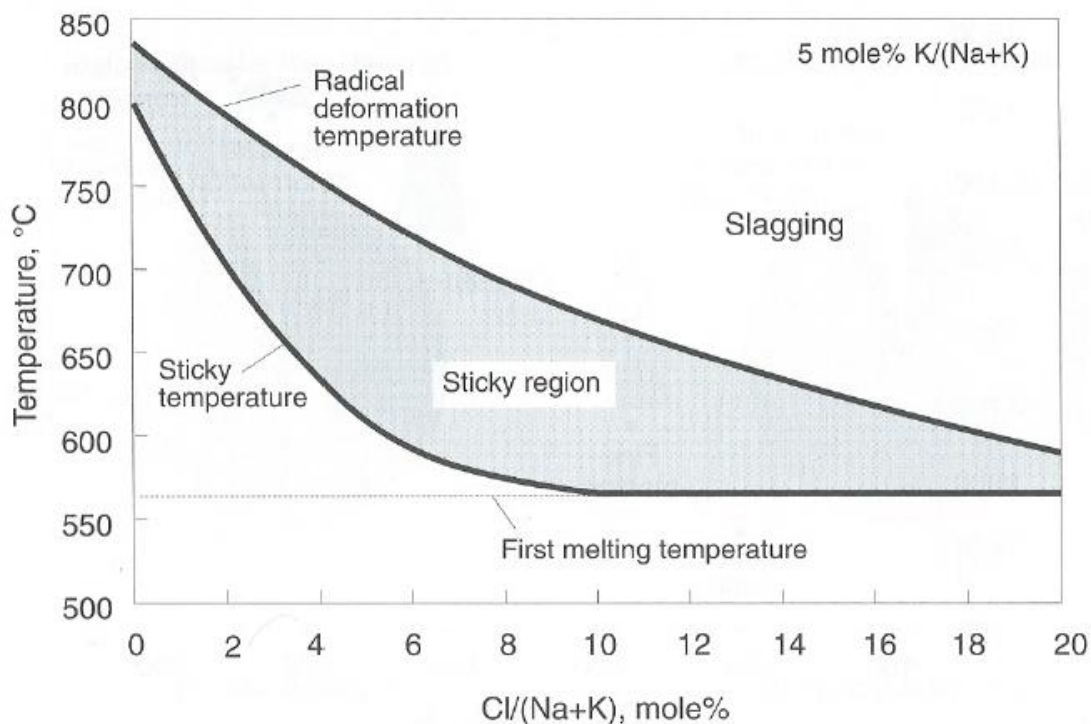
$$Rikastumiskerroin_{Cl} = \frac{\frac{Cl_{ESP}}{K_{ESP} + Na_{ESP}}}{\frac{Cl_{BL}}{K_{BL} + Na_{BL}}} \quad (5.1)$$

missä

Cl_{ESP}	kloorin moolimäärä sähkösuodin tuhkassa [mol]
K_{ESP}	kaliumin moolimäärä sähkösuodin tuhkassa [mol]
Na_{ESP}	natriumin moolimäärä sähkösuodin tuhkassa [mol]
Cl_{BL}	kloorin moolimäärä mustalipeässä [mol]
K_{BL}	kaliumin moolimäärä mustalipeässä [mol]
Na_{BL}	natriumin moolimäärä mustalipeässä [mol]

$$\text{Rikastumiskerroin}_K = \frac{\frac{K_{ESP}}{K_{ESP} + Na_{ESP}}}{\frac{K_{BL}}{K_{BL} + Na_{BL}}} \quad (5.2)$$

Korkea klooripitoisuus laskee olennaisesti tuhkan tahma- sekä kuonaantumislämpötilaa. Vastaavasti korkea kaliumpitoisuus laskee pääasiassa ensisulamispistettä. Matalilla kalium- ja klooripitoisuuksilla tahma- ja kuonaantumislämpötilan erot ovat pieniä, jolloin tahma-alue tulistimilla on kapea. Kloori- ja kaliumpitoisuuden noustessa tahma- ja kuonaantumislämpötilan ero myös kasvaa, jolloin tahma-alueen koko suurentuu. Kloori- ja kaliumpitoisuuksien nousu siirtää myös tahma-aluetta lähemmäksi keittoputkiston sisääntuloa, jolloin tukkeutumiskasvu primääritulistimilla sekä keittoputkistossa. Korkeat kloori- ja kaliumpitoisuudet nostavat kuumakorroosion riskiä kuumimmissa tulistimissa. Tällöin tulistinputken pinta pääsee suoraan kosketukseen sulafaasin kanssa. Sulan kosketus aiheuttaa pinnan oksidikerroksen liukenemisen. (Adams et al. 1997, 259 – 260 & Raiko et al. 2002, 552 - 553) Kuvassa 24 on esitetty tuhkan klooripitoisuuden vaikutusta tahma- ja kuonaantumislämpötiloihin.



Kuva 24. Tuhkan klooripitoisuuden vaikutusta tahma- ja kuonaantumislämpötiloihin. Sekä lämpötilojen vaikutusta tahma-alueen kokoon. (Adams et al. 1997, 258)

10.4.2 Keittoputkiston ja ekonomaiserien likaantuminen

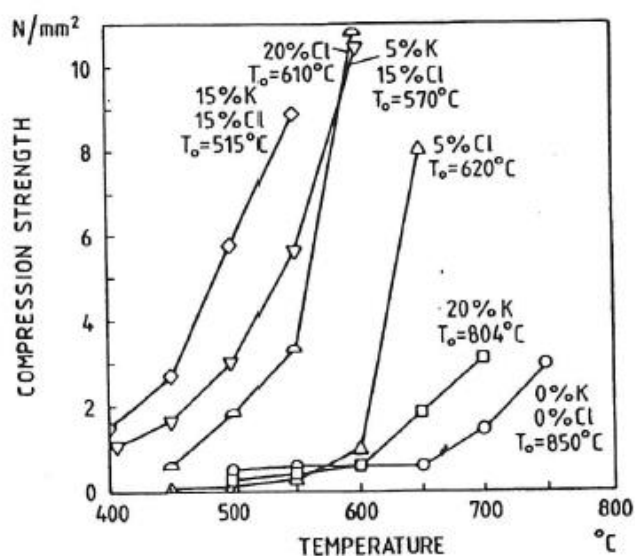
Keittoputkiston ja ekonomaiserin likaantuminen aiheutuu pääasiassa tiivistyneen kiinteän pölyn sintraantumisesta lämpöpinnoille. Keittoputkisto on nykyaikaisissa soodakattiloissa kriittisimpiä osia likaantumislle. Varsinkin tehtaiden sulkeutuneet kemikaalikierrot aiheuttavat keittoputkiston likaantumista moderneissa soodakattiloissa. Kohonneet klooripitoisuudet likaannuttavat tehokkaammin tulistimia, jolloin savukaasujen lämpötila nousee samalla keittoputkiston sisääntulossa. Keittoputkistolle ominainen tulistimia tiheämpi putkiväli on herkkä likaantumislle. Yleisin käytössä oleva keino poistaa klooria kierrosta sähkösuodintuhkan ulosotto. (Vakkilainen 2005, 8-2, 8-22)

Carryover -tuhkan määrä savukaasuissa vähenee savukaasuvirtauksen mukana tulistimien ja keittoputkiston läpi mentäessä. Keittoputkistolla tuhka koostuu myös tiivistyneestä tuhkasta carryover -tuhkan lisäksi. Ekonomaiserilla tuhka on jo pääsääntöisesti tiivistynyttä pölyä. (Salmenoja 2014)

Sintraantuminen on prosessi, missä kiinteät partikkelit tarttuvat lämmönsiirtopinnoille muodostaen tiiviin ja kovan pinnan. Sintraantumista voidaan ehkäistä tehokkaalla nuohouksella ennen kuin kasaantunut tuhka kovettuu. Tuhkapartikkelit sintraantuvat ja kovettuvat vaikeasti poistettavaksi kerrokseksi kahdella eri mekanismilla. Sintraantuminen tapahtuu, kun partikkelit pääsevät kosketuksiin toisiinsa ja muodostavat kaulan toistensa välille. Kaula muodostuu partikkelien välille, kun natriumkloridi höyrystyy partikkelista ja uudelleen lauhtuu, tai kiinteän tilan diffuusion avulla. Partikkelien välillä oleva kaula jatkaa kasvamista, kunnes ne muodostavat yhtenäisen partikkelin. Sintraantumista muodostuvaa kerrostumaa aiheuttavat carryover -hiukkaset, keskikokoiset hiukkaset ja alkalihöyryistä tiivistyneet pienhiukkaset. Kaikkien näiden partikkelien koostumus ja ominainen sintraantumiskäyttäytyminen ovat erilaista, mikä tekee haastavaksi ymmärtää soodakattilan sintraantumiskäyttämistä. (Vakkilainen 2005, 8-14)

Sintraantumiskäyttäytymiseen vaikuttavat oleellisesti lämpötila sekä tuhkan koostumus. Varsinkin tuhkan kloori- ja kaliumpitoisuudella on vaikutus sintraantumiseen. Esimerkiksi puhdas natriumsulfaattia ja natriumkarbonaattia seos alkaa sintraantumaan

vasta 650 °C:ssa. Mutta kun seokseen lisätään suuria määriä kaliumia ja klooria, sintraantuminen alkaa jo 400 °C:ssa. Myös tuhkan natriumkarbonaatti- ja natriumsulfaatti-seos suhteella on merkitys sintraantumiskäyttäytymiseen. Natriumsulfaatti sintraantuu voimakkaammin kuin natriumsulfaatin ja natriumkarbonaatin seos. (Skrifvars et al. 1997) Kloorin ja kaliumin määrän vaikutusta sintraantumislämpötiloihin sekä kerrostuman kovuuteen on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Kaliumin ja kloorin määrän vaikutus sintraantumislämpötiloihin sekä kerrostuman vahvuuteen. (Skrifvars et al. 1997)

Ekonomaiserin likaantuminen aiheutuu pääasiassa matalasta tuhkan pH:sta, mikä aiheutuu matalista tulipesän alaosan lämpötiloista. Happamat sulfaatit tekevät lämmönsiirtopinnoille vaikeasti poistettavan kerroksen, mikäli tuhkan pH:n arvo laskee alle 10. Nykyaikaisilla korkeita polttoaineiden kuiva-aineita polttavilla soodakattiloilla tämä ei aiheuta juuri ongelmia. (Vakkilainen 2005, 8-3)

10.5 Likaantumisen havainnointi

Soodakattilan likaantumisen kehittymistä voidaan havainnoida kattilassa olevien erilaisten mittareiden avulla. Savukaasukanavassa olevien lämpötilamittareiden avulla voidaan ennustaa tulistimien, keittoputkiston sekä ekonomaiserien likaantumista. Savukaasun lämpötilat nousevat, kun lämpöpinnat likaantuvat ja lämmönsiirto huononee. Likaantumisen tarkkaa kohtaa on vaikea ennustaa mittauspisteiden rajallisen määrän

takia. Eri tulistimien välissä harvoin on omia mittareita käytössä, jonka takia ei voida päätellä, mikä tulistin on tukkeutumassa. Painemittauksilla voidaan ennustaa keittoputkiston sekä ekonomaiserien likaantumista. Lämmönsiirtopintojen läpi menevän savukaasun painehäviöllä voidaan ennustaa likaantumista, mutta painehäviö pitää suhteuttaa aina kattilan senhetkiseen höyryn tuotantoon. Tulistimissa savukaasujen paineeron perusteella ei voida likaantumista ennustaa, koska painehäviöt ovat aina alle 10 Pa. Soodakattilan ylösajossa painehäviöt kasvavat keittoputkistossa ja ekonomaisereilla muutaman päivän ajan ennen kuin ne saavuttavat stabiilin tilan. Tästä eteenpäin painehäviön kasvaminen voi indikoida likaantumista. Tulistimien likaantumista voidaan ennustaa höyryn lämpötila mittauksilla. Nämä höyryn lämpötilat ovat luotettavia ja helppoja mitattavia. Tasaisella höyryvirtauksella höyryn lämpötilan lasku merkitsee suoraan lämpöpinnan likaantumiseen ja heikentyneeseen lämmönsiirtoon. Myös ruiskutusveden virtaus höyryn jäähtymiseen tulistimien välillä on kelpo mittari ennustamaan tulistimien likaantumista. Ruiskutusvedellä höyryn lämpötilaa lasketaan tulistusvaiheiden välillä, millä saadaan pidettyä päähöyryn tulistuslämpötila mahdollisimman vakiona. Tulistimen likaantuessa ruiskutusveden tarve vähenee, jolloin ruiskutusveden virtauksen pieneneminen indikoi tulistimen likaantumisesta. Ruiskutusveden virtaus saavuttaa stabiilin tilan noin kahden viikon päästä soodakattilan ylösajosta. Alussa lämmönsiirtopinnat ovat täysin puhtaat ja ruiskutusveden virtaus on suurta, mutta noin kahden viikon päästä ylösajosta höyryn lämpötilat ja ruiskutusveden virtauksen heittely tasoittuu. (Vakkilainen 2005, 8-5)

10.6 Likaantumisen estäminen

Soodakattilan lämmönsiirtopintojen likaantuminen voi johtaa tukkeutumiseen, mikä voi johtaa soodakattilan kuorman tiputukseen tai ennenaikaiseen pesuseisokkiin. Likaantumista voidaan ehkäistä mm. optimaalisella tulipesän toiminnalla, tehokkaalla nuohouksella sekä poltettavan lipeän koostumuksen hallinnalla. Tukkeutuman tai likaantumisen poistamiseen johtava suunnittelematon seisokki voi rajoittaa koko tehtaan tuotantoa ja johtaa suuriin tuotannon menetyksiin sellun, kartongin tai paperin tuotannossa tehtaan mukaan.

10.6.1 Soodakattilan nuohous

Nuohousjärjestelmä on tärkein soodakattilan likaantumisen estämisyjärjestelmä, millä estetään kattilan lämmönsiirtopinnoille syntyvän kerroksen syntymistä ajojaksojen aikana. Soodakattilan nuohousjärjestelmä koostuu useista nuohoimista, joilla poistetaan korkeapaineisella höyry suihkulla kerrostumia lämmönsiirtopinnoista. Nuohoustarpeen määrä on kattilasta riippuvainen, mutta pääasiassa siihen vaikuttaa savukaasujen mukana kulkevan tuhkan määrä sekä sulamiskäyttäytyminen. Tehoton nuohous aiheuttaa kattilan likaantumisen, mikä voi aiheuttaa savukaasukanavan kuroutumista umpeen lämmönsiirtopinnoilla johtaen suunnittelemattomaan pesuseisokkiin. (Tran et al. 2015)

Yksittäinen höyrynuohoin koostuu sähkömoottorista, vaihteistosta, kulmaventtiilistä, suutin- ja tuloputkesta. Sähkömoottorilla siirretään ensiöhammasvaihteiston avulla nuohoimen suutinputki etenevään ja pyörivään liikkeeseen kattilan sisälle. Suutinputken lähdettyä liikkeelle samalla avautuu mekaaninen kulmaventtiili, joka laskee höyryn tuloputken kautta suutinputkelle. Suutinputken päässä oleva suutin, koostuu kahdesta suutinaukosta, mistä höyry puhalletaan lämmönsiirtopintojen väliin. Nuohoimen päästyä täysin kattilan sisälle sähkömoottorin pyörintä suunta vaihtuu ja nuohoin alkaa tulemaan pois kattilasta ulos pyörien vastaiseen suuntaan kuin mennessä. Nuohoimen saapuessa takaisin lähtötilanteeseen liikkuminen loppuu ja mekaaninen kulmaventtiili menee samalla kiinni. Suutinputken painetta säädellään kulmaventtiilin avulla, jolloin tyypillisesti suutinputken paineena pidetään 16 – 22 MPa. Kattilan nuohousjärjestelmää ohjataan automaattisten sekvenssien avulla, jolloin nuohoimet ajavat jatkuvasti normaalin käytön aikana tietyn reseptin mukaan. (Knowpulp 2019)

Soodakattilan lämpöpintojen puhtaana pysymistä voidaan estää kehittämällä nuohousta. Nuohouksen tehokkuutta voidaan parantaa lisäämällä nuohoimia alueille, missä likaantuminen aiheuttaa tukkeutumista. Liian harvaksen asennetut nuohoimet luovat katvealueita, joihin nuohous ei tehoa. Nuohoimien suuttimien vaihto modernimpaan malliin parantaa nuohoustehokkuutta. Nykyaikaiset kehittyneet täydellisesti laajenevat suurteho suutinpäät parantavat puhdistustehoa samalla höyryn kulutuksella verrattuna vanhoihin suutinmalleihin. Kehittämällä nuohousohjelmaa voidaan parantaa kattilan puhtaanapysymistä. Nykyaikaiset älykkäät nuohousjärjestelmät tunnistavat ja luovat parhaat nuohoinsekvenssit kattilan puhtaana pysymisen kannalta. Älykkäät järjestelmät

käyttävät hyödykseen mm. veden, höyryn ja savukaasujen mittaustietoja lämmönsiirtopintojen yli, joiden pohjalta likaantumisen paikkaa voidaan ennustaa ja saadaan siirrettyä nuohouksen painopistettä likaantuvalla alueelle. (Tran et al. 2015 & Vakkilainen 2005, 8-23)

10.6.2 Carryoverin ja palamisen hallinta

Tulipesän toiminnan parantamisella voidaan vähentää carryover -hiukkasten kulkeutumista tulistimille. Carryoverin määrän kasvu aiheuttaa likaantumista kahdella tavalla. Carryover -hiukkasten määrän kasvu nostaa sulfidipitoisuutta, joka laskee rajusti tuhkan sintraantumislämpötilaa. Myös carryoverin määrän kasvu indikoi tulistimien kerrostuman muodostumiseen, mikä voi johtaa kasvaneeseen likaantumiseen. Carryoverin määrää voidaan vähentää parantamalla lipeän ruiskutusta tai ilman syöttöä. Laskemalla savukaasujen lämpötilaa ennen lämmönsiirtopintoja saadaan vähennettyä syntyvän kerrostuman lujutta. Tehokkain tapa tähän on vähentää soodakattilan kuormaa. Päivittämällä kattilan ilmajärjestelmä nykyaikaiseksi vertikaali-ilmajärjestelmäksi saadaan samalla laskettua savukaasujen lämpötilaa. Myös ilmojen sekoittuminen paranee ja carryoverin määrä vähenee. (Vakkilainen 2005, 8-8, 8-23)

10.6.3 Mustalipeän ominaisuudet

Mustalipeän ominaisuuksilla on vaikutusta likaantumisen syntymiseen. Likaantumista voidaan vähentää nostamalla lipeän kuiva-ainepitoisuutta, vähentämällä kloorin ja kaliumin määrää mustalipeässä tai alentamalla sulfiditeettia. Kloori- ja kaliumin määrän kasvu mustalipeässä aiheuttaa moni eri ongelmia, kuten tahma- ja kuonaantumislämpötilan laskua, tuhkan sintraantumisen kasvua sekä korroosio-ongelmia tulistinpinnoilla. Sulfiditeettia voidaan hallita lisäämällä tai poistamalla lipeäkierrosta varantoja. Nykyaikaisissa sellutehtaissa kemikaali- ja vesikierrot ovat niin sulkeutuneita, että rikin määrä ja sulfiditeetti nousee luonnostaan. Sellutehtaissa sulfiditeettia madalletaan tyypillisesti soodakattilan sähkösuodin tuhkan ulosotolla tai lisäämällä keittämön happivaiheeseen natriumhydroksidia. Sähkösuodintuhkan ulosotto on myös keino vähentää kemikaalikierrosta sekä epäsuorasti mustalipeästä haitallisia kaliumia ja klooria. Sähkösuodin tuhka koostuu pääasiassa tiivistyneestä pölystä, missä kalium ja kloori ovat rikastuneet suhteessa mustalipeään. Klooria ei tarvitse yleensä poistaa, jos

klooripitoisuus mustalipeän kuiva-aineesta on alle 0.5 %. (Vakkilainen 2005, 8-22 & Knowpulp 2019)

10.6.4 Vesipesu ja kylmänuohous

Soodakattilan vesipesussa soodakattila joudutaan ajamaan alas ja keskeyttämään tuotanto, mikä voi johtaa sellutehtaan täydelliseen tuotannonkatkokseen. Ennen vesipesun aloittamista soodakattilan tulipesän täytyy antaa vielä jäähtyä. Vesipesu suoritetaan soodakattilassa erillisellä pesupumpulla, jolla syöttövesisäiliöstä pumpataan kuumaa vettä nuohoushöryjärjestelmään. Vesi ajetaan nuohoimien läpi lämmönsiirtopinnoille nuohoussekvenssien avulla, kunnes kattilan lämpöpinnat ovat puhtaat. Kattilan alasajo, jäähtyminen, vesipesu ja ylösajo keskeyttää tuotannon vähintään pariksi vuorokaudeksi. (Stora Enso 2019a)

Soodakattilan kylmänuohouksessa (chill & blow) kattilan lipeän poltto keskeytetään hetkellisesti ja siirrytään polttamaan apupolttoaineita startti- ja kuormapolttimoista. Pelkillä apupolttoaineilla savukaasujen lämpötila laskee, jolloin syntyneet kerrostumat kokevat lämpöshokin. Lämpöshokit hajottavat kerrostumia ja tekevät niistä helposti irrotettavia nuohouksen avulla. Kylmänuohous tehoaa ainoastaan tulistimien alueelle, jossa kerrostumat ovat kovia ja herkempiä lämpötilan vaihtelusta aiheutuvalla lämpölaajenemiselle. Keittoputkiston ja ekonomaiserien alueella kerrostumat ovat huokoisempia, ja eivät ole alttiita niin suurelle lämpöshokille. (Adams et al. 1997, 276 – 277)

11 SOODAKATTILAN OPTIMOINTI

Soodakattilaa ohjaavan automaatiojärjestelmän perustason säädön tavoitteena on ylläpitää mahdollisimman stabiilina tulipesän olosuhteet, jotta sulakeossa tapahtuva rikin reduktion taso on mahdollisimman korkea. Myös automaation tehtävänä on huolehtia soodakattilan turvallisesta ajamisesta sekä häiriötilanteiden ilmaantuessa korjaus tapahtuu mahdollisimman nopeasti. (Knowpulp 2019)

Optimoinnin tavoitteena on löytää palamisprosessin vakiotila, jossa soodakattilan käyttö on turvallista, hyötysuhteet ovat korkeita, päästöjen määrät ovat minimissä ja nuohouksen käyttö on optimaalista. Korkea tulipesän alaosan lämpötila nostaa reduktiota, vähentää rikkipäästöjä, tehostaa palamista samalla vähentäen hiilen määrää keossa sekä helpottaa nuohousta, koska tuhkan koostumus on helpommin irtoavaa lämmönsiirtopinnoista. Tulipesän vertikaalisen lämpötilaprofiilin korkein arvo siirtyy tulipesässä alemmaksi, kun säteilylämmönsiirto tehostuu ja tulipesän sekä savukaasujen loppulämpötila alenee. Samalla myös lämpöhyötysuhde paranee kattilassa. Kuumempi tulipesän alaosa mahdollistaa myös pisarakoon kasvattamisen, jolloin carryoverin määrä laskee samalla. (Knowpulp 2019)

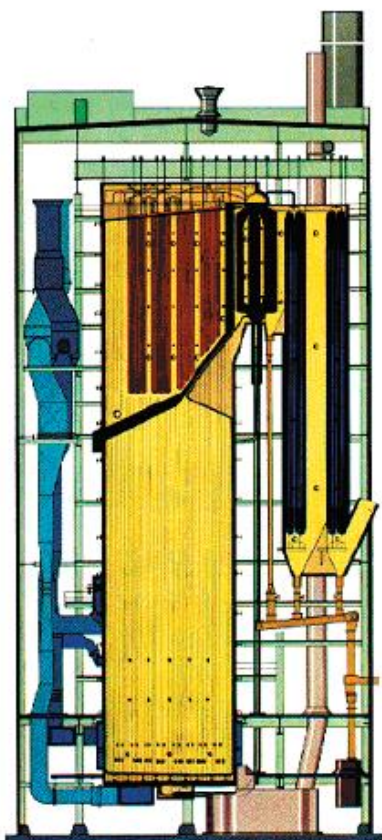
12 ONGELMAN KUVAUS

Työssä tutkitaan Stora Enso Oy:n Imatran tehtaiden vanhemman ja pienemmän soodakattilan optimaalisia ajotapoja eri kuormilla. Soodakattilan ongelmana on jatkuvat SO₂ -päästöt tulipesästä. Soodakattiloiden yhteinen ympäristölupa NO_x -päästöjen osalta kiristyi vuonna 2019 alussa, mikä tekee haastavammaksi pysyä uusissa ominaispäästörajoissa. Tulipesästä karkaava rikkidioksidi muuttuu rikkitrioksidiksi, joka muuttaa sulfaattipölyn happamaksi natriumvetysulfaatiksi aiheuttaen kattilan keittoputkiston sekä ekonomaiserien tukkeutumista ja korroosiota. SO₂-päästöt myös nostavat savukaasupesurin natriumhydroksidin kulutusta. Myös suurena ongelmana oli soodakattilan tulistinalueen tukkeutuminen, mikä aiheutti tuotannon rajoittamista 2018 kesän aikana. Tavoitteena on löytää eri kuormille paras mahdollinen ajotapa, missä tulipesän toiminta mahdollisimman tehokasta. Tehokkaassa palamisessa sulakeon lämpötila on korkea, pisarakoko sopivan on suuri, yli-ilman määrä on mahdollisimman pieni ja ilman syöttö on tehokkaasti vaiheistettu. Tehokas palaminen ehkäisee likaantumisen johtuvaa tukkeutumista, milloin soodakattilan käytettävyys pysyy korkeana huoltoseisokkien välissä. Käytettävyyttä ja päästöjen hallintaa pyritään parantamaan työssä minimoimalla carryoverin määrä, SO₂ - ja NO_x -päästöt. Myös tehokkaasti toimivan soodakattilan reduktioaste on korkea, joka pyritään saamaan nostettua saaduilla muutoksilla.

12.1 Soodakattila 5 (SK5)

Tutkittava soodakattila on vuonna 1987 käyntiin lähtenyt A. Ahlström Oy:n valmistama kaksilieriörakenteinen soodakattila. Soodakattila on modernisoitu myöhemmin yksilieriökattilaksi. Soodakattilan polttokapasiteetti on suunniteltu normaalilla kuormalla 1500 tka/d ja suurin jatkuva kuorma 1700 tka/d. Soodakattilan tuorehöyryn arvot ovat 70 bar ja lämpötila 480 °C. Höyryn tuotto 1500 tka/d kuormalla on noin 58 kg/s.

Soodakattila 5 on edustaa vanhaa 1980 -luvun muotoilua, jota voidaan pitää soodakattiloiden kolmantena sukupolvena. Tyypillistä kolmannen sukupolven kattiloissa on kolmitasoinen ilmajako, jolla pyrittiin saamaan kuumempi tulipesä ja samalla rikkipäästöt aikaisempaa sukupolvea pienemmäksi. (Vakkilainen 1996) Kuvassa 26 on havainnekuva tutkittavasta soodakattilasta.



Kuva 26. Havainnekuva tutkittavasta soodakattilasta. (Vakkilainen 2005, 2-5)

13 SOODAKATTILAN SÄÄDETTÄVYYDEN HAASTEET

Tässä kappaleessa esitellään kyseisen soodakattilan säädettävyyteen rajoittavia tekijöitä sekä koeajoissa huomattuja ongelmia.

13.1 Ilmajako

Kattilan ilmajako edustaa sen ajan vanhaa horisontaalista ilmajakoa, joka eroaa nykypäivän trendeistä. Modernissa ilmajakoissa sekundääri- sekä tertiääri-ilmataso jaetaan useampaan tasoon (vertikaali-ilmajako), millä pyritään vaiheistaa polttoa tehokkaammin sekä välttää savukaasujen kanavoitumisesta johtuva lipeäpisaroiden karkailu tulipesästä. Nykyaikaisissa ilmajärjestelmissä ilmasuuttimet pyritään sijoittamaan lomittain etu- sekä takaseinille lukuunottamatta primääri-ilma-aukkoja, jotka rakennetaan nykyään myös joka seinälle.

Soodakattilassa palamisilma syötetään kolmesta eri tasosta: primääri-, sekundääri- sekä tertiääritasosta. Primääri-ilma aukot sijaitsevat pohjalta 1.2 metrin korkeudessa. Primääri-ilmasuuttimia on kaikilla kattilan seinillä yhteensä 96 kappaletta, joista joka seinällä on kolmen suuttimen sarjoja yhteensä kahdeksan kappaletta. Sekundääri-ilma-aukot sijaitsevat pohjalta 2.5 metrin korkeudessa ja ilmasuuttimia on alun perin yhteensä 44 kappaletta kattilan kaikilla seinillä, mutta ilma-aukkoista on tukittu kaksi kappaletta joka seinältä. Tällä on pyritty parantamaan sekundääri-ilmojen tunkeutuvuutta. Tertiääri ilma aukot sijaitsevat 7 metrin korkeudessa ja ilmasuuttimia on yhteensä yhdeksän kappaletta kattilan sivuseinillä. Oikean seinän keskimäinen ilmasuutin on valjastettu sekoitussäiliön hönkien polttoon. (Stora Enso 2019a)

Nykyisten primääri-ilma-aukkojen suuri määrä ja pieni koko vaikeuttaa ilmamäärän säätelyä. Primääri-ilmamäärää ei voi pudottaa alle $17 - 18 \text{ Nm}^3/\text{s}$ riippuen kattilan kuormasta, koska kanavapaineet laskevat liian alhaiseksi matalammalla virtauksella. Tarpeeksi suurella kanavapaineella pyritään varmistamaan primääri-ilman tunkeutuvuus kekkoon sekä suutin aukkojen puhtaana pysyminen. Koeajoissa turvallisena raja-arvona pidettiin noin 0.9 kPa.

Tertiääri-ilmoissa rajoittavaksi tekijäksi muodostuu korkeat kanavapaineet suurilla ilman virtauksilla. Tertiääri-ilman määrää ei voida nostaa yli $15 \text{ Nm}^3/\text{s}$, koska suuremmilla

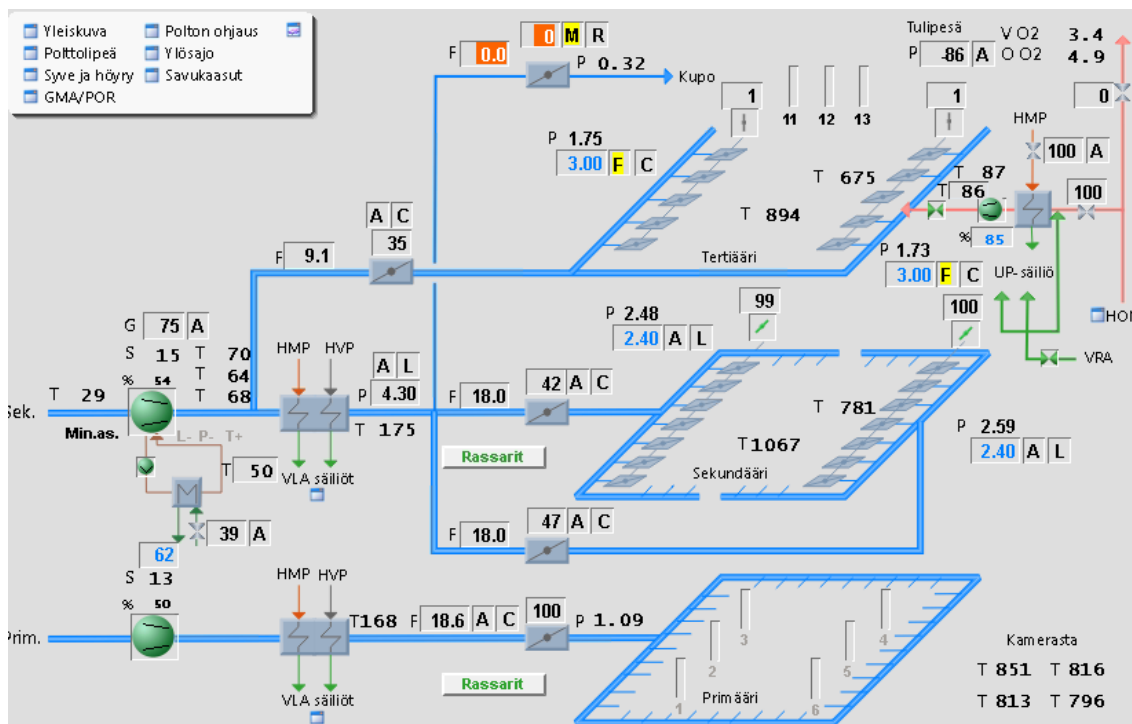
virtauksilla kanavan paine nousee kiihtyvästi yli 3.5 kPa. Tertiääri-ilman määrässä on hyvä jättää väljyyttä, koska poltonohjauksen nopea happikorjaus lisää tarvittaessa tertiääri-ilmaa savukaasujen CO -pitoisuuksien noustessa.

Yhtenä suurimmista haasteista kattilan ilmoja säätäessä on jumiutuneet nopeuspellit. Primääri- ja sekundääri-ilmasuuttimien nopeuspelleistä on noin 20 – 30 % jämähtänyt tiettyyn asentoon. Jumiutuneiden nopeuspeltien takia erilaisia ilman syöttömalleja ei pystytty kokeilemaan. Koeajoissa nopeuspeltejä ohjattiin pelkästään kanavapaineiden mukaan, jolloin pyrittiin tasaisesti sulkemaan tai avaamaan peltejä symmetrian ylläpitämiseksi.

Soodakattilan sivuseinällä olevat sekundääri- ja tertiääri-ilmat sekä jumissa olevat ilman nopeuspellit vaikeuttavat symmetrisen palamisen saavuttamista tulipesässä. Kyseiselle soodakattilalle on tyypillistä, että palaminen tapahtuu toispuoleisesti ja nykyisellä ilmajärjestelmällä symmetrian saavuttaminen on mahdotonta. Epäsymmetrinen palaminen voidaan huomata esimerkiksi savukaasujen vasemman ja oikean seinän lämpötilamittausten eroista tulistimien jälkeen.

13.2 Palamisilmapuhaltimet ja ilmakanavisto

Kattilassa on yhteensä kaksi palamisilmapuhallinta. Primääri-ilmoille on oma puhallin, mutta sekundääri-ilmalle sekä tertiääri-ilmalle on yhteinen puhallin. Kuvassa 27 on havainnollistettu nykyistä ilmajärjestelmää.



Kuva 27. Palamisilmojen hallinta DCS-järjestelmässä.

Sekundääripuhaltimen jälkeinen ilma jaetaan sekundääri- ja tertiääritasolle kanavissa olevien säätöpeltien avulla, millä säädellään molempien ilmatasojen virtausta. Sekundääri-ilma esilämmitetään vielä ennen polttoon syöttämistä. Molempien ilmatasojen suuttimien paineita säädellään vielä aukko-kohtaisilla nopeuspelleillä. Yhden nestekytkimellä säädettävän puhaltimen ja monen eri säätävän säätöpellin yhdistelmä tekee vaikeaksi tarkan ja tasaisen ilman syötön varsinkin tertiäärikanavaan. Ilman kokoonpuristuvuuden ominaisuuden takia pelleillä säätö ei ole stabiilia, mikä myös vaikeuttaa tulipesän hallintaa. Sekundääripuhaltimen täysi kapasiteetti on noin $54 \text{ Nm}^3/\text{s}$, mikä vaikeuttaa suurilla kuormilla kattilan ilmajaon säädettävyyttä.

13.3 Polttolipeän laatu

Imatran tehtaiden kemikaalien talteenotto käsittelee kolmen erilaisen kuitulinjan pesulipeät. Kaukopäässä sijaitsevat mänty- sekä koivusellua tuottavat jatkuvatoimiset vuokeittimet. Tainionkoskella sijaitsee valkaisuamatonta mäntysellua tuottava eräkeittäjä. Tainionkosken sekä Kaukopään mäntylinjan pesulipeät ajetaan samaan pesulipeä säiliöön EPE1, kun taas Kaukopään koivulinjan pesulipeät ajetaan omaan pesulipeäsäiliönsä EPE2. Molemmista pesulipeä säiliöstä pesulipeä syötetään vielä molempien haihduttamojen omaan laihaan mustalipeäsäiliöön (HO5 EMU ja HO6 EMU), jossa kaikkien kolmen kuitulinjan pesulipeät sekoittuvat. Kuitulinjojen pesulipeiden suhde laihaan mustalipeässä riippuu kuitulinjojen ajovauhdeista. Häiriötilanteita varten kaikkien kolmen kuitulinjan pesulipeää voidaan tarvittaessa syöttää kahteen 20 000 m³ varastosäiliöön. Varastosäiliöistä pesulipeä ajetaan tarvittaessa haihduttamojen laihamustalipeäsäiliöihin. Lipeän laatuun vaikuttaa myös oleellisesti haihduttamolle lisättävä valkaisu-kemikaaliasemalta saatava jätehappo, biolingolta tuleva bioliete sekä mäntyöljykeittäjästä syötettävä emävesi. Molempien haihduttamojen vahvat mustalipeät ajetaan samoihin vahvalipeäsäiliöihin, joista vahva mustalipeä syötetään molemmille soodakattiloille.

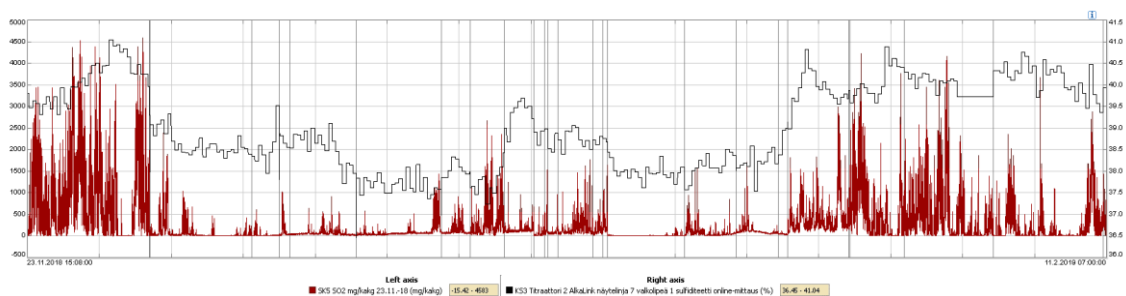
Vahvamustalipeän kemialliset sekä fysikaaliset ominaisuudet vaihtelevat kuitulinjojen ajovauhtien, varastosäiliöiden ajotilanteen ja haihduttamolle syötettävien sivuvirtojen mukaan. Lipeän laadun seuranta reaaliajassa on mahdotonta, mikä vaikeuttaa soodakattilan polton optimointia. Varsinkin fysikaalisten ominaisuuksien vaihtelu aiheuttaa ongelmia lipeän ruiskutuksessa, koska sopivan pisarakoon löytäminen vaatii jatkuvaa seurantaä käyttökäyttökunnalta.

Parhaimman palamisprosessin saavuttamiseksi haihduttamolta saatavan vahvalipeän kuiva-aine tulisi pyrkiä pitämään mahdollisimman korkealla sekä minimoimaan kuiva-aineen vaihtelut. Polttoon syötettävän lipeän kuiva-ainetta heiluttaa haihduttamon sekvenssienvaihdot sekä sekoitussäiliön hönkälinjojen pesut. Koeajoissa myös vahvamustalipeän kuiva-aineet heiluivat, jotka aiheuttavat omat epävarmuustekijänsä tulosten tarkastelussa

13.4 Sulfiditeetti

Sulfiditeetin hallinta on oleellinen osa kemikaalikierron tehokasta toimintaa. Sulfiditeetin vaikutukset korostuvat lipeäkierrossa soodakattiloilla. Korkealla sulfiditeetilla soodakattilan tulipesä on herkempi rikin karkailulle tulipesästä, varsinkin keon lämpötilan ollessa matala. Tämä aiheuttaa pitkällä aika välillä tarkastelussa tukkeutumisongelmia tulistimien jälkeisillä lämmönsiirtopinnoilla. (Andritz 2019)

Tarkasteltava soodakattila edustaa vanhaa sukupolvea ilmajaolta sekä poltettavan lipeän kuiva-aineen suhteen. Jäähdyttävän alailmojen suuri määrä sekä poltettavan lipeän kuiva-aineen alhainen taso tekevät haastavaksi saada kekoa pysymään tarpeeksi kuumana, jonka seurauksena kattila on herkkä itsessään rikin karkaamiselle tulipesästä. Kuvassa 28 on havainnollistettu sulfiditeetin vaikutusta rikittelyyn kyseisellä soodakattilalla. Kuvaajaan on kerätty tasaisia yli 1400 tka/d kuormalla olevia ajojaksoja 2018 seisokin jälkeen.

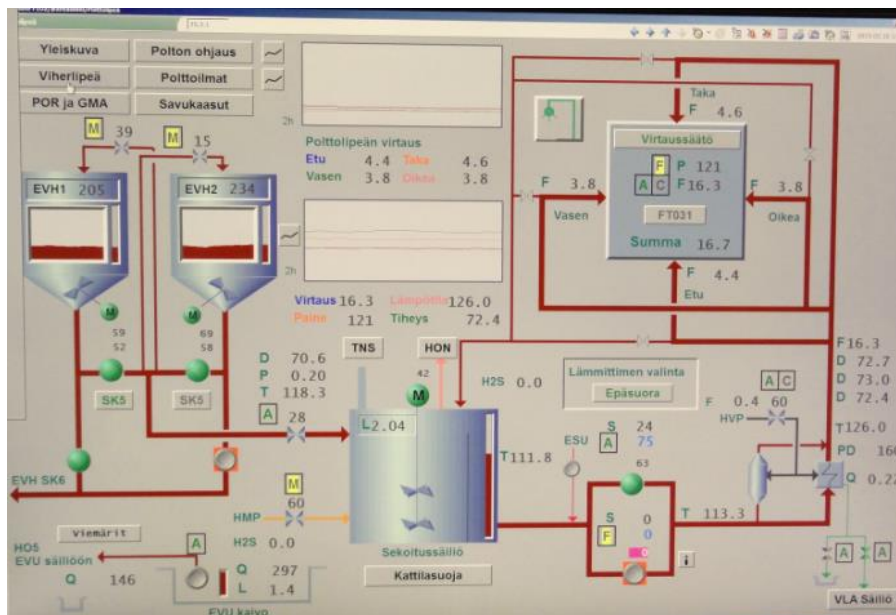


Kuva 28. Sulfiditeetin vaikutus tulipesän SO₂-päästöihin. Punainen kuva rikkidioksidipäästöjä (mg/kg) ja musta kuva valkolipeän sulfiditeettiä (%).

Koeajoissa sulfiditeetti vaihteli rajusti, mikä aiheutti ongelmia tulosten vertailussa ja parhaiden ilmajakojen etsimisessä.

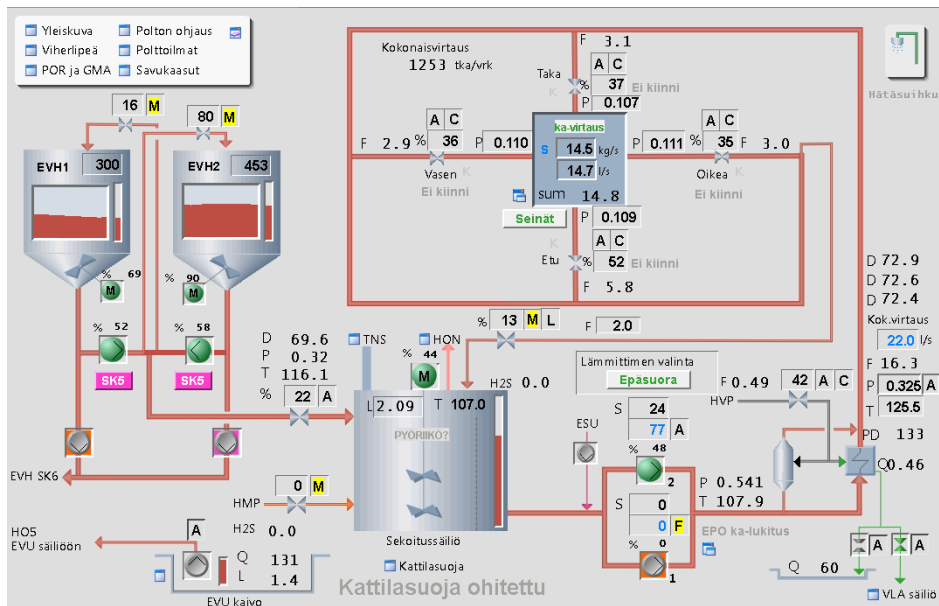
13.5 Polttolipeäjärjestelmä

Syysseisokissa 2018 soodakattilalle modernisoitiin polttolipeäjärjestelmä. Vanhassa järjestelmässä polttolipeäpumpun kuormalla ohjattiin ruiskuista syötettävää polttolipeän määrää. Polttolipeäputkiston paineen perusteella määriteltiin sopiva ruiskujen määrä. Kuvassa 29 on havainnollistettu vanhaa polttolipeäjärjestelmää.



Kuva 29. DCS-järjestelmän kuva polttolipeän syötöstä ennen huoltoseisokkia 2018.

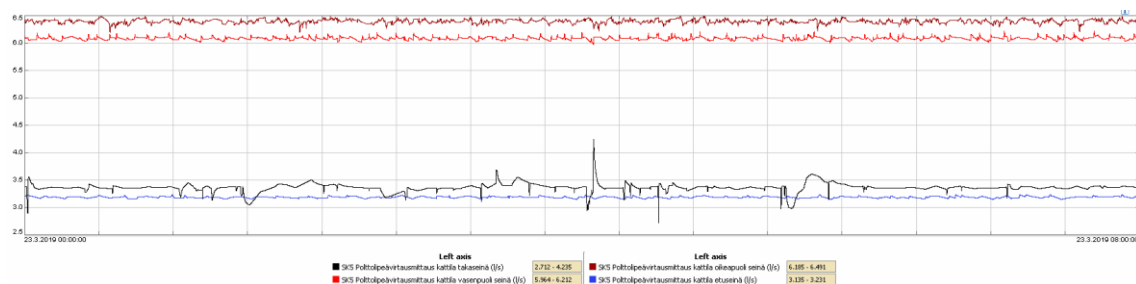
Uudistetussa polttolipeäjärjestelmässä polttolipeäpumpuilla pidetään putkiston paine vakiona. Polttolipeän virtausta säädetään seinäkohtaisilla säätöventtiileillä. Uudistetussa järjestelmässä polttolipeän syöttäminen on tasaisempaa, sekä mahdollistaa seinäkohtaisen virtauksen säädettävyyden. Kuvassa 30 on esitetty uudistettu polttolipeäjärjestelmä.



Kuva 30. DCS-järjestelmän kuva polttoliipeän syötöstä uudella polttoliipeäjärjestelmällä.

Järjestelmän päivityksessä asennettiin myös uudet lipeäruiskutelineet. Uudet telineet mahdollistavat tarkan ruiskutuskulman säädön sekä mahdollistaa syvyys suunnan säädön. Vanhoissa ruiskutelineissä kulman säätäminen oli vaikeata ja ruiskun kulman seuraamiseen ei ollut asennoitinta. Samassa uudistuksessa ruiskujen koko kasvoi 28 mm halkaisijaltaan, kun vanhat ruiskut olivat 26 mm halkaisijaltaan.

Polttoliipeäjärjestelmän uusinnassa jätettiin vanha sekoitussäiliö sekä sekoittaja uusimatta. Uudessa polttoliipeän syöttöjärjestelmässä ongelmalliseksi on muodostunut takaseinän lipeäruiskujen jatkuva ja hetkellinen tukkeutuminen. Takaseinän lipeän virtaus kattilaan heittelee useasti vuorokauden aikana. Vastaava ongelmaa ei muilla kattilan seinillä ole. Kuvassa 31 on havainnollistettu seinäkohtaisten virtausten muutokset vakiokuormalla kahdeksan tunnin ajalta maaliskuulta 2019.



Kuva 31. Seinäkohtaiset lipeän virtaukset tasaisella kuormalla. Musta kuvaa takaseinän virtausta.

Lipeän epätasainen virtaus aiheuttaa epästabiiliutta tulipesän prosesseihin sekä aiheuttaa ongelmia keon hallinnassa. Epätasainen lipeän virtaus ei muodosta optimaalista pisaraa, jonka seurauksena pisaraa ei välttämättä muodostu tai pisarakoko voi olla hetkittäin liian pieni. Pieni pisara nousee todennäköisemmin savukaasuvirtauksen mukana aiheuttaen carryoverin määrän kasvua. Pisan muodostumisen epäonnistuminen nopeuttaa polttolipeän putoamista kehoon, jolloin polttolipeän palamisen vaiheesta kuivuminen ja pyrolyysi tapahtuu keossa. Tämän seurauksena keko jäähtyy aiheuttaen tulipesästä karkaavien rikkidioksidien määrän kasvua. Sulakeon hallinta vaikeutuu myös, jos keon lämpötila laskee radikaalisesti.

Todennäköisin syy tukkeutumiseen on kattilasuolan tai/ja sähkösuodintuhkan epätäydellinen sekoittuminen sekoitussäiliössä. Sekoittumattomat tuhkakokkareet aiheuttavat tuketta ensimmäisessä sekoitussäiliön jälkeisessä lipeärenkaan haarassa eli takaseinällä.

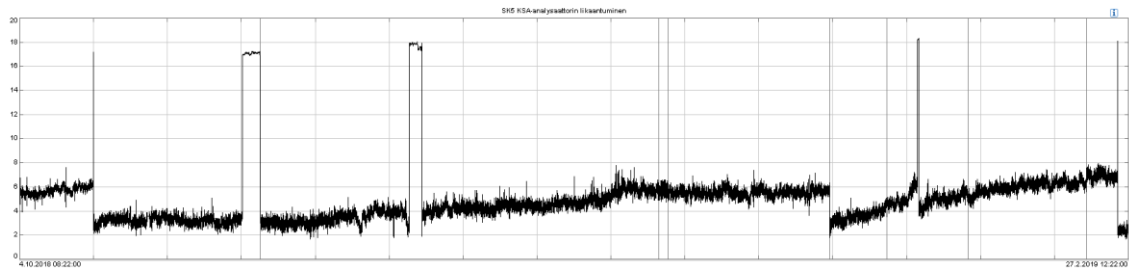
13.6 Savukaasu analyysointori ja savukaasujen happianturit

Soodakattilan polttoa ohjaavien mittauslaitteiden luotettavuus on avainasemassa optimaalisen polton saavuttamiseksi. Koeajojen aikana käytiin keskusteluita soodakattilan eri mittareiden luotettavuudesta automaatio- ja mittaustekniikasta vastaavien kunnossapitoasentajan sekä kunnossapitoinsinöörin kanssa.

Kyseinen soodakattila on varusteltu kahdella jäännöshappea mittaavalla zirkoniumanturilla. Keskusteluissa kävi ilmi, että oikeanpuoleista happianturia ei ollut päästy aikaisemmassa seisokissa kalibroimaan. Oikeanpuoleinen happimittaus näyttää tavallisesti 1.0 – 2.0 %-yksikköä enemmän kuin vasemmanpuoleinen. Poltonohjaus seuraa happiantureiden minimiarvoa, joten epätarkka tulos ei häiritse sumeaa logiikkaa tarvittavasta palamisilman määrästä. Molempien happiantureiden luotettavalla toiminnalla voitaisiin seurata tulipesän palamisen symmetrisyyttä.

Ennen savukaasupesuria savukanavasta mitataan yhteisellä savukaasuanalysointorilla CO-, SO₂- sekä O₂-pitoisuus. Analysointorin ongelmana on helposti tukkeutuva näyteputki, joka tukkeutuessaan antaa todellista pienempiä arvoja CO- ja SO₂-pitoisuuksista.

Tukkeutumista voidaan päätellä analysaattorilta saatavan O₂ -pitoisuuden arvosta. Happipitoisuuden kasvaessa näyteputki alkaa olemaan tukossa, koska analysaattori alkaa imemään ilmaa osittain kattilahuoneesta. Kuvassa 32 on havainnollistettu ekonomaiserin jälkeisen happimittauksen sekä analysaattorin mittaaman hapen eroa.



Kuva 32. Savukaasuanalysaattorin ja ekonomaiserin jälkeisen happimittauksen ero.

Happimittausten välisen eron kasvaessa voidaan päätellä, että näyteputki on tukkeutumassa ja analysaattorilta saatavat pitoisuudet ovat epätarkempia. Analysaattorin epäluotettava toiminta aiheutti ongelmia koeajoista saatujen tulosten tarkastelussa.

14 KOKEELLINEN OSA

Soodakattilan parhaita ajotapoja selviteltiin data-analyyseilla ja systemaattisilla koeajoilla. Koeajoista saatujen havaintojen pohjalta rakennettiin uudet ilmareseptit, happitavoitteet sekä pisarakoon hallinnan ylätaso. Uusien reseptien tavoitteena oli parantaa tulipesän prosessia, mikä parantaisi käytettävyyttä, reduktioastetta sekä päästöjen hallintaa. Palamisilmamäärät sekä soodakattilan päästöt kokeellisen osan analyyseissä on suhteutettu poltettavan mustalipeän kuiva-aineeseen, jotta tuloksien analysointi kuorman muutoksissa on vertailukelpoista.

14.1 Data-analyysit ennen koeajoja

Ennen koeajojen aloittamista pyrittiin löytämään mittaustiedoista mahdollisia korrelaatioita ilmajaolle, lipeän ruiskutuslämpötilalle ja happitavoitteelle. Data-analyyseissa käytettiin hyväksi huoltoseisokin 2018 jälkeistä aikaa, jolloin uusi polttolipeäjärjestelmä oli jo käytössä. Analyysijä tehtiin eri vakiokuormilla, koska palamisolosuhteet muuttuvat kuorman mukana. Selviä korrelaatioita oli vaikea löytää, koska kattilan ilmajakoa ja ruiskutuslämpötilaa ei oltu juuri muutettu resepteistä tai vanhoista operaattorien tottumuksista. Heikkoja korrelaatioita löytyi muutamia. Kuvasta 33 voidaan havaita ilmajaon vaikutus SO_2 - ja NO_x -päästöihin. Tertiääri-ilman määrää lisäämällä saadaan vähennettyä SO_2 -päästöjä, kun vastaavasti NO_x -päästöt nousevat. Primääri- ja sekundääri-ilmalla tämä käyttäytyminen on juuri toisinpäin. Lisäämällä primääri- tai sekundääri-ilmaa SO_2 -päästöt nousevat, kun vastaavasti NO_x -päästöt laskevat. Primääri- ja sekundääri-ilman siirtäminen tertiääri-ilmaan nostaa soodakattilan tulipesän lämpötilaa, mikä voidaan huomata SO_2 - ja NO_x -päästöjen käyttäytymisestä (Vakkilainen 2005, 9-11). Tässä monimuuttuja-analyysissä kuorman lisäksi happitavoite on pysynyt vakiona, jotta ilmajaon muutoksen vaikutukset olisivat vertailukelpoisia.

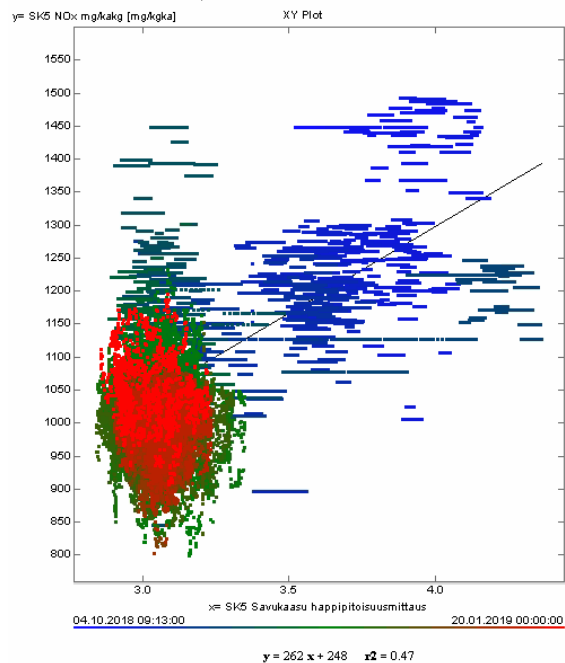
3.12.2018 14:00:00 - 20.1.2019 09:51:00, All data

	SK5 Palamisilma tert/kgka	SK5 Palamisilma sek/kgka	SK5 Palamisilma prim/kgka	SK5 SO2 mg/kakg	SK5 NOx-päästö mg/kgka 23.11.2018 klo 14	SK5 Polttoilpeä kuiva-ainepitoisuus- ^{~0-~0}	SK5 Reduktion tavoite mittaus- ^{~0-~0}	CO- ^{~0}	SK5 Polttoilpeä pisarakoko vakiointisäätömittaus	SK5 Savukaasu happipitoisuusmittaus	SK5 keon lämpötilojen KA suod.
SK5 Palamisilma tert/kgka	1	-0.33	-0.74	-0.33	0.21	0.08	-0.02	0.27	-0.03	-0.21	0.02
SK5 Palamisilma sek/kgka	-0.33	1	0.77	0.22	-0.27	-0.38	0.00	-0.10	0.15	0.36	0.02
SK5 Palamisilma prim/kgka	-0.74	0.77	1	0.29	-0.20	-0.25	0.06	-0.25	0.15	0.28	0.00
SK5 SO2 mg/kakg	-0.33	0.22	0.29	1	-0.29	-0.07	-0.06	-0.10	-0.03	0.08	-0.07
SK5 NOx-päästö mg/kgka 23.11.2018 klo 14	0.21	-0.27	-0.20	-0.29	1	0.28	0.10	-0.05	0.03	-0.12	-0.05
SK5 Polttoilpeä kuiva-ainepitoisuus- ^{~0-~0}	0.08	-0.38	-0.25	-0.07	0.28	1	0.11	-0.08	0.02	-0.17	-0.06
SK5 Reduktion tavoite mittaus- ^{~0-~0}	-0.02	0.00	0.06	-0.06	0.10	0.11	1	0.04	-0.04	-0.01	0.12
CO- ^{~0}	0.27	-0.10	-0.25	-0.10	-0.05	-0.08	0.04	1	-0.05	0.32	0.02
SK5 Polttoilpeä pisarakoko vakiointisäätömittaus	-0.03	0.15	0.15	-0.03	0.03	0.02	-0.04	-0.05	1	-0.03	-0.02
SK5 Savukaasu happipitoisuusmittaus	-0.21	0.36	0.28	0.08	-0.12	-0.17	-0.01	0.32	-0.03	1	-0.09
SK5 keon lämpötilojen KA suod.	0.02	0.02	0.00	-0.07	-0.05	-0.06	0.12	0.02	-0.02	-0.09	1

Kuva 33. Monimuuttuja-analyysi ennen koeajoja noin 1500 tka/d vakiokuormalla sekä vakiohappitavoitteella.

Monimuuttuja-analyysellä tehtiin myös pidemmiltä ajopätkiltä, joissa happitavoitetta oli muutettu. Näistä monimuuttuja-analyysistä ei löytynyt muita korrelaatioita kuin että savukaasujen happipitoisuus korreloi NO_x-päästöjen kanssa, mikä voidaan havaita kuvasta 34. Tämä pätee aikaisempien tutkimustulosten kanssa, että happipitoisuuden kasvaminen savukaasuissa nostaa NO_x-päästöjen määrää (Suhr et al. 2015, 311).

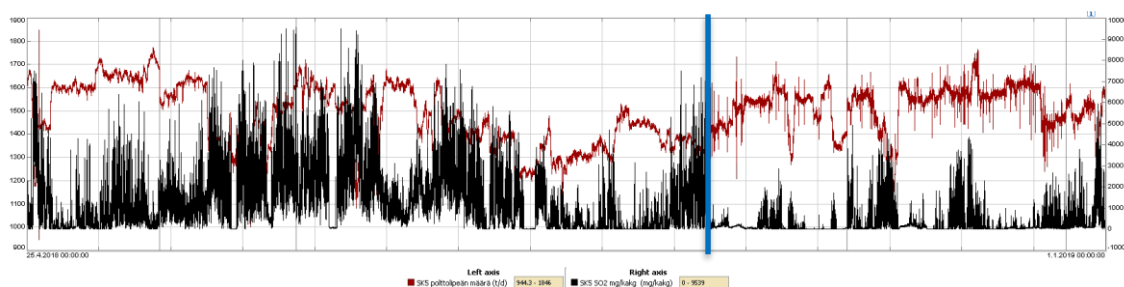
4.10.2018 09:13:00 - 20.1.2019 00:00:00, All data



Kuva 34. NO_x-päästöjen ja savukaasujen happipitoisuuden XY-kuvaaja.

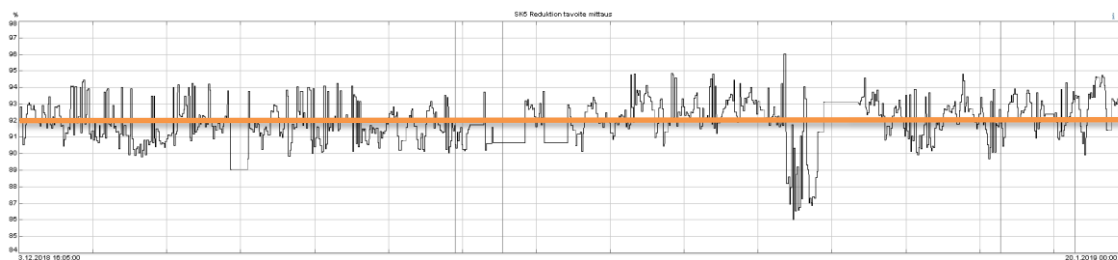
14.2 Lähtötilanne

Tässä kappaleessa käydään läpi tulipesän toimintaa ennen koeajoja. Lähtötietojen perusteella voidaan myöhemmin arvioida uusien muutosten vaikutuksia palamiseen. Soodakattilan tulipesän suurimpia ongelmia oli suuret SO₂ -päästöt tulipesästä, mitkä indikoivat tulipesän matalasta lämpötilasta tai/ja korkeasta sulfiditeetista. Ennen syysseisokkia 2018 rikkidioksidipäästöt piikkittelivät jatkuvasti ja päästöjen taso oli huomattavan korkea. Uusi polttoliipejärjestelmä on radikaalisesti alentanut syntyviä SO₂ -päästöjä. Tämä voidaan huomata kuvasta 35, johon on otettu mittaustietoja kattilan kuormasta sekä syntyvistä SO₂ -päästöistä syötettyä polttoliipeän kuiva-ainekiloa kohden välillä 25.4.2018 – 1.1.2019. Kuvaajasta on leikattu pois normaalin käynnin ulkopuoliset tilanteet mm. huoltoseisokki. Sininen viiva kertoo v. 2018 huoltoseisokin ajankohdan.



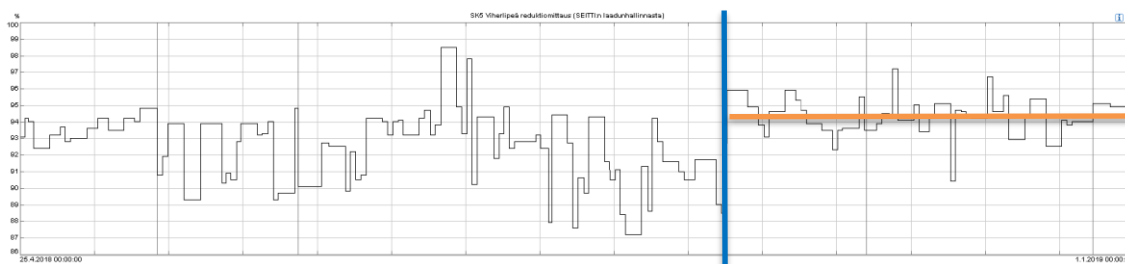
Kuva 35. Rikkidioksidipäästöt kuiva-ainekiloa kohden sekä kattilan kuorma 25.4.2018 - 1.1.2019. Musta kuvaa rikkidioksidipäästöjä (mg/kakg) ja punainen kattilan kuormaa (tka/d).

Tehtaalla reduktiota seurataan viherlipeästä jatkuvatoimisella titraattorilla, jonka lisäksi sellutehtaan oma laboratorio määrittelee joka arkipäivä viherlipeästä reduktion. Mittaukset poikkeavat tasollisesti toisistaan, joten työssä käytetään lähtötietoina molempia reduktiomittauksia. Titraattorin reduktiomittauksesta ei ole saatavilla kerättyä dataa ennen joulukuuta 2018. Lisäksi reduktiomittaukset hyppivät epäluonnollisesti varsinkin joulukuun alussa, mikä luo haasteita määrittellä keskimääräistä reduktiota. Kuvaan 36 on kerätty tasaisen käynnin aikaisia reduktioaste -mittauksia titraattorilta 3.12.2018 – 20.1.2019 väliseltä ajalta. Kuvasta pääteltynä keskimääräinen reduktio on noin 92 %.



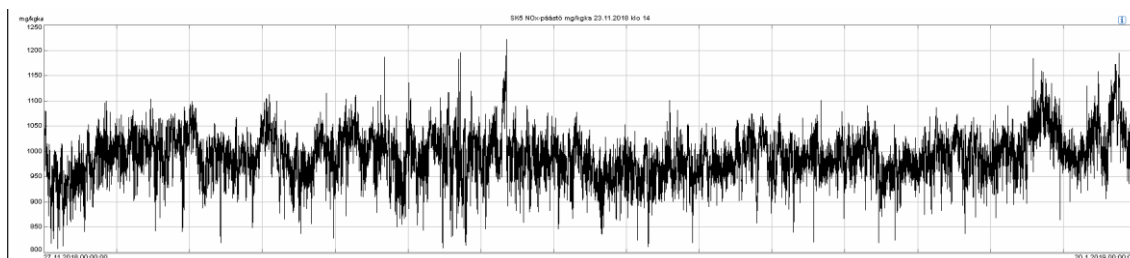
Kuva 36. Titraattorin reduktioaste -mittaukset 3.12.2018 - 20.1.2019

Laboratoriomittauksissa viherlipeän reduktio on heilunut todella laajasti, mikä voidaan huomata kuvasta 37. Mittaustietoja kuvassa on 25.4.2018 – 1.1.2019 väliseltä ajalta, jossa sininen viiva havainnollistaa syysseisokin ajankohtaa. Reduktion keskimääräinen taso on selvästi noussut syysseisokin jälkeen, minkä jälkeen taso on kuvasta pääteltynä ollut hieman yli 94 %.



Kuva 37. Laboratorion viherlipeästä määrittelemä reduktioaste 25.4.2018 - 1.1.2019

Imatran tehtaiden ympäristöluvassa on määritelty soodakattiloille yhteinen päästölupa NO_x -päästöjen osalta. Ympäristöluvassa on määritelty pelkästään vuositasolla kilomääräiset typenoksidipäästöt tuotettua sellutonna kohden. Vielä vuodelle 2018 ympäristöluvan päästöraja oli $1.7 \text{ kgNO}_2/\text{Adt}$, mutta uusimmassa luvassa 1.1.2019 alkaen raja on kiristynyt $1.4 \text{ kgNO}_2/\text{Adt}$. (Aluehallintovirasto 2017, 97) Vuonna 2018 soodakattiloiden ominaispäästöt olivat $1.34 \text{ kgNO}_2/\text{Adt}$. Ympäristöluvan kiristyminen luo paineita pitää ominaispäästöt vähintään samalla tasolla, jotta luparajaa ei ylitetä. Soodakattilan hetkellisistä NO_x -päästöistä ei ollut analysoitavaa dataa keräilyssä ennen v. 2018 marraskuun loppua, joten lähtötilanteen arvot ovat otettu 27.11.2018 – 20.1.2019 väliseltä ajalta. Kuvassa 38 on esitetty NO_x -päästöjen määrä syötettyä polttoaineen kuiva-ainekiloa kohden. Lähtötietona käytetään keskiarvoa tältä ajalta, joka on $990 \text{ mgNO}_x/\text{kakg}$.



Kuva 38. NOx -päästöt kuiva-aine kiloa kohden 27.11.2018 - 20.1.2019

14.3 Koeajot

Koeajot suoritettiin kahdessa osassa. Ensimmäisessä koeajosarjassa ajettiin kahdeksan erilaista koepistettä kolmella eri muuttujalla. Koeajoja jatkettiin ensimmäisen koeajosarjojen tulosten pohjalta, jolloin testailtiin tulevia säätöjä ja reseptejä käsin syötetyillä arvoilla eri polttolipeen kuormilla. Muuttujina käytettiin primääri- ja tertiääri-ilman -suhdetta, sekundääri- ja tertiääri-ilman -suhdetta sekä pisarakoon vakiointilämpötilaa. Ilmasuhteiden säädössä käytettiin poltonohjauksessa valmiina olevia prim/tert ja sek/tert -suhdesäätöjä. Ilmojen suhdesäädössä voidaan muuttaa palamiseen tarvittavasta kokonaisilman määrästä tietty prosenttiosuus toiselle ilmatasolle. Esimerkiksi prim/tert -suhdesäädössä arvo 1.0 % tarkoittaa, että kattilan kokonaispalamisilman määrän ollessa $70 \text{ Nm}^3/\text{s}$ siirtyy tertiääri-ilmasta $0.7 \text{ Nm}^3/\text{s}$ primääri-ilmaan. Vastaavasti negatiiviset prosenttiarvot siirtävät primääri-ilmasta ilmamäärää tertiääri-ilmaan. Automaatiojärjestelmässä pisarakoon vakiointilämpötila pitää polttolipeen lämpötilan eron kiehumapisteeseen vakiona, jolloin pisarakoko ei muutu kuiva-ainepitoisuuden muutoksissa. Koeajopisteissä pyrittiin vakioimaan kaikki muut mahdolliset muuttujat. Koeajopisteet pyrittiin pitämään aina 19 tunnin mittaisena ja siirtymäaika koeajopisteiden välissä pidettiin viidessä tunnissa.

Jokaisesta koeajopisteestä kerättiin polttolipeä-, lentotuhka- ja viherlipeänäytteitä. Näiden näytteiden pohjalta voitiin mahdollisimman laajasti tulkita muutosten vaikutusta palamiseen. Sähkösuotimen lentotuhkasta otettiin jokaisen koeajopisteiden aikana keräilynäyte kenttämiesten toimesta. Näytteestä määriteltiin seuraavana päivänä käsimittauksella pH:n arvo, minkä lisäksi lähetettiin vielä näyte tarkempia tutkimuksia varten Stora Enson Tutkimuskeskukseen. Tutkimuskeskuksella lentotuhkista määriteltiin pH:n lisäksi natrium-, kalium-, kloori-, karbonaatti ja sulfaattipitoisuuksia. Näiden

pohjalta voitiin päätellä tulipesän palamisprosessia koeajoissa sekä vierasaineiden vaikutusta likaantumiseen. Koeajojen polttolipeänäytteet lähetettiin myös Tutkimuskeskukseen, jossa niistä tutkittiin kuiva-ainepitoisuus, lämpöarvo sekä alkuainepitoisuuksia. Polttolipeänäytteiden analyyseillä haluttiin varmistaa, että polttolipeän laatu ei vaihdellut koeajojen aikana. Suuret muutokset polttolipeässä voisivat sekoittaa koeajoista saatuja tuloksia. Lisäksi haluttiin tutkia polttolipeän sisältämien vierasaineiden määrä, joka voisi edesauttaa likaantumista ja korroosiota. Reduktiota seurattiin jatkuvatoimiselta titraattorilta saatavilla arvoilla sekä sellutehtaan oma laboratorio määritti jokaisesta koeajopisteestä kahdesta eri aikaan otetusta viherlipeänäytteestä reduktion. Seurattuja suureita koeajoissa olivat SO₂-pitoisuus ennen savukaasupesuria, NO_x-päästöjen määrä, polttolipeän kuiva-aine, valkolipeän sulfiditeetti ja savukaasujen CO -pitoisuus. Lisäksi seurattiin keon käyttäytymistä tulipesäkamerasta, joka tallensi koeajopisteistä 10 minuutin välein kuvan tulipesästä.

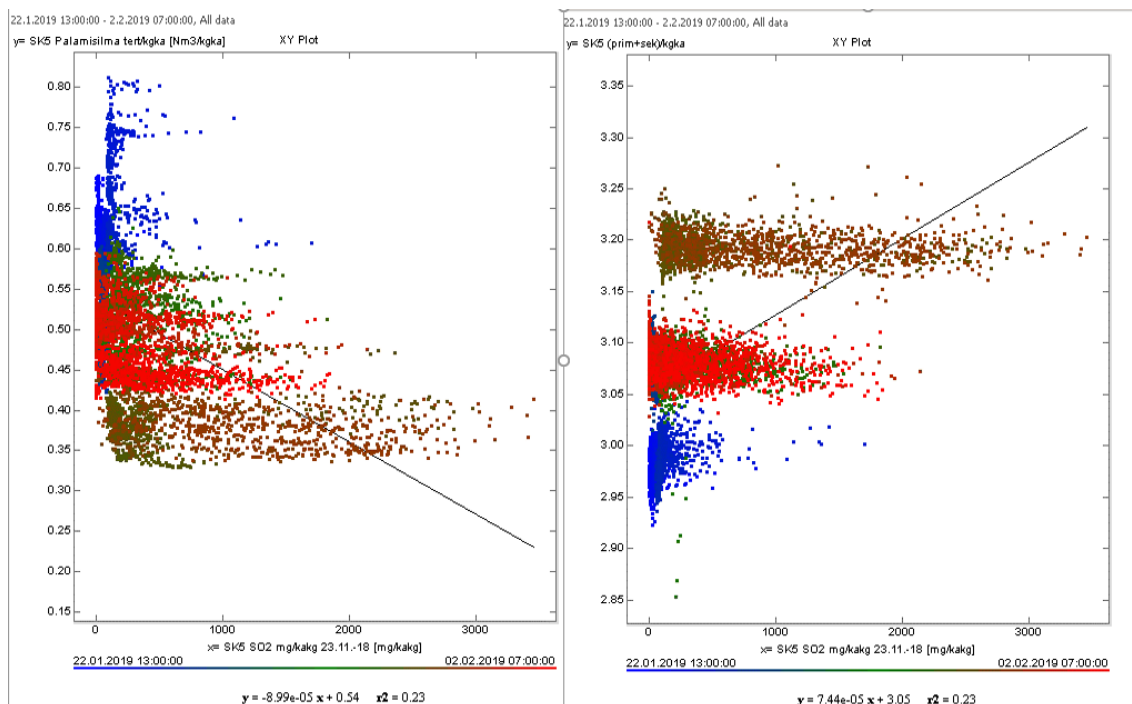
14.3.1 Ensimmäinen koeajosarja

Ensimmäinen koeajosarja ajettiin vakiokuormalla 1500 tka/d, jolloin kattilassa pidettiin yhteensä kuutta lipeäruiskua samoilla paikoilla. Molemmilla sivuseinillä oli kaksi lipeäruiskua ja päätyseinän puolilla yhdet ruiskut. Ruiskut sijoitettiin symmetrisesti, jotta palaminen olisi mahdollisimman tasaista tulipesässä. Jäännöshapen tavoitetta tiputettiin jo ensimmäisessä koeajosarjassa 3.1 %:sta 2.9%:iin. Koeajosarja toteutettiin käyttäen hyödyksi Minitab -tilasto-ohjelmaa. Lipeän pisarakoon vakiointilämpötilana käytettiin 7.6 °C ja 8.6 °C. Suhdesäädössä käytettiin molemmissa prim/tert sekä sek/tert arvoina 1.0 % ja -2.0 %. Näiden syötettyjen arvojen pohjalta ohjelma määritteli kahdeksan erilaista koeajopistettä, jonka pohjalta oli tarkoitus löytää tilastollisesti merkittäviä korrelaatioita reduktiolle, SO₂-päästöille, sähkösuodin tuhkan pH:lle ja NO_x-päästöille. Koeajoissa käytettiin mittaustulosten keskiarvoja. Koeajoista saadut tulokset eri koepisteissä on esitettyä seuraavassa taulukossa 2.

Taulukko 2. Ensimmäinen koeajosarja 22.1. – 1.2.2019

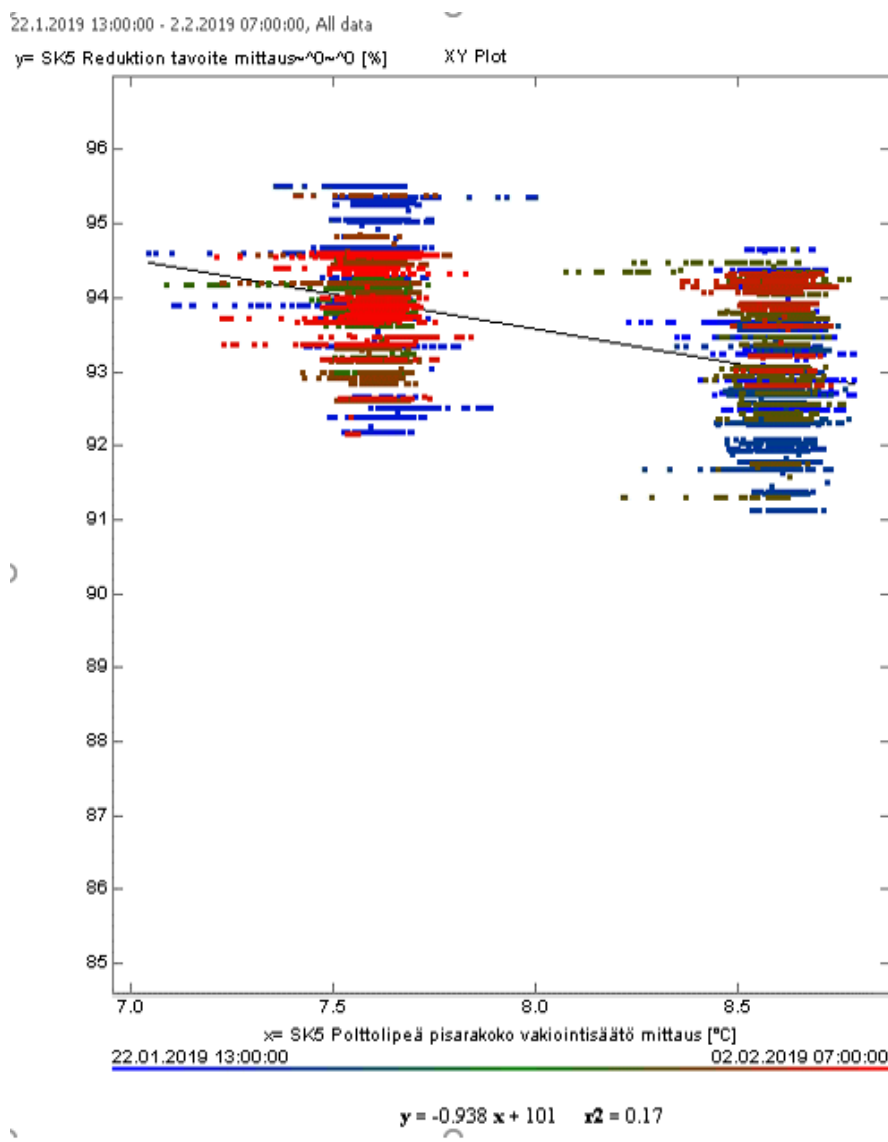
	prim/tert [%]	sek/tert [%]	dT [°C]	ESP tuhka pH [-]	Reduktio titr. [%]	NOx [mg/kakg]	SO2 [mg/kakg]
22.1.2019	-2	-2	8,6	10,9	93,42	929	42,25
23.1.2019	-2	-2	7,6	10,6	94,22	957	141
24.1.2019	-2	1	8,6	11,6	92,49	978	48,64
28.1.2019	-2	1	7,6	10,2	93,91	932	375,9
29.1.2019	1	1	8,6	10,15	92,81	913	467,3
30.1.2019	1	1	7,6	9,74	93,81	894	993,6
31.1.2019	1	-2	8,6	9,95	93,75	946	188,1
1.2.2019	1	-2	7,6	9,9	93,88	945,7	434,2

Lopputuloksena ensimmäisillä koeajoilla korrelaatioita muuttujien välillä löytyi, vaikka ne eivät olleet tilastollisesti merkittäviä. Koesarjoista tehty monimuuttuja-analyysi löytyy liitteestä 1. Monimuuttuja-analyysin pohjalta löydettiin selviä korrelaatioita varsinkin ilmajaon vaikutuksesta rikkidioksidipäästöihin sekä lipeän lämpötilan vaikutuksesta reduktioasteeseen. Selvimmistä korrelaatioista tutkittiin tarkemmin mittaustietojen XY -kuvaajia koeajojen ajalta. Kuvaajista voidaan huomata, että kasvattamalla primääri- ja sekundääri-ilman määrää tulipesä tekee isompia rikkidioksidipäästöjä. Vastaavasti tertiääri-ilman määrää lisäämällä rikkidioksidipiikkittely on pienempää. Tämä havainto vahvisti ennen koeajoja tehtyjä data-analyysien huomioita. Näiden tietojen pohjalta voitiin päätellä, että ylimääräinen primääri- ja sekundääri-ilma jäädyttävät kekoa. Käsimittauksella tehdyt sähkösuodin tuhkan pH:n arvot myös tukivat huomioita. Varsinkin primääri-ilman määrän lisääminen laski pH:n arvoa koeajoissa. Kuvassa 39 on esitetty primääri- ja sekundääri-ilman sekä pelkän tertiääri-ilman vaikutus rikkidioksidipäästöihin tulipesästä polttoliipeän kuiva-ainekiloa kohden.



Kuva 39. Ilmajaon vaikutus rikkidioksidipäästöihin. Vasemmalla tertiääri-ilman määrän vaikutus rikkidioksidipäästöihin ja oikealla primääri- ja sekundaäri-ilman vaikutus rikkidioksidipäästöihin.

Koeajoissa pisarakoon vakiointilämpötilalla oli selvä vaikutus reduktioon. Suuremmalla pisarakoolla viherlipeän reduktio kasvoi. Pisarakoon kasvatus luo paremmat pelkistymisolosuhteet rikille, jolloin koksipalaminen tapahtuu keossa ja palamattomien hiilien määrä kasvaa keon pinnalla (Raiko et al. 2002, 542 – 543). Kuvassa 40 on esitetty pisarakoon vaikutus titraattorilta saatuihin viherlipeän reduktiomittauksen tuloksiin.

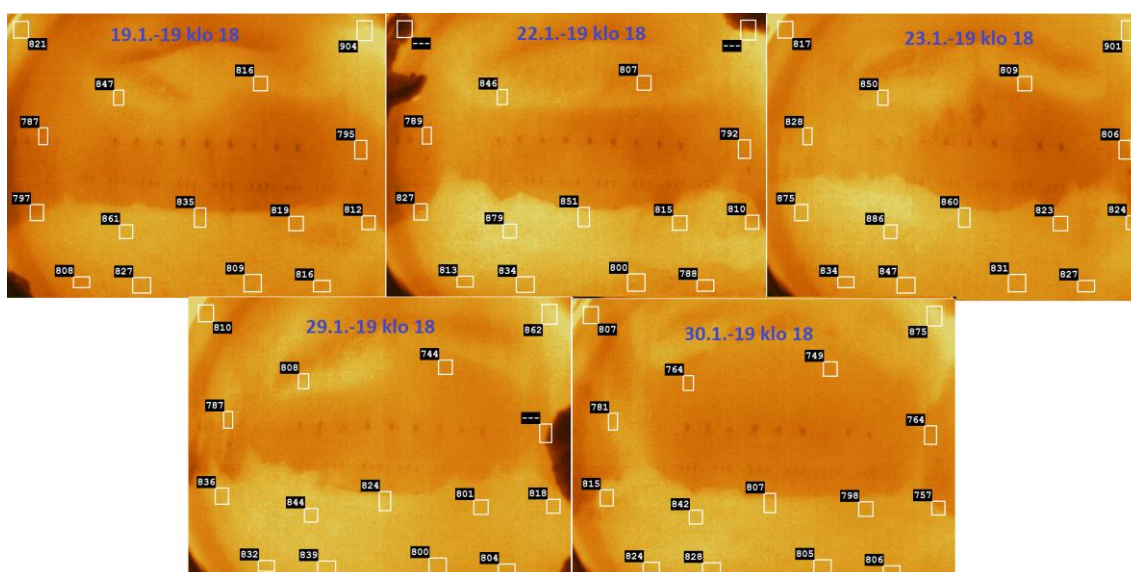


Kuva 40. Pisarakoon vakiointilämpötilan vaikutus titraattorin reduktioaste mittauksen tuloksiin.

Monimuuttuja-analyysissä NO_x -päästöille selvimmät korrelaatiot löytyivät savukaasujen CO - ja SO_2 -pitoisuuksien väliltä. NO_x -päästöjen määrä kasvaa samalla kuin rikkidioksidipäästöt vähenevät, joten tulipesän lämpötilan kasvattaminen nostaa syntyvien NO_x -päästöjen määrää. Osassa koeajopisteissä CO -pitoisuudet piikittelivät, jolloin NO_x -päästöt myös vähenivät (Vakkilainen 2005, 12-3).

Tulipesäkameran kuvilla voitiin havainnoida keon käyttäytymistä koeajoissa. Ennen koeajoja aloittamista tulipesän pohja oli tyypillisesti hyvin tasainen eikä kekoa juuri ollut. Keon puute ja tasaisuus tarkoittaa yleensä huonoa reduktioastetta, koska vapaan hiilen

määrä keon pinnalla on vähentynyt. Kuvasta 41 voidaan huomata keon tilanne enne koeajoja sekä tilanne koeajojen ääripäistä. Yläreunan kaksi oikeanpuoleista kuvaa on koeajopisteissä, joissa primääri- ja sekundääri-ilmaa on siirretty yhteensä 4 % kokonaisilman määrästä tertiääri-ilmaan. Tulipesässä keon koko on kasvanut osittain primääri-ilmarekistereiden korkeudelle. Vastaavasti ilmamäärän lisääminen 2 % kokonaisilmamäärästä primääri- ja sekundääri-ilmaan on pienentänyt ja tasoittanut kekoa, mikä voidaan huomata kahdesta alimmaisesta kuvasta.



Kuva 41. Tulipesäkameran kuvia ennen koeajoja ja koeajojen aikana.

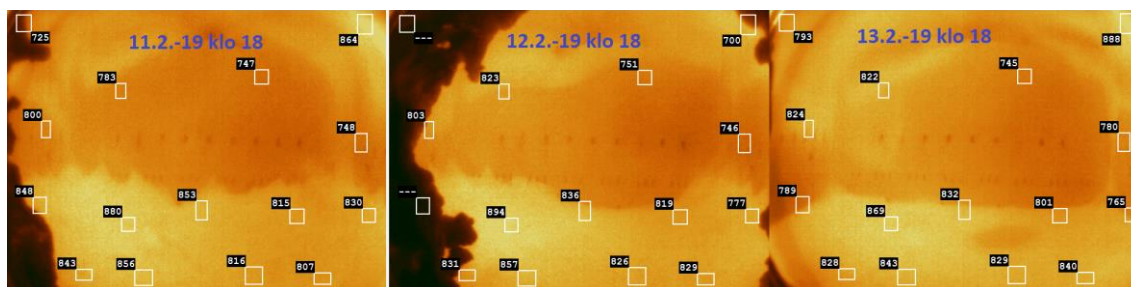
14.3.2 Koeajojen toinen osa

Ensimmäisestä koesarjasta saatujen tietojen pohjalta alettiin etsimään parasta mahdollista ilmareseptiä, pisarakokoa sekä happitavoitetta. Koeajoja jatkettiin 1500 tka/d kuormalla. Nämä koeajot aloitettiin vähentämällä primääri- ja sekundääri-ilman määrä käyttämällä ilmojen suhdesäätöjä. Rajoittavana tekijänä ilmojen määrän vähentämisessä käytettiin kanavapaineita, jotta ilmojen tunkeutuvuus ja ilma-aukkojen auki pysyvyys voitiin taata. Ilmoja vähennettiin seuraamalla kanavapaineiden ja keon käyttäytymistä, jolloin lopulta päädyttiin määrittämään sopiviksi arvoksi prim/tert -suhteelle -2.0 % ja sek/tert -suhteelle arvo -3.5 %.

Taulukko 3. Koeajojen toinen osa.

	prim/tert	sek/tert	dT	ESP tuhka pH	Reduktio titr.	NOx	SO2
	[%]	[%]	[°C]	[-]	[%]	[mg/kakg]	[mg/kakg]
7.2.2019	-2	-3,5	8,6	10,7	94,62	917,5	286
8.2.2019	-2	-3,5	8,1	10,5	94,09	982	148,8
11.2.2019	-2	-3,5	7,6	9,62	94,88	886,2	698,5
12.2.2019	-2	-3,5	8,6	10,53	93,85	856,3	152,2
13.2.2019	-2	-3,5	8,1	10,3	92,43	804,4	150

Taulukossa 3 käydään läpi koeajot, joissa testattiin pisarakoon vaikutusta tulipesän toimintaan. Päivämäärillä 12.2.2019 ja 13.2.2019 koeajoissa lisättiin yksi lipeäruisku etuseinälle eli yhteensä seitsemän kappaletta. Pisarakoon vakiointilämpötilan arvon tiputtaminen liian pieneksi jäädyttää kekoa, jolloin pisaran kuivuminen ja pyrolyysi ovat vielä osittain kesken. Tämä voidaan huomata varsinkin 7.6 °C pisarakoon vakiointilämpötilalla, jolloin rikkidioksidipäästöt ovat kasvaneet selvästi sekä sähkösuodin tuhkan pH:n arvo on laskenut alle 10. Toisaalta reduktioasteen arvo on ollut korkeampi. Ruiskutuspaineen laskeminen eli yhden ylimääräisen lipeäruiskun lisääminen näytti koeajoissa pienentävän pisarakokoa. Tämä voitiin huomata reduktioasteen kääntymisellä laskusuuntaan, mikä oli myös selvästi sidonnainen sulakeon kokoon. Tulipesän keko muuttui lähes tasaiseksi ruiskutuspaineen muutoksen seurauksena. Pienentynyt pisarakoko on alttiimpi muodostamaan carryoveria ja pisaran koksipalaminen tapahtuu ennen kekoa. Kuvassa 42 on havainnollistettu tulipesä kameran kuvilla keon käyttäytymistä 11.2.2019 – 13.2.2019 välisenä aikana.



Kuva 42. Tulipesäkameran kuvia ennen ja jälkeen yhden lipeäruiskun lisäyksen.

Koeajojen tulosten perusteella voitiin päätellä, että ruiskujen määrään tulee kiinnittää tarkempaa huomiota eri kuormilla. Liian matala ruiskutuspainee luo liian pienen pisarakoon, mikä kasvattaa carryoverin määrää sekä huonontaa reduktiota.

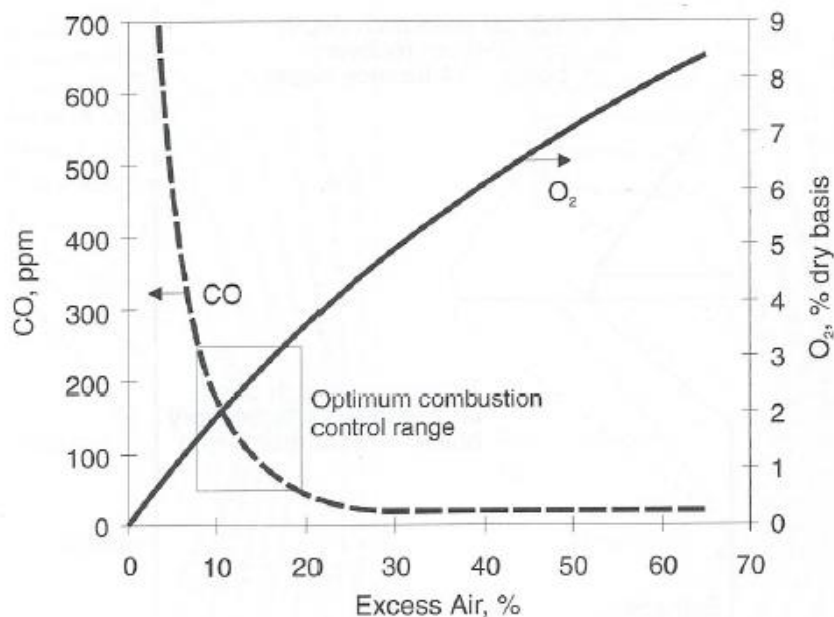
Happitavoitetta oli tiputettu jo ensimmäisissä koeajoissa 2.9 %, joka ei näyttänyt aiheuttavan missään koeajojen vaiheessa ongelmia tulipesässä tai CO -päästöissä. Viimeisenä vielä kokeiltiin 1500 tka/d kuormalla niukemman yli-ilman määrän vaikutuksia CO -päästöjen muodostumiseen tiputtamalla happitavoitetta 2.2 %:iin. Tämä ei pidemmällä aika välillä näyttänyt toimivan halutulla tavalla, koska CO -päästöjen taso nousi välillä mittausalueen ulkopuolelle yli 500 ppm. Koeajojen päätyttyä happitavoitetta nostettiin 1500 – 1700 tka/d kuormilla 2.4 %:iin, mikä ei näyttänyt aiheuttavan ongelmia eikä myöskään CO -päästöt enää piikitelleet yli 500 ppm.

14.4 Uudet reseptit

Tässä kappaleessa esitellään koeajojen pohjalta tehtyjä uusia reseptejä sekä säätöjä. Uusilla säädöillä ja resepteillä luotiin poltonohjauksen automaation perusajomalli soodakattilalle. Muutosten tavoitteena oli vähentää yli-ilman määrää NO_x -päästöjen vähentämiseksi. Alailmojen määrä minimoitiin tulipesän keon lämpötilan nostamiseksi, sekundääri-ilman määrä minimoitiin carryoverin vähentämiseksi ja pisarakoko kasvatettiin carryoverin määrän vähentämiseksi. Muutoksilla on myös positiivinen vaikutus rikin reduktioon, koska ilmojen määrän vähentäminen tekee kuumemman tulipesän ja pisarakoon kasvu kasvattaa keon pinnalla olevan vapaan hiilen määrää.

14.4.1 Happitavoite

Uudella happitavoitteella pyrittiin minimoimaan yli-ilman määrä tulipesässä. Matalammalla happitavoitteella saavutetaan pienemmät typenoksidin päästöt. Ylimääräinen ilma myös jäädyttää kekoa sekä laskee lämpöhyötysuhdetta tuomalla ylimääräistä kuormaa tulipesään. Kuvassa 43 on havainnollistettu optimaalista yli-ilman määrää suhteessa CO - ja O₂ -pitoisuuksiin savukaasuissa.



Kuva 43. Yli-ilman määrän vaikutus savukaasujen CO- ja O₂-pitoisuuteen. (Adams et al. 1997, 207)

Uusi happitavoite rakennettiin pitämään CO -pitoisuustasot etupäässä alle 150ppm. Suuremmilla CO -pitoisuuksilla poltonohjauksen nopea happikorjaus nostaa tertiääri-ilman määrää, mikä ehkäisee isompien pitoisuuksien syntymistä. Uuden happitavoitteen yhteydessä nostettiin samalla nopean happikorjauksen CO -pitoisuuden raja-arvoa 50 ppm:stä 150 ppm:n. Taulukossa 4 on esitelty uusi ja vanha happitavoite eri kuormilla.

Taulukko 4. Vanha ja uusi happitavoite eri kuormilla.

Vanha:		Uusi:	
Kuorma [tka/d]	happi [%]	Kuorma [tka/d]	happi [%]
1100	5,6	1100	3,5
1300	3,9	1300	2,7
1500	3,1	1500	2,4
1700	2,9	1700	2,4

14.4.2 Ilmareseptit

Koeajoissa huomattiin, että primääri- ja sekundääri-ilman määrän vähentäminen vähentää rikkidioksidin määrää tulipesästä. Tämän pohjalta voidaan olettaa, että ylimääräisellä primääri- ja sekundääri-ilmalla on kekoa jäähdyttävä vaikutus. Ilmajärjestelmän

aiheuttamat rajoitteet estävät vähentämästä primääri- ja sekundääri-ilman määrää haluttua matalammaksi. Toisaalta tertiääri-ilmaan määrän kasvattamisessa vastaan tulee kanavan ahtauden rajoitteet. Korkeilla kuormilla sekundääri-ilman rajoittaa lisäämästä ilmaa sekundääri- ja tertiääri-ilmaan, minkä takia primääri-ilmaa joudutaan lisäämään kokonaisilmamäärän saavuttamiseksi. Matalilla kuormilla joudutaan lisäämään primääri-ilman määrä, jotta kanavapaineet eivät laske liian alhaiseksi. Lipeäruiskujen alapuolella olevien ilmojen määrän vähentäminen pienentää samalla riskiä savukaasujen kanavoitumisesta, mikä aiheuttaa lipeäpisaroiden karkaamista tulipesästä. Taulukossa 5 on esitelty uusi ja vanha ilmaresepti.

Taulukko 5. Vanha ja uusi ilmaresepti.

	Kok.	Primääri-ilma		Sekundääri-ilma		Tertiääri-ilma	
	Ilma	%	Nm3	%	Nm3	%	Nm3
Vanha:	52	33,3	17,3	62,9	32,7	3,8	2
	60	30,5	18,3	58,7	35,2	10,8	6,5
	70	27,1	19	54,7	38,3	18,1	12,7
	80	24,3	19,4	51,9	41,5	23,9	19,1
Uusi:	52	34,6	18	63,8	33,2	1,5	0,8
	60	28,7	17,2	55,3	33,2	16,0	9,6
	70	24,3	17	54,3	38	21,4	15
	80	31,3	25	50,0	40	18,8	15

14.4.3 Pesarakoon hallinta

Ensimmäisen koeajosarjassa huomattiin, että pesarakoon kasvattamisella on positiivinen vaikutus reduktioon, mutta samalla myös negatiivinen vaikutus tulipesän jäähtymiseen. Myöhemmissä koeajosarjoissa huomattiin, että ruiskutuspaineen laskiessa myös pesarakoko pienenee. Pienellä pesarakoolla keon koko myös pienenee, mikä voisi selittää pisan koksipalamisen alkavan liian aikaisin. Uuden pesarakoon ylätasoinen tavoitteena on pitää pesarakoko mahdollisimman suurena laskematta tulipesän keon lämpötilaa. Suurella pesarakoolla on myös pienempi riski nousta savukaasuvirtojen mukana lämmönsiirtopinnoille aiheuttaen tukkeutumista.

Ennen koeajoja operaattorit ajoivat pisarakokoa vakio -asetuksella, jolloin itse syötettiin kuiva-aineen kiehumapistettä korkeampi arvo. Kuiva-aineen kasvaessa kiehumapiste nousee, mutta lämpötilan ero kiehumapisteeseen pysyy vakiona. Tavallisesti pisarakoon vakiointilämpötila on ollut syysseisokin 2018 jälkeen 8.6 – 9.1 °C yli lipeän kiehumapisteen. Koeajoista saatujen huomioiden pohjalta rakennettiin uusi pisarakokoa optimoiva ylätaso. Uudessa pisarakoon ylätasosäädössä seurataan savukaasujen SO₂ -pitoisuutta, joka kertoo keon lämpötilasta. Uudeksi pisarakoon vakiointilämpötilan perustasoksi on määritelty 8.1 °C, mistä ylätaso lähtee nostamaan tarvittaessa lämpötilaa SO₂ -pitoisuuden mukaan. Pitoisuuden noustessa yli 15 ppm säätö alkaa hiljakseen nostamaan vakiointilämpötilaa, jolloin pisarakoko pienenee. Lämpötilan kasvun muutosnopeus kasvaa aina 30 ppm:n asti, jonka jälkeen muutosnopeus pysyy vakiona. Pitoisuuden tippuessa alle 15 ppm vakiointilämpötila alkaa laskemaan hitaasti määritettyyn 8.1 °C perustasaan.

Pisaran muodostuminen on riippuvainen lämpötilan lisäksi ruiskutuspainesta sekä lipeän laadusta. Oikean pisarakoon löytäminen vaatii jatkuvaa seurantaa ja kommunikointia keskenään operaattorilta ja kenttämieheltä. Kenttämiehen tulee seurata silmämääräisesti pisaran lentokulmaa sekä kokoa. Pisaran lentokulma säädellään ruiskujen kulmaa säätämällä. Pisaran tulisi lähteä ruiskusta kohtisuorasti kattilan seinään nähden. Yläviistoon lähtevä pisara todennäköisemmin karkaa savukaasujen mukana aiheuttaen carryoverin määrän kasvua. Alaviistoon lähtevä pisara voi aiheuttaa keon viilenemisen ja häiriötä keon hallinnassa.

Ruiskujen likaantumisen voidaan päätellä pisarakoon optimaalisuutta. Palamattoman lipeän kertyminen ruiskun ympärille voi kertoa liian pienestä pisarakoosta, joka voi selittyä liian matalalla ruiskutuspainella. Liian korkealla ruiskutuspainella pisarat voivat lentää seinille ja tukkia ilmarekistereitä. Polttolipeän ruiskutuspaineseen voidaan vaikuttaa pelkästään muuttamalla kuormaa tai ruiskujen määrää, koska kaikki kyseisen soodakattilan ruiskut ovat samankokoisia. Ruiskujen paikat tulee valita mahdollisimman symmetrisesti, jotta palaminen olisi mahdollisimman tasaista. Takaseinällä tulee välttää käyttämästä yhtä ruiskua enempää tukottelun takia. Polttolipeän kokonaismäärän heiluminen kasvaa, jos takaseinällä on enemmän kuin yksi ruisku. Operaattorin tulee seurata tulipesäkamerasta keon muutoksia, reduktion kehitystä sekä savukaasupäästöjen

NO_x - ja SO₂ -pitoisuuksia. Pisarakoon voidaan olettaa olevan sopiva, kun kattilan reduktioaste on korkea, tulipesästä löytyy kekoa, tulipesä ei rikittlee sekä redusoitu NO_x -päästö on korkealla tasolla.

14.4.4 Muut säätömuutokset

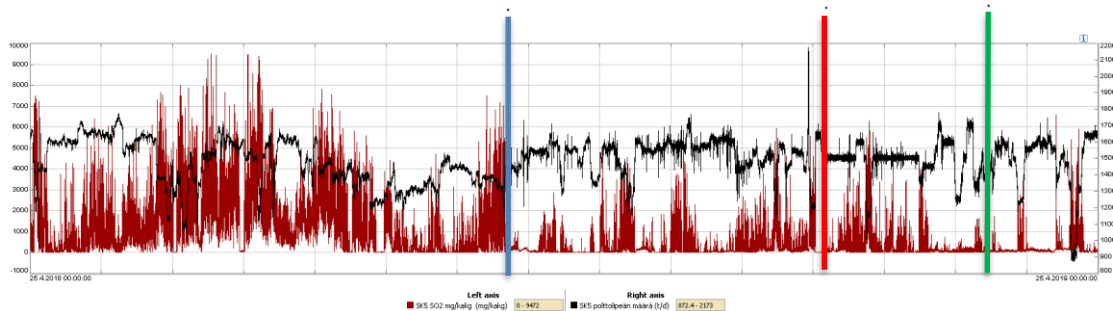
Ennen koeajoja molempia soodakattiloita ajettiin litrasäädöllä, jossa polttoliipeän syötön litramäärä pidettiin vakiona. Molemmille kattiloille rakennettiin mahdollisuus ajaa kuormamääräisellä virtaussäädöllä, jossa syötettävän kuiva-aineen määrä pysyy vakiona. Vakiokuormalla ajettaessa litramääräinen syöttö vaihtelee kuiva-ainepitoisuuden muutoksen mukaan. Kuiva-aineen määrän tasainen syöttö luo stabiilimman palamisprosessin, jolloin palamisilman määrä ei vaihtelee pienistä kuiva-ainepitoisuuden muutoksista.

Myös toiselle ja suuremmalle soodakattilalle luotiin uusi happitavoite NO_x -päästöjen minimoimiseksi. Molemmilla soodakattiloilla on yhteinen ympäristölupa, joten suuremman soodakattilan ajotapamuutoksilla saavutetaan suurempi muutos päästöjen kokonaislaskennassa. Tässä työssä ei esitellä kyseistä muutosta, mutta tämä näkyy varsinkin tulosten tarkastelussa.

14.5 Reseptien vaikutukset soodakattilan käytettävyyteen

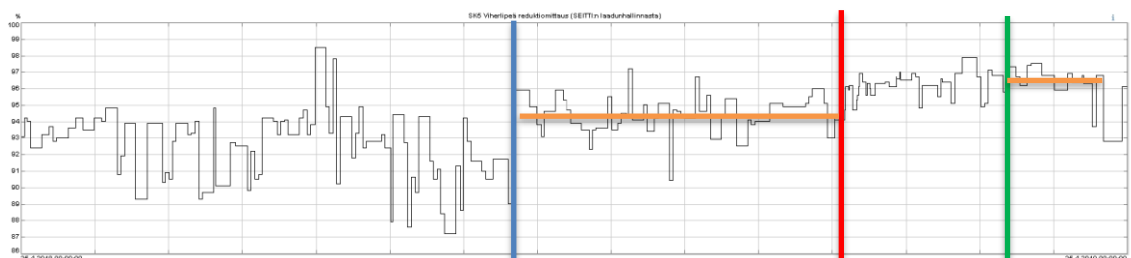
Uusi happitavoite, ilmareseptit ja pisarakoon hallinta otettiin käyttöön 13.3.2019. Uusien reseptien vaikutusta määritellään 13.3. – 25.4.2019 väliseltä ajalta. Saatuja parannuksia peilataan referenssijaksoon syysseisokin 2018 jälkeisestä ajasta koeajojen alkuun 20.1.2019 asti. Kuvissa on käytetty erivärisiä viivoja, jotka havainnollistavat eri ajankohtia: sininen tarkoittaa huoltoseisokin päättymishetkeä, punainen koeajojen aloituspäivämäärä ja vihreä uusien muutosten käyttöönottoa. Uusilla resepteillä on saatu selvästi vähennettyä tulipesässä syntyviä SO₂ -päästöjä, joka voidaan huomata kuvasta 44. Kuvassa on havainnollistettu polttoliipeän määrän sekä tulipesästä syntyvien SO₂ -päästöjen pitoisuutta syötettyä polttoaineen kuiva-ainekiloa kohden 25.4.2018 –

25.4.2019 väliseltä ajalta. Uudet ilmareseptit ovat selvästi nostaneet tulipesän alaosan lämpötilaa, jolloin SO₂-päästöjä ei synny. Tämä on varsinkin huomattavissa normaaleilla ja korkeilla kuormilla. Matalilla, alle 1300 tka/d, kuormilla kattila on edelleen herkkä rikkidioksidin syntymiselle, mikä selittyy huonosta säädettävyydestä ilmajärjestelmässä.

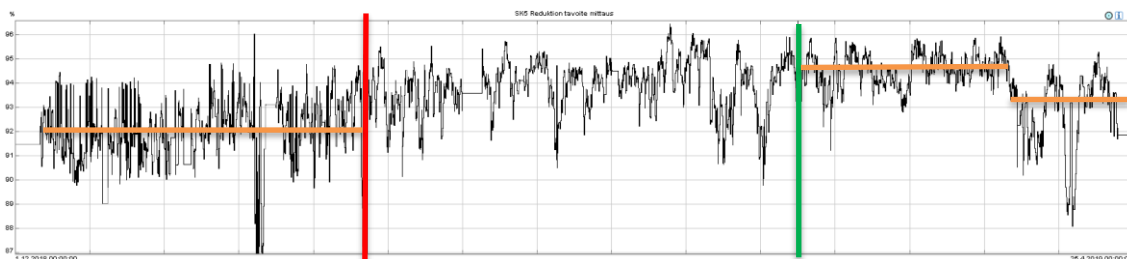


Kuva 44. Rikkidioksidipäästöt ja soodakattilan kuorma 25.4.2018 - 25.4.2019, Punainen kuvaa rikkidioksidipäästöjä (mg/kakg) ja musta kuvaa kattilan kuormaa (tka/d).

Kuumempi keon lämpötila, suurempi pisarakoko ja pienempi yli-ilman määrä luovat paremmat pelkistymisolosuhteet tulipesässä. Tämä voidaan huomata reduktioasteen nousuna koeajojen jälkeen. Aluksi uusien reseptien käyttöönoton jälkeen reduktioaste on noussut keskimäärin noin 2 %-yksikköä verrattuna koeajoja edeltävään tilanteeseen niin titraattorin mittauksissa kuin laboratoriomittauksissakin. Huhtikuun alkupuolella reduktioaste on tasollisesti kuitenkin laskenut tuntemattomasta syystä, jolloin parannus koeajoja edeltävään tilanteeseen on enää 1 %-yksikön luokkaa titraattorin mittaustuloksista luettuna. Kuvassa 45 on esitetty laboratoriomittauksien reduktioaste ja kuvassa 46 on vastaavasti titraattorin mittaamia reduktioasteen arvoja.

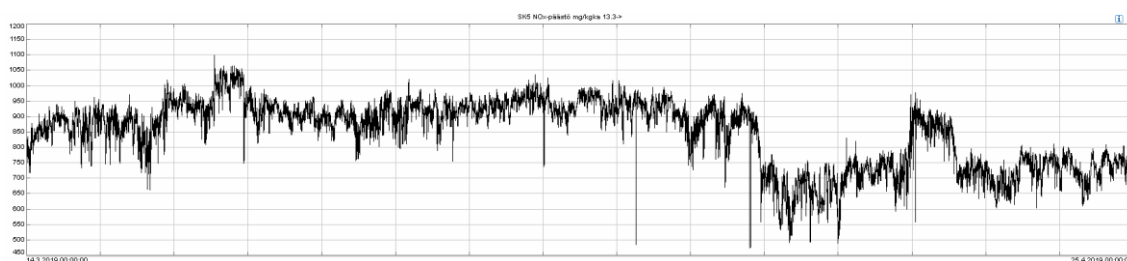


Kuva 45. Laboratorion viherlipeästä määrittämät reduktioasteet 25.4.2018 - 25.4.2019



Kuva 46. Titraattorin mittaamat reduktioasteet 1.12.2018 - 25.4.2019

Tulipesän lämpötilaa nostaessa typenoksidipäästöt nousevat, mutta vastaavasti tiukemmalla happitavoitteella syntyvien päästöjen määrää ollaan kokonaisuudessa saatu vähennettyä. Reseptimuutosten jälkeen keskimääräiset NO_x -päästöt ovat olleet $847 \text{ mgNO}_x/\text{kakg}$, joten tiukempi happitavoite on laskenut päästöjä noin 15 %. Kuvasta 47 voidaan kuitenkin huomata NO_x -päästöjen laskeneen radikaalisti kerralla. Huhtikuun alussa on tapahtunut jotain palamisessa tuntemattomasta syystä, mikä on huonontanut myös reduktioastetta. Myös verrattavat ajat ovat lyhyitä, jotta voitaisiin varmuudella todeta oikea NO_x -päästöjen vähennys.



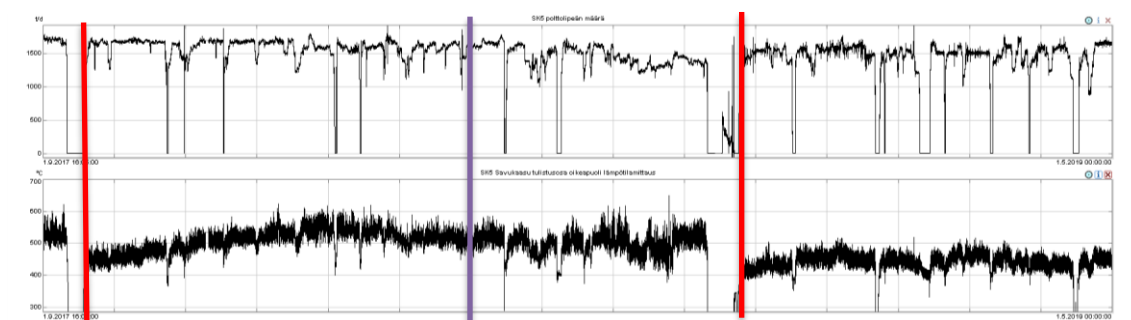
Kuva 47. NO_x -päästöt polttoliipeän kuiva-ainekiloa kohden 14.3. - 25.4.2019

Ympäristölupamielessä NO_x -päästöjen kehitys on ollut reseptimuutosten jälkeen laskevassa suunnassa huhti- ja toukokuun ajan. Tämä voisi selittyä molempien kattiloiden tiukemmilla happitavoitteilla, jotka kytkettiin päälle maaliskuun aikana. Päästöjen kehityksen laskeva suunta antaa varmuutta, että jatkossa pystytään pysymään uuden ominaispäästöluparajassa sallimissa rajoissa ($1.4 \text{ kgNO}_2/\text{Adt}$) vuonna 2019. Kuvassa 48 on molempien soodakattiloiden kilogrammamääräiset typenoksidipäästöt, tuotetut sellutonnit sekä näistä lasketut ominaispäästöt kuukausitasolla 2018 tammikuusta alkaen 2019 toukokuuhun asti.

Kuukausi	Tuotanto Adt	NO _x			Om.päästö kgNO ₂ /Adt
		SK5 kgNO ₂	SK6 kgNO ₂	Yhteensä kgNO ₂	
tammikuu	86038	48545	74040	122586	1,42
helmikuu	78301	38422	67770	106193	1,36
maaliskuu	86229	43350	67097	110447	1,28
huhtikuu	84451	40913	65126	106039	1,26
toukokuu	82172	39488	61840	101328	1,23
kesäkuu	80047	35463	77822	113286	1,42
heinäkuu	91889	41318	76212	117530	1,28
elokuu	90388	34201	83842	118043	1,31
syyskuu	42074	14235	38800	53034	1,26
lokakuu	92940	48473	80010	128483	1,38
marraskuu	85268	49293	74460	123752	1,45
joulukuu	91143	40513	85063	125576	1,38
tammikuu	84423	32295	76209	108504	1,29
helmikuu	80625	33685	74722	108407	1,34
maaliskuu	92426	38110	83250	121360	1,31
huhtikuu	86738	30036	72362	102398	1,18
toukokuu	51642	19672	38306	57978	1,12

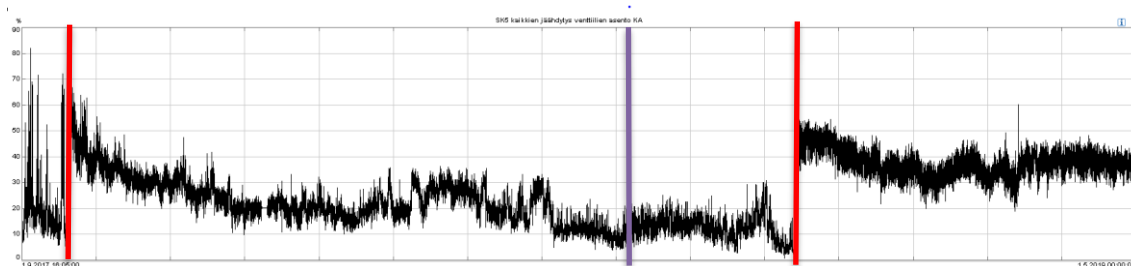
Kuva 48. Molempien soodakattiloiden kilogrammamääräiset NO₂ -päästöt sekä yhteenlaskettu ominaispäästö. (Stora Enso Oy 2019b)

Polton optimoinnin tarkoituksena on luoda parhaimmat mahdolliset olosuhteet tulipesään. Optimoinnin päätavoitteesta, koko sellutehtaan tuotannon kannalta, on ehkäistä lämmönsiirtopintojen likaantumisen johtuva tukkeutuminen, mikä johtaa ikävimmissä tilanteissa suuriin tuotannon menetyksiin. Likaantumista poltonohjausmielessä voidaan vähentää carryoverin määrää vähentämällä sekä nostamalla tulipesän alaosan lämpötilaa. Likaantuminen on ollut selvästi vähäisempää nykyään kuin huoltoseisokkien 2017 ja 2018 välisenä aikana. Suurin painoarvo on todennäköisesti uudella polttolipeäjärjestelmällä, mikä on parantanut polttoaineen syöttöä tulipesään. Kuvassa 49 on havainnollistettu primääritulistimien 1A ja 1B välisen solan savukaasujen lämpötilaa sekä kuormaa 1.9.2017 – 1.5.2019 välisellä ajalla. Punaisten viivojen välissä on huoltoseisokkien 2017 ja 2018 välinen aika. Lämpötilat ovat nousseet nopeasti yli 500 °C ja ovat piikitelleet satunnaisesti 600 °C. Vastaavasti 2018 huoltoseisokin jälkeen lämpötilat ovat pysyneet stabiilisti noin 450 °C ympärillä. Violetti viiva havainnollistaa päivämäärää 1.5.2018, joka on vuosi taaksepäin kuvaajan viimeisestä päivämäärästä.



Kuva 49. Savukaasujen lämpötila 1A ja 1B tulistimien välissä sekä kattilan kuorma 1.9.2017 – 1.5.2019

Ruiskutusvesiventtiilien asennot ovat toinen keino kertomaan tulistinalueen likaantumisesta. Kuvaan 50 on otettu kaikkien neljän ruiskutusvesiventtiilien asentojen keskiarvot yli 55 kg/s höyryntuotannolla. Kuvaajasta voidaan havaita selvästi sama asia, kuin savukaasujen lämpötilasta primääritulistimella. Tulistinalueen likaantuminen on ollut selvästi maltillisempaa huoltoseisokin 2018 jälkeen kuin vastaavasti huoltoseisokin 2017 jälkeen. Venttiilien asennot ovat olleet keskimääräisesti 1.5.2018 (violetti viiva) noin 10 % auki kuin vastaava arvo kuvaajan lopussa (1.5.2019) on noin 35 %.

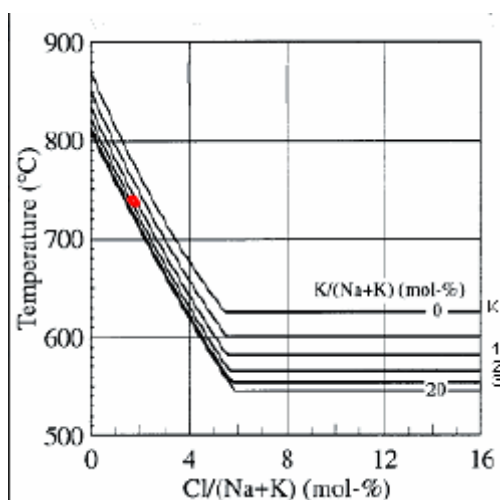


Kuva 50. Ruiskutusvesiventtiilien asentojen keskiarvo 1.9.2017 – 1.5.2019

14.6 Lipeä- ja tuhka-analyysit

Soodakattilan likaantuminen näyttää johtuvan pääasiassa pelkästään carryoverin suuresta määrästä, kun katsotaan koeajoista analysoituja polttolipeä- ja sähkösuodintuhkanäytteitä. Polttolipeänäytteiden analyysit löytyvät liitteestä 2. Polttolipeän klooripitoisuus on ollut koeajojen aikaan todella maltillinen ja pitoisuus on vaihdellut 2.0 – 2.4 g/kg välillä. Näin pieni pitoisuus ei vielä kasvata korrosio- tai tukkeutumisriskiä, kun turvallisena klooripitoisuuden rajana voidaan pitää teoriaosuudessa mainittua 0.5 % kuiva-aineesta. Liitteessä 3 on sähkösuodintuhkan analyysit. Koeajoissa sähkösuodintuhkan laboratorioissa määritellyt pH:n arvot ovat olleet

kaikki yli 10, mikä osoittaa rikkidioksidipäästöjen olleen suhteellisen pieniä koeajojen aikana. Sähkösuodintuhkan pohjalta voidaan laskea tahmalämpötilaa T_{15} , kun tiedetään natriumin, kloorin ja kaliumin määrä. Kloorin mooliosuus suhteessa tuhkan alkaleihin on vaihdellut 1.7 – 2.0 mol % Cl/(Na+K) ja kaliumin vastaava mooliosuus alkaleihin 10.3 – 11.1 mol % K/(K+Na). Näiden pohjalta tuhkan tahmalämpötila T_{15} on noin 750°C, mikä voidaan huomata kuvasta 51.



Kuva 51. Kaliumin ja klooripitoisuuden vaikutus tuhkan tahmalämpötilaan. Punainen piste havainnollistaa koeajojen sähkösuodin tuhkan tahmalämpötilaa. (Vakkilainen 2005, 8-14)

Todellisuudessa tulistinalueella kerrostumaa aiheuttaa carryover -hiukkaset, joiden kaliumin ja kloorin pitoisuudet ovat pienempiä kuin pääasiassa tiivistyneestä pölystä koostuvan sähkösuodintuhkan. Lisäksi savukaasujen lämpötila primääritulistimien välissä on korkeimmillaan ollut 600 °C, mikä voidaan huomata kuvasta 49. Korkean tahmalämpötilan ja savukaasujen matalien lämpötilojen pohjalta voidaan olettaa, että tiheämpien lämmönsiirtopintojen tukkeutumisen riski on varsin matala, varsinkin koeajojen kloori- ja kaliumpitoisuuksilla.

15 SUOSITUKSET

Soodakattilan parhaita ajotapoja etsiessä törmättiin moneen kehitystä kaipaavaan osaluokkaan. Suurimmat kehityskohteet soodakattilalla liittyvät laitteistojen ja ilmajärjestelmän uusintaan. Myös lipeän laadun vaihtelulla on suuri merkitys kyseisen soodakattilan käytettävyyteen, varsinkin lipeän sulfiditeetillä.

15.1 Sulfiditeetin hallinta

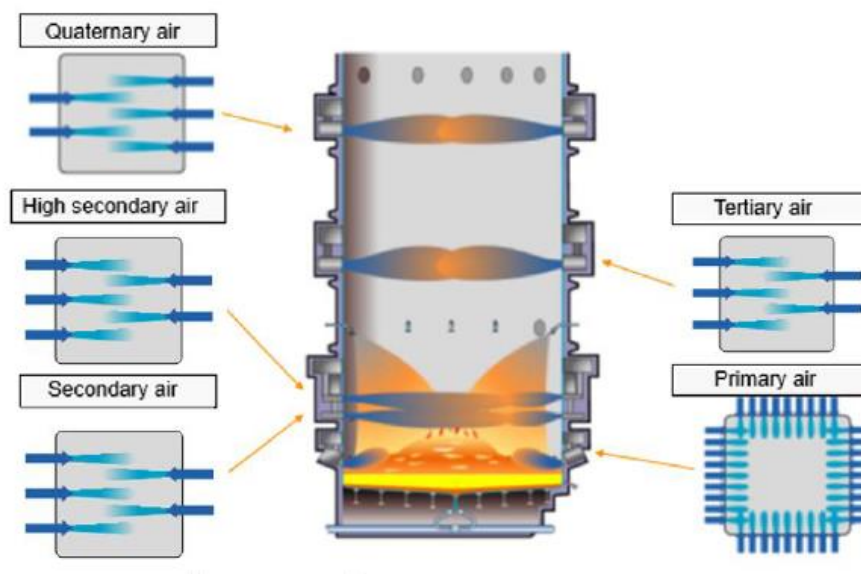
Sulfiditeetin hallinta lipeäkierron tulisi paremmin olla hallinnassa. Tehokkaimmat keinot nykyjärjestelmässä sulfiditeetin hallintaan ovat natriumhydroksidin tankkaaminen kuitulinjojen happivaiheeseen tai lentotuhkan ulosotto soodakattilalla. Natriumhydroksidin tankkaaminen lisää lipeäkierron olevan natriumin määrää, mikä laskee sulfiditeettiä ja nostaa kiertävän alkalien määrää. Lentotuhka sisältää pääasiassa natriumsulfaattia, joten lentotuhkan ulosotossa häviää lipeäkierron rikin lisäksi myös natriumia. Sulfiditeettiä hallittaessa muutokset näkyvät hitaasti, joten päivittäinen sulfiditeetin kehityksen seuraaminen ja muutoksiin vaikuttaminen kuuluvat lipeäkierron rutiinimaisiin töihin. Soodakattiloiden käytettävyyden kannalta sulfiditeetti tulisi pitää korkeintaan 37 – 38 %.

15.2 Palamisilmajärjestelmän uusinta

Soodakattilan palamisilmajärjestelmä on suurin yksittäinen kattilan parasta potentiaalia rajoittava tekijä. Nykyisen ilmajärjestelmällä on monia heikkouksia, kuten huono säädettävyys, suuri primääri- ja sekundääri-ilman määrä, palamisen epäsymmetria, ilmojen huono sekoittuvuus, ilmarekistereiden mekaaninen kunto sekä korkeat NO_x -päästöt. Modernilla vertikaali- tai monitasoilmajärjestelmällä saataisiin palaminen tehokkaammin vaiheistettua, jolloin kattilaa voidaan ajaa pienemmällä ilmamäärällä sekä ilmat sekoittuisivat tehokkaammin. Vertikaali- tai monitasoilmajärjestelmässä tulipesän alaosaan syötettävän ilman määrä vähenee, jolloin keon lämpötila kasvaa sekä hapen määrä minimoituu keossa. Tämän seurauksena kattilan tulipesän herkkyys rikkidioksidipäästöjen syntymiseen pienenee sekä reduktioaste paranee. Vaiheistetulla poltolla saadaan myös vähennettyä NO_x -päästöjä. (Knowpulp 2019)

Huoltoseisokissa 2018 suoritettujen kattilan sisäpuolisten tarkastusraporttien pohjalta ilma-aukkojen mekaaninen kunto alkaa olemaan huono. Primääri-, sekundääri- ja tertiääri-ilmatasojen ilma-aukkojen evityksissä on runsaasti säröilyä sekä primääri-ilma-aukkojen ympärillä olevissa kattilaputkissa pintavaurioita. Ilma-aukkojen huono mekaaninen kunto kasvattaa riskiä kattilavuotoon. Raportissa suositeltiin myös kattilan pohjan uusintaa, koska pohjaputkissa on useita vanhoja päällehitsaus- ja hiontakohia. Kattilan pohjanvaihdon yhteydessä kattilan ilmajärjestelmän uusinta olisi erittäin suositeltavaa. (Valmet 2018)

Uudessa vertikaali-ilmajärjestelmässä ilmatasojen määrä kasvaisi viiteen, jolloin sekundääri- sekä tertiääri-ilmaa syötetään kahdesta eri tasosta. Samalla tasokohtaisten ilma-aukkojen määrä vähenee ja aukkojen koko kasvaa. Tämä parantaa aukkojen puhtaana pysymistä ja jäähdytystä sekä vähentää seisokissa suoritettavia kunnossapitotöitä. Sekundääri- ja tertiääri-ilma-aukot tulisivat sijaitsemaan kattilan päätyseinissä toisiinsa nähden lomittain ns. sormimalli, jolloin kattilan palamisen symmetria tasoittuu sekä ilmojen tunkeutuvuus ja sekoittuvuus paranee. Vaiheistetussa palamisessa savukaasut eivät kanavoidu keskelle tulipesää, jolloin myös carryoverin määrä vähenee. Kuvassa 52 on esitetty Valmetin malli monitasoilmajärjestelmästä.



Kuva 52. Valmetin malli monitasoilmajärjestelmästä (Valmet 2019)

15.3 Mittauslaitteiden toimintavarmuus

Soodakattiloiden erilaisten poltonohjaukseen vaikuttavien mittarien toiminta tulee olla mahdollisimman absoluuttinen ja käyttövarma. Mittarien virheellinen toiminta voi sekoittaa automaatiojärjestelmien käsitystä palamisen tilasta ja ohjata prosessia pahimmassa tapauksessa väärään suuntaan. Mittareiden epävarmuus vaikuttaa myös operaattoreiden herkkyyteen tehdä muutoksia ja korjata palamisprosessia.

Savukaasuanalysointilaitteilta saatavien CO - ja SO₂ -pitoisuuksien tarkkuus tulee olla todellisuutta vastaava, koska uudet muutokset seuraavat näitä vahvemmin. Uusi happitavoite ohjaa palamista yhä niukemmalla yli-ilmalla ja riski tulipesän CO -päästöjen nousuun kasvaa samalla. Uudessa pisarakoon hallinnan säädössä pisarakoon vakiointilämpötilaa on tiputettu. Lämpötilan lasku kasvattaa pisarakokoa, jolloin riski pisaroiden karkaamisesta tulipesän yläosaan savukaasujen mukana pienenee. Samalla riski tulipesän jäähtymiseen kasvaa. Ylätasoa säädetään seuraavasti savukaasuanalysointilaitteen SO₂ -pitoisuuden arvoa ja tekee muutoksia vakiointilämpötilaan SO₂ -pitoisuuden mukaan. Ylätasoa säädetään taustalla on saada mahdollisimman suuri pisarakoko ilman keon jäähtymistä.

Soodakattilan jäännöshapetta mittaavien antureiden arvot ohjaavat poltonohjauksen ilmamäärää ja pyrkii pitämään savukaasujen happipitoisuuden vakiona. Antureiden virheellinen ja epätarkka toiminta voi mahdollisesti sekoittaa poltonohjausta varsinkin tilanteissa, joissa toinen anturi hajoaa. Myös palamisen symmetrian tasapainotilan etsiminen vaikeutuu, jos molempia mittareita ei ole päästy kalibroimaan. Palamisen symmetrian saavuttamisen etuna on tasainen lämmönsiirtopintojen likaantuminen, mikä pidentää kattilan pesuväliä.

Erilaisten palamista ohjaavien mittarien toimintaa tulee seurata, kalibroida ja arvioida niiden luotettavuutta. Luotettavuutta arvioidessa tulee harkita jatkossa mittalaitteiden täydellinen tai osittainen päivittäminen soodakattilan käytettävyyden kannalta.

15.4 Sekoitussäiliön uusinta

Suolan sekoitussäiliö aiheuttaa heittelyä polttolipeän syötössä, koska tuhka ei sekoitu kunnolla mustalipeän kanssa. Lipeän virtauksen heittely aiheuttaa heiluntaa tulipesäprosessissa. Kyseinen sekoitussäiliö sekä sekoittaja ovat alkuperäisiä ja alkavat olemaan mekaanisesti huonossa kunnossa. Laitteiden mekaanisen kunnan rapistuminen kasvattaa käytettävyyseriskiä ja pahimmillaan aiheuttaa koko tehtaan tuotannon rajoittamista. Myös sekoitussäiliön hönkäjärjestelmän tehottomuus aiheuttaa ongelmia tuhkan pudotusputkissa keräten suolaa seinämiin, mikä kasvattaa riskiä putkien tukkeutumiseen. Laitteiden uusiminen parantaa polttoprosessia sekä kattilan käytettävyyttä.

16 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tarkoituksena oli löytää uusi ajotapa Imatran tehtaiden pienemmälle soodakattilalle eri kuormilla. Työssä käytiin läpi soodakattilan tulipesän toimintaa sekä vaikutuksia likaantumiseen ja savukaasupäästöihin. Data-analyysien sekä koeajojen perusteella havaittiin vanhojen ajotapojen olevan epäsuotuisat tulipesän toiminnalle ja lämpöpintojen likaantumiselle. Entisessä ilmajaossa primääri- ja sekundääri-ilmojen suuri määrä aiheutti keon viilentymistä, joka ei ole suotuisa kattilan puhtaana pysymisen, savukaasupesurin natriumhydroksidin kulutuksen sekä reduktioasteen kannalta. Koeajoissa havaittiin pisarakoon hallinnalla olevan merkitystä reduktioasteeseen sekä keon hallintaan. Käyttöhenkilökunnan tottumuksesta pisarakokoa oli pidetty selvästi liian pienenä, mikä aiheuttaa carryoverin määrän kasvua ja huonoa reduktioastetta. Entisen happitavoitteen arvot oli pidetty turhan suurena tavoittelemalla CO-päästöissä nolaa, mikä vaikuttaa epäedullisesti syntyviin NO_x -päästöihin sekä kattilan lämpöhyötysuhteeseen.

Koeajojen havaintojen pohjalta rakennettiin poltonohjaukseen uusi happitavoite, ilmaresepti ja pisarakoon hallinta. Uusien reseptien toimivuutta seurattiin yhdessä käyttöhenkilökunnan kanssa, minkä pohjalta todettiin parannuksien vaikuttavan lupaavalta. Uusien reseptien käyttöönoton jälkeen noin 1.5 kk seurantajaksolla havaittiin selviä parannuksia tulipesän toiminnassa. Tulipesän synnyttämien rikkipäästöjen määrä oli selvästi laskenut normaaleilla ja suurilla kuormilla, mutta palamisilmajärjestelmän heikkouden takia pienillä kuormilla syntyy edelleen rikkipäästöjä. Savukaasujen happitavoitteen laskeminen oli vähentänyt noin 15 %: lla syntyviä NO_x -päästöjä, vaikka tulipesän lämpötilaa oli saatu nostettua. Myös soodakattilan reduktioasteessa huomattiin selvä tasollinen parannus, joka keskimääräisesti nosti reduktioastetta 1 – 2 % -yksikköä. Seurantajakson lyhyys tuo huomattavan epävarmuuden saatujen hyötyjen vertailussa edeltävään tilanteeseen. Soodakattilan yhtäjaksoinen käytettävyys huoltoseisokkien välissä on tehtaan tuotannon kannalta ratkaisevassa roolissa. Savukaasujen lämpötiloja ja ruiskutusveden virtauksia vertailemalla aikaisempiin vuosiin, voidaan todeta kattilan lämpöpintojen pysyvän paremmin puhtaana aiheuttamatta käytettävyysongelmia ajojakson loppupuolella. Todennäköisesti suurin vaikutus tähän on uudella polttolipeäjärjestelmällä.

Sellutehtaan keittämöiden alituinen tuotannon vaihtelu ja pitkät yhtäjaksoiset ajojaksot luovat haastavat olosuhteet soodakattilan käytölle, jonka takia palamisprosessia ei voida täysin jättää automaatio-ohjelmien varaan. Käyttöhenkilökunnan syvälinen ymmärrys prosessista ja kyky reagoida muutokseen vaikuttavat oleellisesti soodakattilan käytettävyyteen ja keittokemikaalien regenerointiin. Suurimmat kipukohdat nykyisessä järjestelmässä ovat soodakattilan vanhanaikainen ilmajärjestelmä sekä mustalipeän matala kuiva-ainepitoisuus. Nämä vaativat kuitenkin yhtiöltä suuria investointeja, joita kannattaa vakavasti harkita tulevaisuudessa prosessin ja käytettävyyden parantamiseksi. Tulevaisuudessa kannattaa myös panostaa sulfiditeetin hallintaan, kuiva-ainepitoisuuksien vaihtelun minimointiin ja polttoa ohjaavien mittareiden luotettavuuteen

LÄHDELUETTELO

Adams Terry N., Frederick Wm. James, Hupa Mikko, Iisa Kristiina, Jones Andrew K. & Tran Honghi. 1997. Kraft Recovery Boiler. American Forest & Paper Association. TAPPI PRESS. ISBN 0-9625985-9-3. 381 s.

Aluehallintovirasto. 2017. Imatran tehtaiden ympäristölupapäätös. [saatavilla: <https://tietopalvelu.ahtp.fi/Lupa/>]

Alakangas Eija, Hurskainen Markus, Laatikainen-Luntama Jaana & Korhonen Jaana. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT. 263 sivua. ISBN 978-951-38-8419-2. 263 s.

Andritz. 2019. Soodakattila 5 ja 6 kapasiteetin nostotutkimus. [Sisäinen materiaali]

Huhtinen Markku, Kettunen Arto, Nurminen Pasi & Pakarinen Heikki. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5.painos. Oy Edita Ab. Helsinki. ISBN 951-37-3360-2. 379 s.

Janka Kauko, Ruohola Tuomo, Siiskonen Pekka & Tamminen Ari. 1997. A comparison of recovery boiler field experiments using various NO_x reduction methods. VOL. 81: NO. 12. TAPPI JOURNAL. 137-141s.

Juvonen Tuukka. 2004. Mustalipeän polttomenetelmät Suomen soodakattiloissa. Diplomityö. Konetekniikan koulutusohjelma. Helsingin teknillinen yliopisto. Raportti 3/2004. Suomen soodakattilayhdistys ry. 77s.

KnowPulp 2.0. 2019. Prowledge Oy. sellutekniikan ja automaation oppimisympäristö [Saatavilla: <http://www.knowpulp.com/suomi/>]

Miikkulainen Pasi, Kankkunen Ari, Järvinen Mika & Fogelholm Carl-Johan. 2009. The significance of velocity in black liquor spraying. January 2009. TAPPI JOURNAL. 36-41s.

Raiko Risto, Saastamoinen Jaakko, Hupa Mikko & Kurki-Suonio Ilmari. 2002. Poltto ja palaminen. 2. täydennetty painos. Helsinki: International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. ISBN 951-666-604-3. 750 s.

Salmenoja Keijo. 2014. Kraft recovery boiler dust chemistry – Implications from operating boilers. ANDRITZ.

Skrifvars B-J., Hupa M. & Hyöty P. 1997. Åbo Akademi & Oy Tampella Ab. Lentotuhkan tarttuvuusominaisuudet.

Stora Enso Oy. 2018. Tehtaan esittelymateriaali. Stora Enson tietokanta. [Sisäinen materiaali]

Stora Enso Oy. 2019a. SK5 Soodakattilan käyttöohjeet. Stora Enson tietokanta [Sisäinen materiaali]

Stora Enso Oy. 2019b. Päästölaskentajärjestelmä. Stora Enson tietokanta. [Sisäinen materiaali]

Suhr Michael, Klein Gabriele, Kourti Ioanna, Gonzalo Miguel Rodrigo, Santonja German Giner, Roudier Serge & Sancho Luis Delgado. 2015. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. European Commission. 866 s. ISBN 978-92-79- 48167-3. 866 s.

Tran Honghi, Vakkilainen Esa K. 2008. The Kraft Chemical Recovery Process. TAPPI. [Saatavilla: <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/1-1.pdf>]

Tran Honghi & Tandra Danny. 2015. Recovery boiler sootblowers: History and technological advances. January 2015. TAPPI JOURNAL. [Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/279324825_Recovery_boiler_sootblowers_History_and_technological_advances]

Valmet Oy. 2018. SK5 Soodakattilan tarkastusraportti. [Sisäinen materiaali]

Valmet Oy. 2019. SE Kaukopää SK5 Kapasiteetinmuutos tarkastelu. [Sisäinen materiaali]

Vakkilainen Esa. 2002. Kaliumin ja kloorin käyttäytyminen soodakattilassa. Soodakattilayhdistys ry. SOTU-hanke.

Vakkilainen Esa. 1996. Recovery Boiler Adjustable Air. Ahlstrom Machinery.

Vakkilainen, Esa. 2005. Kraft recovery boilers – Principles and practice. Suomen Soodakattilayhdistys ry. ISBN 952-91-8603-7. 276 s.

Wessel Rick. 2015. Recovery Boiler Air Systems. The Babcock & Wilcox Company. TAPPI Press. [Saatavilla: <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/4-5.pdf>]

LIITE 1. MONIMUUTTUJA-ANALYYSI ENSIMMÄISISTÄ KOEAJOSARJOISTA

22.1.2019 13:00:00 - 2.2.2019 07:00:00_All data

	SK5 NOx-päästö mg/kgka 23.11.2018 K10 14	SK5 Pala misilma sek/kgka	SK5 Pala misilma prim/kgka	SK5 SO2 mg/kgk 23.11.- 18	SK5 Polt- tolipeä kuiva- ainepito- isuus-- ⁰	SK5 Redu- ktion tavoite mittaus-- ⁰	CO-- ⁰	SK5 Polt- toon men- evä polt- tolipeä lämpötila asasäätö mittaus-- ⁰	SK5 Polt- tolipeä pisarako- ko sekä lämpötila asasäätö mittaus	SK5 (pri- m+sek)/k- gka	SK5 keon lämpötila ojen KA suod.
SK5 NOx-päästö mg/kgka 23.11.2018 K10 14	1	0.26	-0.13	-0.26	-0.48	0.13	-0.35	0.13	0.11	-0.28	0.31
SK5 Palamisilma tert/kgka	0.26	1	-0.48	-0.66	-0.48	-0.29	-0.08	-0.07	0.03	-0.82	0.36
SK5 Palamisilma sek/kgka	-0.13	-0.48	1	-0.03	0.27	-0.07	-0.19	-0.04	-0.03	0.69	-0.27
SK5 Palamisilma prim/kgka	-0.26	-0.66	-0.03	1	0.40	0.32	0.12	0.05	-0.07	0.70	-0.48
SK5 SO2 mg/kgk 23.11.-18	-0.48	-0.48	0.27	0.40	1	-0.06	0.10	0.34	-0.29	-0.31	0.48
SK5 Polttolipeä kuiva-ainepitoisuus-- ⁰	0.13	-0.29	-0.07	0.32	-0.06	1	-0.17	-0.03	0.53	0.24	0.18
SK5 Reduktion tavoite mittaus-- ⁰	-0.01	-0.08	-0.19	0.12	0.10	-0.17	1	0.04	-0.42	-0.42	-0.05
CO-- ⁰	-0.35	-0.37	0.21	0.24	0.34	-0.03	0.04	1	-0.08	-0.09	0.32
SK5 Polttoon menevä polttolipeä lämpötilasäätö mittaus-- ⁰	0.13	-0.07	-0.04	0.05	-0.29	0.53	-0.42	-0.08	1	0.95	0.00
SK5 Polttolipeä pisarakoko vakiointisaatö mittaus	0.11	0.03	-0.03	-0.07	-0.31	0.24	-0.42	-0.09	0.95	1	-0.07
SK5 (prim+sek)/kgka	-0.28	-0.82	0.69	0.70	0.48	0.18	-0.05	0.32	0.00	-0.07	1
SK5 keon lämpötilojen KA suod.	0.31	0.36	-0.27	-0.48	-0.33	-0.18	0.18	-0.04	-0.12	-0.54	1

LIITE 2. KOEAJOJEN SÄHKÖSUODINTUHKANÄYTTEET

Tehdas	Kattila	Pvm.	Klo.	pH	Na	K	Cl	S _{SEDVA}	S _{SEDVA} korjattu	SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ -S	CO ₂	S _{SEDVA} /SO ₄ ²⁻ -S	Kaukopää													
														22.1.2019	23.1.2019	24.1.2019	28.1.2019	29.1.2019	30.1.2019	31.1.2019	1.2.2019	7.2.2019	8.2.2019	11.2.2019	19.2.2019	7.3.2019	8.3.2019
															99,3	99,5	99,4	99,4	99,9	99,4	99,0	99,5	99,6	99,2	99,6	99,4	99,5
															10,8	10,4	10,9	10,4	10,3	10,0	10,1	10,0	10,6	10,0	11,1	10,8	11,1
					g/kg										285	282	288	286	281	280	285	283	280	287	305	317	
					g/kg										58,6	58,6	58,6	57,4	58,6	59,5	58,6	58,0	57,3	56,9	56,1	61,4	62,6
															9,67	8,96	9,50	8,79	9,48	9,17	9,09	8,18	9,50	9,38	8,81	9,09	9,41
															24,26	24,75	23,85	24,47	24,23	24,97	24,69	25,11	24,27	24,14	23,04	24,05	22,12
															24,13	24,67	23,68	24,37	24,15	24,91	24,62	25,05	24,17	24,04	22,80	23,90	21,79
															63,1	64,8	62,4	64,6	64,0	65,5	65,6	65,7	64,1	63,7	65,5	63,1	57,3
															21,06	21,63	20,83	21,56	21,36	21,86	21,90	21,93	21,40	21,26	20,09	21,06	19,13
															2,70	1,53	3,52	2,14	1,73	1,25	1,51	1,14	2,00	2,14	1,43	3,12	7,49
															1,15	1,14	1,14	1,13	1,13	1,14	1,12	1,14	1,13	1,12	1,13	1,13	1,14

