

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Tommi Koso

KORKEASTI KUORMITETUN SOODAKATTILAN LIKAANTUMISEN JA PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN

Työn tarkastajat: Prof. Esa Vakkilainen
TkT. Juha Kaikko

Työn ohjaaja: DI Esa Vihavainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikka

Tommi Koso

Korkeasti kuormitetun soodakattilan likaantumisen ja päästöjen vähentäminen

Diplomityö

2015

83 sivua 57 kuvaa, 6 taulukkoa

Tarkastajat: Professori, TKT Esa Vakkilainen
TKT. Juha Kaikko

Ohjaaja: DI Esa Vihavainen

Hakusanat: soodakattila, mustalipeä, likaantuminen, tulipesän toiminta, päästöt
Keywords: recovery boiler, blackliquor, fouling, plugging, furnace operation, emissions

Tässä työssä perehdytään korkeasti kuormitettujen soodakattiloiden tyypillisiin ongelmiin. Ongelmia ovat likaantuminen ja tukkeutuminen sekä liialliset päästöt. Työn teoriaosassa esitetään taustat likaantumiselle ja päästöjen muodostumiselle. Molemmat johtuvat suurelta osin tulipesän huonosta toiminnasta. Soodakattilan ilmajärjestelmä ja mustalipeän ruiskutus vaikuttavat tulipesän toimintaan.

Usein tulipesän toimintaa voidaan parantaa ilmajärjestelmän ja lipeänruiskutuksen säätöjä muuttamalla. Suurempi muutos tulipesän toimintaan saadaan uusimalla perinteinen sekundääri-ilmajärjestelmä vertikaali-ilmajärjestelmäksi. Nykyaikainen vertikaali-ilmajärjestelmä sekoittaa savukaasut tehokkaasti ja saa aikaan tasaisemman virtauksen tulipesään. Myös mustalipeän korkea kloori- ja kaliumpitoisuus voivat aiheuttaa lämpöpintojen likaantumista. Oikea nuohointen sijainti on tärkeä tekijä kattilan puhtaana pysymisen kannalta.

Työn kokeellisessa osassa selvitetään, kuinka erään eukalyptussellutehtaan korkeasti kuormitetun soodakattilan käytettävyyttä voidaan parantaa ja kapasiteettia nostaa soodakattilan toimintaa virittämällä. Kattilan nykyinen ajomalli ja ongelmat selvitettiin. Tulipesän toimintaa testattiin muuttamalla ilmajakoa primääri-, sekundääri- ja tertiääri-ilman välillä ja muuttamalla sekundääri-ilman syöttöä tulipesään. Testien ja kerätyn tiedon perusteella voitiin päätellä, miten soodakattilaa kannattaa modernisoida kapasiteetin nostamiseksi ja käytettävyyden parantamiseksi. Usein tulipesän toimintaa ja käytettävyyttä voidaan parantaa paljon jo pienilläkin muutostöillä. Kapasiteetin nostaminen vaatii tavallisesti suuremman investoinnin ja pidennetyn vuosihoitoseisokin.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Energy Technology

Tommi Koso

Reduction of emissions and fouling in heavily loaded recovery boilers

Master's Thesis

2015

83 pages, 57 pictures and 6 tables.

Examiner: Prof. (Tech.) Esa Vakkilainen
D.Sc. (Tech.) Juha Kaikko

Supervisor: M.Sc. (Tech.) Esa Vihavainen

Keywords: recovery boiler, black liquor, fouling, plugging, furnace operation, emissions

The aim of this master's thesis is to study typical problems of heavily loaded recovery boilers. The most common of the problems are fouling of boiler heat surfaces and excessive flue gas emissions. The theory part of this thesis sets out the background to fouling of boiler heat surfaces and emissions formation. Both fouling and excessive emissions are largely due to poor furnace operation.

Recovery boiler combustion air system and black liquor spraying have a major effect to furnace operation. Often the furnace operation can be improved by tuning the combustion air system and black liquor spraying. The greater change to the furnace operation is obtained by replacing traditional secondary air system with new vertical air system. As a result better mixing and more uniform flue gas flow velocity are achieved in the furnace. High chlorine and potassium content in black liquor can also cause fouling of heat surfaces. Proper soot blower spacing is an important factor to prevent fouling and plugging problems in recovery boilers.

In the experimental part of the thesis a study is made for a recovery boiler located in eucalyptus pulp mill in South-America. The aim of the study was to find methods how the recovery boiler operation can be improved and the capacity increased by tuning of furnace operation. The current operating model of the boiler and the problems were studied. The furnace operation was tested by changing combustion air distribution and secondary air supply into the furnace. The tests and the collected data led to the conclusion of how to modernize the recovery boiler to improve furnace operation and get more capacity. Often the recovery boiler operation can be improved a lot with just a small upgrade. An increase in capacity usually requires a larger investment and an extended outage.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Andritz Oy:ssä Varkaudessa vuonna 2015. Haluan kiittää erityisesti työnohjaajaa Esa Vihavaista ja työn tarkastajaa Esa Vakkilaista. Olen oppinut teiltä paljon ja saanut teiltä työhön hyviä neuvoja. Kiitokset kuuluvat myös Andritz Oy:lle diplomityöpaikasta ja taloudellisesta tuesta.

Haluan kiittää vanhempiani tuesta opintojen aikana. Lappeenrannasta jäi käteen paljon hyviä muistoja ja hyviä ystäviä, joita haluan myös kiittää. Eivät olisi opinnot olleet yhtä hauskoja ilman teitä. Erityiskiitos kuuluu puolisololleni Viiville tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.



Joutui tämän työn eteen myös hieman hikoilemaan, kuten kuvasta näkee.

Varkaudessa 21.4.2015

Tommi Koso

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	6
2 Soodakattilan tehtävät ja rakenne	7
2.1 Soodakattilan tehtävät	8
2.2 Soodakattilan rakenne.....	8
2.2.1 Tulipesä	9
2.2.2 Tulistimet.....	11
2.2.3 Keittopinta	12
2.2.4 Ekonomaiseri	13
2.2.5 Vesiverho.....	14
2.2.6 Vesihöyrypiiri ja höyrylierö	14
2.2.7 Sula ja viherlipeäjärjestelmä.....	16
3 Mustalipeän ominaisuudet ja tulipesäprosessi.....	17
3.1 Mustalipeän ominaisuudet	17
3.2 Polttolipeän ruiskuttaminen tulipesään.....	18
3.3 Mustalipeän palaminen ja tulipesäprosessi	21
3.4 Savukaasupäästöt.....	23
4 Soodakattilan palamisilmajärjestelmä	25
4.1 Ilmajako	25
4.2 Primääri-ilmajärjestelmä	26
4.3 Sekundääri-ilmajärjestelmä	27
4.3.1 Perinteinen sekundääri-ilmajärjestelmä.....	27
4.3.2 Vertikaali-ilmajärjestelmä	29
4.4 Tertiääri-ilmajärjestelmä	31
4.5 Tulipesän toiminnan CFD-mallintaminen	32

4.6 Hajukaasujen poltto soodakattilassa	34
5 Soodakattilan likaantuminen	35
5.1 Kloori- ja kaliumpitoisuuden vaikutus tuhkan sulamislämpötilaan	35
5.2 Tulipesän alaosan toiminnan vaikutus likaantumiseen	37
5.3 Tuhkapartikkeleiden muodostuminen ja likaantumismekanismit	39
5.3.1 Tuhkan tarttuminen	40
5.3.2 Alhainen lentotuhkan pH.....	41
5.3.3 Sintraantuminen.....	42
5.4 Soodakattilan nuohous.....	43
5.4.1 Erilaiset suutintyytit.....	43
5.4.2 Nuohointen sijoittelu ja tehollinen alue.....	45
5.5 Likaantumisen havaitseminen	46
5.6 Kloori- ja kaliumyhdisteiden poistaminen	47
5.7 Soodakattilan vesipesu sekä ”jäähdytys ja nuohous”	49
6 Soodakattilan toimintaa kuvaavat tunnusluvut.....	51
6.1 Soodakattilan kuormitusta kuvaavat tunnusluvut.....	51
6.2 Tulipesän toimintaa kuvaavat tunnusluvut	52
7 Sellutehdas Etelä-Amerikassa: Soodakattila 1	54
7.1 Soodakattilan rakenne.....	54
7.2 Soodakattilan nykyinen toiminta	56
7.3 Sulakourut.....	58
7.4 Lämpöpintojen likaantuminen ja tukkeutuminen	59
7.5 Korkeat CO- ja TRS- päästöt.....	61
8 Soodakattilalla tehdyt kokeet	63
8.1 Liuottajan hönkien vaikutus soodakattilan päästöihin.....	63
8.2 Ilmajaon ja sekundääri-ilman testaaminen	64

8.3 Ilmajaon ja sekundääri-ilman syötön muuttamisen vaikutus tulipesän toimintaan.....	66
8.3.1 Vaikutukset tulipesän alaosaan.....	66
8.3.2 Vaikutus reduktioasteeseen	68
8.3.3 Vaikutus päästöihin	68
8.4 Muutokset polttoliipeän ruiskutukseen.....	70
8.5 Ilmajärjestelmätestin vaikutukset carry-overiin	71
8.6 Johtopäätökset	74
9 Toimenpiteet soodakattilan toiminnan parantamiseksi	75
9.1 Normaalissa vuosihuoltoseisokissa tehtävät parannukset	75
9.2 Pidentetyn seisokin vaativat modernisointiehdotukset	77
10 Yhteenveto.....	79
Lähteet	81

Symboliluettelo

Roomalaiset

A	pinta-ala	$[\text{m}^2]$
q_m	massavirta	$[\text{kg/s}]$
T	lämpötila	$[\text{K}], [^\circ\text{C}]$
v	nopeus	$[\text{m/s}]$

Kreikkalaiset

ρ	tiheys	$[\text{kg/m}^3]$
--------	--------	-------------------

Alaindeksit

ml	mustalipeä
ka	kuiva-aine
poh	pohja
th	tuorehöyry

Lyhenteet

CFD	laskennallinen virtausdynamikka (computational fluid dynamics)
CNCG	väkevät hajukaasut (concentrated non-condensable gases)
CO	hiilimonoksidi
CO ₂	hiilidioksidi
DNCG	laimeat hajukaasut (diluted non-condensable gases)

HHRR	“Hearth Heat Release Rate”	[kW/m ²]
HHV	ylempi lämpöarvo	[MJ/kg]
H ₂ S	rikkivety	
HSL	soodakattilan poikkipintakuorma (hearth Solids Loading)	
NaHSO ₃	natriumbisulfiitti	
NaOCN	natriumsyanaatti	
Na ₂ S	natriumsulfidi	
Na ₂ SO ₄	natriumsulfaatti	
NO _x	typpioksidi	
PIP	nuohojen aiheuttama dynaaminen paine (peak impact pressure)	
SO ₃	rikkitrioksidi	
SOG	stripperiltä tulevat kaasut (stripper off gases)	
TRS	redusoitunut rikkiyhdisteet (total reduced sulphur)	

1 JOHDANTO

Tässä työssä perehdytään korkeasti kuormitettujen soodakattiloiden ongelmiin ja etsitään niihin ratkaisuja. Tyypillisimmät ongelmat ovat lämpöpintojen likaantuminen ja tukkeutuminen sekä liialliset päästöt. Tämän työn kirjallisuusosassa perehdytään likaantumisen taustoihin ja päästöjen muodostumiseen.

Likaantuminen ja liialliset päästöt voivat johtua tulipesän ja ilmajärjestelmän huonosta toiminnasta. Vanhoissa soodakattiloissa vanhanaikainen sekundääri-ilmajärjestelmä sekoittaa huonosti ja se saa aikaan voimakkaan ylöspäin suuntautuvan virtauksen tulipesän keskelle, joka likaa kattilan lämpöpinnat. Usein tulipesän toimintaa voidaan parantaa ilmajärjestelmän ja lipeänruiskutuksen säätöjä muuttamalla. Suurempi muutos tulipesän toimintaan saadaan uusimmalla perinteinen sekundääri-ilmajärjestelmä vertikaali-ilmajärjestelmäksi. Nykyaikainen vertikaali-ilmajärjestelmä sekoittaa savukaasut tehokkaasti ja saa aikaan tasaisemman virtauksen tulipesään.

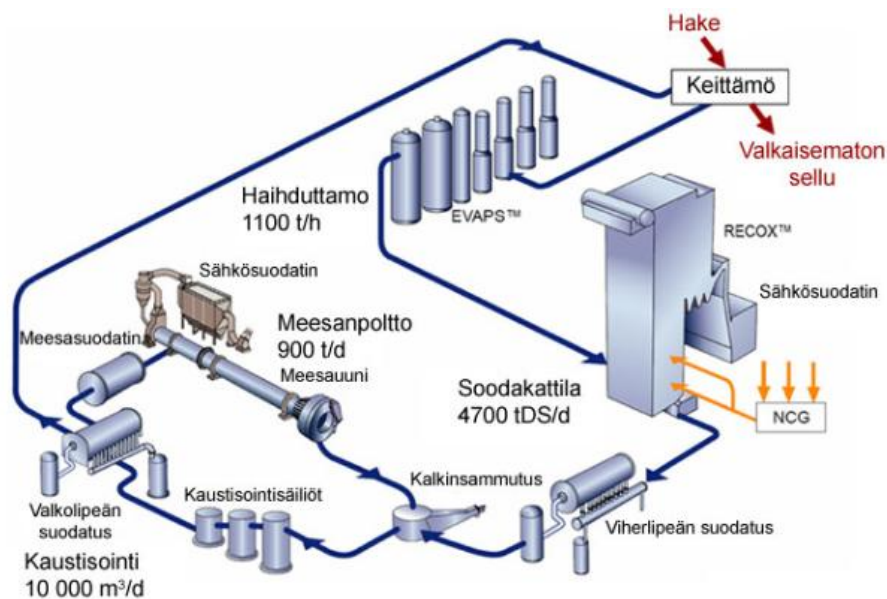
Mustalipeän korkea kloori- ja kaliumpitoisuus voivat myös aiheuttaa likaantumista tuhkan sulamislämpötilan laskiessa. Savukaasun lämpötilan keittopinnalla ylittäessä lentotuhkan sulamislämpötilan keittopinta tukkeutuu herkästi. Lämpöpinnat pidetään puhtaana höyrynuohouksella. Oikea nuohointen sijainti on tärkeä tekijä kattilan puhtaana pysymisen kannalta. Mikäli soodakattila joudutaan pesemään tukkeutumisen vuoksi, seurauksena on 1-2 vuorokauden seisokki.

Lisäksi työssä esitetään tunnuslukuja, joiden avulla soodakattiloita voidaan vertailla keskenään. Tunnuslukujen avulla saadaan myös nopeasti kuva soodakattilan toiminnasta.

Työn kokeellisessa osassa perehdytään erään Etelä-Amerikassa sijaitsevan korkeasti kuormitetun soodakattilan ongelmiin. Kyseisen soodakattilan ongelmia ovat tulipesän alaosan huono toiminta, likaantuminen ja tukkeutuminen sekä liialliset savukaasupäästöt. Soodakattilassa on vanhanaikainen sekundääri-ilmajärjestelmä ja epäsymmetrinen sekundääri-ilmasuuttimien sijainti. Soodakattilan ilmajärjestelmää testattiin kolmen päivän ajan. Kokeiden tarkoituksena oli löytää keinot, joilla voidaan parantaa tulipesän toimintaa sekä vähentää savukaasupäästöjä ja lämpöpintojen likaantumista.

2 SOODAKATTILAN TEHTÄVÄT JA RAKENNE

Soodakattila on osa sellutehtaan talteenottolinjaa. Talteenoton tehtävä on ottaa talteen kemiallisen massan valmistuksessa käytettävät keittokemikaalit. Talteenotto käsittää haihduttamon, soodakattilan, kaustisoinnin ja meesauunin. Sellun valmistuksessa syntyvä mustalipeä koostuu käytetyistä keittokemikaaleista ja ligniinistä. Mustalipeä erotetaan kuidusta massan pesussa ja pumpataan haihduttamolle 12 – 20 % kuiva-ainepitoisuudessa. Haihduttamalla kuiva-ainepitoisuus nostetaan 65 – 85 %. Haihduttamon jälkeen mustalipeä syötetään soodakattilaan, jossa mustalipeän orgaaninen aines poltetaan ja epäorgaaniset keittokemikaalit poistuvat sulana liottajasäiliöön, jossa siihen sekoitetaan heikkovalkolipeää. Näin muodostunut viherlipeä pumpataan kaustisointiin edelleen käsiteltäväksi. Kaustisoinnissa viherlipeästä valmistetaan valkolipeää, jota käytetään sellun keitossa. Lipeäkierto on esitetty kuvassa 1. (Vakkilainen, E. 2003, 2-5)



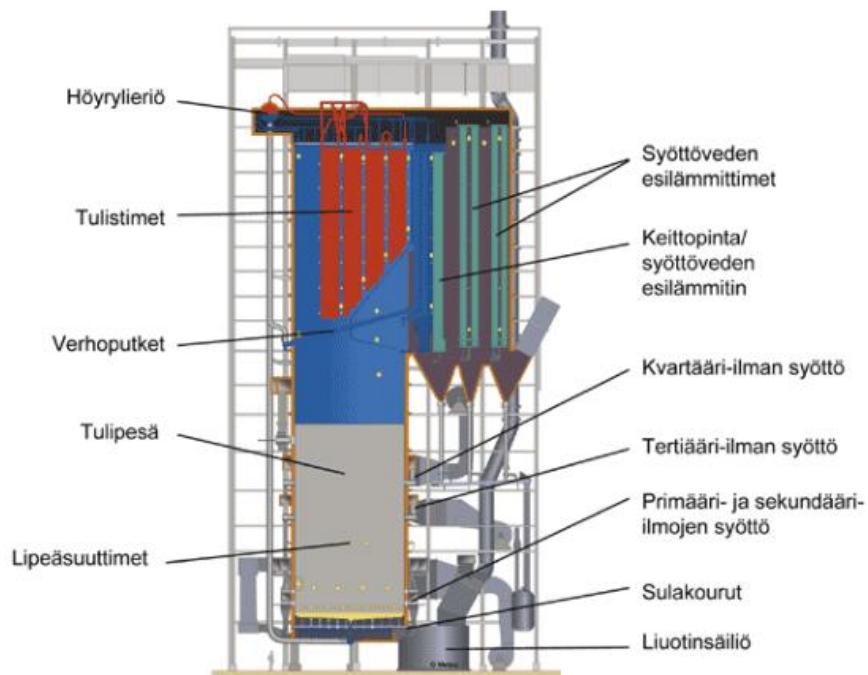
Kuva 1. Talteenottoprosessi. (Knowpulp. 2003)

2.1 Soodakattilan tehtävät

Soodakattila on sellutehtaan kallein komponentti ja sen toiminnalla on ratkaiseva merkitys koko sellutehtaan toiminnalle. Soodakattila toimii kemiallisena talteenottoreaktorina ja höyrykattilana. Soodakattilan tärkein tehtävä on pelkistää mustalipeässä oleva natriumsulfaatti (Na_2SO_4) natriumsulfidiksi (Na_2S) ja ottaa muodostuva kemikaalisula talteen jatkokäsittelyä varten. Lisäksi soodakattilassa poltetaan mustalipeän orgaaninen ligniini. Palamisreaktiossa tuotettua lämpöä kuluu osittain pelkistysreaktioon, mutta suurin osa palamisen tuottamasta lämmöstä otetaan talteen kattilan vesihöyrypiiriin. Soodakattila tuottaa pääosan sellutehtaan energiantarpeesta. Soodakattilassa poltetaan myös sellutehtaan laimeita ja väkeviä hajukaasuja. ”Soodakattilan kaksoisrooli tekee soodakattilan rakenteen varsin mutkikkaaksi ja kattilan käytön huomattavasti vaativammaksi kuin normaaleja polttoaineita polttavien voimalaitoskattiloiden.” (Raiko, R. et al. 2002, 523)

2.2 Soodakattilan rakenne

Soodakattilan lämpöpinnat savukaasun virtaussuunnassa ovat tulipesä, tulistimet, keittopinta ja syöttöveden esilämmitin eli ekonomaiseri. Vesi ja höyry kulkevat lämpöpinnat vastavirtaan savukaasuihin nähden. Soodakattila voidaan suunnitella monella eri tavalla. Olennaisimmat suunnitteluun vaikuttavat asiat ovat: mustalipeän ominaisuudet, verhollinen tai verhoton tulistinalue, yksi- vai kaksilieriörakenne, tulipesän putkimateriaalit, pystyvirtaus vai vaakavirtaus keittopinnalla ja ilmatasojen määrä. Nykyisin kaikki modernit soodakattilat ovat yksilieriöisiä. (Vakkilainen, E. 2007, 1-2) Modernin yksilieriöisen verholla varustetun soodakattilan rakenne on esitetty kuvassa 2.

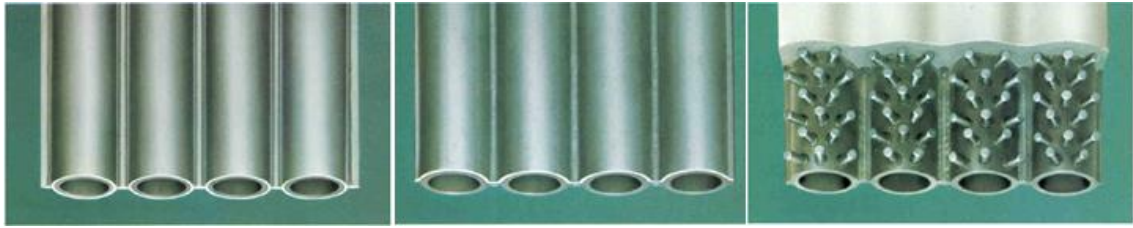


Kuva 2. Poikkileikkaus soodakattilasta. (Knowpulp, 2003)

2.2.1 Tulipesä

Mustalipeän palaminen tapahtuu tulipesässä. Tulipesäksi katsotaan kattilan nokan alapuolella oleva osa. Tulipesässä lämmönsiirto tapahtuu pääasiassa säteilyllä. Kattilan takaseinällä sijaitseva nokka suojaa tulistimia tulipesäsäteilyltä ja ohjaa savukaasuvirtauksen kääntymään kulman ympäri savukaasukanavaan. (Adams T. et al. 1997, 13)

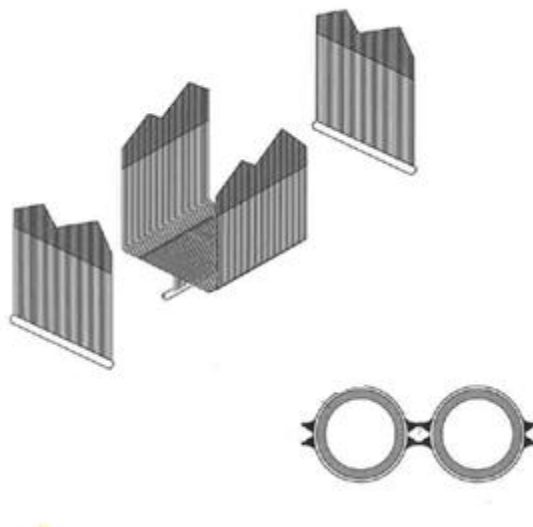
Nykyaikaisen soodakattilan tulipesän seinissä käytetään kaasutiivistä eväputkirakennetta kuvan 3 mukaisesti. Kuvassa on esitetty vaihtoehtoisia materiaaleja tulipesän seinän rakenteeksi. Kuvassa vasemmalla on compoundputki, jossa austeniittinen pintakerros muodostaa korroosiosuojan. Kuvassa keskellä korroosiosuojan muodostaa austeniittinen päällehitsaus ja kuvassa oikealla tapitettu teräsputki, jonka päälle on valeltu suojausmassa.



Kuva 3. Tulipesän vaihtoehtoisia seinämärakenteita. (Vakkilainen, E. 2007, 13-15)

Kompoundputki on näistä vaihtoehtoista käytetyin tulipesän alaosan materiaali. Yleisimmät tulipesässä käytettävät compoundmateriaalit ovat Sanicro 38 ja AISI 304L. Tapitus ja massausta tarjoavat erinomaisen suojan, mutta massausta kuluu käytössä ja vaatii säännöllistä huoltoa. Tulipesän alaosan putket ovat alttiita korroosiolle pelkistävien olosuhteiden vuoksi. Tulipesän alaosassa rikkivetyypitoisuus on suuri. Hiiliteräs syöpyy nopeasti, kun se on kosketuksissa rikkivedyn kanssa. Tertiääri-ilma hapettaa rikkivedyn, joten tertiääri-ilmatason yläpuolella tulipesän putkimateriaalina käytetään yleensä hiiliterästä.

Höyrykattilan tulipesän pohjaputkien tulee nousta 2 - 5° vesihöyryvirtauksen suunnassa, jotta riittävä jäähdytys varmistetaan myös tulipesän pohjaputkissa. Sularännit sijoitetaan niin korkealle, että pohjaputket ovat jähmettyneen sulakerroksen suojaamia. Tulipesän pohjan rakenne on esitetty kuvassa 4. (Vakkilainen, E. 2007, 13-15)



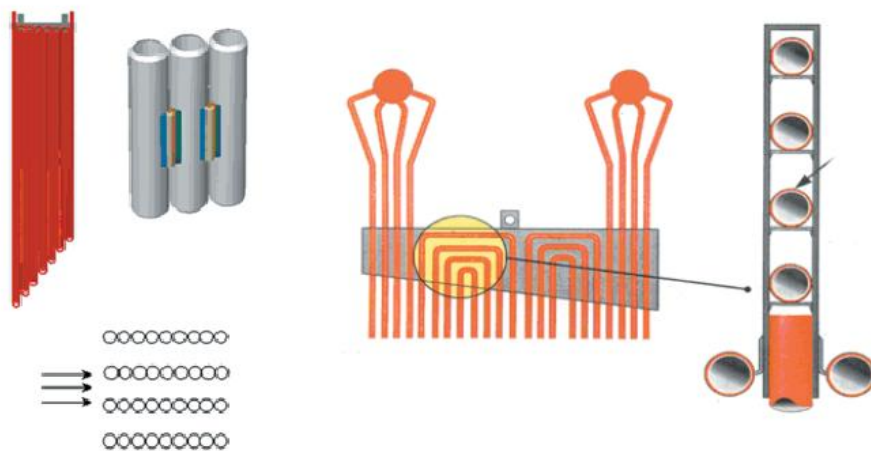
Kuva 4. Soodakattilan tulipesän pohjan rakenne. (Adams, T. et al. 1997, 12)

2.2.2 Tulistimet

Tulistinosä alkaa nokan yläpuolelta. Nokan yläpuolella ja siitä eteenpäin lämpö siirtyy pääasiassa konvektiolla. Lähimpänä tulipesää olevassa tulistinosassa säteilylämmönsiirto on vielä merkittävää. (Adams, T. et al. 13-14) Tulistimet ovat yleensä jaettu kahteen tai kolmeen osaan, jolloin tulistetun höyryn lämpötilaa pystytään säätämään ruiskutusjäähdytyksellä ja lämpöpinnat pystytään nuohoamaan tehokkaammin.

Tulistinputkielementtien poikittaisjako tulee olla tarpeeksi leveä, koska tulistimissa savukaasun lämpötila on korkea ja tuhka on tarttuvaa. Tulistinputket sijoitetaan tyypillisesti 300 – 400 mm välein savukaasun virtaussuuntaa vasten.

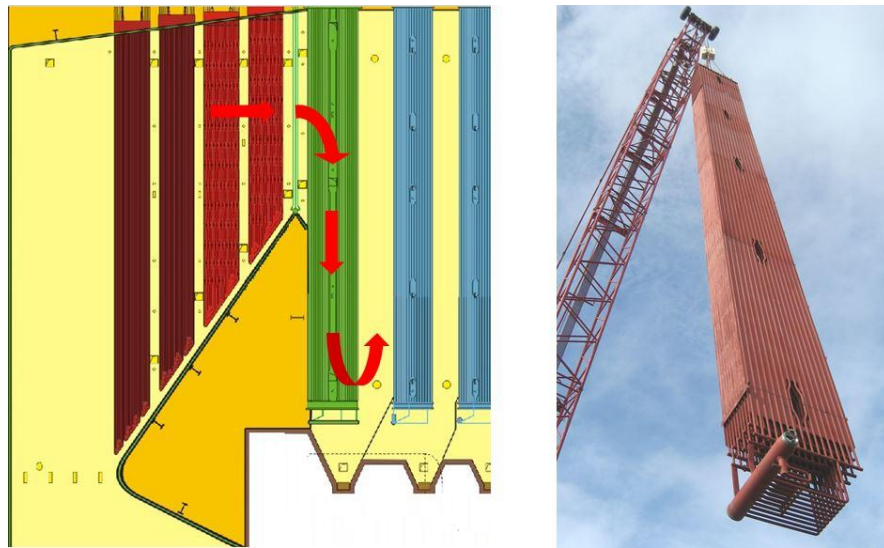
Paneelitulistin on tulistin, jossa savukaasun virtaussuunnassa peräkkäiset tulistinputket asetetaan hyvin lähelle toisiaan. Putkien pitkittäisväli on pienempi kuin 1,25 kertaa putken ulkohalkaisija. Paneelitulistin ei likaannu niin helposti kuin erillään olevat putket ja se on helpompi pitää puhtaana. Paneelia käytetään kaikkein vaativimmissa olosuhteissa, tyypillisesti lähimpänä tulipesää. Tulistimet kiinnitetään ripustustangoilla kannatuskoteloiden kautta kattilarakennuksen tukirakenteisiin. Kannatuskotelot tiivistävät tulipesän kattorakenteen. Erityyppisten tulistinten rakennetta ja tulistimen kiinnitystä on havainnollistettu kuvassa 5. (Vakkilainen, E. 2007, 12-15)



Kuva 5. Paneelitulistin, putkitulistin ja kannatuskotelo. (Vakkilainen, E. 2007, 14)

2.2.3 Keittopinta

Keittopinta sijaitsee tulistimen ja ekonomaiserin välissä. Nykyaikaisissa soodakattiloissa keittopinta koostuu eväputkipaneeleista, jotka kiinnitetään yhteisiin jakoputkiin. Savukaasut kulkevat keittopinnalla ylhäältä alas kuvan 6 esittämällä tavalla. (Vakkilainen E. 2007, 14 - 15)

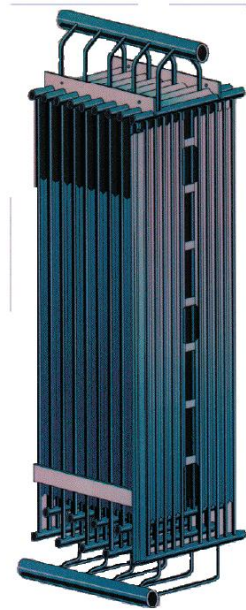


Kuva 6. Pystysuora keittopinta ekonomaiserin ja tulistimen välissä ja keittopinnan asennuslohko. (Lehtinen, M., 2007, 31)

Putken sisällä vesihöyryseos kulkee alhaalta ylös. Savukaasun lämpötila ennen keittopintaa on yleensä 600 – 650 °C. Pääosa höyryn kehityksestä tehdään tulipesän seinäputkissa, mutta loput 10 -30 %, höyrystetään keittopinnalla. Alhaisemman savukaasun lämpötilan ja alhaisemman lämmönsiirron vuoksi keittopinnalla tarvitaan paljon lämmönsiirtopinta-alaa. Putket sijoitetaan lähelle toisiaan, jolloin savukaasusolat ovat kapeammat kuin tulistinalueella ja savukaasun virtausnopeudet ovat korkeampia. Keittopinta likaantuu ja tukkeutuu helposti, jos savukaasunlämpötila on liian korkea, jolloin lentotuhka on tarttuvaa. (Adams, T. et al. 1997, 352-353)

2.2.4 Ekonomaiseri

Ekonomaiserin tarkoitus on nostaa syöttöveden lämpötila lähelle kylläistä tilaa. Ekonomaiseri sijaitsee savukaasukanavassa keittopinnan jälkeen. Ekonomaiseri esitetään kuvassa 7.



Kuva 7. Pystyputkiekonomaiseri. (Vakkilainen, E. 2007, 15)

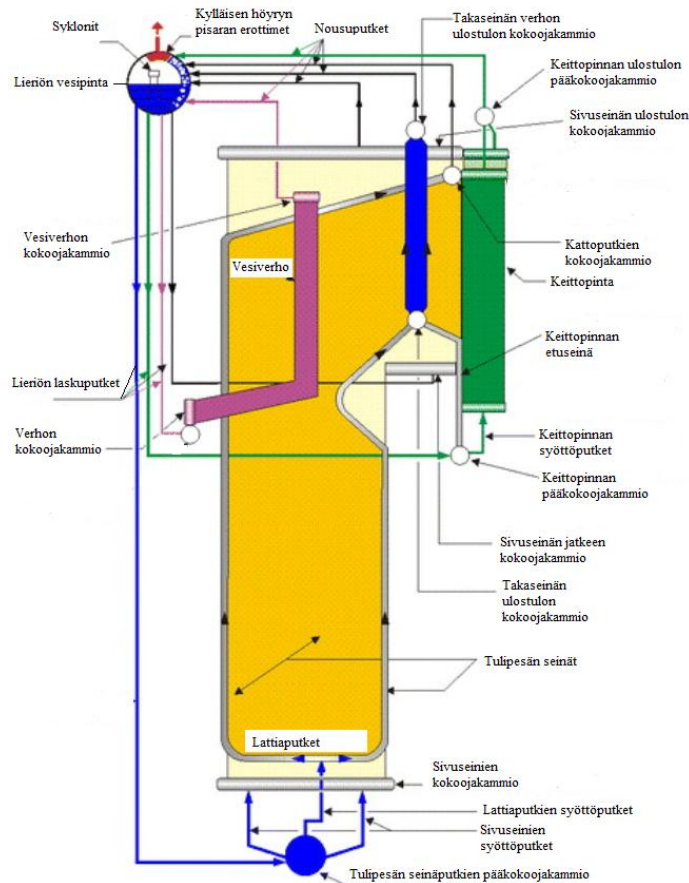
Savukaasun ja syöttöveden lämpötilaero on alhaisempi kuin muilla lämpöpinnoilla, joten ekonomaiseri on suurempi kuin soodakattilan muut lämpöpinnat. Savukaasut kulkevat ylhäältä alaspäin ja putken sisällä vesi virtaa alhaalta ylöspäin. Syöttöveden lämpötila määrää putken pintalämpötilan ekonomaiseriassa. Putken pintalämpötila ekonomaiseriassa ei saa laskea savukaasun happokastepisteen alapuolelle. Tämä aiheuttaa ekonomaiserin korroosiota. (Adams T. et al. 1997, 355) Ilmavuodot savukaasukanavissa voivat aiheuttaa korroosiota savukaasukanavissa ja sähkösuotimissa viileän ilman lauhduttaessa rikkihappoa. (Vihavainen, E. keskustelu 17.12.2014)

2.2.5 Vesiverho

Monissa soodakattiloissa käytetään vesiverhoa suojaamaan tulistimia tulipesäsäteilyltä. Vesiverhon avulla voidaan madaltaa tulipesän korkeutta ja alentaa savukaasun lämpötilaan ennen keittopintaa. Verhoputket kulkevat tulipesän poikki nokan tasolla ja ne ovat osa keittoputkistoa. Vesiverhot ovat yleisiä vanhemmissa kattiloissa, joissa on matalampi käyttöpaine ja pienempi tulistustarve. Uusissa korkeamman käyttöpaineen kattiloissa tulistustarve on suurempi, joten verhoputkistoa ei välttämättä tarvita. Vesiverho on myös turvallisuusriski. Mahdollisten verhovuotojen sattuessa vesi putoaa suoraan tulipesään ja voi aiheuttaa sularäjähdyksen. (Adams T. et al. 1997, 354) Pohjois-Amerikassa vakuutusyhtiöt eivät aiemmin hyväksyneet vesiverhon käyttöä, mutta nykyään se on sallittua. Euroopassa vesiverhon käyttö on yleisempää. (Vihavainen, E. keskustelu 17.12.2014)

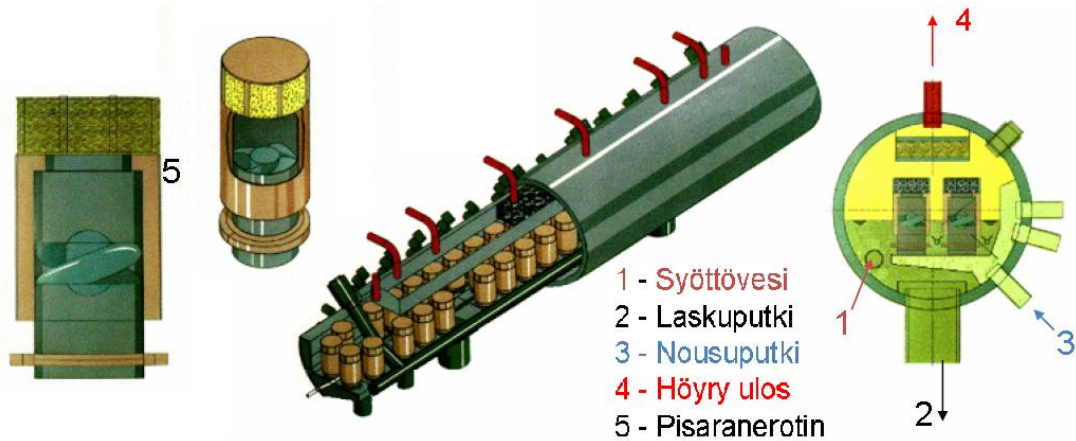
2.2.6 Vesihöyrypiiri ja höyrylieriö

Soodakattilat ovat luonnonkiertokattiloita. Syöttövesi pumpataan syöttövesisäiliöstä syöttövesipumpulla ekonomaiserin kautta kattilan lieriöön. Lieriössä erotetaan kylläinen höyry ja kylläinen vesi. Lieriöstä kattilavesi viedään laskuputkia pitkin tulipesän, vesiverhon tai keittopinnan jakokammioihin. Tulipesän lämpöä siirtyy putkiseinämän läpi ja vesi alkaa kiehua. Kyseessä on kaksifaasivirtaus ja tiheysero tulipesäputkien kylläisen vesihöyryseoksen ja laskuputkien kylläisen veden välillä aiheuttaa nostevoiman. Luonnonkierron vaikutuksesta virtaus nousee ylöspäin takaisin lieriöön. Vesihöyrykierron osat esitetään kuvassa 8.



Kuva 8. Soodakattilan luonnonkierto. (Lehtinen, M. 2007, 31)

Kylläinen höyry virtaa lieriön yhdysputkien kautta tulistimille. Tulistimet ovat yleensä kolmevaiheisia ja höyryn lämpötilaa säädellään tulistinvaiheiden välissä olevilla ruiskutusjäähdytyksillä. Ruiskutusjäähdytys toteutetaan joko ottamalla syöttövedtä syöttövesilinjasta tai erillisen pintalauhduttimen (Dolezal) avulla. Pintalauhduttimella kylläistä höyryä lauhdutetaan syöttövedellä ja syntyvää lauhdetta käytetään höyryn lämpötilan säätöön. Tällä tavalla syöttöveden epäpuhtaudet eivät päädy tulistimiin. Jos tehtaassa vesikemia on hyvällä tasolla ja syöttöveden likaantuminen voidaan varmuudella välttää, pintalauhduttimen käyttö ei ole välttämätöntä. Höyrylieriön rakennetta havainnollistetaan kuvassa 9.



Kuva 9. Höyrylieriö ja sen komponentit. (Vakkilainen E. 2011, 25)

2.2.7 Sula ja viherlipeäjärjestelmä

Viherlipeäjärjestelmä koostuu sulakourujärjestelmästä, liuottajasäiliöstä, liuottajan hönkäjärjestelmästä, sekoittimista ja viherlipeäpumpuista. Sula virtaa liuottajasäiliöön tulipesän takaseinillä sijaitsevien vesijäähdytteisten sulakourujen kautta. Sulavirtaus hajotetaan väli- tai matalapainehöyryllä pisaroiksi, ennen putoamistaan liuottajaan.

Liuottajassa sula muodostaa heikkovalkolipeän kanssa viherlipeää. Liuottajassa muodostuu hönkäkaasuja, jotka imetään pois liuottajasta hönkäpuhaltimella. Hönkä sisältää vesihöyryä, kosteutta rikkiyhdisteitä ja pölyä. Hönkäkaasuja pestään ja kuivataan hönkäpesurissa, jonka jälkeen hönkäkaasut lämmitetään ja puhalletaan soodakattilan tulipesään (Vakkilainen E. 2007, 9-10) Vanhemmissa soodakattiloissa höngät päästetään pesemättöminä ilmaan hönkäpiipun kautta. (Vihavainen, E. keskustelu 9.4.2015)

3 MUSTALIPEÄN OMINAISUUDET JA TULIPESÄPROSESSI

3.1 Mustalipeän ominaisuudet

Mustalipeän tärkeimmät polttoon vaikuttavat ominaisuudet ovat lämpöarvo, kuiva-ainepitoisuus ja viskositeetti. Polttoon tuleva mustalipeä sisältää haihdutusasteesta riippuen 20 – 40 % vettä. Tästä jäljelle jäävä osa on kuiva-ainetta, josta noin 60% on orgaanista ja 40% epäorgaanista ainetta. Kattilaan ruiskutettavan mustalipeän kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 12 – 13 MJ/kgka. Tase- ja tulipesälaskennassa on lämpöarvon lisäksi huomioitava myös kosteuspitoisuus. Mustalipeän elementaarianalyysi prosentteina kuiva-aineesta esitetään taulukossa 1. Taulukosta nähdään, että mustalipeässä on poikkeuksellisen paljon epäorgaanista ainetta, kuten natriumia ja kaliumia. (Raiko, R. et al. 2002, 525)

Taulukko 1. Mustalipeän tyypillinen koostumus prosentteina kuiva-aineesta.

(Raiko, R. et al. 2002, 525)

Alkuaine	Koostumus [%]
C	38,2
H	3,4
O	31,1
N	0,1
S	5,2
Na	19,8
K	1,9
Cl	0,3
Ca, Si, Fe, Mg, Al, Mn, ym.	0,2

Mustalipeän viskositeetilla on myös merkittävä vaikutus mustalipeän käyttäytymiseen niin haihduttamalla kuin poltossa. Haihduttamalla viskositeetti vaikuttaa lämmönsiirtoon ja haihdutusnopeuteen. Poltossa viskositeetilla on vaikutus pisaran muodostumiseen lipeäruiskuilla. Mustalipeän viskositeetti riippuu voimakkaasti lämpötilasta ja kuiva-ainepitoisuudesta. Haihduttamolta tulevan vahvalipeän viskositeetti on erittäin korkea. Jotta vahvalipeä saadaan pumpattavaan ja pisaroituvaan tilaan, pitää se lämmittää kuiva-ainepitoisuudesta riippuen vähintään 100 °C lämpötilatasolle viskositeetin saamiseksi alle 0,5 Pas tason. Yli 75 % kuiva-ainepitoisuudessa oleva mustalipeä vaatii paineistetun

polttoliipeäjärjestelmän ja yli 140 °C lämpötilan, jotta sitä voidaan pumpata. (Raiko, R. et al. 2002, 527)

Myös mustalipeän pintajännitys vaikuttaa pisanamuodostumiseen. Tämän tarkka mittaaminen on kuitenkin hankalaa. Tyypillisen mustalipeän pintajännitysarvot ovat suuruusluokaltaan puolet veden pintajännityksestä, kun kuiva-ainepitoisuus on välillä 20–60%. Korkeamman kuiva-ainepitoisuuden mustalipeän pintajännitystä ei toistaiseksi pystytä mittaamaan. (Raiko, R. et al. 2002, 529)

3.2 Polttoliipeän ruiskuttaminen tulipesään

Polttoliipeä syötetään tulipesään noin 65–85% kuiva-ainepitoisuudessa. Polttoliipeäjärjestelmän kytkentä riippuu lipeän kuiva-ainepitoisuudesta. Yli 75% kuiva-ainepitoisuudessa olevalla mustalipeä pumpataan paineistetusta vahvalipeäsäiliössä lipeäruiskujen kautta tulipesään. Tässä kytkennässä lentotuhka sekoitetaan sekoitussäiliössä mustalipeään ennen viimeistä haihduttamon väkevöittämisvaihetta. Vanhemmilla laitoksilla kuiva-aineen ollessa alhaisempi mustalipeä pumpataan polttoliipeäpumpuilla yleensä suoraan sekoitussäiliöstä tulipesään. Polttoliipeäpumppujen jälkeen on esilämmitin. Korkean kuiva-ainepitoisuuden polttoliipeälle käytetään tavallisesti suoraa esilämmitystä, kun taas alhaisemmalle kuiva-aineelle voidaan käyttää myös epäsuoraa lämmitystä. (Vakkilainen, E. 2007, 1-8)

Mustalipeän pisarakoko ja pisarajakauma ovat tärkeimmät muuttujat palamisen hallinnassa. Liian pienet pisarat karkaavat savukaasuvirran mukaan. Pisarakoon on oltava riittävän suuri, jotta pohjalle saadaan riittävästi palamatonta hiiltä pelkistysreaktioita varten. Toisaalta liian suuret pisarat aiheuttavat keon kasvun liian korkeaksi. Pisarakoko on oikea, kun pisara saavuttaa keon kuivana, osittain pyrolysoituneena ja palaen. Tällöin hiiltä kertyy riittävästi kekoon, mikä varmistaa stabiilit palamisolosuhteet. Tyypillinen pisarakoko on 2-3 mm. (Hupa, M. et al. 1997, 150-151; Raiko, R. et al. 2002, 530)

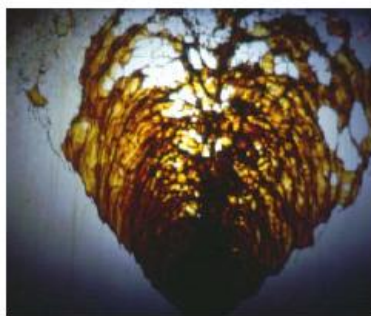
Mustalipeä ruiskutetaan tulipesään lipeäruiskuilla, jotka ovat noin 5 – 6 m korkeudella tulipesän pohjasta. (Raiko, R. et al. 2002, 530) Yleisin käytössä oleva suutintyyppi on lusikkasuutin. Siinä putken päähän on hitsattu levy noin 35 -45° kulmassa. Putkesta tuleva

lipeävirtaus osuu levyyn ja hajoaa pisaroiksi. Lusikkasuutin muodostaa tasaisen ja laajalle leviävän pisaravirtauksen, kuten kuvassa 10 on havainnollistettu. (Adams, T. 1997, 103–105)



Kuva 10. Lusikkasuutin ja mustalipeän pisaroituminen. (Vihavainen, E. 2013, 26)

Lipeäruiskun koolla on suurin vaikutus pisarakokoon. Pisarakokoa voidaan hienosäätää polttolipeän painetta ja lämpötilaa muuttamalla. Polttolipeän lämpötilalla on suurempi vaikutus pisarakokoon ja pisarajakaumaan kuin paineella. Mustalipeälle tunnistetut pisaroitumismekanismit ovat aallon hajoaminen (wavy-sheet disintegration), reikiintyminen (perforation) ja paisuminen (flashing). Kuvassa 11 havainnollistetaan polttolipeän lämpötilan vaikutusta pisaran muodostumiseen. (Miikkulainen, P. 2006, 24-30, 58-59)



$$\Delta T_e = -4.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$



$$\Delta T_e = 4.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$



$$\Delta T_e = 14.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

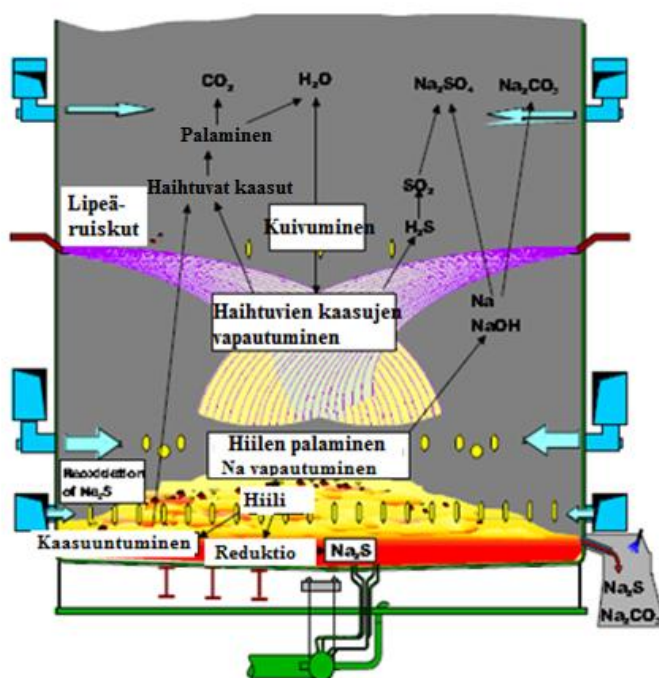
Kuva 11. Polttolipeän lämpötilan vaikutus pisaran muodostumiseen. Vasemmalla aallon muodostuminen, keskellä reikiintyminen ja oikealla paisuminen. ΔT_e kuvaa lämpötilaeroa kiehumispisteeseen. (Miikkulainen, P. 2006, 24)

Kuvassa vasemmalla polttoliipeän lämpötila on kiehumispisteen alapuolella. Tällöin pisarat muodostuvat aallon hajoamisen seurauksena. Keskimmaisessä kuvassa liipeän lämpötila on hieman kiehumispisteen yläpuolella. Tällöin pisarat muodostuvat, kun liipeäkalvoon muodostunut reikä kasvaa pintajännitysvoimien vaikutuksesta ja liipeä muodostaa reiän ympärille paksun renkaan. Kuvassa oikealla polttoliipeän lämpötila on reilusti kiehumispisteen yläpuolella. Tällöin mustaliipeässä oleva vesi paisuu höyryksi. Flashing tarkoittaa äkillistä höyrykuplien muodostumista, kun mustaliipeässä oleva vesi höyrystyy. Höyrystyminen tapahtuu, jos vesihöyryn paine ylittää putkistossa olevan kokonaispaineen.

Polttoliipeän paineen kohottaminen nostaa kiehumispistettä, mutta liipeäruiskun suuaukolla paine putoaa ilmanpainetta vastaavaksi. Höyrykuplien tilavuus on tuhatkertainen verrattuna vastaavan vesimäärän tilavuuteen. Kasvanut tilavuusvirta nostaa virtausnopeutta suuttimessa ja vaikuttaa merkittävästi muodostuvaan pisarajakaumaan. Paisumisen seurauksena muodostuu epätasainen pisarajakauma, joka johtaa epätasaiseen palamiseen ja paikallisiin kuumiin pisteisiin keossa. Höyrykuplat voivat tukkia liipeävirtauksen kokonaan. (Miikkulainen, P. 2006, 24-30, 58-59)

3.3 Mustalipeän palaminen ja tulipesäprosessi

Mustalipeän palaminen sisältää kolme vaihetta: mustalipeäpisan kuivuminen, haihtuvien yhdisteiden vapautuminen eli pyrolyysi ja jäännöshiilen eli koksen palaminen. Mustalipeän palamisprosessi esitetään kuvassa 12.



Kuva 12. Mustalipeän palaminen. (Vakkilainen, E. 2007, 3)

Palamisprosessi alkaa mustalipeäpisaroiden lentäessä ruiskusta tulipesän pohjalle. Kuivumisessa mustalipeän sisältämä vesi höyrystyy ja tämän jälkeen alkaa haihtuvien aineiden vapautuminen. Sen aikana pisarakoko paisuu moninkertaiseksi alkuperäiseen verrattuna. Optimitilanteessa haihtuvat vapautuvat osittain jo pisan pudotessa keoon ja ne vapautuvat lopullisesti keossa. Haihtuvat yhdisteet palavat kirkkaalla liekillä keon yläpuolella. Pyrolyysin aikana lipeän kuiva-aineesta vapautuu kaasutilaan noin 30 %. Pääosa haihtuvista yhdisteistä ovat orgaanisia, mutta pyrolyysivaiheessa vapautuu myös osa epäorgaanisista kemikaaleista, kuten rikkiä ja natriumia. (Raiko, R. et al. 2002, 530)

Viimeisenä palaa hiilijäännös eli koksi. Koksi palaa tulipesän pohjalla keossa ja sen merkitys on suuri myös epäorgaanisten sulan pelkistysreaktioiden kannalta. Hiilijäännös palaa hehkuen ilman näkyvää liekkiä. Koksi palaa ulkopinnaltaan ja partikkeli kutistuu sitä mukaa, kun hiiltä palaa pois. Lopussa hiilirakenne murtuu ja partikkeli muuttuu sulapisaraksi. Koksen palamisaikaan vaikuttavat pääasiassa ympäröivän kaasukehän happipitoisuus ja lämpötila sekä pisaran koko ja paisuminen pyrolyysin yhteydessä. Keossa vapautuneen hiilimonoksidin palaminen loppuun tapahtuu ylempänä tulipesässä. Maksimilämpötila saavutetaan hieman keon pinnan yläpuolella, jossa haihtuvat yhdisteet palavat. Lämpötila keon yläpuolella on likimain 1000 -1200°C. (Vakkilainen, E. 2007, 3–4; Raiko, R. et al. 2002, 530)

Sula koostuu pääasiassa natriumkarbonaatista, natriumsulfaatista, natriumsulfidista ja natriumkloridista. Se sisältää myös pieniä määriä kaliumsuoloja. Natriumsulfaatti pelkistyy natriumsulfidiksi keossa. Reaktio on endoterminen eli se tarvitsee hiilen palamisesta syntyvää lämpöä ja lisäksi hiili toimii keossa pelkistäjänä. Hyvän reduktion edellytyksenä on, että keon pinnalla on koko ajan riittävä määrä koksia, palamislämpötila on korkea ja että keossa vallitsee happivaje. Keossa tapahtuvat myös suurin osa kloorin, natriumin, rikin ja kaliumin vapautumisesta. (Raiko, R. et al. 2002, 543; Vakkilainen, E. 2007, 4-6)

Tärkeimmät reduktioreaktiot ovat



Tärkein sulan laatua kuvaava parametri on reduktioaste. Reduktioaste kuvaa pelkistysreaktion toteutumisasetta eli natriumsulfidin moolisuhdetta natriumsulfaatin ja natriumsulfidin yhteismäärään yhtälön 3 mukaisesti. Tyypillinen korkea reduktioaste on 95 – 98 %. (Vakkilainen, E. 2007, 9)

$$\text{Reduktioaste} = \frac{\text{Na}_2\text{S}}{\text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{SO}_4} \quad (3)$$

Sulfiditeetti on natriumsulfidin suhde natriumsulfidin ja natriumhydroksidin yhteismäärään valkolipeässä yhtälön 4 mukaisesti.

$$\text{Sulfiditeetti} = \frac{\text{Na}_2\text{S}}{\text{Na}_2\text{S} + \text{NaOH}} \quad (4)$$

Sulfiditeettiä pidetään yllä ja säädellään korvauskemikaaleilla ja poistamalla lentotuhkaa prosessista. Sulfiditeettitaso vaihtelee tehdaskohtaisesti ja se valitaan sellunkeiton tuloksen kannalta sopivaksi.

3.4 Savukaasupäästöt

Soodakattilan savukaasujen merkittävimmät päästöt ovat kiintoainepöly, rikkidioksidi SO_2 , pelkistyneet rikkiyhdisteet (TRS), hiilimonoksidi (CO) ja typen oksidit (NO_x). Pölypäästöjä pystytään rajoittamaan tehokkaasti sähkösuotimilla.

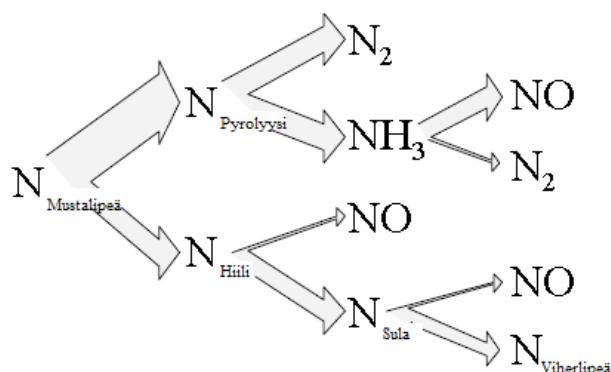
Tulipesän alaosan toiminnalla ja sellutehtaan sulfiditeettitasolla on suurin vaikutus rikkipäästöihin. Usein TRS- ja SO_2 -päästöt esiintyvät samanaikaisesti. Jos tulipesän lämpötila on liian alhainen, lisää se merkittävästi rikkipäästöjen määrää. Tulipesän happipitoisuudella on myös suuri vaikutus TRS-päästöihin. Kuiva-aineen nosto yli 75 % on vaikuttanut olennaisesti rikkipäästöjen vähenemiseen soodakattiloissa. Korkean kuiva-ainepitoisuuden ansiosta palamislämpötila kohoaa ja rikki saadaan sidottua lähes kokonaan sulaan ja lentotuhkaan. (Raiko, R. et al. 2002, 546; Reyes, E. et al. 2014, 1-7)

Epätasainen palaminen vaikuttaa TRS-päästöjen muodostumiseen. Esimerkiksi keon kasvaminen pilarimaisesti ja hetkelliset häiriöt mustalipeän ruiskutuksessa voivat johtaa TRS-piikkeihin. Hajukaasujen poltolla soodakattilassa ja palamisilman lämpötilalla on myös havaittu olevan vaikutusta TRS-päästöjen muodostumiseen. (Reyes, E. et al. 2014, 1-7)

Valkolipeän sulfiditeetin ollessa korkea (> 45 %) ei rikkipäästöiltä voida välttyä, vaikka tulipesän toiminta olisi erinomaista ja kuiva-aine korkea. Korkean rikkidioksidipäästön voivat aiheuttaa myös likaantuneet lipeäruiskut ja ilma-aukot. (Vihavainen, E. 2002b, 11)

Soodakattilan typpioksidipäästöt ovat pieniä verrattuina muihin kattiloihin. Tyypillisesti NO_x -pitoisuus on alle 100 ppm. Mustalipeän poltossa syntyvä NO_x on pääasiassa peräisin polttoaineeseen orgaanisesti sitoutuneena olevasta tyyppistä. Termisen NO_x :n osuus ei ole

merkittävä mustalipeän poltossa, koska lämpötila on alle 1500 °C. (Raiko, R. et al. 2002, 547)
 Typen reaktiot tulipesässä ovat esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Typen reaktiot ja typpipäästöjen muodostuminen tulipesässä. (Forssen, M. et al. 1997)

Mustalipeän tyypestä kaksi kolmasosaa vapautuu pyrolyysikaasujen mukana. Tästä osasta noin puolet muuttuu heti molekyylytypeksi, joka ei ole haitallinen, mutta toinen puolikas reagoi ammoniakiksi (NH_3), joka hapettuu helposti typpioksidiksi. Ammoniakin hapettuminen on suurin typpipäästöjen aiheuttaja soodakattilassa. Pyrolyysikaasujen vaiheistetulla poltolla on pyritty estämään ammoniakin hapettumista typpioksidiksi.

Kuten kuvasta 13 nähdään, pääosa koksiin sitoutuneesta tyypestä jää sulaan ja poistuu tulipesästä sulan mukana liuottajaan. Vain pieni osa reagoi typpioksidiksi. Sulaan sitoutunut typpi on kuitenkin natriumasyanaatti (NaOCN), jota muodostuu koksen hapettumisen yhteydessä. Sulaan sitoutuneesta tyypestä ei aiheudu suoria typpioksidipäästöjä. Natriumasyanaatti kulkeutuu viherlipeän mukana kaustisointiin, jossa se reagoi ammoniakiksi. Sulan mukana poistuva typpi siirtyy siis talteenottoon prosessiin ammoniakina, joka aiheuttaa typpioksidipäästöjä talteenottoon prosessista kerättävien hajukaasujen polton yhteydessä. (Forssen, M. et al. 1997; Kymäläinen, M. et al. 2001)

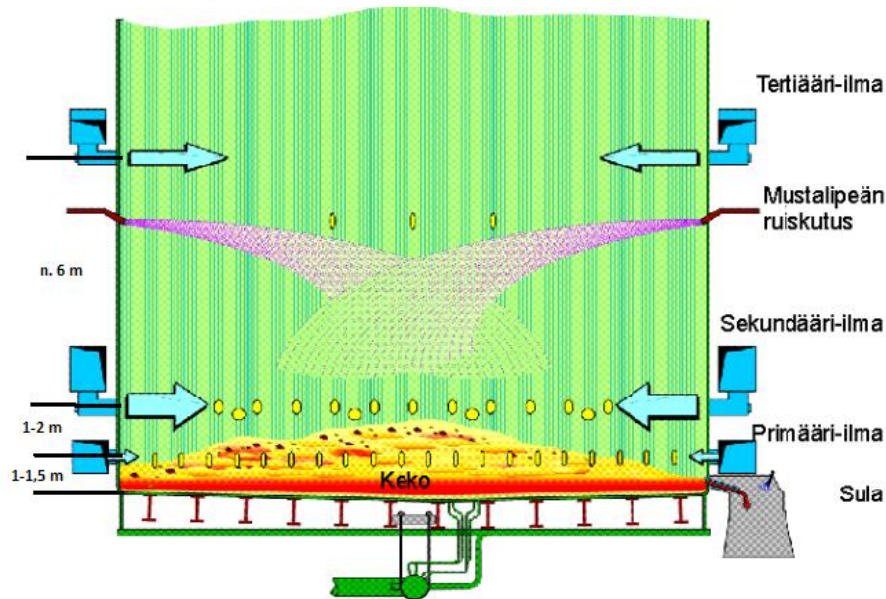
4 SOODAKATTILAN PALAMISILMAJÄRJESTELMÄ

Soodakattilan palamisilmajärjestelmällä on merkittävä vaikutus kattilan toimintaan ja päästöihin. Modernin soodakattilan ilmajärjestelmän tavoitteena on varmistaa mustalipeän tasainen ja tehokas palaminen, hyvä sekoittuminen, tasainen virtaus tulipesään, korkea reduktioaste, matalat rikkipäästöt, matalat typenoksidipäästöt ja kattilan puhtaana pysyminen. (Vakkilainen, E. 2007, 2–4)

Ilmajärjestelmän toiminta ja lipeäruiskujen sijainti vaikuttavat merkittävästi palamiseen. Epätasainen palaminen ja tulipesän huono toiminta vaikuttavat puolestaan soodakattilan likaantumiseen. Huonosti toimiva ilmajärjestelmä on usein soodakattilan kapasiteettia rajoittava tekijä. Kattilaa pitää pystyä operoimaan mahdollisimman pienellä jäännöshapella, jolloin savukaasujen määrä saadaan minimoitua. Huono sekoittuminen tulipesässä johtaa siihen, että soodakattilaa joudutaan operoimaan suurella happiylimäärällä. Tämä tarkoittaa suurempaa palamisilman määrää, joka lisää myös savukaasuvirtausta. Liiallinen savukaasujen määrä rajoittaa usein soodakattilan kapasiteettia, joten sen minimoiminen on tärkeää. (Vihavainen, E. 2002a, 12)

4.1 Ilmajako

Soodakattiloissa palamisilma syötetään tulipesään vaiheittain kuvan 14 mukaisesti. Kuvassa palamisilma tuodaan kolmessa vaiheessa, primääri-, sekundääri- ja tertiääri-ilmana. Tavallisesti sekundääri- ja tertiääri-ilmatasot ovat kuitenkin jaettu kahteen osaan, ala- ja yläsekundääritasoon ja ala- ja ylätertiääritasoon, joten käytännössä palamisilma tuodaan tulipesään viideltä eri korkeudelta. Primääri-ilman osuus kokonaisilmamäärästä on tavallisesti 25 -40 %, sekundääri-ilman 35 -50 % ja tertiääri-ilman 20 -35 %. Kuten kuvasta 14 nähdään, sijaitsevat primääri- ja sekundääritaso lipeäruiskujen alapuolella. Tertiääri-ilmataso on lipeäruiskujen yläpuolella. Ilmajaolla saavutetaan alistökiömetriset ja pelkistävät olosuhteet tulipesän alaosaan, jolloin kemikaalit saadaan otettua talteen halutussa muodossa. Palaminen viimeistellään tulipesän yläosassa. (Vihavainen, E. keskustelu 17.12.2014)



Kuva 14. Soodakattilan palamisilmajärjestelmä. (KnowPulp, 2003)

Ilmanjaolla on merkittävä vaikutus päästöihin, soodakattilan reduktioasteeseen ja tulipesän lämpötilaprofiiliin. Yleensä primääri-ilmamäärän siirtäminen sekundääri- tai tertiääri-ilmaksi parantaa tulipesän toimintaa, kun kattilaa ajetaan ylikuormalla. Keon lämpötila nousee ja CO-pitoisuus laskee merkittävästi. (Vihavainen, E. keskustelu 17.12.2014) Korkeasti kuormitetussa kattilassa vain osa palamisesta tapahtuu lipeäruiskujen alapuolella, jolloin alapesään viety ylimääräinen ilma vain jäädyttää kekoa ja lisää savukaasun nopeutta lipeäruiskujen kohdalla (Savolainen, J. 2005, 15).

4.2 Primääri-ilmajärjestelmä

Primääri-ilmalla hallitaan keon palamista. Primääri-ilma vaikuttaa palamiseen vain noin 1 m etäisyydellä tulipesän seinästä. Sen tavoite onkin hallita keon muotoa sekä paikkaa ja estää keon kasaantuminen seinien viereen. Primääri-ilmasuuttimet sijaitsevat kattilan jokaisella seinällä. Käytännön näkökulmasta suuret primääri-ilmasuuttimet ovat parempia kuin pienet. Primääritason kokonaissuutinpinta-alaa on parempi säädellä suuttimien määrällä kuin koolla. Primääri-ilma-aukot likaantuvat käytön aikana. Pienet primäärisuuttimet tukkeutuvat helposti, kun taas suuremmissa suuttimissa likaantumisen vaikutus on paljon pienempi.

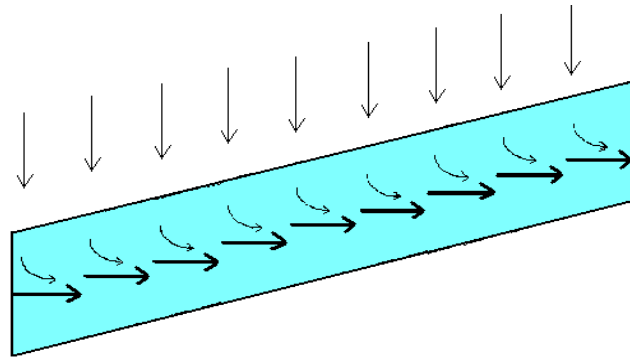
Primääri-ilma-aukot pidetään puhtaina tarkoitukseen sopivilla automaattipuhdistuslaitteilla. Suuttimien sijoitteluun tulee myös kiinnittää huomiota. Erityisesti kattilassa, jossa sekundääri-ilma-aukot sijaitsevat vain etu- ja takaseinillä, primääri-ilmasuuttimia kannattaa sijoittaa enemmän näille seinille kuin sivuseinille, sillä etu- ja takaseinillä sijaitsevat voimakkaat sekundääri-ilmasuihkut heittävät lipeää enemmän etu- ja takaseinille. (Vihavainen, E. keskustelu 17.12.2014)

4.3 Sekundääri-ilmajärjestelmä

Sekundääri-ilmalla on suurin vaikutus palamiseen tulipesässä. Sekundääri-ilmalla säädellään keon kokoa ja pidetään yllä riittävän korkeaa lämpötilaa. Suuttimien sijoittelulla on merkittävä vaikutus sekoittumiseen ja tulipesän savukaasuvirtaukseen. (Jones, A.K. 1997, 202) Sekundääri-ilma tuodaan tulipesään suurella nopeudella hyvän sekoittumisen varmistamiseksi. Sekundääri-ilmasuihkun nopeus on yleensä 70 -100 m/s.

4.3.1 Perinteinen sekundääri-ilmajärjestelmä

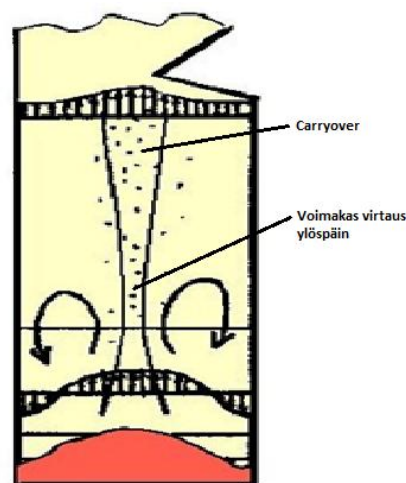
Perinteisesti sekundääri-ilmasuuttimet ovat rivissä vierekkäin ja jokaisesta suuttimesta tulee tasainen ilmasuihku tulipesään. Sekundääri-ilman suuren virtausnopeuden vuoksi jokainen ilmasuihku aiheuttaa alipaineen ympärilleen tunkeutuessaan tulipesään. Sekundääri-ilmasuuttimien ollessa rivissä vierekkäin ilmasuihkut voivat imeä kaasuja ainoastaan yläpuoleltaan. Kuvassa 15 paksut nuolet kuvaavat tulipesään tulevaa ilmasuihkua ja ohuimmat nuolet suihkujen aiheuttamaa alaspäin suuntautuvaa virtausta tulipesän seinällä. (Vihavainen, E. 2002a, 7)



Kuva 15. Vierekkäin olevien sekundääri-ilmasuuttimien aiheuttama virtaus alaspäin.

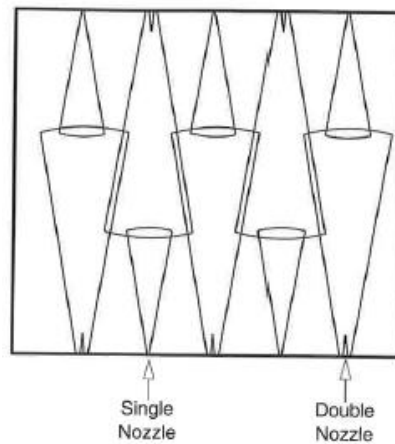
(Vihavainen, E. 2002a, 7)

Tämä aiheuttaa alaspäin suuntautuvan virtauksen tulipesän reunoille ja voimakkaan ylöspäin suuntautuvan virtauksen tulipesän keskelle, kuten kuvassa 16 havainnollistetaan.



Kuva 16. Virtauksen kanavoituminen tulipesän keskelle. (Vihavainen, E. 2002a, 8)

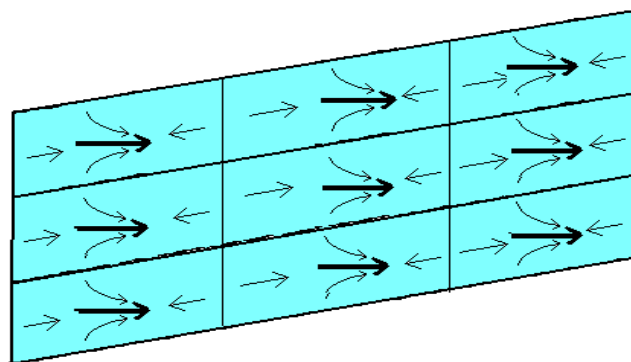
Usein ilmajärjestelmän toimintaa voidaan parantaa ilman investointia säätämällä yksittäisten ilmapeltien asentoa. Tulipesän virtausprofiili ja sekoittuminen paranevat, kun vastakkaiset vuorottelevat vastakkaisten seinien välillä kuvan 17 mukaisesti. Näin voidaan vähentää carryoverin määrää sekä palamiseen tarvittavaa ilmamäärää. (Vihavainen, E. 2002a, 16)



Kuva 17. Sekundääri-ilmasuuttimien säätäminen tulipesän toiminnan parantamiseksi. (Jones, A.K.. 1997, 203)

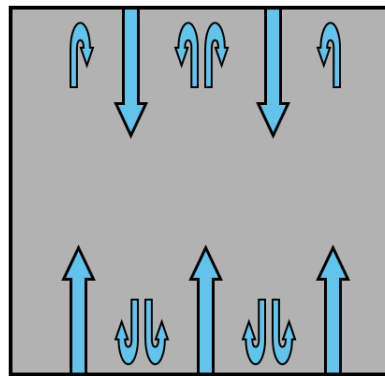
4.3.2 Vertikaali-ilmajärjestelmä

Paras virtausprofiili ja sekoittuminen tulipesään saadaan uusimalla perinteinen sekundääri- ja tertiääri-ilmataso vertikaaliseksi. Vertikaali-ilmajärjestelmä tarkoittaa, että vierekkäiset suuttimet sijoitetaan pystysuoriin riveihin vaakasuoran rivien sijaan kuvan 18 mukaisesti. Vertikaali-ilmajärjestelmässä yksittäinen ilmasuihku pääsee imemään ilmaa sivuilta toisin kuin perinteisessä sekundääri-ilmajärjestelmässä, joten virtaus ei pääse kanavoitumaan tulipesän keskelle.



Kuva 18. Vertikaali-ilmasuutintien periaate. (Vihavainen, E. 2002a, 8)

Vastakkaisilla seinillä olevat suuttimet sijaitsevat sivusuunnassa lomittain toisiinsa nähden. Kuvasta 19 nähdään, että vastakkaisen seinän voimakas ilmasuihku puhaltaa kohtaan, jossa on voimakas alipaine. Vertikaali-ilmajaolla saavutetaan erinomainen sekoittuminen ja tasaisempi tulipesävirtaus kuin perinteisellä järjestelyllä. Sekundääri-ilma suuttimet ovat yleensä 3 -4 tasossa korkeussuunnassa. Modernisoimalla perinteinen sekundääri- ja tertiääri-ilmajärjestelmä vertikaaliseksi voidaan nostaa soodakattilan kapasiteettia, koska paremman sekoittumisen ansiosta kattilaa voidaan ajaa pienemmällä ilmamäärällä. (Vihavainen, E. 2002a, 17)

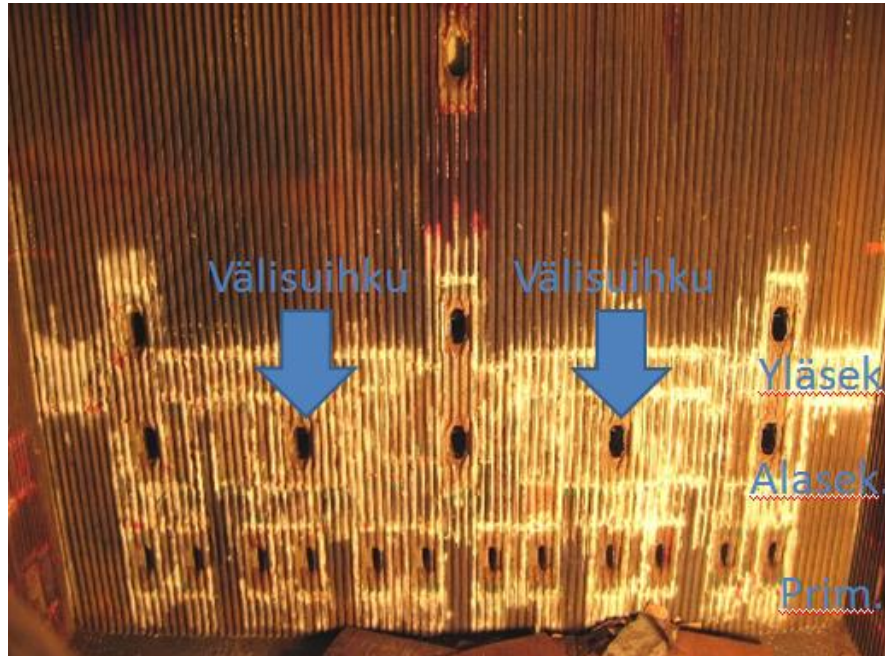


Kuva 19. Suuttimien lomittainen asettelu. (Vihavainen, E. 2002, 8)

Andritz käyttää soodakattiloissaan vertikaali-ilmajärjestelmästä modifioitua järjestelmää, jossa alimmalla sekundääritasolla käytetään välisuihkuja. Tämä tarkoittaa 5+5 ilmasuutinta alasekundääritasolla ja 3+2 ilmasuutinta yläsekundääritasolla tai suuremmissa kattiloissa 7+7 ja 4+3 jakoa. Sekundääri-ilma-aukot sijaitsevat vain etu- ja takaseinillä.

Välisuihkut mahdollistavat paremman säädön ilmajärjestelmälle eri kuormitustilanteissa. Ilmamäärää lisättäessä suihkujen nopeus voidaan pitää ennallaan. Esimerkiksi keon kasvaessa tarvitaan alimmalla sekundääritasolla enemmän ilmaa kuin ylemmillä tasoilla. Tällöin välisuihkujen avulla saadaan enemmän ilmaa tulipesän alaosaan ilman liiallista yläsekundääri-ilman lisäystä. Liiallinen ilman lisääminen ylemmien sekundääritasojen kautta on haitallista tulipesän toiminnan kannalta. Ilmasuihkut lennättävät lipeää ja palavaa materiaalia liikaa seinille eikä palamisilmaa saada tarpeeksi sinne minne sitä tarvitaan, välittömästi keon

yläpuolelle. (Vihavainen, E. keskustelu 17.12.2014) Kuvassa 20 on esitetty etuseinäkuva vertikaali-ilmajärjestelmästä ja välisuihkujen paikoista.



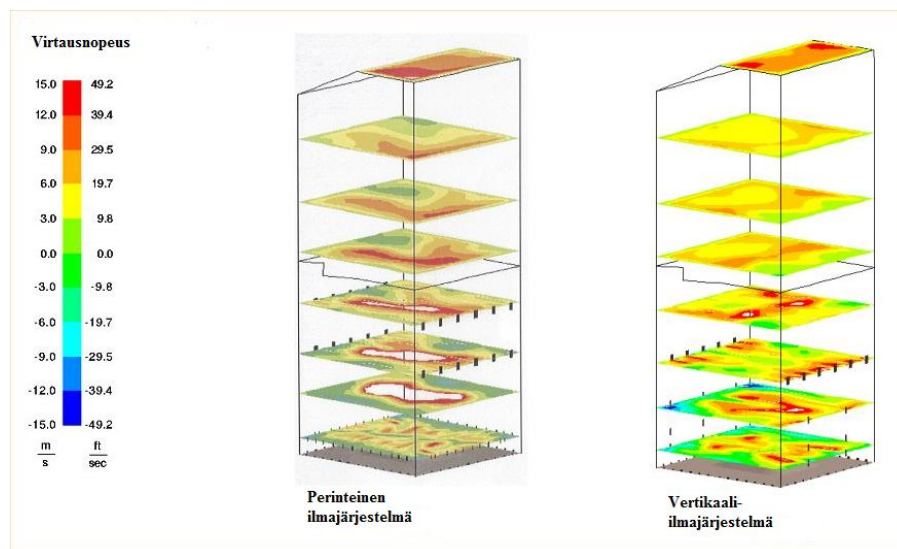
Kuva 20. Vertikaali-ilmasuuttimet tulipesän etuseinällä. (Vihavainen, E. 2014, 20)

4.4 Tertiääri-ilmajärjestelmä

Tulipesän alaosassa on alistökiömetrinen tila, joten tertiääri-ilmatason alapuolella savukaasut sisältävät paljon palamattomia kaasuja. Tertiääri-ilman tehtävä on saattaa palaminen loppuun. Tertiääri-ilma syötetään tulipesään yleensä vain etu- ja takaseinältä. Ilmasuuttimet sijaitsevat lomittain ja vastakkaisilla seinillä on yleensä eri määrä suuttimia. Soodakattilan koosta riippuen tertiääri-ilmasuuttimet ovat yleensä joko 3+2, 4+3 tai 5+4 jaolla. Nykyaikaisissa kattiloissa tertiääri-ilmasuuttimet ovat sijoitettuna korkeussuunnassa useampaan tasoon. Tertiääri-ilman vaihteistamisella voidaan vähentää soodakattilan NO_x päästöä. Myös tertiääri-ilma tuodaan tulipesään suurella nopeudella, jotta tulipesään saadaan paras mahdollinen sekoittuminen. Tertiääri-ilmaa ei yleensä esilämmitetä, koska ilmasuihkun tunkeutuminen kasvaa ilman ja savukaasun lämpötilaeron kasvaessa. (Vakkilainen, E. 2007, 3-6)

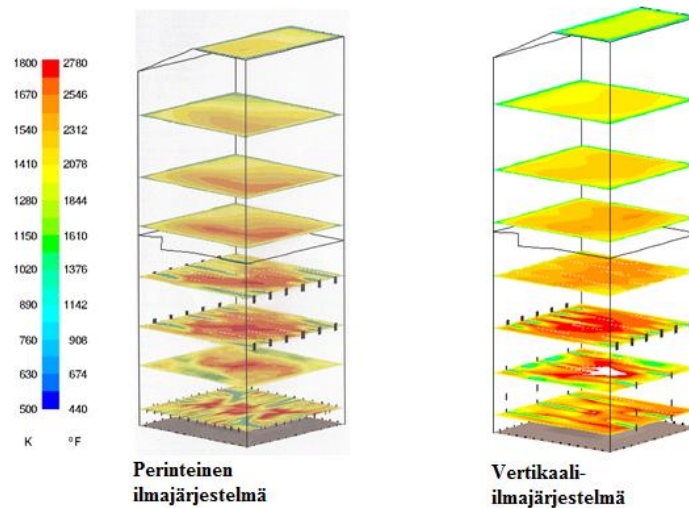
4.5 Tulipesän toiminnan CFD-mallintaminen

Sekoittumista ja virtausnopeutta tulipesässä voidaan mallintaa kolmiulotteisen virtauslaskennan avulla. Kuvassa 21 havainnollistetaan vertikaali-ilmajärjestelmän vaikutusta tulipesän pystysuoraan virtausnopeuteen. Vasemmanpuoleinen CFD-malli kuvaa tulipesää, jossa on perinteinen ilmajärjestelmä ja oikeanpuoleisessa tulipesässä on vertikaali-ilmajärjestelmä. Vasemman puoleisesta kuvasta nähdään, että pystysuora virtausnopeus tulipesän keskellä kasvaa yli mitta-asteikon ja on yli 20 m/s. Lähellä seiniä virtausnopeus on sen sijaan hyvin pieni tai sen suunta on alaspäin. Vertikaali-ilmajärjestelmällä varustetussa tulipesässä virtausprofiili on huomattavasti tasaisempi.



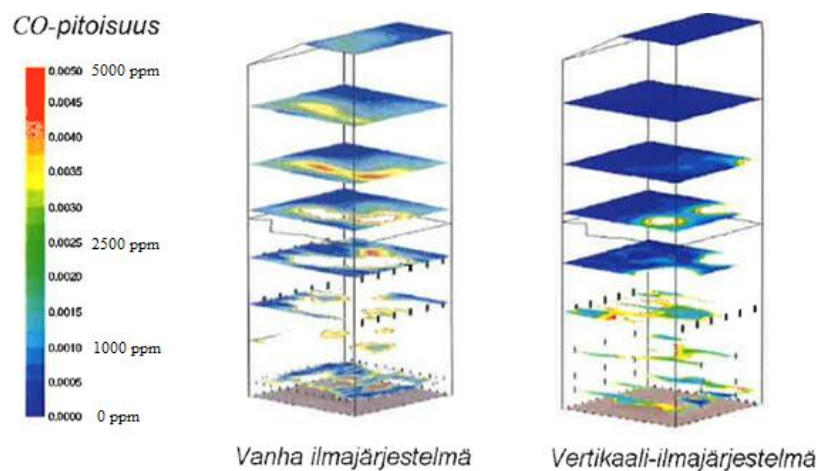
Kuva 21. Virtausnopeusprofiili tulipesässä. (Kaila, J. et al. 2003)

Kuvassa 22 on verrattu ilmajärjestelmän vaikutusta tulipesän lämpötilaprofiiliin. Perinteisessä ilmajärjestelmässä palamista tapahtuu vielä ylempänä tulipesässä huonomman sekoittumisen vuoksi, joten savukaasujen lämpötila tulipesän yläosassa on korkeampi. Vertikaali-ilmajärjestelmässä palaminen tapahtuu alempana tulipesässä ja savukaasujen lämpötila tulipesän jälkeen on alhaisempi kuin huonosti toimivissa tulipesissä.



Kuva 22. Ilmajärjestelmän vaikutus tulipesän lämpötilaprofiiliin. (Kaila, J. et al. 2003)

Kuvassa 23 on verrattu CO-pitoisuutta tulipesässä. Vasemman puoleinen malli kuvaa perinteistä ilmajärjestelmää ja oikeanpuoleinen malli vertikaali-ilmajärjestelmää. Punaisella merkityillä alueilla CO-pitoisuus on 5000 ppm. Valkoisella kuvatut alueet ovat asteikon ulkopuolella, jolloin CO-pitoisuus on yli 5000 ppm. Perinteisessä ilmajärjestelmässä asteikon yli menevä alue on huomattavan suuri tertiääri-ilmatason yläpuolella. Sinisellä olevalla alueella CO-pitoisuus on erittäin pieni. Vertikaali-ilmajärjestelmässä CO-pitoisuus tulipesän yläosassa on lähes olematonta. Mallien perusteella sekoittuminen on vertikaali-ilmajärjestelmässä merkittävästi parempaa.



Kuva 23. CO-pitoisuus tulipesässä. (Kaila, J. et al. 2003)

4.6 Hajukaasujen poltto soodakattilassa

Hajukaasuja muodostuu kaikissa lipeää käsittelevissä prosessilaitteissa. Nykyaikaisissa soodakattiloissa poltetaan sekä laimeita että väkeviä hajukaasuja. Väkevät ja laimeat hajukaasut on erotettava toisistaan ennen polttoa, koska väkevät hajukaasut ovat räjähdysherkkiä. Laimeat hajukaasut (DNCG) muodostuvat lähinnä eri säiliöiden, kuten liuottajan tai vahvamustalipeäsäiliöiden hönkäkaasuista. Laimeat hajukaasut syötetään tulipesään joko erillisistä suuttimista tai sitten ne sekoitetaan palamisilmakanavaan; joko sekundääri- tai tertiääri-ilmakanavaan. Laimeat hajukaasut ovat pääosin ilmaa, joten ne korvaavat osittain tarvittavaa palamisilmamäärää. (KnowPulp, 2003)

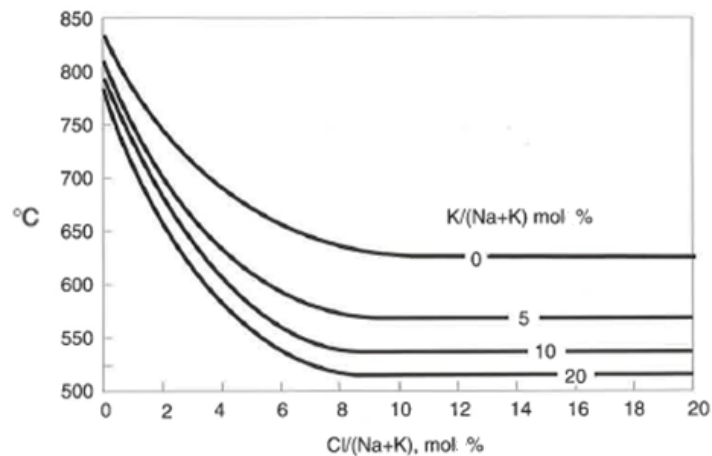
Väkevät hajukaasut (CNCG ja SOG) kerätään pääasiassa haihduttamolta, stripperiltä, keittimiltä ja väkevöittimiltä. Ne koostuvat pääasiassa TRS-yhdisteistä ja metanolikaasuista. Väkevät hajukaasut ovat räjähdysherkkiä ja myrkyllisiä, joten ne vaativat kaasutiiviin keräilyjärjestelmän ja erillisen hajukaasupolttimen. Putkistoissa tarvitaan lisäksi pisaranerottimia, vesityksiä ja liekinestimiä, jotta järjestelmä olisi turvallinen. Hajukaasupoltin muistuttaa normaalia maakaasupoltinta ja se sijaitsee tulipesän alaosassa. Polttimeen voidaan syöttää tukipolttoaineeksi maakaasua tai polttoöljyä, jotta varmistetaan hajuyhdisteiden hapettuminen ja riittävän korkea liekin lämpötila. Hajukaasujen poltossa syntyy rikkidioksidia, mutta tulipesästä vapautuva natrium sitoo rikkiyhdisteitä lentotuhkaan, ja tästä syystä päästöjä ei tavallisesti aiheudu. (KnowPulp, 2003)

5 SOODAKATTILAN LIKAANTUMINEN

Kun kattilaa ajetaan jatkuvasti ylikuormituksella, kasvaa myös likaantumisen ja tukkeutumisen riski. Likaantuminen on yleensä soodakattilan suurin pullonkaula. Suuri epäorgaanisen aineksen määrä mustalipeässä tekee siitä erittäin haastavan polttoaineen. Soodakattilan käytön aikaiset ongelmat liittyvät pääasiassa lämmönsiirtopintojen likaantumiseen ja tukkeutumiseen sekä materiaalien korroosioon. Nuohouksella puhdistetaan lämpöpintoja, mutta suuret kerrostumat voivat johtaa savukaasukanavan tukkeutumiseen ja kattilan ennenaikaiseen alasajoon. (Tran, H. 1997, 253-259) Nykyään soodakattiloilla on tavoitteena ajaa 12 -18 kk ajojakso ilman pesua.

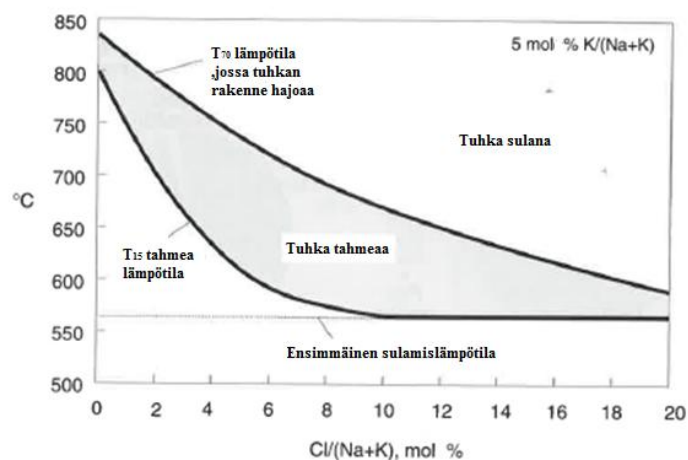
5.1 Kloori- ja kaliumpitoisuuden vaikutus tuhkan sulamislämpötilaan

Polttolipeän kalium- ja klooripitoisuus vaikuttavat kattilan likaantumiseen. Kalium- ja klooripitoisuus vaihtelevat tehdaskohtaisesti, vaikka muuten mustalipeän koostumus pysyy lähestulkoon samana tehtaasta riippumatta. Nykyaikaisilla sellutehtailla kemikaalikierto on erittäin suljettu ja tästä johtuen kloori ja kalium rikastuvat kemikaalikiertoon, jollei niitä osittain poisteta prosessista. Soodakattilassa kloori ja kalium höyrystyvät tulipesän korkeassa lämpötilassa helpommin kuin muut alkalimetallit. Savukaasun jäähtyessä kloori- ja kaliumyhdisteet lauhtuvat ja rikastuvat sähkösuodintuhkaan. Rikastumiskerros kloorille on noin 2,5 ja kaliumille 1,5. (Goncalves, C. et al. 2008, 33-38; Lundström, J. 2007, 29-30) Kalium- ja klooripitoisuus vaikuttavat merkittävästi tuhkan sulamislämpötilaan, kuten kuvasta 24 nähdään.



Kuva 24. Kloori- ja kaliumpitoisuuden vaikutus tuhkan tarttumislämpötilaan. (Tran, H. 1997, 259)

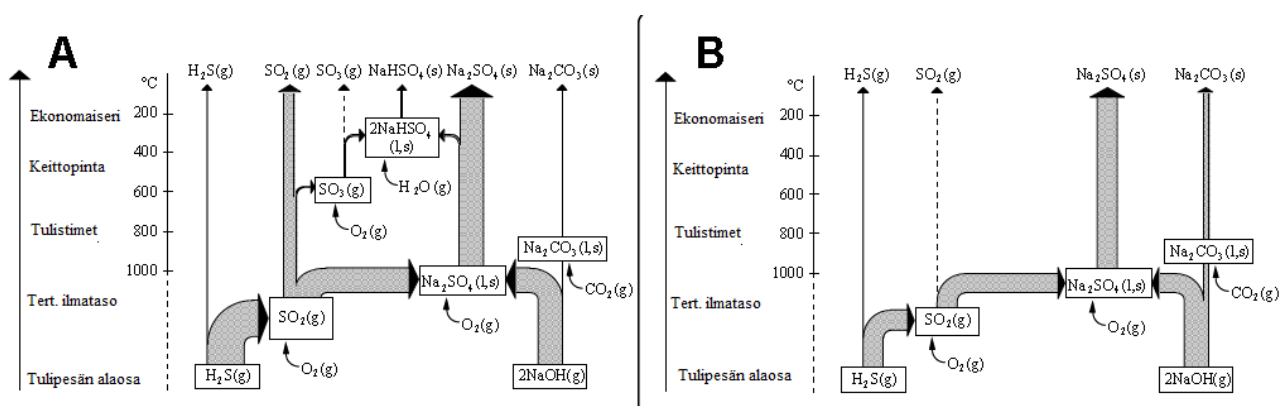
Tuhkan ensimmäinen sulamislämpötila vaikuttaa eniten tuhkan tarttumiseen. Tuhka on tahmeaa, kun 15 -70 % tuhkasta on sulassa muodossa. Tarttuvaa aluetta havainnollistetaan kuvassa 25. Näitä sulamislämpötilarajoja kuvataan symboleilla T_{15} ja T_{70} . Lämpötilan ollessa alhaisempi kuin T_{15} on tuhka vielä kuivaa, eikä se tartu lämpöpintoihin. Kun lämpötila nousee suuremmaksi kuin T_{70} , tuhka on lähes kokonaan sulassa muodossa. Tukkeutumista ei pääse tapahtumaan alueella, jossa savukaasun lämpötila on sulamislämpötilan T_{70} yläpuolella, koska sula tuhka valuu pois lämpöpinnalta. Tulistinalueelle ja keittopinnan yläosaan, joissa savukaasun lämpötila on vielä korkea, muodostuu kuitenkin lämmönsiirtoa heikentävä kerros. (Tran, H. 1997, 258-259)



Kuva 25. Tuhkan tarttumislämpötila-alue klooripitoisuuden funktiona. (Tran, H. 1997, 258)

5.2 Tulipesän alaosan toiminnan vaikutus likaantumiseen

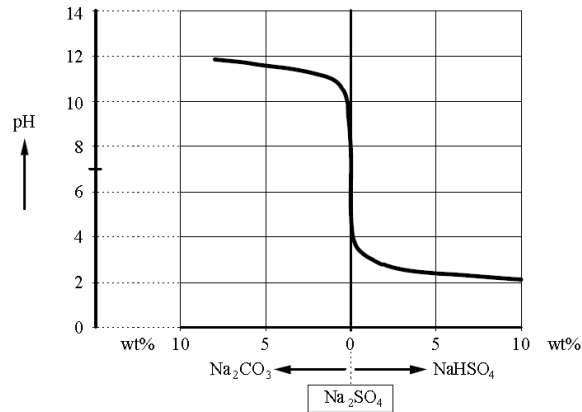
Tulipesän alaosan toiminnalla on suurin vaikutus kattilan likaantumiseen. Kuvassa 26 esitetään periaatekuva rikin ja natriumin reaktioista tulipesässä. Tiedot perustuvat osittain teoreettisiin laskelmiin ja osittain mittauksiin. Rikki vapautuu pääasiassa rikkivedyn (H_2S) muodossa. Rikkivety hapettuu edelleen rikkidioksidiksi. Natrium vapautuu metallisena natriumina ja natriumhydroksidina.



Kuva 26. Natriumin ja rikin reaktiot tulipesässä, A= alhainen keon pintalämpötila, korkea sulfiditeetti B= korkea keon pintalämpötila, alhainen sulfiditeetti. (Hupa, M. 2001, 5)

Korkea keon lämpötila edistää natriumin vapautumista ja vähentää rikkiyhdisteiden vapautumista. Korkea sulfiditeetti lisää rikin vapautumista ja alhainen sulfiditeetti puolestaan vähentää sitä. Kuvassa A keon pinnan lämpötila on kylmempi ja sulfiditeetti on korkea. Kuvan tapauksessa vapautuvan natriumin määrä ei riitä vapautuvan rikin sitomiseen, jolloin muodostuu rikkidioksidipäästöjä. Kaikki natrium kuluu natriumsulfaatin muodostamiseen, joten natriumkarbonaatin muodostuminen on olematonta. Kuvassa B keon pinnan lämpötila on kuumempi ja sulfiditeetti on alhaisempi. Natriumia vapautuu enemmän kuin rikkiä, joten kaikki rikkidioksidi reagoi natriumsulfaatiksi. Natrium ei kulu loppuun reaktiossa, vaan ylimääräinen natrium muodostaa hiilidioksidin kanssa natriumkarbonaattia. (Hupa, M. 2001, 5)

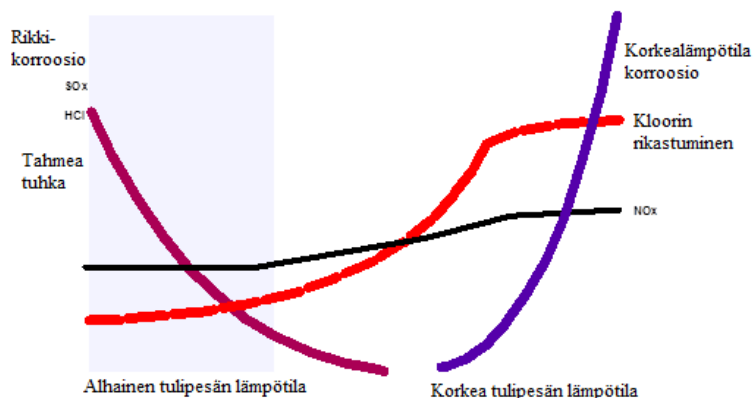
Osa vapautuneesta rikkidioksidista reagoi savukaasussa rikkitrioksidiksi (SO_3), joka reagoi edelleen vesihöyryn kanssa natriumbisulfiitiksi (NaHSO_3). Kuvassa 27 esitetään natriumbisulfiitti- ja natriumkarbonaattipitoisuuden vaikutus lentotuhkan pH-arvoon.



Kuva 27. Tuhkan pH:n riippuvuus natriumkarbonaatti ja natriumbisulfiittipitoisuudesta. (Hupa, M. 2001, 5)

Natriumkarbonaatti on emäksinen yhdiste ja se nostaa lentotuhkan pH:ta. Natriumbisulfiitti puolestaan on hapan ja se laskee lentotuhkan pH:ta ja aiheuttaa kattilan likaantumista ja tukkeutumista erityisesti ekonomaisierissa, savukaasukanavien osissa sekä sähkösuodattimissa. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden nostaminen on osaltaan vaikuttanut rikkipäästöjen vähenemiseen soodakattiloissa. Korkea kuiva-aine nostaa keon pinnan lämpötilaa ja vaikuttaa näin rikin vapautumiseen. (Hupa, M. 1997, 53)

Keon pintalämpötilan noustessa lisääntyy myös klooripitoisuus savukaasussa, mikä laskee tuhkan sulamislämpötilaa. Kloori aiheuttaa myös tulistinkorroosiota. Kuvassa 28 on havainnollistettu keon lämpötilan vaikutusta eri yhdisteiden vapautumiseen.



Kuva 28. Rikin ja kloorin vapautuminen lämpötilan funktiona. (Vakkilainen, E. 2007, 11)

Korkea keon lämpötila vähentää rikin vapautumista ja näin ollen myös ekonomaisemmin likaantumista, mutta toisaalta se lisää kloorin vapautumista ja näin ollen myös tulistinkorroosiota ja tulistimien likaantumista. Kloori ja kalium rikastuvat sähkösuodintuhkaan. Kloori- ja kaliumpitoisuuden ei kuitenkaan anneta kohota, vaan sitä säädetään poistamalla sähkösuodintuhkaa tai poistamalla lentotuhkasta klooria ja kaliumia tarkoitukseen kehitetyillä laitteistoilla.

5.3 Tuhkapartikkeleiden muodostuminen ja likaantumismekanismit

Savukaasuissa olevat sulapisarat ja tuhkapartikkelit muodostavat kerrostumia törmätessään lämpöpintoihin. Kerrostumien muodostumiseen vaikuttavat partikkelin liikkeet, koko ja muoto sekä virtausprofiili, putkigeometria. Soodakattiloissa tyypillisimmät partikkelityypit ovat alkalihöyryistä muodostuneet pienpartikkelit (fume), keskikokoiset partikkelit (ISP, intermediate size particles) ja karanneet lipeäpisarat (carryover).

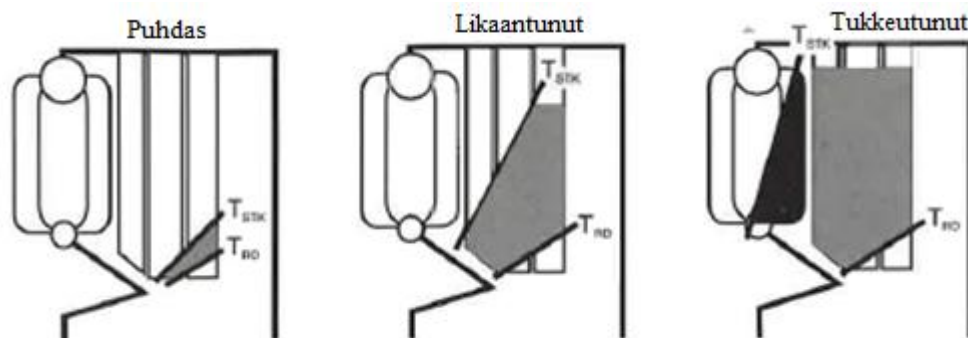
Alkalihöyrypartikkelit muodostuvat, kun tulipesässä höyrystyneet alkaliyhdisteet lauhtuvat savukaasun jäähtyessä. Alkalihöyryt muodostavat suurimman osan lentotuhkasta. Alkalihöyryn partikkelikoko on 0,1 -1 μm . ISP-partikkelit ovat alkalihiuksia suurempia, niiden koko on noin 1 -100 μm . Ne muodostuvat, kun lämpöpinnoista irtoaa kerrostunutta materiaalia savukaasuvirtaukseen. Carry-over on soodakattiloissa esiintyvistä partikkelityypeistä suurikokoisin. Partikkelikoko on 100 μm – 3 mm. Carry-over on savukaasuvirtauksen mukaan tarttuneita lipeäpisaroita. Päälikaantumismekanismit soodakattilassa ovat tuhkan tarttuminen, sintraantuminen ja alhainen lentotuhkan pH. (Tran, H. 1997, 248-257; Savolainen, J. 2005, 19)

5.3.1 Tuhkan tarttuminen

Tulistimissa ja keittopinnalla tahmea tuhka on merkittävin likaantumismekanismi. Tulistimissa ja likaantuminen aiheutuu Carry-over partikkeleista. Keittopinnalla carry-over saattaa aiheuttaa likaantumista tuloreunassa. Muuten keittopinnan likaantuminen aiheutuu alkalihöyryn muodostamasta tuhkasta. Savukaasuvirran mukaan tarttunut carry-over tarttuu kiinni tulistinputkien pintaan. Nokan tasolla olevissa tulistimissa savukaasun lämpötila on kuitenkin suurempi kuin T_{70} , jolloin kerrostuma ei kasva rajattomasti, vaan sula pintakerros valuu pois putken pinnalta. Primääritulistimen alueella ja tulistinosan keskiosassa savukaasun lämpötila on välillä 700 -800 °C. Tällöin tuhka on tarttuvaa ja olosuhteet ovat otolliset tuhkan tarttumiselle lämpöpintoihin.

Kerrostumat tarttuvat erityisesti lämpöpintojen tuloreunalle. Tuhkaa alkaa kerääntyä enemmän kohtiin, joihin kerrostumaa on jo kasaantunut. Usein kerrostumien kasvu johtaa kyseisen tulistimen tukkeutumiseen. Heikosti toimivalla nuohouksella on suuri vaikutus ylemmän tulistinosan tukkeutumiseen. (Tran, H. 1997, 266–268)

Kuvassa 29 on esitetty tulistimien likaantumisen eteneminen. Tulistimien likaantumisen seurauksena savukaasujen lämpötila tulistimien jälkeen on tuhkan ensimmäisen sulamislämpötilan yläpuolella. Tällöin tuhka tarttuu herkästi keittopinnan kapeisiin virtaussoliin, mikä voi aiheuttaa tukkeutumisen.



Kuva 29. Likaantumisen leviäminen tulistinosassa ja keittopinnassa. (Tran, H. 1997, 268)

Keittopinnan sisääntulo ja keskiosa ovat tyypillisimmät paikat kerrostumien muodostumiselle soodakattilassa. Sisääntulossa carry-over voi vielä aiheuttaa likaantumista, mutta keittopinnan keskellä ja ulostulossa carryover ei ole enää merkittävä likaantumisen aiheuttaja. Siellä likaantuminen aiheutuu keittoputken pinnalle tarttuvista alkalihöyryhiukkasista.

Keskiosaan muodostuu kerrostumia, koska siinä virtaussuunta vaihtuu vaakasuorasta pystysuoraksi ja täten virtaus on pyörteistä. Keittopinnalla putkiväli on huomattavasti kapeampi kuin tulistimissa. Savukaasujen lämpötila ennen keittopintaa tulisi olla välillä 540-600 °C. Jos lipeän kloori- ja kaliumpitoisuus ovat suuria, tulee lämpötila mitoittaa lähemmäs 540 °C. (Vakkilainen, E. 2007, 14) Vaikeimmin irrotettavat kerrostumat keittopinnalle muodostuvat yleensä jäähdyttämättömiin siteisiin tai ylempää putoavat suuret tuhkalohkareet, jotka jumittuvat putkien väliin. (Tran, H. 1997, 268-271)

5.3.2 Alhainen lentotuhkan pH

Ekonomaiserin tukkeutumisen saattaa aiheuttaa alhainen lentotuhkan pH, mikä johtuu natriumbisulfiitin muodostumisesta. Natriumbisulfiittia muodostuu, kun savukaasussa oleva rikkiatrioksidi reagoi vesihöyryn kanssa. (Tran, H. 1997, 271) Ekonomaiserissa lika on helposti irrotettavissa, jos pH on yli 10, mutta pH:n laskiessa siitä tulee vaikeasti irrotettavaa. Jotta pH pysyisi halutulla alueella, on tuhkan karbonaattipitoisuus oltava vähintään 2 -3%. (Vakkilainen, E. 2007, 14)

Ekonomaiserin, savukaasukanavien ja sähkösuotimien likaantuminen ja tukkeutuminen on myös mahdollista, vaikka savukaasun SO_2 pitoisuus ei olisikaan normaalia korkeampi. Tämä johtuu yleensä siitä, että kattilaa operoidaan ylikuormalla, jolloin savukaasun virtausnopeudet ovat suurempia. Kanavissa tukkeumat tulevat yleensä kohtiin, joissa virtauksen suunta muuttuu merkittävästi ja virtausnopeus on korkea. Tällainen kohta on esimerkiksi ekonomaiserin ulostulo, jossa virtaus kääntyy 180° , tai savukaasukanavan haarautumiskohdat sähkösuotimille. (Vihavainen, E. keskustelu 17.12.2014)

Merkittävät muutokset geometriassa, kuten kanavan supistaminen tai kartiomaiset kappaleet, aiheuttavat virtaukseen häiriöitä, jos ne asennetaan heti mutkan jälkeen. Savukaasukanavien vuodot voivat aiheuttaa myös tukkeutumisen. Vuotoilma kasvattaa savukaasun tilavuusvirtaa ja kohottaa virtausnopeutta. Ilmavuodot voidaan havaita happimittausten avulla. Jos jäännöshappi piipussa on merkittävästi suurempi kuin ekonomaiserissa, on savukaasukanavassa vuotoja. Sähkösuotimet tukkeutuvat yleensä sisääntulossa olevasta tulosiivilästä. Sen tarkoitus on saada aikaan tasainen virtausprofiili sähkösuotimiin. Tulosiivilän tukkeutumisen syitä ovat yleensä liian suuri virtausnopeus tai puutteellinen kolistus. (Vihavainen, E. keskustelu 17.12.2014)

5.3.3 Sintraantuminen

Lentotuhkan lämpöpinnoille muodostamat kerrostumat kovettuvat ajan myötä korkeissa lämpötiloissa. Ilmiötä kutsutaan sintraantumiseksi ja sitä tapahtuu myös tuhkan sulamislämpötilan alapuolella. Sintraantumisessa useat pienet partikkelit yhdistyvät muodostaen suurempia partikkeleita. Sidos muodostuu partikkeleiden kohtaamispaikkaan, ja usean partikkelin sidosten vahvistuminen diffuusion vaikutuksesta johtaa lopulta yhtenäiseen partikkeliin. Sintraantuminen tapahtuu nopeasti korkeassa lämpötilassa ja hitaasti kylmemmässä lämpötilassa. Pienet partikkelit sintraantuvat nopeammin kuin suuret.

Soodakattiloissa sintraantuminen johtuu yleensä korkeasta lämpötilasta ja sillä on merkittävä vaikutus kattilan likaantumiseen. Sintraantumista tapahtuu kaikilla soodakattilan lämpöpinnoilla. Tuhkan osittainen sulaminen kiihdyttää sintraantumista, koska se edistää partikkeleiden yhteen tarttumista. Sintraantuneen kerrostuman lujuus kasvaa ajan kuluessa ja sen irrottaminen on yhä vaikeampaa. Tämä on otettava huomioon nuohoussekvenssissä.

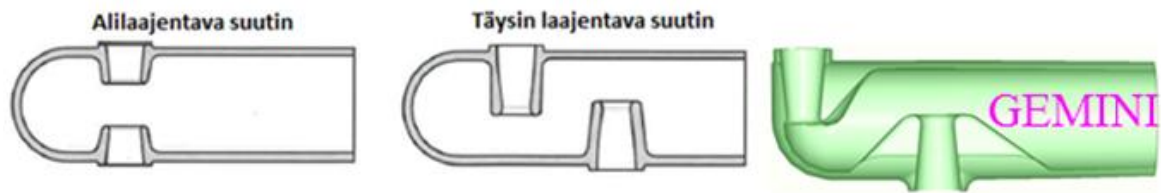
Nuohointen pitää käydä lämpöpinnoilla riittävän usein, jotta kerrostuma on vielä irrotettavissa. (Tran, H. 1997, 258-259)

5.4 Soodakattilan nuohous

Tehokas kerrostumien poisto soodakattilan lämpöpinnoilta on tärkeää soodakattilan toiminnan kannalta. Likaantuminen aiheuttaa kattilan tukkeutumista ja heikentää hyötysuhdetta. Soodakattilassa lämpöpinnat pidetään puhtaina jatkuva-aikaisella nuohouksella. Tämä tarkoittaa, että kattilan lämpöpinnoille puhalletaan korkeapainehöyryä, joka puhdistaa lämpöpinnat. Korkeapainehöyry otetaan tyypillisesti primääritulistimen jälkeen ja paine alennetaan säätöventtiilillä. Vaihtoehtoinen ratkaisu on ottaa nuohoushöyry turpiinin välitosta. Nuohoin koostuu kattilan sisälle työntyvistä pyörivästä putkesta, jonka päässä on kaksi suutinta. Korkeapainehöyry virtaa suuttimien kautta lämpöpinnoille. Suuttimissa höyryn virtausnopeus kasvaa ja paine laskee suihkun etäisyyden funktiona. Suutin on De Laval-tyyppinen suppeneva-laajeneva-suutin. Höyry kulkee suuttimessa äänen nopeudella ja suuttimen ulostulossa nopeus kiihtyy äänen nopeuden yläpuolelle. (Tran, H. 1997, 273)

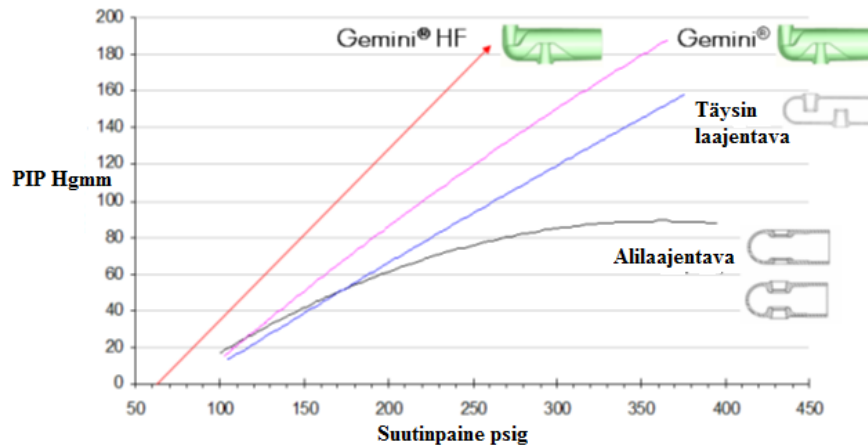
5.4.1 Erilaiset suutintyytit

Nuohojen puhdistustehokkuuden mitta on PIP (Peak Impact Pressure). Tämä tarkoittaa dynaamista painetta, joka mitataan suuttimen keskilinjasta 762 mm etäisyydeltä suuttimen ulostulosta. Yleisesti on olemassa kolmea suutintyyppiä: täysin laajentavia, alilaajentavia suuttimia ja moderneja Gemini-tyyppisiä suuttimia. Erityyppiset suutinvaihtoehdot esitetään kuvassa 30. (Tran, H. 1997, 273-274)



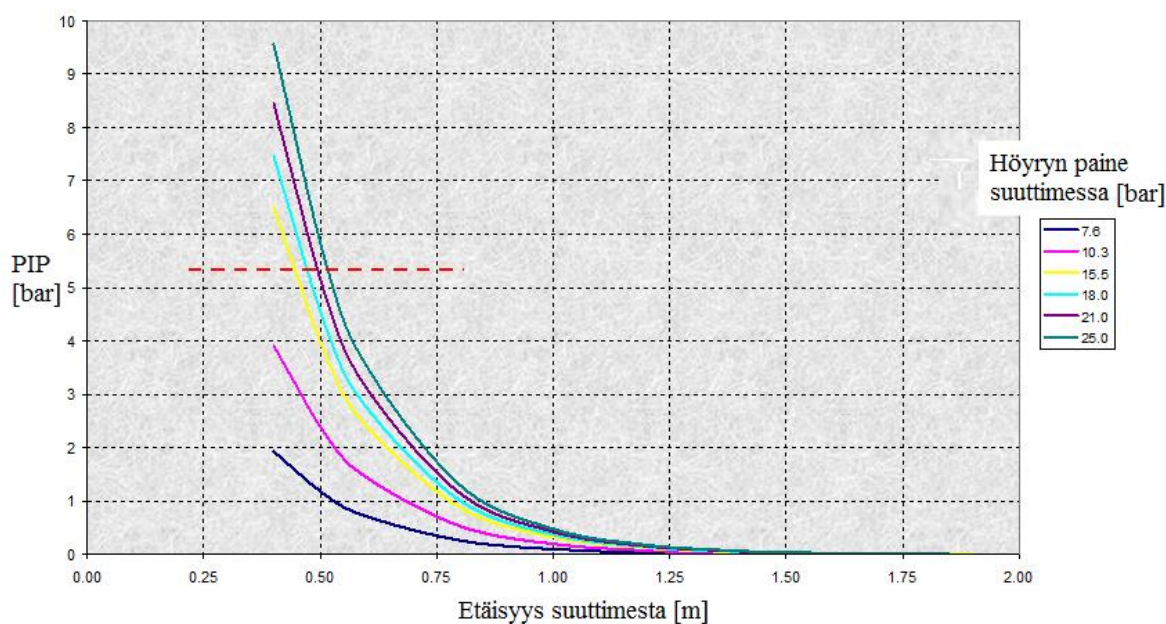
Kuva 30. Nuohoimen suutinvaihtoehdot. (Tran, H. 1997, 274)(Savolainen, J. 2005, 11)

Alilaajentavan suuttimen pituus on liian pieni, jolloin suihkun laajeneminen jatkuu vielä suuttimen ulkopuolella aiheuttaen shokkiaaltoja. Suihkun kineettistä energiaa muuttuu sisäiseksi energiaksi ja puhdistusteho heikkenee. Täysin laajentava suutin on pidempi, jolloin suihku laajenee täysin jo suuttimessa. Tällä suutintyypillä saavutetaan sama puhdistusteho pienemmällä paineella ja höyrymäärällä. (Tran, H. 1997, 275) Paras puhdistusaste saavutetaan Gemini tyypisellä suuttimella. Suuttimen vaikutusta puhdistustehoon havainnollistetaan kuvassa 31. (Diamond Power, 2007)



Kuva 31. PIP nuohoinputken paineen funktiona. (Diamond Power, 2007)

Nuohoushöyryn paineen kasvattaminen ei merkittävästi lisää puhdistustehoa. Kuvassa 32 on esitetty PIP-arvoja erisuuruusilla nuohoushöyryn paineilla. Esimerkiksi yhden metrin etäisyydellä nuohoimesta PIP on lähes sama riippumatta siitä, onko nuohoushöyryn paine 15 vai 21 bar. (Savolainen J. 2005, 7)



Kuva 32. PIP suihkun etäisyyden funktiona eri suutinpaineille. (Savolainen, J. 2005, 7)

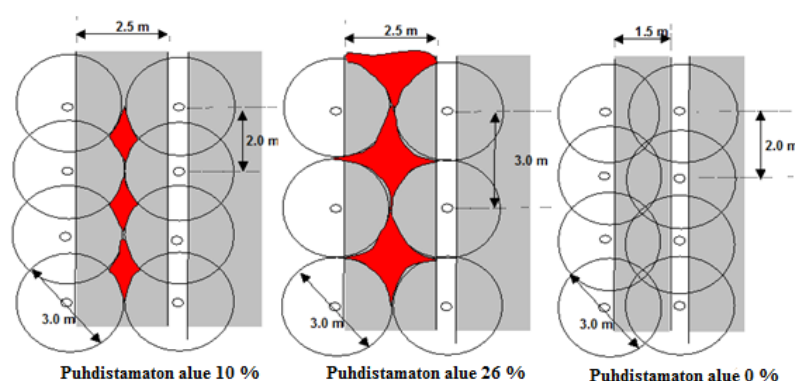
5.4.2 Nuohointen sijoittelu ja tehollinen alue

Soodakattilan lämpöpintojen alue voidaan jakaa likaantumisen ja nuohouksen suhteen neljään kategoriaan. Ensimmäiseen kategoriaan kuuluvat nuohouksen kannalta kriittiset alueet, jotka ovat herkkiä likaantumiselle. Näitä alueita ovat keittopinnan sisään tulo sekä keskiosa ja 2. ekonomaiserin sisääntulo. Näillä alueilla nuohointen tulisi käydä kaikkein useimmin.

Toisen kategorian alueet eivät ole niin herkkiä likaantumiselle, mutta ne ovat kuitenkin kriittisiä. Tähän kategoriaan kuuluvat primääritulistin ja takaseinän verho ja 1. ekonomaiserin sisääntulo. Kolmanteen kategoriaan kuuluvat Sekundääri- ja tertiääritulistimien yläosa ja loput keittopinnasta ja ekonomaiserin yläosa. Neljäs kategoria on kaikkein vähiten tärkein ja siihen kuuluvat tulistimien alaosa ja ekonomaiserin alaosat. Nokka ohjaa savukaasuja enemmän tulistimien yläosaan, joten tulistimen alaosan likaantuminen on vähäisempää. Jos tehtaassa sulfiditeettitaso on korkea, tulee ekonomaiserin nuohoukseen kiinnittää enemmän huomiota. (Savolainen, J. 2005, 16-18)

Hyvän puhdistustehokkuuden takaamiseksi tulee nuohoimen puhdistushalkaisijan olla vähintään 3 metriä. Paras puhdistustulos saadaan, kun putkipaneelit ovat riittävän kapeita, ja nuohoimia on sijoitettu tarpeeksi tiheään. Erityisen tärkeää on, että jäähdyttämättömien

siteiden läheisyydessä sijaitsee nuohoin, koska tuhka tarttuu niihin herkemmin. Lämpöpinnoilla, jotka kuuluvat kategoriaan yksi ja kaksi, tulee nuohoimet sijoittaa tiheämmin. Putkipaneelin leveyttä ei myöskään tule mitoittaa liian suureksi, koska tällöin nuohoin ei yletä puhdistamaan koko paneelia. Nuohoimen sijoittelun vaikutusta puhdistustehokkuuteen havainnollistetaan kuvassa 33. Puhdistamatta jäänyttä aluetta kuvataan punaisella värillä. Liian harvaa nuohointien sijoittelua ei voida korvata nuohoimilla, joissa on parempi suutingeometria. (Savolainen, J. 2005, 141; Vihavainen, E. Keskustelu 17.12.2014)



Kuva 33. Nuohointien sijoittelun ja putkipaneelien koon vaikutus puhdistustehokkuuteen. (Savolainen, J. 2005, 136)

5.5 Likaantumisen havaitseminen

Likaantuminen voidaan havaita kattilassa olevien mittausten perusteella. Tärkeimmät mittaukset ovat lämpötila- ja paine-eromittaukset. Tulistimien likaantuminen voidaan parhaiten havaita höyrypuolen lämpötilan noususta kussakin tulistinvaiheessa. Kattilan ylösajosta kestää noin kaksi viikkoa ennen kuin lämpötilaero saavuttaa tasapainon. Toinen varma tapa mitata tulistimien likaantumista on ruiskutusveden massavirta. Jäähdytystarve vähenee lämmönsiirron heikkenemisen myötä. Yleensä jokaisessa tulistinvaiheessa on kaksi höyrypuolen lämpötilamittausta, jotka sijaitsevat oikealla ja vasemmalla puolella. Vertaamalla oikean ja vasemman puolen mittauksia saadaan tietoa tulipesän palamisolosuhteista. Ideaalitilanteessa oikean ja vasemman puolen mittausarvot ovat hyvin lähellä toisiaan.

Ekonomaiserin ja keittopinnan likaantumista voidaan hyvin mitata painehäviömittauksella. Savukaasuvirtaus lämpöpintojen läpi aiheuttaa painehäviötä, joten painehäviön mittausta täytyy aina suhteuttaa kattilan sen hetken kuormaan. Kaikkein varmin tapa mitata kattilan kuormaa on verrata sitä höyryn tuotantoon. Savukaasujen vetohäviöt tulistimissa ovat erittäin pieniä, joten tulistimien likaantumista on vaikea havaita painehäviöstä ennen kuin ne ovat kokonaan tukossa. Kattilan ylösajosta painehäviö kasvaa muutaman päivän ajan, jonka jälkeen saavuttaa tasapainon. Jos myöhemmin painehäviö alkaa nousta, lämpöpintojen likaantuminen jatkuu. (Vakkilainen, E. 2007, 5)

5.6 Kloori- ja kaliumyhdisteiden poistaminen

Kloori ja kalium tulevat tehtaan kemikaalikiertoon pääasiassa puun, raakaveden, valkaisukemikaalien ja make-up-kemikaalien mukana. Klooria tulee tehtaalte noin 1,2 -14 kg/adt ja kaliumia 0,7 -4 kg/adt. Poistamalla yhdisteet mustalipeästä voidaan nostaa tuhkan ensimmäistä sulamislämpötilaa ja vähentää tulistimen ja keittopinnan likaantumista. Kloori on tulistimissa haitallinen yhdiste myös korroosion kannalta. Erityisesti kattiloissa, joissa tulistetun höyryn lämpötila on yli 495 °C, klooripitoisuus ei saisi ylittää 0,3 %. (Concalves, C. et al. 2008, 33-38; Lundström, J. 2007, 29-30)

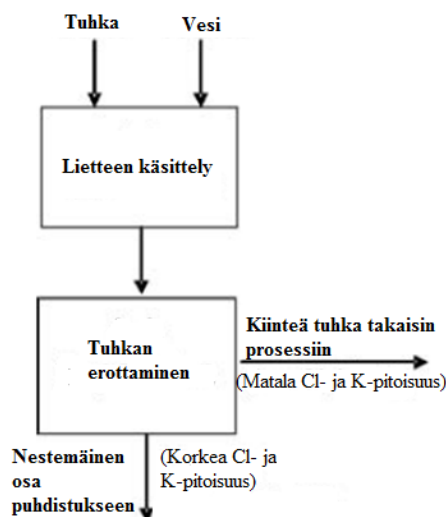
Tyypillisesti kloori- ja kalium erotetaan soodakattilan lentotuhkasta, johon ne rikastuvat käytön aikana.

Käytössä olevat teknologiat ovat:

- Uttaminen
- Haihdutus/kiteyttäminen
- Jäähdytyskiteyttäminen
- Ioninvaihto

Kolme ensimmäistä menetelmää ovat yleisimpiä ja ne perustuvat tuhkan liettämiseen veteen ja käsittelyyn tuhkan käsittely-yksikössä. Muodostuvan lietteen nestemäinen osa sisältää enemmän korkeavesiliukoista klooria ja kaliumia. Kiinteä osa puolestaan sisältää enemmän karbonaattia ja sulfaattia. Kiintoaine ja neste erotetaan, jolloin kiintoaine palautetaan takaisin

haihduttamolle kiertoon ja siten natrium ja rikki saadaan otettua talteen. Prosessia havainnollistetaan kuvassa 34. (Concalves, C. et al. 2008, 34)



Kuva 34. Kaliumin ja kloorin erotus lentotuhkasta. (Congalves, C. et al. 2008, 34)

Uuttamiseen perustuvia järjestelmiä toimittavat markkinoille Valmet (entinen Metso) ja Andritz. Valmetin järjestelmässä lentotuhka sekoitetaan 90 asteiseen veteen, jotta natrium ja kloridi liukenevat paremmin veteen ja natriumsulfaatti pysyy kiinteänä. Lieke pumpataan sentrifugiin, jossa kiintoaine ja siihen rikastunut natriumsulfaatti erotetaan nesteestä. Kiintoaine palautetaan takaisin lipeäkiertoon ja kalium- ja klooripitoinen vesi rejektisäiliöön. Tuhkan uuttamisen tehokkuutta mitataan kloorin ja kaliumin poistotehokkuudella sekä natriumin ja rikin talteenottokyvyllä. Andritzin uuttoprosessi eroaa siten, että tuhka sekoitetaan 60 °C veteen ja että erotus tapahtuu sentrifugin sijaan rumpusuodinta tai alipaineviiraa käyttäen.

Kristalloimisessa hyödynnetään myös natriumsulfaatin alhaista vesiliukoisuutta. Kristalloimisessa tuhka liuotetaan täydellisesti veteen ja tämän jälkeen seos haihdutetaan. Natriumsulfaatin alhaisemman liukenemisen vuoksi se kiteytyy ennen kalium- ja klooriyhdisteitä haihduttamisen aikana. Puhdistettu natriumsulfaatti suodatetaan ja palautetaan takaisin lipeäkiertoon. Suurin osa kloori- ja kaliumipitoisesta liuksesta kierrätetään takaisin haihdutukseen ja kiteyttimeen, mutta pieni osa poistetaan kloorin ja

kaliumin poistamiseksi. Haihdutuskristalloimisessa muodostuvat kiteet ovat merkittävästi suurempia kuin uuttamisessa ja siten ne ovat helpompia erottaa.

Andritz toimittaa ARC (Ash Re-Crystallization) nimellä olevaa kiteyttämiseen perustuvaa prosessia. ARC-prosessissa liete syötetään falling film tyyppiseen haihdutinkiteyttimeen. Muodostuneet kiteet erotetaan rumpusuodattimessa tai sentrifugissa. Natriumsulfaatti- ja natriumkarbonaattirikkaan kiintoaineen kosteuspitoisuus on noin 10 -15 %, joten sekoitettaessa mustalipeään se ei alenna sen kuiva-ainepitoisuutta. Järjestelmä vaatii kalliiden materiaalien käyttöä, koska prosessissa kiertävän nestefaasin klooripitoisuus on erittäin suuri ja se aiheuttaa korroosiota. ARC prosessi toimii alhaisella lämpötilatasolla, mikä mahdollistaa toisiolämpövirtojen hyödyntämisen haihdutinkiteyttimeessä. Yksi mahdollisuus on hyödyntää liuottajan hönkähöyryä. (Lundström, J. 2007, 28-30)

5.7 Soodakattilan vesipesu sekä ”jäähdytys ja nuohous”

Tilanteessa, jossa kattila on tukkeutunut niin pahasti, ettei sitä voida enää höyrynuohouksella puhdistaa, on kattila ajettava alas ja vesipestävä. Vesipesu tapahtuu nuohoimilla, siten, että nuohoushöyrylinjaan kytketään vesiputki. Vesipesu pysäyttää sellutehtaan tuotannon, koska se vaatii soodakattilan alasajon. Soodakattilan alasajo, jäähtyminen ja ylösajo huomioon ottaen pesuseisokki pysäyttää tuotannon kaiken kaikkiaan noin kahdeksi vuorokaudeksi. Nykyisillä sellun hinnoilla tämä merkitsee suurilla tehtailla jopa miljoonien eurojen tuotantotappiota. Kuvassa 35 on esitetty tukkeutunutta keittopintaa. (Vihavainen, E. keskustelu 17.12.2014)



Kuva 35. Tukkeutunut keittopinta. (Vihavainen, E. 2012, 2)

Jäähdytys ja nuohous (Chill&Blow) tarkoittaa mustalipeän polton hetkellistä lopettamista. Kattila pidetään ajossa käynnistys- ja kuormapolttimien avulla. Tällä tavalla saadaan laskettua kerrostumien lämpötilaa. Kerrostumien jäähtyessä ne irtoavat helpommin itsestään tai nuohouksen avustamina. Jäähdytys ja nuohous on hyödyllinen lähinnä tulistimien puhdistamiseen. (Vakkilainen, E. 2007, 21) Soodakattilalla on tavoitteena ajaa täysi ajojakso, joka on yleensä 12 -18 kk, ilman ylimääräistä pesuseisokkia. Pitkällä aikavälillä vesipesutiheys kuvaa, kuinka hyvin soodakattila toimii.

6 SOODAKATTILAN TOIMINTAA KUVAAVAT TUNNUSLUVUT

Tunnuslukujen perusteella voidaan verrata eri soodakattiloiden palamisilmamääriä ja tulipesän kuormituksia toisiinsa sekä tarkastella ilma-, polttoliipeä- ja sekä polttoliipeän virtausmittausten tarkkuutta ja luotettavuutta. Tunnusluvut ovat hyvä työkalu myös tehtaan käyttöhenkilöstölle, koska niiden avulla on helppo tunnistaa, miten hyvin soodakattila toimii. (Vihavainen, E. Keskustelu 9.4.2015)

6.1 Soodakattilan kuormitusta kuvaavat tunnusluvut

Tulipesän poikkipintarasituksen avulla voidaan vertailla soodakattilaa muihin kattiloihin. Pohjakuorma lasketaan yhtälöllä 5. Kattilavalmistajat käyttävät kuiva-ainekuormana haihduttamolta tulevaa tuhkatonta mustaliipeävirtausta. Sellutehtailla käytetään tyypillisesti soodakattilan kuormana polttoliipeän virtausta, jossa on mukana 7-10% kiertotuhkaa.

$$HSL = \frac{q_{m,ml,ka}}{A_{pohja}} \quad (5)$$

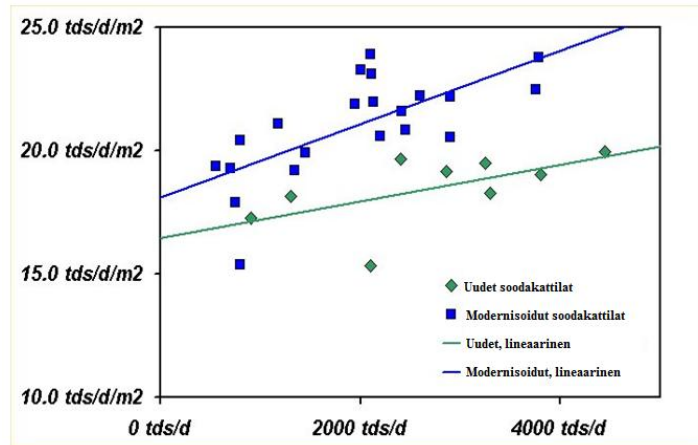
missä

HSL = Tulipesän poikkipintakuormitus (Hearth Solids Loading) [tka/24h,m²]

$q_{m,ml,ka}$ = soodakattilan kuiva-aine kuorma [tka/24h]

A_{poh} = soodakattilan pohjan pinta-ala [m²]

Kuvasta 36 nähdään pohjakuormia eri soodakattiloille. (Vakkilainen, E. 2007, 7)



Kuva 36. Tyypillisiä uusien ja modernisoitujen soodakattiloiden poikkipintakuormituksia. (Vihavainen, E. 2014a)

Toinen yleinen tapa verrata soodakattiloiden tulipesien poikkipintakuormitusta toisiinsa, on laskea tulipesään syötettävä lämpöteho poikkipinta-alaan verrattuna yhtälön (6) mukaisesti.

$$HHRR = \frac{q_{m,ml,ka} \cdot HHV}{A_{pohja}} \quad (6)$$

Missä

$HHRR$ = tulipesässä vapautuva lämpö poikkipinta-alaa kohden [kW/m^2]

HHV = mustalipeän ylempi lämpöarvo [kJ/kg_{ka}]

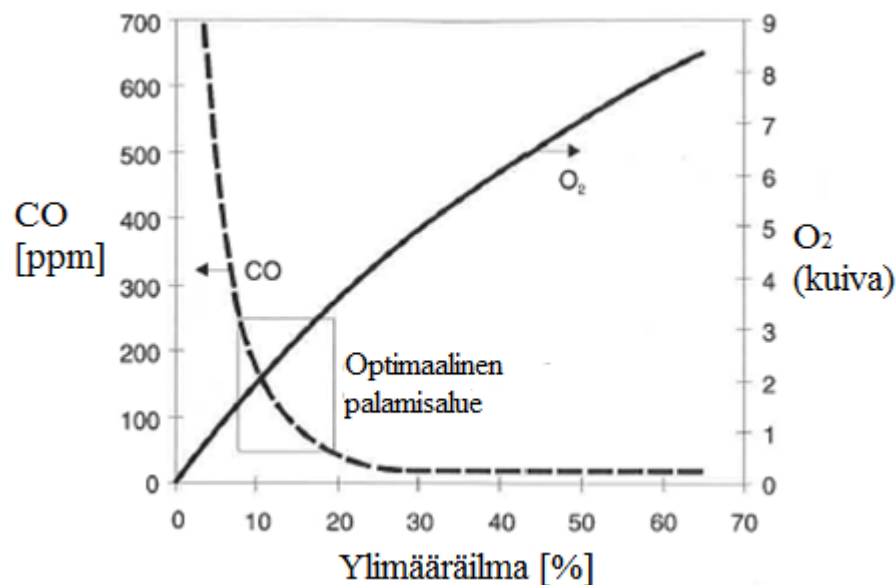
(Adams, T. et al. 1997, 352)

6.2 Tulipesän toimintaa kuvaavat tunnusluvut

Tulipesän toimintaa kuvaa hyvin kokonaisilmamäärän suhde soodakattilan kuormaan. Kattilan kuormana voidaan käyttää kuiva-ainevirtausta tai tuorehöyryvirtausta. Höyrypuolen virtausmittaukset ovat yleensä tarkempia, joten niiden käyttö on suositeltavampaa. Hyvin toimivissa soodakattiloissa kokonaisilmamäärän suhde soodakattilan kuiva-ainekuormaan on $3,2 - 3,4 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{ka}$ tai vastaavasti kokonaishöyryntuotantoon $0,9 - 0,95 \text{ Nm}^3/\text{kg}$. Näitä voidaan käyttää suuntaa antavina tavoitearvoina, kun soodakattilan toimintaa viritetään.

Soodakattilan mittauksista savukaasun happipitoisuus ekonomasierin jälkeen kertoo, kuinka suurella ilmaylimäärällä kattilaa ajetaan. Kun tähän yhdistetään häkämittaus, niin saadaan hyvä kuva tulipesän sen hetken toiminnasta. Moderneissa soodakattiloissa 1,5 – 2,0 % happipitoisuus savukaasuissa on palamisen kannalta riittävä. (Vihavainen, E. Keskustelu 9.4.2015)

Tällöin häkäpitoisuus ei vielä ylitä 250 ppm. Kuvan 40 mukaisesti CO-pitoisuus savukaasuissa lähtee jyrkkään nousuun, kun ilmakerrointa pienennetään alle 1,1. Optimaalinen palamisalue on kohdassa missä CO-käyrä ja O₂-käyrä risteävät. (Jones, A.K. 1997, 206-207)



Kuva 37. Ilmaylimäärän vaikutus CO-pitoisuuteen. (Jones, A.K., 1997, 207)

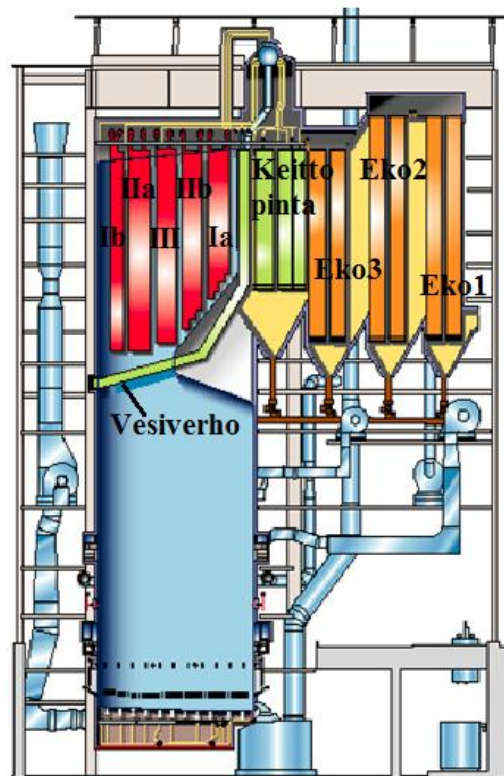
Mittausten tulisi olla sekä oikealla että vasemmalla puolella tulipesää, jolloin saadaan tietoa myös tulipesän mahdollisesta vinokuormituksesta. Suuri tulipesän poikkipintarasitus ja alhainen ilmamäärän ja kokonaishöyrytuotannon suhdeluku ovat merkki hyvästä sekoittumisesta ja hyvästä tulipesän toiminnasta. (Vihavainen, E. Keskustelu 9.4.2015)

7 SELLUTEHDAS ETELÄ-AMERIKASSA: SOODAKATTILA 1

Tässä kappaleessa perehdytään erään eukalyptussellutehtaan soodakattilan ongelmiin. Soodakattila 1 on korkeasti kuormitettu. Suurimmat ongelmat ovat tulistin- ja keittopinta-alueen likaantuminen, sulakourujen huono toiminta liiallisen keon vuoksi ja korkeat CO- ja TRS-päästöt. Ongelmat ovat tyypillisiä korkeasti kuormitetuille soodakattiloille.

7.1 Soodakattilan rakenne

Soodakattila on alun perin otettu käyttöön vuonna 1978, mutta se on rakennettu kokonaan uudelleen suuremman kokoisena alkuperäiseen kattilarakennukseen vuonna 2001. Poikkileikkaus soodakattilasta esitetään kuvassa 38.



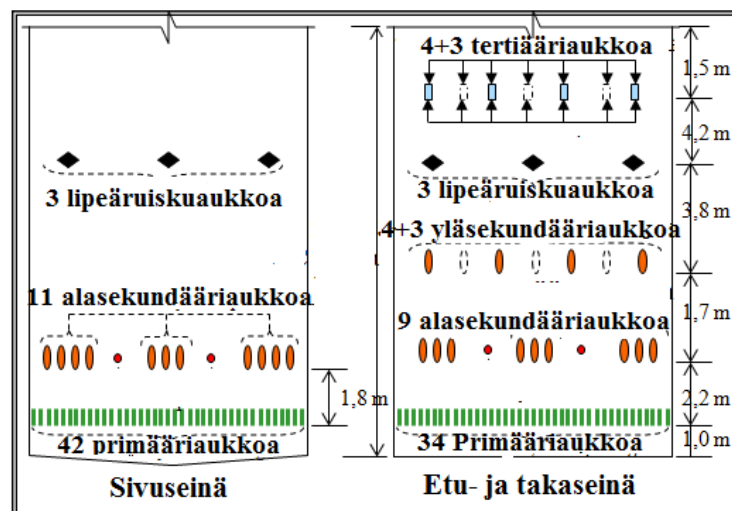
Kuva 38. Soodakattila 1 Etelä-Amerikassa. (Puig, F. et al. 2004, 2)

Kattilassa on 3 ekonomaiseria ja vesiverho. Tulistus on kolmessa vaiheessa. Primääri- ja sekundääritulistin ovat jaettu kahteen osaan. Tulipesän mitat esitetään taulukossa 2.

Taulukko 2. Tulipesän mitat.

Syvyys	m	13,8
Leveys	m	11,3
Korkeus	m	29,5
Pohjan pinta-ala	m ²	156
Nokan osuus sivuseinän pituudesta	%	50

Kattilan ilmajärjestelmä käsittää primääri-ilmatason, ala- ja yläsekundääri-ilmatason sekä tertiääri-ilmatason. Primääri-ilmatasolla on 42 aukkoa molemmilla sivuseinillä ja 32 aukkoa etu- ja takaseinällä. Alasekundääri-ilmasuuttimet sijaitsevat kattilan jokaisella seinällä kuvan 39 mukaisesti. Alasekundäärisuuttimia on 11 molemmilla sivuseinillä ja 9 aukkoa sekä etu- että takaseinällä.



Kuva 39. Soodakattila 1:n ilmasuuttimien sijainti. (Puig, F. et al. 2004, 2)

Yläsekundäärisuuttimet ja tertiäärisuuttimet sijaitsevat etu- ja takaseinällä, molemmilla ilmatasoilla on etuseinällä 4 ja takaseinällä 3 ilmasuutinta. Soodakattilassa on erityinen sekundääri-ilmajärjestelmä, jossa alasekundäärisuuttimet sijaitsevat epäsymmetrisesti toisiinsa nähden. Sivuseinän alasekundäärisuuttimet sijaitsevat hieman alempana kuin etu- ja

takaseinän alasekundäärisuuttimet. Liuottajan hönkä viedään kahden tertiääri-ilmasuuttimen kautta tulipesään. CNCG-poltin sijaitsee yläsekundääritasolla. Sulakouruja on viisi kappaletta ja ne sijaitsevat kattilan takaseinällä. Käynnistyspolttimet sijaitsevat alasekundääritasolla, kaksi poltinta molemmilla sivuseinillä. (Puig, F. et al. 2004, 1-9)

7.2 Soodakattilan nykyinen toiminta

Soodakattilan nykyinen kuorma on 3600 tds/d. Soodakattilan toimintaa kuvaavat tunnusluvut on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Soodakattilan toimintaa kuvaavat tunnusluvut.

	Yksikkö	Soodakattila 1	Tyypillisiä tunnuslukuja
Tulipesän poikkipintakuormitus (tuhkallinen)	tka/24h,m ²	24	20
Tulipesän poikkipintakuormitus	kW/m ²	3740	3000-3300
Kokonaisilma/Mustalipeävirtaus	Nm ³ /kgka	3,5	3,0-3,3
Kokonaisilma/Höyryn tuotanto	Nm ³ /kg	1,1	0,9-1,0

Verrattaessa soodakattila 1:n tunnuslukuja tyypillisiin tunnuslukuihin havaitaan, että tulipesän kuormitus on erittäin korkea ja palamisilman kokonaismäärä on suuri. Näin suurella palamisilman määrällä palamattomien kaasupäästöjen ei pitäisi olla ongelma, jos ilmajärjestelmä toimii suunnitellusti. Osa palamisilmasta ei mennyt tulipesään kanavissa olevien vuotojen vuoksi.

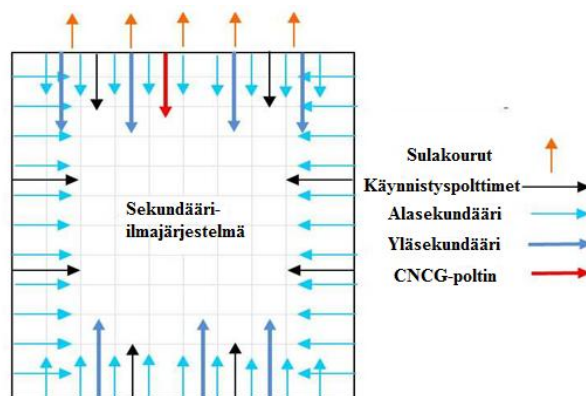
Visuaalisten havaintojen perusteella tulipesä on vinokuormassa. Tulipesän vasemmalla puolella palaa enemmän mustalipeää. Tämän Tulipesän vasemmalla puolella ja erityisesti vasemmassa etunurkassa palamattomia kaasuja on selvästi enemmän. Vasempaan takanurkkaan sulakourujen eteen kertyy paljon kekoa. Primääri-ilmatasolta tarkasteltuna etu- ja takaseinä ovat kuumimpia. Vasen puoli tulipesästä on kuumempi kuin oikea. Erityisesti etu- ja takaseinällä tulipesän pyörteet heittävät paljon lipeää seinille ruiskujen ylä- ja alapuolelle.

Taulukossa 4 esitetään tärkeimmät soodakattilan säädöt normaalitilanteessa. Taulukossa esitetyssä ilmajaossa tertiääri-ilman osuuteen on laskettu mukaan kuormapoltinilma ja liuottajan höngän määrä. Sekundääri-ilman osuudessa on huomioitu kokonaan sekä yläsekundääri- että alasekundääri-ilma.

Taulukko 4. Tärkeimmät operointiparametrit normaalitilanteessa.

Lipeäruiskut, halkaisijaEtu/Taka/Oik/Vas	-	35mm, 3+3+2+2
Polttolipeän lämpötila	C	141,2/141,5
Kuiva-ainepitoisuus	%	79,1/79,5
Höyryn tuotanto	kg/s	140,56
Kuormapoltinilma	Nm ³ /s	1,6
DTVG tertiääri	Nm ³ /s	9,7
Tertiääri-ilma	Nm ³ /s	32,5
Yläsekundääri-ilma etu	Nm ³ /s	18,9
Yläsekundääri-ilma taka	Nm ³ /s	12
Alasekundääri-ilma	Nm ³ /s	47
Primääri-ilma	Nm ³ /s	30,1
Kokonaisilmamäärä	Nm ³ /s	151,8
Ilmajako prim/sek/tert	%	19,8/51,3/28,8

Taulukosta voidaan huomata normaalista poikkeava ilmajako. Sekundääri-ilmamäärä on 52 % kokonaisilmamäärästä, joka on erittäin suuri. Primääri-ilman osuus kokonaisilmamäärästä on mittausten mukaan vain 20 %. Todellisuudessa primääri-ilman määrä on vuotojen vuoksi tätäkin pienempi. Sekundääri-ilma tuodaan tulipesään jokaiselta seinältä kuvan 40 mukaisesti. Kuvan nuolet kuvaavat muodostuvan ilmasuihkun kokoa. Yläsekundäärisuuttimien epäsymmetria aiheuttaa ongelmia keon toimintaan.



Kuva 40. Sekundääri-ilman syöttö tulipesään.

7.3 Sulakourut

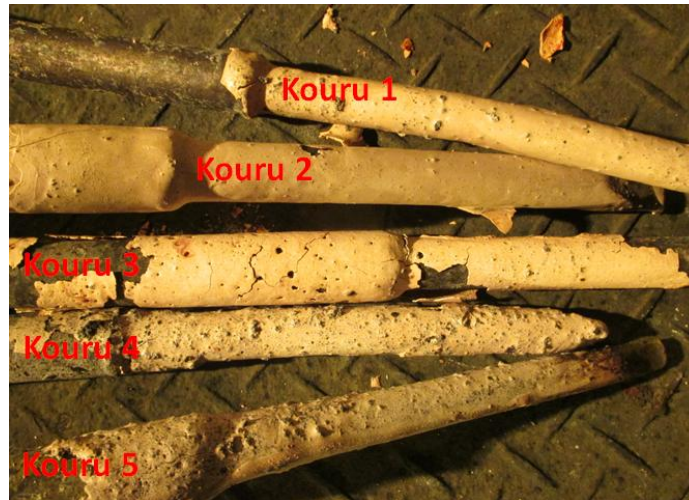
Sulakourujen toiminta oli huonoa tulipesän vinouden vuoksi. Tulipesän alaosassa, etenkin vasemmalla puolella ja sularännien edessä, oli liian paljon kekoa ja liian vähän palamisilmaa. Viidestä sulakourusta kolme vasemman puoleista kourua tukkeutuivat erittäin herkästi, koska niissä virtaavan sulan seassa oli paljon palamatonta keon materiaalia. Palamaton aines sulassa heikentää sulan juoksevuutta. Keko-ongelmien takia sulakouruja jouduttiin puhdistamaan toistuvasti. Mikäli puhdistusväli oli liian pitkä, tuloksena oli erittäin voimakas sulavirtaus, sulasyöksy. Tämä näkyi piikkeinä kourujen jäähdytysveden lämpötilatrendeissä.

Kun kourut puhdistettiin, niistä tuli ulos liekkejä (kuva 41). Tulipesän vasemmalla puolella palaa enemmän mustalipeää, joka aiheuttaa ongelmia keon palamisessa ja sulakourujen toiminnassa.



Kuva 41. Sulakourujen toiminta (vasemmalla tukkeutunut sulakouru, oikealla sulakouru puhdistuksen jälkeen).

Sulan laatua arvioitiin visuaalisesti. Kuvassa 42 on esitetty sulanäytteet. Tulipesän oikealla puolella (kourut 1 ja 2) sulan seassa oli vähän palamatomia partikkeleita, mutta sula on väriltään tummaa. Tulipesän vasemmalla puolella (kourut 4 ja 5) sula on kirkasta, mutta sulan seassa on paljon palamatomia partikkeleita. Keskimmäisestä kourusta tuleva sula on erinomaista. Kirkkaan vaaleanpunainen väri kertoo hyvästä reduktioasteesta. Myös sulanäytteet tukevat käsitystä siitä, että tulipesä on vinokuormassa. Palamista on enemmän vasemmalla, jolloin reduktioaste on parempi ja sulan seassa on enemmän partikkeleita.



Kuva 42. Sulanäytteet normaalioperoinnin aikana.

7.4 Lämpöpintojen likaantuminen ja tukkeutuminen

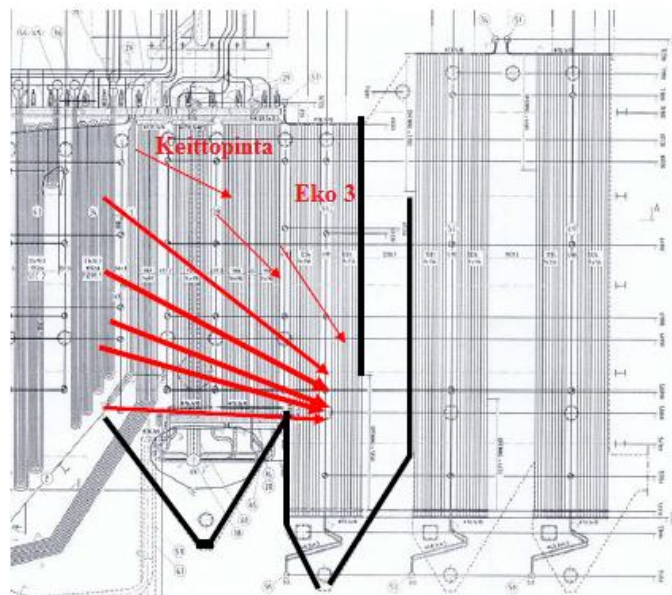
Soodakattilalla täytyy suorittaa vesipesu 3-4 kuukauden välein. Kattila tukkeutuu keittopinnalta ja likaantuu tulistimien yläosasta. Tehdasvierailun aikana ei voitu tehdä likaantumistarkastusta, koska kattila oli ajossa. Tehdasvierailuhetkellä soodakattilan edellisestä vesipesusta oli kulunut aikaa 1,5 kuukautta.

Safe Control Boiler Service oli edellisen mekaanisen tarkastuksen yhteydessä tehnyt myös likaantumistarkastuksen. Soodakattilan tulistinalue likaantuu ja tukkeutuu enemmän yläosasta läheltä tulipesän kattoa. Tulistinalueen yläosan tukkeutuessa savukaasuvirtaus siirtyy keittopinnan alaosaan kohti. Kuvassa 43 on esitetty soodakattilan likaantunut tulistin 1b.



Kuva 43. Likaantunut primääritulistin. (Praszkier, P. 2014, 14)

Tulistinalueen lämmönsiirron heikentyessä savukaasujen lämpötila kohoaa. Tulistimien yläosan likaantumisen takia kuumat savukaasut aiheuttavat tukkeutumista ja korroosiota keittopinnan alaosissa. Savukaasujen kulkureitti tulistinalueen likaantuessa esitetään kuvassa 44.



Kuva 44. Savukaasujen kulkureitti tulistimien yläosan likaantuessa. (Praszkier, P. 2014, 58)

Korkea kalium- ja klooripitoisuus ei kuitenkaan ole perimmäinen syy tulistinalueen ja keittopinnan likaantumiseen, kattilalla on käytössä kloorin ja kaliumin poistolaitteisto.

Keittopinnan nuohointen etäisyys toisistaan on liian suuri, mikä on suurin syy keittopinnan tukkeutumiseen. Lisäksi soodakattilan useiden nuohointen tiivisteissä havaittiin vuotoja, jotka heikentävät nuohoustehoa.

7.5 Korkeat CO- ja TRS- päästöt

Tarkasteltavan soodakattilan CO- ja TRS-päästöt ovat liian suuret. Soodakattilan päästömittauksia on esitetty taulukossa 5. Kuiva jäännöshappipitoisuusmittaus sijaitsee piipussa ja kostea happimittaus ennen ekonomaiseri 1 ainoastaan vasemmalla puolella. Keittopinnan tuhkasuppilon, nuohointen läpivientien sekä mahdollisten kanavien ja sähkösuodattimien vuotojen vuoksi piipun happimittaus näyttää huomattavasti korkeampia arvoja kuin ekonomaiserin happimittaus.

Taulukko 5. Päästömittausarvoja normaalikäynnin aikana.

Päästömittaukset		
O ₂ piippu (kuiva)	%	3-4
O ₂ Eko vasen (kostea)	%	1-2
CO	ppm	2000-3000
TRS	ppm	5-10

Pelkkien mittausten ja tunnuslukujen perusteella sekä palamisilmamäärä että jäännöshappipitoisuus ovat riittävän suuria estämään CO- ja TRS-päästöt. Kuitenkin, ottaen huomioon ilmajärjestelmän sekä savukaasujärjestelmän vuodot todellinen tulipesään menevä ilmamäärä on aivan liian alhainen. Tulipesän todellinen happipitoisuus on erittäin alhainen, mikä on suurin syy korkeisiin CO- ja TRS-päästöihin. Toinen merkittävä syy päästöihin on tulipesän vinokuormitus. Osa tarkasteltavan soodakattilan päästöistä johtuu myös keko-ongelmista sulakourujen edessä. Keko tukkii sulakouruaukkoja, jolloin tulipesän palamattomat kaasut (liekit) pääsevät liuottajan hönkäjärjestelmän tertiärisuutinten kautta tulipesään lisäten CO- ja TRS-päästöjä.

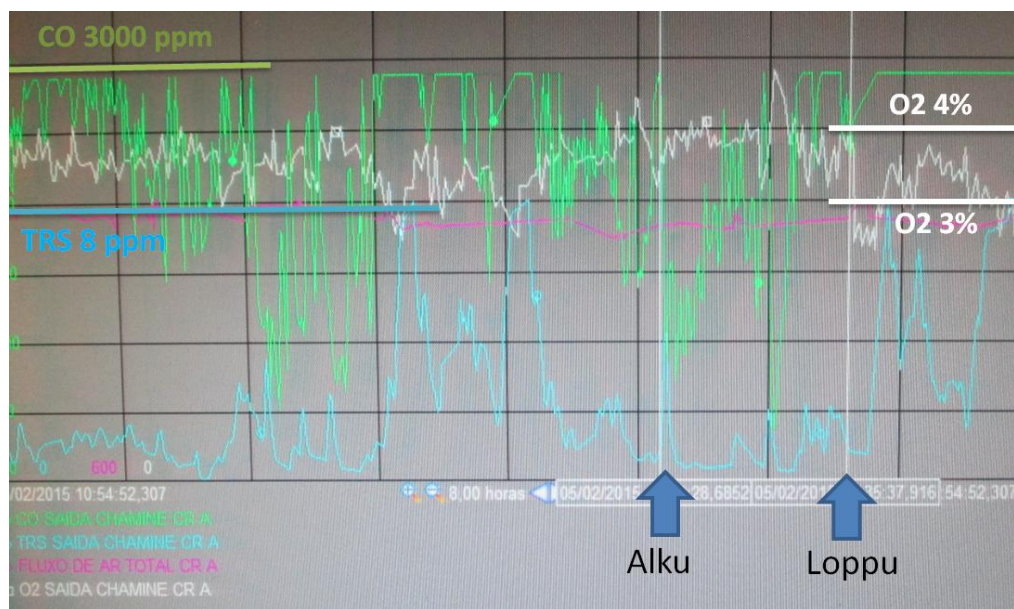
Kanavien huono mekaaninen kunto ja vuodot ilma- ja savukaasupuolella lisäävät soodakattiloiden palamattomien kaasujen päästöjä, sähkönkulutusta sekä rajoittavat monissa tapauksissa soodakattilan ja sähkösuodattimen kapasiteettia ja koko tehtaan tuotantoa (Vihavainen, E. keskustelu 9.4.2015).

8 SOODAKATTILALLA TEHDYT KOKEET

Tutkittavaa soodakattilaa testattiin kolmen päivän ajan. Tavoitteena oli vähentää päästöjä ja parantaa tulipesän toimintaa. Ensimmäisenä testipäivänä testattiin liuottajan hönkäkaasujen vaikutusta CO- ja TRS-päästöihin. Toisena ja kolmantena testipäivänä testattiin palamisilman jaon sekä sekundaari-ilman syötön vaikutusta tulipesän toimintaan.

8.1 Liuottajan hönkien vaikutus soodakattilan päästöihin

Ensimmäisessä testissä selvitettiin sulakouruaukkojen kautta tulipesästä karkaavien palamattomien kaasujen pääsyä liuottajan hönkäjärjestelmän kautta takaisin tulipesään ja tämän mahdollista vaikutusta CO- ja TRS-päästöihin. Liuottajan hönkien poltto soodakattilassa lopetettiin tunnin ajaksi. Kuvassa 45 on näytetty mittaustrendi testitilanteesta.



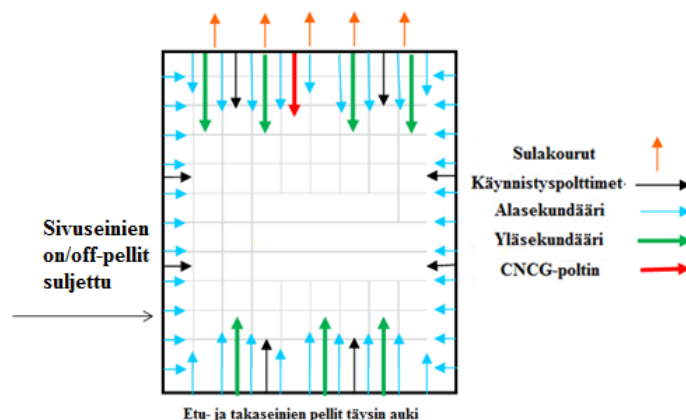
Kuva 45. Soodakattilan CO-, TRS- ja O₂-pitoisuus savupiipussa kokeen aikana (CO vihreä [ppm], TRS sininen [ppm], O₂ valkoinen [%]).

Mittaustrendin perusteella havaitaan, että kokeen aikana TRS-päästöt olivat alhaisempia kuin ennen ja jälkeen kokeen. TRS-kaasuja pääsee liuottajan höngän mukana takaisin tulipesään, On vaikea arvioida liuottajan höngän vaikutusta CO-päästöön, koska jäännöshappipitoisuus oli korkeampi kokeen aikana kuin ennen koetta. Jäännöshappitasen olisi pitänyt pysyä muuttumattomana kokeen aikana, jotta vaikutukset olisi havaittu selkeämmin. Todennäköisesti liuottajan höngän mukana tulipesään tulevat palamattomat kaasut kasvattavat hieman CO- ja TRS-päästöjä savupiipussa. Vähäisen yli-ilmamäärän vuoksi tertiääri-ilma ei pysty hapettamaan palamattomia kaasuja.

8.2 Ilmajaon ja sekundääri-ilman testaaminen

Ilmajärjestelmätesti tehtiin kahtena päivänä, molempina päivinä samalla tavalla. Testien tavoitteena oli saada selville, kuinka tulipesä toimii, miten vähentää päästöjä ja saadun tiedon perusteella parantaa tulipesän toimintaa. Ensisijainen tavoite oli vähentää kekoa sulakourujen edessä ja saada aikaan stabiili sulavirtaus. Hyvä ja turvallinen sulakourujen toiminta on perusedellytys tulipesän toiminnan virittämiseksi.

Ilmajärjestelmätestissä alasekundääri-ilmapellit suljettiin sivuseiniltä kokonaan. Etu- ja takaseiniltä ilma-aukkojen pellit avattiin täysin auki. Yläsekundäärin säätöpellit avattiin täysin auki. Sekundääri-ilmasuuhkujen toiminta kokeen aikana on havainnollistettu kuvassa 46.



Kuva 46. Sekundääri-ilman syöttö vain etu- ja takaseinältä

Testin aikana muutettiin myös ilmajakoa. Yläsekundääri-ilman osuutta kokonaisilmamäärästä kasvatettiin. Alasekundääri-ilman osuutta puolestaan pienennettiin pienentämällä virtauspinta-alaa sivuseinillä. Sekundääri-ilman kokonaismäärä oli suuri, joten kokonaisuudessaan sen osuutta vähennettiin siirtämällä sekundääri-ilmaa primääri-ilmaan. Tertiääri-ilmajärjestelmä kävi jo täydellä teholla.

Ilmajaon muutoksen lisäksi myös kokonaisilmamäärää kasvatettiin hieman, koska jäännöshappitaso oli alhainen ja CO-pitoisuus korkea. Riittämättömän tertiääri-ilmakapasiteetin vuoksi kattilaa ei voitu testata halutulla tavalla. Kattilan kuorma pidettiin vakiona testin ajan. Testin aikana tehdyt ilmajaon muutokset on esitetty tarkemmin taulukossa 6.

Taulukko 6. Testin aikana tehdyt ilmajaon muutokset.

Ilmamäärän muutokset	Ennen koetta	Osuus	Paine ilmarekisterissä	Kokeen aikana	Osuus	Paine ilmarekisterissä
	Nm ³ /s	%	kPa	Nm ³ /s	%	kPa
Primääri	30,1	20,5	1,4	43,3	28,0	2,2
Ala-sekundääri	47,2	30,8	2,0	36,4	23,5	2,2
Ylä-sekundääri, etu	18,9	7,8	4,4	19,1	12,3	4,6
Ylä-sekundääri, taka	12,0	12,2	4,5	12,1	7,9	4,7
Tertiääri	32,5	27,6	4,3	32,5	21	4,3
Kuormapoltinilma	1,6	1,1	-	1,6	1,0	-
DTVVG-ilma	9,7	6,3	-	9,7	6,3	-
Kokonaisilmamäärä	151,9	100,0	-	154,7	100,0	-

Testin aikana primääri-ilman osuus nostettiin 28 % kokonaisilmamäärästä. Tulipesään menevä primääri-ilman määrä on kuitenkin vuotojen vuoksi noin 10 -20 % mittauksia pienempi. Testin aikana primääri-ilmajärjestelmä kävi täydellä teholla, jolloin mitattu primääri-ilman virtaus oli 43,3 Nm³/s.

Testissä ei muutettu mustalipeän ruiskutusta. Ruiskujen määrä ja polttolipeän kuiva-ainepitoisuus olivat taulukon 4 mukaisia. Ilmajärjestelmätesti toistettiin toisena testipäivänä samalla tavalla, koska ensimmäisen testipäivän tulokset antoivat positiivisia tuloksia. Ainoa ero oli, että lipeäruiskujen koko oli muutettu 35 millimetristä 32 millimetriin. Tämä muutos ei kuitenkaan aiheuttanut merkittävää muutosta tulipesän toimintaan.

8.3 Ilmajaon ja sekundääri-ilman syötön muuttamisen vaikutus tulipesän toimintaan

8.3.1 Vaikutukset tulipesän alaosaan

Muutos ilmajaossa ja sivuseinän ilmapeltien sulkeminen sekundääri-ilmajärjestelmässä sai aikaan huomattavan muutoksen tulipesän alaosan olosuhteisiin. Primääri-ilman lisääminen ja sekundääri-ilman vähentäminen paransi keon ja kourujen toimintaa. Tulipesäkamerasta pystyttiin myös havaitsemaan keon pieneneminen.

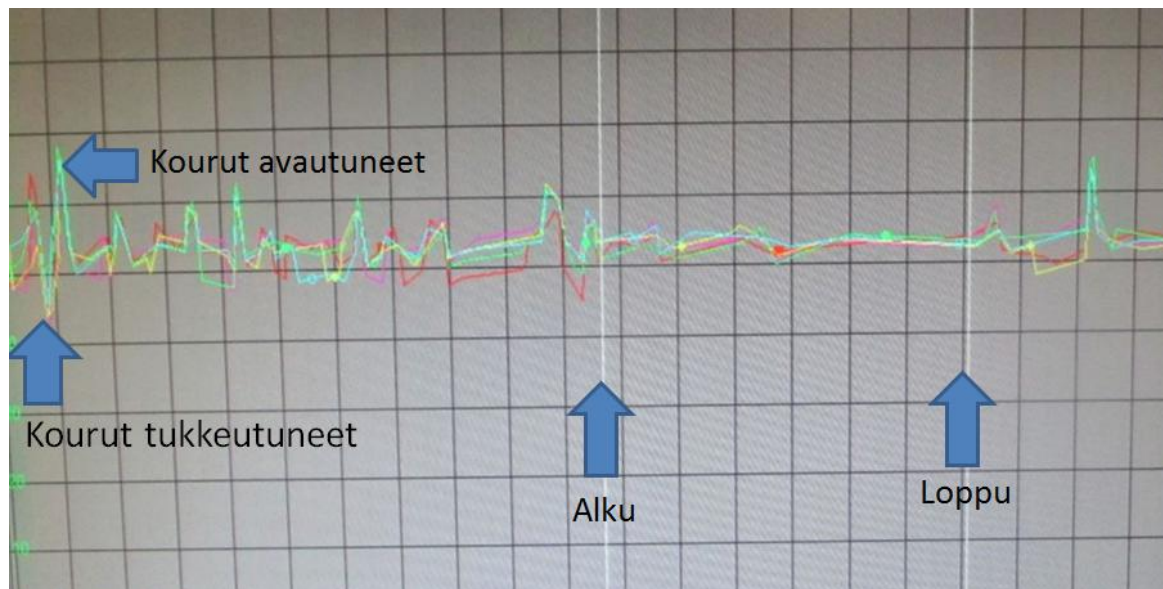
Oikean puoleisten sulakourujen toiminta säilyi edelleen hyvänä. Sen sijaan vasemman puoleisten sulakourujen toiminta parani huomattavasti. Sula virtasi nyt tasaisesti ja hyvin kaikissa kouruissa (kuva 47). Keko ei enää tukkinut sulakouruaukkoja. Sulakouruaukon yläosasta tulipesään virtaava ilma pystyy pitämään keon loitolla tulipesän takaseinästä. Keon ja kourujen ongelmat johtuivat pääosin primääri-ilman liian pienestä osuudesta.



Kuva 47. Tasainen ja hyvä sulavirtaus, sulakouru aukko ei ole tukossa.

Kourujen parantunut toiminta voidaan havaita myös kourujen jäähdytysveden lämpötilatrendeistä, jotka on esitetty kuvassa 48. Ennen testiä erityisesti vasemman puoleiset kourut (kuvassa vihreä ja punainen) tukkeutuivat erittäin nopeasti. Tämä näkyy trendissä lämpötilapiikkeinä. Kourujen tukkeutuminen laskee lämpötilaa ja kourujen avautuessa

voimakas sulavirtaus nostaa lämpötilaa nopeasti. Testin aikana kaikkien kourujen lämpötilakäyrät ovat erittäin tasaisia, joten tällöin sulavirtauskin on ollut tasaista ja kourut ovat pysyneet auki.



Kuva 48. Sulakourujen jäähdytysveden lämpötilatrendit ennen koetta ja kokeen aikana.

Sulan juoksevuusongelmat, sulasyöksyt ja keko-ongelmat sulakourujen läheisyydessä tyypillisiä ylikuormitettujen soodakattiloiden ongelmia. Kun nämä ongelmat saadaan ratkaistua, niin tulipesän toiminnan virittäminen helpottuu olennaisesti. (Vihavainen, E. kesukustelu 9.4.2015)

Tulipesän alaosan lämpötila nousi tehtyjen muutoksen seurauksena. Lämpötilaa arvioitiin tulipesän kirkkauden perusteella visuaalisesti. Erityisesti sekundääritasolta tarkasteltuna tulipesä oli kirkkaampi kuin ennen testiä. Sekoittuminen tulipesän alaosassa parani muutosten seurauksena. Tulipesän vinokuorma korjaantui myös hieman. Tertiääritasolta tarkasteltuna palamattomia kaasuja oli nyt tasaisemmin koko tulipesän alueella.

8.3.2 Vaikutus reduktioasteeseen

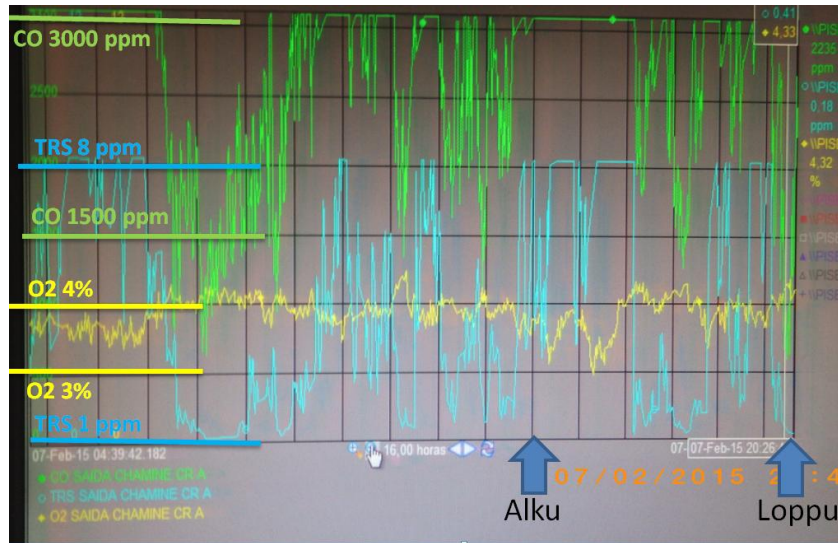
Sulasta otettiin myös testin aikana näytteet jokaisesta kourusta. Näytteet on esitetty kuvassa 49. Sulanäytteen perusteella kourusta 3 tulevassa sulassa reduktioaste on paras. Kourujen 1 ja 2 reduktioastekin on hyvä. Kourun 4 sulanäyte on aiempaa parempi. Väri on nyt parempi ja palamatonta materiaalia on vähemmän. Vaikka ilmajärjestelmän muutokset paransivat kourujen toimintaa, olivat kourut 4 ja 5 edelleen huonompia kuin loput kouruista. Kokonaisuudessaan reduktioaste parani tehtyjen muutosten jälkeen.



Kuva 49. Testin aikana otetut sulanäytteet.

8.3.3 Vaikutus päästöihin

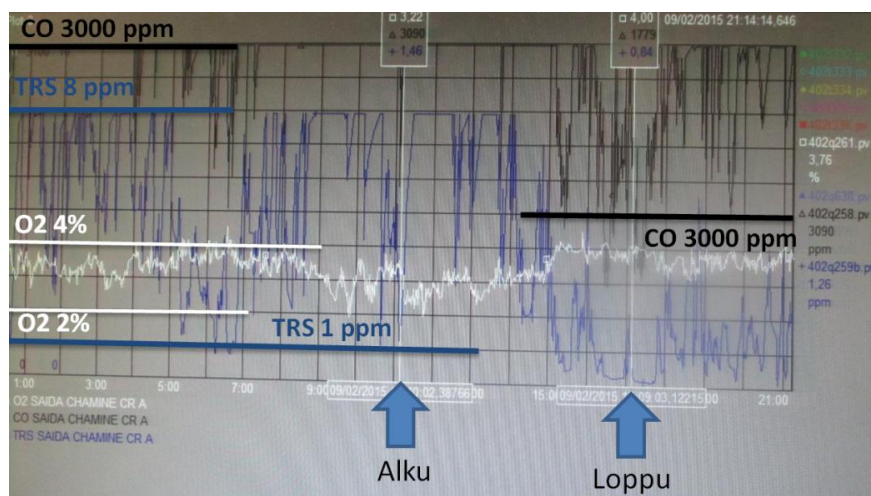
Ilmajärjestelmän toimintaan tehdyt muutokset alensivat TRS- ja CO-päästöjä ja korjasivat hieman myös tulipesän vinokuormaa, joka aiheutti ainakin osan korkeista päästöistä. Perimmäinen syy päästöihin oli kuitenkin liian pieni kokonaisilmamäärä. Päästömittaustrendi ensimmäiseltä testipäivältä on esitetty kuvassa 50.



Kuva 50. Ensimmäisen testipäivän päästömittaustrendit piipusta mitattuna.

(keltainen: jäännöshappi, siinen: TRS ja vihreä:CO).

TRS-päästö hävisi lähes kokonaan, kunhan vain jäännöshappitaso pysyi 4 % tasolla. CO-päästökin puolittui testin alussa, mutta nousi takaisin 3000 ppm aina, kun jäännöshappipitoisuus piipussa laski alle 4 %. Pelkällä ilmajärjestelmän operointitavan muutoksilla ei kuitenkaan pystytäkään hävittämään CO- ja TRS-päästöä kokonaan. Kuvassa 51 esitetään päästömittaustrendit toiselta testipäivältä. Siitäkin nähdään, että jäännöshappipitoisuuden piipussa pitää olla yli 4 %, jotta CO- ja TRS-päästöt olisivat alhaisempia.

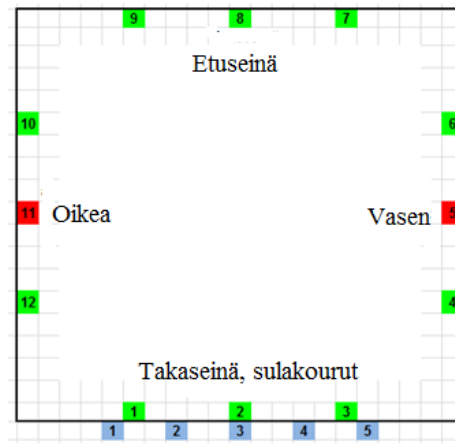


Kuva 51. Toisen testipäivän päästömittaustrendit piipusta mitattuna.

(valkoinen: jäännöshappi [%], sininen: TRS [ppm] ja musta: CO [ppm])

8.4 Muutokset polttoliipeän ruiskutukseen

Lipeäruiskujen paikkoja sekä polttoliipeän lämpötilaa ja painetta muuttamalla pystytään hienosäätämään tulipesäolosuhteita. Tällä kertaa ei kuitenkaan voitu muuttaa lipeän ruiskutusta. Tavallisesti lipeäruiskut ovat sijoitettuna kuvan 50 mukaisella tavalla. Edellisellä tehdasvierailulla oli tehty testejä lipeäruiskujen kanssa. Tällöin lipeäruiskujen 7 ja 12 pois ottaminen vähensi CO- ja TRS-päästöä. Tämä kuitenkin aiheutti paljon ongelmia sulakourujen kanssa. Tällä kertaa keon ja kourujen toiminta saatiin vakaaksi ilmajärjestelmän säätämällä, mikä antaa hyvän perustan lipeäruiskuilla myöhemmin tehtäville testeille.



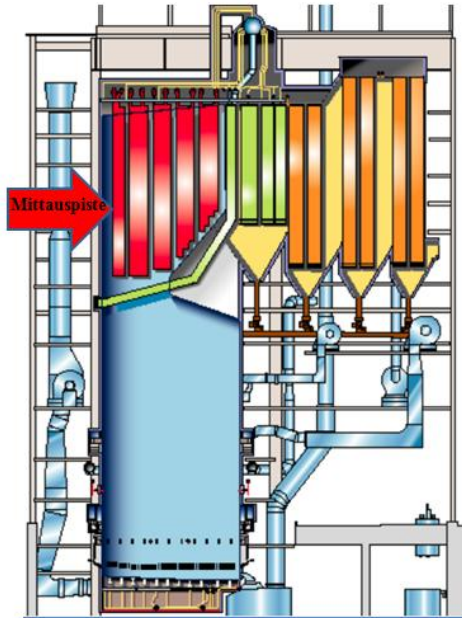
Kuva 52. Lipeäruiskujen sijainti (vihreällä merkityt ovat käytössä olevia, punaiset ovat pois käytöstä).

Ilmajakoon tehdyn muutoksen vaikutuksesta keon koko pieneni huomattavasti. Tämän perusteella polttoliipeän lämpötilaa voisi esimerkiksi laskea ja pyrkiä pisarakokoa kasvattamalla edelleen vähentämään carry-overia ja kasvattamaan keon kokoa. Vinokuormaa voisi myös yrittää korjata lipeän ruiskutusta muuttamalla. Vasemmassa etunurkassa oli kaikkein eniten palamattomia kaasuja, joten sinne tulee myös enemmän mustaliipeää. Tämän perusteella voisi kokeilla ottaa ruiskun 7 pois ja siirtää ruisku 6 aukkoon 11. Toisaalta keko oli korkea myös vasemmassa takanurkassa, joten ruiskun 4 voisi siirtää aukkoon 5.

8.5 Ilmajärjestelmätestin vaikutukset carry-overiin

Carry-overin mittaus tehdään tarkoitukseen sopivalla carry-over-sondilla. Sondi on paineilmalla jäähdytetty putki, jota pidetään tulipesän sisällä minuutin ajan, jonka jälkeen tulokset analysoidaan visuaalisesti. Tarkempien tuloksien saamiseksi sondia voidaan pitää tulipesässä pidempään. Sondiin kertynyt kerrostuma voidaan tällöin mitata tai punnita. Kertymisnopeutta voidaan arvioida yksiköissä g/h tai mm/h. Kerrostuman koostumusta voidaan arvioida laboratoriossa. Luotettavin mittaustulos saadaan tulipesän nokan korkeudelta tai hieman nokan yläpuolelta. (Vähäsavo, N. 2009, 2-4)

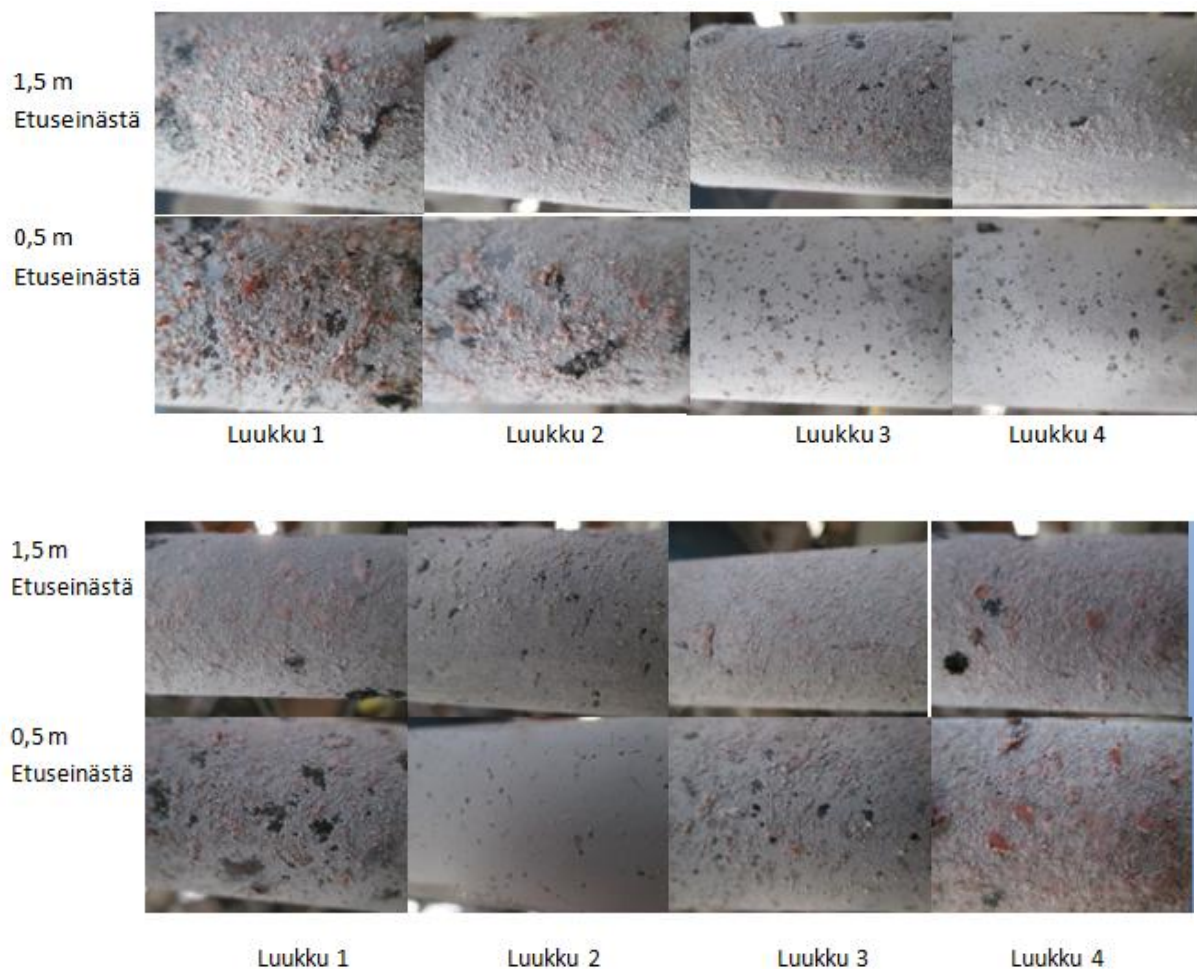
Tällä kertaa carry-overin määrää arvioitiin vain visuaalisesti. Tässä tapauksessa nokan korkeudella ei ollut tarkastusluukkuja, joten mittaukset jouduttiin tekemään liian korkealta. Tästä johtuen todellinen carry-overin määrä heti tulipesän jälkeen on suurempi, mitä näytteet antavat ymmärtää. Näytteenottopaikka on esitetty kuvassa 53.



Kuva 53. Carry-over näytteenottopaikan sijainti.

Tarkastusluukkuja on etuseinällä 4 ja näyte otettiin jokaisesta luukusta. Sondia pidettiin tulipesässä jokaisella mittauksella yhden minuutin ajan. Sondin pinta valokuvattiin

kahdesta kohtaa, jolloin voitiin verrata carry-overin määrää etuseinän vieressä ja 1.5m päässä etuseinästä. Normaalin ajomallin aikaiset säädöt ovat esitettyinä taulukossa 4. Testattu ajomalli on puolestaan esitetty taulukossa 6. Polttoliipeän lämpötilaa tai painetta ei muutettu carry-over-kokeiden aikana. Kuvassa 54 on esitetty carry-over-näytteet. Carry-over näkyy sondissa mustina tai punaisina täplinä. Mustat täplät ovat palamatonta hiiltä ja vaaleanpunaiset puolestaan varsinaista carry-overia eli savukaasuvirtauksen mukaan karanneita sulapisaroita.

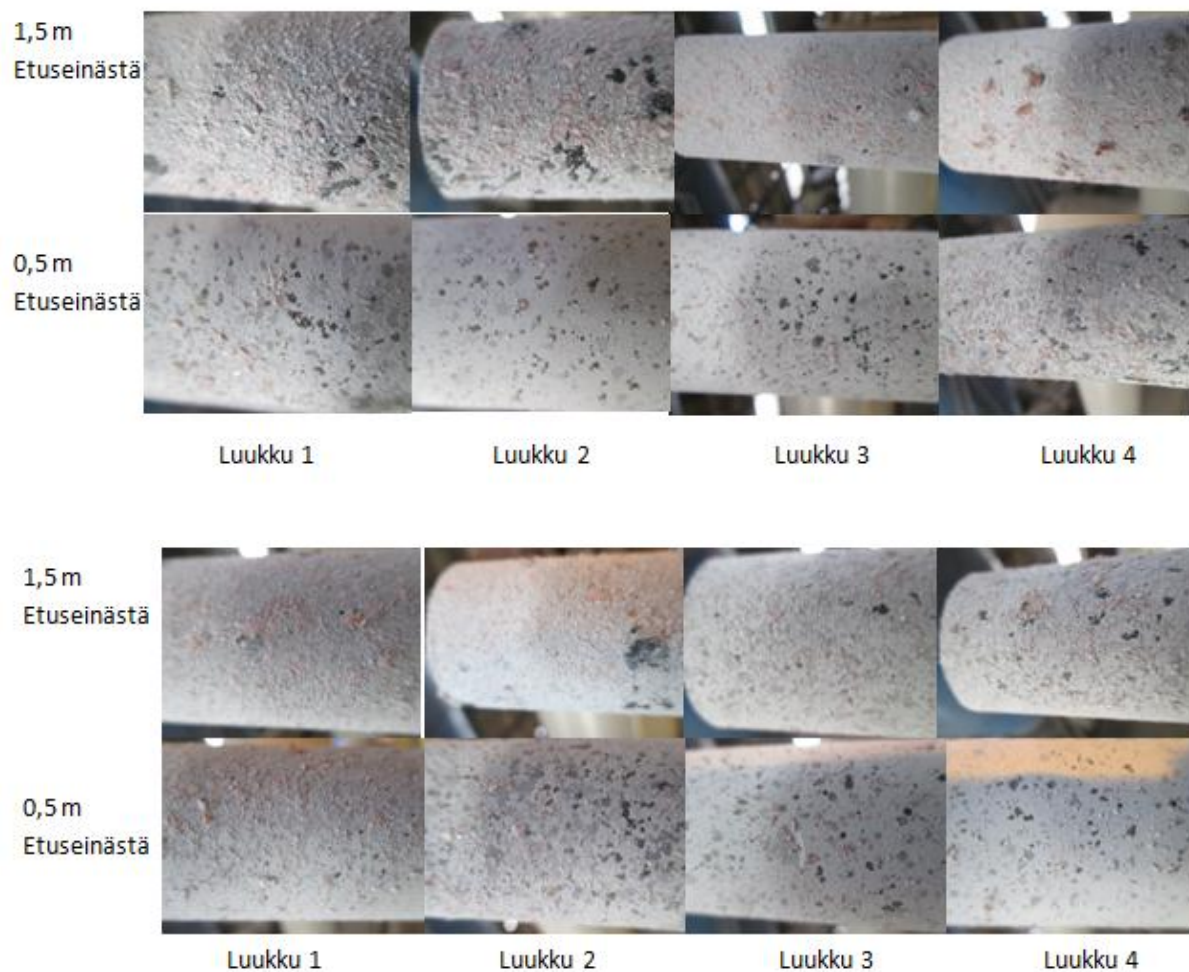


Kuva 54. Carry-over-näyte (yllä normaali ajomalli, alla testattu ajomalli).

Normaalin ajomallin näytteen perusteella voidaan myös havaita kattilan vinokuorma. Tulipesän vasemmalta puolelta (luukut 1 ja 2) otetuissa näytteissä on paljon palamatonta ja sulapisaroita. Oikealta puolelta (luukut 3 ja 4) otetuissa näytteissä ei ole havaittavissa

ollenkaan carry-overia, vaan sondissa oleva vaalea pöly on kondensoitunutta lentotuhkaa. Carry-overia on enemmän lähempänä etuseinää. Testatulla ajomallilla carry-overia on vähemmän tulipesän vasemmalla puolella, toisaalta se on hieman lisääntynyt oikealla puolella. Kokonaisuudessaan carry-overin määrä on vähentynyt hieman. Ilmajärjestelmän säätäminen korjasi hieman tulipesän vinokuormitusta ja vähensi carry-overia.

Kuvassa 55 on toisen testipäivän carry-over näytteet. Soodakattilan kuorma ja lipeäruiskujen järjestys oli sama kuin ensimmäisenä testipäivänä. Lipeäruiskujen koko oli nyt 35 millimetrin sijaan 32 millimetriä. Näytteiden perusteella voidaan tehdä samat havainnot kuin ensimmäisen päivän carry-over-näytteistä. Vinokuormitus on korjaantunut ja carry-overin kokonaismäärä on vähentynyt.



Kuva 55. Carry-over-näytteet (yllä normaali ajomalli, alla testattu ajomalli).

8.6 Johtopäätökset

Kokeessa testattiin ajomallia, jossa sekundääri-ilmaa siirrettiin sivuseiniltä primääri-ilmaan. Kokonaisilmamäärä pidettiin ennallaan, jotta tuloksia voitiin verratta soodakattilan normaaliin ajomalliin. Jäännöshappipitoisuus vaihteli hieman testien aikana, joka vaikutti erityisesti savukaasupäästöjen tasoon. Testattu ajomalli paransi tulipesän toimintaa ja teki siitä vakaampaa etenkin sulakourujen osalta. Keon korkeus tulipesässä pieneni selvästi. Keko pieneni myös sulakourujen edessä, jolloin sulakourujen toiminta parani oleellisesti.

Tehdyn kokeen perusteella sekundääri-ilman syöttöä tulipesään pitää muuttaa sekä primääri-ilman osuutta palamisilmasta lisätä. Primääri-ilman vähäinen osuus oli perussyynä keon huonoon toimintaan. Tässä tapauksessa sekundääri-ilmaa siirrettiin pelkästään primääri-ilmaan, sillä tertiääri-ilmajärjestelmää ajetaan täydellä kapasiteetilla.

Tulipesän vinokuorman ja carry-overin osalta tehty muutos paransi tilannetta. Sekä sekoittumisen että carry-overin kannalta vielä parempi ratkaisu olisi, jos sekundääri-ilmaa voitaisiin siirtää myös tertiääri-ilmaan. CO- ja TRS-päästöjä ei voitu merkittävästi vähentää. Perussyynä palamattomien kaasujen päästöihin on liian vähäinen palamisilman kokonaismäärä, jota ei voitu lisätä riittämättömän tertiääri-ilmajärjestelmän kapasiteetin vuoksi. Liuottajan höngän mukana tulipesään tulevat palamattomat kaasut vaikuttavat hieman TRS-päästöön, mutta hönkäkaasujen vaikutusta CO-päästöön ei pystytty kokeissa osoittamaan.

Sekundääri-ilman siirtäminen sivuseiniltä primääri- sekä tertiääri-ilmaan odotetaan vähentävän merkittävästi soodakattilan carry-overia ja likaantumista sekä palamattomien kaasujen päästöjä. Soodakattilan tulipesän sekä sulakourujen toiminta tulee vakaammaksi ja helpommaksi kuin mitä se on tänä päivänä. Näiden muutosten myötä soodakattilan vinokuormitusta voidaan korjata lipeän ruiskutusta virittämällä, mikä nykyisin on ollut mahdotonta takaseinän keko- ja sulakouruongelmien vuoksi.

9 TOIMENPITEET SOODAKATTILAN TOIMINNAN PARANTAMISEKSI

Tässä kappaleessa tarkastellaan vaihtoehtoja, joilla tarkasteltavan soodakattilan toimintaa voidaan parantaa. Ratkaisut jakautuvat kahteen ryhmään. Pienillä muutoksilla pystytään parantamaan käytettävyyttä ja erityisesti vähentämään vesipesujen määrää. Tarvittavat investoinnit ovat pieniä ja muutostyöt voidaan tehdä vuosihuoltoseisokin aikana. Soodakattilan kapasiteetin nostaminen vaatii yleensä suuremman investoinnin. Suuria muutostöitä ei ehditä tekemään normaalin vuosihuoltoseisokin aikana, joten investoinnin takaisinmaksuajassa on huomioitava lisäseisokkipäivien aiheuttamat tuotantotappiot.

9.1 Normaalissa vuosihuoltoseisokissa tehtävät parannukset

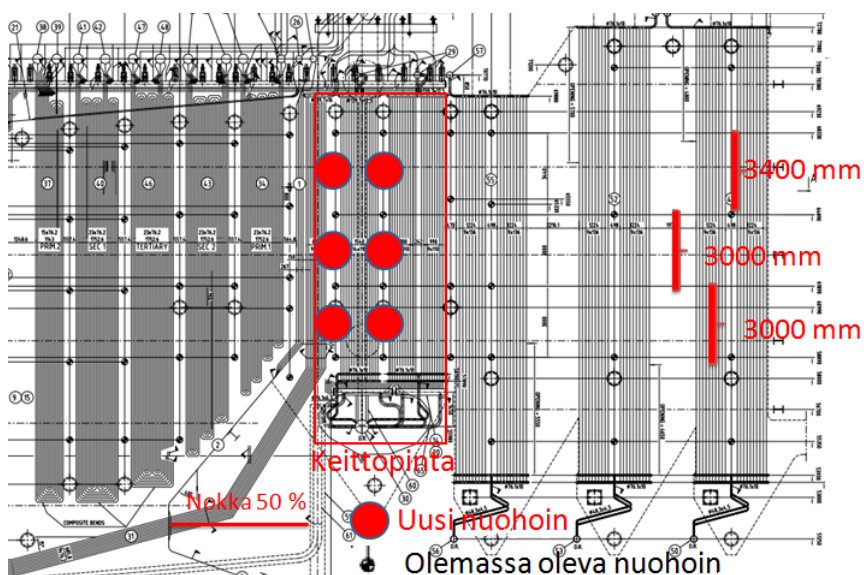
Keon ongelmat johtuivat pääasiassa primääri-ilman liian pienestä osuudesta. Primääri-ilmajärjestelmän kapasiteettia pystytään nostamaan pienillä kunnossapitotöillä. Primääri-ilmajärjestelmässä havaittiin paljon vuotoja, joten osa primääri-ilmasta ei päädy ollenkaan tulipesään. Vuotojen korjaaminen on helppo ja edullinen tapa parantaa tulipesän toimintaa.

Nykyiset sivuseinän sekundääri-ilma-aukot kannattaa tukkia massauksella. Tällöin sekundääri-ilma voidaan tuoda tulipesään vain etu- ja takaseinältä. Massauksella vältetään paineastialle tehtäviltä muutostöiltä. Jotta soodakattilan kokonaisilmamäärää voidaan lisätä, pitää tertiääri-ilmajärjestelmän kapasiteettia kasvattaa. Tässä tapauksessa järkevin tapa on lisätä uusi ylätertiäärijärjestelmä, jonka asennukset voidaan tehdä normaalin käytön aikana ja liitännät vuosihuoltoseisokissa. Ylätertiääri-ilmajärjestelmän ansiosta sekoittuminen paranee ja carry-overin määrää sekä päästöjä voidaan vähentää merkittävästi.

Soodakattilan instrumentointia pitää parantaa. Tällä hetkellä tulipesän vinokuorman korjaaminen on mahdotonta puuttuvien vasen-oikea O₂-analysointoreiden takia. Nykyisen tulipesäkameran antama kuva ei ole paras mahdollinen. Toinen tulipesäkamera auttaisi saamaan paremman kuvan tulipesän toiminnasta.

Myös keittopinnan tuhkasuppilon ilmavuodot tulee korjata. Vuotoilma lisää savukaasumäärää ja toisaalta se vääristää jäännöshappimittausta. Tulipesän todellista happipitoisuutta on tällä hetkellä vaikea arvioida ilmavuotojen vuoksi. Vuotojen paikkaaminen parantaa myös soodakattilan energiatehokkuutta.

Kattilan likaantumista keittopinnalla pystytään vähentämään uusien nuohointen lisäämisellä. Keittopinta-alueella on liian vähän nuohoimia ja niiden väliset etäisyydet ovat liian suuret (3-3,4 m), jolloin savukaasusolien nuohoamattomat alueet tukkeutuvat. Kuvassa 56 on havainnollistettu uusien nuohoimien paikat. Nuohointen välinen etäisyys muutoksen jälkeen on 1,5-1,7 m, jonka ansiosta puhdistusteho kasvaa merkittävästi nykyisellä tukosalueella.



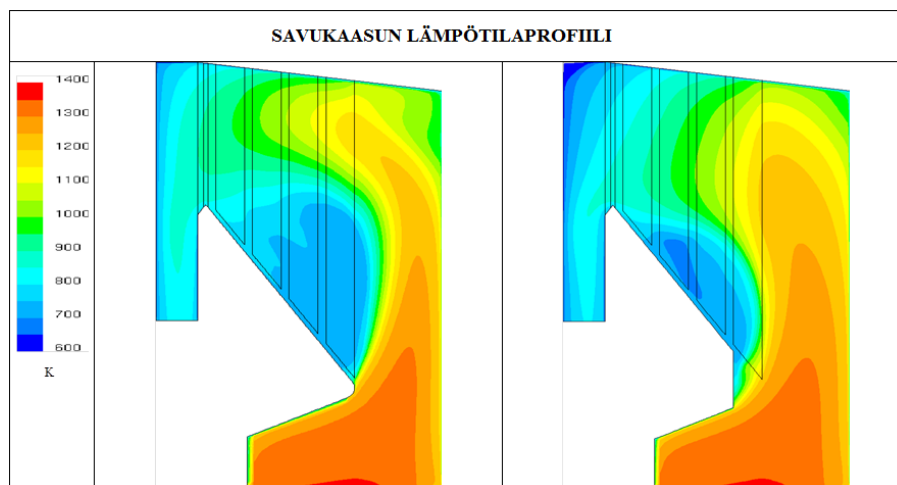
Kuva 56. Poikkileikkaus A-kattilan lämpöpinnoista ja nuohoimien sijainnista.

Tarkasteltavan soodakattilan tapauksessa on kannattavaa tehdä kaikki pienet muutokset, jotka eivät lisää tehtaan vuosiseisokin pituutta, mahdollisimman nopeasti. Suuret paineastiamuutokset, jotka lisäävät tehtaan vuosiseisokin kestoja, kannattaa sen sijaan ajoittaa tehtäväksi samaan aikaan kuin muut suuret investoinnit tehtaan toisilla osastoilla (Vihavainen, E. keskustelu 9.4.2015).

9.2 Pidennetyn seisokin vaativat modernisointiehdotukset

Soodakattilan kapasiteettia pystytään kasvattamaan ja toimintaa parantamaan merkittävästi modernisoimalla perinteinen ilmajärjestelmä vertikaali-ilmajärjestelmäksi. Tämä vaatii suurehkon investoinnin ja paljon paineestialle tehtäviä muutostöitä. Nykyiset sekundääriaukot ovat pieniä ja niitä ei voida käyttää hyväksi vertikaali-ilmajärjestelmässä.

Nykyisen nokan syvyys on 50 % kattilan sivuseinän pituudesta. Liian syvä nokka aiheuttaa savukaasuvirtauksen kanavoitumisen tulistimien yläosaan. Tulistimen alaosaan nokan yläpuolelle muodostuu pyörrevirtausalue, jossa savukaasun virtaussuunta on päävirtaussuuntaa vastaan. Nokan muodon vaikutusta savukaasun lämpötilaprofiiliin on havainnollistettu kuvassa 57. Sininen alue kuvaa pyörrevirtausaluetta, jossa savukaasun lämpötila on matala ja lämmönsiirto tehotonta. Tulipesässä, jossa on syvä nokka, pyörrevirtausalue on suurempi.



Kuva 57. Nokan syvyyden vaikutus savukaasun lämpötilaprofiiliin. (Vihavainen, E. 2013, 16)

Typistämällä tulipesän nokkaa lämmönsiirron kannalta tehoton ”pyörrealue” tulistinalueella pienenee ja tulistimen lämmönsiirto tehostuu. Savukaasujen lämpötila ennen keittopintaa alenee. Tulistinalueen ja keittopinnan likaantuminen ja tukkeutuminen vähenee merkittävästi.

Ilmajärjestelmän uusimista sekä tulipesän nokan typistäminen ei ennätetä tehdä normaalin vuosihuoltoseisokin aikana. Muutoksiin tarvittava asennusaika tulee lisäämään soodakattilan vuosihuoltoseisokin kestoja ja selluntuotantoa menetetään. Toisaalta soodakattilan kapasiteettia voidaan kohottaa. Mikäli soodakattila on sellutehtaan tuotannon pullonkaula ja muutostyöt onnistutaan tekemään mahdollisimman nopeasti, tällaisten investointien takaisinmaksuaika on kohtuullisen lyhyt (Vihavainen, E. keskustelu 9.4.2015).

10 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli perehtyä korkeasti kuormitettujen soodakattiloiden tyypillisiin ongelmiin. Tyypillisimmät ongelmat ovat lämpöpintojen likaantuminen ja tukkeutuminen sekä liialliset päästöt. Kirjallisuudessa selvitettiin taustat lämpöpintojen likaantumiseen ja savukaasupäästöjen muodostumiseen. Liialliset päästöt ja likaantuminen johtuvat tulipesän huonosta toiminnasta.

Työn kokeellisessa osassa tutkittiin erään Etelä-Amerikassa sijaitsevan korkeasti kuormitetun soodakattilan toimintaa. Kyseisen soodakattilan ongelmia olivat juuri liialliset päästöt ja likaantuminen. Kokeiden perusteella saatiin hyvin tietoa siitä, mitä soodakattilalle kannattaa tehdä sen käytettävyyden parantamiseksi. Kokeissa keskityttiin tulipesän toiminnan parantamiseen.

Tämä diplomityö osoittaa, että jo pienillä säätöjen muutoksilla saadaan merkittäviä muutoksia aikaan tulipesässä. Suurempi muutos tulipesän olosuhteisiin saadaan muuttamalla ilmajakoa ja ilmansyöttömallia. Tulipesän toimintaa voidaan vielä hienosäätää muuttamalla lipeäruiskujen kokoa ja polttoliipeän lämpötilaa sekä painetta. Ilmansyöttömallin muuttamisella tarkoitetaan yksittäisten ilmapeltien asennon säätämistä. Tavoitteena on maksimoida tulipesän poikkipintarasitus ja minimoida palamisilmamäärä saavuttaen hyväksyttävä palamattomien kaasujen päästö.

Myös tehtaan käyttöhenkilöstö pystyy oikeilla toimenpiteillä vaikuttamaan soodakattilan käytettävyyteen ja kapasiteettiin. Tavoitteena on ajaa maksimikapasiteetilla ilman ylimääräisiä pesuseisokkeja. Monesti tehtaan käyttöhenkilöstön tiedot eivät kuitenkaan riitä tekemään oikeita toimenpiteitä ongelmien ratkaisemiseksi.

Tässä työssä tutkitun soodakattilan operaattorit olivat kokeneita, mutta soodakattilaan ei uskallettu etsiä parempia säätöjä, vaikka ongelmat olivatkin tiedossa. Ongelmat saadaan parhaiten ratkaistua, kun sellutehtaan ja kattilatoimittajien asiantuntijat tarkastelevat ja testaavat yhdessä soodakattilan toimintaa. Tehdashenkilökunnalla ei ole kokemuksia useista eri soodakattiloista, kun taas kattilatoimittajalla on kokemusta useammalta eri tehtaalta. Työssä esitetyt tunnusluvut ovat hyviä vertailukohtia tulipesän toiminnalle. Niitä käyttämällä saa nopeasti kuvan soodakattilan tämän hetkisestä toiminnasta.

Soodakattilan käytettävyyttä voidaan parantaa normaalin vuosihuoltoseisokin aikana jo pienilläkin investoinneilla. Kapasiteetin nosto vaatii yleensä suuremman investoinnin ja pidemmän seisokin.

Nykyään tulipesän toimintaa pystytään mallintamaan CFD-mallien avulla. CFD-mallit ovatkin hyvä työkalu uusien kattiloiden suunnittelussa. Tulipesän mittoja voidaan esimerkiksi optimoida yhdistämällä useita eri CFD-malleja. (Maakala, V et al. 2015, 119-129) Tulevaisuudessa tulee kuitenkin vielä parantaa mallien tarkkuutta. Ajossa olevien soodakattiloiden tapauksessa ongelmien ratkaiseminen paikan päällä kokeiden avulla on useasti parempi tapa kuin mallintaminen.

LÄHTEET

Adams, T. 1997. Kraft Recovery Boilers-Chapter 1: General Characteristics of Kraft Black Liquor Recovery Boilers. Atlanta, Tappi press. s. 3-38. ISBN 0-9625985-9-3.

Adams, T. Jones, A. 1997. Kraft Recovery Boilers-Chapter 12: Recovery Boiler Design and Control. Atlanta, Tappi press, s. 349-371. ISBN 0-9625985-9-3.

Diamond Power: Gemini Nozzle. 2007. [WWW-sivut] [Viitattu 15.12.2014] Saatavissa: http://www.diamondpower.com/Resources/Gemini_Nozzle

Goncalves, C. Tran, H., Braz, S., Puig F., Shenassa R., Chloride and potassium removal efficiency of an ash leaching system. [Verkkajulkaisu] Pulp & paper Canada 109:3 2008 s. 33-38 [viitattu: 26.11.2014]. Saatavissa: <http://www.pulpandpapercanada.com/paptac/PDFs/Mar08/performanceevaluation.pdf>

Forssen, M. Hupa, M. Pettersson, R. Martin, D. 1997. Nitrogen oxide formation during black liquor char combustion and gasification. Journal of Pulp and Paper Science 23.

Hupa, M. 2001. Recovery Boiler Chemical Principles. TAPPI Kraft Recovery Short Course, January 8-11, 42 s.

Hupa, M. 1997. Kraft Recovery Boilers-Chapter 5: Black liquor droplet burning process, edited by T.N. Adams, Tappi Press. s. 39-57. ISBN 0-9625985-9-3.

Hupa, M. Frederick, J., 1997. Kraft Recovery Boilers-Chapter 2: Recovery Boiler Chemistry, edited by T.N. Adams, Tappi Press. s. 131-160. ISBN 0-9625985-9-3.

Jones, A.K. 1997. Kraft Recovery Boilers-Chapter 7: Air Supply and Gas Flows, edited by T.N. Adams, Tappi Press. s. 245-284. ISBN 0-9625985-9-3.

Kaila, J. Saviharju, K. Comparison of recovery boiler CFD modelling to actual operations. PAPTAC Annual meeting Montreal 2003, 13 s.

KnowPulp 2.0, 2003. Sellutekniikan ja automaation oppimisympäristö. VTT Tuotteet ja tuotanto.

Kymäläinen M. et al. 1999. The fate of nitrogen in the chemical recovery process in a kraft pulp mill. Journal of pulp and paper science, s. 410-417.

Lehtinen, M. 2007. Recovery Boiler 2400 tds/d. Sisäinen koulutusmateriaali. Power point esitys. Andritz Oy. 51 s.

Lundström J. Chloride and potassium balances in the future energy efficient pulp mills.

Sodahuskommitten (2007). 75s. [Verkkojulkaisu] [Viitattu: 26.11.2014]. Saatavissa:

http://www.sodahuskommitten.se/sites/default/files/Rapport_20071_Exjobb_Jimmy_Lundstrom.pdf

Maakala, V. Miikkulainen, P. 2015. Dimensioning a recovery boiler furnace using mathematical optimization. Tappi Journal. s. 119 – 129.

Miikkulainen, P. 2006. Väitöskirja. Spray formation of high dry solids black liquor in recovery boiler. Helsinki. Teknillinen korkeakoulu. 70 s. ISBN 951-22-8508-8

Praszkier, P. 2014. Safe Control Boiler Service, Final inspection report. 91 s.

Puig, F. Baraz dos Santos, S. 2004. Presentation Of Recovery Boiler's Retrofits - Aracruz Celulose S/A. International Chemical Recovery Conference. 9 s.

Raiko, R. et al. 2002. Poltto ja palaminen. Jyväskylä. International Flame Research Foundation (IFRF) Suomen kansallinen osasto. Toinen painos 629 s. ISBN 951-666-604-3.

Reyes, E.; Oliveira, L. C. De; Saturnino, D. M.; Vakkilainen, E. and Cardoso, M. 2014. Analysis of TRS emissions from recovery boilers. Appita Journal, Vol. 67, No. 1 January - March 2014, pp. 66 - 72

Reyes De Oliveira Saturnino Vakkilainen Cardoso.pdf

Savolainen, J. 2005. Recovery Boiler Fouling and Sootblowing Need Prediction. Power Point-esitys 19.4.2005. Andritz Pulp Mill Services. 162 s.

Tran, H.N. 1997. Kraft Recovery Boilers-Chapter 9: Upper Furnace Deposition and Plugging, edited by T.N. Adams, Tappi Press. s. 245-284. ISBN 0-9625985-9-3.

Vakkilainen, E. 2011. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Höyrykattilatekniikka. Luentomateriaali: Luento 4 Höyry/vesikierron suunnittelu. 51 s.

Vakkilainen, E. 2007. Kraft recovery boilers- Principles and practice. Helsinki University of technology, energy engineering and environmental protection. Picaset Oy. Toinen painos. 246 s. ISBN 952-91-8603-7.

Vakkilainen, E. 2003. Voimalaitostekniikan erikoiskurssi opetusmoniste: Kraft recovery boilers- Principles and practice. Lappeenrannan teknillinen yliopisto Energia- ja ympäristötekniikan osasto. ISBN 951-764-764-6.

Vihavainen, E. 2002a. Recovery Boiler Vertical Air System. Power Point-esitys 2.2.2002. Andritz Pulp Mill Services. 40 s.

Vihavainen E. 2002b. Soodakattilan tulipesäprosessi. Power Point-esitys 2.5.2002. Andritz Pulp Mill Services. 35 s.

Vihavainen, E. 2012. Andritz Oy. sisäinen materiaali: Capacity upgrade study. 24 s.

Vihavainen, E. 2013. Andritz Oy. sisäinen materiaali: Tuning Upgrade Report. 59 s.

Vihavainen, E. 2014. Andritz Oy. Sisäinen materiaali. Recovery Boiler Upgrade. 63 s.

Vihavainen, E. 2014. Diplomityöpalaveri 17.12.2014.

Vihavainen, E. 2015. Diplomityöpalaveri 9.4.2015.

Vähäsavo, N. 2009. Minuuttisondi-projekti. Soodakattilayhdistys Ry. 24 s. 16A0913-E0104