

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma
BH10A1101 Diplomityö

Kimmo Penttinen

SOODAKATTILAN TUKKEUTUMINEN

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
DI Sanna Hämäläinen

Ohjaajat: DI Sanna Hämäläinen
DI Kimmo Pakkanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Kimmo Penttinen

Soodakattilan tukkeutuminen

Diplomityö

2018

115 sivua, 72 kuvaa, 11 taulukkoa, 6 liitettä

Työn tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen, DI Sanna Hämäläinen

Ohjaajat: DI Sanna Hämäläinen, DI Kimmo Pakkanen

Hakusanat: soodakattila, tukkeutuminen, likaantuminen, mustalipeä, carryover, nuohous
Keywords: recovery boiler, plugging, fouling, black liquor, carryover, sootblowing

Tämä diplomityö on tehty Metsä Fibren Joutsenon tehtaalle ja työssä tutkittiin soodakattilan tukkeutumista, koska likaantuminen ja tukkeutuminen aiheuttavat usein käytettävyysongelmia ylikuormalla operoitavilla soodakattiloilla. Työn tavoitteena olikin tutkia likaantumisen syitä sekä pyrittiin löytämään ratkaisut Joutsenon soodakattilan likaantumisongelmiin.

Soodakattilan tukkeutuminen voidaan karkeasti jakaa kahteen osaan tukkeutumisen syntymekanismin perusteella. Tulistinalueella tukkeutumiseen vaikuttaakin carryover-hiukkasten aiheuttamat kerrostumat, nuohous sekä tahma-alueen sijainti. Savukaasukanavan loppuosassa tukkeutuminen johtuu usein lentotuhkan sintraantumisesta, happamista sulfaateista, alkalihöyryistä, savukaasukanavan vuodoista tai korkeaksi nousseista savukaasunopeuksista.

Työssä arvioitiin kirjallisuustiedon, mittausdatan sekä kokeiden avulla eri tukkeutumismenetelmien vaikutusta Joutsenon soodakattilan likaantumiseen. Lisäksi kokeiden avulla pyrittiin löytämään ratkaisuja likaantumisen estämiseksi. Kokeissa huomattiinkin, että polttoliipeän tasalaatuisuus, ruiskutus ja nuohous ovat avainasemassa tukkeutumisen hallitsemisessa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Energy Systems
Degree Program in Energy Technology

Kimmo Penttinen

Plugging of the recovery boiler

Master's Thesis

2018

115 pages, 72 figures, 11 tables and 6 appendixes

Examiners: Professor Ph.D. (Tech.) Esa Vakkilainen, M.Sc. (Tech.) Sanna Hämäläinen
Supervisor: M.Sc. (Tech.) Sanna Hämäläinen, M.Sc. (Tech.) Kimmo Pakkanen

Keywords: recovery boiler, plugging, fouling, black liquor, carryover, sootblowing

This Master's Thesis was done for Metsä Fibre Joutseno mill. The aim of this Thesis was to study plugging of the recovery boiler, because fouling and plugging are the most common problems at high loaded recovery boilers. The purpose of thesis was to study causes for fouling and also to find solutions to reduce fouling at Joutseno mill's recovery boiler.

Causes for the recovery boiler's plugging can be divided into two different mechanism of plugging. Carryover, inefficient sootblowing and problematic location of sticky area can cause plugging at superheater area. On the other hand, a boiler bank and economizers' plugging can be caused by fast sintering, acidic sulfates, alkali vapours, leaks and high velocities at a flue gas duct.

Methods of plugging at Joutseno mill's recovery boiler were researched using written material, collected data and experiments. In addition, tests were used to find solutions to prevent plugging. Tests showed that quality of burning liquor, spraying of liquor and sootblowing are in a key position to reduce plugging.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö valmistui Metsä Fibren Joutsenon tehtaalle kevään 2018 aikana. Haluan kiittää Metsä Groupia ja sen henkilöstöä tarjotusta mahdollisuudesta suorittaa diplomityö mielenkiintoisen, haastavan ja kehittävän aiheen parissa.

Haluan esittää suuret kiitokset työni ohjaajille professori Esa Vakkilaiselle sekä diplomi-insinööri Sanna Hämmäläiselle ja diplomi-insinööri Kimmo Pakkaselle, jotka tarjosivat laadukasta ohjausta ja apua aina sitä tarvittaessa sekä mahdollistivat työn etenemisen. Haluan myös antaa erityiskiitokset insinööri Toni Wahlmanille, jonka päivittäinen apu tutkimuksissa ja kokeissa oli korvaamatonta työn lopputuloksen kannalta. Lisäksi haluan kiittää talteenoton vuorohenkilöstöä päivittäisestä panoksesta sekä koko Metsä Fibren Joutsenon tehtaan henkilöstöä sekä ulkopuolisia henkilöitä hyödyllisistä tiedoista ja arvokkaista näkemyksistä työni läpiviemisen kannalta.

Lisäksi haluan osoittaa suurimmat kiitokseni vanhemmilleni ja siskolleni, joiden tuki on ollut arvokasta koko opintojeni ajan. Kiitos myös ystävilleni, ainejärjestö- ja ylioppilaskunta-toimijoille sekä erityisesti lähimmille energiatekniikan opiskelijatovereilleni, joiden kanssa olen jakanut useat hikiset ilta- ja yöpuhteet opintojen parissa sekä monet huikeat kokemukset opintojen aikana.

Joutsenossa 29.03.2018

Kimmo Penttinen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	10
2	SOODAKATTILA	11
2.1	Keittokemikaalien talteenotto	11
2.1.1	Tulipesän pelkistymisreaktiot	12
2.1.2	Natriumin ja rikin kierto	14
2.2	Soodakattilan vesi-höyrykierto	15
2.2.1	Syöttövesisäiliö ja -pumput	16
2.2.2	Ekonomaiserit	17
2.2.3	Höyrylieriö ja dolezal	18
2.2.4	Kattilaputket.....	18
2.2.5	Keittoputkisto.....	19
2.2.6	Tulistimet.....	20
2.3	Polttolipeäjärjestelmä.....	22
2.3.1	Sekoitussäiliö	22
2.3.2	Polttolipeäsäiliö	23
2.3.3	Polttolipeäpumput ja esilämmitys.....	23
2.3.4	Polttolipeäruiskut ja -suuttimet.....	23
2.4	Palamisilmajärjestelmä	24
2.4.1	Palamisilmapuhaltimet.....	25
2.4.2	Palamisilman esilämmitys	26
2.4.3	Ilmatasot.....	26
2.5	Nuohousjärjestelmä	30
2.5.1	Nuohoimet	32
2.5.2	Nuohoushöyry.....	32
2.5.3	Nuohouksen suuttimet	33
3	POLTTOLIPEÄN RUISKUTUS JA PALAMINEN	35
3.1	Mustalipeä.....	35
3.1.1	Kuiva-ainepitoisuuden vaikutus mustalipeän ominaisuuksiin.....	37

3.1.2	Jäännösalkalipitoisuuden vaikutus mustalipeän ominaisuuksiin	38
3.1.3	Suopa- ja mäntyöljypitoisuuden vaikutus mustalipeän ominaisuuksiin	39
3.2	Mustalipeän ruiskutus	39
3.3	Mustalipeän palamisen vaiheet	41
4	SOODAKATTILAN TUKKEUTUMINEN.....	44
4.1	Lämpöpinnan likaantuminen	45
4.1.1	Likaantumismekanismit.....	46
4.1.2	Savukaasujen hiukkaset	47
4.1.3	Likaantumisen havainnointi.....	49
4.2	Tulistimien tukkeutuminen	51
4.2.1	Carryover	52
4.2.2	Kloorin ja kaliumin vaikutus tuhkan sulamiskäyttäytymiseen	55
4.2.3	Riittämätön nuohous	58
4.3	Keittoputkiston ja ekonomaisereiden tukkeutuminen.....	58
4.3.1	Sintraantuminen	59
4.3.2	Sulakeon olosuhteet	61
4.3.3	Kloorin ja kaliumin vaikutus alkalihöyryjen muodostumiseen	63
4.3.4	Savukaasujen nopeudet.....	64
4.3.5	Vuotoilman ja kosteuden aiheuttamat.....	65
4.4	Tukkeutumisen hallinta.....	66
4.4.1	Nuohouksen tehostaminen	66
4.4.2	Lentotuhkan ulosotto	68
4.4.3	Kloorin ja kaliumin poistaminen	68
4.4.4	Carryoverin minimointi	70
4.4.5	Sintraantumisen estäminen	71
4.4.6	Vuotojen havainnointi.....	72
4.4.7	Magnesiumhydroksidin ruiskutus.....	72
4.4.8	Bang & Clean.....	73
4.4.9	Kylmänuohous ja vesipesu	74

5	ONGELMAN KUVAUS	75
5.1	Soodakattilan esittely	75
5.2	Likaantumisen eteneminen	77
5.2.1	Tulistimien likaantuminen	78
5.2.2	Keittopinnan likaantuminen	78
5.2.3	Ekonomaiseri 2:n likaantuminen	79
5.2.4	Ekonomaiseri 1:n likaantuminen	80
5.3	Polttoaineen muutosten vaikutus likaantumiseen	80
5.3.1	Kaliumin ja kloorin rikastuminen	81
5.3.2	Kuiva-ainepitoisuus	82
5.3.3	Jäännösalkalipitoisuus	83
5.3.4	Polttoliipeän mäntyöljypitoisuus	84
5.3.5	Sulfiditeetti ja S/Na ₂ -suhde	85
5.4	Tulistinalueen likaantumistarkastelu	86
5.4.1	Polttoliipeän ruiskutus	86
5.4.2	Palamisilman syöttö	88
5.4.3	Nuohous	90
5.5	Keittoputkiston ja ekonomaisereiden likaantumistarkastelu	91
5.5.1	Happamien sulfaattien esiintyminen	92
5.5.2	Kanavan vuodot	93
5.5.3	Savukaasujen nopeudet	94
6	KOKEELLINEN OSUUS	95
6.1	Kokeiden suoritusperiaatteet	95
6.1.1	Ruiskutuksen ja ilmajärjestelmän koeajot	95
6.1.2	Nuohouksen testaus	97
6.2	Ruiskutuksen askelkoe	97
6.2.1	Koepisteiden valinta	98
6.2.2	Havainnot	98
6.2.3	Tulokset	100
6.2.4	Johtopäätökset	101
6.3	Ilmamallin muutos	102

6.3.1	Koepisteiden valinta	103
6.3.2	Kuvaus	103
6.3.3	Havainnot.....	103
6.3.4	Tulokset	104
6.3.5	Johtopäätökset.....	105
6.4	Nuohouksen testaus	105
6.4.1	Mittapisteiden valinta	105
6.4.2	Kuvaus	106
6.4.3	Havainnot.....	107
6.4.4	Tulokset	108
6.4.5	Johtopäätökset.....	108
7	SUOSITUKSET.....	110
7.1	Carryoverin hallinta	110
7.1.1	Ruiskutus	110
7.1.2	Ilmajärjestelmä.....	111
7.1.3	Polttolipeän laatu	112
7.2	Nuohouksen ajotapa.....	112
7.3	Prosessin hallinta	113
7.3.1	Sulfiditeetin hallinta.....	113
7.3.2	Savukaasujen nopeudet.....	114
8	YHTEENVETO.....	115
	LÄHTEET	116

LIITE 1. Analyysilaskentatyökalu

LIITE 2. Nuohointen sijoittelu ja tehokas nuohousalue

LIITE 3. Minuuttisondin käyttöohje

LIITE 4. Ruiskutuksen askelkokeen carryover-mittaukset

LIITE 5. Ilmakokeen carryover-mittaukset

LIITE 6. Nuohouksen tulokset

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

d	halkaisija	[mm], [m]
d_p	paine-ero	[kPa]
d_p^*	skaalattu paine-ero	[kPa]
EF	rikastumiskerroin	[-]
n	ainemäärä	[mol]
q_m	massavirta	[kg/s]
v	nopeus	[m/s]
v	ominaistilavuus	[m ³ /kg]

Alaindeksit

K	kalium
Na	natrium
norm	nimelliskuorma
NaOH	natriumhydroksidi
Na ₂ S	natriumsulfidi
Na ₂ SO ₄	natriumsulfaatti
pohja	pohja
S,tot	kokonaisrikki
sk	savukaasu
steam	mitattu kuorma
sula	sula
X	yhdiste

Lyhenteet

BPR	Boiling Point Rise
DCS	Distributed Control System
ISP	Intermediate Size Particle
MCR	Maximum Continuous Rating

1 JOHDANTO

Soodakattiloiden suorituskyvyn kasvaminen on edellyttänyt polttoainekuorman nousua, mikä on kasvattanut savukaasujen lämpötilaa, lentotuhkan määrää ja siten likakerroksen muodostumista. Vaikka ilmansyöttöjärjestelmän ja nuohouksen kehittyminen ovat selvästi vähentäneet soodakattilan likaantumisongelmia viime vuosina, aiheuttaa kuorman kasvattaminen merkittäviä haasteita likaantumisen hallinnassa. (Tran 2015, 1)

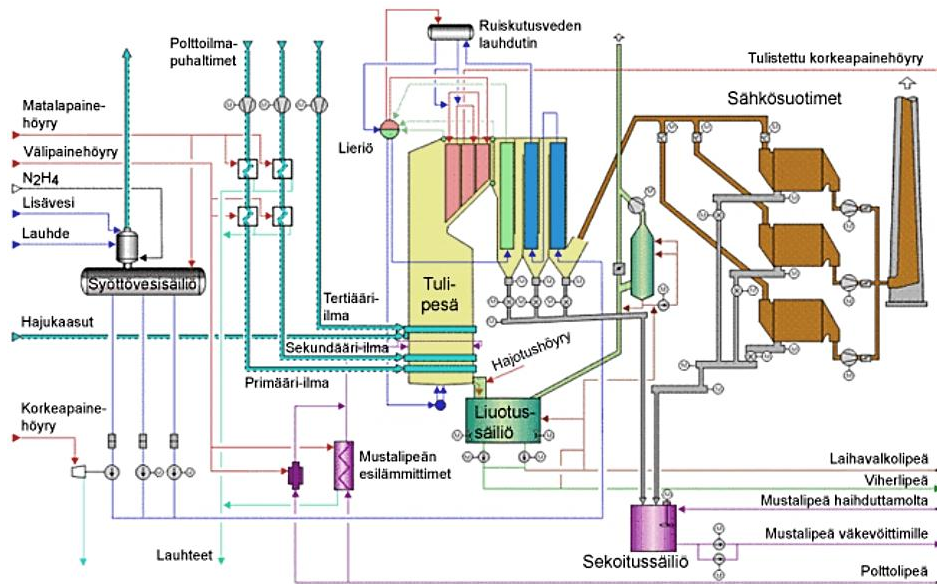
Soodakattilan likaantuminen onkin yksi yleisimmistä käytettävyyden ongelmista sellutehtailla, jolloin soodakattilasta tulee monesti tehtaan pullonkaula. Joutsenon tehtaan soodakattilan likaantuminen on aiheuttanut ongelmia käytettävyydelle varsinkin ajojakson loppupuolella. Tukkeutumiseen liittyvällä lentotuhkan kemialla on tukkeutumisen lisäksi myös yhteys korroosion, joka aiheuttaa syöpyessään materiaalikuluja sekä turvallisuusriskin soodakattilalla. Likaantumisen syyt tuleekin tiedostaa ja puuttua niihin parhaaksi todetuilla tavoilla.

Työn tarkoituksena onkin koota soodakattilan tärkeimmät tukkeutumismekanismit, tukkeutumisen syyt sekä keinot, joilla likaantumista pystytään vähentämään. Lisäksi työssä selvitetään merkittävimmät syyt Joutsenon tehtaan soodakattilan tukkeutumiseen ja esitetään keinot, miten likaantumista voitaisiin hallita kyseisellä tehtaalla. Tukkeutumisen syiden selvittämiseen käytettiin tehdastietojärjestelmästä (DCS) kerättyä dataa useilta vuosilta sekä koeajoja, jotka koettiin tarpeelliseksi kirjallisuuden ja mittausten perusteella.

Työn taustietoina esitetään työn kannalta tärkeimmät soodakattilan osaprosessit, joista esitetään kemikaalikierto, vesihöyrykierto, palamisilmajärjestelmä, kattilan nuohous sekä polttolipeäjärjestelmä ja polttolipeän ruiskutus.

2 SOODAKATTILA

Soodakattilan kaksiosainen rooli on erityisen merkittävä sulfaattisellun valmistusprosessissa, sillä soodakattilassa keittokemikaalit muutetaan soodakattilassa uudelleen käytettävään muotoon sekä sillä tuotetaan tehtaan tarvitsema energia. Sulfaattiselluprosessissa käytettävät keittokemikaalit ovat arvokkaita yhdisteitä, minkä vuoksi on taloudellista kierrättää kemikaalit muokkaamalla ne uudelleen käytettävään muotoon tuottaen samalla energian tehtaan tarpeisiin. (Knowpulp 2015) Tässä luvussa tutustutaan soodakattilan toimintaan kemikaalikierron ja energiantuotannon kannalta sekä käydään läpi kuvassa 1 näkyvät työn kannalta tärkeimmät osaprosessit sekä niiden tunnusomaiset piirteet moderneissa kattiloissa.



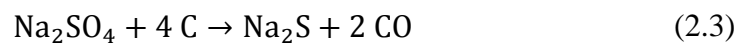
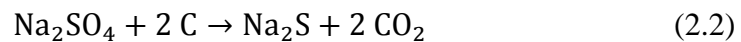
Kuva 1. Soodakattilan osaprosessit (Knowpulp 2015)

2.1 Keittokemikaalien talteenotto

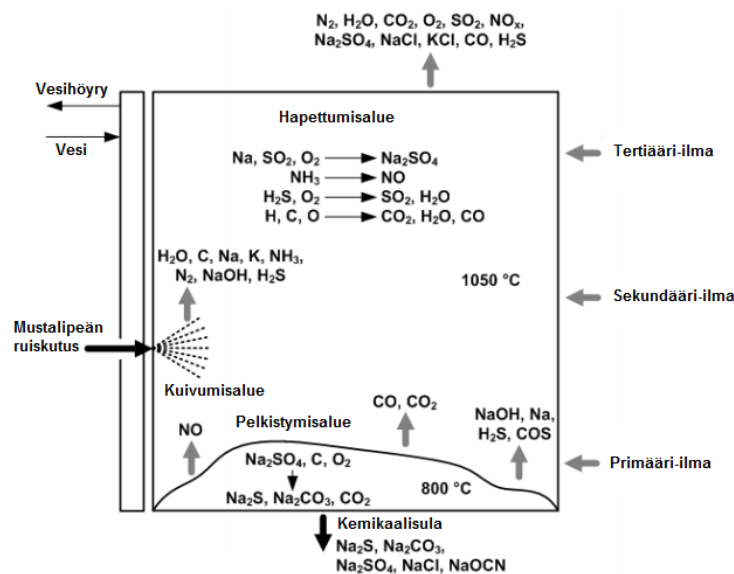
Soodakattilassa otetaan talteen keittokemikaalien sisältämä rikki ja natrium, jotka regeneroituvat uudelleen käytettävään muotoon tulipesän kuumissa olosuhteissa. Lisäksi soodakattilassa tuotetaan energiaa ottamalla talteen mustalipeän sisältämän orgaanisen aineksen eli käytännössä ligniinin palaessa vapautunut lämpö. (Raiko et al. 2002, 523)

2.1.1 Tulipesän pelkistymisreaktiot

Mustalipeän sisältämien rikki- ja natriumyhdisteiden reaktiot perustuvat rikin pelkistymiseen eli reduktioon, jossa mustalipeän sisältämä natriumsulfaatti pelkistyy natriumsulfidiksi sulakeossa. Rikin reduktio tapahtuu seuraavilla reaktioilla (Vakkilainen 2005, 4-6)



Soodakattilan pohjalle muodostuu kuvan 2 mukainen sulakeko, joka sisältää epäorgaanista jäännösainetta. Yhtälöiden 2.2 ja 2.3 mukaisesti natriumsulfaatti reagoi sulakeon vähähappisissa olosuhteissa vapaan hiilen kanssa, jolloin reaktiossa vapautuu hiilimonoksidia (CO), hiilidioksidia (CO₂) sekä syntyy keiton reagoivaa kemikaalia eli natriumsulfidia. (Knowpulp 2015 & Vakkilainen 2005, 4-6)



Kuva 2. Soodakattilan tulipesän reaktiot (muokattu lähteestä Suhr et al. 2015, 236)

Täydellisessä reduktiossa kaiken natriumsulfaatin oletetaan reagoivan kemikaalisulassa natriumsulfidiksi, mutta todellisuudessa aina osa natriumsulfaatista jää reagoimatta. Rikin reduktion onnistumista kuvataan reduktioasteella, joka on tyypillisesti 90-95 % välillä. Rikin reduktio kertoo natriumsulfidin sekä rikin suhteen ja se lasketaan yhtälöllä (Hupa 2012, 2)

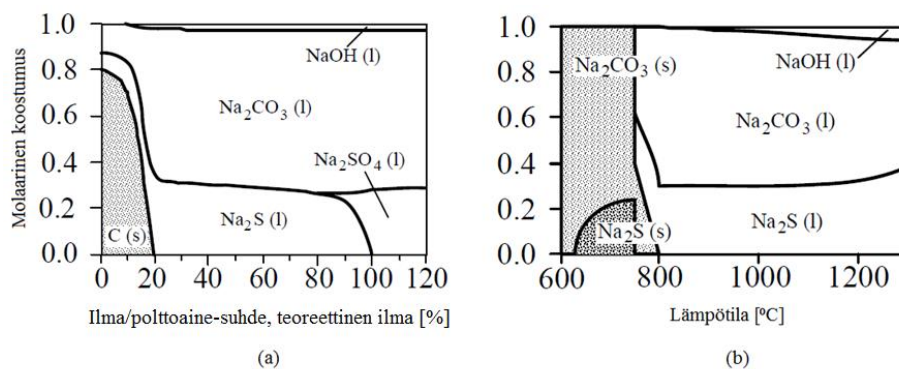
$$\text{reduktioaste} = \frac{n_{\text{Na}_2\text{S}}}{n_{\text{S,tot}}} \cdot 100 \% = \frac{n_{\text{Na}_2\text{S}}}{(n_{\text{Na}_2\text{S}} + n_{\text{Na}_2\text{SO}_4})} \cdot 100 \% \quad (2.4)$$

missä

$n_{\text{Na}_2\text{S}}$	natriumsulfidin ainemäärä	[mol]
$n_{\text{S,tot}}$	sulan rikin ainemäärä	[mol]
$n_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$	natriumsulfaatin ainemäärä	[mol]

Hyvä reduktioaste saavutetaan, kun sulakeossa on riittävästi kiinteää hiiltä, jotta natriumsulfaatti reagoi hiilen kanssa eikä sulakeon yläpuolinen vapaa happi hapeta natriumsulfidia takaisin natriumsulfaatiksi yhtälön 2.1 mukaisesti. Lisäksi onnistunut reduktio vaatii korkean lämpötilan, sillä pelkistymisnopeuden uskotaan kaksinkertaistuvan, kun keon lämpötilaa nostetaan 50-60 °C. Tämän vuoksi pelkistymisalueella vaaditaan vähähappiset ja kuumat olosuhteet. (Hupa 2012, 3-4)

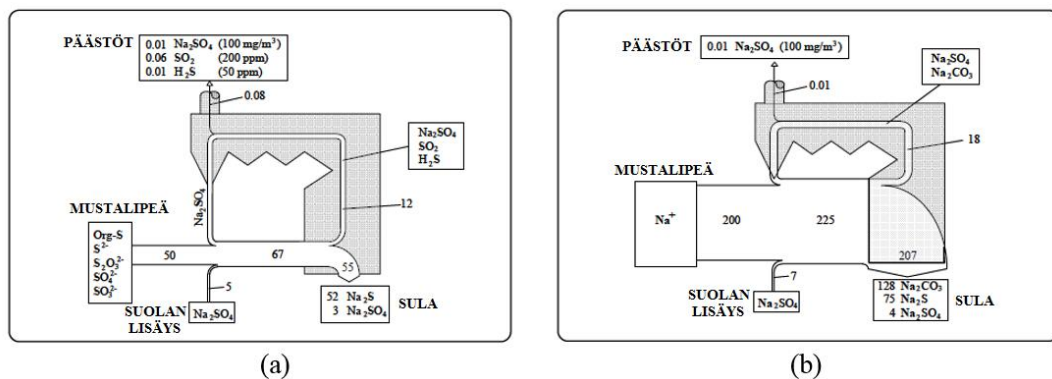
Kuvassa 3 on esitetty ilmamäärän ja sulakeon lämpötilan vaikutukset rikin reduktioon. Kuvan mukaisesti sulassa muodossa esiintyvät natriumsulfidi ja natriumkarbonaatti ovat teoriassa sulakeon hallitsevia yhdisteitä yli 20 %:n ilma-polttoainesuhteella sekä yli 800 °C:n sulakeon lämpötilalla. Tulipesän sulakeko alkaa kiinteytyä, kun lämpötila laskee alle 800 °C. Vaihtelut mustalipeän koostumuksessa, kuiva-ainepitoisuudessa, ruiskutuksessa ja ilman syötön vaiheistuksessa vaikuttavat palamiseen, joten todellisuudessa sulakeon koostumus vaihtelee paljon. Myös reaktioiden rajallinen reaktionopeus rajoittaa todellista rikin pelkistymistä.



Kuva 3. Palamisilman (a) ja sulakeon lämpötilan (b) vaikutus sulakeon koostumukseen ja rikin reduktioon (muokattu lähteestä Hupa 2012, 3)

2.1.2 Natriumin ja rikin kierto

Natriumin ja rikin kiertoa kuvataan usein mustalipeän S/Na₂-suhteella tai valkolipeän sulfiditeetilla. S/Na₂-suhde on parempi kuvaamaan tehtaan natriumin ja rikin kiertoa, sillä sulfiditeetti on riippuvainen myös kaustisiteetista ja reduktioasteesta. (Toni Wahlman keskustelu 30.11.2017) Tyypillisesti S/Na₂-suhde vaihtelee 0,35-0,5 välillä pohjoismaisilla sellutehtailla. Kuvassa 4 on esitetty ideaalisen soodakattilaprosessin S/Na-kemikaalitaset, joissa natrium- ja rikkiyhdisteet on pystytty muuttamaan täydellisesti natriumsulfidiksi ja natriumkarbonaatiksi, vaikka todellisuudessa prosessi sisältää aina häviötä. (Hupa 2012, 2)



Kuva 4. Rikin (a) ja natriumin (b) kemikaalitaset soodakattilassa (muokattu lähteestä Hupa 2012, 2)

Rikki ja natrium kulkeutuvat natriumsulfaattina ja rikkipitoisina kaasuina savukaasuihin. Savukaasuista kerätään lentotuhka sähkösuodattimilta takaisin prosessikiertoon ja karkeasti noin 10 %:a mustalipeän natriumista tulee paluukierron natriumista. Olosuhteista riippuen palamiskaasujen mukana karkaa noin 20-40 %:a kaikesta rikistä ympäristöön eri päästöinä kuten natriumsulfaattina, rikkidioksidina, TRS-päästöinä ja rikkivetynä, joiden mukana karkaa myös pieni osa natriumista.

Natrium-rikki-kiertoa voidaan tarkastella myös sulfiditeetin eli natriumsulfidin ja vaikuttavien alkaliinien suhteen avulla ja se voidaan laskea yhtälöllä

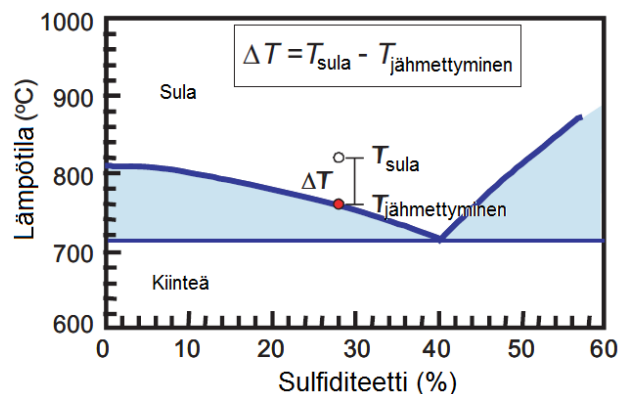
$$S - \% = \frac{n_{Na_2S}}{n_{NaOH} + n_{Na_2S}} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

missä

n_{NaOH} natriumhydroksidi ainemäärä [mol]

Tyypillisesti sulfaattiselutehtaalla sulfiditeetti vaihtelee 35-45 %:n välillä. Havusellua valmistavilla tehtailla sulfiditeetti parantaa saantoa vielä 40 %:iin asti, mutta koivuselutehtailla saanto ei parane enää yli 15 %:n sulfiditeetilla. Sulfiditeetilla on tärkeä rooli myös soodakattilan käytettävyydessä, sillä se vaikuttaa soodakattilan sulan juoksettavuuteen sekä happamien sulfaattien ja rikkipestöjen syntymiseen. Korkea sulfiditeetti aiheuttaa rikkidioksidin muodostumista soodakattilan tulipesässä, mikä edesauttaa happamien sulfaattien aiheuttaman tukkeutumisen syntymistä. Tästä syystä sulfiditeettia tulee hallita tehokkaasti lentotuhkan ulosotolla sekä make up-kemikaalien lisäyksellä. (Knowpulp 2015)

Sulfiditeetti vaikuttaa lisäksi sulan juoksettavuuteen, joka on parhaimmillaan noin 40-41 %:n sulfiditeetilla. Kuvassa 5 onkin esitetty sulfiditeetin vaikutus sulan juoksettavuuteen. Jos sulakeon lämpötila laskee alhaiseksi ja sulfiditeetti on selkeästi alle tai yli 40 %:n, saattaa tämä aiheuttaa ongelmia sulan virtauksessa. Tämä johtaa rännien tukkeutumiseen ja sulavirtauksen epätasaiseen virtaukseen ränneiltä liuotussäiliöön ja siten lisää rännien lämpökuormaa. (Tran et al. 2006, 5)

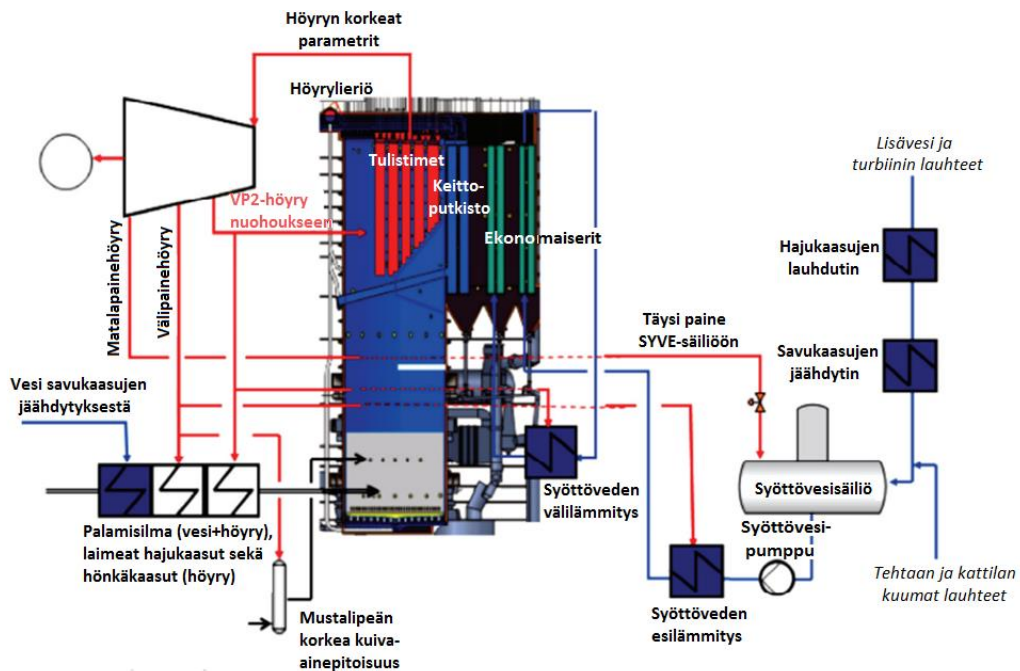


Kuva 5. Sulan juoksettavuuden riippuvuus sulfiditeetista (muokattu lähteestä Tran et al. 2006, 5)

2.2 Soodakattilan vesi-höyrykierto

Soodakattilan vesi-höyryjärjestelmä koostuu syöttövesisäiliöstä, syöttövesipumpuista, ekonomaisereista, höyrylieriöstä, höyrystimestä, keittoputkistosta sekä tulistimista, jotka on esitetty kuvassa 6. Soodakattilan vesi-höyrykierto ei poikkea muiden luonnonkiertokattiloiden vesihöyrykierrosta periaatteeltaan, mutta soodakattila sisältää muutamia rakenteellisia

eroja. Syöttövesi pumpataan syöttövesisäiliöstä ekonomaisereille, joissa syöttöveden lämpötila nostetaan lähelle kiehumispistettä ja ohjataan sieltä lieriöön. Lieriöstä kylläinen vesi laskeutuu höyrystimen alaosaan tiheyseron vaikutuksesta ja nousee takaisin lieriöön veden höyrystyttyä höyrystimessä. Höyry ohjataan lieriöltä tulistettavaksi tulistimille ja lopulta turbiinille prosessihöyryn- ja energiantuotantoon. (Knowpulp 2015)



Kuva 6. Korkea energisen soodakattilan vesi-höyrykierto (muokattu lähteestä Valmet 2015)

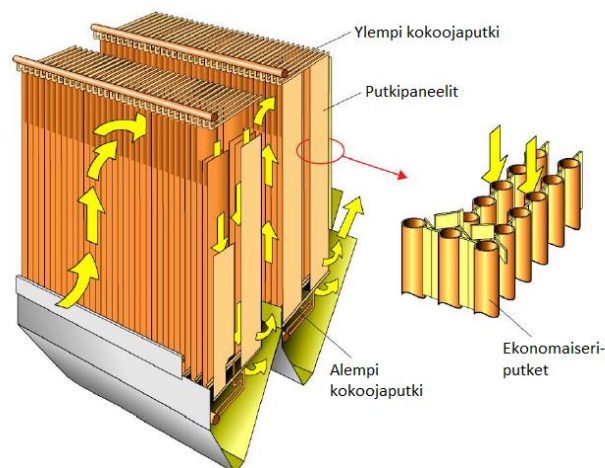
2.2.1 Syöttövesisäiliö ja -pumput

Soodakattilan syöttövesisäiliöön tuodaan lauhtenkäsittelylaitoksella ionivaihdettua ja puhdistettua lisävedtä kaasunpoistimen kautta. Kaasunpoistimessa lisävedestä poistetaan lauhtumattomia kaasuja strippaamalla matalapainehöyryn avulla ja lopulta vesi ohjautuu säiliöön varastoitavaksi noin 110-140 °C:n lämpötilassa. Soodakattilan kuorman vaihteluiden ja häiriötilanteiden vuoksi syöttövesisäiliössä säilötään vettä prosessitarpeen mukaan ja syöttövesisäiliön pintaa säädetään ohjaamalla lisäveden ja lauhteen määrää. (Metsä Fibre 1998)

Syöttövesi pumpataan ja paineistetaan syöttövesipumpuilla syöttövesisäiliöstä esilämmitykseen. Syöttöveden pumppaamista varten soodakattila on varustettu kahdella sähkömoottorilla varustetulla monivaiheisella keskipakoispumpulla, joiden on pystyttävä nostamaan syöttöveden paine ainakin 20 % korkeammaksi kuin soodakattilan rakennepaine. Lisäksi häiriötilanteita varten soodakattila on varustettu turbiinikäyttöisellä syöttövesipumpulla. Normaalitylanteessa syöttöveden paine pidetään 5-10 % korkeampana kuin soodakattilan käyttöpaine putkiston painehäviöiden vuoksi ja pumppaamiseen käytetään vain yhtä sähkökäyttöistä syöttövesipumppua loppujen ollessa varalla.

2.2.2 Ekonomaiserit

Syöttövesi esilämmitetään ekonomaisereissa lähelle veden kiehumispistettä savukaasujen lämmöllä, jolloin savukaasut luovuttavat lämpönsä ja jäähtyvät. (Vakkilainen 2005, 7-8) Usein pystyputkista koostuvat ekonomaiserit toimivat vastavirtalämmönsiirtiminä, sillä syöttövesi tuodaan ekonomaiserin alaosaan ja virtaa lopulta ekonomaiserissa ylöspäin vasten savukaasuvirtaa, joka kulkee kuvan 7 mukaisesti kanavassa ylhäältä alas. Savukaasut saapuvatkin ekonomaiseriin tyypillisesti 350-450 °C välillä. Savukaasukanavaan on lisäksi suunniteltu niin sanottu tyhjäveto, jossa savukaasuvirta ohjataan seuraavan ekonomaiserin yläosaan ja millä pyritään estämään soodakattilan loppuosan likaantumista. (Huhtinen 2012, 74 & Vakkilainen 2005, 6-15)

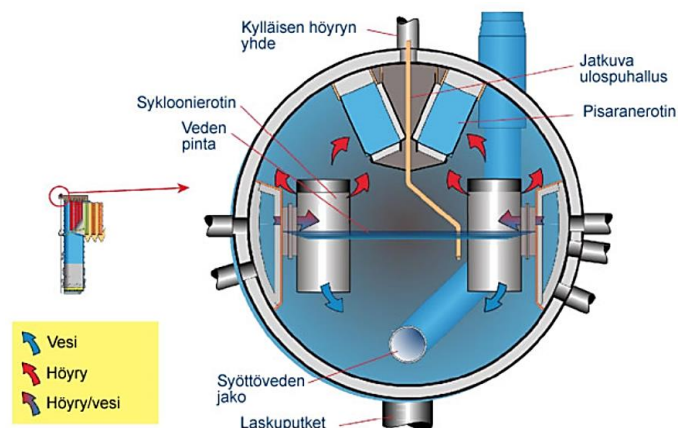


Kuva 7. Ekonomaiserin rakenne (muokattu lähteestä Haaga 2016, 6)

Uusissa kattiloissa ekonomaisereiden putket asetellaan tyypillisesti 110-180 mm välein, vaikka minimiväleissä onkin paljon vaihtelua. Savukaasukanavan vapaa virtausala ekonomaiseri 2:ssa on usein $0,13-0,17 \text{ m}^2/\text{m}^2_{\text{pohja}}$ välillä ja ekonomaiseri 1:n vapaa virtausala vaihtelee $0,11-0,16 \text{ m}^2/\text{m}^2_{\text{pohja}}$ välillä. (Vakkilainen 2005, 6-16)

2.2.3 Höyrylieriö ja dolezal

Syöttövesi ohjataan pintajähdyttimelle eli niin sanotulle dolezalille, jossa syöttövedellä lauhdutetaan lieriöltä saatavaa höyryä. Pintajähdyttimeltä saatavaa puhdasta lauhdetta käytetään tulistimien jäähdytykseen, jotta tulistettu höyry pysyisi mahdollisimman puhtaana. Syöttövesi ohjataan lopulta kuvan 8 mukaiseen höyrylieriöön, jossa ekonomaisereissa lämmennyt kylläinen vesi erotetaan höyrystä. (Knowpulp 2015)



Kuva 8. Höyrylieriön toiminta ja rakenne (Knowpulp 2015)

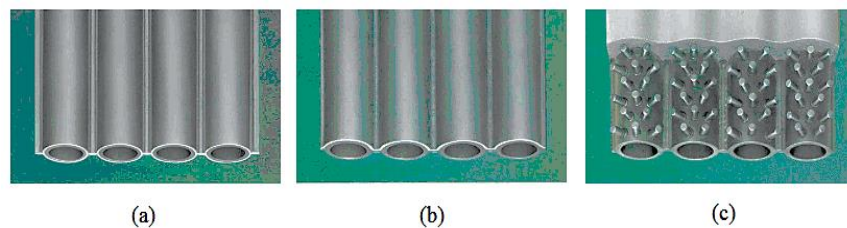
Höyrylieriö on soodakattilan komponenteista monimutkaisin ja lieriössä erotellaan kylläinen vesi ja höyry toisistaan höyrystystä ja tulistusta varten. Höyrystimeltä saapunut osittain höyrystynyt vesi saapuu lieriöön nousuputkia pitkin, jolloin syklonierottimet jakavat veden lieriön alaosaan ja höyry poistuu pisaraerottimien läpi yläosasta tulistimille. Höyrystä erotettu vesi vuorostaan siirtyy tiheyseron vaikutuksesta laskuputkiin. (Vakkilainen 2010, 21)

2.2.4 Kattilaputket

Kylläinen vesi laskeutuu höyrylieriöstä normaalisti 4-6 laskuputkea pitkin höyrystimen alaosaan pääjakokammioon. Pääjakokammioista vesi jakautuu sivuseinien kattilaputkille sekä

pohjaputkille, jotka muodostavat myös etu- ja takaseinän. (Metsä Fibre 2018) Vesi alkaa höyrystyä höyrystinputkien alaosassa ja tiheyseron muuttuessa osittain höyrystynyt vesi nousee soodakattilan seinäputkia pitkin takaisin höyrylieriöön. Vaikka suurin osa höyrystyksestä toteutetaan tulipesän kattilaputkissa, osa kylläisestä vedestä ohjataan keittoputkistolle höyrystettäväksi. (Vakkilainen 2005, 7-9)

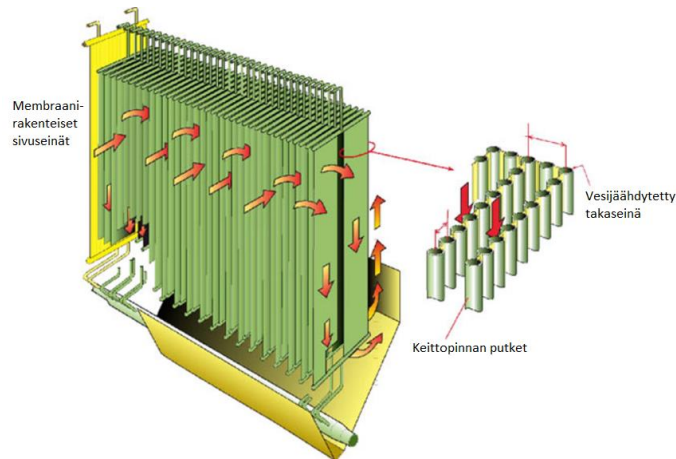
Kuten yllä on mainittu, soodakattilan pohjaputket kuuluvat myös höyrystimeen, minkä vuoksi soodakattila eroaa muista höyrykattiloissa. Soodakattilan seinäputkiin käytetään hiiliterästä, mutta tulipesän kuumien ja erityisen haastavien olosuhteiden vuoksi pohja- ja seinäputket on korvattu compound-putkilla sekundääri-ilmatasolle saakka. (Vakkilainen 2005, 7-10) Korroosioriskin vuoksi on myös mahdollista, että primääri-ilmatason alapuolisen osan tulipesän putket varustetaan kuvan 9 mukaisilla pienillä tapeilla, joilla pyritään estämään suurin lämpökuorma ja korroosion eteneminen pohjaputkessa. (Huhtinen 2013, 74)



Kuva 9. Kattilaputkiston rakenteita: ylemmän tulipesän evitetty membraaniputkisto (a), suojaava verhoputkisto (b) sekä alimman tulipesän compound-putkea varustettuna suojatapeilla (c) (Vakkilainen 2005, 10-13)

2.2.5 Keittoputkisto

Kuvan 10 mukainen keittoputkisto tai keittopinta on höyrystimeen kuuluva soodakattilan osa, jossa tapahtuu operointipaineesta riippuen 10-25 %:a kaikesta höyrystyksestä. Keittoputkisto on rakenteellisesti muista höyrykattiloista poikkeava höyrystin, joka on usein pystyputkinen lämmönsiirrin ja sijaitsee savukaasukanavassa nokan jälkeen tulistimien ja ekonomaisereiden välissä. (Vakkilainen 2005, 7-9)

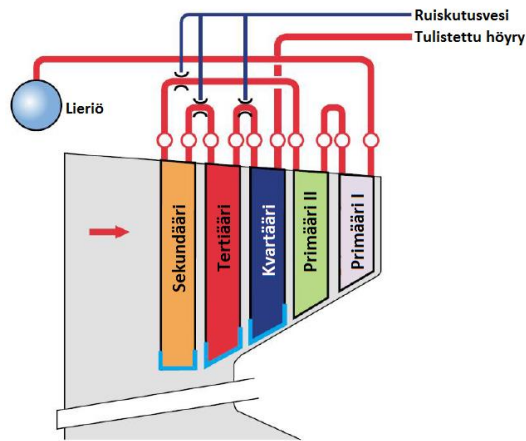


Kuva 10. Keittoputkiston rakenne (muokattu lähteestä Knowpulp 2015)

Keittoputkiston savukaasujen vapaa virtausala vaihtelee keskimäärin $0,17-0,23 \text{ m}^2/\text{m}^2$ pohja välillä eli. Putkien väli vaihtelee soodakattilasta riippuen normaalisti 160-230 mm välillä. (Vakkilainen 2005, 6-16) Keittoputkiston putket ovat toisiinsa kiinnitettyjä evityksellä, jolla parannetaan keittoputkiston lämmönsiirtoa kasvattamalla lämmönsiirtopinta-alaa sekä kestämään putkiin kohdistuvia lämpöjännityksiä. (Vakkilainen 2005, 10-19)

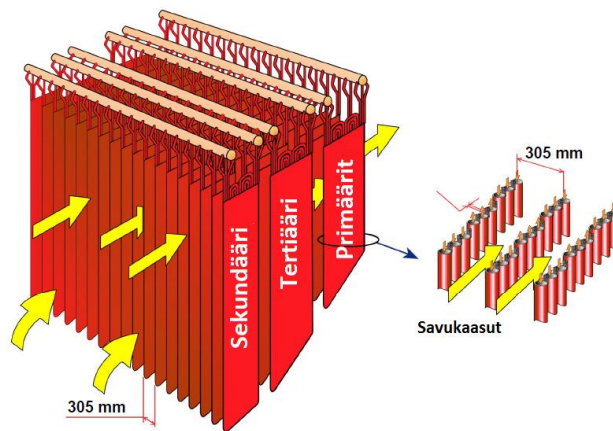
2.2.6 Tulistimet

Lieriöstä kylläinen höyry ohjataan pisaranerotin kautta ensimmäiseen tulistukseen primääritulistimelle, joka sijaitsee fyysisesti lähimpänä keittoputkistoa, kuten kuvasta 11 nähdään. Tulistuksessa höyry tulistetaan yli kylläisen höyryn pisteen, jotta se on käyttökelpoista turbiinilla. Primääritulistimelta tulistunut höyry ohjataan tulistettavaksi jakokammioiden kautta tulipesää lähimpänä sijaitsevalle sekundääritulistimille ja sieltä tertiääritulistimelle lopulliseen tulistuslämpötilaansa. Tuorehöyry ohjataan tertiääritulistimilta päänhöyryventtiilille, jolla säädellään tuorehöyryn virtausta turbiinille. (Metsä Fibre 1998 & Vakkilainen 2005, 7-9)



Kuva 11. Soodakattilan tulistinrakenne ja tulistussuunta (muokattu lähteestä Valmet 2016)

Höyryä tulistetaan moderneissa kattiloissa jopa yli 500 °C:n ja paine vaihtelee tyypillisesti 90-100 bar:n välillä. Jotta höyryn lämpötila saadaan pidettyä optimaalisena, säädetään tulistetun höyryn lämpötilaa jäähdytysvedellä, joka ruiskutetaan tulistetun höyryn linjaan erillisessä ruiskutusammiossa. Jäähdytysvesi saadaan pintajäähdyttimeltä lauhtuneena höyrynä tai vaihtoehtoisesti syöttövetenä syöttövesilinjasta. (Vakkilainen 2005, 7-9)



Kuva 12. Savukaasun kulkeminen tulistimien läpi (mukautettu lähteestä Haaga 2016, 16)

Tulistimet ovat siis joko säteily- tai konvektiolämpöpintoja riippuen niiden sijainnista tulipesässä, sillä esimerkiksi ensimmäinen tulistin on altis suoralle säteilylle ja siten sitä voidaan kutsua säteilytulistimeksi. Muuten lämpö siirtyy tulistimissa savukaasuvirran mukana konvektiolla ja näitä kutsutaan konvektiotulistimiksi. (Vakkilainen 2005, 6-12)

Kuvassa 12 on esitetty savukaasujen virtaaminen tulistimien läpi. Tyypillisesti tulistimien putkipaneelien välit ovat noin 300-400 mm. Joissakin tapauksissa putkien sijoittelu on toteutettu harvemmillä väleillä soodakattilan tahma-alueella, mutta tämä lisää soodakattilan hintaa ja on siitä syystä harvemmin käytetty. Soodakattilan tulistinputkien sijoittelu toteutetaan myös suorilla paneelitulistimilla, joissa putket ovat alle 1,25 kertaa putken halkaisijan verran lähempänä toisiaan savukaasuvirran suuntaan. Paneelitulistimia voidaan käyttää esimerkiksi ensimmäisinä tulistimina, koska ne kestävät normaalia tulistintinputkien asettelua paremmin lämpöä eivätkä likaannu yhtä helposti. (Vakkilainen 2005, 6-14)

2.3 Polttolipeäjärjestelmä

Soodakattilan polttolipeäjärjestelmä koostuu polttolipeäsäiliöistä, sekoitussäiliöstä, polttolipeäpumpuista, polttolipeän esilämmittimestä sekä polttolipeäruiskuista. Polttolipeäjärjestelmä voidaan toteuttaa paineellisena tai ilmanpaineisena, mutta paineellinen järjestelmä on yleistynyt polttolipeän kuiva-ainepitoisuuden noustua 70 %:sta yli 80 %:n. Ilmanpaineisessa polttolipeäjärjestelmässä vahvamustalipeä ohjataan sekoitussäiliöstä tuhkan sekoittamisen jälkeen suoraan polttolipeäpumppujen kautta esilämmittimelle ja sieltä ruiskutettavaksi. (Knowpulp 2015)

Paineellisessa järjestelmässä vahvamustalipeä ohjataan haihduttamon vahvamustalipeäsäiliöltä soodakattilan sekoitussäiliöön, jossa lipeän joukkoon sekoitetaan irronnut lentotuhka keittoputkistolta, ekonomaisereilta sekä sähkösuodattimilta. Sekoitussäiliöstä polttolipeä ohjataan loppuväkevöintiä varten haihduttamolle, josta lipeä ohjataan lopulta paineistettuun polttolipeäsäiliöön. Lopulta polttolipeä syötetään polttolipeäpumpuilla esilämmittimen kautta lipeäruiskuille ruiskutettavaksi tulipesään. (Metsä Fibre 1998)

2.3.1 Sekoitussäiliö

Soodakattilasta ja sähkösuotimilta tuotu lentotuhka sekoitetaan vahvamustalipeän joukkoon erillisessä sekoitussäiliössä, joka koostuu pyörivästä sekoittimesta sekä reikälevystä, joka eristää imu- ja sekoituspuolet toisistaan. Reikälevyllä pyritään varmistamaan vahvamustali-

peän ja lentotuhkan tasainen koostumus, kun lipeä ohjataan säiliön imupuolelta joko väkevöitäväksi tai polttolipeäpumpuille. Sekoitussäiliöön pinnan korkeutta säädetään tuotavan lipeän määrällä eli siirtopumppujen kierrosnopeutta säätämällä. Säiliö on lisäksi varustettu tyhjennyksellä sekä niin sanotulla ylikaadolla, jotta mustalipeä ei vuoda säiliöstä yli. (Knowpulp 2015 & Metsä Fibre 1998)

2.3.2 Polttolipeäsäiliö

Mustalipeä ohjataan loppuväkevöinnistä loppuvahvuudessaan polttolipeäsäiliöön, jonka tehtävänä on säilöä poltettava mustalipeä eli polttolipeä sekä painetta muuttamalla säätää polttolipeän viskositeettia ja ruiskutuslämpötilaa. Polttolipeän polttolämpötilaa nostetaan kasvattamalla säiliön painetta syöttämällä prosessihöyryä säiliöön, kun taas vastaavasti painetta ja siten myös polttolämpötilaa lasketaan vapauttamalla säiliöhönkiä säiliöstä hajukaasujen joukkoon. (Metsä Fibre 1998)

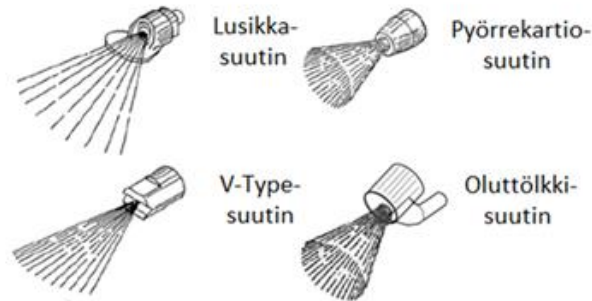
2.3.3 Polttolipeäpumput ja esilämmitys

Polttolipeän pumppaukseen käytetään usein kahta erikoisrakenteista keskipakoispumppua, joista toinen toimii varapumppuna. Polttolipeäpumpuilta polttolipeä ohjataan ruiskutettavaksi, mutta ensin polttolipeän lopullisen ruiskutuslämpötila ja siten pisarakoko säädetään epäsuoran tai suoran esilämmittimen avulla. Suorassa lämmityksessä polttolipeä lämmitetään ohjaamalla välipainehöyry suoraan polttolipeän joukkoon, kun taas vaihtoehtoisesti epäsuoraan lämmityksen käytetään erillistä lämmönvaihdinta, jossa polttolipeää lämmitetään matalapaineisella höyryllä sekoittamatta höyryä lipeän joukkoon. (Knowpulp 2015)

2.3.4 Polttolipeäruiskut ja -suuttimet

Oikean suutintyyppin valitseminen on erityisen tärkeää, kun halutaan vaikuttaa ruiskutuksen laatuun, pisaroiden levittäytymiseen, sulakeon hallintaan ja carryoverin syntyyn. Suutintyyppit ovat keskenään kovin erilaisia ja näin ollen myös pisarasuihkuissa on merkittäviä eroja. Kuvassa 13 on esitelty neljä tyypillisintä suutintyyppiä, joista lusikkasuutin on yleisimmin käytetty malli. Lusikkasuuttimessa polttolipeävirtaus hajotetaan lusikassa viuhkamaiseksi suihkuksi, jolla varmistetaan polttolipeän tasainen leviäminen tulipesään. Pyörrekartio- ja

V-Type-suuttimissa suuttimen sisäinen rakenne kuristaa virtausta ja vaikuttaa näin ruiskutuksen geometriaan, mikä näkyy kuvasta 13. (Adams et al. 1997, 103-108)

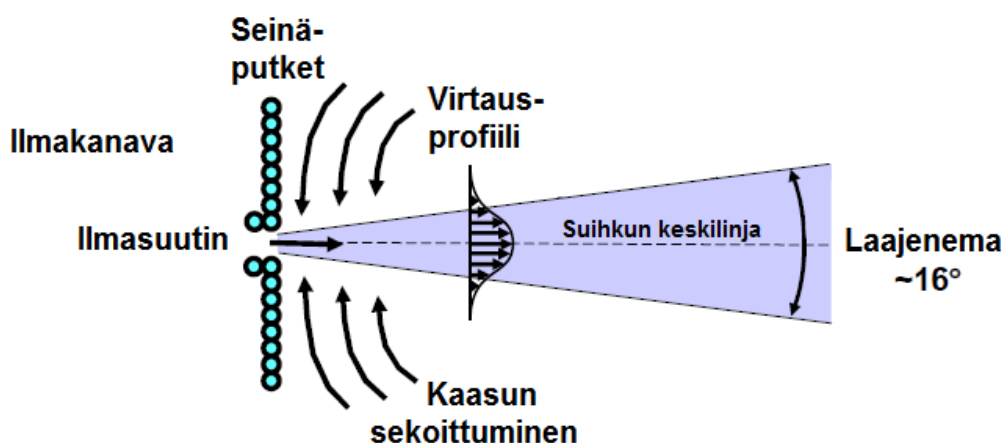


Kuva 13. Erilaisia suutintyyppiä (muokattu lähteestä Engblom 2017, 18)

2.4 Palamisilmajärjestelmä

Palamisilmajärjestelmällä säädellään palamiseen tarvittavan hapen määrää ja sijaintia tulipesän reaktioiden varmistamiseksi. Ilma tulee syöttää tulipesään siten, että ilma jakautuu tasaisesti koko keon alueelle ja mahdollisimman alas tulipesään. Modernin soodakattilan palamisilmajärjestelmä koostuu palamisilmapuhaltimista, ilman esilämmityksestä sekä useasta palamisilmatasosta. (Knowpulp 2015)

Palamisilma syötetään tulipesään ilmasuuttimien kautta kuvan 14 mukaisesti. Palamisilma leviää tulipesään noin 16° kulmassa, jolloin ilma sekoittuu ympäröivien kaasujen kanssa. Ilmavirtaus alkaa taipua ylöspäin tulipesän keskiosissa, koska alapuoliset kaasuvirtaukset ja heikkenevä ilmasuihku pyrkivät kääntämään ilmavirran ylöspäin. (Wessel 2015, 3) Tyypillisesti soodakattilaan syötettävä ilmamäärä vaihtelee noin $3,6-4,0 \text{ m}^3/\text{n/kg}_{\text{ka}}$ välillä. Teoreettisen ilmamäärän lisäksi syötettävän ilman virtaukseen lisätään lisäilmaa, joka on noin 10-20 %. (Vakkilainen 2005, 7-4)



Kuva 14. Ilman syöttö tulipesään (Wessel 2015, 3)

2.4.1 Palamisilmapuhaltimet

Palamisilma otetaan yleisimmin kattilarakennuksen yläosista tai vaihtoehtoisesti osittain myös ulkoilmasta. Koska aksiaalipuhaltimet ovat teollisessa mittakaavassa vielä erityisen kalliita, palamisilmapuhaltimet ovat yleisimmin suuria radiaalipuhaltimia. (Vakkilainen 2011, 20) Radiaalipuhaltimessa ilma ohjataan imuaukosta akselin suuntaisesti puhaltimeen ja juoksupyörässä ilma ohjautuu puhaltimen ulkoreunalta spiraalikehään ja sieltä ilmakanavaan. Puhallin on lisäksi usein varustettu juoksupyörällä, jossa on taaksepäin kaartuvat siivet, koska näiden avulla puhallin saavuttaa parhaan mahdollisen hyötysuhteen. (Huhtinen et al. 2000, 245)

Puhallin valitaan vaaditun tilavuusvirran ja paine-eron perusteella laitetoimittajien laatimia ominaiskäyrästä apuna käyttäen, mutta myös hyötysuhde ja ominaiskäyrän muoto vaikuttavat valintaan. Energiatehokkaat ilmapuhaltimet ovat usein varustettu inverttereillä, jolloin päästään haluttuun ilmakanavan paineeseen puhaltimen kierroslukua säätämällä. Häiriötilanteiden varalle puhaltimet varustetaan myös johtosiipisäädöllä, jossa ilma ohjataan siipipyörän suuntaiseen pyörimisliikkeeseen johtosiivistössä, mikä pienentää tilavuusvirtaa. (Metsä Fibre 1998 & Huhtinen et al. 2000, 243-244)

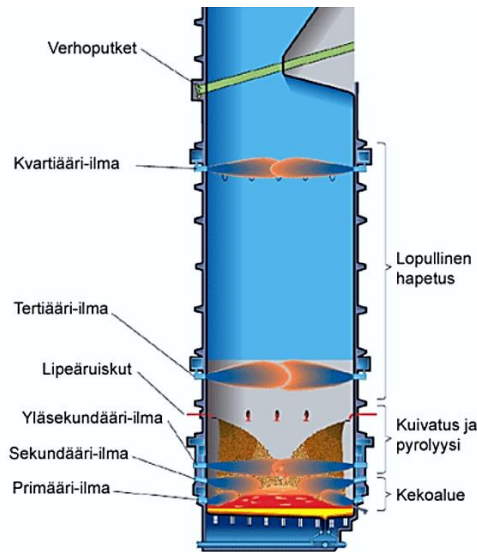
2.4.2 Palamisilman esilämmitys

Soodakattilassa käytetään poikkeuksellisesti höyryesilämmittämiä palamisilman lämmitykseen, koska soodakattilan savukaasukanavat ovat vastaavia höyrykattiloita likaisemmat ja rakenteeltaan hieman erilaiset. Tästä johtuen palamisilmaa ei lämmitetä savukaasuilla. (Vakkilainen 2011, 23 & Huhtinen 2013, 74)

Höyryesilämmitykseen käytetään tyypillisesti 3-10 bar:n matala- tai välipainehöyryä ja ilmaa lämmitetään tyypillisesti 120-150 °C:een. Höyryesilämmittimet toteutetaan usein rivoitettuilla putkilla varustettuna höyry-ilmalämmönsiirtimenä, koska rivoituksella varmistetaan paras lämmönsiirto, sillä lauhtuva höyry siirtää paremmin lämpöä kuin ilma. Lisäksi ilman esilämmittäminen höyryllä estää savukaasujen liiallisen jäähtymisen ja happokastepisteen alittumisen. (Metsä Fibre 1998 & Huhtinen et al. 2000, 201)

2.4.3 Ilmatasot

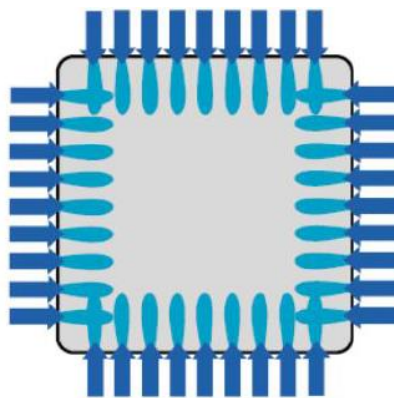
Ilman syöttö tulipesään on jaettu useaan eri polttoilmatasoon, joka kostuu primääri-, sekundääri-, tertiääri- ja joissakin tapauksissa myös kvartääri-ilmatasosta. Kuvassa 15 on esitetty yleistynyt monitasoinen ilmansyöttö soodakattilan tulipesään. Palamisilmajärjestelmää, jossa sekundääri- ja tertiääri-ilmat on jaettu useaan tasoon palamisen vaiheistamiseksi, kutsutaan monitasoilmajärjestelmäksi (engl. multi level). Multi level-järjestelmä on laskenut savukaasun nopeuksia tulipesän alaosissa vähentäen carryoveria ja samalla maksimoinut ilman tunkeutuvuuden sulakekoon. Joissakin tapauksessa ilmansyöttö on toteutettu niin sanotulla vertikaalisella järjestelmällä, jossa sekundääri- ja tertiääri-ilma tuodaan tulipesään esimerkiksi 4-6 eri tasossa. (Knowpulp 2015)



Kuva 15. Esimerkki palamisilmajärjestelmän rakenteesta (Knowpulp 2015)

Primääri-ilman syöttö

Primääri-ilma lämmitetään noin 120-150 °C:n lämpötilaan ennen kuin se syötetään tasaisesti jokaiselle seinälle sijoitettujen primääri-ilmasuuttimien kautta soodakattilan tulipesään kuvan 16 mukaisesti noin 1-1,5 metrin korkeudella soodakattilan pohjasta. Primääri-ilmalla tuodaan happea sulakeon reunoille ja sen määrällä säädellään sulakeon korkeutta ja muotoa. (Metsä Fibre 1998 & Knowpulp 2015) Primääri-ilman tehtävänä onkin kontrolloida sulakeon palamista lähellä ilmakehästä, estää sulan pääsy ilmakehään sekä pitää keko riittävän kuumana ja juoksevana. (Wessel 2015, 3)

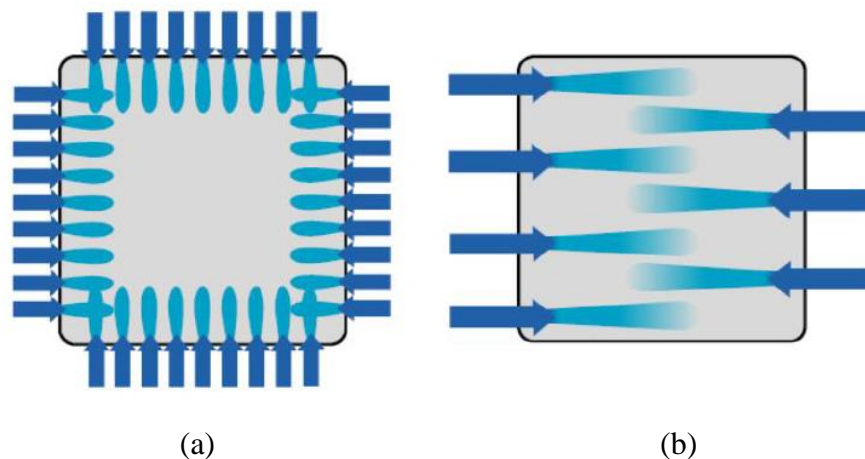


Kuva 16. Neljän seinän primääri-ilman syöttö ja ilman virtaus (Haaga 2016b, 2)

Primääri-ilmamäärän osuus kaikesta ilmasta vaihtelee eri soodakattiloilla noin 25-60 % välillä soodakattilan rakenteesta ja operoinnista riippuen. Tyypillisesti korkean kuiva-aineen kattiloilla primääri-ilmamäärä on noin 30 % kaikesta ilmasta ja ”ilmalaatikon” paine vaihtelee 0,8-1,5 kPa välillä. (Vakkilainen 2005, 7-3, 9-9) Primääri-ilmamäärän tulee olla optimaalinen, jotta tulipesän alaosaan ei synny pystysuuntaisia pyörteitä liian suuresta paineesta tai ilmamäärästä johtuen. Pyörteet vaikuttavat polttoliipeäpisan kulkeutumiseen, minkä seurauksena pisarat eivät laskeudu tasaisesti sulakekoon. Toisaalta liian pieni primääri-ilman määrä jäähdyyttää tulipesää, jolloin sula saattaa päätyä primääri-ilmakanavaan tukkien ilma-suuttimet. (Knowpulp 2015)

Sekundääri-ilman syöttö

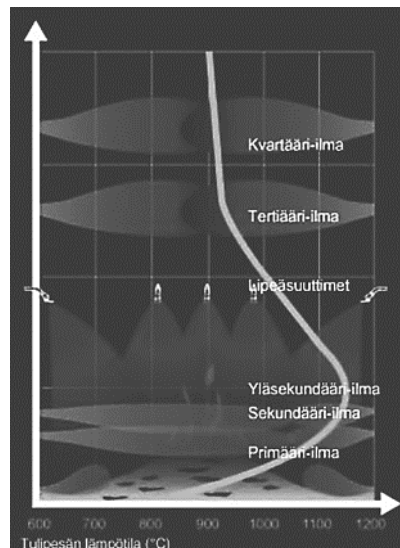
Sekundääri-ilma syötetään tulipesään useassa tasossa noin 1-3 metriä primääri-ilmatason yläpuolella noin 120 °C lämpötilassa. Sekundääri-ilman syöttö voidaan toteuttaa kuvasta 17 näkyvillä tavoilla. Alempi sekundääri-ilma voidaan syöttää tulipesään tasaisesti neljältä tai vaihtoehtoisesti ylemmän sekundääri-ilmatason tavoin kahdelta seinältä lomittain tulipesään. (Wessel 2015,4 & Metsä Fibre 1998) Sekundääri-ilman paine ”ilmalaatikossa” on tyypillisesti 3-5 kPa välillä, mutta tulipesän paineen vaihtelusta johtuen suuttimen paine saattaa olla 0,2-0,4 kPa suurempi. (Vakkilainen 2005, 7-4)



Kuva 17. Sekundääri-ilman vaihtoehtoiset syöttötavat: neljän ilman syöttö (a) tai lomittainen kahden seinän syöttö (b) (muokattu lähteestä Haaga 2016b, 2)

Sekundääri-ilmalla hallitaan sulakeon korkeutta sekä haihtuvien aineiden ja koksen palamista tulipesässä. Lisäksi ilman sekoittumista säädetään nimenomaan juuri sekundääri-ilman avulla. Liiallinen sekundääri-ilma saattaa aiheuttaa lipeäsuihkun karkaamista tulipesän yläosiin. Sekundääri-ilman paineen tulee kuitenkin olla riittävän suuri, jotta se on riittävän tunkeutuvaa ja keon säätely ei käy haasteelliseksi. Tunkeutuvuutta onkin lisätty lisäämällä soodakattilaan ylempi sekundääri-ilmataso. (Wessel 2015, 3 & Knowpulp 2015)

Tulipesän käyttäytymistä voi helposti ennustaa seuraamalla tulipesän lämpötiloja ja tutkimmalla carryoverin määrää tulipesän yläosissa. Kuvasta 18 nähdään tulipesän lämpötilajakauma, joka osoittaa, että tulipesän lämpötila on usein korkein juuri sekundääri-ilmatasojen kohdalla, mistä johtuen palamisilman lämpötilaa nostamalla pystytään vaikuttamaan palamiseen ja siten parempaan lämmönsiirtoon. (Knowpulp 2015 & Vakkilainen 2005, 9-11)



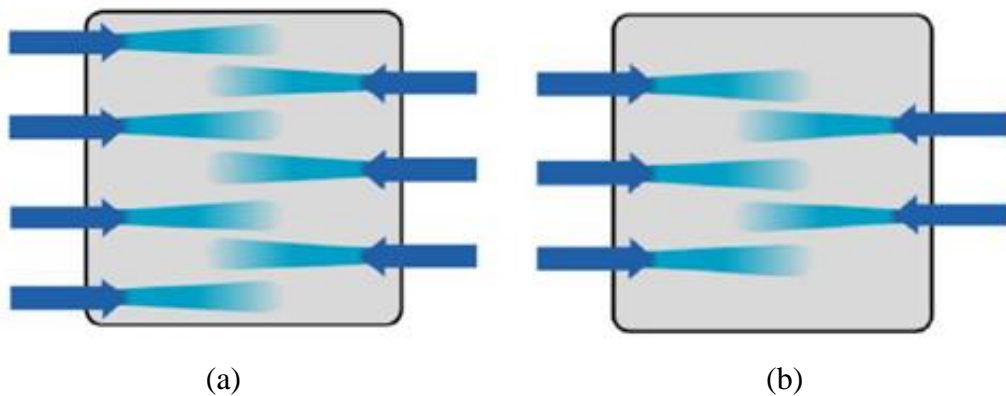
Kuva 18. Tulipesän lämpötilaprofiili (muokattu lähteestä Knowpulp 2015)

Tertiääri- ja kvartääri-ilman syöttö

Tertiääri-ilma syötetään suurella nopeudella soodakattilaan ilman esilämmitystä yleisesti noin 3-6 metriä lipeäruiskujen yläpuolelta. Tertiääri-ilman tehtävänä on polttaa palamattomat kaasut loppuun sekä pyrkiä tasoittamaan ilman virtaukset ennen tulipesän yläosaa. (Vakkilainen 2005, 7-5, 9-9 & Knowpulp 2015) Myös tertiääri-ilma voidaan vaiheistaa useaan

tasoon loppuun palamisen helpottamiseksi, jolla saadaan osittain vähennettyä typenoksidipäästöjä. Lisäksi ilmaa voidaan syöttää myös kvartääritasolta, joka sijaitsee muita ilmatasoja selkeästi korkeammalla. Myös kvartääri-ilmalla pyritään tertiääri-tason tavoin poistamaan NO_x -päästöjä sekä tasoittamaan virtauksia aivan tulipesän yläosassa. (Metsä Fibre 1998 & Knowpulp 2015)

Tertiääri- ja kvartääri-ilman syöttö voidaan toteuttaa esimerkiksi kuvan 19 mukaisesti 4-3- ja 3-2-järjestelmällä. Ilma-aukot on siis uusissa kattiloissa sijoitettu lomittain, mikä on mahdollista, kun etuseinälle sijoitetaan yksi ilmasuutin enemmän. On myös yleistä, että tertiääritasolta syötetään tulipesään myös laimeita hajukaasuja. Laimeat hajukaasut puhdistetaan ja lämmitetään ennen soodakattilaan syöttöä. Lisäksi on mahdollista, että kanavaan syötetään myös ilmaa, jos hajukaasujen jakelussa ilmenee ongelmia. (Metsä Fibre 1998)

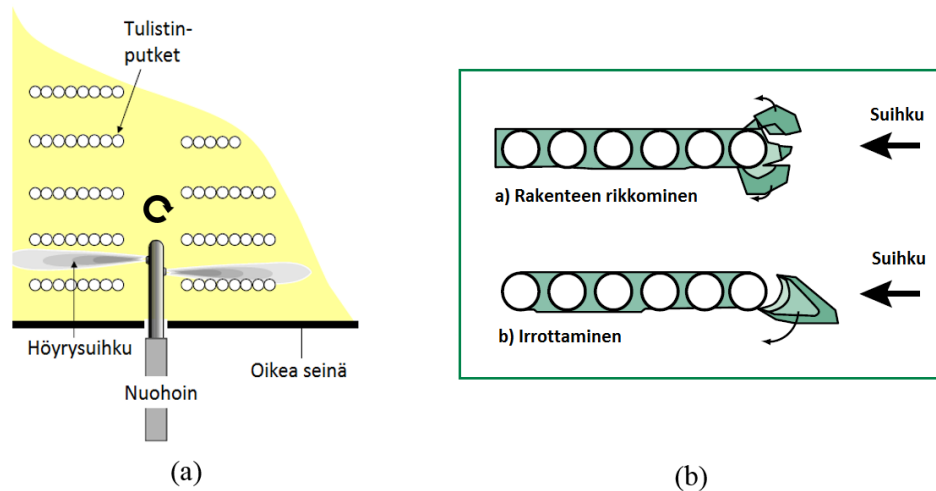


Kuva 19. Lomittainen 4-3 (a) ja 3-2 (b) järjestetty tertiääri- ja kvartääri-ilman syöttö (muokattu lähteestä Haaga 2016b, 2)

2.5 Nuohousjärjestelmä

Nuohoamiseksi kutsutaan toimenpidettä, jossa pintaan kertynyt kerrostuma irrotetaan ulkoista voimaa käyttäen kuten esimerkiksi kuvan 20 mukaisesti korkeapaineisella höyryllä ”puhaltamalla”. Soodakattiloissa tehokas nuohoaminen on erityisen tärkeää, koska polttoliipeä sisältää runsaasti tarttuvaa tuhkaa, joka aiheuttaa useita kerrostumia soodakattilan lämpöpinnoille. Soodakattilan nuohoustarpeen määrääkin poltossa syntyvän tuhkan määrä ja

lentotuhkan sulamiskäyttäytyminen. Ilman toimivaa nuohousjärjestelmää soodakattilan lämmönsiirto heikkenee ja ajan myötä savukaasukanava kuroutuu umpeen. (Tran et al. 2015b, 1)



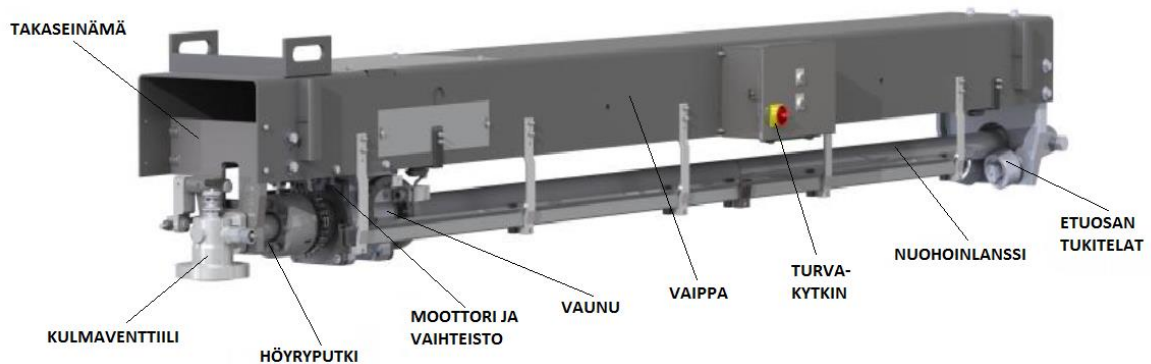
Kuva 20. Nuohouksen toimintaperiaate (a) ja kerrostuman poistomekanismi (b)
(muokattu lähteestä Tran et al. 2011, 2 ja Kaliazine et al. 1997, 2)

Tyypillisesti soodakattilan nuohous toteutetaan ulosvedettävillä höyrynuohoimilla, joissa korkeapaineinen höyry ohjataan suuttimen kautta lämpöpinnoille ja niiden väliin. Höyryputki kulkee tulipesässä pyörivällä liikkeellä kuvan 20a mukaisesti, millä varmistetaan, että höyrystuuhkun vaikutusala olisi mahdollisimman suuri.

Nuohoimen puhdistuskyky on riippuvainen nuohoimen nuohoustehokkuudesta sekä kerrostuman rakenteesta. Nuohouksen tunkeutuvuuteen ja tehokkuuteen vaikuttavat höyryn massavirta, paine ja lämpötila, suuttimen koko ja muoto, hajotuskyky, suuttimen ja kerrostuman välinen etäisyys sekä nuohoussekvenssi. Rakenne vaikuttaa kerrostuman poistomekanismiin, sillä hauraat kerrostumat hajoavat nuohouksessa, kun taas kovat kerrostumat siirtyvät pois lämpöpinnalta. Kerrostuman rakenne vaikuttaa sen poistomekanismeihin, ja se on esitetty kuvassa 20b. (Kaliazine et al. 1997, 2)

2.5.1 Nuohoimet

Nuohoin koostuu kulmaventtiilistä, höyryputkesta, moottorista, nuohoinvaunusta, rajakytkimestä ja nuohoinlanssista. Nuohoimen liikettä ohjataan moottorilla, joka voi sijaita nuohoimen päässä tai kiinni vaunussa vaihdelaatikon yläpuolella kuten kuvan 21 mukaisessa nuohoimessa. Nuohoinputken pyörivä ja vaunun edestakainen liike toteutetaan ensiöhammasvaihteiston avulla. (Knowpulp 2015)



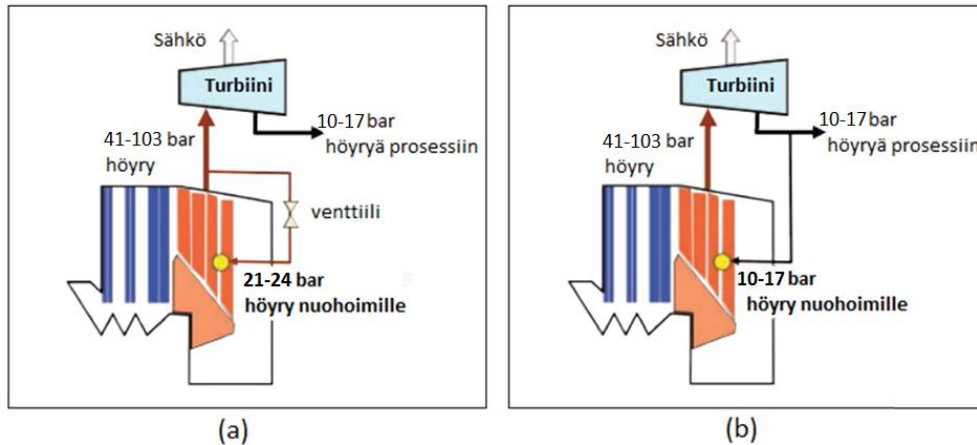
Kuva 21. Höyrynuohoimen rakenne (muokattu lähteestä Clyde Bergemann Power Group)

Kulmaventtiili sijaitsee nuohoimen takaosassa ja ohjaa höyryvirtausta mekaanisesti kammella, joka ohjaa venttiilin asentoa vaunun liikkeen perusteella. Nuohouspainetta säädetään kulmaventtiilin säätörengan avulla joko jättämällä kulmaventtiili täysin auki ja siten säätämällä nuohoinryhmän säätöventtiilillä tai toteuttamalla painesäätö nuohoinkohtaisesti kulmaventtiilillä. (Diamond Power sähköpostikeskustelu 31.1.2018) Höyry kulkee kulmaventtiililtä höyryputkeen, jonka päässä on kaksi vastakkaisille puolille sijoitettua höyrysuutinta, joilla höyry suihkutetaan lämpöpinnoille. Ruostumattomasta teräksestä valmistettu höyryputki tiivistetään tiivistepöksillä ja se sijaitsee nuohoinlanssin sisällä. (Knowpulp 2015)

2.5.2 Nuohoushöyry

Soodakattilan nuohous kuluttaa soodakattilan rakenteesta ja operoinnista riippuen 3-12 % tuotetusta korkeapaineisesta höyrystä. (Tran et al. 2008, 1) Nuohoushöyry otetaan usein tuulimien kokoojakammioista, jolloin nuohoushöyryn paine lasketaan nuohoushöyryventtiili-

lillä 21-24 bar:iin kuvan 22a mukaisesti. Nuohoushöyry voidaan ottaa myös turbiinin ensimmäisistä väliotoista korkeammassa paineessa tai väli- tai matalapaineisena 10-17 bar:n höyrynä kuten kuvassa 22b. Tällä säästetään tuorehöyryn kulutusta, koska höyryä ei tarvitse ottaa tulistimen höyrylinjasta. (Tran et al. 2008, 1)



Kuva 22. Korkeapaineisen (a) ja matalapaineisen (b) nuohoushöyryn käyttö (Tran et al. 2008, 2)

Jos nuohouksessa käytetään matalapaineista höyryä, tulee huomioida, että nuohoussuuttimen dynaaminen paine eli PIP (engl. peak impact pressure) ja nuohoustehokkuus laskevat. Nuohoustehokkuus luonnollisesti laskee, kun höyryn paine ja lämpötila ovat alhaisemmat, mikä vaikuttaa höyrystiivytteen tunkeutuvuuteen ja puhdistuskykyyn. Lisäksi nuohoushöyry sisältää usein pienen määrän lauhdetta. Matalapaineista höyryä käytettäessä nuohoukseen tulee ohjata suurempi höyryn virtaus, mikä voidaan toteuttaa optimoiduilla tehokkailla ja suuremmilla suuttimilla. Esimerkiksi höyryvirtauksen lisääminen 15-20 %:lla 14 bar:n nuohouspaineella, voidaan päästä riittävään nuohoustehokkuuteen. (Tran et al. 2008, 1)

2.5.3 Nuohouksen suuttimet

Nuohouksen tehokkuuteen vaikuttaa höyryn parametrien ohella suutintyyppi, jolla höyry ohjataan lämpöpinnoille. Nuohouksessa on siirrytty käyttämään täydellisesti laajenevia suutinpäitä (engl. fully-expanded nozzles) heikosti laajenevien suuttimien (engl. under-expanded) sijaan, koska puhdistusta heikentävät shokkiaallot ovat vähentyneet ja siten puhdistusteho on kasvanut huomattavasti. Samalla höyryn kulutuksella täydellisesti laajenevien suuttimien puhdistusteho on moninkertainen aiemmin käytettyyn suutinmalliin. (Tran et al. 2015b, 7)

Suurimmat nuohointoimittajat ovat jatkaneet suutinpäiden kehitystä parantaen entisestään nuohointen puhdistustehokkuutta ja vähentäneet siten nuohoushöyryn kulutusta. Kuvassa 23 on esitetty Diamond Powerin ja Clyde Bergemannin suurtehosuuttimet, jotka ovat nykyisin yleisimmin käytössä uusissa soodakattiloissa.



Diamond Powerin Gemini-suutin



Clyde Bergemannin CFE-suutin

Kuva 23. Kahden nuohointoimittajan suurtehonuohoussuuttimet (Tran et al. 2015b, 6)

3 POLTTOLIPEÄN RUISKUTUS JA PALAMINEN

Mustalipeä on jäteliemeksikin kutsuttu soodakattilassa poltettava nestemäinen polttoaine. Paljon epäorgaanista ainesta sisältävä mustalipeä on haastava polttoaine johtuen sen matalasta lämpöarvosta sekä korkeasta vesi- ja tuhkapitoisuudesta. Tästä johtuen mustalipeän polttoon liittyy erityisiä piirteitä. (Bajpai 2017, 78) Tässä luvussa tutustutaan mustalipeän ruiskutukseen ja palamisvaiheisiin sekä niihin vaikuttaviin ominaisuuksiin.

3.1 Mustalipeä

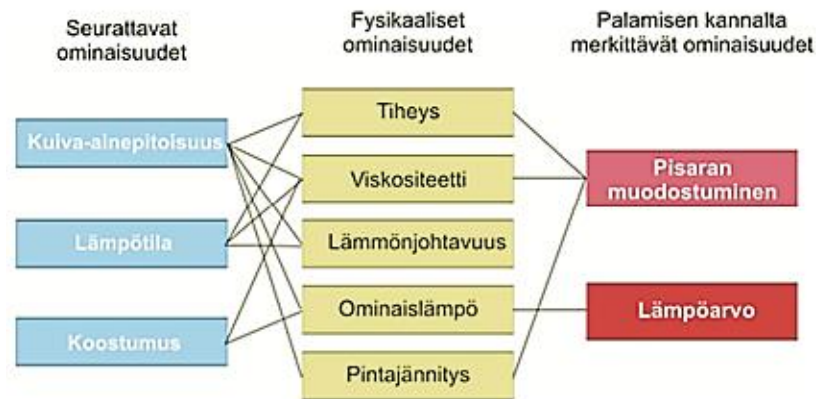
Mustalipeä on epäorgaanisista yhdisteistä eli erilaisista natrium- ja rikkiyhdisteistä koostuva sellunkeiton välituote, joka syntyy sellunkeitossa, kun keittokemikaalien vaikuttavat alkalit eli natriumhydroksidi (NaOH) ja natriumsulfidi (Na_2S) liuottavat puukuituja sitovan orgaanisen aineen keittokemikaalien joukkoon. Mustalipeää erottuu myös sellun pesuvaiheissa. (Raiko et al. 2002, 522)

Mustalipeä sisältää myös orgaanisia yhdisteitä eli ligniiniä, hemiselluloosaa ja uuteaineita, jotka palavat ja palaessa luovuttavat runsaasti lämpöä soodakattilassa. Vaikuttavien alkalien lisäksi mustalipeä sisältää myös natriumkarbonaattia (Na_2CO_3), natriumsulfaattia (Na_2SO_4) ja natriumtiosulfaattia ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$). Sellun pesu ja haihdutus muuttavat kuitenkin mustalipeän koostumusta, sillä pesuvaiheessa ilman happi hapettaa mustalipeän natriumsulfidin polysulfidiksi tai natriumtiosulfaatiksi ja haihduttaessa mustalipeän sisältämä rikkivety ja metanoli haihtuvat. (Knowpulp 2015) Havusellun keitossa syntyneen mustalipeän tyypillinen koostumus on esitetty taulukossa 1. Arvot ovat prosenttiosuuksia polttolipeän kuiva-aineessa.

Taulukko 1. Havumustalipeän koostumukset (Alakangas et al. 2016, 113)

	Tyypillinen koostumus [%]
Hiili, C	35
Vety, H	3,6
Typpi, N	0,1
Happi, O	33,9
Natrium, Na	19,4
Kalium, K	1,8
Kloori, Cl	0,5
Rikki, S	5,5
Muut	0,2
Kalorimetrinen lämpöarvo [MJ/kg]	14,2

Kuvassa 24 on esitetty mustalipeän palamiseen vaikuttavat prosessisuureet sekä mustalipeän fysikaaliset ominaisuudet. Kuiva-ainepitoisuuden ja koostumuksen lisäksi tärkein mustalipeän seurattava suure on lämpötila, koska se vaikuttaa mustalipeän tiheyteen sekä viskositeettiin ja siten mustalipeän pisaroitumiseen. (Alakangas et al. 2016, 115 & Adams et al. 1997, 61)

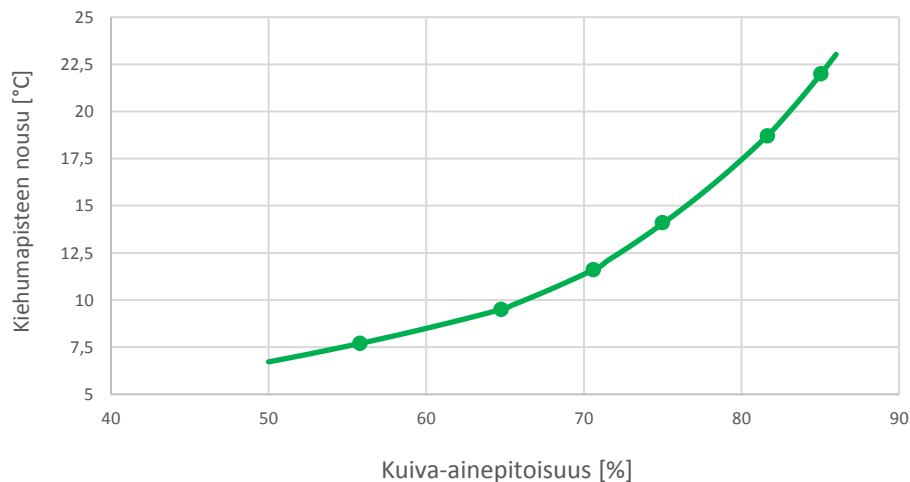
**Kuva 24.** Mustalipeän ruiskutukseen vaikuttavat prosessisuureet ja fysikaaliset ominaisuudet (Alakangas et al. 2016, 115)

3.1.1 Kuiva-ainepitoisuuden vaikutus mustalipeän ominaisuuksiin

Keitto- ja pesuvaiheista erotetun mustalipeän kuiva-ainepitoisuus vaihtelee normaalisti 14-18 %:n välillä, minkä vuoksi ylimääräinen vesi joudutaan haihduttamaan haihduttamalla. Polttoon kelpaavan mustalipeän kuiva-ainepitoisuus vaihtelee normaalisti 72-85 %:n välillä. (Suhr et al. 2015, 205)

Kuiva-ainepitoisuus vaikuttaa kaikkiin mustalipeän fysikaalisiin ominaisuuksiin, sillä mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden nostaminen kasvattaa mustalipeän tiheyttä ja viskositeettia, kun taas kosteuden väheneminen laskee lämmönjohtokykyä ja ominaislämpöä. Koska kuiva-ainepitoisuuden nostaminen muuttaa mustalipeän fysikaalisia ominaisuuksia, muuttaa se myös mustalipeän kiehumapisteen nousua (lyh. BPR, engl. boiling point rise) eli lämpötilaeroa, joka kuvaa mustalipeän ja veden kiehumispisteiden eroa samassa paineessa. (Knowpulp 2015)

Kuvassa 25 on esitetty erään tehtaan polttolipeän BPR-käyrä, josta havaitaan, että mustalipeän kiehumispiste kasvaa jyrkästi korkeilla kuiva-ainepitoisuuksilla. Jotta kuiva-ainepitoisuutta nostettaessa pystytään säilyttämään samat ruiskutusominaisuudet, täytyy mustalipeän ruiskutuslämpötilaa nostaa.

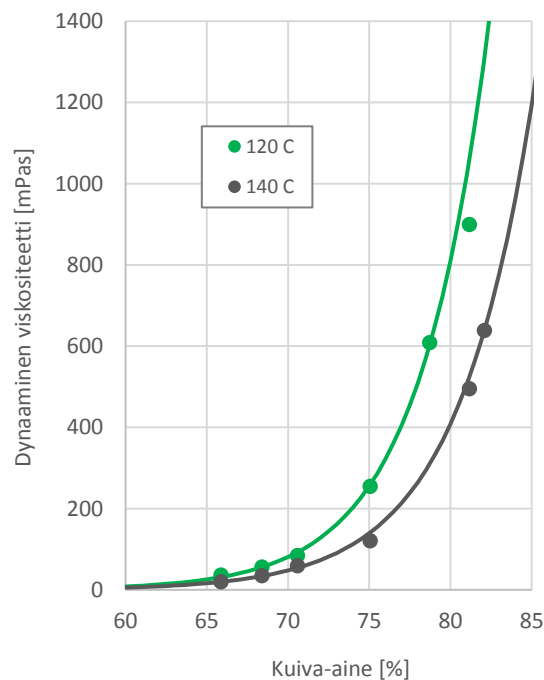


Kuva 25. Kuiva-aineen vaikutus polttolipeän kiehumapisteen nousuun

3.1.2 Jäännösalkalipitoisuuden vaikutus mustalipeän ominaisuuksiin

Jäännösalkali kuvaa alkalien määrää mustalipeässä keittoprosessin jälkeen. Jäännösalkalipitoisuus on riippuvainen keiton kappaluvusta, puuraaka-aineen laadusta, hakkeen koosta sekä valkaisuprosessista, mistä syystä sille ei ole olemassa tarkkaa ohjearvoa. Liian pienillä alkaliannoksilla ligniini saattaa saostua uudelleen, kun taas liian suurilla jäännösalkalin arvoilla kalliita alkaleja kulutetaan turhaan. Tyypillisesti jäännösalkalipitoisuus vaihtelee tehtailta kuitenkin 5-10 g/l välillä. (Knowpulp 2015)

Mustalipeän jäännösalkalipitoisuus vaikuttaa siis orgaanisen aineen liukenemiseen mustalipeään ja laskee mustalipeän viskooseja ominaisuuksia. Jos jäännösalkalipitoisuus on haluttua korkeampi, se pitää orgaanisen materiaalin liukoisena ja samalla laskee mustalipeän kokonaisviskositeettia. Matalalla jäännösalkalipitoisuudella mustalipeän viskositeetti on siis luonnollisesti korkeampi. (NALCO 2017) Jotta mustalipeän pisaroitumisominaisuudet eivät muutu, täytyy mustalipeän ruiskutuslämpötilaa kasvattaa. Kuvassa 26 on esitetty erään tehtaan mustalipeän viskositeetit 120 °C:n ja 140 °C:n lämpötiloissa kuiva-aineen funktiona.



Kuva 26. Polttolipeän dynaaminen viskositeetti 120 °C:ssa ja 140 °C:ssa

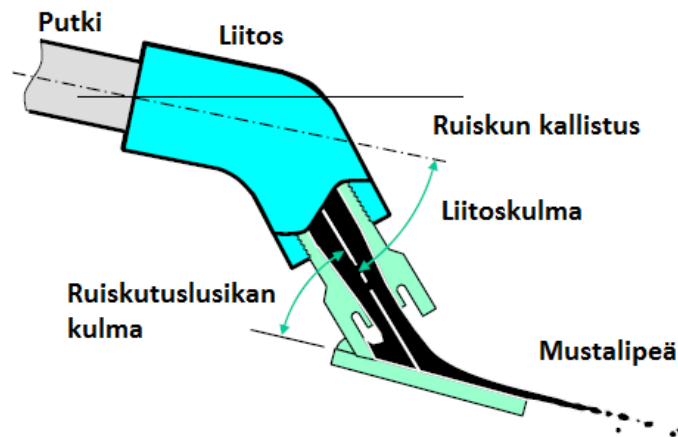
3.1.3 Suopa- ja mäntyöljypitoisuuden vaikutus mustalipeän ominaisuuksiin

Mustalipeä sisältää suopaa tyypillisesti noin 1 %, mutta tehtailla, joilla ei ole erillistä mäntyöljyntuotantoa, mustalipeän suopapitoisuus voi olla jopa 2,5 %. Suopapitoisuuden muuttuminen aiheuttaa vaihtelua mustalipeän laadussa, mistä syystä se luo haasteita soodakattilan operointiin ja mustalipeän tuotantoon. Suovan huono erotus laskee mustalipeän tuotantokapasiteettia ja samalla lisää soodakattilan likaantumista sekä TRS-päästöjä jo pienillä pitoisuuksilla. Toisaalta korkea suopapitoisuus edistää palamisprosessia, parantaa höyryntuotannon tehokkuutta sekä kasvattaa keon lämpötilaa, koska suovan lämpöarvo on jopa kaksinkertainen mustalipeään verrattuna. Tämä parantaa soodakattilan reduktioastetta ja helpottaa SO₂-päästöjen hallintaa. (Allen et al. 2007, 2, 32-34)

Suovalla on lisäksi mustalipeää korkeampi viskositeetti eikä se liukene täydellisesti mustalipeään, mistä johtuen polttolipeäpisaroiden jakauma kasvaa ja ruiskutuksessa syntyy erikoisia hienoja ja karkeajakoisia pisaroita. Samalla myös polttolipeäpisanan palamisaika muuttuu. Korkea suopapitoisuus siirtääkin polttolipeän palamisen suspensioon ja lisää karkeavien pisaroiden eli carryoverin määrää, mikä lisää tulistinalueen likaantumista. Korkeilla suopa- ja mäntyöljypitoisuuksilla tuleekin polttolipeäruiskujen kulmaa laskea alemmaksi, jotta pisarat suuntautuvat nopeammin tulipesään eivätkä karkaa tulipesän yläosiin. Matalammilla polttolipeän lämpötiloilla ja alhaisilla ruiskun kulmilla, tulee primääri-ilmaa kuitenkin lisätä, jotta keon lämpötila ei laske liian alhaiseksi.

3.2 Mustalipeän ruiskutus

Mustalipeä ruiskutetaan soodakattilan tulipesään kuvan 27 mukaisten lipeäsuuttimien avulla pisaramaisena suihkuna. Polttolipeän leviäminen tasaisesti tulipesän pelkistymisalueelle riippuu polttolipeän pisaroitumisesta, mikä vaikuttaa merkittävästi polttolipeän palamisen, sulakeon toiminnan, rikin reduktion, savukaasujen sekoittumisen sekä carryoverin hallintaan. Sulakeon ja palamisen perusteella säädetään polttolipeän ruiskutuslämpötilaa, joka tyypillisesti vaihtelee 115-143 °C:n välillä 65-80 %:n kuiva-aineella. (Wessel 2008, 1-2, 5)



Kuva 27. Esimerkki käytetystä lusikkasuuttimesta (muokattu lähteestä Wessel 2008, 3)

Hyvin toimivassa soodakattilassa pisarakoko pyritään säätämään optimaaliseksi eli tyypillisesti 2-4 mm välille, jotta pisarat ehtivät kuivua ennen päätymistään tulipesään eivätkä karkea tulipesän yläosiin aiheuttaen carryoveria. Tällöin on myös tärkeää, että lipeäruiskujen asettelu, asento ja ruiskutus pysyvät vakaana. Pisarakoko vaikuttaa myös polttolipeän palamisen sijaintiin tulipesässä, sillä pisarakoon pienentyessä palaminen siirtyy suspensioon, mikä pienentää koksen määrän siirtymistä tulipesään ja pienentää siten sulakeon korkeutta.

Sulakeon hallinnan kannalta on tärkeää, että polttolipeäsuihku jakautuu tasaisesti tulipesän sulakekoon, jotta estetään polttolipeän haitallinen kerrostuminen tulipesän seinille. Sulakeon symmetria, lämmönsiirron maksimointi sekä hyvä rikin reduktio kertoo onnistuneesta lipeän ruiskutuksen hallinnasta. Ruiskutusta hallitaan polttolipeän lämpötilalla, tilavuusvirralla, suutintyyppillä, sen koolla sekä polttolipeäruiskujen määrällä, mitkä taas vaikuttavat polttolipeän virtausnopeuteen ja paineeseen suuttimessa. Esimerkiksi polttolipeäruiskuja lisäämällä, paine suuttimessa pienenee ja siten kasvattaa pisarakokoa.

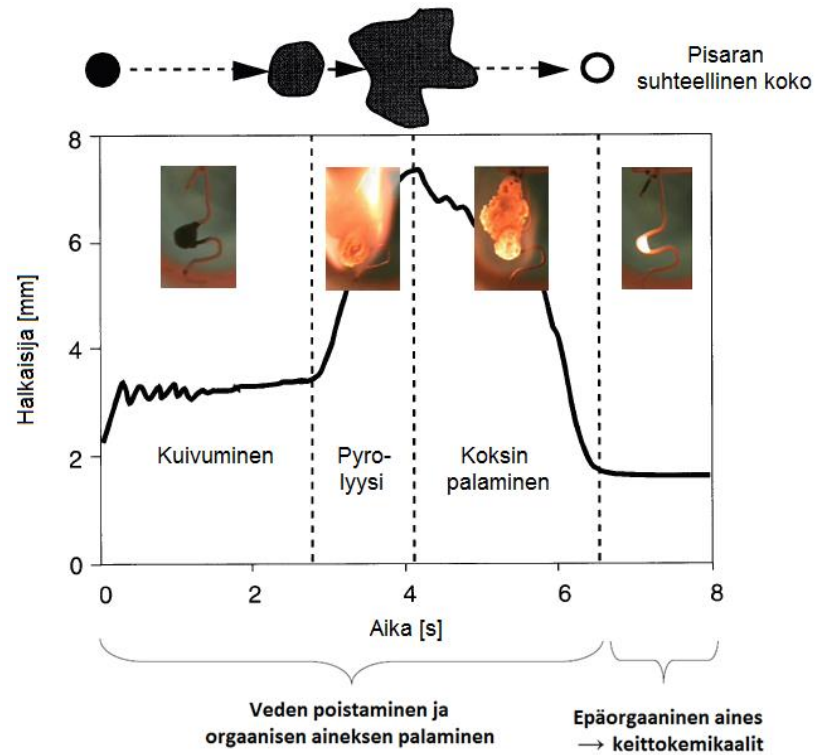
Polttolipeän lämpötilaa nostamalla lasketaan viskositeettia, mikä myös pienentää polttolipeäpisaran kokoa. Riittävän korkealla lämpötilalla varmistetaan polttolipeän riittävä juoksevuus sekä esteetön kulkeminen polttolipeänsyöttöjärjestelmässä ilman merkittäviä painehäviöitä. Polttolipeän lämpötilan hallinta on ruiskutuksen kannalta erittäin oleellista, sillä lämpötilan noustessa liian korkeaksi, polttolipeävirtauksen paisuntakiehumisen eli niin sanottu

flashing-ilmiö aiheuttaa suuttimessa merkittäviä ongelmia ja saattaa pahimmillaan kiehauttaa lipeän ruiskussa ja siten estää lipeän kulkeutumisen tulipesään. (Wessel 2008, 5)

Flashing-ilmiö aiheutuu liian suuresta nopeudesta suuttimessa, mikä synnyttää höyrykuplia virtaavaan polttolipeään ja hajottaa suihkun, jolloin polttolipeäsuihku ei levittäydy tasaisesti tulipesään vaan kulkeutuu tulipesän seinille ja epätasaisesti sulakekoon. Monesti tyypillinen operointialue kuitenkin sijaitsee niin sanotulla flashing-alueella, mikä aiheuttaa ongelmia ruiskutuksessa ja operoinnissa. Esimerkiksi Suomessa polttolipeä syötetään soodakattilan tulipesään kiehumispistettä korkeammassa lämpötilassa. (Vakkilainen sähköpostikeskustelu 19.10.2017)

3.3 Mustalipeän palamisen vaiheet

Mustalipeän palaminen on hyvin samanlainen prosessi kuin monella kiinteällä polttoaineella, kuten hiilellä ja puulla, sillä mustalipeän palaminenkin tapahtuu kolmessa vaiheessa: kuivaminen, pyrolyysi ja koksen palaminen. Polttolipeäpisara kuitenkin paisuu palaessaan huomattavasti enemmän muihin polttoaineisiin verrattuna. Lisäksi polttolipeä sisältää kiinteässä aineessa suuren määrän epäorgaanisia aineksia, joilla on alhainen sulamispiste. Orgaanisen aineksen palaessa polttolipeäpisaran sisältämä vesi haihtuu ja pisara siirtyy lopulta palaneena sulana sulakekoon muodostaen kemikaalisulaa. Polttolipeäpisaran palaminen on nopea reaktio, mikä on havainnollistettu kuvassa 28. (Adams 1997, 132-133)



Kuva 28. Mustalipeän palamisen vaiheet (muokattu lähteestä Vakkilainen 2005, 4-1)

Kuivumisvaiheessa pisarakoosta ja tulipesän lämpötilasta riippuen polttolipeäpisaran sisältämä vesi haihtuu noin 0,5-3 sekunnissa. Pisara kuivaa ensin tulipesässä säteilyn ja konvektion vaikutuksesta ennen kuin lämpö siirtyy pisarassa konduktiolla. Pisara paisuu kuivumisen alussa n. 1,5 kertaiseksi, mutta palamisen alkuvaiheessa koko vaihtelee kiehumisen vuoksi. Pisaran kuivumisessa tulipesän lämpö menee höyrystymiseen ja tästä syystä pisaran lämpötila ei nouse kuivumisvaiheessa merkittävästi. Pisara ei lisäksi luovuta kaikkea vettä kuivaessaan, vaan palava polttolipeäpisara sisältää noin 5 % vettä vielä kuivumisen päätteenä. (Raiko et al. 2002, 535 & Bajpai 2017, 80)

Kuivumisen jälkeen polttolipeäpisara luovuttaa haihtuvia aineita ja lisäksi pisara pyrolysoituu, jolloin pisaran tilavuus kasvaa. Jos ympäröivissä olosuhteissa on riittävästi happea ja riittävän korkea lämpötila, pyrolyysin tuotekaasut vapautuvat ja syttyvät muodostaen silminnähtävän liekin. Toisinaan haihtuvien kaasujen haihtuminen on sen verran suurta, että pisara ei pääse kosketuksiin hapen kanssa tulipesässä ja olosuhteet pisarassa muistuttavatkin pyrolyysiä tai lämpenemistä inertissä ympäristössä. (Vakkilainen 2005, 4-3)

Haihtuvien aineiden poistuminen ja pyrolyysi ovat erityisen nopeita reaktioita, jonka aikana haihtuvien kaasujen haihtuminen tapahtuu pisaran ulkokuorella, jolloin pyrolysoimaton osuus jää pisaraan. (Vakkilainen 2005, 4-3) Pisanan lämpötila kasvaa korkeaksi pyrolyysivaiheessa, sillä pisara on menettänyt suurimman osan kosteudestaan eikä veden höyrystymisen sijaan enää tulipesästä siirtyvää lämpöä. Pisanan koko kasvaa vaiheessa moninkertaiseksi, mutta lopulta kasvu pysähtyy ja pisaraa ympäröivä liekki sammuu. Tällöin pisarasta on jäljellä enää huokoista kiinteää koksia, sillä pisara on luovuttanut kaiken haihtuvan aineksen. (Raiko et al. 2002, 535)

Koksin palaminen tapahtuu ilman näkyvää liekkiä ja koksi palaa ulkopinnaltaan palamisilman vaikutuksesta ja kutistuu hiilen palaessa pois. Tulipesän happipitoisuus ja lämpötila, polttolipeäpisanan koko sekä pisanan paisuminen pyrolyysivaiheessa vaikuttavat koksin palamiseen kuluvaan aikaan, joka on tyypillisesti 2-5 sekunnin välillä keskikokoisella pisaralla. Kuitenkin 5 %:n hapella palamisaika voi olla jopa kymmeniä sekunteja. (Adams 1997, 152 & Raiko et al. 2002, 537)

Koksin palaessa kiinteä hiili palaa pois ja jäljelle jää sula epäorgaaninen kemikaalisula, jonka koostumus on nähtävissä kuvasta 2. Täydellisessä prosessissa polttolipeän natriumsulfaatti pelkistyy natriumsulfidiksi ja natriumin suuren määrän vuoksi, kaikki natrium ei sitoudu kaiken rikin kanssa vaan muodostaa myös natriumkarbonaattia reagoidessaan hiilen kanssa. Kuten aiemmin luvussa on mainittu, runsaan hapen seurassa natriumsulfidi hapettuu takaisin natriumsulfaatiksi yhtälön 2.1 mukaisesti. Tämän vuoksi onnistuneessa palamisprosessissa palava koksi saavuttaa sulakeon pinnan vielä palaessaan, jolloin sula vapautuu koksisista eikä hapeta sulfidia sulfaatiksi. (Raiko et al. 2002, 538)

4 SOODAKATTILAN TUKKEUTUMINEN

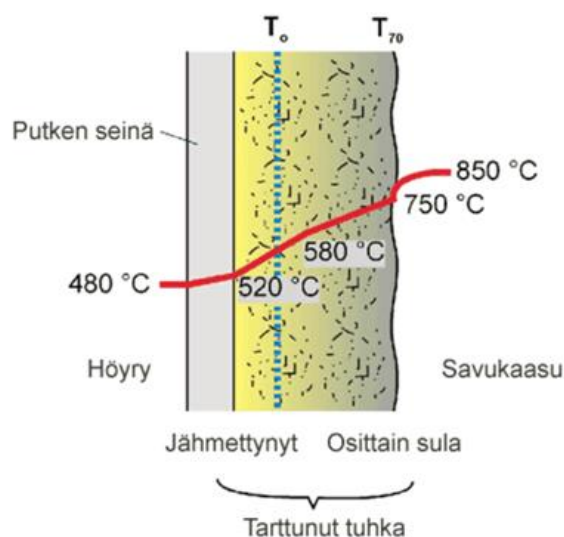
Tehtaan tasaisen ja tehokkaan tuotannon varmistamiseksi on erityisen tärkeää, että soodakattila toimii luotettavasti. Tästä syystä soodakattilan rakenneratkaisut vaikuttavat merkittävästi käyttövarmuuteen, sillä likaantuminen ja tukkeutuminen ovat tyypillisimpiä ongelmia soodakattiloiden käytössä. Pahimmassa tapauksessa tukkeutuminen aiheuttaa useita vesipesuja vuodessa ja näin ollen pysäyttää soodakattilan tuotannon päiviksi. (Knowpulp 2015 & Suhr et al. 2015, 359) Tässä luvussa tutustutaankin lämpöpinnan likaantumisen mekanismeihin tulistinalueella ja soodakattilan loppuosassa sekä käydään läpi tukkeutumisen estämiskeinoja ja -tekniikoita. Kuvasta 29 on nähtävissä savukaasukanavan oikealta puolelta tukkeutunut tulistin.



Kuva 29. Oikealta puolelta tukkeutunut tulistinalue (Kimmo Penttinen)

4.1 Lämpöpinnan likaantuminen

Likaantumisella tarkoitetaan epätoivotun materiaalikerroksen kertymistä lämpöpinnalle, mikä on havainnollistettu kuvassa 30. Lämpöpinnan likaantuminen heikentää kattilan lämmönsiirtoa merkittäväksi, sillä likaantumiskerroksen lämmönjohtavuus on erityisen alhainen ja siten heikentää lämmönsiirron tehokkuutta. (Awad 2011, 505) Lisäksi likaantuminen tukkii savukaasukanavan virtauspoikkipinnan ja mahdollisesti jopa aiheuttaa rakennevikoja lämpöpinoilla epätasaisesta lämpövirrasta johtuen. Savukaasukanavan likaantuminen johtaa kattilan painehäviöiden nousemiseen sekä virtausnopeuksien haitalliseen kasvamiseen. (Vakkilainen 2016a, 5)

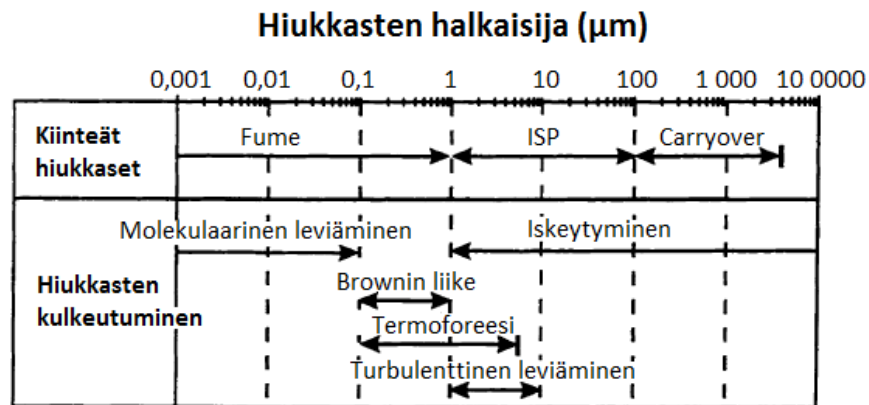


Kuva 30. Likaantunut lämpöpinta tulistinalueella (Knowpulp 2015)

Likaantuminen voidaan jakaa kolmeen osaan, sen ongelmallisuuden ja etenemisen perusteella: kuonaantuminen (engl. slagging), likaantuminen (engl. fouling) ja tukkeutuminen (engl. plugging). Kuonaantuminen tarkoittaa tulipesän säteilyalueiden likaantumista, jossa kuonakerros muodostuu sulaneesta kerrostumasta, joka ei kasva enää pinnan lämpötilan ylitäessä kuonaantumislämpötila. Likaantumisella tarkoitetaan kerrostuman muodostumista usein kattilan konvektio-osiin eli keittoputkistoon sekä ekonomaisereihin, joissa kerrostuma on alhaisemman lämpötilan vuoksi kiinteää. Tukkeutumisella tarkoitetaan kattilan lämpöpintojen likaantumisen etenemistä siihen pisteeseen, että savukaasukanava on täysin tai osittain tukkeutunut. (Raiko et al. 2002, 275)

4.1.1 Likaantumismekanismit

Hiukkasten kerääntyminen tapahtuu usealla eri tavalla riippuen hiukkasen koosta, savukaasuvirrasta, lämpöpinnan lämmönsiirtokertoimesta sekä kanavan lämpötilasta. (Goerg-Wood et al. 1998, 139) Erikokoisten hiukkasten kulkeutumisen ja likaantumismekanismien havainnollistettu kuva on kuvassa 31. (Mao 1997, 11)



Kuva 31. Eri kokoisten hiukkasten tarttumismekanismit (muokattu lähteestä Mao 1997, 11)

Savukaasuvirran ohittaessa lämpöpinnan kaasu kulkee hiukkasineen virtaviivaisesti väistäen putken. Kaikista pienimmät hiukkaset eli 0,1 μm kokoluokkaa tarttuvat lämpöpinnalle molekulaarisella leviämällä (engl. molecular diffusion), jossa hiukkaset seuraavat savukaasuvirtaa virtaviivaisesti ja niiden tarttuminen on riippuvainen savukaasujen sisältämien hiukkasten määrästä. (Shassan 2000, 26) Pienet eli 0,1-1 μm kokoluokan hiukkaset kulkeutuvat Brownin liikkeen (engl. Brownian motion) seurauksena sattumanvaraisesti savukaasuissa ja tarttuvat lämpöpinnoille elektrostaattisten voimien vaikutuksesta. (Goerg-Wood et al. 1998, 139)

Yli 1 μm kokoiset hiukkaset kulkeutuvat satunnaisesti turbulenttisen virtauksen mukana ja tarttuvat lämpöpinnoille hiukkasten saavutettua riittävä nopeus läpäistäkseen laminaarisen kerroksen. Näiden hiukkasten leviämistä kutsutaan turbulenttiseksi leviämiseksi (engl. turbulent diffusion). (Shassan 2000, 26) Hiukkaskoon vaihdellessa 0,1-10 μm välillä, termoforeesi on yleisin syy hiukkasten tarttumiseen. Termoforeesi perustuu eri nopeuksilla liikkuvien kaasumolekyylien ja aerosolihiukkasten sattumanvaraisiin törmäyksiin, joiden seurauksena

hiukkaset ohjautuvat lämpöpintoja kohti. Törmäyksissä vapautuva energia on suurempi kuumalla pinnalla, joten törmäysten energiaero aiheuttaa hiukkasten siirtymisen kohti viileämpää aluetta. (Cameron et al. 1999, 51)

Suuret eli yli 10 µm hiukkaset eivät pysy savukaasuvirran mukana vaan iskeytyvät (engl. internal impaction) lämpöpintoihin aiheuttaen kasauman lämpöpinnalle. Esimerkiksi carryover-kerrostuma koostuu pääsääntöisesti juuri iskeytyneistä sulapisaroista tulistinpinnoilla. (Wessel et al. 2007, 1 & Adams et al. 1997, 267) Kulkeutumisen lisäksi hiukkaset voivat tarttua lämpöpinnoille höyrystymisdiffuusion eli kristallisaation (engl. vapor diffusion tai crystallization) vaikutuksesta. Höyrystymisdiffuusiosta lämpöpinnan rakenneosan osapaine nousee tasapainotilaa korkeammaksi ja aiheuttaa höyrystyneiden aineiden tiivistymisen lämpöpinnoille. Rikkisulfaattihöyryistä johtuvaa kerrostumista tutkittaessa on todettu, että kastepistelämpötilan ylittäminen vähentää kerrostumista. (Goerg-Wood et al. 1998, 139)

4.1.2 Savukaasujen hiukkaset

Carryover, ISP (engl. Intermediate Sized Particle) eli keskikokoiset hiukkaset, tiivistynyt lentotuhka (engl. fume) sekä tuhkapöly (engl. dust) kerrostuvat helposti aiheuttaen lämpöpinnan likaantumista. (Tran 2015, 3-4) Carryoverissa osittain sulanut hiukkanen tai osittain palanut polttoliipeä kulkeutuu savukaasujen mukana lämpöpinnoille ja aiheuttaa normaalisti kuvan 32a mukaisen tumman, sulaneen ja erittäin kovan kerrostuman. Joskus sulat polttoliipeäpysarat muodostavat pinnalle myös ruskeita pisteitä, kuten kuvasta 32b näkyy. (Tran 2015, 1)



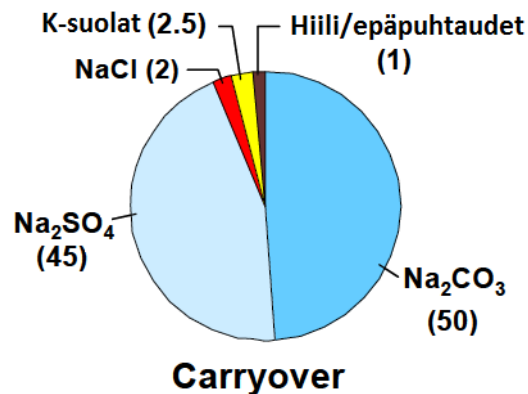
(a)



(b)

Kuva 32. Carryoverin (a) ja fumen (b) aiheuttamat likaantumukset (Kimmo Penttinen)

Carryover-kerrostuma koostuu pääsääntöisesti natriumkarbonaatista ja -sulfaatista, kuten kuvassa 33 on esitetty. Tulipesän yläosissa hapettavissa olosuhteissa natriumsulfidi hapetuu natriumsulfaatiksi ja koostumus vastaa hapettuneen sulan koostumusta. Kerrostuneiden hiukkasten natriumkarbonaatti reagoi rikin oksidien kanssa muodostaen natriumsulfaattia, mistä johtuen carryover-kerrostuma tulistinpinnalla sisältääkin enemmän natriumkarbonaattia ja vähemmän sulfaattia kuin tiivistynyt lentotuhka, kuten kuvasta 34a voidaan huomata. Lisäksi kerrostuman sisältämät kloridit haihtuvat pois. Kerrostuma sisältää myös pieniä määriä kaliumsuolaa ja epäpuhtauksia. (Tran 2015, 3) Carryoveriin tutustutaan tarkemmin kappaleessa 4.2.1.



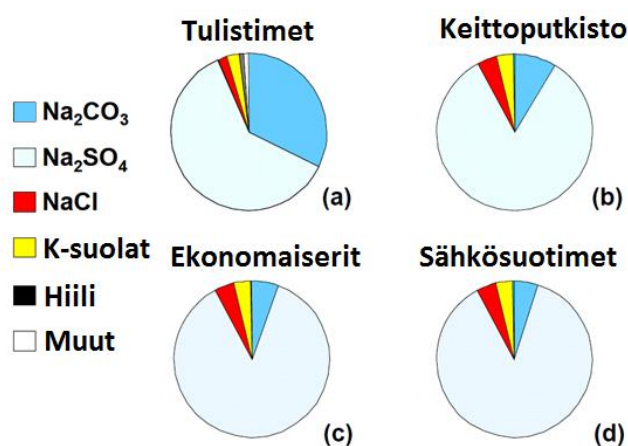
Kuva 33. Carryover-kerrostuman tyypillinen koostumus (Tran 2015, 3)

Tiivistynyt lentotuhka eli fume muodostuu savukaasuihin natrium- ja kaliumhöyryjen tiivistyessä ja on usein valkeaa ja pehmyttä kuten kuvassa 32b. Tiivistyminen tapahtuu joko suoraan kaasumaisessa muodossa muodostaen hienojakoisia partikkeleita jäähtyneelle pinnalle tai epäsuorasti muodostamalla lentotuhkapartikkeleita savukaasuvirtaan, jonka mukana partikkelit kulkeutuvat savukaasuja viileämmälle pinnalle.

Tiivistyneen lentotuhkan koostumus muuttuu runsaasti tulipesän alaosaan yläosaan siirryttäessä, koska se koostuu pienistä hiukkasista, jotka ovat erittäin herkkiä reagoimaan. Yläosan hapettavissa olosuhteissa alaosaan muodostunut rikkivety (H_2S) muuttuu savukaasuissa rikkidioksidiksi, joka taas reagoi hydroksidien kanssa muodostaen sulfaattia. Lisäksi osa natriumkarbonaatista ja klorideista muodostaa sulfaatteja. Tulipesän yläosan tiivistyneen

tuhkan koostumus on esitetty kuvassa 34b ja se sisältää suurimmaksi osaksi natriumsulfaattia. Tiivistynyt tuhka sisältää tyypillisesti carryover-kerrostumaa enemmän natriumsulfaattia, kloridia, kaliumia, mutta vähemmän natriumkarbonaattia.

ISP:n muodostuminen on huonommin tunnettu kuin edelliset, mutta sen uskotaan muodostuvan palamisen aikana hajonneista polttoliipeäpisaroista sekä sulakeosta irronneesta aineksesta koxsin palaessa. ISP:n kerrostuma on samanlaista kuin carryoverin, mutta väriltään valkeaa tai harmaata eikä sisällä koksia ja hiiltä. (Tran 2015, 1)



Kuva 34. Hiukkasten koostumus savukaasukanavan eri kohdissa (Tran 2015, 4)

4.1.3 Likaantumisen havainnointi

Soodakattiloiden likaantumisen ja tukkeutumisen havaitsemiseen on tyypillisesti käytetty savukaasukanavien painehäviön, höyryntuotannon, tuorehöyryn jäähdytysveden määrän, tulistimien, keittopinnan ja savukaasukanavan ulostuloslämpötilan sekä savukaasupuhaltimen nopeuden muutoksia. (Wahlman Toni keskustelu 12.10.2017)

Tulistimien likaantuminen voidaan helposti havaita tuorehöyryn lämpötilan kehityksestä, sillä likaantuminen heikentää tulistusta. Tuorehöyryn jäähdytysveden virtausmäärä on lisäksi erinomainen mittari tulistimen likaantumisen havainnoimiseksi. Ruiskutusveden vir-

tauksella pyritään pitämään höyryvirtauksen lämpötilaa vakiona, joten höyryn jäähdystarpeen vähentyessä huomataan lämpövirran laskevan ja lämpöpinnan likaantuneen. (Vakkilainen 2005, 8-5)

Lämpöpintojen likaantumisen havainnointi ja ennustaminen perustuu yksinkertaisimmillaan lämpötilan ja paineen mittauksiin tulipesässä sekä savukaasukanavassa. Tulistimien, keittoputkiston ja ekonomaiserien lämpötilamittausten avulla voidaan ennustaa kattilan olevan likaantunut, kun operointilämpötilat alkavat heikentyä lämpöpintojen välillä. Mittauspisteiden rajallinen määrä savukaasukanavassa kuitenkin aiheuttaa haasteita tukkeutumisen havaitsemiseksi, sillä tarkka ennustaminen vaatii huomattavasti enemmän mittausdataa kuin tavallisesti on käytettävissä.

Painemittausta hyödynnetään likaisuuden ennustamiseen asettamalla mittauspisteet lämpöpintojen molemmiin puoliin ja seuraamalla siten mittausten paine-eroa lämpöpinnan yli. Mitattuun painehäviöön vaikuttaa myös savukaasuvirta, joka on suoraan verrannollinen kattilan kuormitukseen, jota voidaan arvioida höyryvirtausmittauksen avulla. Skaalattu paine-ero saadaan yhtälöllä

$$d_p^* = d_p \left(\frac{q_{m,norm}}{q_{m,steam}} \right)^2 \quad (3.1)$$

missä

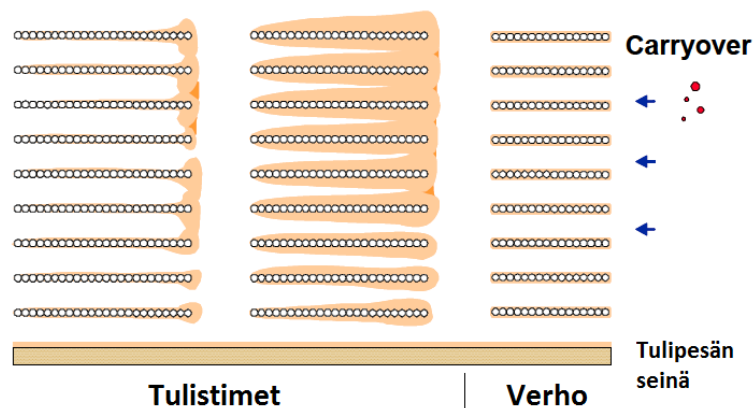
d_p^*	skaalattu paine-ero	[Pa]
d_p	mitattu paine-ero	[Pa]
$q_{m,steam}$	mitattu höyryvirtaus	[kg/s]
$q_{m,norm}$	nimellishöyrykapasiteetti	[kg/s]

Tulistimen painehäviö on aina pienempi kuin 10 Pa, joten käytännössä vain ekonomaisereiden ja keittoputkiston painehäviöillä voidaan ennustaa likaantumista. Ekonomaisereiden ja keittoputkiston painehäviö tasoittuu muutaman päivän päästä käynnistyksestä samalla kun kattilan kuormaa kasvatetaan. Vaikka tieto likaantumisesta voidaan päätellä painehäviön kasvusta, siitä ei suoraan voi päätellä lämpöpinnan tukkeutumisen tarkkaa sijaintia.

Lämpöpintojen likaantuminen kasvattaa kattilan vetohäviöitä, milloin soodakattila saattaa puhaltaa kipinöitä lipeäruiskujen aukoista. Vetohäviöiden kasvaessa tarvitaan suurempi veto tulipesään, jotta kattila pidetään alipaineisena. Tämä tarkoittaa, että savukaasupuhaltimen pyörimisnopeus kasvaa ja ohjaus lähenee täyttä kuormaa, mikä johtuu siis lämpöpintojen tukkeutumisesta. (Metsä Fibre 1998)

4.2 Tulistimien tukkeutuminen

Tulistinalueiden kerrostumat johtuvat pääsääntöisesti sulan materiaalin tarttumisesta lämpöpinnoille ja ovatkin siten riippuvaisia tuhkan sulamiskäyttäytymisestä. Käytännössä kerrostumat koostuvat carryover-hiukkasista, jotka iskeytyvät ja tarrautuvat tulistinpinnoille ja kiinteytyessään muodostavat kovan kerrostuman tulistinputkien pinnalle kuvan 35 mukaisesti. (Adams et al. 1997, 267)



Kuva 35. Tulistinalueen kerrostumisen muodostuminen (Tran 2015, 7)

Tulistimen alaosissa likakerroksen kasvaessa ympäröivä lämpötila nousee entisestään ja kerrostuma sulaa, kuonaantuu ja lopulta lopettaa kasvamisen, kun ympäröivä tila saavuttaa kuonaantumislämpötilan (engl. fluid temperature) T_{70} . Tällöin kerrostuman saavutettua tietty paksuus, ei likakerros siitäkään huolimatta enää kasva, vaikka savukaasut sisältäisivätkin sulia, kovia ja helposti kiinnittyviä hiukkasia.

Tulistimien viileämmissä yläosissa, savukaasujen lämpötila laskee lähelle tahma-lämpötilaa T_{15} (engl. sticky temperature), jolloin kerrostuma kasvaa rajattomasti kunnes lämpötila saavuttaa kuonaantumislämpötilan T_{70} . Iskeytyneet hiukkaset eivät irtoa ilman riittävän tehokasta nuohousta ja siten kerrostuma saattaa kasvaessaan tukkia koko savukaasukanavan. (Tran 2015, 6)

Likakerros muodostuu harvoin verhoputkistolle tahma-alueen sijaitessa tulistinalueella ja tästä syystä tarttuva kerros muodostuukin tyypillisesti tulistinalueen keskiosiin. Likaantuminen alkaakin tyypillisesti juuri tulistimen keskiosista. Tulistimen tukkeutuessa myös keittoputkiston kapea sisääntulo likaantuu helposti, koska savukaasut tulevat tällöin kuumempina keittopinnalle ja tarrautuvat sisääntulon seinämiin. (Adams et al. 1997, 268)

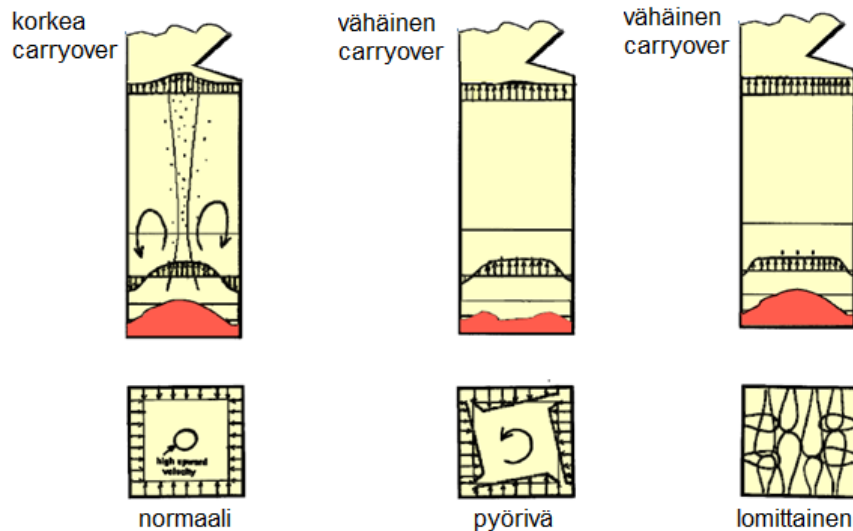
Koska tulistinalueen tukkeumat johtuvat tyypillisesti carryoverista, on tulistinalueen kerrostuman koostumus luonnollisesti hyvin samankaltainen carryover-hiukkasten kanssa. Tulistinalueen kerrostuma sisältää suuren määrän natriumkarbonaattia, mutta kaliumin ja kloorin määrä on alhaisempi kuin soodakattilan peräpään kerrostumissa. (Khalaj-Zadeh 2008, 15)

4.2.1 Carryover

Carryoverissa sulat tai osittain sulat polttoliipeäpisarat karkaavat soodakattilan yläosiin savukaasuvirran mukana. Tulistimen alaosissa savukaasun lämpötila on tyypillisesti yli 820 °C, jolloin carryover-hiukkaset voivat palaa soodakattilan yläosissa ympäröiviä savukaasuja kuumempana ja siten sulassa olomuodossa tarttuvat lämpöpinnolle. Vastavuoroisesti viileämmissä olosuhteissa carryover-hiukkaset iskeytyvät lämpöpinnalle tahma-alueella ja kasvavat rajattomasti, jos niiden kerrostumista ei estetä tehokkaalla nuohouksella. (Tran 2015, 6)

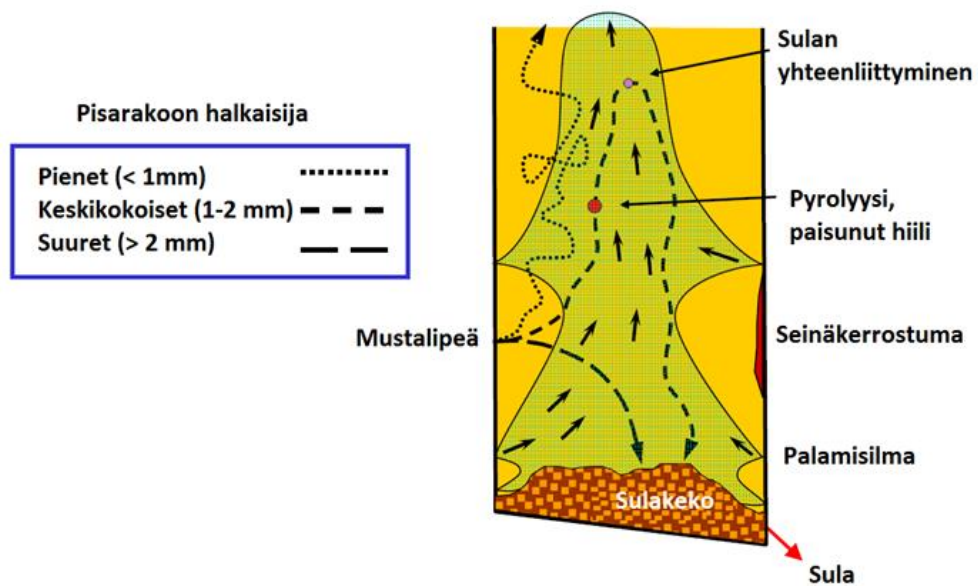
Carryover-hiukkaset tarttuvat tyypillisesti ensimmäisiin tulistimiin ja carryoverin määrä vähenee savukaasuissa keittopintaa kohti kuljettaessa. Carryover-hiukkasten löytyminen esimerkiksi ekonomaisereilta tai sähkösuotimilta onkin hyvin epätodennäköistä, vaikkakin mahdollista pieninä määrinä. (Salmenoja 2014, 2)

Kuvassa 36 on esitetty, miten sekundääri-ilman syöttö on vaikuttanut aiemmin soodakattilan carryovermääriin. Lomittaisella ilmasyötöllä onkin pystytty vähentämään carryoveria, koska palamisilma sekoittuu ja tunkeutuu tulipesässä tehokkaammin. Pyörivä ilmamalli on myös vähentänyt carryoveria, mutta kyseisistä malleista onkin siirrytty vertikaalisiin ilmansyöttöön, jossa ilma syötetään kahdelta seinältä lomittain tulipesään ilmavirtojen tasaamiseksi. (Vakkilainen 1996, 9-10)



Kuva 36. Eri ilmansyöttömallien vaikutus carryoveriin (muokattu lähteestä Vakkilainen 1996, 10)

Myös ruiskutukseen liittyvät ongelmat vaikuttavat syntyvän carryoverin määrään. Esimerkiksi polttoliipeäruiskun flashing-ilmio (paisuntakiehuminen) hajottaa suihkun, jolloin pisarakoko pienenee ja voivat karata tulipesän yläosiin. Liian pieni pisarakoko voi siis johtua liian korkeasta polttoliipeän lämpötilasta tai ruiskutusaineesta, koska ne laskevat polttoliipeän viskositeettia ja siten pienentävät pisarakokoa. Pisarakoko tulee optimoida 2-4 mm välille, jotta ruiskutuksessa syntyvät pisarat ovat riittävän kokoisia siirtymään suoraan sulakekoon. Kuvassa 37 on esitetty polttoliipeäpisaroiden kulkeutuminen tulipesässä. (Wessel 2008, 2, 5)



Kuva 37. Pisaroiden kulkeutuminen ja palaminen tulipesässä (Wessel 2008, 2)

Carryoverin koostumus vaihtelee palamisen vaiheen mukaan. Jos carryover-hiukkaset ovat täysin palaneet, ne sisältävät enemmän natriumsulfaattia ja niiden reduktio on korkea. Vaikka palaminen olisi tapahtunut alempana tulipesässä, rikin reaktiot ovat hitaita carryover-hiukkasille. Täysin palaneet carryover-hiukkaset ovat lisäksi väriltään vaaleanpunaisia tai punaisia ja niitä voi nähdä esimerkiksi tulistimen alaosan nuohoinlansseista. Sulat carryover-hiukkaset taas voidaan nähdä kirkkaina viiruina carryover-mittaussondissa. (Vakkilainen 2005, 8-8)

Carryoverin arvioiminen

Carryoverin tarkka mittaaminen on erittäin haastavaa, mistä syystä carryoverin määrää onkin pyritty arvioimaan usealla eri menetelmällä. Koska tulistimien tukkeutuminen johtuu suurimmaksi osaksi carryover-hiukkasista, voidaan carryoveria karkeasti arvioida samoin kuin tulistimien tukkeutumistakin. Toisin sanoen tuorehöyryn ruiskutusvirtauksen ja savu-kaasujen lämpötilan perusteella on mahdollista arvioida carryoverin aiheuttamaa kerrostumaa tulistimilla. (Vähä-Savo 2009, 3)

Carryoverin määrää voidaan arvioida esimerkiksi sondimittauksella, jossa carryoveria arvioidaan ilmajäähdytetyn tai jäähdyttämättömän metalliputken pinnalta visuaalisesti kerrostuman värin ja paksuuden perusteella. Normaalisti sondimittauksessa 1-2 m pitkä metalliputki työnnetään tulipesään soodakattilan luukusta nokan korkeudelta ja pidetään jäähdytyksestä riippuen tulipesässä 10 sekunnista useisiin minuutteihin. Carryover-hiukkaset kerrostuvat putken alapuolelle savukaasuvirran mukaisesti. (Vähä-Savo 2009, 4)

Vaihtoehtoisesti carryoverin määrää voidaan arvioida infrapunakameraa käyttäen. Niin sanottu kipinäkamera laskee kameran ohi lentävät taustasäteilyä kuumemmat carryover-hiukkaset. Infrapunakameran käyttäminen aiheuttaa kuitenkin haasteita, koska niitä täytyy jäähdyttää, linssiä pitää puhdistaa aktiivisesti eikä se kykene erottamaan hiukkasia, joiden lämpötila on sama taustasäteilyn kanssa.

4.2.2 Kloorin ja kaliumin vaikutus tuhkan sulamiskäyttäytymiseen

Natrium ja rikin lisäksi prosessissa kiertää myös vierasaineita (engl. non-process elements) kuten kaliumia, klooria, alumiinia, kalsiumia ja rautaa. (Hupa 2012, 7) Kemikaalikierron kannalta ongelmallisimpia näistä ovat kalium ja kloori, koska ne aiheuttavat soodakattilan lämpöpintojen likaantumista ja lämpökorroosiota sekä renkaan muodostumista meesauuilla. Kaliumin tai kloorin määrän lisääntyminen polttolipeässä laskee tuhkan sulamislämpötilaa ja kiihdyttää siten likaantumista tulipesän yläosissa. (Jordan et al. 1995, 1)

Kalium ja kloori ovat peräisin puun mineraaleista ja kertyvät prosessiin keittämöllä ja prosessivesien mukana. Lisäksi klooria saapuu prosessiin uittopuista, kemikaalien lisäyksen yhteydessä (esimerkiksi klooridioksidina, jätesuolana, jätehappona ja hypokloriittina) ja joskus myös massan valkaisuodoksien jätevesivirroista. Klooridioksidilaitoksen jätehappoa käytetään esimerkiksi mäntyöljylaitoksella suovan palstoituksessa ja jätesuolaa lisätään tarvittaessa haihduttamolle natrium- tai rikkitason nostamiseksi, jolloin klooria pääsee kertymään tehtaan kiertoon. Kloorin ja kaliumin määrä saattaa rikastua jopa 4-12 kertaiseksi suljetussa vesikierrossa. (Jordan et al. 1995, 1 & Hämäläinen Sanna keskustelu 26.10.2017)

Polttolipeän klooripitoisuus on tyypillisesti matala ja vaihtelee normaalisti 0,1-0,5 % välillä kuiva-aineessa. Joillakin kattiloilla klooripitoisuus voi olla kuitenkin selkeästi korkeampi ja esimerkiksi joissakin Pohjois-Amerikan tehtaissa se voi olla jopa yli 3-5 %, kun se pääsee rikastumaan prosessikierrossa. Kaliumpitoisuus polttolipeässä on tyypillisesti korkeampi kuin kloorin ja se vaihtelee noin 1-3 % välillä, mutta myös kaliumtaso nousee usein kaliumin rikastuessa suljetussa prosessikierrossa. Kaliumin ja kloorin rikastumista prosessikierrossa voidaan seurata rikastumiskertoimen avulla ja se vaihtelee tyypillisesti 2-4 välillä. Rikastumiskerroin lasketaan yhtälöllä (Hupa 2012, 7)

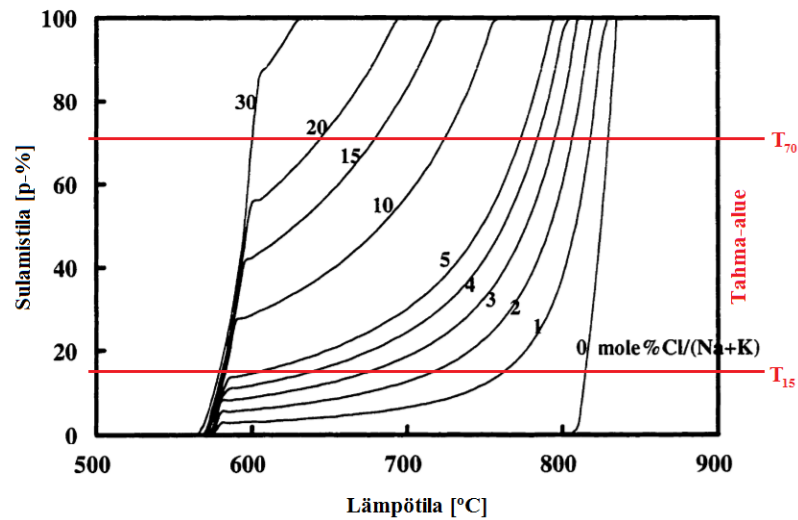
$$EF_X = \frac{\left(\frac{X}{Na}\right)_{sk}}{\left(\frac{X}{Na}\right)_{sula}} \quad (3.3)$$

missä

EF_X	rikastumiskerroin (kaliumille ja kloorille)	
Na	natriumpitoisuus	[%], [mg]
K	kaliumpitoisuus	[%], [mg]

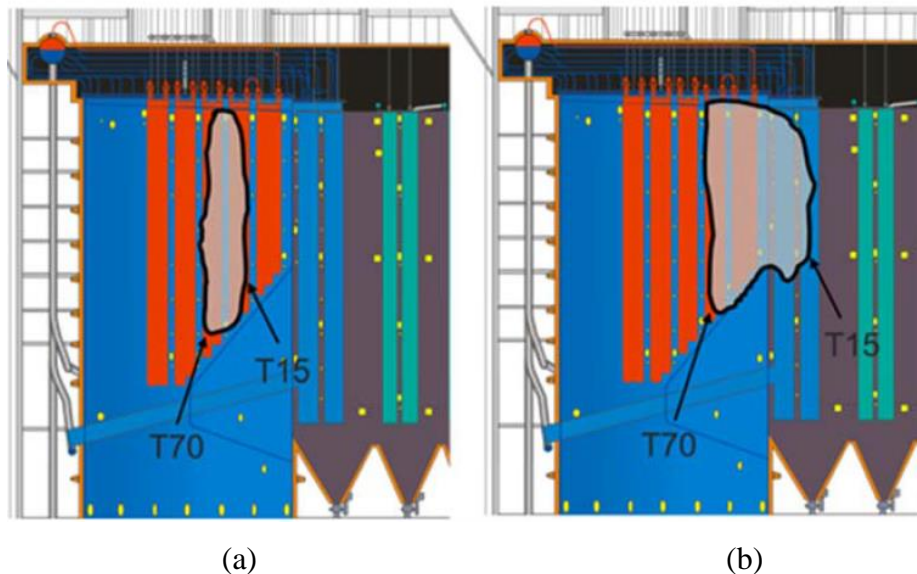
Lentotuhkan tahma-alueeksi (engl. sticky area) kutsutaan lämpötila-aluetta, jossa kerrostuma on sulassa olomuodossa 15-70 %:sti ja on erityisen tarttuvaa. Ensimmäisessä sulamislämpötilassa T_0 tuhka alkaa ensimmäisen kerran esiintyä sulassa olomuodossa. Tahma-lämpötilassa T_{15} tuhkasta 15 % on saavuttanut sulan olomuodon. Kuonaantumislämpötilassa T_{70} tuhka on 70 %:sti sulaa, jolloin tuhka on kokonaan juoksevaa. (Valmet 2015, 7) Kun sulapitoisuus nousee yli 70 %:n, tuhka on riittävän juoksevaa irrotakseen pinnalta ja muodostaa pinnalle vain noin 10-15 mm kerroksen. Ilmiötä kutsutaankin kuonaantumiseksi. (Adams et al. 1997, 267)

Korkea klooripitoisuus laskee tahma- ja kuonaantumislämpötilaa ja kaliumpitoisuus laskee ensimmäistä sulamislämpötilaa. Usein prosessin ulkopuoliset aineet voitaisiin karkeasti jakaa siten, että klooripitoisuus vaikuttaa enemmän tukkeutumisongelmiin ja kalium vuorostaan korroosioon. (Valmet 2015, 7) Koska kloori ja kalium kuitenkin esiintyvät prosessissa yhdessä, kuvaa 38 kloorin ja kaliumin yhteisvaikutusta sulamislämpötilaan. (Tran et al. 2002, 30)



Kuva 38. Tuhkan sulamisen riippuvuus lämpötilasta eri klooripitoisuuksilla, kun karbonaattipitoisuus on 20 % ja kaliumpitoisuus 5 %. (muokattu lähteestä Jorshari 2000, 57)

Tuhkan sulamiskäyttäytyminen vaikuttaa siis tahma-alueen sijaintiin kattilan lämpöpinnoilla. Matalilla kloori- ja kaliumpitoisuuksilla tahma-alue on kapea ja sijaitsee tulistimien etu- tai keskiosassa ja siten tarpeeksi kaukana tukkeutumiselle alttiista keittopinnan sisääntuloalueesta. Korkeat kloori- ja kaliumpitoisuudet kasvattavat tahma-alueen kokoa ja siirtävät sitä kohti keittopinnan sisääntuloaluetta kuvan 39 mukaisesti. (Valmet 2015, 7)



Kuva 39. Tahma-alueen mahdollinen sijainti matalilla (a) ja korkeilla (b) kalium- ja klooripitoisuuksilla (Valmet 2015, 7)

4.2.3 Riittämätön nuohous

Soodakattilan likaantuminen on vahvasti riippuvainen nuohouksen tehokkuudesta. Soodakattilan nuohous voi olla tehotonta johtuen tehottomista nuohoussuuttimista, liian suurista nuohousetäisyyksistä, liian harvasta nuohoussekvenssistä sekä alhaisesta nuohoushöyryn paineesta johtuen. (Tran 2015, 10) Nuohoussuutinten nuohoustehokkuus onkin suoraan riippuvainen nuohoushöyryn paineeseen kulmaventtiilillä. Vaaditut nuohouspaineet eri lämpöpinnoilla onkin listattu taulukkoon 2. (Diamond Power 2018) Luvussa 4.4.1 käsitellään tarkemmin soodakattilan nuohouksen tehokkuutta ja tehostamiskeinoja.

Taulukko 2. Vaadittu höyryn paine kulmaventtiilillä (Diamond Power 2018)

Sijainti	GEM [bar]	MPCS/STD [bar]
Tulistin	19-20	23-24
Keittopinta	19-20	23-24
Ekonomaiserit	17	20

4.3 Keittoputkiston ja ekonomaisereiden tukkeutuminen

Vaikka tiivistyneen lentotuhkan (engl. fume) ja tuhkapölyn (engl. dust) sintraantuminen aiheuttaakin eniten kerrostumia keittoputkistoilla ja ekonomaisereissa, saattaa myös carryover tukkia keittoputkiston savukaasukanavan sisääntuloaukkoja. Tulistimien likaantuessa lämpö ei siirry riittävästi tulistimilla höyryyn, jolloin savukaasut saapuvat keittoputkistolle liian kuumina ja tahma-alue siirtyy keittoputkiston alueelle. Koska savukaasukanava lisäksi supistuu keittoputkiston sisääntulossa, tulistimelta saapuvat tahmaavat hiukkaset tukkivat keittopinnan sisääntulon. (Tran 2015, 7)

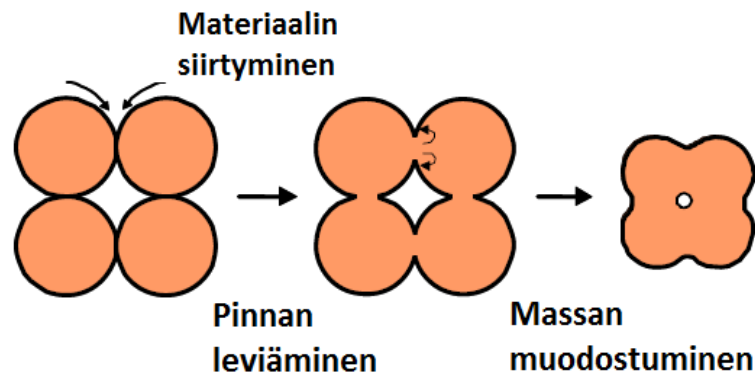
Hiukkasten tahmaavuus keittopinnalla riippuu lämpötilan lisäksi hiukkasten koostumuksesta ja sekoittumisasteesta tiivistyneen lentotuhkan (fumen) kanssa. Tyypillisesti savukaasujen lämpötila keittoputkistolla vaihtelee tulistimien likautumisasteesta riippuen 550-700°C:n välillä. Näiden lisäksi liian korkea kloori-pitoisuus lisää likaantumista keittoputkistolla.

Ekonomaisereiden tukkeutumiselle ei ole löydetty yhtä selkeitä syitä kuin tulistimien ja keit-toputkiston tukkeutumiselle. Esimerkiksi carryover-hiukkaset eivät juurikaan vaikuta enää ekonomaisereilla, koska carryover-hiukkasten eteneminen alueelle on epätodennäköistä ja kyseiset hiukkaset eivät alhaisesta lämpötilasta johtuen ole enää tahmaavia. Tästä syystä happamat yhdisteet, kuten natriumbisulfaatti (NaHSO_4) voikin selittää pintojen likaantumisen. Lisäksi savukaasuvirran kääntyminen tukkii ekonomaiserin sisääntulokanavan, kun savukaasut törmäävät kylmille pinnoille. Jäähdyttämättömälle levypinnalle muodostunut kerrostuma on tällöin sintraantunutta ja kovaa. (Adams et al. 1997, 271, 273)

Savukaasujen rikkipitoisuus on usein korkea soodakattiloilla, joissa sulakeon lämpötila on alhainen ja sulfiditeetti erityisen korkea. Happamat sulfaatit muodostavat tällöin ekonomaisereissa alueita, joissa lentotuhka on erityisen tahmeaa ja edistää siten kerrostumista ja sintraantumista. (Tran 2015, 9)

4.3.1 Sintraantuminen

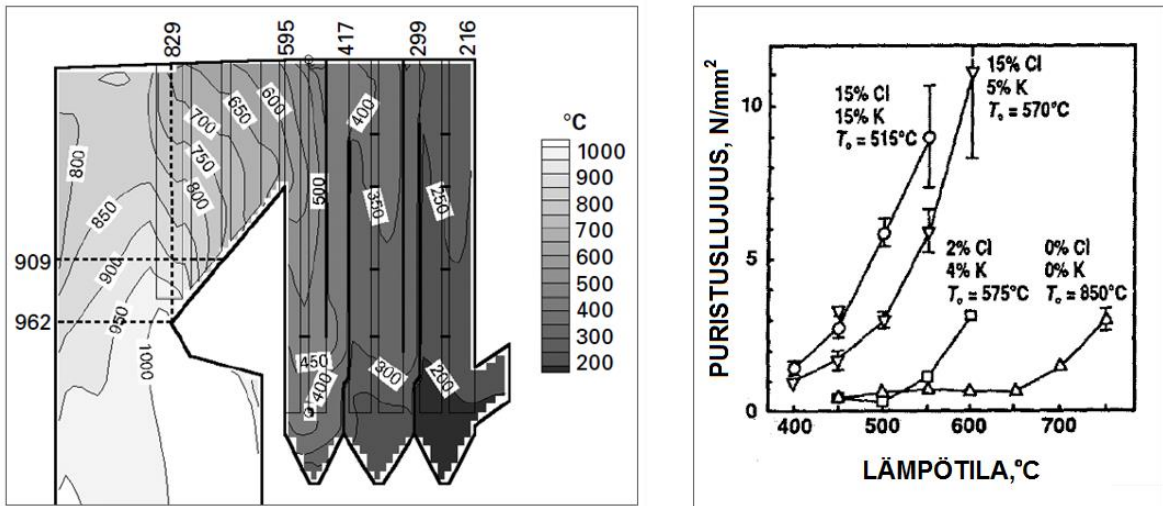
Sintraantumiseksi kutsutaan huokoisten kiintoaineiden tiivistymistä, joka aiheuttaa tiivistyneen lentotuhkan (fume) ja tuhkapölyn (dust) kovettumisen lämpöpinnoilla. Kuvan 40 mukaisesti sintraantumisessa kosketuksiin pääsevät huokoiset materiaalit sitoutuvat toisiinsa ja muodostavat toistensa välille ”sillan”. (Tran 2015, 5) Hiukkaset liittävä ”silta” muodostuu hiukkasten välille natriumkloridin (NaCl) haihtuessa hiukkasista, uudelleenlauhtumisessa tai kiinteän aineen leviämisessä, jolloin hiukkaset muodostavat yhtenäisen massan ja partikkelin koko kasvaa. Syntyneestä partikkelista on tällöin mahdoton erottaa yksittäisiä hiukkasia, koska ne ovat muodostaneet tiukan yhtenäisen rakenteen. (Vakkilainen 2005, 8-15)



Kuva 40. Sintraantumismekanismi (Tran 2015, 6)

Sintraantumisen aiheuttamat kerrostumat keittoputkistolla sisältävät hienorakenteista tiivistynyttä lentotuhkaa (fumea), suurempia carryover-hiukkasia ja keskikokoisia hiukkasia (ISP). Jokaisella hiukkasella on oma tyypillinen sintraantumiskäyttäytymisensä, mikä aiheuttaa hankaluuksia ymmärtää sintraantumisen käyttäytymistä. (Vakkilainen 2005, 8-15) Esimerkiksi tiivistynyt lentotuhka alkaa sintraantua noin 300 °C:ssa ja sintraantuminen etenee lämpötilan kasvaessa ja yli 500 °C lämpötilassa saavuttaa äärimmäisen kovan rakenteen jo lyhyessä ajassa. Sintraantuminen onkin vahvasti riippuvainen ympäröivästä lämpötilasta, polttolipeästä ja tuhkan koostumuksesta, mistä johtuen sintrautumiskäyttäytyminen vaihtelee paljon soodakattiloiden välillä. (Adams et al. 1997, 262-264)

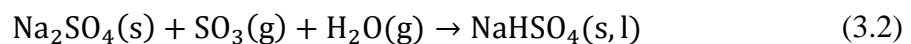
Levinnyt materiaali saa tiivistyessään kovan ja vahvan rakenteen, jonka hajottaminen korkeapaineisella höyrynuhouksella on haasteellista. Sintraantuneen pölyn kovuutta kuvaa se, että sintraantuma kestää jopa 50 MPa puristusvoiman, mikä on hyvin lähellä sementin (30-60 MPa) hajottamiseen vaadittavaa puristusvoimaa. (Tran 2015, 5-6) Korkeammissa lämpötiloissa sintraantumisen aiheuttamat kerrostumat alkavat sulaa, mitä kutsutaan ensimmäiseksi sulamislämpötilaksi, mitä ennen sintraantumisen puristuslujuus saavuttaa maksiminsa. (Vakkilainen 2005, 8-16) Kuvaan 41 onkin havainnollistettu savukaasujen lämpötilajakaumaa soodakattilalla sekä lämpötilan vaikutusta puristuslujuuteen.



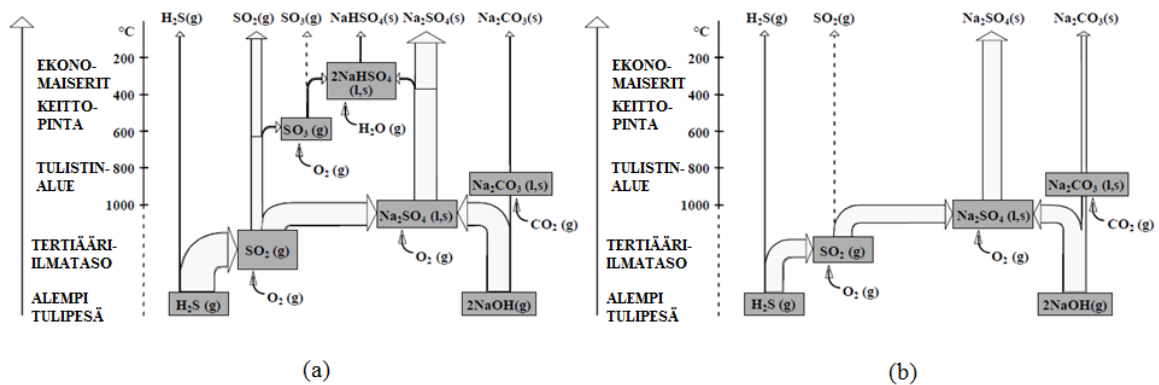
Kuva 41. Lämpötilajakauma savukaasukanavassa (a) ja lämpötilan vaikutus sintraantumisen puristuskestävyyteen. (Wessel et al. 2003, 23 & Skifvars et al. 1991, 4)

4.3.2 Sulakeon olosuhteet

Lentotuhkan pH onkin erinomainen mittari, operoidaanko soodakattilaa kuumalla vai viileällä tulipesällä ja mikä on polttoliipen S/Na₂-suhde. Kuumalla tulipesällä soodakattilaa operoidaan enemmän emäksisen natriumkarbonaatin puolella ja kylmempi tulipesä viittaa rikkidioksidin muodostumiseen, jolloin hapan natriumbisulfaatti on hallitseva yhdiste lentotuhkassa. Natriumbisulfaattia syntyy ekonomaisereilla tiivistyneen lentotuhkan (fumen) sisältämän natriumsulfaatin, rikin oksidien sekä vesihöyryn reagoitessa seuraavasti (Adams et al. 1997, 271)

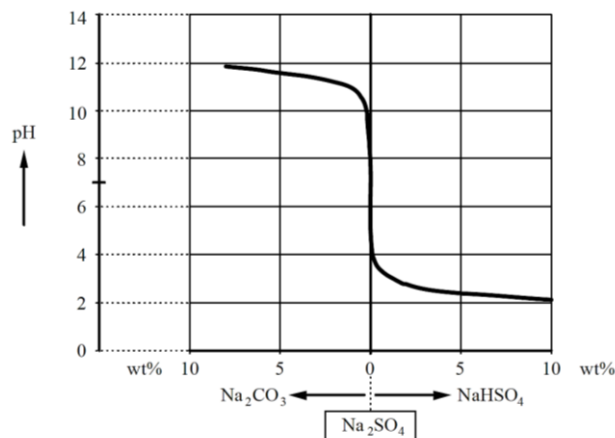


Happamien sulfaattien syntyminen edellyttää siis viileää tulipesää tai suurta rikkidioksidin määrää savukaasuissa, jotta rikkidioksidi muuttuu alkaliin kanssa reagoivaksi rikkitrioksidiksi. Tämä on havainnollistettu kuvassa 42. Ongelmia happamat sulfaatit aiheuttavat nimittäin keittopinnalla ja ekonomaiserien sisääntuloalueilla, sillä natriumbisulfaatti on sulassa olomuodossa ja siten erittäin tahmeaa 180-270 °C ja 400-500 °C lämpötila-alueilla. Lisäksi nuohoushöyryn lauhteet voivat paikallisesti lisätä kosteutta ja siten edesauttaa happamien sulfaattien syntymistä. (Haaga 2016c, 23)



Kuva 42. Rikin ja natriumin reaktiot savukaasuissa viileällä keolla ja korkealla S/Na₂-suhteella (a) sekä kuumalla keolla ja alhaisella S/Na₂-suhteella (b) (Hupa 2012, 5)

Kuvasta 43 nähdään, että jo pieni määrä happamia sulfaatteja lentotuhkassa laskee pH:ta huomattavasti. Normaalisti pH vaihtelee noin 7-12 välillä ja 10-11 pidetään prosesseille optimaalisena, koska tällöin lentotuhka ei sisällä happamia sulfaatteja. Kun pH laskee alle 10, riski happamien sulfaattien esiintymiseen kasvaa merkittävästi. Onkin mahdollista, että pH on tässä vaiheessa jo paikallisesti alle 10, jolloin hapanta natriumbisulfaattia saattaa olla kerrostunut lämpöpinnoille. (Hupa 2012, 6-7)



Kuva 43. Lentotuhkan pH muuttuminen lentotuhkan natriumkarbonaatti- ja natriumbisulfaattimäärän suhteen (Hupa 2012, 6)

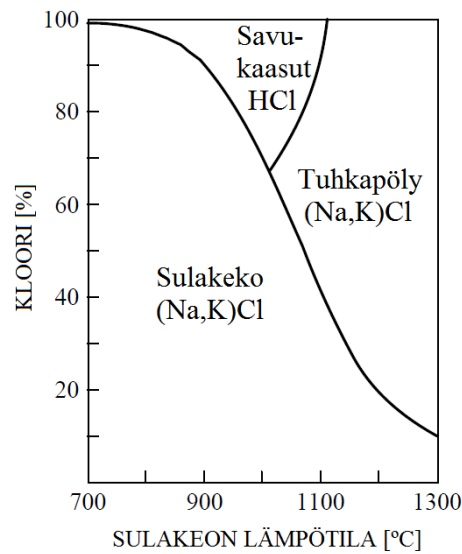
Vaikka tukkeutumisen kannalta ongelmallisempaa ovatkin happamat sulfaatit eli pH:n laskeminen 10, niin myös liian korkea pH saattaa lisätä tukkeutumisongelmia korkean karbonaattipitoisuuden takia. Tuhkan karbonaattipitoisuus on korkea, kun pH lähenee 12 ja se voi

selittyä esimerkiksi natriumkarbonaattia sisältävien carryover-hiukkasten läsnäololla. On myös mahdollista, että natrium esiintyy kaasumaisena olomuotona tulipesässä, joka aiheuttaa korkean pölykonsentraation ja tästä syystä mahdollisia ongelmia sähkösuotimilla. (Hupa 2012, 7)

Lentotuhkan pH:n mittaaminen sisältää suuria epätarkkuuksia, koska lentotuhkanäytteet ovat keskenään toisistaan poikkeavia ja koostumus vaihtelee näytepaikan mukaan. Usein näyte otetaan sähkösuotimien jälkeen, koska se on sijainniltaan helpoin, vaikka näyte suositellaan ottamaan suoraan savukaasuvirrasta. Lisäksi mittaamiseen tulisi käyttää aina yhtä tiettyä mittaustekniikkaa, jotta mittaustulokset ovat vertailukelpoisia. Esimerkiksi kuvan 43 käyrä on saatu sekoittamalla 1 % tuhkaa veteen. Lisäksi virhettä aiheuttaa ilman kontaktin vaihtelu näytteenottotilanteessa, koska ilman ja lentotuhkan pitkittynyt kontakti laskee pH:ta. (Hupa 2012, 7)

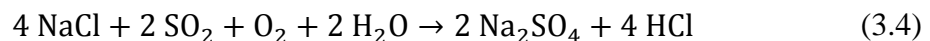
4.3.3 Kloorin ja kaliumin vaikutus alkalihöyryjen muodostumiseen

Kloori- ja kalium esiintyy tulipesän alaosissa alkalihöyryinä eli käytännössä natrium- (NaCl) ja kaliumkloridikaasuina (KCl). Kuvassa 44 on havainnollistettu kloorin esiintyminen eri lämpötiloissa ja kuva osoittaa, että korkeissa lämpötiloissa suurin osa kloorista on höyrystyneenä lentotuhkan joukossa. Savukaasujen jäähtyessä höyrystyneet kloridit kondensoituvat, mikä muodostaa tuhkapölyä. Lentotuhkan käyttäytyminen savukaasukanavassa on merkittävästi riippuvainen kloorimäärästä, sillä jo pienet pitoisuudet kaliumin kanssa aiheuttavat sulamislämpötilan romahtamisen ja siten tekee lentotuhkasta äärimmäisen tarttuvaa. (Hupa 2012, 8)



Kuva 44. Kloorikaasun olomuodot eri lämpötiloissa (Hupa 2012, 7)

Osa kloorista esiintyy myös vetykloridina (HCl), jos kaikki rikki ei ole sitoutunut tulipesän alaosaan vaan savukaasuihin on vapautunut rikin oksideja. Matalilla sulakeon lämpötiloilla vetykloridin muodostuminen on hyvin vähäistä ja suurin osa kloorista sijaitseekin natrium- tai kaliumkloridina. Sulakeon korkea lämpötila laskee S/Na₂-suhdetta, jolloin vapaita rikin oksideja ei muodostu savukaasuihin. Oleellista on seurata savukaasujen S/Na₂-suhdetta, sillä ilman vapaita rikin oksideja, myöskään kloridit eivät pääse reagoitumaan vetykloridiksi. Vetykloridia syntyy tulipesän yläosissa seuraavasti

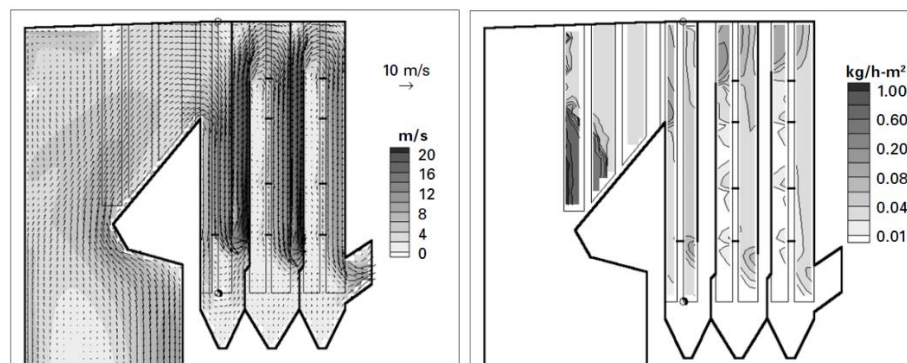


4.3.4 Savukaasujen nopeudet

Savukaasujen nopeuksien kasvaminen liian suureksi kasvattaa lämpöpinnan likaantumisriskiä, mistä johtuen keittoputkiston savukaasujen virtausnopeus pyritään pitämään alle 20 m/s. Liian pieni vapaa virtausala johtaa savukaasujen virtausnopeuksien kasvamiseen, joten putkivälin kasvattaminen keittoputkistoissa on joissakin tapauksissa vähentänyt keittoputkistolle kertyneen kerrostuman määrää. (Vakkilainen 2005, 6-15, 6-16)

Ekonomaiserit eivät ole aina keskenään täysin symmetrisiä vaan niiden vapaat virtausalat vaihtelevat keskenään. Virtausnopeus pyritäänkin mitoittamaan ekonomaisereissa keittoputkiston tavoin myös alle 20 m/s likaantumisen hallitsemiseksi, jotta hiukkaset eivät keräänny kanavan sisääntuloaukkoon. Ekonomaisereiden suurimmat ongelmat onkin havaittu sijaitsevan juuri kanavan sisääntuloaukoissa, joissa virtauskanava kapenee ja nopeudet kasvavat haitallisen suuriksi. Joillakin tehtailta savukaasun virtausnopeuden laskeminen noin 30 %:lla onkin vähentänyt savukaasukanavan tukkeutumista.

Koska savukaasukanavien kasvattaminen pienentää savukaasujen virtausnopeuksia, saattaa sisääntuloaukon suurentaminen vähentää paikallista tukkeutumista kanavan sisääntulossa. Savukaasunopeuksien vaikutus likaantumiseen virtauskanavan sisääntulossa havaitaan kuvasta 45. Likaantuminen on keskimäärin suurempaa ja nopeampaa juuri kanavan käänkökohdissa, mistä syystä nuohous on erityisen tärkeää kyseisillä alueilla. (Wessel 2003, 23)



Kuva 45. Savukaasujen nopeudet (a) ja kerrostumispaikat (b) soodakattilan loppuosassa (muokattu lähteestä Wessel 2003, 23)

4.3.5 Vuotoilman ja kosteuden aiheuttamat tukkeutumat

Savukaasukanavan repeämät, vuotavat sulkusyöttimet tai kanavan palkeet saattavat päästää savukaasukanavaan ylimääräistä ilmaa. Ilmavuodot lisäävät savukaasun tilavuusvirtaa ja siten savukaasujen virtausnopeutta, mikä kasvattaa tukkeutumisriskiä vuotokohdan jälkeen. Lisäksi ilman sisältämä kosteus saattaa aiheuttaa savukaasun tarrautumista ja siten johtaa

kanavan tukkeutumiseen. Myös sekoitus- ja liuotussäiliöiden hönkäkaasut voivat vuotaa välijistä sulkusyöttimistä savukaasukanavaan tuoden mukanaan kosteutta, mikä aiheuttaa kanavan likaantumista ja kerrostuman kertymistä. (Metsä Fibre 2017)

4.4 Tukkeutumisen hallinta

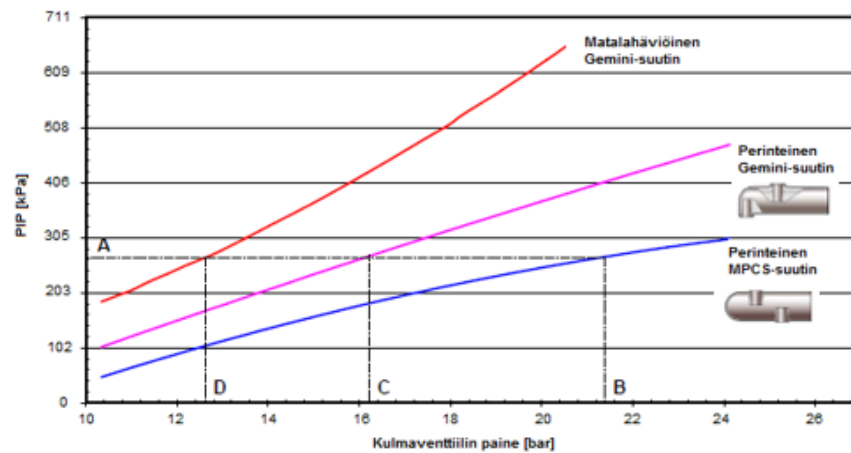
Soodakattilan tukkeutumiseen on olemassa niin sanotusti kaksi mahdollista ratkaisutapaa eli ennakoivat toimenpiteet tai kerrostuman irrottaminen. Ennakoivilla toimenpiteillä tarkoitetaan ratkaisuja, joilla estetään soodakattilan likaantuminen ja haitallisten kerrostumien syntyminen. Tällä voidaan esimerkiksi tarkoittaa nuohouksen tehostamista, palamisen optimointia sekä aktiivista pH:n seuranta ja alkalimetallien poistamista kierrosta. Jo syntyneen likakerroksen tai tukkeutuman poistamiseen on olemassa muutamia keinoja, kuten Bang&Clean-puhdistus, kylmänuohous tai soodakattilan vesipesu, joita pyritään välttämään, koska ne rajoittavat tai pahimmillaan katkaisevat tuotannon.

4.4.1 Nuohouksen tehostaminen

Nuohouksessa on ollut pitkään käytössä kokemusperusteisesti tietyllä logiikalla ohjattuja nuohoinsekvenssejä, jotka puhdistavat lämpöpintoja automaattisesti ilman tietoa lämpöpinnan todellisesta likaantumisasteesta. Nuohousta on pystyttykin tehostamaan kehittämällä älykäs nuohousjärjestelmä, joka prosessiohjausjärjestelmän tiedonkeruun ansiosta pystyy päättämään likaantuneita paikkoja ja siten suuntaamaan nuohouksen tehokkaammin niille alueille. Älykkäät nuohousjärjestelmät käyttävätkin parempia likaantumisindekattoreita, kuten lämmönsiirtoa lämpöpinnan yli, jännitysmittauksia sekä paikallista likaantumisasetta. (Tran et al. 2015, 9)

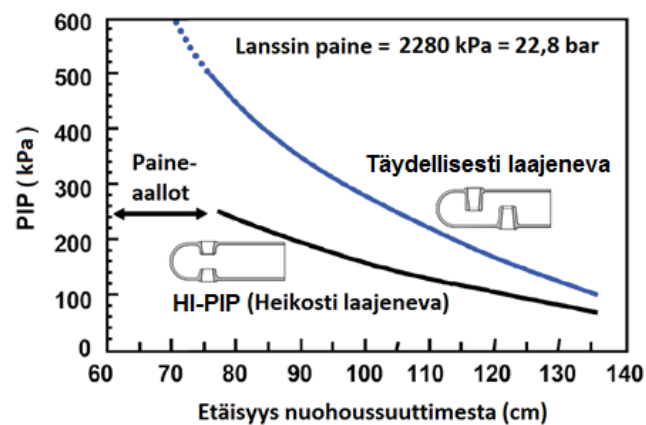
Älykkään nuohouksen lisäksi nuohoustehokkuutta voidaan kasvattaa käyttämällä nuohoimissa suurtehosuuttimia, jotka vaativat huomattavasti alhaisemman höyrynpaineen saavuttaakseen saman nuohoustehokkuuden kuin heikompitehoinen nuohoinsuutin. Kuvassa 46 on esitetty eri suuttimien PIP kulmaventtiilin paineen funktiona ja kuva osoittaaakin, että nuohouksen tehostamiseksi tulee käyttää tehokkaampia suuttimia. Tällä voidaan tehostaa myös tehtaan sähköntuotantoa, koska nuohoukseen voidaan käyttää turbiinin väliotosta otettua

nuohoushöyryä ja siten vähentää tuorehöyryn kulutusta nuohoukseen. (Tavares et al. 2006, 10)



Kuva 46. Kulmaventtiilin paineen ja PIP:n korrelaatio (muokattu lähteestä Tavares et al. 2006, 7)

Nuohousta voidaan lisäksi parantaa lisäämällä nuohoimia tai kasvattamalla nuohoustiheyttä kriittisellä alueella. Nuohoimet tulisivat sijoittaa siten, että niiden vaikutusalat olisivat mahdollisimman lähellä toisiaan ja parhaimmillaan jopa leikkaisivat toisensa. Kuvassa 47 on havainnollistettu, miten nuohouksen puhdistusteho laskee etäisyyden kasvaessa. Alle yhden (1) metrin etäisyydellä pystytään saavuttamaan vielä riittävä nuohoustehekkuus, kun nuohouspaine on riittävä ja käytetään tehokkaita suutinmalleja. (Tran et al. 2015, 6)



Kuva 47. Nuohoussuuttimen vaikutus nuohoustehekkuuteen (muokattu lähteestä Tran et al. 2015, 6)

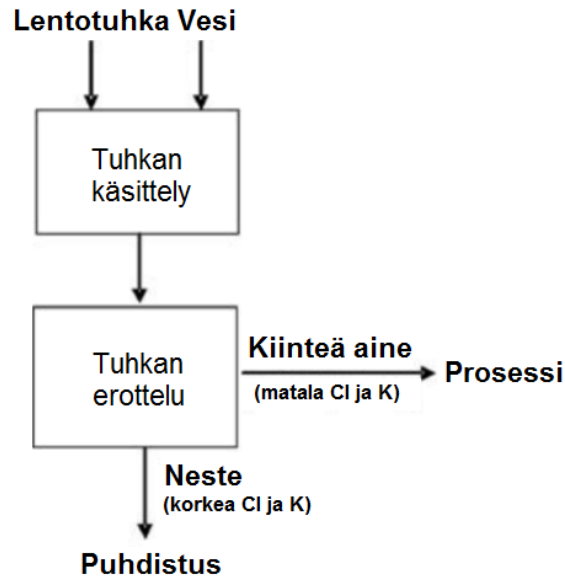
4.4.2 Lentotuhkan ulosotto

Poistamalla soodakattilan lentotuhkaa hallitaan tehtaan natrium-rikki-tasetta eli sulfiditeettia sekä kaliumin ja kloridin rikastumista prosessissa. (Vakkilainen 2005, 1-1) Liian korkea sulfiditeetti aiheuttaa ongelmia soodakattilalla, koska se muuttaa sulan virtausominaisuuksia, kasvattaa sintraantumisenopeutta sekä lisää rikkipäästöjen riskiä. Sulfiditeetin säätämisen lisäksi lentotuhkaa voidaan joutua poistamaan lipeäkierrosta myös silloin, kun lentotuhkassa esiintyy happamia sulfaatteja, koska ne lisäävät lämpöpintojen likaantumista.

Lentotuhka kerätään keittopinnan ja ekonomaisereiden tuhkasuppiloista sekä sähkösuodattimilta ja kuljetetaan tuhkakuljettimien avulla sulkusyöttimien kautta takaisin lipeäkiertoon. (Metsä Fibre 1998) Lentotuhkan ulosotto toteutetaan tyypillisesti yhden tai useamman sähkösuodattimien kuljetuslinjan kautta tuhkanliuotukseen ja siten jätevesien joukkoon. Kaliumin ja kloridin rikastumista seurataan korroosioriskin vuoksi tasaisin väliajoin sähkösuodattimien lentotuhkasta ja pitoisuuksien kasvaessa liian suuriksi, hallitaan kaliumin ja kloridin pitoisuuksia myös poistamalla lentotuhkaa. (Wahlman keskustelu 30.11.2017)

4.4.3 Kloorin ja kaliumin poistaminen

Kloorin ja kaliumin pitoisuuksia voidaan hallita lentotuhkan ulosottamisen lisäksi myös kaupallisilla menetelmillä, joissa kuvan 48 mukaisesti lentotuhka sekoitetaan veteen, jolloin syntyneestä lietteestä poistetaan kloori- ja kaliumyhdisteet erilaisilla erottelulaitteistoilla kuten esimerkiksi lingolla tai suodattimilla. (Goncalves et al. 2008, 1)



Kuva 48. Kaliumin ja kloorin erotuksen periaate (Goncalves et al. 2008, 1)

Kloorin ja kaliumin poistamistehokkuus on merkittävästi riippuvainen kiinteän ja nestemäisen aineksen erotteluasteesta, johon vaikuttaa käytettävä laitteisto, sen kapasiteetti ja erotusmenetelmä sekä kiinteän aineen fysikaaliset ja morfologiset ominaisuudet. Erottelukyvyyn lisäksi myös syntyneen lietteen tuhkapitoisuus ja yksittäisten suolojen liukoisuus vaikuttaa prosessin puhdistustehokkuuteen. Kaliumin ja kloorin erotuskyky ei ole kuitenkaan koskaan täydellinen, koska erotteluprosessissa kiinteään aineeseen jää aina nestemäistä ainesta.

Markkinoilla on useita käytössä olevia kaupallisia kaliumin ja kloridin erotusmenetelmiä kuten suodatus, kiteytys, uudelleenkiteytys, haihdutus-kiteytys ja ioninvaihto, joista tärkeimmät prosessista ja toimittajat on listattu taulukkoon 3. Taulukkoon on myös listattu prosessien erotustehokkuudet sekä maksimikapasiteetit käytössä olevissa laitteistoissa. Menetelmien soveltuvuus tulee kuitenkin tarkastella laitoskohtaisesti huomioiden jätteenkäsittelymahdollisuudet.

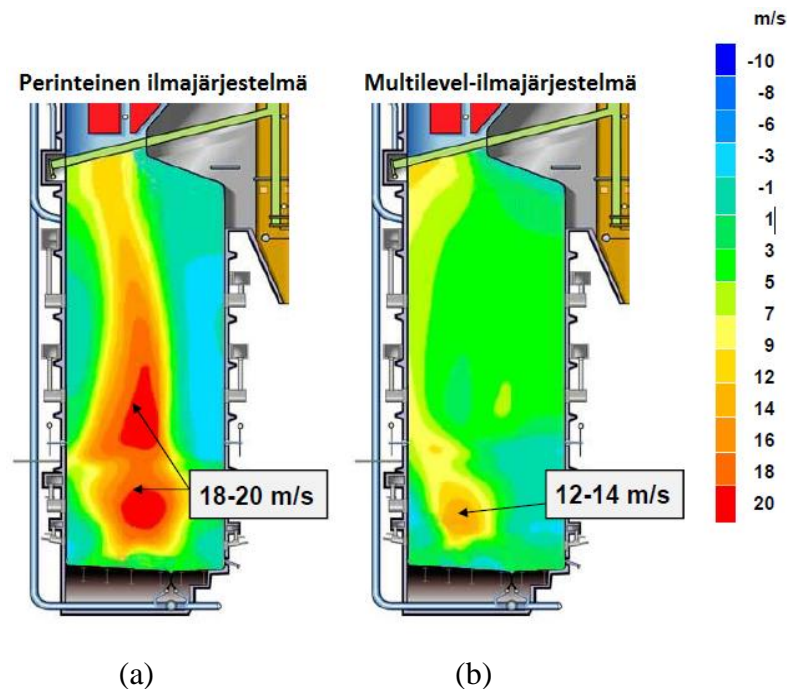
Taulukko 3. Esimerkkejä käytössä olevista ja testatuista kaupallisista erotusprosesseista (muokattu lähteestä Tran et al. 2004, 9 & Veolia 2014 & Valmet 2015 & Andritz 2017)

Tuotenimi	Toimittaja	Prosessi	Kapasiteetti [t/d]	Kloorin erotustehok- kuus [%]	Kaliumin erotustehok- kuus [%]
ALE	Andritz	Suodatus	-	85	85
ARC	Andritz	Uudelleen- kiteytys	167	90	90
Ash Leach	Valmet	Suodatus	260	78	78
Ash Leach Duo	Valmet	Tuplasuodatus	350	82	82
Ash Crystallization	Valmet	Kiteytys	920	96	92
HPD CRP	Veolia	Haihdutus- Kiteytys	446	95-99	95-99
MPR	Mitsubishi	”Jäädetyt” kiteytys	192	90	75
PDP	Eco-Tec	Ioninvaihto	-	97	5
PDR	Eka Chemicals	Haihdutus- kiteytys	-	90	90

4.4.4 Carryoverin minimointi

Soodakattilan carryoveria voidaan hallita ruiskutusta tai ilmansyöttöä muuttamalla. Sula-keon olosuhteita voidaan hallita paremmin parantamalla pisaroiden levittäytymistä tulipesään säätämällä ruiskutuslämpötilaa, -painetta, -kulmaa sekä -asentoa. Carryoverin ja sulakeon hallinnan kannalta polttoliipeä tuleekin ruiskuttaa tulipesään mahdollisimman symmetrisesti kaikilta seiniltä, jotta pisarat levittäytyvät tasaisesti tulipesään. Lisäksi tällä saadaan vähennettyä lipeäruiskun leviämistä tulipesän seinille, mikä varmistaa, että ilma-aukot pysyvät paremmin puhtaina. Ilman tunkeutumisen ja sekoittumisen varmistaminen mahdollistaa tasaisemmat olosuhteet tulipesässä eikä aiheuteta virtauksia, jotka aiheuttaisivat carryoveria. (Vakkilainen 1996, 9-10)

Carryoverin määrä on lisäksi suoraan soodakattilan kuormasta riippuvainen, sillä ilmajärjestelmän rakenne ja syötettävän ilman määrä vaikuttavat savukaasujen virtaus- ja lämpöprofiiliin. Carryoverin määrä vähenee luonnollisesti pienemmällä kuormalla, koska se laskee samalla lämpötiloja ja kaasuvirtauksia. Perinteisellä ilmasyötöllä tai ylikuormalla ajavissa kattiloissa kaasuvirrat kasvavat niin suuriksi tulipesän alaosissa, että ne kuljettavat pienimmät sulapisarot tulipesän yläosiin kuvan 49a mukaisesti. Lisäksi multilevel-ilmajärjestelmässä jälkipolttoalueelle syötettävä ilma ei ylikuormalla ajettaessa riitä estämään carryoverhiukkasten karkaamista tulipesän yläosiin. (Vakkilainen 2005, 8-8 & Haaga 2016, 3-4)



Kuva 49. Savukaasujen nopeusprofiilit tulipesässä (muokattu lähteestä Haaga 2016, 3)

4.4.5 Sintraantumisen estäminen

Sintraantumista edistää tiivistyneen lentotuhkan (fumen) suuri määrä savukaasuissa, nuohouksen riittämättömyys sekä liian korkea savukaasujen lämpötila. Sintraantuvan tiivistyneen lentotuhkan määrään voidaan vaikuttaa kasvattamalla lämmönsiirtopinta-alaa ja laskeamalla sulakeon lämpötilaa. Lisäksi säätämällä sulakeon lämpötila tasaiseksi, tasoittuu soodakattilan lämpökuorma sekä tiivistyneen lentotuhkan määrä vähenee. (Tran 2015, 11)

Nuohouksen tehostaminen sintraantuneilla alueilla on mahdollista toteuttaa esimerkiksi kasvattamalla nuohoussekvenssiä tai nuohousalaa lisäämällä nuohoimia riskialueille. Lisäksi nuohointen järkevä sijoittelu lisää luonnollisesti nuohouksen puhdistuskykyä. Myös edistyneiden ja tehokkaiden nuohoussuuttimien käyttöönottoaminen ennaltaehkäisee kerrostuman sintraantumisen etenemistä, koska korkeampi paineinen höyry irrottaa kerrostuman tehokkaammin.

Koska sintraantuminen lisääntyy lämpötilan kasvaessa, tulee savukaasujen lämpötilaa pitää optimaalisena ja mahdollisimman alhaisena. Lämpöpintojen likaantuminen kuitenkin kasvattaa savukaasujen lämpötilaa ja siten altistaa kerrostuman sintraantumiselle. Lisäksi lämpötilaa on mahdollista laskea pitämällä palamisolosuhteet vakaina ja optimaalisena tulipesän alaosissa. Lisäksi lämpöpintaa kasvattamalla lämpöä saadaan enemmän talteen savukaasuista, jolloin savukaasujen lämpötila luonnollisesti laskee.

4.4.6 Vuotojen havainnointi

Savukaasukanavan ilmavuoto on mahdollista selvittää happimittausten avulla, sillä vuotopaikauksissa jäännöshapen määrä kasvaa savukaasujen jälkeisissä mittauksissa ekonomaisemmin verrattuna. Savukaasukanavan vuodot ja repeämät voidaan paikantaa savukaasukanavasta huoltoseisokkien aikana. Esimerkiksi paineilmakuuntelulaitteita voidaan käyttää kanavan vuotojen paikantamisessa myös ajon aikana. (Metsä Fibre 2017)

Savukaasukanavan ilmavuotoja voidaan estää käyttämällä pinnoitettua kirkasta peltiä savukaasukanavan seinämissä. Tämä estää tiivistyneen lentotuhkan tarttumista kylmälle pinnalle. Väljät sulkusyöttimet tulee vaihtaa uusiin ja vuodoille alttiit palkeet tulee tarkastaa ja tarvittaessa vaihtaa uusiin tasaisin väliajoin.

4.4.7 Magnesiumhydroksidin ruiskutus

Soodakattiloiden likaantumista voidaan myös hallita ruiskuttamalla kierron kannalta inerttiä kemikaalia soodakattilan likaantuneeseen kohtaan kuten tulistinalueelle tai keittopinnalle erillistä ruiskua käyttäen. Kemikaalin käyttö onkin tehostanut lämpöpinnan puhdistusta ja

johtanut parempaan lämmönsiirtoon. Parhaiten toimivat mekanismit likaantumisen hallitsemiseksi kemikaaleja käyttämällä ovatkin olleet tuhkan sulamislämpötilan nostaminen, liakerroksen rakenteen haurastuttaminen sekä alhaisen sulamislämpötilan yhdisteiden pitoisuuksien vähentäminen. (Saratovsky et al. 2017, 4)

Käytetyistä kemikaaleista tehokkaimpia ovat olleet magnesiumyhdisteet, joista magnesiumhydroksidi on todettu toimivaksi yhdisteeksi eri kattiloilla. Magnesiumhydroksidin hajotessa magnesiumoksidiksi ja vesihöyryksi vesi höyrystyy voimakkaasti, mikä hajottaa kerrostuman pienemmiksi partikkeleiksi. Magnesiumhydroksidi vaikuttaakin kerrostuman lujuuteen tekemällä rakenteesta heikon ja epävakaan muuttamalla rakenteen seinämävahvuutta. Pitkällä tarkasteluvälillä magnesiumhydroksidi tekee rakenteesta helposti poistettavan ja estää näin soodakattilan nopean likaantumisen.

4.4.8 Bang & Clean

Sähkösuodattimien, siilojen sekä sooda- ja jätteenpolttokattiloiden puhdistukseen on kehitetty tehokas Bang&Clean-menetelmä, jossa happea ja etaania sisältävän kaasuseoksen räjäyttämisen synnyttää paineaallon ja irrottaa syntyneet kerrostumat. Bang&Clean on erityisen käyttökelpoinen menetelmä soodakattiloilla, koska se voidaan toteuttaa ilman erillistä huoltoseisokkia ja tuotannonkeskeytyksiä. (Delete 2016) Koska menetelmä on yksinkertaisuudessaan erittäin toimiva helposti irtoaville kerrostumille, voidaan sitä käyttää soodakattiloilla erityisesti keittoputkiston ja ekonomaisereiden kerrostumien poistamiseen. Erittäin sintraantuneen kerroksen irrottaminen voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia. (Wahlman keskustelu 12.10.2017)

Menetelmässä kaasuseos puhalletaan ilmatiiviiseen panospussiin, joka on päällystetty vettä imevällä paperilla. Paperi kostutetaan ennen työntämistä kattilan rakenteisiin, jotta se haihduttaa vettä. Pussi asetetaan varren päähän ja suojataan suppilolla, jotta pussi ei vaurioidu säteilylämmön vaikutuksesta. Varsi työnnetään kattilan luukusta sisään ja pussi täytetään kaasuseoksella, joka räjäytetään sytytystulpan kipinällä. (Delete 2016)

Soodakattiloissa räjäytyksiä toteutetaan usein noin 500, jotta räjäytyksellä saavutetaan riittävä tehokkuus. Vaikka kattilan painevaihteluiden vuoksi soodakattilan tehoa joudutaan laskemaan työn toteutuksen ajaksi, kerrostuman irrottaminen säästää merkittävästi kustannuksia, joita aiheutuisi tuotannon jatkuvasta rajoittamisesta saati pysäyttämisestä kattilan pesun ajaksi. Lisäksi menetelmällä voidaan kuvata kattilan sisäosia ja näin ollen saada hyödyllistä dataa lämpöpintojen kunnosta.

4.4.9 Kylmänuohous ja vesipesu

Kylmänuohouksella eli niin sanotulla Chill & Blow-menetelmässä soodakattilan tuotantoa rajoitetaan, jotta lämpötilat laskevat tulistinalueella riittävästi. Lämpötilan laskeminen heikentää kerrostumien lujuutta, jolloin tehokkaalla nuohouksella pyritään nuohoamaan pinnat mahdollisimman puhtaiksi. Vaikka tuotantoa ei tarvitse kokonaan pysäyttää, pidetään kylmänuohousta huonona puhdistusmenetelmänä, koska sulakekoon putoavat suuret kerrostuman saattavat aiheuttaa turvallisuusriskin ja ongelmia käytettävyydelle. (Wahlman keskustelu 12.10.2017)

Soodakattilan vesipesu edellyttää tuotannon keskeyttämisen, koska vesipesu vaatii riittävän jäähtyneen tulipesän ja keon, jotta ei ole vaaraa sulavesiräjähdykselle. Vesipesussa soodakattilan lämpöpinnat pestään ohjaamalla pesuvesi erillisellä vesipesupumpulla nuohousjärjestelmään ja lopulta nuohoimien kautta lämpöpinnoille. Vesipesua jatketaan kunnes lämpöpinnat ovat puhdistuneet riittävästi. Hankalasti puhdistettavat kohdat täytyy puhdistaa miesluukuista vesiletkujen avulla. Sulavesiräjähdysvaaran vuoksi on erityisen tärkeää, että vesipesuputkisto erotetaan nuohousjärjestelmästä heti vesipesun jälkeen. Tällä varmistetaan, että vesi ei vahingossakaan pääse kosketuksiin kemikaalisulan kanssa. (Metsä Fibre 1998)

5 ONGELMAN KUVAUS

Työssä tutkitaan Metsä Groupin Joutsenon tehtaan soodakattilan savukaasukanavan tukkeutumisongelmia. Savukaasukanavan likaantuminen heikentää tehtaan tuotantovauhtia ja vaikeuttaa soodakattilan operointia merkittävästi. Pahimmassa tapauksessa savukaasukanavan likaantuminen tukkii koko kanavan ja siten voi aiheuttaa ennenaikaisen vesipesun, joka pysäyttää koko tehtaan tuotannon. Tässä luvussa tarkastellaan Joutsenon soodakattilaa, sen likaantumista sekä likaantumiseen johtavia syitä.

5.1 Soodakattilan esittely

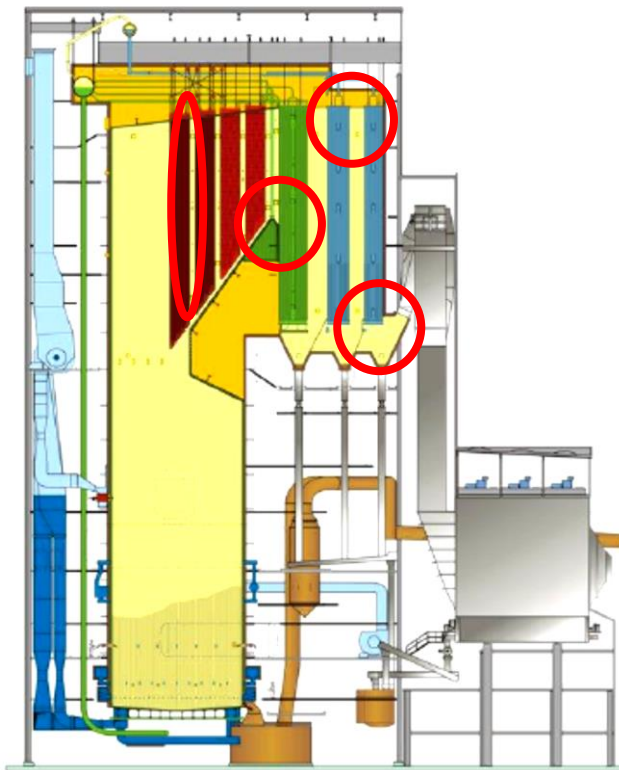
Tutkittava soodakattila on kuvan 50 mukainen Andritzin toimittama moderni soodakattila, joka käynnistettiin vuonna 1998. Soodakattilan kapasiteetti on tuhkattona 3150 tka/d, mutta soodakattilaa ajetaan jatkuvasti ylikuormalla tuhkattona noin 3500-3700 tka/d mikä vastaa noin 3800-4000 tka/d tuotantovauhtia tuhkalliselle polttoaineelle. Tuorehöyryn tuotanto mitoitustilanteessa on 130 kg/s, mutta ylikuormalla ajettaessa tuotanto on yli 150 kg/s. Soodakattilan tuorehöyryn parametrit ovat 92 bar ja 490 °C.

Polttoliipeä ruiskutetaan tulipesään noin seitsemän (7) metrin korkeudella 78-82 % kuiva-aineessa. Soodakattila on varustettu 12 ruiskupaikalla, jotka on sijoitettu tasaisesti soodakattilan jokaiselle seinälle yhteen tasoon. Liipejärjestelmä sisältää suoran höyryesilämmittimen, jolla säädetään polttoliipeäsäiliöstä saapuvan polttoliipeän polttolämpötilaa. Polttoliipeä lämmitetään noin 18-22 °C kiehumispisteen yläpuolelle, mistä johtuen polttoliipeän lämpötila vaihtelee keskimäärin 140-146 °C välillä kuiva-aineesta riippuen.

Soodakattilaa on modernisoitu ja soodakattilan lämpöpintoja on uusittu tarpeen mukaan. Viimeisin modernisointi oli soodakattilan tulipesän pohjan vaihto, jonka yhteydessä suoritettiin soodakattilan ilmajärjestelmän uusinta, jolloin prosessiin lisättiin kvartääritaso nousseiden typen oksidi-päästöjen vuoksi. Soodakattilan ilmansyöttö on toteutettu tyyppillisellä multi level-ilmajärjestelmällä, jossa sekundääri- ja tertiääri-ilmalähteet tuodaan soodakattilaan kahdessa tasossa.

Soodakattilan savukaasukanavan alipainetta säädetään kolmella savukaasupuhaltimella ja alipaine puhaltimen jälkeen on noin 0,5 kPa. Savukaasut puhdistetaan jokaista kanavaa kohti yhdellä sähkösuotimella, joissa erottunut lentotuhka sekoitetaan mustalipeän joukkoon sekoitussäiliössä. Savukaasupuhaltimilta savukaasut ohjataan savupiipun kautta ympäristöön.

Kemikaalisula ohjataan soodakattilasta kuuden vesijäähdytteisen sularännin kautta liuotinsäiliöön. Liuotinsäiliössä muodostunut viherlipeä pumpataan kaustisointilaitokselle selkeyttäväksi. Viherlipeäjärjestelmä sisältää kaksi rinnakkaista pumppua, joista toisella pumpataan viherlipeä pois säiliöstä ja toisen kautta liuotinsäiliöön tuodaan laihavalkolipeää.



Kuva 50. Joutsenon tehtaan Soodakattila 3 ja sen tyypilliset ongelmakohdat (Metsä Fibre)

5.2 Likaantumisen eteneminen

Soodakattilan tulistinalue on likaantunut ja aiheuttanut haasteita jo pitkään, mutta käytettävyydessä on tullut merkittäviä ongelmia vasta kun soodakattilaa on alettu operoida merkittävällä ylikuormalla. Kuvassa 50 on esitetty soodakattilan tyypilliset ongelmakohdat savukaasukanavassa. Ensimmäiset likaantumisongelmat ovat sekundääri- ja tertiäritulistimen välissä, mikä on esitetty kuvassa 51.

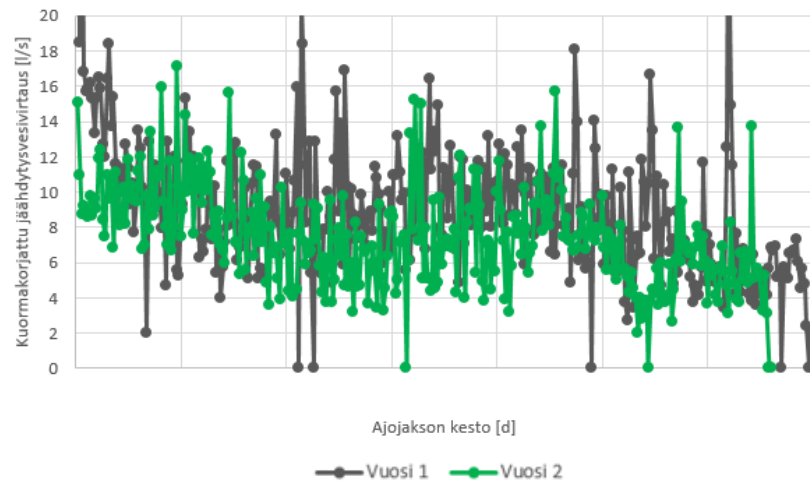
Lämmönsiirron heikentyminen tulistinalueella nostaa tulistimien jälkeisten savukaasujen lämpötilaa, mikä altistaa myös keittoputkiston likaantumiselle, jos tahma-alue siirtyy keittoputkiston sisääntuloon. Myös keittoputkiston lämpötilataso on noussut seuraten tulistimien lämpötilan kehitystä. Korkea lämpötila lisää myös kerrostuman sintraantumista, mistä johtuen myös keittoputkiston ja ekonomaiserin likaantumiset voivat olla seurausta tulistimen ongelmista.



Kuva 51. Savukaasukanavan runsasta likaantumista sekundääri- ja tertiäritulistimen välisellä alueella (Kimmo Pakkanen)

5.2.1 Tulistimien likaantuminen

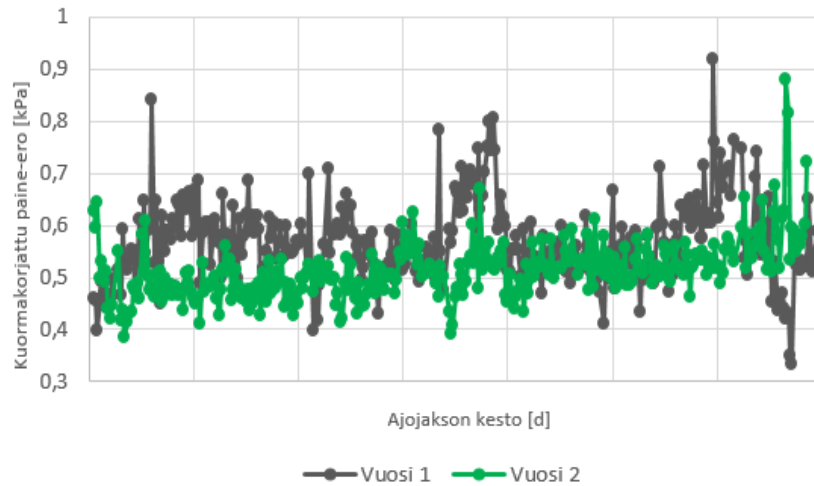
Tulistimien likaantuminen ajojakson aikana voidaan todeta tuorehöyryn ruiskutusvesivirtauksen vähenemisestä. Tuorehöyryn jäähdytysvesivirtauksen väheneminen johtuu tulistinalueen lämmönsiirron heikkenemisestä, jolloin tuorehöyryä tarvitsee jäähdyttää vähemmän. Kuvassa 52 on esitetty kahden eri vuoden tuorehöyryn kuormakorjatut jäähdytysvesimäärät, joiden huomataan laskevan tasaisesti ajojakson aikana. Sellutehtaan tuotantohäiriöt laskevat ajoittain soodakattilan kuormaa, jolloin matalalla tuotantotasolla nuohous irrottaa tehokkaammin kerrostumia ja näin kasvattaa jäähdytysvesivirtausta ja parantaa lämmönsiirtoa. Kuvasta huomataankin, että tulistinalue on merkittävästi likaantunut ajojaksojen loppuvaiheessa.



Kuva 52. Kuormakorjattu ruiskutusvesivirtaus

5.2.2 Keittopinnan likaantuminen

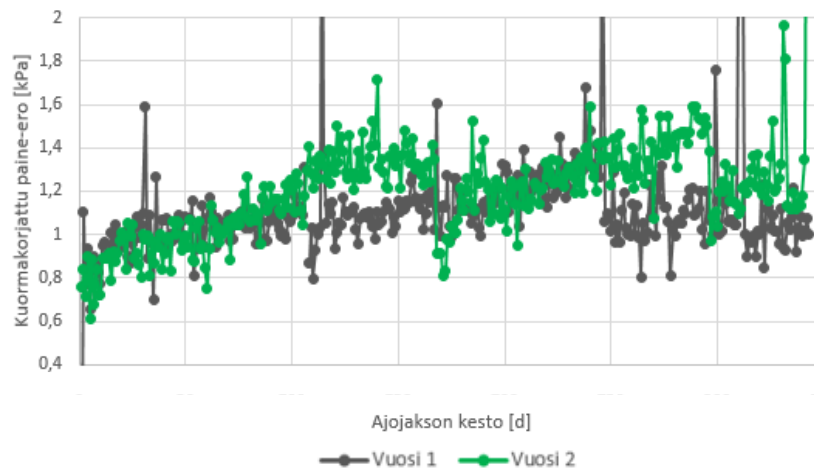
Keittopinnan likaantuminen voidaan havaita kanavan paine-eron kasvaessa. Kuvassa 53 on esitetty keittopinnan kuormakorjatut paine-erot kahden eri ajojakson ajalta. Keittopinta saavuttaa likaantumisessa tasapainon ensimmäisten viikkojen aikana eikä merkittävästi enää likaannu ajojakson aikana. Keittopinnalla on kuitenkin ajoittain äkillisiä paine-eron kasvuja eli voidaan havaita nopeaa likaantumista, mikä on mahdollisesti seurausta lämpöpinnan sintraantumisesta. Kerrostuman lujuus kuitenkin heikkenee matalilla kuormilla, jolloin merkittävästi likaantunutta pintaa voidaan puhdistaa nuohoamalla tai Bang&Clean-menetelmällä.



Kuva 53. Keittopinnan likaantumisen eteneminen

5.2.3 Ekonomaiseri 2:n likaantuminen

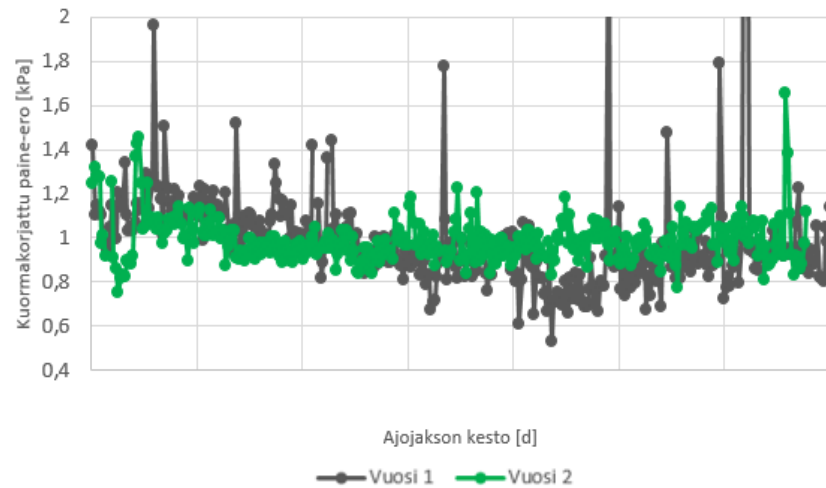
Keittopinnan lisäksi myös ekonomaisereiden likaantumisesta voidaan seurata paine-eron muutosten avulla. Kuvassa 54 onkin havainnollistettu ekonomaiseri 2:n likaantuminen kahdella eri ajojaksolla. Ekonomaiseri 2 likaantuu vähitellen ajojakson edetessä ja johtaa siten käytettävyysoongelmiin, kun savukaasupuhaltimien kuorma nousee ylärajalle. Vihreän ajojakson aikana kuormakorjattu paine-ero nousee vähitellen ylärajalle, minkä jälkeen tuotantoa joudutaan rajoittamaan tai vaihtoehtoisesti toteuttamaan Bang&Clean-puhdistus.



Kuva 54. Ekonomaiseri 2:n likaantumisen eteneminen

5.2.4 Ekonomaiseri 1:n likaantuminen

Ekonomaiseri 1 likaantuminen on havainnollistettu kahdella eri ajojaksolla kuvassa 55. Ekonomaiseri 1:n kuormakorjatussa paine-erossa ei juurikaan ole havaittavissa likaantumista kummaltakaan ajojaksolta. Paine-ero pysyy hyvin tasaisena ja jopa vähenee ajojakson aikana. Ajoittaisia piikkejä on kuitenkin havaittavissa, ja nämä voivat johtua mittalaitteiden likaantumisesta tai sisääntuloalueen sintraantumisesta.



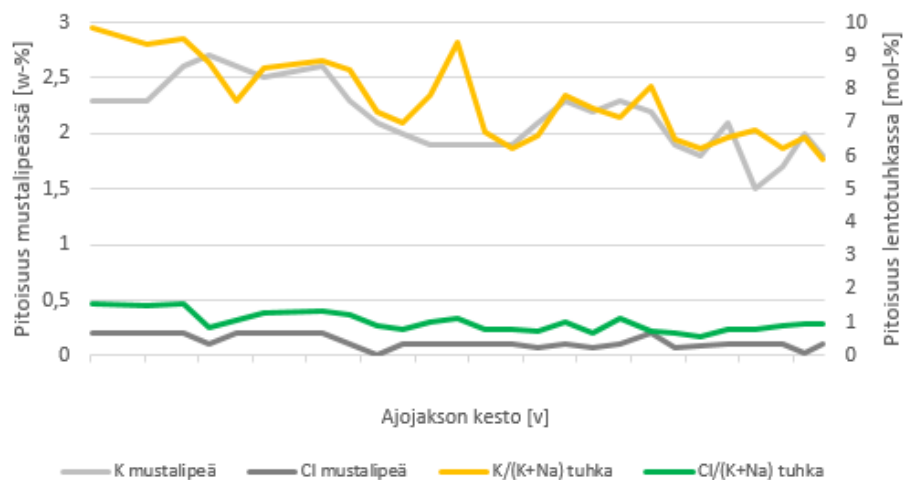
Kuva 55. Ekonomaiseri 1:n likaantumisen eteneminen

5.3 Polttoaineen muutosten vaikutus likaantumiseen

Polttoaineen tasalaatuisuus on yksi avaintekijä onnistuneen ajotavan luomisessa. Polttoliipeän koostumuksen seuraaminen perustuu monesti yksittäisiin laboratorioanalyysiin, mistä johtuen hetkelliset poikkeamat saattavat jäädä huomaamatta. Lisäksi muutokset ajotavoissa on monesti havaittavissa vasta pitkistä trendeistä, mistä johtuen esimerkiksi orgaanisen aineen määrän, suopapitoisuuden tai jäännösalkalin muutosten vaikutukset viskositeettiin, kiehumispisteennousuun ja siten ruiskutukseen sekä palamiseen saattavat johtaa vääränlaiseen operointiin. Onkin tärkeää ymmärtää polttoliipeän muutosten vaikutukset operoitavuuteen, jotta soodakattilaa operoitaisi tehokkaasti ja ajotapaa muutettaisiin liipeän muutosten perusteella.

5.3.1 Kaliumin ja kloorin rikastuminen

Kuvassa 56 on havainnollistettu kloori- ja kaliumpitoisuuden muutokset soodakattilalla yli 10 vuoden ajalta. Kloori- ja kaliumpitoisuudet ovat olleet suhteellisen matalia pitkään ja ovat vuosien saatossa laskeneet yhä pienemmiksi. Mustalipeän klooripitoisuus onkin ollut keskimäärin noin 0,1 %:ssa ja kaliumpitoisuus on pysynyt noin 2 %:n tuntumassa viimeiset neljä vuotta. Sähkösuodintuhkan klooripitoisuus on pysynyt 1 %:ssa usean vuoden, mutta kaliumpitoisuus on laskenut viime vuosina 6 % tuntumaan. Yhtälöllä 3.3 kaliumin rikastumiskertoimeksi saadaan 1,8 ja kloorille 3,0, jotka ovat normaalit havulipeää polttavalle soodakattilalle. Kloori- ja kalium-tasot ovatkin keskimääräistä alhaisempia, mistä johtuen myös tuhkan sulamispiste on korkeampi.



Kuva 56. Kaliumin ja kloorin pitoisuus mustalipeässä (harmaat) sekä suodintuhkassa (vihreät)

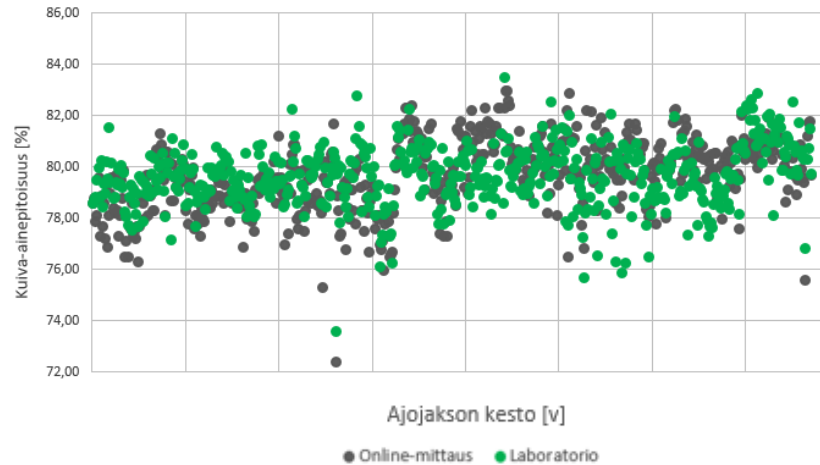
Kalium- ja kloori aiheuttavat lämpöpintojen likaantumista laskemalla tuhkan sulamislämpötilaa. Mustalipeän kalium- ja klooripitoisuuksien perusteella tuhkan tahma- ja kuonaantumislämpötilat ovat noin 760 °C ja 820 °C, minkä perusteella tahma-alue sijaitsee sekundääri- ja tertiääritulistimen alueella. Tukkeutumistarkasteluissa hankalimmat likaantumiskohdat ovatkin sijainneet sekundääri- ja tertiääritulistimen välimaastossa. Kyseinen alue on kuitenkin vähemmän ongelmallinen alue soodakattilan lämpöpinnoilla verrattuna esimerkiksi keittopinnan kapenevaan sisääntuloalueeseen.

Koska kaliumin ja kloorin hallintakeinot ovat riittävät, pitoisuudet ovat vuosien saatossa laskeneet, mistä johtuen kaliumilla ja kloorilla ei ole merkittävää osaa soodakattilan tukkeutumisessa. Tahma-alue on kapea ja se sijaitsee tulistinalueella, jossa savukaasukanavan pinta-ala on suuri ja alueen likaantumista voidaan hallita tehokkaasti nuohouksella. Tästä syystä on todennäköisempää, että tertiääritulistimen tukkeutuminen johtuu carryoverista tai riittämättömästä ja tehottomasta nuohouksesta.

5.3.2 Kuiva-ainepitoisuus

Polttoliipeän viskositeetti ja kiehumispisteennousu kasvavat ja siten ruiskutusominaisuudet muuttuvat nopeasti yli 80 % kuiva-aineilla. Kuiva-ainepitoisuus vaikuttaa siis merkittävästi polttoliipeän ruiskutusominaisuuksiin, joten on tärkeää, että kuiva-ainepitoisuus tunnetaan mahdollisimman tarkasti juuri ennen ruiskutusta. Jotta polttoliipeän viskositeetti pystytään vakioimaan tarkasti lämpötilaa säätämällä, täytyy mittausten olla luotettavia ja prosessinohjausjärjestelmän säätö toteutettu käyttäen tuoreita liipeän ominaisuuksia esimerkiksi elementaarianalyysiin perustuen.

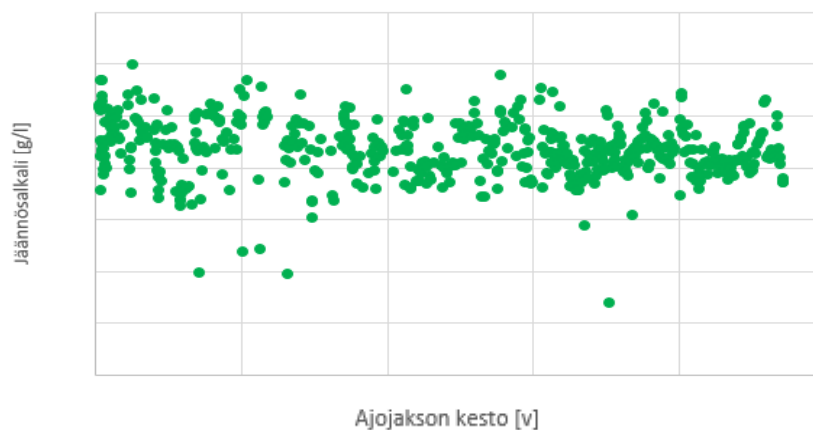
Kuvassa 57 on esitetty kuiva-ainemittausten online- ja laboratorion tarkistusmittausten tulokset, jotka ovatkin nousseet tasaisesti yli 80 %:n kuiva-ainetta ajotavan muutoksesta johtuen. Kuvasta voidaan lisäksi huomata, että onlinemittauksen ja laboratorion tarkistusmittauksen ero on ollut jatkuvasti yli 0,5 %. Mittauseroa ei voida kuitenkaan luotettavasti korjata käyttämällä refraktometrien tasokorjausta, koska polttoliipeänäytettä ei saada polttoliipeärenkaalta tuotannon aikana turvallisuussyistä johtuen. Mustaliipeänäyte otetaankin polttoliipeäsäiliölle menevästä linjasta eikä säiliön jälkeen. Tästä syystä polttoon päätyvän polttoliipeän todellista kuiva-ainepitoisuutta ei tunneta ja siten pisarakokoa joudutaan säätämään enemmän käsiohjauksella, mikä lisää epätarkkuutta pisarakoon säädössä.



Kuva 57. Polttoliipeän kuiva-ainepitoisuuden online- (harmaa) ja laboratoriomittaukset (vihreä)

5.3.3 Jäännösalkalipitoisuus

Jäännösalkalipitoisuuden laskeminen vähentää orgaanisen aineen liukenemista mustalipeään ja siten kasvattaa polttoliipeän viskositeettiä. Kuvasta 58 nähdään, että keittoprosessin jäännösalkalipitoisuus on laskenut. Jäännösalkalipitoisuus on tärkeä seurattava suure haihduttamon likaantumisen ja korroosion kannalta. Liian korkea alkalipitoisuus aiheuttaa haihduttamon hönkäputkien korrosioitumista, mistä johtuen jäännösalkali on pyritty laskemaan. Jäännösalkalipitoisuuden laskeminen on kasvattanut luonnollista viskositeettia ja vaikuttanut siten ruiskutusominaisuuksiin. Jotta polttoliipeän viskositeetti ja siten ruiskutusominaisuudet on saatu pidettyä optimaalisina, on polttoliipeän ruiskutuslämpötilaa jouduttu nostamaan käsisäädöllä.

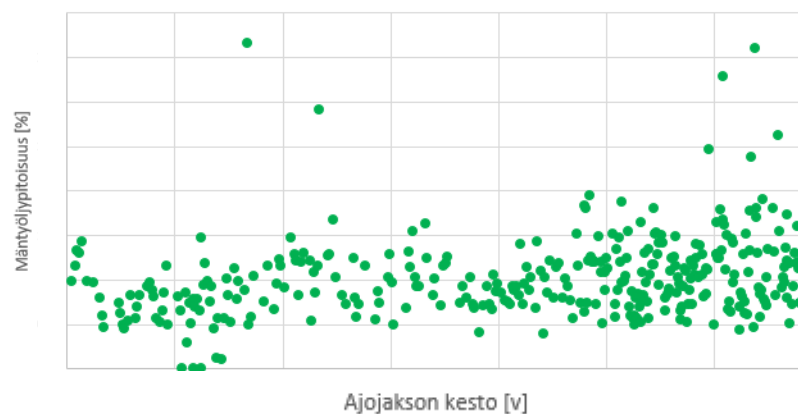


Kuva 58. Haihduttamon syöttöliipeän alkalipitoisuuden vaihtelut

5.3.4 Polttoliipeän mäntyöljypitoisuus

Suovalla on selkeästi korkeampi lämpöarvo kuin mustalipeällä, mistä syystä korkea suopaja mäntyöljypitoisuus tehostaakin soodakattilan höyryntuotantoa. Polttoliipeän suopapitoisuus on normaalisti alle 1 %:n, mutta huonolla erotuksella saattaa nousta korkealle jopa 2,5 %:iin. Vaikka korkea suopapitoisuus lisääkin höyryntuotantoa, se kasvattaa pisarakoon ja kaumaa ja siten aiheuttaa pisaran palamisen suspensiossa sekä pisaroiden karkaamisen lämpöpinnoille eli kasvattaa carryoverin määrää. Samalla saattaa aiheutua myös ongelmia sula-keon hallinnassa.

Kuvassa 59 on esitetty mäntyöljypitoisuus polttoliipeässä ja siitä selviää, että tehtaalla on ollut joidenkin prosenttiosuuksien vaihtelua mäntyöljypitoisuudessa riippuen vuodenaajoista, suovan erotuksesta sekä prosessiolosuhteista. Mäntyöljy aiheuttaa tulistimien likaantumista, jos pisaroitumista ei yritetä muuttaa säätämällä ruiskutuskulmaa tai polttoliipeän parametreja eli lämpötilaa tai painetta. Ruiskutuskulmaa ei ole muutettu mäntyöljypitoisuuden muutosten mukaan, joten mäntyöljy on voinut vaikuttaa likaantumiseen. Mäntyöljyn vaikutus suoraan likaantumiseen ei kuitenkaan uskota olevan kovin merkittävä kyseisellä tehtaalla, mutta lipeän laadun muuttuminen voi aiheuttaa ongelmia keon hallinnassa.

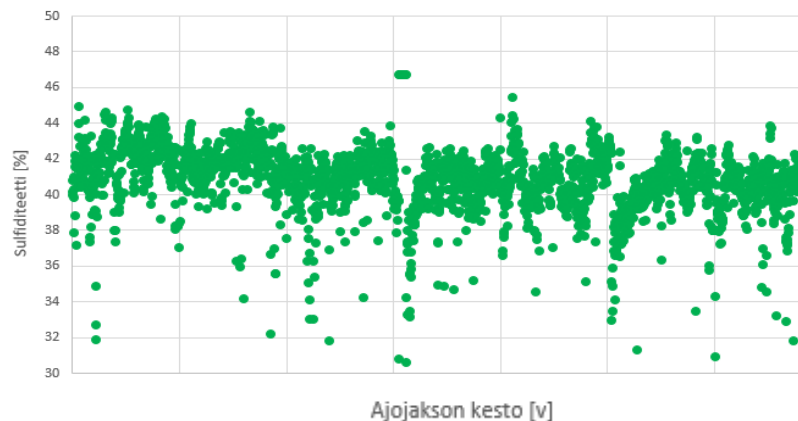


Kuva 59. Mäntyöljypitoisuuden vaihtelut

5.3.5 Sulfiditeetti ja S/Na₂-suhde

Korkea sulfiditeetti lisää polttoaineen rikkipitoisuutta ja siten riskiä rikkidioksidin muodostumiseen. Rikin oksidien syntyminen taas mahdollistaa happamien sulfaattien muodostumisen lentotuhkaan, jolloin tuhka muuttuu tahmeaksi ja aiheuttaa lämpöpintojen likaantumista. Sulfiditeetti vaihtelee tyypillisesti paljon, mistä syystä myös hetkittäiset muutokset saattavat johtaa nopeaan likaantumiseen. Tästä syystä sulfiditeetin hallinta onkin äärimmäisen tärkeässä asemassa soodakattilan auki pysymisessä.

Sulan ominaisuuksien kannalta paras sulfiditeetti on 40-41 % välillä, koska tällöin sula on mahdollisimman viskoosissa muodossa ja sula virtaa helpoiten sularänneillä. Kuvasta 60 huomataankin, että sulfiditeetti vaihtelee paljon ajojakson sisällä ja vuosien aikana on keskimääräinen sulfiditeetti on laskenut selkeästi alemmalle tasolle 40-41 % väliin. Keskimääräinen sulfiditeetti onkin sulan virtaamisen kannalta optimaalisella alueella, vaikka toisaalta sulfiditeetti vaihtelee nopeasti. Lisäksi sulan huono virtaaminen ränneillä aiheuttaa polttoliipeän lämpötilan nostamisen, jotta keon palaminen tehostuu ja sulavirtaus olisi tasaista. Tämä aiheuttaa pisarakoon pienenemisen, mikä taas johtaa runsaampaan carryoveriin.



Kuva 60. Valkoliipeän sulfiditeetti

Toinen rikin ja natriumin suhdetta kuvaava tunnusluku on S/Na₂-suhde, joka normaalisti vaihtelee 0,35-0,5 välillä suomalaisilla sellutehtailla. Polttoliipeän elementaarianalyysistä saatu S/Na₂-suhde onkin heitellyt viime vuosina, mikä on aiheutunut liipeän rikkipitoisuuden merkittävistä vaihteluista sulfiditeetin muuttuessa. Vaikka rikkipitoisuus onkin liipeässä ollut

ajoittain korkeampi, ei soodakattilalla ole silti syntynyt SO₂-päästöjä eikä savukaasukanan loppuosiin ole muodostunut happamia sulfaatteja, koska tulipesän lämpötila on korkea.

Sulfiditeetti on kuitenkin aiheuttanut nopeaa likaantumista keittopinnalla. Korkea rikki- ja klooripitoisuus laskee tuhkan sulamislämpötilaa ja samalla kasvattaa sintraantumisen nopeutta, jolloin riittämättömällä nuohouksella ja korkeilla lämpötiloilla keittopinta voi sintraantua nopeasti. (Esa Vakkilainen keskustelu 14.02.2018)

5.4 Tulistinalueen likaantumistarkastelu

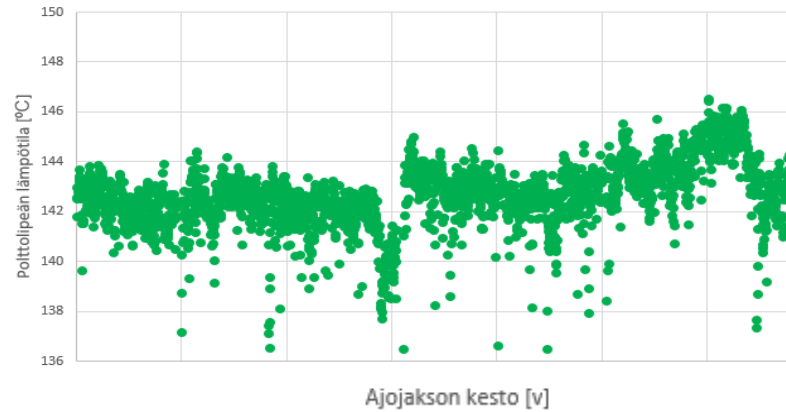
Tulistinalueella merkittävimmät syyt likaantumiseen ovat carryover sekä riittämätön nuohous. Carryoverin määrään vaikuttaa polttoliipeän ruiskutuslämpötilalla ja suutinpaineella säädettävä polttoliipeäpisaroiden koko, ruiskutuskulma sekä palamisilmanjako sekä ilmanpaineet. Nuohouksen tehokkuuteen vaikuttavat vuorostaan nuohousjärjestelmän paine, linjan painehäviöt sekä käytettävät nuohoussuuttimet.

5.4.1 Polttoliipeän ruiskutus

Polttoliipeän operointilämpötila ja suutinpaine vaihtelevat soodakattilan dimensioista riippuen merkittävästi. Esimerkiksi Suomessa käytettävät suutinpaineet vaihtelevat 1,1-2,0 bariin ja polttoliipeän ruiskutuslämpötilana käytetään 122-143 °C kuiva-aineesta, viskositeetista ja ruiskutuskorkeudesta riippuen. (Vakkilainen 2006, 14) Korkean kuiva-aineen soodakattiloilla käytetään tyypillisesti korkeampaa ruiskutuslämpötilaa ja suutinpainetta, jos ruiskutustaso on alempana, jotta lipeäpisara kerkeää palaa ennen päätymistä sulakekoon.

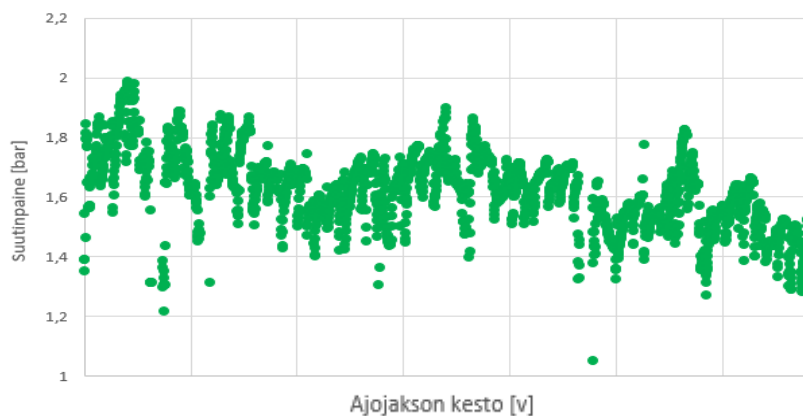
Kuvasta 61 nähdään, että soodakattilan polttoliipeän lämpötila on noussut jo yli 146 °C:n, joka on normaalia ruiskutuslämpötilaa huomattavasti korkeampi. Ruiskutuslämpötila on noussut kuiva-ainepitoisuuden kasvaessa sekä jäännösalkalipitoisuuden laskiessa, sillä tämä kasvattaa polttoliipeän viskositeettia ja siten vaativat korkeampaa lämpötilaa liipeän pisaroitumiseksi. Toisaalta myös nykyinen ajotapa, jossa ajetaan tasaisella tulipesällä ilman kekoa, on lisännyt epätarkkuutta pisarakoon säätöön ja samalla aiheuttanut lämpötilan nousun tarpeettoman korkeaksi. Liian korkea polttoliipeän lämpötila aiheuttaa pisaroiden karkaamista

tulipesän yläosiin sekä vaikeuttaa lipeän virtausta suuttimessa flashing-ilmioistä eli paisuntakiehumisesta johtuen. Paisuntakiehuminen vaikuttaa pisaroitumiseen ja saattaa siten hajottaa suihkun.



Kuva 61. Polttoliipeän lämpötila

Kuvasta 62 huomataan, että polttoliipeän suutinpaine on vuodesta 2010 alkaen laskenut noin 1,5 bariin. Suutinpaine on laskenut, koska lipeän viskositeettiä on laskettu nostamalla lämpötilaa ja siten suutinpaineen on täytynyt laskea, jotta pisaroituminen on pysynyt vakiona. Matalammalla suutinpaineella pisarakoko on suurempi ja siten vähentää karkaavien carryover-hiukkasten määrää. Suutinkokoa on lisäksi kasvatettu 32 mm:stä 34 mm:iin, mikä myös on laskenut painetta. Lisäksi viimeisillä ajojaksoilla on ajettu ensin 9 ja myöhemmin myös 10 lipeäruiskulla, koska korkea kuiva-aine on pakottanut lisäämään ruiskujen määrää liian korkeasta suutinpaineesta johtuen.

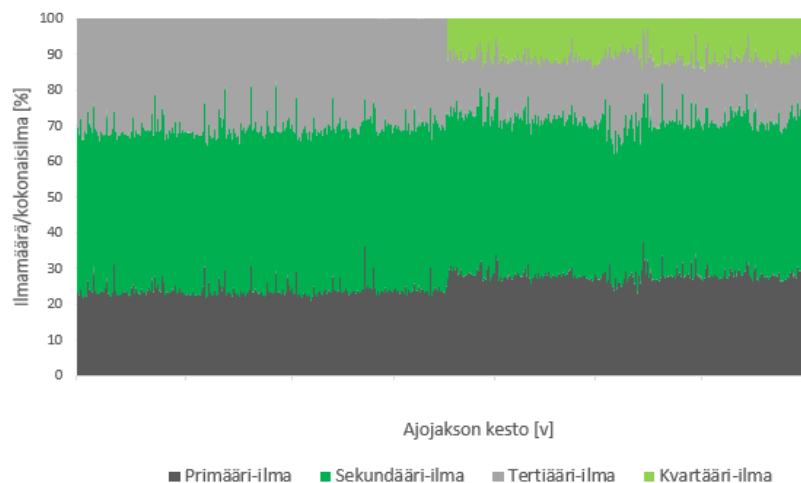


Kuva 62. Polttoliipeän suutinpaine

Korkea polttoliipeän lämpötila ja suutinpaine pienentävät polttoliipeäpisan kokoa ja siksi lisää carryoveria ja tulistinalueen tukkeutumista. Vaikka polttoliipeän viskositeetti onkin noussut lipeän laadun muuttuessa, polttoliipeän lämpötilan vääränlainen kehitys on pienentänyt pisarakokoa, pahentanut soodakattilan carryoveria ja siten johtanut tulistimen likaantumiseen. Polttoliipeän lämpötilan muuttaminen vaikuttaa kuitenkin myös suutinpaineeseen ja säätöä rajoittavat haluttu kapasiteetti, ruiskujen kesto ja keon säätö. Ruiskutuksen lämpötilan ja suutinpaineen vaikutusta carryoveriin tuleekin testata kokeellisessa osuudessa.

5.4.2 Palamisilman syöttö

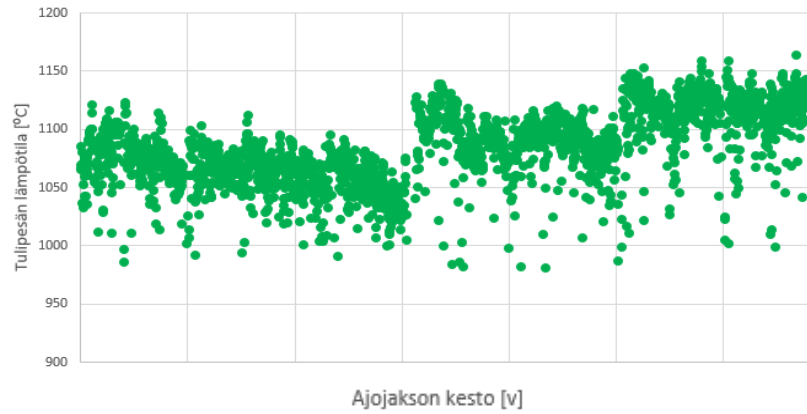
Moderneissa soodakattiloissa käytetään monesti multilevel-ilmajärjestelmää, jossa sekundaari- ja tertiääri-ilmatasot on jaettu vähintään kahteen tasoon ja soodakattilalle on lisätty kvartaari-ilmataso varmistamaan loppuun palamisen. Soodakattilan ilmajärjestelmä on modernisoitu, jolloin soodakattilalle lisättiin kvartaari-ilmataso vähentämään typen oksidipäästöjä. Kuvassa 63 onkin esitetty soodakattilan ilmansyöttösuhteet, jossa huomataan ilmajärjestelmämuutoksen jälkeen soodakattilalle syötettävän niin sanotun ylailman määrän vähentyneen suhteessa alailmatasoihin.



Kuva 63. Soodakattilan ilmanjako

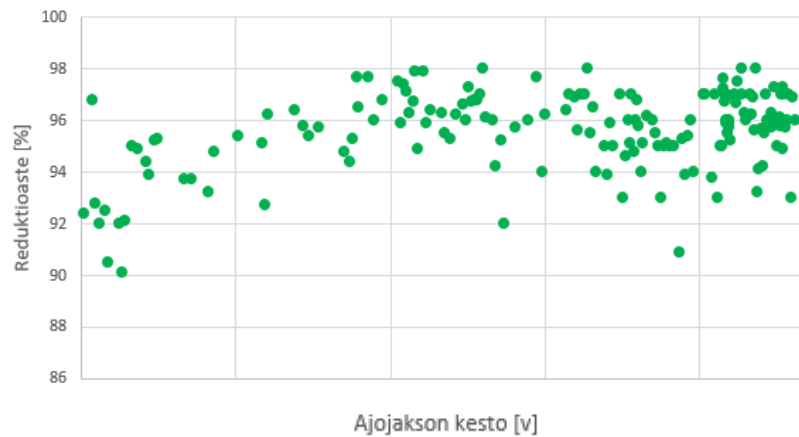
Soodakattilan ilmajärjestelmän muutos onkin kasvattanut tulipesän lämpötilaa ja muutos on nähtävissä kuvasta 64, jossa on esitetty tulipesän lämpötilat tertiääri-ilmatason korkeudella.

Tulipesän lämpötila onkin noussut kymmenillä asteilla tertiääritason korkeudella. Ilmajärjestelmän muuttamisen lisäksi palamista ja lämmöntuotantoa on myös tehostanut kuiva-ainepitoisuuden kasvattaminen.



Kuva 64. Tulipesän lämpötila tertiääri-ilmatasolla

Tulipesän lämpötilan kasvaminen parantaa soodakattilan höyryntuotannon tehokkuutta, vähentää SO_2 - ja TRS-päästöjä ja parantaa prosessin reduktiota. Kvartääritason lisäämisen jälkeen soodakattilalla ei olekaan enää havaittu rikkidioksidipäästöjä ja soodakattilan reduktioaste on ollut yli 96 %. Reduktioasteen kasvaminen havaitaankin kuvasta 65, jossa on esitetty reduktioasteen laboratorion mittaustulokset.

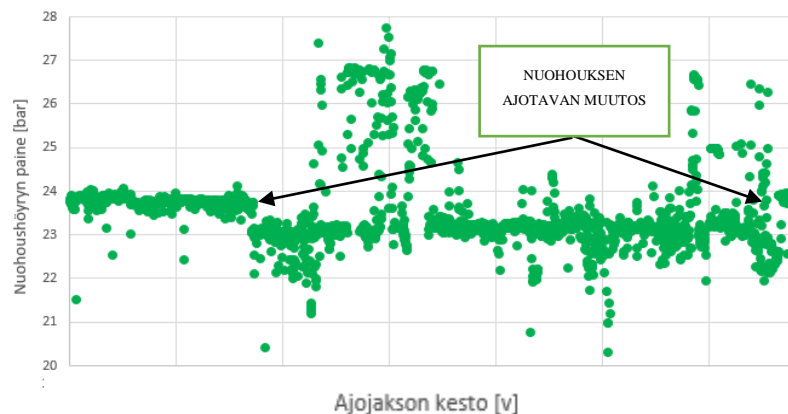


Kuva 65. Reduktioasteen laboratoriomittaustulokset

5.4.3 Nuohous

Soodakattilalla on siirrytty käyttämään alkuperäisen ajotavan eli kolmen nuohoimen sijasta kahta nuohousparia, koska kuormaa on kasvatettu ja siten nuohoustarve on kasvanut samassa suhteessa. Nuohousmäärän kasvattamisella on haluttu varmistaa, että lämpöpintoja pystytään puhdistamaan samanaikaisesti mahdollisimman paljon ja riittävän usein. Aiemmassa ajotavassa toista nuohousryhmää eli joko tulistin- tai savukaasukanavan loppuosaa on ajettu yhdellä nuohoinparilla ja toista ryhmää yhdellä nuohoimella, jolloin toisen alueen nuohouskerrat ovat olleet alhaisemmat. Nuohouskertojen lisääminen kasvattaa nuohoushöyryn kuluusta, jolloin nuohousjärjestelmä on oltava mitoitettu riittävän suureksi, jotta nuohoushöyryn paine ja virtaus ovat riittävän korkeat tehokkaaseen puhdistukseen.

Kuvasta 66 nähdään, että kaksiparinuohoukseen siirtyminen on aiheuttanut nuohoushöyryn paineen jatkuvaa heiluntaa, koska nuohouksen pääsäätöventtiili ei pysty enää lisäämään höyrymäärää käytettäessä tulistimilta saapuvaa höyryä ja siten paine vaihtelee runsaasti eri nuohousmäärillä. Nuohouksen linjapaine vaihtelee 19-28 bar:in välillä ja päivittäinen keskiarvo on laskenut 24 bar:sta 23 bar:iin. Tällöin säätöventtiili on täysin auki, jolloin virtauksen ja paineen säätö ei enää onnistu venttiilin avulla. Neljällä nuohoimella nuohotessa linjapaine on hetkittäin hyvin alhainen, mikä johtaa myös liian alhaiseen paineeseen kulma-venttiilillä painehäviöstä riippuen ja aiheuttaa siten riittämättömän puhdistustehokkuuden.



Kuva 66. Soodakattilan nuohoushöyrylinjan paine

Nuohoushöyryjärjestelmän riittävyyttä voidaan arvioida myös esimerkiksi nuohoushöyryn virtausnopeuden avulla. Tyypillisesti virtausnopeudet mitoitetaan 25-40 m/s välille, koska

yli 40 m/s nopeuksilla putkisto voi vaurioitua ja höyrylinjan painehäviö kasvaa. Nuohoushöyryn nopeus saadaan selvitettyä höyryputkiston halkaisijan yhtälöstä ja nopeus voidaan laskea yhtälöllä (Spirax Sarco)

$$v = \frac{4 \cdot q_m \cdot v}{d^2 \cdot \pi} \quad (5.1)$$

missä

v	nopeus	[m/s]
q_m	massavirta	[kg/s]
v	ominaistilavuus	[m ³ /kg]
d	putken halkaisija	[m]

Nuohoushöyryjärjestelmän putkikoko ennen nuohoushöyryn säätöventtiiliä on DN100. Lasketaan yhtälöllä 5.1 nykyisen nuohousjärjestelmän riittävyys, kun linjapaine on 24 baria ja nuohoushöyryn kulutus kolmella nuohoimella eli 7,5 kg/s

$$v = \frac{4 \cdot 7,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,09 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{(0,101 \text{ m})^2 \cdot \pi} = 82 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Nuohousjärjestelmässä DN150-putkella nopeus on 36 m/s ja DN200-putkella 21 m/s. Huomataankin, että DN100-putkikoolla putkisto on mahdollisesti liian ahdas ennen säätöventtiiliä, kun taas DN200-putkella nopeudet ovat mitoitusalueella. Nuohouslinjan riittävyyttä tulee tarkistella tarkemmin.

Nuohouksen puutteet vaikuttavat tulistinalueen lisäksi myös savukaasukanavan loppuosan likaantumiseen, kun kanavan paine-erot ovat suuria ja nuohoimella käytetään vanhoja heikompitehoisia nuohoussuuttimia. Tästä syystä nuohoushöyryn paineet ja linjan painehäviöt päätettiin selvittää mittaamalla paineet nuohoimen kulmaventtiileiltä.

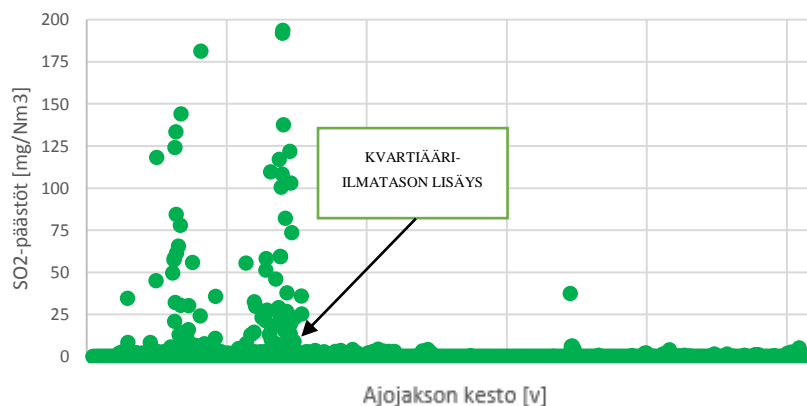
5.5 Keittoputkiston ja ekonomaisereiden likaantumistarkastelu

Soodakattilan loppuosassa merkittävimmät syyt likaantumiseen ovat monesti happamat sulfaatit, sintraantuminen, savukaasujen nopeudet sekä savukaasukanavan vuodot. Happamat

sulfaatit johtuvat usein rikkidioksidipäästöistä, kun taas sintraantumiseen vaikuttaa keittopinnalle ja ekonomaiseri 2:lle tulevien lentotuhkan koostumus ja lämpötila. Savukaasujen nopeudet ovat liian suuret, jos kanavat on mitoitettu kyseiselle kuormalle liian ahtaiksi tai kanavassa esiintyy suuria vuotoja suurista vuodoista.

5.5.1 Happamien sulfaattien esiintyminen

Vapaat rikkidioksidit voivat muodostaa natriumbisulfaattia eli happamia suoloja savukaasukanavan loppuosassa, mikä aiheuttaa lentotuhkan tarrautumista ekonomaisereissa ja sähkösuodattimilla. Kuvasta 67 huomataan, että soodakattilan rikkidioksidipäästöt ovat olleet alhaiset, kun soodakattilan ilmajärjestelmä uusittiin ja soodakattilalle lisättiin jälkipolttoalueelle kvartääri-ilmataso. Myös kuiva-ainepitoisuus on noussut yli 80 %:n, mikä on myös tehostanut tulipesän lämmöntuotantoa ja samanaikaisesti vesihöyryn määrä savukaasuissa on alhaisempi, mikä vähentää muodostumisriskiä. Soodakattilan keon korkea lämpötila sekä S/Na₂-suhteen matala taso viittaavatkin vahvasti siihen, että mittaus on myös luotettava ja savukaasuissa ei esiintyisi rikkiä.



Kuva 67. Soodakattilan rikkidioksidipitoisuudet

Kvartääritason lisäyksen jälkeen soodakattilalla onkin ollut vain satunnaisia rikkidioksidipäästöpiikkejä, jotka eivät ole laskeneet tuhkan pH:ta juuri alle 11. Soodakattilan sähkösuodatintuhkan pH on ollut jatkuvasti yli 11, mikä siis tekee happamien sulfaattien esiintymisen epätodennäköiseksi soodakattilan tuhkassa. Taulukkoon 4 on listattu satunnaisia mittauksia, joissa pH on mitattu analysoimalla näytteestä, johon on sekoitettu yksi (1) g tuhkanäytettä 100 ml puhdistettuun veteen.

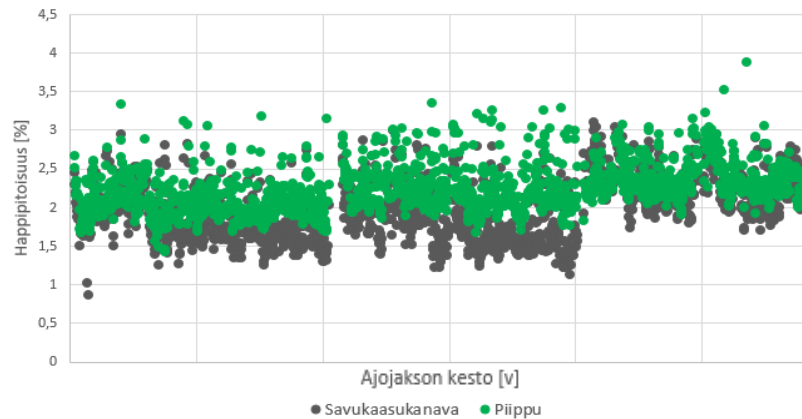
Taulukko 4. Tuloksia sähkösuodintuhkan pH:n mittauksista ja karbonaattipitoisuuksista eri mitauspäivinä.

	Tuhkan pH [-]	CO₃⁻-pitoisuus [%]
Mittaus 1 (22.11.)	10,89	6,65
Mittaus 2 (23.11.)	10,92	7,28
Mittaus 3 (23.11.)	11,03	7,56
Mittaus 4 (27.11.)	11,05	9,87
Mittaus 5 (29.11.)	11,16	15,17
Mittaus 6 (22.12. 16)	11,06	-
Mittaus 7 (27.12. 10)	11,09	-
Mittaus 8 (4.1. 13)	11,11	-
Mittaus 9 (5.1. 12)	11,13	-
Mittaus 11 (16.1. 8)	11,15	-

Vaikka sulfiditeettitaso vaihteleeikin tehtaalla muutaman prosentin välillä, ei soodakattilalla esiinny SO₂-päästöjä eikä pH laske suodintuhkassa alle 10, mitä pidetään rajana happamien sulfaattien esiintymiselle lentotuhkassa. Tulipesän lämpötilan kasvattaminen uudella ilmajärjestelmällä sekä korkeammalla kuiva-aineella on poistanut soodakattilan rikkidioksidipäästöt, mikä poissulkee happamien sulfaattien esiintymisen ja niiden aiheuttaman tukkeutumisen soodakattilan loppuosissa.

5.5.2 Kanavan vuodot

Savukaasukanavan vuodot voidaan havaita esimerkiksi piipun happipitoisuudesta, jonka ollessa savukaasukanavan happipitoisuutta korkeampi, voidaan olettaa, että kanavaan pääsee korvausilmaa. Pienet erot mittauksissa ovat mittaustarkkuuden ja mahdollisten mittalaittevirheiden vuoksi mahdollisia. Kuvasta 68 huomataan, että soodakattilan happipitoisuudet savukaasukanavassa keittopinnan jälkeen ja jäännöshappi piipussa seuraavat hyvin toisiaan eikä siten merkkejä suuresta ilmavuodosta ole havaittavissa mittauksen avulla. Kanavien seinämät on tarkastettu vuosiseisokissa eikä sieltä ole löydetty repeämiä, josta olisi voinut vuotaa kosteaa ilmaa kanaviin.



Kuva 68. Soodakattilan happipitoisuudet keittopinnan jälkeen ja savupiipussa

5.5.3 Savukaasujen nopeudet

Savukaasujen nopeuden kasvaminen liian suureksi kasvattaa partikkeleiden törmäämistä, mikä aiheuttaa pinnan likaantumista virtauskanavan kapenevissa kohdissa. Tästä syystä esimerkiksi keittopinnan ja varsinkin ekonomaisereiden sisääntuloaukoissa nopeus saattaa kasvaa haitallisen suureksi. Taulukkoon 5 onkin listattu mitoitusalueet, joiden rajoissa olisi hyvä pysyä moderneilla kattiloilla. Esimerkiksi ekonomaisereiden sisääntulossa suositusnopeus on 7-9 m/s ja lämpöpinnan kanavassa 17-19 m/s. Samasta taulukosta huomataan, että MCR-kuormalla savukaasujen todelliset nopeudet pysyvät mitoitusalueella eivätkä kasva liian suuriksi. Ainoastaan ekonomaiseri 1 jälkeisessä kapeassa kanavassa savukaasujen nopeus nousee mitoitusaluetta suuremmaksi. Tästä syystä kanavan käänntökohtaan onkin kertynyt lika-kerros ja kanava on lopulta kuroutunut umpeen.

Taulukko 5. Soodakattilan savukaasukanavan nopeudet

	MCR- kuorma	Mitoitus- alue
Keittopinta [m/s]	16,4	16-19
Ekonomaiseri 2 [m/s]	17,4	16-19
EKO2 sisääntulo [m/s]	7,7	7-9
Ekonomaiseri 1 [m/s]	17,2	16-19
EKO1 sisääntulo [m/s]	5,5	7-9
EKO1 jälkeinen kanava [m/s]	18,3	10-15

6 KOKEELLINEN OSUUS

Työtä varten suoritettiin kolme erillistä koetta, joissa testattiin eri ajomallien vaikutusta prosessin vakauteen, operoitavuuteen ja tulistimen likaantumiseen. Seuraavassa luvussa alustetaan koeajojen suoritusperiaatteet ja kokeiden valintaperusteet sekä käydään läpi kokeiden toteutustavat, havainnot, tulokset ja johtopäätökset.

6.1 Kokeiden suoritusperiaatteet

Suoritetut kokeet valittiin kirjallisuustietojen sekä kerätyn datan ja mittausten vertailun perusteella, koska todettiin, että soodakattilan ylikuorma sekä polttolipeän ruiskutuslämpötilan kasvaminen normaalia tasoa korkeammaksi on lisännyt carryoveria. Carryover johtuu liian pienestä pisarakoosta sekä epätasaisesta ilmajaosta, mistä syystä ruiskutusparametreihin ja ilmanpaineisiin haluttiin löytää ajoarvot, joilla carryover olisi mahdollisimman vähäistä. Lisäksi pyrittiin tasapainottamaan savukaasujen virtauksia ja siten vähentämään carryoveria tasoittamalla ilmansyöttöprofiilia.

Nuohouksen tehokkuutta testattiin, koska nuohouksen ajotavan muuttaminen oli laskenut keskimääräistä höyrynpainetta ja linjan höyrynpaine oli hetkittäin hyvin alhainen ja jopa matalampi kuin laitetoimittajien vaatimukset nuohoimen kulmaventtiilillä. Tästä johtuen haluttiin selvittää todellinen painehäviö höyrylinjassa ja nuohouksen puhdistustehokkuus kriittisillä alueilla.

6.1.1 Ruiskutuksen ja ilmajärjestelmän koeajot

Suoritetuissa koeajoissa pyrittiin varmistamaan tulosten vertailukelpoisuus ja edustavuus vakioimalla olosuhteet eri koepisteissä. Kokeet pyrittiin suorittamaan mahdollisimman korkealla tuotannolla sekä tasaisella kuiva-ainepitoisuudella, jotta saadut johtopäätökset olisivat vertailukelpoisia myös MCR-tuotantoon. Tuloksia analysoitaessa huomioitiin myös tulipesän olosuhteiden ja polttolipeän laadun aiheuttamat häiriötekijät, jotka aiheuttavat aina virhettä mittaustuloksissa.

Ruiskutuksen ja ilmajärjestelmän kokeissa mittausdataa kerättiin jokaisesta koepisteestä vähintään kahden tunnin ajalta ja seurattavien suureiden muutosta arvioitiin mittausdatan perusteella. Lisäksi keon muutoksille varattiin aikaa useita tunteja ennen suoritettuja carryover-mittauksia, jotta muutokset palamisessa kerkesivät tasoittua ja kerätyt mittaustulokset olisivat luotettavia. Carryover-mittauksia toteutettiin ilmakokeessa vähintään 3 jokaista koepistettä kohden.

Carryover-mittaukset perustuivat Åbo Akademin minuuttisondi-projektissa luotuun mittaus-tapaan, jolla pystytään luotettavasti arvioimaan hetkellisen carryoverin määrää käyttämällä jäähdyttämätöntä sondia. Carryovermittauksessa mittaussondi työnnetään soodakattilan etu-seinältä vasemman ja oikean puolen tarkastusluukuista soodakattilan tulipesään ja sondia pidetään soodakattilan tulipesässä kerrostumanopeudesta riippuen 10-30 sekuntia. Lopuksi sondin pinnan osumien määrää verrataan Minuuttisondi-projektissa luotuun vertailtavaan kuvasarjaan ja visuaalisesti arvioidaan kerrostuman peittävyysaste. (Vähä-Savo 2009) Koe-ajossa päädyttiin käyttämään 10 sekunnin mittauksia, koska jo 20 sekunnin mittauksissa kerrostumia oli alkanut jo kertyä päällekkäin ja peittävyysastetta oli vaikeaa enää arvioida.

Carryoverin arviointi on melko epätarkkaa, koska arviointi tehdään visuaalisesti ja arvioin-tiin vaikuttaa putken pinta sekä taustan väri ja valaistus. Koska kuvaukset tehtiin kattilahuo-neessa, ei valaistukseen ja taustaan pystytty juurikaan vaikuttamaan, mutta arviointipaikka vakioitiin jokaiselle mittaukselle yhteiseksi. Tärkeintä carryoverin mittauksessa on kuiten-kin tietää suuruusluokat, joiden avulla pystytään tulkitsemaan carryoverin vaikutus likaantumiseen. Suuruusluokat onkin esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Carryoverin suuruusluokat (Vakkilainen keskustelu 10.11.2017)

	Kerrostuma [g/m³n]
Korkea carryover, merkittävä vaikutus likaantumiseen	>5
Normaali carryover, vaikuttaa likaantumiseen	3-4
Matala carryover, vähäinen vaikutus likaantumiseen	1-2

6.1.2 Nuohouksen testaus

Nuohousjärjestelmän riittävyttä arvioitiin mittaamalla nuohoushöyryn paine nuohointen kulmaventtiileiltä nuohointoimittajan toimesta. Näin varmistettiin, että mittauksen toteutus oli laitetoimittajan käytäntöjen mukainen eikä aiheuttanut ongelmia soodakattilan käytettävyydessä. Lisäksi haluttiin varmistaa, että mittalaitteen tuloksiin voitiin luottaa virhemarginaalin rajoissa. Mittaukset olivat lisäksi tarkempi tapa selvittää painehäviöt, sillä painehäviön laskeminen olisi ollut haastavaa ja hyvin epätarkkaa ilman soveltuvia laskentaohjelmia.

6.2 Ruiskutuksen askelkoe

Ruiskutuksen askelkoe toteutettiin kaksimuuttujakokeena, jossa kokeiltiin polttoliipeän lämpötilan ja suutinpaineen vaikutusta carryoverin määrään, soodakattilan vinokuormaan, tuorehöyryn jäähdytysveden määrään, höyryntuotantoon, päästöihin sekä sulakeon kokoon eli operoitavuuteen. Taulukkoon 7 on listattu kokeen muuttujat ja koepisteet.

Soodakattilan vinoutumaa ja sen kehittymistä tutkittiin savukaasujen tulistimien jälkeisen lämpötilan sekä tulistuksen oikean ja vasemman puolen lämpötilan mittausdatan avulla. Lisäksi vaikutusta tulistinalueen likaantumiseen arvioitiin tuorehöyryn jäähdytysvesivirtauksen avulla, minkä lisäksi palamista arvioitiin höyryntuotannon sekä NO_x- ja CO-päästöjen avulla. Keon hallinta on soodakattilan operoinnin kannalta tärkeä parametri, mistä syystä myös keon muutoksien avulla arvioitiin koepisteiden operoitavuutta. Tästä syystä kaikki selkeät ajettavuuteen vaikuttavat muutokset sulakeossa kuvattiin.

Taulukko 7. Koeajon 1 testiparametrit

Testiparametri	+	-
Polttoliipeän pisaransäätölämpötila [°C]	22,0	19,0
Polttoliipeän ruiskujen määrä [-]	8	10

6.2.1 Koepisteiden valinta

Koeajon tarkoituksena on löytää ohjeelliset arvot polttolipeän lämpötilalle ja ruiskujen määrälle, joilla soodakattilaa voidaan operoida aiheuttamatta merkittävää carryoveria. Koepisteet valittiin siten, että muutosten vaikutus pisarakokoon olisi mahdollisimman merkittävä ja koepisteiden väliltä pystyttäisiin löytämään optimaaliset ajoarvot. Koepisteet valittiin myös tiedostaen, että matalilla koepisteillä (-) operoitaessa pisarakoko kasvaa, jolloin keon hallinta hankaloituu ja saattaa aiheuttaa muutoksia kokeisiin.

6.2.2 Havainnot

Haasteita koeajojen suorittamiseen aiheuttivat muuttuva lipeän laatu, jatkuvat kuiva-ainepitoisuuden vaihtelut, epätasainen kuorma sekä sulakeon muutokset. Lisäksi kuiva-aine oli tavoitetasoa alhaisempi koeajojen alkaessa, mistä syystä koe jouduttiin suorittamaan alle 80 %:n kuiva-aineessa. Kuiva-ainepitoisuuden vaihtelut johtuivat haihduttamon kärkiyksiköiden pesusyklistä, joka aiheutti kuiva-aineen romahduksia polttolipeän vahvuuden laskiessa polttolipeäsäiliössä. Tästä syystä olosuhteiden vakioiminen ei onnistunut täysin vaan koeajot suoritettiin jatkuvien muutosten läsnä ollessa. Toisaalta koepisteiden mittausten ajankohta valittiin siten, että olosuhteet olisivat mahdollisimman tasaiset ja vertailukelpoiset.

Muutosherkkyyden vuoksi muutokset tehtiin rauhallisesti, mistä syystä myös carryover-mittauksia tehtiin useita myös koepisteiden välillä. Soodakattilan tuotantoa jouduttiin koepisteiden välillä kuitenkin tehtaan ajotilanteesta johtuen rajoittamaan, mistä syystä tehdyt mitaukset eivät ole merkityksellisiä tutkimuksen kannalta. Koepisteiden 2 ja 3 välillä sulakeko olikin paremmin hallittavissa. Kuvassa 69 on havainnollistettu sulakeon muutoksia eri koepisteissä.



Koepiste 1 (22 °C, 8 ruiskua)

Koepiste 3 (19 °C, 8 ruiskua)



Mittapiste A (21 °C, 10 ruiskua)

Mittapiste B (19 °C, 8 ruiskua)



Kuva 69. Soodakattilan keon muutokset ruiskutuskokeessa

Koepisteessä 1 tulipesä oli kirkas ja paloi hyvin ilman kekoa tulipesässä. Suutinmäärän lisääminen aiheutti pientä sulakeon muodostumista, mutta keko tasoittui ilman muutoksia. Lämpötilaa laskiessa 22 °C:sta 21 C:een, suutinpaine laski entisestään, mikä kasvatti pisarakokoa ja johti keon epämuodostumiseen ja kasvamiseen. Matalilla suutinpaineilla sulakeko olikin hyvin herkkä muutoksille. Sulakeko kuitenkin paloi pois vähentämällä ruiskujen määrää, mikä luonnollisesti kasvatti ruiskutuspainetta ja pienensi pisarakokoa. Koepisteessä 3 sulakeko alkoi kasvaa, mutta tulipesä paloi silti kirkkaana. Kuiva-aine nousi kokeen loppuvaiheessa yli 80 %:n, jolloin sulakeko alkoi kasvaa merkittävästi. Sularännit alkoivat tukkeutua ja sula virtasi huonosti jo aiemmissa mittauspisteissä. Polttolipeän lämpötilaa jouduttiin nostamaan, ettei sulakeko alkanut kasvaa hallitsemattomasti ja siten viimeisen koepisteen mittauksia ei voitu suorittaa.

6.2.3 Tulokset

Matalalla lämpötilalla ja suutinpaineella carryover oli myös odotetusti pienempi, koska pisarakoko kasvaa suutinpainetta ja polttolipeän lämpötilaa laskettaessa. Mittauksista huomattiin myös, että carryoverin vinoutuma vaihteli eri koepisteissä. Keskimäärin carryoverin määrä pienenikin matalammalla lämpötilalla, mutta muutos ei ollut erityisen merkittävä. Taulukkoon 8 on listattu carryover-mittausten tulokset ruiskutuksen askelkokeesta. Carryover-mittauksia olisi pitänyt kuitenkin toistaa useampia, koska mittaushetkellä carryoverin mittaustulokseen vaikuttaa tulipesän ilmaprofiilin muutokset sekä tulistinalueen nuohous.

Taulukko 8. Koeajon carryover-mittausten tulokset

	Carryover, vasen [g/m³n]	Carryover, oikea [g/m³n]
Koepiste 1 (22 °C, 8 ruiskua)	4,4	2,3
Koepiste 2 (22 °C, 10 ruiskua)	2,3	3,5
Koepiste 3 (19 °C, 8 ruiskua)	2,3	3,5
Koepiste 4 (19 °C, 10 ruiskua)	-	-

NO_x- ja CO-päästöissä ei nähty merkittäviä muutoksia koepisteiden välillä, sillä CO-päästöt vaihtelivat vain muutostilanteissa ja NO_x-päästöt vaihtelivat 180-200 mg/m³n välillä koko ajojakson. Merkittäviä haasteita päästöjen kannalta ei koeajossa ilmennyt. Höyryntuotannossa ei ollut merkittäviä eroja koepisteiden välillä, sillä höyryntuotanto oli keskimäärin noin 150-152 kg/s välillä kaikissa koepisteissä. Koepisteillä ei ollut siis merkittävää vaikutusta päästöihin eikä höyryntuotantoon.

Tulistuksen vinoutumassa koepisteiden välillä oli kuitenkin eroja. Koepisteessä 1 tulistus oli merkittävästi suurempi soodakattilan vasemmalla puolella, kun taas koepisteessä 2 ja 3 soodakattilan oikea puolen tulistus oli korkeampi. Tulistimien jälkeisten savukaasujen lämpötiloissa vinoutumaa oli selkeästi enemmän oikealle puolelle ja koepisteessä 2 vinoutuma olikin merkittävin. Savukaasut olivat myös keskimäärin kuumempia juuri koepisteessä 2, sillä lämpötilat vaihtelivat noin 615-650 °C:n välillä. Pienin vinokuorma ja samalla myös matalimmat lämpötilat olivat koepisteessä 1, jossa lämpötilat vaihtelivat 615-635 °C:n välillä.

6.2.4 Johtopäätökset

Yli 80 %:n kuiva-aineella polttolipeän viskositeetti kasvoi liian suureksi matalammalla lämpötilalla, mikä kasvatti polttolipeän pisarakokoa ja aiheutti siten pisaroiden siirtymisen suoraan sulakekoon. Tämä johti keon nopeaan kasvuun, mikä on nähtävissä kuvasta 69. Sulakeon kasvaessa myös sularännien toiminnassa oli häiriöitä. Polttolipeän lämpötilaa jouduttiinkin nostamaan, jotta tulipesä saatiin hallintaan. Lisäksi kuiva-ainepitoisuuden laskeminen muutti pisaroitumista, jolloin sulakeko paloi varsin nopeasti pois.

Lipeän lämpötilan laskeminen aiheutti epävakautta tulipesän hallinnassa, mutta samalla myös vähensi carryoverin määrää. Ruiskutuksessa tulisikin suosia mahdollisimman matalaa ruiskutuslämpötilaa, jotta pisarakoko pysyisi riittävän suurena, etteivät pisarat karkaa tulipesän yläosiin. Haasteita ruiskutuksen säätöön kuitenkin aiheuttaa lipeän laadun muuttuminen, jolloin viskositeetti muuttuu esimerkiksi kuiva-aine-, mäntyöljy- ja jäännösalkalipitoisuuksien vaihtelusta johtuen.

Matalalla ruiskutuspainella carryoverin todettiin olevan myös matalampi, mutta sulakeko oli myös pidempään muutostilassa ja herkempi muutoksille. Kuiva-aineen muutoksista johtuen kymmenen (10) ruiskun käyttäminen onkin haastavaa, sillä usean prosentin muutokset kuiva-aineessa laskevat suutinpaineen liian alhaiseksi. Tällöin ruiskujen määrää tulee säätää usein, mikä aiheuttaa muutoksia tulipesän olosuhteissa ja siten haasteita operoinnissa. Korkealla kuiva-aineella ja lämpötilalla tulisi kuitenkin käyttää kymmentä ruiskua kahdeksan sijasta, jotta ruiskutuspainetta olisi alhaisempi eikä nousisi lähelle 1,9-2,0 bar.

Toisaalta lämpötilan ja suutinpaineen laskeminen liian alhaiseksi saattaa kasvattaa pisarakoon niin suureksi, että se siirtyy suoraan sulakekoon ja aiheuttaa keon nopeaa kasvamista ja sitä kautta aiheuttaa ongelmia operoinnissa. Matalaa ruiskutuslämpötilaa käytettäessä pisarakoon kasvusta aiheutuvaa sulakeon kasvamista hallitaan primääri- ja alasekundääri-ilmoilla. Ilmamäärän siirtäminen alaosiin saattaa kuitenkin aiheuttaa palamisilman nopeuk-

sien kasvamisen alaosissa, jolloin pystysuuntaiset virtaukset kasvattavat carryoveria. Tulisi-kin siis pyrkiä matalaan operointilämpötilaan, mutta samalla pyrkiä olemaan kasvattamatta liikaa alailman syöttämistä tulipesään.

Lisäksi sulakeko aiheutti haasteita operoimiseen, koska uhkana oli esimerkiksi korkean keon kaatuminen ja siten sulan valuminen primääri-ilmakanaviin. Koeajojen aikaiset rännien toimintahäiriöt johtuivat heikoista sulan virtausominaisuuksista, koska sulfiditeetti nousi korkeaksi koeajojen aikana. Näistä syystä johtuen lipeän muutoksia pitäisikin pystyä hallitsemaan paremmin.

Polttolipeän kuiva-aineen laboratorion ja online-mittausten välisen eron vuoksi ruiskutuslämpötila on tarpeettoman korkea lipeärenkaalla ja siten aiheuttaa polttolipeän flashing-ilmiötä. Onlinemittauksen näyttäessä 0,5 %-yksikköä liian korkeaa kuiva-ainepitoisuutta yli 80 % kuiva-aineilla, säätää automaatio ruiskutuslämpötilan liian suureksi, jolloin pisarakoko muuttuu liian pieneksi. Tästä syystä carryover on lisääntynyt ja siten nopeuttanut tulistinalueen likaantumista. Onlinemittausten näyttäessä vuorostaan liian pientä kuiva-ainepitoisuutta, säätää järjestelmä lämpötilan liian matalaksi, mikä aiheuttaa ongelmia keon hallinnassa ja lisää epätarkkuutta, kun pisarakokoa joudutaan säätämään enemmän käsisäädöllä, joka voi myös johtaa liian pieneen pisarakokoon.

6.3 Ilmamallin muutos

Ilmamallin askelkoe toteutettiin kaksimuuttujakokeena, jossa kokeiltiin sekundääri- ja tertiääri-ilmatasojen paineiden eli ilman tunkeutuvuuden vaikutusta carryoveriin sekä sulakeon kokoon eli operoitavuuteen. Taulukkoon 9 on listattu kokeen muuttujat ja koepisteet.

Taulukko 9. Koeajo 2:n testiparametrit

Testiparametri	+	-
Sekundääritason paine [kPa]	3,3	2,7
Tertiääritason paine [kPa]	4,0	3,0

Yläilmapainotteista ilmajaon testejä ei voitu toteuttaa tämän työn puitteissa, koska nykyisillä ilmamäärillä muutokset olisivat aiheuttaneet ongelmia tertiääri- ja kvartääri-ilmojen säädössä. Tästä syystä päätettiin tehdä kokeet tunkeutuvuuden testaamisen lisäksi muuttamalla ilmansyöttöprofiilia tasapainottamalla virtaukset tasaiseksi jokaisesta aukosta.

6.3.1 Koepisteiden valinta

Koepisteet valittiin vallitsevien säätömahdollisuuksien mukaan, sillä matalalla koetasolla painetta säättävät sekundääritason nopeuspellit aukaistiin kokonaan, jolloin kanavan paine asettui 2,7 kPa, kun ilmaa oli siirretty sekundääritasolle yläilmatasolta. Ylärajaksi asetettiin 3,3 kPa, jotta kanavan paine ei nouse tavoiterajan yläpuolelle. Tertiääritason paineet päätettiin tyypillisten ajoarvojen mukaan, jotta saataisiin selville käytettyjen tasojen tunkeutuvuuskyky ja vaikutus carryoveriin. Palamisilman paineen laskeminen heikentää ilman tunkeutuvuutta, joten matalilla sekundääritason paineilla on mahdollista, että keko alkaa kasvaa.

6.3.2 Kuvaus

Ilmaprofiilin säätö toteutettiin käyttämällä TSI:n DP-CALC-mikromanometriä, jolla mitattiin paine-ero ilmakehässä. Mittaamalla paine-ero kanavassa pystyttiin säätämään paineet kanavissa keskenään tasaisiksi muuttamalla nopeuspeltien asentoja. Paineiden tasapainotuksen jälkeen annettiin olosuhteiden tasoittua ennen mittausta.

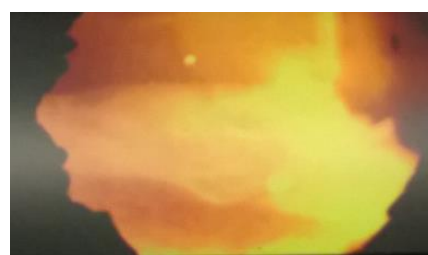
6.3.3 Havainnot

Sulakeko reagoi varsin suuresti sekundääri-ilman paineeseen, sillä soodakattilan tulipesä oli suhteellisen hyvin hallittavissa, kun sekundääritason paine oli suurempi. Matalalla sekundääri-ilmanpaineella keko alkoi kuitenkin kasvaa, keko oli jatkuvassa muutostilassa ja kekkoon tuli epämuodostuneita alueita. Kuvassa 70 onkin esitetty soodakattilan keon muutokset kokeen aikana. Ilmaprofiilin tasoittamisella ei ollut juuri vaikutusta sulakeon hallintaan.



Koepiste 1 (S 3,3 kPa, T 4,0 kPa)

Koepiste 3 (S 2,7 kPa, T 3,0 kPa)



Koepiste 2 (S 3,3 kPa, T 3,0 kPa)

Koepiste 4 (S 2,7 kPa, T 4,0 kPa)



Kuva 70. Soodakattilan keon muutokset palamisilman kokeessa

6.3.4 Tulokset

Keskimäärin matalalla sekundääri-ilman paineella carryover oli hieman suurempi kuin korkealla sekundääri-ilman paineella. Korkea sekundääri-ilmanpaine aiheutti vinoutumaa carryover-mittauksessa, sillä koepisteiden välillä oli isompi ero kuin matalaa sekundääri-ilmanpainetta käytettäessä. Tertiääripaineen muutoksilla ei havaittu merkittäviä muutoksia carryoveriin. Taulukkoon 10 onkin listattu carryover-mittausten tulokset ilmakokeesta.

Taulukko 10. Ilmakokeen carryover-mittauksen tulokset

	Carryover, vasen [g/m³n]	Carryover, oikea [g/m³n]
Koepiste 1 (S 3,3 kPa, T 4,0 kPa)	4,7	3,3
Koepiste 2 (S 3,3 kPa, T 3,0 kPa)	>5,0	4,1
Koepiste 3 (S 2,7 kPa, T 3,0 kPa)	4,7	4,7
Koepiste 4 (S 2,7 kPa, T 4,0 kPa)	4,7	4,1

Ilmavirtauksien muuttaminen ei vaikuttanut carryoveriin, vaan mittaustulokset pysyivät ennallaan eikä carryoverin vinoutuma muuttunut.

6.3.5 Johtopäätökset

Sulakeko kasvoi, kun käytettiin matalampaa sekundääri-ilman painetta. Sekundääri-ilman tunkeutuvuus oli tällöin heikompi eikä tunkeutuvuus riittänyt enää säätämään sulakeon korkeutta ja muotoa. Sulakeko ei ollut kuitenkaan yhtä herkkä ilmanpaineen muutoksille kuin esimerkiksi polttolipeän ruiskutuksen paineen muutoksille. Kokeessa huomattiin, että carryover olikin luonnollisesti parempi korkeammilla ilmatason paineilla, jolloin ilman tunkeutuvuus on parempi. Riittävän tunkeutuvuuden varmistamiseksi sekundääri-ilman paineen tulleen olla yli 3,0 kPa ja tertiäritasolla 4,0 kPa.

Paineiden tasaaminen ei juuri vaikuttanut carryoverin määrään, vaikka tällä toivottiin tasapainottamaan tulipesän virtauksia ja carryoverin vinoutumaa. Samaa koetta tulisikin testata siirtämällä ilmaa enemmän tulipesän yläosiin, jolloin tasaisella ilmansyötöllä ilmavirtaukset voisivat sekoittua tasaisiksi eikä carryoveria aiheuttavia pystysuuntaisia virtauksia aiheudu.

6.4 Nuohouksen testaus

Soodakattilalla käytettiin kaksiparinuohousta, jossa yksi pari nuohooa tulistinalueella ja toinen soodakattilan savukaasukanavan loppuosassa. Kulmaventtiilien ja siten nuohousjärjestelmän painehäviön selvittäminen todettiin tarpeelliseksi, kun nuohousjärjestelmää testattiin ajamalla nuohoimia kahden parin sijasta yhdellä parilla ja yhdellä nuohoimella. Nuohousjärjestelmän keskimääräinen paine nousi tällöin 23 bar:sta 24 bar:iin eikä muutoksella havaittu olevan nopeaa liikaavaa vaikutusta.

6.4.1 Mittapisteiden valinta

Mittaukset suoritettiin nuohointen kulmaventtiileiltä eri menetelmillä. Ensin tulistinalueelta ja ekonomaiseri 2:lta mitattiin yhteensä neljältä nuohoimelta paineet kolmen (3) ja neljän (4) nuohoimen ajomallilla. Tämän jälkeen toisen tulistinalueen, keittopinnan ja ekonomaiseri

1:n nuohointen paineet mitattiin yhden (1) ja kolmen (3) nuohoimen ajomallilla. Näin haluttiin testata painehäviö linjassa ja siten linjapaineen riittävyys yhdelläkin nuohoimella.

Mittauspaikoiksi valittiin tulistinalueelta kaksi nuohoinparia likaantuneimmalta alueelta sekundääri- ja tertiäritulistimien välistä. Lisäksi haluttiin testata painehäviöt mahdollisimman kaukana säätöventtiilistä, mistä syystä keittopinnalta valittiin keittopinnan sisääntulon kääntöpaikka, ekonomaiseri 2:lta sisääntulon nuohoimet sekä ekonomaiseri 1:lta ulostulon nuohoinpari. Mittauspaikat on esitetty kuvassa 71.



Kuva 71. Mitattavien nuohointen sijainti savukaasukanavassa

6.4.2 Kuvas

Soodakattilan nuohoushöyryn painetta tutkittiin nuohoimen kulmaventtiililtä mittaamalla paine teccis-painemittarilla, joka liitettiin nuohoimen kulmaventtiilin t-haaraan. Kulmaventtiilin paineen avulla pystytään laskemaan linjan painehäviöt eri etäisyyksille nuohoimen säätöventtiililtä. Mittauksessa painemittarilta luettiin mittausarvoja pitkin nuohoimen liikerataa. Kulmaventtiilin höyrynpaineen mittausten vertaaminen DCS-järjestelmän painemittauksiin

aiheuttaa kuitenkin painehäviön laskemisessa mahdollisesti $\pm 1-2$ barin virhettä johtuen mitaustuloksen ja mittausajan kirjaamisen epätarkkuudesta. Kuvassa 72 on esitetty mittauksen toteutus.



Kuva 72. Nuohoushöyryn paineen mittaus kulmaventtiililtä

6.4.3 Havainnot

Kulmaventtiilin paineet heittelivät merkittävästi nuohoimen liikeradan aikana nuohoushöyryn kulutuksesta johtuen. Paineet olivat kulmaventtiileillä mittauksen aikana merkittävän alhaiset. Kulmaventtiilit olivat kuitenkin pääosin asetettu täysin auki, mikä on vaatimus kyseisen soodakattilan kulmaventtiileille, jotta nuohoin läpäisee mahdollisimman paljon höyryä.

Nuohoimella 4 havaittiin, että nuohoin ei kuluttanut höyryä nuohoimen lähtiessä liikkeelle. Nuohoimen kulmaventtiilin asento tarkistettiin laitetoimittajan toimesta ja kulmaventtiilistä havaittiin, että venttiilin säädön lukitsijatappi oli hajonnut ja näin kulmaventtiili oli lähes kokonaan sulkeutunut tuotannon aikana. Painemittari näyttikin vain 0,5 baria läpi koko nuohoimen liikeradan. Kulmaventtiili asetettiin täysin auki, minkä jälkeen mittaukset suoritettiin uudestaan. Nuohoimen 4 kulmaventtiilin asennosta johtuen kyseinen tulistinalueen oikea

puoli oli kuroutumassa pahasti umpeen, mikä selvisi myös edellisessä soodakattilalle tehdyssä tukkeutumistarkastelussa.

6.4.4 Tulokset

Taulukkoon 11 on listattu testattujen nuohointen sijainti, käytetty nuohoinsuutin sekä kulmaventtiilin ja säätöventtiilin välinen painehäviö kyseisellä nuohoimella. Painehäviö vaihtelee noin 5-7 bariin tulistinalueen yläosissa, noin 7-8 bariin keittopinnalla, sekä noin 6-8 bariin ekonomaisereilla sijainnista riippuen. Nuohoushöyryn paineet kulmaventtiilillä on nähtävillä liitteestä 6.

Taulukko 11. Nuohointen painehäviöt

Nuohoin	Sijainti	Kerros	Suutinpää	Painehäviö Δp [bar]
03	Tulistin, vasen	12	STD	5-6
04	Tulistin, oikea	12	GEM	5
05	Tulistin, vasen	11	GEM	6-7
06	Tulistin, oikea	11	GEM	7-8
51	Keittopinta, vasen	10,5	MPCS	8
52	Keittopinta, oikea	10,5	MPCS	7-8
71	Ekonomaiseri 1, vasen	8	GEM	6-7
73	Ekonomaiseri 2, vasen	12	STD	5-6
74	Ekonomaiseri 2, oikea	12	STD	7-8

6.4.5 Johtopäätökset

Nuohoushöyryn paine ei ole riittävä nuohointen kulmaventtiilillä, koska nuohouslinjan painehäviö on merkittävä ja vaihtelee 5-8 barin välillä nuohoimen sijainnista riippuen. Lisäksi ongelmia aiheuttavat vanhat nuohoussuuttimet, koska puhdistustehokkuus on olematon näissä kohdissa, mikä johtaa alueen likaantumiseen ja lopulta jopa tukkeutumiseen ajojakson edetessä. Tästä syystä erityisen matalilla nuohoushöyryn paineilla olisi tärkeää, että nuohoimissa käytettäisiin tehokkaita suurtehosuuttimia varsinkin tulistimilla ja keittopinnalla.

Mittauksista selvisi myös, että neljän nuohoimen ajomallilla nuohoustehokkuus oli keskimäärin 1-2 baria heikompi kuin kolmen nuohoimen ajotavalla. Onkin selvää, että neljää nuohointia ei tule käyttää yhtäaikaisesti ilman nuohousjärjestelmään ja -putkistoon tehtäviä muutoksia. Tästä syystä kolmen nuohoimen ajotapa on paras mahdollinen nykyisellä tuotantotavalla ilman muutostoimia, mutta nuohouksen painotusta tulistimille tai loppupäähän voi kokeilla erityisesti ajojakson alussa.

Nuohouksen puuttuminen kriittisellä tulistinalueella onkin edistänyt alueen tukkeutumista, mistä syystä myös tulistus oli vinoutunut ja vasemmanpuolen tulistinpintojen materiaalilämpötilat olivat nousseet hetkittäin korkeiksi. Tulistuksen vinoutuma tasoittuikin huomattavasti, kun nuohoin 4 saatiin normaaliin toimintakuntoon. Nuohoushöyryn poikkeavuuksiin tulisikin jatkossa reagoida välittömästi esimerkiksi nuohoushöyryn kulutusmittauksiin, jotta kyseinen alue ei pääsisi tukkeutumaan.

7 SUOSITUKSET

Soodakattilan operoinnissa ja prosessissa havaittiin puutteita, joihin tulee jatkossa kiinnittää tarkemmin huomiota. Seuraavassa luvussa esitellään soodakattilaprosessin kehitysehdotuksia, jotta tukkeumista saataisiin hallittua. Kyseiset suositukset liittyvät polttoliipeän ruiskutuksen sekä ilma- ja nuohousjärjestelmän ajotapoihin sekä näihin liittyviin muutoksiin.

7.1 Carryoverin hallinta

Carryoverin minimoimiseksi ruiskutusta ja ilmansyöttöä tuleekin hallita tehokkaammin. Lisäksi polttoliipeän laatu tulee saada tasaisemmaksi ja isot vaihtelut tulee saada poistettua.

7.1.1 Ruiskutus

Soodakattilaa pitäisi operoida mahdollisimman matalalla lämpötilalla tai suutinpaineella, jotta vähennettäisiin likaantumista aiheuttavaa carryoveria. Tämä voidaan toteuttaa joko laskemalla ruiskutuslämpötilaa tai lisäämällä polttoliipeäruiskujen määrää. Myös suurempaa suutinkokoa tulisi kokeilla, jolloin suutinpaine olisi automaattisesti matalampi. Koeajoissa kuitenkin havaittiin, että soodakattilan sulakeko oli paljon herkempi merkittävästi matalammilla suutinpaineilla, mistä syystä lämpötilan säätö on operoitavuuden kannalta parempi säätötapa. Lämpötilan säätö riippuu tietysti mustaliipeän luonnollisen viskositeetin muutoksista, mutta mitä alempana lämpötilaa pidetään, sitä todennäköisemmin estetään pienimpien pisaroiden karkaaminen tulipesän yläosiin. Tästä johtuen tuleekin välttää liian korkeaa pisanäsäätölämpötilaa, jos halutaan vähentää carryoverin määrää.

Etuseinän hajukaasupolttimen lisäilman sekä etu- ja takaseinällä sijaitsevien yläsekundääri- ja alatertiääri-ilmojen aiheuttamat virtaukset sotkevat ruiskutusta nykyisellä päätyseinäpaineisella ruiskutusprofiililla. Tästä syystä ruiskutusta tuleekin kokeilla sivuseinäpainotteisena, jotta saadaan selville tämän vaikutus carryoverin määrään ja savukaasujen lämpötilan vinokuormaan. Ruiskutusprofiilin muutoksia pystytään testaamaan, kun sivuseinille asennetaan helposti säädettävät telineet polttoliipeäruiskuille.

Lisäksi ruiskutusolosuhteita pystytään parantamaan puhdistamalla ruiskut riittävän usein sekä muuttamalla ruiskutuskulmaa riittävästi alaviistoon. Myös ruiskulinja on pidettävä mahdollisimman suorana kattilapohjaan nähden, ettei ruiskutus tapahdu vinossa. Ruiskutuskulmalle löytyykin usein sopiva kulma kokeilemalla erilaisia ruiskujen asentoja, mutta liian ylös säädettyinä carryover kasvaa. Ruiskutuskulmien vaikutusta keon olosuhteisiin ja carryoveriin tulee myös jatkossa seurata aktiivisesti, jotta onnistutaan jatkossakin tunnistamaan olosuhteet, joissa carryover aiheuttaa tulistimien likaantumista.

7.1.2 Ilmajärjestelmä

Lähtökohtaisesti pienen pisarakoon aiheuttama carryover voitaisiin estää onnistuneella ilmajaolla, mistä syystä ilmaa pitäisikin saada siirrettyä enemmän tulipesän yläosiin, jotta nopeudet eivät kasva liian korkeiksi tulipesän alaosissa. Alaosiin syötetty ilma pyrkiikin työntämään lipeäpisarat ylöspäin, jos ilma ei sekoitu tai tunkeudu riittävästi alaosissa. Käytetyn säätöalueen puitteissa ilmojen siirtäminen tulipesän yläosiin on kuitenkin haastavaa tertiäripuhaltimen kapasiteetista ja tertiääri- ja kvartääri-ilmakanavan puutteellisesta säädöstä johtuen. Lisäksi ilmamäärän siirtäminen yläilmatasolle saattaa vaatia korkeamman kapasiteetin myös puhaltimelta, jolloin esimerkiksi tertiääri- ja kvartääri-ilman syöttö olisi hyvä toteuttaa esimerkiksi omilla puhaltimillaan.

Lisäksi suuri yksittäinen ongelma on ilman tunkeutuvuuden varmistaminen poikkeustilanteissa eli osakuormalla operoitaessa. Palamisilma onkin syötettävä riittävässä paineessa, jotta esimerkiksi sekundääri-ilma tunkeutuu tulipesään ja pystyy säätämään keon korkeutta. Lisäksi ilma-aukkojen puhtaana pitäminen on oleellista carryoverin minimoimisen kannalta, jotta ilma syötetään soodakattilaan tasaisesti ja kanavan paine pysyy tasaisena. Tasainen ilmansyöttö onkin tärkeää lomittaista ilmansyöttömallia käyttävillä soodakattiloilla, jotta palamisilma tasoittuu tulipesässä eikä tulipesään synny kovia pystysuuntaisia virtauksia, jotka aiheuttavat carryoveria.

7.1.3 Polttoliipeän laatu

Tärkeimmät polttoliipeän ruiskutukseen vaikuttavat ominaisuudet ovat mäntyöljy-, kuiva-aine- sekä jäännösalkalipitoisuudet, joiden hallinta on tärkeässä osassa tasaisten tulipesän olosuhteiden vakioimisessa. Joutsenon soodakattilalla kuiva-ainepitoisuus ei pysy tasaisena, mikä muuttaa jatkuvasti polttoliipeän viskositeettia ja siten pisarakokoa. Haihduttamon pesusekvenssin entistä parempi hallinta onkin edellytys polttoliipeän kuiva-aineen hallitsemiseksi. Myös polttoliipeän viskositeettianalyseja tulee hyödyntää aktiivisesti polttoliipeän ruiskutuslämpötilan säätämisessä. Lisäksi on jatkettava toimenpiteitä mäntyöljypitoisuuden ja jäännösalkalin seuraamiseksi. Mäntyöljypitoisuuden vaikutuksia hallittaessa paras keino onkin laskea ruiskutuskulmaa alemmaksi, jolloin pisarat laskeutuvat paremmin kekkoon.

Koska ruiskutuslämpötila kasvaa nopeammin yli 80 % kuiva-aineilla, kuiva-ainepitoisuuden online- ja laboratorion mittausten välisen eron vuoksi ruiskutuslämpötilan säätö toteutetaan epätarkasti. Tästä syystä polttoliipeärenkaalle tulee lisätä polttoliipeänäytepaikka samaan paikkaan missä online-mittauskin on toteutettu, jotta refraktrometriin mittaukseen voidaan tehdä tasokorjaus luotettavasti. Yli 0,5 % ero todelliseen kuiva-aineseen vaikuttaakin merkittävästi ruiskutuslämpötilaan, mikä voi johtaa haasteisiin joko keon tai carryoverin hallinnassa pisarakoon ollessa optimialueen ulkopuolella.

7.2 Nuohouksen ajotapa

Koeajoissa huomattiin, että nuohoushöyryn linjapaine on liian alhainen käytettäessä neljää yhtäaikaista nuohointia. Ylikuormalla operoitaessa soodakattilaa tulisi puhdistaa neljällä yhtäaikaisella nuohoimella, mutta koska nuohouspaine ei ole riittävä, voidaan nykyisellä nuohousjärjestelmällä käyttää vain kolmea yhtäaikaista nuohointia. Tulistinta tulee tällöin nuohota yhdellä nuohoimella, kun taas kanavan loppuosaa tulee puhdistaa kahdella nuohoimella nopean sintraantumisen estämiseksi.

Nuohoushöyryn paine onkin suurempi käytettäessä kolmea nuohointia, muttei silti riittävä, koska putkiston painehäviöt ovat verrattain suuria. Nykyistä nuohousjärjestelmän rakennetta

tulisikin muuttaa, jotta nuohoushöyryn paine olisi riittävä tehokkaan puhdistustehon ylläpitämiseksi. Nykyinen nuohousjärjestelmä tulee kartoittaa ja selvittää putkikoon ja säätöventtiilin riittävyys eri putkiston kohdissa. Lisäksi nuohoushöyryn säätöventtiili tulee tarkistaa, jotta se ei aiheuta turhaa ahtautta. Putkistossa on suuret painehäviöt, mikä kasvattaa höyryn virtausnopeutta.

7.3 Prosessin hallinta

Soodakattilan hallinnan kannalta onkin oleellista, että tulipesään saadaan vakaat ja hallitut olosuhteet, etteivät tulipesän olosuhteet ole jatkuvan muutoksen alaisina. Tukkeutumisen ja sulakeon hallinta on huomattavasti helpompaa, kun polttoliipeän laatu pidetään tasaisena ja soodakattilan olosuhteet eivät jatkuvasti muutu.

7.3.1 Sulfiditeetin hallinta

Tehtaan sulfiditeettitasoa tulee seurata ja säätää aktiivisesti, jotta soodakattilan operoinnissa ei aiheuteta merkittäviä haasteita esimerkiksi sulan juoksevuuden ja rikkipäästöjen kanssa. Korkealla sulfiditeetilla polttoliipeän rikkipitoisuus kasvaa, mikä lisää riskiä rikkipäästöjen syntymiseen sekä kasvattaa lentotuhkan sintraantumisenopeutta. Liian korkealla sulfiditeetilla lentotuhkaa tulee poistaa lipeäkierrosta, jotta sulfiditeetti saadaan laskemaan 40 %:n tavoitetasolle. Tällöin soodakattilan sula on juoksevimmassa muodossaan eikä polttoliipeän S/Na-suhde kasva liian suureksi eikä siten kasvata sintraantumisenopeutta ongelmallisen suureksi. Tästä johtuen sulfiditeettitaso tuleekin pitää mahdollisimman vakaana.

Lentotuhkan pH:ta seurataan happamien sulfaattien havaitsemiseksi soodakattilan savukaasukanavassa. Joutsenon soodakattilalla lentotuhkan pH:n jatkuva seuraaminen ei ole kuitenkaan tarpeen, koska happamia sulfaatteja ei esiinny normaalitilanteessa soodakattilan lentotuhkassa, koska soodakattilalla ei ole rikkipäästöjä. Poikkeustilanteissa kuten SO₂-päästöjen syntyessä tai sulfiditeetin kohotessa merkittävästi korkealle tasolle, on lentotuhkasta hyvä mitata pH, jotta varmistetaan, ettei happamia sulfaatteja pääse esiintymään savukaasukanavaan ja siten aiheuta likaantumista savukaasukanavan loppuosassa. Matalilla pH:n arvoilla lentotuhkaa tulee poistaa lipeäkierrosta, jotta lasketaan polttoliipeän rikkipitoisuutta.

7.3.2 Savukaasujen nopeudet

Vaikka soodakattilaa operoidaan merkittäväällä ylikuormalla, ei savukaasujen nopeudet nouse haitallisin suuriksi savukaasukanavassa. Tarkastelussa huomattiin kuitenkin, että nopeudet kasvavat liian suuriksi soodakattilan ekonomaiseri 1:n jälkeisessä ahtaassa kanavassa. Suuret nopeudet aiheuttavat lentotuhkan iskeytymistä kanavan seinille, mikä aiheuttaa kanavan tukkeutumisen. Kanavan nopeuksia pystytään esimerkiksi hallitsemaan muuttamalla virtausprofiilia tai pitämällä kanava auki esimerkiksi täryttimillä.

8 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli kuvata soodakattilan tukkeutumisen eri mekanismit sekä tehdä selvitys Joutsenon soodakattilan tukkeutumisesta. Työssä käytiin läpi yleisimmät soodakattilan tukkeutumismekanismit tulistimilla sekä savukaasukanavan loppuosassa ja kokeiden sekä mittausdatan perusteella arvioitiin niiden vaikutusta soodakattilan tukkeutumiseen.

Tulistinalueen likaantumisen syiksi havaittiinkin merkittävä carryover, joka johtuu tulipesän epätasaisista ilmavirroista ja ongelmista ruiskutuksessa. Tehdyissä kokeissa havaittiin, että carryoveria pystyttiin hallitsemaan laskemalla polttolipeen ruiskutuslämpötilaa sekä suutinpainetta. Ruiskutuksen tasapainottaminen on kuitenkin haastavaa, koska polttolipeen laatu vaihtelee tehtaalla runsaasti ajojakson sisällä, mistä syystä soodakattilaan ei saada jatkuvia tasaisia olosuhteita. Lisäksi sulakeko oli herkkä ruiskutukseen tehdyille muutoksille. Ruiskutuksen lisäksi carryoveria voidaan hallita siirtämällä ilmaa alaosista enemmän soodakattilan yläosiin, mikä vähentää pystysuuntaisten ilmavirtojen vaikutusta. Kokeissa havaittiin, että ilmanpaineiden tulee olla riittävän korkeat sekundääri- ja tertiääritasoilla, jotta ilma tunkeutuu ja sekoittuu tulipesässä riittävästi.

Nuohouksen puhdistustehon riittämättömyys havaittiin mittaamalla nuohoushöyryn paineet nuohointen kulmaventtiileiltä. Tehdyssä kokeessa havaittiin, että nuohouslinjan painehäviö vaihtelee 5-8 barin välillä eikä nuohouspaine ole riittävä kulmaventtiileillä. Nuohoustehokkuuden riittämättömyys lisää myös sintraantumisen vaikutusta savukaasukanavan loppuosassa, koska puhdistuskyky ei riitä puhdistamaan likaantuneita alueita. Nuohoustehokkuutta pystytään kasvattamaan käyttämällä alkuperäistä ajotapaa, vaihtamalla tehottomat nuohoussuuttimet suurtehosuuttimiin sekä parantamalla nuohousjärjestelmää.

Savukaasukanavan loppuosan likaantuminen johtuu sintraantumisesta sekä liian korkeista savukaasun nopeuksista savukaasukanavan ulostulossa. Sintraantumista pystytään vähentämään hallitsemalla sulfiditeettia sekä pitämällä tulistinalue puhtaana, jotta savukaasujen lämpötila laskee. Savukaasukanavan ulostulon nopeuksia voitaisiin hallita esimerkiksi virtausprofiilia muuttamalla tai erilaisia täryttimiä käyttämällä.

LÄHTEET

Adams, Terry. 1997. Kraft Recovery Boiler. American Forest & Paper Association. TAPPI Press. ISBN 0-9625985-9-3. 381 s.

Alakangas, Eija et al. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 258. ISBN 978-951-38-8419-2. 263 s.

Allen, Larry et al. 2007. Operational extractives management from-mountain pine beetle-attacked lodgepole pine for pulp and papermaking. Mountain Pine Beetle Initiative Working Paper 2007-15. ISBN 978-0-662-46480-8. 45 s.

Andritz 2017. Proven Methods for removing chloride and potassium from the recovery loop. Spectrum Tech News. No. 36/2-2017 [viitattu 10.3.2018]

Awad, Mostafa. 2011. Heat Transfer – Theoretical Analysis, Esperimental Investigations and Industrial Systems. ISBN 978-953-307-226-5.

Bajpai, Pratima. 2017. Pulp and Paper Industry: Chemical Recovery, 1st Edition. Elsevier. ISBN 978-0-12-811103-1, 243 s.

Cameron, John et al. 1999. Role of thermophoresis in the deposition of fume particles resulting from the combustion of high inorganic containing fuels with reference to kraft black liquor. Fuel Processing Technology 60, 49-68. Western Michigan University. ELSEVIER. 20 s.

Clyde Bergemann Power Group. Products and solutions: Retractable Sootblower. [verkkojulkaisu], [viitattu 8.11.2017]. Saatavilla: <http://www.cbpg.com/en/products-solutions-boiler-efficiency-load-cleaning-systems/retractable-sootblower-0>

Delete. 2016. Täydellä teholla räjäytyksistä huolimatta. Julkaistu 5.10.2016. [verkkojulkaisu], [viitattu 17.10.2017], saatavilla: <https://www.delete.fi/deletelehti/artikkelit/kasvata-energiatehokkuutta/taydella-teholla-rajaytyksista-huolimatta?origin=item6>

Diamond Power. Sähköpostikeskustelu 31.1.2018

Engblom, Markus. 2017. Introduction to Kraft process: Black liquor and The black liquor recovery boiler. [verkkojulkaisu], [viitattu 20.10.2017], saatavilla: http://users.abo.fi/maengblo/FPK_II_2017/

Frederick, James et al. 2004. Mechanisms of sintering of alkali metal salt aerosol deposits in recovery boiler.

Goerg-Wood, Kristin et al. 1998. Fume deposition with kraft recovery boiler implications. Innovative Advances in the Forest products industries, AIChE Symposium Series, Vol. 94, No. 319. 138–145 s.

Goncalves, C. et al. 2008. Chloride and potassium removal efficiency of an ash leaching system. Pulp & Paper Canada.

Haaga, Kari. 2016. Soodakattilan höyry ja vesikierto. [sisäinen materiaali]

Haaga, Kari. 2016b. RECOX Auxiliary Systems. [sisäinen materiaali]

Haaga, Kari. 2016c. Fouling in SH and BB areas. [sisäinen materiaali]

Huhtinen, Markku et al. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. uusittu painos. Edita Oy. Helsinki. ISBN 951-37-3360-2. 379 s.

Huhtinen, Markku et al. 2013. Voimalaitostekniikka. 2. Painos. Opetushallitus. 344 s. ISBN 978-952-13-5426-7. 342 s.

Hupa, Mikko. 2012. Recovery Boiler Chemical Principles. Åbo Akademi University. TAPPI Kraft Recovery Short Course. TAPPI Press. 9 s.

Hämäläinen, Sanna. Keskustelu 26.10.2017

Jordan, J. Miles. 1995. Cluster rule impact on recovery boiler operations: Chloride and potassium concentrations in the kraft liquor cycle. Institute of Paper Science and Technology.

Jorshari, Keyvan. 2000. Effects of potassium and carbonate on the depotision of synthetic recovery boiler carryover particles. ISBN 0-612-53346-8. 86 s.

Khalaj-Zadeh, Asghar. 2009. A Study of the Composition of Carryover Particles in Kraft Recovery Boilers. Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto. 211 s.

KnowPulp. 2015. KnowPulp-oppimisympäristö. Versio 15.0. Päivitetty 4/2016 [Viitattu 27.9.2017]. Prowledge Oy, AEL. Saatavissa: <http://www.knowpulp.com/suomi>. Palvelu on maksullinen ja vaatii käyttäjätunnuksen.

Mao, Ted. 1997. Impact of liquid droplets on solid surfaces and its application to carryover deposition in kraft recovery boilers. University of Toronto.

Metsä Fibre. 1998. Soodakattilan käyttöohje: Oy Metsä-Botnia AB, Joutseno Pulp, Soodakattila SK3. [sisäinen materiaali]

Metsä Fibre. 2017. Tehtaiden sisäinen kirjeenvaihto soodakattilan tukkeutumisesta. [sisäinen materiaali]

NALCO. 2017. Recovery Boiler Draft Plugging Review [sisäinen materiaali]

Raiko, Risto et al. 2002. Poltto ja palaminen. 2. täydennetty painos. Helsinki: International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. SBN 951-666-604-3. 750 s.
Soodakattilan käyttö-ohje. 1998. Metsä Group, sisäinen materiaali.

Salmenoja, Keijo. 2014. Kraft Recovery Boiler Dust Chemistry – Implications from Operating Boilers. Andritz Oy, Recovery and Power Division. 35 s.

Shenassa, Reyhaneh. 2000. Dynamic carryover deposition in an entrained flow reactor. University of Toronto. 173 s.

Skifvars, Bengt-Johan et al. 1991. Composition of recovery-boiler dust and its effect on sintering. Recovery Boiler Operation. TAPPI Journal. 5 s.

Spirax Sarco. Steam Engineering Tutorials: Pipes and Pipe Sizing. [verkkójulkaisu] [viitattu 27.3.2018], saatavilla: <http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorials/steam-distribution/pipes-and-pipe-sizing.aspx>

Suhr, Michael et al. 2015. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. European Commission. 866 s. ISBN 978-92-79-48167-3.

Tavares, Alarick et al. 2006. Retrofitting Existing Sootblower Systems To Use a Lower Pressure Steam Source.

Tran, Honghi. 1986. How does a kraft recovery boiler become plugged? University of Toronto. Tappi Journal, Vol. 69. TAPPI Press. 5 s.

Tran, Honghi et al. 2002. The sticky temperature of recovery boiler fireside deposits. Recovery furnaces. Pulp & Paper Canada. 6 s.

Tran, Honghi et al. 2006. The fluidity of recovery boiler smelt. Journal of Pulp and Paper Science: Vol 32 No. 3. 6 s

Tran, Honghi et al. 2008. Development of low-pressure sootblowing technology. Recovery boilers. Pulp & Paper Canada, Ontario. 6 s.

Tran, Honghi et al. 2011. Measurements of sootblower jet strength in kraft recovery boilers – part II : results of the 3rd and 4th field trials. PEERS 2011. 8 s.

Tran, Honghi. 2015. Recovery Boiler fireside deposits and plugging prevention. University of Toronto. TAPPI Kraft Recovery Short Course. TAPPI Press. 13 s.

Tran, Honghi et al. 2015b. Recovery boiler sootblowers: History and technological advances. Vol. 14. No 1. TAPPI Journal. 10 s.

Vakkilainen, Esa. 1996. Recovery boiler adjustable air. Ahlstrom Machinery.

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

Vakkilainen, Esa. 2010. Höyrykattilatekniikka-kurssin materiaalit: Vesi-höyrykierron suunnittelu. [LUT Moodle-materiaalit], [viitattu 28.9.2017]. Palvelu on tarkoitettu opiskelijoille ja vaatii sisäänkirjautumisen.

Vakkilainen, Esa. 2016a. Höyrykattilatekniikka-kurssin materiaalit: Vesi-höyrykierron suunnittelu. [LUT Moodle-materiaalit], [viitattu 28.9.2017]. Palvelu on tarkoitettu opiskelijoille ja vaatii sisäänkirjautumisen.

Vakkilainen, Esa. Keskustelut 19.10.2017, 10.11.2017 ja 14.02.2018

Valmet. 2015. High Power Generation from Recovery Boilers – What are the limits? Technical Paper Series. [viitattu 31.10.2017]

Valmet 2015. Ash treatment pays off in cleaner recovery boiler conditions. Forward 1/2015. [viitattu 10.3.2018]

Veolia 2014. The CRP System: Ash Treatment for the Pulp & Paper Industry. Veolia Water Technologies Communications 10/2014. [viitattu 10.3.2018]

Vähä-Savo, Niklas. 2009. Minuuttisondi-projekti. Raportti 5b. Suomen Soodakattilayhdistys ry. 16A0913-E0104. 24 s.

Wahlman Toni. Keskustelut 12.10.2017 ja 30.11.2017

Wessel, Richard et al. 2003. Comprehensive model of alkali-salt deposition in recovery boilers. TAPPI Journal. Vol 2: No 2. 5s.

Wessel, Rick. 2008. Black Liquor Spraying. The Babcock & Wilcox Company. TAPPI Kraft Recovery Short Course. TAPPI Press. 11 s.

Wessel, Rick. 2015. Recovery Boiler Air Systems. The Babcock & Wilcox Company. TAPPI Kraft Recovery Short Course. TAPPI Press. 8 s.

LIITE 1. Analyysilaskentatyökalu

LUT Energy
LUT School of Energy Systems
Esa Vakkilainen
User: Kimmo Penttinen

Lappeenranta
29.3.2018
1(1)

 LAPPEENRANNAN
TEKNILLINEN YLIOPISTO
Version 1.22 #####

Enrichment

Virgin liquor analysis

	Design value	Estimate from HHV
HHV MJ/kgds	14,20	14,20
C mass-%, dry	35	34,8
H mass-%, dry	3,6	3,5
N mass-%, dry	0,1	0,1
S mass-%, dry	5,5	5,5
Na mass-%, dry	19,4	18,5
K mass-%, dry	1,80	1,8
Cl mass-%, dry	0,50	0,5
B mass-%, dry	0,00	0,0
Inorganic mass-%, dry	27,2	26,3
Si(Na2+K) mol-%	38,5	40,4
SiNa2 mol-%	40,6	42,7
Cl(Na+K) mol-%	1,58	1,66
K(Na+K) mol-%	5,17	5,42
B/Na mol-%	0,00	10,81
Dry solid: %	80	80

FurnHeat kW/kgds	12650	12663
NetHeat kW/kgds	10029	10086
Air at 1.0 m3n/kgds	3,09	2,99
Air at 1.0 kg/kgds	4,002	3,870
AirHHV m3n/MJ	0,218	0,211
FG at 1.2 m3n/kgds	4,54	4,34
m3n(dry)/kgds	3,65	3,84
FG/HHV m3n/MJ	0,320	0,306
FG/HHV m3n/MJ	0,453	0,431
FurnHFE kW/m3n	2786	2915

SO2 ppm	0	<-predicted
HCl ppm	0	<-predicted
	637,0	

LFtemp °C	1150,7	<-predicted
Furnace I kW/m2	3560,0	
NCG-loa gS/kgds	4,0	

BBash g/m3n,dry	3,5	<-predicted
kg/kgds	0,017	
ESPash g/m3n,dry	24,0	<-predicted
kg/kgds	0,117	

Dry solid: % - as fired 81,9

FG dust mg/m3n(dry) 30,000
Cl-loss g/kgds 0,00

FG dust g/kg ds 0,109

Load kg ds/24h 4000
FG dust kg/24h 437,9

As fired analysis

HHV MJ/kgds	12,53
C m-%	31,1
H m-%	3,2
N m-%	0,09
S m-%	7,0
Na m-%	20,8
K m-%	2,1
Cl m-%	0,8
B m-%	0,0
O m-%	35,0

Cl(Na+K) mol-%	2,34
K(Na+K) mol-%	5,57
Si(Na2+K2) mol-%	45,28

E Cl	1,48
e K	1,08
T(Firstm)	604,4
T15	721,1
T70	834,2
Sintering index	300,00

SH Front deposit (=carryo.)

Na m-%	36,42
K m-%	2,18
Cl m-%	0,39
CO3 m-%	29,76
SO4 m-%	31,14
S m-%	0,10
BO2 m-%	0,00
(Na2+K2)SO m-%	46,41
(Na2+K2)CO m-%	53,11
(Na2+K2)Cl m-%	0,65
(Na2+K2)S m-%	0,25
NaBO2 m-%	0,00

Cl(Na+K) mol-%	0,68
K(Na+K) mol-%	3,40
Si(Na2+K2) mol-%	39,94
CO3(Na2+K) mol-%	60,49
B/Na mol-%	0,00
E Cl %	0,29
e K %	0,61
T(Firstm)	541,5
T15	786,6
T70	820,4
Sintering index	300
Initial der kg/m3	807
Density ε kg/m3	983
Strength MPa	1,1
pH	12,51

ESP ash (=fume)

Na m-%	30,71
K m-%	4,42
Cl m-%	3,30
CO3 m-%	5,57
SO4 m-%	55,91
S m-%	0,10
BO2 m-%	0,00
(Na2+K2)SO m-%	84,12
(Na2+K2)CO m-%	10,06
(Na+K)Cl m-%	5,56
(Na2+K2)S m-%	0,25
NaBO2 m-%	0,00

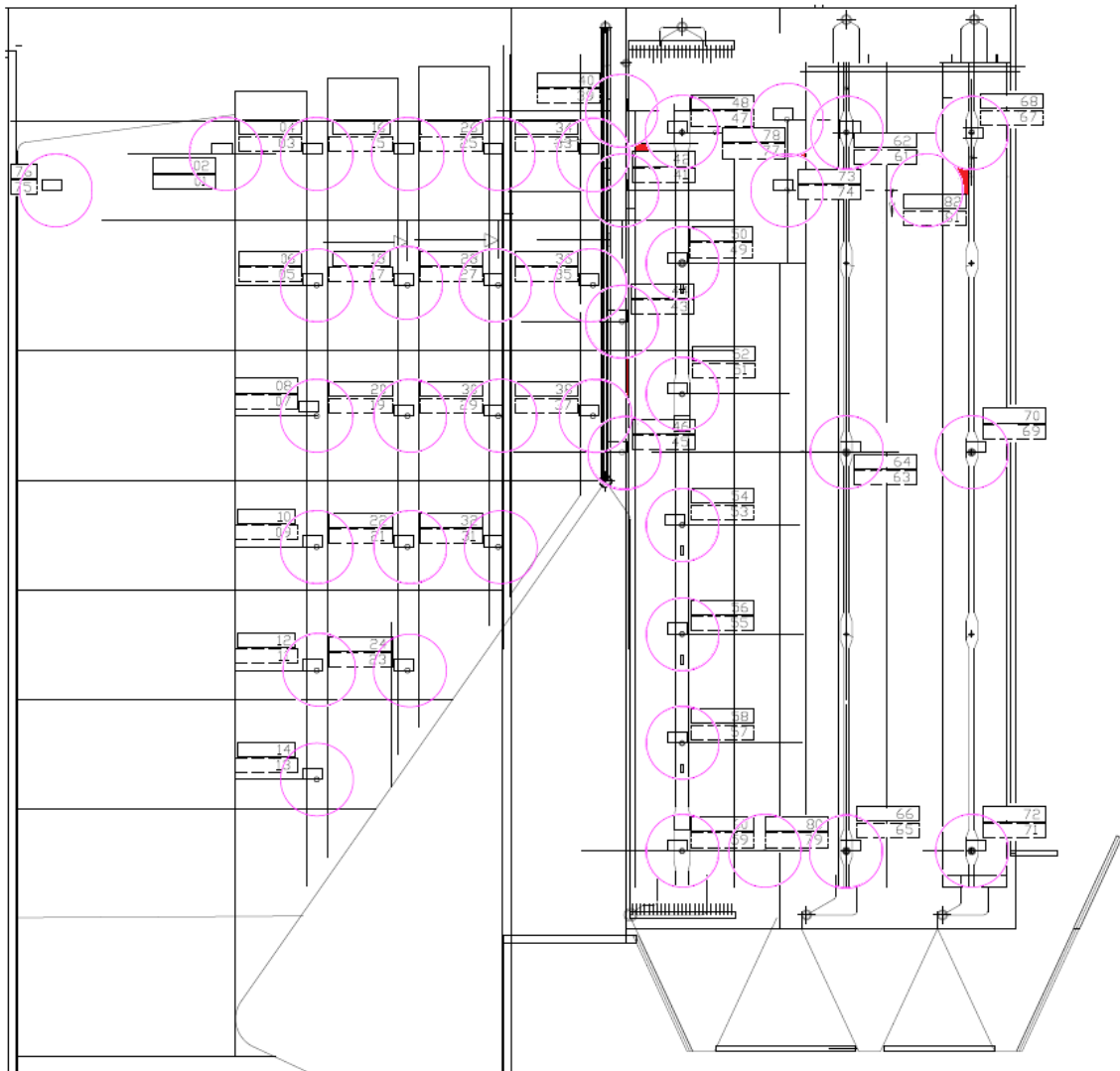
Cl(Na+K) mol-%	6,43
K(Na+K) mol-%	7,80
Si(Na2+K2) mol-%	80,82
CO3(Na2+K) mol-%	12,81
B/Na mol-%	0,00
E Cl	2,75
e K	1,40
T(Firstm)	541,9
T15	575,0
T70	756,8
Sintering index	300
Initial de kg/m3	217
Density ε kg/m3	564
Strength MPa	0,3
pH	11,21

BB ash (=mixture)

Na m-%	35,17
K m-%	2,88
Cl m-%	1,01
CO3 m-%	25,59
SO4 m-%	35,25
S m-%	0,10
BO2 m-%	0,00
(Na2+K2)SO m-%	52,68
(Na2+K2)CO m-%	45,83
(Na2+K2)Cl m-%	1,68
(Na2+K2)S m-%	0,25
NaBO2 m-%	0,00

Cl(Na+K) mol-%	1,77
K(Na+K) mol-%	4,59
Si(Na2+K2) mol-%	46,19
CO3(Na2+K) mol-%	53,20
B/Na mol-%	0,00
E Cl	0,76
e K	0,82
T(Firstm)	534,2
T15	712,6
T70	799,4
Sintering index	597
Initial der kg/m3	188
Density ε kg/m3	693
Strength MPa	0,5
pH	12,39

LIITE 2. Nuohointen sijoittelu ja tehokas nuohousalue



LIITE 3. Minuuttisondin käyttöohje



PROCESS CHEMISTRY CENTRE



Minuuttisondin käyttöohjeet

Minuuttisondina käytetään noin 2 m pitkää jäähdyttämätöntä ruostumatonta tai haponkestävää teräsputkea. Sondista jätetään noin 50 cm soodakattilan ulkopuolelle, jotta sondia on helpompi käsitellä.

Ensimmäisellä mittauksella arvioidaan mittausaika. Tämä suoritetaan siten että 1,5 metriä kahden metrin sondista työnnetään tarkistusluukusta soodakattilan sisälle, eli 0,5 m jätetään soodakattilan ulkopuolelle. Mittausaika alkaa vasta kun 1,5 m sondista on soodakattilan sisällä, eli ei huomioida aikaa jota kuluu sondin sisään laitossa (tämä aika on erittäin lyhyt korkeintaan 1 s). Kun 20 s on kulunut, vedetään sondi varovasti ulos soodakattilasta ja annetaan sondin jäähtyä. Ulosvedettäessä sondia tulee kääntää 180° tai sondia on nostettava hieman, jotta ei tuulipuolenpinta vaurioidu tarkistusluukun alareunasta. Seuraavaksi verrataan minuuttisondin pintaa kalibrointikuvasarjaan, jos minuuttisondin pinnalla osumien peittävyysaste on suurempi kuin 43 % (viimeinen kuva kalibrointikuvasarjassa) on käytettävä lyhyempää mittausaikaa kuin 20 s esim. 10 s, jos minuuttisondissa ei näytä olevan lainkaan osumia on käytettävä pidempää mittausaikaa kuin 20 s esim. 30 s.

Kun optimaalinen mittausaika on saatu selville, minuuttisondia voidaan käyttää carry-over määrän arvioimiseen. Se tapahtuu seuraavanlaisesti:

- Työnnetään sondi soodakattilan sisälle niin että 0,5 m sondista jää seinän ulkopuolelle eli 1,5 m on soodakattilan sisällä.
- Mittausaika (X sekuntia) alkaa vasta kun sondi on kattilan sisällä. (sisäänlaittoaikaa ja ulosottoaikaa ei huomioida)
- Kun mittausaika on kulunut, vedetään sondi varovasti ulos jotta ei sondin tuulipuoli vaurioidu. Ulos vedettäessä sondi tulee kääntää 180° tai sondia on nostettava hieman, jotta ei tuulipuolen pinta vaurioidu tarkistusluukun alareunasta.
- Annetaan sondin jäähtyä hetki.
- Verrataan sondin pintaa kalibrointikuvasarjaan, arvioidaan mikä kuvista vastaa parhaiten sondi pintaa.
- Katsotaan taulukosta mittausaikaa ja mittaushetken kuormaa (prosenttia nimelliskuormasta) vastaava carry-over määrä $\text{g/Nm}^3 \text{ dfg}$ (kuivassa savukaasussa).

Mittauksen jälkeen annetaan sondi jäähtyä niin viileäksi että sitä voi käsitellä normaaleilla työvälineillä. Sondin pinta puhdistetaan kulmahiomakoneella johon kiinnitetään messinkiharja. Pinnan voi myös puhdistaa lämpimällä vedellä.

Sondin käsittelyssä on oltava varovainen:

- Mittauksen aikana tulee sondia pitää molemmilla käsillä kiinni mutta kaukana kehosta. Soodakattilan katosta voi pudota isoja kerrostuma kappaleita (kami) jotka voivat osua sondin. Tämä voi aiheuttaa vaaratilanteen mittaajalle. Sondin ja tarkistusluukku toimivat tässä tapauksessa vipuvartena ja pahimmassa tapauksessa sondin voi osua mittaajaa leukaan tai muualle kehoon.
- Juuri ulosvedetty sondi on polttavan kuuma, huolimaton käsittely voi aiheuttaa palovammoja ihmisille tai jopa tulipalon.
- Jos sondi puhdistetaan kulmahiomakoneella, tulee käyttää suojalaseja, hengityssuojaimia sekä työhansikkaita. Sondin pinnan puhdistuksessa kulmahiomakoneella muodostuu pölyä sekä messinkiharjan säikeet irtoilevat harjasta jotka voivat osua silmiin.

Minuuttisondin käyttöohje lyhyesti

1. Työnnä 1,5 m sondista soodakattilan sisälle (0,5 m sondista soodakattilan ulkopuolella).
2. Mittausaika, 20 s, alkaa kun sondi on työnnetty sisään.
3. Kun 20 s on kulunut sondi vedetään ulos varovasti, jotta ei sondin tuulipuoli vaurioidu.
4. Annetaan sondin jäähtyä hetki.
5. Arvioidaan mikä kuvasarjan kuvista vastaa parhaiten sondin pintaa.
 - a. Jos sondin pinnassa näyttää olevan enemmän osumia kuin kuvasarjan viimeisessä kuvassa (peittävyysaste 43 %) käytetään lyhyempää mittausaikaa, eli 10 s. Sondi puhdistetaan ja mittaus suoritetaan uudestaan lyhyemmällä mittausajalla.
 - b. Jos sondin pinnassa ei näytä olevan lainkaan osumia, käytetään pidempää mittausaikaa, eli 30 s. Sondi puhdistetaan ja mittaus suoritetaan uudestaan pidemmällä mittausajalla.
6. Katsotaan taulukosta mittausaikaa ja mittaushetken kuormaa (prosenttia nimelliskuormasta) vastaava carry-over määrä g/Nm^3 dfg (kuiva savukaasu)
7. Sondin jäähdyttyä käsin kosketeltavaksi, puhdistetaan sondi kulmahiomakoneella tai lämpimällä vedellä

LIITE 4. Ruiskutuksen askelkokeen carryover-mittaukset

Koepiste 1

vasen

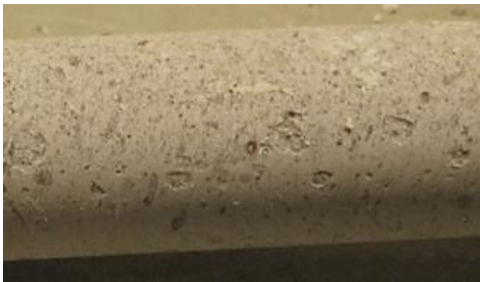


oikea



Koepiste 2

vasen



oikea



Koepiste 3

vasen



oikea



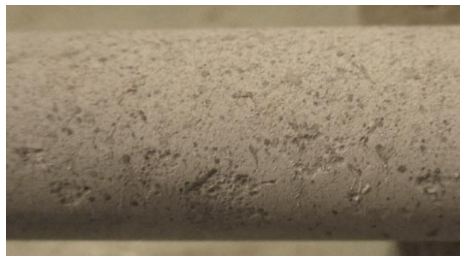
LIITE 5. Ilmakokeen carryover-mittaukset

Koepiste 1

vasen



oikea



Koepiste 2

vasen

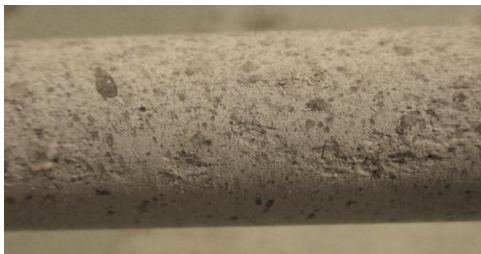


oikea

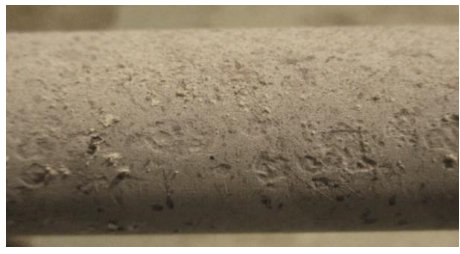


Koepiste 3

vasen



oikea

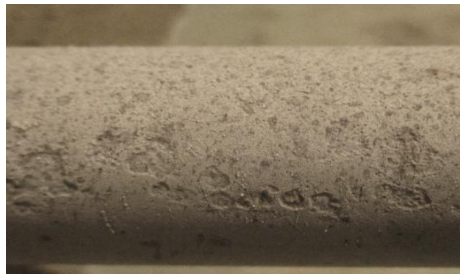


Koepiste 4

vasen



oikea



LIITE 6. Nuohouksen tulokset

Taulukko L1. Normaalien ajomallien testaus

Nuohoin	Sijainti	Kerros	Suutinpää	3 nuohointa [bar]	4 nuohointa [bar]
03	Tulistin, vasen	12	STD	17,5	16,5
04	Tulistin, oikea	12	GEM	17,5	15,5
73	Ekonomaiseri 2, vasen	12	STD	18,5	17,5
74	Ekonomaiseri 2, oikea	12	STD	15	15

Taulukko L2. Yhden ja kolmen nuohoimen ajomallin testaus

Nuohoin	Sijainti	Kerros	Suutinpää	1 nuohoin [bar]	3 nuohointa [bar]
05	Tulistin, vasen	11	GEM	16	16
06	Tulistin, oikea	11	GEM	15,5	15
51	Keittopinta, vasen	10,5	MPCS	16	15,5
52	Keittopinta, oikea	10,5	MPCS	16	15,5
71	Ekonomaiseri 1, vasen	8	GEM	17,5	16