

Suomen Soodakattilayhdistys ry

Soodakattila-alan yhteistoiminta

MUSTALIPEÄN

POLTTO MENETELMÄT

SUOMEN SOODAKATTILOISSA

3.5.2004

Raportti 3/2004

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Konetekniikan osasto

Tuukka Juvonen

**MUSTALIFEÄN POLTTOMENETELMÄT SUOMEN
SOODAKATTILOISSA**

Tekijä:	Tuukka Juvonen		
Työn nimi:	Mustalipeän polttomenetelmät Suomen soodakattiloissa		
Päivämäärä:	29.4.2004	Sivumäärä: 74 + 3	
Osasto:	Konetekniikan osasto		
Professuuri:	Ene-47 Energiatekniikka		
Työn valvoja:	Professori Carl-Johan Fogelholm		
Työn ohjaaja:	Tekniikan tohtori Esa Vakkilainen		
Tämän työn tarkoituksena oli kartoittaa mustalipeän polttomenetelmiä Suomen sellutehtailla käytössä olevilla soodakattiloilla, sekä selvittää eri kattiloiden lipeänpolttotapoja yhdistävät ja erottavat tekijät vertailemalla lipeän ruiskutuksen ja palamisilman syötön parametrejä muun muassa lipeän ominaisuuksien ja kattilakoon suhteen. Työssä on tarkasteltu 11 suomalaisella sellutehtaalla käytössä olevien 14 soodakattilan toimintaa. Polttomenetelmien vertailun lisäksi on tarkasteltu soodakattiloiden tulipesärasituksia, päästöjä ja kemikaalien talteenottoa, sekä niihin vaikuttavia tekijöitä. Uusissa ja suurissa kattiloissa pohjakuormien todettiin olevan huomattavasti korkeampia, kuin vanhoissa ja pienissä kattiloissa. Pohjakuormien havaittiin myös usein olevan sitä korkeampia, mitä suurempi on tulipesän suhteellinen korkeus ja lipeän kuiva-ainepitoisuus. Rikkidioksidipäästöt ovat kaikista kattiloista hyvin alhaiset, eikä minkään yksittäisen tekijän voitu havaita selvästi vaikuttavan niihin. Typenoksidipäästöjen sen sijaan havaittiin nousevan lipeän kuiva-ainepitoisuuden kasvaessa. Kuiva-ainepitoisuuden vaikutus reduktioasteisiin ei ole yhtä selvä. Mustalipeän poltto tarkastelluissa soodakattiloissa on pääpiirteissään hyvin samanlaista. Lipeän kuiva-ainepitoisuuden havaittiin olevan vahvasti kaikkiin polton parametreihin vaikuttava tekijä. Kaikissa kattiloissa käytetään liikkumattomia lusikkasuuttimia lipeän ruiskutukseen. Eri valmistajien kattiloissa ruiskujen geometria ja niiden korkeus tulipesän pohjasta on selvästi erilainen. Käytetyn ruiskukoon havaittiin kasvavan kattilan koon ja kapasiteetin kasvaessa. Myös lipeän kuiva-ainepitoisuuden nousun todettiin kasvattavan ruiskukokoa. Lipeän kiehuminen on kaikissa kattiloissa pisaroitumista hallitseva tekijä, koska ruiskutuslämpötilat ovat reilusti lipeiden kiehumispisteitä korkeampia. Ruiskutuspaineissa hajonta on suurta, mutta isoissa kattiloissa havaittiin käytettävän usein alhaisempaa painetta kuin pienissä kattiloissa. Palamisilman jako on kattiloissa hyvin samanlaista samanlaisilla lipeän kuiva-ainepitoisuuksilla. Kuiva-ainepitoisuuden nousun todettiin laskevan primääri-ilman osuutta, millä puolestaan havaittiin selvästi olevan reduktioastetta parantava vaikutus. Ilmajärjestelmien moninaisuudesta johtuen varsinkin sekundääri- ja tertiääri-ilmojen syöttöpaineissa ja -nopeuksissa on suuria eroja.			

**HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ABSTRACT OF THE
MASTER'S THESIS**

Author:	Tuukka Juvonen	
Title of the thesis:	Black liquor combustion practices in Finnish kraft recovery boilers	
Date:	29.4.2004	Number of pages: 74 + 3
Department:	Department of Mechanical Engineering	
Professorship:	Ene-47 Energy Engineering	
Supervisor:	Professor Carl-Johan Fogelholm	
Instructor:	Esa Vakkilainen, D.Sc. (Tech.)	
The purpose of this work was to map the black liquor combustion practices in the kraft recovery boilers that are in operation at Finnish kraft pulp mills. Also an aim was to discover the unifying and the separating factors of the combustion methods by comparing liquor spray and combustion air feed parameters of different boilers. Data was collected from 14 recovery boilers that are located at 11 kraft pulp mills in Finland. The nominal furnace loadings, the emissions and the reduction efficiencies of these boilers were also studied. The nominal furnace loading was observed to be much higher in new and large boilers, than in old and small boilers. The furnace loading was also observed to increase with increasing specific furnace height and liquor dry solids content. The sulfur dioxide emissions are very low in all the boilers and there was not any specific factor that seemed to affect them. The nitrogen oxide emissions were observed to increase with increasing black liquor dry solids content. Black liquor combustion is very similar in all the recovery boilers studied. The dry solids content of the black liquor seemed to have the greatest effect on all the firing parameters. Stationary firing and splashplate nozzles are used in every boiler. The geometry of the nozzles and the liquor gun height vary, depending mainly on the boiler manufacturer. The liquor gun size was observed to increase with increasing boiler size and capacity. Also an increase in the dry solids content of the liquor seemed to increase the gun size. In all boilers the liquor firing temperature is much higher than the liquor boiling point, hence flashing occurs at the nozzles. The liquor firing pressures vary, but in large boilers the pressures are usually lower than in small boilers. The air feed models of the boilers are very similar when the liquor dry solids contents are similar. The portion of the primary air was observed to decrease with increasing liquor dry solids. Also the reduction efficiency increased with decreasing primary air portion. Because of differences in the air systems, there is a lot of variation especially in the secondary and tertiary air inlet velocities.		

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	6
2. SOODAKATTILA	8
2.1 Soodakattilan tehtävät	8
2.2 Soodakattilan rakenne ja toiminta	9
2.3 Tulipesän prosessit	12
2.3.1 Lipeän ruiskutus	13
2.3.2 Palamisilman syöttö	15
2.3.3 Lipeäpisan palaminen	18
2.4 Savukaasujen koostumus ja päästöt	21
2.4.1 Rikki ja natrium tulipesässä	21
2.4.2 SO ₂	22
2.4.3 Pöly	23
2.4.4 NO _x	23
2.4.5 TRS	25
2.4.6 CO ja muut	25
2.5 Lipeän kuiva-ainepitoisuuden vaikutus	25
2.5.1 Vaikutukset lipeän ruiskutukseen	26
2.6 Soodakattilan likaantuminen ja tukkeutuminen	29
3. KOHDETEHTAAT	32
3.1 Tehdaskuvaukset	32
3.2 Tuotannot ja päästöt	34
4. SOODAKATTILAT	36
4.1 Perustiedot	36
4.2 Mitat ja kapasiteetit	37
4.3 Polttoaineet	39
4.3.1 Mustalipeä	39
4.3.2 Hajukaasut ja muut	41
4.4 Tulipesän rasitus	42
4.4.1 Kattilan iän vaikutus	44
4.4.2 Kattilan koon vaikutus	44
4.4.3 Lipeän kuiva-ainepitoisuuden vaikutus	46
4.5 Likaantumisongelmat	47
4.6 Reduktioasteet	48
4.7 Päästöt	49
4.7.1 SO ₂	50
4.7.2 NO _x	51
4.7.3 Pöly	53
4.7.4 TRS	53
5. LIPEÄN POLTTOMENETELMÄT	54
5.1 Lipeän ruiskutus	54
5.1.1 Ruiskut	54
5.1.2 Ruiskutusparametrit	58

5.2	Palamisilman syöttö.....	61
5.2.1	<i>Ilmanjako</i>	61
5.2.2	<i>Ilman paine ja lämpötila</i>	64
5.2.3	<i>Ilmasuihkun nopeus</i>	64
5.3	Lipeälajin vaikutus polttoon	66
6.	YHTEENVETO	68
	LÄHDELUETTELO.....	71

LIITTEET	1	Soodakattilan laitteet ja ainevirrat
	2	Turvallisuuskysely

1. JOHDANTO

Mustalipeän poltto soodakattilassa on tärkeä osa sellutehtaan toimintaa. Soodakattila tuottaa suurimman osan tehtaan energiantarpeesta ja samalla regeneroi sellunkeittoprosessissa käytettyjä kemikaaleja käyttökelpoiseen muotoon. Soodakattilan toiminnan on oltava mahdollisimman tehokasta. Tämä tarkoittaa korkeaa kemikaalien talteenottoastetta, alhaisia päästöjä ja hyvää lämmön talteenottoa. Suurista investointikustannuksista ja tuotannon keskeytysten aiheuttamista tappioista johtuen myös soodakattilan käyttövarmuuden on oltava korkea. Luotettavuuden merkitys korostuu entisestään, kun kattiloiden yksikkökoot kasvavat.

Suomen sellutehtailla on tällä hetkellä käytössä yhteensä noin 20 soodakattilaa. Ne ovat kokonsa, ikänsä ja valmistajansa puolesta erilaisia ja niissä poltetaan ominaisuuksiltaan erilaisia mustalipeitä. Tämän vuoksi myös lipeän polttomenetelmät ovat kattiloilla useimmiten hieman erilaisia. Polttomenetelmät käsittävät mustalipeän ruiskutuksen ja palamisilman syötön soodakattilan tulipesään. Näillä tekijöillä ohjataan palamisprosessia ja ne ratkaisevat suurelta osin soodakattilan suorituskyvyn.

Tässä työssä on kartoitettu mustalipeän polttomenetelmiä Suomessa käytössä olevilla soodakattiloilla. Työn tavoitteena oli lähinnä selvittää eri sellutehtaiden lipeänpolton menetelmiä yhdistävät ja erottavat tekijät vertailemalla lipeän ruiskutusta ja palamisilman syöttöä tehtaiden soodakattiloissa. Myös polton parametrien ja esimerkiksi lipeän kuiva-ainepitoisuuden ja kattilakoon välisiä riippuvuuksia on tarkasteltu. Kartoituksen kohteena oli 14 soodakattilaa, jotka sijaitsevat 11 sellutehtaalla eri puolilla Suomea. Tällaista laajaa kartoitusta lipeänpolton menetelmistä käytössä olevilla kattiloilla ei tiettävästi ole aikaisemmin tehty.

Polttomenetelmien tarkastelun lisäksi työssä on vertailtu kohdekattiloiden tulipesärasituksia, päästöjä ja kemikaalien talteenottoasteita joidenkin tekijöiden funktioina. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on yksi tarkasteltu tekijä, joka vaikuttaa soodakattilan toiminnassa lähes kaikkeen. Myös soodakattilan koon, iän ja tulipesän korkeuden merkitystä on tarkasteltu.

Työn teoriaosassa, kappaleessa 2, on esitelty soodakattilan tehtävät, rakenne ja toimintaperiaate. Tulipesän prosesseja ja niihin vaikuttavia tekijöitä on tarkasteltu lähemmin. Lisäksi on käsitelty soodakattilan päästöjä, lämpöpintojen likaantumista sekä mustaliipeän kuiva-ainepitoisuuden vaikutusta kattilan toimintaan ja liipeän ruiskutukseen.

Kappaleessa 3 on esitelty kartoituksen kohdetehtaat pääpiirteissään sekä tehtaiden tuotantokapasiteetit ja päästöt ilmaan vuositason tasolla. Kappaleessa 4 on esitetty perustiedot soodakattiloista ja tarkasteltu niiden toimintaa tulipesärasituksen, kemikaalien talteenoton ja päästöjen osalta. Kappaleessa 5 on vertailtu liipeän ruiskutusta ja palamisilman syöttöä kohdekattiloissa. Yhteenvedossa on koottu keskeisimmät tulokset ja johtopäätökset.

2. SOODAKATTILA

Soodakattilassa poltetaan mustalipeää, joka on kemiallisen massan eli sellun valmistuksessa syntyvä sivutuote. Mustalipeä on yksi tärkeimmistä hiilidioksidivapaista polttoaineista maailmassa. Suomessa vuonna 2001 mustalipeällä katettiin lähes 10 % primäärienergian kulutuksesta ja noin 6 % sähkön kulutuksesta /1/.

Yleisin sellunvalmistusmenetelmä on sulfaattikeitto, jossa käytetään keittokemikaaleina natriumsulfidia (Na_2S) ja natriumhydroksidia (NaOH). Kemikaalien tarkoituksena on irrottaa puun kuidut toisistaan liuottamalla niitä sitovaa ligniiniä. Keiton jälkeisessä massan pesussa erotetaan kuidut keittonesteestä. Pesussa syntyvää pesulientä kutsutaan laihamustalipeäksi. Se sisältää lähes kaikki keittokemikaalit, liunneen ligniinin, sekä muuta puusta liuennutta orgaanista ainesta. Koska laihamustalipeän kuiva-ainepitoisuus on ainoastaan 12-20 %, on siitä poistettava vettä, jotta se olisi polttokelpoista. Haihduttamalla laihamustalipeää väkevöidään, jonka jälkeen sen kuiva-ainepitoisuus on 65-85 %. Tämä vahvamustalipeä poltetaan soodakattilassa./2,3/

2.1 Soodakattilan tehtävät

Soodakattilan ensisijaisena tehtävänä on arvokkaiden keittokemikaalien, rikin ja natriumin talteenotto. Soodakattilassa mustalipeän rikki- ja natriumyhdisteet saatetaan sopivaan pelkistyneeseen muotoon ja otetaan talteen jatkokäsittelyä varten. Sulassa muodossa olevat yhdisteet ovat pääasissa natriumkarbonaattia (Na_2CO_3) ja natriumsulfidia (Na_2S). Soodakattilasta tuleva kemikaalisula liuotetaan, jolloin syntyy ns. viherlipeää. Viherlipeän sisältämä natriumkarbonaatti muunnetaan kaustisointiprosessissa toiseksi keitossa tarvittavaksi yhdisteeksi, natriumhydroksidiksi (NaOH)./2,4/

Toinen soodakattilan päätehtävistä on mustalipeän orgaanisen aineksen palamisessa muodostuvan lämmön talteenotto. Talteenotetulla lämmöllä tuotetaan korkeapaineista tulistettua höyryä, joka pääosin johdetaan turbiinille sähkön tuottamiseksi. Turbiinin väliotto- ja vastapainehöyryjä käytetään sekä kattilan omakäyttöhöyrynä että muualla sellutehtaan prosesseissa. Nykyaikaisessa

sellutehtaassa mustalipeän poltosta saatava sähkö- ja lämpöenergia riittää tyydyttämään koko tehtaan tarpeet. Nykyaikaiset sellutehtaat ovatkin energian suhteen yliomavaraisia.

Nykyisin on myös yleistynyt sellutehtaalla syntyvien haitallisten hajukaasujen polttaminen soodakattilassa. Näin niidenkin lämpösisältö saadaan keskitetysti ja tehokkaasti talteen ja tehtaan aiheuttama ympäristökuormitus sekä hajuhaitat vähenevät. Runsaasti rikkiä sisältävien väkevien hajukaasujen poltto soodakattilassa on mahdollista, mikäli mustalipeän sulfiditeetti (rikki-natrium – suhde) sen sallii.

2.2 Soodakattilan rakenne ja toiminta

Soodakattila eroaa perinteisistä voimalaitoskattiloista lähinnä matalampien höyrynarvojen sekä tulipesän alaosan rakenteen osalta. Myös käytettävä polttoaine, mustalipeä, on erikoinen korkean vesipitoisuuden ja epäorgaanisen aineksen (tuhkan) suuren osuuden vuoksi.

Mustalipeän palamisessa syntyvän lentotuhkan aggressiivisesta koostumuksesta johtuen joudutaan soodakattilan tuorehöyryn lämpötila rajoittamaan alhaiseksi verrattuna voimakattiloille yleiseen lämpötilaan 540 °C. Liian korkealla höyryn lämpötilalla etenkin seinämä- ja tulistinputkien korroosio nopeutuu huomattavasti. Tulistetun höyryn paine soodakattiloissa on tyypillisesti noin 85 bar ja lämpötila noin 480 °C. Nykyään uudet soodakattilat suunnitellaan korkeammille höyrynarvoille, jolloin sähköntuotannon hyötysuhde ja rakennusaste nousevat. Tyypilliset arvot uusille kattiloille ovat 105 bar ja 505 °C. /3,5/

Höyryntuotannon hyötysuhde soodakattilassa on tyypillisesti 60 - 75 % (lipeän ylemmän lämpöarvon mukaan) ja suurimmat häviöt aiheuttaa savukaasun sisältämä lämpö. Tulipesässä tapahtuvat rikkiyhdisteiden pelkistymisreaktiot ovat endotermisiä, joten myös ne vähentävät höyryn kehitykseen käytettävissä olevaa lämpöä. Muita häviöiden aiheuttajia ovat muun muassa kemikaalisulan sisältämä lämpö, sekä nuohous- ja ulospuhallushäviöt. /3,5/

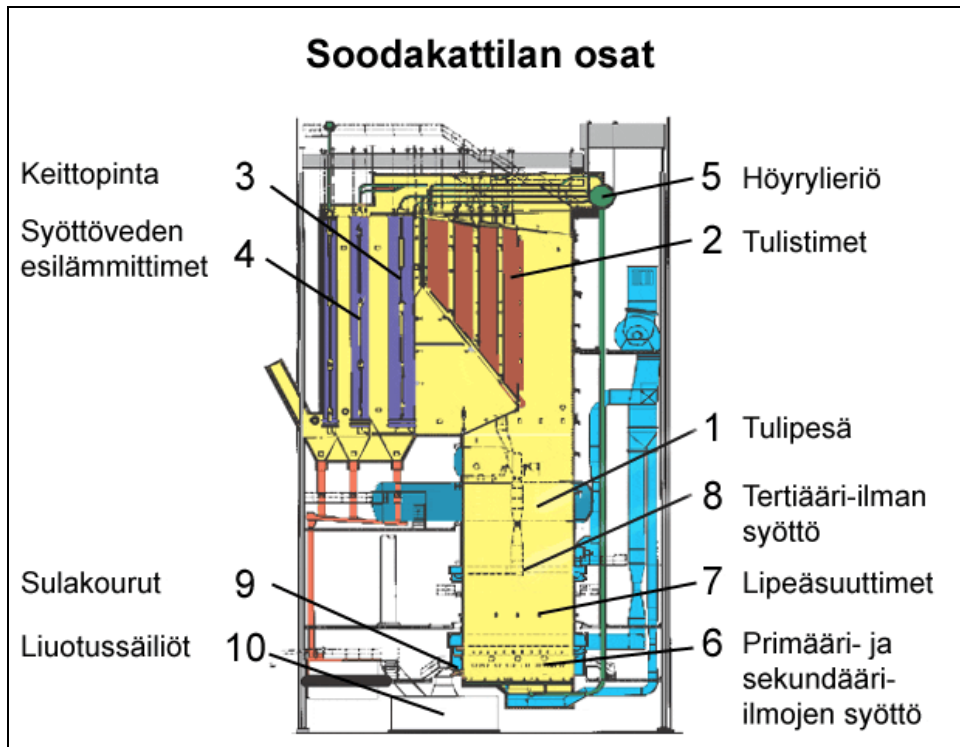
Soodakattilan tulipesän seinät ja pohja ovat vesijäähdytteisistä putkista kauttaaltaan kaasutiiviiksi hitsattua rakennetta. Putket on hitsattu joko suoraan toisiinsa, tai sitten putkien välissä on evä. Tulipesän pohja on vino tai ns. suora dekantoiva pohja

kattilan valmistajasta riippuen. Vesi-höyrykierron ja lämmönsiirtopintojen osalta soodakattilan rakenne on hyvin samanlainen kuin muissakin kattilatyypeissä. Soodakattila on aina luonnonkiertoinen. Lämmönsiirtimet savukaasun virtaussuunnan mukaisessa järjestyksessä ovat seinät, verho, tulistimet, keittopinta ja ekonomaiserit./2,6/

Useimmissa vanhemmissa kattiloissa on vesijäähdytteinen verholämmönsiirrin tulistimien alapuolella. Verho voi kulkea joko kokonaan tulipesän poikki nokan kohdalla, tai sitten tulistimien edestä seinästä kattoon. Verhon päätehtävänä on suojata tulistimia tulipesän pohjalla olevan keon lämpösäteilyltä, vähentää savukaasujen mukana kulkeutuvien mustalipeäpisaroiden kerrostumista tulistimiin ja estää suurten kerrostumapalojen putoaminen tulipesän pohjalle. Tulistimet voidaan sijoittaa myös tulipesän nokan taakse suojaan, jolloin verhoa ei välttämättä tarvita. Myös suuntaus kohti korkeampia tuorehöyryn lämpötiloja lisää tulistustarvetta ja siten vähentää verhon käyttöä uusissa kattiloissa./3,7/

1980-luvun lopulle asti lähes kaikki kattilat olivat kaksilieriörakenteisia. Sen jälkeen on rakennettu miltei yksinomaan yksilieriöisiä kattiloita. Kaksilieriökattilassa lieriöt ovat osittain kosketuksissa savukaasun kanssa ja lieriöitä yhdistävät putket muodostavat keittopinnan. Savukaasujen virtaus on kohtisuorassa putkia vastaan.

Kuvassa 1 on esitetty yksilieriöisen soodakattilan rakenne ja tärkeimmät osat. Laajempi kuva soodakattilan ainevirroista ja apulaitteista on esitetty liitteessä 1. Yksilieriökattilassa lieriö on savukaasutilan ulkopuolella ja keittopinta on ekonomaiserien kaltainen pitkä lämmönsiirrin, jossa savukaasu virtaa putkien suuntaisesti ylhäältä alaspäin. Tällainen rakenne vähentää lämpöpintojen likaantumista ja helpottaa nuohousta. Yksilieriörakenteessa on vähemmän putkiliitoksia kuin kaksilieriörakenteessa, joten se on halvempi valmistaa. Se mahdollistaa myös korkeammat käyttöpainet, lieriön pinnansäätö on helpompaa sekä kattilan alas- ja ylösajo on nopeampaa. Moderneissa yksilieriökattiloissa lämmönsiirtimien putkielementtien välit ovat avarat tukkeutumisen välttämiseksi. /2,4,7/



Kuva 1. Yksilieriöisen soodakattilan rakenne ja tärkeimmät osat. /2/

Mustalipeän korkean tuhkapitoisuuden vuoksi palamisessa syntyy runsaasti lentotuhkaa, joka voi muodostaa lämpöpinnoille tiiviitä kerrostumia ja heikentää lämmönsiirtoa. Tämän vuoksi soodakattilan lämmönsiirtopinta-ala on mitoitettu huomattavasti suuremmaksi kuin vähätuhkaisilla ja ns. ”puhtaammilla” polttoaineilla. Esimerkiksi soodakattilan tulipesän tilavuus on 2 - 2,5 -ertainen verrattuna vastaavantehoiseen hiilipölykattilaan.

Keittopinnalta, ekonomaisereilta ja sähkösuodattimelta kerätty lentotuhka sekoitetaan sekoitussäiliössä haihduttamolta tulevaan vahvamustalipeään. Sekoitettavan tuhkan määrä on huomattavan suuri, 5 - 10 % polttoon menevän lipeän kuiva-aineesta. Perinteisessä laitoksessa mustalipeä menee lentotuhkan lisäyksen jälkeen suoran tai epäsuoran höyrylämmittimen kautta ruiskutettavaksi kattilaan. Nykyisin yleinen käytäntö on palauttaa mustalipeä sekoitussäiliöltä haihduttamolle puolivahvalipeän joukkoon. Lentotuhkan sekoittaminen mustalipeään ennen sen lopullista väkevöintiä vähentää jälkimmäisten haihdutinvaiheiden tukkeutumiseriskiä. /3,4/

Palamisilma syötetään kattilaan yleensä kolmessa tasossa ja kaikilla ilmatasoilla on useimmiten oma puhaltimensa. Kattilan alaosaan syötettävää ilmaa esilämmitetään

epäsuorasti höyryllä. Soodakattilassa ei käytetä savukaasua palamisilman esilämmitykseen.

Tulipesässä mustalipeän orgaaninen osuus palaa ja suurin osa epäorgaanisesta aineksesta muodostaa sulaa. Eräs soodakattilan erityispiirteistä on sen tulipesän pohjalla oleva keko, jossa tapahtuvat sulan reaktiot. Näistä keskeisin on natriumsulfaatin (Na_2SO_4) pelkistyminen natriumsulfidiksi (Na_2S). Sula poistuu kattilasta 0,5 - 1 metrin korkeudella pohjasta sijitsevien sulakourujen kautta liuotussäiliöön. Säiliössä sula liuotetaan veteen tai laihaan keittoneesteeseen (laihavalkolipeään), jolloin syntyy viherlipeää. Pääasiassa natriumkarbonaatista ja natriumsulfidista koostuva viherlipeä pumpataan kattilalta edelleen kaustistamolle, jossa siitä jalostetaan keitossa tarvittavaa valkolipeää./2,3/

2.3 Tulipesän prosessit

Soodakattilan kaksoistehtävästä, eli yhtäaikaisesta kemikaalien ja lämmön talteenotosta, johtuen sen toiminta ja tulipesän prosessit ovat huomattavasti monimutkaisempia kuin muissa kattilatyypeissä. Palamisen hallinnassa keskeisimmät tekijät ovat lipeän ja palamisilman syöttö tulipesään.

Mustalipeä on korkeista vesi- ja tuhkapitoisuuksista, sekä alhaisesta lämpöarvosta johtuen ongelmallinen poltettava. Mustalipeän kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo on yleensä 12-15 MJ/kg. Lämpöarvo on käytännössä kääntäen verrannollinen keittoprosessin saantoon. Mitä enemmän keittoon syötetystä puuaineksesta saadaan hyödynnettyä sellumassaan, sitä vähemmän mustalipeään jää orgaanista ainetta, ja sitä alhaisempi sen lämpöarvo on. Käytetyllä puulajilla on myös pieni vaikutus mustalipeän lämpöarvoon, koska keiton saanto on yleensä havu- ja lehtipuulla erilainen. Samoin orgaanisen aineksen koostumus on havu- ja lehtipuilla hieman erilainen. /4,6/

Ideaalisessa kemikaalien talteenottoprosessissa natriumsulfaatti pelkistyisi kattilassa täydellisesti natriumsulfidiksi. Käytännössä täydellistä reduktiota on kuitenkin mahdotonta saavuttaa, joten sula sisältää aina myös jonkin verran natriumsulfaattia. Kemikaalien talteenoton tehokkuutta soodakattilassa kuvataan reduktioasteella, joka määritetään moolisuhteena seuraavasti:

$$\text{reduktioaste} = \frac{Na_2S}{Na_2S + Na_2SO_4} \cdot 100\% \quad (1)$$

Reduktioaste voidaan määrittää myös natriumsulfidin ja kokonaisrikin suhteena:

$$\text{reduktioaste} = \frac{Na_2S}{S_{tot}} \cdot 100\% \quad (2)$$

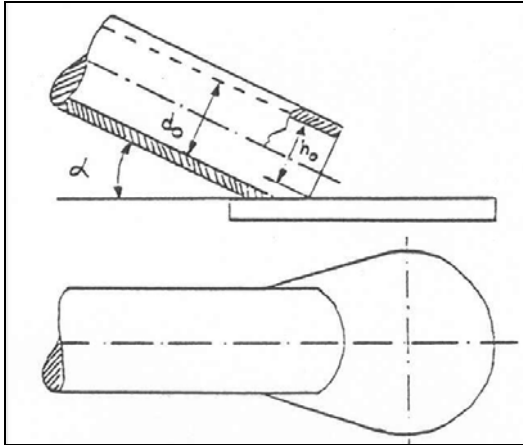
Kokonaisrikkiin perustuva menetelmä huomioi sulan ja etenkin viherlipeän sisältämät muut hapettuneet rikkiyhdisteet, kuten natriumtiosulfaatin ($Na_2S_2O_3$). Reduktioaste nykyisissä soodakattiloissa on yleensä 90 - 98 %. Arvoon vaikuttaa jonkin verran määrittämenetelmä ja se, tehdäänkö määrittäminen sulasta vai viherlipeästä.

2.3.1 Lipeän ruiskutus

Mustalipeä syötetään kattilaan pisaroina. Pisaroituminen tapahtuu 5-9 metrin korkeudelle tulipesän pohjasta sijoitetuissa lipeäruiskuissa. Ruiskuja voi olla käytössä kattilan valmistajasta, koosta ja kuormituksesta riippuen 1-16 kappaletta ja ne on sijoitettu joko kahdelle vastakkaiselle tai kaikille neljälle seinälle. Lipeä pyritään syöttämään tasaisesti koko tulipesän pohjan alalle käyttämällä useita ruiskuja. Lipeän määrää säädetään ruiskujen lukumäärällä ja ruiskutuspainella.
/3,5,8/

Kuva 2 esittää yleisimmin käytössä olevaa ruiskutyyppiä, lusikkasuutinta. Myös muuntyyppisiä suuttimia käytetään joidenkin valmistajien kattiloissa, mutta Suomen soodakattiloissa lusikkasuutin on selvästi yleisin. Muita suutintyyppisiä ovat esimerkiksi rako- ja pyörresuuttimet.

Lusikkasuuttimessa lipeäsuihku purkautuu putkesta ja törmää lusikkaan. Lusikassa lipeä muodostaa kalvon, joka levitessään hajoaa rihmoiksi ja edelleen pisaroiksi. Kalvon muodostuminen riippuu paljon suuttimen geometriasta, lähinnä lusikan kiinnitystavasta putkeen, sekä putken ja lusikan välisestä kulmasta. Suutinputken halkaisija on yleensä 10-40 mm ja lusikan kulma 20-45 astetta./3,9,10/

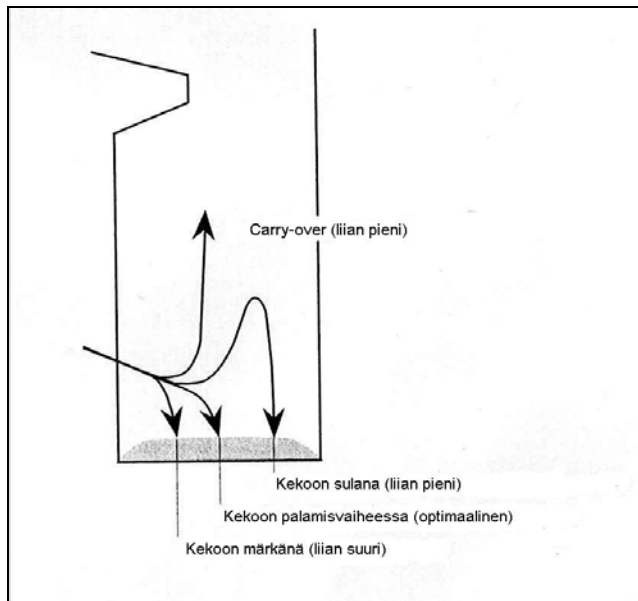


Kuva 2. Lusikkasuutin./11/

Mustalipeän ruiskutuksen tavoite on erikoinen verrattuna esimerkiksi öljyn polttoon. Pisaroista halutaan riittävän suuria, koska varsinaisen palamisen halutaan tapahtuvan tulipesän alaosassa, eikä suspensiossa suuttimien yläpuolella. Sopiva pisarakoko on noin 2 - 3 mm, mikä on huomattavasti suurempi (yli 10-kertainen) kuin tavanomaisten polttoaineiden ruiskutuksessa käytettävä pisarakoko./3,5/

Suurehkolla pisarakoolla pyritään minimoimaan pisaroiden liian nopea kuivuminen ja palaminen sekä niiden kulkeutuminen savukaasujen virtauksen mukana kattilan yläosiin (carryover). Oikean kokoiset pisarat laskeutuvat kecoon kuivuneina ja sopivassa palamisvaiheessa, jolloin pisarassa on jäljellä koksen sisältämä hiili ja epäorgaaninen aines.

Ylärajan pisarakoolle asettaa reaktioiden nopeus keossa. Liian suurilla pisaroilla keossa oleva koksi ei ehdi reagoida samassa tahdissa kuin sitä sinne syötetään ja keko alkaa kasvaa korkeutta. Lisäksi vesi ei ehdi haihtua liian suurista pisaroista, jolloin keko alkaa jäähtyä ja palaminen hidastuu. Tämän seurauksena mm. päästöt kasvavat ja reduktioaste laskee. Kuva 3 esittää erikokoisten pisaroiden käyttäytymistä tulipesässä./3,5/



Kuva 3. Erikokoisten pisaroiden käyttäytyminen tulipesässä./3/

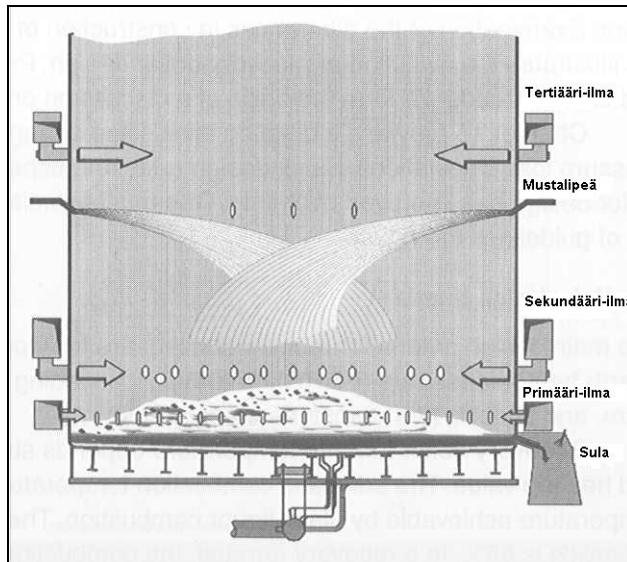
Kattilan ajettavuuden ja optimaalisen tulipesäprosessin kannalta pisarakoon on siis oltava oikea ja pisaroiden kokojakauman mahdollisimman kapea. Pisarakoon säätäminen on tärkeä kattilan toimintaa ja palamisprosessia ohjaava tekijä. Pisarakokoon vaikuttaa pääasiassa lipeäsuuttimen koko ja geometria, ruiskutuspaine ja -lämpötila sekä lipeän ominaisuudet. Lipeän ominaisuuksista tärkein on viskositeetti, joka vaihtelee voimakkaasti kuiva-ainepitoisuuden ja lämpötilan funktiona. Käytännössä lipeäruiskun koko ja lipeän virtaus määräävät karkeasti syntyvien pisaroiden koon ja kokojakauman. Hienosäätö tapahtuu ruiskutuslämpötilaa ja sen myötä lipeän viskositeettia muuttamalla./3,6,10/

2.3.2 Palamisilman syöttö

Soodakattilan ilmansyöttö on järjestetty siten, että tulipesän alaosassa on pelkistävät ja yläosassa hapettavat olosuhteet. Tämän vuoksi palamisilma syötetään tulipesään kolmessa tai useammassa vaiheessa. Kolmitasoisessa ilmajärjestelmässä tasoista käytetään nimityksiä, alhaalta ylöspäin, primääri-, sekundääri- ja tertiääritaso. Jos sekundääri-ilman syöttö on jaettu kahteen tasoon, niin puhutaan alasekundääri- ja (ylä)sekundääritasosta. Kuva 4 esittää tulipesän alaosaa soodakattilassa, jossa on yleinen kolmitasoinen ilmansyöttö.

Ilmajärjestelmän on oltava joustava eli sen on ajotilanteesta riippuen tuotava sopiva määrä happea juuri sinne, missä sitä tarvitaan mahdollisimman hyvän palamisen

aikaansaamiseksi. Tarvittavan palamisilman kokonaismäärä riippuu lipeän koostumuksesta. Orgaanisen aineen osuuden kasvaessa myös palamisilman tarve kasvaa. Nykyaikaisessa sellutehtaassa, jossa keiton saanto on korkea ja mustalipeän orgaaninen osuus alhainen, palamisilmaa tarvitaan $3,4 - 4,0 \text{ m}^3/\text{kg}$ ka ilmakertoimen ollessa 1,2. Palamisilman osuudet eri tasoilla, ilma-aukkojen sijoittelu sekä ilmojen syöttönopeudet vaikuttavat merkittävästi tulipesän toimintaan./2,4/



Kuva 4. Kolmitasoinen ilmajärjestelmä./4/

Primääri-ilman syöttöaukot ovat pieniä ja ne on sijoitettu tasaisesti kaikille seinille noin 1 - 1,5 metrin korkeudelle tulipesän pohjasta. Primääri-ilmalla tuodaan happea keon sivuille ja ylläpidetään keon palamista ja lämpötilaa. Lisäksi primääri-ilman tehtävänä on säädellä keon paikkaa ja muotoa. Keon alueelle ei syötetä riittävästi happea täydelliseen palamiseen, jolloin sinne muodostuu pelkistymisreaktioiden edellyttämät olosuhteet. Primääri-ilman osuus pyritään minimoimaan, kuitenkin siten että se ylläpitää palamista keossa ja keon lämpötila pysyy riittävän korkeana. Primääri-ilman osuus kokonaisilmasta on yleensä 20-35 % ja se on lämmitetty matala- ja välipainehöyryllä $130-180 \text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilaan. Ilman syöttöpaine primääritasolla on alhainen, tavallisesti $0,5-1,0 \text{ kPa}$. /2,3/

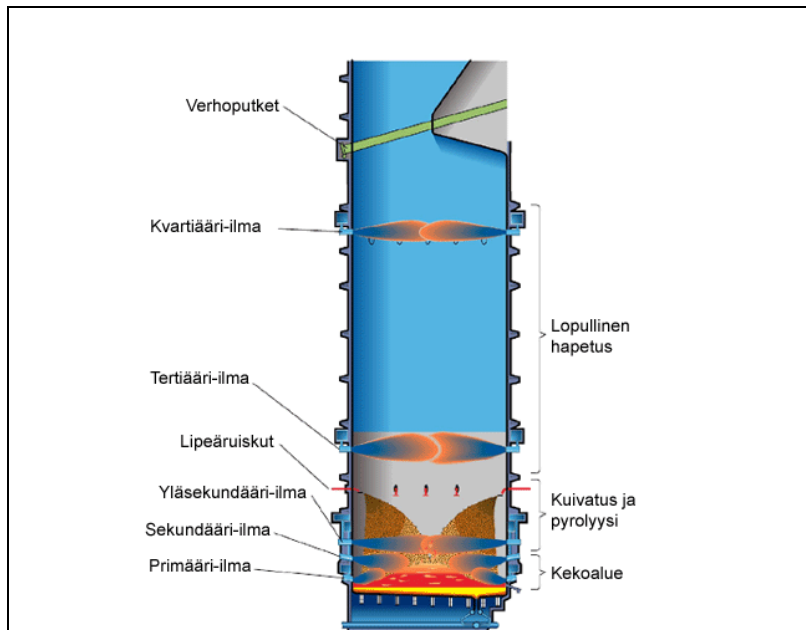
Sekundääri-ilman syöttö sijaitsee noin metrin primääriaukkojen yläpuolella. Sen avulla poltetaan keosta nousevia palamiskelpoisia kaasuja (pyrolyysikaasut). Lisäksi sillä tuodaan happea keon keskiosiin ja säädellään keon huipun muotoa ja paikkaa. Sekundääri-ilma on esilämmitetty höyryllä $120-150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan ja sen osuus kokonaisilmasta on 40-60 %. Sekundääri-ilman syötöllä pyritään mahdollisimman

hyvään sekoittumiseen tulipesän kaasujen kanssa. Mitä parempaa sekoittuminen on, sitä nopeampaa on palaminen ja sitä korkeampi on tulipesän alaosan lämpötila. Korkea lämpötila on tärkeä tekijä hyvän reduktioasteen ja alhaisten rikkiemissioiden kannalta./3,7,12/

Sekundääri-ilma-aukot ovat suurempia kuin primääri-ilma-aukot ja niitä on harvemmassa. Ilman syöttöpaine sekundääritasolla on yleensä 1-3 kPa. Alasekundääri- ja/tai (ylä)sekundääriaukot on sijoitettu joko kaikille neljälle seinälle tai vain kahdelle vastakkaiselle seinälle. Vastakkaisilla seinillä olevat aukot on usein sijoitettu lomittain. Usein myös käytetään vuorotellen isoja ja pieniä aukkoja sekoittumisen parantamiseksi. Sekundääri-ilman syöttötavalla pystytään vaikuttamaan merkittävästi myös kattilan likaantumiseen. Varsinkin tasaisesti kaikille seinille sijoitettujen aukkojen tapauksessa voi tulipesän keskelle muodostua ns. savukaasuhissi, jossa virtausnopeus on paljon suurempi kuin seinien läheisyydessä. Tällöin kattilan yläosien lämpöpintoja likaavan carryoverin määrä kasvaa./12,13/

Tertiääri-ilma syötetään kattilaan muutaman metrin lipeäruiskujen yläpuolelta. Sillä varmistetaan vielä palamatta jääneiden kaasujen loppuunpalaminen. Tertiääri-ilman tehtävänä on myös tasoittaa savukaasujen nopeus- ja lämpötilajakaumaa ennen tulistinaluetta. Tämän vuoksi tertiääri-ilmalla pyritään hyvään tunkeutuvuuteen ja sekoittumiseen, joten tertiääri-ilma-aukot ovat suuria ja ilman syöttöpaine korkea, yleensä 2-5 kPa. Tertiääriaukot on sijoitettu useimmiten vain kahdelle vastakkaiselle seinälle. Tertiääri-ilman osuus kokonaisilmasta on 10 - 30 %, eikä sitä yleensä esilämmitetä, vaan se otetaan suoraan kattilahuoneen yläosasta.

Osa lipeäruiskujen yläpuolisesta ilmasta voidaan syöttää tulipesään vielä varsinaista tertiääritasoa ylempää, jolloin puhutaan ylätertiääri-ilmasta tai kvartiääri-ilmasta. Tällainen pidemmälle viety vaiheistus on joustavampi ilman jakamisessa eri tasoille ja se hyödyntää tehokkaammin tulipesän kokonaiskorkeuden. Vaiheistuksen päätavoitteena on useimmiten typenoksidipäästöjen vähentäminen. Kuva 5 esittää monitasoisella ilmajärjestelmällä varustettua soodakattilaa. Siinä sekundääri-ilman syöttö on kahdessa tasossa. Kvartiääri-ilman syöttöaukot ovat korkealla tulipesän yläosassa lähellä nokkaa./2,4/

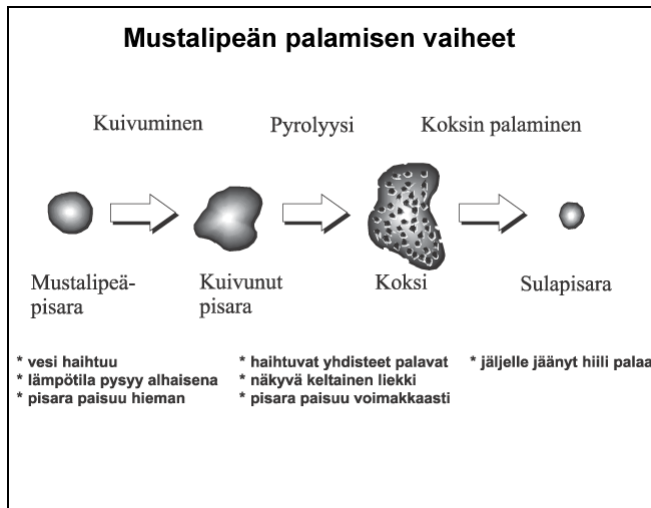


Kuva 5. Monitasoinen ilmajärjestelmä. /2/

Eräs polttoprosessin onnistumisen mittari on savukaasujen happi- ja hiilimonoksidipitoisuuksien (CO) suhde. Happipitoisuus on pyrittävä minimoimaan kaikissa tilanteissa, koska liian suuri yli-ilmamäärä lisää merkittävästi savukaasuhäviöitä. Liian pienellä yli-ilmamäärällä CO-päästö kasvaa, koska palaminen on epätäydellistä. Jäännöshapen säätö tapahtuu useimmiten tertiääri- ja yläsekundääri-ilmoilla. Sekundääri- ja tertiääri-ilmojen hyvä sekoittuvuus on tärkeää, jotta jäännöshapen määrä voidaan minimoida CO-päästön kasvamatta liian suureksi. Moderneilla ilmajärjestelmillä varustetuissa kattiloissa saavutetaan jo 2-3 %:n jäännöshappipitoisuudella alhaiset CO-päästöt./4/

2.3.3 Lipeäpisaran palaminen

Tulipesään saapuvan lipeäpisaran palaminen voidaan kuvata neljällä vaiheella, jotka ovat: 1. kuivuminen, 2. pyrolyysi, 3. koksen palaminen ja 4. sulan muodostuminen. Palamisvaiheet on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Lipeäpisan palamisvaiheet./2/

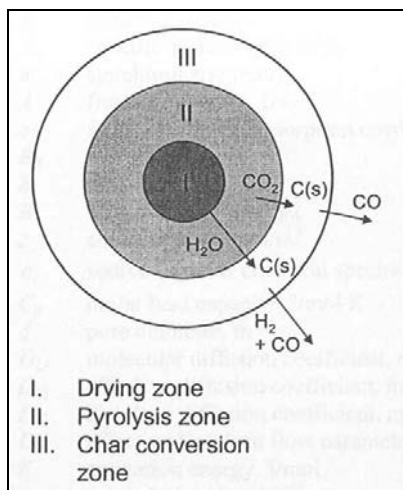
Lipeäpisan saapuessa tulipesään se alkaa välittömästi kuivua savukaasujen lämmön vaikutuksesta. Lämmönsiirto tulipesän kaasuista pisaraan rajoittaa kuivumisnopeutta, ja siten osaltaan asettaa pisarakoolle ylärajan. Pisara paisuu hieman – sen halkaisija kasvaa noin 50 % välittömästi tulipesään saavuttuaan, mutta veden haihtumisen aikana halkaisija pysyy vakiona.

Pyrolyysissä osa pisan orgaanisesta aineesta vapautuu kaasumaisessa muodossa. Nämä pyrolyysikaasut palavat välittömästi kirkkaalla keltaisella liekillä. Pisara paisuu runsaasti pyrolyysivaiheen aikana, mikä vaikuttaa pisan lentorataan ja kaasujen palamiseen. Tyypillisesti pisan paisuessa sen halkaisija kolminkertaistuu, jolloin tilavuus kasvaa jopa 30-kertaiseksi.

Erilaisilla lipeillä on erilaiset paisumisominaisuudet. Esimerkiksi sulfaattilipeistä havulipeä paisuu enemmän kuin koivulipeä. Sulfiittilipeät sen sijaan eivät paisu juuri ollenkaan. Paisumisen on todettu kasvattavan orgaanisen aineksen palamisnopeutta, eli enemmän paisuva lipeä palaa nopeammin kuin vähän paisuva. Pyrolyysivaiheessa mustalipeän kuiva-aineesta vapautuu kaasumaisena noin 30 %. Haihtuvat aineet eivät ole pelkästään orgaanisia yhdisteitä, vaan myös osa kuiva-aineen rikistä ja natriumista vapautuu pyrolyysissä. Jäljelle jäävä osa koostuu enimmäkseen koksaantuneesta hiilestä ja epäorgaanisista suoloista. /5,6,11/

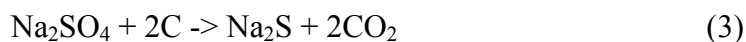
Suurelle hiukkaselle, kuten mustalipeäpisaralle, kuivuminen ja pyrolyysi ovat osin päällekkäisiä tapahtumia. Tietyssä palamisen vaiheessa hiukkasen ulkopinta on pyrolysoitunut ja jäljellä on koksaantunut hiilikerros (kuva 7). Hiukkasen sisäosista

vapautuu edelleen kuivumisen ja pyrolyysin edetessä H₂O:ta ja CO₂:ta, jotka kulkeutuvat ulkokuoren koksikerroksen läpi. Jos koksen lämpötila on riittävän korkea, saattaa se kaasuuntua reagoidessaan veden ja hiilidioksidin kanssa (auto-gasification)./14/



Kuva 7. Palamisvyöhykkeet lipeäpisarassa ja koksen kaasuuntuminen (auto-gasification). /14/

Koksen palamisen tulisi tapahtua vasta kattilan pohjalla keossa. Optimitilanteessa pisara putoaa keoon kun se on täysin kuivunut ja osittain pyrolysoitunut. Sulan muodostuminen epäorgaanisesta aineksesta tapahtuu keossa samanaikaisesti koksen palamisen kanssa. Koksijäännös palaa hapen läsnäollessa hiilimonoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Natriumsulfaatti voi pelkistyä natriumsulfidiksi joko tulipesän alaosan pelkistävien kaasujen (CO ja H₂) avulla tai keossa olevan kiinteän hiilen avulla mm. seuraavien reaktioiden kautta./3,5/



Koksen palamisen loppuvaiheessa pisaran sisältämä rikki on pelkistynyt lähes täydellisesti natriumsulfidiksi. Käytännössä pelkistymisreaktioiden rajallinen nopeus on täydellisen reduktion esteenä. Reaktioiden nopeus on voimakkaasti lämpötilasta riippuvainen. Hiilen avulla tapahtuvien pelkistysreaktioiden nopeus kaksinkertaistuu, kun lämpötilaa nostetaan 50-60 °C /3/.

Se osa natriumista, joka ei sitoudu sulfidiksi, on koksen palamisen loppuvaiheessa sulassa natriumkarbonaattina. Muodostunut sula on voimakkaasti pelkistyneessä

tilassa, joten hapen läsnäollessa natriumsulfidi reagoisi jälleen natriumsulfaattiksi. Tämän vuoksi sula pyritään johtamaan ulos sulakourujen kautta ilman, että se ehtisi hapettua. Keon pinnalle muodostuva reaktiovyöhyke ja siihen jatkuvasti syötettävä aines suojaa sulaa hapettumiselta.

2.4 Savukaasujen koostumus ja päästöt

Tulipesän alaosan savukaasujen pääkomponentit ovat tyypillisiä alistokiömetrisen palamisen tuotekaasuja: vesi, hiilimonoksidi, hiilidioksidi, vety ja typpi. Lipeäpisan palamisvaiheiden aikana osa rikistä ja natriumista siirtyy kaasumaisina yhdisteinä savukaasuihin. Näistä tärkeimmät ovat rikkidioksidi (SO_2), rikkivety (H_2S), karbonyylisulfidi (COS), natriumhydroksi (NaOH) sekä natriumhöyry (Na). Osa rikistä ja natriumista siirtyy savukaasuihin kiinteänä pölynä natriumsulfaatin (Na_2SO_4) ja natriumkarbonaatin (Na_2CO_3) muodossa.

2.4.1 Rikki ja natrium tulipesässä

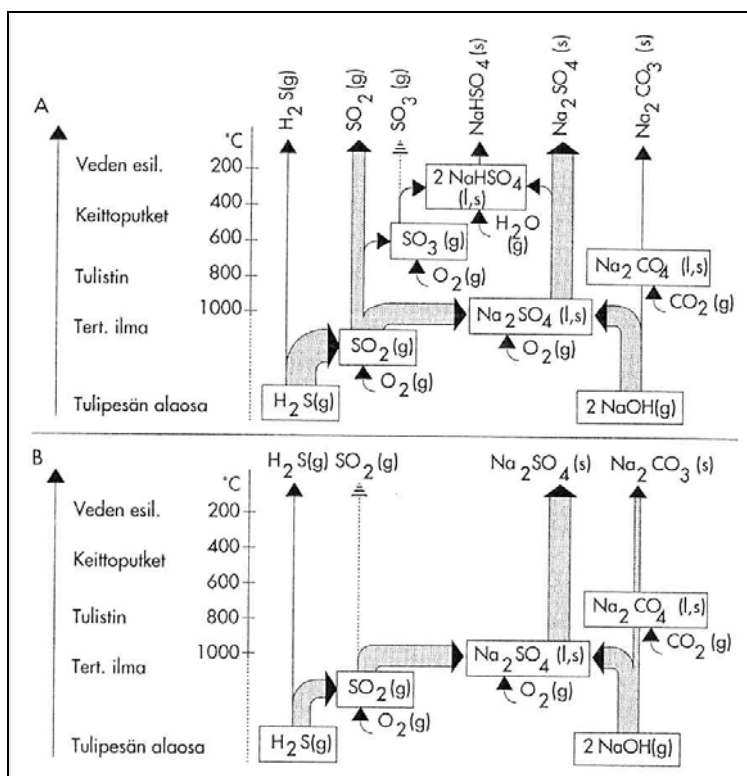
Rikin ja natriumin kaasumaisten yhdisteiden määriin tulipesän alaosassa vaikuttaa olennaisesti lämpötila. Lämpötilan kasvu vähentää rikin vapautumista ja lisää natriumin vapautumista. Korkeassa lämpötilassa rikkiä sitovaa natriumia on läsnä runsaasti ja rikki sitoutuu tehokkaasti Na_2SO_4 :ksi. Keon alueen lämpötila pyritäänkin maksimoimaan, jotta kemikaalien talteenotto olisi tehokasta ja rikkidioksidin muodostuminen mahdollisimman vähäistä. Toisaalta lisääntyvä natriumin vapautuminen kasvattaa myös pölyn määrää savukaasuissa./3,5/

Toinen tulipesän rikki-natriumkemiaan suuresti vaikuttava asia on se, missä suhteessa mustalipeä kyseisiä aineita sisältää. Sulfiditeetilla kuvataan tehtaan lipeäkierron rikin ja natriumin moolisuhdetta ja se riippuu lähinnä keitossa käytettyjen kemikaalien annostelusta. Myös hajukaasujen ja säiliöhönkien polttaminen soodakattilassa vaikuttaa savukaasujen rikki-natrium -tasapainoon.

Kuva 8 esittää rikin ja natriumin reaktioita tulipesässä kahdessa erilaisessa tilanteessa. Tilanteessa A lipeän sulfiditeetti on korkea tai tulipesän lämpötila alhainen. Tällöin savukaasujen rikki/natrium-suhde on korkea ja rikkidioksidia jää savukaasuihin runsaasti. Tämä näkyy luonnollisesti kattilan SO_2 -päästöjen kasvuna. Ylimäärä rikkidioksidia voi myös muodostaa sulfaattipölyn kanssa hapanta sulfaattia

NaHSO_4 , joka tarttuu tehokkaasti kattilan loppupään lämpöpinnoille lisäten korroosiota ja tukkeutumisongelmia./3/

Tilanteessa B savukaasun rikki/natrium-suhde on alhainen eli lipeän sulfiditeetti on matala tai tulipesän lämpötila on korkea. Tällöin lähes kaikki rikkidioksidi sitoutuu natriumsulfaattiin ja ylimääräinen natrium muodostaa hiilidioksidin (CO_2) kanssa natriumkarbonaattipölyä. Lentotuhkan pH-arvo on hyvä indikaattori siitä, onko savukaasuissa hapanta sulfaattia vaiko alkalista natriumkarbonaattia./3,5/



Kuva 8. Rikin ja natriumin reaktioita tulipesässä kahdessa erilaisessa tilanteessa./5/

2.4.2 SO_2

Mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden nousu on mahdollistanut korkeammat lämpötilat tulipesän alaosassa, jolloin soodakattiloiden rikkidioksidipäästöt ovat laskeneet huomattavasti. Rikkidioksidipäästöjä ajatellen lipeän kuiva-ainepitoisuus toimii vastapainona sen sulfiditeetille. Korkealla kuiva-ainepitoisuudella myös lipeän sulfiditeetti voi olla korkea ja SO_2 -päästö pysyvä silti hyvin alhaisena./3,4/

Varsinkin vanhempien tehtaiden soodakattiloissa on käytössä myös savukaasupesuri rikkidioksidin ja pölyn emissioiden vähentämiseksi. Pesuri sijaitsee juuri ennen savupiippua ja on usein osa piipun rakennetta. Pesurissa ruiskutetaan NaOH - tai

Na_2CO_3 -vesiliuosta savukaasuihin, jolloin suurin osa rikistä ja pölystä siirtyy liuokseen ja savukaasu jäähtyy kyllästyslämpötilaansa, noin 60 asteeseen. Pesuri tuottaa lämmintä prosessivettä 10-15 m³ poltettua kuiva-ainetonnina kohti, eli se myös parantaa tehtaan energiataloutta. Uudemmissa soodakattiloissa ei savukaasupesuria yleensä ole, koska niissä SO_2 -päästöt ja energiatalous ovat hyvällä tasolla ilman pesuriakin. Tyypillisen korkeakuiva-aineista mustalipeää polttavan soodakattilan rikkidioksidipäästöt ovat normaalikäytössä hyvin lähellä nollaa (0-10 mg/m³n). /2,7/

Merkittävin osa soodakattiloiden rikkidioksidipäästöistä vuositasolla muodostuu ylös- ja alasajoista, sekä erilaisista häiriötilanteista. Useimmiten käynnistys- ja kuormapolttimien polttoaineena käytetään runsasrikkistä raskasöljyä, jolloin kattilan SO_2 -päästö kohoaa huomattavasti.

2.4.3 Pöly

Soodakattilan kiintoainepäästö koostuu lähinnä natriumsulfaattipölystä. Tulipesästä lähtevässä savukaasussa on suurehko määrä, n. 10-30 g/m³ kiintoainetta. Tästä osa saadaan talteen keittopinnan ja ekonomaiserien tuhkasuppiloissa. Suurin osa tulipesästä lähtevästä kiintoaineesta erotetaan savukaasuista sähkösuodattimessa ja mahdollisessa savukaasupesurissa. Talteen kerätty pöly pääsääntöisesti sekoitetaan mustalipeään ja palautetaan takaisin kiertoon.

Pölypäästö riippuu hyvin paljon sähkösuodattimen erotuskyvystä. Alhainen SO_2 -pitoisuus savukaasuissa voi kasvattaa pölypartikkeleiden resistiivisyyttä, jolloin sähkösuodatin ei erota niitä tehokkaasti /3/. Lisäksi tulipesän alaosan lämpötilan nousu lisää natriumin vapautumista, ja siten myös pölyn määrää savukaasuissa. Tämän vuoksi mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden noston yhteydessä pölypäästöt usein kasvavat, jos sähkösuodattimeen ei tehdä parannuksia. Nykyisissä soodakattiloissa pölypäästöt ovat useimmiten alle 150 mg/m³n. Euroopassa uusien soodakattiloiden takuuarvot ovat tyypillisesti 30-50 mg/m³n /15/.

2.4.4 NO_x

Tyypin oksidien päästöt soodakattilasta ovat alhaiset verrattuna muihin kattilatyyppeihin. NO_x :n määrä soodakattilan savukaasuissa on tyypillisesti luokkaa 200 mg/m³n NO_2 :na. Soodakattilan NO_x -päästöt ovat peräisin mustalipeään

orgaanisesti sitoutuneesta tyypestä, josta lähes kaikki on raaka-ainepuusta lähtöisin. Keiton aikana tyypillisesti yli 95 % puun sisältämästä tyypestä jää keittonesteseen. Haihdutuksessa tästä vapautuu 10-15 % ja loput menee mustalipeän mukana soodakattilaan. Koivussa tyypeä on hieman enemmän kuin havupuissa, joten koivulipeä aiheuttaa n. 20-50 % korkeammat NO_x -päästöt kuin havulipeä. Termisen NO_x :n muodostuminen palamisilman tyypestä on merkittävää vasta yli 1350 °C lämpötiloissa, joten soodakattilassa se ei ole oleellista tulipesän alhaisen lämpötilan vuoksi./3,16,17/

Mustalipeän kuiva-aine sisältää tyypillisesti 0,05-0,20 p-% tyypeä. Pyrolyysivaiheessa 60-70 % siitä vapautuu savukaasuihin N_2 :na ja ammoniakkinä (NH_3). Loppuosa jää koksiin ja reagoi hiilen palaessa osittain syanaatiksi (OCN^-). Tämä tyyppi tulee sulan mukana syanaattina liuotussäiliöön ja reagoi veden kanssa jälleen ammoniakiksi./15,17/

Noin puolet pyrolyysivaiheessa vapautuneesta tyypestä muodostaa ammoniakkia. Tulipesän hapettavan vyöhykkeen lämpötilalla on suuri vaikutus ammoniakin käyttäytymiseen. Korkeassa lämpötilassa se muodostaa NO :ta, joka myöhemmin hapettuu NO_2 :ksi. Matalammassa lämpötilassa ammoniakki reagoi jo muodostuneen NO :n kanssa pelkistäen sen N_2 :ksi ja vesihöyryksi. Alhaiset NO_x -päästöt siis edellyttävät sopivaa lämpötilaa kattilan loppuunpalamisvyöhykkeessä ja siellä alhaista happitasoa. Polttoteknisesti tähän pyritäänkin ilmansyötön vaiheistuksella, jolloin sekundääri- ja/tai tertiääri-ilman syöttö on jaettu useisiin eri tasoihin. Nykyisillä kattiloilla, joissa kuiva-ainepitoisuus on korkea, kuormitus normaali ja ilmansyöttöjärjestelmä perinteinen kolmitasoinen, noin 30 % mustalipeän tyypestä konvertoituu NO_x :ksi. Vaiheistetulla ilmansyötöllä varustetuissa ja alhaisia NO_x -päästöjä ajatellen mitoitetuissa kattiloissa päästään alle 15 % konversioon. /15,18,19/

Myöskään tulipesän alaosan lämpötila ei saa olla liian korkea, koska lämpötilan nousu lisää pyrolyysissä vapautuvan NH_3 :n määrää. Tämä lämpötilakriteeri on ristiriidassa alhaisen rikkidioksidipäästön edellyttämään korkeaan lämpötilaan. NO_x -päästöjen suurempi vähentäminen vaatii sekundäärisiä menetelmiä, eli muodostuneiden typen oksidien redusointia N_2 :ksi. Redusointi voi tapahtua ei-katalyyttisesti (SNCR) tai katalyyttisesti (SCR). Ei-katalyyttisiä järjestelmiä NO_x :ien vähentämiseksi on jo käytössä soodakattiloissa etenkin Japanissa./18,19,20/

2.4.5 TRS

Pelkistyneet rikkiyhdisteet, kuten rikkivety (H_2S) ja merkaptaanit ovat sellutehtaiden hajupäästöjen aiheuttajia. Ne ovat aistittavissa jo hyvin pieninä pitoisuuksina, joten hajuhaitoista täydellisesti eroon pääseminen on käytännössä mahdotonta. Kattilan TRS-päästöt riippuvat lähinnä kaasujen, erityisesti tertiääri-ilman, sekoittumisesta tulipesässä. Keon alueelta nousevat TRS-kaasut hapettuvat sekundääri- ja tertiääri-ilman avulla SO_2 :ksi. Hapettuminen on tehokkainta tertiääri-ilman aukkojen yläpuolella, missä lämpötila on n. $1000^\circ C$ ja sekoittuminen tehokasta. Tulistinpintojen jälkeen TRS:n hapettumista ei juurikaan enää tapahdu lämpötilan laskun ja virtauksen tasaantumisen vuoksi./2,3,12/

Usein liuotussäiliössä, superväkevoittimessä tai muualla muodostuvat hajukaasut johdetaan savukaasupesurin kautta piippuun. Koska pesuri ei juurikaan poista joitain TRS-yhdisteitä, on tämä yksi hajupäästön lähteistä. Nykyaikaisissa soodakattiloissa TRS-päästöt ovat kuitenkin hyvin lähellä nollaa.

2.4.6 CO ja muut

Soodakattilan hiilimonoksidipäästöt riippuvat pitkälti kaasujen sekoittumisesta ja yli-ilman määrästä. Pyrittäessä alhaisiin savukaasuhäviöihin ja NO_x -päästöihin on yli-ilmamäärän oltava mahdollisimman pieni. Tällöin täytyy savukaasuissa hyväksyä jonkin verran CO:ta. Muiden aineiden, kuten palamattomien yhdisteiden ja raskasmetallien päästöt soodakattilasta ovat usein merkityksettömät. Palamattomiin kuuluvat hiilimonoksidin ohella vety ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC). Niiden emissiot johtuvat lähes kokonaan epätäydellisestä sekoittumisesta tulipesässä ja niiden vähentämiseen sopivat samat keinot kuin TRS:n ja CO:n vähentämiseen. Raskasmetallit ovat peräisin raaka-ainepuusta ja kemikaalien lisäyksistä./3,15/

2.5 Lipeän kuiva-ainepitoisuuden vaikutus

Poltettavan mustalipeän kuiva-ainepitoisuudet ovat viime vuosikymmeninä nousseet yleisesti noin 60 % tasosta 70-80 % tasolle. Suomen tehtailla 75-80 % kuiva-ainepitoisuudet ovat hyvin tavallisia. Kuiva-aineen nostolla on saavutettu huomattavia etuja, joista tärkein on olemassa olevien kattiloiden polttokapasiteettien kasvattaminen ilman suuria rakenteellisia muutoksia. Kattilan höyryntuotanto kasvaa

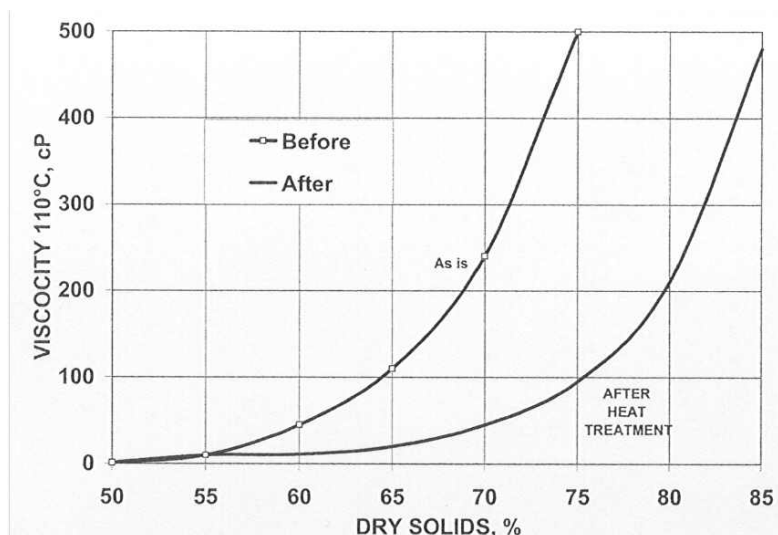
yli 2 %, kun lipeän kuiva-ainepitoisuus nousee 5 %. Hyötysuhde paranee hieman enemmän kuin höyryntuotanto, koska lipeän esilämmitysenergian tarve pienenee./4,7/

Tulipesän alaosan lämpötilaa saadaan nostettua korkeamman kuiva-aineen ansiosta, mikä parantaa kemikaalien talteenottoa ja vähentää rikin oksidien emissioita. Lipeäpisan kuivuminen nopeutuu ja ruiskutuksessa voidaan käyttää suurempaa pisarakokoa, jolloin carryoverin määrä vähenee. Lisäksi savukaasumäärä poltettua kuiva-ainetta kohti pienenee, koska vettä on lipeässä vähemmän. Kuiva-aineen nousun haittapuolia ovat lisääntyvä pölymäärä sekä kasvava tulipesän lämpörasitus. Korkea kuiva-ainepitoisuus asettaa myöskin lipeän ruiskutukselle ja käsittelylle tiettyjä erityisvaatimuksia.

2.5.1 Vaikutukset lipeän ruiskutukseen

Mustalipeä on erittäin viskoosi aine. Viskositeetti kasvaa voimakkaasti kuiva-ainepitoisuuden mukana, joten pumppauksen ja pisaroitumisen mahdollistamiseksi on viskositeetti pidettävä alle noin 500 mPas:n. Useimmiten tämä tapahtuu nostamalla lipeän lämpötila riittävän korkeaksi ja pitämällä se korkeana kaikissa käsittelyvaiheissa./4,6/

Viskositeettia voidaan alentaa myös erityisen lämpökäsittelyn avulla. Lämpökäsittelyssä lipeää pidetään lyhyen aikaa (n. 30 min) paineistettuna korkeassa lämpötilassa (n. 180 °C), jolloin suuret ligniini- ja hemiselluloosamolekyylit pilkkoutuvat /4/. Lämpökäsittelyn lipeän viskositeetti on samaa luokkaa kuin käsittelemättömän lipeän, jonka kuiva-ainepitoisuus on 10 % alhaisempi. Kuva 9 esittää kuiva-ainepitoisuuden ja lämpökäsittelyn vaikutusta mustalipeän viskositeettiin.

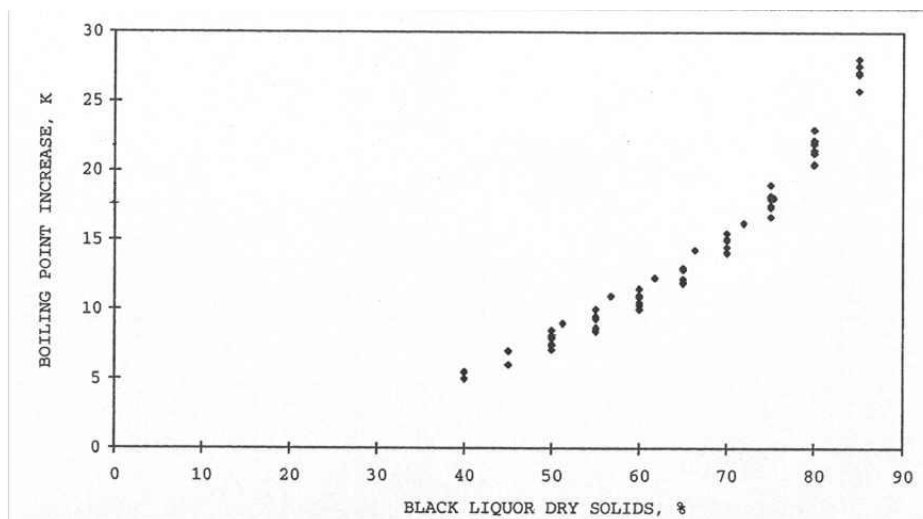


Kuva 9. Käsitlemättömän ja lämpökäsitellyn mustalipeän viskositeetti kuiva-ainepitoisuuden funktiona. (Koivulipeä, 110°C) /4/

Lämpökäsittely pienentää lipeän viskositeettia, mutta samalla muuttaa lipeäpisan käyttäytymistä tulipesässä. Lämpökäsitelty lipeä paisuu pyrolyysivaiheessa enemmän kuin käsitlemätön lipeä. Tämä tarkoittaa että se palaa nopeammin ja sen lentorata on lyhyempi. Lämpökäsittelyssä suurin osa lipeän rikistä vapautuu, joten se myös vähentää epäsuorasti pyrolyysissä kaasutilaan vapautuvan rikin määrää./4,11,21/

Nykyisin useissa tehtaissa kuiva-ainepitoisuuden nostaminen on pakottanut siirtymään paineistettuun polttolipeän käsittelyyn ja varastointiin. Paineistuksen ansiosta lipeä voidaan varastoida korkeassa lämpötilassa. Lämpötila on valittu pisaroitumisen kannalta sopivaksi, jolloin lipeän esilämmityksen tarve ennen ruiskutusta poistuu. Ruiskutuslämpötilaa hienosäädetään tarvittaessa paisunnalla tai suoralla höyrylämmittimellä./4,7/

Lipeän lämpötilan nostaminen viskositeetin alentamiseksi tarkoittaa useimmiten, että ruiskutuslämpötila on korkeampi kuin lipeän kiehumispiste normaali-ilmanpaineessa. Tällöin lipeä alkaa kiehua (flashing-ilmiö) kun sen paine laskee suuttimessa kattilan paineen tasolle. Kiehumisen vaikuttaa merkittävästi lipeäkalvon muodostumiseen ja pisarakokoon. Lipeän kiehumispiste kasvaa kuiva-ainepitoisuuden myötä ja on tietysti myös paineesta riippuvainen. Kiehumispisteen nousu (BPR-Boiling Point Rise) ilmoitetaan yleensä normaalissa ilmanpaineessa 101,3 kPa. Kuva 10 esittää mustalipeän kiehumispisteen nousua kuiva-aineen funktiona.



Kuva 10. Mustalipeän kiehumispisteen nousu kuiva-ainepitoisuuden funktiona./4/

Korkeilla kuiva-ainepitoisuuksilla lipeän viskositeetti kasvaa huomattavasti jyrkemmin kuin kiehumispiste. Tästä johtuen on käytännössä mahdotonta ruiskuttaa yli n. 72 %:n kuiva-aineista lipeää alle kiehumispisteen olevissa lämpötiloissa.

Lipeäruiskun suutinputkessa vallitsevaan paineeseen vaikutetaan lipeän virtausmäärällä. Mitä alhaisempi virtaus on, sitä alhaisempi paine putkessa vallitsee ja sitä voimakkaampaa on kiehuminen. Muodostuvat höyrykuplat kiihdyttävät virtausta, mikä pienentää lusikalla syntyvien pisaroiden kokoa. Kiehuminen myös pienentää massavirtaa suuttimen läpi, joten painetta on nostettava mikäli lipeän virtaus halutaan pitää vakiona.

Voimakkaasti kiehuva lipeäsuihku ei muodosta selkeää kalvoa vaan hajoaa nopeasti. Pisaroitumistutkimuksissa on havaittu, että liikuttaessa n. 5-8 astetta yli lipeän kiehumispisteen olevissa lämpötiloissa, pienikin lämpötilan muutos vaikuttaa huomattavasti lipeäkalvon muodostumiseen ja pisarakokoon. Joillain ruiskutyypeillä pisarakoossa esiintyy voimakkaasti epästabiileja alueita lipeän kiehumispisteen lähellä. Eräässä tutkimuksessa pisarakoolla havaittiin olevan maksimiarvo noin 8 °C kiehumispisteen yläpuolella. Lämpötilaa nostettaessa pieneni pisarakoko nopeasti.
/10,22/

On myös havaittu, että todella korkealla kuiva-ainepitoisuudella (>85 %) on jo vaikeaa saada pisaroista tarpeeksi suuria, koska ruiskutuslämpötilan on oltava reilusti yli lipeän kiehumispisteen, jolloin kiehuminen on voimakasta. Viskositeetin ja

kiehumisen vuoksi tietylle lipeälle ja tietylle ruiskutyyppille sopiva ruiskutuslämpötila-alue onkin hyvin kapea.

2.6 Soodakattilan likaantuminen ja tukkeutuminen

Sellutehtaan tuotannon keskeytysten aiheuttamat tappiot ovat kymmeniä tuhansia euroja tunnissa, joten soodakattilankin on oltava hyvin toimintavarma. Yleinen syy soodakattilan käyttökeskeytyksille on lentotuhkasta johtuva lämpöpintojen likaantuminen ja joissakin tapauksissa jopa tukkeutuminen. Mustalipeän kuiva-aineesta 40-50 % on epäorgaanista ainesta /3/. Suurin osa tästä poistuu kattilasta sulana, mutta osa muodostaa lentotuhkaa, jolla on ikävä taipumus tarttua lämmönsiirtopinnoille. Jatkuva nuohouksesta huolimatta kerrostumat saattavat kasvaa, jolloin painehäviöt savukaasukanavissa nousevat ja lopulta kattila on pysäytettävä pesua varten.

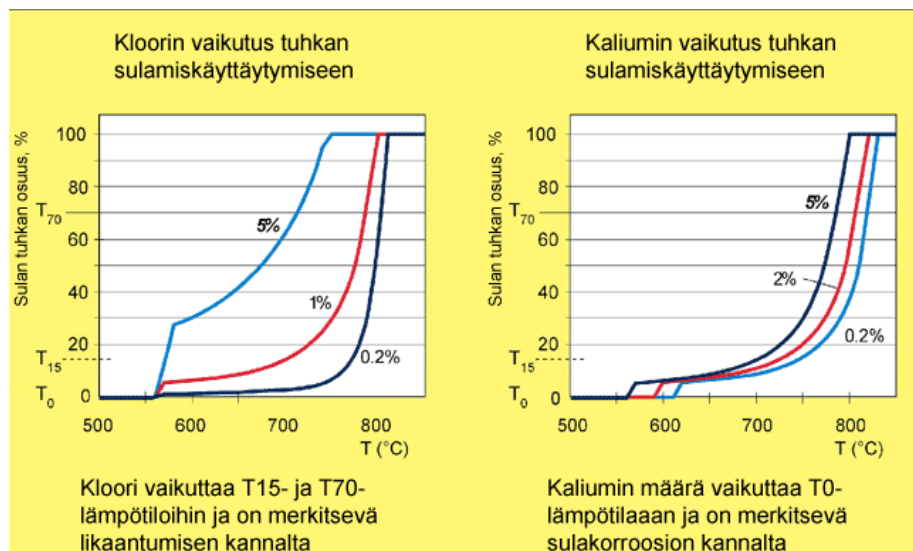
Myös kattilan lämpöpintojen korroosio on vahvasti yhteydessä likaantumiseen ja varsinkin lentotuhkan koostumukseen. Korroosio ja likaantuminen asettavat monessa suhteessa reunaehdot kattilan suunnittelulle ja mitoitukselle.

Lentotuhkaa on periaatteessa kahdenlaista. Carryover - tuhka koostuu tulipesästä karanneista lipeäpisaroista ja fume-tuhka puolestaan on tulipesässä höyrystynyttä ja myöhemmin tiivistynyttä materiaalia. Carryover - hiukkaset ovat kooltaan suurehkoja, 10 – 1000 µm, ja niiden koostumus on sulan kaltainen. Pääkomponenttina on natriumkarbonaatti ja mukana on myös natriumsulfidia ja -sulfaattia. Carryover-tuhkaa esiintyy lähinnä tulistimien alueella, koska ne ovat ensimmäisenä karanneiden pisaroiden kulkureitillä. Fume on tulipesän alaosassa höyrystyneistä epäorgaanisista suoloista tiivistynyttä pölyä. Se on huomattavasti hienojakoisempaa kuin carryover, tyypillisesti kokoluokkaa 0,1 - 1 µm. Tiivistynyt pöly koostuu pääosin natriumsulfaatista, karbonaatin osuus on selvästi pienempi. Kattilan loppupään kerrostumat ovat pääosin tiivistynyttä pölyä./3,5/

Lentotuhkan tarttuvuus on vahvasti yhteydessä sen sulamiskäyttäytymiseen. Kokonaan kiinteytynyt pöly muodostaa yleensä helposti poistettavan kerroksen, mutta kerrostuma voi ajan myötä sintrautua kovaksi ja vaikeasti irtoavaksi. Osittain sula tuhka sen sijaan on erittäin tarttuvaa ja muodostaa usein tiukasti kiinni pysyvän kerrostuman. Tuhkan tarttuvuutta voidaan arvioida ns. T_0 , T_{15} , T_{70} -lämpötilojen

avulla. T_0 on lämpötila jossa tuhkaan alkaa muodostua ensimmäisiä sulapisaroita. T_{15} on ns. sticky-lämpötila, jolloin 15 % tuhkasta on sulana ja se alkaa olla tarttuvassa muodossa. T_{70} on lämpötila jossa 70 % tuhkasta on sulana ja tuhka on hyvin juoksevaa. Tällöin tuhkakerrostuman paksuus ei enää kasva. Tuhkan tarttuvuus on suurimmillaan T_{15} ja T_{70} lämpötilojen välissä./2,3,24/

Lentotuhkan kloori- ja kaliumpitoisuudet vaikuttavat voimakkaasti sen sulamiskäyttäytymiseen. Kaliumia on puussa luonnostaan, mutta kloori on peräisin merivesiuitetusta puusta tai sellunvalmistuksen kemikaaleista, esimerkiksi valkaisimon jätevesistä. Suomen tehtailla kloori- ja kaliumpitoisuudet ovat yleisesti matalia, mutta vesikiertojen sulkeminen ympäristökuormituksen vähentämiseksi aiheuttaa kloorin ja kaliumin rikastumista lipeäkiertoon. Kuva 11 esittää kloori- ja kaliumpitoisuuksien vaikutusta tuhkan sulamiskäyttäytymiseen.



Kuva 11. Kloorin ja kaliumin vaikutus tuhkan sulamiskäyttäytymiseen./2/

Kalium vaikuttaa lähinnä T_0 -lämpötilaa laskevasti, joten se on merkittävä sulakorroosion kannalta. Kloori puolestaan alentaa T_{15} - ja T_{70} -lämpötiloja ja laajentaa tuhkan tarttumisaluetta, joten se on merkitsevä lämpöpintojen likaantumisen kannalta. Koska lentotuhka palautetaan takaisin lipeävirtaan, kloori ja kalium rikastuvat tuhkaan, joten sen sulamiskäyttäytyminen ja tarttuvuus muuttuvat ajan myötä. Tämän vuoksi useilla tehtailla aika ajoin poistetaan kiertotuhkaa kierrosta kloori- ja kaliumpitoisuuksien alentamiseksi. Tästä kuitenkin aiheutuu myös arvokkaiden keittokemikaalien häviöitä, joten parempi olisi kloorin ja kaliumin erottaminen tuhkasta. Tällaisia erotusprosesseja on kehitelty ja niitä on käytössä mm.

Japanissa ja Etelä-Amerikassa, missä raaka-ainepuun K- ja Cl-pitoisuudet ovat yleisesti korkeammat kuin esimerkiksi Suomessa./2,4,20/

Myös savukaasujen korkeat SO_2 - ja SO_3 -pitoisuudet lisäävät etenkin kattilan loppupään kylmempien osien tukkeutumisongelmia. Tällöin lentotuhkan natriumsulfaatti voi muodostaa vesihöyryn ja rikin oksidien kanssa natriumvetysulfaattia NaHSO_4 , joka on sulassa muodossa noin $190 - 280\text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötiloissa. Toisaalta hyvin alhaisella savukaasujen SO_2 -pitoisuudella tulee lentotuhkaan natriumsulfaatin tilalle klorideja, jotka muuttavat tuhkan sulamisaluetta ja voivat siten lisätä likaantumisongelmia./3,5/

3. KOHDETEHTAAT

Tietoa mustalipeän polttomenetelmistä ja soodakattiloiden toiminnasta on kerätty 11 suomalaiselta sellutehtaalta. Näillä tehtailla on käytössään yhteensä 14 soodakattilaa. Kohdetehtaita ei ole valittu minkään tietyn kriteerin perusteella. Ne edustavat useita eri metsäteollisuusyhtiöitä ja niiden tuotteet, tuotantokapasiteetit, prosessit ja laitteistot ovat hyvinkin erilaisia. Tiedot on pääosin kerätty vierailemalla tehtailla ja haastattelemalla talteenotto-prosessien parissa työskenteleviä henkilöitä. Näin on pyritty saamaan mahdollisimman todenmukainen kuva soodakattiloista ja lipeän polton menetelmistä. Tehdasvierailuilla kartoitettiin myös työturvallisuuteen liittyviä asioita, kuten esimerkiksi soodakattiloilla työskentelevien työvarustusta. Turvallisuuskyselyn tulokset on esitetty liitteessä 2.

3.1 Tehdaskuvaukset

Tehdas 1

Tehtaan 1 tuotantokapasiteetti on 350 000 tonnia sellua vuodessa. Tehdas valmistaa niin kutsuttua armeerausmassaa, eli käyttää raaka-aineenaan pelkästään havupuuta. Talteenottolinjaan kuuluu kaksi pientä soodakattilaa, joiden polttokapasiteetit ovat 820 ja 1200 tka/d. Pienempi kattiloista on kaksilieriöinen ja isompi yksilieriöinen. Kattiloiden kapasiteetti on tehtaan tuotantoa rajoittava tekijä, joten niiden kuormitus on käytännössä jatkuvasti maksimaalinen. Polttolipeä varastoidaan paineistetussa lipeäakussa ja sen kuiva-ainepitoisuus on noin 80 %.

Tehdas 2

Tehdas 2 käyttää raaka-aineenaan noin 60 % havupuuta ja noin 40 % lehtipuuta. Tuotantokapasiteetti on 720 000 tonnia vuodessa. Eri kuitulinjoilta tulevat mustalipeät sekoitetaan ja sekalipeä, jonka kuiva-ainepitoisuus on noin 80 % poltetaan yhdessä soodakattilassa. Kattila on yksilieriöinen ja kapasiteetiltaan 4000 tka/d.

Tehdas 3

Tehtaan tuotantokapasiteetti on 850 000 tonnia ja raaka-aine on 40 % havupuuta ja 60 % lehtipuuta. Mustalipeä on sekalipeää ja sen kuiva-ainepitoisuus on keskimäärin 74 %. Tehtaalla on kaksi soodakattilaa, joiden maksimikapasiteetit ovat 1800 ja 3400 tka/d. Tehtaan talteenottolinja käsittelee myös läheiseltä toiselta tehtaalta putkea pitkin tulevan laihamustalipeän.

Tehdas 4

Tehdas 4 on maailman suurin yksilinjainen valkaistua havusellua valmistava tehdas. Uusien kuitu- ja talteenottolinjojen myötä tehtaan tuotantokapasiteetti on noussut 600 000 tonniin vuodessa. Soodakattila on tällä hetkellä Suomen uusiin, yksilieriöinen ja kapasiteetiltaan 4000 tka/d. Tehdas käyttää raaka-aineenaan ainoastaan havupuuta ja polttolipeän kuiva-ainepitoisuus on noin 80 %.

Tehdas 5

Tehtaalla 5 on kaksi jatkuvatoimista keitintä, jotka käyttävät raaka-aineenaan noin puolet havupuuta ja puolet lehtipuuta. Tuotantokapasiteetti on noin 525 000 tonnia vuodessa. Kuiva-ainepitoisuudeltaan 77 %:nen sekalipeä poltetaan kahdessa soodakattilassa, joiden kapasiteetit ovat 800 ja 1800 tka/d. Soodakattilat ovat kaksilieriöisiä ja niissä on vino pohja.

Tehdas 6

Tehtaan tuotantokapasiteetti on 485 000 tonnia vuodessa. Soodakattila on 1985 käynnistynyt kaksilieriökattila ja sen polttokapasiteetti on nykyään 2700 tka/d. Tehtaalla on yksi jatkuvatoiminen keitin, joka vaihtelee lajia havupuun ja koivun välillä noin kolmen vuorokauden jaksoissa. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on keskimäärin 77 %.

Tehdas 7

Vuonna 1996 käynnistyneen tehtaan tuotantokapasiteetti on 570 000 tonnia vuodessa. Tehtaassa on yksi kuitulinja, joka käyttää raaka-aineenaan ainoastaan

havupuuta. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on noin 78 %. Soodakattila on myös vuonna 1996 käynnistynyt yksilieriökattila, jonka polttokapasiteetti on 4000 tka/d.

Tehdas 8

Tehdas 8 on tuotantokapasiteetiltaan 560 000 tonnia vuodessa. Tehtaan kaksi kuitulinjaa käyttävät raaka-aineenaan havupuuta noin 65 % ja lehtipuuta noin 35 %. Mustalipeä on havulipeää suurimman osan ajasta, muulloin koivupitoisuus vaihtelee välillä 0-70 %. Lipeän kuiva-ainepitoisuus on noin 82 %. Soodakattila on vuonna 1990 käynnistynyt yksilieriökattila, jonka maksimikapasiteetti on noin 3000 tka/d.

Tehdas 9

Tehdas käyttää raaka-aineena noin kolmanneksen koivua ja loput havupuuta. Tuotantokapasiteetti on 375 000 tonnia vuodessa yhdellä kuitulinjalla. Poltettavan mustalipeän laatu vaihtelee koivu-, havu- ja sekalipeän välillä ja sen kuiva-ainepitoisuus on noin 70 %. Soodakattila on vuonna 1988 käynnistynyt kaksilieriökattila ja sen polttokapasiteetti on 2000 tka/d.

Tehdas 10

Tehtaan tuotantokapasiteetti on 355 000 tonnia vuodessa. Tehtaalla on yksi jatkuvatoiminen kuitulinja, joka käyttää raaka-aineenaan noin kolmanneksen havupuuta ja loput lehtipuuta. 10-15 % lehtipuusta on eucalyptusta. Lipeän kuiva-ainepitoisuus on noin 80 %. Soodakattila on vuonna 1977 käynnistynyt kaksilieriökattila, jonka kapasiteetti on 2000 tka/d.

Tehdas 11

Tehtaan tuotantokapasiteetti on 170 000 tonnia vuodessa ja raaka-aine on pelkästään havupuuta. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on noin 75 % ja se poltetaan pienessä, kapasiteetiltaan 680 tka/d kattilassa.

3.2 Tuotannot ja päästöt

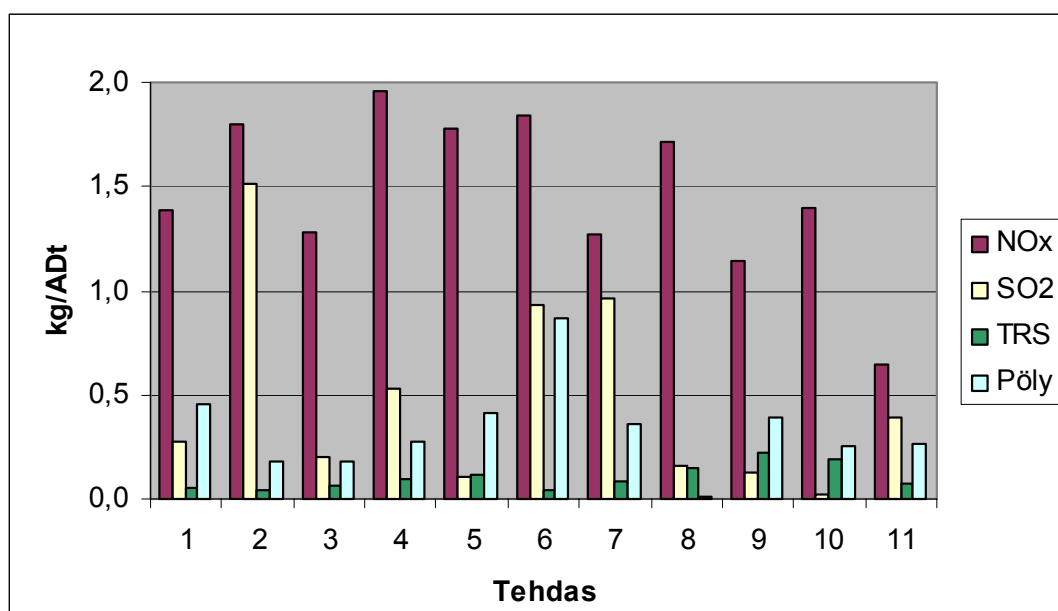
Taulukossa 1 on esitetty kohdetehtaiden tuotannot ja päästöt ilmaan vuodelta 2002. Päästöt käsittävät koko sellunvalmistusprosessin eli päästölähteitä ovat soodakattila,

meesauuni, haihduttamo, keittämö, pesemö, valkaisimo ja kemikaalien valmistus. Tehtaiden muu energiantuotanto ei sisälly taulukon päästöihin.

Taulukko 1. Tehtaiden tuotannot ja päästöt ilmaan vuonna 2002. /25/

Tehdas	Sulfaattisellun tuotanto [ADt]	NO _x [tNO ₂]	SO ₂ [tSO ₂]	TRS [tS]	Pöly [t]
1	302 000	419	83	16	137
2	694 000	1247	1052	32	124
3	888 000	1133	174	59	164
4	433 000	849	231	41	118
5	422 000	750	45	48	174
6	452 000	831	423	21	394
7	506 000	641	489	41	182
8	474 000	811	73	72	5
9	339 000	387	44	74	134
10	343 000	480	8	65	88
11	154 000	100	60	11	41
Summa	5 007 000	7 648	2 682	480	1 561

Tuotantoa kohti lasketut ominaispäästöt on esitetty kuvassa 12. Tehtaiden ympäristöluvuissa päästörajat SO₂:lle vaihtelevat yleensä välillä 2-4 kg/ADt. Muiden päästöjen raja-arvot on asetettu päästölähteittäin. Typen oksideille on asetettu päästöraja vain muutamalle tehtaalle koko Suomessa /25/.



Kuva 12. Päästöt tuotettua sellutonnia kohti vuonna 2002.

4. SOODAKATTILAT

4.1 Perustiedot

Kohdetehtaila käytössä olevien soodakattiloiden ikäjakauma on laaja. Vanhimmat kattiloista on otettu käyttöön jo 50- ja 60-lukujen vaihteessa. Uusimmat on rakennettu 90-luvun loppupuolella. Kaikki kattilat ovat tunnettujen skandinaavisen valmistajien toimittamia. Suurimmat erot kattiloiden perusrakenteissa ovat lieriöiden lukumäärässä ja tulipesän pohjan muodossa. Yleisesti Suomessa ennen 1990-lukua rakennetut kattilat ovat kaksilieriökattiloita, siitä uudemmat poikkeuksetta yksilieriöisiä. Tutkituista kattiloista puolet on kaksilieriöisiä. Alunperin kaksilieriöinen kattila N on sittemmin muutettu yksilieriöiseksi.

Pohjan muoto on kattilan valmistajasta ja valmistusajankohdasta riippuvainen. Vain kattilat G ja H ovat vinopohjaisia, muissa on ns. suora dekantoiva pohja. Suurimmassa osassa kattiloista on, tai on ainakin uutena ollut verholämmönsiirrin. Joistain kattiloista tulistimien edessä ollut verho on poistettu modernisointien yhteydessä. Uusissa verhottomissa kattiloissa tulistimet ovat kokonaan tai lähes kokonaan tulipesän nokan takana.

Taulukko 2. Kattiloiden perustiedot.

Tehdas	Sooda-kattilat	Valmistusvuosi	Lieriöitä	Pohjan muoto
1	A	1965	2	suora
	B	1988	1	suora
2	C	1991	1	suora
3	D	1987	2	suora
	E	1992	1	suora
4	F	1998	1	suora
5	G	1963	2	vino
	H	1976	2	vino
6	I	1985	2	suora
7	J	1996	1	suora
8	K	1990	1	suora
9	L	1988	2	suora
10	M	1977	2	suora
11	N	1959	1	suora

4.2 Mitat ja kapasiteetit

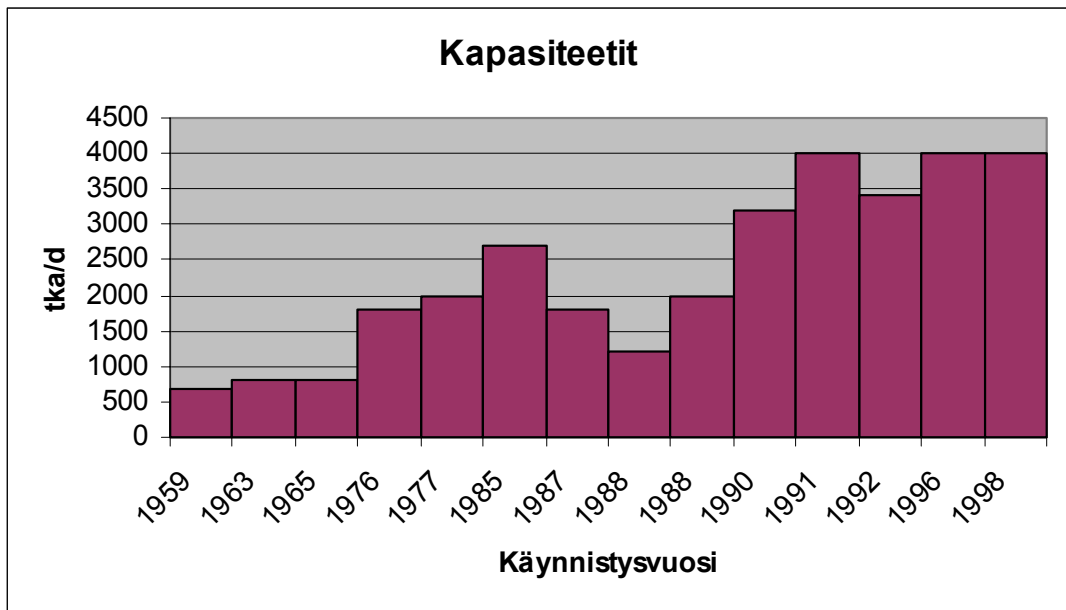
Soodakattiloiden päämitat ja polttokapasiteetit on esitetty taulukossa 3. Kapasiteetit ovat kattiloiden nykyisiä maksimikuormia, eli sellaisia mitä kattiloilla pystytään ajamaan pidempiä aikoja ilman suuria ongelmia. Ne eivät siis ole kattiloiden alkuperäisiä suunnittelukapasiteetteja.

Taulukko 3. Kattiloiden mitat ja kapasiteetit.

Kattila	Tulipesän leveys [m]	Tulipesän syvyys [m]	Pohjan pinta-ala [m ²]	Korkeus tulipesän nokalle [m]	Suhteellinen korkeus	Kapasiteetti [tka/d]
A	7,6	7,6	57,8	15,5	2,04	820
B	8,0	8,0	64	18	2,25	1200
C	12,4	12,8	159	35,6	2,82	4000
D	10,1	10,4	105,1	27,6	2,69	1800
E	13,7	13,3	182,9	40,7	3,01	3400
F	12,5	13,3	166,8	36,5	2,83	4000
G	6,8	6,4	48			800
H	10,3	10,8	111,2	29	2,75	1800
I	10,9	10,8	117,5	31,6	2,92	2700
J	12,6	12,6	158	38,5	3,06	4000
K	12,6	11,8	148,6	31,5	2,58	3200
L	10,1	10,4	105,1	27,8	2,71	2000
M	9,9	9,9	98	23	2,32	2000
N	6,5	6,9	44,9	17	2,54	680

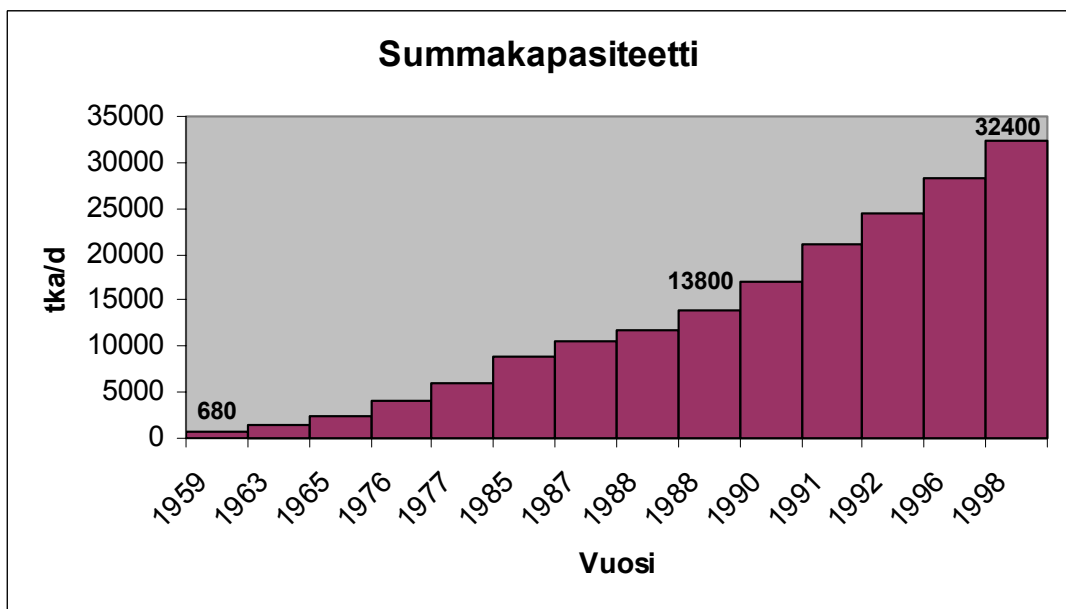
Suomen sellutehtaiden soodakattiloille on ominaista suuri yksikkökoko. Useimmiten tehtailla on vain yksi suuri soodakattila, jossa poltetaan kaikilta kuitulinjoilta tuleva mustalipeä. Etenkin vanhoilla tai tuotannoltaan suurilla tehtailla voi olla kaksi kattilaa. Kolmella tutkimuksen kohdetehtaalla on käytössä kaksi soodakattilaa kullakin: kattilat A ja B tehtaalla 1, D ja E tehtaalla 3, sekä G ja H tehtaalla 5. Usean kattilan etuna on, että tehtaan koko tuotantokapasiteettia ei menetetä, jos yhdellä kattilalla sattuu alasajoon johtava häiriö. Suuntaus on kuitenkin ollut kohti isompia yksiköitä, jolloin käyttövarmuuden merkitys korostuu entisestään.

Kattiloiden polttokapasiteetit ovat välillä 680 – 4000 tka/d. Yksikkökoon kasvu on ollut huomattavaa viime vuosikymmeninä. Vielä 1980-luvun alussa 1700 tka/d katsottiin olevan absoluuttinen maksimikapasiteetti. Nykyään useilla Suomen soodakattiloilla poltetaan lipeää yli 3000 tka/d. Lähiaikoina on käynnistymässä suunnittelukapasiteetiltaan 4450 tka/d kattila. Yksikkökoon kasvu käy ilmi kuvista 13 ja 14. Kuvasta 14 nähdään, että tutkituista 14 kattilasta viisi uusinta muodostaa yli puolet kaikkien yhteenlasketusta kapasiteetista.



Kuva 13. Kattiloiden nykyiset polttokapasiteetit ikäjärjestyksessä.

Varsinkin vanhempien kattiloiden polttokapasiteetteja on nostettu reilusti yli alkuperäisen suunnittelukapasiteetin. Parhaimmillaan ylitys voi olla jopa 50 %. Tämän on mahdollistanut lipeän kuiva-ainepitoisuuden nousun ohella tasaisempi lipeän ruiskutus, sekä tietokonepohjaisten säätöjärjestelmien kehittyminen.



Kuva 14. Kattiloiden summakapasiteetin kehitys. (nykyisten kapasiteettien mukaan)

Luonnollisesti myös kattiloiden fyysinen koko on kasvanut. Tutkituissa kattiloissa tulipesän pohjan pinta-alat vaihtelevat noin 45 neliömetristä yli 180 neliömetriin ja

tulipesän seinien leveydet vastaavasti 6,5 metristä lähes 14 metriin. Korkeudet tulipesän pohjasta nokalle ovat 15 metristä yli 40 metriin.

Tulipesän suhteellinen korkeus on mielenkiintoinen vertailuluku. Se määritetään jakamalla tulipesän korkeus (nokalle) pohjan pinta-alan neliöjuurella. Yleensä soodakattiloiden suhteellinen korkeus on 2,6 - 3,0. Kohdekattiloista suurin osa osuu tähän väliin, mutta muutama on selvästi muita matalampia lukemilla 2,0 - 2,3. Matalan kattilan kuormittaminen on usein ongelmallista ja vaatii hyvin hallitun tulipesän alaosan.

Tulipesän korkeuden mitoituksessa määrävänä tekijänä on savukaasun lämpötila ennen tulistimia. Tavallisesti korkeus mitoitetaan siten, että lämpötila on noin 950-980 °C. Mitoitukseen vaikuttaa suuresti se, miten palamislämmön luovutus jakautuu pystysuunnassa. Tämä puolestaan riippuu pääasiassa lipeän ruiskutuksesta ja palamisilman jaosta. Myös verholämmönsiirtimen olemassaolo ja sen rakenne vaikuttaa tarvittavaan korkeuteen. Verho laskee savukaasujen lämpötilaa, joten kattilan korkeus voidaan mitoittaa pienemmäksi kuin verhottomassa tapauksessa.

4.3 Polttoaineet

4.3.1 Mustalipeä

Mustalipeän laatu sekä ominaisuudet vaihtelevat eri tehtaiden välillä. Tämä johtuu mm. erilaisten puulajien ja keittomenetelmien käytöstä, keittokemikaalien annostelusta ja laitteistojen iästä. Lipeän ominaisuudet voivat vaihdella huomattavasti myös tehtaan sisällä, riippuen kuitulinjojen lukumäärästä sekä lajinvaihtoista eri massatyypin kesken.

Neljä kohdetehdasta valmistaa ainoastaan havupuusellua, jolloin lipeän ominaisuudet pysyvät melko muuttumattomina. Samoin kolmella tehtaalla eri puulajia ajavilta kuitulinjoilta tulevat mustalipeät sekoitetaan, jolloin polttolipeä on sekalipeää lähes aina. Tällöinkin tasaisessa tuotantotilanteessa lipeän ominaisuudet pysyvät melko vakiona. Neljässä tehtaassa jokin kuitulinjoista vaihtaa lajia säännöllisesti, jolloin myös polttolipeän ominaisuudet muuttuvat käytännössä koko ajan. Tällaisessa tapauksessa palamisen hallinta on usein vaikeaa. Sääto- ja automaatiojärjestelmiltä

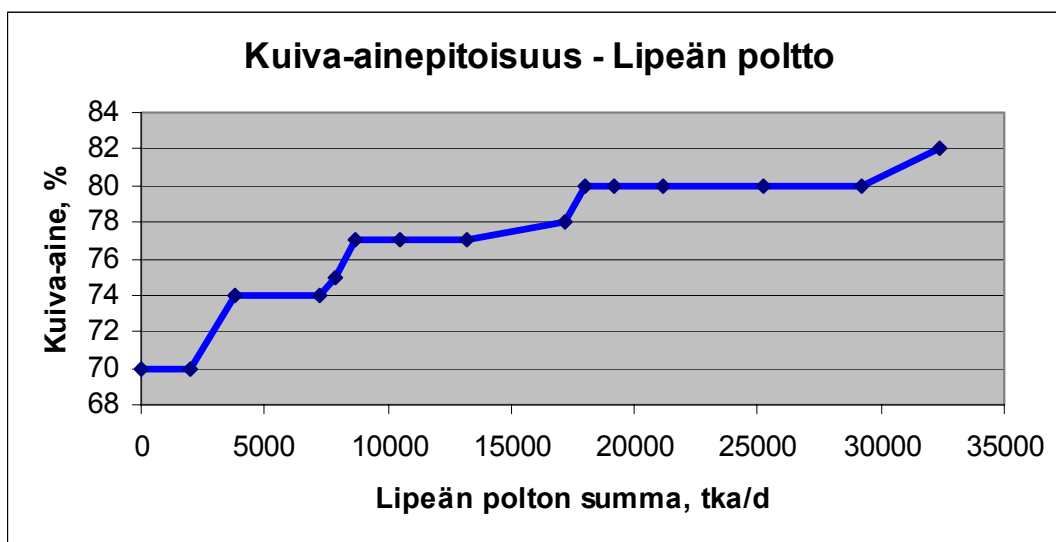
vaaditaan paljon, koska lipeän ruiskutusta ja ilmanjakoja on jatkuvasti muutettava lipeän ominaisuuksille sopiviksi.

Taulukossa 4 on esitetty kattiloissa poltettavien lipeiden laadut, kuiva-ainepitoisuudet ja kuiva-aineen kalorimetriset lämpöarvot. Luvut ovat keskimääräisiä arvoja, koska luonnollisesti lipeän kaikki ominaisuudet vaihtelevat jatkuvasti. Kattiloissa, joissa lipeälaji vaihtelee säännöllisesti, kuiva-ainepitoisuus ja lämpöarvo on oletettu samaksi kaikille lipeille.

Taulukko 4. Kattiloissa poltettavat lipeät.

Kattila	Lipeälaji	Kuiva- aine %	HHV [MJ/kgka]
A	Havu	80	13,5
B	Havu	80	13,5
C	Seka	80	12,5
D	Seka	74	13,7
E	Seka	74	13,7
F	Havu	80	13,3
G	Seka	77	13,0
H	Seka	77	13,0
I	Havu/Koivu/Seka	77	13,2
J	Havu	78	13,0
K	Havu/Seka	82	13,7
L	Havu/Koivu/Seka	70	13,7
M	Havu/Koivu/Seka	80	13,7
N	Havu	75	14,1

Erot lipeän kuiva-aineen lämpöarvoissa tehtaiden välillä johtuvat pääasiassa erilaisista keittoprosesseista ja raaka-aineista. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuus Suomen sellutehtailla on yleisesti korkea, yli 70 %. Tutkimuksen kohteena olleissa kattiloissa kuiva-ainepitoisuudet ovat 70 - 82 %. Viidellä tehtaalla kuiva-ainepitoisuus on 80 % tai enemmän. Kuva 15 esittää eri kuiva-aineisten lipeiden polttoa tutkituissa kattiloissa. Noin puolet kattiloiden yhteenlasketusta lipeän poltosta tapahtuu yli 80 %:n kuiva-aineessa.



Kuva 15. Eri kuiva-aineisten lipeiden poltto.

4.3.2 Hajukaasut ja muut

Hajukaasujen ja säiliöhönkien poltto soodakattilassa on nykyään hyvin yleistä. Vain muutamassa kohdekattilassa niitä ei polteta lainkaan. Laimeiden hajukaasujen ja säiliöhönkien happipitoisuus on noin 20 %, joten niillä voidaan korvata sekundääri- tai tertiääri-ilmaa. Muutamassa kattilassa poltetaan myös väkeviä hajukaasuja ja nesteytettyä metanolia. Niiden poltto tapahtuu erillisessä polttimessa tulipesän alaosassa. Taulukossa 5 on eritelty hajukaasujen ja muiden vieraiden aineiden poltto kohdekattiloissa.

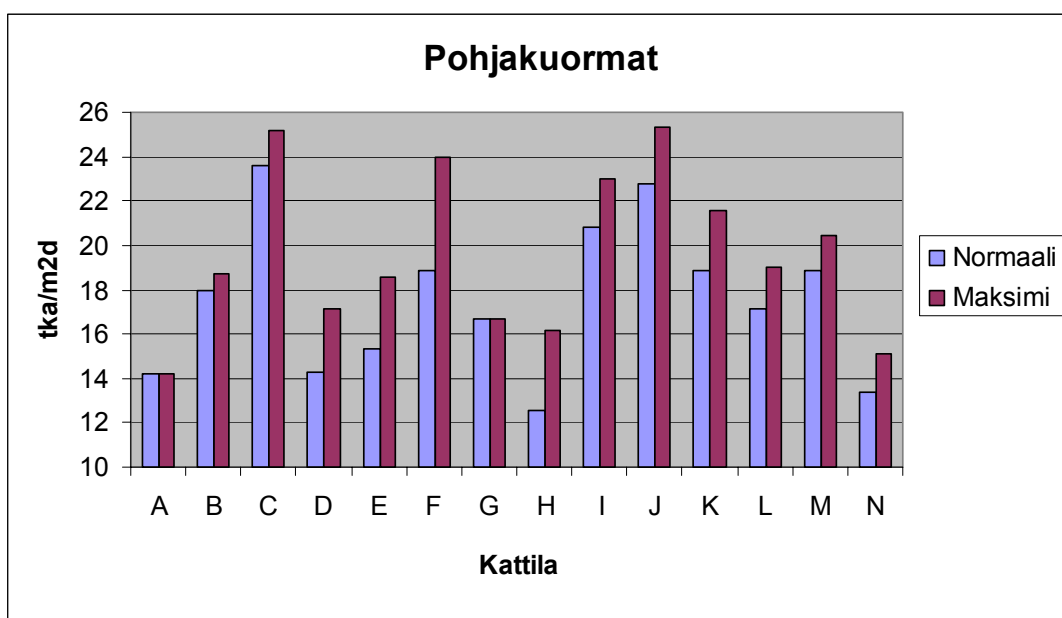
Taulukko 5. Hajukaasujen ja muiden aineiden poltto soodakattiloissa.

Kattila	Laimeat hajukaasut	Väkevät hajukaasut	Metanoli	Muut
A	x	-	-	säiliöhönkä
B	-	-	-	säiliöhönkä
C	x	-	-	suopa joskus
D	-	-	-	säiliöhönkä, suopa
E	x	-	-	säiliöhönkä, suopa
F	x	x	x	tärpätti,bioliete,CTMP-väkeväite
G	-	-	-	-
H	x	-	-	-
I	x	-	-	-
J	x	-	-	-
K	x	x	x	-
L	x	-	-	-
M	x	x	x	superväkevöitinkaasu
N	-	-	-	suopa tai maakaasu

Kattiloiden alas- ja ylösajoissa sekä tukipolttoaineena käytetään raskasta polttoöljyä tai maakaasua. Kattilassa N poltetaan maakaasua käytännössä jatkuvasti varsinkin talviaikaan tehtaan höyryntarpeen tyydyttämiseksi.

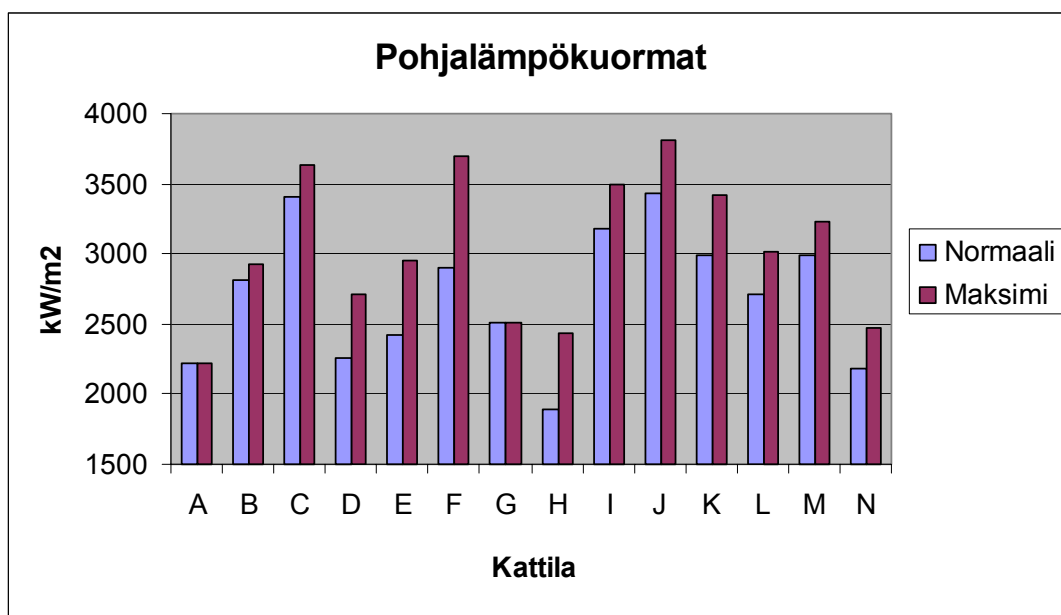
4.4 Tulipesän rasitus

Tärkeitä suunnitteluarvoja kattilan tulipesän mitoituksessa ovat pohjakuorma ja pohjalämpökuorma. Niiden perusteella määritetään tarvittava kattilan pohjan pinta-ala. Pohjakuorma kuvastaa kattilaan syötettävän kuiva-aineen määrää pohjan pinta-alayksikköä kohti vuorokaudessa ja sen yksikkö on $\text{tka/m}^2\text{d}$. Pohjakuorman suunnitteluarvo nimelliskuormituksella on yleensä välillä 13-19 $\text{tka/m}^2\text{d}$. Kuvassa 16 on esitetty kattiloiden pohjakuormat normaalilla ja maksimilla kuormituksella.



Kuva 16. Kattiloiden pohjakuormat normaali- ja maksimikuormalla.

Pohjakuorma ei huomioi lipeän ominaisuuksia, joten tulipesän lämpörasitusta paremmin kuvaava ominaisluku on pohjalämpökuorma. Se määritellään mustalipeän kalorimetrinen lämpöarvon perusteella polttoainetehona pohjan pinta-alayksikköä kohti. Pohjalämpökuormat tutkituille kattiloille on esitetty kuvassa 17. Laskennassa on käytetty taulukossa 4 esitettyjä lämpöarvoja lipeille. Kattilan suunnittelussa pohjalämpökuorma nimellistuotannolla on yleensä välillä 2500 - 3000 kW/m^2 .



Kuva 17. Kattiloiden pohjalämpökuormat normaali- ja maksimikuormituksella.

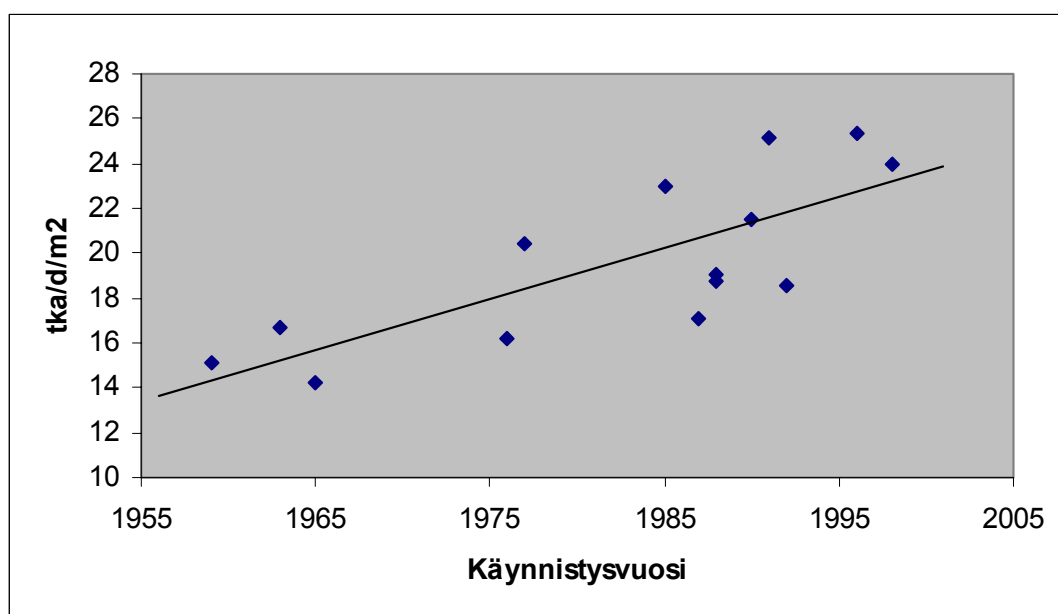
Pesärasitusta kuvaavat ominaisluvut ovat hyödyllisiä vertailtaessa kattiloiden suhteellista kuormitusta. Kattiloiden kapasiteettien noston myötä pesärasitukset ovat myös kasvaneet huomattavasti mitoitusarvoja suuremmiksi. Joissain uudemmissa soodakattiloissa pohjakuorma voi olla maksimissaan yli 25 tka/m²d ja lämpökuorma lähes 4000 kW/m².

Tulipesän rasituksen ja samalla kattilan polttokapasiteetin nostamista rajoittavat useimmiten lipeäpisan palamisnopeus ja savukaasujen pystysuuntainen virtausnopeus. Jos kattilan kuormitusta kasvatetaan liikaa, ei kekkoon saapuva lipeä ehdi reagoida samassa tahdissa kun sitä sinne syötetään. Tällöin keko alkaa kasvaa korkeutta ja palaminen on huonoa. Keon lämpötila laskee, jolloin päästöt lisääntyvät ja reduktioaste huononee. Samoin lisääntyneen savukaasumäärän vuoksi virtausnopeus tulipesässä kasvaa, jolloin carryoverin määrä ja sen myötä likaantumisoongelmat lisääntyvät. Likaantuminen on selvästi yleisin polttokapasiteetin nostamista rajoittava tekijä soodakattiloissa.

Polttokapasiteettia rajoittavina tekijöinä voivat olla myös liian pieniksi jäävät savukaasu- ja ilmapuhaltimet, ilma-aukot ja -kanavat sekä savukaasukanavat ja sähkösuodatin. Jossain tapauksessa vesi/höyry-puolen kapasiteetti voi tulla vastaan ensimmäisenä. Eri tekijöiden vaikutusta kattilan kuormitettavuuteen voidaan tarkastella vertailemalla pesärasituksia jonkin parametrin funktiona.

4.4.1 Kattilan iän vaikutus

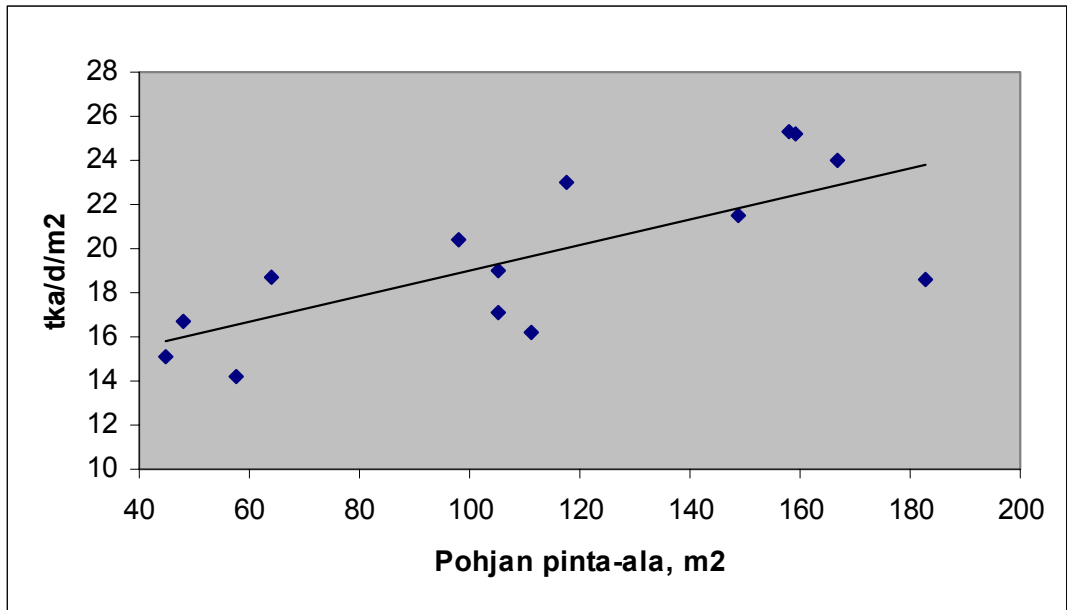
Vaikka vanhojen kattiloiden polttokapasiteetteja on nostettu huomattavasti vuosien varrella, niitä ei kuitenkaan kuormiteta pohjakuorman perusteella enempää kuin uudempia kattiloita. Tämä ilmenee kuvasta 18, missä pohjakuormat on esitetty kattiloiden käynnistysvuoden mukaisessa järjestyksessä. Tulipesärasitukset ovat kasvaneet soodakattilatekniikan kehityksen ja paremman palamisen hallinnan myötä. Uudet kattilat mitoitetaan myös kaikkien apulaitteiden osalta yhä suuremmille pohjakuormille.



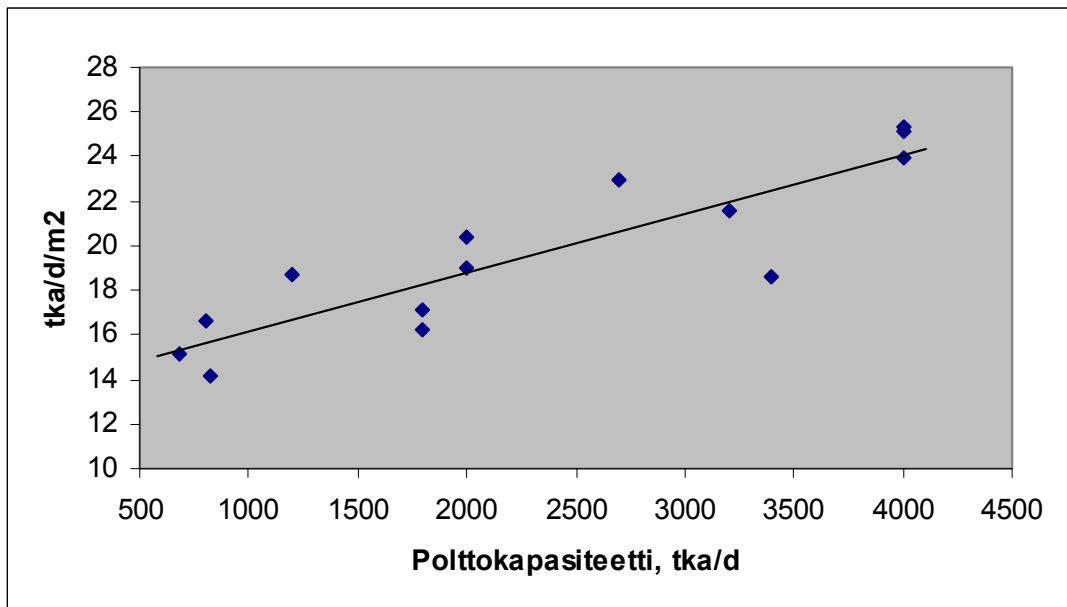
Kuva 18. Kattiloiden pohjakuormat käynnistysvuoden funktiona. (maksimikuorma)

4.4.2 Kattilan koon vaikutus

Kattilan koolla on samansuuntainen vaikutus tulipesärasitukseen kuin käynnistysvuodella (kuvat 19 ja 20). Suuremmat kattilat ovat toki usein uudempia kuin pienet, mutta suuremmassa kattilassa keon käyttäytyminen on myös usein rauhallisempaa kuin pienessä, mikä mahdollistaa korkeammat pesärasitukset /3/.

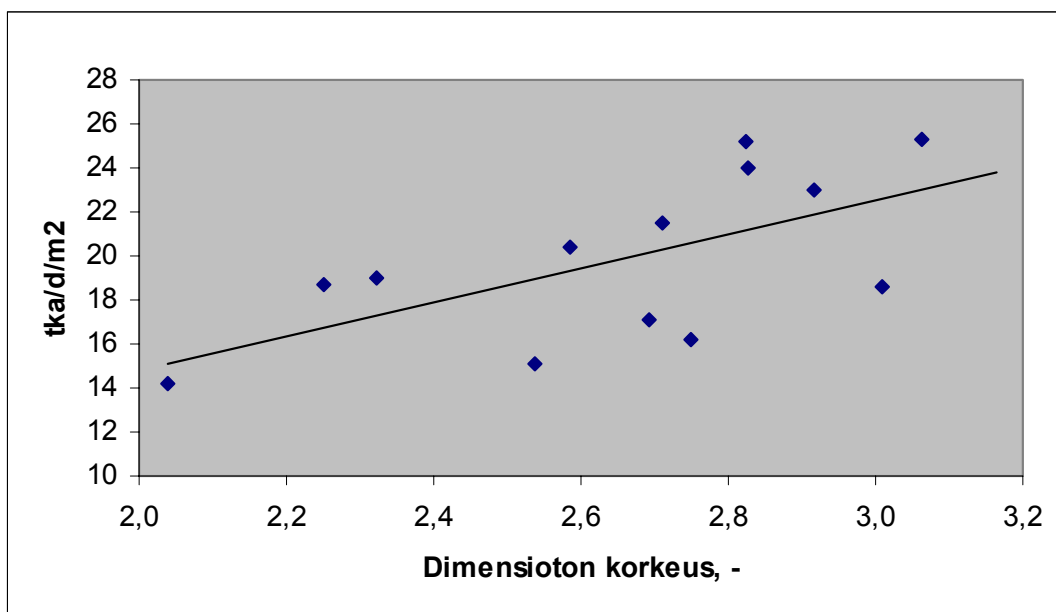


Kuva 19. Kattiloiden pohjakuormat pohjan pinta-alan funktiona.



Kuva 20. Kattiloiden pohjakuormat polttokapasiteetin funktiona.

Tunnettua on, että tulipesän korkeus usein asettaa rajan kattilan polttokapasiteetille. Liian suurella kuormituksella kaasujen viipymäaika tulipesässä on liian lyhyt ja palaminen on epätäydellistä. Myös savukaasujen lämpötila tulistinalueella saattaa nousta liian korkeaksi, mikä voi lisätä lentotuhkan tarttuvuutta ja nopeuttaa korroosiota. Kuva 21 esittää kattiloiden pohjakuormia tulipesän suhteellisen korkeuden funktiona. Kaikki yli 22 tka/m²d pohjakuormaan yltävät kattilat ovat suhteelliselta korkeudeltaan yli 2,8:n.



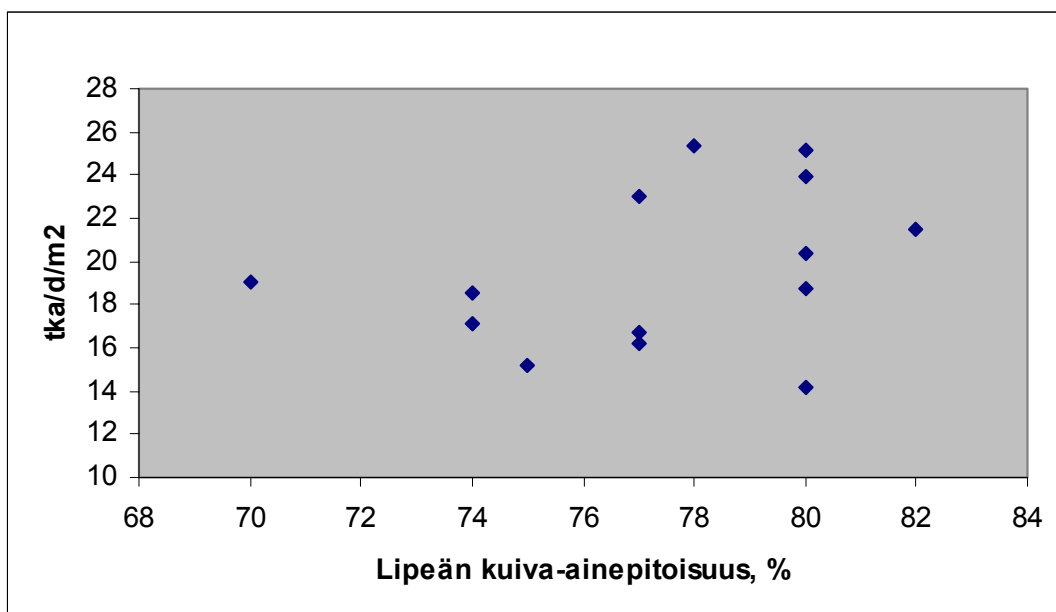
Kuva 21. Kattiloiden pohjakuormat suhteellisen korkeuden funktiona.

4.4.3 Lipeän kuiva-ainepitoisuuden vaikutus

Mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden noston tavoitteina on yleensä soodakattilan polttokapasiteetin kasvattaminen ja rikkipäästöjen (SO_2 , H_2S) vähentäminen. Lipeäkuorman noustessa myös kattilan tulipesärasitus kasvaa.

Lipeän kuiva-ainepitoisuuden vaikutus pesärasitukseen ei ole yhtä selkeä kuin kattilan iän tai koon vaikutus. Kuvassa 22 on esitetty kattiloiden pohjakuormat lipeän kuiva-ainepitoisuuden funktiona. Hajonta on melko suurta, mikä selittyy sillä, että lipeän kuiva-ainepitoisuus on korkea myös useissa vanhoissa kattiloissa. Niissä pesärasitusta rajoittaa esimerkiksi apulaitteiden kapasiteetti. Uudemmat kattilat on alunperin mitoitettu korkeille kuiva-aineille ja pesärasituksille.

Pesärasitus voi olla korkea myös alhaisen kuiva-aineen kattilassa. Esimerkiksi 70 % kuiva-aineista lipeää polttavassa kattilassa L pohjakuorma on suurempi kuin monissa korkeamman kuiva-ainepitoisuuden kattiloissa. Kuitenkin suurimmat pesärasitukset esiintyvät uusimmissa korkeiden kuiva-aineiden (> 77 %) kattiloissa.



Kuva 22. Kattiloiden pohjakuormat lipeän kuiva-ainepitoisuuden funktiona.

4.5 Likaantumisongelmat

Viidellä soodakattilalla (A, B, E, H, M) lämpöpintojen likaantuminen on käyttöhenkilöstön mukaan säännöllinen ongelma. Monissa tapauksissa likaantuminen johtaa tukkeutumiseen ja suunnittelemattomiin käyttökeskeytyksiin soodakattiloilla. Tukkeutuminen on usein seurauksena kun kattilaa käytetään pitkään suurella kuormituksella.

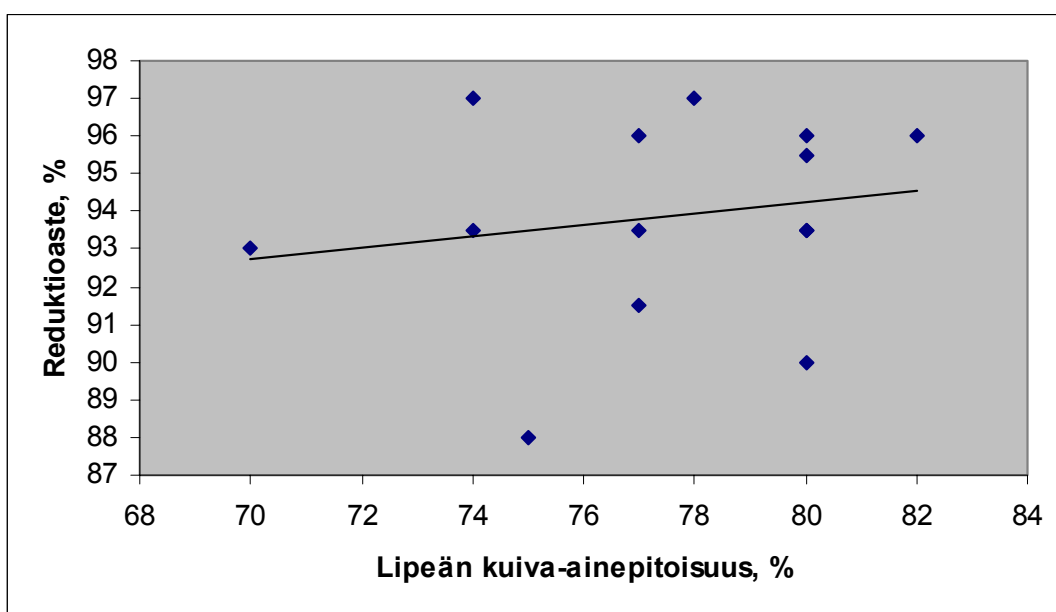
Likaantumisongelmista kärsivät kattilat (lukuunottamatta E:tä) ovat kapasiteetiltaan pieniä tai keskisuuria ja useimmiten niiden polttokapasiteetti on tehtaan tuotannon pullonkaula. Tästä johtuen kattilat ovat yleensä jatkuvasti suuresti kuormitettuja. Pohjakuorma kattiloissa B ja M on normaalisti yli 18 tka/m²d ja muissa luokkaa 14-16 tka/m²d, eli sen puolesta kattilat eivät ole erityisen suuresti rasitettuja. Kattilat A, B ja M ovat suhteellisen matalia, mikä edesauttaa likaantumista suurilla kuormituksilla. Muita syitä likaantumisongelmille voivat olla esimerkiksi suuri carryoverin määrä, korkeat K- ja Cl-pitoisuudet lentotuhkassa, riittämätön nuohous ja korkea SO₂-pitoisuus savukaasuissa (korkea sulfiditeetti).

Likaantumisongelmien tarkempaa tutkiskelua varten täytyisi kattiloita tarkastella yksilöllisesti, mihin tämän tutkimuksen puitteissa ei ole mahdollisuutta. Tarvittaisiin myös lisätietoa mm. polttoliipeän ja lentotuhkan koostumuksista sekä savukaasujen lämpötiloista tulipesässä.

4.6 Reduktioasteet

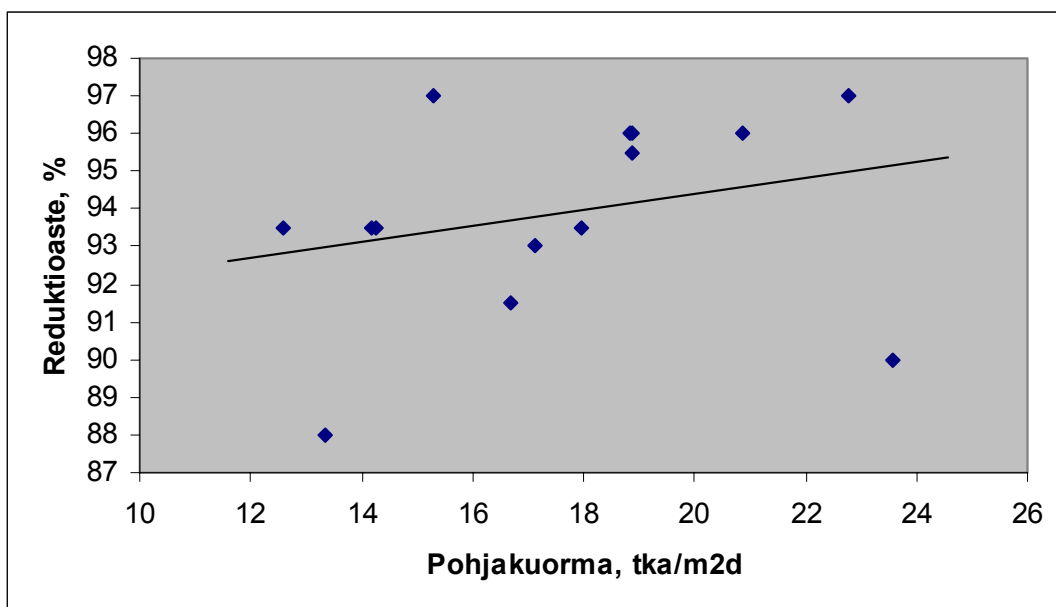
Kemikaalien talteenoton tehokkuutta kuvaavat reduktioasteet ovat kohdekattiloissa välillä 88 - 97 % keskiarvon ollessa 94 %. Reduktioaste määritetään useimmissa tapauksissa viherlipeästä natriumsulfidin ja -sulfaatin suhteena. Reduktioasteissa ei ole huomioitu mahdollisia kemikaalilisäyksiä ennen määrittelyn tekemistä.

Reduktioasteet lipeän kuiva-ainepitoisuuden funktiona on esitetty kuvassa 23. Korkealla kuiva-ainepitoisuudella keon lämpötila saadaan helposti korkeaksi, jolloin sulfaatin pelkistyminen tehostuu. Reduktioaste ei kuitenkaan tässä 14 kattilan otoksessa näytä olevan selkeästi riippuvainen mustalipeän kuiva-ainepitoisuudesta, vaikkakin hienosta nousua on kuvasta havaittavissa. Muut reduktioasteeseen vaikuttavat tekijät, kuten palamisilman jako ja lipeän sulfiditeetti aiheuttavat hajontaa. Kattiloissa C ja N reduktioasteet (90 % ja 88 %) ovat selkeästi kattiloiden keskiarvoa alhaisemmat, vaikka lipeän kuiva-ainepitoisuus on molemmissa korkea.



Kuva 23. Reduktioasteet lipeän kuiva-ainepitoisuuden funktiona.

Kuvassa 24 on esitetty kattiloiden keskimääräiset reduktioasteet pohjakuorman (normaalikuorma) funktiona. Kuvasta on havaittavissa reduktioasteen hienoinen nousu pohjakuorman kasvaessa. Alhaisen reduktioasteen kattilat C ja N ovat pohjakuormiltaan aivan erilaiset. Toisessa pohjakuorma on kaikista kattiloista korkein ja toisessa lähes alhaisin.



Kuva 24. Reduktioasteet pohjakuorman funktiona.

4.7 Päästöt

Kattiloiden toiminnan tarkastelu päästöjen osalta on ongelmallista, koska niihin vaikuttavat monet tekijät. Paras keino lienee tarkastella tasaisen ajotilanteen päästöarvoja, koska häiriötilanteiden sekä ylös- ja alasajojen osuus päästöistä voi olla merkittävä pidemmällä aikavälillä. Tasaisen ajotilanteen määrittely on myöskin vaikeaa, koska kattilan kuormitustaso, lipeän koostumus sekä hajukaasujen ja muiden ”vieraiden” aineiden poltto vaikuttavat päästöihin. Päästöjen tarkastelussa päähuomio on rikkidioksidissa ja typen oksideissa.

Taulukossa 6 on esitetty soodakattiloiden tyypilliset päästöt (savupiipusta) normaalissa ajotilanteessa. Taulukossa on vertailun vuoksi myös uuden, vasta rakenteilla olevan soodakattilan X valmistajan takaamat päästöarvot. Referenssikattilassa alhaiset päästöt (etenkin NO_x) ovat olleet yhtenä tärkeänä suunnittelukriteerinä. Kattila on varustettu mm. pitkälle kehittyneellä palamisilmojen vaiheistuksella ja kaksitasoisella lipeän ruiskutuksella /19/. Taulukossa on myös BAT:n (Best Available Techniques) mukainen parhaimman nykytekniikan avulla saavutettavissa oleva päästötaso /26/.

Taulukko 6. Kattiloiden tyypilliset savukaasupäästöt.

Kattila	SO ₂ [mg/m ³ n]	NO _x ⁽¹⁾ [mg/m ³ n]	Pöly [mg/m ³ n]	TRS [mg/m ³ n]
A	7	-	-	-
B	7	-	-	-
C	2	180	10	10
D	3	160	-	0
E	2	170	-	0
F	2	180	20	2
G	5	210	-	-
H	5	200	-	3
I	0	200	100	0
J	5	170	30	1
K	0	220	20	-
L	0	-	130	2
M	2	230	30	3
N	0	160	10	0
X ⁽²⁾	<10 ⁽³⁾	<150	<30	<3
BAT	10-20	80-120 ⁽⁴⁾	30-50	0-10
1) NO ₂ -na, kuiva savukaasu, 3% O ₂ -pitoisuus 2) valmistajan takuu, kuiva savukaasu, 3% O ₂ -pitoisuus 3) lipeän S/Na ₂ moolisuhde max 35% 4) ilman sek. menetelmiä, kuten SNCR:ää				

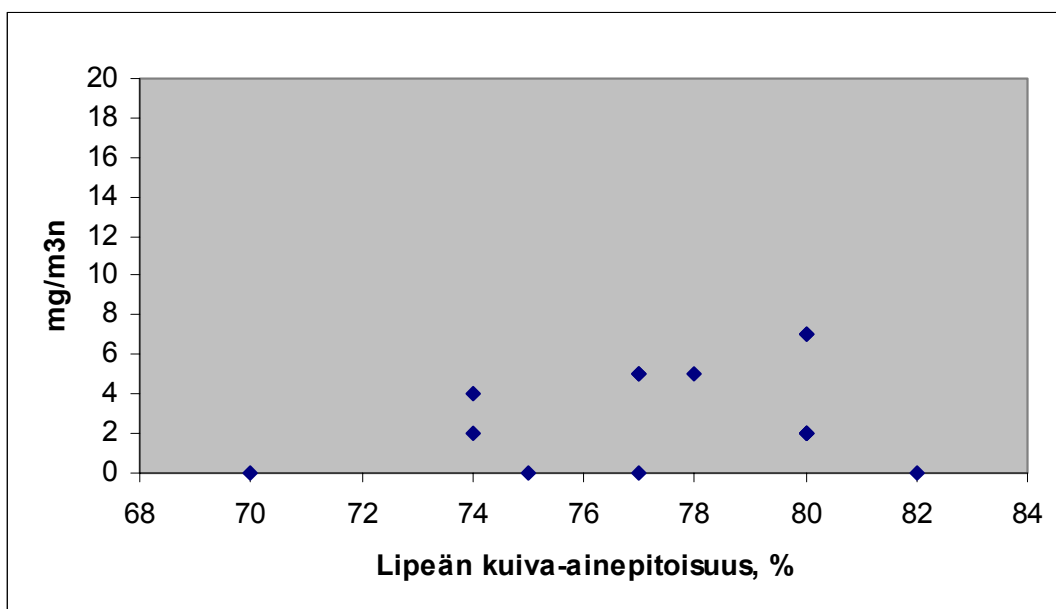
Nykyisille soodakattiloille asetetaan päästöraajat yleensä vain rikin ja pölyn suhteen. Tulevaisuudessa ehkä myös typenoksidipäästöille asetetaan rajat uusissa soodakattiloissa. Yleensä soodakattilan savukaasuista mitataan jatkuvatoimisesti vain SO₂, TRS (H₂S) ja CO-pitoisuuksia, koska niiden päästöt kertovat paljon tulipesän olosuhteista ja palamisprosessin onnistumisesta. Yleisen huomion kääntyessä typenoksidipäästöjen vähentämiseen, ovat myös NO_x-mittaukset yleistymässä soodakattiloilla.

4.7.1 SO₂

Tarkasteltujen soodakattiloiden rikkidioksidipäästöt ovat normaalissa ajotilanteessa hyvin lähellä nollaa. Korkea lämpötila keon alueella ja riittävän alhainen lipeän sulfiditeetti ovat edellytyksiä pienelle SO₂-päästölle. Korkealla lipeän kuiva-ainepitoisuudella on helppoa saada tulipesän alaosaan korkea lämpötila, jolloin rikin vapautuminen kaasutilaan on vähäistä. Hieman alhaisemmalla kuiva-ainepitoisuudella pieni rikkidioksidipäästö saavutetaan tasaisella kuormituksella sekä hyvin optimoidulla lipeän ruiskutuksella ja ilmajaolla, jos lipeän sulfiditeetti pysyy riittävän alhaisena.

Uusimmissa kattiloissa F ja J ei ole lainkaan savukaasupesuria, mutta silti niiden SO₂-päästöt ovat yhtä alhaisella tasolla kuin muissa, pesurillisissa kattiloissa. Kaikkien soodakattiloiden SO₂-päästö on normaalisti niin alhainen, ettei minkään tietyn tekijän vaikutusta siihen pystytä havaitsemaan. Alhaisten pitoisuuksien vuoksi jatkuvatoimisen SO₂-mittauksen antama lukemaa ei välttämättä ole kovin tarkka, mikä myös osaltaan hankaloittaa tarkastelua.

Kuvassa 25 on esitetty kattiloiden tyypilliset SO₂-päästöt normaalista ajotilanteesta lipeän kuiva-ainepitoisuuden funktiona. Kuvasta ei voi nähdä, että tässä 14 kattilan otoksessa kuiva-ainepitoisuus vaikuttaisi SO₂-päästöihin mitenkään. Voikin sanoa, että kaikkien kattiloiden rikkidioksidipäästöt ovat hyvässä, tasaisessa ajotilanteessa alle 10 mg/m³n.



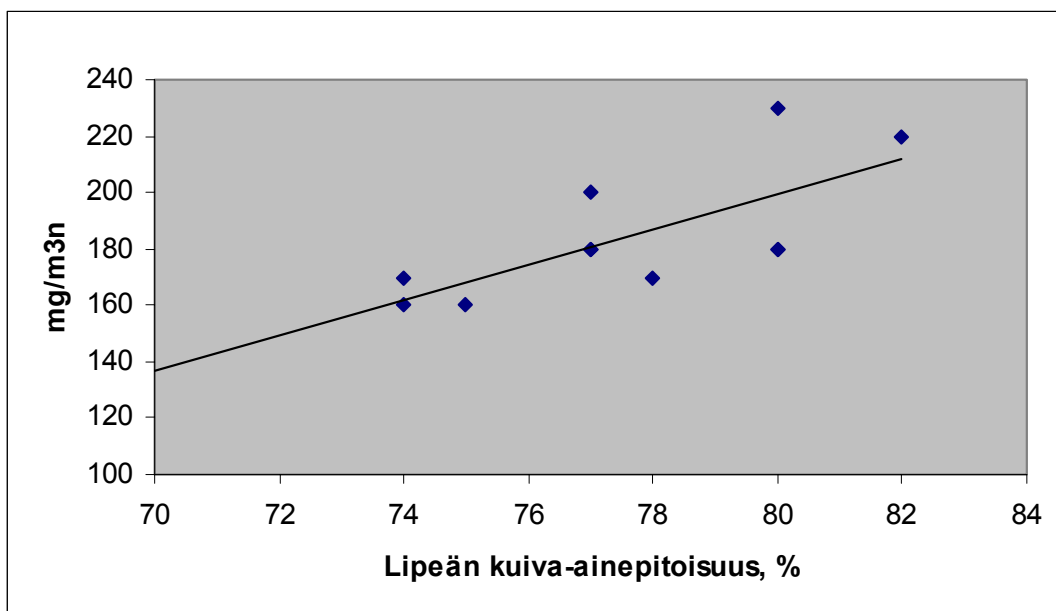
Kuva 25. Kattiloiden normaalit SO₂-päästöt lipeän kuiva-ainepitoisuuden funktiona.

4.7.2 NO_x

Soodakattiloiden NO_x-päästöt ovat luonnostaan alhaiset moniin muihin höyrykattiloihin verrattuna. Soodakattilassa typenoksidipäästöjen lähde on mustalipeän typpi, josta pääosa on peräisin raaka-ainepuusta. Mustalipeän kuiva-aineen typpipitoisuus, 0,05-0,20 p-%, on alhaisempi kuin useimmissa muissa polttoaineissa. Termisen NO_x:n muodostuminen soodakattilassa on alhaisen tulipesän lämpötilan vuoksi hyvin vähäistä.

Kohdekattiloiden NO_x -päästöt ovat normaalissa ajotilanteessa 160-230 $\text{mg/m}^3\text{n}$ (NO_2 :na). NO_x -päästöt lipeän kuiva-ainepitoisuuden funktiona on esitetty kuvassa 26. Kuvan perusteella NO_x -päästö näyttää kasvavan lipeän kuiva-ainepitoisuuden kasvaessa. Mustalipeän typpipitoisuus vaikuttaa suoraan soodakattilan NO_x -päästöihin, mutta sen vaikutusta ei kuitenkaan tässä tarkastella osin puutteellisten ja vanhojen lipeäanalyyysien vuoksi.

Polttotekniset NO_x -päästöjen vähentämiskeinot vaikuttavat usein muita päästöjä lisäävästi. Esimerkiksi tulipesän alaosan lämpötilalla on ristikkäinen vaikutus savukaasujen NO_x - ja SO_2 -pitoisuuksiin. Lämpötilan lasku vähentää NO_x -päästöjä, mutta lisää SO_2 -päästöjä. Yli-ilmamäärän minimointi puolestaan saattaa lisätä CO- ja TRS-päästöjä. Tämän vuoksi soodakattilan ”vähäpäästöinen” ajotapa on usein kompromissi NO_x :n ja muiden päästöjen välillä. Kohdekattiloissa NO_x :n ja SO_2 :n ristikkäisvaikutusta ei pystytä havaitsemaan. Tarkasteltavia kattiloita täytyisi olla enemmän ja pitoisuuksia tulisi tarkastella esimerkiksi ekonomaiserien jälkeisistä savukaasuista pidemmän aikavälin keskiarvona, jotta tällainen vaikutus voitaisiin havaita.



Kuva 26. Kattiloiden NO_x -päästöt lipeän kuiva-ainepitoisuuden funktiona.

Kahdessa kattilassa (C ja F) on tertiäri-ilman syöttö jaettu pystysuunnassa useampaan vaiheeseen, minkä yhtenä tavoitteena on vähentää NO_x :n muodostumista.

Näissä molemmissa kattiloissa lipeän kuiva-ainepitoisuus on 80 % ja NO_x-päästö noin 180 mg/m³n.

Palamisilmojen vaiheistuksella ja jäännöshapen minimoinnilla on mahdollista saavuttaa NO_x-päästöissä 80-120 mg/m³n taso, eli noin 50 %:n vähennys kohdekattiloihin verrattuna. Ilmojen vaiheistuksella ja sekundääristen menetelmien (SNCR) käytöllä voidaan päästä noin 55 mg/m³n tasolle. SNCR:n käyttö tosin lisää jonkin verran ammoniakkin (NH₃) päästöä kattilasta./26/

4.7.3 Pöly

Soodakattiloiden pölypäästöt ovat suurimmaksi osaksi riippuvaisia sähkösuodattimen ja savukaasupesurin toiminnasta. Kattiloissa, joista tietoa oli saatavilla, pölypäästö oli 10 - 130 mg/m³n. Uusilta soodakattiloilta vaaditaan yleensä alle 100 mg/m³n pölypäästö, mikä voidaan saavuttaa oikein mitoitettulla sähkösuodattimella.

Varsinaisen polttotekniikan vaikutus pölypäästöihin on melko pieni. Tulipesän lämpötilan nousu lisää natriumin vapautumista ja siten pölyn määrää savukaasuissa. Carryoverin määrä ei välttämättä näy pölypäästöissä juuri ollenkaan, koska se on melko suurijakeista ja siten erottuu savukaasuista hyvin viimeistään sähkösuodattimessa.

4.7.4 TRS

Pelkistyneiden rikkiyhdisteiden päästöt tarkastelluista soodakattiloista ovat hyvin lähellä nollaa. Niiden päästöt ovat vähentyneet viime vuosikymmeninä lähinnä parantuneen palamisen hallinnan ja hajukaasujen käsittelyn kehittymisen seurauksena. Joillain kattiloilla säiliöhönkiä ohjataan edelleen savukaasupesurin kautta savupiippuun. Tällöin TRS-päästöt voivat hieman kohota, mutta pysyvät kuitenkin kohtuullisen alhaisina.

Korkeammat lämpötilat tulipesän alaosassa vähentävät TRS:n vapautumista savukaasuihin. Tertiääri-ilman hyvä sekoittuvuus merkitsee vapautuneiden TRS-yhdisteiden lähes täydellistä hapettumista SO₂:ksi, joka sitten reagoi natriumsulfaatiksi kattilan yläosissa. Samoin tapahtuu hajukaasujen mukana tulevalle TRS:lle.

5. LIPEÄN POLTTOMENETELMÄT

5.1 Lipeän ruiskutus

Tutkimuksen kohteena olleet soodakattilat ovat eri kokoisia, eri ikäisiä, eri valmistajien toimittamia ja niissä poltetaan ominaisuuksiltaan erilaisia lipeitä. Luonnollisesti tästä seuraa, että lipeän ruiskutuksessa käytettävät laitteet ja ruiskutusparametrit ovat kullekin kattilalle ominaisia. Ruiskutuksen pääperiaate ja tavoitteet ovat kuitenkin samat kaikissa tapauksissa. Lipeä pyritään syöttämään oikean kokoisina pisaroina mahdollisimman tasaisesti koko pohjan alalle. Seinille lentävän ja siellä palavan lipeän määrä pyritään minimoimaan.

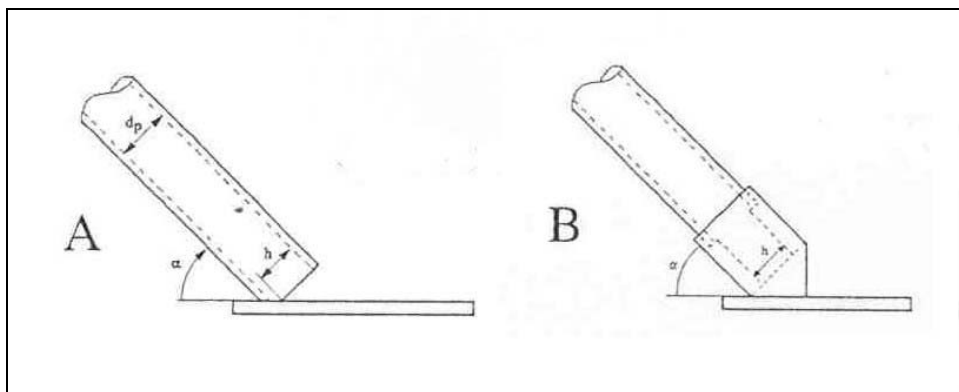
5.1.1 Ruiskut

Kaikissa kattiloissa käytetään lusikkasuuttimia lipeän ruiskutukseen. Ruiskuja on kattilasta riippuen käytössä 4-12 kappaletta ja ne ovat liikkumattomiksi asennettuja. Kattiloiden käyttämät ruiskut ja niiden mitat on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Kattiloiden lipeäruiskut.

Kattila	Lipeäruiskujen korkeus pohjasta [m]	Ruiskujen tyyppi	d_p/h [mm]	Lusikan kulma [°]
A	8,2	B	32/32	35
B	7,6	B	34/34	35
C	6,5	A	38/29	25
D	6,0	A	22/18	25
E	8,6	B	28/28	37
F	6,7	A	34/26	25
G	6,2	B	16/16	25
H	8,5	B	20/20	45
I	6,2	A	28/22	30
J	9,0	B	32/32	37
K	8,6	B	34/34	35
L	6,0	A	24/18	30
M	6,0	A	32/24	30
N	6,0	A	18/14	25

Eri kattilavalmistajat käyttävät hieman erilaisia ruiskuja kattiloissaan. Käytännössä lusikkasuuttimet voidaan jakaa lusikan kiinnitystavan perusteella kahteen tyyppiin. Toisessa (tyyppi A) lusikka leikkaa osan suutinputken aukosta eli kuristaa lipeän virtausta. Toisessa (tyyppi B) lusikka on kiinnitetty erityiseen kaulusosaan erilleen putkesta. Nämä kaksi ruiskutyyppiä on esitetty kuvassa 27.

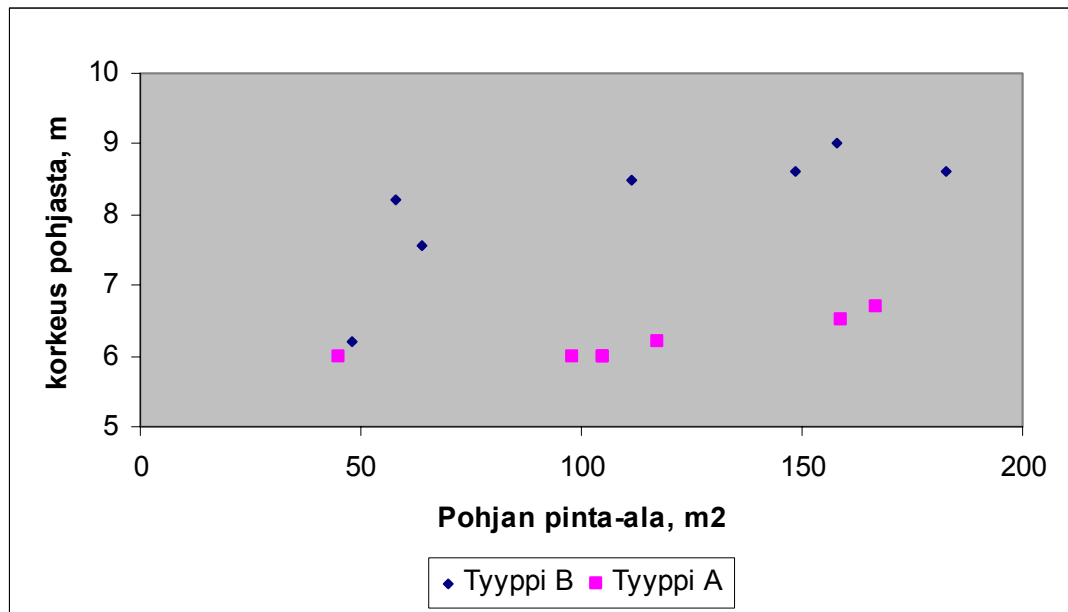


Kuva 27. Kaksi erilaista lusikkasuutinta.

Lusikan ja suutinputken välinen kulma on useimmiten samansuuruinen saman valmistajan kattiloissa. Tyypissä A kulma on 25-30 astetta, kun tyypissä B se on suurempi, noin 37 astetta. Useimmiten kattilan valmistaja toimittaa myös lipeäruiskut tehtaille, mutta joissain tapauksissa ruiskut valmistetaan tehtaan omalla verstaalla. Tämä voi aiheuttaa pientä vaihtelua samantyyppisten ruiskujen geometriaan ja lusikan kiinnitykseen.

Lusikan kulma vaikuttaa lipeäsuihkun muodostumiseen periaatteessa siten, että pienellä kulmalla syntyy avautumiskulmaltaan kapea suihku ja suurella kulmalla leveä. Todellisuudessa avautumiskulma riippuu monesta muustakin tekijästä, mm. ruiskutuspainesta ja lipeän ominaisuuksista. Yleensä A tyypin ruiskussa avautumiskulma on pienempi, noin 90° ja B tyypissä suurempi, yli 180° .

Ruiskujen korkeus tulipesän pohjasta on välillä 6-9 metriä. Korkeus on kattilan suunnitteluvaiheessa asetettu kiinteäksi, eikä sitä voi juurikaan muuttaa ilman suuria rakenteellisia muutoksia. Ruiskujen korkeudessa on selvä ero kattilavalmistajien välillä. Taulukosta 7 ja kuvasta 28 on nähtävissä, että kuristettua lusikkasuutinta käyttävän valmistajan kattiloissa ruiskut sijaitsevat alempana kuin kuristamatonta suutinta käyttävissä kattiloissa. Isommissa kattiloissa ruiskut on sijoitettu hieman korkeammalle kuin pienemmissä. Kattiloissa G ja H, jotka ovat muista poiketen vinopohjaisia, myös ruiskujen geometria ja korkeus pohjasta on hieman poikkeava.



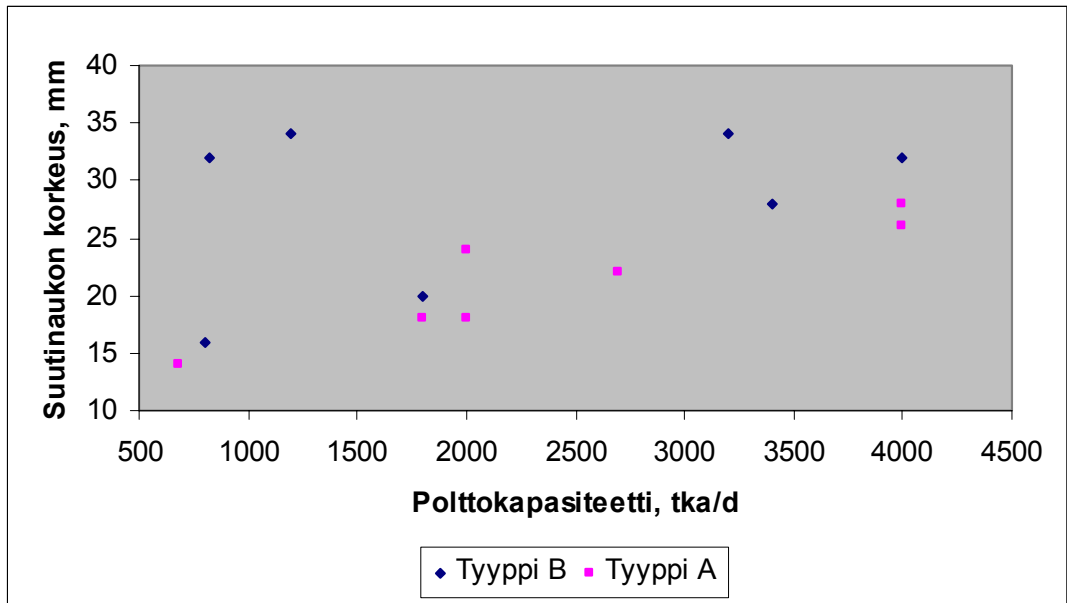
Kuva 28. Ruiskujen korkeus pohjasta kattilan koon funktiona.

Pisarakoko on luonnollisesti tärkeä ruiskukoon valintaan vaikuttava tekijä. Ruiskukoon kasvaessa myös pisarakoko kasvaa, jos lipeän massavirta pysyy vakiona. Ruiskujen koon ja lukumäärän valintaan vaikuttaa myös kattilan koko ja kuormitus sekä lipeän ominaisuudet.

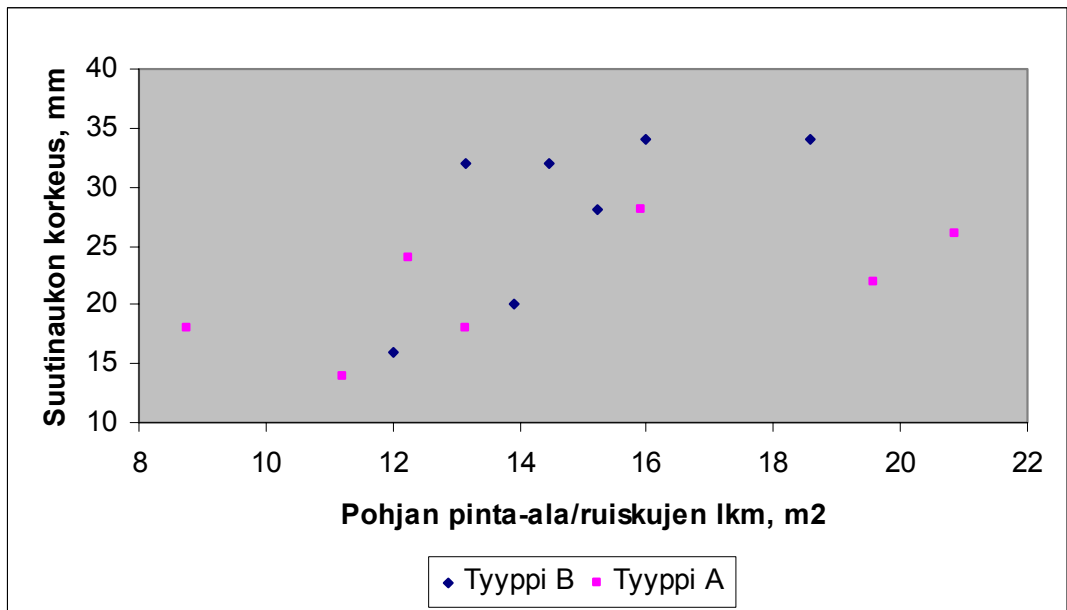
Lipeäruiskujen suutinputken halkaisijat ovat kohdekattiloissa välillä 16 - 38 mm. Suuremmissa kattiloissa myös ruiskut ovat yleisesti ottaen suurempia kuin pienemmissä kattiloissa. Tämä näkyy kuvassa 29, jossa ruiskukoot on esitetty kattiloiden polttokapasiteetin funktiona. Polttokapasiteetin kasvaessa myös ruiskukoko kasvaa, koska ruiskujen lukumäärää ei välttämättä voi, eikä kannata kasvattaa. Kuristetun lusikkasuuttimen kokona on käytetty suutinaukon vapaata korkeutta, mikä on noin neljäsosan pienempi kuin suutinputken sisähalkaisija. Kattiloissa A ja B ruiskut ovat huomattavan suuria (32 ja 34 mm) kattiloiden pieniin polttokapasiteetteihin (820 ja 1200 tka/d) nähden, mutta luonnollisesti ruiskuja on käytössä lukumääräisesti vähän.

Kuvassa 30 on esitetty lipeäruiskujen koot yhtä ruiskua kohti lasketun pohjan pinta-alan funktiona. Pienissä kattiloissa (< 1500 tka/d) ruiskuja on yleensä käytössä maksimissaan 4 kappaletta. Suuremmissa kattiloissa ruiskuja on käytössä enemmän, 6-12 kappaletta. Kattiloiden pohjan pinta-ala ruiskua kohden vaihtelee

maksimikuormituksella välillä 10-20 m². Ruiskukoko on sitä suurempi, mitä suurempi ala sillä on katettava.

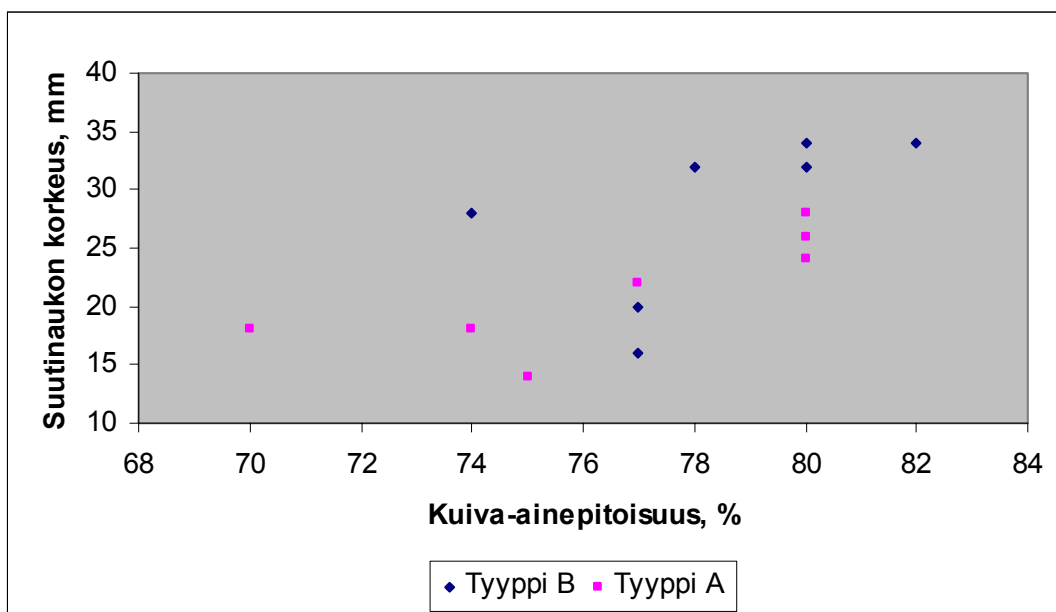


Kuva 29. Ruiskukoko kattilan kapasiteetin funktiona.



Kuva 30. Ruiskukoko yhtä ruiskua kohti olevan pohjan alan funktiona.

Ruiskukoot lipeän kuiva-ainepitoisuuden funktiona on esitetty kuvassa 31. Ruiskukoko näyttää kasvavan lipeän kuiva-ainepitoisuuden kasvaessa, mikä saattaa tarkoittaa pyrkimystä suurempaan pisarakokoon korkeilla kuiva-ainepitoisuuksilla.



Kuva 31. Ruiskukoko lipeän kuiva-ainepitoisuuden funktiona.

5.1.2 Ruiskutusparametrit

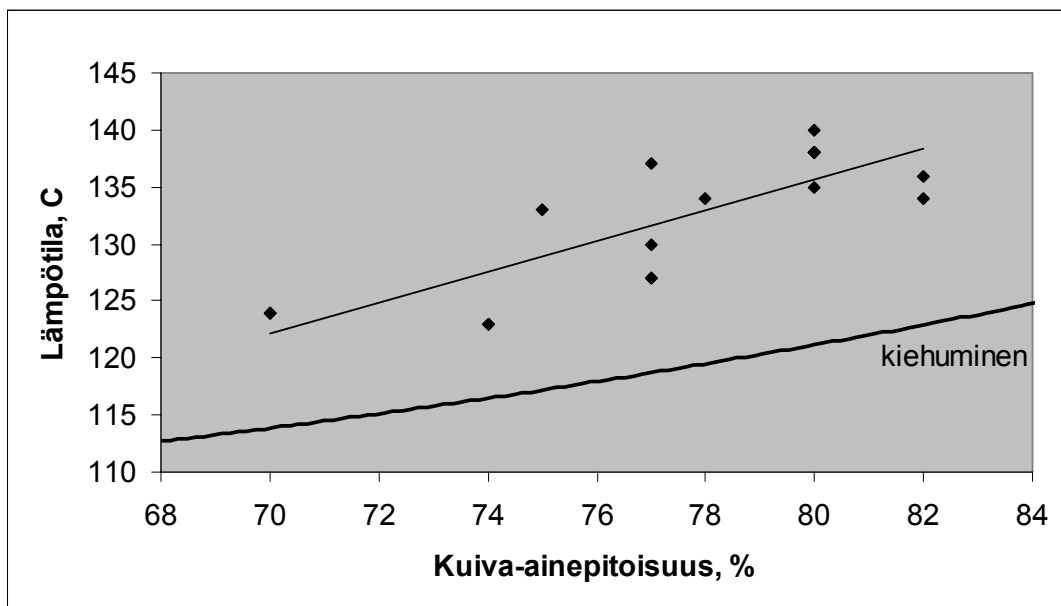
Kattiloissa poltettavat lipeät ja niiden ruiskutusparametrit on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Lipeän ruiskutusparametrit. Alaindeksit kattilakoodeissa viittaavat erilaisiin lipeisiin.

Kattila	Lipeä	kuiva- aine %	Ruiskutus paine [bar]	Ruiskutus lämpötila [°C]	Ero kieh. pisteeseen [°C]
A	Havu	80	2	138	17
B	Havu	80	1,8	138	17
C	Seka	80	1,4	138	17
D	Seka	74	1,2	123	7
E	Seka	74	1,2	123	7
F	Havu	80	1,5	138	17
G	Seka	77	1,3	127	8
H	Seka	77	1,2	127	8
I ₁	Havu	77	1,6	137	18
I ₂	Koivu	77	1,6	130	11
J	Havu	78	1,2	134	14
K ₁	Havu	82	1,7	136	13
K ₂	Seka	82	1,1	134	11
L ₁	Havu	70	1,5	124	10
L ₂	Koivu	70	1,5	124	10
M ₁	Havu	80	1,8	140	19
M ₂	Koivu	80	1,8	135	14
N	Havu	75	1,4	133	16

Sopiva ruiskutuslämpötila-alue tietylle lipeälle ja ruiskulle on melko kapea. Määräävänä tekijänä on lipeän viskositeetti, joka riippuu voimakkaasti kuiva-

ainepitoisuudesta ja lämpötilasta. Lipeän pumppauksen ja pisaroitumisen mahdollistamiseksi on viskositeetti saatava riittävän alhaiseksi. Tämän vuoksi ruiskutuslämpötilat nousevat lipeän kuiva-ainepitoisuuden mukana, kuten kuvasta 32 ilmenee. Samantyyppisillä lipeillä, samoissa kuiva-ainepitoisuuksissa ruiskutuslämpötiloissa ei ole suuria eroja.



Kuva 32. Ruiskutuslämpötilat ja kiehumispisteen nousu kuiva-ainepitoisuuden funktiona.

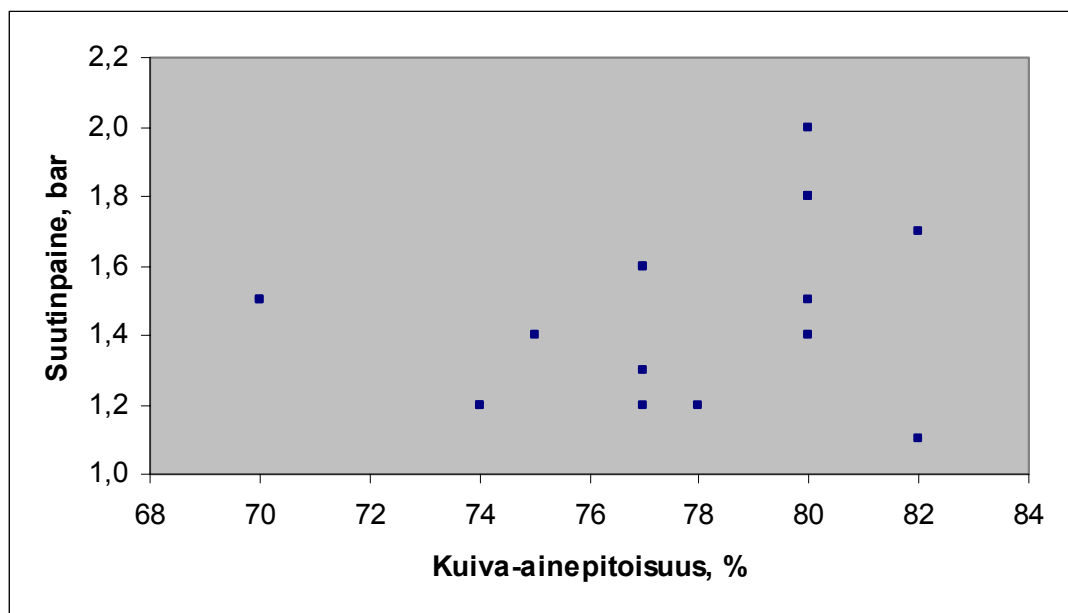
Ruiskutuslämpötilan ero kiehumispisteeseen kuvastaa lipeäsuihkun kiehumistaipumusta suuttimessa. Noin 5-8 °C yli kiehumispisteen olevissa lämpötiloissa alkaa kiehuminen vaikuttaa pisaroitumiseen huomattavasti. Mitä suurempi on ruiskutuslämpötilan ero kiehumispisteeseen, sitä voimakkaampaa on kiehuminen ja sitä pienempiä ovat muodostuneet pisarat. Pisarakokoja kattiloissa ei tässä ole arvioitu, koska tulosten tarkkuus olisi todennäköisesti huono puutteellisista lähtötiedoista johtuen.

Lipeiden kiehumispisteet on arvioitu kuvassa 10 esitetystä kiehumispisteen nousukäyrästä. Ruiskutuslämpötilat kohdekattiloissa ovat 7-19 astetta lipeiden kiehumispisteitä korkeampia, joten kiehuminen on merkittävä pisaroitumiseen vaikuttava tekijä kaikissa kattiloissa.

Jos ruiskutuslämpötila on alempi kuin lipeän kiehumispiste, ruiskutuspaineen lasku suurentaa pisarakokoa. Paineen nousu vastaavasti pienentää pisarakokoa. Ruiskutuslämpötilan ollessa kiehumispistettä korkeampi, ruiskutuspaineen vaikutus

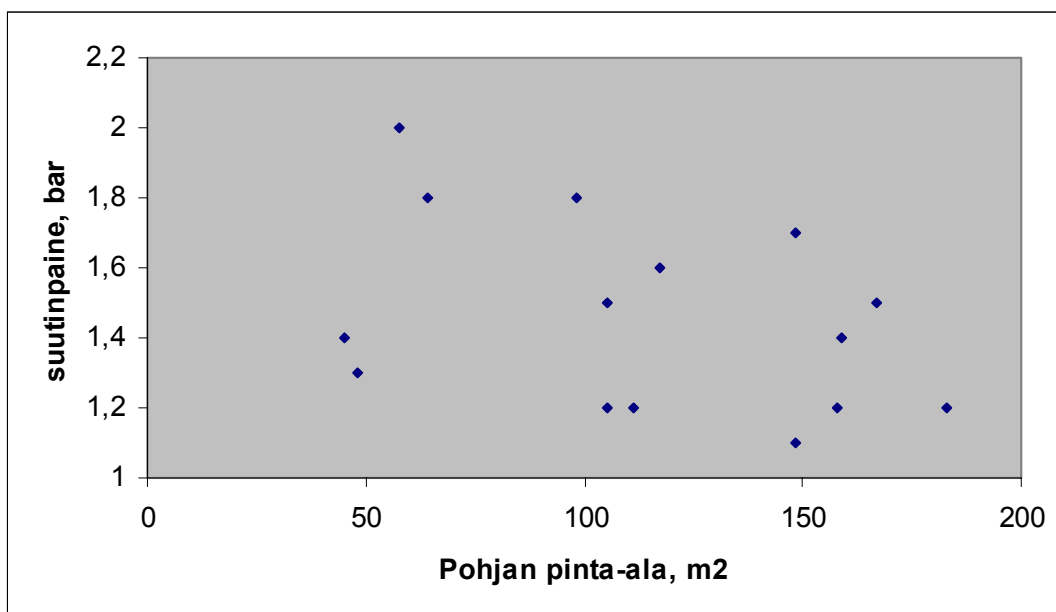
pisarakokoon ei ole yhtä selkeää, koska kiehuminen muuttaa ruiskutuksen luonnetta huomattavasti. On kuitenkin todettu paineen noston vähentävän kiehumista ja samalla lämpötilan muutosten vaikutusta pisarakokoon./22/

Ruiskutuspainet luonnollisesti vaihtelevat lipeän virtauksen muuttuessa, joten taulukon 8 arvot ovat kattiloissa normaalisti esiintyviä maksimipaineita. Ruiskutuspainet kattiloissa ovat välillä 1,1-2,0 bar ja ne on esitetty lipeän kuiva-ainepitoisuuden funktiona kuvassa 33. Kuiva-ainepitoisuudella ei ole yhtä selvää vaikutusta ruiskutuspaineseen kuin sillä on ruiskutuslämpötilaan. Teoriassa korkeampi kuiva-ainepitoisuus, ja siten korkeampi ruiskutuslämpötila merkitsee myös korkeampaa ruiskutuspainetta. Tämä siksi, ettei voimakasta kiehumista tapahtuisi putkistoissa ennen lipeäsuuttimia. Samoissa kuiva-ainepitoisuuksissa ruiskutuspainessa on suuriakin eroja kattiloiden välillä.



Kuva 33. Ruiskutuspainet kuiva-ainepitoisuuden funktiona.

Ruiskutuspainet kattilan koon funktiona on esitetty kuvassa 34. Paineet näyttävät olevan hyvin yksilöllisiä, eikä kattilakoolla ole selvää vaikutusta niihin. Suurissa kattiloissa ruiskutuspainet näyttää kuitenkin usein olevan alhainen.



Kuva 34. Ruiskutuspaineet kattilan koon funktiona.

5.2 Palamisilman syöttö

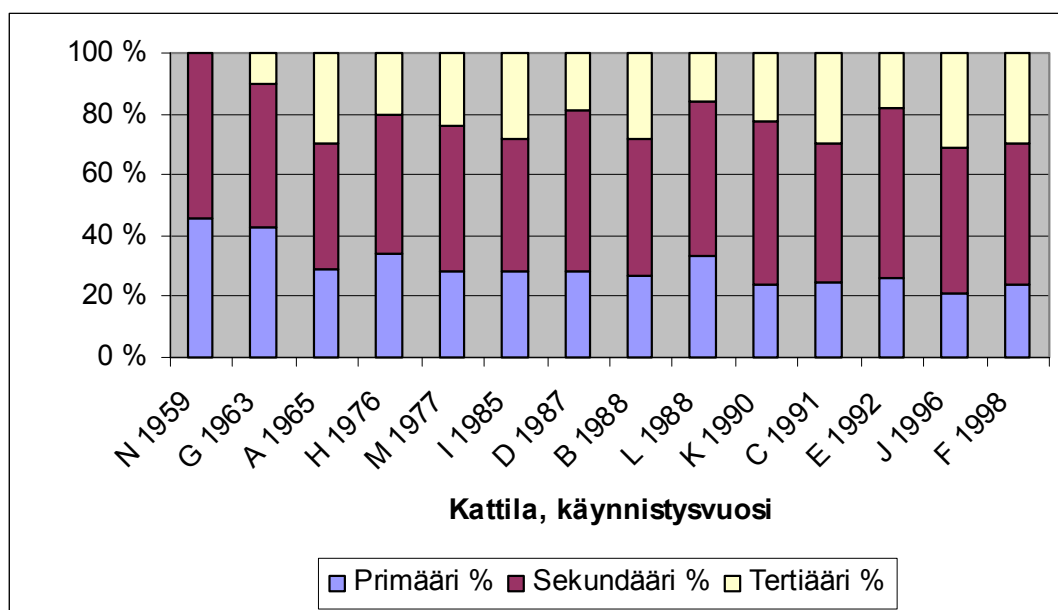
Kuten lipeän ruiskutuksessa, myös palamisilman syöttötavoissa on eroja kattiloiden välillä. Ennen 1990-lukua rakennetuissa soodakattiloissa on yleensä kolmitasoinen ilmajärjestelmä. Uudemmissa kattiloissa C, E, F, J, ja K, sekä vanhemmissa kattiloissa A ja I sekundääri-ilma syötetään tulipesään kahdessa tai useammassa vaiheessa. Kattiloissa C ja F myös tertiääri-ilman syöttö on jaettu useampaan vaiheeseen. Varsinaista kvartiääri-ilmatasoa ei ole missään tarkastellussa kattilassa.

Sekundääri- ja tertiääri-ilma-aukkojen sijoittelussa on jonkin verran eroavaisuuksia riippuen lähinnä kattilan valmistajasta ja valmistusajankohdasta. Sekundääri-ilma voidaan syöttää kaikilta neljältä seinältä tai vain kahdelta vastakkaiselta seinältä. Tertiääri-ilma syötetään kaikissa kattiloissa kahdelta vastakkaiselta seinältä lukuunottamatta kattilaa N, jossa tertiääri-ilma-aukot sijaitsevat kattilan nurkissa. Tällaisessa ratkaisussa ilma syötetään tangentiaalisesti tulipesän keskellä olevan kuvitteellisen ympyrän kehälle, jolloin savukaasuihin muodostuu voimakas pyörre.

5.2.1 Ilmanjako

Soodakattiloiden ilmanjakomallit maksimikuormalla kattiloiden ikäjärjestyksessä on esitetty kuvassa 35. Sekundääri-ilmaksi on luettu primääri-ilmatason ja lipeän ruiskutustason väliset ilmansyötöt. Tertiääri-ilmaksi on luettu kaikki ruiskutustason

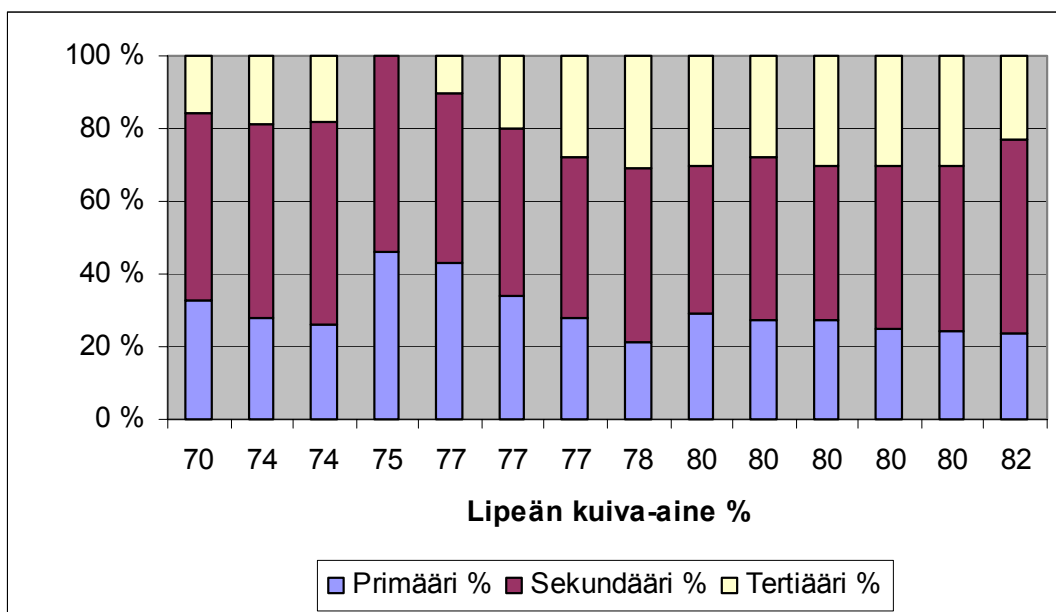
yläpuoliset ilmat. Ilmamalleissa on eroja varsinkin primääri- ja tertiääri-ilmojen osalta.



Kuva 35. Kattiloiden ilmajaot ikäjärjestyksessä.

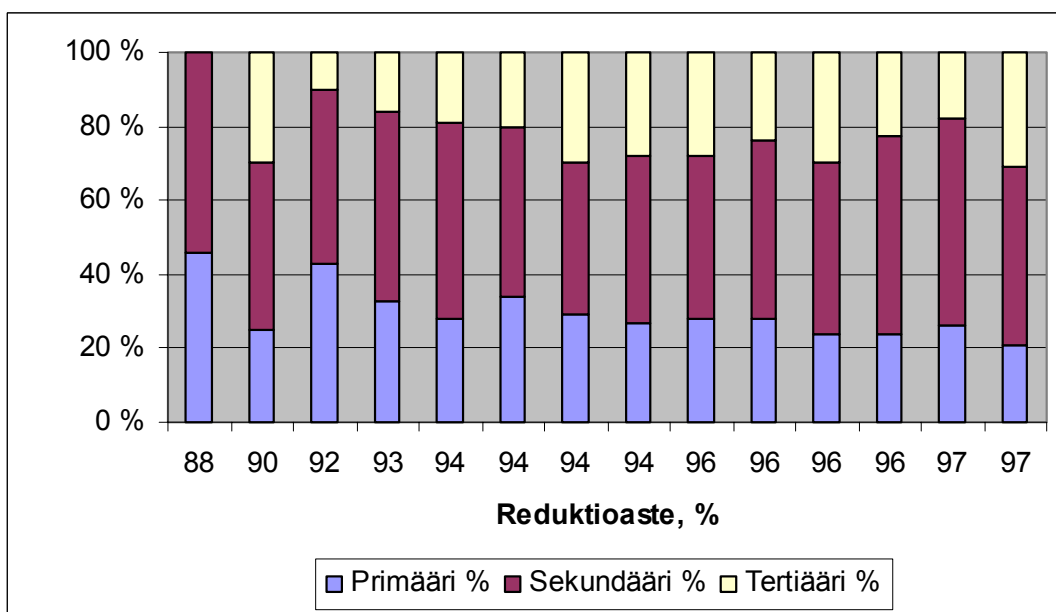
Kattilassa N poltetaan lipeän ohella myös maakaasua suurin osa ajasta. Kaasu syötetään tulipesään tertiääri-ilma-aukoista yhdessä palamisilman kanssa, minkä vuoksi kattilasta N on huomioitu vain primääri- ja sekundääri-ilmojen osuudet. Vinopohjaisissa kattiloissa G ja H primääri-ilman osuus on huomattavan suuri verrattuna muihin, suorapohjaisiin kattiloihin. Primääri-ilman minimointi on yksi ilmajärjestelmän suunnittelun pääperiaate. Uusimmissa kattiloissa sen osuus on 20-25 %, vanhemmissa yleisesti hieman korkeampi. Lipeän kuiva-ainepitoisuuden nousu osin selittää primääri-ilman osuuden laskevan trendin kuvassa 35.

Kuvassa 36 kattiloiden ilmajaot on esitetty mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden mukaisessa järjestyksessä. Samanlaisten kuiva-ainepitoisuuksien kattiloissa ei ilmamalleissa ole suuria eroja. Korkealla kuiva-ainepitoisuudella keon alueen lämpötila saadaan korkeaksi jo alhaisella primääri-ilman määrällä. Kattilassa L korkea primääri-ilman osuus johtune juuri alhaisimmasta kuiva-ainepitoisuudesta (70 %). Tertiääri-ilman osuus vastaavasti kasvaa kuiva-ainepitoisuuden noustessa. Sekundääri-ilman osuus on 45-55 %:n välillä kaikissa kattiloissa.



Kuva 36. Kattiloiden ilmajaot lipeän kuiva-aineen funktiona.

Alhainen primääri-ilman osuus on luonnollisesti eduksi keon alueen pelkistävien olosuhteiden ja siten hyvän reduktioasteen kannalta. Kuvassa 37 kattiloiden ilmajaot on esitetty keskimääräisen reduktioasteen mukaisessa järjestyksessä. Reduktioaste kasvaa primääri-ilman osuuden pienentyessä.



Kuva 37. Kattiloiden ilmajaot keskimääräisen reduktioasteen mukaisessa järjestyksessä.

5.2.2 Ilman paine ja lämpötila

Kattiloiden palamisilmojen paineet ja lämpötilat on esitetty taulukossa 9. Varsinkin tertiääri-ilmojen paineissa on huomattavia eroja kattiloiden välillä. Pienimmillään tertiääri-ilman paine on alle 2 kPa ja suurimmillaan yli 7 kPa. Primääri-ilman paineet ovat välillä 0,5-1,8 kPa ja sekundääri-ilman välillä 2,0-5,4 kPa.

Ilmojen lämpötilat primääritasolla vaihtelevat välillä 130-180°C. Sekundääritasolla lämpötilat ovat 110-170°C. Tertiääri-ilmaa ei useimmiten lämmitetä, joten sen lämpötilaksi on oletettu kaikille kattiloille sama 30°C.

Taulukko 9. Palamisilmojen paineet ja lämpötilat.

Kattila	Paine [kPa]			Lämpötila [°C]		
	Primääri	Sekundääri	Tertiääri	Primääri	Sekundääri	Tertiääri
A	1	2	1,6	134	134	30
B	1,8	2,4	3,1	150	110	30
C	1,4	4,5	5	158	124	30
D	1,1	2,6	2,4	150	145	30
E	1,2	3,1	3,3	140	140	30
F	1,6	5,4	4	139	129	30
G	0,8	3,9	2,6	175	162	30
H	0,5	2,9	2,5	175	170	30
I	1,1	2,9	5,7	168	134	30
J	1,1	3,5	4,0	130	120	30
K	1,2	3	5,1	132	130	30
L	1,8	3	7,1	180	170	30
M	1	3,3	4	160	110	30
N	0,9	2	1,5	150	150	150

5.2.3 Ilmasuihkun nopeus

Palamisilman syöttöpaine ja lämpötila vaikuttaa ilmasuihkun nopeuteen ja sen myötä tunkeutuvuuteen. Ilmasuihkun teoreettinen maksiminopeus voidaan laskea seuraavasti, kun ilman paine ja lämpötila tiedetään /27,28/:

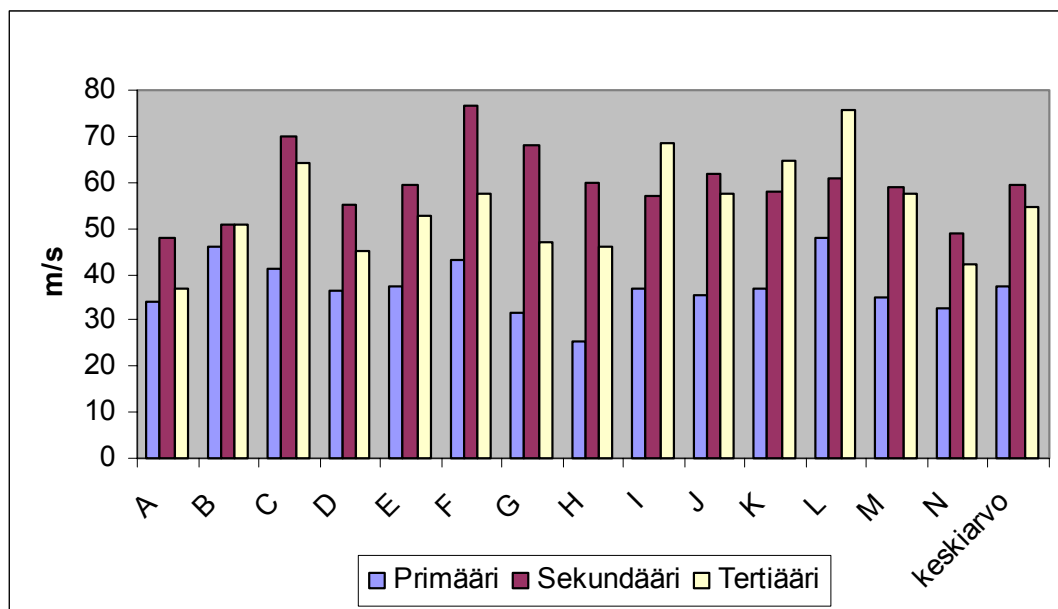
$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{K \cdot \rho}} \quad (3)$$

, missä Δp = paine-ero ilmakehän ja kattilan paineen välillä [Pa]

K = ulosvirtauksen häviökerroin

ρ = ilman tiheys [kg/m³]

Ilman tiheys riippuu lämpötilasta ja paineesta. Laskennassa käytetyt tiheydet on arvioitu kohtuullisella tarkkuudella ideaalikaasun tilanyhtälöstä. Ulosvirtauksen häviökertoimena kaikille kattiloille on käytetty arvoa 2. Kuvassa 38 on esitetty kattiloille lasketut palamisilmojen nopeudet eri ilmatasoilla.



Kuva 38. Teoreettiset ilmasuihkujen maksiminopeudet.

Ilmasuihkun nopeus kattiloiden primääritasolla on keskimäärin 37 m/s. Pienimmillään nopeus on 25 m/s ja suurimmillaan 48 m/s. Vinopohjaiset kattilat G ja H erottuvat joukosta muita alhaisemmilla primääri-ilman nopeuksilla. Muissa kattiloissa nopeudet ovat melko lähellä toisiaan. Primääri-ilman tavoitteena on lähinnä keon tasainen polttaminen sekä sen muodon ja paikan säätely. Tämän vuoksi primääri-ilman syöttö on hyvin samanlaista kaikissa kattiloissa. Ilma-aukot on sijoitettu tiheästi kaikille neljälle seinälle. Liian pienellä primääri-ilman nopeudella keko voi alkaa kasvaa ja sula saattaa nousta primääriaukkoihin asti. Liian suuri nopeus puolestaan lisää palamattoman materiaalin kulkeutumista kattilan yläosiin.

Sekundääritasolla ilman syöttönopeus on huomattavasti primääritasoa korkeampi, keskimäärin 59 m/s. Pienin arvo on 48 m/s ja suurin 77 m/s. Sekundääri-ilmajärjestelmät ovat kattiloissa hyvin erilaisia, joten myös ilman syöttönopeuksissa on suuria eroja. Sekundääri-ilmalla poltetaan pyrolyysissä vapautuvia sekä keosta nousevia kaasuja, joten syöttönopeudet ovat korkeita hyvän sekoittuvuuden ja tunkeutuvuuteen aikaansaamiseksi. Liian suuri nopeus varsinkin vastakkaisilla

suuttimilla voi lisätä carryoverin määrää. Kattiloissa C, F ja G sekundääri-ilman nopeus on huomattavan suuri.

Myös tertiääri-ilmalla pyritään hyvään sekoitukseen ja tunkeutuvuuteen. Lisäksi sillä pyritään tasoittamaan savukaasun nopeus- ja lämpötilajakaumaa ennen tulistimia. Tertiääri-ilmojen nopeudet ovat samaa luokkaa kuin sekundääri-ilmojen, mutta hajonta kattiloiden välillä on suurempaa. Nopeudet vaihtelevat välillä 37 - 77 m/s keskiarvon ollessa 55 m/s.

5.3 Lipeälajin vaikutus polttoon

Eri puulajeista saatavilla mustalipeillä on erilaiset koostumukset, mikä vaikuttaa mm. lipeän viskositeettiin ja pisaran paisumiseen. Tämän vuoksi erilaisten lipeiden ruiskutus, pisaranmuodostus ja pisaran palamiskäyttäytyminen on erilaista.

Lehtipuulipeän, eli Suomessa useimmiten koivulipeän, viskositeetti on korkeampi kuin havulipeän. Myös sekalipeän viskositeetti on usein korkeampi kuin havulipeän. Havulipeä paisuu pyrolyysivaiheessa enemmän kuin koivulipeä, eli se palaa nopeammin, sen lentorata on lyhyempi ja se on alttiimpaa kulkeutumaan savukaasujen mukana kattilan yläosiin. Tämän perusteella havulipeän ruiskutuslämpötilan tulisi olla hieman alhaisempi kuin koivu- tai sekalipeän, jotta niiden pisarakoko ja palamiskäyttäytyminen olisi samankaltaisia. Käytännössä asia ei ole näin yksinkertainen, mutta on kuitenkin selvää, että erilaisten lipeiden poltto vaatii erilaiset ajoparametrit ruiskutuksessa ja ilmansyötössä.

Ruiskutuslämpötilat näyttävät taulukon 8 mukaan olevan havulipeillä muutaman asteen korkeammat kuin seka- tai koivulipeällä samoissa kuiva-ainepitoisuuksissa. Kattiloissa I, K, L ja M lipeän laatu vaihtelee keittimien ajojaksojen perusteella havu-, seka- ja koivulipeän välillä. Myös näissä kattiloissa havulipeiden ruiskutuslämpötilat ovat useimmiten korkeampia kuin koivu- ja sekalipeiden. Viskositeetin ja pyrolyysipaisumisen perusteella voisi olettaa tilanteen olevan päinvastainen. Toisaalta lipeän kuiva-ainepitoisuus ja suovan määrä lipeässä ovat usein erilaisia eri lipeälajeilla, mikä vaikuttaa myös ruiskutuslämpötilaan. Myös mahdolliset lämpökäsittelyt vaikuttavat lipeiden viskositeettiin, joten ruiskutuslämpötilan ja lipeälajin välisistä riippuvuuksista ei voi tehdä kovin suuria päätelmiä.

Kattiloita vertailtaessa ei voi myöskään nähdä lipeälajin selkeästi vaikuttavan ruiskutuspaineeseen, vaikka taulukon 8 mukaan ruiskutuspaineet näyttävät havu- ja koivulipeillä olevan yleisesti korkeampia kuin saman kuiva-ainepitoisuuden sekalipeillä. Kattilassa K havulipeän ruiskutuspaine on selvästi korkeampi kuin sekalipeän. Ruiskutuspaineet ovat kuitenkin kattiloille hyvin yksilöllisiä ja niihin vaikuttavat monet seikat.

Kattiloilla, joissa lipeälaji vaihtelee, on erilaiset ilmansyöttöreseptit eri lipeälajeille. Koivulipeällä primääri-ilman osuus on yleensä hieman pienempi kuin havu- tai sekalipeällä. Tertiääri-ilman osuus koivulipeällä on vastaavasti hieman suurempi. Tarvittavan palamisilman kokonaismäärä on myös hieman erilainen eri lipeälajeilla, koska ilmamäärä on riippuvainen lipeän lämpöarvosta. Koivulipeän orgaanisen aineen osuus on keskimäärin hieman matalampi kuin havulipeän, mutta myös suovan määrä on usein erilainen. Lipeälajilla ei ole juurikaan muita vaikutuksia palamisilman syöttöön. Ilman syöttöpaineita tai lämpötiloja ei muuteta lipeälajin vaihtuessa.

6. YHTEENVETO

Tässä työssä on tarkasteltu mustalipeän polttoa 14 Suomessa käytössä olevassa soodakattilassa. Tutkitut soodakattilat ovat käynnistyneet vuosien 1959 ja 1998 välillä. Kattiloista seitsemän on kaksilieriöisiä ja seitsemän yksilieriöisiä. Kahdessa kattilassa tulipesän pohja on vino, muissa on suora dekantioiva pohja. Kattiloiden pohjien pinta-alat ovat välillä 45-183 m² ja maksimi lipeänpolttokapasiteetit välillä 680-4000 tka/d. Mustalipeä on tehtaasta riippuen havu-, koivu- tai sekalipeää. Polttolipeiden kuiva-ainepitoisuudet tehtailla ovat 70-82 %. Noin puolet kattiloiden yhteensä polttamasta lipeästä on kuiva-ainepitoisuudeltaan 80 % tai enemmän.

Soodakattiloiden yksikkökoiko on kasvanut huomattavasti viime vuosikymmeninä. Tarkastelluista soodakattiloista viisi suurinta ja samalla uusinta muodostaa yli puolet kaikkien kattiloiden yhteenlasketusta polttokapasiteetista. Uudemmat kattilat on mitoitettu myös suuremmille pohjakuormille kuin vanhemmat kattilat. Uusimmissa kattiloissa pohjakuorma voi olla normaalisti yli 22 tka/m²d ja lämpökuorma yli 3500 kW/m². Vanhemmissa kattiloissa pohjakuormat ovat luokkaa 14-18 tka/m²d ja lämpökuormat 2200-3000 kW/m². Pohjakuorman todettiin kasvavan myös lipeän kuiva-ainepitoisuuden ja tulipesän suhteellisen korkeuden kasvaessa. Suurimpien pesärasitusten kattiloissa mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on yli 77 % ja tulipesän suhteellinen korkeus yli 2,8.

Viidellä kohdekattilalla lämpöpintojen likaantuminen aiheuttaa usein tukkeutumista ja johtaa suunnittelelmattomiin käyttökatkoksiin. Useimmat näistä kattiloista ovat jatkuvasti suuresti kuormitettuja. Kolmen likaantumisongelmista kärsivän kattilan tulipesä on suhteellisen matala.

Soodakattiloiden reduktioasteet viherlipeässä ovat 88-97 % keskiarvon ollessa 94 %. Lipeän kuiva-ainepitoisuudella tai tulipesärasituksella ei havaittu olevan selvää yhteyttä kattiloiden kemikaalien talteenoton tehokkuuteen. Kahdella kattilalla reduktioaste on korkeasta lipeän kuiva-ainepitoisuudesta huolimatta selvästi alhaisempi kuin muilla kattiloilla.

Rikkiyhdisteiden päästöt tutkituista soodakattiloista ovat hyvin alhaiset. Normaalisissa ajotilanteissa kaikkien kattiloiden SO₂- ja TRS (H₂S)-päästö on alle 10 mg/m³n.

Alhaisten pitoisuuksien vuoksi lipeän kuiva-ainepitoisuuden tai muiden tekijöiden vaikutusta SO_2 -päästöön ei kattiloita vertailtaessa pysty havaitsemaan. Uusimmissa kattiloissa alhainen rikkidioksidipäästö saavutetaan ilman savukaasupesuria.

Typenoksidipäästöt kattiloista ovat välillä $150\text{--}230 \text{ mg/m}^3\text{n}$. NO_x -päästön havaittiin olevan sitä suurempi, mitä korkeampi on lipeän kuiva-ainepitoisuus. Kahdessa kattilassa lipeäruiskujen yläpuolinen ilmansyöttö on jaettu useampaan vaiheeseen. Molemmissa näissä NO_x -päästö on kattiloiden keskitasoa, noin $180 \text{ mg/m}^3\text{n}$. Pölypäästöt olivat normaaliajossa välillä $10\text{--}130 \text{ mg/m}^3\text{n}$ kattiloissa, joista tietoa oli saatavilla. Tulipesän lämpötilan nousun tiedetään lisäävän pölyn määrää savukaasuissa, mutta pölypäästö riippuu enimmäkseen sähkösuodattimen ja savukaasupesurin toiminnasta.

Lipeän ruiskutus tulipesään on pääpiirteissään hyvin samanlaista tutkituissa kattiloissa. Kaikissa kattiloissa käytetään useita, liikkumattomiksi asennettuja lusikkasuuttimia lipeän ruiskutukseen. Suuttimet ovat kuristettuja tai kuristamattomia kattilan valmistajasta riippuen. Kuristettua lusikkasuutinta käyttävissä kattiloissa ruiskut on sijoitettu muutaman metrin alemmas kuin kuristamatonta suutinta käyttävissä kattiloissa. Lipeäruiskut on sijoitettu sitä korkeammalle mitä suurempi on kattilan pohjan pinta-ala.

Lipeäruiskujen suutinputket ovat sisähalkaisijaltaan $16\text{--}38 \text{ mm}$. Ruiskukoko on yleisesti sitä suurempi, mitä suurempi on kattilan polttokapasiteetti ja mitä suurempi on tulipesän pohjan pinta-ala yhtä ruiskua kohden. Ruiskukoon havaittiin kasvavan myös lipeän kuiva-ainepitoisuuden kasvaessa. Muutamassa pienessä kattilassa käytetään pientä määrää huomattavan suuria ruiskuja.

Lipeän ruiskutuslämpötilat kattiloissa ovat välillä $123\text{--}140 \text{ }^\circ\text{C}$. Ruiskutuslämpötila on yleensä sitä korkeampi, mitä korkeampi on lipeän kuiva-ainepitoisuus. Ruiskutuslämpötilat ovat $7 - 19 \text{ }^\circ\text{C}$ korkeampia kuin lipeiden kiehumispisteet, eli kiehuminen on kaikilla kattiloilla merkittävä pisaroitumiseen vaikuttava tekijä. Lipeän ruiskutuspaineet kattiloilla ovat $1,1\text{--}2,0 \text{ bar}$. Suurissa kattiloissa käytetään usein isoja ruiskuja ja pientä ruiskutuspainetta. Ruiskutuspaineen ei kuitenkaan havaittu olevan selkeästi riippuvainen kattilan koosta tai lipeän kuiva-ainepitoisuudesta.

Palamisilman syöttöjärjestelmät ovat eri ikäisissä ja eri valmistajien kattiloissa useimmiten erilaisia. Ilmanjako eri tasoille on kuitenkin hyvin samanlaista samanlaisten lipeän kuiva-ainepitoisuuksien kattiloissa. Vinopohjaisissa kattiloissa ilmanjako poikkeaa muista, suorapohjaisista kattiloista lähinnä primääri-ilman suuren osuuden vuoksi. Primääri-ilman osuuden todettiin olevan sitä pienempi, mitä korkeampi on lipeän kuiva-ainepitoisuus. Tertiääri-ilman osuus on vastaavasti suurempi korkeilla kuiva-ainepitoisuuksilla. Kattiloiden reduktioasteiden havaittiin nousevan primääri-ilman osuuden pienentyessä (kuiva-aineen noustessa).

Ilmajärjestelmien eroista johtuen etenkin sekundääri- ja tertiääri-ilmojen syöttöpaineissa ja siten myös ilmasuihkujen nopeuksissa on suuria eroja kattiloiden välillä. Primääri-ilmojen nopeudet kattiloissa ovat välillä 25-48 m/s, sekundääri-ilmojen 48-77 m/s ja tertiääri-ilmojen 37-77 m/s.

Lipeälajilla on pieni vaikutus polttomenetelmiin. Havulipeillä ruiskutuslämpötilat ovat yleisesti muutaman asteen korkeampia kuin seka- ja koivulipeillä samoissa kuiva-ainepitoisuuksissa. Joillain kattiloilla lipeälaji vaihtelee säännöllisesti, jolloin ruiskutusparametrejä joudutaan muuttamaan eri lipeiden erilaisista viskositeeteistä ja pisaroiden erilaisista palamiskäyttäytymisistä johtuen. Myös näissä kattiloissa ruiskutuslämpötila seka- tai koivulipeällä on yleensä alhaisempi kuin havulipeällä. Tämä tosin saattaa johtua myös eri lipeälajien erilaisista kuiva-ainepitoisuuksista ja suopamääristä. Ruiskutuspaineisiin ei lipeälajilla ole selvää vaikutusta, vain yhdellä kattilalla sekalipeän ruiskutuspaine on huomattavasti pienempi kuin havulipeän. Kattiloissa, joissa lipeälaji vaihtelee on myös erilaiset ilmareseptit eri lipeille. Primääri-ilman osuus on hieman pienempi ja tertiääri-ilman suurempi koivulipeällä, kuin havu- tai sekalipeällä.

LÄHDELUETTELO

1. Energiatilastot 2001. Tilastokeskus, Ympäristö ja Energiaosasto. Helsinki. 2002.
2. KnowPulp 2.0 Sellutekniikan ja automaation oppimisympäristö. VTT Tuotteet ja tuotanto. 2003.
3. Adams, T.N., Frederick, J., Grace, T., Hupa, M., Iisa, K., Jones, A., Tran, H. Kraft recovery boilers. American Forest & Paper Association. Tappi Press. New York. 1997.
4. Vakkilainen, E. Recovery Boiler, teoksessa: Chemical Pulping, Papermaking Science and Technology, osa 6 B. Finnish Paper Engineers' Association and Tappi. Jyväskylä. 1999.
5. Hupa, M., Hyöty, P. Mustalipeän poltto ja soodakattila, teoksessa: Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J., Hupa, M. Poltto ja palaminen. International Flame Research Foundation, Suomen Kansallinen Osasto. Jyväskylä. 1995.
6. 30 Years recovery boiler co-operation in Finland. International Conference proceedings. Finnish Recovery Boiler Committee. Helsinki. 1994.
7. Vakkilainen, E. Soodakattilan haasteet lähestyttäessä seuraavaa vuosisataa. Paperi ja Puu – Paper and Timber, Vol.79, NO. 3/1997.
8. Empie, J., Lien, S., Yang, W., Adams, T. Spraying characteristics of commercial black liquor nozzles. Tappi Journal, Vol.78, NO. 1/1995.
9. Adams, T.N. Spraying Black Liquor in Kraft Recovery Boilers. Tappi Proceedings. Kraft Recovery Short Course, Orlando, USA Jan. 11-14, 1999.
10. Kankkunen, A. Mustalipeän pisaroituminen lusikkasuuttimessa. Teknillinen korkeakoulu. Energiatekniikan laitoksen julkaisu. Espoo. 1996.
11. Järvinen, M. Effects of black liquor firing on recovery boiler operation. Master's thesis. Lappeenranta University of Technology. Lappeenranta. 1997.

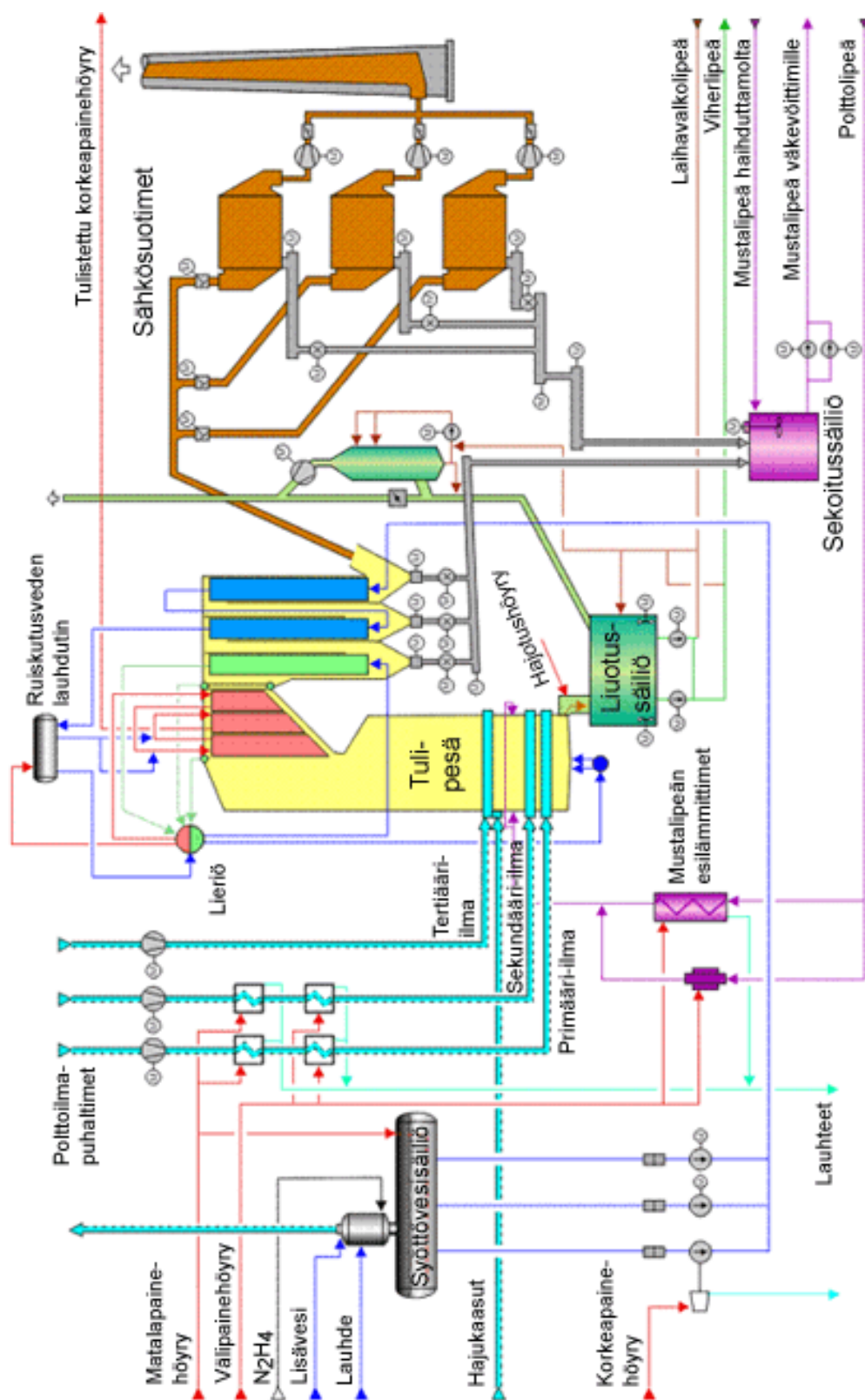
12. MacCallum, C. Towards a superior recovery boiler air system. Tappi Proceedings. International Chemical Recovery Conference. 1992.
13. Anttonen, N. Soodakattilan ilmajärjestelmän vaikutus kattilan käytettävyyteen. Diplomityö. Lappeenrannan Teknillinen Korkeakoulu. 2001.
14. Järvinen, M.P. Numerical modeling of the drying, devolatilization and char conversion processes of black liquor droplets. PhD thesis. Helsinki University of Technology. Espoo. 2002.
15. Saviharju, K. Soodakattilan päästöt. Suomen Soodakattilayhdistys ry. Soodakattilapäivä, Helsinki, 16.10.2003.
16. Niemelä, K., Ulmgren, P. Behaviour of nitrogen during kraft pulping of wood. The 7th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp, Turku, Finland, August 26-29, 2002.
17. Ulmgren, P., Samuelsson, Å., Niemelä, K., Järvinen, R., Forssén, M., de Martini, N., Kilpinen, P., Hupa, M., Saviharju, K., Ferreira, P., Rebola, J., Reduction on NO_x emissions at kraft pulp mills - Overview of an EU project. Proceedings, 28th EUCEPA Conference, Lisboa, Portugal, April 2-4, 2003.
18. Larfeldt, J., Tao, L. Implementering av beräkningsmetoder i avsikt att optimera sodapannedrift och förbättra miljödata, slutrapport. Iggesund Paperboard och Statens Energimyndighet. Nyköping. 2000.
19. Saviharju, K. Challenges of the Modern Recovery Boiler Process. Course on Black Liquor Spraying and Combustion in Kraft Recovery Boilers. Otaniemi, Espoo. Sep. 2-5. 2003.
20. Tran, H., Arakawa, Y. Recovery boiler technology in Japan. Tappi Proceedings. Engineering, Finishing and Converting Conference, San Antonio, USA, September 16-20, 2001.
21. Vakkilainen, E., Järvinen, M., Liquor firing philosophy – focus on efficiency, energy and emissions. Paper and Timber, Vol.81, NO.1/1999.

22. Miikkulainen, P., Kankkunen, A., Järvinen, M. Mustalipeän ruiskutuskokeet soodakattilassa ja ruiskutuskammiossa. Teknillinen Korkeakoulu. Energiatekniikan ja Ympäristönsuojelun julkaisu. Espoo. 2002.
23. Nieminen, K. Experiments on black liquor splashplate nozzle performance. Master's thesis. Helsinki University of Technology. Espoo. 1996.
24. Frederick, Wm. J. Jr., Vakkilainen, E. Sintering and structure development in alkali metal salt deposits in kraft recovery boilers. Energy and Fuels, Vol.17, NO.6/2003.
25. Ympäristönsuojelun vuosikirja. Massa- ja paperiteollisuus, vuoden 2002 tilastot. Metsäteollisuus ry. <http://www.forestindustries.fi/>. Helsinki. 2003.
26. Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). European Commission. 2001.
27. Young, D., Munson, B., Okiishi, T. Introduction to fluid mechanics. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1997.
28. Gäsman, J. Soodakattilan polttokapasiteetti sahajauhonkeittoprosessissa. Diplomityö. Lappeenrannan Teknillinen Korkeakoulu. 1994.

LIITE 1

Soodakattilan laitteet ja ainevirrat

Soodakattilan laitteet ja ainevirrat.



LIITE 2

Turvallisuuskysely

	Tehdas										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Työvarustus soodakattilalla											
Kypärä (* = seisokissa)	x	*	*	x	x	x	*	*	*	*	*
Turvakengät	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Tavallinen "palamaton" haalari	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Hansikkaat tavalliset	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Hansikkaat pitkävartiset					x		x				
Kuulosuojaimet	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Suojalasit	x	x		x	x	x	x	x	x	x	
Varustus sulakouruilla											
Maski	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Suojapuku (aluminoitu yms.)							x				
Kommunikointi valvomoon											
Radiopuhelin	x	x		x	x			x			x
Kypärässä kuulosuojain-radio			x			x	x		x	x	
Puhelin	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Hälytysten toteutus											
Sireenit	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Valot	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rikkivetyhälytykset											
Kattilalla/polttolipeäsäiliöillä	x		x	x			x	x	x	x	
Muut hälytykset				maakaasu							
Käyttö- ja kemikaaliohjeiden sijainti											
Valvomo	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ATK-järjestelmä	x	x	x	x	x	x	x		x		x
Poikkeustilanteiden tiedotus											
ATK-järjestelmä (päiväkirja jne)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Suullinen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Kohdistettu korvausilma											
sulakourut, ruisk.taso, muu		x	x	x	x	x	x		x	x	

SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS RY
RAPORTTISARJA

SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS RY
RAPORTTISARJA

- 1/2003 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Konemestaripäivä 23.1.2003, esitelmät
Stora Enso Oyj, Fine Paper, Oulun tehdas
23.1.2003 (16A0913-E0047)
- 2/2003 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilan lentotuhkan hyötykäyttö. Esiselvitys Soodakattilayhdistykselle
KCL/Klaus Niemelä
18.2.2003 (16A0913-E0048)
- 3/2003 Suomen Soodakattilayhdistys ry
EPER – päätöksen vaikutukset soodakattiloiden päästöjen raportoinnissa
KCL/ Esko Talka, Simo-Pekka Vanninen
18.2.2003 (16A0913-E0049)
- 4/2003 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattila-alan yhteistoiminta
Vuosikertomus 2002
18.3.2003 (16A0913-E0046)
- 5/2003 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Suopaselvitys
Urho Räsänen, Elektrowatt- Ekono Oy, Jaakko Pöyry Group
24.3.2003 (16A0913-E0050)
- 6/2003 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Vuosikokous 27.3.2003, Jaakko Pöyry Oy, Vantaa
Pöytäkirja (16A0913-E0051)
- 7/2003 Suomen Soodakattilayhdistys ry
OKA-hankkeen loppuraportti
Boildec Oy/Karjunen Timo
9.9.2003 (16A0913-E0053)
- 8/2003 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilapäivä 16.10.2003
Presidentti Congress Center, Helsinki, esitelmät
(16A0913-E0054)

SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS RY
RAPORTTISARJA

- 1/2004 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Konemestaripäivä 22.1.2004, esitelmät
Oy Metsä-Botnia Ab, Rauman tehdas/Hotelli Raumanlinna
22.1.2004 (16A0913-E0055)
- 2/2004 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattila-alan yhteistoiminta
Vuosikertomus 2003
25.3.2004 (16A0913-E0057)
- 3/2004 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Mustalipeän polttomenetelmät Suomen soodakattiloissa
Tuukka Juvonen
3.5.2004 (16A0913-E0058)