

Suomen Soodakattilayhdistys ry

Soodakattilapäivä 1995

**Vesikierroltaan suljettu sellutehdas ja
soodakattilan NO_x-kemialla**

**HOTELLI HAAGA,
HELSINKI 18.10.1995**

SJO-18711V-02



EVK/MPS

Otaniemi 13.9.1995

SJO-18711V

Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilapäivä 1995.

AIKA

18.10.1995 klo 8.30 -

PAIKKA

Helsinki, Hotelli Haaga

OHJELMA

08.30-09.00 Ilmoittautuminen ja aamukahvi

09.00-10.20 Tilaisuuden avaus
(Juha Kouki, Kymin Paperiteollisuus Oy)

Vesikierroltaan suljettu sellutehdas
(Olli Välttilä, KCL)

Vesikierroltaan suljettu sellutehdas tutkimusten tuloksia
(Liva Söderhjelm, KCL)

10.20-10.30 Tauko

10.30-11.45 Nitrogen chemistry in black liquor combustion
(Mikko Hupa/Mikael Forssén, Åbo Akademi)

NOx-pesuprosessi sellutehtaassa
(Ari Tamminen, Tampella Power Oy)

11.45-13.00 Lounas

13.00-14.15 Sellutehtaan kaasumaiset päästöt
(Markku Hietamäki, Ympäristöministeriö)

Soodakattilan automaation näkymiä
(Jukka Mikkonen, Valmet Automation)

14.15-14.45 Kahvi

14.45-16.00 Soodakattilan likaantuminen
(Esa Vakkilainen, Ahlström Machinery)

Soodakattilan ilmajaon hallinta
(Erik Uppstu, Oy Polyrec Ab)

17.00-19.00 Cocktail tilaisuus
(Tampella Power Oy)

19.00- Päivällinen



EVK/MPS

Otaniemi 13.9.1995

1(3)

SJO-18711V
Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilapäivä 1995

Yritys	Osallistujat	Kokous	Päivällinen	Majoitus 17.-18. 18.-19.
LUENNOITSIJAT				
Ahlström Machinery	Esa Vakkilainen	x	x	x
KCL	Liva Söderhjelm	x		
KCL	Olli Välttilä	x	x	
Oy Polyrec Ab	Erik Uppstu	x	x	
Tampella Power Oy	Ari Tamminen	x	x	x
Valmet Automation	Jukka Mikkonen	x		
Ympäristöministeriö	Markku Hietamäki	x		
Åbo Akademi	Mikko Hupa	x	x	x



EVK/MPS

12.10.1995

2

OSANOTTAJAT	Osallistuja	Kokous	Päivällinen	Majoitus 17.-18. 18.-19.
A. Ahlström Osakeyhtiö, Varkaus	Lauri Hämäläinen	x	x	x
	Arja Hyvärinen	x	x	x
	Marjo Kuusio	x	x	x
	Yrjö Olli	x	x	x
	Raimo Paju	x	x	x
	Kari Palmu	x	x	x
	Keijo Raak	x	x	x
	Esa Vihavainen	x	x	x
Energia-Ekono Oy, Espoo	Hannu Maskuniitty	x	x	
	Petri Nieminen	x	x	
	Mika Salo	x	x	
Enocell Oy, Uimaharju	Ismo Orava	x	x	
Enso-Gutzeit Oy, Heinola	Rainer Kokemäki	x	x	x
Enso-Gutzeit Oy, Varkaus	Veli-Antti Kortelainen	x	x	x
Kaukas Oy, Lappeenranta	Juha-Pekka Juuti	x	x	x
	Hannu Kytö	x	x	x
Keskeytysvakuutusosakeyhtiö Otso, Helsinki	Juhani Ingalsuo	x	x	
Kymin Paperiteollisuus Oy, Kuusankoski	Lasse Elojärvi	x	x	x
	Rauno Karvinen	x	x	x
	Juha Kouki	x	x	x
	Raine Rantanen	x	x	x
Laminating Papers Oy, Kotka	Matti Takala	x	x	x
	Tuomas Timonen	x	x	
Metsä-Botnia, Kaskinen	Kari Auvinen	x	x	x
	A. Heinävaara	x	x	x
	Tapani Niskonen	x	x	x
	A. Virkkala	x	x	x
Oy Metsä-Rauma Ab, Rauma	Matti Alamaa	x	x	x
	Reijo Kiuru	x	x	x



EVK/MPS

12.10.1995

3

OSANOTTAJAT	Osallistuja	Kokous	Päivällinen	Majoitus 17.-18. 18.-19.	
Metsä-Sellu Oy, Äänekoski	Hanna Niemitalo	x	x		x
	Osmo Niemitalo	x	x		x
	Hannu Peltola	x	x		x
Metsäteollisuus ry	Antti Kurki	x	x		
Pohjola-yhtiöt, Helsinki	Thomas Åström	x	x		
Jaakko Pöyry Oy, Vantaa	Pekka Heikkinen	x	x		
	Markku Lehtinen	x	x		
Steamservice Oy, Tampere	Kaj Lindström	x	x		x
	Jussi Orhanen	x	x		x
Sunila Oy, Sunila	Jukka Henriksson	x	x		x
Tampella Power Oy, Tampere	Jari Ekholm	x	x	x	x
	Kari Haaga	x	x		x
	Kauko Janka	x	x		x
	Kai Mäenpää	x	x		x
	Ari Laakso	x	x		x
Teollisuusvakuutus Oy, Helsinki	Asmo Rantanen	x	x		
Veitsiluoto Oy, Kemijärvi	Antero Raassina	x	x		x
Veitsiluoto Oy, Oulu	Armas Seppänen	x			
Yhtyneet Paperitehtaat Oy, Joutseno	Jukka Veitola	x	x	x	x
	Jorma Viinikainen	x	x	x	x
Yhtyneet Paperitehtaat Oy, Valkeakoski	Olavi Aaltonen	x	x		x
	Matti Kinnari	x	x		x
Åbo Akademi	Mikael Forssén	x	x		x

Olli Välttilä
Oy Keskuslaboratorio

Vesikierroltaan suljettu sellutehdas. KCL:n projekti. Vierasaineet.

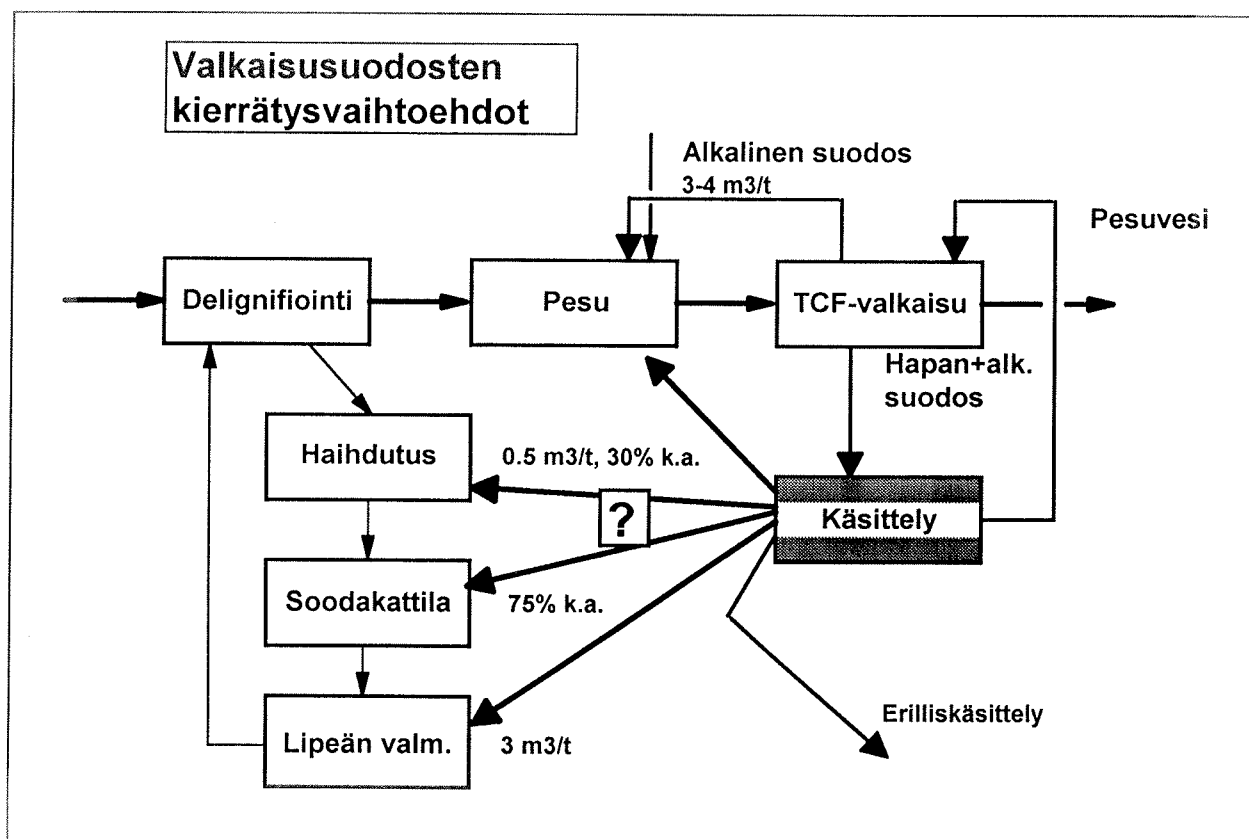
1. JOHDANTO

Keskustelua kloorivalkaisusta ja siinä syntyvistä orgaanisista klooriyhdisteistä sekä nopeata kehitystä ECF- ja TCF-valkaisuihin on seurannut ajatus suljetusta sellutehtaasta. Ajatus ei ole uusi, mutta keiton ja happidelignifioinnin sekä valkaisu-tekniikan kehittyminen ovat muuttaneet oleellisesti edellytyksiä eliminoida valkaisusta tulevat jätevedet verrattuna siihen, mitkä ne olivat 70- ja 80-luvuilla: Valkaisuun tulevan massan kappaluku voidaan alentaa tasolle 10 ja jopa sen alle, kloridin määrä valkaisu-suodoksissa on romahtanut ja on TCF-valkaisun tapauksessa lähes olematon. Siten valkaisu-suodosten eliminointia jätevesistä voidaan nyt tarkastella tilanteessa, jossa niiden sisältämä sekä orgaanisen aineen että kloridin määrä on oleellisesti aikaisempaa pienempi.

Toisaalta, mikä ei ole oleellisesti muuttunut, tai ainakaan ei tiedetä muuttuneen, on valkaisu-suodoksiin joutuvien vierasaineiden (Ca, Mg, Ba, Si, Al, P, Mn ym.) määrä.

2. KCL:N PROJEKTI

Tätä taustaa ajatellen on luonnollista, että maailmanlaajuisesti on aloitettu useita tutkimuksia, jotka tähtäävät sellutehtaan sulkemiseen. Myös KCL:ssä käynnistyi 1993 3-vuotinen projekti "Vesikierroltaan suljettu sellutehdas". Sen tavoitteena oli toisaalta selvittää sellutehtaan omien erotusprosessien



Kuva 1. Vaihtoehdot kierrättää valkaisusuodoksia.

(lipeäkierron sakat, meesahäviöt) kyky poistaa vierasaineita ja toisaalta selvittää miten valkaisun suodokset pitäisi käsitellä ennen kierrätystä tehtaan talteenottokiertoon. Projekti rajattiin tutkimaan vain TCF-valkaisun tapauksia, ja sen ulkopuolelle rajattiin mustalipeähaihduttamon lauhdeiden käyttö valkaisussa sekä kloorin ja kaliumin erotustekniikat. Muutoin projektin tavoitteena on mahdollisimman kattavasti luoda tietoa, jonka perusteella voitaisiin tarkastella erilaisten kierrätysvaihtoehtojen etuja ja haittoja sekä niiden käyttöä rajoittavia tekijöitä (Kuva 1).

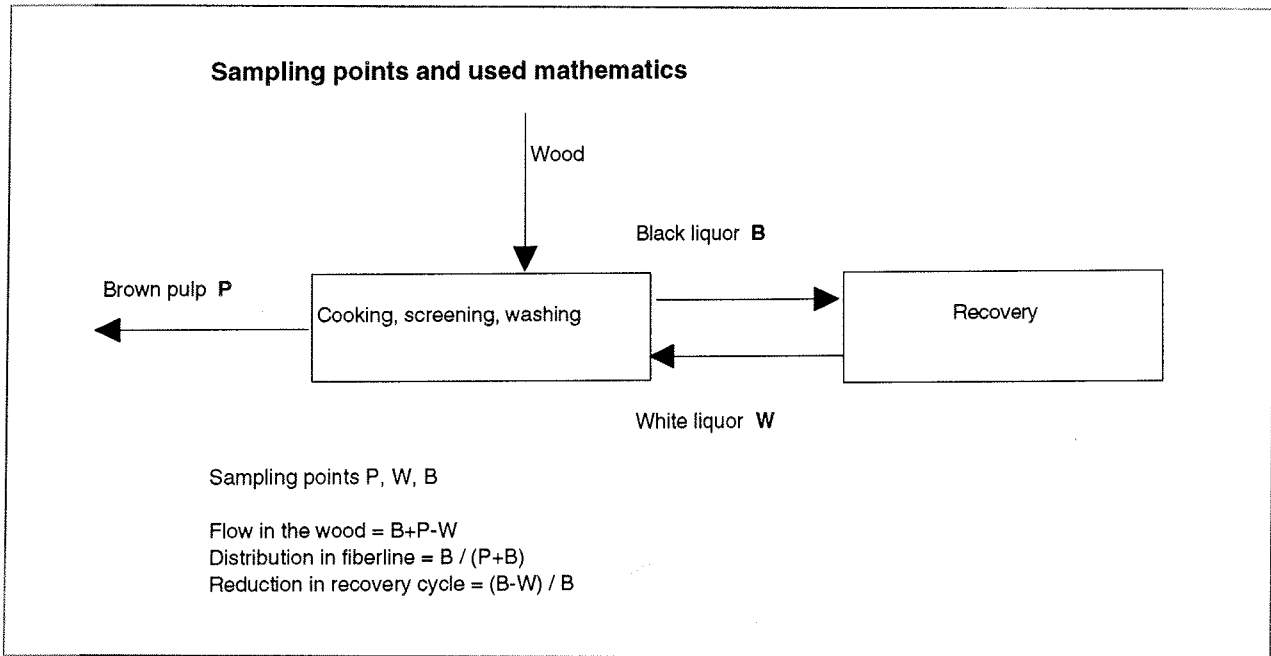
Projektissa on tutkittu seuraavia asioita:

- * Vierasaineiden tasot sellutehtaissa
- * Vierasainepitoisuuksien lyhytaikainen vaihtelu kuitulinjassa
- * Metallien poisto
 - Kompleksinmuodostajat c. hapot
- * Peroksidi- ja otsonivaiheiden herkkyys kiertävien aineiden väkevyyden kasvulle
- * Eri alkalit peroksidivaiheessa
 - NaOH natriumkarbonaatin jäähdytyskiteytyksestä
 - Natriumkarbonaatti, terästys NaOH:lla
 - Hapetettu valkolipeä, hapetus hapella
- * TCF-suodosten puhdistus
 - Biologinen puhdistus
 - Vierasaineiden poisto saostamalla
 - Saostuksen optimoiminen piin erottamiseksi, DI-työ
- * Vierasaineiden käyttäytyminen viherlipeän selkeytyksessä
 - Yhden tehtaan seuranta
 - Lyhyt- ja pitkäaikainen seuranta
- * Fosforin poisto viherlipeästä
 - DI-työ
- * Kaliumin poisto
 - Teoreettinen selvitys
- * TCF-suodosten haihdutus, pilotkokeet
- * TCF-suodosten vaikutus mustalipeän ominaisuuksiin
- * EDTA- ja DTPA-kompleksien stabiilisuus mustalipeähaihduttamon oloissa
- * Selvitys oksalaatista
- * Mustalipeän poltto-ominaisuuksien muuttuminen
 - Pisarapolttokokeet, ÅA
- * Soodakattilan sietorajat kaliumille ja kloorille
 - Teoreettinen selvitys, ÅA

Projektin tutkimusten läpiviemiselle on ollut ensiarvoisen tärkeää KCL:oon hankittu plasmaemissiospektrometri (ICP) ja kehitystyö määrittää suurimäärä alkuaineita nopeasti sellutehtaan erilaisista näytteistä: sellut, lipeät, sakat.

Projektin kokeelliset työt on saatettu suurin piirtein loppuun, tietyiltä osin tulosten analysointi on vielä kesken. Jäljempänä esitetään tärkeimpiä vierasaineisiin liittyviä tuloksia ja toisessa esitelmässä mustalipeän ominaisuuksiin ja polttoon liittyviä tuloksia.

Projektin lopputuloksena tulee olemaan eri sulkemisvaihtoehtojen vertailu ja jatkotutkimusta vaativien asioiden identifiointi sekä niiden tärkeysjärjestykseen asettaminen. Tämän perusteella KCL tullee ensi vuoden aikana suunnittelemaan ja käynnistämään jatkoprojektin.



Kuva 2. Näytteet sellutehtaiden vierasainekartoituksessa ja kaavat tunnuslukujen laskemiseksi.

3. VIERASAINHEET SELLUTEHTAASSA

Kaikilta Suomen sellutehtailta kerättiin näytteet valkolipeästä, haihduttamolle menevästä mustalipeästä ja valkaisimoon menevästä pestystä sellusta (Kuva 2). Sellutonnin kohden lasketut ainemäärät eri virroissa on esitetty taulukossa 1 mediaaneina ja vaihteluväleinä. Käyttäen kuvassa 2 esitettyä matematiikkaa vierasaineille laskettiin niiden jakautuminen kuitulinjassa mustalipeän ja valkaisuamattoman massan mukana kulkeviin osiin (Kuva 3) sekä reduktio kemikaalikierrrossa (Kuva 4).

Tulokset osoittavat, että rikastuvien vierasaineiden, K, Cl, Al, Si, B, V, pitoisuudet ovat harvoja poikkeuksia lukuunottamatta Suomen sellutehtaiden lipeäkierrrossa varsin pienet.

Lipeisiin kaikissa oloissa liukenevista vierasaineista K, Cl, B, V kiertää mustalipeän mukana 95 % tai enemmän kemikaalien talteenottoon, josta niiden poistuminen on hyvin vähäistä. Muut vierasaineet saostuvat vaihtelevin määrin lipeäkierrrossa ja kuitulinjassa. Suuren määränsä (1-2 g/ADt) takia keittoon tulevasta kalsiumista noin 70-90% kulkee valkaisuamattoman sellun mukana ilmeisesti karbonaattina. Bariumia ei löydetty mustalipeästä. Kuitulinjassa kulkevista alkuaineista poistuu valkaisuamattoman massan mukana keskimäärin 15-50% seuraavia alkuaineita järjestyksessä $Si < Al < P < Fe < Mn < Zn < Mg$ hajonnan jakautumiskertoimessa ollessa kuitenkin suuri kunkin alkuaineen kohdalla.

Mustalipeän mukana kemikaalikiertoon kulkeutuvista alkuaineista Zn, Mg ja Mn poistuvat kemikaalikierrrosta 85%:sti tai paremmin, P, Cu ja Ca poistuvat 65-85%:sti ja Fe keskimäärin 40%:sti. Alumiinin keskimääräinen reduktio oli hyvin pieni, mutta se kuten raudankin reduktio vaihteli hyvin suuresti tehtaasta toiseen.

Mustalipeän kuiva-aineessa Ca-, Mg-, Mn, Zn- ja P-pitoisuudet korreloivat keskenään viitaten niiden osittain kulkevan samoissa kiinteissä

Taulukko 1. Vierasaineet sellutehtaan ainevirroissa, g/t sellua. Havusellu

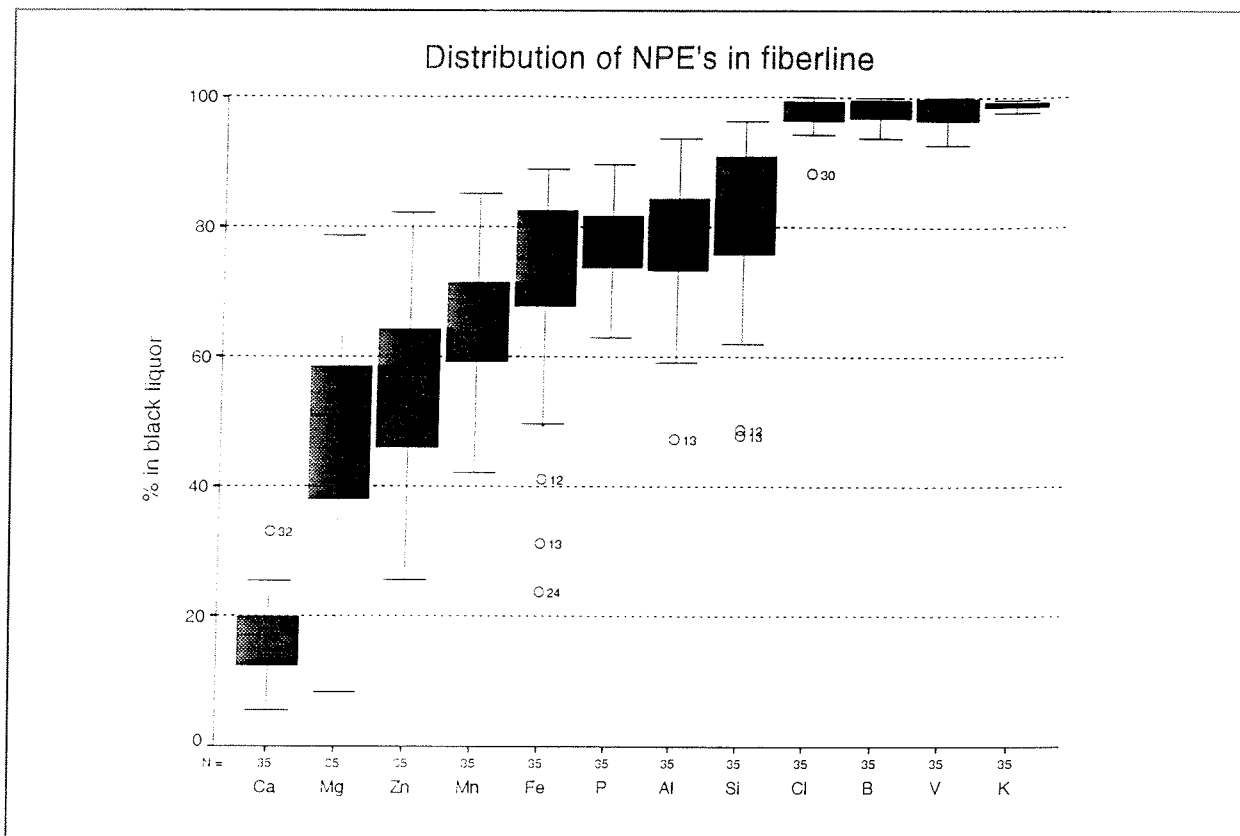
	Valkolipeä			Mustalipeä			Valkaisematon sellu		
	Median	Min	Max	Median	Min	Max	Median	Min	Max
Ca	50	20	600	200	60	450	1200	950	1900
Mg	2	0.5	15	180	420	50	200	100	600
Ba							12	7	25
P	40	20	100	120	80	160	40	20	80
Si	460	270	1800	350	140	800	80	35	300
Al	25	7	390	30	15	300	12	5	60
Zn	0	0	5	8	2	20	10	5	20
Mn	14	7	35	110	60	160	55	25	130
Fe	13	6	37	20	12	90	10	4	50
Cu	0.6	0.3	0.8	2	1.2	6.5	0.3	0.1	0.7
Cr							0.4	0	2
Ti							0.7	0	3.5
V	5	0.6	240	7	2	200	0.3	0	1.5
B	80	30	140	80	30	140	1.5	0	4.5
K	28000	16000	50000	28000	17000	49000	400	200	800
Cl	4300	1000	7600	3800	700	7400	50	10	100

partikkeleissa. Tulokset viittasivat magnesiumin voivan saostaa piitä selluun.

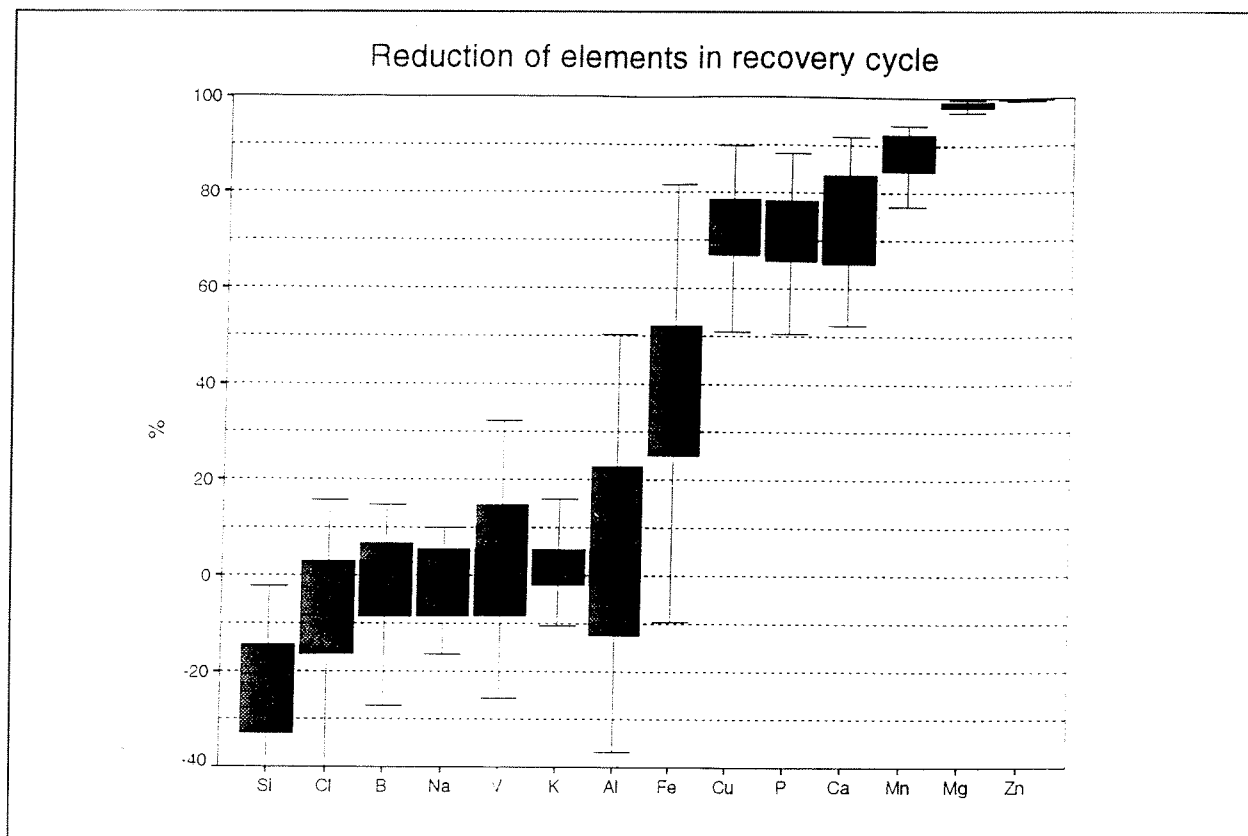
Keiton kappaluvun muutoksen ei todettu vaikuttavan kuitulinjan vierasaineisiin. Happivalkaisun käyttöönotto kahdella tehtaalla näytti ohjaavan fosforia kulkemaan hiukan suuremmassa määrässä mustalipeän mukana ja piitä sellun mukana. Tehtaiden väliset erot kuitenkin peittävät tämän muutoksen.

Tulokset sopivat hyvin yhteen käsityksen kanssa, että pääosa vierasaineista tulee prosessiin puun mukana poikkeuksina pii ja alumiini, joita tulee pääasiassa korvauskalkissa. Edelleen tulokset tukevat hyvin käsitystä, että metallit kuten Mn, Cu, Zn, Mg poistuvat kemikaalikierrosta viherlipeäsakan mukana ja kalkkikiertoon rikastuva fosfori meesahäviöiden mukana.

Tehdaskartoituksen tuloksista voidaan edelleen tehdä seuraavat johtopäätökset. Kaikille vierasaineille, ehkä klooria lukuunottamatta, valkaisen sellu on huomioon otettava poistumistie nykyisestä kemikaalikierrosta. Kierrätystä ajatellen merkittävä seikka on se, että alkaliliukoisia vierasaineita lukuunottamatta ne rajoittavat mahdollisuutta käyttää suoraa vastavirtapesua. Mustalipeässä saostuvat aineet, etenkin kalsium, barium, pii ja alumiini, rajoittavat valkaisuodosten kuiva-aineen vientiä mustalipeähaihduttamoon. Rikastuville aineille, joilla valkaisen sellu on merkittävä poistumistie, täytyy ottaa käyttöön erilliset erotusmenetelmät pitoisuustasojen hallitsemiseksi. Piin ja alumiinin rikastumiseen voidaan vaikuttaa korvauskalkin laadulla ja määrällä, vanadiinin rikastumiseen öljyn käytön kautta. Korvauskalkin määrään vaikuttaa ainakin fosforin rikastuminen kalkkikiertoon. Mangaanin, raudan, kuparin ja ehkä muidenkin metallien rikastuminen pesulinjassa ei saa nousta tasolle, joka vaikeuttaisi niiden hallintaa valkaisussa.



Kuva 3. Vierasaineiden jakautuminen kuitulinjassa mustalipeän mukana haihduttamoon ja sellun mukana valkaisimoon menevään osaan.



Kuva 4. Vierasaineiden reduktio kemikaalikierrrossa, määrä valkolipeässä verrattuna määrään mustalipeässä.

4. VIERASAINEET VALKAISUSUODOKSISSA

TCF-valkaisussa vierasaineet joutuvat suurimmaksi osaksi happamaan kelatointivaiheen suodokseen (Taulukko 2). Erityisesti kalsium ja mangaani löytyvät siitä yli 90%:sti. Magnesiumia, jota käytetään peroksidivaiheissa stabilaattorina, on merkittäviä määriä myös alkalisessa suodoksessa, samoin siinä on piitä ja jonkin verran alumiinia ja fosforiakin. Siten pelkästään alkalisen suodoksen kierrättäminen tehtaan kemikaalikiertoon olisi vierasaineiden rikastumisen kannalta selvästi vaarattomampi kuin kelatointivaiheen vesien kierrätys, mutta selvästi sekin lisäisi vierasaineiden määriä kemikaalikiertoon etenkin magnesiumin ja piin määriä.

Taulukko 2. TCF-valkaisun suodosten koostumus.

		Hapan (alk.kierr.)	Alkalinen
Kuiva-aine	kg/ADt	90	70
Pitoisuus	%	0.4	0.8
Tuhka	%	75	70
Kal. lämpöarvo	MJ/kg	4	5
Rikki	kg/ADt	14	7
Natrium	kg/ADt	20	15
Ca	g/ADt	1000	100
Mg	"	700	400
Al	"	30	10
P	"	35	10
Si	"	200	100
Mn	"	40	2
K	"	250	50
Oksaalihapo	kg/ADt	0.5	2
Metanoli	kg/ADt	4	1

5. VIERASAINEIDEN POISTO SUODOKSISTA

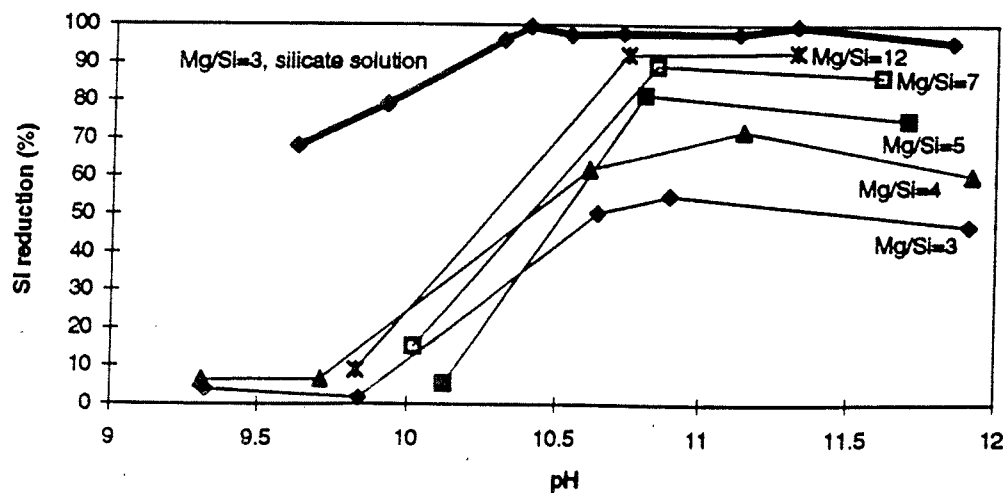
Vierasaineiden erottamisella suoraan valkaisun suodoksista olisi se etu, että viettäessä suodosten kuiva-aine kemikaalikiertoon, niiden rikastumista ei tarvitsisi pelätä. Näin etenkin niiden aineiden kohdalla, jotka eivät poistu soodasakan mukana: pii, alumiini, fosfori. Kalsiumin poisto parantaisi selvästi mahdollisuuksia viedä suodosten kuiva-aine mustali-peähaiduttamoon.

Vierasaineiden poistamiseksi valkaisusuodoksista on projektissa kokeiltu saostusta pH:ta korottamalla ilman saostavia lisäaineita ja niiden kanssa. Tällaisia aineita ovat olleet kalsium-, alumiini- ja magnesiumsuolat. On osoittautunut (Taulukko 3), että useimmat vierasaineista saostuvat valkaisusuodoksista, kun pH on 9-11. Saostumista ja sakan erottumista voidaan parantaa lisäämällä kalsium- tai magnesiumsuoloja, joista saostuu vastaavaa hydroksidia tai karbonaattia. Kalsiumia käytettäessä sen jäännöspitoisuus jää kuitenkin korkeaksi.

Taulukko 3. TCF-valkaisun suodosten käsittely pH:ta nostaen ja lisäten magnesiumyhdisteitä.

	Filtrate	Adjusting pH to 11.1	Adding Mg Mg/Si = 5 pH 10.7
Si	16.4	7.8	1.9
P	1.7	0.4	0.6
Al	1.6	0.2	0.1
Mg	43.1	3.9	3.4
Ca	48.8	44.5	43.3
Ba	0.4	0.3	0.3
Mn	2.5	0.1	0.0
Fe	0.8	0.1	0.1
Zn	0.4	0.1	0.0
Cu	0.1	0.1	0.1

Saostus magnesiumin läsnäollessa on optimoitu piin poistamiseksi suodoksista. Kun magnesiumin määrä piihin nähden mooleina on 5-kertainen, pH 10.7 ja käsittelyaika 30 min, saadaan suodosten piipitoisuus alennettua tasolle 2-3 mg/l (Kuva 5). Toistaiseksi kalsiumia ei ole onnistuttu poistamaan toistettavasti. Vaikka magnesiumia käytettäessä on saatu laskeutuva sakka, se kuitenkin laskeutuu hitaasti, ei tiivisty kunnolla ja on vaikeasti suodatettavaa. Siten menetelmää pitää kehittää edelleen, ennenkuin sitä voidaan pitää käyttökelpoisena.



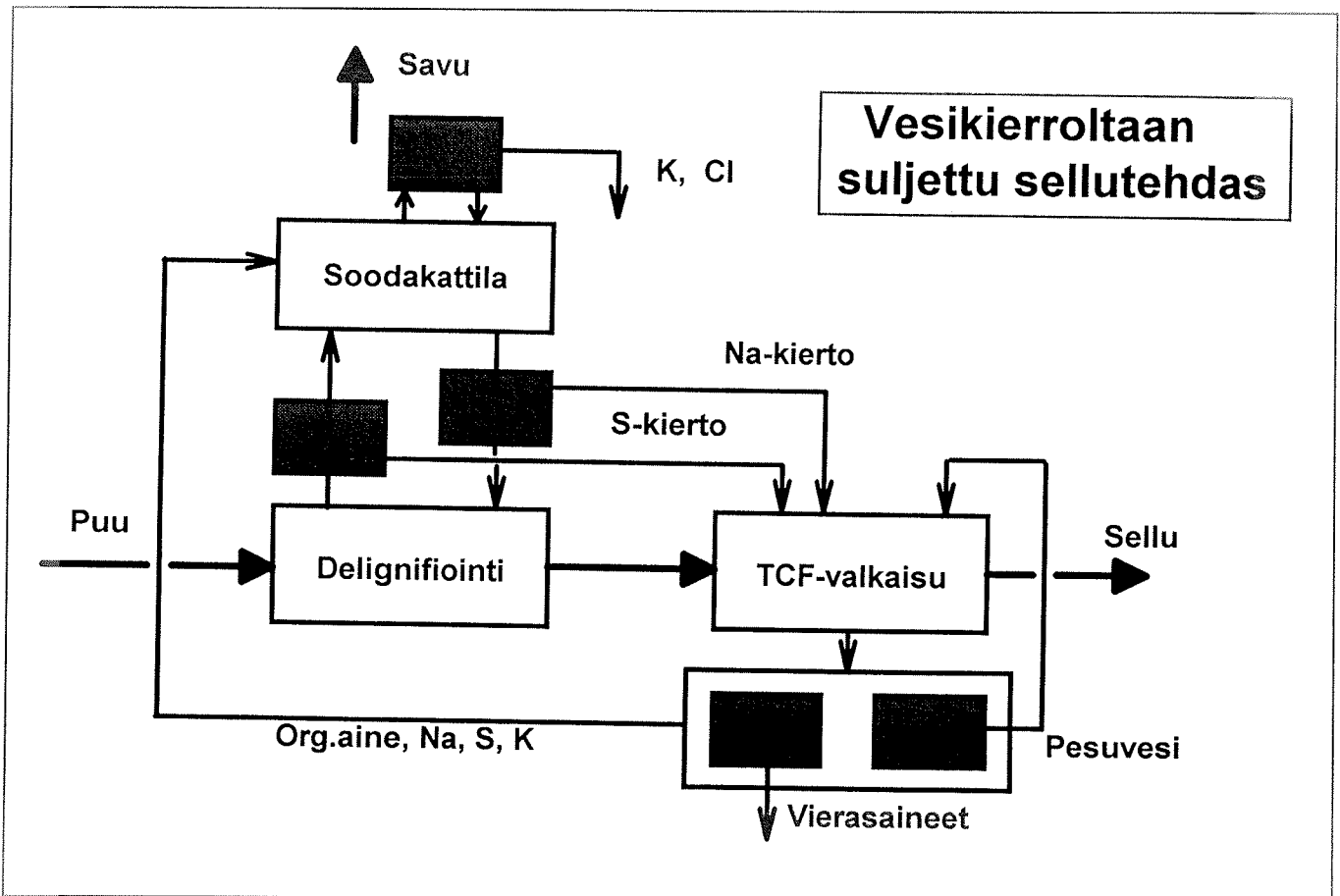
Kuva 5. Piin poistaminen TCF-valkaisun suodoksista magnesiumisuolaa lisäten.

6. SULJETUN TEHTAAN KONSEPTTI

Projektin ollessa vielä kesken ei voida lopullisesti vertailla eri vaihtoehtoja kierrättää valkaisuudosten sisältämää kuiva-ainetta tehtaan kemikaalikiertoon. Kuitenkin projektin kuluessa on hahmottunut eräs kuva suljetusta tehtaasta, joka on esitetty kuvassa 6. Kuvan mukaiset lisäprosessit - mustat laatikot - olisivat tarpeen, jotta vesikierrroltaan suljetun tehtaan kiinteiden jätteiden määrä pidettäisiin mahdollisimman pienenä. Siten ennenkuin voitaisiin puhua suljetusta tehtaasta pitäisi ratkaista seuraavien prosessien toteutus:

- valkaisuudosten puhdistus puhtaan veden tuottamiseksi
- mustalipeähaihdutuksen lauhdeiden puhdistus kelvollisiksi käyttää valkaisuissa
- vierasaineiden erotus
- kaliumin ja kloorin erotus
- orgaanisen aineen hävitys
- valkaisukemikaalien regenerointi.

Valkaisuvesien sulkemisessa voidaan päätyä konseptiin, jossa ei tarvitse toteuttaa näitä kaikkia, mutta mitä ilmeisimmin monta uutta prosessia tarvitaan.



Kuva 6. TCF-sellua tekevä tehdas, jossa valkaisuvedet on suljettu.

Vesikierroltaan suljettu tehdas. Mustalipeän haihdutus ja poltto

1 JOHDANTO

Valkaisimo on sellutehtaan merkittävin vedenkuluttaja. Vesikiertoa suljettaessa joudumme käsittelemään suurta määrää likaista vettä siten, että syntyy uutta, käyttökelpoista vettä. Keskustelussa on näkynyt muutamia vaihtoehtoja, joille kaikille yhteistä on se, että ne vaikuttavat sellutehtaan kemikaalikiertoon. KCL:n projektissa on ehkä pääpaino pantu sellaiselle ratkaisulle, jossa valkaisuvedet esihaihdutetaan erillisessä haihduttimessa ja ns. konsentraatti yhdistetään laihaan mustalipeään edelleen haihdutettavaksi ja poltettavaksi. Toivomus on, että esihaihdutuksessa syntyvä lauhde olisi riittävän puhdasta kelvataksaan valkaisuun, tai puhdistettavissa.

2 VALKAISUN SUODOKSET

Vaikka valkaisu raakavedenkulutusta on vähennetty sulkemalla vesikiertoja valkaisimon sisällä, syntyy modernissakin laitoksessa noin 20 m³ jätevettä per sellutonni. TCF valkaisussa syntyy sekä happamia että emäksisiä suodoksia. Niiden kuiva-ainepitoisuudet ovat 0,3 - 0,7 % ja niiden edustama kuiva-ainevirtaama oletetaan olevan noin 3 % alkalisilla suodoksilla, noin 5 % happamilla suodoksilla ja noin 7 - 8 % yhteensä mustalipeän kuiva-ainevirtaamasta. Epäorgaanisen aineen osuus on suuri; kuiva-aineen tuhka on 70 - 80%. Liitteestä 1 ilmenee suodosten mukana tulevien epäorgaanisten aineiden määrät. Analyysit perustuvat Kaskisten tehtailla vuonna 1994 tehtyihin koeajoihin.

Suodoksista määritettiin kiehumapisteen nousu ja kalorimetriset lämpöarvot sekä muutamista myös viskositeetti. Kiehumapisteen nousut olivat matalammat kuin mustalipeällä, mikä viittaa siihen, etteivät epäorgaaniset suolat ole pysyneet liuoksessa, kun suodosten kuiva-aine on nostettu. Kalorimetriset lämpöarvot olivat matalat, 3,9 - 5,2 MJ/kg ka. Alkalisten suodosten viskositeetti oli samalla tasolla kuin mustalipeän koivun kohdalla, mutta huomattavasti matalampi havupuuta valkaistaessa.

Kaskisten tehtailla tehtiin esihaihdutuskokeita Ahlströmin ZEDIVAP-laitteella. Pyrittiin noin 10 %:n kuiva-aineeseen haihdutettaessa erikseen happamia ja emäksisiä vesiä sekä näiden yhdistelmiä. Haihdutettiin sekä koivu- että havupuusuodoksia. Tavoitteeseen päästiin yleensä ilman kohtuuttomia ponnisteluja. Lauhteet olivat riittävän puhtaita valkaistun sellun pesuun, kun niissä ollut metanoli oli poistettu strippaamalla.

3 SUODOSTEN YHDISTÄMINEN MUSTALIPEÄÄN. HAIHDUTUSKOKEET

Liitteestä 1 havaitaan, että valkaisu-suodosten tuominen haihduttamolle nostaa merkittävästi mustalipeän kalsium-, magnesium- ja piipitoisuutta. Näiden voidaan olettaa aiheuttavan vaikeuksia seoksia haihdutettaessa. Saostumispisteessä ei kuitenkaan mitään olennaista eroa syntynyt, mutta kokeessa, jossa lisättiin liioitellusti kalsium- ja magnesiumsuoloja, havaittiin noin 40 %:n kuiva-aineessa, että vastuslangoille syntyi kalsiumpitoista kerrostumaa. Tästä voidaan päätellä, että lisääntynyt kalsiummäärä saattaa aiheuttaa kerrostumien muodostumista lämpöpinnoille.

Liitteessä 2 on muutaman seoksen kiehumapiste- ja viskositeettikäyrät.

Muista haihdutukseen vaikuttavista seikoista mainittakoon oksalaatti sekä EDTA ja DTPA-kompleksien epästabilisuus.

Puun mukana tulee prosessiin 0,3 - 1 kg oksalaattia per massatonni. Happidelignifioinnissa ja ECF-tai TCF-valkaisussa oksalaattia arvioidaan syntyvän noin 2 kg per massatonni. Kokeellisesti löydettiin kuitenkin mustalipeässä 2,5 - 5 kg oksalaattia per sellutonni. Oksalaatti on siis pyörinyt jo jonkun aikaa mustalipeässä ilman, että sen vaikutusta olisi havaittu. Sen merkitys kasvanee kuitenkin, jos kalsiumin määrä lisääntyy; jos oksalaatti joutuu mustalipeään kalsiumoksalatina, likaantumisongelmia on odotettavissa lisääntyvänä kalsiumkarbonaatin kerrostumisena lämpöpinnoille.

Metalli-ionien sitomiseksi käytetään valkaisussa EDTA:ta ja DTPA:ta. KCL:n tutkimuksessa ilmeni, etteivät muodostuneet kompleksit ole pysyviä joutuessaan korotettuun lämpötilaan ja emäksisiin oloihin varsinkaan sulfidin läsnäollessa. Näin ollen kuiduista poistetut metallit, esim. rauta ja mangaani, saostuvat kun valkaisu-suodokset yhdistetään mustalipeään.

5 POLTTO

Polton kannalta hankalimmat ionit lienevät kalium ja kloridi. Kumpikin vaikuttaa sulan sulamispistettä alentavasti. Vaikutusta on tutkittu Åbo Akademin matemaattista mallia käyttäen. Tavoitteena on selvittää mille tasolle kalium- ja kloridipitoisuudet saavat nousta mustalipeässä ennenkuin poltto-ominaisuudet olennaisesti muuttuvat. Tämän takia on määritetty eri kalium- ja klooritasolla syntyvän carry-oversuolan ja lentotuhkan sulamisominaisuudet. Liitteessä 3 on esimerkki kaliumin ja kloorin vaikutuksesta suolan tahmopisteeseen T_{15} . Tulosten käsittely on vielä kesken.

Kaliumin ja kloorin määrien vähentämiseksi on esitetty sähkösuodatinsuolan fraktion poistamista prosessista. Hyvää, selektiivistä menetelmää kaliumin erottamiseksi natriumista ei näytä olevan.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUKSET

Tämän hetken tietämyksen mukaan tulee vesikierron täydellinen sulkeminen aiheuttamaan suuria vaikeuksia kemikaalien talteenotossa. Kehitys kulkee kuitenkin eteenpäin ja ongelma toisensa jälkeen löytää ratkaisunsa. Mielestäni pitäisi nyt keskittää voimat seuraaviin jatkoprojekteihin

Valkaisun vesimäärien pienentämiseen. Jos määrä on tarpeeksi pieni, ei jäteliemiä tarvitse haihduttaa vaan koko vesimäärä sopii esim. liuottajaan.

Klooridin poistoon kierroksesta.

Luotan siihen, että kemikaalikierto toimii tulevaisuuden jätevedettömässä sellutehtaassa.

KCL:N SELOSTEET JA TIEDOTTEET

Väänänen,V: EDTA:n ja DTPA:n stabilisuus korkeissa lämpötiloissa ja voimakkaasti emäksisissä oloissa. Tiedote 134, 1994

Pöllänen,T: TCF-valkaisun suodosten vaikutus mustalipeän koostumukseen ja ominaisuuksiin. Seloste 2166, 1995

Kuusio,M., Kottila,M., Pöllänen,T., Välttilä,O.: TCF-valkaisun suodosten haihduttaminen. Seloste 2183, 1995

Pöllänen,T., Välttilä,O.: Oksaalihapo sellunvalmistusprosessissa. Seloste 2194,1995

Söderhjelm,L., Backman,R.: Valkaisusuodosten vaikutus mustalipeän poltto-ominaisuuksiin. Tulee laadittavaksi.

1995-09-29

TCF - SUODOSTEN MUKANA TULEVAT EPÄORGAANISET AINEET

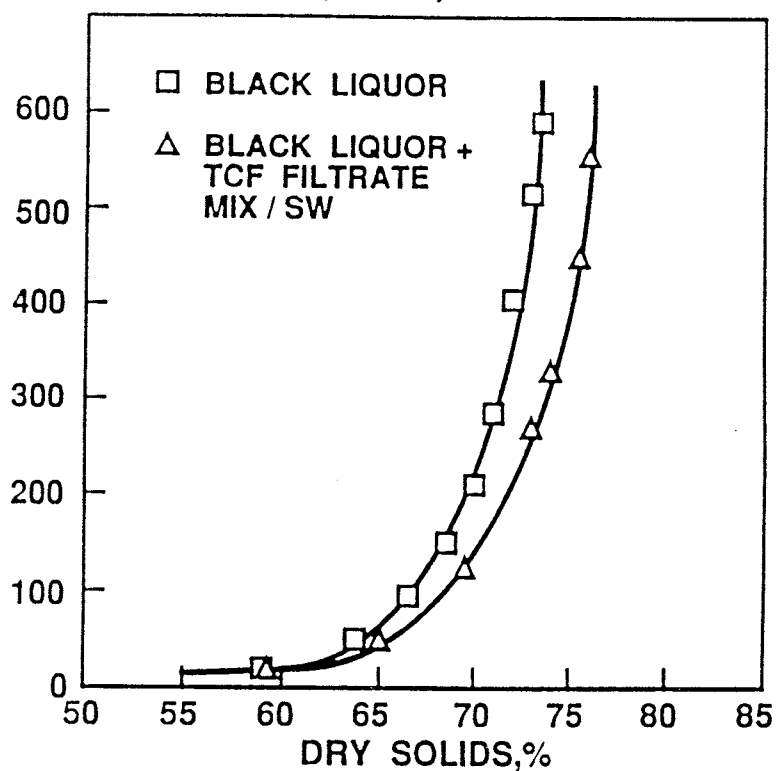
	MUSTA-LIPEÄ	VALKAISUSUODOKSET					
		ALKALISET		HAPPAMAT		SEOKSET	
		havu	koivu	havu	koivu	havu	koivu
kuiva-aine, kg/ADT	n. 1700	59	41	89	88	137	129
Na, kg/ADT	306 - 374	15	11	22	20	34	32
K, kg/ADT	17 - 51	0,06	0,03	0,1	0,4	0,2	0,2
SO ₄ , kg/ADT	27 - 50*	19	12	42	40	61	54
CO ₃ , kg/ADT	69 - 127*	4,3	3,1	0,6	<0,6	2,9	0,8
Cl, kg/ADT	3,4 - 15	0,5	0,4	0,7	0,6	1,2	0,9
C ₂ O ₄ , kg/ADT		0,7	0,7	0,8	0,8	1,2	0,4
Ca, g/ADT	68 - 425	100	61	992	1114	1012	999
Mg, g/ADT	51 - 476	488	146	685	769	867	954
Al, g/ADT	12 - 85	3,1	0,5	21	36	22	14
Si, g/ADT	221 - 646	103	25	215	210	232	185
P, g/ADT	102 - 255	11	3,6	35	32	22	41
Ba, g/ADT		1,6	1,2	6,5	4,5	6,7	9,8
B, g/ADT	34 - 136	-	-	-	-	-	-
Cu, g/ADT	1,7 - 5,1	0,2	0,0	1,5		0,5	
Fe, g/ADT	10 - 75	1,3	0,3	16	22	15	13
Mn, g/ADT	68 - 170	9,0	0,8	34	38	26	37
V, g/ADT	1,7 - 153						
Zn, g/ADT	1,7 - 39	1,7	0,3	11	15	7,3	14

* luvut saatu "Mustalipeän polttotekniset ominaisuudet" selvityksestä.

VALKAISUSUODOKSEN VAIKUTUS MUSTALIPEÄN VISKOSITEETTIIN

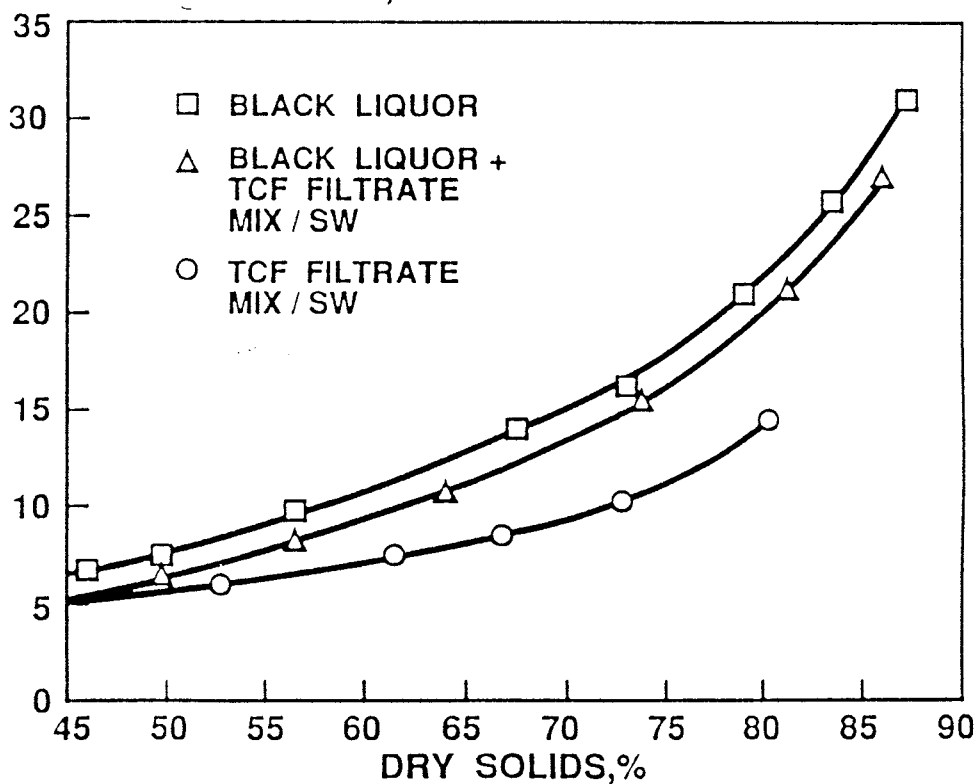
LIITE 2

VISCOSITY, mPa·s, 115°C, D=500



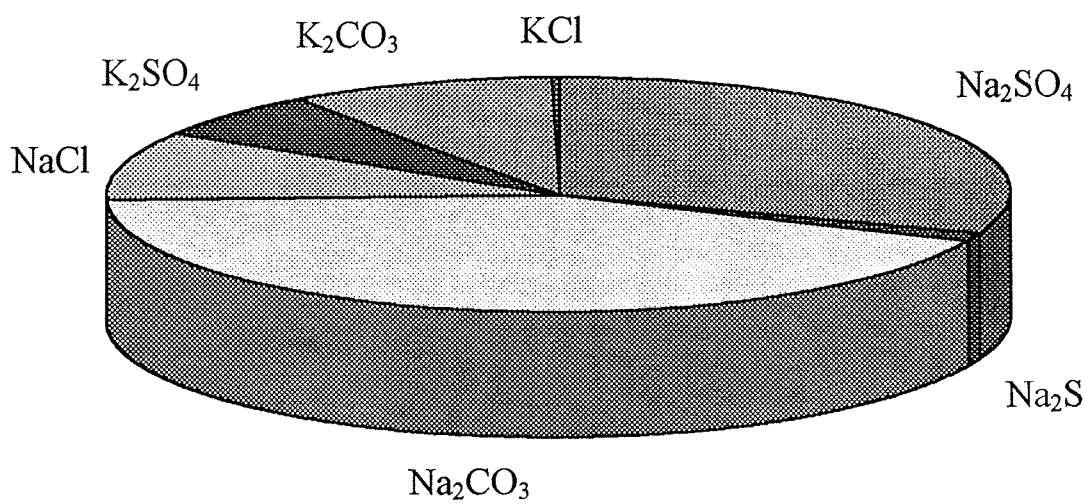
VALKAISUSUODOKSEN VAIKUTUS MUSTALIPEÄN KIEHUMISPISTEEN NOUSUUN

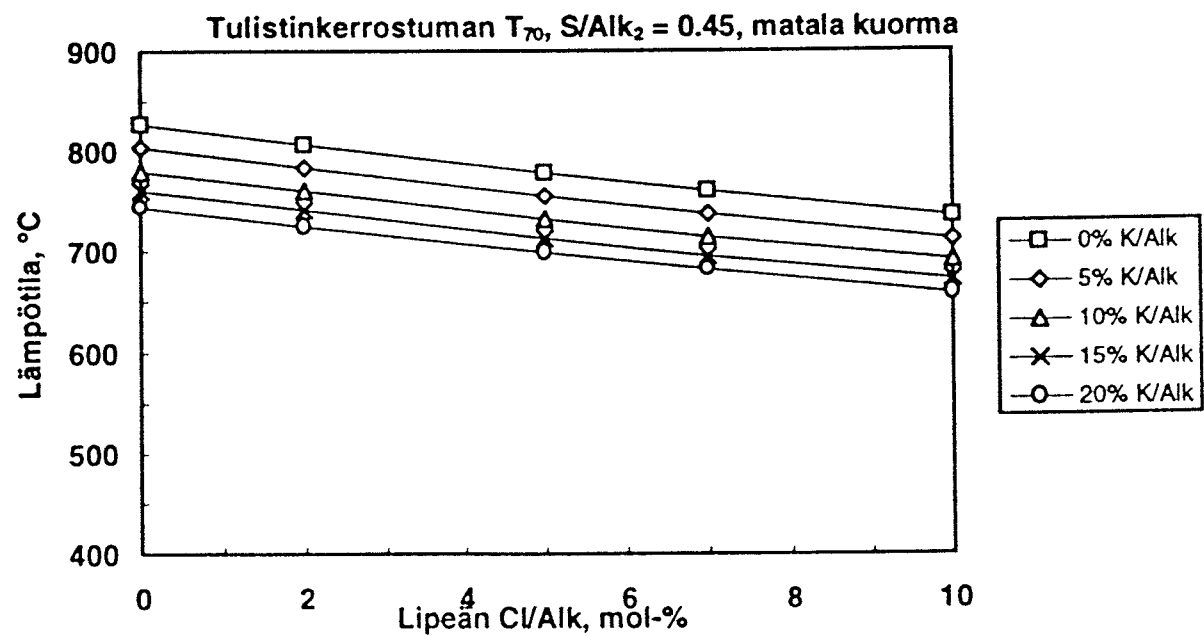
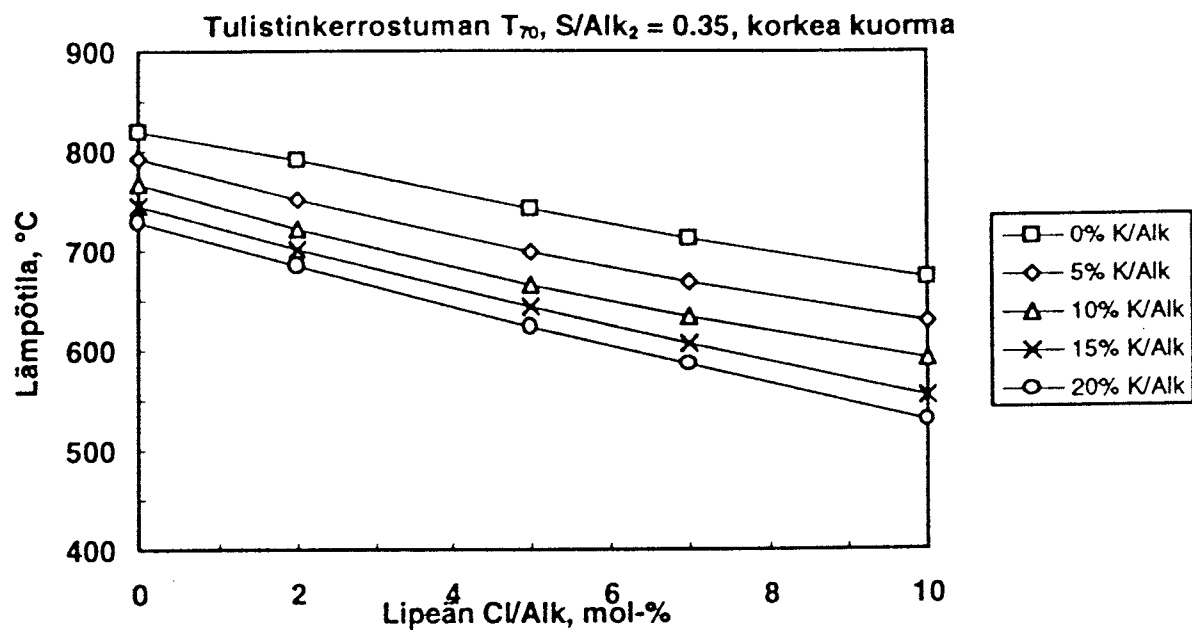
BOILING POINT RISE, °C



$S/Na_2 = 0.35$, korkea kuorma, $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$

$K/(Na+K)=10\%$, $Cl/(Na+K)=5\%$





Carry-over suolan valumispiste T_{70}

Nitrogen Chemistry in Black Liquor Combustion

Typpikemia mustalipeän poltossa

Työhön osallistuneet

Mikko Hupa	vastaava johtaja
Mikael Forssén	projektipäällikkö
Pia Kilpinen	kinettinen mallitus
Peter Hellström	diplomityö
Ralf Pettersson	diplomityö

Rahoittajat

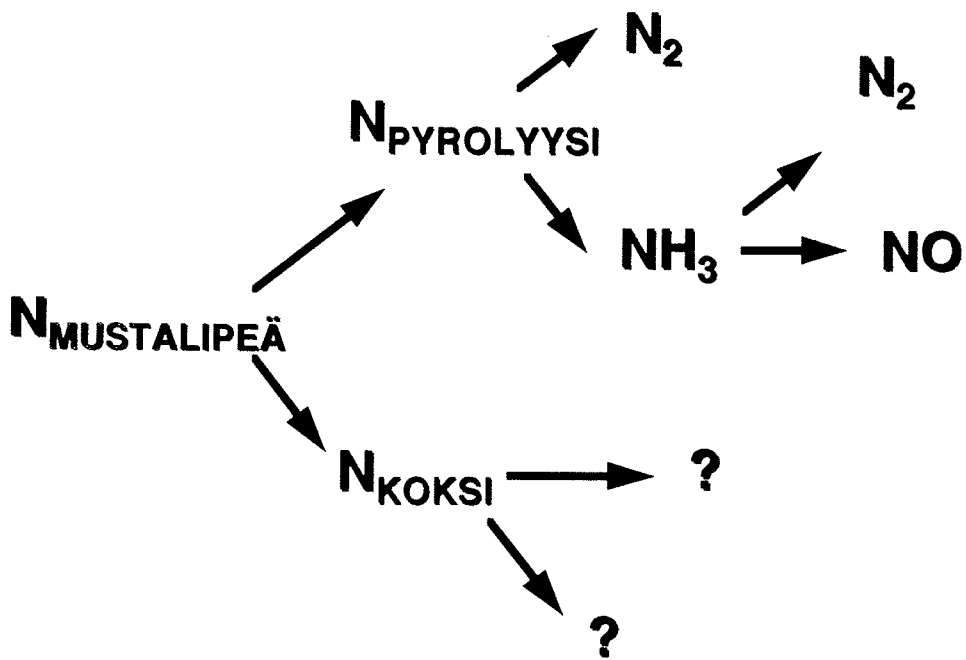
LIEKKI 2

Soodakattilayhdistys ry

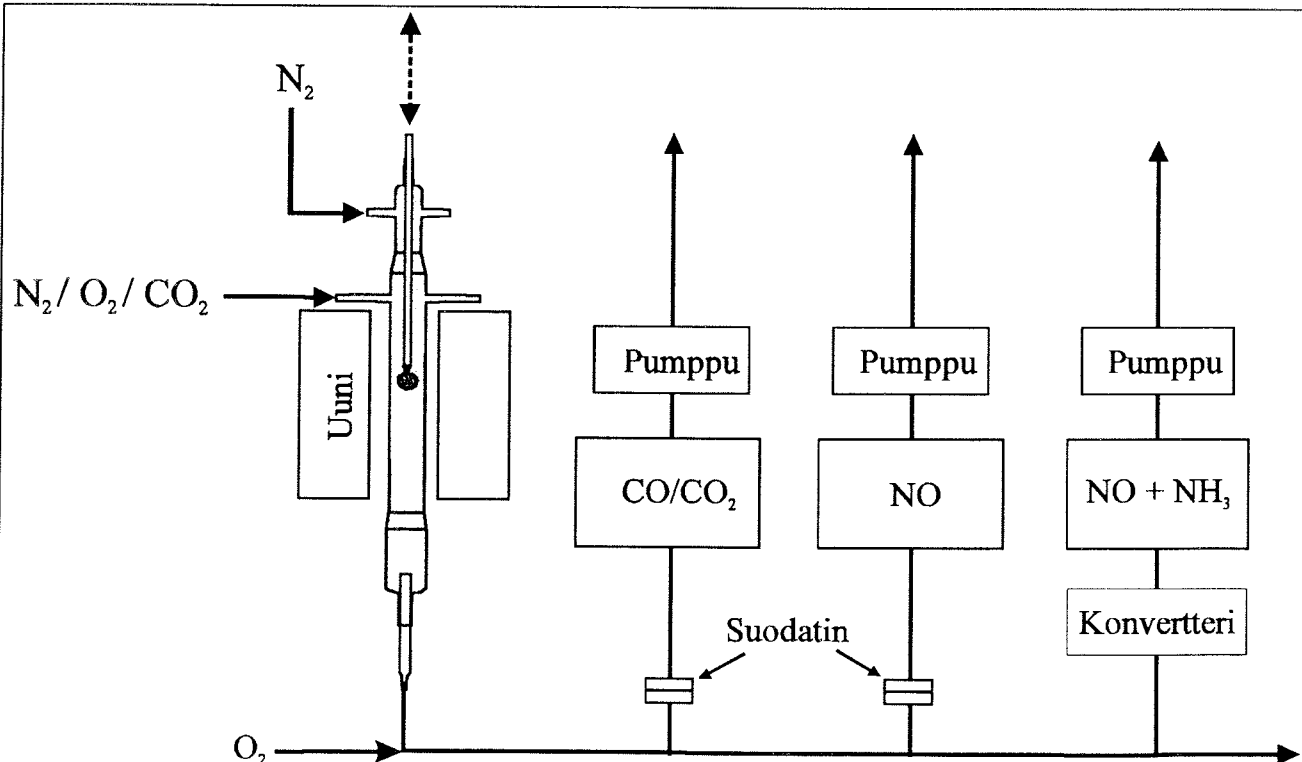
Tampella Power Oy

A.Ahlström Osakeyhtiö

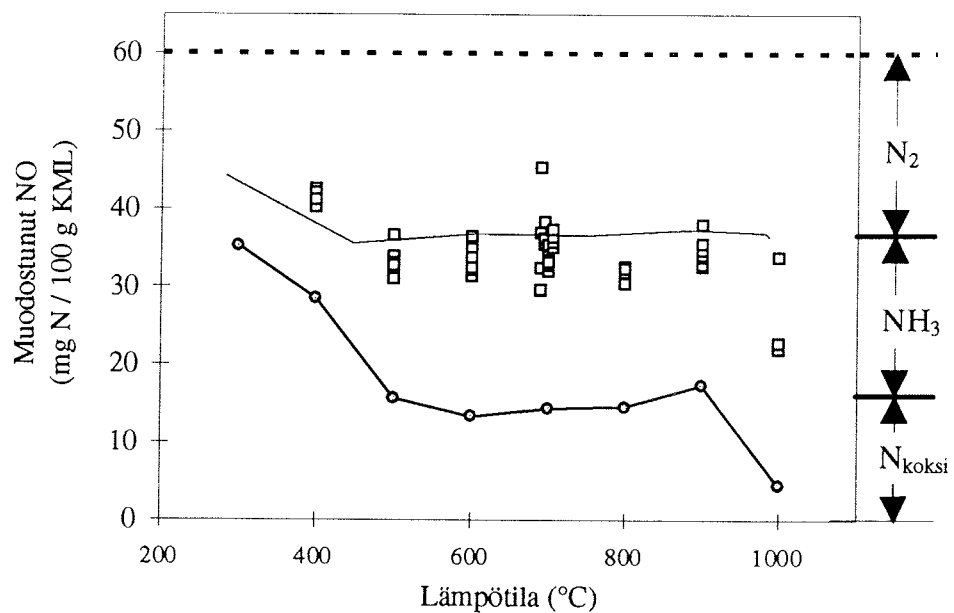
Mustalipeätynen reaktioreitit



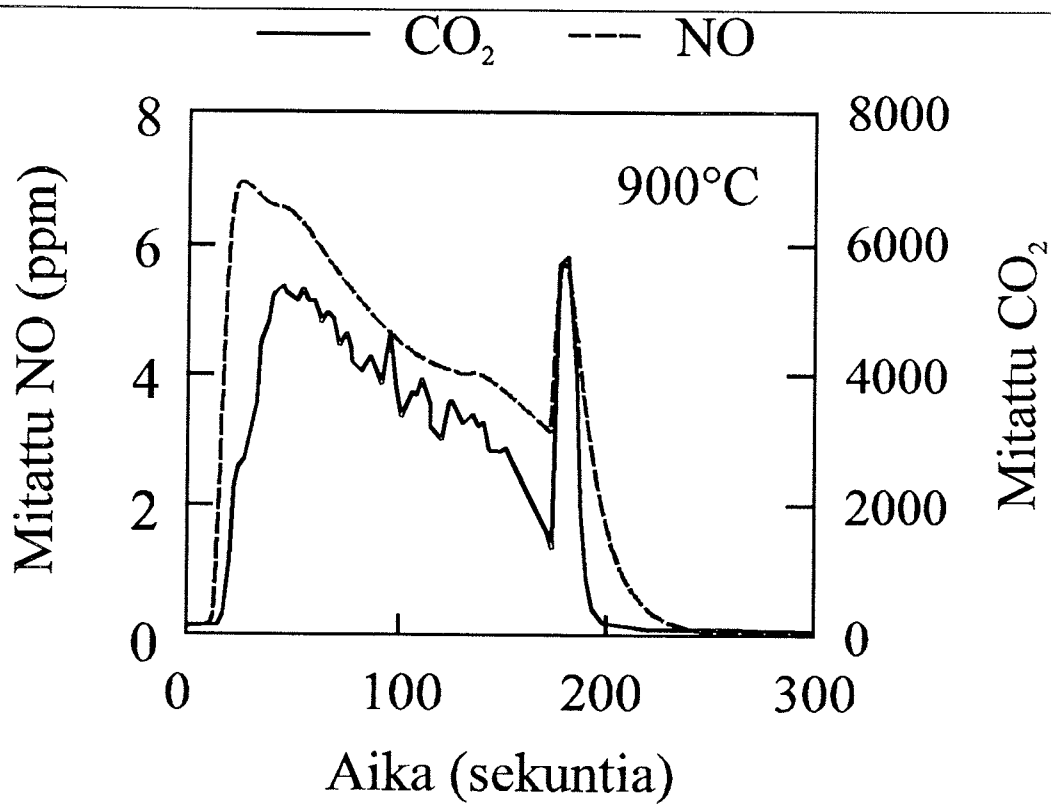
Kuva 1



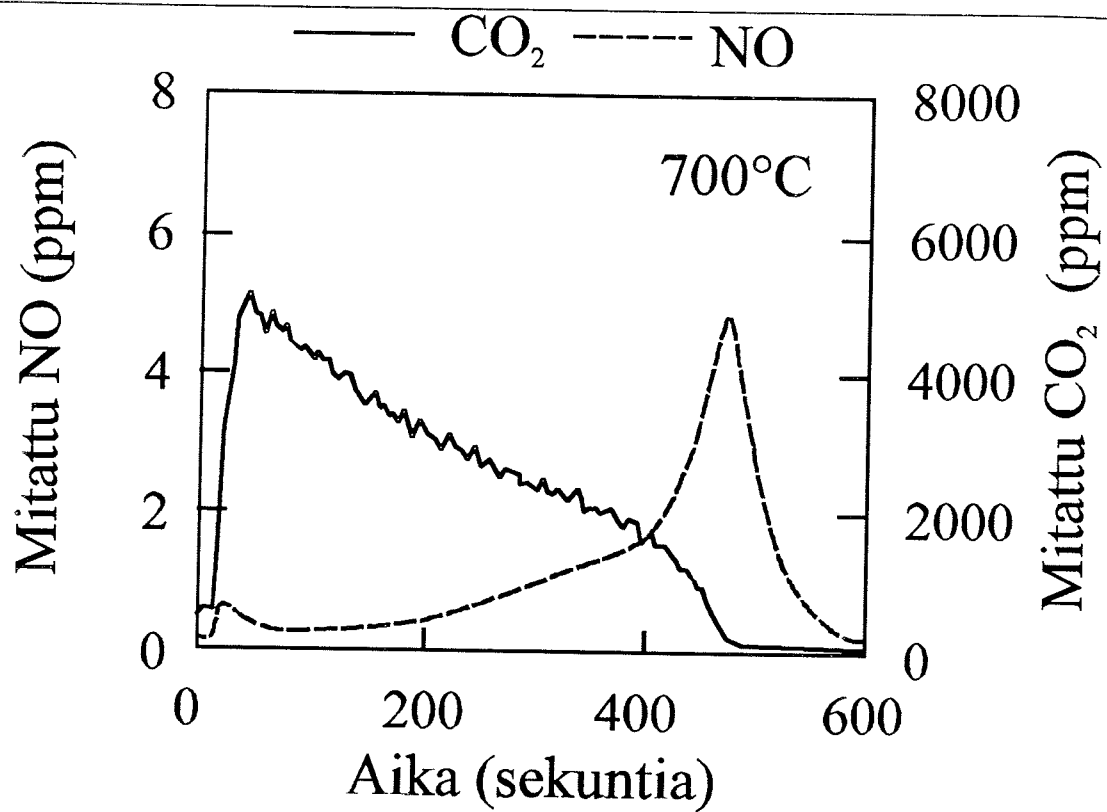
Kuva 2



Kuva 3

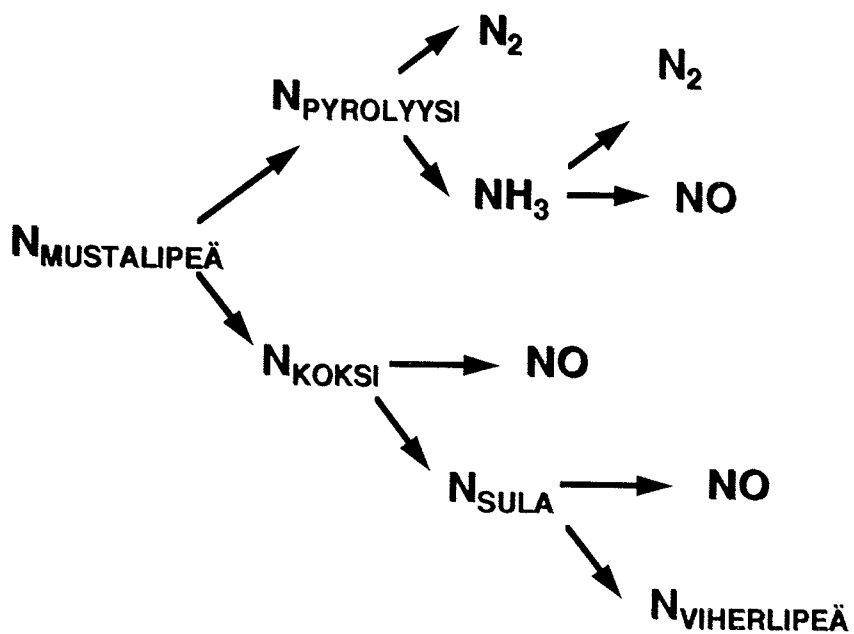


Kuva 4

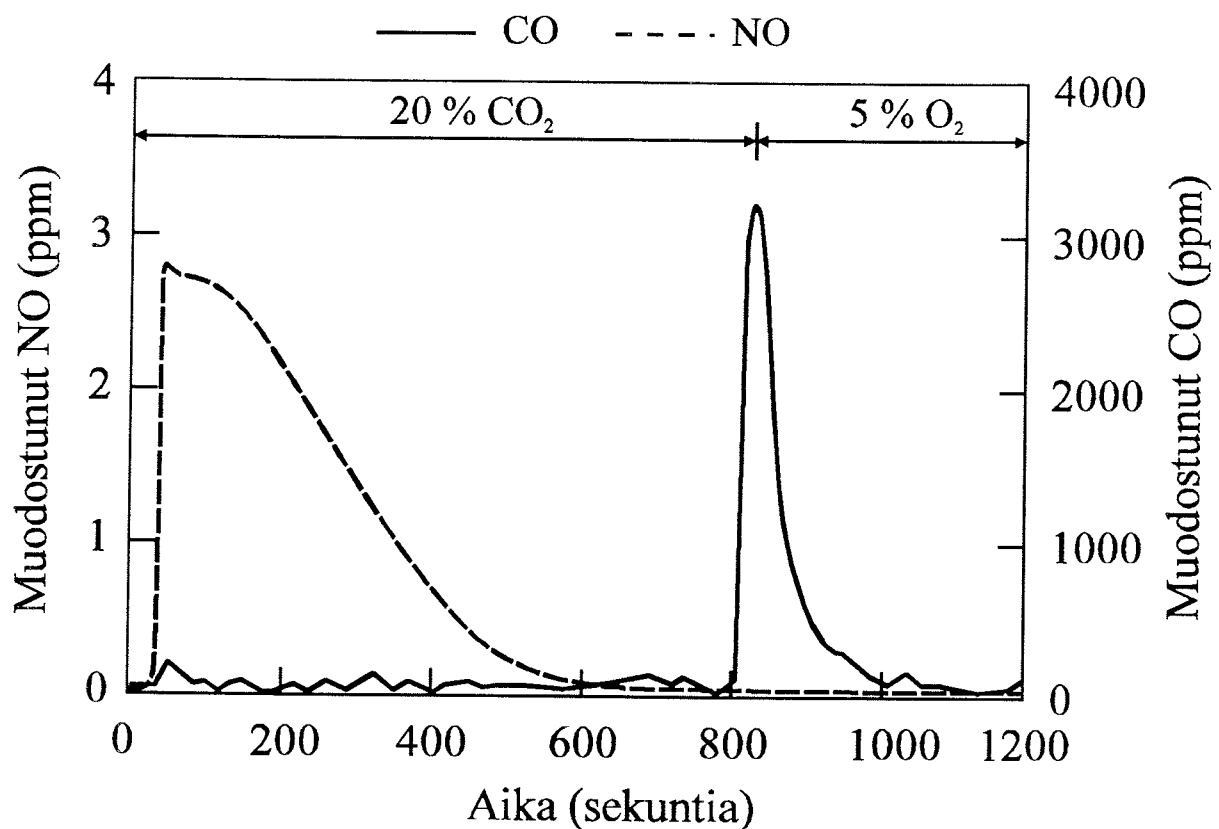


Kuva 5

Mustalipeätyn reaktioreitit



Kuva 6



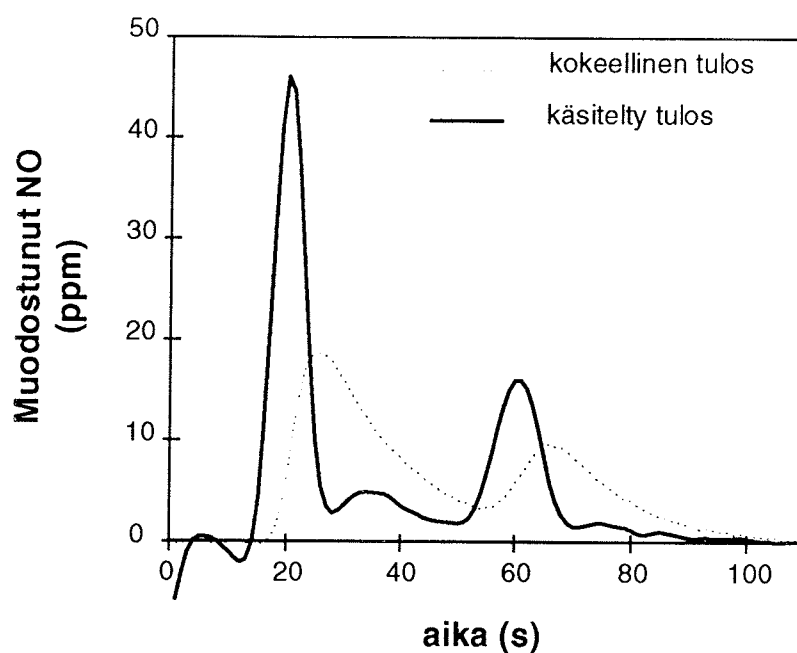
Kuva 7

Johtopäätökset

1. Koksen nopeassa hapetuksessa NO muodostuu samanaikaisesti kuin hiili vapautuu
2. Hitaassa hapetuksessa NO muodostuminen tapahtuu hiilen vapautumista myöhemmin
3. NO:n muodostuminen ei lämpötilasta riippuvainen ($T < 950^{\circ}\text{C}$)
4. Koksinkaasutuksessa, $< 800^{\circ}\text{C}$, typpi jää sulajäännökseen
5. Kaasutusjäännösoässä oleva typpi vapautuu hapetuksessa NO:na

Kuva 8

NO-muodostumistendenssitesti



Kuva 9

Mustalipeät...

Nro		Keitto	Alkuperä	Typpi (% ka:sta)
1	Sulfaatti	havupuu	Skandinavia	0.06
4	Sulfaatti	havupuu	Skandinavia	0.06
5	Sulfaatti	havupuu	Skandinavia	0.07
6	Sulfaatti	havupuu	Skandinavia	0.07
7	Sulfaatti	havupuu	Skandinavia	0.07
8	Sulfaatti	havupuu	Skandinavia	0.07
9	Sulfaatti	havupuu	Skandinavia	0.07
2	Sulfaatti	lehtipuu	Skandinavia	0.07
10	Sulfaatti	lehtipuu	Skandinavia	0.08
23	Sulfite	lehtipuu	Skandinavia	0.20

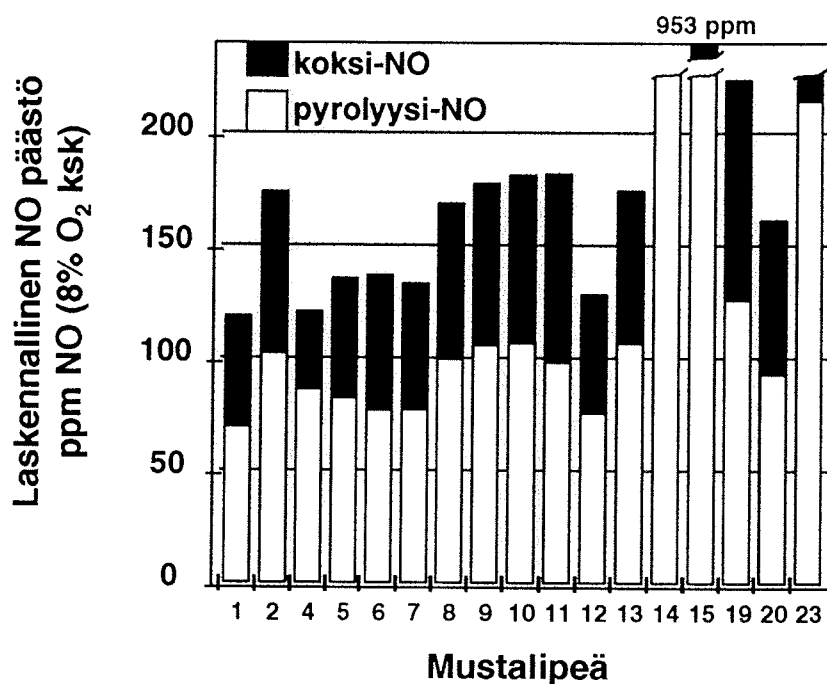
Kuva 10

... Mustalipeät

Nro	Keitto	Alkuperä	Typpi (% ka:sta)
12	Sulfaatti	havupuu	P-Amerikka
13	Sulfaatti	havupuu	P-Amerikka
20	Sulfaatti	havupuu	P-Amerikka
19	Sulfaatti	havu/lehti	P-Amerikka
11	Sulfaatti	eukalyptus	P-Amerikka
14	Sooda	bagassi	P-Amerikka
15	Sooda	olki	Kaukoitä

Kuva 11

NO-muodostumistaipumus



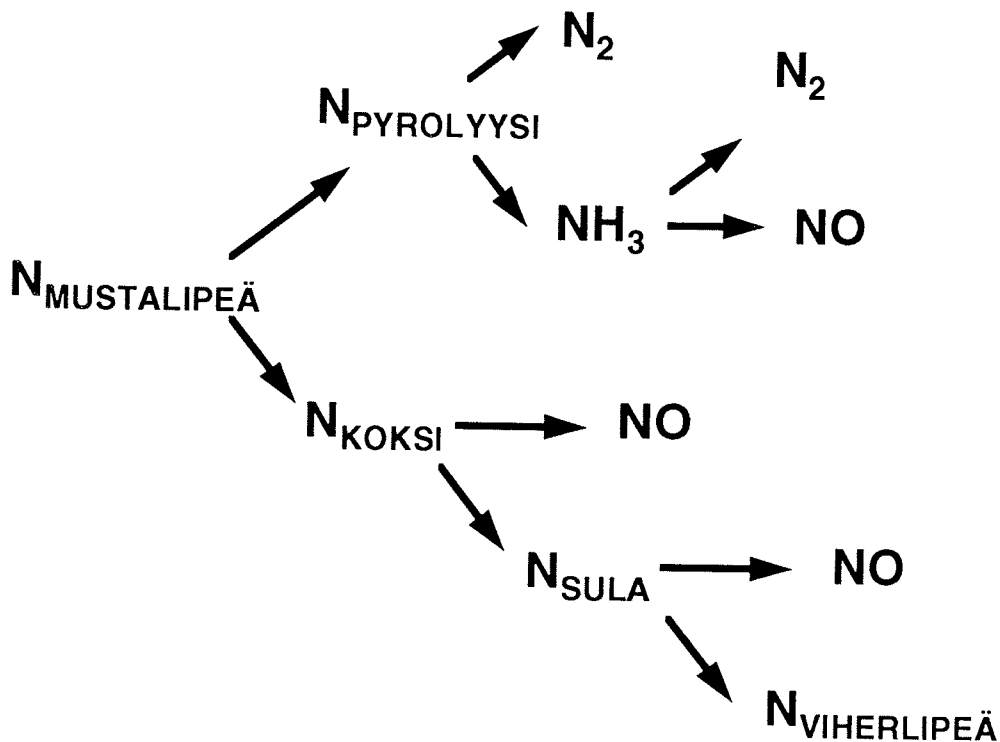
Kuva 12

Lipeitten NO:n muodostamistendenssi - johtopäätöksiä

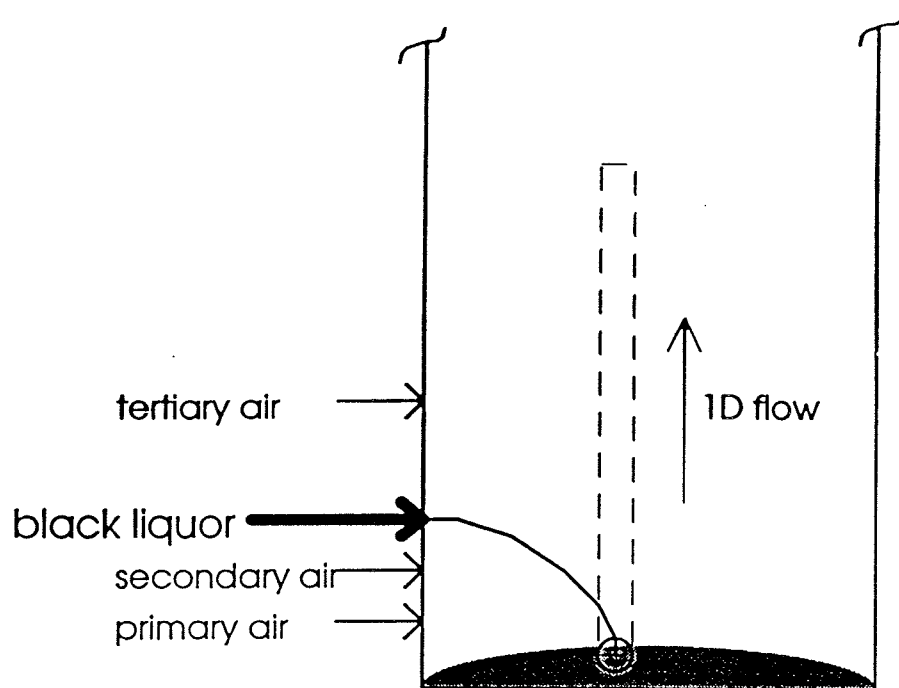
- Typen käyttäytyminen poltossa samantapainen kaikille lipeille
- Voidaan jakaa pyrolyysi-NO:ksi sekä koksi-NO:ksi
- Mustalipeän NO:n muodostamistendenssi selville kokeellisesti yksittäispisarapoltolla
- Yksittäispisarapoltossa mitattu NO:n määrä samoissa lukemissa kuin soodakattilan NO emissiot.

Kuva 13

Mustalipeätyypen reaktioreitit



Kuva 14



Kuva 15

Typpikemian kineettinen mallitus (I)

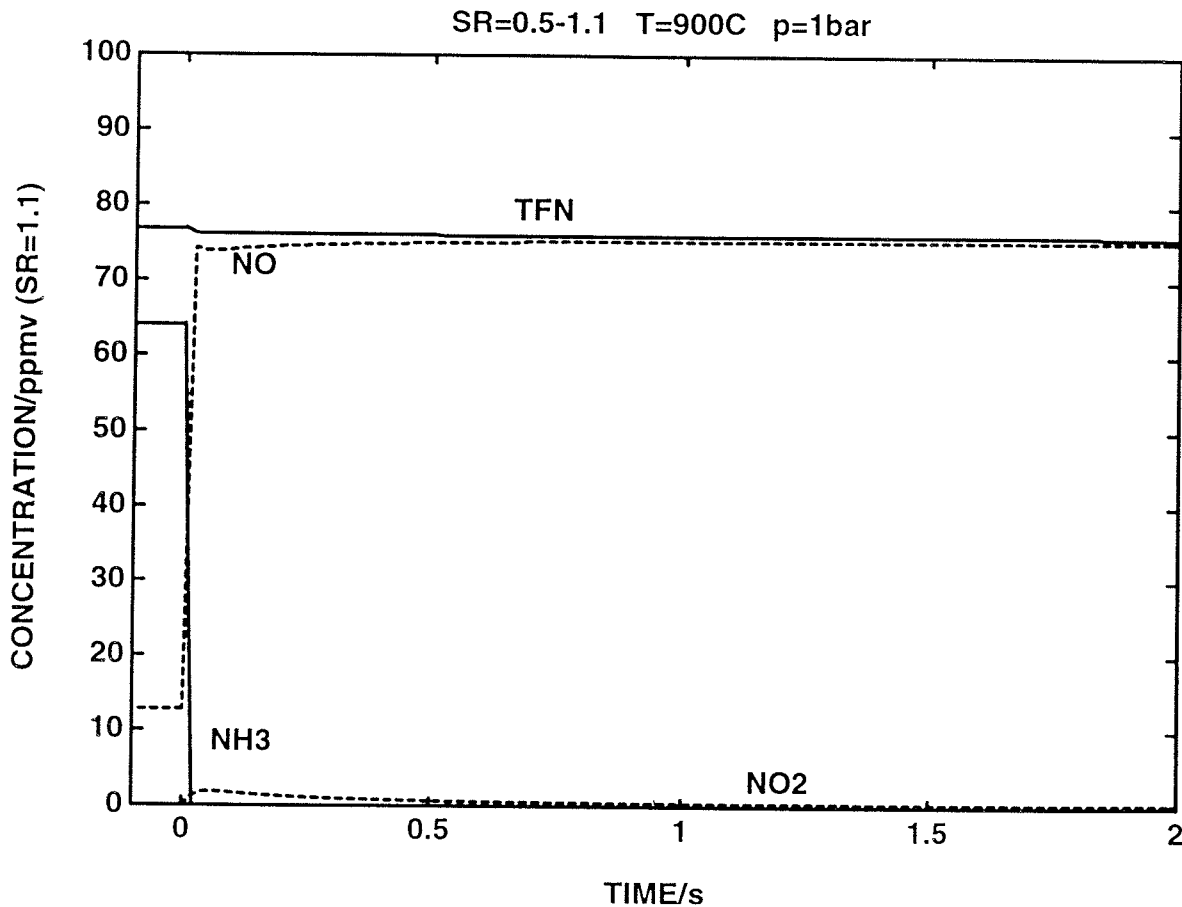
- perustuu kemian kuvaukseen alkeisreaktioiden avulla
- virtaus/sekoitus: ideaalireaktori (esim. tulppavirtausreaktori)
- lähtötiedot:
 - alkeisreaktiolista
 - kineettiset ja termodynaamiset vakiot
 - pitoisuudet sisään tuleville yhdisteille
 - lämpötila, paine (joko suoraan tai energiatase ratkaisemalla)
- tuloksena:
 - yhdisteitten pitoisuus reaktioajan funktiona
 - lämpötila ja paine (jos energiatase ratkaistaan)

Kuva 16

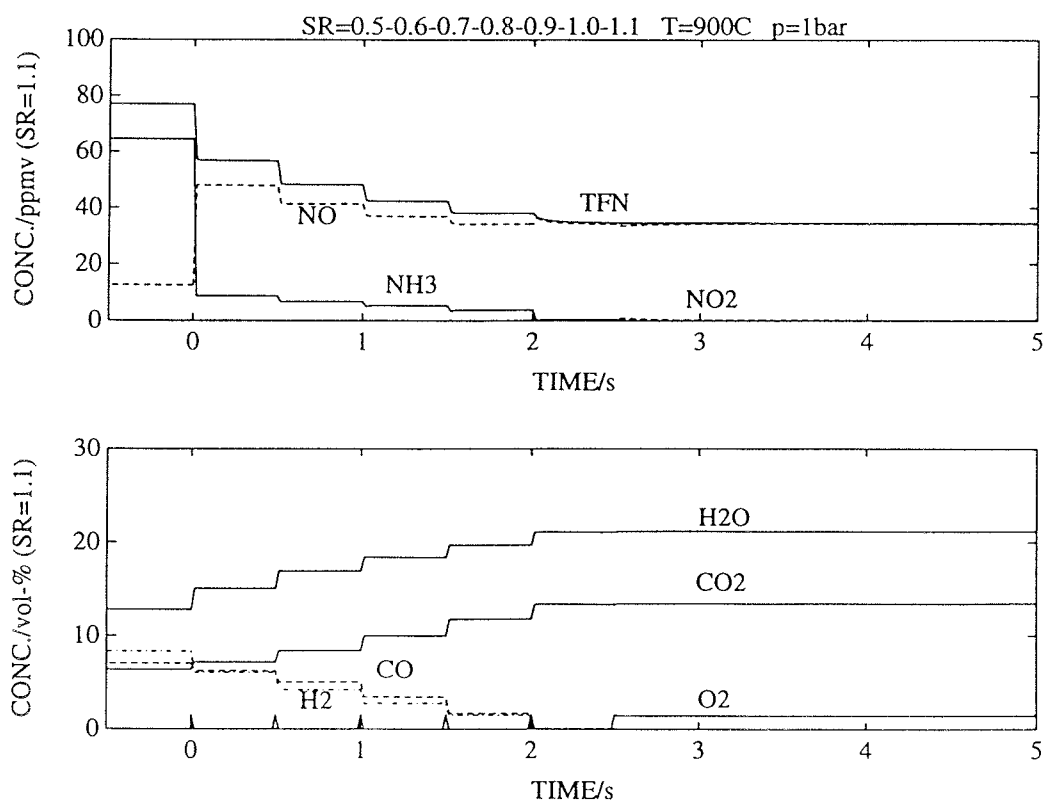
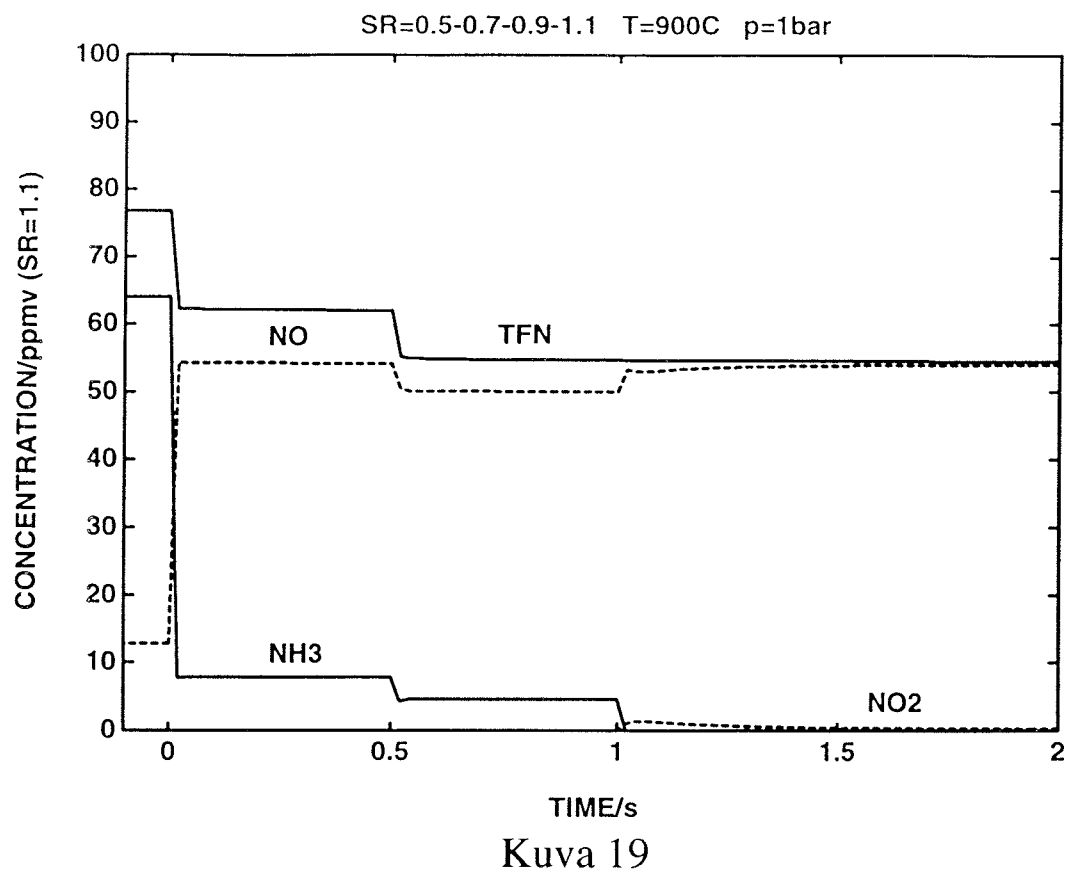
Typpikemian kineettinen mallitus (II)

- kaasufaasipalamisen yhteydessä tapahtuva NO-muodostus
- 250 alkeisreaktion tietokanta:
 - CH_4 , C_2H_6 : hajoaminen/hapettuminen (pääpalaminen)
 - N_2 : hapettaminen happiatomeilla ("terminen NO ")
 - HCN , NH_3 hapettuminen ("polttoaine- NO_x ")
("thermal de NO_x , SNR")
 - typpi/hiilivety -reaktiot ("nopea- NO_x ")
("reburning")
- tietokannan jatkuva päivitys ja testaus (Glarborg/DTU, Miller/Sandia)

Kuva 17



Kuva 18



Pyrolyysikaasujen hapettuminen - mallilaskelmien yhteenveto

Ilman syöttö	Lämpötila/ C	Hiilivedyt / %	NO _x (out)/ppm
1 vaih.	900	0	75
4 vaih.	800	0	42
4 vaih.	900	0	55
4 vaih.	1000	0	62
4 vaih.	1100	0	64
4 vaih.	1200	0	64
4 vaih.	1200-60·(t/s)	0	64
4 vaih.	1100-60·(t/s)	0	64
6 vaih.	800	0	22
6 vaih.	900	0	35
6 vaih.	800	1	33 (+7 HCNO!)
6 vaih.	900	1	41 (+8 HCNO!)

(Laskelmien lähtötilanne: SR = 0,5, 64 ppm NH₃, 13 ppm NO, molempien ppm-luvut korjatt ilmakertoimelle SR = 1,1)

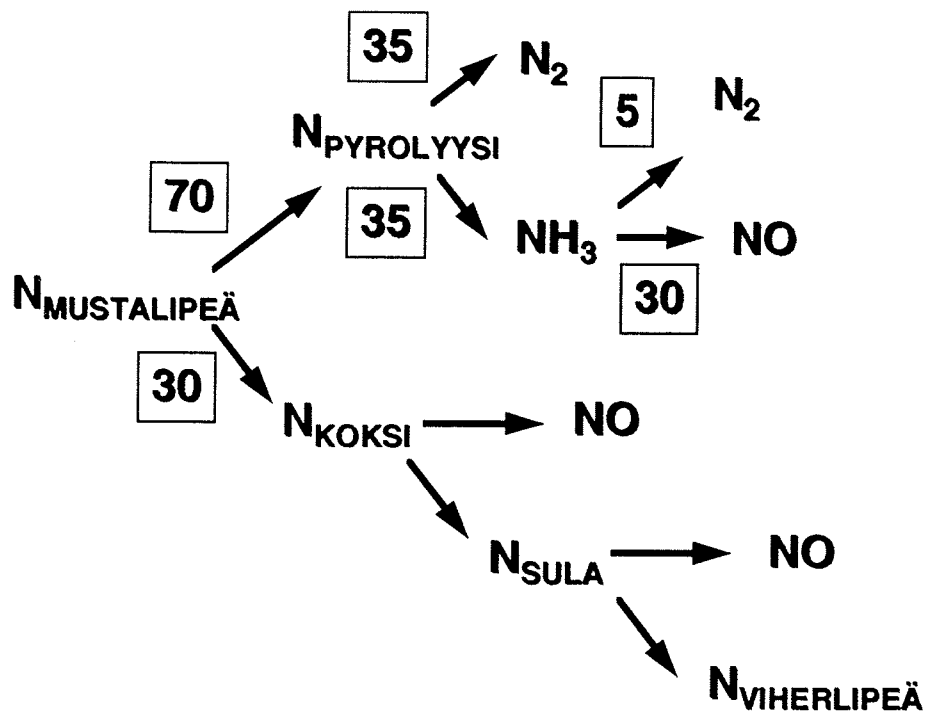
Kuva 21

Pyrolyysikaasujen ammoniakin hapettuminen - johtopäätöksiä

- NH₃ hapettuu lähes täydellisesti NO:ksi, jos hapetusilma lisätään kerralla
- NH₃:n konversio NO:ksi pienenee, jos
 - hapetusilma syötetään useassa vaiheessa
 - lämpötila hapetuksen yhteydessä pidetään alhaisena (800-900°C)
- Laskelmien mukaan NH₃:n konversio NO:ksi saatiin alle 50 %, kun ilma syötettiin kuudessa vaiheessa ja lämpötila oli 800°C.
- Palamattomien hiilivetyjen läsnäolo vaikuttaa olennaisesti yo. tuloksiin.

Kuva 22

Mustalipeätyn reaktioreitit



Kuva 23

YHTEENVETO

Kuvio 23 esittää yhteenvetona mustalipeän typen reaktioreittejä soodakattilassa niin kuin ne tämän työn tulosten pohjalta ovat selvinneet.

Pyrolyysin yhteydessä noin kaksi kolmasosaa polttoaineen tyyppistä, N_{ML} , vapautuu kaasumaisina yhdisteinä, $N_{\text{PYROLYYSI}}$. Näistä yhdisteistä tyypillisesti puolet on reaktiivisessa muodossa eli ammoniakkinä, ja toinen puoli molekyylityyppinä. Pyrolyysin reaktiivisen typen mittaus onnistui sekä pelkistävässä pyrolyysissä että hapettavassa pyrolyysissä ja tulokset olivat pitkälti yhtä pitäviä.

Pyrolyysissä vapautuva ammoniakki muodostaa tehokkaasti typpioksidia pyrolyysikaasujen polton yhteydessä. Korkeissa lämpötiloissa tämä ammoniakkin hapetus NO :ksi on lähes täydellistä. Alemmissa lämpötiloissa

ja vaiheittaisella polttoilman lisäyksellä hapetus NO:ksi jää epätäydelliseksi ja osa ammoniakista saadaan reagoiman molekyylitypeksi.

Pyrolyysin yhteydessä vapautuvan ammoniakin hapettuminen NO:ksi on tämänkin työn tulosten perusteella soodakattilan NO_x-päästöjen tärkein muodostusreitti. Arvioimme, että ainakin kaksi kolmasosaa soodakattilan typpioksidista muodostuu tätä kautta.

Koksiin jää pyrolyysin jälkeen noin kolmannes polttoaineen tyypestä, N_{KOKSI}. Typpi on aluksi koksissa veteen liukenemattomassa muodossa, ilmeisesti orgaanisesti sitoutuneena koksen hiilirenkaisiin. Koksen palamisen yhteydessä koksen typpi hapettuu NO:ksi. Korkeissa lämpötiloissa (>900°C) hapettuminen tapahtuu suunnilleen samassa tahdissa kuin koksen hiili hapettuu.

Alhaisemmissa lämpötiloissa ja kaasutusolosuhteissa koksen hiili voidaan hapettaa ja vapauttaa ilman että koksen typpi vapautuu. Näissä olosuhteissa koksen typpi muuntuu orgaanisessa muodossa olevasta typpiyhdisteestä epäorgaaniseksi yhdisteeksi. Sopivan "varovaisella" koksen hapetuksella typpi jää lähes kvantitatiivisesti epäorgaaniseen suolajäännökseen, N_{SULA}, josta se kuitenkin vapautuu NO:na välittömästi, jos suola päästetään yhteyteen hapen kanssa.

"Varovainen" hapetus tarkoittaa tässä tapauksessa joko hapetusta hapella suhteellisen alhaisessa (800 C) lämpötilassa tai kaasutusta hiilidioksidilla. Tällainen varovainen hapetus on varsin mahdollinen soodakattilan olosuhteissa (keon pinnalla) ja näin osan koksen tyypestä voi olettaa jäävän kattilan pohjalta valutettavaan sulaan. Tässä työssä otetut sulanäytteet vahvistivatkin, että huomattava osa (jopa 30 %) polttoaineen tyypestä, eli

lähes koko koksen tyyppä vastaava määrä tyyppä löytyi tutkitun kattilan sulanäytteistä.

On ilmeistä, että kuvion 1 eri reaktiopolkujen merkitys on erilainen eri polttotavoilla. On todennäköistä, että nykyisin Pohjoismaissa tavallinen tekniikka, jossa lipeä ruiskutetaan melko karkeina pisaroina kekkoon johtaa suureen koksitypen siirtymiseen sulan kautta pois kattilasta. Tällaisissa kattiloissa NO muodostuu lähes yksinomaan pyrolyysikaasujen ammoniakkireittiä myöten. Sen sijaan mustalipeän poltto hienona pisarana ("suspensiopoltto") todennäköisesti hapettaa myös olennaisen osan koksen tyyppästä NO:ksi ja sitä kautta lisää savukaasujen NO-tasoa. Näissä tapauksissa on odotettavissa, että sulan tyyppipitoisuus jää pienemmäksi.

Reaktiokuvio 23 pätee kaikille tutkituille lipeille. Kuitenkin eri tyyppivirtojen suuruudet vaihtelivat suuresti eri lipeillä. Samoin luonnollisesti vapautumisreaktioitten nopeus. Joukossa oli muutama lipeä, joiden koksien hapettuminen kesti kertaluokkaa kauemmin kuin muilla lipeillä. Näillä epäreaktiivisilla lipeillä myös tyypin vapautuminen tapahtui huomattavan hitaasti.

Työssä kehitettiin menetelmä lipeitten NO_x-muodostustaipumuksen vertailuun. Menetelmä toimi erinomaisesti ja sillä saatiin yhdessä ja yksinkertaisesti toisistaan eroteltuina pyrolyysikaasujen kautta muodostuva NO ja koksijäännöksestä muodostuva NO.

Työ täytti tavoitteensa ja ylittikin ne useissa suhteissa. Asetettuihin pääkysymyksiin saatiin kaikkiin vastaus.



Ari Tamminen

SOODAKATTILAPÄIVÄ 18.10.1995
Hotelle Haaga, Helsinki

NO_x -PESURI SELLUTEHTAASSA

1. TAUSTAA

Typenoksidien päästöjen vähentäminen on lähimmän vuosikymmenen haaste sellu- ja papriteollisuuden ilmansuojelussa. On esitetty koko sellutehdasta koskevia tuotantomäärään perustuvia NO_x -ominaispäästötavoitteita, sooda- ja voimakattiloiden kiristytviä NO_x -päästönormeja ja lopputuotteen ympäristömerkkikriteerejä NO_x -päästöjen suhteen.

Samanaikaisesti ollaan sulkemassa tehtaan kemikaali- ja vesikiertoja, jolloin pelkästään puuaineksen mukana tulevan typen poistumistiet vähenevät nykyisestä. Tehdastaselaskelmien mukaan savukaasut jäävät typpiyhdisteiden ainoaksi poistumistieksi.

Savukaasupesurin etuna on laitteen monikäyttöisyys, koska se soveltuu sekä lämmön talteenoton että kaasumaisten ja hiukkasmaisten epäpuhtauksien erotukseen. Uuden sukupolven savukaasupesuri toimii sellutehtaassa sekä typen oksidien pienten hiukkasten, että muiden prosessista karkaavien aineiden talteenottolaitteena ja prosessiin palauttajana.

2. NO_x -PESURI

Tampella Power Oy :ssä on kehitetty savukaasupesuriin perustuva typen oksidien erotustekniikka. Kehitetyn tekniikan avulla on mahdollisuus laskea soodakattiloiden typenoksidien päästötaso nykyiseltä keskimääräiseltä **tasolta 60 - 70 mgNO₂/MJ** aina **tasolle 20 mgNO₂/MJ**. Menetelmää voidaan soveltaa myös muihin sellu- ja paperitehtaan kattiloihin.

Menetelmän investointikustannukset ja käyttökustannukset ovat kilpailukykyisiä muihin käytettävissä oleviin menetelmiin verrattuna. Hapetusvaiheessa voidaan käyttää tehtaan omia valkaisukemikaaleja, klooridioksidia ja otsonia sen mukaan, mikä kulloinkin on tarkoituksenmukaisinta. Menetelmässä ko. valkaisukemikaalit käsitellään haitattomaan muotoon ja palautetaan prosessiin. Pelkistysvaiheessa käytetään hyödyksi tehtaan hajukaasuja.

3. PROSESSI

Kehitetty tekniikka on kaksivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa typpimonoksidi hapetetaan typpidioksidiksi klooridioksidin tai otsonin avulla. Toisessa vaiheessa typpidioksidi pelkistetään typeksi hajukaasulaitoksen sulfiittiliuoksen avulla.

Kehitetyn menetelmän käyttökustannukset ovat hapetuskemikaalista riippuen 4000 - 8000 mk/tonni poistettua NO₂. Käytännössä käyttökustannuksia voidaan alentaa merkittävästi, koska hajukaasujen rikkisisältö on suurempi kuin pesurin pelkistysvaiheessa tarvittava sulfiittimäärä. Tällöin suurin osa talteenotetusta rikistä voidaan ohjata hyötykäyttöön esim. bisulfiittina valkaisulaitokselle.

Investointikustannukset ovat olemassa olevalla pesurilla 4 - 8 MMK ja mikäli rakennetaan uusi savukaasupesuri, kustannukset voivat vaihdella alueella 10 - 20 MMK laitoksen koosta riippuen.

Menetelmä ei aiheuta ympäristökuormitusta. Klooriyhdisteet poistuvat prosessista suolan muodossa, natriumkloridina. Pesuliuos voidaan palauttaa tehtaan kemikaalikiertoon, koska muodostuva kloridimäärä on savukaasun alhaisesta typenoksidimäärästä johtuen vähäinen eikä kohota kemikaalikierron kloriditasoa.

VIITE: Menetelmä typen oksidien poistamiseksi sellutehtaan savukaasuista" FI pat.hak. 944344

Soodakattila-automaation näkymiä

1. Johdanto

Automaatiojärjestelmät ovat kehittyneet kolmenkymmenen vuoden aikana systeemeiksi, joissa voidaan tehokkaasti soveltaa monentyyppisiä kehittyneitä säätömenetelmiä.

Koko ajanjaksolle on ollut tyypillistä, että tehtaiden tuotevalikoima on laajentunut ja lajinvaihdot tapahtuvat useammin ja nopeammin kuin ennen. Ympäristö on lisäksi asettanut omat vaatimukset mm. emissioiden minimoinnin ja seurannan suhteen. Ja kun vielä muistetaan, että valmistuskustannuksiin kohdistuu jatkuvasti pienennyspainetta, on meillä käsissämme ongelmakenttä, johon ratkaisuja etsitään monelta taholta, mm. automaatiosta.

Seuraava taulukko kuvaa automaation kehitystaivalta 30 vuoden ajalta.

1965-1975 = erilliset järjestel- mät	1975-1985 = erilliset järjestel- mät	1985-1995 = integroitu systee- mi	1995-> = avoimet järjes- telmät
Reletekniikka Analogiset sää- döt Ylätason tieto- konesovellus- paketit	Ohjelmoitavat logiikat Hajautettu säätö- järjestelmä Ylätason tietoko- nesovelluspaketit Raportointijärjes- telmät	Integroidut ha- jautetut automaa- tiojärjestelmät Järjestelmät avoimia Tehtaan laajuiset raportointijärjes- telmät	Tuotannon ohjaus Kaikkien käytet- tävissä Kehittyneiden säätömenetel- mien käyttö (su- mea, neuro jne.)

2. Kehittyneiden säätömenetelmien yhteenveto

Tässä kappaleessa selostetaan kehittyneiden, soodakattilasta riippumattomien säätömenetelmien ominaispiirteitä.

2.1 Tilastolliset menetelmät

Tilastollisten menetelmien käyttö on käytännössä prosessin tilan laskentaa ja tilan näyttämistä ajan suhteen niin, että poikkeamat normaalista saadaan eri tyyppisillä menetelmillä esille. Tyypillisesti monitoroidaan pientä, mutta oleellista ryhmää muuttujia, joista lasketaan mm. toimintarajoja, poikkeamia ja hajontoja.

Perustotuushan on, että yksittäisten tapahtumien ennustaminen on mahdotonta, mutta tapahtumajoukon käyttäytyminen on ennustettavaa. Esimerksi yksittäinen ihminen voi olla syömättä klo 11-13 välisenä aikana, mutta ihmisjoukko keskimäärin nauttii lounaansa ao. aikana.

Tilastollisia menetelmiä käytetään mm. mittausten tilan tarkasteluun ja laadunohjaukseen.

2.2 Mallipohjaiset menetelmät

Näissä menetelmissä vaaditaan prosessin lineaarinen malli ja tarkat, kattavat sekä luotettavat mittaukset. Säädön onnistumisen edellytyksenä on lisäksi, että prosessi käyttäytyy lineaarisesti toimintapisteiden ympäristössä. Käytännössä tarkastellaan prosessin tilan muutosta ja päätellään sen perusteella mitä seuraavaksi on tehtävä halutun lopputuloksen varmistamiseksi.

Mallipohjainen menetelmä on ylivoimainen muihin verrattuna, mikäli edellään mainitut edellytykset täyttyvät, koska kyseessä on varsin tarkka matemaattinen menetelmä. Jos mittaustiedot ovat puutteelliset tai niiden luotettavuus on kyseenalainen, voidaan joutua tilanteisiin, joissa malli antaa tyystin väärää tietoa.

Mallipohjaisia menetelmiä käytetään mm. paperikoneohjauksissa (neliömassa).

2.3 Asiantuntijajärjestelmät

Asiantuntijajärjestelmiin yhdistetään ominaisuuksia, joissa on piirteitä inhimillisestä käyttäytymisestä, ts. älykkyyttä. Näin ollen järjestelmä kykenee käyttämään samanaikaisesti sekä numeerista että sanallisin kuvauksin määriteltyä tietoa. Päättelymekanismi kykenee hyödyntämään myös epävarmuusasteita, jotta päästään ilmeisimpään lopputulokseen. Käytännössä haasteita käytölle asettavat koottavan säännösten kattavuus ja muokattavuus.

Asiantuntijajärjestelmien sovelluksia löytyy mm. jätevesien puhdistusprosesseista.

2.4 Sumea logiikka

Kiinnostus sumeaan logiikkaan on viime vuosina kasvanut voimakkaasti sekä Suomessa että muualla maailmassa. Syynä tähän ovat olleet mm. japanilaisten menestyksenkäs sumean logiikan soveltaminen eri laitteisiin, sekä alan voimakkaasti lisääntynyt julkisuus. Tyypillisiä sumean logiikan sovelluskohteita ovat olleet mm. erilaiset asiantuntijajärjestelmät, hahmontunnistus ja robotiikka. Toistaiseksi kuitenkin merkittävin sumean logiikan sovellusalue on ollut erilaiset säätö- ja ohjausjärjestelmät.

Vaikeasti hallittavien teollisten prosessien säätämiseen sumea logiikka tuo aivan uusia mahdollisuuksia, koska prosessin tilaa ja säätötavoitetta voidaan aina kuvata sanallisesti eli lähtökohtana on ihmisen ajattelu. Kun systeemistä saatava tai sitä kuvaava tieto on pääasiassa epätarkkaa, epävarmaa tai systeemi käyttäytyy epälineaarisesti, sumealla logiikalla saavutetaan perinteisiä säätöratkaisuja parempia tuloksia. Sumean säädön kohteeksi valittu prosessi on tyypillisesti vaikeasti mallinnettavissa ja/tai sen tila on vaikeasti mitattavissa.

Sumean logiikan sovelluksia löytyy lukuisia määriä kulutustavarateollisuudesta (pesukoneet, kamerat jne.) sekä lisääntyvässä määrin myös prosessiteollisuudesta.

2.5 Neuroverkot

Neurolaskenta on menetelmä, jonka avulla saadaan selville suurien tietojoukkojen kytkentöjä ja lainalaisuuksia. Laskentamenetelmän älykkyys perustuu oppimiskykyyn, jolloin myös ennenkokemattomia tilanteita voidaan ratkaista nopeasti. Laskenta perustuu neuroverkkoihin, joissa on monta syöttöä ja yksi vaste.

Neuroverkko koostuu yksittäisistä neuroneista, joilla kullakin on oma painokerroin. Tästä seuraa, että verkon kokonaistoiminta on useiden painotettujen arvojen yhdistelmä. Painokertoimet määrätään esimerkkien avulla.

Prosessinohjauksessa neuroverkon tavoitteena on mittaustietojen avulla ennustaa lopputuloksen hyvyttä sekä päätellä kuinka lopputulosta voidaan parantaa. Pohjaksi vaaditaan matemaattinen malli, joka perustuu mittaustietoihin.

Neuroverkkotutkimus on tällä hetkellä varsin vilkasta ja toimivia ratkaisuja saataneen selluteollisuuden lähiaikoina.

2.7 Neurosumea

Neurosumea on kahden edellä kuvatun menetelmän yhdistelmä, jossa sumean logiikan prosessin kuvauskyky ja neuroverkon oppimiskyky on yhdistetty toisiinsa. Tavoitteena voi esimerkiksi olla prosessin virituskyvyn nopeuttaminen, joihin tähtääviä projekteja on Suomessa tällä hetkellä menossa.

3. Soodakattilaan soveltuvat säädöt

Tässä kappaleessa kerrotaan tarkemmin jo käytössä olevista tai käyttöön lähiaikoina tulevista säädöistä.

3.1 Sumea logiikka

Sumea logiikka on ainakin seuraavien ominaisuuksiensa osalta varsin sopiva selluteollisuuden säätöjen kehittämisessä:

1. Reaktiot ovat epälineaarisia eli optimaalinen säädön viritys on riippuvainen prosessin toimintapisteestä.
2. Raaka-aine on heterogeenista, mikä vaikeuttaa prosessien mallintamista.

3. Prosessimuuttujat ovat toisistaan riippuvia mikä edelleen vaikeuttaa prosessin mallintamista.
4. Selluteollisuuden optimoivat säädöt ovat tyypillisesti monimuuttujasäätöjä, sumea säätö on luonnostaan monimuuttujasäätöä.
5. Sumea logiikan avulla voidaan käyttäjälle esittää miten ohjaus muodostuu eri prosessimuuttujista.
6. Sumealla logiikalla on helppo hyödyntää jatkuvatoimiset mittaukset, analysaattorityyppiset mittaukset (esimerkiksi Kappa-analysaattori tai titraattori), sekä tarvittaessa laboratorioanalyysit.
7. Säätoalgoritmiin voidaan helposti lisätä operaattori- ja insinööritietämys prosessin käyttäytymisestä.
8. Monet prosessit pystytään kuvaamaan helpoimmin sanallisesti käyttäjien operointitapoina.
9. Säätoimenetelmä antaa mahdollisimman suoraan palautteeseen tasapainotilan ympärillä tapahtuneista muutoksista.

Tyypillisiä kohteita ovat mm. soodakattilan keon ja symmetrian säädöt, meesauunin polton ohjaus ja valkaisun vaihesäätö, joissa kaikissa täyttyvät sumean logiikan perusedellytykset.

3.2 Neuroverkko ja neurosumea

Neuroverkkojen ja neurosumean laskennan ja säädön käyttöalue kemikaalikierrossa liittyy prosessin luonteesta johtuen prosessin virstykyseen. Mikäli riittävä tietomäärä prosessista on saatavissa, voidaan neurolaskennan avulla tuottaa sumean logiikan käyttöä tukevaa, säätöä helpottavaa ja nopeuttavaa tietoa. Sovellusalueet ovat samat kuin sumeassa logiikassa.

3.3 Tilastolliset menetelmät

Tilastollisten menetelmien työkaluina käytetään kokonaista joukkoa trendejä ja diagrammeja. Näiden menetelmien avulla tuotetaan joukko ominaislukuja käytön seurantaa varten sekä ohjaussuureita säätöä varten. Seuraavassa tyypillisiä työkaluja.

1. Keskiarvo, hajonnat 1σ , 2σ ja 3σ
2. Ajon seurantatrendi
3. Toiminta-alue = R kuvaaja (R_i = suurin - pienin) R = range
- R_{kesk} = keskiarvo R_i
4. Keskiarvojen keskiarvo X_{kesk}
5. Kumulatiivinen summa (CuSum), joka näyttää prosessin suuntaa tietyssä toimintapisteessä
6. Pareto-diagrammi, joka esittää syy-seuraus suhteita
7. Mittausviestien ja toiminnan testejä:
 - 2/3-testi
 - 4/5-testi
 - Peräkkäisiä arvoja N kpl toiminta-alueen ulkopuolella
 - Joukko peräkkäisiä pisteitä tekee jatkuvaa ylös-alas liikettä
 - Joukko peräkkäisiä pisteitä tekee toistuvaa aaltoliikettä
 - Joukko peräkkäisiä pisteitä nousee tai laskee säännöllisesti

Tyypillisiä sovelluskohteita ovat mm. kattilan likaisuuden valvonta, mittausten toiminnan valvonta sekä laatukriteerien täyttymisen seuranta.

4. Yhteenveto

Kiinnostus kehittyneiden säätömenetelmien soveltamiseen on suuri. Tulevaisuuden osalta näyttää siltä, että signaalin käsittely ja diagnostiikka, älykkäiden systeemien kehittäminen sekä sovellus- että kenttälaitepuolella sekä itsevirittyvien säätimien kehitystyö ovat tärkeimpiä automaation osa-alueita. Tällä hetkellä tilanne on se, että erilaisia asiantuntijajärjestelmiä käytetään vielä melko vähän.

Edellä mainitusta puolestaan seuraa, että matematiikan soveltaminen ao. kohteisiin lisääntyy. Lisäksi on tunnettava entistä tarkemmin prosessin dynamiikka. Työkaluina ovat luonnollisesti automaatiojärjestelmät ja tietokoneet, josta seuraa että ao. systeemit on tunnettava hyvin ja siihen on saatava riittävä määrä koulutusta.

Soodakattilan osalta ja laajemminkin koko kemikaalikierrossa kehittyneistä säätömenetelmistä sumean säädön ja neuroverkkojen sekä näiden yhdistelmien käyttö avaa säädölle parempia mahdollisuuksia, koska näissä prosesseissa käsitellään suuria kokonaisuuksia ja edellä mainituilla menetelmillä voidaan olemassaolevaa mittaustietoa käsitellä tehokkaasti.

Kirjallisuutta

Cox, E (1994):

Fuzzy models for pattern recognition. IEEE press, New York

Freeman, J. and Skapura, D. (1992):

Neural Networks: Algorithms, Applications and Programming techniques

Haykin, S. (1994):

Neural Networks, a Comprehensive Foundation, Macmillan, New York, NY.

Isomursu, P Niskanen, V. Carlsson, C. and P. Eklund (1993):

Sumean logiikan mahdollisuudet, TEKES, Helsinki

Kohonen, T. (1984):

Self-organization and Associative Memory, Springer - Verlag, New York (2nd edition: 1988, 3rd edition 1989)

Laurikkala, M. (1993):

Oppiva sumea säätäjä, diplomityö, Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto

Viljamaa, P.:

Sumean säätäjän viritys, DI-työ, Tampere: TTKK, sähköosasto, 1992 52 s.

Viljamaa, P. Koivo, H.N.:

Tuning of a multivariable PI-like fuzzy logic controller. FUZZ-IEEE'94, Orlando, FLA, USA, June 26-29 1994, p- 388-393

SOODAKATTILAN LIKAANTUMINEN

TkT, Esa K. Vakkilainen
Ahlstrom Machinery, Talteenoton tuotekehitys

1

LIKAANTUMINEN SOODAKATTILASSA

Soodakattilan likaantuminen on merkittävä kapasiteettia rajoittava tekijä monella sellutehtaalla¹. Likaantumisen rajoittamista on pohdittu niin kauan kuin soodakattiloita on ollut olemassa. Merkittävää edistymistä likaantumisen mekanismien ymmärtämisessä on saavutettu, jolloin soodakattilan ominaiskuormaa on voitu kasvattaa.

A. Ahlström Osakeyhtiö on tehnyt jatkuvaa kehitystyötä likaantumisen mekanismien selvittämiseksi. Tuloksia on julkaistu useissa kansainvälisissä konferensseissa^{2,3,4}. Omaa tietoa likaantumisesta täydennetään asiakaskeskeisesti, itse soodakattilan ajoa ja toimintaa optimoimalla. Kansainvälistä kehitystä tarkkaillaan osallistumalla yhteistyöhankkeisiin eri yliopistojen ja tutkimuslaitosten kanssa.

Jotta voisimme ymmärtää likaantumista, on meidän kyettävä vastaamaan ainakin seuraaviin kysymyksiin;

1. Miten likaantumisen etenemistä voidaan parhaiten seurata?
2. Miten kattilan kuorman ja lipeän laadun vaihtelu vaikuttaa kattilan likaantumiseen.
3. Onko likaantuminen jatkuvaa, vai saavutetaanko siinä tasapaino?
4. Jos saavutetaan tasapainolikaantuminen, niin kuinka pian?
5. Voiko nuohousta optimoimalla vaikuttaa likaantumiseen?

Selluteollisuus kehittyy ja muuttuu jatkuvasti. Viimeaikainen polttava kysymys on ollut kuinka tämä kehitys heijastuu soodakattilaan. Muuttuvatko lipeän ominaisuudet merkittävästi huonommaksi, vai kyetäänkö tämä muutos osittain kompensoimaan.

2

LIKAANTUMISEN SEURANTA

Luotettavin tapa seurata likaantumista soodakattilalla on säännöllinen visuaalinen pintojen tarkastus ja havaintojen kirjaus. Nykyinen tapa ajaa kattiloita ja sopivien välineiden puute estää pintojen tarkastamisen paitsi seisokkien aikana. Likaantumisen etenemistä seurataankin pääasiassa mittausrvojen ja niistä laskettujen toimintasuuereiden avulla.

2.1

Painehäviön käyttö likaantumisen seurantaan

Painehäviötä on verrannollinen savukaasun nopeuden neliöön ja sen tiheyteen.

$$\Delta p = p_{sisään} - p_{ulos} \approx \rho v^2 \quad (1)$$

Vetohäviötä voidaan käyttää likaantumisen seurantaan koska likakerroksen paksuuden lisäys johtaa savukaasun nopeuden nousuun.

Jotta vetohäviö olisi riittävän herkkä mittari on savukaasunopeuden muutoksen oltava merkittävä. Yleensä vetohäviötä voidaan menestyksellisesti käyttää keittopinnan ja ekonomaisereiden likaantumisen seurantaan^{2,3}.

Tulistinalueen vetohäviö on yleensä erittäin matala. Suurin vaikuttava tekijä tulistinalueen painehäviöön on savukaasujen virtausprofiili nokalla. Yleensä kun tulistinalueen painehäviö reagoi, niin likaantuminen on ehtinyt jo niin pitkälle ettei sitä voi tehonuohouksella poistaa.

Painehäviöt nousevat yleensä jo muutaman päivän sisällä startista vakioarvoon, Kuva 1.

2.2

Savukaasun lämpötilojen käyttö likaantumisen seurantaan

Likaantumista voidaan seurata lämmönsiirtokertoimen arvon muutoksena. Mitä korkeampi lämmönsiirtokerroin on sen enemmän lämpöä siirtyy savukaasusta putkiin.

Lämpöpinnan likaantuminen pienentää lämmön siirtymistä

$$h = \frac{\phi}{A(T_{kaasu} - T_{seinä})} \quad (2)$$

savukaasuista. Poistuva savukaasu on kuumempaa kuin ennen.

Savukaasun lämpötilan käyttö sopii erityisesti tulistinalueen toiminnan seuraamiseen^{2,3}. Kun lämpötila ennen keittopintaa nousee, niin tulistinalue likaantuu.

On kuitenkin huomattava että savukaasun lämpötilat vaihtelevat kuorman ja lipeälaadun mukaan. Paras tulos saavutetaan, jos automaatiojärjestelmä laskee nimelliskuorman lämpötilaa vastaavan lämpötilan, jota seurataan.

Suurin ongelma savukaasupuolen lämpötilojen käytössä on mittausten epäluotettavuus ja epäedustavuus.

2.3

Vesi/höyrypuolen lämpötilojen käyttö likaantumisen seurantaan

Lämpöpinnan likaantuminen pienentää lämmön siirtymistä savukaasuista. Tällöin vesi/höyry lämpiää pinnassa vähemmän. Lämpöpinnan likaantuminen näkyy siten lämpötilaeron pienenemisenä.

Yksittäisten tulistimien likaantuminen näkyy selvästi lämpötilannousun muutoksina, Kuva 2. Ajovauhti ja lipeälaatu muuttavat myös lämpövirtoja tulistimiin, joten lämpötilannousut on kompensoitava kuormalla².

2.4

Ruiskutusvirran käyttö likaantumisen seurantaan

Tulistinalueen likaantuminen pienentää lämmön siirtymistä savukaasuista tulistinalueella. Tällöin höyryn jäähdyttämiseen tarvittava vesimäärä pienenee.

Tulistinalueen likaantumisen seurantaan on ruiskutusvirran muutos erittäin hyvä indikaattori^{2,3}. Ruiskutuksen määrään vaikuttaa sekä ajettava kuorma että lipeälaadun vaihtelu.

3

LIKAANTUMISTYYPIT

Soodakattilan likaantuminen ei johdu vain yhdestä syystä. Soodakattila menee myös tukkoon monesta eri kohdasta. On tärkeää tunnistaa eri likaantumistyytit ja niiden oireet.

Tavallisimmat prosessista johtuvat likaantumista aiheuttavat ongelmat ovat suuri palamattoman määrä, savukaasuvirran mukana kulkeutuvat pisarat ja tulipesässä muodostuneen tuhkan laatu.

3.1

Palamaton

Kylmä tulipesä, väärä pisarakoko ja huono ilmanjako tulipesän alaosassa aiheuttavat palamisen siirtymistä ylemmäksi. Tällöin palamattoman materiaalin määrä tulistinalueella kasvaa.

Loppuun asti reagoimattomat lipeäpisarat, jotka sisältävät palamatonta hiiltä osuvat lämpöpintoihin pääasiassa tulistinalueella. Palamaton muodostaa kovia ja tiheitä kerrostumia, joissa hiili erottuu tummana. Tyypillinen palamattoman aiheuttama ongelma on suuri kerrostuma ensimmäisissä tulistimissa.

Korkean kuiva-aine (kuuma pesä) ja suureneva kattilakoko (pitkä aika palaa) ovat vähentäneet tämän mekanismin merkitystä. Viimeaikoina ei tästä aiheutuneita ongelmia ole juuri tullut vastaan.

3.2

Savukaasuvirran mukana kulkeutuvat pisarat

Vaikka pesä on kuuma ja viiveaika on niin pitkä että pisara ehtii täydellisesti palaa tulipesässä voivat tällaiset sulat tuhkapisarat aiheuttaa ongelmia.

Savukaasuvirran mukana kulkeutuvat pisarat aiheuttaa tiheitä kerrostumia. Nämä kerrostumat sisältävät merkittävästi karbonaattia ja niissä on vähemmän klooria ja kaliumia kuin aerosolihiukkasissa.

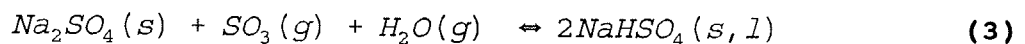
Kerrostuman pinnalle osuva sulapisara muodostaa vaikeasti nuohottavan kohdan. Jos määrä on riittävän korkea ei nuohoin enää pure tällaiseen kerrostumaan.

Savukaasuvirran mukana kulkeutuvat pisarat ovat suurikokoisia hiukkasia. Siksi se kerrostuu pääasiassa tulistinalueelle ja keittopinnan alkuosaan. Paras havainnointitapa on seurata ensimmäisten nuohoimien varsille kerrostuvan suolan laatua ja määrää.

3.3

Tuhkan pH

Jos savukaasut sisältävät merkittävästi rikkidioksidia muodostuu natriumbisulfiittia.



Natriumbisulfaatti laskee tuhkan pH:ta, jolloin tuhkasta tulee tarttuvaa ja huonosti nuohottavaa. Ongelmiin johtava pH vaihtelee kattilasta toiseen. Tyypillisesti olisi tuhkan pH pidettävä yli 10.

Tavallisesti tuhkan alhainen pH korjaantuu tulipesän toimintaa parantamalla. Rikkitrioksidia muodostuu vain jos rikkidioksidia on läsnä, joten pienentämällä rikkipäästöjä nostetaan tuhkan pH:ta.

3.4

Tuhkan tarttuvuus

Kun yhtä yhdistettä sisältävää suolaa lämmitetään se sulaa jossain lämpötilassa muuttuen kiinteästä nesteeksi. Soodakattilan tuhka muodostaa monikomponenttisysteemin. Tällaisille yhdisteille on tyypillistä että ennen kuin täydellinen sulaminen tapahtuu sisältää yhdiste jo merkittävästi sulaa.

Kun tuhkan sisältämä sulamäärä on riittävä, on tuhka tarttuvaa, jolloin se on vaikeasti irtoavaa. Tavallisesti tämä lämpötila on yli 600 °C, mutta joillekin kattiloille se on merkittävästi alhaisempi.

On tärkeää että lämpöpintojen jako on riittävän suuri kunnes tuhka on kylmempää kuin tarttumislämpötila. Tavallisesti vasta keittopinnalle mentäessä jako tihenee.

Tuhkan tarttuvuuteen vaikuttaa eniten kaliumin ja kloorin osuudet tuhkassa. Tämän lisäksi vaikuttaa rikkiyhdisteiden tyyppi ja määrä.

4

KALIUMIN JA KLOORIN RIKASTUMINEN SOODAKATTILAN TUHKAAAN

Määrällisesti suurin osa kerrostumista on peräisin noin mikrometrin aerosolihiukkasista. Koska savukaasu virtaa mutkittelevaa reittiä läpi kattilan on suurin osa sähkösuodintuhkaa peräisin aerosolihiukkasista.

Tulipesän lämpötilan nousu nostaa höyrystyvän natriumin määrää. Kuuma pesä johtaa siis karbonaatin määrän nousuun tuhkassa.

Tulipesän alaosan toiminta vaikuttaa myös rikin, kaliumin ja kloorin rikastumiseen soodakattilan tuhkaan. Tuhka sisältää tyypillisesti suhteellisesti enemmän näitä aineita kuin mustalipeää. Esimerkiksi kloorille rikastuminen määritellään

$$Rikastuminen_{Cl} = \frac{\frac{Cl_{näyte}}{(Na+K)_{näyte}}}{\frac{Cl_{mustalipeä}}{(Na+K)_{mustalipeä}}} \quad (4)$$

Ahlström on ollut erityisen kiinnostunut eri prosessiparametrien vaikutukseen kaliumin ja kloorin rikastumiseen. Tutkimuksen aikana on suoritettu kokeita viidellätoista Ahlströmin kattilalla ja laboratoriokokeita Oregon State Universityn laminaarivirtausuunilla.

Ahlström on kerännyt noin 500 lipeänäytteen tietopankin. Sen mukaan on klooripitoisuus mustassa lipeässä tyypillisesti alle 0.5 %. Suurimmat klooripitoisuudet ovat kuitenkin lähes 4 % kuiva-aineesta. Mustan lipeän kaliumpitoisuus on tavallisesti 1 - 3 %. Suurimmat kaliumpitoisuudet ovat jopa 8 % kuiva-aineesta. Eräs muutama vuosi sitten toimitettu soodakattila polttaa mustalipeää, jonka klooripitoisuus on noin 2.5 ja kaliumpitoisuus noin 7 % kuiva-aineesta.

Kaliumin ja kloorin rikastumisen aiheuttamat tukkeutumat ovat nousseet ongelmaksi. Sellutehtaat ovat vähentäneet merkittävästi ympäristökuormituksiaan. Samalla on tehtaasta poistuvan kaliumin ja kloorin määrä vähentynyt. Tasot nousevat jollei tulevia määriä voi alentaa.

4.1

Kaliumin rikastuminen tuhkaan

Kalium käyttäytyy soodakattilan tulipesässä kuten natrium. Koska se on reaktioherkempi kuin natrium on kaliumin suhteellinen osuus tuhkassa sen osuutta mustalipeässä hieman suurempi.

Tehtyjen tehdaskokeitten perusteella on kaliumin määrä tuhkassa suoraan verrannollinen kaliumin määrään mustalipeässä.

Suoritetuissa laboratoriokokeissa huomattiin uunin lämpötilan nousun pienentävän kaliumin rikastumista. Sama ilmiö havaittiin teollisuusmittakaavassa. Kun soodakattilan tuhkan karbonaattipitoisuus nousee, niin kaliumin rikastuminen laskee. Korkea karbonaattipitoisuus korreloi tulipesän lämpötilan kanssa.

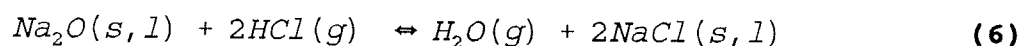
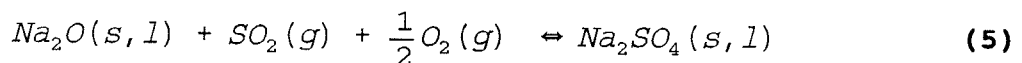
Ahlströmin kattiloilla on kaliumin suhteellinen osuus tuhkassa noin 1.5 kertaa sen osuus mustalipeässä, Kuva 3.

4.2

Kloorin rikastuminen tuhkaan

Kloori käyttäytyy kaliumista ja natriumista poikkeavalla tavalla. Samaa suhteellista kloorin osuutta mustalipeässä vastaa laaja joukko eri rikastumisarvoja tuhkaan, osa jopa alle yhden¹¹, Kuva 4.

Suoritetuissa laboratoriokokeissa huomattiin uunin lämpötilan nousun pienentävän kloorin rikastumista. Toisaalta rikkidioksidin lisäys pienensi kloorin rikastumista. Ilmeisesti kloori kilpailee natriumoksidista rikkikaasun kanssa.



Samantyyppinen ilmiö havaittiin teollisuusmittakaavassa. Kun soodakattilan savukaasun rikkidioksidipitoisuus on pieni on kloorin rikastuminen välillä 2 - 4. Se laskee karbonaattipitoisuuden noustessa. Jos soodakattilan savukaasu sisältää paljon rikkidioksidia on kloorin rikastuminen vähäistä.

5

TULIPESÄPROSESSI VAIKUTTAА LIKAANTUMISEEN

Tulipesän alaosan tapahtumilla on erittäin suuri merkitys likaantumiseen. Erityisesti keon pinnassa sekä aivan sen yläpuolella oleva alue vaikuttaa kattilan toimintaan merkittävästi. Pyrkimyksenä on saada mahdollisimman korkea lämpötila sekä pelkistävää hiiltä tähän kohtaan. Tähän voimme vaikuttaa kahden tekijän optimaalisella käytöllä: oikealla lipeän ruiskutuksella (tasainen ruiskutus ja hiiltä kekoon asti) sekä oikealla ilmasyötöllä. Tuloksena on korkea lämpötila tulipesän alaosassa, pieni SO₂ päästö sekä korkea reduktio.

Tulipesän toiminnalla voidaan vaikuttaa vapautuvan natriumin, rikin, kaliumin ja kloorin määrään. Oikealla ilmanjaolla voidaan estää palamattoman kulkeutuminen tulistinalueelle ja minimoida kaasuvirran mukana kulkeutuvien pisaroiden määrä.

Tärkeimmät vaikuttavat tekijät tulipesän toimintaan ovat oikea pisarakoko, kuiva-aine ja ilmanjako.

5.1

Pisarakoon vaikutus likaantumiseen

Lipeän pisarakoko vaikuttaa pisaran lentorataan, Kuva 5. Pienet pisarat pysähtyvät nopeasti, koska ne myös paisuvat ja palavat nopeasti. Suoritetuissa simulaatioissa lisää juuri liian pieni pisarakoko kaasuvirran mukana kulkeutuvien pisaroiden määrää.

Isommat pisarat ehtivät hyvin kuivua ennen osumistaan kattilan pohjaan tai seinään. Tavallisesti ruiskutettavat pisarat ovat sellaisia, että myös haihtuvat aineet ovat ehtineet jo poistua pisarasta ennen kekoa. Hyvin isot pisarat saattavat olla vielä märkiä osuessaan kekoon. Tämä laskee keon lämpötilaa ja voi aiheuttaa keon hallitsemattoman kasvun.

Jos keko kylmenee, vähenee natriumemissio jolloin rikki-päästöt kasvavat. Kasvava rikki-päästö aiheuttaa tuhkan pH:n laskua ja ekojen tukkeutumista. Nykyisissä kattiloissa tämä ei ole ongelma.

On huomattava, että toistaiseksi ei ole keksitty lipeäruiskumallia, joka tekisi tasaisempaa pisarajakaumaa kuin toiset. Pienempi ruisku tekee keskimäärin pienempää pisaraa kuin suurempi ruisku, mutta jakauma pysyy samana.

5.2

Kuiva-aineen vaikutus likaantumiseen

Lipeän kuiva-aine vaikuttaa polttoon. Yksittäisen pisaran palamisessa se lyhentää kuivumisvaihetta. Vaikutukset pisaran paisumiseen ovat ilmeisesti vähäiset, mutta sitä kasvattavat^{8,9}.

Kuiva-aineen kasvaessa, Kuva 6

- lipeäpisara pyrkii jarruttamaan aikaisemmin
- sen lentorata lyhenee
- se myös 'nousee' helpommin eli palamisen maksimi siirtyy ylemmäs
- kekoon tulee vähemmän kosteita pisaroita ja haihtuvia aineita sisältäviä lipeäpisaroita, jolloin keon lämpötila nousee

Korkea kuiva-aine nostaa tulipesän lämpötilaa aiheuttaen edelleen palamisen nopeutumista ja voimistaen palamisreaktioita. Korkealla kuiva-aineella on joskus vaikeaa pitää tulipesän pohjalla kekoa, joka siellä välttämättä tarvitaan korroosiota estämään.

Kuiva-aineen nosto ei juuri vaikuta kaliumin rikastumiseen, sen sijaan vaikutus kloorin rikastumiseen on selvä.

5.3

LHT lipeä vähentää likaantumista

Suoritetuissa kokeissa on lipeän lämpökäsittelyn todettu parantavan lipeän palamisominaisuuksia. Lämpökäsitelty lipeä paisuu enemmän ja sen haihtumis- ja koksipalamisnopeudet ovat suuremmat. Samalla lipeän lentorata muuttuu ja palamisen maksimivöhykkeen paikka siirtyy. Lipeä on paremmin poltettavissa optimaalisesti, Kuva 2.

Koska lämpökäsitelty lipeä paisuu palaessaan paremmin, Kuva 1, niin erityisesti koivu- ja eukalyptuslipeän poltto on helpompaa. Parhaat tulokset saadaan optimoimalla tulipesän alaosa LHT lipeän poltolle.

LHTn käytön on todettu vähentävän likaantumista¹¹.

Likaantumisen vähenemiseen on monta syytä. Lisääntyvä paisuminen minimoi palamattoman ja nostaa tulipesän alaosan lämpötiloja. Korkeampi lämpötila vaikuttaa likaantumista vähentävästi .

Pienenevä rikki päästö palamisen aikana laskee tuhkan natriumsulfidi ja -sulfaattimäärää, jolloin tuhka ei ole enää yhtä tarttuvaa ja se on helpommin nuohottavissa.

5.4

Ilmanjaon vaikutus likaantumiseen

Oikein toimivan tulipesän vaatimukset ovat oikea lipeän pisarakoko ja jakauma, riittävä kuivuminen ja hiiltä kekoon asti. Tällöin saadaan aikaan korkea reduktio ja alhaiset päästöt.

Monilla kattiloilla on erittäin vaikeaa, käytännössä mahdotonta saavuttaa 95 % reduktiota, alhaista SO₂ ja hyviä palamisolosuhteita. Korkeilla kuiva-aineilla tosin SO₂ saadaan kohtuullisen pieneksi, mutta reduktio ei välttämättä ole korkea. Usein syynä on huonosti suunniteltu ilmanjako.

Ilmajärjestelmiä tutkitaan ja kehitetään jatkuvasti. Julkisuudessa on esitetty mm. seuraavaa

- Kokeiluja sekundääri-ilmatason kaksinkertaistamiseksi
 - Kokeiluja ilmojen lisäämiseksi tertiääritason yläpuolelle
 - Etu/takaseinä- ja sivuseinäilmatasojen erilainen lomittaminen
- Selvää parannusta ei ole raportoitu

Tämänhetkisten käyttökokemusten mukaan kolmitasoinen ilmajärjestelmä on edelleen paras tapa jakaa ilma tulipesään.

Ahlströmin uudentyyppisen tulipesän alaosan ja ilmanjaon kehitystyötä on tehty TEKESin "Korkeahyötysuhteinen soodakattila" -projektissa¹⁰.

Lipeän kuiva-aineen nousu, palamisominaisuuksien muutos ja lämpöarvon lasku muuttavat merkittävästi kattilan alaosan rakennetta. Uudet tietokoneavusteiset suunnittelumallit yhdessä kokeellisen toiminnan kanssa ovat muuttaneet mitoituskäytäntöä.

Ahlström tarjoaa tulipesän alaosaa, jolla voidaan saada merkittävä hyöty polttoteknisesti, energiataloudellisesti ja ympäristöteknisesti. Ahlströmin LHT ilmajärjestelmä tarjoaa merkittävästi uudistuneen ratkaisun, joka sopii nimenomaan LHT lipeän polttoon.

1. Korkea kuiva-aine vaatii lipeän lämpökäsittelyä
2. Lämpökäsittely muuttaa lipeän palamisominaisuuksia
3. Lipeän lämpöarvo laskee samalla kun kloori- ja kaliumpitoisuudet nousevat

6

TYYPILLISIÄ VIRHEITÄ

Erilaisia likaantumiseen liittyviä ongelmia selvitellessä vastaan tulee usein samantyyppisiä toimintoja. Enemmän kuin väärästä toiminnasta ne kertovat oikean toiminnan tarpeesta.

Soodakattilan automaatio on harvoin tarpeeksi 'älykäs' huomaamaan mittauksen rikkoontumisen tai vaurioitumisen. Tyypillinen esimerkki on painehäviö keittopinnan yli. Jos painemittaus menee tukkoon, ei painehäviö ole luotettava likaantumisen mittari. Automaatio ei tyypillisesti hälytä tai varoita tästä.

Nuohouksen tarkoitus on poistaa kertynyt suola lämpöpinnoilta. Paras tulos saavutetaan kun kutakin pintaa nuohotaan vain tarpeen mukaan. Nuohouksen tehokkuus on kuitenkin kääntäen verrannollinen edellisestä käynnistä kuluneeseen aikaan. Jos jotain lämpöpintaa ei nuohota pitkään aikaan, niin sen likaantumisherkkyys kasvaa. Tavallisesti tämä ilmenee kohtuuttomina nuohousaikoina tukkeutumisherkillä pinnoilla.

Kerran pintaan kiinni jämähtänyt tuhka ei siitä hevin irtoa. Äsken pintaan tarttunut tuhka irtoaa melko helposti. Siksi on tarpeetonta nuohota liikaa helposti aukipysyviä pintoja. Huonoin mahdollinen nuohousohjelma on sellainen, missä kukin nuohoin käydään numerojärjestyksessä läpi.

Vaarallisin tilanne on silloin kun automaatiotoimittaja on asentanut 'älykkään' nuohousohjelman. Kattilahenkilöstö oppii nopeasti luottamaan sokeasti tämän toimintaan. Olosuhteiden muuttuessa ei 'äly' aina pelaa. Tavallisen kattilamiehen järjen käyttö nuohouksen tehokkuuden seurantaan olisikin aina suotavaa.

7

YHTEENVETO

Likaantuminen soodakattilassa on ongelma, mutta ongelma, josta ymmärrämme paljon enemmän kuin ennen.

Luotettavin tapa seurata likaantumista soodakattilalla on säännöllinen visuaalinen pintojen tarkastus ja havaintojen kirjaus. Likaantumisen etenemistä seurataan pääasiassa mittausarvojen ja niistä laskettujen toimintasuureiden avulla.

Keittopinnan ja ekojen likaantumista indikoi hyvin painehäviö kyseisen pinnan yli. Tulistimien likaantumista voidaan seurata ruiskutuksen massavirtojen tai lämpötilan nousujen muutosten avulla.

Tavallisimmat likaantumista aiheuttavat ongelmat ovat suuri palamattoman määrä, savukaasuvirran mukana kulkeutuvat pisarat ja tulipesässä muodostuneen tuhkan laatu.

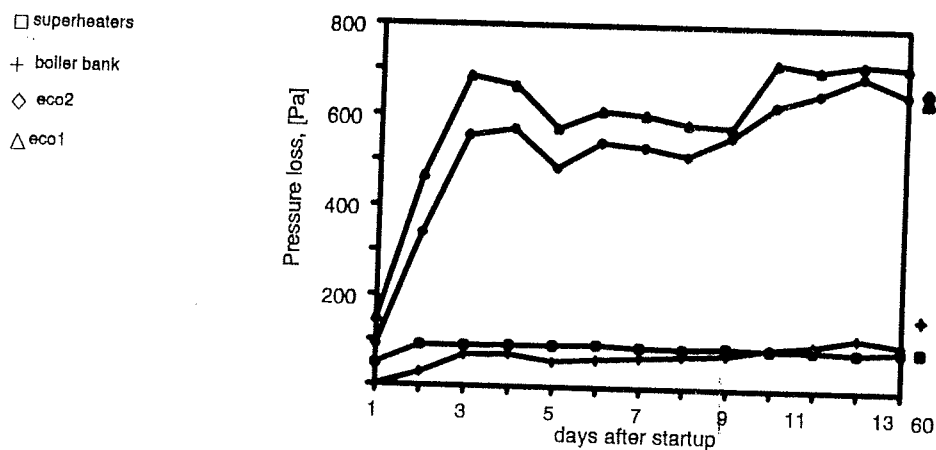
Suuri palamattoman määrä on harvoin ongelma nykyaikaisessa soodakattilassa. Väärä pisarakoko ja huono ilmanjako tulipesän alaosassa aiheuttavat usein savukaasuvirran mukana kulkeutuvien pisaroiden määrän kasvua. Tällöin tulistinalueen likaantuminen kasvaa.

Tulipesän alaosan toiminnalla voidaan vaikuttaa kloorin ja kaliumin rikastumiseen lämpöpinnoille kerrostuvaan tuhkaan.

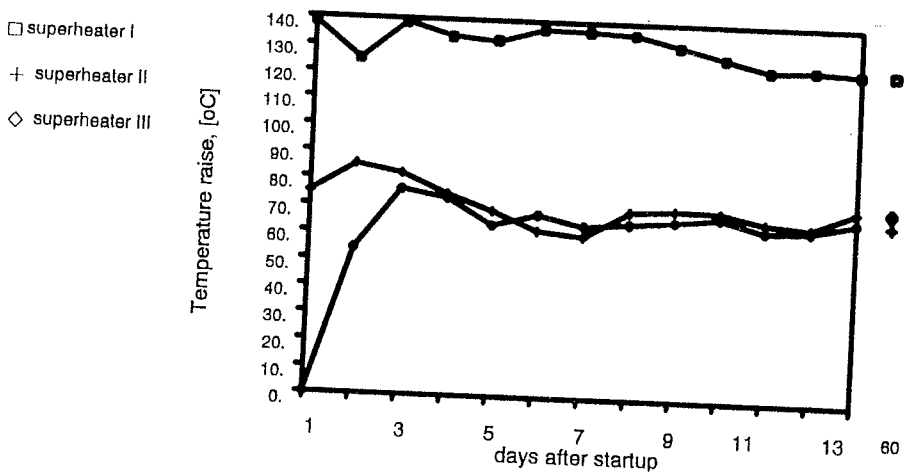
Moderni automaatiojärjestelmä mahdollistaa nuohouksen älykkään ohjauksen ja vähentää nuohoushöyryn kulutusta. Sokea luottamus automaation toimivuuteen ei kuitenkaan ole vielä perusteltua.

LÄHDELUETTELO

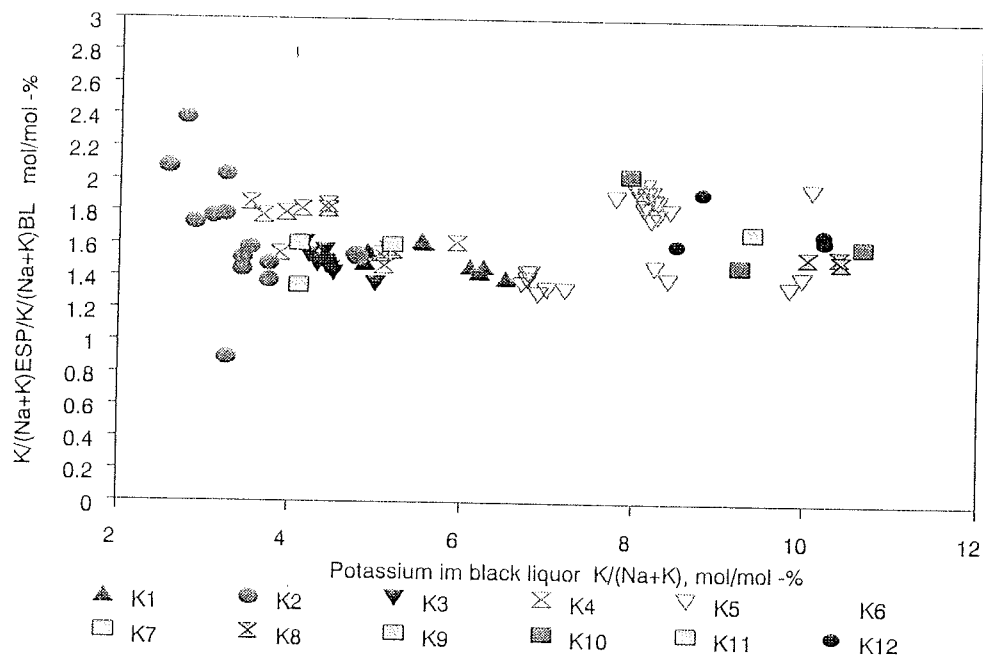
1. Vakkilainen, Esa, Limits of recovery boiler technology. 30 Years Recovery Boiler Co-operation in Finland. International conference, Baltic sea, 24 - 26 May , 1994.
2. Vakkilainen, Esa and Vihavainen Esa, Long term fouling of recovery boiler surfaces. International Chemical Recovery Conference, Seattle, June 7-11, 1992.
3. Vakkilainen, Esa and Niemitalo, Hanna, Measurement of high dry solids fouling and improvement of sootblowing control. Tappi Engineering Conference, San Francisco, California.
4. Vakkilainen, Esa, Frederick, William J., Reis, V. V. and Wåg, Kaj. J., Potassium and chlorine enrichment during black liquor combustion. laboratory and mill measurements and a mechanistic model. 1995 International Chemical Recovery Conference, Toronto.
5. Tran, H., Reeve, D. and Barham, D., Formation of Kraft Recovery Boiler Superheater Fireside Deposits. Pulp and Paper Canada 84(1983)1. pp. 36 - 41.
6. Hupa, M., Backman, R. and Uppstu, E., Fouling and corrosion mechanisms in the recovery boiler superheater area. Tappi Journal 70(1987)6. pp. 123 - 127.
7. Lidén, J. and Pejryd, L., Chloride emission from recovery boilers. Nordic Pulp and Paper Research Journal. (1968)1. pp. 22 - 25.
8. Vakkilainen, Esa, Korkea kuiva-aine muuttaa soodakattila-prosessia. Sellutehtaan avainkysymykset seminaari, 14-15.9.1994, Kotka.
9. Vakkilainen, Esa, High black liquor solids changes operation of recovery boiler. Paperi ja Puu - Paper and Timber, Vol. 76, No. 8, 1994
10. Vakkilainen, Esa, Role of recovery boiler modelling in developing a new lower furnace for LHT liquor firing. Yosemite Colloquium on Recovery Boiler Modelling, September 25-28, Yosemite California.
11. Niemitalo, Hanna, 1993, Soodakattilan likaantuminen ja nuohouksen ohjaus. Diplomityö, Oulun yliopisto.



Kuva 1, Painehäviöt kattilan startin jälkeen

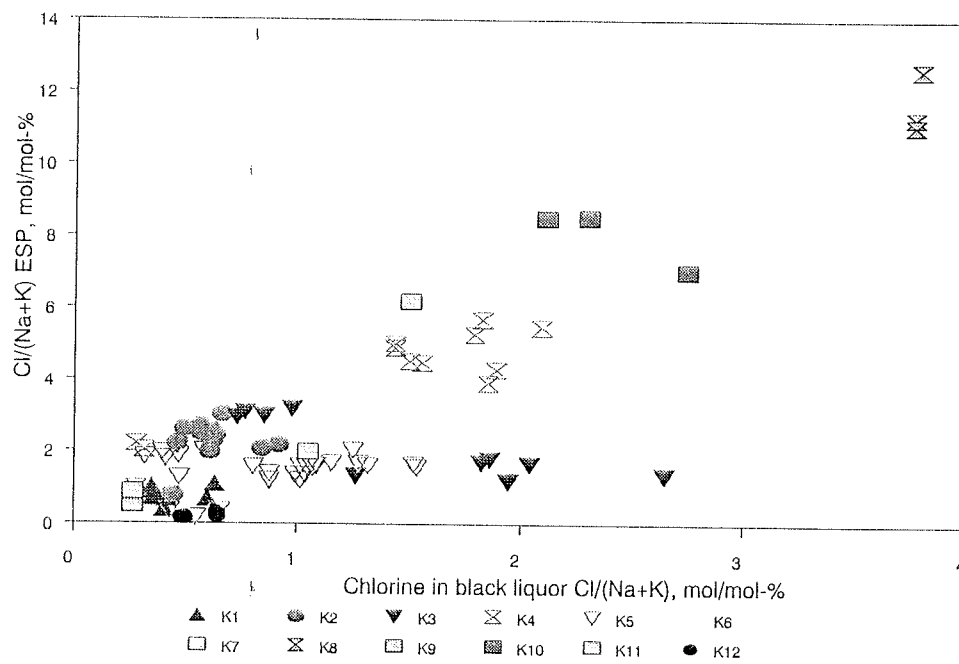


Kuva 2, Tulistinten lämpötilan nousut kattilan startin jälkeen

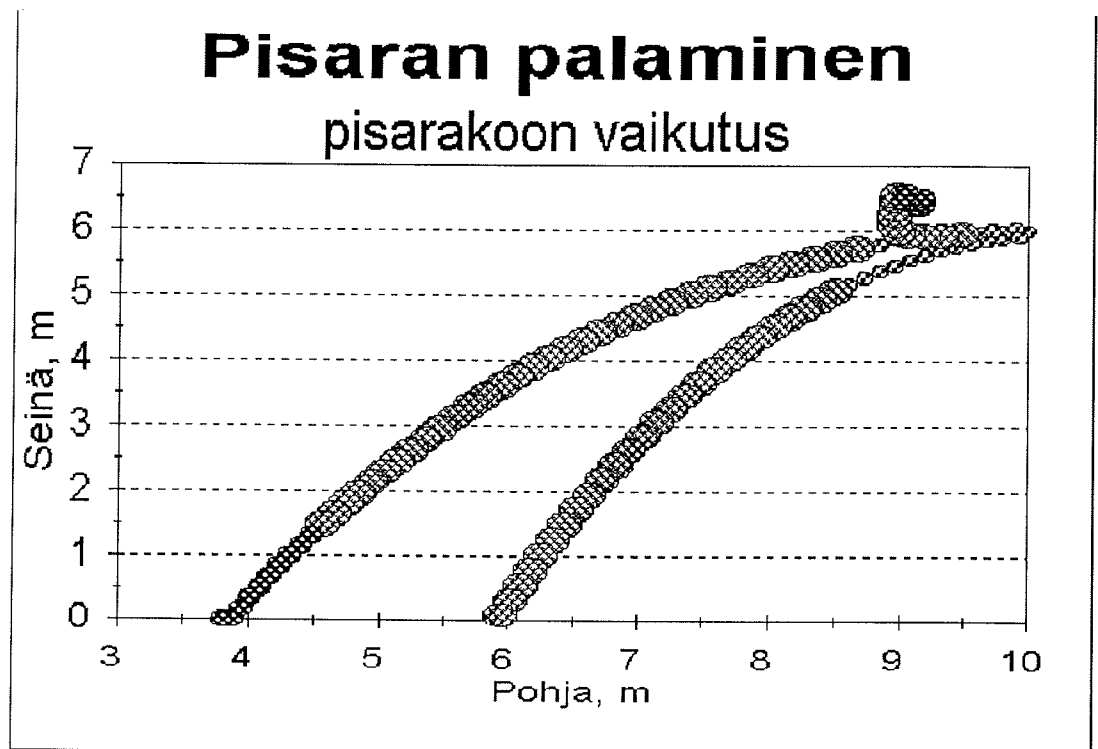


Copyright © 1993 A. Ahlstrom Corporation

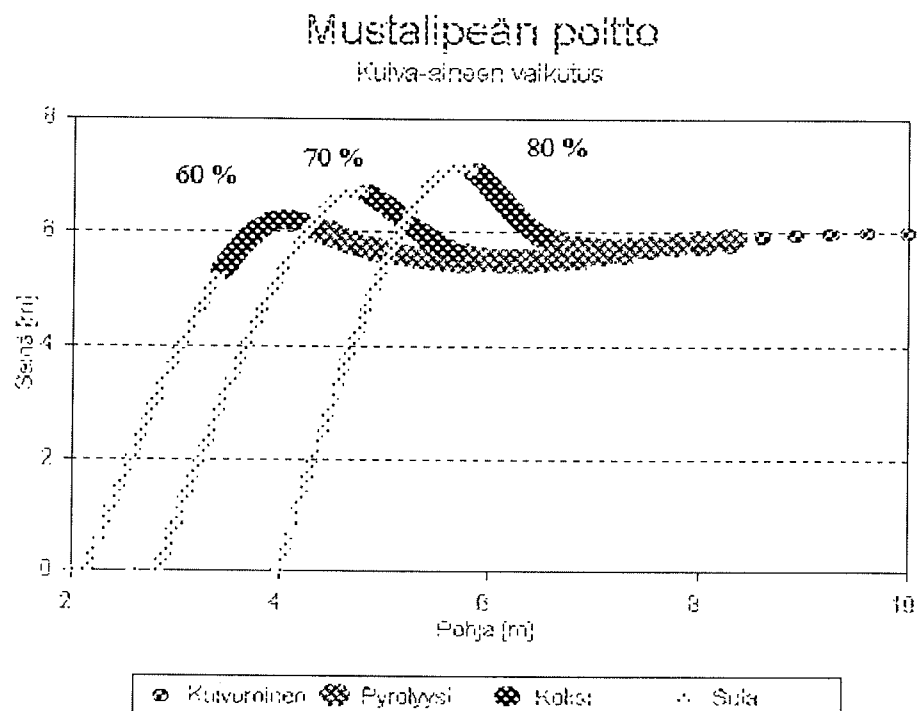
Kuva 3, Kaliumin rikastuminen tuhkaan



Kuva 4, Kloorin rikastuminen tuhkaan

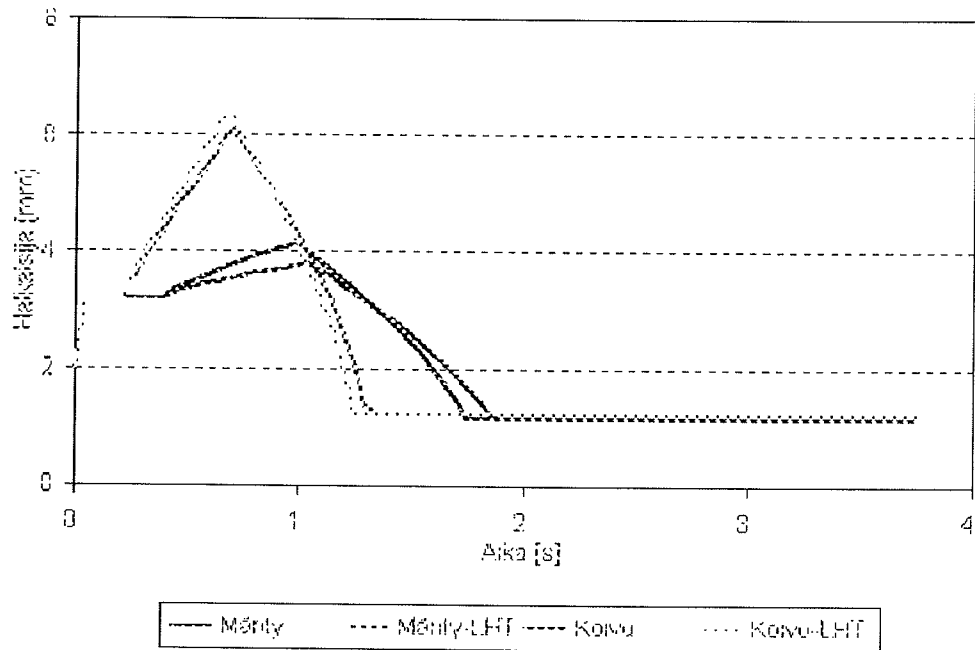


Kuva 5, Pisarakoon vaikutus palamiseen tulipesässä



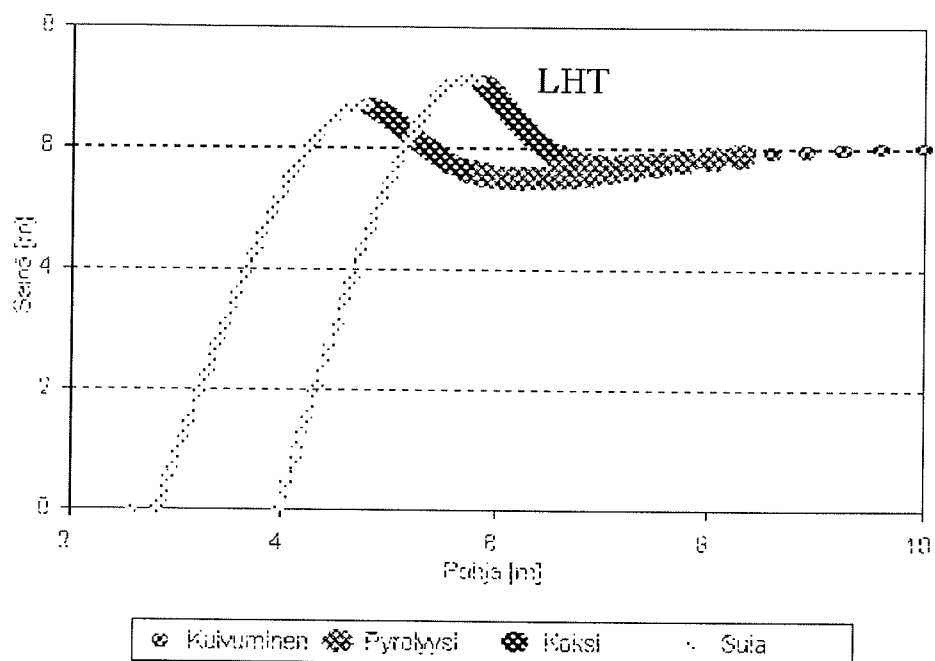
Kuva 6, Erikuiva-aineisia pisaroita tulipesässä

LHT lipeän poltto



Kuva 7, Tavallisen lipeän ja LHT lipeän palamisen vaiheet

LHT lipeän poltto



Kuva 8 , Tavallinen lipeä ja LHT lipeä tulipesässä

SOODAKATTILAN ILMANJAON HALLINTA

Erik Uppstu
Oy Polyrec Ab
Puh./fax 931-346 3496
Myllypuront. 26, 33450 Siivikkala

Johdanto

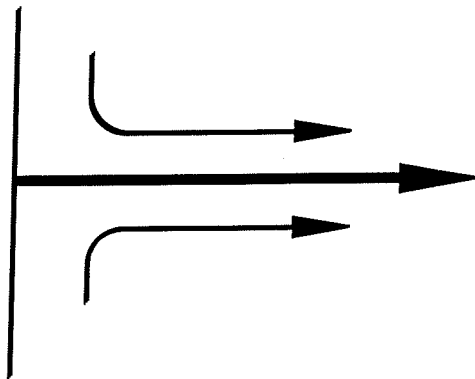
Soodakattilan peruskonsepti on pysynyt muuttumattomana yli 50 vuotta. Pieniä muutoksia sinne tai tänne on tosin tehty, mutta ne ovat rajoittuneet ilmarekistereiden siirtelyyn vähän ylös tai alas tai korkeintaan niiden lukumäärän vähäiseen kasvattamiseen.

Suurin osa soodakattiloista kärsivät edelleen ongelmista, jotka ovat hyvin kalliita tehtäville. Kapasiteetti on useasti riittämätön, niinkuin myös siihen liittyvä käytettävyys. Lisäksi korkea päästötaso on jatkuvasti ympäristön riesana.

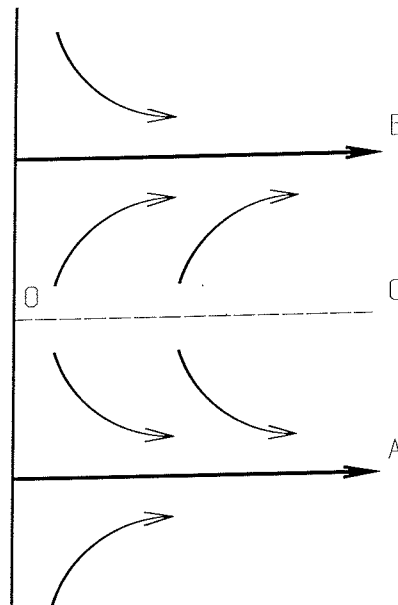
Virtausopin alkeita

Kaasun (niinkuin nesteen) staattinen paine alenee kun virtausnopeus kasvaa. Ilmasuihku joka etenee kattilan ilma-aukosta tulipesään "imee" siis ympäristön kaasua puoleensa, eli syntyy imuvirtaus joka suunnalta tulipesän seinää pitkin suihkua (aukkoa) kohti (kuva 1).

Jos suihkun lähelle sijoitetaan toinen suihku, imee tämä vastaavalla tavalla omaan suuntaansa, ja katkaisee siten toisen suihkun imuvirran tältä suunnalta. Kahden samanlaisen suihkun puolenväliin syntyy näin "nollavyöhyke" missä suihkujen imut vastakkaisiin suuntiin kumoavat toisiaan (kuva 2).



Kuva 1. Ilma-aukosta tuleva suihku imee kaasua ympäristöstä tulipesdän seinää pitkin.

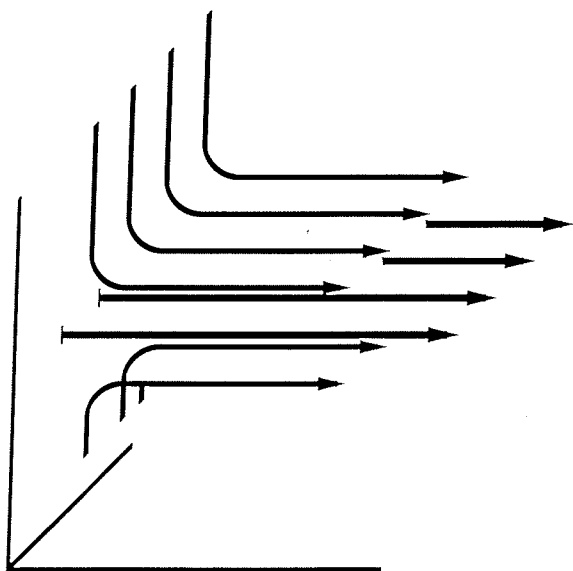


Kuva 2. Kahden ilmasuihkun väliin muodostuu "nollavyöhyke" O-O.

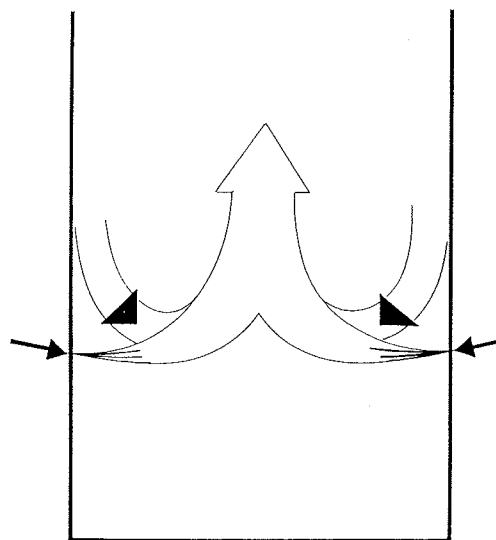
Kaksi lähekkäistä, samansuuntaista suihkua yhtyy edetessään riittävän pitkälle mm. laajenemisen johdosta, ja tuloksena on yhtenäinen, litteä suihku. Jos suuri määrä suihkuja on pitkässä, vaakasuorassa rivissä (peräisin ilma-aukoista jotka ovat vaakasuorassa rivissä) on tulos näin ollen leveä, litteä ja vaakasuora suihku. Tämä imee ympäristön kaasuja puoleensa ylhäältä ja alhaalta. Suihkun sisäisiä, vaakasuoria imuvirtauksia ei sitä vastoin pääse kehittymään. Muodostuu virtauskenttä joka on tyypillinen meidän nykyisille soodakattiloille (kuva 3)

Konventionaalinen soodakattila

Seurauksena konventionaalisen soodakattilan vaakasuorista ilma-aukkoriveistä syntyy mm. jokaisen ilmarekisterin yläpuolelle vahva, alaspäin suunnattu kaasuvirtaus. Jos tämän määrä vastaa esim. 20% ylöspäin menevästä nettovirtauksesta kyseisellä korkeudella, on tulipesän keskellä joka puolelta kokoon puristetun kaasuvirtauksen määrä 120%. Ei ihme että muodostunut "pisarahissi" on tehokas! Tyypillinen virtauskenttä on kaavamaisesti esitetty kuvassa 4.



Kuva 3. Vaakasuoran ilmasuihkurivin muodostama litteä, vaakasuora suihku joka imee kaasua ylhäältä ja alhaalta.

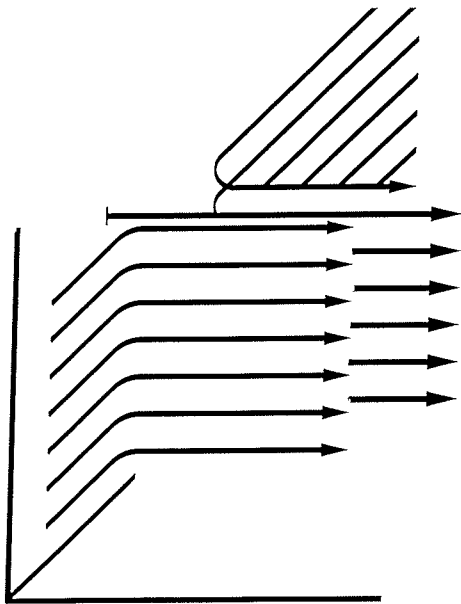


Kuva 4. Tyypillinen virtauskenttä konventionaalisessa soodakattilassa. Keskellä "pisarahissi".

Kun yo. olosuhteissa pyritään tehostamaan kaasujen sekoittumista (tavoittaen täydellisempää palamista) lisäämällä polttoilman painetta, vahvistuvat pystysuorat virtaukset samalla, ja pystysuuntainen kanavointi pahenee entisestään. Pyritään keskittämään palamista tulipesän alaosaan, mutta tulokseksi jää että polttoaine kulkeutuu entistään enemmän yläosaan.

Uusi konsepti

Sijoittamalla ilma-aukot pystysuoriin riveihin kääntyy perusasetelma myös 90 astetta. Erillisten suihkujen muodostamat litteät suihkut muuttuvat pystysuoriksi (kuva 5), jonka ansiosta imuvirtaukset tulevat sivuilta (siis vasemmalta ja oikealta) tehostaen sekoittumista vaakatasossa. Sitä vastoin pystysuorat virtaukset vaimenevat, heikentäen tai kokonaan poistaen kanavoitumista.



Kuva 5. Pystysuoran ilma-aukkorivin muodostama pystysuuntainen litteä suihku, joka imee ympäristön kaasua sivuilta.

Käytännön sovellutukset

Sovellutukseksi ehdotetaan seuraava:

Muutama pystysuora ilma-aukkorivi sijoitetaan perinteisen vaakasuoran primäärirekisterin yläpuolelle esim. "viisisormiperiaatteen" mukaisesti. Etu(taka-)seinälle kolme pystyriviä ja taka(etu-)seinälle kaksi pystyriviä suunnattuina vastakkaisten rivien puolenväliin antavat hyvin suuren "kitkapinnan" (kohtaavien suihkujen välinen raja-alue) ja varmistavat siten erittäin tehokkaan sekoittumisen.

Uuden konseptin vaikutukset

Uuden konseptin ansiosta on mahdollista nostaa kuormitusta pahentamatta esimerkiksi lentävistä pisaroista tai korkeammasta lämpötilasta johtuvaa lämpöpintojen likaantumista ja tukkeutumista. Vaihtoehtoisesti on muuttumattomalla kuormalla mahdollista parantaa esim. käytettävyyttä. Mustalipeäpisaroiden pysyessä tulipesän alaosassa lämpötila nousee tällä alueella, jonka ansiosta palaminen stabiloituu, SOX-taso laskee, reduktio paranee jne. Koska pystysuuntaisen kanavoitumisen takia käytön kannalta vaikea kompromissi sekoittumisen ja pisaroiden lentoon lähtemisen välillä poistuu, antanee uusi järjestelmä sellaiset puitteet, että todellinen tietokoneohjaus vihdoinkin voisi toteutua.

Todettakoon tässä yhteydessä että uuden järjestelmän rakentaminen verrattuna perinteiseen ratkaisuun, joka normaalisti olisi tulipesän suurentaminen, tulisi oleellisesti halvemmaksi. Tähän vaikuttaa pienemmän työ- ja ainemäärän lisäksi lyhyempi asennusaika (tuotantomenetykset vähenevät).

Vaikutus NOX-päästöihin

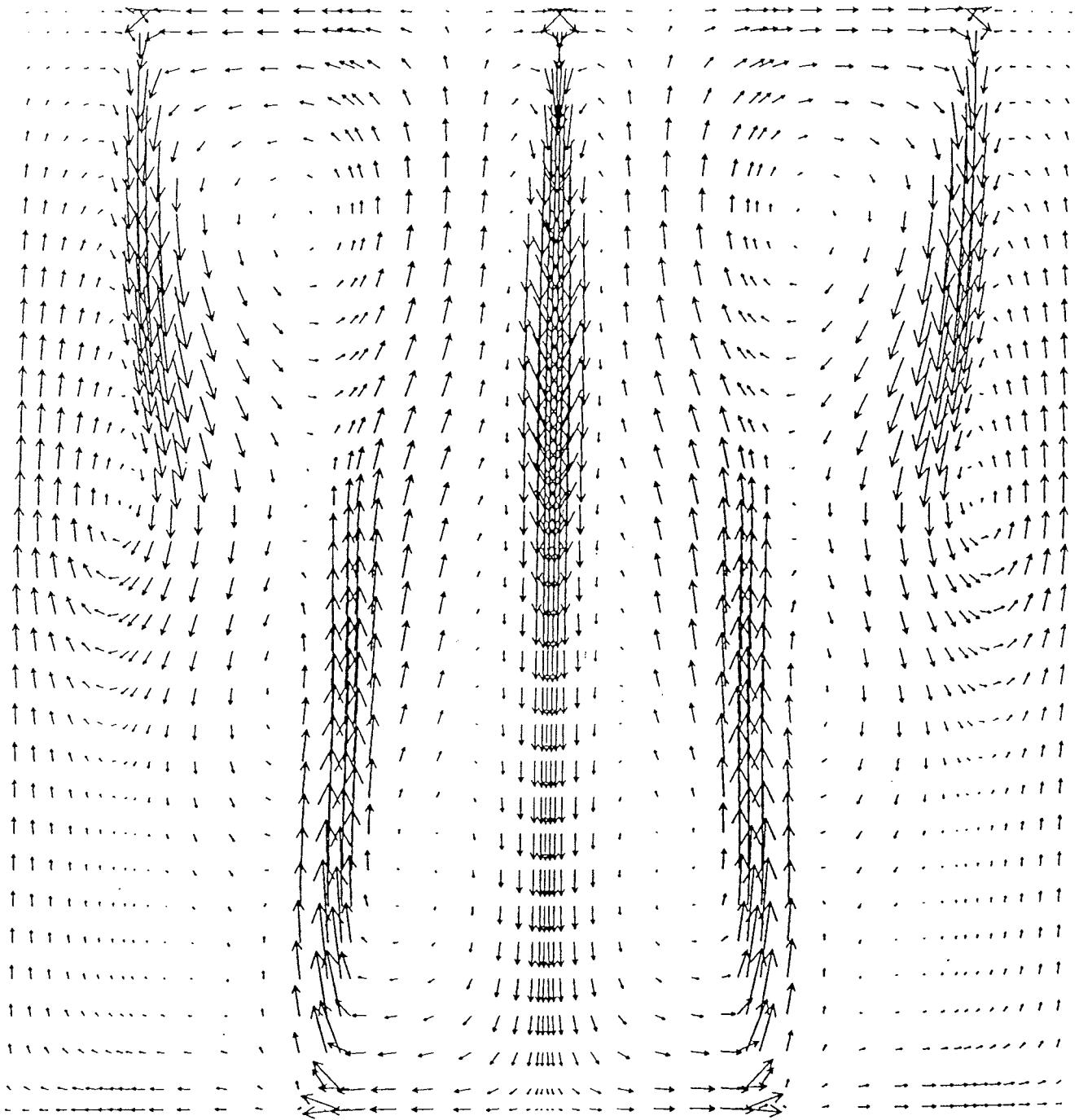
Yllä olevat toteamukset prosessieduista perustuvat laajaan käytännön kokemukseen, virtausopin alkeisiin, mallikokeisiin ja ATK-simulointiin (kuvat 5-8). Kirjoittajalla ei kuitenkaan ole perusteita ennakoida uuden konseptin vaikutuksia NOX-päästöihin. Lienee joka tapauksessa todennäköistä, että jos ilmanjaolla ylipäänsä vaikuttaa näihin, juuri asteittainen ilman lisäys ja perusteellinen sekoittuminen parhaiten edistäisi NOX-päästöjen torjumista. Sitä vastoin perinteisessä asetelmassa sekä happirikkaiden että happiköyhien kaasujen vahva kanavointi läpäisee tulipesän kaikki lämpötilavyöhykkeet. Tällaisissa olosuhteissa näiden "vuotojen" tukkiminen on varmaan vaikea tehtävä.

Mahdolliset riskit

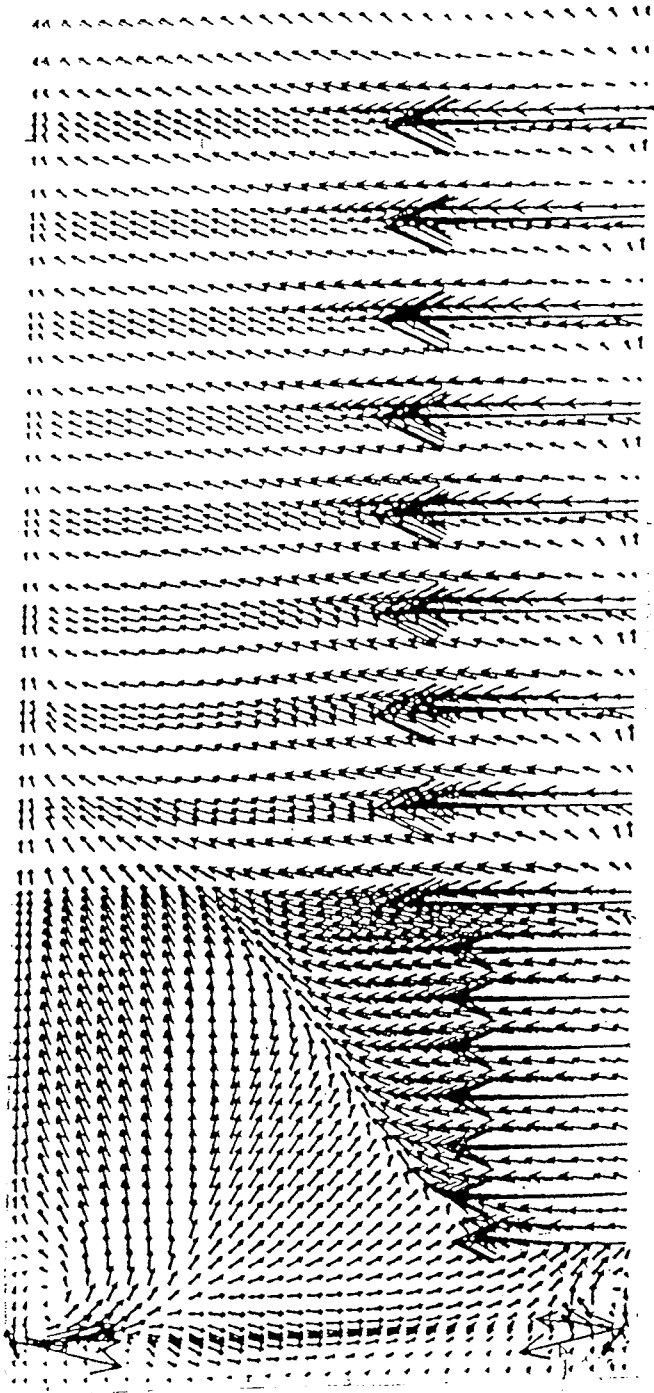
Polton keskittämällä voidaan ehkä nostaa tulipesän lämpötilaa haitallisen korkealle. Verrattaessa voimakattiloiden lämpörasituksiin, jotka ovat moninkertaiset soodakattilan mitoitussarvoihin nähden, riskit lienevät kuitenkin kohtuulliset. Tarvittaessa voidaan joka tapauksessa ottaa "askel taaksepäin" ilman suurempia vaikeuksia.

Tiivistelmä

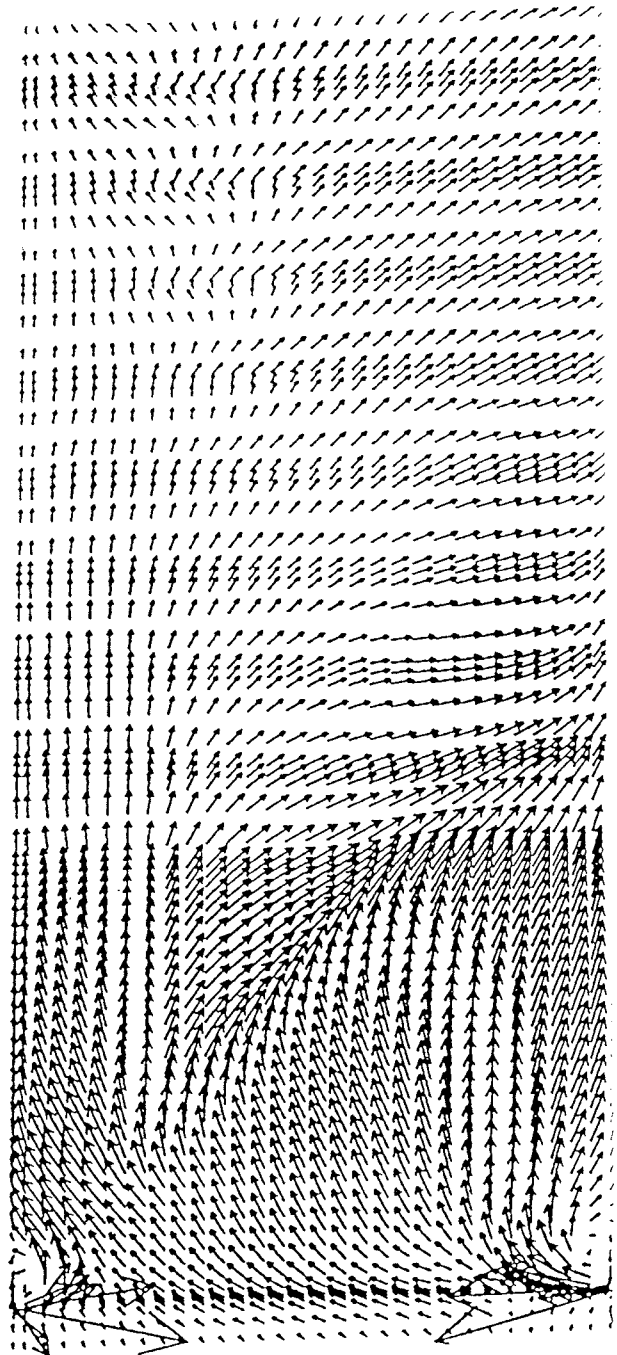
On keksitty uusi asetelma soodakattilan ilmanjaolle perustuen ilma-aukkojen sijoittamiseen pystysuoriin riveihin. Uusi konsepti kääntää eräät virtauskuviot jotka perinteisessä konseptissa toimivat haitaksi niin, että ne uudessa edistävät prosessin tavoitteita. Uuden konseptin etuihin voidaan lisäksi lukea investointikustannukset, jotka perinteisten, vaihtoehtoisten ratkaisujen hintatasoon nähden ovat varsin kohtuulliset.



Kuva 6. Vaakatason virtauskenttä, missä ylhäällä näkyy etuseinällä olevien kolmen aukkorivin muodostamat kolme suihkua, "sormea", ja alhaalla takaseinän vastaavat "sormet". Nämä vahvat suihkut sekoittavat kaasut tehokkaasti vaakatasossa. Simuloinnin erotuskyky ei riitä kuvaamaan ne miljoonat pienet pyörteet jotka sormien välisissä "kitkapinnoissa" varmistavat molekyyli-tason sekoittamisen ja siten tehokkaan palamisen.



Kuva 7. Simuloitu pystysuora virtauskenttä viisisormisen ratkaisun keskisormen keskiviivaa pitkin. Huomatkaa tasainen nopeusjakauma pystysuunnassa. Vain primääri-ilman yläpuolella on jonkin verran alaspäin menevää takaisinvirtausta.



Kuva 8. Pystyleikkaus kahden sormen puolessavälissä. Alaspäin meneviä virtauksia löytyy vain primääriaukkojen yläpuolelta. Muualla kaasun nopeus ylöspäin on varsin tasainen.