

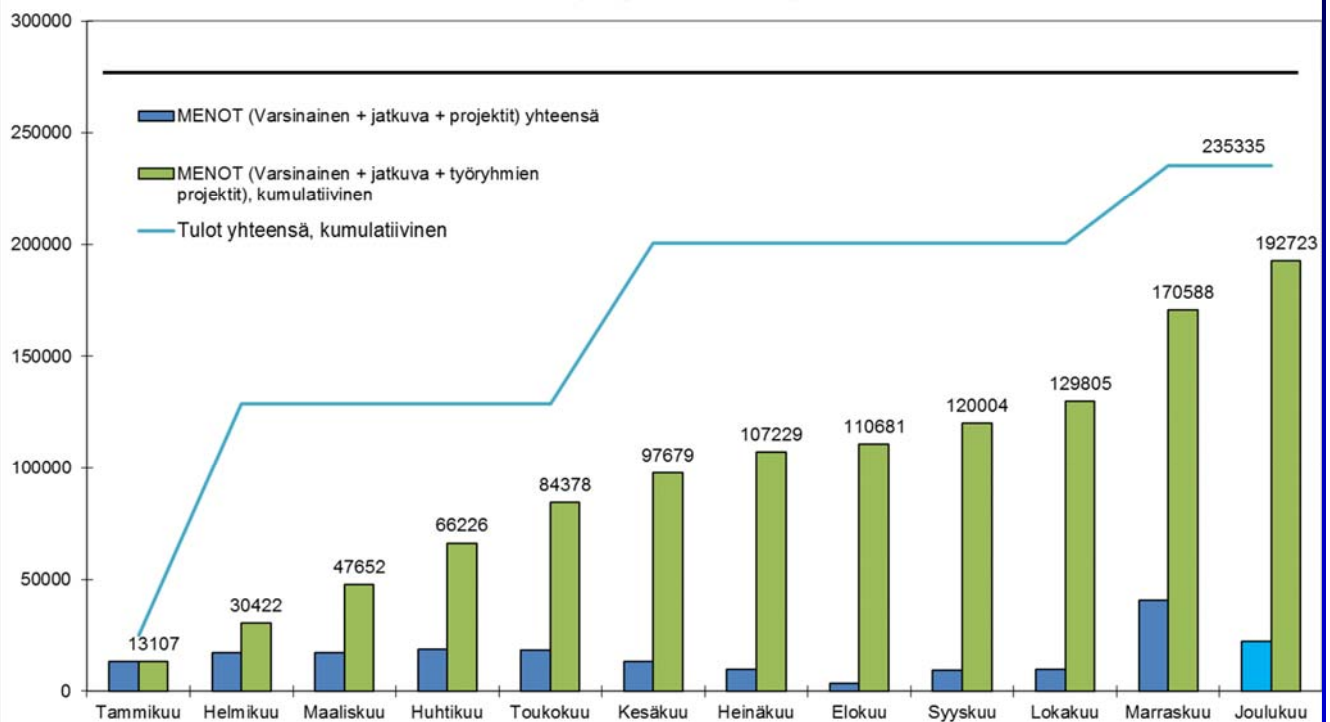
LIITE 2
Tuntiseuranta ja kassavirta



Talous 2013

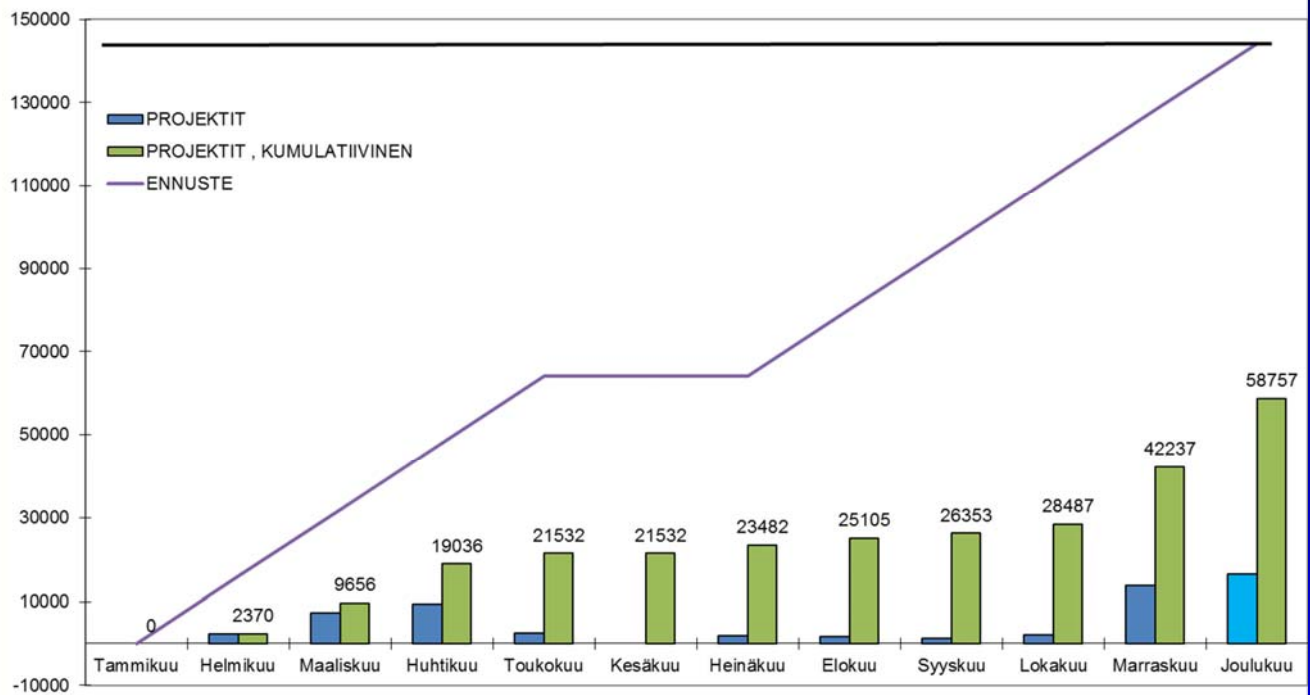


Tulot vs. menot v. 2013
(budjetti 277 000 eur)

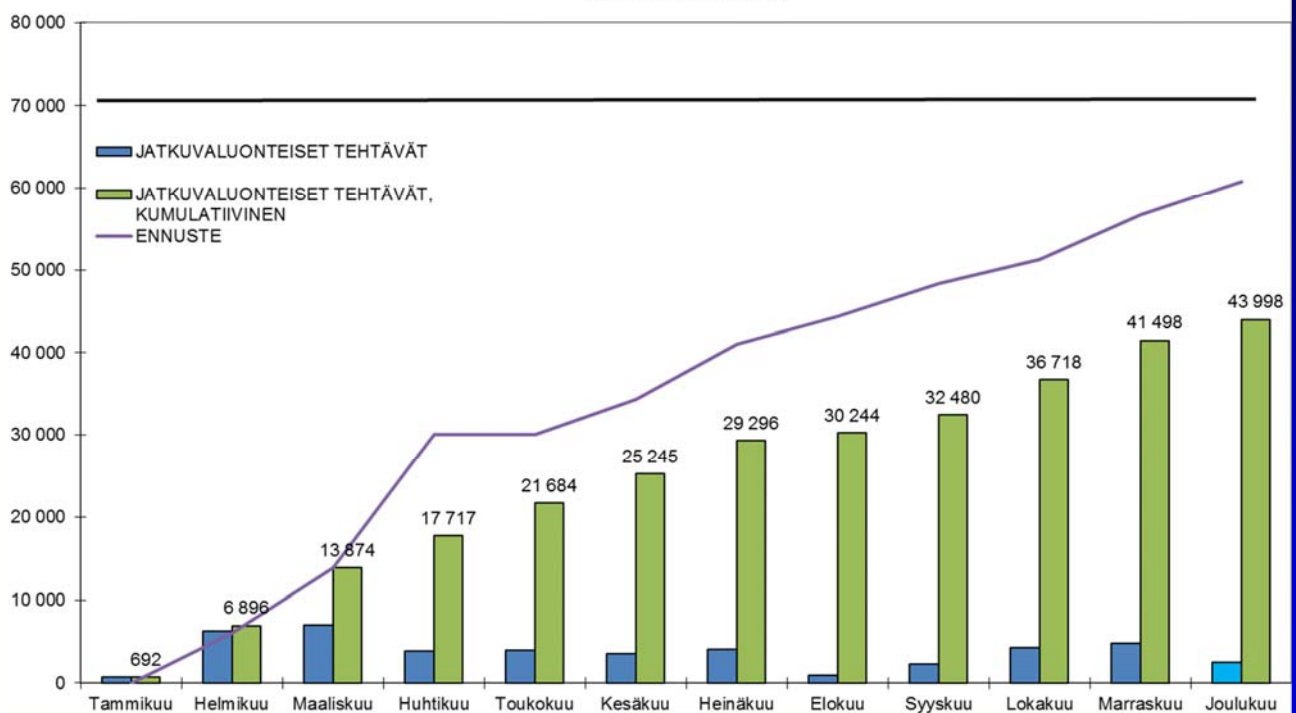




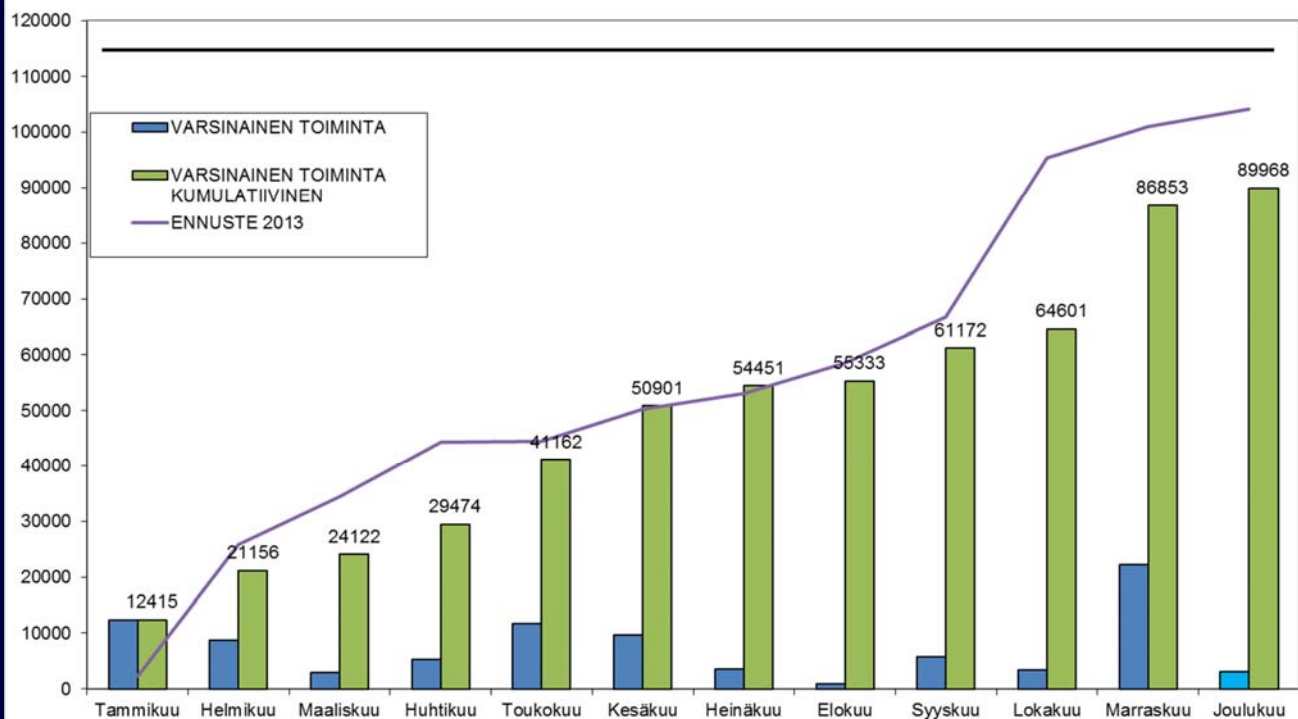
Projektit kustannuskehitys v. 2013 (budjetti 144 000 eur)



Jatkuvaluonteiset tehtävät kustannuskehitys v. 2013 (budjetti 71 000 eur)



Varsinainen toiminta kustannuskehitys v. 2013
(budjetti 115 200 eur)



	Toteuma vuonna 2013	Ennuste vuonna 2013	Budjetti vuodelle 2013	Erotus
TULOT				
Jäsenmaksut ja muu säännöllinen tuki				
Kattilan käyttäjät	110 500	110 500	130 000	-19 500
Kattilan valmistajat	24 650	24 650	29 000	-4 350
If Vahinkovakuutus	5 950	5 950	7 000	-1 050
Pohjola	3 825	3 825	4 500	-675
YIT Teollisuus	7 650	7 650	9 000	-1 350
Pöyry Finland	7 650	7 650	9 000	-1 350
Labtium Oy	3 825	3 825	4 500	-675
Inspecta	7 650	7 650	9 000	-1 350
Ulkojäsenet	3 600	3 600	3 600	0
Yhteensä	175 300	175 300	205 600	-30 300
Ennakkojäsenmaksut		0	0	0
Seminaarien osallistumismaksut				
Konemestaripäivä	25 115	25 115	25 000	115
Vuosikokous	0	0	0	0
Soodakattilapäivä	34 920	34 920	35 000	-80
Yhteensä	60035	60 035	60 000	35
Tulot yhteensä	235335	235 335	265 600	



	Toteuma vuonna 2013	Ennuste vuonna 2013	Budjetti vuodelle 2 013	Erotus
Ulkopuolinen rahoitus				
Ulkopuolinen rahoitus yhteensä	0	0	0	0
Muu rahoitus	0	0	0	0
Korkotuotot	0	0	1 500	-1 500
TULOT YHTEENSÄ	235 335	235 335	267 100	-31 765



	Toteuma vuonna 2013	Ennuste vuonna 2013	Budjetti vuodelle 2 013	Erotus
MENOT				
VARSINAINEN TOIMINTA				
Seminaarikulut				
Konemestaripäivä (3010, 3011, 3012, 3013)	21 120	21 120	25 000	3 880
Soodakattilapäivä (3010, 3011, 3012, 3013)	26 735	26 735	35 000	8 265
50-vuotisjuhla (3014, 3015, 3016)	17 763	17 763	20 000	2 237
Seminaarikulut yhteensä	65 618	66 062	80 000	13 938
MUU VARSINAINEN TOIMINTA				
Taloushallinto (3820, 3825)	10958	10 658	14 000	3 342
Hallituksen kulut (3835, 3840, 3845)	0	0		0
Vuosikokous (3850, 3855, 3856, 3857)	10755	10 755	15 000	4 245
Pankin palvelumaksut (3810)	150	150	200	50
Opinnäytetyöapuraha (8000)	2 000	2 000	2 000	0
Kotisivu ylläpito (3865)	156	156	2 000	1 844
Muut ostokulut (3880,3881)	188	188	2 000	
MUU VARSINAINEN TOIMINTA YHTEENSÄ	24207	23 907	35 200	
VARSINAINEN TOIMINTA YHTEENSÄ	89825	89 968	115 200	25 232



	Toteuma vuonna 2013	Ennuste vuonna 2013	Budjetti vuodelle 2 013	Erotus
JATKUVALUONTEISET TEHTÄVÄT				
Sihteeristö (5510,5515,5513,5515)				
Sihteeristön työ	18 135	18 135	25 000	6 865
Kansainvälinen toiminta	4 591	4 591	10 000	5 409
Sihteeristö yhteensä	22 726	22 726	35 000	12 274
Hallitus ja työryhmät				
Hallitus (5520)	5 436	5 436	8 000	2 564
Kestoisuustyöryhmä (5530)	4 042	4 042	6 000	1 958
Vaurioraportointi	546	546	1 000	454
Lipeätyöryhmä (5535)	1 904	1 904	6 000	4 096
Ympäristötyöryhmä (5540)	5 527	5 527	6 000	473
Automaatiotyöryhmä (5545)	2 033	2 033	6 000	3 967
Ohjelmatyöryhmä (5550)	1 784	1 784	3 000	1 216
Hallitus ja työryhmät yhteensä	21 272	21 272	36 000	14 728
JATKUVALUONTEISET TEHTÄVÄT YHTEENSÄ	43 998	43 998	71 000	-27 002
VARSINAINEN + JATKUVA TOIMINTA	133 823	133 966	186 200	52 234
				9

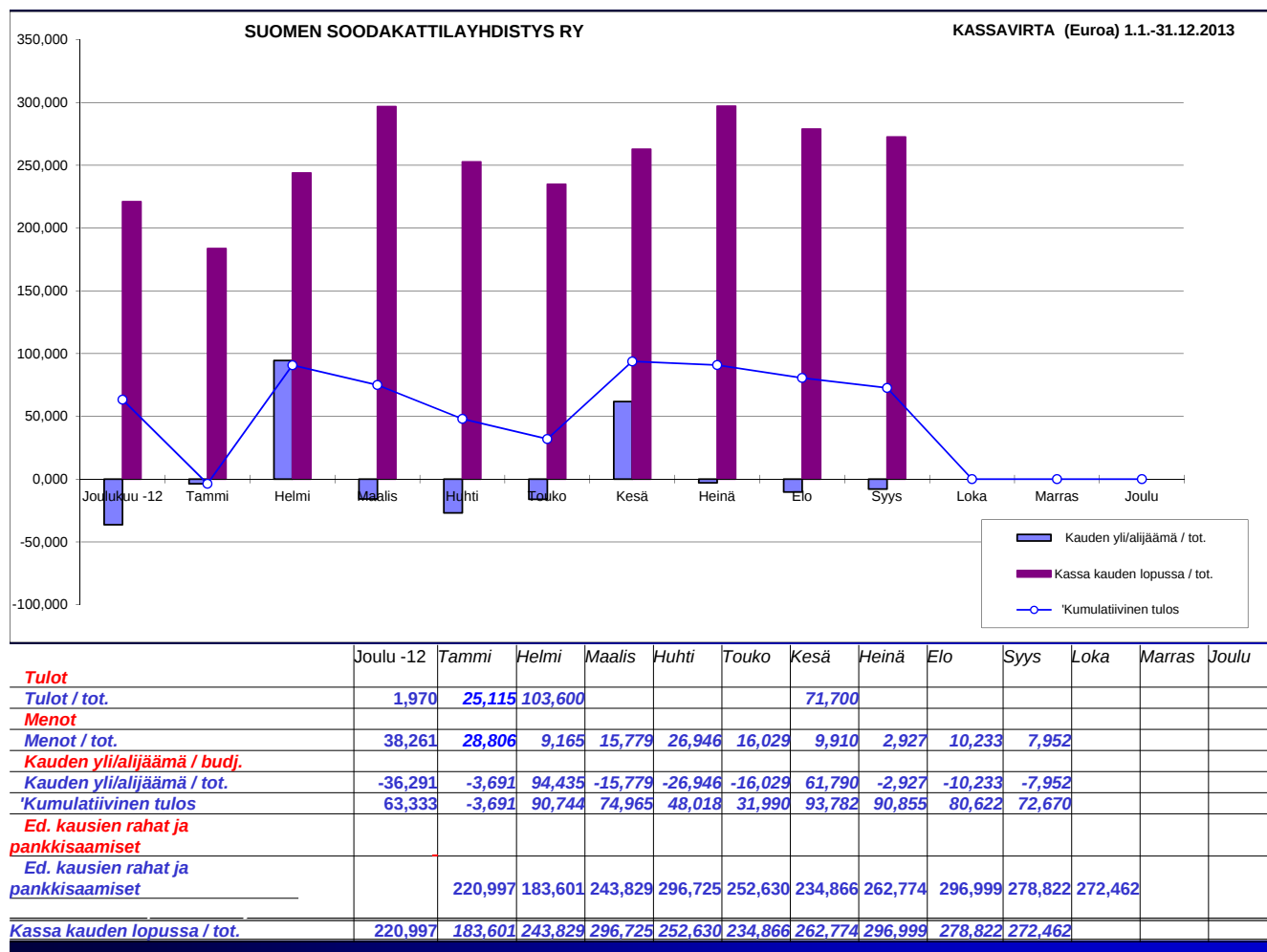


	Toteuma vuonna 2013	Ennuste vuonna 2013	Budjetti vuodelle 2 013	Erotus
Työryhmien projektit				
Kestoisuustyöryhmän tehtäväalue (5700)				
VARO-tietokanta ylläpito				
Suojaussuosituksen päivitys	4 836	4 836	5 000	164
TOC-mittaukset MF Kemi (JP-analysis)	1 229	1 229	1 500	
Kestoisuustyöryhmän tehtäväalue yhteensä	6 065	6 065	6 500	436
Lipeätyöryhmän tehtäväalue (5710)				
Syöttövesipumpun mitoitus (LUT)	11 900	11 900	11 900	
Mustalipeän Ei-newtonilaisuus ja pisaroituminen (Labtium/Aalto)	0	0	46 000	46 000
Lipeätyöryhmän tehtäväalue yhteensä	11 900	11 900	57 900	46 000
Ympäristötyöryhmän tehtäväalue (5720)				
POPE	8 332	8 332	7 858	-474
Hajukaasusuosituksen päivitys (ATR/YTR:n kanssa)	4 815	4 815	1 500	-3 315
Soodakattilan sähkösuodintuhkan hyötykäyttömahdollisuudet (Sirra)	12 500	12 500	12 500	0
Ympäristötyöryhmän tehtäväalue yhteensä	25 647	25 647	21 858	-3 789
Automaatiotyöryhmän tehtäväalue (5730)				
UPS-järjestelmän vikapuu	654	654	500	-154
UPS-ohje (Pöyry)	14 492	14 492	13 400	-1 092
Automaatiotyöryhmän tehtäväalue yhteensä	15 146	15 146	13 900	-1 246
Ohjelmatyöryhmän tehtäväalue (5740)				
Ohjelmatyöryhmän tehtäväalue yhteensä	0	0	0	0

	Toteuma vuonna 2013	Ennuste vuonna 2013	Budjetti vuodelle 2 013	Erotus
Projektiehdotukset (varaus)				
Muut projektiehdotukset (varaus)	0	0	44 075	44 075
Projektiehdotukset yhteensä	0	0	44 075	44 075
JATKUVALUONTEISET TEHTÄVÄT YHTEENSÄ	43 998	43 998	71 000	27 002
VARSINAINEN TOIMINTA YHTEENSÄ	89 825	89 968	115 200	25 232
TYÖRYHMIEN PROJEKTIT YHTEENSÄ	58 757	58 757	144 233	85 476
MENOT (Varsinainen + jatkuva + projektit) YHTEENSÄ	192 580	192 723	330 433	137 710

TULOS				
Tulot	235 335	235 335	267 100	31 765
Menot	192 580	192 723	330 433	137 710
Tilikauden tulos	42 755	42 612	-63 333	

11





Saamiset 30.9.2013

- 116/2012 Savcor Forest Oy 664,20
 - Lähetetty useita muistutuksia



Budjettiehdotus 2014



	Ennuste vuodelle 2 013	Budjetti vuodelle 2013	budjetti- suunnitelma 2014	budjetti- suunnitelma 2015	budjetti- suunnitelma 2016
TULOT					
Jäsenmaksut ja muu säännöllinen tuki					
Kattilan käyttäjät	110 500	130 000	130 000	130 000	130 000
Kattilan valmistajat	24 650	29 000	29 000	29 000	29 000
If Vahinkovakuutus	5 950	7 000	7 000	7 000	7 000
Pohjola	3 825	4 500	4 500	4 500	4 500
YIT	7 650	9 000	9 000	9 000	9 000
Pöyry Finland	7 650	9 000	9 000	9 000	9 000
Labtium	3 825	4 500	4 500	4 500	4 500
Inspecta	7 650	9 000	9 000	9 000	9 000
Ulkojäsenet	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600
Yhteensä	175 300	205 600	205 600	205 600	205 600
Ennakkojäsenmaksut					
		0	0	0	0
Kokousten osallistumismaksut					
Konemestaripäivä	25 115	25 000	25 000	25 000	25 000
Soodakattilapäivä	34 920	35 000	35 000	36 000	36 000
SKY 50-vuotisjuhla / ICRC	0	0	144 508		
Yhteensä	60 035	60 000	204 508	61 000	61 000
Ulkopuolinen rahoitus					
Ulkopuolinen rahoitus yhteensä	0	0	0	0	0
Korkotuotot					
	1 500	1 500	1 000	1 000	1 000
TULOT YHTEENSÄ	235 335	267 100	411 108	267 600	267 600

15



	Ennuste vuodelle 2 013	Budjetti vuodelle 2013	budjetti- suunnitelma 2014	budjetti- suunnitelma 2015	budjetti- suunnitelma 2016
MENOT					
VARSINAINEN TOIMINTA					
Seminaarikulut					
Konemestaripäivä	21 120	25 000	25 000	25 000	25 000
Soodakattilapäivä	26 735	35 000	35 000	35 000	35 000
50-vuotisjuhla / ICRC	17 763	20 000	156 222	0	0
Seminaarikulut yhteensä	65 618	80 000	216 222	60 000	60 000
MUU VARSINAINEN TOIMINTA					
Taloushallinto	10 958	14 000	14 000	14 000	14 000
Vuosikokous	10 755	15 000	15 000	15 000	15 000
Pankin palvelumaksut	150	200	200	200	200
Opinnäytetyöapuraha	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
Kotisivun ylläpito	156	2 000	2 000	2 000	2 000
Muut ostokulut	188	2 000	2 000	2 000	2 000
MUU VARSINAINEN TOIMINTA YHTEENSÄ	24 207	35 200	35 200	35 200	35 200
VARSINAINEN TOIMINTA YHTEENSÄ	89 825	115 200	251 422	95 200	95 200

16



	Ennuste vuodelle 2 013	Budjetti vuodelle 2013	budjetti- suunnitelma 2014	budjetti- suunnitelma 2015	budjetti- suunnitelma 2016
JATKUVALUONTEISET TEHTÄVÄT					
Sihteeristötyö					
Sihteeristön työ	18 135	25 000	25 000	25 000	25 000
Kansainvälinen toiminta	4 591	10 000	10 000	10 000	10 000
Sihteeristötyö yhteensä	22 726	35 000	35 000	35 000	35 000
Hallitus ja työryhmät					
Hallitus	5 436	8 000	8 000	8 000	8 000
Kestoisuustyöryhmä	4 042	6 000	6 000	6 000	6 000
Vaurioraportointi	546	1 000	1 000	1 000	1 000
Lipeätyöryhmä	1 904	6 000	6 000	6 000	6 000
Ympäristötyöryhmä	5 527	6 000	6 000	6 000	6 000
Automaatiotyöryhmä	2 033	6 000	6 000	6 000	6 000
Ohjelmatyöryhmä	1 784	3 000	4 000	4 000	4 000
Hallitus ja työryhmät yhteensä	21 272	36 000	37 000	37 000	37 000
JATKUVALUONTEISET TEHTÄVÄT YHTEENSÄ	43 998	71 000	72 000	72 000	72 000



	Ennuste vuodelle 2 013	Budjetti vuodelle 2013	budjetti- suunnitelma 2014	budjetti- suunnitelma 2015	budjetti- suunnitelma 2016
PROJEKTIT					
Kestoisuustyöryhmän tehtäväalue					
Suojaussuosituksen päivitys	4 836	5 000			
TOC-mittaukset MF Kemi (JP-analysis)	1 229	1 500			
Kestoisuustyöryhmä yhteensä	6 065	6 500	25 000	25 000	25 000
Lipeätyöryhmän tehtäväalue					
Syöttövesipumpun mitoitus (LUT)	11 900	11 900			
Mustalipeän Ei-newtonilaisuus ja pisaroituminen (Labtium/Aalto)	0	46 000			
Lipeätyöryhmä yhteensä	11 900	57 900	25 000	25 000	25 000
Ympäristötyöryhmän tehtäväalue					
POPE	8 332	7 858			
Hajukaasusuosituksen päivitys (ATR/YTR:n kanssa)	4 815	1 500			
Soodakattilan sähkösuodintuhkan hyötykäyttömahdollisuudet (Sirra)	12 500	12 500			
Ympäristötyöryhmä yhteensä	25 647	21 858	25 000	25 000	25 000
Automaatiotyöryhmän tehtäväalue					
UPS-järjestelmän vikapuu	654	500			
UPS-ohje (Pöyry)	14 492	13 400			
Automaatiotyöryhmä yhteensä	15 146	13 900	25 000	25 000	25 000
Ohjelmatyöryhmän tehtäväalue					
SKY Historiikki			70 000		
Ohjelmatyöryhmä yhteensä		0	70 000	0	0



	Ennuste vuodelle 2 013	Budjetti vuodelle 2013	budjetti- suunnitelma 2014	budjetti- suunnitelma 2015	budjetti- suunnitelma 2016
Projektitehdotukset (varaus)					
Muut projektiehdotukset (varaus)	0	44 075			
Projektiehdotukset yhteensä		44 075	0	0	0
PROJEKTIT YHTEENSÄ	58 757	144 233	170 000	100 000	100 000
MENOT YHTEENSÄ	192 580	330 433	493 422	267 200	267 200
TULOS					
Tulot	235 335	267 100	411 108	267 600	267 600
Menot	192 580	330 433	493 422	267 200	267 200
Tilikauden yli/alijäämä	42 755	-63 333	-82 314	400	400
Välittömät verot		0	0	112	112
Tilikauden voitto / tappio	42 755	-63 333	-82 314	288	288

LIITE 3
ATR: Soodakattilan UPS järjestelmän ohje, Pöyry
– raportti 3.10.2013



SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS
FINNISH RECOVERY BOILER COMMITTEE

Suomen Soodakattilayhdistys ry.

**Ohje soodakattilalaitoksen
varmennetun jännitejakelun
periaatteeksi**

**Suomen Soodakattilayhdistystyksen
Automaatiotyöryhmä**

3.10.2013

(16A0913- E0145)

JOHDANTO

Selvityksen tarkoitus on suositella mahdollisimman varmaa UPS verkon rakennetta syöttämään soodakattilan varmennettuja kuormia. Dieselin osalta käsitellään dieselistä syötettäväksi suositeltavat kuormat. Ohjeen tekemisestä on vastannut Suomen Soodakattilayhdistyksen Automaatiotyöryhmä.

Ohje ei yritä pakottaa valmistajia ja käyttäjiä samanlaisiin laitteisiin ja ohjausratkaisuihin, vaan ohjeessa pyritään esittämään malliratkaisuja varmasta UPS verkon rakenteesta, suunnittelusta sekä varmennetusta verkosta syötettävistä kuormista. Lisäksi on annettu suosituksia laitevalintaan, testauksiin ja huoltoon liittyen. Selvityksen loppuun on kerätty kuvauksia tehtailla tapahtuneista UPS-jakelun häiriöistä.

Toteutusprojekteissa on huomioitava, että voimassa olevia lakeja, asetuksia sekä viranomaisten antamia määräyksiä ja ohjeita noudatetaan.

Yhdistys ei vastaa tämän ohjeen virheistä eikä näistä johtuvista mahdollisista ongelmista.

Käytetyt termit ja lyhenteet:

DCS	Prosessin ohjausjärjestelmä (Distributed Control System)
KLTK	Kattilalaitosten turvallisuuskomitea
TAJ	Turva-automaatiojärjestelmä
UPS	Katkoton jännitelähde (Uninterruptable power source)
VJV	Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset



SISÄLLYSLUETTELO

1	SÄHKÖKATKOKSEN VAIKUTUKSET SOODAKATTILAN TOIMINTAAN.....	4
2	VARMENNETUISTA VERKOISTA SYÖTETTÄVÄT KUORMAT	4
3	SUOSITELTAVAT UPS-VERKON RAKENTEET.....	5
4	UPS-VERKON SUUNNITTELUSSA HUOMIOON OTETTAVIA NÄKÖKOHTIA...	9
4.1	Mitoitus.....	9
4.2	Kompaktikatkaisijoiden käyttö syötöissä	10
4.3	Kuormien jako UPS:n kesken.....	10
4.4	Maadoitus.....	10
4.5	Toiminta poikkeavalla taajuudella ja jännitteellä	11
4.6	Ylijännitesuojaus.....	11
5	UPS LAITEVALINNASSA HUOMIOITAVIA SEIKKOJA.....	12
5.1	UPS laitetoimittajan valinta	12
5.2	Akuston rakenne ja tekniset vaatimukset	12
5.3	Häiriösuojaus	12
6	SUOSITUKSIA TESTAUSKÄYTÄNNÖSTÄ JA KUNNOSSAPIDOSTA.....	13
6.1	Huolto	13
6.2	Testaaminen	13
6.3	Perehdytys ja dokumentointi.....	14
7	ESIMERKKEJÄ TAPAHTUNEISTA UPS-JÄNNITTEENJAKELUN HÄIRIÖISTÄ	15
7.1	Esimerkki 1	15
7.2	Esimerkki 2	16
8	LÄHTEET	17

LIITTEET:

Liite 1	Varmennetuista verkoista syötettävät kuormat
Liite 2	Suosittelavan UPS-verkon periaatekuva – kaksi UPS:a ja kaksi erillistä jännitteenjakoa
Liite 3	Toiminta poikkeavalla taajuudella ja jännitteellä
Liite 4	UPS-verkkovaihtoehtojen kaaviot



1 SÄHKÖKATKOKSEN VAIKUTUKSET SOODAKATTILAN TOIMINTAAN

Mikäli soodakattilalaitoksella tapahtuu täydellinen sähkökatko, jossa sekä normaalit että varmennetut sähköjärjestelmät menetetään:

- kattilan normaalitoiminta pysähtyy, koska palamispuhaltimet, mustalipeäpumput ja syöttövesipumput pysähtyvät.
- venttiilijärjestelyistä (syöttövesi/päähöyryventtiili) riippuen kattila mahdollisesti kuivuu tai on märkäkeiton vaara
- koska operointinäytöt eivät toimi, operaattorit eivät tiedä mitä prosessissa tapahtuu, eivätkä voi täten hallita prosessia edes ohjaamalla venttiilejä käsin.
- hälytystorvet ja -valot eivät toimi
- Radiopuhelimien/matkapuhelimien tukiasemat, sähkölukot, varaosa-automaatit ja valvontakamerat eivät välttämättä toimi.

Kattila joutuu epämääräiseen tilaan ja pahimmassa tapauksessa putkistoon voi tulla vesivuoto, joka johtaa sulavesiräjähdykseen. Tästä syystä kattilahuoneesta on poistuttava. Poistumisen organisointia haittaa se, että puhelinyhteydet, hälytystorvet ja -valot eivät toimi.

Edellä kuvatun välttämiseksi soodakattilan varmennetut sähköjärjestelmät on suunniteltava siten, että kaikkien sähköjärjestelmien yhtäaikainen menetys on epätodennäköinen. Kaikki sähköiset laitteet ja järjestelmät, joilla kattila voidaan ohjata turvalliseen tilaan, tulee syöttää varmennetusta järjestelmästä. Tätä aihetta on käsitelty kappaleessa 3.

2 VARMENNETUISTA VERKOISTA SYÖTETTÄVÄT KUORMAT

Kaikki sähköiset laitteet ja järjestelmät, joilla kattila voidaan ohjata turvalliseen tilaan, tulee syöttää joko UPS:lla tai dieselillä varmennetusta järjestelmästä. Pääperiaate on, että kuormat, joiden toiminta häiriintyy lyhytaikaisestakin sähkökatkosta, tulee syöttää UPS-järjestelmästä, esim. kaikki ohjausjärjestelmät. Dieselillä voidaan syöttää laitteet, jotka ovat toimintavalmiita heti jännitteen palattua lyhyen sähkökatkon jälkeen. Koska paineilmaa ei välttämättä ole saatavilla sähkökatkon aikana, on venttiilit, joita on



pakko saada ohjattua molempiin suuntiin (kiinni/auki) sähkökatkon aikana, varustettava moottoritoimilaitteella.

Taulukkoon (liite 1) on kerätty tyypilliset UPS ja dieselistä syötettävät kuormat. Varmennetusta verkoista syötettävät kuormat riippuvat kattilatyypistä, valmistajasta ja käytetyistä teknisistä ratkaisuista.

Ohjausjärjestelmät tarvitsevat jännitesyöttöjä seuraaviin osiin:

- prosessiasemat
- operointiasemat
- valvomolaitteet
- ohjelmointiasemat
- analogiset ja digitaaliset ohjauskortit
- väyläkomponentit

3 SUOSITELTAVAT UPS-VERKON RAKENTEET

Ohjetta varten tarkasteltiin eri tehtailla käytössä olevia UPS-järjestelmän kytkentöjä ja näiden pohjalta kehitettyjä parannettuja vaihtoehtoja. Taulukossa 3-1 kuvatuille UPS-verkkovaihtoehtoille tehtiin luotettavuustarkastelu vikapuuanalyysimenetelmällä (Fault tree analysis, FTA). Tutkittujen UPS-verkkovaihtoehtojen yksinkertaistetut kaaviot on esitetty liitteessä 4.

Taulukko 3-1. Tutkitut UPS-verkkovaihtoehtot

Vaihtoehto	Kuvaus
1	1 x UPS-laitteisto, jolle syöttö kahdesta eri verkosta. Automaatiojärjestelmien sekä kenttälaitteiden syöttö saman UPS-varmennuksen takana.
2	2 x UPS-laitteisto, kummallekin syöttö kahdesta eri verkosta, UPS:t syöttävät omia verkkojaan, automaatiojärjestelmille syöttö kummastakin UPS:sta, automaattinen syötönvaihto kenttälaitteille.
3	2 x UPS-laitteisto, kummallekin syöttö kahdesta eri verkosta, UPS:t syöttävät yhtä verkkoa, josta syöttö automaatiojärjestelmille sekä kenttälaitteille.
4	1 x UPS-laitteisto, jolle syöttö kahdesta eri verkosta. Automaatiojärjestelmille vaihtoehtoinen syöttö UPS:n ohi varmentamattomasta verkosta, vaihtoehtoinen syöttö kenttälaitteille myös varmentamattomasta verkosta automaattisen syötönvaihdon kautta.



Verkot on pyritty vertailtavuuden helpottamiseksi laatimaan yhteneviltä osiltaan samanlaisiksi. Samoin vikadatana on käytetty samoja arvoja eri verkkovaihtoehtoissa, jotta verkon rakenteen erot saadaan esille. Analyysissä käytetty vikadata (vikataajuudet) ovat peräisin kirjasta T-boken. Kirjaan on kerätty vikatilastoja pohjoismaisesta ydinvoimateollisuudesta, tästä johtuen vikataajuudet saattavat olla liian optimistisia. Analyysin lopputuloksen kannalta on kuitenkin oleellista eri vaihtoehtojen luotettavuus toisiinsa nähden.

Vikapuuanalyysien laadinnan työkaluna käytettiin OpenFTA-nimistä freeware-ohjelmaa (saatavilla <http://www.openfta.com/>). Vikapuuanalyysin periaate on esitetty esimerkiksi standardissa IEC 61025 tai USA:n ydinviranomaisen ohjeistuksessa NUREG-0492.

Analyysissä tarkasteltiin vaihtoehtojen luotettavuutta kolmen erityyppisen vikatilanteen suhteen:

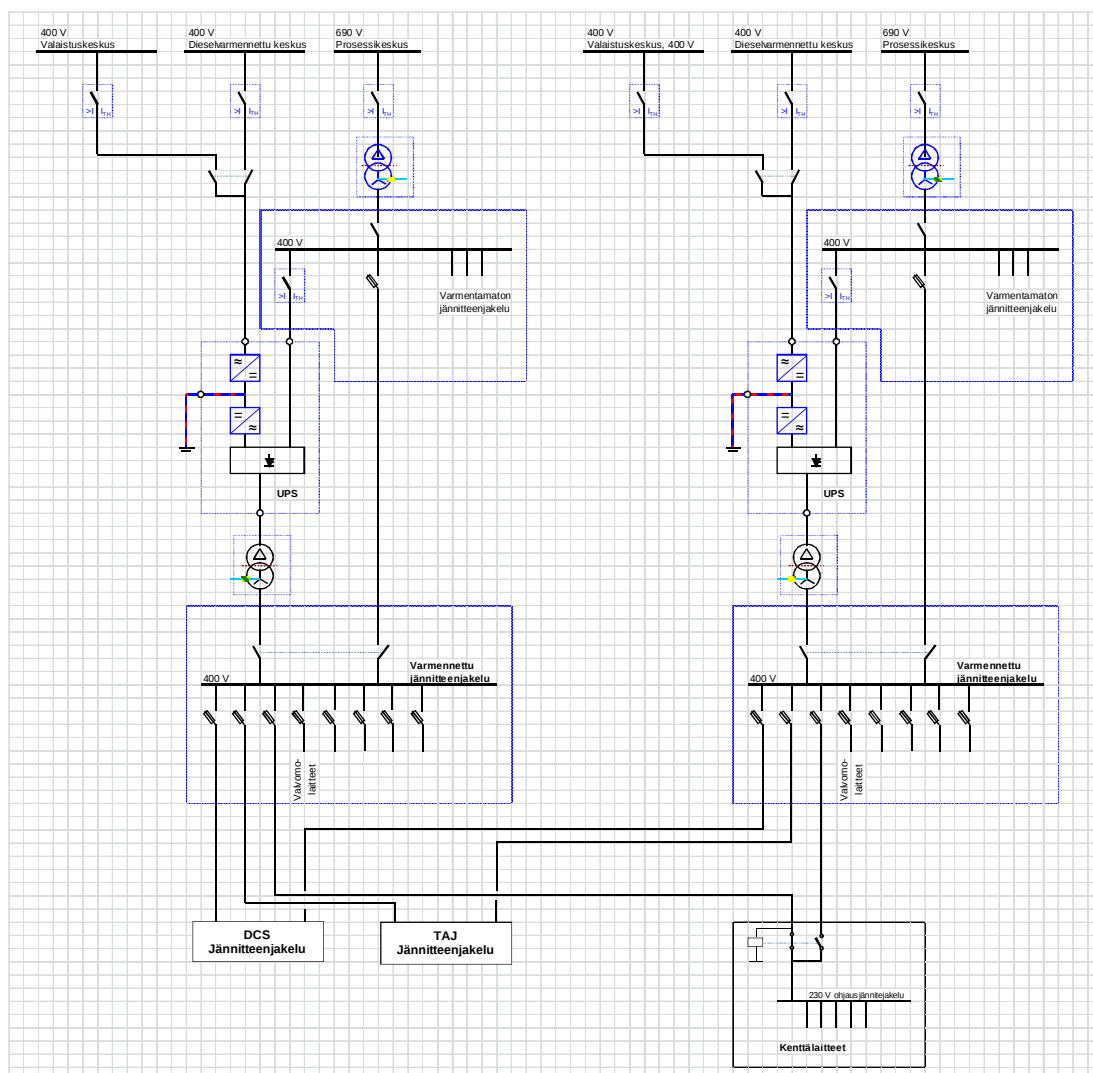
- Automaatiojärjestelmät hetkellisesti jännitteettömiä
- Kenttälaiteverkko jännitteetön pysyvästi normaalikäytön aikana
- Kenttälaiteverkko jännitteetön pysyvästi normaaliverkon sähkökatkon aikana

Analyysin tulokset on esitetty taulukossa 3-2.

Taulukko 3-2. Vaihtoehtojen suhteellinen luotettavuus vaihtoehtoon 1 nähden eri vikatilanteiden suhteen:

	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3	Vaihtoehto 4
Vikatilanne a	100 %	29219440 %	513 %	100 %
Vikatilanne b	100 %	726 %	152 %	726 %
Vikatilanne c	100 %	2188 %	457 %	98 %

Tarkastelun tuloksena luotettavin UPS-verkkovaihtoehto on numero 2, kuva 3-1. Tarkempi kuva järjestelmästä on esitetty liitteessä 2.



Kuva 3-1. Suositeltavan UPS-verkon periaate

Varmennettuja jännitesyöttöjä varten tulee olla kaksi täysin erillistä UPS-laitteistoa, jotka voivat sijaita myös eri osastoilla:

- UPS 1
- UPS 2

UPS:ien jännitteenjakehut rakennetaan täysin erillisinä siten, että toisen UPS:n sisäinen vika tai varmennetun jännitteenjakehulun keskuksessa tapahtuva vika ei aiheuta keskeytystä toisen UPS:n jännitteenjakehuluun.

UPS-laitteistot ehdotetaan syötettäviksi dieselgeneraattorilla varmennetusta keskukselta. Mikäli dieselvarmennetussa keskuksessa ei ole jännitettä, UPS:n syöttö voidaan ohjata manuaalisesti valaistuskeseuksesta.



Varasyöttö UPS:n staattiselle ohituskytkimelle ja käsin ohjattavalle ohituskytkimelle ehdotetaan syötettäväksi prosessikeskuksesta. Mikäli UPS vikaantuu tai ylikuormittuu se kääntää syötön automaattisesti staattisella kytkimellä ohituskäyttöön. Käsin ohjattavan ohituskytkimen on toimittava katkottomasti, ja sitä on tarkoitus käyttää ainoastaan UPS-laitteiston huollon aikana.

UPS-lähdön ja varmennetun jakelun keskuksen välissä oleva muuntaja on erotusmuuntaja (Liite 2), jonka tehtävä on erottaa galvaanisesti UPS-keskus UPS:ia syöttävästä verkosta, jolloin UPS-jakelussa mahdollisesti tapahtuvan maasulun vikavirta ei kulkeudu UPS:ia syöttävään verkkoon.

Ohjausjärjestelmien jännitesyötöissä tulee olla mahdollista tuoda kaksi erillistä jännitesyöttöä. Molemmissa syötöissä on jännite normaalitilanteessa päällä ja syötönvaihto tapahtuu katkottomasti. Mikäli sähkö- ja automaatiolaitteita ohjataan kenttäväylällä, tulee väylä varustaa kahdennetuilla jännitelähteillä, jotka on syötetty eri UPS:sta.

Valvomolaitteiden jännitesyötöt tulee jakaa UPS:ien välille siten, että vaikka toinen UPS vikaantuu, prosessia voidaan valvoa ja ohjata toisesta UPS:ta syötetyillä laitteilla.

UPS:sta syötetyt kenttälaitteet, joita ei ole kahdennettu, syötetään vaihtoautomatikalla varustetusta 230 V ohjausjännitekeskuksesta. Kenttälaitteet, jotka on kahdennettu, syötetään suoraan eri UPS:ta.

Mikäli UPS-laitteistot ovat identtiset, ovat syötöt redundanttiset. Mikäli UPS-laitteistot ovat eri valmistajilta, täyttää syöttö sekä redundanttisuus-, että diversiteettisyysvaatimukset.

Yllä olevilla toimenpiteillä pyritään poistamaan osa laitevioista johtuvista jännitekatkoista.



4 UPS-VERKON SUUNNITTELUSSA HUOMIOON OTETTAVIA NÄKÖKOHTIA

UPS-verkon suunnittelussa tulisi kiinnittää huomiota varmennetun sähköverkon tai sen osan lamauttavien yksittäisten vikojen esiintymismahdollisuuteen ja niiden poissulkemiseen.

Esimerkki:

- syötönvaihtoautomaatiikat tulisi mahdollisuuksien mukaan suunnitella niin, että syötönvaihdossa itsessään esiintyvät viat kuten kontaktorin kelan palaminen, valvontareleen vika tai ohjauspiirin stotsin laukeaminen ei normaalitilanteessa aiheuta pysyvää jännitekatkoa varmennetussa verkossa.

4.1 Mitoitus

UPS:ien nimellistehojen tulee olla sellaisia, että yksi UPS-laite kykenee syöttämään koko UPS-järjestelmään kytketyn kuorman. UPS-laitteissa tulee olla sellainen ylivirran syöttökyky, että UPS-järjestelmään kytketty suurin moottori saadaan käyntiin yhdellä UPS-laitteella muiden kuormien saadessa samaan aikaan niiden tarvitseman virran. Lisäksi UPS-laitteiden syöttämän UPS-järjestelmän suurin suojalaite (sulake, katkaisija tai johdonsuojakatkaisija) on saatava laukaistua yhdellä UPS-laitteella ja samaan aikaan muille lähdöille on saatava syötettyä niiden tarvitsema jatkuva virta. UPS jännitteenjakelun suojaukset tulee suunnitella selektiiviseksi, jotta vikatapauksessa häiriöt rajoittuvat mahdollisimman pieneen osaan verkosta.

Jos moottoriventtiilejä on syötetty UPS:sta, on ohjaukset järjestettävä niin, että useampia kuin yksi moottori ei käynnisty samanaikaisesti.

Selektiivisyyden aikaansaaminen ja laukaisuehtojen täyttäminen edellyttävät useimmiten erotusmuuntajien ylimitoitusta kuormitukseen nähden. Tyypillisesti erotusmuuntajien nimellisteho on vähintään puolitoistakertainen UPS:n tehoon verrattuna.

Kosketinelementtien hitsautumisesta johtuvan kiinnijäämisen eliminoimiseksi UPS-verkon ylivirtasuojalaitteiden mitoituksessa kontaktoreiden, releiden ja apukytkimien valmistajien antama nimellisvirta on kerrottava turvakertoimella 0.6 ([SFS-EN 50156](#)). Kaikkien kytkinlaitteiden on oltava toimintakuntoisia 250 000 kytkentäjakson jälkeen



käyttöolosuhteita vastaavissa olosuhteissa. Kontaktoreilla ja releillä on oltava lisäksi 3×10^6 kytkentäjakson mekaaninen kestävyys.

4.2 Kompaktikatkaisijoiden käyttö syötöissä

UPS-laitteistojen jännitesyötöissä suositellaan, että käytetään kompaktikatkaisijoita. Kun syötöissä käytetään sulakesuojausta, ei vikatilanteessa saada kolminapaista katkaisua. Tämä vaikeuttaa sekä suojauksen suunnittelua, että vikatilanteen hallitsemista (varmaa kolminapaista poiskytkentää). Myös vanhojen laitosten varokeyttekimet tulisi korvata kompaktikatkaisijoilla, joissa on virranrajoitusominaisuus. Kompakti-katkaisijoihin on saatavissa elektroniset suojareleet jotka mahdollistavat asianmukaisen suojauksen toteutuksen.

4.3 Kuormien jako UPS:n kesken

Jaettaessa UPS-kuormia eri UPS:n välillä on jako tehtävä siten, että vaikka toinen UPS vikaantuu, voidaan kattilan käyttöä jatkaa tai kattila ajaa toimivan UPS:n avulla turvalliseen tilaan.

Esimerkki:

- näyttöjen jännitesyötöt kannattaa jakaa eri UPS:n välille siten, että toisen UPS:n vikaantuessa kaikki oleellinen tieto on nähtävissä ja ohjattavissa kunnossa olevasta UPS:sta syötetyillä näytöillä

4.4 Maadoitus

Koska UPS-järjestelmässä on useita syöttövaihtoehtoja, tulee maadoitus- ja nollajohtimen kytkentöihin kiinnittää erityistä huomiota. Jos suunnittelua ei tehdä asianmukaisesti, osa käyttövirrasta voi kulkea muuta, kuin tarkoitettua reittiä pitkin. Nämä virrat voivat aiheuttaa tulipaloja, korroosiota ja sähkömagneettisia häiriöitä.

Seuraaviin seikkoihin tulee kiinnittää erityistä huomiota:

- Kaikissa kytkentätilanteissa kussakin virtapiirissä saa N- ja PE-johdin olla yhdistetty vain yhdessä kohdassa. Tarvittaessa tulee käyttää nelinapaista katkaisua.



- Vikavirralle on oltava paluureitti syöttävän muuntajan tähtipisteeseen PE- ja PEN-johtimia pitkin siten, että PE (PEN)-johdin kulkee vaihejohtimien kanssa samaa reittiä.

4.5 Toiminta poikkeavalla taajuudella ja jännitteellä

Polttolaitteistojen sekä niiden apulaitteiden sähkölaitteiden on toimittava jännitealueella 85%...110 % nimellisjännitteestä ja 95 %...105 % nimellistaajuudesta (SFS-EN 50156). Tyypillisesti teollisuuskäyttöön tarkoitettu UPS toimii näillä jännite- ja taajuusalueilla. Uutta laitosta rakennettaessa Suomeen on lisäksi otettava huomioon Fingridin [voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2013](#). Vaatimuksia on kuvattu tarkemmin liitteessä 3.

4.6 Ylijännitesuojaus

Turvallisuuteen liittyvien järjestelmien sähkönsyöttö tulee suojata ylijännitteeltä (KLTK Suojeluohje G10). Ylijännitteille herkkää elektroniikkaa sisältävät laitteet voidaan suojata sähköverkon moniportaisella ylijännitesuojauksella. Teollisuuskäyttöön tarkoitetut UPS:t on tyypillisesti varustettu ylijännitesuojilla. Lisäksi tulee varmistaa, että UPS:ia syöttävässä verkossa on tarvittavat ylemmän portaan ylijännitesuojat.

Hyvän suojaustason saavuttamiseksi maadoitusverkossa on oltava hyvä potentiaalitasaus sekä pieni maadoitusvastus.



5 UPS LAITEVALINNASSA HUOMIOITAVIA SEIKKOJA

5.1 UPS laitetoimittajan valinta

Laitevalintaa tehtäessä tulee varmistaa seuraavat asiat, joilla halutaan selvittää, että toimittaja on luotettava ja pysyy todennäköisesti markkinoilla jatkossakin:

- huollon ja varaosien saatavuus
- referenssit
- käyttökokemukset

Lisäksi UPS-laitteista kannattaa tarkistaa ja vertailla seuraavat asiat:

- laitteen diagnostiikka
- ohjelmapäivitykset ja –tuki
- saatavat hälytykset - vähintään summahälytys tarvitaan
- väyläliitännät

5.2 Akuston rakenne ja tekniset vaatimukset

Akuston tulee olla suljettuja lyijyakkuja ja käyttöiän tulee olla yli kymmenen vuotta. Suljetut lyijyakut voidaan asentaa sähkötilaan. Akusto mitoitetaan niin pitkälle toiminta-ajalle, että laitos saadaan ajettua turvalliseen tilaan (45 min - Suomen Soodakattilayhdistys ry:n Automaatiotyöryhmä, Soodakattilan turva-automaation suositus).

Akut tulee olla mahdollista asentaa rinnakkain vähintään kahteen ryhmään siten, että UPS:ia voidaan käyttää, vaikka yhteen akustoryhmään tulisi vika.

5.3 Häiriösuojaus

Sähköverkkoon voivat aiheuttaa häiriöitä sekä tehdasverkon ulkopuoliset häiriölähteet kuten ukkonen, sähkölaitosten käyttöhäiriöt, pikajälleenkytkennät ja suurtaajuiset häiriöt että tehdasverkon sisällä sijaitsevat häiriölähteet kuten voimalaitoksen käyttöhäiriöt, muuntajien ja kondensaattoreiden kytkennät, suurten moottoreiden käynnistykset, taajuusmuuttajat ja hitsauslaitteet.



Sähköhäiriöitä ovat esimerkiksi:

- sähkökatkos
- lyhyt- ja pitkäaikainen alijännite
- lyhyt- ja pitkäaikainen ylijännite
- kytkentätransientit
- suurtaajuinen häiriö
- taajuuden vaihtelut
- harmoninen särö

UPS:ia valittaessa tulee tarkistaa, että laite suojaa syötettäviä kuormia kaikilta edellä mainituilta häiriötyypeiltä.

6 SUOSITUKSIA TESTAUSKÄYTÄNNÖSTÄ JA KUNNOSSAPIDOSTA

6.1 Huolto

UPS tulee huoltaa säännöllisesti valmistajan antamien ohjeiden mukaan. UPS:n ennakkohuoltoon kuuluvat tyypillisesti seuraavat toimenpiteet:

- jäähdytysaukkojen tarkastus, puhdistus ja suodattimien vaihto
- hälytysten tarkastus
- akuston kunnontarkkailu, testaus ja tarvittaessa vaihto
- tekninen tarkastus, jossa tarkistetaan onko komponenteissa, johdotuksessa tai liittimissä havaittavissa ylikuumenemista tai vaurioita
- sisäpuolinen puhdistus
- mittaukset ja lämpökuvaukset

Valmistajat suosittelevat, että valtuutettu huoltomies tekee UPS -kotelon avaamista vaativat huoltotoimenpiteet.

6.2 Testaaminen

UPS-järjestelmän kaikkia manuaalisia ja automaattisia syöttövaihtoehtoja tulee testata säännöllisesti esimerkiksi vuoden välein ja vähintään valmistajan suosituksen mukaisesti. Kannattaa myös testata UPS:n toiminta akkukäytössä kytkemällä kaikki



sähkösyötöt pois UPS:sta. Testauksista on informoitava operaattoreita, että ei aiheuteta vääriä toimenpiteitä, kun testaukset aiheuttavat hälytyksiä.

Akustojen varauskykyä on testattava säännöllisin väliajoin, esimerkiksi vuoden välein ja vähintään valmistajan suosituksen mukaisesti. Tyypillisesti UPS-laitteissa on akuston automaattinen kunnontarkastus. Tämän lisäksi kannattaa tehdä säännöllisin väliajoin manuaalisesti täydellinen purkaustesti. Lämpötilan vaikutus suljetun akuston käyttöikään on suuri. Akuston suositeltava ympäristön lämpötila on 20 °C. Lämpötilan kohotessa 10 °C lyijyakuston käyttöikä putoaa noin puoleen nimellisestä. Alemmat lämpötilat pienentävät käytettävää kapasiteettia.

6.3 Perekdytys ja dokumentointi

Suunnittelun aikana tehdyt UPS-järjestelmän selektiivisyystarkastelut ja muut laskelmat perusteluineen tulee dokumentoida ja säilyttää huolellisesti. Kun UPS:sta otetaan uusia syöttöjä, tulee tarkistaa, että alkuperäiset mitoitusperusteet ovat voimassa. Erityisesti on huomioitava, että UPS:n selektiivisyyttä laskettaessa käytettyä maksimikuormitusta ei ylitetä, eikä jännitteenjakopaneeliin asenneta liian suuria sulakkeita tai sulakeautomaatteja. Lisäksi on pyrittävä kuormittamaan eri vaiheet mahdollisimman tasaisesti.

UPS-järjestelmän periaatekytkentäkaavio, selvitys järjestelmän toiminnasta ja toimintaohjeet vian etsimiseksi tulee säilyttää näkyvällä paikalla UPS:n välittömässä läheisyydessä. Henkilöstö on perehdytettävä näihin dokumentteihin.



7 ESIMERKKEJÄ TAPAHTUNEISTA UPS-JÄNNITTEENJAKELUN HÄIRIÖISTÄ

Seuraavassa on kuvattu esimerkein eräitä Soodakattilayhdistyksen tietoon tulleita UPS-jännitejakelun häiriöitä. Häiriöt on kuvattu, jotta ohjeen lukijalle tulisi konkreettinen kuva mahdollisista vaaratilanteista, jotka liittyvät UPS-jännitteenjakeleluun.

Vastaavanlaisia tapahtumia on esiintynyt muillakin tehtailla.

7.1 Esimerkki 1

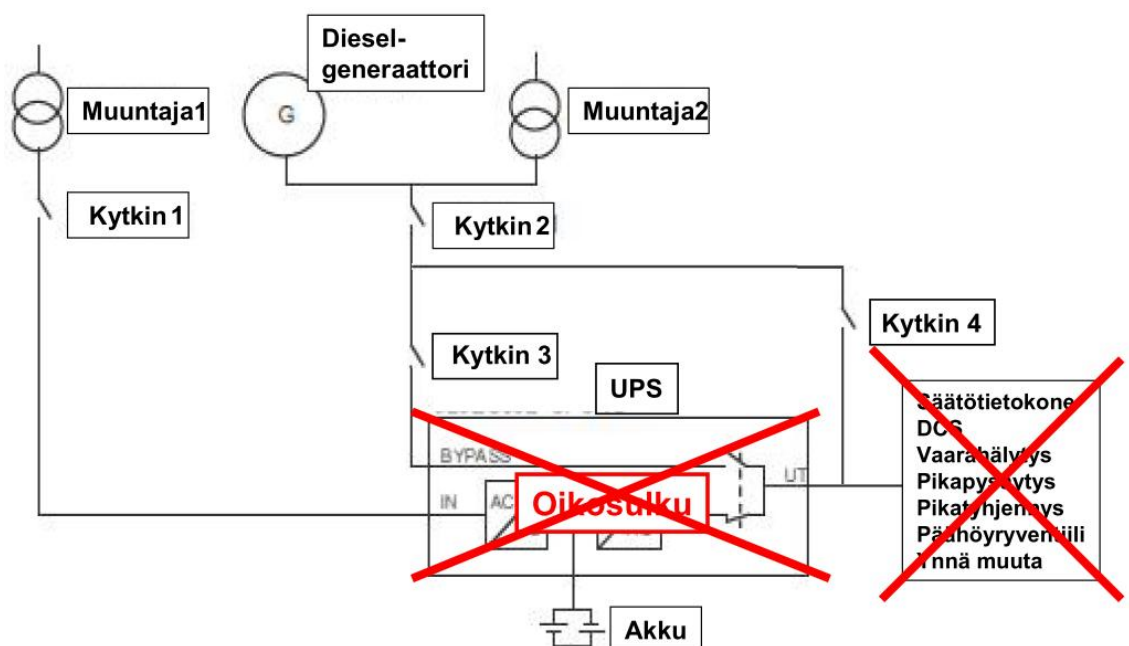
Sähkön menettäminen on mahdollista, jos jännitteenjakele on rakennettu yhden UPS:n varaan. Esimerkissä UPS:n sisäinen vika aiheutti täydellisen sähkökatkon tehtaalla, jolloin muun muassa valvomon kaikki näyttöpäätteet sammuiivat. Myös turvallisuusjärjestelmän pikasulku ja pikatyhjennys työasema pimeni, kuten höyrylieriön valvontakamera. Hälytystä ei voitu antaa, koska tämäkin järjestelmä oli sähkötön.

Ensimmäiset minuutit olivat sekasortoisia. Käyttäjä riensi poistamaan kaikki lipeäruiskut kattilasta ja totesi kattilan sammuneen ja poistui välittömästi rakennuksesta. Valvomossa ei tiedetty oliko kattilassa vettä tai olivatko höyryventtiilit kiinni. Jälkeenpäin huomattiin että kattilan päähöyryventtiilit eivät menneet kiinni, joten paine kattilassa laski hallitsemattomasti (noin 1 bar/minuutissa) kunnes sähköt saatiin palautettua ja järjestelmä ohjasi venttiilit kiinni. Syöttövesiventtiilit jäivät auki, mutta lieriön pintasäätöventtiilit menivät kiinni, joten kattilaveden pinta laski 61% normaalista ja paine 32 bariin (käyttöpaine 65 bar) vaikka syöttövesipumput jäivät päälle sähkökatkosta huolimatta noin 15 minuutiksi. Käynnissä olleet nuohoimet jäivät sisään ilman höyryvirtausta, koska nuohoushöyryn paineensäätöventtiilit menivät kiinni. Nuohoushöyryn lämpötilansäätöventtiilit jäivät kuitenkin auki, jolloin syöttöveden paine (100 bar) oli vasten paineensäätöventtiileitä, joten mahdollisuus veden pääsulle nuohointen kautta tulipesään oli olemassa.

Yksinkertaistettu kuva järjestelmästä on esitetty kuvassa 7-1. Normaalisti sähkönsyöttö tapahtuu Muuntaja 1:stä mm. prosessi- ja operointiasemiin sekä turvallisuusjärjestelmään kytkimen 1 kautta. Jos Muuntaja 1 ei toimi, käytetään

Muuntaja 2:sta ja sähkösyöttö tapahtuu kytkimien 2 ja 3 kautta. Jos Muuntaja 2 ei toimi, käynnistyy dieselgeneraattori automaattisesti ja sähkönsyöttö tapahtuu kytkimien 2 ja 3 kautta.

Noin 30 minuutin jälkeen todettiin, että vika oli UPS-järjestelmässä ja kun UPS kytkettiin käsin ohi (Kytkin 4) sähkö saatiin palautettua. UPS:n sisällä oli tapahtunut voimakas oikosulku (todennäköisesti staattinen ohituskytkin hajosi) joka keskeytti sähkösyötön sekä kytkimen 1 että kytkimen 2 kautta. Myös akkuvarmennus ei enää toiminut.



Kuva 7-1. Yksinkertaistettu kuva UPS-järjestelmästä

7.2 Esimerkki 2

Tehtaalla on kaksi rinnankäyvää UPS-laitetta jotka syöttävät samaa keskusta. Noin muutaman vuoden vanhana toisen UPS:in lähtöpuolella olevat suodatin kondensaattorit olivat valmistusvirheen johdosta huonontuneet siten että yksi kondensaattori aiheutti täydellisen oikosulun UPSin sisällä tuhoten laiteen täysin.

Ilman toista laitetta syöttämässä UPS-verkkoa seurauksena olisi ollut sähkökatkos UPS-verkkoon, sillä rikkoutunut laite ei kyennyt siirtymään staattiselle ohitukselle eikä akuston perään.



8 LÄHTEET

[Fingrid, Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset \(VJV 2013\).](#)

Kattilalaitosten Turvallisuuskomitea (KLTK), Suojeluohje G10, Kattilalaitosten turvallisuuteen liittyvä automaatio, 2000.

Helsingin Teknillinen Oppilaitos, Insinööritoimisto, Automaatio- ja turvajärjestelmien sähkösyötöt, Kalle Kontula.

Internet sivu, <http://powerquality.eaton.com/Suomi/Products-services/Backup-Power-UPS/9390-UPS/FI-9390-Specs.asp?CX=79#ups>, Eaton 9390 UPS Tekniset Tiedot. MGE Galaxy 5000, 20-120 kVA, Installation and user manual.

MGE UPS Systems, Design guide, UPS and power protection solutions 12/98.

SFS-EN 50156, Polttolaitteistojen sekä niiden apulaitteiden sähkölaitteet.

SFS 6000, Pienjännitesähköasennukset ja sähkötyöturvallisuus.

[Suomen Soodakattilayhdistys ry:n Automaatiotyöryhmä, Soodakattilan turva-automaation suositus, 14.12.2009 rev A.](#)

[Suomen Soodakattilayhdistys ry, Soodakattilalaitoksen suojaussuositus 1997.](#)

[Suomen Soodakattilayhdistys ry, Soodakattilan vaaran arviointi, 18.10.2001.](#)

LIITE 1

Tyypilliset UPS:lla tai dieselillä varmennetusta verkosta syötettävät kuormat

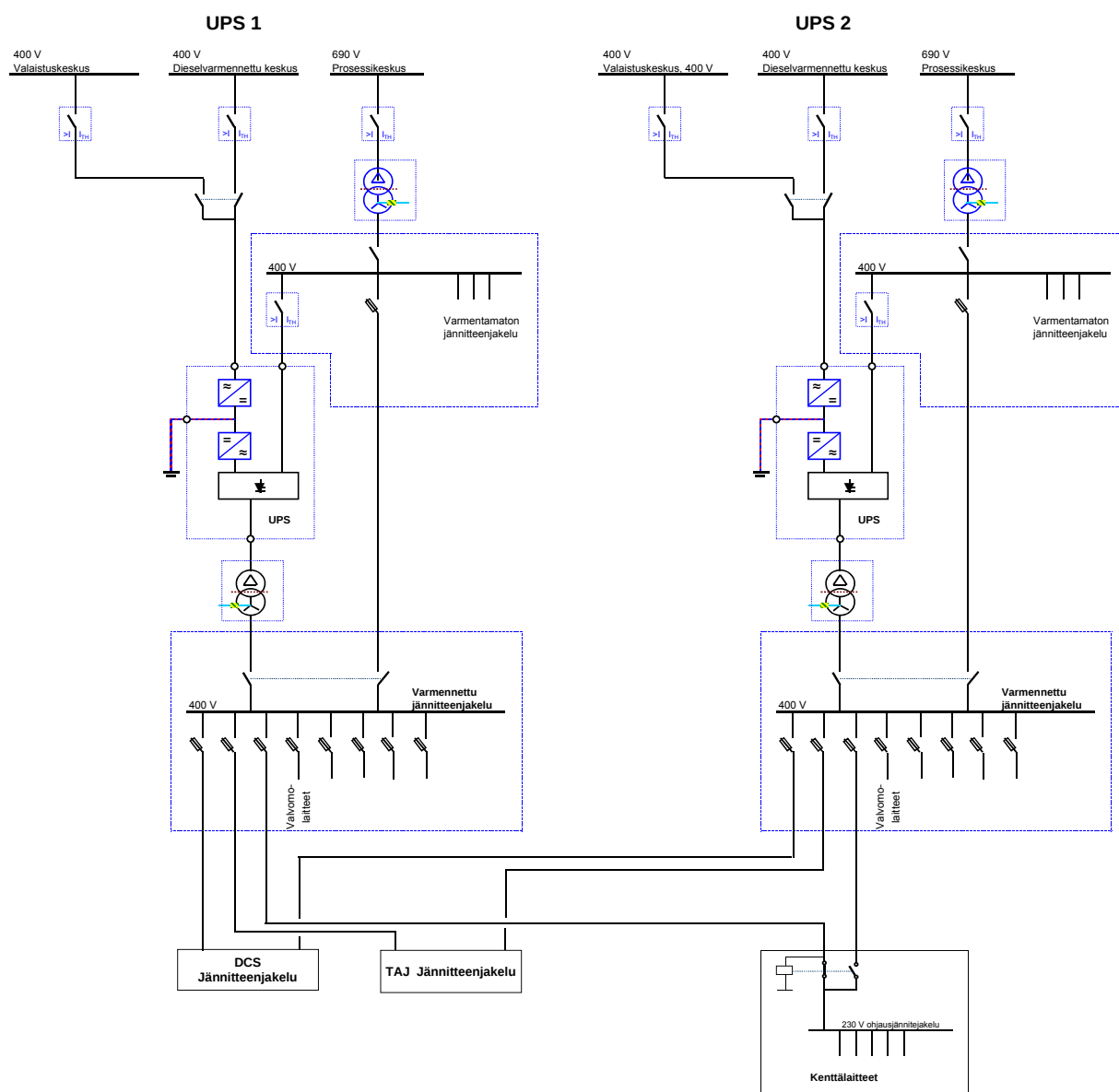
Varmennetuista verkoista syötettävät kuormat

Kuorma	UPS	DIESEL	Perustelu tarpeelle ja muut huomautukset
Moottoriventtiilit:			
Turbopumpun höyryn syöttöventtiili	(x)	x	Syöttöveden saamisen turvaamiseksi Turbopumppu on oltava käynnistettävissä/pysäytettävissä aina.
Turbopumpun höyryn poistoventtiili	(x)	x	Syöttöveden saamisen turvaamiseksi Turbopumppu on oltava käynnistettävissä/pysäytettävissä aina.
Turbopumpun lämmönsäätimen sulkuventtiili	(x)	x	Syöttöveden saamisen turvaamiseksi Turbopumppu on oltava käynnistettävissä/pysäytettävissä aina.
Turbopumpun syöttöveden ohjausyksikkö	x		Syöttöveden saamisen turvaamiseksi Turbopumppu on oltava käynnistettävissä/pysäytettävissä aina.
Syöttöveden sulkuventtiili turbopumpun jälkeen	(x)	x	Syöttöveden saamisen turvaamiseksi sähkökatkon aikana.
Syöttöveden ohitusventtiili	(x)	x	Syöttöveden saamisen turvaamiseksi sähkökatkon aikana.
Kattilan täyttöventtiili		x	
KP/MP höyryn sulkuventtiili		x	
Ruiskutusvesilinjan venttiili (kondensaatti)	(x)	x	Joissakin kattilatyypeissä suljetaan pikatyhjennyksessä.
Ruiskutusvesilinjan venttiili (syöttövesi)	(x)	x	Joissakin kattilatyypeissä suljetaan pikatyhjennyksessä.
Käynnistysventtiili (sulkuventtiili)	(x)	x	Sähkökatkoksesta mahdollisuus varmistaa paineen tasaus.
Käynnistysventtiili (säätöventtiili)	(x)	x	Sähkökatkoksesta mahdollisuus varmistaa paineen tasaus.
Lierion ulospuhallusventtiili	(x)	x	Kattilatyypistä riippuen suljetaan pikatyhjennyksessä tai kattilan pulloituksessa.
Jatkuva ulospuhallusventtiili	(x)	x	Kattilatyypistä riippuen suljetaan pikatyhjennyksessä tai kattilan pulloituksessa.
Nuohointin höyryn sulkuventtiili (boilerilta)	(x)	x	Joissakin kattilatyypeissä suljetaan pikatyhjennyksessä.
Nuohointin höyryn sulkuventtiili (turbiinilta)		x	
Päähöyryventtiili(t)	(x)	x	Kattilatyypistä riippuen suljetaan pikatyhjennyksessä tai kattilan pulloituksessa.
Päähöyryventtiili(e)n ohitusventtiili(t)	(x)	x	Kattilatyypistä riippuen suljetaan pikatyhjennyksessä tai kattilan pulloituksessa.
Pikatyhjennysventtiilit	(x)	x	Jos kattilassa havaitaan vuoto tai on vuotavaara, on se saatava tyhjennettyä nopeasti.
Moottoritoimiset pellit:			
Savukaasun sulkupellit ennen sähkösuodinta		x	
Savukaasun sulkupellit sähkösuotimen jälkeen		x	
Laitteet:			
Nuohoimet		x	
Kanaalipumppu		x	Tyhjennyskäiliön tulvimisen estäminen.
Sularännin jäähdytysvesipumppu		x	Sulan tulo jatkuu sähkökatkon aikana.
Liutostustankin sekoittimet		x	Sulan tulo jatkuu sähkökatkon aikana.
Syöttövesipumpun kytkimen öljypumppu		x	Harkittava tapauskohtaisesti
Paloveden paineenkorotuspumppu		x	Taataan riittävä sammutusveden paine kattilan yläosaan.
Hätäsuihkupumput		x	
Väkevien hajukaasujen epäpuhtaan kondensaatin varapumppu		x	Harkittava tapauskohtaisesti
Väkevien hajukaasujen varapolttimon fd puhallin		x	Harkittava tapauskohtaisesti
Väkevien hajukaasujen varapolttimon öljypumppu		x	Harkittava tapauskohtaisesti
Varavesisäiliönpumput		x	Varavesi mm. sularännien jäähdytykseen
Rakennus:			
Varavalaistus		x	Jotta varavalaistus syttyy heti dieselin käynnistyttyä, käytetään varavalaituksessa halogeeni-pilot valaisimia ja loisteputkivalaisimia.
Poistumistievalaistus		x	Syötetään erillisestä hätävalaistukseen tarkoitettua keskusakustosta, joka on suunniteltu SFS-EN 50171 mukaan. Keskusakuston syöttö dieselvarmennetusta keskuksista.
Savunpoistojärjestelmä		x	
Hissi		x	
Savupiipun varoitusvalo		x	Toimittava aina.
Sähkölukot	x		Turvataan lukkojen toiminta sähkökatkon aikana ja pääsy esim sähkötiloihin.
Puhelin / radiopuhelimien tukiasemat	x		Yhteydenpidon varmistaminen
Kaasuilmaläisimet	x		
Kulun- ja kameravalvonta	x		Kattilalaitoksen sähköiset turvajärjestelmät
Palohälytysjärjestelmä		x	Palohälytysjärjestelmässä on omat akustot
Instrumentaatio ja Automaatio:			
Varoventtiilin ohjausyksikkö	x		
Lierion pinnan korkeuden mittaus	x		
Kenttäinstrumenttien jännitesyötöt	x		
Sähkösuotimen ohjausjärjestelmä	x		
Turva-automaatiojärjestelmä	x		
Automaatiojärjestelmä	x		
Lierion pinnanmittauksen valvontakamerat	x		
Poistumishälytysjärjestelmä	x		
Sähkölaitteet:			
Pienjännitekojeiston ohjausjännite	x		Tarpeellinen erityisesti, jos höyryä syötetään generaattorille, joka syöttää sähköä ulkoiseen sähköverkkoon.
Taajuusmuuttajien ohjausjännite	x		

(x) Mikäli halutaan varmentaa, voidaan nämäkin syöttää UPS:sta.

LIITE 2

UPS-verkon periaatekuva

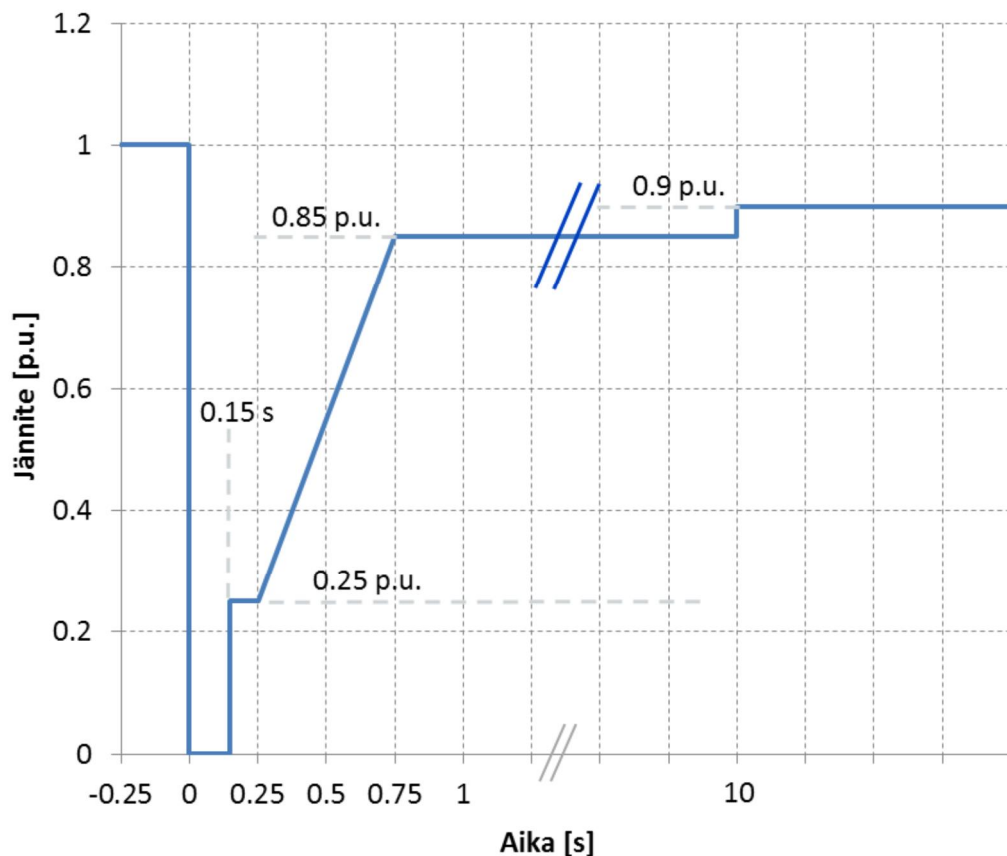


LIITE 3

Toiminta poikkeavalla taajuudella ja jännitteellä

1 TOIMINTA POIKKEAVALLA JÄNNITTEELLÄ JA TAAJUUDELLA

Jos soodakattilan tuottamaa höyryä menee generaattorille, joka on kytketty yleiseen sähköverkkoon, on lisäksi huomioitava sähköverkkoyhtiön vaatimukset. Suomessa vaaditaan ([Fingrid, VJV 2013](#)) sähkölaitteiden toimivan SFS-EN 50156 vaatimuksia laajemmalla taajuusalueella: 47,5...53 Hz. Tyypillisesti teollisuuskäyttöön tarkoitettu UPS toimii tällä taajuusalueilla. Lisäksi vaaditaan, että 0,5 ... 100 MW voimalaitoksen on kestävä irtoamatta sähköverkosta ja menettämättä tahtikäyttöään kuvassa 1 esitetty syvä jännitekuoppa:



Kuva 1. VJV-referenssipisteen jännitteen verhoikäyrä, jonka perusteella määräytyvän jännitehäiriön ajan ja jälkeen voimalaitoksen tulee jatkaa toimintaansa normaalisti. Jännitteen suhteellisarvo 1.0 p.u. on jännite ennen häiriötä

Syvän jännitekuopan aikana UPS menee akkukäytölle ja turvaa siitä syötettyjen laitteiden sähkönsaannin. Jännitekuopan aikana moottorit joko pysähtyvät kokonaan tai ainakin pyörimisnopeus hidastuu. Ilman erityistoimenpiteitä taajuusmuuttajat menevät häiriötilaan, koska ohjausjännite häviää vähäksi aikaa ja alijännitteestä, sekä kontaktorilähdöissä kontaktorit päästävät ja ohjausjärjestelmä hälyttää kaikkia moottoreita. Tästä johtuen joudutaan UPS:sta syöttämään seuraavia laitteita:

- taajuusmuuttajien ohjausjännite
- joissakin tapauksissa pienjännitekeskusten ohjausjännite



Jotta taajuusmuuttajakäyttöiset moottorit eivät aiheuttaisi laitoksen alasajoa, jaetaan taajuusmuuttajat kolmeen luokkaan:

- osa saa pysähtyä ja tarvittaessa operaattori käynnistää moottorit uudelleen
- laitteet joissa on riittävästi liike-energiaa, voidaan jännitekatkon jälkeen käynnistää automaattisesti liikkeessä (toiminto voidaan parametroida taajuusmuuttajassa)
- osa vaatii ohjausjärjestelmässä ohjelmallisen uudelleenkäynnistyksen

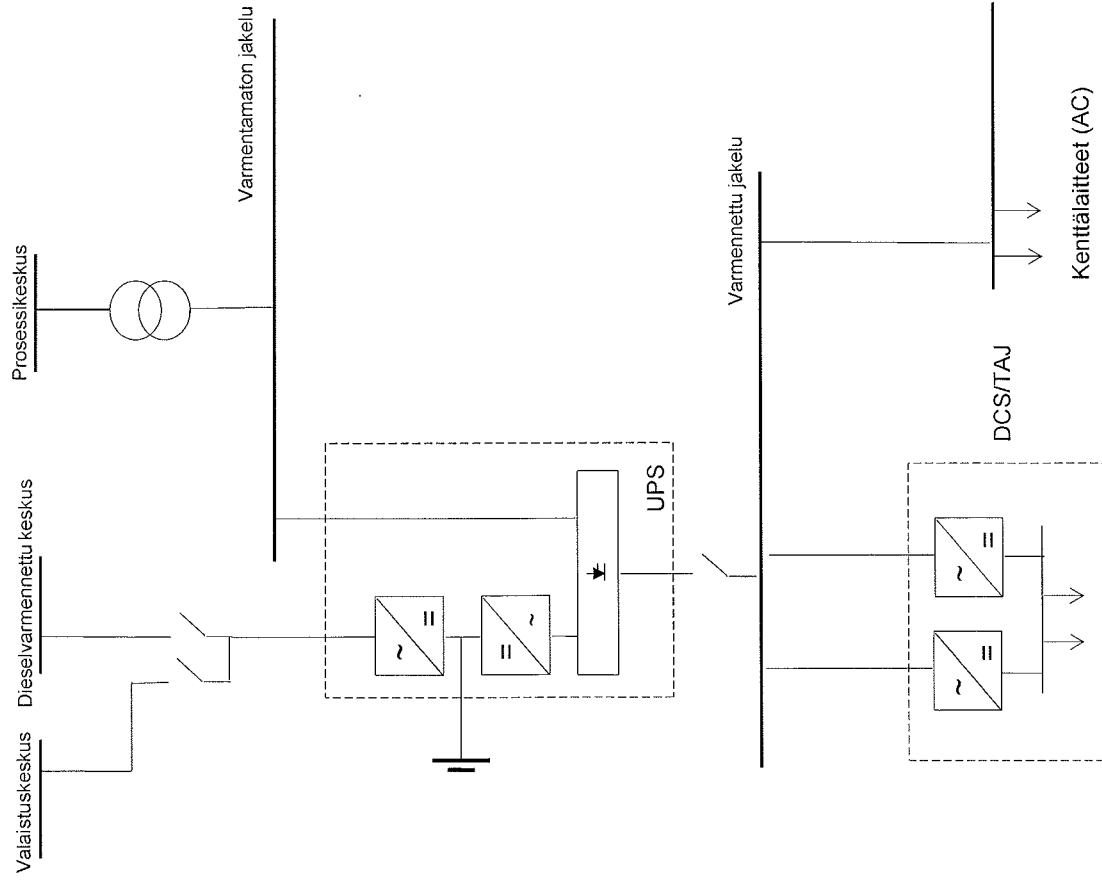
Jos pienjännitekeskusten ohjausjännite syötetään UPS:sta, kontaktorit jäävät vetäneiksi jännitekatkon ajan ja kontaktorilähdöillä syötetyt moottorit käynnistyvät uudelleen jännitteen palattua. On tarkistettava, että liian suuri yhteenlaskettu moottoriteho ei käynnisty samanaikaisesti. Toinen vaihtoehto on, että pienjännitekeskusten ohjausjännitettä ei syötetä UPS:sta ja kontaktorilähdöillä syötetyt moottorit käynnistetään lyhyen jännitekatkon jälkeen tarpeen mukaan osittain ohjelmallisesti ja osittain manuaalisesti.

LIITE 4

UPS-verkkovaihtoehtojen kaaviot

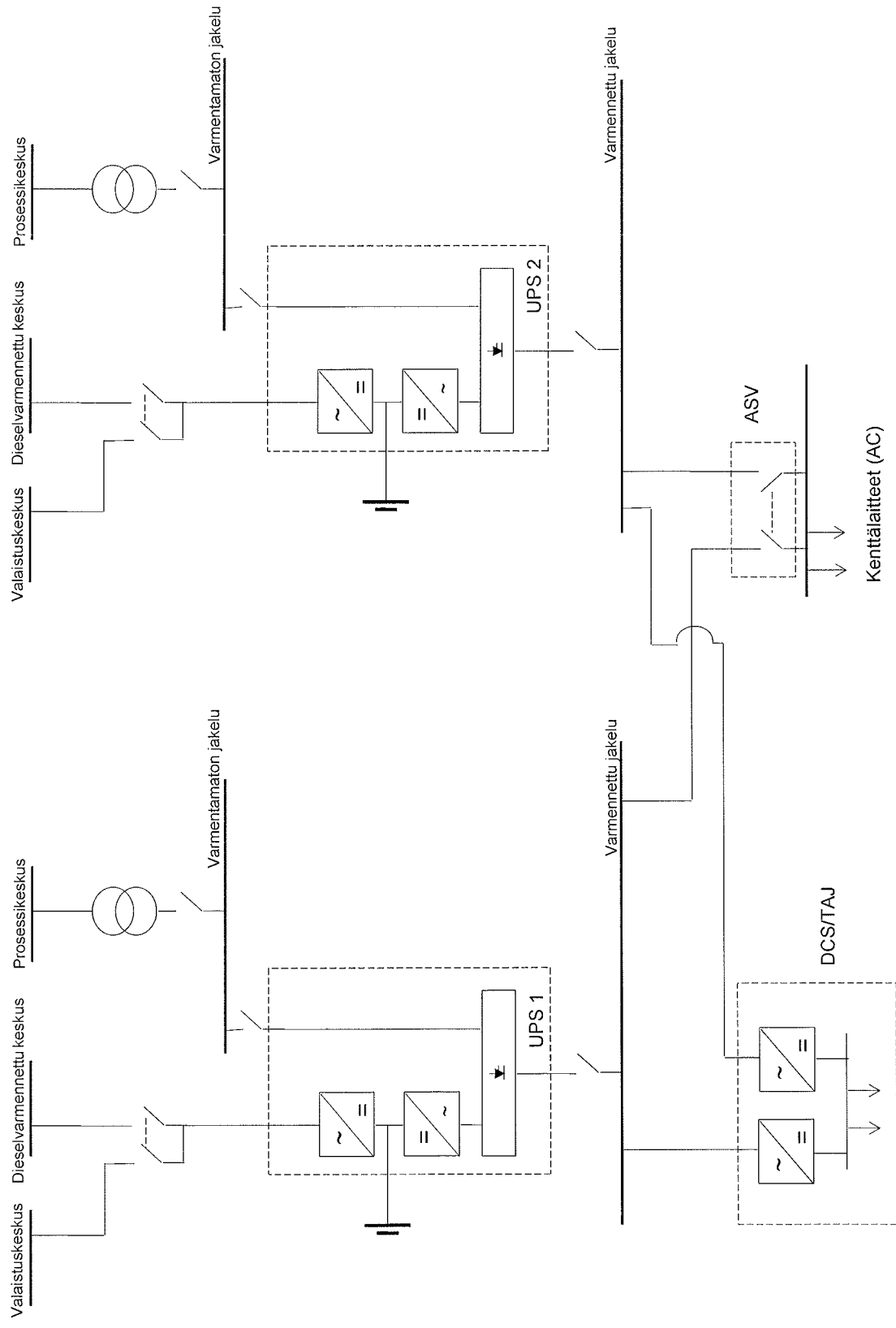
LIITE 4: UPS-verkkovaihtoehtot luotettavuustarkastelussa

Vaihtoehto 1



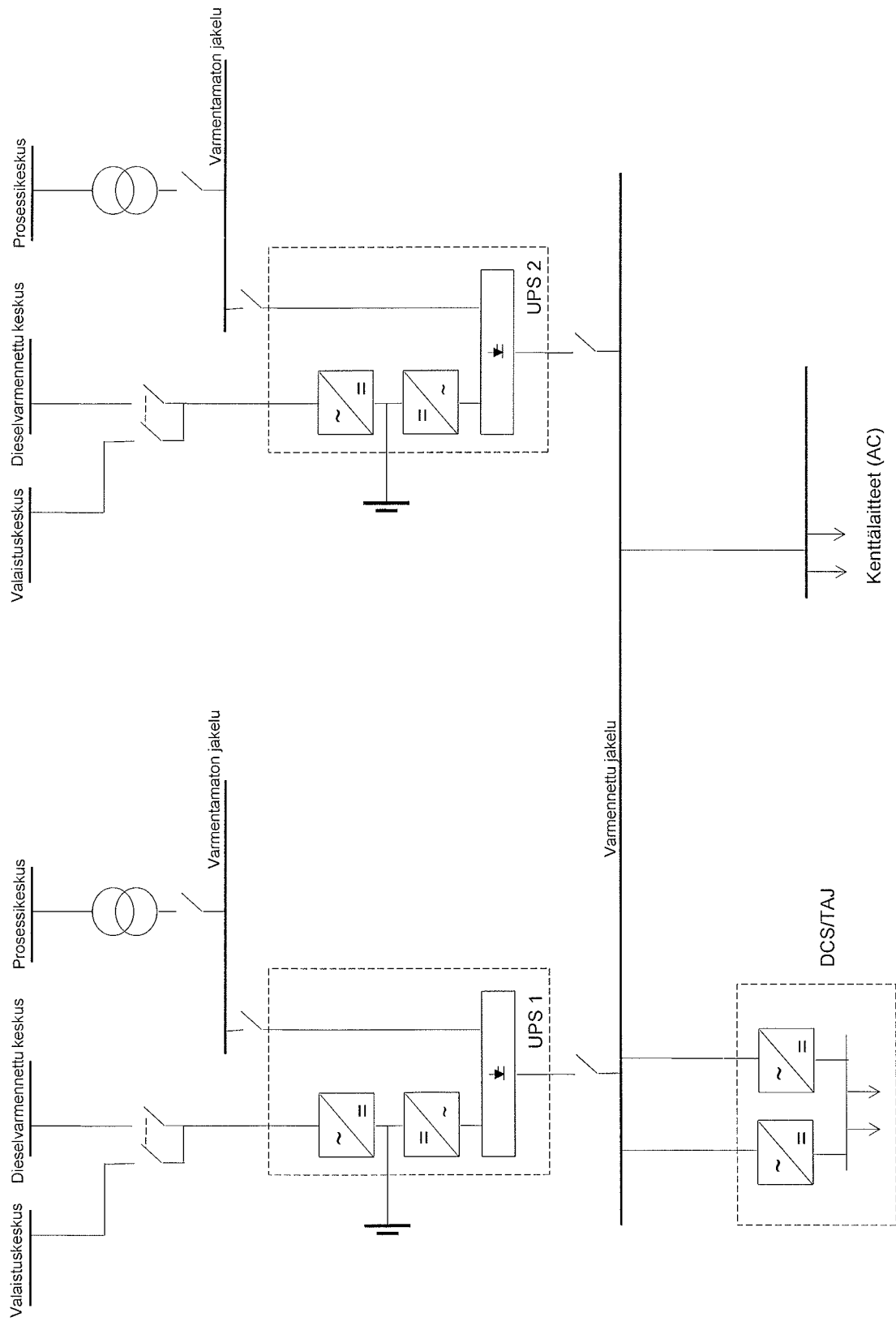
LIITE 4: UPS-verkkovaihtoehtot luotettavuustarkastelussa

Vaihtoehto 2



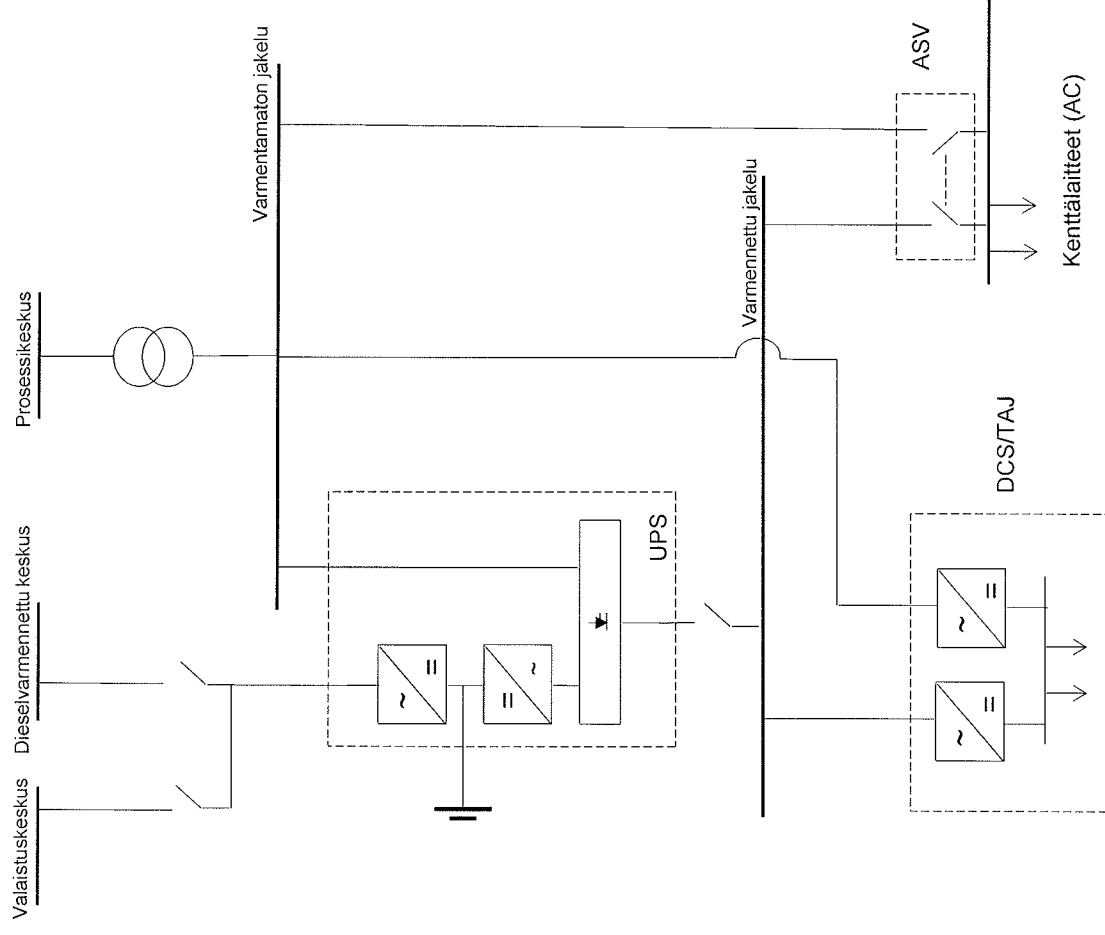
LIITE 4: UPS-verkkovaihtoehdot luotettavuustarkastelussa

Vaihtoehto 3



LIITE 4: UPS-verkkovaihtoehdot luotettavuustarkastelussa

Vaihtoehto 4



SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS RY
SUOSITUS

- 1 Suomen Soodakattilayhdistys ry

Hajukaasujen polttosuositus
Jaakko Pöyry Oy/Esa Vakkilainen
(16A0913-E0031)
Revisio B 29.10.2013
- 2 Suomen Soodakattilayhdistys ry

Soodakattilan turva-automaation suositus
Suomen Soodakattilayhdistys ry:n Automaatiotyöryhmä/Mauri Heikkinen
(16A0913-E0044)
15.1.2003
- 3 Suomen Soodakattilayhdistys ry

Soodakattilan tarkastus- ja peittausuusiutus/Esa Ilves, Pekka Pohjanne, Jorma Kiimalainen
(16A0913-E0061)
15.12.2004
- 4 Suomen Soodakattilayhdistys ry

Soodakattilan turvallisuussuositus
Suomen Soodakattilayhdistys ry:n Kestoisuustyöryhmä
(16A0913-E0109)
26.11.2009
- 5 Suomen Soodakattilayhdistys ry

Vesikemian ohjeavot
Teollisuuden Vesi Oy / Jani Vuorinen, Maija Vidqvist
9.12.2011
- 6 Suomen Soodakattilayhdistys ry

Ohje soodakattilalaitoksen varmennetun jännitejakelun periaatteeksi
Suomen Soodakattilayhdistys ry:n Automaatiotyöryhmä
(16A0913-E0145)
3.10.2013

LIITE 4
YTR/ATR: Hajukaasujen polttosuosituksen päivitys
– raportti 29.10.2013



SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS
FINNISH RECOVERY BOILER COMMITTEE

Suomen Soodakattilayhdistys ry

Hajukaasujen polttosuositus

30.5.2002

16.12.2005, rev A.

29.10.2013, rev B.

Suositus 1



ESIPUHE

Tämä Soodakattilayhdistyksen suositus on toinen päivitetty versio 30.5.2002 ilmenneestä suosituksesta. Suositus on päivitetty viime vuosina toteutettujen sellutehdasprojektien kokemusten perusteella. Päivitystyö aloitettiin loppuvuonna 2010 ja saatiin päätökseen keväällä 2013.

Tämän revisio B tekemisestä on vastannut Soodakattilayhdistyksen perustama työryhmä jäseninään Marja Heinola ja Risto Honkanen Andritz Oy, Kari Haaga ja Tuomo Hilli Metso Power Oy, Ismo Tapalinen UPM-Kymmene Kaukaan tehdas, Lauri Mattila UPM-Kymmene Oyj Pietarsaaren tehdas, Raine Rantanen UPM-Kymmene Kymin tehdas, Esa Vakkilainen Lappeenrannan teknillinen yliopisto sekä sihteerinä Markus Nieminen Pöyry Finland Oy.

Revisio A tekemisestä on vastannut Suomen Soodakattilayhdistyksen Ympäristötyöryhmä puheenjohtajanaan Pekka Posti Oy Metsä-Botnia Ab, Sihteerinä Jens Kohlmann Jaakko Pöyry Oy ja jäseninään Hanna Anttila Andritz Oy, Jouni Hiltunen Stora Enso Fine Paper Oy, Mikko Anttila Kvaerner Power Oy, Kari Parviainen Teknillinen korkeakoulu, Harri Jussila UPM-Kymmene Oyj, Kymi, Jorma Torniaisen Oy Keskuslaboratorio-Centrallaboratorium AB ja Juha Tolvanen Alstom Power Finland Oy sekä asiantuntijana Esa Vakkilainen Jaakko Pöyry Oy.

Alkuperäisen suosituksen tekemisestä vastasi Suomen Soodakattilayhdistyksen Ympäristötyöryhmä puheenjohtajanaan Pekka Posti Oy Metsä-Botnia Ab, Sihteerinä Sebastian Kankkonen Jaakko Pöyry Oy ja jäseninään Aimo Hakkarainen Andritz-Ahlstrom Oy, Jouni Hiltunen Stora Enso Fine Paper Oy, Markku Isoniemi Kvaerner Pulping Oy, Kari Parviainen Jaakko Pöyry Oy, Matti Tikka Kymi Paper Oy, Esko Talka Oy Keskuslaboratorio-Centrallaboratorium AB ja Juha Tolvanen Alstom Power Finland Oy sekä asiantuntijana Esa Vakkilainen Jaakko Pöyry Oy.

Työryhmä kiittää Reijo Hukkasta Stora Enso Oy ahkerasta ja asiantuntevasta kommentoinnista.



Tämä suositus ei yritä yhtenäistää hajukaasujärjestelmien rakennetta tai pakottaa käyttäjiä tai valmistajia samanlaisiin laitteisiin tai prosessiratkaisuihin. Suosituksessa esitetään perustietoutta, jota voidaan käyttää suunnittelun, valmistuksen ja käytön apuna.

Tarkoituksena on kehittää suositusta edelleen ja tästä syystä mahdolliset huomiot virheistä, parannusehdotuksista ja kokemuksista pyydetään lähettämään Soodakattilayhdistyksen sihteeristölle. Yhteystiedot löytyvät yhdistyksen kotisivuilta: <http://www.soodakattilayhdistys.fi>

Yhdistys ei vastaa tämän suosituksen virheistä eikä tästä johtuvista mahdollisista ongelmista. Mahdollinen päivitetty versio on jäsenten löydettävissä yhdistyksen kotisivuilta tai saatavissa sihteeristöstä.

Suomen Soodakattilayhdistys ry



SISÄLLYS

1	YLEISTÄ	1
2	MÄÄRITELMIÄ JA LYHENTEITÄ	3
2.1	VÄKEVÄT HAJUKAASUT	3
2.2	LAIMEAT HAJUKAASUT	4
2.3	LIUOTINSÄILIÖN JA SEKOITUSSÄILIÖN HÖNGÄT	5
2.4	MÄÄRITELMIÄ	5
2.5	LYHENTEITÄ	6
2.6	RÄJÄHDYSRAJOJEN LASKENTAKAAVOJA	6
2.7	RIKKIVETY	8
2.8	METYYLIMERKAPTAANI	8
2.9	DIMETYYLISULFIDI / DIMETYYLIDISULFIDI	8
2.10	METANOLI	8
2.11	TÄRPÄTTI	9
3	VAIKUTUKSET SOODAKATTILAN PÄÄSTÖIHIN	10
3.1	VAIKUTUKSET SOODAKATTILAN RIKKIPÄÄSTÖIHIN	10
3.2	VAIKUTUKSET SOODAKATTILAN NO _x -PÄÄSTÖIHIN	10
3.2.1	LAIMEIDEN HAJUKAASUJEN VAIKUTUS	10
3.2.2	LIUOTINHÖNGÄN VAIKUTUS	11
3.2.3	VÄKEVIEN HAJUKAASUJEN VAIKUTUS	11
3.2.4	METANOLIN VAIKUTUS	12
3.3	VAIKUTUKSET SOODAKATTILAN TRS-PÄÄSTÖIHIN	12
3.4	VAIKUTUKSET SOODAKATTILAN TUKKEENTUMISEEN	12
3.5	VAIKUTUKSET SOODAKATTILAN MUUHUN TOIMINTAAN	13
4	HAJUKAASUJÄRJESTELMIEN RISKIT JA KORROOSIO	14
4.1	HAJUKAASUJEN KARKAAMINEN TYÖSKENTELYTILAAN	14
4.1.1	TUULETUS/HÖYRYTYS	15
4.1.2	HAJU	15
4.1.3	SUOJAUTUMINEN	15
4.2	LAUHTEN POISTO-ONGELMAT	15
4.2.1	VESILUKON KUIVUMINEN	16
4.2.2	VESILUKON TUKKEUTUMINEN	16
4.2.3	VESITYSTASKUN TÄYTTYMINEN	16
4.3	RÄJÄHDYSVAARAT HAJUKAASULINJOISSA	16
4.3.1	ALAS- JA YLÖSAJOTILANTEET	17
4.3.2	TULENKÄSITTELY- JA TUPAKOINTIKIELTO	17
4.4	KAASURÄJÄHDYS KATTILASSA	17
4.5	SULAVESIRÄJÄHDYS KATTILASSA	17
4.6	KORROOSIO-ONGELMAT	18
4.7	KIPINÖINTI/STAATTINEN SÄHKÖ	18
5	LAIMEIDEN HAJUKAASUJEN JÄRJESTELMÄT SOODAKATTILALLA	19



5.1	KOOSTUMUS JA MÄÄRÄ.....	19
5.2	JÄÄHDYTYKSI/LÄMMITYS	21
5.3	LAIMEIDEN HAJUKAASUJEN POLTON LOGIIKKA.....	21
5.3.1	LAIMEIDEN HAJUKAASUJEN SYÖTÖN EDELLYTYKSET	22
5.3.2	LAIMEIDEN HAJUKAASUJEN SYÖTÖN KESKEYTYS	23
5.4	PUHALLIN.....	23
5.5	VARASILMAYHDE	23
5.6	KANAVAT	24
5.6.1	VIRTAUS.....	24
5.6.2	POTENTIAALITASAU.....	24
5.7	LAUHTENPOISTO	24
5.7.1	LAUHTENPOISTOLINJOJEN KOKO	24
5.7.2	KANAVIEN KALLISTUS JA LAUHTENPOISTOYHTEITTEN SIIJOITUS	24
5.7.3	VESILUKOT	25
5.8	PESURIT / LAUHDUTTIIET.....	25
5.9	VENTTIILIT/PELLIT	25
5.10	OHITUS.....	26
5.11	PISARANEROTIN	26
5.12	LIEKINESTIN.....	27
5.13	ALIPAINESUOJA.....	27
5.14	YLIPAINESUOJA.....	27
5.14.1	RÄJÄHDYSLEVY/ MURTOKALVOT.....	27
5.15	PITOISUUSMIIITTAUS	27
6	LIUOTTIIEN HÖNGÄN KÄSITTELYJÄRJESTELMÄT SOODAKATTILALLA	
	28	
6.1	KOOSTUMUS JA MÄÄRÄ.....	28
6.2	SEKOITUSSÄILÖN HÖNGÄT	29
6.3	JÄÄHDYTYKSI/LÄMMITYS.....	29
6.4	LIUOTTIIEN HÖNKIEN POLTON LOGIIKKA.....	29
6.4.1	LIUOTTIIEN HÖNKIEN SYÖTÖN EDELLYTYKSET.....	30
6.4.2	LIUOTTIIEN HÖNKIEN SYÖTÖN KESKEYTYS	30
6.5	PUHALLIN.....	31
6.6	KANAVAT	31
6.6.1	VIRTAUS.....	31
6.6.2	POTENTIAALINTASAU	31
6.7	LAUHTENPOISTO	31
6.7.1	LAUHTENPOISTOLINJOJEN KOKO	31
6.7.2	KANAVIEN KALLISTUS JA LAUHTENPOISTOYHTEITTEN SIIJOITUS	31
6.7.3	VESILUKOT	32
6.8	PESURI.....	32
6.9	VENTTIILIT/PELLIT	33
6.10	OHITUS.....	33
6.11	PISARANEROTIN	33
6.12	LIEKINESTIN.....	33
6.13	YLIPAINESUOJA.....	33
6.13.1	RÄJÄHDYSLEVY	33
6.14	PITOISUUSMIIITTAUS	33



7	VÄKEVIEN KAASUJEN POLTTO SOODAKATTILALLA.....	34
7.1	KOOSTUMUS JA MÄÄRÄ.....	34
7.2	VÄKEVIEN KAASUJEN POLTON LOGIIKKA.....	36
7.2.1	VÄKEVIEN KAASUJEN POLTTIMEN KÄYNNISTYKSEN EDELLYTYKSET	36
7.2.2	KAPASITEETTIRAJOITUS.....	37
7.2.3	VÄKEVIEN KAASUJEN POLTON KESKEYTTÄMINEN.....	38
7.2.4	POLTIN JA TUKILIEKIN KÄYTTÖ	38
7.3	PUTKISTO	40
7.3.1	PUTKISTON HÖYRYTYS	40
7.3.2	PUTKISTON PAINEMITTAUKSET	41
7.3.3	POTENTIAALITASAU.....	41
7.4	LAUHTENPOISTO	41
7.4.1	LAUHTENPOISTOLINJOJEN KOKO	41
7.4.2	PUTKIEN KALLISTUKSET JA LAUHTENPOISTOYHTEIDEN SJOITUS	41
7.4.3	VESILUKOT	42
7.5	VENTTIILIT.....	42
7.5.1	SULKUVENTTIILIT	43
7.6	VÄKEVIEN KAASUJEN SIIRTO.....	43
7.7	PAINEENPITOHÖYRY	43
7.8	JÄÄHDYTYKSEN/LÄMMITYS	43
7.9	POLTTIMEN SÄHKÖISTYS JA AUTOMATIikka	44
7.10	LIEKINESTIN.....	44
7.10.1	LIEKINESTIMEN PESU.....	44
7.10.2	LIEKINESTIMEN PAINEMITTAUS.....	44
7.11	VAIHTOEHTOINEN PAIKKA.....	44
7.11.1	VENTTIILIT	44
7.11.2	HÖYRYTYS.....	44
7.11.3	SOIHDUN SJOITUS	45
7.12	ALIPAINESUOJA.....	45
7.13	YLIPAINESUOJA.....	45
7.13.1	RÄJÄHDYSLEVYT /MURTOKALVOT	45
7.14	PITOISUUSMITTAUS	45
8	METANOLIN / TÄRPÄTIN POLTTO SOODAKATTILALLA.....	47
8.1	METANOLIN/TÄRPÄTIN POLTON LOGIIKKA	48
8.1.1	METANOLI- JA TÄRPÄTIPOLTTIMEN KÄYNNISTYKSEN EDELLYTYKSET	49
8.1.2	METANOLIN JA TÄRPÄTIN POLTON KESKEYTTÄVÄT TAPAHTUMAT.....	49
8.2	POLTTIMEN SÄHKÖISTYS JA AUTOMATIikka	50
8.3	VENTTIILIT.....	50
8.3.1	PIKASULKUVENTTIILIT	50
9	TOIMINTA ERIKOISTILANTEISSA.....	51
9.1	TOIMINTA HÄIRIÖN YHTEYDESSÄ.....	51
9.2	TOIMINTA ALASAJON YHTEYDESSÄ	51
9.3	TOIMINTA YLÖSAJON YHTEYDESSÄ.....	51
9.4	TOIMINTA SEISOKIN AIKANA.....	52



9.4.1	OHJEITA HAJUKAASUJÄRJESTELMÄN VALMISTELEMISEKSI SEISOKKI- TAI HUOLTOTÖITÄ VARTEN	52
9.4.2	OHJEITA SEISOKIN AIKAISIIN KUNNOSSAPIDON TÖIHIN	53
9.5	TOIMINTA HÄIRIÖIDEN YHTEYDESSÄ	53
10	ERIKOISOHJEET HAJUKAASULINJOJEN SUUNNITTELUSSA	54
10.1	LUOKITTELU	54
10.2	KYLTIT	54
10.3	LAUHTENPOISTO	55
10.4	KANAVA/PUTKISTOMATERIAALI	55
10.5	KANAVIEN ERISTYKSET	55
10.6	PUTKIEN/KANAVIEN KALLISTUKSET	55
10.7	VENTTIILIT/PELLIT	56
10.8	LAIPAT, YHTEET	56
10.9	PUHALTIMET	56
10.10	EJEKTORIT / NESTERENGASKOMPRESSORI	56
10.11	KANAVAMITOITUS	57
10.12	LIEKINESTIMEN SJOITUS	57
10.13	RÄJÄHDYSLEVYJEN /MURTOKALVOJEN SJOITUS	57
10.14	OHITUKSEN SJOITUS	57
10.15	TILALUOKITUKSET	58
10.16	VALMISTUSLUVAT	58
11	SUUNNITTELUUN JA KÄYTTÖÖN VAIKUTTAVAT MUUT OHJEET JA MÄÄRÄYKSET	60
11.1	SUOMEN LAINSÄÄDÄNTÖ	60
11.1.1	POIKKEAMATARKASTELU (HAZOP)	60
11.1.2	PUTKISTOJEN LUOKITTELU	60
11.1.3	RÄJÄHDYSVAARALLISTEN TILOJEN LUOKITTELU (ATEX)	61
11.2	EUROOPPALAISET STANDARDIT	61
11.3	OLEMASSA OLEVAT OHJEET	62
11.3.1	SODAHUSKOMMITTÉN	62
11.3.2	BLRBAC	62
12	POIKKEAMAT MUIDEN OHJEIDEN KÄYTÄNTÖÖN	63
12.1	POIKKEAMAT BLRBACn OHJEISIIN	63
13	ESIMERKKEJÄ VAURIOISTA	64
13.1	ESIMERKKI 1:	64
13.2	ESIMERKKI 2: UPM-KYMMENE, PIETARSAARI, 28.12.2008	65
13.3	ESIMERKKI 3: OY METSÄ-BOTNIA AB, RAUMA, 2.1.2007	66
13.4	ESIMERKKI 4:	67
13.5	ESIMERKKI 5: SUNILA OY, KOTKA, 19.10.2004	68
13.6	ESIMERKKI 6: OY METSÄ-BOTNIA AB, JOUTSENO, 1.4.2004	70
13.7	ESIMERKKI 7: OY METSÄ-BOTNIA AB, KEMIN TEHTAAN VAURIO 29.12.1998	71
13.8	ESIMERKKI 8: KLABININ TAPAUS BRASILIASSA 10.10.1998	71



13.9	ESIMERKKI 9: VARKAUDEN TAPAUS 1980-LUVULLA	72
14	LOPPUSANAT	73
15	KIRJALLISUUSVIITTEITÄ.....	74

LIITTEET:

Liite I	Esimerkkilaskelma
Liite II	Alfa-pineenin tasapainokäyrä
Liite III	Metanolin tasapainokäyrä



1 YLEISTÄ

Hajukaasujen poltto soodakattiloissa on yleistä. Suomen Soodakattilayhdistys ei ota kantaa siihen missä hajukaasujen poltto pitäisi suorittaa. Hajukaasujen poltto soodakattilassa lisää onnettomuusriskejä ja hajukaasujen käsittely voi aiheuttaa työturvallisuusongelmia. Koska hajukaasuja kuitenkin poltetaan, niin yhdistyksen jäsenistö on kaivannut selkeää ohjetta sellutehtaan hajukaasujen käsittelyyn ja poltoon soodakattilalla. Taustana on huoli turvallisuudesta ja kokonaisprosessin toimivuudesta.

Tämä suositus koskee soodakattilan hajukaasujärjestelmiä ja niihin liittyviä laitteita. Hajukaasujen keräilykohteisiin ja keräilytapoihin sekä niihin liittyviin laitteisiin ei oteta kantaa. Keräilyn suunnittelu täytyy kuitenkin tehdä kokonaisvaltaisesti. Suositus ei myöskään yritä yhtenäistää hajukaasujärjestelmien rakennetta eikä pakottaa samanlaisiin laitteisiin tai prosessiratkaisuihin. Sen sijaan esitetään perustietoutta jota tulee käyttää suunnittelun, valmistuksen ja käytön apuna.

Soodakattila vaatii käyttöympäristönä erittäin luotettavat ja turvalliset järjestelmät. Laitteiden laatuun ja niiden oikeaan käyttöön kannattaa investoida. Sellutehtaalla lyhyetkin häiriöistä aiheutuvat käyttöseisokit maksavat usein enemmän kuin niiden eston tarvitsema investointi. Hajukaasujen poltto lisää soodakattilan käyttöön monimutkaisuutta ja palavien myrkyllisten kaasujen käsittely tuo onnettomuusriskejä. Tämän suosituksen ohjeiden noudattaminen pienentää kyseisiä riskejä ja vaaratilanteita.

Tämä suositus ei ota kantaa hajukaasujen keräilyn ja polton järjestelmien vaatimaan käyttäjäkoulutuksen sisältöön. Ennen kuin uusia laitteita aletaan käyttää ja ennen kuin uudet työntekijät alkavat hajukaasujen polttolaitteilla työskennellä on asianmukainen koulutus ja työhön perehdyttäminen suoritettava.

Suositus ei ota kantaa hajukaasujärjestelmien laitteiden mekaanisiin huolto- ja kunnossapitotoimintoihin. Sen sijaan suosituksessa on otettu kantaa tarkastusväliin ja -tapaan.



Suosituksista laadittaessa on noudatettu huolellista valmistelutapaa ja yritetty kuulla sekä tehtaiden, laitetoimittajien että vakuutuslaitosten mielipiteitä hajukaasujen poltosta. Tämä suositus lähtee siitä olettamuksesta, että hajukaasujärjestelmän laitteet ensisijaisesti täyttävät ne vaatimukset, jotka Suomen voimassa olevat lait ja oikeussäännökset mm. työsuojelulaki sekä palavia nesteitä ja kaasuja koskevat lait ja asetukset, määräävät tai valvovat viranomaiset asettavat. Hajukaasulaitteistojen oletetaan myös olevan kaikin puolin ammattitaitoisesti suunniteltuja, ensiluokkaisia, asianmukaisia ja käyttövarmoja sekä rakenteeltaan tarkoituksenmukaisia ja lisäksi käytettyjen aineiden ja työn moitteettomuuden suhteen ensiluokkaisia.

Vastuu hajukaasujärjestelmän toimivuudesta ja prosessiratkaisuista on laitteiden suunnittelijoilla. Vastuu hajukaasujärjestelmän oikeasta ja huolellisesta käytöstä on laitoksen käyttäjillä. Soodakattilayhdistys suosittelee että ennen järjestelmän hankkimista toimittaja ja loppukäyttäjä suorittavat laitoksen poikkeamatarkastelun (HAZOP) ja käyvät yhdessä läpi vaaranarvioinnin vaatimat tiedot. Soodakattilayhdistys on raporttisarjassaan julkaissut raportin [11/2001 ”Soodakattilalaitoksen vaaranarviointi”](#).

Huolimatta siitä mitä tässä suosituksessa on sanottu, on ensisijaisesti noudatettava lakeja, asetuksia ja viranomaisten antamia määräyksiä ja ohjeita.



2 MÄÄRITELMIÄ JA LYHENTEITÄ

Hajukaasut sisältävät sellun valmistuksen yhteydessä vapautuvia kaasuja, puun mukana tulevia kaasuuntuvia yhdisteitä, vesihöyryä ja ilmaa. Keitossa, mustalipeän käsittelyssä ja kaustisoinnissa vapautuvat kaasut ja höngät; rikkivety, metyyliimerkaptaani, dimetyylisulfidi, dimetyylidisulfidi, metanoli ja tärpätti ovat palavia, räjähtäviä ja voimakkaasti haisevia yhdisteitä, mikä antaa hajukaasuille niiden luontaisen aromin. Puun mukana tulevat kaasuuntuvat yhdisteet; tärpätti ja metanoli, eivät puhtaana haise, mutta sellutehtaassa ne sisältävät epäpuhtautena haisevia komponentteja.

Tässä suosituksessa hajukaasut ryhmitellään seuraavasti:

- laimeat hajukaasut
- väkevät hajukaasut
- liuottajan ja sekoitussäiliön hönkäkaasut
- nestemäinen metanoli
- nestemäinen tärpätti

2.1 Väkevät hajukaasut

Väkevät hajukaasut ovat pääosin peräisin haihduttamolta, strippauksesta, metanolilaitokselta, polttolipeäsäiliöstä, vahvalipeäsäiliöstä, sekä niitä voi tulla myös keittämöltä.

Väkevät hajukaasut sisältävät palavia kaasumaisia yhdisteitä, jolloin hajukaasujen käsittelyssä riskinä on räjähdysvaara. Räjähdysvaara poistetaan estämällä ilman vuoto järjestelmään ja eliminoimalla sytytysenergian lähteet.

Pelkistyneet rikkiyhdisteet (TRS, Total Reduced Sulphur) ja etenkin tärpätti ovat räjähdysherkkiä laajalla pitoisuusalueella.

Englanninkielisinä lyhenteinä väkeville hajukaasuista käytetään termejä CNCG (Concentrated Non-Condensable Gas) ja LVHC (Low Volume High Concentration).

SOG (Stripper Off Gases) tarkoittaa stripperiltä tulevia lauhtumattomia väkeviä kaasuja, jossa esim. metanoli on höyryfaasissa. Jos stripperin kaasuille tehdään me-

tanolin nesteytys, niin syntyvät lauhtumattomat kaasut johdetaan väkevien hajukaasujen keräilyjärjestelmään. SOG kaasujen puuttuessa hajukaasujen polttoprosessi saadaan tasaisemmaksi ja varmatoimisemmaksi myös haihduttamon ja stripperin häiriötilanteissa.

Kuvassa 2-1 on esimerkki väkevien hajukaasujen polttimesta, jossa näkyy mm. hajukaasujen tuloputki, metanolilanssi, liekinvalvojat, liekinestin ja tukipoltin.



Kuva 2-1. Väkevien hajukaasujen poltin

2.2 Laimeat hajukaasut

Laimeita hajukaasuja kerätään paineettomista säiliöistä ja laitteilta kuitulinjalta, haihduttamolta, mäntyöljykeittämöltä sekä kaustisointilaitokselta. Paineellisista mustalipeäsäiliöistä tulevat kaasut pitää ohjata väkeviin hajukaasuihin. Paineettomista vahvalipeäsäiliöistä tulevien kaasujen johtaminen väkevien tai laimeiden hajukaasujen keräilyjärjestelmään tulisi harkita tapauskohtaisesti.



Laimeat hajukaasut sisältävät samoja komponentteja kuin väkevätkin hajukaasut. Laimeat hajukaasut sisältävät niin paljon vuotoilmaa, että ne ovat pitoisuuksiltaan räjähdysalueen alapuolella. Laimeiden hajukaasujen käsittelyn prosessiratkaisujen pitää huolehtia kaasujen laimeudesta kaikissa olosuhteissa.

Englanninkielinen lyhenne HVLC (High Volume Low Concentration) tarkoittaa laimeita hajukaasuja. BLRBAC:in ohjeessa käytetään amerikkalaista termiä DNCG (Diluted Non-Condensable Gas).

2.3 Liuotinsäiliön ja sekoitussäiliön höngät

Tuhkan ja mustalipeän sekoitussäiliö voidaan yhdistää laimeisiin hajukaasuihin tai liuotinsäiliön hönkiin esimerkiksi tyhjennyssäiliön kautta. Sekoitussäiliön höngän keräilyssä pitää prosessiratkaisun olla sellainen, jossa kaasut ovat laimeita kaikissa olosuhteissa.

Liuotinsäiliön hönkä sisältää epäorgaanista pölyä sekä haisevia rikkiyhdisteitä. Hönkää ei perinteisesti ole luettu hajukaasuksi. Kuitenkin, jos hönkä johdetaan soodakattilan tulipesään, tulee sen käsittelyssä noudattaa laimeille hajukaasuille annettuja suosituksia muun muassa höngän suuren kosteuspitoisuuden vuoksi.

2.4 Määritelmiä

- | | |
|--------------------------|---|
| Alempi räjähdysraja, LEL | Pitoisuus jota korkeampi palavan kaasun pitoisuus voi räjähtää (pelkkä ilma ei räjähdä). |
| Ylempi räjähdysraja, UEL | Pitoisuus jota alempi palavan kaasun pitoisuus voi räjähtää (pelkkä polttoaine ei räjähdä). |



2.5 Lyhenteitä

Lyhennys	Suomalainen määritelmä	Englanninkielinen määritelmä
BLRBAC	Amerikan soodakattilayhdistys	Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee
CH ₃ SH	metyylimerkaptani	methyl mercaptan
MM	metyylimerkaptani	methyl mercaptan
(CH ₃) ₂ S	dimetyylisulfidi	dimethyl sulfide
DMS	dimetyylisulfidi	dimethyl sulfide
(CH ₃) ₂ S ₂	dimetyylidisulfidi	dimethyldi sulfide
DMDS	dimetyylidisulfidi	dimethyldi sulfide
C ₁₀ H ₁₆	tärpähti	turpentine
CH ₃ OH	metanoli	methanol
MeOH	metanoli	methanol
C ₂ H ₅ OH	etanoli	ethanol
H ₂ S	rikkivety	hydrogen sulfide
SO ₂	rikkidioksidi	sulfur dioxide
O ₂	happi	oxygen
NH ₃	ammoniakki	ammonia
H ₂ O	vesi	water
CO ₂	hiilidioksidi	carbon dioxide
CO	hiilimonoksidi	carbon monoxide
NO	typpioksidi	nitric oxide
CNCG	väkevät hajukaasut	concentrated non condensible gas
DNCG	laimeat hajukaasut	diluted non condensible gas
HEL	ylempi räjähdysraja	higher explosion limit
HVLC	laimeat hajukaasut	high volume low concentration
LEL	alempi räjähdysraja	lower explosion limit
LVHC	väkevät hajukaasut	low volume high concentration
NCG	hajukaasu	non condensible gas
SHK	Ruotsin soodakattilayhdistys	Sodahuskommittén
SOG	stripperin kaasut	stripper off gas
TRS	pelkistyneet rikkiyhdisteet	total reduced sulfur compounds
UEL	ylempi räjähdysraja	upper explosion limit
HAZOP	poikkeamatarkastelu	hazard and operability study
HTP (TLV)	haitalliseksi tunnettu pitoisuus	threshold limit value

2.6 Räjähdysrajojen laskentakaavoja

Räjähdysraja lasketaan tyypillisesti seoksen komponenttien avulla.

Sosiaali- ja terveysministeriön päätös kemikaalien luokitusperusteista ja merkintöjen tekemisestä (807/2001) [liite 1 kohta 7.7.1](#) antaa kaavan syttyvyyden määrittämiselle. Pohjana on käytetty standardia [“Gases and gas mixtures — Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets”](#)



[ISO 10156](#) ja sen taulukoita 1 ja 2 jotka antavat eri palaville ja inerteille kaasulle laskentavakioita. Taulukkoon 2-2 on kerätty hajukaasun eri komponenttien ominaisuuksia ilmassa.

Taulukko 2-1. Hajukaasun eri komponenttien ominaisuuksia ilmassa Burgess ja Young 1992.

		Rikki vety	Metyyli merkaptani	Dimetyyli sulfidi	Dimetyyli disulfidi	Tärpähti (α-pineeni)	Metanoli
Kaava		H ₂ S	CH ₃ SH	(CH ₃) ₂ S	(CH ₃) ₂ S ₂	C ₁₀ H ₁₆	CH ₃ OH
Molykyylipaino		34	48	64	94	132	32
Räjähdyksraja	LEL	4.3	3.9	2.2	1.1	0.8	5.5
	HEL	45.0	21.8	19.7	16.1	6.0	36.5
Liekin nopeus	m/s			0.55		0.62	0.5
Itsesyttymislämpötila	°C	260	197 (340)	206	300	255	385 (465)
Leimahduspiste	°C	Kaasu	Kaasu	- 49	24	34	11
Kiehumispiste	°C	- 60	6	38	110	150	65
Lämpöarvo HHV	MJ/kg	15	22	31	23	41	22
Kaasun tilavuuspaino verrattuna ilmaan		1,19	0,87	2,14	3,24	4,7	1,11
Hajukynnys	ppm	0.008	0.0004-0.003	0.001-0.01	0.003-0.011	100	100
Liukoisuus veteen		Kyllä	Ei	Ei	Huonosti	Ei	Kyllä

Syttymis- eli räjähdysrajoja määriteltäessä on syytä käyttää menetelmää, joka varmasti antaa turvalliset rajat. Räjähdysrajoja voidaan laskea eri periaatteilla.. Kaasuseoksissa voidaan soveltaa standardissa [ISO 10156 /2010](#) kohdassa 5.2 käytettyä räjähdysrajojen laskentaa.

Toinen tapa on tarkkailla ongelmaa termodynaamisesti (Hokynar 1999). Eroa ei käytännössä ole alemman räjähdysrajan osalta, mutta ylemmän räjähdysrajan määrittely eroaa koska inertin kaasun vaikutus on eri kahdessa edellä mainitussa menetelmässä.



2.7 Rikkivety

Rikkivety on väritön, myrkyllinen, erittäin helposti syttyvä ja ilmaa raskaampi kaasu, jolla on voimakas mädäntyneen kananmunan haju, mutta lähestyttäessä 100 ppm:n lukemia rikkivetyä ei yleensä enää haista. Rikkivetyvuoto voi aiheuttaa ulkotiloissa syttymisvaaran ja sisätiloissa räjähdysvaaran. Se syövyttää useita metalleja ja muoveja.

Rikkivety on pelkistin, joten se voi reagoida hapettavien aineiden kanssa voimakkaasti. Aine syövyttää metalleja ja muodostaa metallisulfideja. Vesiliuoksessa rikkivety reagoi happamasti. Rikkivetyä muodostuu sulfidia, esimerkiksi natriumsulfidi, sisältävien liuosten sekoituessa happojen kanssa ja sitä voi esiintyä koko tehdasalueella ja viemäreitä sekä kanaaleja pitkin se voi levitä pitkienkin matkojen päähän. Tästä syystä sellutehtaalle on asennettu kaasuilmaisimia alueille joissa voi esiintyä rikkivetyä. Ilmaisimen havaitessa tarpeeksi suuren pitoisuuden vaarallista kaasua järjestelmään kytketyt ja mittauspisteiden lähelle asennetut hälytysvalot syttyvät.

2.8 Metyylimerkaptani

Metyylimerkaptani on väritön, ilmaa raskaampi, erittäin helposti syttyvä, haihtuva ja myrkyllinen kaasu. Metyylimerkaptanin terveyteen kohdistuvat haittavaikutukset ovat paljolti samanlaiset kuin rikkivedyn.

2.9 Dimetyylisulfidi / Dimetyylidisulfidi

Dimetyylisulfidi ja dimetyylidisulfidi ovat normaaliolosuhteissa värittömiä nesteitä, joilla on tunnusomainen epämiellyttävä haju. Molemmat yhdisteet ovat helposti syttyviä ja ilman kanssa sekoituessaan räjähtäviä.

2.10 Metanoli

Metanolia syntyy sellunkeitossa ja se tyypillisesti poltetaan soodakattilassa, meesaunissa, erillispolttokattilassa. Puhdas metanoli (CH_3OH) on väritön, lähes hajuton ja myrkyllinen kaasu/neste, mutta sulfaattitehtaalla metanolin joukkoon erottuu runsaasti haisevia yhdisteitä. Metanoli liukenee veteen kaikissa tilavuussuhteissa, joten se voidaan poistaa kaasuseoksesta helposti pesurilla.



2.11 Tärpätti

Tärpättiä syntyy sellun keitossa. Tärpätti erotetaan ja joissain tapauksissa se poltetaan. Puhdas tärpätti on väritön ja miedosti tuoksuva kaasu/neste, mutta sulfaatti-
tehtaalla tärpätin joukkoon erottuu runsaasti haisevia yhdisteitä.

Kerättäessä kohteita, joissa voi esiintyä terpeenejä, rajoitetaan suuria pitoisuuksia lauhduttamalla kaasuja. Suoritetusta lauhdutuksesta huolimatta terpeenejä jää aina kaasumaisena käsiteltyyn kaasuseokseen terpentiinien osapainetta vastaava määrä.

Edellä olevasta johtuu, että tällaiset mahdollisesti runsaasti terpeenejä sisältävät laimeiden hajukaasujen kohteet on laimennettava keräyspisteen tai lauhdutuksen jälkeen. Keräyskohteen maksimilämpötilan ylittyessä on kohde rajattava automaattisesti pois keräilystä.

Terpeenipitoisia keräyskohteita voi olla esimerkiksi seuraavat: havuhakkeen syöttösiilot, likaislaudesäiliöt, keräily- ja laihalipeäsäiliöt, jos niihin johdetaan ajoittainkin tärpättipitoisia lauhteita.

Myös seisokki- ja starttitilanteissa voi lauhtunut tärpätti höyrystyä hajukaasujen joukkoon lauhdesäiliöiden pinnalta tai kanavista.



3 VAIKUTUKSET SOODAKATTILAN PÄÄSTÖIHIN

Hajukaasujen poltto soodakattilassa saattaa vaikuttaa soodakattilan emissioihin. Hajukaasujen poltto saattaa alentaa soodakattilan tuhkasuolan karbonaattipitoisuutta ja pH-arvoa. Hajukaasujen mukana tulipesään sisään syötettävä lisärikki näkyy ensin savukaasujen mukana sähkösuodattimille tulevassa tuhkasuolassa olevan karbonaatin korvaantumisena sulfaatilla. Karbonaatin tultua käytetyksi ylimäärä riskistä muodostaa SO₂:ta.

3.1 Vaikutukset soodakattilan rikkipäästöihin

Hajukaasujen sisältämä lisärikki nostaa aina soodakattilan tuhkan sulfaattipitoisuutta ja täten saattaa alentaa sen pH:ta. Jollei riittävää karbonaattipuskurivaraa ole, saattaa kattilan SO₂ päästö nousta. Kattilan SO₂ päästöön vaikuttaa tehtaan korkea sulfidititeetti, polttolipeän kuiva-aine ja lämpöarvo sekä kattilan kuorma.

Hajukaasuja ei tulisi polttaa soodakattilalla jossa on jo rikkipäästöjä. Kyseisessä tapauksessa hajukaasujen polttopaikaksi suositellaan erillistä polttopaikkaa jossa on rikin talteenotto, Tälläisiä polttopaikkoja ovat muun muassa erillispolttokattila ja pesurilla varustettu meesauuni.

3.2 Vaikutukset soodakattilan NO_x-päästöihin

Varsinkin väkevät hajukaasut sisältävät typpiyhdisteitä. Nämä typpiyhdisteet ovat pääosin ammoniakkia, joka erottuu haihduttamalla mustalipeästä. Osa tästä tyypestä on muodostunut soodakattilan sulan mukana liuotinsäiliöön tulleen typen reaktioissa kaustisointialueella ja on kiertänyt keiton kautta takaisin soodakattilaan.

3.2.1 Laimeiden hajukaasujen vaikutus

Laimeiden hajukaasujen osuus soodakattilan syötettävästä kokonaisilmasta on tyypillisesti 5...15 % koko ilmamäärästä. Typpi laihoissa hajukaasuissa on pääasiassa ammoniakkia. Ammoniakkipitoisuuden kuivissa kaasuissa voidaan olettaa olevan luokkaa 10 ppm. Voitaisiin olettaa, että noin 30 % ammoniakista konvertoituu NO:ksi. Jos kattilan NO taso on luokkaa 100 ppm, niin kattilan typpioksidipäästöjen lisäys on silloin



$$NO_x = \frac{(100 + 0.3 * 0.1 * 10)}{100} - 1 \leq 1\%$$

Mitattavaa vaikutusta ei käytännössä ole havaittu, jos laimeat hajukaasut ohjataan tulipesässä oikealle lämpötila-alueelle.

3.2.2 Liuotinhöngän vaikutus

Liuotinhöngän mukana tulevan ilman osuus soodakattilan syötettävästä kokonaisilmasta on tyypillisesti 5 % koko ilmamäärästä. Typpi liuotinhöngässä on peräisin haihduttamon sekundäärilauhteista tai sulan mukana liuotinsäiliöön tulevan typen reagoimisesta ammoniakiksi. Ammoniakkipitoisuuden kuivissa kaasuissa voidaan olettaa olevan luokkaa 100 ppm. Voitaisiin olettaa, että noin 30 % ammoniakista konvertoituu NO:ksi. Jos kattilan NO taso on luokkaa 100 ppm, niin kattilan typpioksidipäästöjen lisäys on silloin

$$NO_x = \frac{(100 + 0.3 * 0.05 * 100)}{100} - 1 \approx 1\%$$

Mitattavaa vaikutusta ei käytännössä ole havaittu, jos laimeat hajukaasut ohjataan tulipesässä oikealle lämpötila-alueelle.

3.2.3 Väkevien hajukaasujen vaikutus

Väkevien hajukaasujen osuus soodakattilan syötettävästä kokonaisilmasta on tyypillisesti 0.2... 3 % koko ilmamäärästä. Typpi väkevissä hajukaasuissa on pääasiasa ammoniakkia. Ammoniakkipitoisuuden kuivissa kaasuissa voidaan olettaa olevan luokkaa 2000 ppm. Voitaisiin olettaa, että noin 30 % ammoniakista konvertoituu NO:ksi. Jos kattilan NO taso on luokkaa 100 ppm, niin kattilan typpioksidipäästöjen lisäys saattaa olla silloin

$$NO_x = \frac{(100 + 0.3 * 0.01 * 2000)}{100} - 1 \approx 6\%$$



3.2.4 Metanolin vaikutus

Metanolia syntyy noin 10 kg/ADt riippuen käytetystä puuraaka-aineesta. Nestemäisessä metanolissa voi ammoniakkia olla noin 2%. Ammoniakkipitoisuuden metanolissa voidaan olettaa olevan luokkaa 0,2 kg/Adt. Voitaisiin olettaa, että noin 30 % ammoniakista konvertoituu NO:ksi. Jos kattilan NO taso on luokkaa 200 mg/Nm³, savukaasuja syntyy 3,5 Nm³/kg ka ja lipeäkuiva-ainemäärä on 1600 kgka/Adt, niin kattilan typpioksidipäästöjen lisäys saattaa olla silloin:

$$NO_x = \frac{(200 * 3,5 * 1600 / 1000000 + 0,3 * 0,2)}{200 * 3,5 * 1600 / 1000000} - 1 \approx 5\%$$

3.3 Vaikutukset soodakattilan TRS-päästöihin

Moderneissa kattiloissa, joissa on tehokas polttoaineen ja ilman sekoitus ja hajukaasujärjestelmä toimii suunnitellulla tavalla, ei kattilan TRS päästö merkittävästi lisäännä, mikäli hajukaasut syötetään vyöhykkeelle, jossa lämpötila on vähintään 900 °C.

Jos kattilan ylimmälle ilmatasolle syötetään laimeita hajukaasuja, on mahdollista että jonkin verran hajukaasuista kulkeutuu reagoimatta kylmiä seinänvieriä pitkin.

Mitattava vaikutus kokonaisvirrassa on käytännössä ollut joitakin ppm:n kymmenesosia.

3.4 Vaikutukset soodakattilan tukkeentumiseen

Katso kappale 3.1. Vaikutukset soodakattilan rikki-päästöihin

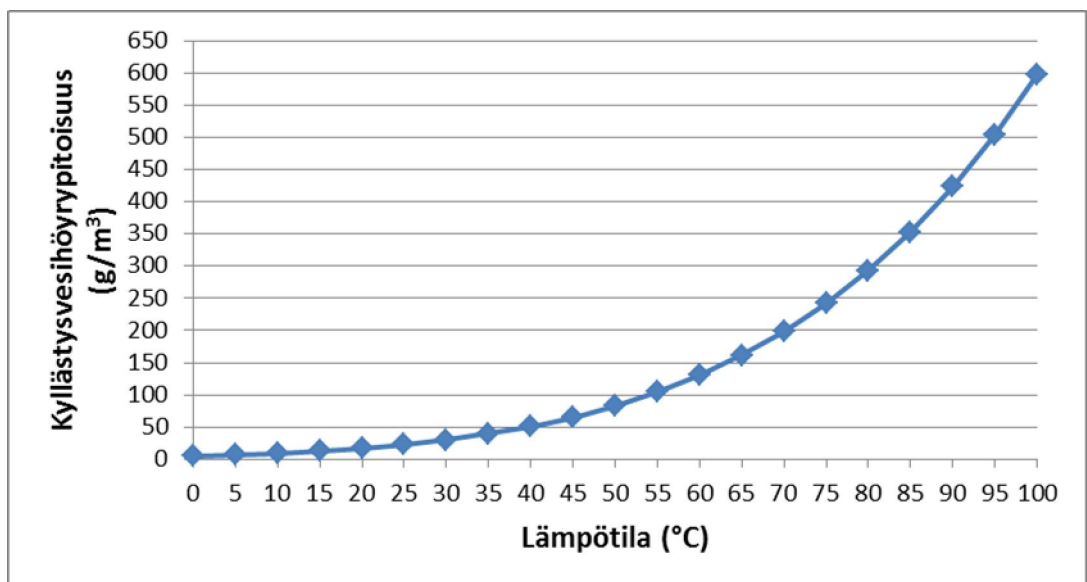
Jos hajukaasujen poltto-olosuhteet soodakattilassa eivät ole optimaaliset, ja syntyy SO₂-päästöjä, niin kattilan ja sähkösuodattimen tukkeentumis- ja korroosioalttius erityisesti ekonomaiserialueella happamien tuhkasuolojen takia (alhainen pH) lisääntyy.

3.5 Vaikutukset soodakattilan muuhun toimintaan

Moderneissa kattiloissa, joissa on tehokas polttoaineen ja ilman sekoitus ja riittävä pohjakuorma, sekä kun hajukaasujärjestelmä toimii suunnitellulla tavalla, ei vaikutuksia soodakattilan toimintaan ole havaittu. Esimerkiksi muutoksista reduktioon ei ole raportoitu.

Hajukaasujen polton aloittaminen pienentää yleensä tehtaan kokonaisrikkipäästöjä. Tämä vaikuttaa kuitenkin tehtaan kemikaalitaseisiin ja pyrkii nostamaan sulfiditeettia. Rikkitase tehtaalla pitääkin aina tarkastella tapauskohtaisesti.

Liuotinhöngän ja laimeiden hajukaasujen mukana kattilaan tulee vesihöyryä, mikä saattaa hiukan vesihöyrypitoisuudesta riippuen rajoittaa kattilan kapasiteettia. Kuvasssa 3-1 on esitetty tietyn lämpöisen ilman sisältämän vesihöyryn maksimimäärä kuivassa ilmassa. Väkevien hajukaasujen, metanolin, tärpätin poltto lisää kattilan höyrystystä. Tällöin vesi- ja höyrypuolen suunnittelu on tarkastettava ennen polton aloittamista varsinkin olemassa olevissa soodakattiloissa.



Kuva 3-1. Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus lämpötilan funktiona.



4 HAJUKAASUJÄRJESTELMIEN RISKIT JA KORROOSIO

Tyypillisiä riskejä hajukaasujärjestelmissä ovat räjähdysvaara (kaasujen konsentroituminen ja syttyminen kipinästä, esimerkiksi ylipaineesta tulipesässä), myrkytysvaara, lauhteenpoisto-ongelmat (vesi tulipesään) ja korroosio/eroosio.

Lisäksi hajukaasujen poltto voi aiheuttaa prosessiongelmia kuten rikkipäästöjä kattilasta, ekojen ja keittopintojen tukkeutumista ja polttohäiriöitä.

4.1 Hajukaasujen karkaaminen työskentelytilaan

Hajukaasuja voi vuotaa liitoksista, venttiileistä, vesityksistä tai vauriokohdista laitteiston ulkopuolelle. Hajukaasuissa on pelkistyneiden rikkiyhdisteiden ja metanolin pitoisuus korkea, jolloin myrkytysvaara on olemassa. Vuodon tapahtuessa kattila-huoneeseen tai muuhun tilaan, pitää koko huone tai muu tila evakuoidea ja tuulettaa hyvin ja mittauksin varmistaa tilan sopivuus työskentelyyn.

Hajukaasuja vapautuu työskentelytilaan tavallisimmin lauhteista kunnossapitotöiden yhteydessä. Mahdollisia vuotokohteita kunnossapitotöiden yhteydessä ovat hajukaasujärjestelmän vesilukot sekä varolaitteet. Erityistä huolellisuutta vaaditaan metanoli- ja tärpätipolttimien käsittelyssä. Pienetkin vuotavat määrät aiheuttavat merkittävän hajuhaitan.

Koska väkevien hajukaasujen linjat ovat ylipaineisia ejektorin jälkeen soodakattilarakennuksessa, voi soodakattilarakennukseen muodostua kaasumyrkytysvaara hajukaasulinjan vuotaessa ja jollakin huonosti tuuletetulla alueella voi olla kaasuräjähdysvaara.

Sallittu rikkivety-pitoisuus sisätiloissa on 5 ppm (7 mg/m^3) / 8 h ja 10 ppm (14 mg/m^3) / 15 min Sosiaali- ja Terveysministeriön ohjeen ”[Työpaikan ilman epäpuhtauksien enimmäispitoisuudet](#)” mukaisesti. Nämä ns. HTP-arvot (haitalliseksi tunnettu pitoisuus) ovat pienimpiä pitoisuuksia, joiden uskotaan voivan vahingoittaa työntekijää.

Tehtailla on sekä kiinteitä että kannettavia rikkivety-mittareita, joista kiinteät mittarit käynnistävät vilkkuvat hälytysvalot ja summerit, jos rikkivety-pitoisuus ilmassa on liian korkea. Mittareiden sijoituksessa on hyvä huomioida mm. ilmavirtaukset ja



työskentelykorkeus. Niin kannettaville mittareille kuin kiinteästi asennetuille tulee tehdä säännöllisesti toimintatestit ja ne tulee ohjeistaa laatujärjestelmissä ja tehdyt testit tulee dokumentoida.

Kun hajukaasulinjoilla tai -laitteilla tehdään korjaus- tai huoltotöitä, täytyy ko. työkohteilla saada erityislupa työn suorittamiseksi.

4.1.1 Tuuletus/Höyrytys

Hajukaasulinjat, kuten muutkin lipeäosaston linjat, on saatettava turvalliseen tilaan ennen kuin niiden kanssa voidaan työskennellä. Hajukaasujärjestelmän laitteiden sisällä työskentelyyn vaaditaan aina kirjallinen säiliötyölupa. Laimeiden hajukaasujen linjat on huolellisesti erotettava prosesseista ja tuuletettava. Väkevien hajukaasujen linjat vaativat höyrytyksen sekä tarvittaessa typetyksen. Laimeat ja väkevät hajukaasulinjat vaativat myös LEL ja rikkipitoisten kaasujen mittauksen ennen töiden aloittamista.

Tuuletus on aina johdettava ulkoilmaan.

Ennen töiden aloittamista on tehtävä riskienarviointi, jossa erityisesti kartoitetaan kaikki työalueelle tulevat putkilinjat. Kirjallinen työlupakäytäntö on suositeltavaa ennen töiden aloittamista.

4.1.2 Haju

Rikkipitoisuudet turruttavat hajuaistin, joten nenään ei saa luottaa. Tilanne voi muodostua hengenvaaralliseksi, jollei asianmukaisia suojatoimia käytetä. Kaikkien hajukaasuja sisältävien laitteiden parissa työskentelevien on tutustuttava laimeitten – ja väkevien hajukaasujen käyttöturvallisuustiedotteisiin.

4.1.3 Suojautuminen

Hajukaasuilta suojautumiseen käytetään ainoastaan paineilmalaitteita. Kaasunamari ja hengitysilmasuojain on tarkoitettu vain vaara-alueelta poistumista varten.

4.2 Lauhteen poisto-ongelmat

Jos hajukaasulinjastossa oleva vesihöyry pääsee lauhtumaan, on olemassa sula-vesiräjähdyksivaara, mikäli tämä vesi pääsee soodakattilaan.



Vesityksiin tulisi kiinnittää erityistä huomiota ja ne pitää järjestää linjoihin kattavasti.

4.2.1 Vesilukon kuivuminen

Vesilukon kuivumista edistää hajukaasujen lämmitys lauhtumislämpötilaa korkeammalle. Vesilukkoihin on kuivumisen estämiseksi aina johdettava riittävä tuorevesivirta ja ne on varustettava vähintään virtausvahdeilla.

Vesilukkojen kuivuminen on estettävä myös seisokkien aikana.

4.2.2 Vesilukon tukkeutuminen

Hajukaasujen mukana kulkeutuu pieniä määriä lipeävaahtoa/suopaa, joka saattaa kerääntyä linjan alimpiin kohtiin kuten vesityksiin. Jos vesitysputkien halkaisija ei ole riittävän suuri, voi putkisto tukkeutua kokonaan.

4.2.3 Vesitystaskun täyttyminen

Yleinen ongelma hajukaasujärjestelmissä on ajoittainen runsas lauhdemäärä. Vesitystaskut lähimpänä soodakattilaa, on varustettava yläpinnan hälytyksellä sekä tarvittaessa lukituksella jolloin hajukaasut kääntyvät pois poltosta.

4.3 Räjähdysvaarat hajukaasulinjoissa

Väkevän hajukaasun siirto ja poltto toteutetaan siten, että kaasu ei ole missään tilanteessa räjähtävää. Räjähdysvaara syntyy, jos väkevän hajukaasun joukkoon vuotaa ilmaa. Väkevien hajukaasujen konsentraatio pidetään ylemmän räjähdysrajan yläpuolella huolehtimalla systeemin tiiveydestä.

Laimean hajukaasun siirto ja poltto toteutetaan niin, että kaasun konsentraatio on alle alemman räjähdysrajan. Laimeiden konsentraatio pidetään alle räjähdysrajan esimerkiksi huolehtimalla ilmalaimennuksesta. Joissain tapauksissa räjähdysvaara voi syntyä kun hajukaasuissa olevaa vesihöyryä lauhdutetaan pois jolloin kaasun konsentraatio nousee lähemmäksi alempaa räjähdysrajaa.

Syttyminen vaatii syttymisenergiaa. Maadoituksin, rakentein ja laitevalinnoin yritetään kipinän syntyä mahdollisuuksien mukaan estää.



4.3.1 Alas- ja ylösajotilanteet

Erityistä huomiota laimeiden hajukaasujen konsentraatioihin on kiinnitettävä alas- ja ylösajotilanteiden aikana. Usein soodakattiloiden hajukaasuräjähdykset ovat tahtuneet juuri laimeiden hajukaasujen järjestelmille, joissa seisokki- tai häiriötilanteessa on konsentraatio päässyt nousemaan liian suureksi. Eräs tyypillinen ongelma on ollut räjähtävien kaasujen kerääntyminen putkistoon seisokin aikana ja niiden höyrystyminen käynnistyksen yhteydessä.

4.3.2 Tulenkäsittely- ja tupakointikielto

Hajukaasujen käsittelyalueella on tupakointi ja muu avotulenteko kielletty. Tästä syystä on hajukaasulinjat ja tulityöluvan mukaiset vakinaiset tulenkäsittely- sekä tupakointipaikat sijoitettava erilleen toisistaan. Kriittiset alueet tulee varustaa asianmukaisin varoituskilvin.

4.4 Kaasuräjähdyks kattilassa

Hajukaasut ovat palavien komponenttien, hapen ja inertin kaasun (typpi, vesihöyry) seos. Kuten aina palavia kaasuja käsiteltäessä on vaara, että tulipesässä tapahtuu kaasuräjähdyks. Kaasuräjähdyks saadaan aikaan, jos polttoainetta johdetaan tulipesään ilman että se välittömästi palaa, ja sen jälkeen seos saa niin paljon energiaa että se syttyy.

4.5 Sulavesiräjähdyks kattilassa

Hajukaasujen linjaan lauhtuneen veden joutuminen tulipesään voi aiheuttaa sulavesiräjähdyksen. Veden tulon estämiseksi laimeat hajukaasut lämmitetään riittävästi jotta suurin osa vedestä olisi höyrynä ja hajukaasulinjat rakennetaan niin, että niissä on riittävät lauhteenpoistot ja kallistukset. Vesityksiä suunniteltaessa tulisi kiinnittää huomiota mm. kokoon, määrään ja sijaintiin.

Sulavesiräjähdyksellä tarkoitetaan kuumen kemikaalikeon kanssa kosketuksiin joutuvan veden erittäin nopeaa höyrystymistä. Höyrystymisen aiheuttama paineaalto saattaa rikkoa tulipesää ja siten aiheuttaa savukaasu/vesi/höyryvuodon kattilahuoneeseen.



4.6 Korroosio-ongelmat

Hajukaasujen polttaminen soodakattilassa ei ole todettu lisännen soodakattilan korroosiota.

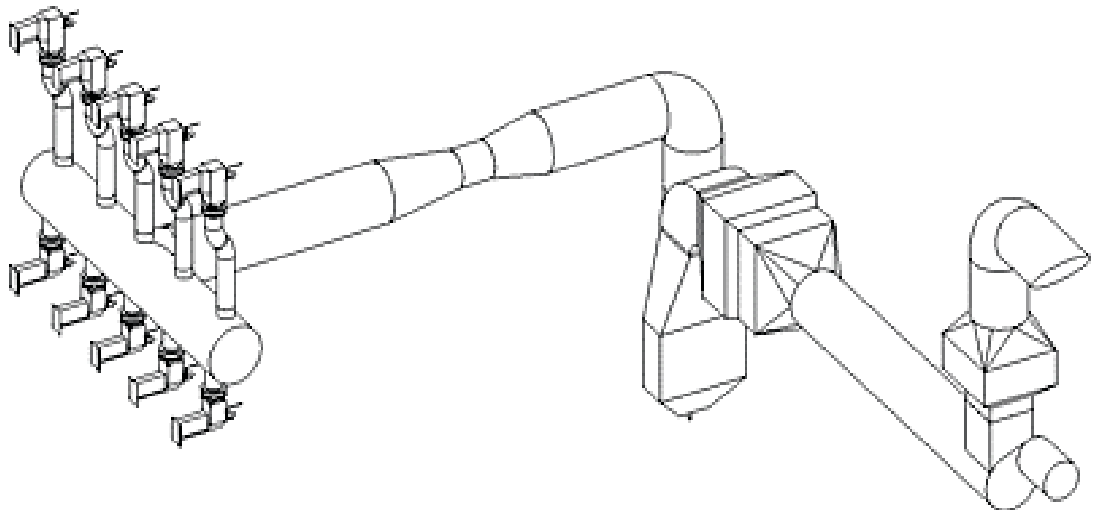
4.7 Kipinöinti/staattinen sähkö

Räjähdys vaatii alkuenergian esimerkiksi kipinästä. Turvallisuuden takaamiseksi hajukaasulinjoille tehdään potentiaalintasaus keräilypisteestä lähtien. Potentiaalintasauksen tarkoituksena on ehkäistä vaarallisten jännite-erojen esiintyminen samanaikaisesti kosketeltavien johtavien osien välillä. Esimerkiksi laipoissa, luukuissa ja yhteissä, joissa esim. tiivistämateriaalin takia voi muodostua galvaaninen erotus, on suoritettava potentiaalintasaus. Potentiaalintasaus tehdään määräysten mukaan ja varmistetaan mittauspöytäkirjalla.

5 LAIMEIDEN HAJUKAASUJEN JÄRJESTELMÄT SOODAKATTILALLA

Laimeat hajukaasut eivät ole polttoainetta. Ne koostuvat pääasiassa ilmasta ja vesihöyrystä. Laimeat hajukaasut luokitellaan kemikaalilain mukaisesti yleensä haitallisiksi, joten niiden laitteiden hankinta, suunnittelu, asennus ja käyttö tulee hoitaa tämän mukaisesti.

Soodakattilan käyttöturvallisuuden takia pitää veden joutuminen kattilaan estää laimeiden hajukaasujen polton yhteydessä. Laimeat hajukaasut jäähdytetään (osa kaasun sisältämästä vedestä lauhtuu), siirretään puhaltimella ja kuumennetaan, jotta mahdolliset pisarat höyrystyisivät ennen polttoa. Hajukaasulinjat varustetaan lauhteenpoistolla, jottei vettä kerääntyisi hajukaasulinjaan ja joutuisi siitä kattilaan.



Kuva 5-1. Esimerkki laimeiden hajukaasujen kanavistosta

5.1 Koostumus ja määrä

Laimeat hajukaasut koostuvat mm. sellutehtaan kuitulinjan säiliö- ja laitehöngistä, haihduttamon säiliöalueen höngistä, kaustistamon höngistä yms. Laimeiden hajukaasujen määrä on noin $300 - 400 \text{ m}^3 \text{ n/ADt}$ ja niiden rikkipitoisuus on noin $0.1 - 0.5 \text{ kgS/ADt}$. Laimeat hajukaasut pääsääntöisesti käsitellään pesurityyppisellä hönkäjäjäähdyttimellä, jolloin käsiteltävä hajukaasumäärä pienenee. Sellutehtaan laimeiden hajukaasujen keräilykohteiden tyypillisiä osastomääriä on esitetty taulukossa 5-1.



TAULUKKO 5-1. Laimeiden hajukaasujen keräilymäärät eri osastoilta lämpötilassa 40 °C.

Osasto	kg S / ADt	m ³ n / ADt
Jatkuvatoimisen keiton höngät	0.1 – 0.5	100 – 400
Superbatch keiton höngät (evakuointi-ilma, paineetomien säiliöiden hönkä)	0.1 – 0.5	150 – 300
Pesemön höngät	0.05 – 0.1	100 – 200
Mäntyöljykeittämön höngät	0.05 – 0.2	2 – 3
Säiliöhöngät, haihduttamo (ilmanpaineiset säiliöt)	0.1 – 0.4	20 – 30
Kaustistamo- ja meesauunialue	0.01 – 0.1	5 – 10
Yhteensä	0.1 – 0.5	300 – 400

Laimeiden hajukaasujen konsentraatio pidetään koko ajan alle räjähdysrajan ja konsentraation nousu tulee estää. Kun konsentraatio ja kosteus pidetään alhaisena, niin laimeita hajukaasuja voidaan käsitellä kattilalaitoksella kuten muuta palamisilmaa. Esimerkkejä laimeiden hajukaasujen analyyseistä on esitetty taulukossa 5-2. Hajukaasun komponenttien pitoisuudet vaihtelevat paljon riippuen tehtaasta ja mittauspisteestä.

Taulukko 5-2. Esimerkkejä laimeiden hajukaasujen analyyseistä syntypisteessä.

	Tehdas A	Tehdas B	Tehdas C	Tehdas D	Tehdas E	Tehdas F	Tehdas G
Komponentti	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
H ₂ S	*	*	1	0	725	1	5
MM, CH ₃ SH	200	40	70	2	14	2	2706
DMS, (CH ₃) ₂ S	1 000	60	160	643	1 530	784	24 040
DMDS, (CH ₃) ₂ S ₂	90	*	270	1	10	365	267
Tärpähti, C ₁₀ H ₁₆	1 500	15	*	69	470	12 400	2
MeOH, CH ₃ OH	900	150	*	834	6 943	2 046	2 845
Etanoli, C ₂ H ₅ OH	80	*	*	*	*	*	*
Happi, O ₂	*	*	*	*	*	*	*
Ammoniakki, NH ₃	200	*	*	*	*	*	*
Vesi, H ₂ O	70 000	50 000	*	*	*	*	*
Hiilidioksidi, CO ₂	*	300	*	*	*	*	*

*) ei analysoitu tai havainnointirajan alapuolella

Kun laimeiden hajukaasujen poltto otetaan tehtaalla ensimmäistä kertaa käyttöön tai prosessiin tehdään muutoksia, tulee konsentraatiot linjoissa ja eri keräyspisteistä mitata jotta todetaan laimeiden hajukaasujen pitoisuudet eri keräyslähdeistä. Erityistä huomiota on kiinnitettävä siihen, että hakesiilon höngissä häiriötilanteissa hajukaasujen konsentraatio ei nouse liian korkeaksi. Hakesiilon häiriötilanteessa ei sen hönkäkaasuja saa johtaa laimeiden hajukaasujen keräilyjärjestelmään.

Taulukko 5-3. Laimeiden hajukaasujen komponenttien suositeltavia enimmäispitoisuuksia ennen polttoa.

Ominaisuus	Raja	Huom.
Ilmapitoisuus, til-%	> 90	
Vesipitoisuus, til-%	< 7	40 °C
Vesipitoisuus til-%	< 12	50 °C
Rikkipitoisuus TRS, ppm	< 200	
Tärpättipitoisuus, ppm	< 1000	
Metanolipitoisuus, ppm	< 1000	

Taulukko 5-3 esittää suosituksen laimeiden hajukaasujen komponenttien enimmäispitoisuuksille ennen polttoa. Laimeat hajukaasut ovat tyypillisesti alle 10 % LEL rajasta.

Lisäksi on selvitettävä, mihin tärpättipitoiset lauhdeet johdetaan turvallisesti keittämöhäiriössä. Tiedetään tapauksia, joissa harkitsemattoman kytkennän vuoksi tärpättipitoisuus lauhdeessa on noussut keittämöhäiriön seurauksena merkittävästi.

Laimeat hajukaasut syötetään soodakattilaan tyypillisesti osana kattilan polttoilmaa. Lauhderyöpyn aiheuttaman sulavesiräjähdyksen vaaran vuoksi hajukaasujen syöttämistä primääri-ilman joukkoon ei suositella.

5.2 Jäähdytys/lämmitys

Laimeiden hajukaasujen lauhdetta ei saa päästä soodakattilan tulipesään. Laimeiden hajukaasujen mukana kulkevan vesihöyryn määrä tulipesään on oltava mahdollisimman pieni. Suositellaan, että laimeiden hajukaasujen lämpötila lauhduttimen jälkeen on 40–50 °C.

Laimeat hajukaasut suositellaan lämmitettävän 30 °C yli lauhdutuslämpötilan, jotta minimoidaan vesipisaroiden pääsy tulipesään.

5.3 Laimeiden hajukaasujen polton logiikka

Tämä teksti pyrkii esittämään ne prosessivaateet, joita vaaditaan laimeiden kaasujen polton logiikalta. On pyritty esittämään joukko välttämättömiä ehtoja, joita turvallisen automaation pitää täyttää. Jokaisessa soodakattilassa on varustelun, prosessikytkentöjen ja toteutuksen takia myös muita kuin tässä esitettyjä suureita mukana logiikassa.



Tämä suositus ei koske laimeiden hajukaasujen keräilyn aloituksen ja ajon lukituksia, vaikka ne usein on osittain toteutettu samassa järjestelmässä kuin polton lukitukset. Nämä lukitukset pitää määritellä tapauskohtaisesti erikseen.

Soodakattilayhdistys suosittelee, että hajukaasujärjestelmä on ollut käytössä riittävän pitkään (esim. yli 1 tunti) ennen syötön aloittamista, jotta kanaviin lauhtuneet palavat hajukaasukomponentit höyrystetään ja tuuletetaan ulos. Jos mahdollista, laimeiden hajukaasujen keräily tulisi olla päällä seisokin aikana. Tavoite on että laimeiden hajukaasujen järjestelmässä ei tapahdu konsentroitumista väkeviksi.

Laimeiden hajukaasujen polttoa soodakattilassa tulee voida valvoa ja polton aloittaminen ja lopettaminen tulee voida tehdä samasta valvomosta kuin muukin soodakattilan toiminnan valvonta tapahtuu.

5.3.1 Laimeiden hajukaasujen syötön edellytykset

Laimeita hajukaasuja voidaan syöttää kattilan tulipesään, kun mm. seuraavat ehdot ovat voimassa. **HUOM. Jokaisessa soodakattilassa saattaa olla käyttöönotto-vuoden, varustelun, prosessikytkentöjen ja toteutuksen takia myös muita kuin tässä esitettyjä ehtoja mukana logiikassa.**

Taulukko 5-4. Laimeiden hajukaasujen syötön edellytykset

	Ehto	Ehdon tarkoitus
1.	Kattilan höyrykuorma / syöttövesivirtaus on yli 15% kattilan nimelliskuormasta. Tämä raja tulee määrittää tapauskohtaisesti	Varmistaa tulipesässä riittävän vakaat olosuhteet hajukaasujen hapettumiseksi (lämpötila, viive-aika).
2.	Laimean hajukaasun puhallin päällä	Varmistaa riittävä virtaus kanavassa, jolla estetään liekin eteneminen taaksepäin putkistoon (takatuli)
3.	Paine kanavistossa ennen sulkuventtiiliä riittävä	Varmistaa riittävä virtaus kanavassa, jolla estetään liekin eteneminen taaksepäin putkistoon (takatuli)
4.	Virtaus kanavistossa ennen sulkuventtiiliä riittävä	Varmistaa riittävä virtaus kanavassa, jolla estetään liekin eteneminen taaksepäin putkistoon (takatuli)
5.	Lämpötila jäähdytyksen jälkeen (ennen lämmityspatteria) alle lämpötilarajan	Alentaa kaasun tilavuutta ja vesihöyryn määrää
6.	Lämpötila ennen syöttöä kattilaan / lämmityspatterin jälkeen yli lämpötilarajan	Estää vesipisaroiden pääsyn kattilaan
7.	Tuuletus katolle (ohitus) on ollut käynnissä riittävän ajanjakson	Estää hajukaasujen konsentroituminen kanavistoon
8.	Hajukaasujärjestelmässä mahdollisesti oleva vesitaskun pinta alle ylärajan	Indikoi vikaa lauhteenpoistojärjestelmässä, joka estää lauhteiden poiston



5.3.2 Laimeiden hajukaasujen syötön keskeytys

Laimeitten hajukaasujen syöttö kattilan tulipesään on keskeytettävä kun jokin seuraavista ehdoista on voimassa. **HUOM. Jokaisessa soodakattilassa saattaa olla käyttöönottovuoden, varustelun, prosessikytkentöjen ja toteutuksen takia myös muita kuin tässä esitettyjä ehtoja mukana logiikassa.**

Taulukko 5-5. Laimeiden hajukaasujen syötön keskeytys

	Ehto	Ehdon tarkoitus
1.	Kattilan höyrykuorma / syöttövesivirtaus on alle 15% kattilan nimelliskuormasta. Kuitenkin tämä raja tulee määrittää tapauskohtaisesti.	Varmistaa tulipesässä riittävän vakaat olosuhteet hajukaasujen hapettumiseksi (lämpötila, viive-aika).
2.	Pikapysäytys laukeaa	Estää hajukaasujen syöttö kun kattila ei ole käytössä
3.	Laimean hajukaasun puhallin pysähtyy	Estetään liekin eteneminen taaksepäin putkistoon (takatuli)
4.	Lämpötila jäädytyksen jälkeen (ennen lämmityspatteria) nousee yli lämpötilarajan	Liian korkea kaasujen kosteuspitoisuus
5.	Lämpötila ennen syöttöä kattilaan/lämmityspatterin jälkeen laskee alle lämpötilarajan	Vesipisaroiden määrä nousee liian suureksi
6.	Paine hajukaasukanavassa laskee alle alarajan	Estää liekin eteneminen taaksepäin putkistoon (takatuli)
7.	Hajukaasujärjestelmässä olevan vesitaskun pinta yli ylärajan	Indikoi vikaa lauhteenpoistojärjestelmässä, joka estää lauhteiden poiston

5.4 Puhallin

Puhaltimen rakenne tulee olla riittävän tiivis ja siinä on oltava lauhteenpoisto.

5.5 Varasilmayhde

Laimeiden hajukaasujen järjestelmän osana voidaan käyttää varasilmayhdettä (lisäsilmayhdettä, laimennusilmayhdettä), jossa hajukaasujen joukkoon lisätään ilmaa. Jos laimeiden hajukaasujen turvallisuus riippuu varasilmayhteen toiminnasta, on erityistä huomiota kiinnitettävä siihen, ettei laimennusilma tulo voi estyä mistään syystä.

Edellä olevasta syystä on laimennusta valvottava ja mitattava riittävästi, esimerkiksi virtausmäärä mittauksilla ja riittämättömästä laimennuksesta suoritettava tarpeelliset lukitukset.



Jos varasilmayhde sijoitetaan puhaltimen imuaukon yhteyteen, on aukon suuntauksessa varauduttava mahdollisiin painepurkauksiin yhteestä. Puhaltimen käynnistymistä suojaavan varasilmayhteen on avauduttava lukitustoimintana puhaltimen pysähtyessä välittömästi ja sulkeuduttava hitaasti puhaltimen käynnistyessä puhallinta suojaavan laimennuksen varmistamiseksi.

5.6 Kanavat

Laimeiden hajukaasujen vuotaminen kattilahuoneeseen pitää estää ja kanavan pituus kattilahuoneessa minimoida.

5.6.1 Virtaus

Poltoon menevien laimeiden hajukaasujen virtausmäärää suositellaan mitattavaksi. Virtausmäärän mittauksen tulee sijaita mahdollisimman lähellä laimeiden hajukaasujen syöttökohtaa kattilaan.

5.6.2 Potentiaalitasaus

Laimeilla hajukaasuilla ei vaadita potentiaalitasasta.

5.7 Lauhteenpoisto

Laimeiden hajukaasujen linjat on varustettava lauhteenpoistoyhteillä. Lauhteet tulee ensisijaisesti johtaa likaislauhteiden käsittelyyn omana järjestelmänä.

5.7.1 Lauhteenpoistolinjojen koko

Lauhteenpoistoyhteitten ja niistä alkavien linjojen suositeltava putkihalkaisija on vähintään 50 mm tukkeutumisvaaran vuoksi.

5.7.2 Kanavien kallistus ja lauhteenpoistoyhteitten sijoitus

Kanavien ja putkien on kallistuttava lauhteenpoistoihin päin. Lauhteen poisto muuhun kun virtaussuuntaan on vaikeaa. Suositeltava kanavien kallistus, muualla kuin soodakattilalaitoksella, kaasun virtaussuunnassa on 1:100 ja kaasun virtaussuuntaa vastaan 1:25.

Veden tulipesään joutumisvaaran vuoksi soodakattilalaitoksessa on pyrittävä kanavien kallistukseen kaasun virtaussuunnassa 1:100 ja kaasun virtaussuuntaa vastaan



1:1 tai jyrkempään. Ennen jyrkkää nousua on aina tehtävä lauhteenpoisto. Jollei suositeltaviin kallistuksiin päästä jollain osalla kanavaa, on lauhteen poisto tällaisesta kanavan osasta suunniteltava erityisen huolellisesti.

Lauhteidenpoistoa suunniteltaessa tulee kiinnittää erityistä huomiota mm. yhteiden kokoon, määrään ja sijaintiin. Viimeinen poisto tulisi sijoittaa mahdollisimman lähelle soodakattilaa niin, että kanavan pituus tästä poistosta pesään on mahdollisimman lyhyt.

5.7.3 Vesilukot

Lauhteidenpoistolinjat on varustettava vesilukoilla tai yhteisellä vesilukkosäiliöllä (lauhteiden keräysastia). Näin estetään hajukaasujen vuoto lauhteenpoistoyhteiden kautta.

Jotta vesilukkojen kuivuminen voidaan estää, on vesilukot varustettava pinnankorkeuden mittauksin tai virtausmittauksin varmistetulla jatkuvalla vesivirralla.

Jotta laimeiden hajukaasujen kanavassa vallitseva paine ei riittäisi tyhjentämään vesilukkoa, on lukon vesipintojen korkeuden eron voitava vaihdella ainakin 10 kPa tai kanavan rakennepainetta vastaava määrä. 10 kPa vastaa vesilukon pinnankorkeuden eron vaihtelua 1 m.

Jos lauhteet kerätään pumppausastiaan, niin astian pinnankorkeuksien eron tulee voida vaihdella ainakin 10 kPa tai kanavan rakennepainetta vastaavan määrä.

5.8 Pesurit / lauhduttimet

Laimeiden hajukaasujen järjestelmässä tulee olla tarpeellinen määrä pesureita tai lauhduttimia, joilla poistetaan kaasujen sisältämää vesihöyryä sekä VOC:ja (mm. tärpätti) ja siten pienennetään kerättävää kaasumäärää.

5.9 Venttiilit/pellit

Laimeiden hajukaasujen polton venttiilit/pellit on valittava huolellisesti. Erityistä huomiota on kiinnitettävä venttiilien tiiviyyteen. Normaalisti käytetään tiiviitä läpäventtiilejä/peltejä isoille putkikooille.

Laimean hajukaasulinjan automaattisen sulkuventtiilin on sulkeuduttava apuenergian loppuessa. Sulkuventtiileissä on oltava sulkeutumisen ilmaiseva rajatieto automaatiojärjestelmään.

Venttiilien rakennemateriaaliksi suositellaan EN 1.4301 (SS2333) tai vastaava.



Kuva 5-2. Erään tehtaan laimeiden hajukaasujen polttojärjestelmä asennusvaiheessa.

5.10 Ohitus

Laimeiden hajukaasujen ohituskanava on johdettava mahdollisimman korkealle paikalle. Normaalisti ohituskanava johdetaan soodakattilalaitoksen katolle tai savupiippuun.

Ohituksen automaattisen sulkuventtiilin on avauduttava apuenergian loppuessa.

5.11 Pisaranerotin

On suositeltavaa käyttää laimeiden hajukaasujen kanavan polttopäässä pisaranerotinta ennen kaasujen lämmitystä ja aina sen jälkeen kun laimeita hajukaasuja jäähdytetään tai käsitellään pesurilla.



5.12 Liekinestin

Laimeiden hajukaasujen kanavissa ei tarvitse käyttää liekinestintä.

5.13 Alipainesuoja

Laimeille hajukaasuille voidaan käyttää alipainesuojaa jos putkiston rakennepaine ja puhaltimen imu sitä vaativat.

5.14 Ylipainesuoja

Laimeille hajukaasuille ei tarvitse käyttää ylipainesuojaa.

5.14.1 Räjähdyslevyt / murtokalvot

Laimeiden hajukaasujen kanavissa ei tarvitse käyttää räjähdyslevyä. Mikäli järjestelmissä käytetään painesuojaukseen murtokalvoja, on näiden kuntoa valvottava automaatiojärjestelmässä aiheuttamalla hälytys. Tällaisen murtokalvon poistoaukon suuntaus on tehtävä turvalliseen suuntaan.

5.15 Pitoisuusmittaus

Laimeille hajukaasuille ei tarvitse käyttää jatkuvatoimista pitoisuusmittausta.

Soodakattilayhdistys suosittelee, että laimeiden hajukaasujen pitoisuudet lähtöpis-
teessä mitataan, jos tässä syntykohteessa tehdään laitemuutoksia.

Lisäksi Soodakattilayhdistys suosittelee, että laimeiden hajukaasujen rikki- ja hap-
pipitoisuus polttoon mitataan ainakin kerran vuodessa.

6 LIUOTTIMEN HÖNGÄN KÄSITTELYJÄRJESTELMÄT SOODAKATTILALLA

Liuottimen höngät vastaavat ominaisuuksiltaan laimeita hajukaasuja. Ne koostuvat pääasiassa ilmasta ja vesihöyrystä. Liuottimen hönkien sisältämän hajurikin talteen saamiseksi sekä pölypäästöjen pienentämiseksi niitä on alettu polttaa soodakattiloilla. Soodakattilayhdistys suosittelee liuotinhönkien polttamista soodakattilalaitoksella.

Liuottajan hönkajärjestelmään voidaan johtaa mm. sekotussäiliön hönkiä, tuhkan käsittelyprosessin hönkiä sekä tehtaan laimeita hajukaasuja,

Soodakattilan käyttöturvallisuuden takia pitää veden joutuminen kattilaan estää liuottimen hönkien polton yhteydessä.

Liuottimen höngät pestään, jäähdytetään, siirretään puhaltimella ja kuumennetaan, jotta mahdolliset pisarat höyrystyisivät ennen polttoa. Hönkälinjat varustetaan lauhteenpoistolla, jottei vettä kerääntyisi hönkälinjaan ja joutuisi siitä kattilaan.

6.1 Koostumus ja määrä

Liuottimen höngät ovat peräisin pääasiassa vuotoilmasta, sulan lämmön aikaansaamasta liuottimen kiehumisesta ja sulan hajotushöyrystä. Ongelmallisinta käsittelyn kannalta on liuottimen hönkien sisältämät pienet viherlipeäpisarat, jotka kuivussa pyrkivät likaamaan hönkajärjestelmän.

Sellutehtaan liuottimen hönkien määriä ja koostumuksia on esitetty taulukossa 6-1.

TAULUKKO 6-1. Liuottimen hönkien määrät ja koostumus, Rantanen 1987

Hönkämäärä liuotinsäiliöstä	$\text{m}^3\text{n} / \text{kgka}$	0.4 – 0.8
Hönkien lämpötila liuotinsäiliöstä	$^{\circ}\text{C}$	85 - 95
Hönkien kosteuspitoisuus liuotinsäiliöstä	til-%	40 - 80
Hönkien kokonaispöly liuotinsäiliöstä	$\text{mg} / \text{m}^3\text{n}(\text{kuiva})$	1000 – 5000
Hönkien TRS liuotinsäiliöstä	$\text{mg} / \text{m}^3\text{n}(\text{kuiva})$	150 - 700
Hönkien kokonaisrikki pesurin jälkeen	$\text{kg S} / \text{ADt}$	0.01 - 0.1
Hönkien kokonaispöly pesurin jälkeen	$\text{mg} / \text{m}^3\text{n}(\text{kuiva})$	100 - 200
Hönkien TRS pesurin jälkeen	$\text{mg} / \text{m}^3\text{n}(\text{kuiva})$	1 - 10

Liuottimen hönkiä syötetään soodakattilaan esimerkiksi sekoitettuna ilmaan tai muihin kattilaan johdettaviin laimeisiin hajukaasuihin. Toinen mahdollisuus on syöttää liuottimen höngät omien erillisten suutinten kautta.



6.2 Sekoitussäiliön höngät

Sekoitussäiliön hönkiä johdettaessa liuottimen hönkäjärjestelmään on otettava huomioon niiden likaava vaikutus, jolloin sekoitussäiliön hönkäjärjestelmään voidaan lisätä oma pesuri.

Sekoitussäiliön hönkiä johdettaessa tulipesään omana järjestelmänään on huomioitava liuotinhönkien polton erityispiirteet.

6.3 Jäähdytys/Lämmitys

Liuottimen hönkien lauhdetta ei saa päästä soodakattilan tulipesään. Liuottimen hönkien järjestelmässä tulee olla jäähdytin, joka on voitu kytkeä pesuriin tai voi olla erillinen. Jäähdyttimellä poistetaan vesihöyryä ja siten pienennetään kattilaan menevää kaasumäärää. Jäähdyttimen pesumahdollisuus käynnin aikana on huomioitava.

Suositellaan, että liuottimen hönkien lämpötila lauhduttimen jälkeen on 40–50 °C.

Liuottimen höngät suositellaan lämmitettävän 30 °C yli lauhdutuslämpötilan, jotta minimoidaan vesipisaroiden pääsy tulipesään.

6.4 Liuottimen hönkien polton logiikka

Tämä teksti pyrkii esittämään ne prosessivaateet, joita vaaditaan liuottimen hönkien polton logiikalta. On pyritty esittämään joukko välttämättömiä ehtoja, joita turvallisen automaation pitää täyttää. Jokaisessa soodakattilassa on varustelun, prosessikytkentöjen ja toteutuksen takia myös muita kuin tässä esitettyjä suureita mukana logiikassa.

Liuottimen hönkien polttoa soodakattilassa tulee voida valvoa ja polton aloittaminen ja lopettaminen tulee voida tehdä samasta valvomosta kuin muukin soodakattilan toiminnan valvonta tapahtuu.

6.4.1 Liuottimen hönkien syötön edellytykset

Liuottimen hönkiä voidaan syöttää kattilan tulipesään, kun seuraavat ehdot ovat voimassa. **HUOM. Jokaisessa soodakattilassa saattaa olla käyttöönottovuoden, varustelun, prosessikytkentöjen ja toteutuksen takia myös muita kuin tässä esitettyjä ehtoja mukana logiikassa.**

Taulukko 6-2. Liuottimen hönkien syötön edellytykset

	Ehto	Ehdon tarkoitus
1.	Kattilan höyrykuorma/syöttövesivirtaus on yli 5% kattilan nimelliskuormasta. Tämä raja tulee määrittää tapauskohtaisesti	Varmistaa tulipesässä riittävän vakaat olosuhteet hajukaasujen hapettumiseksi (lämpötila, viive-aika)
2.	Liuottimen hönkäpuhallin on päällä	Varmistaa riittävä virtaus kanavassa, jolla estetään liekin eteneminen taaksepäin putkistoon (takatuli)
3.	Paine kanavistossa ennen sulkuventtiiliä on riittävä	Varmistaa riittävä virtaus kanavassa, jolla estetään liekin eteneminen taaksepäin putkistoon (takatuli)
4.	Lämpötila jäähtyksen jälkeen (ennen lämmityspatteria) on alle lämpötilarajan	Alentaa kaasun tilavuutta ja vesihöyryn määrää
5.	Lämpötila ennen syöttöä kattilaan/lämmityspatterin jälkeen on yli lämpötilarajan	Estää vesipisaroiden pääsy kattilaan
6.	Hajukaasujärjestelmässä mahdollisesti oleva vesitaskun pinta alle ylärajan	Indikoi vikaa lauhteenpoistojärjestelmässä, joka estää lauhteiden poiston
7.	Virtaus kanavistossa ennen sulkuventtiiliä on riittävä (jos erilliset suuttimet)	Varmistaa riittävä virtaus kanavassa, jolla estetään liekin eteneminen taaksepäin putkistoon (takatuli)

6.4.2 Liuottimen hönkien syötön keskeytys

Liuottimen hönkien syöttö kattilan tulipesään on keskeytettävä, kun jokin seuraavista ehdoista on voimassa. **HUOM. Jokaisessa soodakattilassa saattaa olla käyttöönottovuoden, varustelun, prosessikytkentöjen ja toteutuksen takia myös muita kuin tässä esitettyjä ehtoja mukana logiikassa.**

Taulukko 6-3. Liuottimen hönkien syötön keskeytys

	Ehto	Ehdon tarkoitus
1.	Kattilan höyrykuorma / syöttövesivirtaus on alle 5% kattilan nimelliskuormasta. Tämä raja tulee määrittää tapauskohtaisesti.	Varmistaa tulipesässä riittävän vakaat olosuhteet hajukaasujen hapettumiseksi (lämpötila, viive-aika)
2.	Pikapysäytys laukeaa	Estää hajukaasujen syöttö kun kattila ei ole käytössä
3.	Liuottimen hönkien puhallin pysähtyy	Estää liekin eteneminen taaksepäin putkistoon (takatuli)
4.	Lämpötila jäähtyksen jälkeen (ennen lämmityspatteria) nousee yli lämpötilarajan	Alentaa kaasun tilavuutta ja vesipisaroiden määrää



	jan	
5.	Lämpötila ennen syöttöä kattilaan/lämmityspatterin jälkeen laskee alle lämpötilarajan	Estää vesipisaroiden pääsy kattilaan
6.	Vesitaskun pinta yli ylärajan	Indikoi vikaa lauhteenpoistojärjestelmässä, joka estää lauhteiden poiston

6.5 Puhallin

Puhaltimen rakenne tulee olla riittävän tiivis ja siinä on oltava lauhteenpoisto.

6.6 Kanavat

Liuottimen hönkien vuotaminen kattilahuoneeseen pitää estää ja kanavan pituus kattilahuoneessa minimoida.

Korroosiovaaran vuoksi on liuottimen hönkien polton kanavat ja suuttimet tehtävä ruostumattomasta teräksestä EN 1.4301 (SS2333) tai paremmasta.

6.6.1 Virtaus

Liuottimen hönkien virtausmäärä voidaan mitata. Virtausmäärän mittauksen tulee sijata lähellä liuottimen hönkien syöttöä kattilaan.

6.6.2 Potentiaalintasaus

Liuottimen hönkien kanavistolle ei tarvitse tehdä potentiaalintasausta.

6.7 Lauhteenpoisto

Liuottimen hönkien linjat on varustettava lauhteen poistoyhteillä. Lauhteet tulee ensisijaisesti johtaa liuottimeen tai likaisten lauhteiden käsittelyyn.

6.7.1 Lauhteenpoistolinjojen koko

Lauhteenpoistoyhteitten ja niistä alkavien linjojen suositeltava putkihalkaisija on vähintään 50 mm tukkeutumisvaaran vuoksi.

6.7.2 Kanavien kallistus ja lauhteenpoistoyhteitten sijoitus

Kanavien ja putkien on kallistuttava lauhteenpoistoihin päin. Lauhteen poisto muuhun kun virtaussuuntaan on vaikeaa. Suositeltava kanavien kallistus, muualla kuin



soodakattilalaitoksella, kaasun virtaussuunnassa on 1:100 ja kaasun virtaussuuntaa vastaan 1:25.

Veden tulipesään joutumisvaaran vuoksi soodakattilalaitoksessa on pyrittävä kanavien kallistukseen kaasun virtaussuunnassa 1:100 ja kaasun virtaussuuntaa vastaan 1:1 tai jyrkempi. Ennen jyrkkää nousua on aina tehtävä lauhteenpoisto. Jollei suositeltaviin kallistuksiin päästä jollain osalla kanavaa, on lauhteen poisto tällaisesta kanavan osasta suunniteltava erityisen huolellisesti.

Lauhteidenpoistoa suunniteltaessa tulee kiinnittää erityistä huomiota mm. yhteiden kokoon, määrään ja sijaintiin. Viimeinen poisto tulisi sijoittaa mahdollisimman lähelle soodakattilaa niin, että kanavan pituus tästä poistosta pesään on mahdollisimman lyhyt.

6.7.3 Vesilukot

Lauhteidenpoistolinjat on varustettava vesilukoilla tai yhteisellä vesilukkosäiliöllä. Näin estetään haisevien kaasujen vuoto lauhteenpoistoyhteiden kautta.

Jotta vesilukkojen kuivuminen voidaan estää, on vesilukot varustettava pinnankorkeuden mittauksin tai virtausmittauksin varmistetulla jatkuvalla vesivirralla.

Jotta liuottimen hönkien kanavassa vallitseva paine ei riittäisi tyhjentämään vesilukkoa, on lukon vesipintojen korkeuden eron voitava vaihdella ainakin 10 kPa tai kanavan rakennepainetta vastaava määrä. 10 kPa vastaa vesilukon pinnankorkeuden eron vaihtelua 1 m.

Jos lauhteet kerätään pumppausastiaan, niin astian pinnankorkeuksien eron tulee voida vaihdella ainakin 10 kPa tai kanavan rakennepainetta vastaavan määrän.

6.8 Pesuri

Liuottimen hönkien järjestelmässä tulee olla pesuri, jolla poistetaan pölyä ja vesihöyryä. Pesurin ja päälaitteiden pesumahdollisuus käynnin aikana on huomioitava.



6.9 Venttiilit/pellit

Liuottimen hönkien polton venttiilit/pellit on valittava huolellisesti. Erityistä huomiota on kiinnitettävä venttiilien tiiviyyteen. Normaalisti käytetään tiiviitä läppäventtiilejä/peltejä.

Liuottimen hönkälinjan automaattisen sulkuventtiilin/pellin on mentävä itsestään kiinni apuenergian loppuessa.

Venttiilien rakennemateriaaliksi suositellaan EN 1.4301 (SS2333) tai vastaava.

6.10 Ohitus

Liuottimen hönkien ohituskanava on johdettava mahdollisimman korkealle paikalle. Normaalisti ohituskanava johdetaan soodakattilalaitoksen katolle tai savupiippuun.

Ohituksen automaattisen sulkuventtiilin on avauduttava apuenergian loppuessa.

6.11 Pisanerotin

Liuottimen hönkien järjestelmässä suositellaan pisanerotinta kaasun jäähtymisen jälkeen.

6.12 Liekinestin

Liuottimen hönkien kanavissa ei tarvitse käyttää liekinestintä.

6.13 Ylipainesuoja

Liuottimen hönkäjärjestelmän on kestävä puhaltimen aiheuttama ylipaine. Lisäksi liuottimelta menee erillinen kanava soodakattilan katolle, joka aukeaa liuottimen ylipaineesta.

6.13.1 Räjähdyslevy

Liuottimen hönkien kanavissa ei tarvitse käyttää räjähdyslevyä.

6.14 Pitoisuusmittaus

Liuottimen höngille ei tarvitse käyttää jatkuvatoimista pitoisuusmittausta.

7 VÄKEVIEN KAASUJEN POLTTO SOODAKATTILALLA

Väkevät hajukaasut ovat luonteeltaan matalalämpöarvoinen polttoaine ja niiden polttojärjestelmän tulee noudattaa turvallisuusmääräyksiltään ja logiikaltaan räjähtävien kaasujen poltosta annettuja suosituksia ja määräyksiä.

Väkevien hajukaasujen lähteet ovat mm. haihduttamon tyhjökaivon lauhtumattomat kaasut, stripperin ja metanolitislauksen kaasut, likaislahdesäiliön hönkä, keittimen lauhduttimien kaasut sekä paineistetun lipeän väkevöinnin kaasut. Ilman vuotaminen väkevien hajukaasujen joukkoon pitää yrittää estää kaikissa olosuhteissa.

Väkevien hajukaasujenjärjestelmien suunnittelussa on huomioitava ATEX-säädökset.



Kuva 7-1. Soodakattilan tulipesän alaosa, jossa keskellä erillispoltin väkeville hajukaasuille.

7.1 Koostumus ja määrä

Väkevien hajukaasujen kokonaismäärä modernissa sellutehtaassa on 2 - 4 kgS/ADt. Määrä lisääntyy merkittävästi jos mustalipeää haihdutetaan korkeaan kuiva-aineeseen (yli 80 %). Prosessista johtuen väkevien hajukaasujen määrä voi vaihdella.



la suuresti eri ajankohtina. Sellutehtaan väkevien hajukaasujen keräilykohteiden tyypillisiä määriä on esitetty taulukossa 7-1.

TAULUKKO 7-1. Väkevien hajukaasujen tyypillisiä määriä eri osastoilta

Osasto	kg S / ADt	m ³ n / ADt
Eräkeiton pusku	0.4 – 0.8	5 – 15
Eräkeiton kaasaus	0.1 – 0.2	1.0 – 3.0
Jatkuva keitto	0.1 – 0.4	1.0 – 4.5
Stripperi	0.5 – 1.0	15 – 25
Haihduttamo	0.4 – 0.8	1 – 10
Metanolin käsittely	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0
Mustalipeän lämpökäsittely	2 – 3	1.5 – 3.0
Konsentraattori	2 – 5	1.5 – 6.0

Väkevät hajukaasut sisältävät merkittäviä määriä rikkiyhdisteitä sekä ammoniakia. Esimerkkejä väkevien hajukaasujen analyyseista on esitetty taulukossa 7-2. Väkevät hajukaasut luokitellaan sisältönsä mukaan joko erittäin myrkyllisiksi, myrkyllisiksi tai palaviksi.

TAULUKKO 7-2. Esimerkkejä väkevien hajukaasujen analyyseista.

	Tehdas A	Tehdas B	Tehdas C
Komponentti	ppm	ppm	ppm
H ₂ S	*	50 000	81 300
CH ₃ SH	80 900	110 000	188 300
(CH ₃) ₂ S	22 000	50 000	116 000
(CH ₃) ₂ S ₂	800	30 000	3 000
C ₁₀ H ₁₆ (tärpätti)	1 900	*	*
CH ₃ OH	*	*	*
O ₂	*	*	*
NH ₃	*	*	*
H ₂ O	20 000	330 000	*
CO ₂	*	*	*

*) ei analysoitu tai havainnointirajan alapuolella

TAULUKKO 7-3. Väkevien hajukaasujen komponenttien lämpöarvoja, BLRBAC.

Komponentti	kJ/kg(kuiva)
H ₂ S	15 280
CH ₃ SH	26 100
(CH ₃) ₂ S	30 890
(CH ₃) ₂ S ₂	23 630
Tärpätti	41 560
Metanoli(kaasu)	22 720

Väkeviä hajukaasuja ei yleensä jäähdytetä eikä kuumenneta kuten laimeita hajukaasuja. Väkevien hajukaasujen siirtoon käytetään ejektoria tai nesterengaskompressoria. Näiden laitteiden jälkeen hajukaasujärjestelmässä on pisanerotin, liekinestin ja räjähdyslevy ennen polttoa.



Väkevien hajukaasujen poltto- ja keräilyjärjestelmältä vaaditaan että vuodot linjoista työskentelytiloihin on estetty, vettä ei pääse kaasujen mukana tulipesään ja tulipalon/räjähdyksen riski on minimoitu.

7.2 Väkevien kaasujen polton logiikka

Väkevien hajukaasujen polttoa soodakattilassa tulee voida valvoa ja sen aloittaminen ja lopettaminen tulee voida tehdä samasta valvomosta kuin muukin soodakattilan toiminnan valvonta tapahtuu.

Tämä teksti pyrkii esittämään ne prosessivaateet, joita vaaditaan väkevien kaasujen polttimen polttologiikalta. On pyritty esittämään joukko välttämättömiä ehtoja, joita turvallisen automaation pitää täyttää. Jokaisessa soodakattilassa on varustelun, prosessikytkentöjen ja toteutuksen takia myös muita kuin tässä esitettyjä suureita mukana logiikassa.

Tämä suositus ei koske väkevien hajukaasujen keräilykohteiden lukituksia, vaikka ne usein on osittain toteutettu samassa järjestelmässä, kuin polton lukitukset.

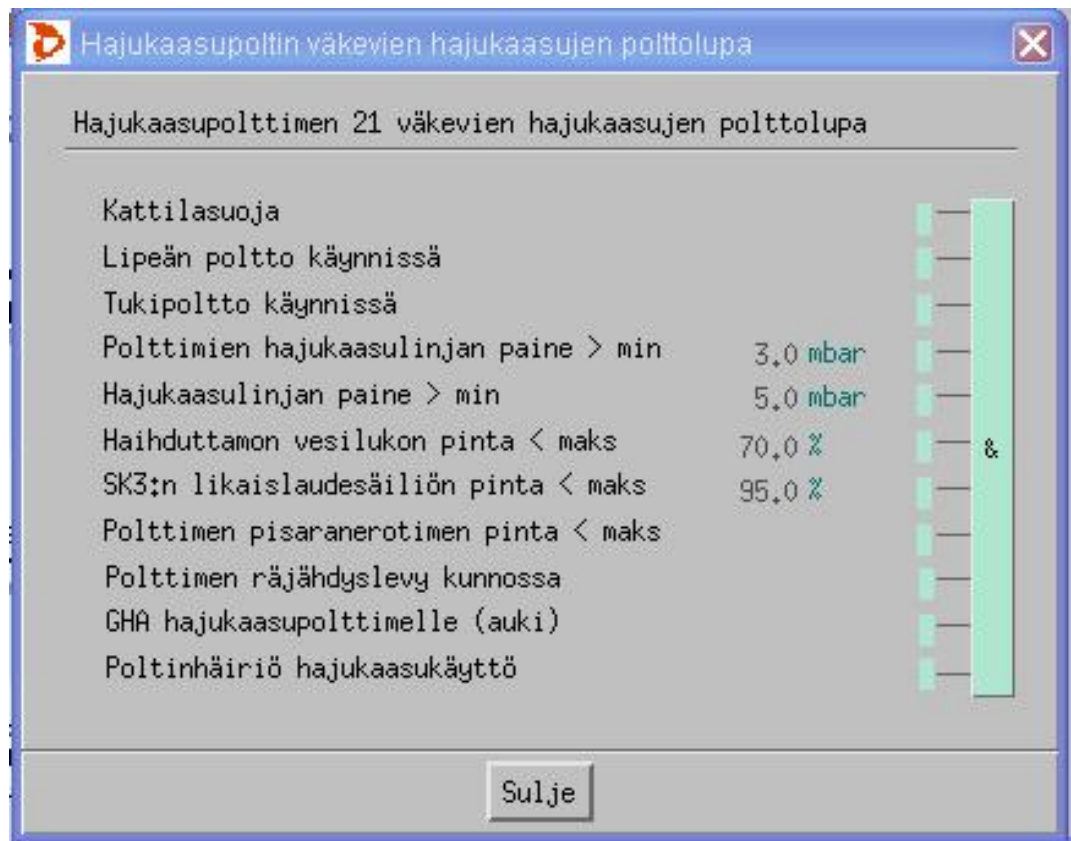
7.2.1 Väkevien kaasujen polttimen käynnistyksen edellytykset

Väkevien kaasujen poltto voidaan aloittaa kun mm. seuraavat ehdot ovat voimassa.

HUOM. Jokaisessa soodakattilassa saattaa olla käyttöönottovuoden, varustelun, prosessikytkentöjen ja toteutuksen takia myös muita kuin tässä esitettyjä ehtoja mukana logiikassa.

Taulukko 7-4. Väkevien kaasujen polttimen käynnistyksen edellytykset

	Ehto	Ehdon tarkoitus
1.	Kattilan tuliteho suurempi kuin 0,7 MW/m ² Tämä raja tulee määrittää tapauskohtaisesti.	Varmistaa tulipesässä riittävän vakaat olosuhteet hajukaasujen hapettumiseksi (lämpötila, viive-aika)
2.	Polttimen tukiliekki on päällä	Varmistaa riittävät palamisolosuhteet polttimella
3.	Liekinvartija näyttää tukiliekin olevan päällä	Varmistaa tukiliekin palamisen
4.	Polttimen polttoilman tulopaine sekä virtaus on yli minimiarvon	Varmistaa riittävä ilmavirtaus polttimelle
5.	On tarkistettu, että poltinaukko ei ole tukossa	Varmistaa turvallinen hajukaasujen poltto



Kuva 7-2. Esimerkki erään tehtaan väkevien hajukaasujen polttoehdoista

7.2.2 Kapasiteettirajoitus

Väkevien hajukaasujen poltto vaatii, että tulipesässä on riittävä lämpötila ja viive-aika, jotta hajukaasut palaisivat hiilidioksidiksi, vesihöyryksi ja rikkidioksidiksi. Riittävä lämpötila saavutetaan, kun kattilan kuormaa nostetaan tarpeeksi. Minimikapasiteetin höyryvirtana määrittää laitetoimittaja. Koska nimelliskuorma on usein jonkin verran epämääräinen käsite, suositellaan, että tämä kapasiteetti vastaisi vähintään tulitehoa $0,7 \text{ MW/m}^2$ pohjaa. Esimerkki kapasiteettirajan laskemiseksi on esitetty Liite I.



7.2.3 Väkevien kaasujen polton keskeyttäminen

Väkevien kaasujen poltto keskeytyy, kun esimerkiksi jokin seuraavista ehdoista on voimassa. **HUOM. Jokaisessa soodakattilassa saattaa olla käyttöönottovuoden, varustelun, prosessikytkentöjen ja toteutuksen takia myös muita kuin tässä esitettyjä ehtoja mukana logiikassa.**

Taulukko 7-5. Väkevien kaasujen polton keskeyttäminen

	Ehto	Ehdon tarkoitus
1.	Kattilan tuliteho alle 0,7 MW/m ² Tämä raja tulee määrittää tapauskohtaisesti.	Varmistaa tulipesässä riittävän vakaat olosuhteet hajukaasujen hapettumiseksi (lämpötila, viive-aika)
2.	Pikapysäytys laukeaa	Estää hajukaasujen syöttö kun kattila ei ole käytössä
3.	Hajukaasun lauhteenpoistojärjestelmän pintakytkimet laukeaa	Indikoi vikaa lauhteenpoistojärjestelmässä, joka estää lauhteiden poiston Estää veden pääsy kattilaan
4.	Hajukaasun paine ennen poltinta laskee alle alarajan	Estää liekin eteneminen taaksepäin putkistoon (takatuli)

Väkevien kaasujen poltto **suositellaan keskeytettävän**, jos esimerkiksi jokin seuraavista hälytyksistä aktivoituu.

Taulukko 7-6. Väkevien hajukaasujen polton hälytyksiä

	Hälytys	Hälytyksen tarkoitus
1.	Kattilan CO päästö on huomattavan korkea (yli 1000 ppm yli 1 min)	Poltoissa merkittävä häiriö
2.	Kattilahuoneen rikkipitoisuushälytys (H ₂ S) laukeaa.	Tarkistaa vuotaako hajukaasujärjestelmä
3.	Polttomustalipeän kuiva-aine laskee alle hälytyksen aiheuttavan alarajan	Palamisen varmistaminen
4.	Liekinestimen paine-ero yli ylärajan	Liekinestin tukossa/tukkeutumassa
5.	Hajukaasun virtaus polttimelle laskee alle alarajan (varsinainen virtaus varmistetaan paineen kautta)	Todetaan, että hajukaasuja tulee polttoon

7.2.4 Poltin ja tukiliekin käyttö

Väkevät hajukaasut voidaan polttaa ainoastaan asianmukaisella ja tarkoitukseen soveltuvalla erillispolttimella. Poltin tulee varustaa erillisellä ilmarekisterillä ja erillisellä lanssilla tuki/pilottipolttoaineelle, joka voi olla esimerkiksi öljy, kaasu, metanoli, tärpähti, pikiöljy. Väkevien hajukaasujen polttimen ilmaksi ei suositella laimeita hajukaasuja kaasujen kosteuden ja epäpuhtauksien takia

Väkevien hajukaasujen palaminen vaatii riittävää polttovyöhykkeen lämpötilaa. Yleisesti vaatimuksena pidetään 900 °C. Lämpötilavaatimus täyttyy, jos hajukaasu- ja johdetaan, kattilan toimiessa stabiilisti ja riittävällä kuormalla, lipeäruiskujen alapuolelle. Jos väkeviä hajukaasuja johdetaan lipeäruiskujen yläpuolelle, pitää varmistaa, että ne johdetaan kattilan sellaiseen osaan, jossa tämä lämpötila ylittään. Toinen mahdollisuus on käyttää riittävän kapasiteetin omaavaa tukiliekkiä.

Pienillä kuormilla tukiliekkin tarkoitus on varmistaa hajukaasujen syttyminen ja palaminen eikä liekin irtoamista tai sammumista polttimella tapahdu. Tukiliekkin polttoaineteho tulee olla vähintään 10 % polttimen maksimaalisesta polttoainetehosta. Tukiliekkiä on valvottava liekinvalvojilla.

Kuvassa 7-3 on esimerkki väkevien hajukaasujen polttimesta kuvattuna ulkoa että sisältä, jossa näkyy mm. hajukaasujen poltin, metanolilanssi, liekinvalvojat, liekinestin ja tukipoltin.



Kuva 7-3. Eräs väkevien hajukaasupoltin kuvattuna kattilan sisältä ja ulkoa.

Väkevien hajukaasujen tukipoltin täytyy varustaa paikallisohjauskoteloilla, josta tukipoltto käynnistetään. Hajukaasujen poltto voidaan tämän jälkeen käynnistää valvomosta. Kumpikin edellä mainittu voidaan pysäyttää valvomosta.



Kattilan toimiessa tulitehoalueella suurempi kuin $0,7 \text{ MW/m}^2$, tukiliekkin voi yrittää sytyttää valvomosta max. 2 kertaa. **HUOM: tämä raja tulee määrittää tapauskohtaisesti.** Ensimmäinen sytytys tulee aina tehdä polttimen vierestä.

Tukiliekkin sammussa väkeviä hajukaasuja voidaan johtaa soodakattilaan jonkin aikaa (esim. 3 minuuttia) ennen pikasulkuventtiilien sulkeutumista. Tänä aikana voi vaihtoehtoisen polttopaikan käynnistyssekvenssi käynnistyä.

Tukiliekkiä ei tarvita kun seuraavat ehto on voimassa. Ehto saattaa vaihdella käyttöönottovuoden, varustelun, prosessikytkentöjen ja toteutuksen takia.

Taulukko 7-7. Edellytykset hajukaasujen polttoon ilman tukiliekkiä

	Ehto	Ehdon tarkoitus
1.	Kattilan tuliteho suurempi kuin $1,5 \text{ MW/m}^2$. Tämä raja tulee määrittää tapauskohtaisesti	Varmistaa tulipesässä riittävän vakaat olosuhteet (lämpötila, viive-aika)

7.3 Putkisto

Väkevien hajukaasujen linjojen pituus soodakattilahuoneessa on pyrittävä pitämään mahdollisimman lyhyenä. Putkisto on sijoitettava välttämällä mahdollisia ongelmapaikkoja kuten liuotussäiliö ja sen ympäristö, heikko nurkka, hätäpoistumistiet ja porraskäytävät.

Putkiston rakentamisessa on noudatettava paineastia- ja kemikaalilakia.

Putkiston rakennemateriaaliksi suositellaan haponkestävää terästä EN 1.4436 (SS2343) tai vastaavaa. Hajukaasun eräät yhdisteet, kuten tärpätti ja metanoli, ovat voimakkaita liuottimia, minkä johdosta lasikuitu- ja muoviosien käyttöä ei sallita.

7.3.1 Putkiston höyrytys

Polton pysähtyttyä suositellaan väkevien kaasujen linjojen tuuletusta sulkuventtiileiltä kattilaan puhaltamalla ne puhtaaksi inertillä väliaineella. Inerttejä väliaineita ovat mm. höyry ja typpi. Linjojen puhallusta ilmalla ei suositella, koska puhallusilman ja puhallettavan väkevän hajukaasun rajavyöhykkeelle muodostuu räjähtävä seos. Käytännössä linjat aina höyrytetään.



Höyrytettäessä on olemassa riski, että linjaan lauhtunut vesi pääsee tulipesään ja aiheuttaa vaaratilanteen. Putkistosuunnittelussa on otettava huomioon että putkistoon mahdollisesti lauhtuvat vedet johdetaan lauhteenkeräilyyn.

7.3.2 Putkiston painemittaukset

Väkevien hajukaasujen putkisto pitää varustaa painemittauksin ejektorin jälkeen ja välittömästi ennen väkevien hajukaasujen poltinta. Putkiston paineesta on ylipaine- sekä minimipainehälytys.

Putkiston tukkeentumista voidaan valvoa sekä virtausmäärän että painemittausten perusteella.

7.3.3 Potentiaalitasaus

Väkevien hajukaasujen linjoille tehdään potentiaalintasaus. Esimerkiksi laipoissa, luukuissa ja yhteissä, joissa esim. tiivistemateriaalin takia voi muodostua galvaaninen erotus, on suoritettava potentiaalitasaus. Potentiaalitasaus tehdään määräysten mukaan ja varmistetaan mittauspöytäkirjalla.

7.4 Lauhteenpoisto

Väkevien hajukaasujen linjat on varustettava lauhteenpoistoyhteillä. Lauhteet sisältävät runsaasti hajuyhdisteitä. Lauhteet tulee kerätä pumppaussäiliöön ja pumpata säiliön kautta haihduttamolle likaislauhteiden strippaukseen.

7.4.1 Lauhteenpoistolinjojen koko

Lauhteenpoistoyhteitten ja niistä alkavien linjojen suositeltava putkihalkaisija on vähintään 50 mm syntyvän lauhde- sekä tukkeutumisvaaran vuoksi. Ulkona olevat yhteet ja lauhdeputket varustetaan sähkösaatolla jäätymisvaaran takia.

7.4.2 Putkien kallistukset ja lauhteenpoistoyhteiden sijoitus

Putkien on kallistuttava lauhteenpoistoihin päin. Suositeltava putkien kallistus, muualla kuin soodakattilalaitoksella, lauhteen kulkiessa kaasun virtaussuunnassa on 1:100 ja lauhteen kulkiessa kaasun virtaussuuntaa vastaan 1:25. Putket tulee mitoittaa niin suureksi, ettei lauhde ala tulvia putkistossa.



Veden tulipesään joutumisvaaran vuoksi soodakattilalaitoksessa on pyrittävä putkiston kallistukseen kaasun virtaussuunnassa 1:100 ja kaasun virtaussuuntaa vastaan 1:1 tai jyrkempi. Jollei suositeltuihin kallistuksiin päästä jollain osalla putkistoa, on lauhteen poisto tällaisesta putkiston osasta suunniteltava erityisen huolellisesti.

Lauhteidenpoistoa suunniteltaessa tulisi kiinnittää huomiota mm. yhteiden kokoon, määrään ja sijaintiin. Viimeinen poisto tulisi sijoittaa mahdollisimman lähelle soodakattilaa niin, että putkiston pituus tästä poistosta pesään on mahdollisimman lyhyt. Erityistä huomiota tulee kiinnittää väkevien hajukaasupolttimen paineenpito-höyrylinjojen lauhteenpoistoon.

7.4.3 Vesilukot

Jotta lauhteenpoistoyhteiden kautta estettäisiin hajukaasujen vuoto, on lauhteidenpoistolinjat varustettava vesilukoilla ja pumppaussäiliöllä tai yhteisellä vesilukosäiliöllä.

Jotta väkevien hajukaasujen putkistossa ejektorin kehittämä paine ei riittäisi tyhjentämään vesilukkoa, on vesilukon mitoituksessa otettava huomioon ejektorin mitoitussarvot (yli- ja alipaine) sekä prosessin tuomat vaateet (esimerkiksi systeemin pulutus).

Vesilukkosäiliö on mitoitettava riittävän suureksi jotta ejektorin imu ei ota pisaroita mukaansa. Vesilukkojen pinta tulee varmistaa. Yhtenä keinona on johtaa vesilukoon jatkuva vesivirtaus, joka varmistetaan virtausmittauksella.

7.5 Venttiilit

Väkevien hajukaasujen polton venttiilit on valittava huolellisesti. Erityistä huomiota on kiinnitettävä venttiilien tiiviyyteen.

Väkevien hajukaasujen tulolinjassa polttimelle pitää olla kaksi pikasulkuventtiiliä ja välissä tuuletusputkilinja venttiileineen. Venttiilivalinnassa on huomioitava palavalle kaasulle esitetyt vaatimukset mm. palonkesto.



Venttiilien rakennemateriaaliksi suositellaan haponkestävää terästä EN 1.4436 (SS2343) tai vastaava materiaalia.

7.5.1 Sulkuventtiilit

Väkevien hajukaasujen linjat on varustettava tiiviillä sulkuventtiileillä. Sulkuventtiilit on varustettava rajatiedolla.

Kattilahuoneeseen menevät väkevien hajukaasujen linjat on kyettävä sulkemaan myös kattilahuoneen ulkopuolelta ns. palosulkuventtiileillä. Vaatimus ulkopuolelta sulkemisesta aiheutuu siitä, että vaaratilanteessa ei voida edellyttää hajukaasulinjojen sulkemista kattilahuoneesta. Lisäksi halutaan estää hajukaasujen virtaus kattilahuoneeseen tilanteessa jossa esim. kattilahuoneessa oleva venttiili vuotaa.

Sulkuventtiilien on sulkeuduttava ilman ulkopuolista käyttöenergiaa. Samalla on sulkuventtiilien välissä olevan tuuletuslinjan venttiilin avauduttava.

7.6 Väkevien kaasujen siirto

Väkevien kaasujen siirtoon ei saa käyttää puhallinta. Väkevien kaasujen siirtoon suositellaan ejektoria tai nesterengaskompressorina. Höyryejektorin höyryn lämpötila saa olla maksimissaan 200 °C, (vastaa höyryn painetta noin 12 bar(yp)) kaasukomponenttien itsesyttymislämpötilan takia

Väkevien kaasujen ejektori/nesterengaskompressorin voidaan tarvittaessa sijoittaa soodakattilalaitokseen.

7.7 Paineenpitohöyry

Paineenpitohöyryä käytetään matalapainehöyryä. On varmistettava että höyrylinjojen vesitykset toimivat kaikissa tilanteissa, tällä estetään veden pääsy kattilaan.

7.8 Jäähdytys/lämmitys

Väkevien hajukaasuja ei yleensä polton yhteydessä lämmitetä eikä jäähdytetä.



7.9 Polttimen sähköistys ja automatiikka

Väkevien hajukaasujen polttimen sähköistyksen ja automatiikan täytyy täyttää kaasupolton sähköistyksen ja automatiikan vaatimukset. Jos tukipolttoaineena käytetään öljyä, on nämä määräykset tältä osin täytettävä.

7.10 Liekinestin

Väkeville hajukaasuille on käytettävä liekinestintä. Liekinestimen tarkoitus on sammuttaa putkistoa pitkin pesästä kohti hajukaasujen tuloa etenevä palorintama. Liekinestimen sijoituspaikan on oltava mahdollisimman lähellä väkevien hajukaasujen poltinta.

7.10.1 Liekinestimen pesu

Jos liekinestimelle on järjestetty pesumahdollisuus, ei pesulinjoja saa kytkeä pysyvästi.

7.10.2 Liekinestimen painemittaus

Liekinestimen paine-ero on mitattava ja siitä on oltava hälytys.

7.11 Vaihtoehtoinen paikka

Väkevien hajukaasujen polton edellytys soodakattilassa on, että järjestelmässä on olemassa vaihtoehtoinen paikka, minne kaasut voidaan automaattisesti ohjata tilanteessa jossa hajukaasujen poltto soodakattilassa keskeytyy. Kääntö vaihtoehtoiseen polttopaikkaan pyritään toteuttamaan niin että väkeviä hajukaasuja ei pääse ympäristöön.

7.11.1 Venttiilit

Soodakattilalaitoksessa sijaitsevien väkevien hajukaasujen venttiilien, joilla haju-kaasut ohjataan vaihtoehtoiseen paikkaan, tulee avautua automaattisesti ulkopuolisen käyttöenergian loppuessa.

7.11.2 Höyrytys

Väkevien hajukaasujen varapolton putkilinja on kyettävä höyryttämään.



7.11.3 Soihdun sijoitus

Jos väkevien hajukaasujen vaihtoehtoisena polttopaikkana käytetään soihtua, on sen suositeltava sijoituspaikka soodakattilalaitoksen katto.

7.12 Alipainesuoja

Väkeville hajukaasuille ei saa käyttää ilmaa korvauskaasuna ottavaa alipainesuojaa. Suositellaan että putkisto ja laitteet mitoitetaan kestäämään niin että alipainesuojia ei tarvita.

7.13 Ylipainesuoja

Väkeville hajukaasuille ei kattilarakennuksessa saa käyttää suoraan kattilahuoneeseen aukeavaa ylipainesuojaa. Ylipainesuojan laukeamisen aiheuttama väkevien hajukaasujen virtaus on johdettava paikkaan, josta siitä ei aiheudu vaaraa ja joka on mahdollisimman haitaton. Ulkoilmaan menevissä ylipainesuojien putkissa on huomioitava vesitys jäätyminen estämiseksi. Ylipainesuojan laukeamisesta on tullava hälytys.

Tyypillisin ylipainesuoja on räjähdyslevy, josta tulee hälytys.

7.13.1 Räjähdyslevyt / murtokalvot

Jos putkiin voi syntyä niitä käytettäessä kahden sulkuventtiilin väliin putkien rakennepaineen ylittävä paine, on tämä putkiosa varustettava räjähdyslevyyn. Tällainen paine on esimerkiksi korkeapaineisen höyrypuhalluksen aiheuttama paine.

Suositeltava räjähdyslevyn materiaali on haponkestävä teräs tai grafiitti.

Räjähdyslevyt on varustettava indikaattorilla, josta seuraa hälytys räjähdyslevyn toimiessa. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää lämpötilamittausta toimintaindikaattorina.

Räjähdyslevyt on sijoitettava siten, että niiden toimiessa ei normaaleilla työskentelytasoilla oleskeleville henkilöille aiheudu vaaraa

7.14 Pitoisuusmittaus

Väkeville hajukaasuille ei tarvitse käyttää jatkuvatoimista pitoisuusmittausta.



Soodakattilayhdistys suosittelee, että väkevien hajukaasujen pitoisuudet lähtöpis-
teessä mitataan, jos tässä syntykohteessa tehdään laitemuutoksia.

Lisäksi Soodakattilayhdistys suosittelee, että väkevien hajukaasujen rikki- sekä
mahdollisesti happipitoisuus polttoon mitataan ainakin kerran vuodessa.



8 METANOLIN / TÄRPÄTIN POLTTO SOODAKATTILALLA

Metanoli (CH_3OH) erotetaan likaislauhteesta strippauskolonnissa. Stripperikaasu, joka sisältää 30-35 % metanolihöyryä, johdetaan metanolikolonnein. Metanoli nesteytetään ja pumpataan säiliön kautta polttoon. Metanolin liekki nopeus on noin 0.5 m/s ja lämpöarvo ~ 20 MJ/kg. Metanolia poltetaan sellutehtailla myös meesauunissa, erillisessä hajukaasukattilassa, voimakattilassa ja soihdussa. Metanolin pääseminen ulkoilmaan aiheuttaa merkittävän hajuhaitan.

Jollei varapolttopaikka ole käytettävissä, on metanolia kyettävä varastoimaan esimerkiksi 24 h tuotantoa vastaava määrä. Metanolisäiliön sijoituksessa on huomioitava kemikaalilainsäädännön ja palavien nesteiden varastoinnin määräykset. Sitä ei saa sijoittaa kattilahuoneeseen.

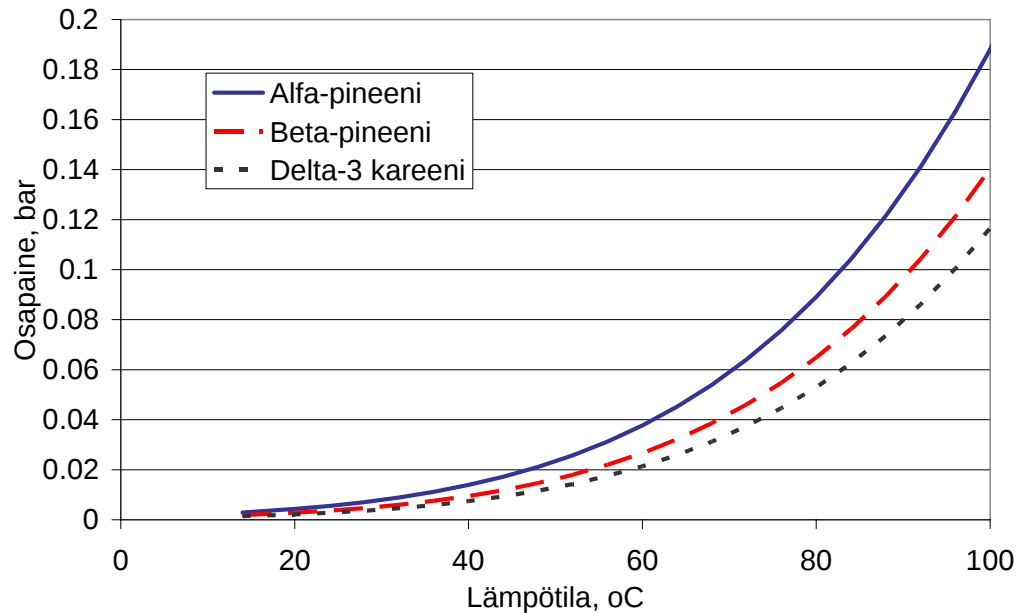
Hajukaasuista on syytä poistaa mahdollisimman tarkkaan tärpätti ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}$), koska se on räjähdysherkkä erittäin laajalla pitoisuusalueella. Tärpättiä erotetaan pesurissa lauhduttamalla kylmällä vedellä. Pesuri sijaitsee tärpättilauhduksen jälkeen hajukaasulinjassa. Hajukaasujen lisäksi tärpättiä voidaan erottaa metanolitislauksen pohjalauhteesta tärpättidekanterilla. Tärpätin lämpöarvo on ~ 40 MJ/kg.

Tärpätin tyypillinen koostumus on esitetty taulukossa 8-1.

Taulukko 8-1. Tärpätin tyypillinen koostumus

Yhdiste	Pitoisuus, %
Alfa-pineeni	80 - 90
Beta-pineeni	5 - 10
Delta-3 kareeni	5 - 10
Muita $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$ yhdisteitä	< 1
Metyylimerkaptani	0 - 5
Dimetyylisulfidi	0 - 12
Dimetyyliidisulfidi	0 - 1

Eräiden tärpätin komponenttien höyryn osapaineita on esitetty kuvassa 8-1.



Kuva 8-1. Tärpätin komponenttien höyryn osapaineita, Drew et al., 1971

8.1 Metanolin/Tärpätin polton logiikka

Tämä teksti pyrkii esittämään ne prosessivaateet, joita vaaditaan metanolin ja tai tärpätin polttimen polttologiikalta normaalin kaasu/öljypolttimen lisäksi. On pyritty esittämään joukko välttämättömiä ehtoja, joita turvallisen automaation pitää täyttää. Jokaisessa soodakattilassa on varustelun, prosessikytkentöjen ja toteutuksen takia myös muita kuin tässä esitettyjä suureita mukana logiikassa.

Metanolia voidaan käyttää väkevien hajukaasujen polttimessa tukipolttoaineena sekä starttipolttimen polttoaineena. Metanolia käytettäessä starttipolttimen polttoaineena tulee huomioida tulipesän riittävä lämpötila. Metanolin poltto voidaan aloittaa aikaisemmin kuin hajukaasujen poltto. Tällöin metanolin polton lukitusehdot on määritettävä tapauskohtaisesti.

Metanolin ja tärpätin poltto soodakattilassa tulee voida valvoa ja sen aloittaminen ja lopettaminen tulee tehdä samasta valvomosta kuin muukin soodakattilan toiminnan valvonta tapahtuu.



8.1.1 Metanoli- ja tärpätipolttimen käynnistyksen edellytykset

Metanolin ja tärpätin poltto voidaan aloittaa soodakattilassa kun seuraavat ehdot ovat voimassa.

Taulukko 8-2. Metanoli- ja tärpätipolttimen käynnistyksen edellytykset

	Ehto	Ehdon tarkoitus
1.	Tulitieto kattilassa	Ei tule hajuhaittoja
2.	Metanoli/tärpätilanssi on paikallaan ja kytkettynä	Varmistaa metanolin/tärpätin lanssin oikea sijoitus
3.	Metanolin/tärpätin paine on yli minimipaineen (viive)	Varmistaa riittävä metanolin/tärpätin saanti polttimelle
4.	Polttimen ilman paine on yli paineen alarajan	Varmistaa riittävä polttoilman saanti polttimelle sekä riittävä hajotus
5.	Hajotusilman paine riittävän korkea	Varmistaa metanolin riittävä hajotus sekä estetään metanolin pääsy paineilmaverkkoon
6..	Polttimen ilmapelti on sytytysasennossa	Varmistaa riittävä polttoilman määrä sytytystä varten
7.	Liekinvartija näyttää liekkiä (syttymisviive)	Varmistaa liekin palaminen
8.	On tarkistettu, että poltinaukko ei ole tukossa.	Varmistaa turvallinen metanolin/tärpätin poltto
9.	Metanolin/tärpätin tiheys alle ylärajan	Varmistetaan ettei polttoaineen lämpöarvo laske liian alas

8.1.2 Metanolin ja tärpätin polton keskeyttävät tapahtumat

Metanolin ja tärpätin poltto keskeytyy, kun jokin seuraavista ehdoista on voimassa.

Taulukko 8-3. Metanolin ja tärpätin polton keskeyttävät tapahtumat

	Ehto	Ehdon tarkoitus
1.	Tulitieto menetetään	Ei tule hajuhaittoja
2.	Metanoli/tärpätilanssi pois paikaltaan	Varmistaa metanolin/tärpätin lanssin oikea sijoitus
3.	Metanolin/tärpätin paine on alle minimipaineen (viive)	Varmistaa riittävä metanolin/tärpätin saanti polttimelle
4.	Polttimen ilman paine laskee alle paineen alarajan	Varmistaa riittävä polttoilman saanti polttimelle sekä riittävä hajotus
5.	Hajotusilman paine liian matala	Varmistaa metanolin riittävä hajotus sekä estetään metanolin pääsy paineilmaverkkoon
6	Metanolin/tärpätin tiheys nousee yli ylärajan	Varmistetaan ettei polttoaineen lämpöarvo laske liian alas
7.	Liekinvalvonta ilmoittaa liekin sammuneen	Varmistaa liekin palaminen



8.2 Polttimeen sähköistys ja automatiikka

Metanolin/tärpätin polttimeen sähköistyksen ja automatiikan täytyy täyttää öljy/kaasupolton sähköistyksen ja automatiikan vaatimukset.

Metanolilanssi ja tärpättilanssi puhalletaan höyryllä tai ilmalla. Tällöin pitää olla tuli kattilassa -tieto voimassa (starttipolttimia päällä).

8.3 Venttiilit

Metanolin ja tärpätin polton venttiilit on valittava huolellisesti. Venttiilivalinnassa on huomioitava palavalle nesteelle esitetyt vaatimukset mm. palonkesto.

Venttiilien rakennemateriaaliksi suositellaan haponkestävää terästä EN 1.4336 (SS2343) tai vastaava. Venttiilien tiivistemateriaalin on oltava sellaista, että se ei liukenisi (metanoli ja tärpähti ovat liuottimia). Tiivistemateriaalivalintaan on kiinnitettävä erityistä huomiota.

8.3.1 Pikasulkuventtiilit

Linjat on kyettävä sulkemaan myös kattilahuoneen ulkopuolelta. Vaatimus ulkopuolelta sulkemisesta aiheutuu siitä, että vaaratilanteessa ei voida edellyttää metanoli/tärpättilinjojen sulkemista kattilahuoneesta. Lisäksi halutaan estää metanolin/tärpätin virtaus kattilahuoneeseen tilanteessa, jossa esim. kattilahuoneessa oleva venttiili vuotaa.

Metanolin/tärpätin polton pikasulkuventtiilit sulkeutuvat ilman ulkopuolista käyttöenergiaa.



9 TOIMINTA ERIKOISTILANTEISSA

Tämä luku käsittelee niitä toimenpiteitä, joita on tarkoitus suorittaa niissä tilanteissa kun soodakattilaa ei ajeta vakiokuormalla.

9.1 Toiminta häiriön yhteydessä

Soodakattilayhdistys suosittelee, että kaikkien soodakattilan häiriötilanteiden yhteydessä sekä väkevien että laimeiden hajukaasujen poltto soodakattilassa keskeytetään ja kaasut ohjataan varapolttopaikkaan.

9.2 Toiminta alasajon yhteydessä

Alasajon yhteydessä hajukaasujen poltto soodakattilassa suositellaan lopetettavaksi lähestyttäessä lukitusrajoja, katso taulukot 5.5, 6.3 ja 7.5. Väkevien hajukaasujen polton loppuessa on putkisto sulkuventtiileiltä kattilaan huuhdeltava höyryllä. Jos väkevien hajukaasujen linjoissa tai niiden lähellä tehdään asennus- tai kunnostustöitä, linjat vaativat höyrytyksen sekä tarvittaessa typetyksen. Hajukaasulinjat vaativat myös LEL ja rikkipitoisten kaasujen mittauksen ennen töiden aloittamista. Väkevien putkiston huuhtelua suositellaan tehtäväksi 24 tuntia ennen pitoisuusmittausta ja huolto/kunnossapitotöiden aloittamista väkevien hajukaasujen putkilla.

Laimeiden hajukaasujen polton loppuessa on kanavisto huuhdeltava ilmalla. Laimeiden kanaviston huuhtelua suositellaan tehtäväksi 8 tuntia ennen pitoisuusmittauksia ja huolto/kunnossapitotöiden aloittamista laimeiden hajukaasujen kanavilla.

9.3 Toiminta ylösajon yhteydessä

Hajukaasujen käsittelyyn liittyvä laitteisto suositellaan pidettäväksi käytössä myös seisokin aikana. Jos hajukaasujen poltto soodakattilalla on kuitenkin ollut keskeytyksissä, on ennen hajukaasujärjestelmän käyttöönottoa soodakattilalla varmistettava että:

- seisokin aikaiset kunnossapito- ja korjaustyöt ovat loppuun suoritettut eikä hajukaasulaitteilla ole enää menossa seisokkitöitä
- kunnossapito- ja korjaustoimenpiteiden kohteena olleet laitteet ja putkistot on asianmukaisesti asennettu, tarkastettu ja puhdistettu asennusjätteistä



- kunnossapito- ja korjaustoimenpiteiden kohteena olleisiin laitteisiin liittyvät venttiilit ovat käynnistyksen edellyttämässä kunnossa ja asennossa
- kunnossapito- ja korjaustoimenpiteiden kohteena olleet laitteet ja putkistot ovat käyttövalmiita ja tiiviitä. Tiiviys pitää kokeilla koepöyritysten ja kierrätysten avulla.

Ennen ylösajoa on kaikki seisokissa käyttämättä olleet laimeiden hajukaasujen linjat tuuletettava ja väkevien hajukaasujen linjat höyrytettävä sekä tarvittaessa type-tettävä. Tuulettamisen tarkoitus on varmistaa, että seisokin aikana kanaviin ja muihin laitteisiin vuotaneet ja sinne lauhtuneet hajukaasut eivät aiheuta haittaa tai vaaratilannetta.

Ennen ylösajoa on kaikki lauhdesäiliöt tarkastettava ylivuotojen ja kuivumisten havaitsemiseksi.

Ennen ylösajoa on kaikki vesilukkojen lisävedet tarkastettava ja laitettava toimi-maan.

9.4 Toiminta seisokin aikana

Seisokin aikana on hajukaasujen vuoto kattilarakennukseen estettävä. Hajukaasu-linjojen erottamisen tarkoitus on estää seisokin aikainen hajukaasujen vuoto ja ker-tyminen kattilarakennuksen sisäisiin kanaviin ja putkiin.

9.4.1 Ohjeita hajukaasujärjestelmän valmistelemiseksi seisokki- tai huoltotöitä varten

Jos hajukaasujärjestelmissä aiotaan tehdä seisokki- tai huoltotöitä on hajukaasujär-jestelmän pysäyttämisen ja tarvittavien laitteiston osien erottamisen jälkeen tehtävä tehostettua tuuletusta kaikille erotetuille laitteistoille heti seisokin alussa. Tuuletuk-sen lisäksi on suoritettava LEL ja rikki pitoisuusmittauksia. Tehostettu tuuletus ja pitoisuusmittaus on toistettava välittömästi ennen seisokki- tai huoltotöiden alkua.

Ennen töiden aloittamista on tehtävä riskienarviointi, jossa erityisesti kartoitetaan kaikki työalueelle tulevat putkilinjat. Kirjallinen työlupakäytäntö on suositeltavaa ennen töiden aloittamista.



9.4.2 Ohjeita seisokin aikaisiin kunnossapidon töihin

Hitsaus on hajukaasusysteemiin kipinän tuottava toimenpide ja synnyttää räjähdysvaaran. Kunnossapitotyöt hajukaasujärjestelmissä ja putkistoissa edellyttävät aina erikoislupaa. Seisokin yhteydessä on seisokkitöihin osallistuville selvitettävä mitkä linjat ovat hajukaasulinjoja ja kuinka niiden korjaus- ja huoltotöissä tulee menetellä.

9.5 Toiminta häiriöiden yhteydessä

Jos kattilasuoja laukeaa, on metanolin, tärpätin, liuottimen ja sekoitussäiliön hönkien sekä väkevien että laimeiden hajukaasujen poltto soodakattilassa lopetettava ja linjat tuuletettava / höyrytettävä.

Jos hätäpysäytys on käynnistetty, metanolin, tärpätin, liuottimen ja sekoitussäiliön hönkien sekä väkevien että laimeiden hajukaasujen poltto soodakattilassa ja tuonti soodakattilarakennukseen on lopetettava. Tällöin ei myöskään esimerkiksi soodakattilalaitoksen katolla olevaa varapoltinta voi käyttää.



10 ERIKOISOHJEET HAJUKAASULINJOJEN SUUNNITTELUSSA

Nämä ohjeet on laadittu hajukaasulinjoja suunnittelevien avuksi. Hajukaasulinjoissa on noudatettava suunnittelutavan ja materiaalien valinnassa tavallisten putkien/kanavien suunnitteluohjeiden lisäksi erityisohjeita, koska hajukaasulinjat sisältävät räjähdysherkkiä, liuottavia ja korrodoivia yhdisteitä.

Hajukaasulinjojen tulee kestää mekaaniset, kemialliset ja termiset vaikutukset, jotka aiheutuvat sisällöstä ja ympäristöstä (lumi, jää, kuumat ja kylmät pinnat, tärinä). Putkiston liitostavan on oltava valitulle materiaalille sopivaa.

10.1 Luokittelu

Hajukaasulinjat kuuluvat kemikaalilain alaisiin putkilinjoihin. Nämä linjat luokitellaan niiden myrkyllisyyden mukaan eri luokkiin.

Hajukaasujen jako laimeisiin ja väkeviin hajukaasuihin ei riitä karakterisoimaan sisällön vaarallisuutta. Kaasuseokset pitää luokitella [Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen kemikaalien luokitusperusteista ja merkintöjen tekemisestä 26.9.2001/807](#) mukaisesti. Täten kukin hajukaasulinjasto pitää luokitella sen nimomaisen kaasun sisällön mukaan.

Jos ei muuta esitetä, niin väkevien hajukaasujen, metanolin ja tärpätin linjoja voidaan esisuunnitella luokituksen myrkyllinen ja syttyvä mukaan.

Jos ei muuta esitetä, niin laimeiden hajukaasujen linjaa voidaan esisuunnitella luokituksen haitallinen mukaan.

Luokitus pitää kuitenkin tarkistaa.

10.2 Kyltit

Hajukaasujen polttolaitteet ja putkistot/kanavat on varustettava asianmukaisin merkinnöin. Merkinnöissä on luettava ainakin tekstit ”Väkeviä hajukaasuja”, ”Tärpättiä”, ”Metanolia” ja ”Laimeita hajukaasuja” sekä tarvittaessa ”Palavaa”, ”Myrkyllistä” ja ”Ei saa hitsata tai leikata ilman valvontaa” sekä ”Laitteita ei saa avata ilman kirjallista työlupaa”. Lisäksi putket/kanavat on varustettava virtaussuuntaa kuvaavilla merkeillä.



Hajukaasujen käsittelyalueella on tupakointi ja muu avotulenteko kielletty. Alueelle on asennettava asianmukaiset kyltit.

10.3 Lauhteenpoisto

Lauhteenpoistoa suunniteltaessa tulisi kiinnittää erityistä huomiota mm. yhteiden kokoon, määrään ja sijaintiin. Katso kohdat 5.7, 6.7 ja 7.4.

10.4 Kanava/putkistomateriaali

Laimeiden hajukaasujen kanaviston rakennemateriaaliksi suositellaan ruostumatonta terästä EN 1.4301 (SS2333) tai vastaavaa

Väkevilla hajukaasuilla pitää käyttää putkia $PN \geq 10$. Putkiston rakennemateriaaliksi suositellaan haponkestävää terästä EN 1.4436 (SS2343) tai vastaavaa.

Metanolin/tärpätin polton putkiston rakennemateriaaliksi suositellaan EN 1.4436 (SS2343) tai vastaavaa.

Hajukaasun eräät yhdisteet, kuten tärpähti ja metanoli, ovat voimakkaita liuottimia, minkä johdosta lasikuitu- ja muoviosien käyttöä ei sallita.

10.5 Kanavien eristykset

Hajukaasut sisältävät runsaasti vettä ja muita lauhtuvia aineita. Lauhteiden muodostuminen ja käsittely on pyrittävä minimoimaan. Hajukaasulinjat on eristettävä missä niiden pintalämpötila on korkea.

Vesitykset on eristettävä ja ulkona olevat vesitykset on tarvittaessa lämpösaattettava.

10.6 Putkien/kanavien kallistukset

Hajukaasut sisältävät lähes poikkeuksetta merkittäviä määriä vesihöyryä. Vaikka kanavat ovat huolellisesti eristettyjä ja/tai sähkösaattettuja, on lauhtumiseen aina varauduttava. Putkien/kanavien kallistusohjeet ja lauhteenpoistoyhteiden sijoituskohdat on selitetty tarkemmin kappaleissa: 5.7 laimeiden hajukaasujen lauhteenpoisto, 6.7 liuottajan höngän lauhteenpoisto ja 7.4. väkevien hajukaasujen lauhteenpoisto.



10.7 Venttiilit/pellit

Hajukaasujen poltossa on käytettävä käsiteltävän hajukaasun ominaisuuksien mukaan valittuja venttiilejä/peltejä.

Laimeiden hajukaasujen venttiilien/peltien rakennemateriaaliksi suositellaan EN 1.4301 (SS2333) tai vastaava.

Väkevien hajukaasujen venttiilien rakennemateriaaliksi suositellaan EN 1.4436 (SS2343) tai vastaavaa valumateriaalia.

Metanolin/tärpätin polton venttiilien rakennemateriaaliksi suositellaan EN 1.4436 (SS2343) tai vastaavaa. Venttiilien tiivistemateriaalin on oltava sellaista, että se ei liukenisi (metanoli ja tärpähti ovat liuottimia).

10.8 Laipat, yhteet

Laippojen ja yhteitten tiiviyteen kaikissa olosuhteissa on kiinnitettävä erityistä huomiota. Tiivisteitä valittaessa on oikeantyyppisen tiivistemateriaalin käyttöön kiinnitettävä erityistä huomiota. Hajukaasut sisältävät liuottavia ja korrodoivia yhdisteitä.

Liitosten on pysyttävä tiiviinä myös käytössä (hapettuminen, reagointi hajukaasujen sisältämien rikkiyhdisteiden kanssa, jäätyminen, vääntymät jne.)

10.9 Puhaltimet

Laimeiden hajukaasujen siirtoon suositellaan käytettäväksi puhaltimia.

10.10 Ejektorit / nesterengaskompressori

Väkevien hajukaasujen siirtoon ei saa käyttää puhallinta. Niiden siirtoon käytetään höyryejektoria tai nesterengaskompressoria. Höyryejektorin höyryn lämpötila saa olla maksimissaan 200 °C. (vastaa höyryn painetta noin 12 bar(yp)) kaasukomponenttien itsesyttymislämpötilan takia. Häiriön tai käynnistystilanteen yhteydessä väkevissä hajukaasuissa saattaa olla happea niin paljon, että kaasuseos on syttyvää.



10.11 Kanavamitoitus

Hajukaasuja poltettaessa kanavanopeudet on pidettävä kaikissa käyttöolosuhteissa yli liekin etenemisnopeuden.

Väkevien hajukaasujen linjojen käytönaikainen paine on $-10 \dots +10$ kPa. Laimeiden hajukaasujen linjojen käytönaikainen paine on $-5 \dots +10$ kPa.

Laimeiden hajukaasujen linjojen on kestettävä alipainetta 10 kPa. Väkevien hajukaasujen linjojen on kestettävä täyttä alipainetta (100 kPa).

Väkevät hajukaasut luokitellaan tyypillisesti erittäin myrkylliseksi, myrkylliseksi tai syttyväksi. Tällaisen aineen putkistot mitoitetaan käyttöpaineen mukaan; kuitenkin mitoituspaineen on oltava vähintään 4 bar (yp). Putkiston varusteen mitoituspaineeksi riittää kuitenkin 1,3 kertaa suunnittelupaine. Suunnittelupainetta valittaessa on huomioitava höyrytyshöyryn paine.

Laimeat hajukaasut luokitellaan tyypillisesti haitalliseksi. Haitalliseksi luokiteltuja hajukaasuja sisältävän putkiston suunnittelupaineen tulee olla vähintään 1,3 kertaa käyttöpainetta, mutta kuitenkin vähintään +10 kPa.

10.12 Liekinestimen sijoitus

Liekinestin on sijoitettava mahdollisimman lähelle itse polttolaitetta. Jos liekinestimen pohja on linjan pohjaa alempana, on erottimelle järjestettävä lauhteenpoisto.

10.13 Räjähdyslevyjen /murtokalvojen sijoitus

Räjähdyslevyt/murtokalvot on sijoitettava siten, että niiden toimiessa ei normaaleilla työskentelytasoilla oleskeleville henkilöille aiheudu vaaraa. Näiden kuntoa on valvottava automaatiojärjestelmässä aiheuttamalla hälytys.

Räjähdyslevyt on sijoitettava suoran kanavaosan jatkeeksi ilman mutkia. Varsinainen kanava jatkaa matkaa t-haaralla.

10.14 Ohituksen sijoitus

Ohituskanava on johdettava mahdollisimman korkealle paikalle. Ohitus suositellaan johdettavaksi omana putkena savupiippuun tai soodakattilalaitoksen katolle.



Ohiajopiipun tulisi sijaita mahdollisimman lähellä kattilaa, jotta ohiajopiipun ja soodakattilan välinen linja olisi mahdollisimman lyhyt. Käytännön syystä ohiajopiippu sijaitsee lähellä soodakattilaa, koska ejektori tai puhallin on usein soodakattilarakennuksessa tai sen läheisyydessä, ja piippu on aina painepuolella ejektorin tai puhaltimen jälkeen.

Ohituksen automaattisen sulkuventtiilin on avauduttava apuenergian loppuessa.

10.15 Tilaluokitukset

Tilaluokituksissa noudatetaan kemikaalilainsäädännön ohjeita ja määräyksiä.

Väkeville hajukaasuille ja tärpättipitoisille likaislauhteille joudutaan usein sovelta-
maan räjähdysvaarallisten tilojen tilaluokitusta.

Tilaluokat ja niiden vaikutusalueet määritellään myös mahdollisille vuotokohteille. Tilaluokan vaikutusalueelle tulevat laitteistot rakennetaan luokituksen mukaisin komponentein. Luokka 1 tarkoittaa, että räjähtävää kaasua esiintyy satunnaisesti ja luokka 2 tarkoittaa, että kaasua ei odoteta esiintyvän kyseisellä alueella normaali-
käytön aikana.

Mikäli tila katsotaan riskialttiiksi, voidaan se varustaa automaattisella tehotuuletuk-
sella, mikäli H₂S-pitoisuus nousee liian korkeaksi.

Kattilahuone ja mahdollinen väkevien hajukaasujen ja metanolin ja tärpätin poltti-
men lähialue tulee varustaa hälyttävällä rikkipitoisuutta näyttävällä mittarilla, jos
hajukaasua sisältävä linja kulkee työskentelytilan kautta.

10.16 Valmistusluvut

Putkistolle, jonka käyttöpaine on yli 0.5 bar (yp) ja sisältönä syttyvä kaasu (tavalli-
sesti väkevät hajukaasut), edellytetään putkiston valmistajalta paineastialainsäädännön tarkoittamaa valmistuslupaa ja valmistuksen valvojaa.

Jos laimeat hajukaasut sisältönsä puolesta luokitellaan haitallisiksi aineiksi, ei put-
kiston valmistajalta edellytetä paineastialainsäädännön tarkoittamaa valmistuslupaa
ja valmistuksen valvojaa.



Metanoli ja tärpättilinjojen asennustöissä pitää noudattaa asianomaisia määräyksiä (kaasuasennukset, öljyasennukset ja paineastianvalmistus). Käytännössä on syytä menetellä kuten starttipolttimien öljy- ja kaasuputkistojen asennuksessa menetel-
lään.

On suositeltavaa, että kaikissa valmistukseen ja asennukseen liittyvissä töissä käytetään vain pätevyyden osoittamaan pystyviä yrityksiä.

Polttimen ja tukipolttoaineputkiston asennuksen saa tehdä vain kyseiset asennuslu-
vat omistava liike.



11 SUUNNITTELUUN JA KÄYTTÖÖN VAIKUTTAVAT MUUT OHJEET JA MÄÄRÄYKSET

11.1 Suomen lainsäädäntö

Tärkeimmät hajukaasujen käsittelyä koskevat kotimaiset lait ja asetukset ovat:

- Kemikaalilaki ([744/1989](#))
- Asetus vaarallisten kemikaalien teollisesta käsittelystä ([59/1999](#))
- Sosiaali- ja terveysministeriön asetus CLP-asetuksen liitteessä VI tarkoitetuista kemikaaleista ([5/2010](#))

11.1.1 Poikkeamatarkastelu (HAZOP)

Kemikaalilaki määrittelee vaaralliset kaasut ja vaatii hajukaasun poltolle poikkeamatarkastelun (HAZOP-tarkastelu).

11.1.2 Putkistojen luokittelu

Kemikaalilaki ja asetus vaarallisten kemikaalien teollisesta käsittelystä antavat teknisiä laitevaatimuksia ja määräävät käytännössä esimerkiksi, miten putket luokitellaan, miten määräaikaistarkastuksia suoritetaan ja että väkevät hajukaasut on siirrettävä ejektorilla eikä esimerkiksi puhaltimella.

Tällä hetkellä on voimassa kaksi rinnakkaista lainsäädäntöä, jotka koskevat kemikaalien luokitusta, merkintöjä ja pakkaamista. Voimassa ovat edelleen ns. ainedirektiivin ([67/548/ETY](#)) ja seosdirektiivin ([1999/45/ETY](#)) mukaiset luokitus- ja merkintäsäädökset, jotka on toimeenpantu kemikaalilaissa ([744/1989](#)), kemikaaliasetuksessa ([675/1993](#)) sekä luokitusperusteasetuksessa ([STMa 807/2001](#)) (ns. väistynyt järjestelmä).

EU:n uusi aineiden ja seosten luokitusta, merkintöjä ja pakkaamista koskeva ns. [CLP-asetus \(EY\) N:o 1272/2008](#) astui voimaan 20.1.2009. CLP-asetus on sellaisenaan voimassa kaikissa EU:n jäsenmaissa. Väistynyt lainsäädäntö on voimassa tiettyjen siirtymäaikojen puitteissa.

Sosiaali- ja terveysministeriön päätös kemikaalien luokitusperusteista ja merkintöjen tekemisestä [26.9.2001/807](#) antaa kaavan syttyvyyden määrittämiselle, pohjana on käytetty standardia [Determination of fire potential and oxidizing ability for the](#)



[selection of cylinder valve outlets ISO 10156](#) ja sen taulukoita 1 ja 2. Laimeat hajukaasut luokitellaan haitallisiksi kaasuiksi, muttei räjähtäviksi kaasuiksi.

Väkevien hajukaasujen erillispoltto rakennetaan käytännössä yleensä maakaasun vaatimusten mukaan. Maakaasulle on olemassa ohjeistus joka asettaa mm. venttiileille ja huuhtelulle tarkat vaatimukset.

11.1.3 Räjähdysvaarallisten tilojen luokittelu (ATEX)

Räjähdysvaarallisia tiloja koskee [EU ATEX-direktiivi 94/9/EY](#). Lisäksi räjähdysvaarallisten tilojen luokittelusta annetaan ohjeet [standardissa EN 60079-10: 1956](#), joka on käännetty suomeksi ja julkaistu SFS-käsikirjana numero 59 (4. painos 1998). Väkeville hajukaasuille sovelletaan räjähdysvaarallisten tilojen tilaluokitusta. Tilaluokat ja niiden vaikutusalueet määritellään mahdollisille vuotokohteille. Tilaluokan vaikutusalueelle tulevat laitteistot rakennetaan luokituksen mukaisin komponentein. Luokka 1 tarkoittaa, että räjähtävää kaasua esiintyy satunnaisesti ja luokka 2 tarkoittaa että kaasua ei odoteta esiintyvän kyseisellä alueella normaali-käytön aikana.

11.2 Eurooppalaiset standardit

Eurooppalainen paineastioita käsittelevä standardi ([EN 12952-8, Annex A.3.3.](#)) asettaa hajukaasujen poltolle soodakattilassa tiettyjä rajoituksia. Väkeviä hajukaasuja saa polttaa soodakattilassa, mikäli höyrynkehitys on vähintään 50 % kattilan nimelliskuormasta mustalipeällä.

Lisäksi standardi vaatii, että varotoimenpiteisiin ryhdytään, jottei vesiliuoksia joutuisi tulipesään kaasujen tai polttoaineen mukana sekä ettei väkeviä hajukaasuja joutuisi kattilarakennuksen ilmaan. Laimeita hajukaasuja ei tämä edellä mainittu koske.

Kaikkiin hajukaasulinjoihin on asennettava sulkuventtiili.



11.3 Olemassa olevat ohjeet

Ruotsin Sodahuskommittén ja amerikkalainen BLRBAC ovat tehneet ohjeita hajukaasujen käsittelystä ja poltosta. BLRBAC:n ohjeet ovat hyvin seikkaperäisiä ja antavat tarkkoja teknisiä kuvauksia ratkaisuista.

11.3.1 Sodahuskommittén

Ruotsin sisarorganisaatiomme Sodahuskommittén teki joulukuussa 2008 periaatepäätöksen, että suosituksia julkaistaan vastedes vain ruotsiksi ja ne on ainoastaan tarkoitettu Sodahuskommittén jäsenten käyttöön. Komitean teettämän selvityksen mukaan komitean vastuu suosituksista voidaan ulottaa pitkällekin.

11.3.2 BLRBAC

BLRBAC on tehnyt ohjeen vaaratilanteiden minimoimiseksi nimeltä ”[Recommended good practice for the thermal oxidation of waste streams in a black liquor recovery boiler](#)”, päivitetty helmikuu 2012 (Vapaasti suomennettu: Suositeltava hyvä tapa jätevirtojen polttamiseksi soodakattilassa)

Ohjeessa luetellaan palavat hajukaasut ja määritellään niiden räjähdysrajat. Ohje kertoo, mistä hajukaasuja kerätään, miten niitä voidaan hävittää ja antaa ohjeet mm. metanolin ja tärpätin polttoon muun muassa hakesiilon hönkien käsittelystä on oma kappale. Ohje antaa ehdot esim. millä mustalipeän kuiva-ainepitoisuudella hajukaasuja voidaan turvallisesti polttaa.

Ongelmatilanteissa, ja erityisesti kun käytännössä kun suoritetaan pikapysäytys eli Emergency Shutdown Procedure (ESP), on hajukaasut välittömästi johdettava soodakattilasta muualle muun polttoaineen tavoin.

Ohje varoittaa myös hajukaasujen myrkyllisyydestä ja niiden aiheuttamasta korroosiovaarasta, vaikkei hajukaasujen poltosta olekaan todistetusti havaittu korroosiota paineastialle.

Ohje on hyvin kattava, se sisältää myös logiikkaehtoja ja esimerkkejä poltto- ja keräilyjärjestelmien PI- ja lukituskaavioista.



12 POIKKEAMAT MUIDEN OHJEIDEN KÄYTÄNTÖÖN

Suomen Soodakattilayhdistys on pyrkinyt pääosin noudattamaan eräissä muissa maissa laadittuja suosituksia ja ohjeita hajukaasujen poltosta soodakattilalla. Aina-kin seuraavat asiat poikkeavat muissa suosituksissa esitetyistä.

12.1 Poikkeamat BLRBACn ohjeisiin

Soodakattilayhdistyksen ohjeet poikkeavat BLRBACn (<http://www.blrbac.org/>) ohjeista muun muassa seuraavissa kohdin:

- Suositus laimeiden hajukaasujen ja hönkien suhteelliseksi kosteudeksi lauhduttimen jälkeen 50 % joka vastaa lämpötilaa $< 43,3\text{ °C}$ (110 °F). Lämmitys vähintään $22,2\text{ °C}$ (40 °F) yli lauhdutuslämpötilan.
- Laimien hajukaasujen poltto voidaan aloittaa kun kattilan höyrykuorma on yli 30% kattilan MCR:stä.
- Väkevien hajukaasujen poltto voidaan aloittaa kun kattilan höyrykuorma on yli 50% kattilan MCR:stä.
- Metanolin/tärpätin poltto mustalipeään sekoitettuna



13 ESIMERKKEJÄ VAURIOISTA

Seuraavassa on kuvattu esimerkein eräitä Soodakattilayhdistyksen tietoon tulleita vaurioita ja vaaratilanteita. Vauriot on kuvattu, jotta suosituksen lukijalle tulisi konkreettinen kuva mahdollisista vaaratilanteista, jotka liittyvät hajukaasujen käsittelyyn tai polttoon.

Vastaavanlaisia tapahtumia on esiintynyt muillakin tehtailla.

13.1 Esimerkki 1:

Syyt

Sellutehtaan käynnistyksen yhteydessä hakkeen syöttö keittimelle pysähtyi mustalipeäsuodattimien ongelmien takia. Tämän jälkeen hakesiilon pinta nostettiin tasolle 95 % ja hake pasutettiin tuorehöyryllä, jolloin hakesiilon pintalämpötila näytti 90 °C.

Puoli tuntia pysäytyksen jälkeen hakkeen syöttö keittimelle käynnistettiin uudelleen, jolloin myös pasutushöyryä lisättiin hakesiiloon, koska väkevien hajukaasujen systeemi ei kyennyt pitämään riittävää alipainetta keräilylinjassa hajukaasujen polttokattilalle. Valmiiksi pasutettu hakepatja ei pystynyt lauhduttamaan ja absorboimaan pasutushöyryä, jolloin se pääsi hakepatjan läpi nostaen nopeasti hakesiilon yläosan lämpötilaa ja edelleen laimeiden hajukaasujen keräilysystemiin.

Lämpötilalukitus hakesiilon hönkien lauhduttimien jälkeen saavutti lukitusrajan >55 °C, jolloin kaasut ohjautuivat ohitusputkeen. Ennen tätä turvalukitusta kaasuja pääsi n. 40 sekunnin ajan laimeiden hajukaasujen keräilyyn aiheuttaen räjähdys n. 1.5 minuuttia pasutushöyryventtiilin avaamisesta. Räjähdys tapahtui lähellä hajukaasukattilan poltinta keräilyputkistossa.

Jatkotoimenpiteet räjähdys jälkeen

Ennen tehtaan uudelleenkäynnistämistä tehtiin seuraavat toimenpiteet:

- Pasutushöyryventtiilin avautumisnopeutta hidastettiin (5%/min välillä 0-10%), jotta pasutushöyryä pääsee käynnistyksen yhteydessä vain hallittava määrä.

- Hakekuljetin siiloon täytyy olla käynnissä vähintään viisi minuuttia ennen kuin pasutushöyryventtiili hakesiilolle voidaan avata. Näin varmistetaan, että tuotetta haketta on hakesiilossa lauhduttamassa pasutushöyryä.
- Hakesiilon lämpötilan noustessa yli 90 °C avautuu lauhduttimen jäähdytys-vesiventtiili heti 100 % auki.

13.2 Esimerkki 2: UPM-Kymmene, Pietarsaari, 28.12.2008

Tehtaan betonipiipussa tapahtui räjähdys, jossa vaurioitui laimeitten kaasujen teräspiippu koko pituudeltaan, osa meesauunin savukaasupiipusta ja pala väkevien hajukaasujen putkea. Räjähdys piipussa aiheutui usean tekijän yhteisvaikutuksesta. Räjähdystä edelsivät ajotilanteet, jotka lisäsivät ohituspiipun kaasuseoksen pitoisuuden syttymis- ja räjähdyspitoisuuksiin. Samanaikaisesti vallitsevat sääolosuhteet työnsivät meesauunin kuumat savukaasut ulostulevien laimeiden hajukaasujen sekaan aiheuttaen syttymisen.

Syyt:

- Haihduttamon laimeat hajukaasut olivat konsentroituneet normaaliajon ja seisokin aikana räjähdyspitoisuuteen
- Polttoliipeäsäiliön kaasut johdettiin laimeiden hajukaasujen keräilyyn. Polttoliipeäsäiliöstä purkautui voimakkaasti kaasuja 22 tuntia ennen räjähdystä.
- Kuitulinjojen hajukaasupuhallin oli pysäytetty, jolloin laimentavaa vaikutusta kuitulinjojen hajukaasuista ei saatu.
- Meesauunin kuumat (n. 260 °C) savukaasut sekoittuivat vallitsevien sääolosuhteiden johdosta suoraan ulospurkautuneisiin laimeisiin hajukaasuihin, jotka olivat yli alemman räjähdyspisteen. Laimeiden hajukaasujen ohituspiippu ja meesauunin savukaasupiippu olivat samalla tasolla.

Jatkotoimenpiteet räjähdysten jälkeen

- Kuitulinjojen laimeiden hajukaasujen puhallin tulisi pitää käynnissä seisokin aikana ja samalla johtaa laimennusilmaa puhaltimen imupuolelle, jotta varmistetaan, että pitoisuus on tarpeeksi alhainen
- Polttoliipeäsäiliön kaasut tulee johtaa väkevien hajukaasujen keräilyyn tai haihdutinsarjalle, ei laimeiden hajukaasujen keräilyyn



- Polttolipeäsäiliön vahvalipeän lämpötila ja kuiva-aine pudotetaan 117 °C:een ja 67-69 % kuiva-aineeseen seisokkia varten kaasunmuodostumisreaktioiden estämiseksi
- Hajukaasupesurin kierrätyspumppua ei tule pysäyttää seisokin aikana
- Laimeiden hajukaasujen seisokkiaikaiselle ajolle tulee antaa selvä ohjeistus
- Haihduttamon hajukaasupesurin pesukiertonestettä ei tulisi pumpata vuotolipeäsäiliöön, josta kaasut imetään takaisin laimeiden hajukaasujen keräilyyn

Muut suositukset:

- Kartoitetaan metanolin, TRS- yhdisteiden ja tärpätin pitoisuuksia laimeissa hajukaasuissa, lipeissä ja lauhdeissa.
- Lisätään laimeiden hajukaasujen keräilyyn pitoisuusmittaus tai virtausmittaus valvontaa varten.
- Laaditaan simulointiohjelma, jolla voidaan luotettavasti määrittää laimennusilmojen määrä eri ajotilanteissa.
- Haihduttamon suljetun laimeiden hajukaasujen keräilyn puhaltimen kapasiteettia tulisi lisätä ja imupuolet varustaa laimennusilman sisäännotolla.
- Laimeiden hajukaasujen ohituspiipun alaosan suunnittelu pitää miettiä uudelleen.
- Puhaltimen käyttö tulisi lopettaa ja ohjata ne imupuolella olevaan omaan piippuun, jos laimeat hajukaasut konsentroituvat räjähdysalueelle.
- Laimeille hajukaasuille tulisi tehdä poikkeama- tarkastelu (HAZOP) kaasujen väkevöitymiselle normaaliajossa ja seisokitilanteessa.

13.3 Esimerkki 3: Oy Metsä-Botnia Ab, Rauma, 2.1.2007

Massatehtaan ja soodakattilan ylösajon yhteydessä hajukaasukanavassa syttyi tulipalo, joka vaurioitti soodakattilan etuseinää ja kanavaa n. 2 m. Palo sai mahdollisesti alkunsa kattilan takatulesta, jolloin hajukaasukanavan pohjalle kertynyt ”sakka” syttyi palamaan. Hajukaasukanavan pohjalle muodostunut ”sakka” on yleensä peräisin mäntyöljylaitokselta.

Soodakattilayhdistyksen kestoisuustyöryhmä antoi seuraavat aiheita, joihin olisi kiinnitettävä huomiota onnettomuuden jälkeen:

- Pesurien toiminta on saatava kuntoon, jotta taataan hyvä pesutulos. Nesteenjako, pisanerotus ja pesurin jälkeinen lämpötila on tarkastettava jokaisessa pesurissa.
- Laimeiden hajukaasujärjestelmän laimennuksen hallinta tarkastettava
- Ennen esilämmitintä oltava pisanerotus
- Polttosuosituksen mukaisesti hajukaasujen koostumus mitattava säännöllisesti
- Kanavat on tarkastettava ja puhdistettava säännöllisesti
- Poikkeamatarkastelu (HAZOP) tulisi tehdä aina järjestelmämuutosten yhteydessä yhdessä hajukaasujärjestelmän toimittajan kanssa.

Jatkotoimenpiteet räjähdysen jälkeen

- Laimeiden hajukaasujen puhallin uusittiin
- Ilman esilämmitystä tehostettiin lisäämällä tuoreilmalle oma lämmönvaihdin, jolloin laimeiden hajukaasun lämpötilaa saatiin nostettua
- Keräilyjärjestelmän kapasiteettia kasvatettiin
- Polttoon liittyvät lukitukset tarkistettiin
- Liuottajan höngät otettiin mukaan polttoon laimeiden hajukaasujen mukana.

13.4 Esimerkki 4:

Syyt

Brasilialaisella on käynyt kaksi räjähdystä käynnistyksen jälkeen. Ensimmäinen räjähdys liittyy hakesiiloon ja toinen paineelliseen polttolipeäsäiliöön.

Pasutushöyryä ajettiin hakesiiloon tehtaan seisokin aikana, jolloin väkevä hajukaasu pääsi laimeiden hajukaasujen keräilyyn hakepatjan läpi tai metanoli oli väkevöitynyt patjaan ja vapautui. Pasutushöyrylle ei ollut lauhdutusta, vaan se oli johdettava hakesiiloon. Räjähdys tapahtui soodakattilalla laimean hajukaasun kanavistossa. Soodakattilan sekundääri- ilmamäärää oli manuaalisesti pienennetty.

Toinen räjähdys liittyi paineelliseen polttolipeäsäiliöön, joka räjähti, kun sen kiertospumppu jätettiin käyntiin seisokissa ja hajukaasuyhdisteitä alkoi muodostua säiliön sisällä voimakkaasti. Säiliössä ei ollut varoventtiiliä eikä sitä ollut liitetty väkevien hajukaasujen keräilyyn.

Jatkotoimenpiteet räjähdysen jälkeen

Hakesiilon väkevien kaasujen räjähdys laimeassa keräilyjärjestelmässä johti siihen, että tehdas investoi pasutushöyryn kiehuttimeen (reboileriin), jolloin hake pasutetaan puhtaalla höyryllä. Tämä keittämön parannus poisti ongelmat liittyen laimeiden hajukaasujen keräily- ja käsittelyjärjestelmään. Kiehuttimen höyryn käyttö hakesiilossa pitää laimeiden hajukaasujen konsentraation aina alhaisella tasolla. Myös varapolttosysteemin hankintaa harkittiin hajuongelmien takia, mutta kiehutin ratkaisi pahimman häiriöpäästölähteen ongelman, joten siitä luovuttiin.

Polttoliipeäsäiliöt liitettiin väkevien hajukaasujen keräilysystemiin ja säiliöön asennettiin varoventtiili.

13.5 Esimerkki 5: Sunila Oy, Kotka, 19.10.2004

Syyt

Sellutehtaan ylösajossa pääsi hakesiilosta räjähdysrajan sisäpuolella olevia pitoisuuksia tärpätti- ja hajukaasuyhdisteitä, jotka syttyivät räjähdysmäisesti soihdussa. Palorintama eteni takaperin hajukaasupuhaltimelle, jossa tapahtui toinen räjähdys.

Räjähdys aiheutui usean tekijän yhteisvaikutuksesta hakesiilossa, jossa laimeiden hajukaasujen turvajärjestelmällä ei pystytty hallitsemaan poikkeuksellisia olosuhteita. Turvajärjestelmä toimii hyvin normaaleissa käyttötilanteissa, mutta poikkeus-tilanteissa, joiden vaikutuksia ei täysin tunneta, ne eivät ole riittäviä. Muiden keräilyn piirissä olevien säiliöiden osalta laimeiden hajukaasujen muutokset ovat hitaampia, joten näihin muutoksiin tehtaan turvajärjestelmät ovat olleet riittäviä.

Linkki [TUKESin onnettomuustutkintaraporttiin](#).

Räjähdysen syntyyn vaikuttaneet yksittäiset seikat ovat seuraavat:

- Hakkeen pitkä pasutus hakesiilossa (mp-kiikin jumiutuminen)
- Tavanomaista korkeammat TRS- ja VOC-pitoisuudet hakesiilossa ja sen kaasuissa käynnistyksen yhteydessä
- Hakesiilolta tulevan hönkälän lämpötilamittauksen viive
- LEL-analysaattorin viive



- Hajukaasupesuri lauhduttaa pääasiassa vesihöyryä, jolloin hajukaasujen osuus ilmamäärässä kasvaa. LEL-analysaattori oli sijoitettu ennen lauhdutusta, jolloin mitattava pitoisuus on pienempi.
- Laimeiden hajukaasujen keräilypuhaltimen imupuolella olevan laimennusventtiilin toimimattomuus
- Keittämön laimeiden hajukaasujen keräilyventtiilin automaattinen uudelleenavautuminen LEL- analysaattorin mittauksen perusteella
- Kuristuslevy keittämön laimeiden hajukaasujen hönkäpiipussa
- Soihdun sammuminen

Laimennusilman määrä on ollut riittävä normaaliajotilanteissa ja ne perustuvat vuosina 1998 ja 2000 tehtyihin mittauksiin. Mittaukset eivät kuitenkaan kata poikkeustilanteita.

Laimennusilmaa lisätään kolmessa kohtaa laimeiden hajukaasujen keräily- ja käsittelyjärjestelmässä:

- Hakesiilon ja muiden säiliöiden hönkäputken kautta hajukaasupuhaltimen aiheuttama alipaine imee laimennusilmaa eri keräilykohteista. Järjestelmä ei kuitenkaan toimi, jos systeemi paineistuu, jolloin kaasu puskee sieltä ulos. Hakesiilon tapauksessa laimennusilmalyhteeseen oli lisätty kuristuslevy.
- LEL- hajukaasuanalysaattori avaa laimennusventtiiliä hajukaasupuhaltimen imupuolella, jos pitoisuus nousee yli 30 % alemmasta LEL-rajasta
- Laimeat hajukaasut johdetaan soihtuun, jossa tarvittava lisäilma laimentaa hajukaasuja

Jatkotoimenpiteet räjähdysen jälkeen:

- Hakesiilon ajotapaa ja sen valvontaa kehitetään
- Muutosten yhteydessä laimeiden hajukaasujen käsittely ja siihen liittyvät turvajärjestelmät tarkastellaan kokonaisuutena
- Laimennusilman riittävyys poikkeustilanteissa varmistetaan
- Suojajärjestelmä rakennetaan turva-automaation periaatteiden mukaisella tavalla



- Laimeiden hajukaasujen pitoisuuksien seuranta parannetaan ja lukitusrajat tarkistetaan (analysaattorin kehittäminen ja sijoitus sekä mahdollinen kahdentaminen)
- Poikkeustilanteet tunnistetaan ja ohjeistetaan
- Vaarojen tunnistaminen ja riskien arviointi toteutetaan järjestelmällisesti
- Valvontaa yhtenäistetään.

13.6 Esimerkki 6: Oy Metsä-Botnia Ab, Joutseno, 1.4.2004

Syyt

Hakesiilolla oli häiriöitä, johtuen hakekuljettimen pysähtymisestä ja pasutushöyryn joutumisesta hakesiilon hönkäjärjestelmään. Hakesiilon höngät kytkettiin laimeiden hajukaasujen keräilyjärjestelmään valkolipeäpesurin kautta v. 2002 lopussa massa-tehtaan käynnistymisen jälkeen. Kytkentä tehtiin, koska hakesiilo oli suuri yksittäinen hajuhaitta tehtaalla. Häiriön aikana hakesiilon hönkien määrä ja pitoisuus nousivat voimakkaasti, jolloin väkevää tärpähtiä, metanolia ja TRS-yhdisteitä sisältävää palavaa kaasua on päässyt soodakattilan tertiääri-ilmajärjestelmään.

Räjähdyksen jälkeisissä hajukaasumittauksissa todettiin, että hakesiilon poistokaasu on ylittänyt alemman räjähdysrajan pitoisuuden, jolloin kaasu on voinut syttyä soodakattilasta takaperin tulleesta liekistä tai puhaltimen aiheuttamasta kipinästä. Tärpättiliekien etenemisnopeus on 150 m/s, kun nopeus tertiääri-ilmasuuttimissa on noin 85 m/s.

Räjähdyksestä ei aiheutunut henkilövahinkoja, mutta mahdollisuudet niihin olivat olemassa.

Jatkotoimenpiteet räjähdysten jälkeen

Tehdyssä selvityksessä suositeltiin, ettei hakesiilon poistokaasua vietäisi laimeiden hajukaasujen keräilyjärjestelmään. Raportissa kuitenkin todettiin, että jos hönkähajusyistä halutaan sinne viedä, niin hakesiilon hönkälinja tulee varustaa tärpättilauhduttimella ja pesurilla, jossa kaasu jäähdytetään kylmällä vedellä. Lisäksi alemman räjähdysrajan mittaus ja ohitus vaaratilanteissa olisi suositeltavaa.

13.7 Esimerkki 7: Oy Metsä-Botnia Ab, Kemin tehtaan vaurio 29.12.1998

Hajukaasulinjastossa voi olla räjähdysvaara, mikäli kaasun konsentraatio on räjähdysalueella. Kaasun konsentraatio on pidettävä riittävän korkeana tai tarpeeksi matalana. Etenkin alas - ja ylösajotilanteet ovat ongelmallisia.

Yleensä soodakattiloiden hajukaasuräjähdykset ovat tapahtuneet laimeiden hajukaasujen järjestelmille.

Kemissä oli seisokin jälkeen startin aikana laimeiden hajukaasujen polttolinjastossa kaasuseos konsentroitunut liian korkeaksi.

Todennäköisesti räjähdysalueella ollut kaasuseos oli kulkeutunut osittain auki olleen sulkuventtiilin ja/tai vesitysputkistojen kautta soodakattilan tertiääritason takaseinän hajukaasusuuttimille seisokin jälkeen tehtaan käynnistyksen aikana. Seos syttyi suuttimilla ja eteni hajukaasukanavistoa pitkin lämmönvaihtimen etuosaan, jossa tapahtui räjähdys.

Nykyään Oy Metsä-Botnia Ab:n tehtaalla Kemissä pidetään hajukaasujen keräily käynnissä myös seisokin aikana.

13.8 Esimerkki 8: Klabinin tapaus Brasiliassa 10.10.1998

Jos hajukaasulinjastossa vesi pääsee kondensoitumaan, on olemassa sulavesiräjähdysvaara, mikäli vesi pääsee soodakattilaan.

Vesityksiin tulisi kiinnittää erityistä huomiota ja ne pitää järjestää linjoihin kattavasti. Ohiajopiipun tulisi sijaita mahdollisimman lähellä kattilaa, jotta ohiajopiipun ja varsinaisen soodakattilarakennuksen välinen linja olisi mahdollisimman lyhyt. Käytännön syystä ohiajopiippu sijaitsee lähellä soodakattilaa, koska ejektori on usein soodakattilarakennuksessa tai sen läheisyydessä, ja piippu on aina painepuolella ejektorin jälkeen.

Klabinissa sattui vakava räjähdys, koska tulipesään joutui suurehko määrä vettä lauhtumattomien kaasujen (NCG) polttimen läpi. Räjähdysten seurauksena 4 henkilöä menehtyi ja 13 henkilöä loukkaantui. Toinen, pienempi sulavesiräjähdys tapahtui 15 minuuttia myöhemmin.

Räjähdyksen perimmäinen syy oli todennäköisesti tulipesään joutunut vesi, joka sammutti keon. Vesi pääsi ilmeisesti soodakattilaan lauhtumattomien kaasujen polttolinjastosta, kun automatiikka sammutti polttojärjestelmän ja puhalsi höyryllä kaasulinjan tyhjäksi, puhaltaen samalla linjastossa olleen lauhtuneen veden tulipesään.

13.9 Esimerkki 9: Varkauden tapaus 1980-luvulla

On syytä korostaa kaikille hajukaasulinjojen ja niiden läheisyydessä työskentelemään joutuville henkilöille hajukaasumyrkytyksen vaaraa.

Varkaudessa sattui 1980-luvun alussa tapaturma, jossa kaksi soodakattilan käyttöhenkilöä sai hajukaasumyrkytyksen. Onnettomuus sattui, kun lipeää ei enää virranut mustalipeän sekoitussäiliöön hönkäputken tukkeentumisen seurauksena. Sekoitussäiliössä pinnanmittauksena oli painelähetin, mikä paineen nousun johdosta näytti väärää nestepintaa. Normaalitilanteessa jätehapo johdettiin sekoitussäiliön pohjalle n. 2 m lipeäpinnan alapuolelle, tällöin rikkivetyä ei pääsisi huonetilaan.

Onnettomuustilanteessa lipeäpinta laski liian alas, jolloin jätehapo aiheutti reaktion, joka vapautti rikkivetyä. Reaktiossa syntynyt kaasunpaine sulki tulevan mustalipeän venttiilin, jolloin rikkivedyn muodostuminen lisääntyi voimakkaasti. Käyttöhenkilö oli puhdistamassa hönkälinjaa ja sai hönkälinjan rassauserästä rikkivetyä hengitykseen. Kyseinen henkilö tunsu huimausta ja poistui ulkoilmaan, jonka jälkeen hän menetti hetkellisesti tajuntansa. Toinen käyttöhenkilö tuli tarkastamaan sekoitussäiliön toimintaa ja havaitsi mustalipeän sekaista vaahtoa pursuavan sekoitussäiliön tarkastusluukun kannen välistä. Samoin hän tunsu huimausta ja poistui soodakattilan valvomoon ilmoittaen valvomonhoitajalle tilanteen ja tämän jälkeen menetti hetkellisesti tajuntansa. Kyseiset henkilöt kävivät sairaalassa tarkkailussa. Tapahtuman jälkeen ylimäärä-jätehapon pumppaus sekoitussäiliöön lopetettiin riskitekijöiden poistamiseksi.



14 LOPPUSANAT

Suomen Soodakattilayhdistyksen jäsenistö on kaivannut selkeää kannanottoa sellutehtaan hajukaasujen keräilyyn ja polttoon. Taustana on huoli turvallisuudesta ja kokonaisprosessin toimivuudesta.

Hajukaasujen syttymis- eli räjähdysalue jakaa hajukaasut laimeisiin, eli pitoisuudeltaan alle räjähdysalueen, ja väkeviin, eli pitoisuudeltaan yli räjähdysalueen.

Väkevien hajukaasujen poltto soodakattilassa on tullut vasta 1990-luvulla voimakkaasti kiinnostuksen kohteeksi. Laimeita hajukaasuja on johdettu soodakattilaan jo aiemmin.

Laimeiden hajukaasujen johtamisessa polttoon on ilmennyt runsaasti ongelmia ja väkevien hajukaasun poltolla on kuten muillakin polttokaasuilla riskinsä, mikä on herättänyt tarpeen ohjeelle. Hajukaasujen poltolle on myös olemassa eri koulukuntia, mikä on herättänyt hämmennystä ja paljon keskustelua aiheesta.

Soodakattilaa on ohjeistettu monin eri tavoin. Hajukaasujen poltto soodakattilassa vaatii oman suosituksensa, jotta hajukaasujen hävitys voidaan tehdä soodakattilassa turvallisesti. Lainsäädäntö ei käytännössä tunne hajukaasuja. Niitä koskevat lähinnä kemikaalilain yleiset periaatteet. Tämän suosituksen tarkoituksena on mahdollistaa hajukaasujen turvallinen poltto soodakattilassa.



15 KIRJALLISUUSVIITTEITÄ

Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee, Recommended good practice for the thermal oxidation of waste streams in a black liquor recovery boiler. February 2012.

Allen, Travis, 2001, NCG Handling, incineration concerns drive need for safe system design. Pulp&Paper, April 2001. pp. 39 – 41.

Burgess, Tom ja Young, Randy, The explosive nature of noncondensable gases. Proc. 1992 Tappi Environmental Conf., pp. 81 – 95.

Compilation of 'Air Toxic' Emission Data for Boilers, Pulp Mills and Bleach Plants; NCASI Technical bulletin no. 650, June 1993.

Drew, John, Russel, James and Bajak, Henry W., Sulfate turpentine recovery. Pulp Chemicals Association, New York 1971, 147 p.

Grace, T. M., Klabin / Monte Alegre recovery boiler explosion. Föredrag vid Sodahuskonferensen '99, ÅF-IPK AB 1999.

Huuska, T., Esitelmä Konemestaripäivillä 2000. Soodakattilayhdistyksen raportti 1/2000.

Hokynar, S., Sulfaattisellun valmistuksessa syntyvät hajukaasut ja niiden räjähdysrajat. TKK, Diplomityö, 1999.

ISO 10156:1996 Ed.2, TC58/SC2: Gases and mixtures – Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets.

Jaakko Pöyry Oy:n arkistotietoa.

Janka, K., Haaga, K., Tamminen, A. ja Wallin, E., Advanced Recovery Boilers Reduce Odor Gases Cost-Efficiently; SPCI 1999 s.531-535.



Karjunen, T., Kaasuräjähdykset soodakattiloissa vesivuotojen aikana. Soodakattilayhdistyksen raportti 7/1999.

Kankkonen, S., Pekkanen, M., Soodakattilassa poltettavat ainevirrat. Soodakattilayhdistyksen raportti 2/2000.

Modernin sulfaattiselutehtaan haihtuvat kaasumaiset yhdisteet, Osaprojekti 1 Haihtuvien kaasumaisten yhdisteitten määrittäminen, Loppuraportti. VTT Kemiantekniikka, Ympäristötekniikka. 45 p.

Mäntyniemi, Jussi, Isoniemi, Markku ja Harila, Pauli, Biosludge and NCG incineration in a recovery boiler. 1995 International Chemical Recovery Conference. pp. B57 – B61.

Pekkanen M, Nieminen R, Lehtinen T. Hajukaasujen polttosuosituksen päivytykseen liittyvä selvitys Soodakattilayhdistyksen raportti 7/2010.

Rantanen, Asmo, 1987, Soodakattilan liuotinhöngän koostumuksen ja käsittelymenetelmien tutkiminen. Diplomityö LTKK, Energiatekniikan osasto, Lappeenranta, 114 p.

Sosiaali- ja terveysministeriön päätös (979/1997) kemikaalien luokitusperusteista ja merkintöjen tekemisestä.

Sosiaali- ja terveysministeriön päätös (1058/1999) kemikaalien luokitusperusteista ja merkintöjen tekemisestä annetun sosiaali- ja terveysministeriön päätöksen muuttamisesta.

Työpaikan ilman epäpuhtauksien enimmäispitoisuudet (enimmäispitoisuusohjeet). Sosiaali- ja terveysministeriön vahvistamat teknilliset turvallisuusohjeet N.o 11. Sosiaali- ja terveysministeriö 1972.

Venermo, Mikko, Upgrading of the odour control system of a kraft pulp mill by pre-evaporating the black liquor. Diplomityö, TKK Espoo. 94 p, 1992.

LIITE 1
Esimerkki pohjakuorman laskemiseksi



ESIMERKKI POHJAKUORMAN LASKEMISEKSI

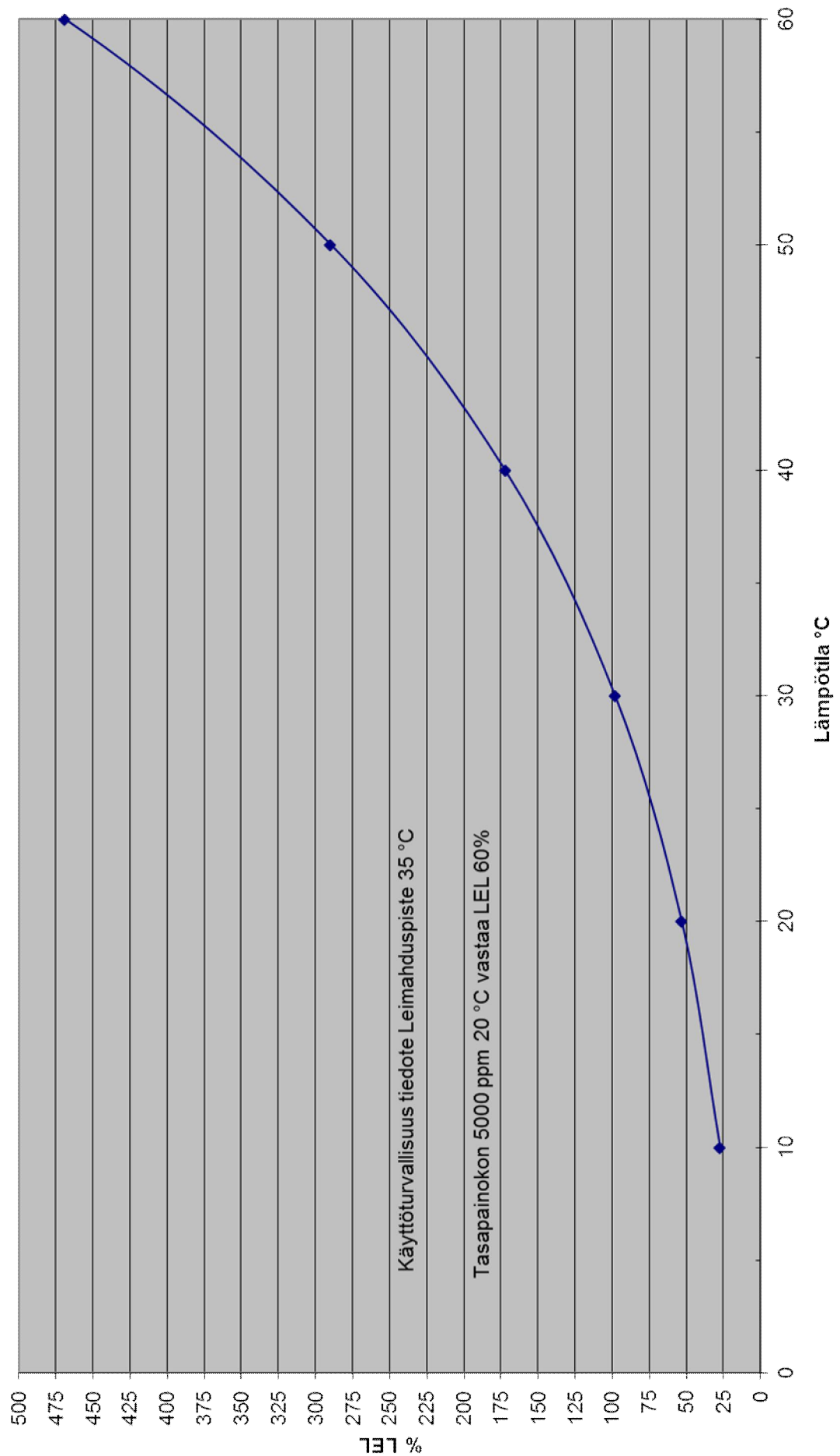
Jotta minimikuorma hajukaasujenpoltolle laskettaisiin yhtenevästi, on ohessa esitetty kaksi tapaa laskea minimikuorma. Toisessa kuorma sidotaan höyryvirtaan ja toisessa lipeävirtaan. Tulitehon yksikkö on höyrynkehitykseen saatu nettolämpö jaettuna tulipesän pohjaneliöillä.

	100	%		43	%
Kattilan pohjan ala	100	m ²		100	m ²
Höyrynkehitys	80	kg/s		34,3	kg/s
Tuorehöyryn paine	80	bar		80	bar
Tuorehöyryn lämpötila	480	°C		480	°C
Tuorehöyryn entalpia	3349.5	KJ/kg		3349.5	kJ/kg
Syöttöveden paine	100	bar		100	bar
Syöttöveden lämpötila	115	°C		115	°C
Syöttöveden entalpia	489.6	kJ/kg		489.6	kJ/kg
Lierion paine	90	bar		90	bar
Nuohoushöyryn entalpia	2942.9	kJ/kg		2942.9	kJ/kg
Ulospuhalluksen entalpia	1363.7	kJ/kg		1363.7	kJ/kg
Ulospuhallus	1.5	%		1.5	%
Nuohous	2,0	%		2.0	%
Lämpö höyryyn	2.922	MJ/kg		2,922	MJ/kg
	233.8	MW		100.2	MW
Nettolämpö pohja-alaa kohti	2.34	MW/m ²		1.00	MW/m ²
TAI					
	100	%		43	%
Mustalipeävirtaus	2200	tka/24h		943	tka/24h
	25.5	kgka/s		10.9	kgka/s
Nettolämpö (taseesta)	9200	kJ/kgka		9200	kJ/kgka
	234.3	MW		100.4	MW
Nettolämpö pohja-alaa kohti	2.34	MW/m ²		1.00	MW/m ²

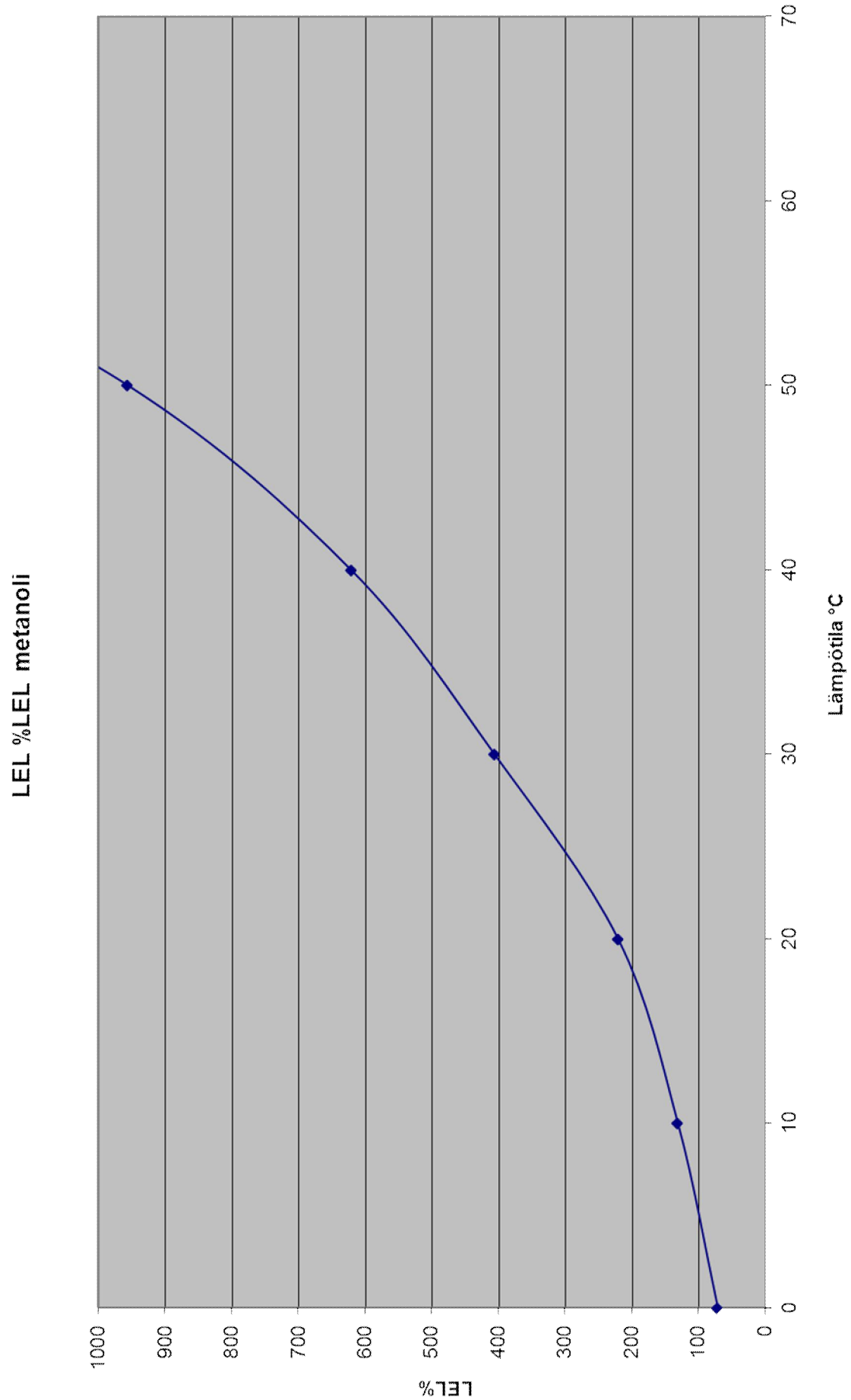
LIITE 2
Alfa-pineenin tasapainokäyrä ilmassa



LEL %LEL Tärpätintasapainoilmassa



LIITE 3
Metanolin tasapainokäyrä ilmassa



LIITE 5
OTR: Soodakattilapäivä 2013,
Sokos Hotel Vantaa 31.10.2013 - Palaute



Soodakattilapäivä 31.10.2013

Palaute



Palaute

- *Ilmoittautuneita*
 - 94
- *Palautettuja lomakkeita yhteensä*
 - 48 kpl
- *Vastausprosentti 51 %*

Kuinka arvioisit luennoitsijaa ja esityksen sisältöä?

Kurt Sirén, Sähkösuodintuhkan hyötykäyttömahdollisuudet	3,6
Risto Ikäheimo, Online recovery boiler reduction degree	3,8
Lauri Reiman, Soodakattilan hyötysuhde	4,0
Danny Tandra, Latest advancement in recovery boiler intelligent sootblowing technology for improved safety, energy efficiency, and cost reduction	3,7
Jani Vuorinen, Uudet vesikemian ohjeavrot ja käytäntö	3,8
Paterson McKeough, Lignin recovery - Andritz's evaluations and development work	3,8
Markus Nieminen, Suomen, Pohjois-Amerikan ja Brasilian soodakattilayhdistyksien kuulumiset	3,4
Peter Andersson, Sodahuskommittén – Ruotsalais-norjalainen soodakattilakomitea vuosikatsaus 2012	3,3
Viljami Maakala, opinnäytetyöpalkinnon esittely: "Multi-Objective Optimization of Recovery Boiler Dimensions Using Computational Fluid Dynamics"	4,2

Mielipiteesi tilaisuuden muista järjestelyistä

	Keskiarvo
Salijärjestelyt (pöytäjärjestys, kuuluvuus, näkyvyys)	4,3
Ilmoittautumis- ja vastaanottopalvelut	4,5
Tilat	4,1
Tarjoilut	4,2
Yleisvaikutelma tilaisuudesta	4,3



Toivottuja luentoaiheita

- Edelleen vesikemiaa, uudet tutkimukset (Jani Vuorinen)
- Vesikemia osa 2.
- Laitosten viritys
- Eri maiden komiteoiden yhteistyö
- Simulaattorit
- Tehtaiden omia kokemuksia
- Hajukaasusuosituksen päivitykset
- Energiatehokkuus-direktiivin vaikutus
- Soodakattilan kemia (Hupa)
- Tuhkan ominaisuudet
- Hajukaasujen poltto



Muuta palautetta

- Pukukoodit eri tilaisuuksiin mukaan kutsuun
- Mielenkiintoista asiaa ja hyvin järjestetty
- Aula/kahvitila hieman ahdas näinkin isolle joukolle, tästä pieni miinus, muutoin erinomainen päivä

LIITE 6

**KTR: Aktiivihiihden mitoituksen varmistus ja optimointi sekä
TOC-reduktion varmistaminen, JP-analysis/Oulun Yliopisto –
loppuraportti 11.3.2013**

Loppuraportti

Aktiivihiihen mitoituksen varmistus ja optimointi sekä TOC-reduktion varmistaminen

1 TAUSTAA

Soodakattilayhdistyksen SKYREC-projektissa on tutkittu aktiivihiihen käyttöä soodakattilalaitoksen lisäveden orgaanisen aineen poistossa vuosina 2009 – 2013. Aiheesta on valmistunut pro gradu – työ, raportti jatkotutkimushankkeen tuloksista ja tieteellinen julkaisu. Tutkimuksissa on osoitettu, että aktiivihiihisiuodatus alentaa jopa 60 - 70 % lisäveden orgaanisen hiilen (TOC) pitoisuutta. Kokeet on toteutettu laboratorio-, pilot- ja tehdasmittakaavassa. Kevään 2012 aikana on selvitetty otsonointi- ja vetyperoksidihapetusten vaikutusta TOC:n reduktioon. Selvitetty katalysoinnin vaikutuksia aktiivihiihen toimivuuteen. Lisäksi lyhyt koe aktiivihiihen ja sekavaihtimen toimivuudesta toisiinsa sekoitettuna. Talven 2012 – 2013 aikana on tutkittu aktiivihiihisiuodattimien mitoitusta nostamalla virtaussuhdetta alhaisista arvoista realistisiin arvoihin. Lisäksi on vertailtu eri TOC-mittalaitteiden välisiä eroja TOC-reduktion varmistamiseksi.

2 TOTEUTUS

Aktiivihiihen mitoituksen optimointi toteutettiin olemassa olevilla suodatin kolonneilla. Kolonneja on kahta eri mallia. Käytettyjen kolonnien ja aktiivihiihisiuodattimeksi kaavaillun suodattimen (Heikkoanioni) speksit ja käytetyt virtaussuhteet on taulukossa 2-1. Kokeissa virtaussuhde aloitettiin alhaisista arvoista ja yhden hiilisuodattimen (AC3) virtaussuhde nostettiin vaiheittain realistiseen arvoon, joka vastaa virtaussuhdetta käytettäessä heikkoanionivaihtimen suodatinta aktiivihiihisiuodatuksena (n. 30 BV/h). Aktiivihiihisiuodattimien AC1 ja AC2 virtaussuhteet pidettiin vakioina. TOC-reduktiot määritettiin TEKMAR Phoenix 3000 analysaattorilla (JP-analysis-yrityksen laite). Lisäksi tuloksia vertailtiin aikaisemmissa tutkimuksissa käytettyyn TOC-laitteistoon (Oulun yliopiston laite). Johtokykyä seurattiin jokaisen aktiivihiihisiuodattimen jälkeen reaaliaikaisella mittauksella.

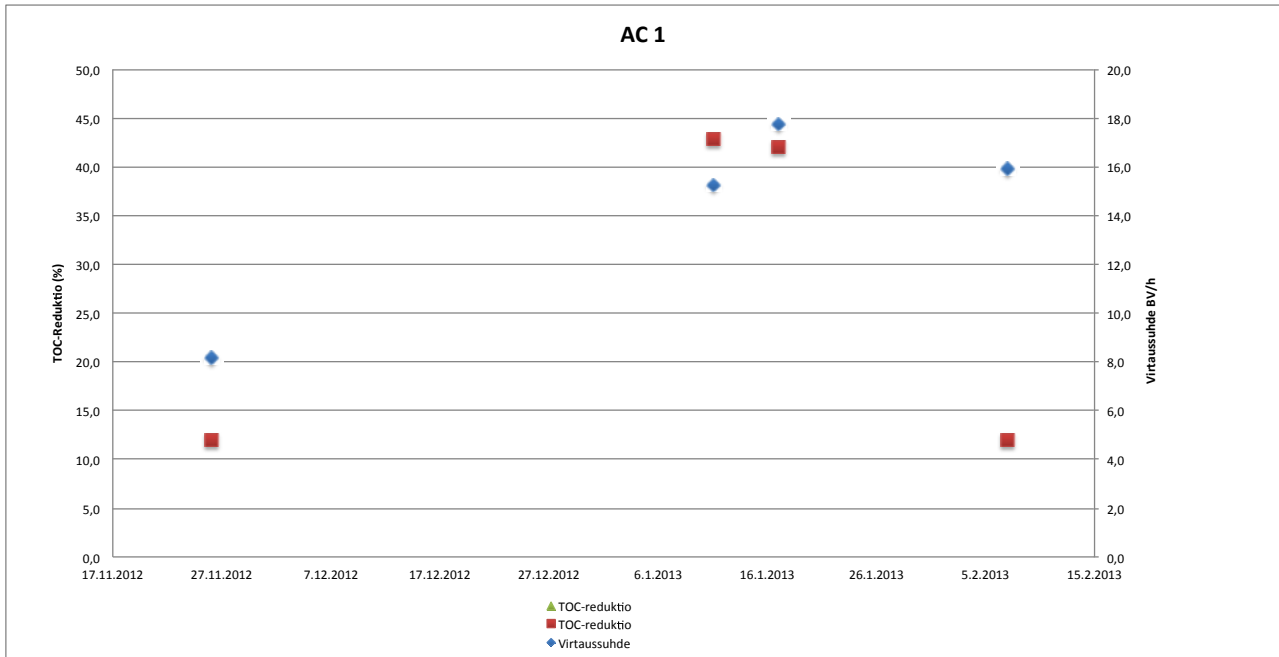
TAULUKKO 2-1. Käytettyjen aktiivihilisuodattimien ja vertailusuodattimen (heikkoanioninvaihdin) speksit ja mitoituskokeissa käytettyjen virtaamat ja virtaussuhdearvot

mitoitusvirtaama		Heikkoanioni 55 l/s	AC1 2 l/min	AC2 kaksi	AC 3 pienätarometriä
Vesivirtaus		198 m ³ / h	0,124	0,031	0,028 m ³ /h
Massa tilavuus		6 m ³	0,015	0,005	0,005 m ³
Virtaussuhde	5_40	33 BV / h	8,180	6,565	5,866 BV / h
Suodattimen halkaisija		2,4 m ³ / h	0,220	0,110	0,110 m ³ / h
Suodattimen pintaala		4,5 m ²	0,0380	0,0095	0,0095 m ²
Suodatus nopeus	10_50	0,0 m/h	3,272	3,282	2,933 m/h
Massapetin paksuus	>700	1327 mm	400	500	500 mm
Virtaukset tarkistettu 18.12.2012			0,12076087	0,03117647	0,02785714 m ³ /h
Vesimäärät lisätty 19.12.2012			4 l/min	2+1 rotametri	
Vesivirtaus		198 m ³ / h	0,232	0,051	0,051 m ³ /h
Massa tilavuus		6 m ³	0,015	0,005	0,005 m ³
Virtaussuhde	5_40	33 BV / h	15,266	10,829	10,829 BV / h
Suodattimen halkaisija		2,4 m ³ / h	0,220	0,110	0,110 m ³ / h
Suodattimen pintaala		4,5 m ²	0,0380	0,0095	0,0095 m ²
Suodatus nopeus	10_50	0,0 m/h	6,106	5,414	5,414 m/h
Massapetin paksuus	>700	1327 mm	400	500	500 mm
28.12.2012 klo 10:00 AC2 vesimäärä pudotettu alkuperäiseen (2 pientä rotametriä)					
		198 m ³ / h	0,232	0,031	0,051 m ³ /h
			15,2655682	6,56450399	10,8287775 BV/h
14.01.2012 klo 13:00		AC1 ja AC3 vesimäärä lisätty 2 pientä ja kaksi isoa rotametri			
Vesivirtaus		198 m ³ / h	0,270	0,031	0,079 m ³ /h
Massa tilavuus		6 m ³	0,015	0,005	0,005 m ³
Virtaussuhde	5_40	33 BV / h	17,766	6,565	16,694 BV / h
Suodattimen halkaisija		2,4 m ³ / h	0,220	0,110	0,110 m ³ / h
Suodattimen pintaala		4,5 m ²	0,0380	0,0095	0,0095 m ²
Suodatus nopeus	10_50	#VIITTAUS! m/h	7,106	3,282	8,347 m/h
Massapetin paksuus	>700	1327 mm	400	500	500 mm
31.1.2013 AC3 tarkistettu klo 14:30					
Vesivirtaus		198 m ³ / h	0,233	0,02386364	0,080 m ³ /h
Massa tilavuus		6 m ³	0,015	0,005	0,005 m ³
Virtaussuhde Petivilavuus/h	5_40	33 BV / h	15,298	5,025	16,780 BV / h
Suodattimen halkaisija		2,4 m ³ / h	0,220	0,110	0,110 m ³ / h
Suodattimen pintaala		4,5 m ²	0,0380	0,0095	0,0095 m ²
Suodatus nopeus	10_50	0,0 m/h	6,119	2,512	8,390 m/h
Massapetin paksuus	>700	1327 mm	400	500	500 mm
04.2.2013 AC3 Lisätty AC3					
Vesivirtaus		198 m ³ / h	0,243	0,0225	0,130 m ³ /h
Massa tilavuus		6 m ³	0,015	0,005	0,005 m ³
Virtaussuhde Petivilavuus/h	5_40	33 BV / h	15,956	4,738	27,373 BV / h
Suodattimen halkaisija		2,4 m ³ / h	0,220	0,110	0,110 m ³ / h
Suodattimen pintaala		4,5 m ²	0,0380	0,0095	0,0095 m ²
Suodatus nopeus	10_50	0,0 m/h	6,383	2,369	13,686 m/h
Massapetin paksuus	>700	1327 mm	400	500	500 mm
Tarkistus 1.03.					
Vesivirtaus		198 m ³ / h		0,0255	0,114 m ³ /h
Massa tilavuus		6 m ³		0,005	0,005 m ³
Virtaussuhde	5_40	33 BV / h		5,369	24,004 BV / h
Suodattimen halkaisija		2,4 m ³ / h		0,110	0,110 m ³ / h
Suodattimen pintaala		4,5 m ²		0,0095	0,0095 m ²
Suodatus nopeus	10_50	0,0 m/h		2,685	12,002 m/h
Massapetin paksuus	>700	1327 mm		500	500 mm

3 TULOKSET

3.1 Aktiivihiili AC1:

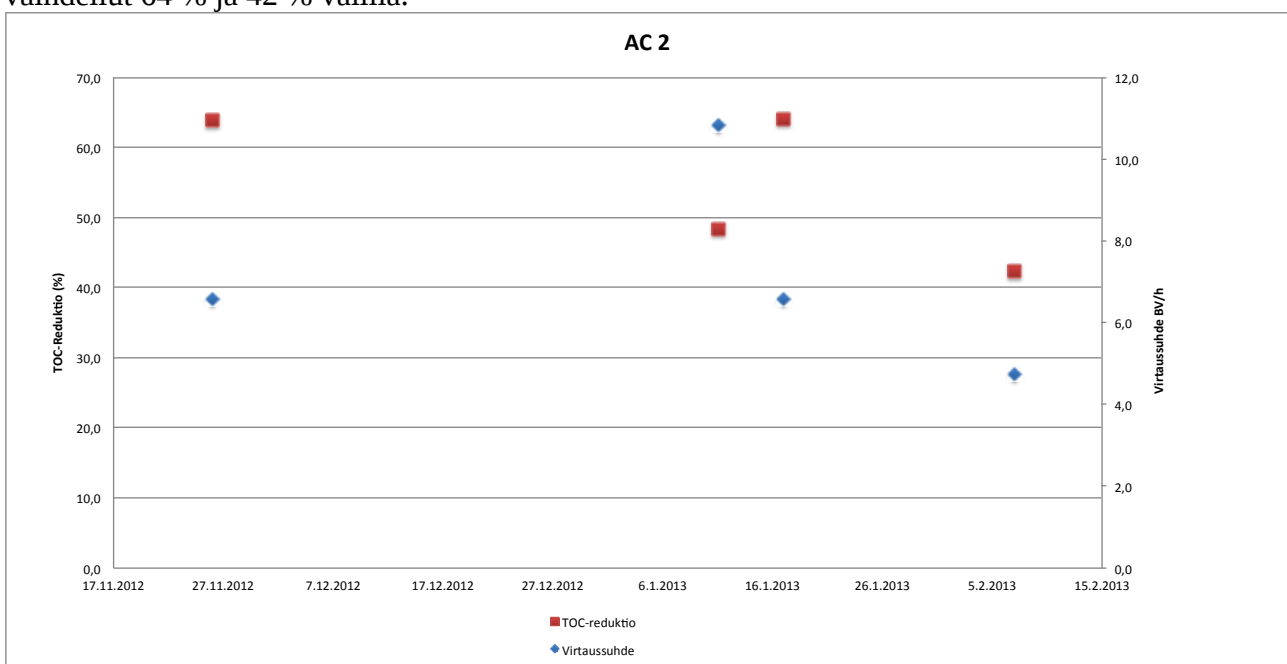
Kuvassa 3-1 näkyy aktiivihiilisuodatin AC1:n TOC-reduktiot virtaussuhteen ja ajan funktiona. Aktiivihiili AC1 ja sekavaihdin MB1 oli kytketty aluksi väärin. Tämä on aiheuttanut alhaisen TOC-reduktion 26.11.2012. TOC-reduktio on ollut 11.1 ja 17.1 n. 42 % ja romahtanut 7.2.13 mitatuissa näytteissä, jolloin TOC-reduktio on ollut 12 %. Romahdus johtuu AC1:n hiilipatjan karkaamisesta näytteenottopisteeseen. Tämä on havaittu johtokykymittausputken mustumisena.



KUVA 3-1. Aktiivihiilen AC1:n TOC-reduktiot virtaussuhteen ja ajan funktiona.

3.2 Aktiivihiili AC2:

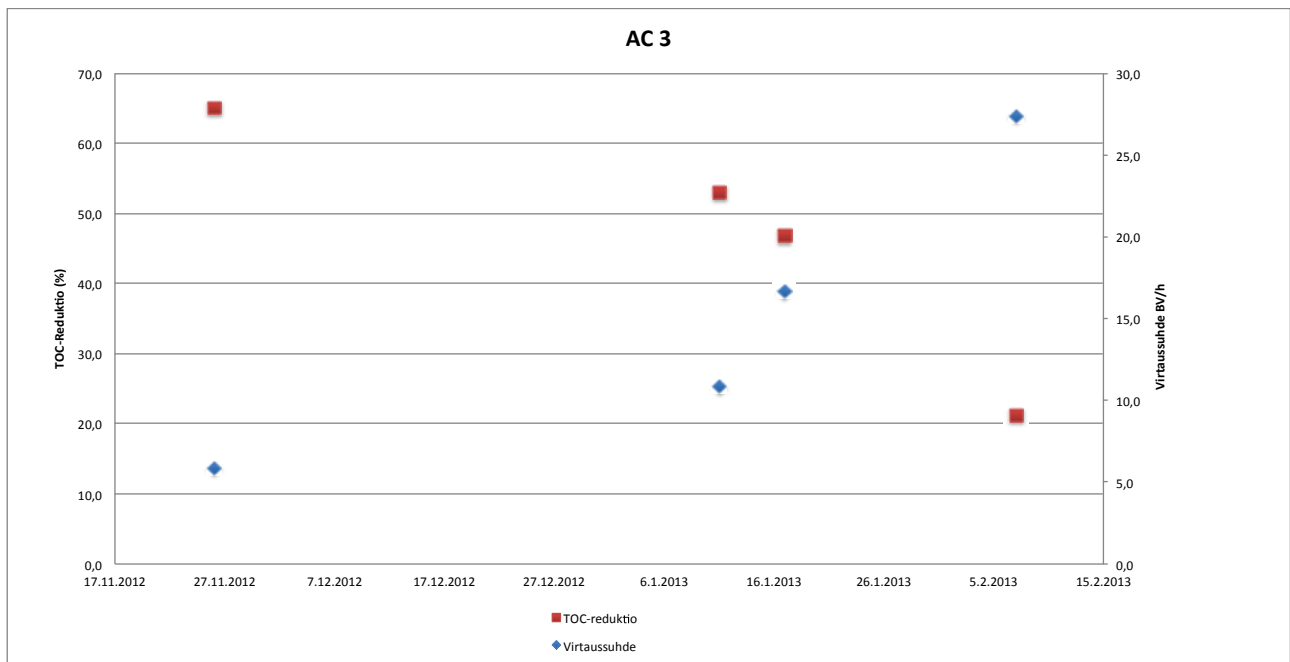
Kuvassa 3-2 on esitetty AC2:n TOC-reduktiot virtaussuhteen ja ajan funktiona. TOC-reduktio on vaihdellut 64 % ja 42 % välillä.



KUVA 3-2. Aktiivihiilen AC2:n TOC-reduktiot virtaussuhteen ja ajan funktiona.

3.3 Akviivihili AC3:

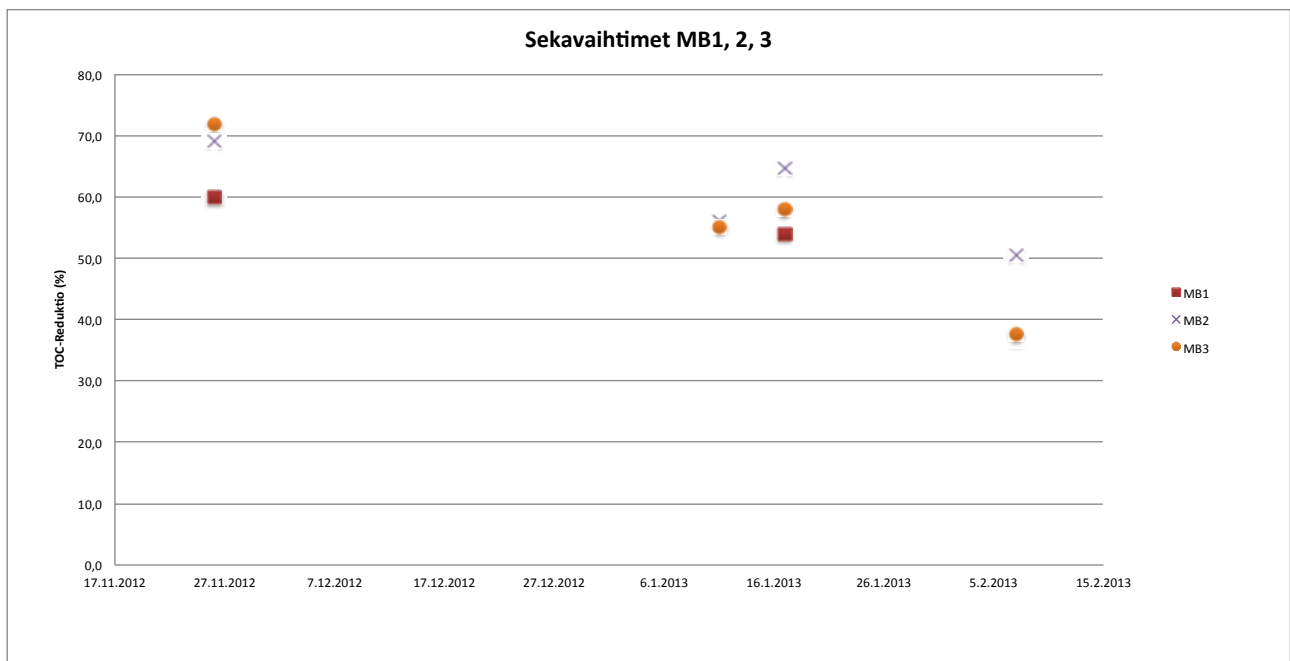
Kuvassa 3-3 on esitettyä aktiivihilisuodatin AC3:n TOC-reduktiot virtaussuhteen ja ajan funktiona. TOC-reduktio on vähentynyt virtaussuhteen ja ajan funktiona.



KUVA 3-3. Aktiivihillen AC3:n TOC-reduktiot virtaussuhteen ja ajan funktiona.

3.4 Sekavaihtimet MB1, MB2 ja MB3:

Kuvassa 4 on esitettyä sekavaihtimien MB1, MB2 ja MB3 TOC-reduktiot virtaussuhteen ja ajan funktiona. TOC-reduktio on vähentynyt ajan / virtaussuhteen funktiona.



KUVA 3-4. Sekavaihtimien MB1, MB2 ja MB3 TOC-reduktiot virtaussuhteen ja ajan funktiona.

3.5 TOC-mittausten vertailu

Tutkimuksessa vertailtiin kahden TOC-analysaattorin antamia tuloksia tutkimuksen vesillä. Toinen TOC analysaattoreista oli aikaisemmissa tutkimuksissa käytetty Sievers 900 Portable TOC Analyzer (yliopiston laite) ja toinen JP-analysis-yrityksen Tekmar Pheonix 8000 TOC analyzer. Tekmar laitteisto on suunniteltu alhaisten TOC-pitoisuuksien määrittämiseen.

Taulukossa 2-2 on vertailtuna edellä mainittujen laitteiden tuloksia. Vertailusta huomataan että Tekmarin laite antaa huomattavasti alhaisempia TOC-pitoisuuksia.

Taulukko 3-1. TOC-analysaattorien pitoisuuksien vertailu

Analysaattori	Päivä	Pitoisuus	AC1	AC2	AC 3	MB1	MB2	MB3	TSP	Höyry
Sievers	26.11.2012	ppb	300	250	258	163	158	154	298	
Tekmar	26.11.2012	ppb	184	75	74	84	64	58	209	116
Sievers	11.1.2013	ppb	268	260	258	264	258	244	270	
Tekmar	11.1.2013	ppb	113	102	93	90	87	89	198	124

4 YHTEENVETO

Tulokset osoittavat, että aktiivihielet poistavat orgaanista hiiltä tehokkaasti TSP-vedestä. Virtaussuhteen kasvu vaikuttaa alentavasti TOC-reduktioon. Aktiivihielessä AC 3 virtaussuhde (n. 30 BV/h) oli lähimpänä käytäntöä. Tällöin TOC-reduktio oli n. 20 %. Kolonnien petitilavuudet ovat kuitenkin erittäin vaatimattomat ja täten eivät mahdollisesti vastaa täyttä totuutta. Suurilla veden virtauksilla riski tunneloitumisefektiin kolonneissa kasvaa. Tällöin vesi voi kulkea vain tiettyä reittiä pitkin kolonnin sisällä ja kontaktia ei synny kokopetitilavuudella.

TOC-analysaattorien mittaamissa pitoisuuksissa oli merkittäviä eroja. Yliopiston Sievers-laitteistoa käytetään lisäksi jätevesianalytiikassa, joten virhe tuloksia on odotettavissa. Sievers-laitteisto antoi lisäksi ultrapuhtaalle vedelle (MQ-vesi) TOC-pitoisuudeksi n. 150 ppb, jonka TOC-pitoisuudet ovat luokkaa 5-10 ppb. Tästä voidaan päätellä, että Sievers laitteella ei päästä tätä (150 ppb) pitoisuutta alemmaksi.

Jaakko Pellinen
+358 50 5916109
jaakko.pellinen@jp-analysis.fi
Kaitoväylä 1 F2
90570 Oulu
www.jp-analysis.fi

LIITE 7
KTR: Soodakattilan materiaalit
– alustava raportti 14.11.2013



SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS
FINNISH RECOVERY BOILER COMMITTEE

Suomen Soodakattilayhdistys ry.

**SOODAKATTILALAITOKSEN
SUOJAUSSUOSITUS**

26.5.1988

25.9.1997

XX.XX.2013

ESIPUHE

SISÄLLYSLUETTELO

1	SOODAKATTILAN MATERIAALIT JA HITSAUKSET	6
1.1	Yleistä	6
1.2	Terästen jaottelu	6
1.2.1	Seostamattomat ja niukkaseosteiset teräsputket	7
1.2.2	Runsasseosteiset teräsputket	7
1.2.3	Ruostumattomat teräsputket	8
1.2.4	Kompound-putket	11
1.3	Materiaalit käyttökohteen mukaan	12
1.3.1	Pohja	14
1.3.2	Seinät	14
1.3.3	Kammiot, aukot, läpiviennit, kourut, massaukset	15
1.3.4	Verho	15
	Verhoputkia käytetään ensimmäisenä lämpöpintana tulipesän jälkeen suojamaan tulistimia säteilylämmöltä sekä vähentämään carryoverin määrää. Verhoputket valmistetaan yleensä hiiliteräksestä koska lämpötila on lähellä seinäputkien lämpötilaa. Korroosio on vähäistä johtuen materiaalin lämpötilasta.	16
1.3.5	Tulistin	16
1.3.6	Ekonomaiseri	18
1.3.7	Lieriö	19
1.4	Hitsaus	19
1.4.1	Erikoishitsaukset	21
1.4.2	Päällehitsaus	22
1.5	Lähteet:	23
2	SOODAKATTILAPINNOITUKSET	24
2.1	Johdanto	24
2.2	Ruiskutusmenetelmät	25
2.3	Pinnoitemateriaalit	27
2.3.1	Rautavaltaiset pinnoitteet	27
2.3.2	Nikkelivaltaiset pinnoitteet	29
2.3.3	Kaupalliset pinnoitemateriaalit	30
2.3.4	Pinnoitemateriaalien valinta	31
2.4	Pinnoitteen valmistus	33
2.4.1	Termisellä ruiskutuksella pinnoitettavan pinnan esikäsittely	34
2.4.2	Pinnoitemateriaali	35
2.4.3	Terminen ruiskutus	35
2.4.4	Sulautuvien seosten ruiskutus	36
2.4.5	Vaaditut ominaisuudet ja pinnoitteen testausmenetelmät	36
2.4.6	Pinnoitteen ulkonäkö	36
2.4.7	Tartunta	37
2.4.8	Paksuuden mittaus	37
2.4.9	Vanhojen pinnoitteiden tarkastus ja pintojen korjaus	38
2.4.10	Manipulaattorin käyttö pinnoituksessa	38

2.5	Yhteenveto	39
2.6	Lähdeluettelo.....	39
3	PAINEASTIAN KORJAUKSET.....	42
3.1	Yleistä	42
3.2	Oppaat.....	42
3.3	Lait ja asetukset.....	43
3.4	Hitsauksen laatu	43
3.5	Hitsaajan pätevyystodistukset.....	44
3.6	Hitsausohjeet.....	44
3.7	Asennus-, korjaus- ja muutostyöt.....	44
3.8	Painekoe.....	46
3.9	Korjauksen luonne.....	46
3.9.1	Ennakkoon valmisteltu korjaus	46
3.9.2	Ennalta arvaamattoman tapahtuman korjaus	47
3.9.3	Hitsauksen korjaus	47
4	SOODAKATTILATARKASTUKSET.....	49
4.1	Yleistä	49
4.2	Tarkastusmenetelmät.....	51
4.2.1	Silmämääräinen tarkastus/VT (visual testing)	51
4.2.2	Paksuusmittaus/ TM (thickness measurement).....	52
4.2.3	Magneettijauhetarkastus / MT (magnetic particle examination)	52
4.2.4	Tunkeumanestetarkastus / PT (liquid penetrant examination).....	53
4.2.5	Radiografia/RT (radiographic examination).....	54
4.2.6	Ultraäänitarkastus / UT (ultrasonic examination)	54
4.2.7	Pyörrevirtatarkastus/ET (eddy current testing).....	55
4.2.8	Jäljennemenetelmä/REP (replica)	56
4.2.9	Endoskoopitarkastus/END (endoscopy).....	57
4.2.10	Akustinen emissioseuranta / AE (acoustic emission)	57
4.2.11	Lämpökuvaus (thermography).....	57
4.2.12	Kovuusmittaus/HT (hardness test).....	57
4.2.13	T-Scan paksuusmittaus	58
4.2.14	IRIS-tekniikka	58
4.2.15	Sisäpuolisen kerrostuman / magnetiittikalvon paksuusmittaus	59
4.2.16	Guided Wave	61
4.2.17	RFET (kaukokenttämenetelmä pyörrevirtatekniikalla, Remote Field Electromagnetic Technique).....	62
4.2.18	Magneettinen vuotokenttätarkastus (MFL)	62
4.2.19	Jäännös jännitystilat	63
4.2.20	Ainetta rikkovat tarkastukset	63
4.3	Tarkastettavat kohteet.....	63
4.4	Vesipainekoe korjausten jälkeen.....	64
4.5	Dokumentointi	64
5	SOODAKATTILAN VAURIOT	66
5.1	TULIPESÄ.....	66
5.1.1	Pohja	66

5.1.2	Seinät	68
5.1.3	Katto	69
5.2	VERHOPUTKISTO	69
5.3	TULISTIN	69
5.3.1	Ruiskujäähdyttimet	69
5.4	KONVEKTIO-OSA	69
5.5	LIERIÖ	69
5.6	EKONOMAISERI	69
5.6.1	A- ja B-putket	69
5.6.2	Evän päät/kavennukset	69
5.7	LIUOTTAJA	69
5.8	VESI- JA HÖYRYPUOLEN VAURIOT	70
5.9	ILMAN ESILÄMMITTIMET	70
5.10	MUUT	70
5.10.1	Kaasuräjähdytys	70



JOHDANTO

Soodakattilalaitoksen Suojaussuositus 2013 pohjautuu vuonna 1997 julkaistuun suositukseen (raportti 6/1997). Suositus on päivitetty vastaamaan nykytilannetta ja -tarvetta.

Aikaisempi suojaussuositus vuodelta 1997 käsitteli suojauskäsitettä laajemmassa merkityksessä kuin tässä suosituksissa. Suosituksesta valittiin päivitettäväksi seuraavat kappaleet: Soodakattilan materiaalit ja hitsaukset, Soodakattilapinnoitukset, Paineastian korjaukset ja Soodakattilatarkastukset. Lisäksi uutena kappaleena on Soodakattilan vauriot, johon kerätty vaurioesimerkkejä yhdistyksen vauriotietokannasta.

Suojaussuositus on koottu laadintahetkellä saatavilla olleiden tietojen ja kokemusten perusteella.

1 SOODAKATTILAN MATERIAALIT JA HITSAUKSET

Alkuperäinen teksti: Lasse Koivisto, Ahlstrom Machinery Oy

Päivitetty teksti: Kestoisuustyöryhmä

1.1 Yleistä

Valmistajalla tulee olla laatu järjestelmä (esim. ISO 9001 mukainen), jossa kuvataan (soveltuvin osin) materiaalin valinta, tilaus, vastaanotto, aine todistusten käsittely, materiaalin tuotantoonotto ja materiaalin tunnistettavuuden säilyttäminen.

1.2 Terästen jaottelu

Soodakattiloissa yleisimmin käytetyt teräkset voidaan jaotella monella tapaa kuten mikrorakenteen tai kemiallisen koostumuksen perusteella, taulukko 1-1.

Taulukko 1-1. Terästen jaottelu kemiallisen koostumuksen mukaan

Kemiallinen koostumus	Teräsluokka
C, Mn	Seostamattomat teräkset
Cr, Mo, Ni, Cu, V, Nb (Cb) < 5 %	Niukkaseosteiset teräkset
Cr, Mo, Ni, Cu, V, Nb (Cb) > 5 %	Runsasseosteiset teräkset
Min 13% Cr	Ruostumattomat teräkset Ferriittiset & martensiittiset
Min 18% Cr + 4-6% Ni (lean duplex +N)	Ruostumattomat teräkset Austeniittis-ferriittiset (duplex)
Min 18% Cr + min 7% Ni (myös Mn seostus)	Ruostumattomat teräkset Austeniittiset
Enemmän muita metalleja (esim. Ni) kuin Fe	Nikkelivaltaiset tms. seokset

Putket valitaan lujuuslaskujen perusteella paineestiamääräysten ja standardien mukaan. Terästuotteille on olemassa lukuisia standardeita, standardit koskevat mm. teräksen ominaisuuksia, valmistusmenetelmiä, aineen koetusta, koostumusta ja nimikkeitä jne. Lisäksi standardit vaihtelevat alueellisesti: Yhdysvalloissa käytetään ASME (American Society of Mechanical Engineers)- standardeita, Euroopassa EN-standardeita, joihin Suomalaiset SFS-standardit on yhdenmukaistettu.

Vaikka standardit periaatteessa velvoittavat valmistajat käyttämään standardien mukaisia määriteltyjä nimikkeitä, käytetään usein kirjallisuudessaakin vakiintuneita vanhoja nimikkeitä. Esimerkiksi saksalainen DIN- standardi (lähinnä DIN 17175) on jäänyt elämään. Taulukoissa 2-2, 2-3, 2-4 on verrattu nykyisten ja vanhojen standardien mukaisia teräksiä, seostamattomien terästen kohdalla merkinnät ovat

muuttuneet oleellisesti, mutta seostettujen terästen merkinnät ovat hyvin lähellä toisiaan. ASME käyttää hyväksi ASTM:n (The American Society for Testing and Materials) merkintöjä, esimerkiksi ASTM A 213 = ASME SA213

Putkien koestusvaatimukset ja muut vaatimukset on esitetty edellä mainitussa standardissa. Vaadittava todistuslaji on yleensä standardin [EN 10204](#) mukainen.

1.2.1 Seostamattomat ja niukkaseosteiset teräspuutket

Terästä sanotaan seostamattomaksi teräkseksi jos rautaan ei ole seostettu mitään lisäainetta parantamaan sen ominaisuuksia. Kuitenkin kaikki hiiliteräkset sisältävät jonkin verran mangaania, piitä ym. Seostamattomat teräokset ovat erittäin hyvin muokattavia ja niillä on yleensä hyvä sitkeys ja lujuus. Toisaalta niiden virumiskestävyyden on heikko ja käyttö rajoittuu alle 450 °C lämpötiloihin.

Kuumalujuutta ja hapettumisenkestävyyttä parannetaan lisäämällä teräkseen erilaisia seosaineita. Tavallisimmat seosaineet ovat molybdeeni (Mo), kromi (Cr), vanadiini (V) ja niobi (Nb), joista tehokkain seosaine kuumalujuuden suhteen on molybdeeni. Standardit määrittelevät seosainepitoisuuksille ylärajat, joiden ylittäminen merkitsee teräksen nimikkeen muuttumista seosteiseksi teräkseksi. Niukkaseosteisiin teräksiin luetaan teräokset joissa seosaineita on yhteensä vähemmän kuin 5 prosenttia, taulukko 1-2.

Taulukko 1-2. Yleisesti käytetyt EN 10216 mukaiset putkiteräokset

EN Nimike	EN numero	Vanha DIN 17175	ASME	Tyyppi	Tyypillinen käyttöalue
P235GH	1.0345	St 35.8	SA-192	Hiiliteräs	< 400 °C
P265GH	1.0425	St 45.8	SA-210-A1	Hiiliteräs	< 400 °C
16 Mo 3	1.5415	15 Mo 3	SA-209 T1	≤ 0.3 % Mo	< 470 °C
13 CrMo 4-5	1.7335	13 CrMo 4 4	SA-213 T12	1% Cr - 0.5% Mo	< 500 °C
10 CrMo 9-10	1.7380	10CrMo 9 10	SA-213 T22	2.25% Cr - 1%Mo	< 540 °C
7 CrWVMoNb 9-6	1.8201		SA-213 T23	2.25% Cr -MoWV	
7 CrMoVTiB 10-10	1.7378		SA-213 T24	2.25% Cr -1%MoVTiB	

Taulukko 1-3. Yleisesti käytetyt EN 10028 mukaiset levyteräokset

EN Nimike	EN numero	DIN 17175	ASME	Tyyppi	Tyypillinen käyttöalue
P235GH	1.0345	H I	-	Hiiliteräs	< 450 °C
P265GH	1.0425	H II	-	Hiiliteräs	< 450 °C

1.2.2 Runsasseosteiset teräspuutket

Runsasseosteisiin teräsiin päästään kun mm. kromin seostusta lisätään, esimerkiksi “X20”-teräs (X20CrMoV111), joka on melko runsashiilinen (0,2 %) ja sisältää kromia 12 %. Yleisesti käytössä olevia runsasseosteisiä putkimateriaaleja on lueteltu taulukossa 1-4.

Taulukko 1-4. Yleisesti käytetyt EN 10216 mukaiset runsasseosteiset putket

EN Nimike	EN tunnus	DIN 17175	ASME	Tyyppi	Tyypillinen käyttöalue
X10CrMoVNb9-1	1.4903	X10CrMoVNb91	SA-213 T91	9% Cr - 1%Mo mod.	
X20CrMoV11-1	1.4922	X20CrMoV12 1	-	12% Cr - 1%MoNiV	

1.2.3 Ruostumattomat teräsputket

Kromin ansiosta teräksen pintaan muodostuu ympäristön sisältämän ilman hapen vaikutuksesta erittäin ohut tiivis “oksidikalvo”, joka suojelee terästä korroosiolta. Kalvon muodostumiseen ilmassa tarvitaan teräksessä vähintään noin 11 % kromia, joka on vähiten seostetun ruostumattoman teräksen kromipitoisuus. Kromin lisäksi teräsiin seostetaan yleensä tarpeen mukaan monia muitakin seosaineita, esim. nikkeliä tarvitaan vähintään noin 8 % ja kromia 18%, kun halutaan saada aikaan yleisin ruostumaton teräs, austeniittinen teräs.

Kemiallisen koostumuksen (lähinnä kromi, nikkeli, molybdeeni, mangaani, pii ja tyyppi) ja lämpökäsittelytilan mukaan saadaan teräsiin erilaisia mikrorakenteita, joilla on erilaisia ominaisuuksia. Mikrorakenteensa perusteella ruostumattomat teräkset jaetaan: ferriittisiin, austeniittisiin, austeniittis-ferriittisiin (duplex) ja martensiittisiin teräsiin. Seosainepitoisuuksia muuttamalla kyetään vaikuttamaan teräksen korroosionkestävyyteen, hitsattavuuteen ja mekaanisiin ominaisuuksiin, taulukko 1-5.

Taulukko 1-5. Seosaineiden vaikutus teräksen ominaisuuksiin

Seosaine:	Vaikutus:
Kromi (Cr)	+ Parantaa sekä korroosion että jännityskorroosion kestävyyttä + Parantaa sulfidoitumiskestävyyttä estämällä rikin diffuusiota + Korkea Cr-pitoisuus pienentää lämpölaajenemiskerrointia - Korkea Cr-pitoisuus laskee lämmönjohtavuutta - Huonontaa sitkeyttä
Nikkeli (Ni)	+ Parantaa jännityskorroosionkestävyyttä korkeilla pitoisuuksilla (Ni > 30 %) + Korkea Ni-pitoisuus pienentää lämpölaajenemiskerrointia + Parantaa kestävyttä kloorikorroosiota vastaan + Parantaa sitkeyttä - Puhtaalla nikkelillä on alkalisissa sulfidiympäristöissä huono jännityskorroosionkestävyys

	- Heikentää sulfidoitumiskestävyyttä - Korkea Ni-pitoisuus laskee lämmönjohtavuutta
Molybdeeni (Mo)	+ Parantaa jännityskorroosionkestävyyttä väkevissä lipeäliuoksissa korkeilla kloridipitoisuuksilla + Parantaa sulfidoitumiskestävyyttä + Nostaa lujuutta korkeissa lämpötiloissa - Heikentää jännityskorroosionkestävyyttä väkevissä lipeäliuoksissa matalilla kloridipitoisuuksilla.
Mangaani (Mn)	+ Parantaa kestävyyttä muodostamalla pysyviä rikkiyhdisteitä ja estää rikin ja nikkelin sekä kromin välisiä reaktioita
Titaani (Ti)	+ Parantaa korroosionkestävyyttä + vähentää raerajakorroosion (herkistymisen) riskiä hitsauksen jälkeen
Niobi (Nb)	+ Parantaa korroosionkestävyyttä + Parantaa sulfidoitumiskestävyyttä + Vähentää raerajakorroosion (herkistymisen) riskiä hitsauksen jälkeen
Typpi (N)	+ Parantaa pistekorroosionkestävyyttä + Parantaa lujuutta
Rauta (Fe)	+ Korkea Fe-pitoisuus lisää lämmönjohtavuutta - Heikentää korroosionkestävyyttä - Heikentää sulfidoitumiskestävyyttä.

Ruostumattomista teräksistä austeniittiset teräkset ovat ehdottomasti yleisimmin käytettyjä. Austeniittisiä teräksiä käytetään vaikeissa korroosio-olosuhteissatulistinputkena. Austeniittiset teräkset ovat kromi- nikkeli-teräksiä, joiden kromipitoisuus vaihtelee välillä 17–26 % ja nikkelipitoisuus välillä 7-22 %, pitoisuuksien summan ollessa vähintään 23 %. Hiiltä austeniittisissä teräksissä on hyvin vähän, yleensä alle 0,05 %. Austeniittisten terästen korroosionkestävyys, sitkeys, kylmämuovattavuus ja hitsattavuus ovat hyviä. Lujuus on melko vaatimaton lukuun ottamatta runsaasti seostettuja erikoisteräksiä. Niillä on kuitenkin erittäin hyvät kuumalujuusominaisuudet, mistä syystä niitä käytetään paljon virumiskestävinä teräksinä korkeissa lämpötiloissa. Austeniittista terästä ei voida karkaista lujuuden nostamiseksi, mutta sen lujuutta voidaan nostaa mm. tyypiseostuksella. Mikäli käytetään austeniittista materiaalia, on muistettava sen jännityskorroosioalttius.

Ferriittisten terästen pääseosaine on kromi. Toisena seosaineena voidaan käyttää muutamia prosentteja molybdeeniä. Hiilipitoisuus on alle 0,08 %. Lisäksi niissä voi olla hyvin pieniä määriä erilaisia stabilointiaineita, mm. titaania ja alumiinia. Ferriittisten terästen perustyyppit ovat 12% Cr- ja 17% Cr-teräkset. Ferriittisten terästen sitkeysominaisuudet eivät ole verrattavissa austeniittisten terästen erinomaiseen sitkeyteen ja ne kärsivät myös monista haurausilmiöistä. Samoin korroosionkestävyys monissa olosuhteissa on huonompi. Ferriittisten terästen hyvä ominaisuus on kuitenkin hyvä jännityskorroosionkestävyys, joka on puolestaan austeniittisten



vakioterästen heikko kohta. Lujuudet ovat yleensä jonkin verran suurempia kuin austeniittisilla teräksillä. Niiden etuna on myös edullinen hinta.

Austeniittis-ferriittiset teräset eli duplex-teräset ovat CrNi- ja CrNiMo-teräksiä. Näiden pääseosaineiden pitoisuudet on tasapainotettu siten, että teräkseen saadaan kaksifaasinen mikrorakenne, jossa on austeniittia ja ferriittiä suurin piirtein suhteessa 50:50. Duplex-terästen hyvät ominaisuudet ovat suuri lujuus ja hyvä korroosionkestävyys (erityisesti jännityskorroosionkestävyys ja pistekorroosionkestävyys) sekä vielä hyvä hitsattavuus. Terästen sallittu käyttölämpötila-alue on noin -50...+280 °C. Martensiittiset teräset ovat pääkoostumukseltaan kromiteräksiä, minkä lisäksi joissakin laaduissa on muutamia prosentteja nikkeliä. Päätyypiltään ne ovat 13% Cr- ja 17% Cr -teräksiä, joiden hiilipitoisuus on välillä 0,10 – 1 %. Martensiittiset teräset ovat ainoita karkaistavia ruostumattomia teräksiä, minkä ansiosta niiden lujuutta voidaan nostaa karkaisulla. Terästen lujuus on korkea ja kulumiskestävyys hyvä. Korroosionkestävyys on huonompi kuin muilla ruostumattomilla terästyypeillä. Sitkeysominaisuudet ovat myös melko huonot. Hitsattavuus on yleensä huono (haurastuu hitsattaessa), minkä takia hitsaus vaatii yleensä aina erilaisia erityis- toimenpiteitä onnistuakseen, mm. esikuumennus ja jälkilämpökäsittely.

Yleisesti käytössä olevia ruostumattomia putkimateriaaleja on lueteltu taulukossa 1-6.

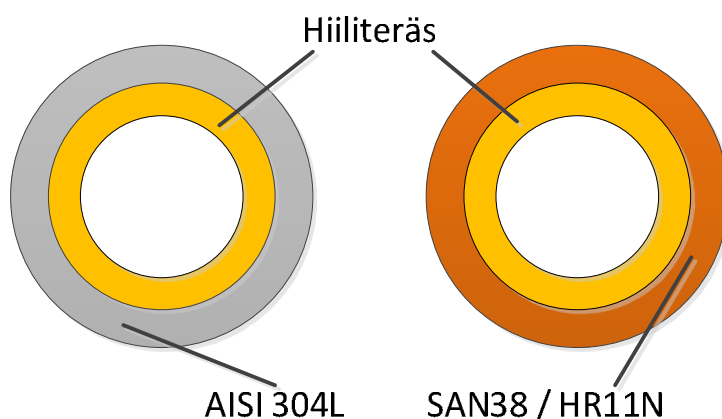
Taulukko 1-6. Yleisesti käytetyt EN 10088 ja EN 10216 mukaiset ruostumattomat putket

EN Nimike	EN Tunnus	DIN 17175	ASME	Tyyppi	Tyypillinen käyttöalue
X2CrNi19-11	1.4306	X5CrNi189	304L	19%Cr - 11%Ni	
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	X2CrNiMo18 14 3	316L	18%Cr - 3%Mo14%Ni	
X6CrNiNb18-10	1.4550	X6CrNiNb 18 10	347	18%Cr- 10%NiNb	
X8CrNi 25-21	1.4845	X12CrNi 25 20	310S	25%Cr- 21%Ni	
X6NiCrNbCe32-27	1.4877	-	A213	31%Ni - 27%Cr (AC-66)	
X6Cr13	1.4000	-	410S	13%Cr - 0.08%C	
X6Cr17	1.4016	-	430	17%Cr – 0.08%C	
X2CrMoTi18-2	1.4521	-	444	18%Cr – 2%MoTi	
X12Cr13	1.4006	-	410	13%Cr - 0.1%C	
X20Cr13	1.4021	-	420	13%Cr - 0.2%C	
X2CrNiN23-4	1.4362	-	S2304	23%Cr - 4%NiN	< 300 °C
X2CrNiN22-2	1.4062	-	S2202	22%Cr - 0.5%Mo2Ni	< 250 °C
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	-	S2205	22%Cr - 3%Mo5%NiN	< 280 °C
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	-	S2750	25%Cr - 4%Mo7%NiN	< 300 °C
X2CrNiN22-2	1.4062	-	S2202	22%Cr - 2%NiN	< 250 °C

Siinä vaiheessa kun muita metalleja, kuten nikkeliä on enemmän kuin rautaa, ei puhutakaan enää teräksistä. .

1.2.4 Compound-putket

Kompound-putki on yhdistelmä kahdesta materiaalista, jossa putken painetta kantava sisäkerros on seostamaton tai niukkaseosteinen terästä ja ulommainen korroosiota kestävä kerros ruostumatonta terästä tai nikkelseosta. Soodakattiloissa käytetään AISI 304L tai Sanicro38/Alloy 825/HR11N -tyyppisellä pinnoitteella valmistettua compound-putkea, putken rakenne on esitetty kuvassa 1-1. Compound-rakenne voidaan valmistaa sekä pursottamalla että päälle hitsaamalla.





Kuva 1-1. Tyypillinen compound-putken rakenne

Tulistinmateriaalina voidaan käyttää compoundputkea, jolloin pintakerros voi olla esim. AISI 310 -tyyppinen. Tulistinolosuhteissa sisemmän komponentin tulee tietysti olla lujuutensa puolesta ko. lämpötilaan ja paineeseen sopivaa terästä. Eri pintamateriaalien koostumuksia on esitetty taulukossa 1-7.

Taulukko 1-7. Compound-putkien pintamateriaaleja

Materiaali	Cr %	Ni %	Mo %	Fe %	Mn %	Muut %
AISI 304L	17 – 19	9 - 12	-	bal.	1.3	-
AISI 310	24 – 26	19 - 22	-	bal.	1.77	-
Alloy 825 (Sanicro38)	19 - 23.5	38 - 46	2.5 - 3.5	bal.	0.8	Cu: 1.7, Ti: 0.8
HR11N	27 – 31	38 - 46	0.5 – 1.5	bal.	≤ 2.0	N
Sanicro 28	27	31	3.5	bal.	≤ 2.0	1.0 Cu
Sanicro 63	21	bal.	8.5	3.0	0.5	Nb: 3.5
Sanicro 67	30	60	-	bal.	≤ 0.5	Co: <0.05
Super 625	20 – 23	bal.	-	≤ 5.0	≤ 0.5	W: 3.15 – 4.15, Al: 0.4, Co: ≤ 1.0

Compound-putket valitaan kuhunkin sovellutukseen lujuuslaskujen ja korroosio-näkökohtien perusteella. Lujuuslaskuissa painetta kantavaksi seinämäksi otetaan ainoastaan “musta” osuus. Compound-putkien koestus- ja muut vaatimukset on esitetty sisäosan osalta standardissa EN 10216-2, lisäksi on noudatettava kattilastandardia EN 12952-2 Annex C vaatimuksia sekä valmistajan spesifikaatiota. Compound-putkien käsittelyssä tulee huolehtia siitä, että pintakerrosta ei vahingoiteta ja että voimakas kontakti hiiliterästyökaluihin estetään.

1.3 Materiaalit käyttökohteen mukaan

Soodakattilan käyttöolosuhteet ovat rakennemateriaalien kannalta erittäin vaativat. Lämpötilat ovat korkeat, poltettavassa mustalipeässä on sekä klorideja että rikkiyhdisteitä ja tietyt aineet (Cl, K, S) rikastuvat käytön aikana putkien pintaan, vaikuttavia aineita on kattilassa niin kiinteässä, sulassa kuin kaasumaisessakin muodossa ja korkeita paikallisia jännityksiä esiintyy kattilan eri osissa putkirakenteesta ja paikallisista lämpötilan nousuista johtuen.

Soodakattilan lämpöpintojen materiaalivalinta onkin tasapainottelua käyttöominaisuuksien ja kustannusten välillä. Korkea tuorehöyryn lämpötila ja paine mahdollistavat rakennusasteen nostamisen, mutta vaativat samalla kestävämpiä materiaaleja. Soodakattilassa vallitsee useita lämpötilatasoja ja lämmönsiirtopinnoilla vauriomekanismit vaihtelevat, joten materiaalivalinnassa kullekin kattilan osalle on



huomioitava kohteen olosuhteet ja vauriomekanismien riskit. Muita valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. materiaalin kemiallinen koostumus, materiaalin lujuusominaisuudet, valmistettavuus, valmistusmenetelmien (kylmämuokkauksen, hitsauksen tai herkistymisen) vaikutukset korroosionkestävyyteen ja hinta. Koska soodakattilassa vallitsevat korrodoivat olosuhteet, valitaan usein suuri seinämänpaksuus niin, että saadaan suuri syöpymisvara.

Kompound-pohjaputkien yleisin vauriomekanismi on säröily. Kompound-putkien säröilyä esiintyy soodakattilan alaosassa tyypillisesti kolmessa eri paikassa: pohjanputkissa sekä ilma- ja sula-aukoissa. Säröilyn syynä on pidetty sekä termistä väsymistä että jännityskorroosiota. Väsyttävää kuormitusta aiheuttavat lämpötilan vaihtelut käytön aikana ja jännityskorroosiolle välttämätön ympäristö voi olla pesunaikainen vesiliuos ja kostea suola

Käytönaikainen sulfidikorroosio on toinen tärkeä soodakattilan tulipesän korroosiomekanismi, sillä pelkistävässä olosuhteissa metallin ja rikkivedyn reagoidessa syntyvä sulfidikerros heikentää metallia suojaavia oksidikerroksia.

Tulistinalueella korroosio-olosuhteet ovat vaikeat. Syynä tähän on mustalipeän polton seurauksena syntyvät alkalikloridit- ja rikkiyhdisteet, jotka tulistinpinnoille kertyessään aiheuttavat tulistinputkien syöpymistä. Korroosion lisäksi kerrostumat aiheuttavat kattilan tukkeutumista, joka puolestaan johtaa kasvaneeseen nuohoustarpeeseen. Korroosioon vaikuttavat ennen kaikkea tulistinputkien pintaan syntyvien kerrostumien sulamisalue sekä materiaalin lämpötila. Kloridit ja kalium ovat oleellisia aineita erityisesti kerrostumissa (ja lipeässä), sillä kalium laskee voimakkaasti kerrostuman sulamislämpötilaa ja kloori aiheuttaa nopean korroosion. Rikkivety (H_2S) ja polysulfidit aiheuttaa sulfidikorroosiota.

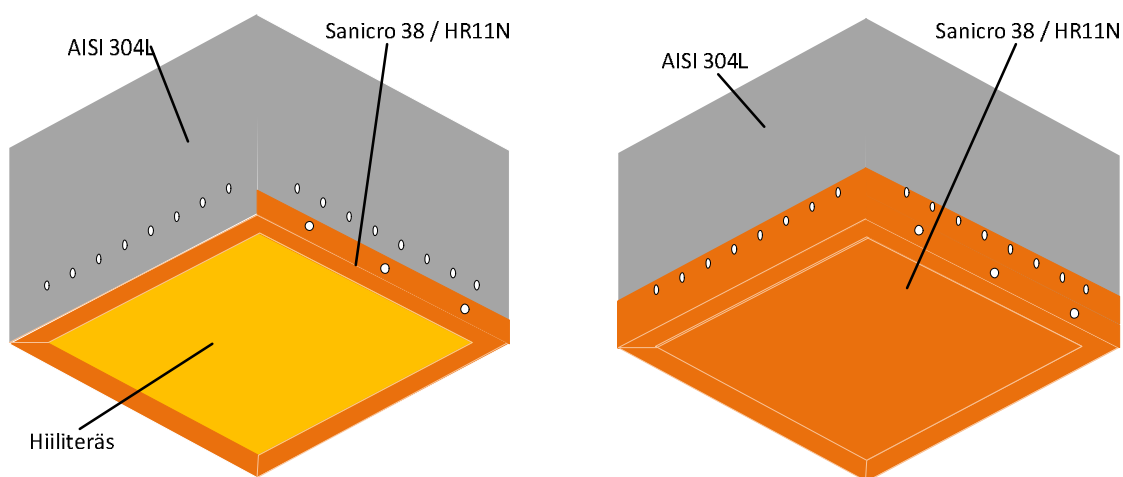
Edellä mainituissa olosuhteissa on kiinnitettävä erityistä huomiota materiaalin valintaan ja siihen, että materiaalin lämpötila pidetään mahdollisimman alhaisena.

Vesikiertojen sulkeminen aiheuttaa edellä mainittua haitallisten aineiden rikastumista mm. mustalipeään, mikä tulee ottaa huomioon materiaaleja valittaessa.

Seostamattomien ja matalaseosteisten terästen korroosiosuojana voidaan käyttää myös erilaisia pinnoitteita.

1.3.1 Pohja

Nykyisin soodakattilan tulipesän pohjan compound materiaalina käytetään tavallista ruostumatonta terästä (AISI 304L) tai paremmin korroosiota kestävästä nikkeliseosta kuten Sanicro38/ HR11N. Compound-putkien sijasta yleensä käytetään hiiliterästä, jota käytetään pohjan keskiosissa. Compound-putkimateriaalit voidaan valmistaa joko perinteisesti pursottamalla ja valssaamalla tai pinnoitushitsaamalla. Esimerkki tulipesän alaosan materiaalivaihtoehtoista on esitetty kuvassa 1-2.



Kuva 1-2. Esimerkki tulipesän alaosan putkimateriaaleista

Japanissa soodakattilan tulipesän materiaalina käytetään ferriittistä ruostumatonta hitsauspinnoitetta 18% Cr tai 25% Cr. Ferriittisten ruostumattomien terästen ongelmana pidetään materiaalin taipumusta haurausilmiöihin. Soodakattilan käytön kannalta suurin pelko kohdistuu 475 °C-haurauteen ja sigma-haurauteen. Tällöin teräksen kromi rikastuu paikallisesti sigma-faasiksi, joka kohottaa voimakkaasti materiaalin lujuutta ja alentaa sitkeyttä. Stabiloivien seosaineiden (Nb, Ti, Al) käytön avulla on ollut mahdollista pienentää ferriittisten ruostumattomien terästen raekokoa merkittävästi ja eliminoida haurastumistaipumus.

Termisen väsymisen kannalta paras compound-materiaali on sellainen, jonka lämpölaajenemiskerroin on mahdollisimman lähellä hiiliterästä. Myös jännityskorroosioriski pienenee lämpölaajenemiskertoimien erojen pienentyessä. Lisäksi materiaalin lämmönsiirtokerroin tulee olla suuri, jotta lämpö johtuu pinnasta hiiliteräkseen ja sitä kautta kiertoveteen, eikä materiaaliin synny sisäisiä lämpötilagradientteja.

1.3.2 Seinät



Nykyisin soodakattiloiden tulipesän alaosan seinät ylimpään ilmatasoon asti ovat rakennettu joko compound-materiaalista (304L, Sanicro 38/HR11) tai päällehitsatusta materiaalista. Yläosissa käytetään seostamatonta hiiliterästä esim. P235GH, P265GH tai niukkaseosteisia teräksiä esim 16Mo3.

Hiiliteräksen ja compound-putken rajalla pohjalla ja seinällä on galvaanisen korroosion riski. Lisäksi yläosassa olosuhteet vaihtelevat pelkistävän ja hapettavan välillä.

1.3.3 Kammiot, aukot, läpiviennit, kourut, massaukset

Kammiot valitaan kuten putket. Voimakkaalle korroosiolle alttiissa osissa, kuten erilaisissa läpivienneissä tms. heikommin jäähdytetyissä osissa, tulee kiinnittää erityistä huomiota niiden korroosion-kestävyyteen, jäähdytykseen ja suojaukseen. Monesti korroosionopeutta ei voida kovinkaan paljon pienentää millään toimenpiteillä, jolloin osa joudutaan vaihtamaan tai korjaamaan huoltoseisokeissa määrä ajoin.

Primääri-ilma-aukkojen ohitusputkissa käytetään yleensä compoundia (304L, Sanicro 38/HR11N) tai päällehitsattua materiaalia. Joskus compoundista valmistetuissa ohitusputkissa on havaittu säröilyä. Säröily on lähes yksinomaan ollut termistä väsymistä, jotkut säröt ovat olleet tyypiltään jännityskorroosion aikaansaamia. Materiaalivalinnan lisäksi säröilyyn voidaan vaikuttaa lipeän ruiskutuksella sekä ilmasuihkun hallinnalla.

Primääri-ilmasuuttimina käytetään nykyään valusuuttimia, standardimateriaalina on GRP 400 (pallografiittirauta), jolla on hyvä sitkeys verrattuna suomugrafiittiin ja hyvä lämmönjohtavuus verrattuna seostettuihin materiaaleihin. Tarkka sovitus ja tiivistys massalla ovat huomioitavia asioita suuttimia asennettaessa. Uusiminen on helppoa, ei tarvita hitsausta eikä hiontaa. Myös korkeaseosteisia materiaaleja voidaan käyttää mutta hinta on moninkertainen.

Hitsattujen levysuuttimien on todettu syöpyvän korkeiden lämpöpiikkien aikana.

1.3.4 Verho



1.3.5 Verhoputkia käytetään ensimmäisenä lämpöpintana tulipesän jälkeen suojamaan tulistimia säteilylämmöltä sekä vähentämään carryoverin määrää. Verhoputket valmistetaan yleensä hiiliteräksestä koska lämpötila on lähellä seinäputkien lämpötilaa. Korroosio on vähäistä johtuen materiaalin lämpötilasta. Tulistin

Tulistimien materiaalinvalinnassa joudutaan tasapainoilemaan yhtäältä materiaalien korroosionkestävyyden ja toisaalta niiden hinnan välillä. Perinteisesti tulistimien korroosio-ongelmat minimoidaan pitämällä tulistimien materiaalilämpötilat alle lämpötilan T_0 , jossa ensimmäiset sulapisarot syntyvät kerrostumiin. Kerrostumien ominaisuudet ja niiden korroosiovaikutus voidaan laskea kun tiedetään lipeäanalyyysin lisäksi mitä lipeälle tapahtuu tulipesässä ja millaista lentotuhkaa syntyy.

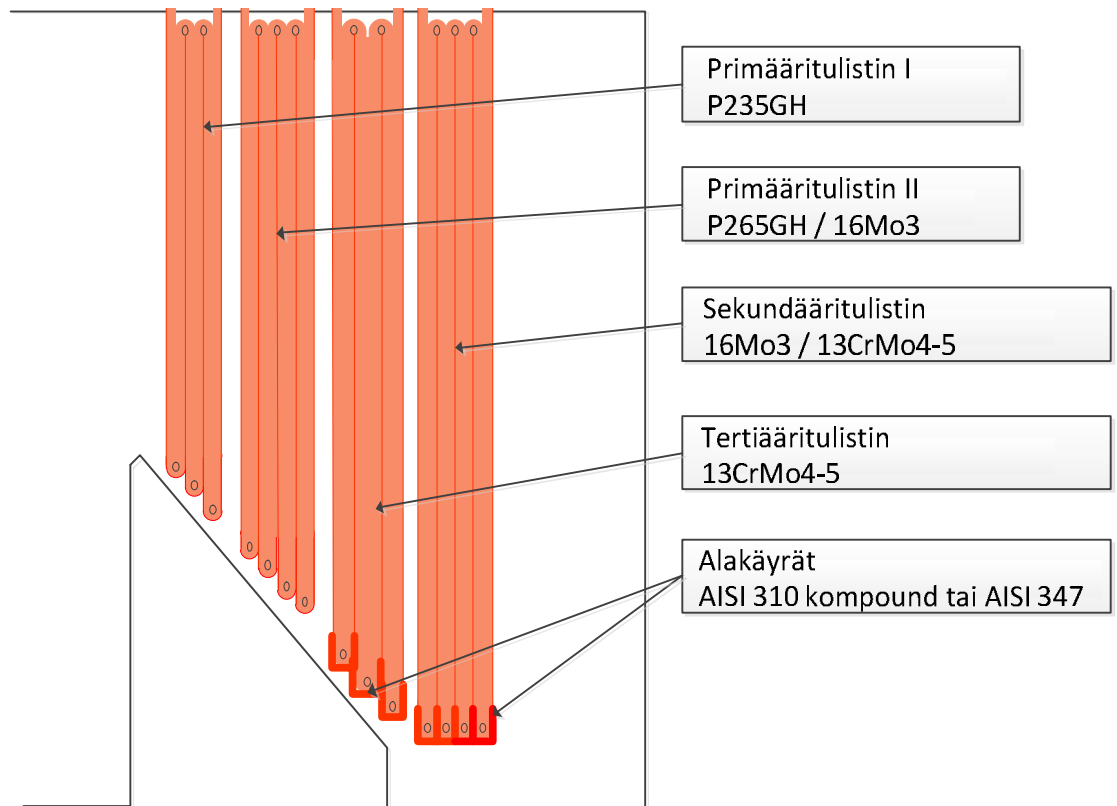
Pyrittäessä korkeampiin höyrynlämpötiloihin ja paineisiin täytyy käyttää paremmin korroosiota kestäviä materiaaleja sekä parantaa kloori- ja kaliumpitoisuuksien hallintaa. Korroosionopeus ei aina ole suoraan kääntäen verrannollinen käytettyyn rahamäärään. Parhaimmat tulistinmateriaalit voivat olla yli kymmenen kertaa kalliimpia kuin perinteiset materiaalit, mutta korroosionkesto saattaa joissakin tapauksissa olla vain 2-3 kertainen.

Tulistinkorroosiota voidaan tehokkaasti vähentää myös tulistimien sijoituksella. Yleensä säteilyn alla tulistimien korroosio on voimakkaampaa kuin konvektiopuolella. Tämä johtuu käytännössä siitä, että säteilypuolella materiaalilämpötilat ovat noin 15-20 °C korkeampia kuin konvektiopuolella. Sijoittamalla tulistimet joko nokan taakse tai käyttämällä tulistimien edessä verhoputkia, voidaan korroosiota vähentää oleellisesti. Verhoputket vähentävät myös merkittävästi tulistimille tulevaa carryoverin määrää pienentäen samalla tulistimien korroosioriskiä.

Tulistimissa käytetään yleensä useita eri terässeoksia jolloin tulistimien korroosiokestävyys ja hinta voidaan optimoida. Materiaaleina käytetään kuumalujia seostamattomia/niukkaseosteisia teräksiä tai ruostumattomia teräksiä monoputkena, compoundputkena tai päällehitsattuna. Eniten korroosiolle alttiita alueita ovat tulistimien kuumimmat osat sekä tulistimien putkikäyrien alaosat, jotka ovat tulipesän suoran säteilylämmön kohteena.

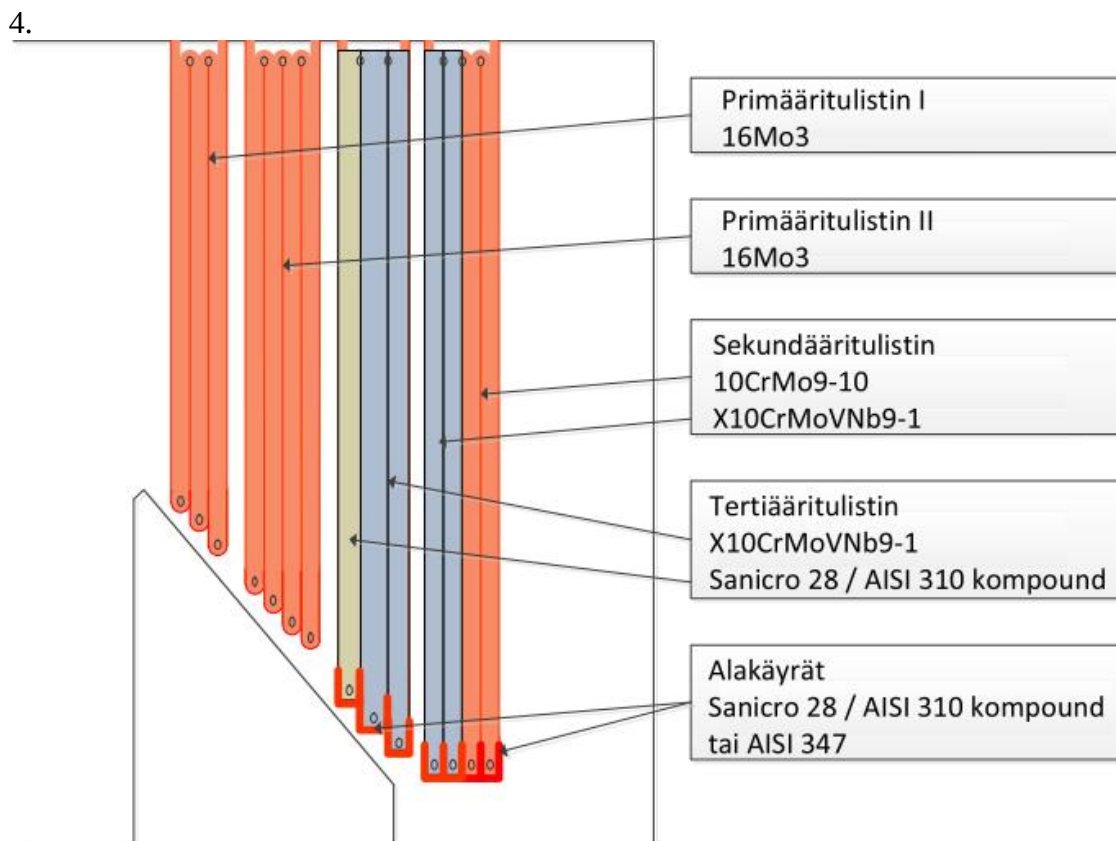
Perinteisesti soodakattiloiden primääritulistimissa on käytetty hiiliterästä (esim. P235GH, P265GH). Sekundääri- ja tertiääritulistimet on valmistettu Cr-Mo teräksistä (esim. 16Mo3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10). Tulistinputkien alakäyrissä on käytetty

materiaalina austeniittista ruostumatonta terästä esim. AISI 347 tai kompondia esim. AISI 310. Esimerkki perinteisistä tulistinmateriaaleista on esitetty kuvassa 1-3.



Kuva 1-3. Esimerkki perinteisistä tulistinmateriaaleista

Parempaan lujuuteen ja/tai suurempaan korroosiovaraan vuoksi hiiliteräsputket voidaan korvata primääritulistimissa esim. 16Mo3-materiaalilla. Sekundääritulistimen kuumimmissa osissa niukkaseosteisten teräksien sijaan käytetään runsasseosteisia teräksiä esim. X10CrMoVNb9-1 ja tertiääritulistimissa kompond-materiaalia, jossa on pinnoitteena esim. AISI 310 tai Sanicro 28. Alakäyrissä käytetään esimerkiksi austeniittista AISI 347 umpiputkea tai AISI 310 sekä Sanicro 28 kompondia. Esimerkki parempaan lujuuteen ja/tai suurempaan korroosiovaraan tulistinmateriaaleista on esitetty kuvassa 1-



Kuva 1-4. Esimerkki paremman lujuuden / suuremman korroosiovaran tulistinmateriaaleista

Kompound-materiaalien käyttöä puoltaa se, että sisämateriaalina voidaan käyttää kuumalujia teräksiä (esim. 10CrMo910), joiden höyrypuolen käyttäytyminen on tunnettua. Lisäksi compoundissa ulkopuolinen särö pysähtyy yleensä rajapintaan. Compound-materiaalin sisämateriaali valitaan maksimikäyttölämpötilan ja virumiskestävyyden perusteella. Pinnoite valitaan korroosionkeston perusteella. Pinnoitteen valinnassa ei viruminen näyttele merkittävää osaa.

Putkien lisäksi tulee kiinnittää huomiota tulistinsiteiden konstruktion ja materiaaliin. Siteiden kesto ja materiaalin valinta riippuu suuresti putkien välisestä etäisyydestä ja sidekonstruktiosta eli putken kyvystä jäähdyttää sidettä sekä kerrostuvan suolan koostumuksesta. Jos eri tulistimissa putkien välinen etäisyys on sama, voidaan käyttää samaa tulistinsidettä. Mitä alhaisemmassa lämpötilassa sulavia kerrostumia syntyy, sitä vaikeammat ovat korroosio-olosuhteet ja sitä paremmin on huolehdittava siteiden jäähdytyksestä ja sitä suurempi huomio on kiinnitettävä materiaalin valintaan.

1.3.6 Ekonomaiseri



Ekonomaisierissä lämmitetään höyrystimeen menevää vettä alle kylläisen lämpötilan(noin 250–300 °C), jolloin ekonomaiserin putkimateriaalin pintalämpötila pysyy melko alhaisena. Ekonomaiseri sijoitetaan kattilassa tulistimien jälkeen takavetoon, jossa savukaasujen lämpötila on noin 400-450- °C. Verrattain alhaisista lämpötiloista ja veden hyvästä jäähdytysvaikutuksesta johtuen ekonomaiserin materiaalina käytetään yleensä tavallista hiiliterästä.

1.3.7 Lieriö

Lieriön kohdalla menetellään kuten edellä eli lujuuslaskujen ja paineastiamääräysten perusteella valitaan sopiva materiaali. Lieriömateriaalille vaaditaan standardin vaatimien koestusten lisäksi kerrostumatarkastus. Lieriömateriaalia valittaessa on syytä punnita eri vaihtoehtojen lujuuksia ja säröilyalttiutta (ks. raportti VTT-MET C-206).

1.4 Hitsaus

Valmistajalla tulee olla laatujärjestelmä (esim. ISO 9001:n mukainen), jossa kuvataan menettelyt hitsausmenetelmien ja hitsaajien pätevöimiseksi, hitsauslisäaineiden tilaaminen ja käsittely, lisäaineiden jakelu tuotantoon ja palautus varastoon sekä hitsin tarkastuksesta ja dokumentoinnista. Painetta kantavien ja niihin liitettävien osien hitsaukseen tulee olla käytettävissä pätevöidyt hitsausohjeet ja hitsaajat. Konepajalla sekä paikan päällä tehdyn hitsauksen dokumentointi on tärkeää jäljitettävyyden takia. Lisäaineiden käsittelyn tulee tapahtua em. järjestelmän mukaan. Lisäaineiden tulee olla viranomaisen hyväksymiä.

Lämpökäsittelyuunien tulee olla kalibroituja samoin kuin mahdolliseen esilämmitykseen käytettävien laitteiden. Tämä koskee myös hitsauskoneita.

Itse hitsaustyö tulee suorittaa tarkoin kyseisen hitsausohjeen mukaan. On erittäin tärkeää, että seuraavat asiat tehdään oikein:

- teräslaadun valinta käyttöolosuhteisiin (löytyy hitsauspiirustuksesta)
- lisäaineen valinta perusaineelle ja käyttöolosuhteisiin (löytyy hitsauspiirustuksesta)
- lisäaineiden varastointi ja käsittely
- hitsattavan alueen puhtaus (erityisesti runsaasti seostetuilla)
- railosovitus
- esilämmitys
- hitsaus-parametrit



- hitsausohjeavot
- juurensuojaus
- hitsauksen jälkeiset käsittelyt

Esimerkkinä vaativasta hitsauksesta voidaan käyttää runsasseosteisen “X10”-teräksen (X10CrMoVNB9-1) hitsausta välijäähdytyksineen koska teräs on erittäin karkeneva ja hitsatussa tilassa hauras. Hitsaus edellyttää esikuumennuksen, välipalkolämpötilan eli palkojen välisen lämpötilan, välijäähdytyksen ja jälkihehkutuksen huolellista kontrollointia. Esikuumennus on yleensä vähintään noin 200 °C ja palkojen välinen enimmäislämpötila noin 300 °C. Hehkutusta ei saa tehdä kuitenkaan heti hitsauksen jälkeen, vaan hitsi on annettava jäähtyä lämpötilaan alle 100-150 °C eli reilusti alle Mf-lämpötilan, jotta metallurgiset mikrorakennemuutokset (jäännösausteniitin muodostuminen martensiitiksi) ehtivät tapahtua loppuun. Jos hehkutus tehdään suoraan hitsauksen jälkeen, muuttuu jäännösausteniitti martensiitiksi eli karkeneminen tapahtuu vasta hehkutuksen jälkeisen jäähtymisen aikana. Tällöin liitokseen jää päästämätöntä martensiittia, joka on melko haurasta ja halkeilualtista. Lisäaineen valinnassa on otettava huomioon rakenteen käyttöolosuhteet (korroosio-olosuhteet ja lämpötila) ja eheys (kuumahalkeiluherkkyys) sekä muut ominaisuudet, joita hitsiltä vaaditaan. Yleisohjeena on, että käytetään perusainetta koostumukseltaan vastaavaa lisäainetta. Käytännössä tällaisen lisäaineen seosainepitoisuudet ovat palohäviöiden ja suotautumisten kompensoimiseksi hiukan korkeampia kuin perusaineessa.

Hitsauksen ongelmakohtia voivat olla muun muassa:

- Materiaalien (esim. maalatut putket, hitsauslisäaineet) sekaantuminen keskenään
- Asennusolosuhteet:
 - lika ja ruoste hitsattavilla pinnoilla
 - kosteus hitsattavilla pinnoilla
 - kosteat hitsauspuikot
- Kokemattomat tekijät:
 - hitsauslisäaineen valinta
 - eripariliitosten hitsaus (erityisesti liitoksen lämpökäsittely ja lämpötilan seuranta)

Mikäli käytetään runsaasti seostettuja ferriittisiä teräksiä, ovat ne hitsauksen jälkeen (ennen lämpökäsittelyä) huoneenlämmössä hyvin hauraita, mikä on otettava huomioon niiden käsittelyssä.

Erityisesti ohutseinämäisten putkien evähitsauksessa on varottava läpipalamista, joka tehokkailla menetelmillä, kuten jauhekaarihitsauksella tapahtuu helposti



häiriötilanteessa. Käsien hitsattavilla eväosuuksilla tulee taata riittävä tunkeuma, mikä yleensä edellyttää viistettyä evää.

Hitsausstandardisarja EN 1011 (Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset) antaa yleiset ohjeet tuotannolle sekä hitsausten valvonnalle. Se käsittelee eri osissaan myös mahdollisia haitallisia ilmiöitä, joita eri materiaalien hitsauksessa voi esiintyä, ja antaa ohjeita niiden välttämiseksi:

- [SFS-EN 1011-1: Yleisohjeet kaarihitsaukselle](#)
- [SFS-EN 1011-2: Osa 2: Ferriittisten terästen kaarihitsaus](#)
- [SFS-EN 1011-3: Osa 3: Ruostumattomien terästen kaarihitsaus](#)
- [SFS-EN 1011-4: Osa 4: Alumiinin ja alumiiniseosten kaarihitsaus](#)

Kuumalujien terästen hitsausta ja siihen liittyviä asioita käsitellään standardissa: [SFS-EN 12952-5 Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot Osa 5 Paineellisten osien valmistus](#). Putkistostandardi SFS-EN 13480:

- [SFS-EN 13480-1 Osa 1: Yleistä](#)
- [SFS-EN 13480-2 Osa 2: Materiaalit](#)
- [SFS-EN 13480-3 Osa 3: Suunnittelu ja laskenta](#)
- [SFS-EN 13480-4 Osa 4: Valmistus ja asennus](#)
- [SFS-EN 13480-5 Osa 5: Tarkastus ja testaus](#)
- [SFS-EN 13480-6 Osa 6: Maahan asennettavien putkistojen lisävaatimukset](#)
- [SFS-EN 13480-7 Part 7: Guidance on the use of conformity assessment procedures](#)
- [SFS-EN 13480-7 Osa 8: Alumiini ja alumiiniseosteisten putkistojen lisävaatimukset](#)

1.4.1 Erikoishitsaukset

Eripariliitos, jota kutsutaan joskus myös sekaliitokseksi, on "hitsausliitos, jossa liitettävien perusaineiden mekaanisissa ominaisuuksissa ja/tai kemiallisissa koostumuksissa on merkittäviä eroja"

Ferriittisten terästen ("Musta/musta") –liitos

"Musta/musta" -eripariliitoksen ollessa kyseessä hitsataan erilaisia ferriittisiä (ml. myös martensiittiset) teräksiä toisiinsa. Yleissuositukset ovat seuraavat:

- lisäaine valitaan vähemmän seostetun teräksen mukaan
- esikuumennus ja välipalkolämpötila valitaan seostetumman (so. karkenevamman) teräksen mukaan
- jos tarvitaan jälkihehkutus, lämpötila täytyy sopia molemmille teräksille

Austeniittisen ja ferriittisen teräksen ("Musta/ruostumaton") liitos



Tällaisen ns. eripariliitoksen hitsauksessa on erityisesti huomioitava, että erilaisten terästen sekoittuessa toisiinsa syntyy helposti hauras rakenne. Tästä syystä on oltava erittäin huolellinen oikean lisäaineen ja hitsausmenettelyn valinnassa sekä itse hitsaustyössä. Seuraavia haitallisia ilmiöitä voi syntyä jos työ epäonnistuu:

- vetyhalkeilu
- kuumahalkeilu
- haurastuminen
- hiilen diffuusio
- terminen väsyminen

Koska eripariliitoksissa käytetyt lisäaineet ovat yleensä huomattavasti huonommin hitsattavia, on syytä tehdä tällaisista liitoksista mahdollisimman suuri osa konepajalla.

Kompound-putkien hitsauksessakin joudutaan tavallaan tekemään em. kaltainen eripariliitos, ja on luonnollista, että siihen on oltava omat erityisohjeet ja compound-materiaalilla pätevytetty hitsaajat.

Erityisesti on huomioitava, että pinnoitemateriaalia on kuorittava liitoksen läheltä niin, että se ei "mustaa" osuutta hitsattaessa pääse sekoittumaan hitsisulaan. Pintapalot hitsataan ns. yliseostetulla lisäaineella käyttämällä sellaisia hitsausmenetelmiä ja -parametrejä, että "mustan" hitsi- ja perusaineen sulaminen ja sekoittuminen pintakerrokseen on mahdollisimman vähäistä eikä luotettava liittyminen tämän vuoksi vaarannu. Yliseostetussa lisäaineessa on enemmän kromia ja nikkeliä, jotta sillä on varaa "laimentua" sekoittuessaan seostamattomaan teräkseen ja sekoittunut osuus pysyy austeniittisena. Hitsausta on käsitelty mm. Sandvikin raportissa "Welding of Sandvik Composite Tubes".

Evähitsauksessa on compoundia hitsattaessa varottava tunkeumaa putken hiiliteräsosaan, koska hiiliteräksen seostuminen evähitsiin vaikuttaa haitallisesti laatuun ja lujuuslaskut perustuvat ainoastaan hiiliteräsosan paksuuteen.

1.4.2 Päällehitsaus

Eroosion ja korroosion takia kuluneita putkia voidaan korjata lisäämällä seinämän paksuutta päällehitsauksella. Päällehitsauksella voidaan käyttää myös putkien pinnoittamiseen.



1.5 Lähteet:

Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilalaitoksen suojaussuositus 1997
60V00326-V070-001

Suomen Soodakattilayhdistys ry
Selvitys: Soodakattila tulevaisuudessa - materiaalivaihtoehtojen valinta osaprojekti
Pekka Pohjanne, VTT, Hannu Hänninen, TKK, ja Timo Kiesi, TKK.
Raportti 2/2005 (16A0913-E066)

Soodakattilapäivä 2000
Soodakattiloiden tulistinkorroosio
Keijo Salmenoja, Kvaerner Pulping Oy

Soodakattilapäivä 2011
Tämän päivän materiaalivalinnat soodakattiloissa
Johanna Tuiremo, Metso Power Oy

Kunnossapito – lehti 5/99 erikoisliite
Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus

Kunnossapito – lehti 10/98 erikoisliite
Kuumalujat teräkset ja niiden hitsaus



2 SOODAKATTILAPINNOITUKSET

Alkuperäinen teksti: Kari Korpiola, VTT Valmistustekniikka

Päivitetty teksti: Tommi Varis, VTT

2.1 Johdanto

Soodakattiloiden pinnoitukset keskittyvät useimmiten kohteisiin, joissa esiintyy paikallisesti korroosio-ongelmia. Pinnoitteiden käyttö vaihtelee laitoksittain. Kompound-putken käyttö on saattanut jonkin verran vähentää pinnoitteiden tarvetta ja pinnoitteiden tarve on tyypillisesti painottunut korjauspinnoituksiin. Pinnoitettavia kohteita soodakattiloissa ovat yleensä a) ”mustan” ja kompond-putken raja, jossa pinnoitteella estetään galvaanista korroosiota b) tulistinputkien mutkat, joissa pyritään estämään hapettumisen ja korroosion kautta tapahtuvaa ohenemista ja c) paikalliset kompond-putkien säröytymien korjaus.

Pinnoitusmenetelmien ja laitteistojen kehittyessä pinnoitteilla olisi nykyisin edellytykset tarjota kompond-putkelle vaihtoehtoinen kustannustehokas ratkaisu, jolla suojata kriittisiä alueita soodakattiloissa. Pinnoitteet ovat parhaimmillaan tiiviitä korroosiolta suojaavia kerroksia. Lisäksi terminen ruiskutus on monipuolinen ja joustava menetelmä valmistuksen ja materiaalikoostumuksen suhteen. Sillä voidaan valmistaa myös gradientti- tai kerrosrakenteita ja suhteellisen kustannustehokkaasti runsasseosteisia pinnoitteita, joita ei kompond-putkiksi ole taloudellisesti tai teknisesti järkevää valmistaa. Pinnoitteet tarjoavat mahdollisuuden käyttää erilaisia strategioita materiaaliongelmiin ratkaisemiseksi. Jalompia ja kalliimpia materiaalivehtoehtoja voidaan suunnitella vain korroosiosuojausta silmälläpitäen putkimateriaalin pinnalle.

Termiseen ruiskutukseen liittyy monia prosesseja, joilla kaikilla on omat erityispiirteensä ja lisäksi materiaalivehtoima on runsasta ja kokemukset pinnoitteista saattavat olla hyvin vaihtelevia. Termisesti ruiskutetuilla pinnoitteilla on oma erityinen lamellimainen rakenteensa, eikä niiden vaurioituminen tapahdu yleensä samoin kuin putkimateriaalien tuhoutuminen; hapettumalla pinnasta ja oksidikerroksen irtoamisen kautta. Näin ollen pinnoitteiden elinikää saattaa olla hyvin vaikea ennustaa. Tämän johdosta pinnoitusten käyttö, pinnoitusprosessin ja pinnoitemateriaalin valinta ei ole yksiselitteistä ja vaatii runsaasti tietotaitoa ja



vuoropuhelua kattilan käyttäjän, valmistajan ja pinnoitteen toimittajan välillä erityisesti soodakattiloissa.

2.2 Ruiskutusmenetelmät

Termisesti ruiskutetut metalliset pinnoitteet tehdään ruiskuttamalla sulaan tilaan kuumennettu pinnoitemateriaali kaasuvirtauksen avulla pinnoitettavaan pintaan. Sula materiaali jähmettyy pinnoitettavan materiaalin pinnalla ja muodostaa suojaavan kalvon, joka on paksuudeltaan 0,1–1,5 mm. Terminen ruiskutus pitää sisällään monia ruiskutusprosesseja kuten kaariruiskutus, liekki-ruiskutus, plasma ruiskutus, suurnopeusliekkiruiskutus (High Velocity Oxy-Fuel, HVOF ja High Velocity Air-Fuel, HVOF) ja kylmäruiskutus. [1]

Valokaariruiskutuksessa tai lyhyesti *kaariruiskutuksessa* (Wire arc) pinnoittaminen tehdään kuumentamalla lankamainen metalli sähkövalokaaren avulla sulaan tilaan ja puhaltamalla se paineilmalla kohteen päälle.

Suurnopeusliekkiruiskutuksessa jauhemainen lisäaine (metallinen tai keraaminen pinnoitemateriaali) kuumennetaan hapen ja poltтокаасун avulla sulaan tilaan rakettimootorin periaatteella toimivassa polttimessa. Menetelmää kutsutaan lyhyesti *HVOF-ruiskutukseksi* (High Velocity Oxy Fuel). Menetelmän etuna on pidetty sillä aikaansaattavia hienorakeisia erityisen tiiviitä pinnoitteita. *HVOF-ruiskutus* (High Velocity Air Fuel) on muunnelmä HVOF-ruiskutuksesta ja siinä käytetään hapen sijaan ilmaa, jolloin muodostuva liekki on kylmempi.

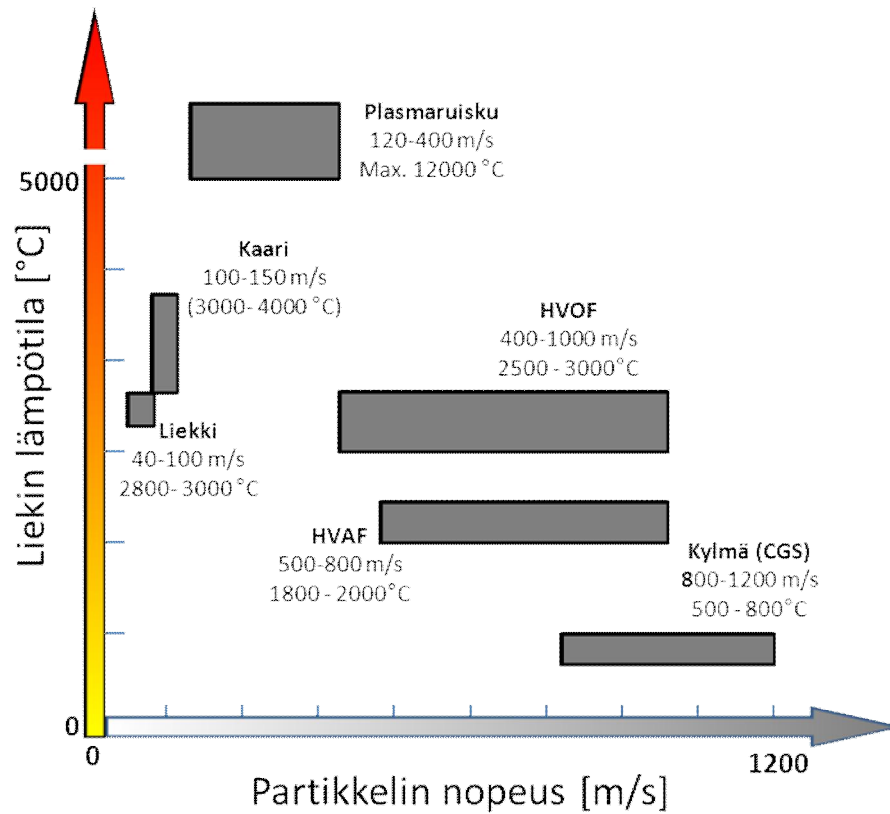
Plasmaruiskutuksessa sähkövalokaari kuumentaa kaasun noin 10 000 °C:ksi. Kuuma polttimesta suihkuava kaasu kuumentaa ja sinkoaa tällöin jauhemaisen pinnoitteen pinnoituskohteeseen, jonka päällä sulapisarot jähmettyvät.

Kylmäruiskutus on menetelmä, jossa jauhepartikkelit lämmitetään ja kiihdytetään suuttimessa. Kylmäruiskutuksessa ei ole liekkiä, vaan kaasu (ilma, typpi tai helium) kuumennetaan esilämmittimessä noin 500–800 °C lämpötilaan.

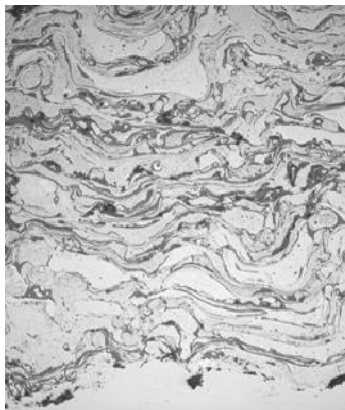
Edellä kuvattuja menetelmiä käytetään kattiloissa niiden ruiskutusnopeuden, laadun ja taloudellisuuden vuoksi. Markkinoilla on myös muita ruiskutusmenetelmiä, jotka eivät sovellu kattilaolosuhteisiin taloudellisista tai teknisistä syistä, kuten liekki-ruiskutus.



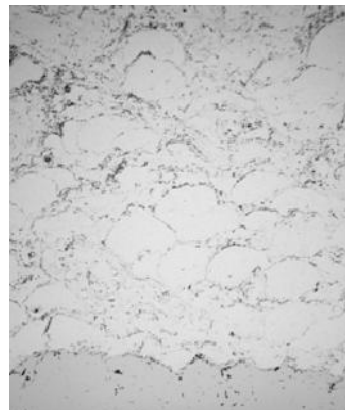
Ruiskutuslisäaineiden valikoima on suuri. Pinnoitteiden ominaisuudet ovat aina kombinaatio materiaalista ja valmistusprosessista. Samaa materiaalia voidaan valmistaa useilla eri menetelmillä, mutta sen ominaisuudet ovat riippuvaisia käytetystä prosessista. Ruiskutuspartikkelien lämpötila ja nopeus määrittävät suurelta osin pinnoitteen ominaisuudet. Kuvassa 3-1 on esitetty eri ruiskutusmenetelmien liekinlämpötila ja partikkelinopeus. Voidaan ajatella, että mitä nopeammaksi pinnoitettavat partikkelit kiihtyvät sitä tiiviimpi pinnoitteesta muodostuu. Ruiskutusprosessissa tulee olla riittävästi lämpöä materiaalin sulattamiseksi, mutta liiallinen lämpö lisää esimerkiksi metallisen materiaalin hapettumista ruiskutuksen aikana. Kuvassa 3-2 on esitetty eri ruiskutusmenetelmillä valmistettu NiCr-pinnoite, ja huomionarvoista on, että eri ruiskutusmenetelmillä saadaan aikaan varsin erilainen pinnoiterakenne. Viimeisimmät HVOF ruiskut kuten CJS (carbide jet spray) samoin kuin HVOF ruiskut tuottavat erittäin tiiviin ja lähes hapettoman pinnoiterakenteen. Hieman tätä vanhemmilla HVOF menetelmillä kuten DJ-Hybridillä saavutetaan myös erinomainen pinnoitelaatu, vaikka happipitoisuus on hieman korkeampi. Myös kaariruiskuttamalla aikaansaadaan suhteellisen korkeasta huokoisuudesta riippumatta melko hyvä suojaavuus, koska ruiskutusmateriaalin sulamisaste on korkea, jolloin muodostuu voimakkaasti lamellimainen rakenne, jossa lamellien välinen kiinnittyminen on hyvä. Yleisesti ottaen HVOF ja HVOF menetelmillä saavutetaan kuitenkin ylivoimainen pinnoitteen tiiveys.



Kuva 2-1. Eri prosessien tuottama ruiskutuspartikkelien nopeus ja liekin lämpötila-alue.



a)



b)



c)

Kuva 2-2. Ni50Cr-pinnoitteen mikrorakenne ruiskutettuna kolmella eri prosessilla a) kaariruiskutus-, b) DJ Hybrid HVOF- ja c) CJS HVOF-prosessilla.

2.3 Pinnoitemateriaalit

2.3.1 Rautavaltaiset pinnoitteet



Rautavaltaisia pinnoitteita pidetään yleensä kustannustehokkaina pinnoitevaihtoehtoina. Polttokattiloissa käytetyt materiaalit voivat olla korkealämpötilateräksiset kuten FeCr, FeCrMo, FeCrNi and FeCrAl. Lähtökohtana kattilaoolosuhteisiin on, että rautavaltaiset pinnoitteeseen seostetaan joko kromia tai alumiinia tai molempia, jotta saadaan suojaava oksidikerros hapettumista ja korroosiosta vastaan. Fe-Cr -seokset ovat hyvin tunnettuja korroosionsuojausta vaativissa kohteissa korkeissa lämpötiloissa. Rikkikorroosiota vastaan suhteellisen korkeat kromipitoisuudet (yli 26 %:a) on havaittu olevan hyödyllisiä. Huomattavaa on, että yli 13 %:a Cr sisältävät seokset ovat tasapainon mukaisesti austeniittisia, mutta termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden kohdalla, jäähtymisnopeuden ollessa suuri, kromipitoisuuden kasvattaminen lisää amorfisuustaipumusta. [2,3,4]

Käytettäessä alumiini-seostusta, riittävän suuri alumiinipitoisuus on tärkeää FeAl-materiaalien korroosionsuojaavuuden kannalta.[5] Jos alumiinioksidikerroksen suojaavuus on puutteellinen, pääsee rikki tunkeutumaan sen läpi ja johtaa erittäin suureen korroosionopeuteen. Jos käytetään alle 5 % alumiinipitoisuutta päädytään helposti yhtenäisen sulfidikerroksen kasvamiseen materiaalin pinnalle. FeAl-seoksien, jotka sisältävät 5–10 paino-% alumiinia, on raportoitu omaavan erittäin hyvän rikkikorroosion keston rikkipitoisessa ympäristössä (0.1% H_2S -3.0% H_2 -Ar 600°C, 50 h). Tarvittavan alumiinipitoisuuden, jolla voidaan merkittävästi pienentää FeAl-seoksen korroosiokestävyyttä 100 % H_2S :ssa on havaittu olevan noin 10 % 600 ja 700 °C:ssa ja hieman matalampi 400 °C:ssa [6]. Kuitenkin on havaittu, että noin 3–5% Al lisäys Fe–17Cr seoksen saa aikaan parantuneen rikkikorroosionkeston. Tästä suurempi alumiinipitoisuuden lisäys, lisää rikkikorroosionkestoja vielä enemmän 800 °C:ssa. Suuremmilla alumiinipitoisuuksilla (yli 11 %) alkaa muodostua rauta-alumiini yhdisteitä (Fe₃Al or FeAl), jotka menestyvät hyvin rikkipitoisissa ympäristöissä. Niillä on myös hyvä hapettumisen kesto korkeissa lämpötiloissa, hiilettymisen kesto ja suolasulankesto. Fe₃Al- tai FeAl-metallien väliset yhdisteet ovat kuitenkin suhteellisen hauraita, joten niiden soveltamiseen on suhtauduttava pienellä varauksella. [7].

Yleisesti ottaen Fe-Cr-Al – pinnoitteilla on suhteellisen hyvä hapettumiskestävyys, mutta ilman kovia partikkeleja niiden eroosiokestävyys jää huonoksi. Eroosiokestävyyden parantamiseksi voidaan lisätä karbidin tai boridien muodostajia. Suhteellisen pitkään on kattiloissa sovellettu kaariruiskutettuja rautavaltaisia



materiaaleja (esim. Armacor), joissa on Fe-15–25 % Cr matriisissa kovia Cr-, W- ja boridi-faaseja. Näiden pinnoitteiden suuri lujuus perustuu nanokokoisiin borideihin tai karbideihin. Pinnoitteet ovat usein myös osittain amorfisia. Nytemmin on kehitetty myös täysin amorfisia rautavaltaisia pinnoitteita, joissa mm. wolframi- ja booripitoisuutta on lisätty, mikä edesauttaa pinnoitteen muodostumista amorfiseksi. Amorfisen rakenteen etuna on, että siinä diffuusion oletetaan olevan nopeampaa kuin kiteisissä materiaaleissa. Lisäksi pinnoitteen kovuus on jo ruiskutettuna erittäin suuri, noin 1100 HV. Pinnoitteen kovuus lisääntyy edelleen karbidien ja boridien erkautuessa (kiteytyessä) 600–650 °C:n lämpötilassa, mutta tämä ei välttämättä ole suotuisaa korroosiokestävyyden kannalta ”matriisiin” köyhtyessä kromista. [8,9,10,11]

2.3.2 Nikkelivaltaiset pinnoitteet

Nikkelivaltaisia materiaaleja kuten NiCr, NiAl, NiCrAl ja NiCrSi käytetään yleensä komponenteissa, joissa tarvitaan hyvää kulumiskestävyyttä yhdistettynä hapettumis- ja korroosionkestoon. [2,3,4]. Näidenkin materiaalien suojaavuus perustuu suojaavan oksidikerroksen syntymiseen. Nikkelivaltaiset materiaalit seostettuna noin 20 %:a kromia kestävät hapettumista tyypillisesti 800 °C:een saakka. Lisäksi Ni-Cr –seosten lämpölaajenemiskertoimet ovat hyvin lähellä teräksiä. Tunnettuja seoksia ovat esim. Inconel 625 ja Ni20%Cr. Kirjallisuudesta voidaan löytää muutamia erilaisia lähestymistapoja, joilla parannetaan nikkelivaltaisten seosten korroosio- ja eroosiokestävyyttä kattilasovelluksiin, joista erityisesti suuren kromipitoisuuden omaavat Ni-seokset ja nikkelivaltaiset sulautuspinnoitteet ovat potentiaalisimpia. [8,12,13,14]

Korkean kromipitoisuuden materiaalit (aina 50 %:iin saakka) on todettu olevan yksi parhaista materiaaleista kloori- ja rikkikorroosiota vastaan. Kromioksidikerros on suojaava ja uudistuskykyinen, eikä rikkikorroosio pääse etenemään oksidikerroksen läpi. Matalakromisilla seoksilla, kuten Inconel 625, on kromioksidin suojaavuuden kanssa ongelmia erityisesti lämpötiloissa, joissa suolasulia pääsee muodostumaan [15]. NiCr-pohjaisten materiaalien suolasulan kestävyttä voidaan parantaa seostamalla niihin oksidia stabiloivaan seosainetta, esim. alumiinia tai piitä (NiCrAl, NiCrBSi, NiCr-MoBSi), jolloin oksidikalvon liukeneminen sulaan vaikeutuu. Korkeampikromisilla nikkeliseoksilla on havaittu, että yli 550 °C:n lämpötiloissa ja suurilla klooripitoisuuksilla pinnoitteeseen syntyvä kromioksidi ei ole suojaava ja

lisäksi kromin on todettu olevan suhteellisen herkkä aktiiviselle korroosiolle esim. rautaan ja nikkeliin verrattuna, jolloin kloori pääsee hyökkäämään pinnoitteiden lamellirajoja pitkin syvemmälle pinnoitteeseen. Vastaavasti voidaan olettaa olevan rikin tapauksessa [8,12]

Pinnoitteiden tiiveyttä voidaan parantaa sulautuskäsittelyllä, jossa tyypillisesti NiCrBSi-seos lämpökäsitellään tiiviiksi. Pii- ja booriseostuksen vaikutuksesta pinnoitteen sulamisalue voidaan laskea merkittävästi alle putkiteräksen, jolloin pinnoite voidaan lämpökäsitellä noin 1100 °C puuroalueella täysin tiiviiksi rakenteeksi. Sulautuspinnoitteiden kovuutta voidaan lisätä esimerkiksi W, Cr ja hiili seostuksella, jolloin seokseen erkautuu sulautuskäsittelyn yhteydessä karbideja. [16]

2.3.3 Kaupalliset pinnoitemateriaalit

Ruiskutusmateriaalien valmistajien kattilamateriaaleiksi tarjoamat vaihtoehdot sekä muut mahdollisesti potentiaaliset materiaalit on koottu taulukkoon 2-1, jossa kattilamateriaalit on luokiteltu karkeasti eroosiosuojamateriaaleihin tai korroosiosuojamateriaaleihin. Taulukkoon on haettu jauhevalmistajien esitteistä sellaisia materiaaleja, joiden sovelluskohteiksi on mainittu joko kattilasovellukset tai hapettumisen kesto.

Taulukko 2-1. Joitain esimerkkejä termisen ruiskutuksen materiaalitoimittajien tarjoamista kattilamateriaaleista.

Materiaali-ryhmä	Koostumus	Valmistaja	Nimike	Pinnoitus-prosessi	Olosuhde
Fe-valtaisia					
Fe-Cr-Al	Fe-20-25Cr-4-6Al	Kanthal	SW 010	Kaariruisku	Korroosio
Fe-Cr	Fe 29Cr 3.7B 1.7Mn 1.4Si	Praxair	95 MXC	Kaari	Eroosio-korroosio
Fe-Cr (amorphous)	Fe-25Cr-15Mo-5B-5W-2C-2Si	Nanosteel	SHS 7150	Kaari	Eroosio-korroosio (Biomassa kattila)
Fe-Cr (amorphous)	Fe-30Cr-10Mo-5B-4W-2C-2Mn-2Si	Nanosteel	SHS 7174	Kaari	Eroosio (SFBC kattila)
Fe-Cr (amorphous)	Fe-22Cr-5B-5Mo-5Nb-2C-1Mn-1Si	Nanosteel	SHS8000	Kaari	Eroosio-korroosio
Fe-Cr (amorphous)	Fe-25Cr-20Mo-10W-5B-5Mn-3C-2Si	Nanosteel	SHS7574	HVOF	Korroosio Cl-ympäristö
Ni-valtaisia					
Ni-20Cr	Ni20Cr	Höganäs	1616-02	HVOF	Korroosio
Ni-50Cr	50Ni49Cr1Fe, Ni50%Cr	Praxair Sulzer Metco	1260F, Amdry 350C	HVOF	Korroosio
Ni-Cr (Inconel 625)	Ni 21.5Cr 8.5Mo 3Fe 0.5Co	Sulzer Metco	Diamalloy 1005, Metco 8625	HVOF, Kaari	Korroosio
NiCrBSi	Ni 16Cr 4Fe 4B 4Si	Sulzer Metco	Metco 19E	Spray and	Eroosio korroosio

	2.4Fe 2.4Mo 2.4W 0.5C			fuse	
Cr-Ni	Cr-34Ni-7C	Sulzer Metco	SM5241	HVOF	Eroosio-korroosio

2.3.4 Pinnoitemateriaalien valinta

Termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden vaurioituminen soodakattilaolosuhteissa tapahtuu usein eri mekanismilla kuin vastaavan koostumuksen omaavan putkimateriaalin. Tämä johtuu pinnoitteen erityisestä rakenteesta, joka on tyypillisesti jähmettyneistä sulapisaroista muodostunut lamellimainen rakenne. Lisäksi ruiskutuksen aikana metallinen lähtöaine hapettuu pinnaltaan ja happi jää rakenteeseen sulkeumina. Pinnoitteen lamellit eivät ole täydellisesti kiinnittyneitä toisiinsa. Lamellirajat ovat näin ollen pinnoitteiden heikkoja kohtia, jotka vaikuttavat pinnoitteen korroosiokäyttäytymiseen. Pinnoitemateriaalin ja ruiskutusmenetelmän valinnalla voidaan merkittävästi vaikuttaa pinnoitteen sisäiseen vaurioitumisnopeuteen ja korroosiokestävyyteen. Ruiskutettu pinnoitteen vaurioituminen voi tapahtua seuraavasti [17]:

- Pinnoitteen hapettumisesta, rikkikorroosiosta ym. ympäristöaltistuksesta aiheutuu pinnoitteen sisäinen vaurioituminen. Korroosio keskittyy tyypillisesti lamellirajoille ja voi avata reitin pinnoitteen läpi.
- Korrodoiva ympäristö pääsee ajan kuluessa kulkeutumaan pinnoitteen läpi pinnoitteen ja alustan rajapinnalle, jolloin alustamateriaali alkaa tuhoutua nopeasti. Tämä johtaa pinnoitteen nopeaan irtoamiseen alustalta.
- Pinnoite säröilee lämpötilan muutoksien aiheuttamien jännitystilojen seurauksena.

Edellä mainittujen vaurioiden minimoimiseksi pinnoitemateriaalin valinnan sekä pinnoitusprosessin valinnan merkitys korostuu. Pinnoitemateriaali voidaan esim. helposti valita sellaiseksi, että pinnoite ei vaurioidu pinnastaan hapettumalla ja sisäinen korroosio on pieni. Pinnoitemateriaalin ja alustan välinen lämpölaajenemiskertoimien välinen ero on minimoitava, jotta säröilyltä vältytään. Lisäksi pinnoitusprosesseilla on saavutettava riittävä tiiveys.

On tärkeää huomioida, että pinnoitteen korroosionsuojaavuus on aina kombinaatio valitusta materiaalista ja valmistusprosessista. Tämän vuoksi pinnoitteita ei voida valita pelkästään materiaaliperusteisesti vaan suunnittelussa on huomioitava pinnoiterakenteen erityispiirteiden tuomat muutokset pinnoitemateriaaliin. Pinnoiterakenteiden erityispiirteet, tiiveys ja happipitoisuus, riippuvat suuresti käytetystä pinnoitusprosessista.



Kriittiset tekijät, jotka määrittelevät pinnoitteen korroosiosuojaavuuden ovat:

- itse pinnoitemateriaalin korroosiokestävyys, johon vaikuttaa valitun pinnoitemateriaalin korroosiokestävyys ko. ympäristössä (koostumus ja oksidikerroksen suojaavuus)
- pinnoitteen korrodoivien aineiden läpäisevyys, johon voidaan vaikuttaa valitulla prosessilla ja prosessiparametreilla (lamellirajat ja huokoisuus) ja
- mekaaninen yhteensopivuus (säröily)
- Tärkeimpiä määriteltäviä ominaisuuksia pinnoitteelle ovat adheesio (= tartuntalujuus), huokoisuus, koheesio, lämpölaajenemiskerroin ja paksuus.

Pinnoitusmateriaalien valikoima termisesti ruiskuttamalla on suuri. Korkealämpötilakorroosiota kestävät materiaalit muodostavat suojaavan ja helposti uudistuvan oksidikerroksen materiaalin pinnalle. Oksidikerroksen tulisi olla tiivis ja hyvin kiinnittynyt, jotta se voisi estää korrodoivien elementtien kuten rikin ja kloorin kulkeutumisen läpi vahingoittamaan perusmateriaalia. Tyypillisesti käytetään nikkeli- tai rautavaltaisia seoksia, joissa on korkea kromi- ja/tai alumiinipitoisuus. Termisesti ruiskutettavilla rautavaltaisilla seoksilla kromipitoisuus on tyypillisesti aina 30 %:iin saakka ja nikkeliseoksilla 50 %:iin saakka. Kromi on tärkeä ja kaikkein käytetyin suojaavan oksidin muodostavista alkuainesta. Kromioksidin muodostavia seoksia voidaan käyttää yleisesti ottaen lämpötilavälillä 500–900 °C:ta. Korkeakromisten terästen (yli 25 %) on raportoitu antavan hyvän suojan hapettavissa ympäristöissä ja suojaavan myös sulfaatteja ja sulfideja vastaan. [4, 18].

Pelkistävissä olosuhteissa korkeakromiset materiaalit pystyvät muodostamaan suojaavan kerroksen, joka koostuu kromista, rikistä ja natriumista. Pelkistävissä olosuhteissa tämän kerroksen korroosiokestävyys kasvaa kromipitoisuuden lisääntyessä. [5]

Alumiini on toinen tärkeä oksidin muodostaja. Alumiinioksidia muodostavat FeCrAl-materiaalit ovat myös tyypillisiä hapettumiskestäviä materiaaleja. Niitä käytetään lämpötilavälillä noin 800–1200 °C:ta, jolloin suojaavan oksidikerroksen muodostumiselle on parhaat edellytykset. [19, 20]. Lämpötiloissa alle 600 °C:ta alumiinioksidin muodostajien ongelmana on, että alumiini ei muodosta suojaava corundi-tyyppistä oksidikerrosta [19]. Metastabiileilla alumiinioksidoilla on puutteelliset suojausominaisuudet. Matalissa lämpötiloissa alumiinin diffuusio on erittäin hidas eikä suojaava oksidikerrosta pääse muodostumaan. Sen sijaan tyypillistä on tällöin rauta-alumiini-kromi sekaoksidin muodostuminen. [20].



Soodakattiloissa mahdollisia pinnoituskohteita ovat kattilan pohja, seinämäputket ja tulistimet. Kattilan pohjan osalta pinnoitteilla pyritään ehkäisemään säröily- ja pistekorroosio-ongelmia. Pinnoitemateriaaleista on hyviä kokemuksia saavutettu esim. Ni50%Cr seoksella.

Kattilan keski-osan korroosio-olosuhteita ei yleensä pidetä kovin aggressiivisena ja tyypillinen oheneminen on materiaalin hapettumista. Kuitenkin, jos voidaan havaita paikallisia ja pistemäisiä syöpymistä/ohenemista, on esitetty tämän johtuvan tyypillisesti pelkistävien olosuhteiden syntymisestä tai suuren kiintoainepitoisuuden omaavan lipeän poltosta. Pinnoitteita voidaan tällöin soveltaa paikallisesti. Pelkistävät olosuhteet ovat haaste myös korkeakromisille pinnoitteille, joiden suojaavuus perustuu oksidikerroksen muodostumiseen. Pelkistävissä olosuhteissa ei oksidikerroksen muodostumiselle ole luontaisia edellytyksiä, jolloin pinnoitteen tiiveyteen on kiinnitettävä erityisesti huomiota. [5]

Tulistinputkien alueella korroosio-olosuhteet ovat syntyvistä kerrostumista johtuen vaikeita, koska muodostuvat kerrokset saattavat olla sulatilassa. Tulistinalueella erityisesti matalaseosteisia teräksiä voidaan suojata pinnoitteilla. Pinnoitteiden suojaavuus alkalisulfidisulia vastaan on voimakkaasti riippuvainen pinnan lämpötiloista. Vielä alle 500 °C:n alapuolella saavutetaan useillakin pinnoitemateriaaleilla hyvä suojaavuus. Vaihtoehtoisia materiaaleja voivat olla esim. rautavaltaiset runsaskromiset teräkset tai NiCr-seokset.

2.4 Pinnoitteen valmistus

Tämä osio käsittelee ruiskuttamalla tehtyjen soodakattilapinnoitteiden valmistusta paikan päällä (on site) ja verstaalla. Lisäksi se antaa soveltuvia testaustapoja, joiden avulla suoritettu pinnoitustyö voidaan hyväksyä.

Se käsittelee pinnan esikäsittelyä, pinnoituksen suoritusta ja pinnoitteiden luonteenomaisia ominaisuuksia: paksuutta, ulkonäköä ja tarttuvuutta. Lopuksi ohje antaa testausmenetelmiä näiden ominaisuuksien toteamiseksi ja käsittelee vanhan pinnan tarkastusta ja korjausta.

Hankintasopimuksessa tulee määritellä pinnoitettava alue, pinnan paksuus, pinnoitettava materiaali, pinnoitusmenetelmä, pinnoitteen tartuntalujuus



alustamateriaaliin ja pinnoitemateriaali. Lisäksi on määriteltävä mahdolliset pinnoitettavan kohteen esikäsittelyprosessit sekä ennen pinnoitusta että sen jälkeen (pesut) ja mahdollinen ulkopuolinen työn valvoja, jolla on tarpeellinen asiantuntemus termisen ruiskutuksen pinnoitteiden ja työn suorituksesta.

2.4.1 Termisellä ruiskutuksella pinnoitettavan pinnan esikäsittely

Termisesti ruiskutettavalla pinnoitteella ei ole perusainetta vastaavaa mekaanista lujuutta, joten putken seinämänpaksuudelle asetetut vaatimukset on varmistettava ennen pinnoituksen suorittamista. Pinnan esikäsittelystä on määritelty standardissa SFS-EN 13507, ”Terminen ruiskutus. Metalliosien ja -komponenttien pintojen esikäsittely ennen termistä ruiskutusta” [21]. Pinta tulee puhdistaa kauttaaltaan ja karhentaa sopivalla kuluttavalla rakeella puhaltaen. Puhallusta jatketaan, kunnes pinta on metallinpuhdas ja rakenteeltaan yhtenäinen. Juuri ennen ruiskutusta on pinnan oltava kuiva, eikä siinä saa olla pölyä, rasvaa, NDT-nesteitä ja geelejä, hilsettä, ruostetta tai muita epäpuhtauksia, joihin kuuluvat myös liukoiset suolat. Liukoiset suolat voivat erityisesti vaikeuttaa pinnoitteen tarttuvuutta kattilan pintaan. Vanhoissa kattiloissa on syytä selvittää tarvittava pesuprosessi ennen pinnoitusta, jolla poistetaan aiemmat putkistojen pinnoille kertyneet suolat. Ennen työhön ryhtymistä on myös selvitettävä poistetaanko vanhan pinnoite kokonaan vai vain osittain. Kullakin pinnoittajalla on omat menetelmänsä suolojen ja kemikaalien poistoon, ja ne on syytä yksilöidä ennen työhön ryhtymistä. Kaikissa tapauksissa on puhdistetun pinnan karheus yksilöitävä vertailukappaleilla, joilla on samanlaiset ominaisuudet kuin työkaluilla ja jotka on valmistettu osapuolten määrittelemällä tavalla. Ellei muuta ole sovittu, voidaan pinnan puhdistukseen käyttää seuraavia raemateriaaleja:

- valurautarae, josta hematiitti on erotettu
- alumiinioksidirae
- piikarbidirae.

Raemateriaalin raekoko on yleensä 0,5–1,5 mm. Olipa puhdistusmateriaali minkä tyyppistä tahansa, sen tulee olla puhdasta ja kuivaa. Varsinkaan se ei saa sisältää liukenevia suoloja. Kun suihkupuhdistuksessa käytetään paineilmaa, on ilman oltava riittävän puhdasta ja kuivaa, jotta raemateriaali tai metallilla ruiskutettava pinta ei likaantuisi. Ilmamäärän tulee olla riittävä siten, että suihkupuhalluksessa suositeltu minimipaine on 6,5 bar käyttöletkun päässä. Edelleen on tarkistettava suihkupuhdistetun pinnan puhdistusaste, niin että se vastaa astetta Sa 3 standardin



SFS-EN ISO 8501-1 mukaisesti [22]. Pinnoitettavasta kohteesta on ennen pinnoitusta tarkistettava mahdolliset viat, säröt, kulumat ja perusaineen vahvuus ym., ja ne on ilmoitettava kirjallisesti pinnoituksen tilaajalle. Jos pinnoitettavalla alueella esiintyy säröilyä, on perusohjeena, että kaikki havaittavat on säröt poistettava, ennen kuin pinnoitus voidaan suorittaa. Pinnoituskohteeseen on varattava riittävä määrä valoa, jotta pinnoitettavan kohteen pinnoitus ja silmämääräinen tarkistus voidaan suorittaa vaivatta. Pinnoitettavan kohteen tarkistus tulee suorittaa myös 15° viistolla valolla, jolloin havaitaan mahdolliset poikkeamat pinnan puhdistuksessa. Lisäpuhallusta vaativat kohdat merkitään liidulla. Pinnoitettavan kohteen ilmanvaihto pitää olla riittävä, jotta pinnan puhdistuksessa ja pinnoituksessa syntyneet pölyt voidaan imeä pois.

2.4.2 Pinnoitemateriaali

Pinnoitemetallin tulee täyttää seuraavat vaatimukset: 1) pinnoitemateriaalin koostumuksen pitää olla selvillä kaupanimen lisäksi, 2) samoin tulee olla selvillä pinnoitteen keskeisimmät alkuaineet ja muoto (lanka tai jauhe), 3) kuten myös pinnoitustapa, valokaari- tai HVOF-menetelmä yms. Pinnoitemateriaalien määrittelyssä voidaan käyttää apuna myös standardia SFS-EN 1274, ”Terminen ruiskutus. Ruiskutusjauheiden kemiallinen koostumus ja tekniset toimitusehdot” [23] sekä standardia SFS-EN ISO 14919, ”Terminen ruiskutus. Langat, puikot, ja täytelangat liekki ja kaariruiskutukseen. Tekniset toimitusehdot.” [24].

2.4.3 Terminen ruiskutus

Terminen ruiskutus voidaan aloittaa puhdistetussa osassa, kun tilaaja on hyväksynyt edellä mainitun pinnan esikäsittelyn. Terminen ruiskutus tulee tehdä pian sen jälkeen, kun pinta on esikäsitelty suihkupuhdistamalla niin, että metalli ruiskutetaan valmisteltuun pintaan, joka on vielä puhdas ja kuiva eikä näkyvästi hapettunut. Käytettävissä oleva aika tulee pitää mahdollisimman lyhyenä, kuitenkin enintään 4 tuntia paikallisten olosuhteiden mukaan. Ruiskutusta ei saa tehdä olosuhteissa, joissa tapahtuisi kondensoitumista ruiskutettavalle pinnalle, ja pinta tulee pitää kastepistettä korkeammassa lämpötilassa. Termistä ruiskutusta suoritettaessa tulee teräksen lämpötilan olla ainakin 3 °C kastepisteen yläpuolella, jotta välttyttäisiin tartunnan heikkenemiseltä perusmateriaaliin. Pinnoitettavan alueen esilämmitys ennen



pinnoitusta on suositeltavaa tehdä 70–80 °C lämpötilaan. Tällä estetään ruiskun palotuotteiden kondensoituminen pinnalle sekä pienennetään pinnoitteeseen syntyvää vetojännitystilaa. Mikäli pinnoitettava pinta on hapettunut tai likaantunut, tulee sen esikäsitteily uusia. Ruiskutuksen pyyhkäisyjen tulee tapahtua pääsääntöisesti kohtisuorassa putkistojen pintaan nähden. Lisäksi ruiskutuspyyhkäisyjen tulee olla putkistojen pituusakselin suuntaisia. Tällöin vältetään mahdollisimman paljon viiston ruiskutuksen aiheuttamaa varjostusvaikutusta.

2.4.4 Sulautuvien seosten ruiskutus

Niin kutsutut sulautuspinnoitteet ovat yksi termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden erikoismenetelmä. Siinä ruiskutus tehdään liekkiruiskulla ja jälkikäsitellään kuumentamalla materiaali noin 1100 °C:een joko liekillä tai uunissa. Sulautusmateriaalien seosaineina on käytetty piitä ja booria, joka laskee materiaalin sulamislämpötilaa alle perusmateriaalin sulamispisteen. Muodostuva pinnoite tiivistyy lämpökäsittelyn seurauksena täysin tiiviiksi ja poistaa termisesti ruiskutetulle pinnoitteelle tyypillisen lamellirakenteen. Tästä on usein etua korroosiota vastaan. Menetelmä soveltuu parhaiten suoritettavaksi ruiskutusajalla. Pinnoitusohjeena voidaan käyttää Standardia SFS-EN ISO 14920, ”Terminen ruiskutus. Sulautuvien seosten ruiskutus ja sulautus” [25].

2.4.5 Vaaditut ominaisuudet ja pinnoitteen testausmenetelmät

Termisesti ruiskutetuille pinnoitteille voidaan tehdä hyvin vähän yksikäsitteisiä laadun mittauksia. Tällaisia ovat pinnoitteen tartunta alustaan, vetotestit, kemiallinen analyysi sekä abraasio- ja eroosiokulumistestit sekä pinnoitteen paksuus ja pinnoitettu pinta-ala. Mikrorakenteeseen liittyvät seikat, kuten oksidit, huokoiset sulamattomat partikkelit ja karbidien määrä, ovat laboratoriotutkimuksissa vielä kiistanalaisia asioita. Samoin pinnoitteiden kemiallinen kestävyys soodakattilaolosuhteissa voi olla vaikeasti selvitettävissä. Käytännössä pinnoitteiden ominaisuuksia voidaan testata soodakattilassa.

2.4.6 Pinnoitteen ulkonäkö

Pinnoitteen tulee olla tasalaatuinen ilman kuplia tai paljaita alueita, eikä siinä saa olla tarttumaton metallia tai vikoja, jotka voivat olla haitallisia pinnoitteen kestävyydelle



tai suojapinnoitteen tarkoituksenmukaiselle käytölle. Epäonnistuneessa kaariruiskutuksessa vikoina voidaan pitää pinnoitelangan pätkiä, pinnan epätasaisuutta ja ylipaksuuteen pinnoitettuja kattilan osia. Ulkonäköä voidaan verrata pinnoittajan toimittamaan vertailupalaan, joka on riittävän suuri, (300*300*10 mm).

2.4.7 Tartunta

Pinnoitteen ja perusaineen tartunta voidaan mitata ennen tilaamista koekappaleella standardin SFS-EN 582: ”Terminen ruiskutus. Vetotartuntalujuuden määrittäminen” [26] mukaisesti. Standardin mukainen testi tehdään erillisille Ø 25 tai 40 mm oleville kiekkoille. Kiekko liimataan tartuntasauvojen väliin ja vedetään vetokoneessa irti. Tällöin voidaan määritellä pinnoitteen tartunta alustamateriaaliin. Pinnoittaja saa tehdä koekappaleen vapaasti kattilassa käytettävillä aineilla ja pinnoitusmenetelmillä. Levyyn tehdyt vetonäytteet antavat yleensä paremmat tartuntalujuudet kuin putkistoon tehdyt pinnoitteet. Suositeltavan pinnoitteen tartuntalujuuden tulisi olla vähintään $> 25 \text{ N/mm}^2$. Hyvä tartunta-alusta materiaaliin kertoo usein onnistuneesta pinnoituksesta. Parhaiden liimojen vetolujuus on tyypillisesti 80–100 MPa, jonka parhaimpien pinnoitteiden tartuntalujuudet saattavat ylittää. Mikäli vetokokeen lopussa ei ilmene pinnoitteen irtoamista perusmateriaalista ennen sovittua murtolujuutta, katsotaan pinnoitteen läpäisseen tyydyttävästi tarttuvuuskokeen. Pinnoitteen tartunnalle voidaan tehdä myös tarkistusmittauksia pinnoituksen aikana, mistä on syytä sopia testaajan kanssa erikseen.

2.4.8 Paksuuden mittaus

Pinnoitteen paksuuden mittaukseen voidaan käyttää kaarimikrometriä tai sähköisiä mittamenetelmiä. Putkimaisia kappaleita mitattaessa on edellä mainitulla haastavaa saavuttaa luotettava tulosta. Paksuuden mittaukset onkin suositeltavaa tehdä magneettisella tai pyörrevirtamenetelmällä. Magneettisten mittausten etuna on, että ne ovat ainetta rikkomattomia, nopeita ja ne voidaan tehdä suoraan mistä tahansa tarkastettavan pinnan kohdasta. Paksuuden mittauksia voidaan tehdä useita satoja kertoja pinnoituskohteesta ja jopa pinnoituksen aikana. Pinnoitteen paksuutta mitattaessa tulee sopia ennen pinnoitusta, millä asteikolla pinnoitteen paksuudet tarkistetaan, koska paksuus voidaan mitata mikrometreinä tai tuhannesosatuuminä. Tuumamittaus voi aiheuttaa metriseen järjestelmään tottuneella sekaannusta. Mittalaite kalibroidaan koepalaan, joka on pinnoitettu samalla materiaalilla, jota



kattilan pinnoituksessa käytetään. Paksuuden tarkistuksesta on laadittava pinnoitteen paksuuskartta, jonka pinnoitteen ostaja saa.

Mikroskooppinen tarkastus poikkileikkauksesta tehdään kontrollipinnoitteille. Tällöin pinnoitteista katsotaan yleinen rakenne, pisarakoko, sulamattomat partikkelit, huokoset, oksidit sekä pinnoitteen ja perusmateriaalin rajapinta. Menetelmä on tuloksiltaan subjektiivinen, ja ne ovat riippuvaisia käytetystä materiaalista, ruiskutusparametreista ja -menetelmästä. Mikroskooppitarkastelun ei voi katsoa soveltuvan ensisijaisesti määrittämään pinnoitteen laatua. Mikroskooppisia näytteitä otetaan ensisijaisesti koekappaleista. Mikroskooppinen tarkastusmenetelmä on ainetta rikkova testi, jolloin se soveltuu hankalasti jo pinnoitetun kappaleen ominaisuuksien tutkimiseen. Mahdollisissa vauriotapauksissa voidaan kuitenkin ottaa ruiskutetun kattilan pohjasta 10 -senttisen kokoisia näytteitä ja tehdä niistä rakennetutkimus.

2.4.9 Vanhojen pinnoitteiden tarkastus ja pintojen korjaus

Kattilan seisokkien aikana on syytä tarkastaa pinnoitteiden kunto, jolloin tarkastetaan ensisijaisesti mahdolliset pinnoitteiden vauriot. Silmämääräisesti havaittavia vauriota ovat pinnoitteen irtoaminen sekä mahdolliset korroosio- ja painepesuvauriot. Mikäli havaitaan pinnoitteen irtoamista, voidaan alustavasti tutkia pinnoitteen kiinnipysyvyyttä piikkaamalla pinnoitetta pois vauriokohdan ympäristöstä. Piikkaus tehdään pienellä taltalla ja vasaralla vaurioittamatta putkistoa. Jos pinnoite lähtee helposti putkiston päältä ja sen alla on korroosiotuotetta, on syytä ryhtyä laajempiin jatkotarkastuksiin. Samoin jos pinnoite irtoaa painepesussa, on syytä olettaa, ettei se ole hyvin kiinni alustassaan. Jos vanha pinnoite irtoaa helposti alustasta, on siinä usein jokin piilevä vika, josta on syytä raportoida pinnoittajalle. Mahdollisten vikojen korjausprosessi on selvitettävä ennen työn aloitusta pinnoittajan kanssa. Käytännössä pinnoitteen korjaaminen on hyvin hankalaa koska korjaus pidentää seisokkiaikaa (korjauksen aiheutuu melua/pölyä/myrkyllisiä kaasuja jolloin muiden töiden tekeminen kattilassa on vaikeaa).

2.4.10 Manipulaattorin käyttö pinnoituksessa

Tilaajien kireät pinnoiteruiskutuksen aikatauluvaatimukset aiheuttavat usein kiirettä itse työssä. Tämän vuoksi vaikeissa työskentely olosuhteissa pinnoituksen tasalaatuisuus voi olla vaikea aikaansaada. Pinnoitteen tasaisen laadun kannalta on



tärkeää, että laajoilla pinnoilla käytetään manipulaattorilevitystä (kauko-ohjauksella tai yksinkertaisella ohjauksella varustettu automaattinen käsittelylaite), joka takaa tasaisemman pinnoitteen laadun.

Käsiruiskutuksen voi jättää tällöin vaikeammin suoritettaviin kohteisiin, kuten nurkkiin, seinämille tai yksittäisiin putkiin.

2.5 Yhteenveto

Termisesti ruiskutettavilla pinnoitteilla voidaan suojata soodakattilaputkimateriaaleja korroosiolta. Pinnoitettavia kohteita soodakattiloissa ovat yleensä a) ”mustan” ja compound-putken raja, jossa pinnoitteella estetään galvaanista korroosiota b) tulistinputkien mutkat, joissa pyritään estämään hapettumisen ja korroosion kautta tapahtuvaa ohenemista ja c) paikalliset compound-putkien säröytymien korjaus. Tyypillisesti käytettyjä materiaaliveikkoja ovat erilaiset NiCr-seokset tai rautavaltaiset runsaskromiset seokset. Tilattaessa kattilan pinnoitusta on hyödyllistä ensin määritellä seuraavat asiat: pinnoitettava alue, pinnan esikäsittelyt, pinnoitteen paksuus, pinnoitemateriaali, pinnoitusmenetelmä, ja pinnoitteen tartunta. Lisäksi on määriteltävä ja dokumentoitava, kuka suorittaa pinnoituksen aikana työn valvonnan ja hyväksymisen.

2.6 Lähdeluettelo

Kirjalliset lähteet:

1. Davis, J.R. (Ed.). Handbook of Thermal Spray Technology. Thermal Spray Society, ASM International, Materials Park, OH, USA (2004). 338 p.
2. Mohanty, P.S., Roche, A.D., Guduru, R.K. and Varadaraajan, V. Ultrafine Particulate Dispersed High-Temperature Coatings by Hybrid Spray Process. Journal of Thermal Spray Technology, 19(2010)1–2, pp. 484–494
3. Sidhu, T., S. Prakash, S. and Agrawal, R.D. Hot corrosion and performance of nickel-based coatings. Current science, 90(2006)1, pp.41–47
4. Crimmann, P., Bendix, D. and Faulstich, M. Investigations on corrosion protective layers in waste incineration plants. Sulzbach-Rosenberg \ D. (2005). http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/investigations_incineration_plants_Basel_2005.pdf.
5. Banovic, S.W., DuPont, J.N. and Marder, A.R. High temperature sulfidation behavior of low Al iron-aluminum compositions. Scripta Materialia 38(1998)12, pp. 1763–1767.

6. Uusitalo, M.A., Vuoristo, P.M.J. and Mäntylä, T.A. High temperature corrosion of coatings and boiler steels below chlorine-containing salt deposits. *Corrosion Science* 46 (2004), pp. 1311–1331
7. Tortorelli, P.F., DeVan, J.H., Pint, B.A., Wright, I.G. and Saunders, S.R.J. High-temperature corrosion behaviour of iron-aluminide alloys and coatings. *Proc. Fossil Energy Materials Conf.*, May 1995.
8. Uusitalo, M.A., Vuoristo, P.M.J. and Mäntylä, T.A. Elevated temperature erosioncorrosion of thermal sprayed coatings in chlorine containing environments. *Wear* 9069(2002), pp. 19.
9. Totemeier, T.C., Wright, R.N. and Swank, W.D. Microstructure and Stresses in HVOF Sprayed Iron Aluminide Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology* 11(3), September 2002, pp. 400-408.
10. Wang, B.Q. and Seitz, M.W. Comparison in erosion behavior of ironbase coatings sprayed by three different arcspray process. *Wear* 250 (2001), pp. 755–761.
11. Branagan, D.J., Breitsameter, M., Meacham, B.E. and Belashchenko, V. High-performance nanoscale composite coatings for boiler applications. *Journal of Thermal Spray Technology* 06/2005, Vol. 14, No. 2, pp. 196–204.
12. Hidalgo, V. Higuera, Varela, J. Belzunce, Menéndez, A. Carriles, Martinez, S. Poveda, High temperature erosion wear of flame and plasmasprayed nickelchromium coatings under simulated coalfired boiler atmospheres. *Wear* 247 (2001), pp. 214-222.
13. Uusitalo, M.A., Vuoristo, P.M.J. and Mäntylä, T.A. High temperature corrosion of coatings and boiler steels in oxidizing chlorinecontaining atmosphere. *Materials Science and Engineering A346*(2003), pp. 168–177.
14. Zanchuk, W. The use of tafaloy 45CT, an Ni-Cr-Ti alloy, as an arc sprayed corrosion barrier in high temperature sulfurous environments. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 39–40, Part 1, 1 December 1989, pp. 65–69, 16th International Conference on Metallurgical Coatings.
15. Zahrani, E.M. and Alfantazi, A.M. Molten Salt Induced Corrosion of Inconel625 Superalloy in PbSO4-Pb3O4-PbCl2-Fe2O3-ZnO Environment. To be published in *Corrosion Science* (2012).
16. Heath, G.R., Polak, R., Tsujita, T. and Gustafsson, S. Roel of Thermal Spray Coatings in Boilers; development of Reliable Spray and Fuse Coatings for Boiler Protection. NTSC, 7-11 October, 1996, Cincinnati, Ohio.
17. Heath, G.R., Heimgartner, P., Irons, G, Miller, R. and Gustafsson, S. An Assessment of Thermal Spray Coating Technology for High Temperature Corrosion Protection.
http://web.castolin.com/wCastolin_com/pdf/publications/essai7.pdf
18. Mayoral, M.C., Andres, J.M., Belzunce, J. and Higuera, V. Study of sulphidation and chlorination on oxidized SS310 and plasma-sprayed Ni-Cr coatings as



simulation of hot corrosion in fouling and slagging in combustion. Corrosion Science 48(2006)6, pp. 1319–1336

19. Lai, G. High Temperature Corrosion and Materials Applications. ASM International, Ohio, USA 2007. P. 461.
20. Grabke, H.J. Surface and interface segregation in the oxidation of metals. Surface and Interface Analysis 30(2000)1, pp. 112–119
21. SFS-EN 13507. Terminen ruiskutus. Metalliosien ja – komponenttien pintojen esikäsittely ennen termistä ruiskutusta. Suomen standardisoimisliitto (2001).
22. SFS-EN ISO 8501-1. Teräspintojen esikäsittely ennen pinnoitusta maalilla tai vastaavilla tuotteilla. Pinnan puhtauden arviointi silmämääräisesti. Osa 1: Teräspintojen ruostumisasteet ja esikäsittelyvasteet. Maalaamattomat teräspinnat ja aiemmista maaleista kauttaaltaan puhdistetut teräspinnat (2007).
23. SFS-EN 1274, Terminen ruiskutus. Ruiskutusjauheiden kemiallinen koostumus ja tekniset toimitusehdot. Suomen standardisoimisliitto (2005)
24. SFS-EN ISO 14919. Terminen ruiskutus. Langat, puikot, ja täytelangat liekki ja kaariruiskutukseen. Tekniset toimitusehdot. Suomen standardisoimisliitto (2002).
25. SFS-EN ISO 14920. Terminen ruiskutus. Sulautuvien seosten ruiskutus ja sulautus. Suomen standardisoimisliitto (1999).
26. SFS-EN 582. Terminen ruiskutus. Vetotartuntalujuuden määrittäminen. Suomen standardisoimisliitto (1994).

Suulliset lähteet:

Henkilökohtainen tiedonanto, Tapio Huuska, Metsä Fibre Oy, Kemin tehdas, 2012.

Henkilökohtainen tiedonanto, Martti Hirttiö, Metsä Fibre Oy Äänekosken tehdas, 2012.

Henkilökohtainen tiedonanto, Lauri Mattila, UPM-Kymmene, Oyj, Pietarsaaren tehtaas, 2012.

Henkilökohtainen tiedonanto, Juha Rintala, Telatek Oy, 2012.

Henkilökohtainen tiedonanto, Rauno Karvinen, UPM Kymmene Oy, 1997.

Henkilökohtainen tiedonanto, J. Tenkula, Telatek Oy, 1997.



3 PAINEASTIAN KORJAUKSET

Alkuperäinen teksti: Kalle Salmi, Kvaerner-Pulping Oy

Päivitetty teksti: Kestoisuustyöryhmä

3.1 Yleistä

Soodakattilan käyttövarmuuden ja käyttöturvallisuuden ylläpitämiseksi on tehtävä korjauksia, joiden sisältö ja laajuus ovat etukäteen tiedossa. Tämän lisäksi tulee sellaisia yllättäviä tilanteita, joissa paineastia joudutaan korjaamaan ilman ennakoivaa tarkempaa suunnittelua. Esimerkiksi paineastian vuotovauriotapaukset ovat tällaisia. Tähän kappaleeseen on kerätty laeista, asetuksista ja muista määräyksistä paineastian korjausta käsitteleviä ohjeita sekä käytännössä esiin tulleita asioita.

Asiakirjat, joihin tässä kappaleessa viitataan, ja muut paineastioita käsittelevät ohjeet ja standardit, muuttuvat edelleen kehityksen seurauksena kohtuullisen nopealla aikataululla. Tekstiin on pyritty lisäämään linkkejä internetsivuille joilta voi ladata viimeisimmät versiot ohjeista/standardeista.

3.2 Oppaat

TUKES on julkaissut seuraavia oppaita liittyen painelaitteisiin.

Painelaiteopas:

http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_oppaat/painelaiteopas.pdf

Painelaitteiden kunnossapito:

http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_oppaat/painelaite-kunnossapito-opas.pdf

Painelaitteiden määräaikaistestaukset:

http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_oppaat/Painelait.mraikaist.pdf

Painelaiterekisteri P1-2002

<http://tukes.fi/fi/Palvelut/Tukes-ohjeet/3Painelaitteet/P1-02-Painelaiterekisteri/>

Painelaitteiden kunnonvalvonta P1-2000

<http://tukes.fi/fi/Palvelut/Tukes-ohjeet/3Painelaitteet/P2-00-Painelaitteiden-kunnonvalvonta/>

Painelaitteiden seuranta P2-2000

<http://tukes.fi/fi/Palvelut/Tukes-ohjeet/3Painelaitteet/P1-00-Painelaitteiden-seuranta/>

Painelaitedirektiivin soveltamisohjeita:

http://www.tukes.fi/Tiedostot/julkaisut/3_2009.pdf



3.3 Lait ja asetukset

[Painelaitedirektiivin \(97/23/EY\)](#) velvoitteet on julkaistu Suomessa [painelaitelaissa \(869/1999\)](#) ja [kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksessä painelaitteista \(KTMp 938/1999\)](#). Päätös (938/1999) sisältää painelaitedirektiivin menettelyt painelaitteiden ja laitekokonaisuuksien suunnittelulle, valmistukselle ja vaatimustenmukaisuuden arvioinnille. Painelaitedirektiivin soveltamisalueen ulkopuolelle jäävät painelaitteita koskevat määräykset, kuten painelaitteen käyttö, korjaukset, muutostyöt ja asennus, on julkaistu [kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksessä painelaiteturvallisuudesta \(KTMp 953/1999\)](#).

Painelaite tarkoittaa säiliöitä, putkistoja, varolaitteita ja paineenalaisia lisälaitteita. Painelaitteiden osiksi luetaan tarvittaessa myös paineenalaisiin osiin kiinnitetyt osat kuten laipat, yhteen, liittimet, nostokorvakkeet jne. Laitekokonaisuus tarkoittaa valmistajan yhtenäiseksi ja toiminnalliseksi kokonaisuudeksi kokoamia useita painelaitteita. Säädöksiä sovelletaan painelaitteisiin ja laitekokonaisuuksiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine (PS) on yli 0,5 bar.

Painelaitelain mukaan painelaite on rakennettava ja sijoitettava ja sitä on hoidettava, käytettävä ja tarkastettava niin, ettei se vaaranna kenenkään terveyttä, turvallisuutta tai omaisuutta. Painelaitteen markkinoille saattajan, esimerkiksi valmistajan tai maahantuojan, on voitava osoittaa, että painelaite sekä sen suunnittelu ja valmistus täyttävät säädetyt vaatimukset. Vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyt perustuvat moduuleihin (A, ...H1, G), jotka on esitetty [KTM:n painelaitepäätöksen \(938/1999\) liitteessä III](#).

Useimmissa painelaitedirektiivin mukaisissa painelaitteissa vaaditaan CE-merkintä osoituksena vaatimusten täytymisestä. Vaarattomimpiin painelaitteisiin ei tule CE-merkintää.

Painelaitesäädösten vaatimuksia on tarkemmin kuvattu TUKESin julkaisemassa [painelaitteoppaassa](#).

3.4 Hitsauksen laatu



Standardit [SFS-EN ISO 3834-2](#), “Hitsauksen laatuvaatimukset. Metallisten materiaalien sulahitsaus. Osa 2: Kattavat laatuvaatimukset” ja [SFS-EN ISO 17663](#), “Hitsaus. Hitsauksen ja sen lähiprosessien yhteydessä suoritettavan lämpökäsittelyn laatuvaatimukset” ovat hyviä apuvälineitä sekä valmistavassa että korjaavassa hitsauksessa laatutoimintojen hallintaan. Standardi täydentää hitsaavan yrityksen mahdollisesti olemassa olevaa laatujärjestelmää.

3.5 Hitsaajan pätevyydistukset

Korjaustyötä tekevällä hitsaajalla on oltava voimassa oleva pätevyyskoe, joka on teräksille standardin [SFS-EN 287-1](#) mukainen.

3.6 Hitsausohjeet

"Hitsausohjeita tarvitaan hitsauksen aikana hitsaustöiden suunnittelun perustaksi sekä laadun valvontaan. Hitsaus katsotaan erikoisprosessiksi laatujärjestelmästandardien terminologiassa. Laatujärjestelmästandardit edellyttävät yleensä, että erikoisprosessien suorituksessa noudatetaan kirjallisia menettelyohjeita. Hitsausohje (WPS) on asiakirja, joka on hyväksytty jollain seuraavista hyväksymistavoista:

- aikaisempi hitsauskokemus
- hyväksytty/testattu hitsausaine
- menetelmäkoe
- standardihitsausohje
- esituotannollinen koe

ja jossa esitetään vaadittavat hitsausmenetelmän muuttujat toistettavuuden varmistamiseksi tuotantohitsauksessa (otteet standardista [SFS-EN ISO 15607](#)).

Hitsausohjeen käyttäminen luo perustan sille, että hitsi on vaatimusten mukainen, mutta ei sinänsä vielä takaa sitä. Sen käyttö vähentää oleellisesti kuitenkin hitsausvirheitä. Myös lämpökäsittelyä voidaan pitää tällaisena erikoisprosessina, josta pitää olla kirjalliset ohjeet.

Muutamia hitsausstandardeja:

- [SFS-EN 1011](#) osat 1-8 Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuosituks
- [SFS-EN 12952-5 Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 5: Paineellisten osien valmistus](#)

3.7 Asennus-, korjaus- ja muutostyöt



Käytössä olevien painelaitteiden asennus-, korjaus- ja muutostöissä sovelletaan [kauppa- ja teollisuusministeriön päätöstä painelaiteturvallisuudesta \(953/1999\)](#).

Asennus-, korjaus- ja muutostyön tekevä toiminnanharjoittaja voi käyttää:

- painelaitteen valmistuksessa aikoinaan hyväksyttyä suunnitelmaa ja hitsausohjetta, jos tarkastuslaitos pitää niitä turvallisina ja ne kattavat työn
- tarkastuslaitoksen riittäväksi katsomallaan menettelyllä hyväksymää hitsausohjetta, jos kyse on yksittäistapauksesta
- uusien painelaitteiden valmistuksessa soveltamaansa vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyä
- päätöksessä (953/1999) annettua vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyä.

Hyväksytty laitos ja omatarkastuslaitos tekevät asennus-, korjaus- ja muutostöihin liittyvät tarkastustehtävät. Pysyvien liitosten menetelmien, niitä tekevien henkilöiden ja rikkomatonta aineenkoetusta tekevien henkilöiden vaatimukset ovat samat kuin uusien painelaitteiden valmistuksessa. Toiminnanharjoittaja antaa tilaajalle asennus-, korjaus- ja muutostyön vaatimustenmukaisuusvakuutuksen. CE-merkinnän vaatimusta ei sovelleta.

Painelaitteen vaihtamiseen kokonaisuudessaan, sen erityisen merkittävään muutostyöhön ja kokonaan uuden putkiston asennukseen sovelletaan yleensä kauppa- ja teollisuusministeriön päätöstä painelaitteista (938/1999). Tällöin painelaitteeseen tulee yleensä myös CE-merkintä.

Korjaustyöhön ja asennukseen liittyy seuraavanlaisia asiapapereita:

- korjaussuunnitelma mahdollisine piirustuksineen, hitsaussuunnitelmineen ja luku-laskuineen
- tarkastuslaitoksen päätös korjaussuunnitelman tarkastuksesta ja hyväksynnästä
- materiaaliluettelo käytetyistä aineista
- rakenneainetodistukset
- lämpökäsittelytodistukset
- korjausselostus
- valmistuksen valvojan vakuutus
- hitsaajaluettelo ja heidän pätevyytensä
- NDT-tarkastuspöytäkirjat ja röntgenfilmit
- tarkastuslaitoksen hyväksyntä korjaukselle
- vaatimustenmukaisuusvakuutus

Edellä mainituista asiapapereista jää yleensä yksi kappale paineastian omistajalle ja yksi valmistajalle.



Luontevin toimintatapa on se, että korjauksen toimittaja hoitaa hyväksynnät ja kyseiseen tapaukseen liittyvän dokumentoinnin.

3.8 Paineekoe

[Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös \(953/1999\)](#) toteaa paineastian painekokeen suorittamisesta:

”Painelaitteen painekokeessa on todettava, ovatko painelaitteen paineenalaiset seinämät koepaineessa tiiviit ja esiintyykö rakenteessa turvallisuutta vaarantavia muodonmuutoksia. Kokeen tekemisessä on otettava huomioon painelaitteen valmistajan mahdollinen ohje.

Paineekoe on tehtävä nesteellä. Koe voidaan kuitenkin tehdä kaasulla, jos nesteellä tehty painekoe ei rakenteellisista syistä ole kohtuudella mahdollinen tai painelaitteessa ei voida sallia pieniäkään nestemääriä. Koe on tehtävä noudattaen tarpeellista varovaisuutta.

Nestepaineekoe on tehtävä vähintään paineella, joka on 1,3 kertaa suurin sallittu käyttöpainelämpö ja kaasupaineekoe paineella, joka on 1,1 kertaa suurin sallittu käyttöpainelämpö. Jos erityiset syyt vaativat, tarkastuslaitos voi hyväksyä käytettäväksi muun koepaineen.

Paineekoe on tehtävä joka toisen sisäpuolisen tarkastuksen yhteydessä. Koetta ei tarvitse kuitenkaan tehdä painesäiliölle ja putkistolle, joiden sisäpuolisessa tarkastuksessa on voitu riittävästi varmistua rakenteen eheydestä ja lujuudesta. Kokeen poisjättämisen perustelut on esitettävä tarkastuspöytäkirjassa ja kokeen poisjättäminen on arvioitava uudestaan jokaisessa seuraavassa sisäpuolisessa tarkastuksessa.”

3.9 Korjauksen luonne

3.9.1 Ennakkoon valmisteltu korjaus

Normaaleihin huoltoseisokkeihin ajoittuviin paineastian korjauksiin valmistaudutaan yleensä riittävän ajoissa ja riittävän suunnitelmallisesti. Hyvällä etukäteisvalmistelulla ja asiantuntemuksella (toimittajavalinta) saadaan aikaan hyvä lopputulos.



Jos korjauskohde tai -tapa on erityisen vaativa tai poikkeuksellinen (esimerkiksi huono luoksepäästävyys tai harvinainen työtapa), voidaan toimittaja velvoittaa tekemään sellainen työkoe, joka vastaa mahdollisimman hyvin korjausolosuhteita joko konepajaolosuhteissa tai tulevalla työmaalla.

3.9.2 Ennalta arvaamattoman tapahtuman korjaus

Tilanne muuttuu oleellisesti, kun joudutaan korjaustilanteeseen yllättäen joko vaurion tai huoltoseisokitarkastuksen seurauksena. Tällöin lähes kaikki ennakkovalmistelut ovat tekemättä. Tällöinkin pitää muistaa lait ja asetukset sekä työturvallisuus. Laitoksilla tulisi olla kattilan jokaiseen eri lämpöpintaan kohtuullinen määrä sellaista varaosaputkea, jolla voidaan korvata vanhaa ja mahdollisesti vaurioitunutta putkea. Yleensä lämpöpintaputki voidaan vaihtaa parempaan (lujempaan) samoilla ulkohalkaisijadimensiolla ja/tai paksummalla seinämällä olevaan putkeen. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että hitsaustyö vaikeutuu ja lämpökäsittely on mahdollisesti tarpeellinen, kun mennään lujempiin ja/tai runsaasti seostettuihin teräksiin. Kattilan käyttäjillä tulisi olla yhteystiedot kattilan toimittajaan, jolloin on mahdollista saada asiantuntevaa teknistä apua ja mahdollisesti materiaaleja kussakin tapauksessa.

Vauriotapauksissa, korjausseisokin aikana, tulisi kiinnittää huomiota niihin tekijöihin, jotka ovat mahdollisesti vaikuttaneet vaurioon. Dokumentointi, esimerkiksi valokuvat, tarkastusraportit ja silmämääräiset havainnot tapahtumapaikalta antavat usein selvyyttä vaurion syistä. Syiden selvitys on tärkeää siksi, että voidaan mahdollisesti poistaa vaurion aiheuttaja tai oleellisin syy, joka on johtanut vaurioon.

3.9.3 Hitsauksen korjaus

Yleisperiaatteena voidaan pitää sitä, että hitsiä voidaan korjata hitsaamalla kaksi kertaa, jos kyseessä on pienehkö hiomalla avattavissa oleva hitsausvirhe. Poikkeuksena valmiiksi hitsatun compound-putken päittäisliitoshitsi, jota ei voi korjata luotettavasti materiaalien sekoittumisen takia.

Korjaushitsauksessa pitää käyttää samaa alkuperäisen hitsin aikaansaamiseksi käytettyä hitsausohjetta. Mikäli ajaudutaan sellaiseen tilanteeseen, jossa lämpöpintaputken hitsi ei täytä laatukriteereitä kahdella korjauskerralla, on perusteltua katkaista alue pois ja asentaa tilalle uusi putki. Tällainen tilanne saattaa helposti



syntyä esimerkiksi silloin, kun hitsisulaan tipahtaa kattilassa olevia suoloja. Myös silloin, kun särö on edennyt hitsialueella lämpöpintaputken seinämän läpi, on hyvän lopputuloksen kannalta varmempaa katkaista kyseinen putki vaurion kohdalta, jotta tarkastuksessa on helpompi löytää kaikki mahdolliset särön haarat.

Pintatarkastuksissa esiin tulleet näyttämät hitsin ja perusaineen liittymässä voidaan useasti poistaa pyöreällä viilalla, kunhan varmistetaan, että kyseessä on pienehkö reunahaava tai jyrkkä palon liittymä. Hiontaa/viilausta pitää jatkaa niin pitkälle, että näyttämät poistuvat. Pyöristämisellä saadaan aikaan myös jouhea jännitysjakautuma, jolloin väsymissärön liikkeelle lähtö ei tapahdu niin helposti kuin terävpohjaisesta urasta.

Jos hionta- tai viilaussyvyys hitsin liittymässä perusaineeseen on niin suuri, että sen perusteella voidaan päätellä näyttämän olevan muuta kuin pelkkä hitsausvirhe, on se merkki jostakin merkittävämmästä ilmiöstä. Kyseessä saattaa tällöin olla materiaalin väsyminen ja väsymissärö. Jotta syy väsymiseen pystytään selvittämään, tulisi tehdä vähintään silmämääräisiä tarkistuksia ympäristöstä, jotta nähdään esimerkiksi sidontojen kunto ja niiden osuus vauriossa.



4 SOODAKATTILATARKASTUKSET

Alkuperäinen teksti: Esa Ilves, Keskeytysvakuutusosakeyhtiö Otso

Päivitetty teksti: Inspecta Oy

4.1 Yleistä

Tämä suositus on tarkoitettu käynnissä oleville laitoksille. Valmistuksessa ja korjauksissa toimitaan tuotestandardien mukaisesti ([Vesiputkikattila SFS-EN 12952, jne.](#)).

Määräaikaista vaatimukset tulevat kauppa- ja teollisuusministeriön [päätöksestä painelaiteturvallisuudesta 953/1999](#). Päätöksen mukaan vähimmäisvaatimus on joka toinen vuosi käyttötarkastus, neljän vuoden välein sisäpuolinen tarkastus ja kahdeksan vuoden välein painekoe. Osa määräaikaistarkastuksista voidaan korvata hyväksytyn laitoksen tarkastuskohdetta varten vahvistamalla kunnonvalvontajärjestelmällä, jos se vaikutukseltaan vastaa määräaikaistarkastusta. Kunnonvalvontajärjestelmästä on [TUKES julkaissut ohjeen P2-2000](#).

Tämä suosituksen lähtökohtana on, että soodakattilalle tehdään tarkastuksia jokaisessa huoltoseisokissa.

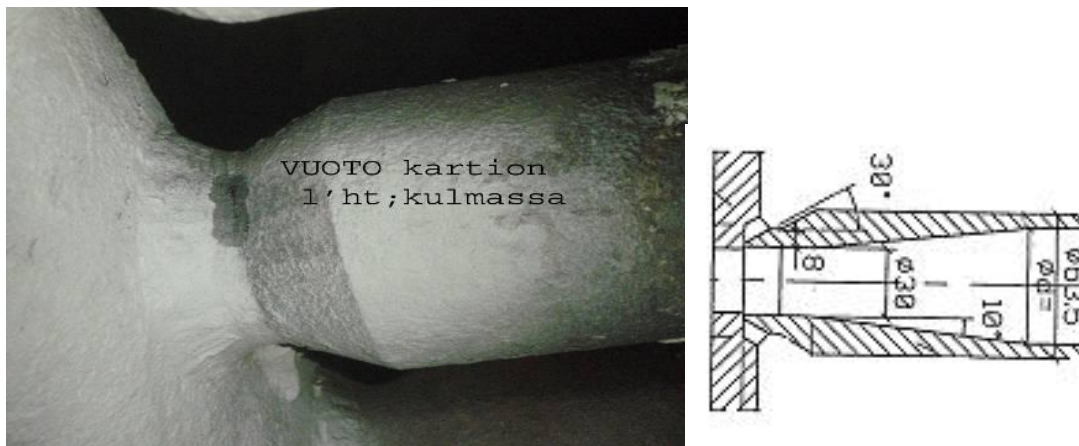
- Soodakattilatarkastuksien onnistumisen perusedellytykset ovat:
- pitkäntähtäimen tarkastussuunnitelmat ja tarkastusohjeet
- pätevoitetyt tarkastajat: EN-pätevyys
- kunnolliset tarkastusolosuhteet: työturvallisuus, telineet, valaistus ja puhdistus
- realistinen aikataulu

Edes 100 %:lla tarkastuslaajuudellakin kohde tulee vain harvoin täysin luotettavasti tarkastettua. NDT-menetelmät ovatkin toisiaan täydentäviä ja vain harvoin toisiaan täysin korvaavia. Esimerkiksi ultraäänitarkastus paljastaa huonosti kolmiulotteiset viat, kuten esim. huokokset. Röntgen on herkkä säteilykeilan suuntaisille tasomaisille vioille, mutta epäherkkä säteilysuunnasta poikkeaville vioille.

NDT-menetelmien avulla voidaan ohjata hitsauksen laatua. On myös järkevää panostaa hitsausvalvontaan, johon tärkeänä osana kuuluvat menetelmä- ja hitsaajakohtaiset työkokeet. Kun tarkastuslaajuus on vähemmän kuin 100 % tulee, vaaditun [tarkastuslaajuuden täyttyä hitsaajakohtaisesti](#).

Valmistuksen aikana tarkastusmenetelmiä ja -laajuutta arvioitaessa on huomioitava viranomaismääräykset sekä kohteen sijainti sulavesiräjähdystä, korjattavuutta ja

käytönaikaisia tarkastuksia ajatellen. Suunnitteluvaiheessa tulee jo arvioida mahdolliset vikaantumismekanismit ja käyttää NDT-asiantuntijoita arvioimaan rakenteiden tarkastettavuus.



Kuva 4-1. Ekonomaiserin jakotukin yhde.

Kuvassa 5-1 on hitsiliitos, jonka luotettava volymetrinen tarkastus NDT-menetelmillä on käytännössä mahdotonta. Valokuvan perusteella vuoto on yhteen perusaineen epäjatkuvuuskohdassa, joka paikantuu hyvin lähellä muutosvyöhykettä (HAZ-alue Heat Affected Zone). Tämän alueen lujuus on muuta rakennetta heikompi ja liikkeestä aiheutuva väsyttävä kuormitus kohdistuu ko. kohtaan. Putken ulkopinnalta alkava putken väsymissärö voidaan todeta magneettijauhetarkastuksella. Jos rakennetta ei muuteta, niin ko. kohteelle on suoritettava pintatarkastus lähes vuosittain.

Laajoissa revisioissa NDT-tarkastuksille pitää olla selkeästi nimetty vetäjä, joka tuntee kattilarakenteet, niiden tarkastettavuuden ja niihin liittyvät vikaantumismekanismit.

Sen lisäksi että tarkastuksista tehdään asianmukaiset tarkastuspöytäkirjat, tarkastuksessa havaitut merkittävät viat/poikkeamat tulee merkitä rasvaliidulla tai vastaavalla kohteeseen, jotta korjaavat toimenpiteet tehdään oikeaan kohtaan ja ajallaan.

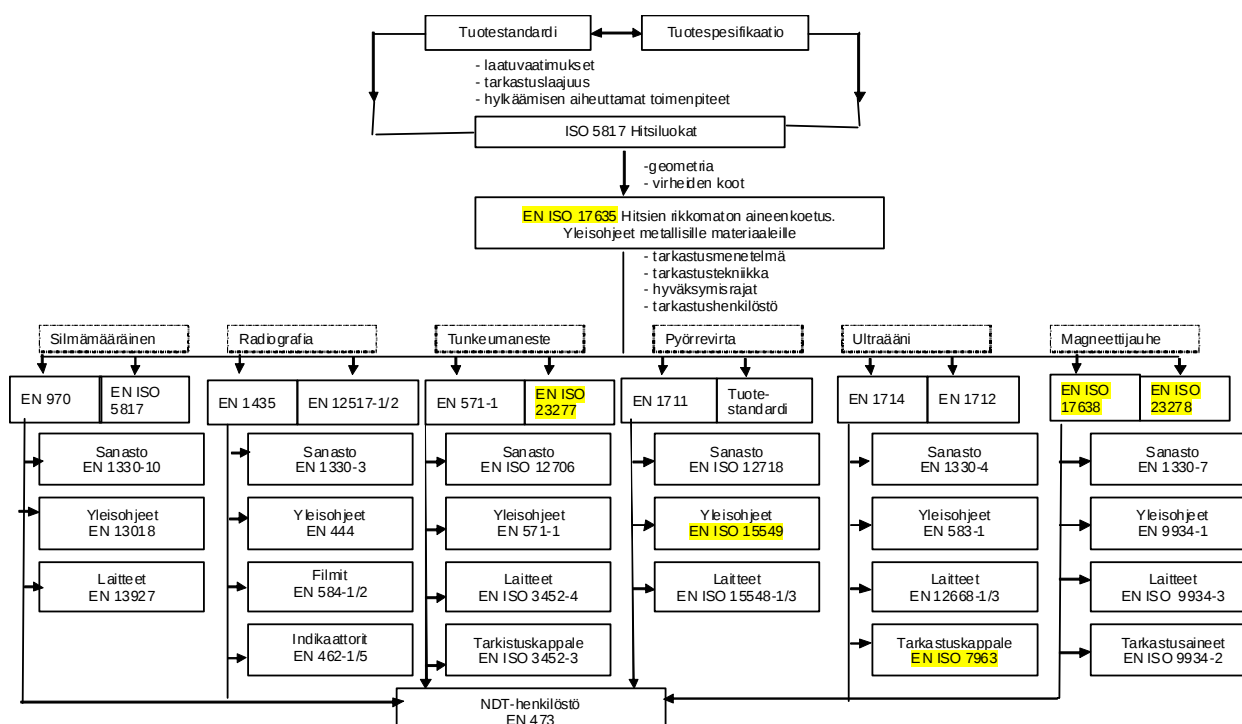
Huoltoseisokin aikaisissa tarkastuksissa menetelmä valitaan sen mukaan, mitä vauriomekanismia ollaan etsimässä. Tarkastuksissa haetaan seuraavia ilmiöitä tai vauriomekanismeja: eroosio, korroosio, väsyminen, viruminen, ylikuumentuminen, jännityskorroosio, korroosioväsyminen, terminen väsyminen, puutteellisen tuennan aiheuttamat räsitukset, väärä vesikemia jne.

NDT-tarkastusmenetelmät ovat vertaavia, eli tarvitaan kalibrointikappale tai vastaava. Tästä syystä vauriotapauksessa on aina syytä ottaa näytekappale ja säilyttää se tulevia NDT-tarkastuksia ja opetusta silmällä pitäen.

4.2 Tarkastusmenetelmät

Yleisesti NDT-menetelmät voidaan jakaa pintatarkastuksiin ja volymetrisiin tarkastuksiin. Tärkeimmät ja yleisimmin käytettävät tarkastusmenetelmät ovat visuaalinen tarkastus, röntgenkuvaus, ultraääni-, magneettijauhe- ja tunkeumaneste- ja pyörrevirtatarkastus.

Yleisellä tasolla NDT-menetelmien käytöstä saa hyvän kuvan standardista [SFS-EN-ISO 17635](#), jossa on annettu suositukset hitsien tarkastamiselle eri materiaaleille ja menetelmille.



Kuva 4-2. Kaaviossa on esitetty vuoden 2010 lopussa voimassa ja työn alla olevat hitsien tarkastukseen liittyvät standardit. Tarkemmin standardit löytyvät linkin (http://www.metsta.fi/standardisointilueet/Kansalliset_komiteat/K89.php) kohdasta NDT standardisoinnin tilannekatsaus. Standardien päivityksestä löytyy myös tietoa MetSta:n nettisivuilta kohdasta [standardisointilueet](#)

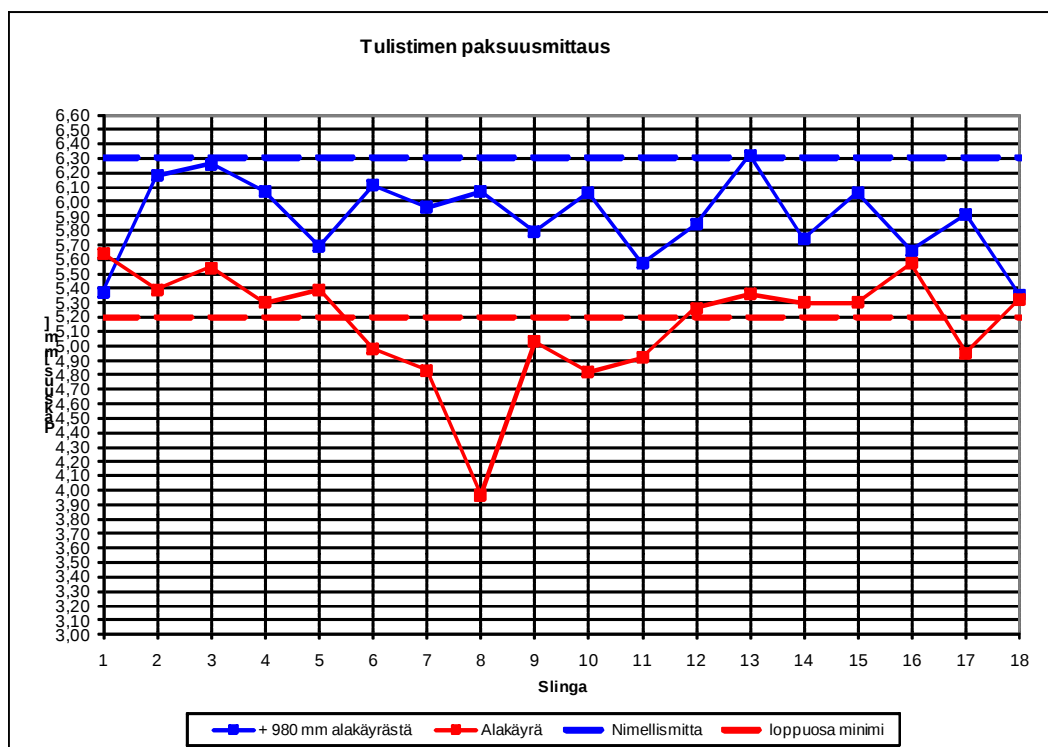
4.2.1 Silmämääräinen tarkastus/VT (visual testing)

- Menetelmistä kaikkein tärkein, jolla havaitaan parhaiten kattilassa tapahtuneet muutokset.
- Hitsien silmämääräinen tarkastus [SFS-EN 17637](#)
- Nykyisin testaajilta vaaditaan EN-pätevyys

- Tekijän on tunnettava kattilan rakenne ja mahdolliset vauriomekanismit
- Vaatii hyvän valaistuksen
- Suurennuslasi ja peili ovat usein välttämättömiä apuvälineitä
- Käytä valokuvausta ja videointia!
- Endoskooppi hyvä apuväline

4.2.2 Paksuusmittaus/ TM (thickness measurement)

- Paksuusmittauksesta on oma standardi [SFS-EN 14127-2 ”Paksuusmittaus ultraäänellä”](#)
- Mittauksissa suositellaan käytettäväksi a-kuvallista mittalaitetta. A-kuvassa x-akseli kertoo näyttämän paikan (aika / mm) ja y-akseli näyttämän amplitudin.
- A-kuva mahdollistaa taustakaiun ja kerrannaiskaikujen vaimenemisen seuraamisen, mikä antaa viitteitä sisäpuolisesta likaantumisen tai korroosiosta.
- Vaativissa mittauskohteissa suositellaan tarkastajalle UT:n EN-pätevyyttä.
- Ohentuminen voi olla epäsymmetristä: esim. seinäputken mittatauksessa mittausikkuna on evästä evään.
- Kohdassa erikoismenetelmät käsitellään muita paksuusmääritys menetelmiä mm. EMAT ja RFET.



Kuva 4-3. Tulistimen paksuusmittaustulokset kaaviona.

Kuvassa 5-3 punainen suoraviiva kuvaa kohteen laskennallista minimiä. Ennen paksuusmittauksien suorittamista on kyseisen kohteen kriittiset rajat selvitettävä tarkastuksien vetäjille ja ennen kaikkea mittauksia suorittaville henkilöille, jotta alimittaisuudesta saadaan välittömästi tieto kattilanomistajalle.

4.2.3 Magneettijauh tarkastus / MT (magnetic particle examination)

- Hitsausliitosten magneettijauhetarkastuksen standardit ([SFS-EN ISO 17638](#) ”[Hitsien rikkomaton aineenkoetus, Magneettijauhetarkastus](#)”. vahvistettu 23.8.2010, vanha SFS-EN 1290).
- Testaajalta vaaditaan EN-pätevyys.
- Pintamenetelmä, jossa kohteen on oltava magnetoituva ferriittinen teräs (hiiliteräs), jolloin lähes aina on suositeltavaa käyttää magneettijauhetarkastusta haettaessa särötyyppejä vikoja.
- Fluoresoiva menetelmä parantaa tarkastuksen herkkyyttä, mutta vaatii hämärän ympäristön ja ultraviolettivalon.
- Magneettijauhetarkastuksessa on myös sovellettu vieruskaapelimenetelmää, joka mahdollistaa ahtaiden kohteiden tarkastamisen ("putkirykelmät").
- Päähöyryputkiston MT tarkastukset on suositeltavaa tehdä fluoresoivalla menetelmällä hiottulle (n 120 Grit) pinnalle, kun etsitään virumisen aiheuttamia säröjä.

4.2.4 Tunkeumanestetarkastus / PT (liquid penetrant examination)

- Hitsausliitosten tunkeumanestetarkastuksen standardit: [SFS-EN ISO 23277](#) ”[Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsien tunkeumanestetarkastus. Hyväksymisraajat](#)”. vahvistettu 23.8.2010. Vanha SFS-EN 1289, SFS-EN571-1 ”[Rikkomaton aineenkoetus. Tukeumanestetarkastus. Osa 1. Yleisperiaatteet](#)”
- Testaajalta vaaditaan EN-pätevyys.
- Pintamenetelmä, joka soveltuu kaikille muille paitsi huokoisille materiaaleille.
- Paljastaa pintaan asti ulottuvat viat (myös pintahuokokset ja kuonan, jotka eivät näy luotettavasti magneettijauhetarkastuksessa)
- Vaatii pinnan puhdistamisen metallipinnalle.

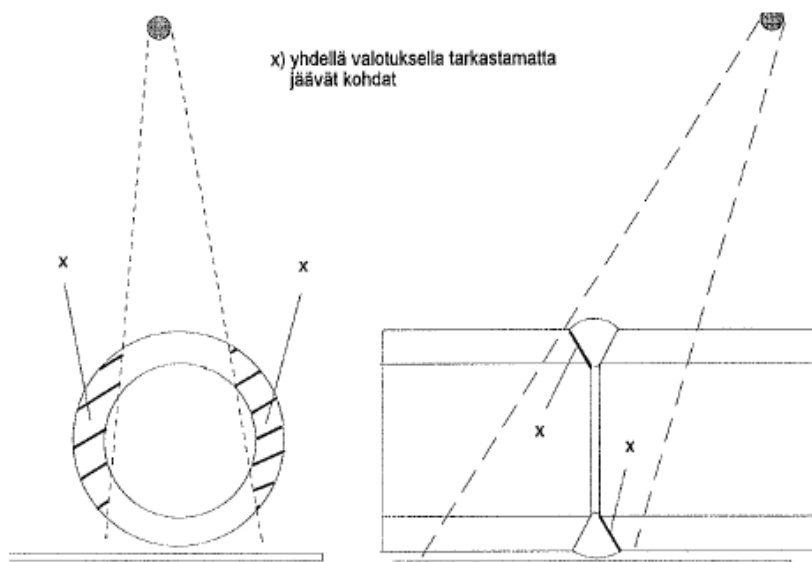
Kattilaolosuhteissa on suositeltavaa käyttää fluoresoivaa menetelmää, joka helpottaa tunkeumanesteen poistoa/puhdistusta erityisesti silloin, kun käytetään vedellä poistettavaa tunkeumanestettä. Riittävä puhtausaste nähdään heti uv-valossa eikä kohdetta tarvitse puhdistaa varmuuden vuoksi, kuten värillisellä menetelmällä joudutaan tekemään. Jos puhtausaste ei ole riittävä, lian aiheuttamat indikaatiot peittävät todelliset viat. Mikäli epäillään esim. kattilapesun aiheuttamaa kosteutta säröissä, niin rakenne on kuivattava. Apuna voidaan käyttää lämmittämistä (vältettävä suoraa liekkiä) tai kehitettä, jolla imetään kosteus ennen tunkeumanesteen levitystä.



Kuva 4-4. Fluoresoivalla tunkeumanesteellä tarkastetun pohjan särönäyttämiä

4.2.5 Radiografia/RT (radiographic examination)

- Standardit:
 - [SFS EN ISO 17636 -1 "Non-destructive testing of welds. Radiographic testing. Part 1: X- and gamma-ray techniques with film"](#) vahvistettu 4.3.2013
 - [SFS EN ISO 17636 -2 "Non-destructive testing of welds. Radiographic testing. Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors"](#) vahvistettu 4.3.2013
 - [SFS-EN 12517-1 "Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Osa 1: Teräksestä, nikkelistä, titaanista ja niiden seoksista hitsattujen hitsausliitosten arviointi radiografisella kuvauksella. Hyväksymisrajat"](#).
- Tarkastajalta vaaditaan EN-pätevyys
- Volymetrinen tarkastus, joka soveltuu erityisesti kolmiulotteisten vikojen, kuten huokosten ja kuonan toteamiseen.
- Lineaaristen vikojen, kuten liitosvikojen ja halkeamien suhteen valotus on tehtävä vian suuntaisesti. Kuvassa 5-5 on esitetty ellipsikuvauksessa yhdellä valotuksella tarkastamatta jäävät alueet. Hitsin täysin kattava röntgenkuvaus vaatii 4 valotusta, mikä jo kustannussyistä jää toteutumatta.
- Säteilylähteinä voidaan käyttää isotooppeja, puoli- ja tasavirta röntgen koneita sekä pulssikoneita (digitaalinen)
- Röntgen kuvauksen kohteet kunnonseurannassa ovat mm. korroosiokuvaus myös eristeiden läpi, ruiskujen kunto rakennetta purkamatta, jne.
- Digitaalinen radiografia tulee yleistymään kunnonseurannassa, koska se on reaaliaikaista, nopeampaa verrattuna filmiteknikkaan, rajalliset säteilymäärät ja säteilykeilan suuntaaminen mahdollista.



Kuva 4-5. Ellipsikuvauksessa yhdellä valotuksella tarkastamatta jäävät alueet.

Soodakattilaympäristöön soveltuvana sovelluksena on isotoopilla suoritettu korroosiokuvaus.

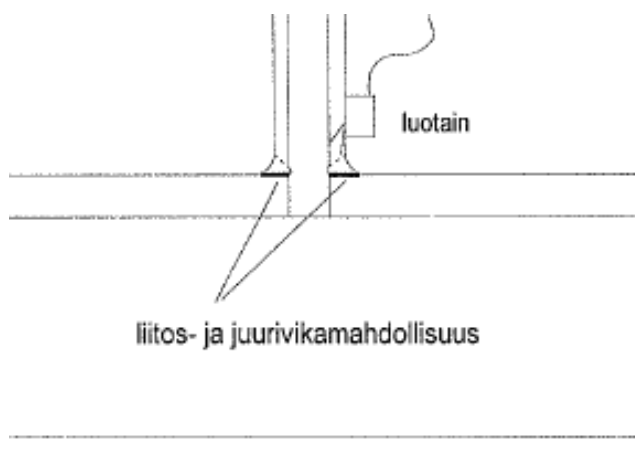
4.2.6 Ultraäänitarkastus / UT (ultrasonic examination)

Standardit:

- [SFS-EN 11666 ”Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsausliitosten ultraäänitarkastus Hyväksymisrajat”](#) (vanha SFS-EN-1712 sekä 1714)
- ”
- [SFS-EN ISO 23279 ” Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsien ultraäänitarkastus. Hitsausvirheiden tyypin määrittäminen”](#) (päivitetty 24.2.2010, vanha SFS-EN 1713)

Ultraäänitarkastus on volymetrinen menetelmä, joka paljastaa kaksidimensionaaliset viat, kuten liitosvian ja halkeaman. Lineaarisen vian on kuitenkin oltava lähes kohtisuoraan äänikeilaan nähden, mikä paksummassa aineessa edellyttää useamman luotauskulman käyttämistä. Nykyaikaisella vaiheistetulla UT-tarkastuslaitteistolla mahdollistaa useamman luotauskulman samanaikaisen käytön yhdellä scannauksella. Hitsiin nähden poikittaiset viat vaativat hitsin suuntaisen luotauksen. Hitsien tarkastuksessa UT-menetelmää on syytä täydentää pintamenetelmillä, jotta kaiken suuntaiset pintaviat todetaan.

Ultraäänitarkastusta käytetään nykyisin menestyksekkäästi standardin vastaisesti ohuiden materiaalien (seinämä < 8 mm) tarkastuksessa. Esim. jakotukin ja putken välistä pienaliitosta (kuva 5-6), jossa liitosvian mahdollisuus on suurempi kuin päittäisliitoksessa, ei voida tarkastaa röntgenkuvauksella. Ultraäänitestauksen herkkyys vikojen suhteen (ei herkkä kolmeulotteisille vioille) ei ole sama kuin optimikulmassa tehdyllä röntgenkuvauksella, mutta se on nopeampi suorittaa eikä vaadi kattilan tyhjentämistä muista työntekijöistä. Tarkastuksen luotettavuutta voidaan parantaa magneettijauhe- tai tunkeumanestetarkastuksella ja/tai pistokoeluontoisella röntgenkuvauksella (kuona ja huokoset).



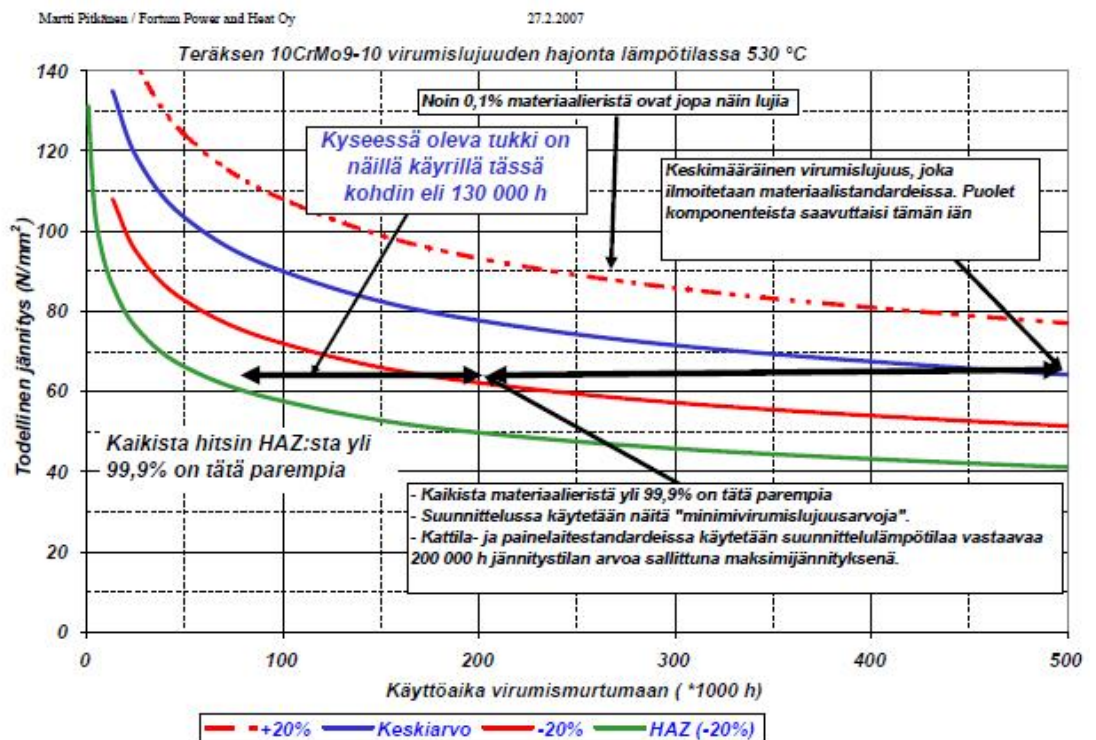
Kuva 4-6. Jakotukin ja putken välinen pienaliitos.

4.2.7 Pyörrevirtatarkastus/ET (eddy current testing)

- [SFS-EN 1711 “Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsien pyörrevirtatarkastus kompleksitasoanalyysillä”](#)
- Ei reagoi veteen
- Maalikalvo mahdollinen
- Soodakattilan pohjan pyörrevirtatarkastus
- Pohjan compound-tarkastus
- Särön syvyyden määrittäminen, kalvonpaksuuden määrittäminen
- Suurin käyttö on lämmönvaihtimien putkien sisäpuolisessa tarkastuksessa, kun kyseessä on sähköä johtava metalli
- Käytetään myös pintatarkastusmenetelmänä (myös ferriittinen teräs)
- Erikoissovellutuksina ferriittisen materiaalin tarkastukset kaukokenttä- (RFET) ja magneettinen vuotokenttä (MFL) menetelmillä.

4.2.8 Jäljennemenetelmä/REP (replica)

- Paineastiat ja putkistot
- Virumisasteen arviointi [SFS 3280](#) / [ISO 3057](#) / Nordtest ohjeen mukaisesti.
- Menetelmällä määritetään metallin virumis- ja hajaantumistaso mikrorakenteesta jäljenteen avulla. Viruminen alkaa tyypillisesti yli 450 °C lämpötiloista ja on materiaalista riippuvainen.
- Ennen hitsien jäljennetarkastusta suoritetaan aina magneettijauhetarkastus fluoresoivalla menetelmällä, jolla saadaan lisäarvoa tarkastukseen.
- Jäljennemenetelmällä voidaan paljastaa virumisasteen lisäksi ylikuumeneminen ja selvittää säröilyn syytä ainetta rikkomatta.



© Fortum Power and Heat 2007

Kuva 4-7. 10CrMo9-10 KP-tukin perusaineen ja hitsin virumislujuuden hajonta ja käyttäminen käyttötuntien mukaan. Perusmateriaalille suunniteltu käyttöikä 200 000 h (-20%) saattaa HAZ-alueella pudota jopa alle 100 000 käyttötuntin n 60 N/mm²



jännitystasolla. Syynä tähän HAZ:n heikompi virumislujuus /Fortum Service, Martti Pitkänen/.

Virumisen mukaan mitoitettujen komponenttien hitsien kuntoon pitää kiinnittää erityistä huomiota ja aloittaa tarkastukset kriittisten komponenttien osalta selvästi ennen suunnittelussa käytettyä elinikää. Kriittiset komponentit päähöyryputkistossa ovat mm. T-haarat ja jakotukit, joissa yhdeputken halkaisija on hyvin lähellä itse pääputkea.

4.2.9 Endoskoopitarkastus/END (endoscopy)

- Endoskoopilla tai putkistokameralla päästää tarkastamaan rakenteita ahtaissa kohteissa, kuten putkissa, onkaloissa ja raoissa.
- Menetelmällä täydennetään sisäpuolista tarkastusta
- Nykyisillä endoskoopeilla on mahdollista mitoittaa vikoja ja näyttämiä käyttämällä varjostavia tai stereolinssejä. Samalla ne mahdollistavat videoinnin ja valokuvauksen.

4.2.10 Akustinen emissioseuranta / AE (acoustic emission)

- Paineekokeiden ja rakenteiden käytönaikainen valvonta
- Voidaan käyttää rakenteen kuunteluun säröilyn ja rasiuksien toteamiseksi sekä atmosfäärin kuunteluun vuotojen ilmaisemiseksi. Putkirikko kasvaa vuodon seurauksena ja pienikin vuoto voi aiheuttaa viereisen putken vaurioitumisen, mikä lisää esim. sulavesiräjähdyriskiä.
- Rakenteen kuuntelu tehdään aaltotankojen (hitsattu putkeen) välityksellä. Ne mahdollistavat antureiden asennuksen eristeen ulkopuolelle ja samalla pudottavat antureiden lämpötilaa.
- AE-seuranta auttaa ohjaamaan muiden tarkastusmenetelmien käyttöä.
- Antaa tietoa ajokäyttäytymisen vaikutuksista ja siitä, missä vaiheessa käyttöä vioittuminen mahdollisesti tapahtuu.

4.2.11 Lämpökuvaus (thermography)

- Lämpökamera mittaa kohteiden lähettämää lämpösäteilyä (infrapuna-aallonpituus), joka voidaan muuttaa lämpötiloiksi kalibroinnin avulla.
- Voidaan käyttää laajasti kunnonseurannassa laitoksen käynninaikana.
- Lämpökuvaus on nopea menetelmä tarkastella laajoja alueita ja useita kohteita samanaikaisesti.
- Lämpökameran käyttö edellyttää menetelmän syvällistä osaamisesta (emissiivisyys, lämmönsiirtyminen...)
- On käytetty mm. kattilan täytön seurannassa.

4.2.12 Kovuusmittaus/HT (hardness test)

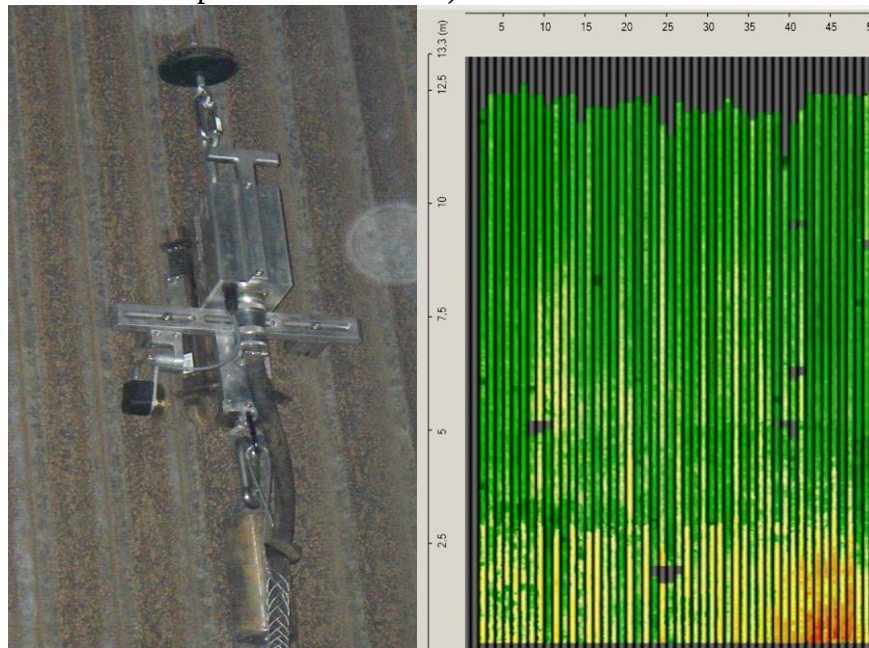
- Kovuusmittaus korreloi hyvin mittauskohteen lujuusominaisuuksien kanssa.
- Kovuusmittaustulokset kertovat materiaaliteknisistä muutoksista esim. vauriotilanteissa.
- Hitsauksen laadunhallinta (HAZ kovuus piikit) päähöyryputkistossa.

- Kovuus mittaamenetelmä pitää valita kohteen mukaan (materiaali, ainevahvuudet jne..)
- Pinnanlaatu vaikuttaa oleellisesti mittaustulosten hajontaa, minkä tähden pitää pyrkiä vähintään 220 karheuteen.
- Tarkempia tietoja ja sovellusohjeita eri menetelmistä löytyy laitevalmistajan sivuilta.

4.2.13 T-Scan paksuusmittaus

Kattilan seinämät ja tulistimet ovat mahdollista paksuus mitata suurella laajuudella (lähes 100 %:sti) käyttämällä T-Scan tekniikkaa.

- Tekniikka perustuu EMAT-antureihin (Electro Magnetic Acoustic Transducer), joissa ei tarvita erillistä kytkentäainetta.
- Tarkkuus sama kun perinteisellä UT:llä
- Kattilan seinämäputkien paksuudet voidaan mitata kolmella mittalinjalla, joista jokainen mittaa 15 mm leveää kaistaa
- Mittaustiheys jopa 1 mm välein.
- Menetelmä on erittäin herkkä asteittaiselle kulumiselle.
- Voidaan tarkastaa putkia jotka ovat pinnanlaadultaan huonoja – ilman hiontaa.
- Menetelmällä on mahdollista tarkastaa pinnoitettuja ja compound putkia (ferriittistä materiaalia pitää olla kohteessa)



Kuva 4-8. T-scan laitteisto kattilan seinällä ja Client ohjelmiston tuottamaa visuaalista paksuusmittaustulosta tarkastuksista.

4.2.14 IRIS-tekniikka

- Ultraäänitekniikkaan perustuva menetelmä, joka soveltuu ferriittisten tuubien sisäpuoliseen tarkastukseen
- Putken suunnassa lähetetty ääni käännetään peilin avulla putken seinämän suuntaan putken ollessa vesitäytössä ja peiliä pyöritetään vesiturpiinilla tai sähköisesti.

- Menetelmä on tarkempi kuin pyörrevirtamenetelmällä tehty tarkastus, mutta huomattavasti hitaampi ja työläämpi.
- Iris-anturi tulee olla kohtuullisesti, mitattavan putken kokoinen

4.2.15 Sisäpuolisen kerrostuman / magnetiittikalvon paksuusmittaus

Kattilaputken sisäpintaa suojaa normaalisti magnetiittikerros, jonka paksuus vaihtelee 10 µm:stä 200 µm:iin. Vedenkäsittelyongelmat voivat kasvattaa magnetiittikalvon paksuutta tai aiheuttaa erilaisista epäpuhtauksista koostuvan kerrostuman, jonka alle saattaa syntyä korroosioaurio, mikä pahimmillaan on aiheuttanut ns. vetyhyökkäyksen.

Vetyhyökkäysriski on pahin siellä, missä lämpökuorma on suurin. Kuvassa 5-9 on lämpövuon jakautuminen etuseinän keskellä primääritason alapuolelta nokan tasolle kattilassa, jossa perinteisesti laskettuna keskimääräinen lämpövuoto 90 kW/m². Kuvan mukaan primaari-ilma-aukkojen alueella lämpövuoto ylittää 230 kW/m².

Error! Objects cannot be created from editing field codes.

Kuva 4-9. Lämpövuon jakaantuminen kattilan etuseinällä.

Korroosioaurioita on todettu kohdissa, jossa virtaus häiriintyy. Tällaisia paikkoja ovat aukkojen ohitusputket (käyrät) ja hitsien vierusalueet, jonka syynä ovat ylisuuret juurikuvut. Vaurioriskiä lisää ylileveät evärakenteet, jotka kasvattavat paikallista lämpövuotoa.

Vetyhyökkäys aiheuttaa aina sulavesiräjähdyksriskin ja mittavat korjaustoimenpiteet.

Ilmiötä voi tutkia ultraäänimenetelmillä seuraavasti:

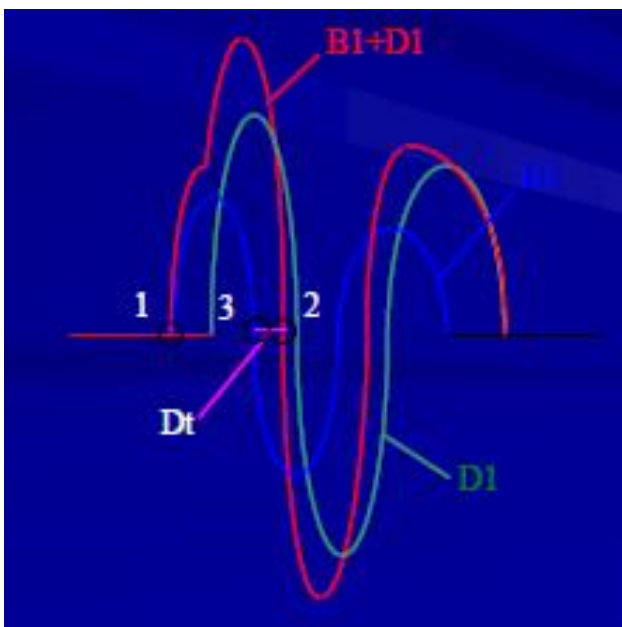
Alkava sisäpinnan korroosio tai paksu epäpuhtauksista koostuva kerros vaimentaa ultraääntä voimakkaasti. Normaalisti ultraäänilaitteen a-näytössä näkyy useampi taustakaiku kuten kuvan 5-10 vasemman puoleisessa a-näytössä. Jos korroosiovaihe on alkanut tai sisäpinnalla on paksu epäpuhtauksista koostuva kerros, niin taustakaiut vaimenevat voimakkaasti kuten kuvan oikean puoleisessa näytössä. Vaimennuksen arviointi vaatii kuitenkin tarkastajalta kokemusta, sillä vaimennukseen vaikuttaa ulkopinnan kunto/puhtaus ja käyrissä geometria.



Kuva 4-10. A-näytöt ehjästä putkesta ja vetyhyökkäyskohdalta.

Kerrostuman tarkempi määrittys perustuu kahteen ultratekniikkaan. Sisäpuolisen magnetiitin paksuuden määrittämisen mittaustekniikka perustuu korkeaan taajuuteen ja poikittaiseen aaltomuotoon. Poikittainen aaltomuoto mahdollistaa ohuemman kalvonpaksuuden mittaamisen. Tällä menetelmällä on voitu mitata magnetiittipaksuuksia 80 μm :stä ylöspäin.

Toinen kerrostuman paksuuden mittaaminen perustuu siihen, että kerrostuma-ilman/veden rajapinnasta heijastuva aalto levantää signaalia verrattuna puhtaasta metalli-ilma/vesi signaaliin, katso kuva 5-11. Tässä mittauksessa käytetään pitkittäistä aaltomuotoa ja menetelmällä luvataan päästävän jopa 20–40 μm minipaksuuteen.



Kuva 4-11. Ultraäänikaikujen käyttäytyminen saostuma/putki rajapinnassa

Molemmat tarkemmat mittaustavat vaativat erillisen kalibrointipalan, jolla varmennetaan äänennopeus kerrostumassa.

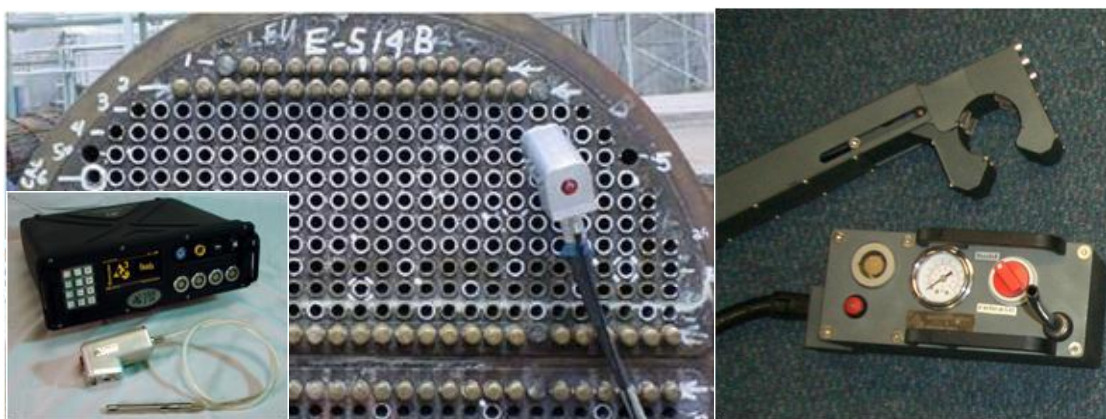
Sisäpuolisen kerrostuman mittauksissa on muistettava, että ongelmakohdat saattavat olla hyvin paikallisia. Jos kattilassa todetaan epäpuhtauksia ja edellä olevat mittaustavat antavat viitteitä sisäpuolisista kerrostumista, niin varmin tapa on ottaa kattilasta näytepalat, joista mitataan laboratoriossa kerrostumien paksuus ja koostumus. NDT-menetelmät kohdistavat näytepalojen oton ongelmakohtiin.

4.2.16 Guided Wave

Guided Wave tekniikka perustuu ultraääneen, joka on matalataajuisia ja etenee materiaalin pinnansuuntaisesti. Guided Wave on suuntaa-antava menetelmä, jota on hyödyllistä käyttää putkistojen ei luoksepäästävässä osissa. Guided Wavella saadut mittatulokset on hyvä tarkastaa lähemmin esimerkiksi käsivaraisilla laitteistoilla. Guided Waven vahvuus onkin saada suuntaa-antavaa tietoa, mistä kohdin esim. maanalaiset putkistot on syytä kaivaa esiin ja tarkastaa lähemmin.

- Menetelmä havaitsee muutoksia putkien poikkipinta-alassa.
- Tekniikan herkkyys on 5 % poikkipinta-alasta.
- Tekniikalla on mahdollista luodata jopa satoja metrejä anturipannasta molempiin suuntiin.
- Testaus tehdään normaalisti asentamalla kiinteä tai ilmatäytteinen lähetinrenkas putken ulkopinnalta.

Tekniikan uusia sovelluskohteita on mm. lämmönsiirtimien tarkastaminen synnyttämällä ultraääni putken sisäpinnan kautta. Guided Wavesta on olemassa samantyyppisiä sovelluksia, kuten Iris-tarkastuksessakin, mutta GW on enemmänkin suuntaa-antava sovellus ja Iris on näistä kahdesta menetelmästä se tarkempi.



Kuva 4-12. Guided wave laitteiston sovelluksia lämmönvaihtimelle sekä tuubiputkistolle /Guided ultrasonics ltd/.

4.2.17 RFET (kaukokenttämenetelmä pyörrevirtatekniikalla, Remote Field Electromagnetic Technique)

Sisäpuolinen pyörrevirtatarkastus ferriittisille putkille, jolla voidaan todeta laaja-alaiset ohentumat (esim. nuohojen aiheuttama kuluma). Esimerkiksi keittopintaputkien ohenemien mittaaminen.



Kuva 4-13. RFET laitteisto putkiston tarkastukseen /Testex Incorporation/

4.2.18 Magneettinen vuotokenttätarkastus (MFL)

Tarkastettava kohde magnetoidaan kestopagneetilla ja ylä- tai alapinnalla olevien vikojen synnyttämä magneettinen vuotokenttä havaitaan Hall-anturilla. Erityisen käyttökelpoinen menetelmä on pistesyöpymien ja paikallisten korroosioaurioiden paikantamiseen silloin, kun kohde on ferromagneettista materiaalia 6-20 mm paksuusalueella. Menetelmällä paikannetaan vikakohdat, joiden tarkempi analysointi suoritetaan esim. ultraäänimenetelmällä. MFL:n tarkastusherkyys on riippuvainen kohteen paksuudesta. Menetelmä ei ole herkkä havaitsemaan tasaisesti ohentunutta laaja-alaista syöpymää. Tänä päivänä löytyy laitteita, joissa on yhdistetty ET- ja MF-tekniikka.

4.2.19 Jäännös jännitystilat

Materiaalin jäännösjännitystilat voidaan mitata ainetta rikkomatta. Mittausmenetelmät perustuvat barkhausenin-kohinaan ja röntgendiffraktioon.

Barkhausen-kohina on materiaalista mitattava magneettinen parametri. Se on riippuvainen jäännösjännityksistä. Menetelmä vaatii kalibrointipalat, joihin tarkastuskohdetta verrataan.



Röntgendiffraktio menetelmässä mitataan jännitysten kiteisessä metallissa synnyttämien siirtymien aiheuttamia muutoksia hilavakioissa. Tutkittavaan näytteeseen kohdistetaan röntgensäde kahdessa kulmassa. Intensiteetinhuippukohdan ja muodon perusteella voidaan laskea vastaava jännitystila. Mittausherkkyyks on noin 50 N/mm^2 .

4.2.20 Ainetta rikkovat tarkastukset

Vauriotapauksessa ja materiaaliselvityksissä on aina syytä ottaa kunnolliset näytepalat, joita voidaan myöhemmin laboratoriossa tutkia. **Näytepalojen turhaa puhdistusta ja käsittelyä on vältettävä. Jos mahdollista on näyte irrotettava sahaamalla, jotta materiaaliominaisuudet eivät muutu.** Riittävän taustatiedon kerääminen on erittäin tärkeää, joka korostuu vauriotapauksissa.

4.3 Tarkastettavat kohteet

Liitteessä I on esitetty luettelomaisesti seisokinaikaiset tarkastuskohteen, vikaantumismekanismin ja soveltuvan tarkastusmenetelmän mukaan.

Listaus on suuntaa antava, eikä voi olla täydellinen, kun otetaan huomioon kattiloiden ikäjakauma sekä erilaiset rakenteet ja ajotavat.

4.4 Vesipainekoe korjausten jälkeen

Kattilan korjauksen jälkeen yleensä suoritetaan painekoe, jolla varmistetaan kattilan tiiveys ja käytettävyys ennen starttia. Painekokeen suorituksessa voidaan soveltaa standardin [SFS-EN 12952-6](#) kohtaa 10.2 kuitenkin siten, että painekokeen koepaine on enintään 1,3 X suurin sallittu käyttöpaine. Koepainetta määritettäessä voidaan huomioida korjauksen laajuus ja kohta (tulipesä, tulistin tai ekonomaiseri), seuraavaan määräaikaistarkastukseen liittyvän painekokeen ajankohta jne. Vähintään koepaineen pitäisi olla 1.1 X suurin sallittu käyttöpaine.

Painekokeessa käytettävän veden lämpötilaa määritettäessä tulee ottaa huomioon kattilan materiaalien haurasmurtumavaara ja vanhempien kattiloiden osalta voidaan joutua ylittämään em. standardin yläraja $+50 \text{ °C}$.

Painekokeessa koepaineen tasaannuttua tarkastetaan silmämääräisesti paitsi korjauskohdat myös kattilan painerunko mahdollisten vuotojen havaitsemiseksi, joita



ei NDT-menetelmillä ole havaittu tai jotka ovat syntyneet painekokeen yhteydessä. Kattilan sisäosien tarkastuksessa tulee huomioida työturvallisuus ja laskea koepaine arvoon, jossa tarkastus on turvallista tehdä.

Painekokeessa käytettävän veden lämpötila, koepaine ja mihin arvoon paine sisäpuolen tarkastuksessa lasketaan sovitaan tapauskohtaisesti painelaitetarkastajan kanssa.

4.5 Dokumentointi

Kaikista tarkastuksista, mukaan lukien silmämääräiset ja toteamisluontoiset tarkastukset, on tehtävä selkeät pöytäkirjat ja raportit, joista selviää erityisesti korjaustarpeet. Korjauskohdat on myös merkittävä selvästi itse kohteisiin, jotta korjaukset kohdentuvat varmasti oikeisiin paikkoihin.

Pöytäkirjat on syytä tehdä heti tarkastuksen jälkeen, jolloin asiat ovat vielä tuoreessa muistissa. Tarkastuksista ja korjauksista tulee tehdä yhteenveto, joka auttaa myöhemmissä tarkasteluissa.

Dokumentointiin on saatavissa ATK-ohjelmia, joihin voidaan liittää mm hitsausohjeita, pitkäntähtäimensuunnitelmia jne.

LIITTEET

Liite 1 Komponenttikohtaiset suositukset NDT-tarkastuksille



5 SOODAKATTILAN VAURIOT

Kappaleessa käsitellään soodakattilan tyypillisiä vaurioita ja syitä niiden syntymiseen. Tiedot on kerätty Soodakattilayhdistyksen vauriotietokannasta.

5.1 TULIPESÄ

Kompound-putkien säröilyä esiintyy soodakattilan alaosassa tyypillisesti kolmessa eri paikassa: pohjanputkissa sekä ilma- ja sula-aukoissa. Tarkastuksissa ja vauriotutkimuksissa on todettu, että säröillä on esiintymispaikasta riippumatta samoja luonteenomaisia piirteitä. Säröjä on todettu putkien ylä- ja sivupinnoilla sekä putkia yhdistävissä evissä että evä-putkihitseissä.

5.1.1 Pohja

5.1.1.1 Pohjan säröt

Havaituista pohjan putkien ja evien säröistä suurimman osan on todettu johtuvan jännityskorroosiosta.

Mahdollisia syitä säröilyyn:

- Jos pohjan säröt ovat kannatuspalkin reunan kohdalla, kannatusten aikaansaamalla vetojännityksellä on merkitystä jännityskorroosion syntyyn.
- Jos säröjä esiintyy reunoilla sularajalla ja käynnistyspolttimilla voi olla merkitystä säröilyyn.
- Jos kattilan pohja on ollut pitempiä aikoja kuivaamatta, vesipesun mahdollisuus säröjen aiheuttajana kasvaa.
- Reunaputket ovat alttiimpia kiertohäiriöille. Kiertohäiriön havaitsemiseksi putkistoon on asennettu virtausmittauksia.
- Pällehitsauksen aikana esiintulleet uudet säröt eivät välttämättä johdu siitä että hitsaus aikaansaanut uusia säröjä vaan jännitykset avasivat jo aiemmin syntyneitä säröjä jolloin ne voitiin löytää

HR11 materiaalin säröily ([vaurioilmoitus 4/2007](#))

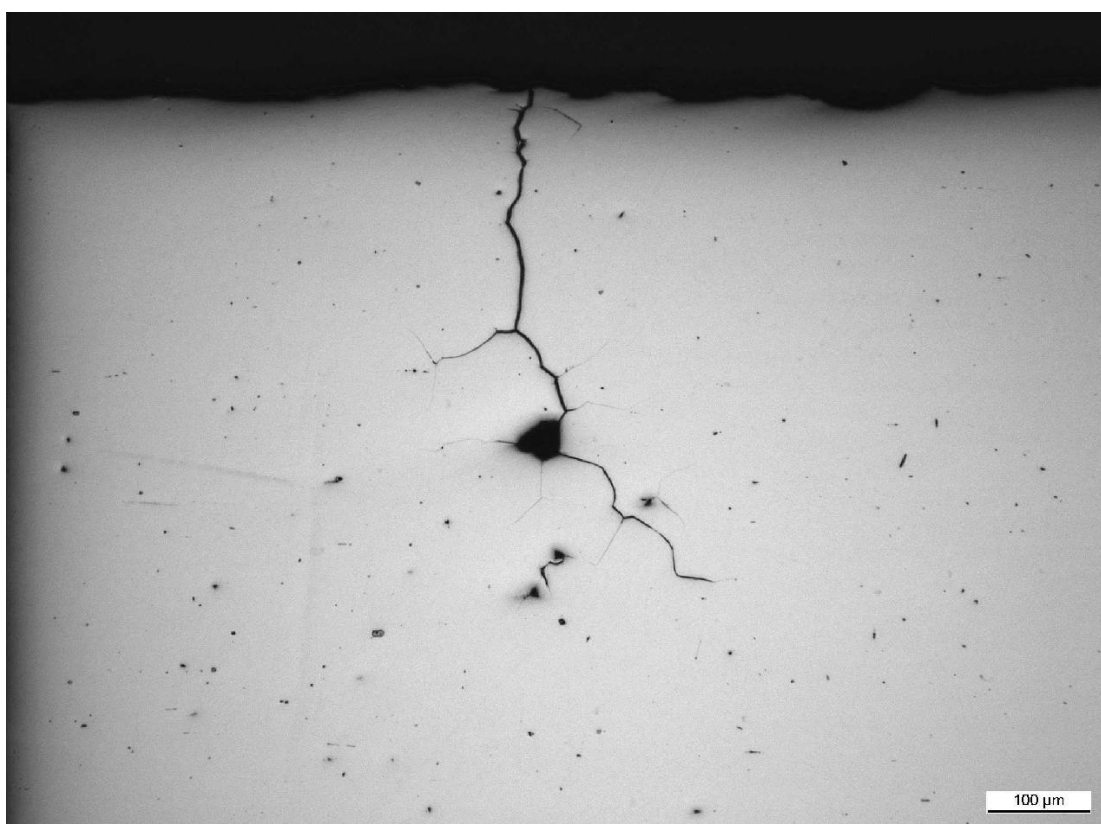
- Rutiinitarkastuksessa havaittiin HR11 pohjaputkien evämateriaalina käytetyssä Alloy 825 säröjä, Kuva 6-1.
- Tutkimusten mukaan evämateriaalin säröilyn syy on raerajajännityskorroosio (IGSCC, intergranular stress corrosion cracking), mutta sen aiheuttajasta ei ole varmuutta.
- Metallografisten tutkimusten mukaan evämateriaali ei ole herkistynyt pohjapaneelien hitsauksen yhteydessä tai käytönaikana.
- Vajaaksi jääneellä liuotushehkutuksella ei ilmeisesti ole ollut vaikutusta säröilyyn, sillä kaikki todetut säröt etenevät nykyisen rakenteen raerajoja pitkin.
- Käyttökokemukset Alloy 825 tyyppisistä compoundputkista soodakattiloissa ovat hyviä. Tähän mennessä Alloy 825 compound pohjaputkissa tai evissä ei ole

havaittu säröjä. Hyvin pieniä säröjä on havaittu muutamien kattiloiden sula-aukkojen putkissa, mutta ei evissä.

- Säröjä on myös havaittu kahdessa kattilassa primääri-ilma-aukkojen alaosissa.
- Tyypillistä kaikille tähän mennessä havaitulle säröille on ollut se, että ne ovat edenneet rakeiden läpi, eikä raerajoja pitkin. Soodakattiloissa käytössä olevista kompondputkimateriaaleista raerajoja pitkin eteneviä säröjä on tähän mennessä todettu vain voimakkaasti kylmämuokatussa Alloy 625 materiaalissa.

Kestoisuustyöryhmän lausunto:

- Pohja-alueet tulee tarkastaa, vaikka pohjamateriaali olisi Sanicro 38 tai vastaava materiaali.
- Vaurioon voi olla vaikutusta evän leveydellä, joka on suurempi kuin uudemmissa kattiloissa.



Kuva 5-1. Esimerkki poikkileikkaushieessä todetuista tyypillisistä haarautuneista suurista säröistä.

Kattilan katosta pudonnut kami vaurioitti pohjaputkia ([Vaurio-ilmoitus 2/2001](#))

- Kattilan ollessa pulloitetuna n 13 tuntia pohjalle putosi tulipesän katosta kami joka taivutti pohjaputkiston ja kannatuspalkit.
- Pohjan osittainen uusiminen, kannatusten vahvistaminen ja nuohointen lisääminen harkinnassa.

Kestoisuustyöryhmän lausunto:

- Kamin todettiin muodostuvan useimmissa tapauksissa tulipesän katon läpimenokohtaan tulistimen tai verhon läpimeno), ei etuseinän ja katon kulmaan kuten joskus on oletettu.

- Tehtaiden on kiinnitettävä huomiota tulipesän yläosan kamin muodostumiseen ja sen poistamiseen.
- Kamin muodostumista tulisi seurata siirtymällä aika ajoin, mahdollisuuksien mukaan, öljytulille ja tekemällä silmämääräistarkastus



Kuva 5-2. Taipuneet pohjaputket ja kannatuspalkki

5.1.1.2 Kamparauta

Vielä 1990-luvulla sattui sulavuotoja seinän ja pohjan välisen tiivistelevyn (kamparauta) takia. Tyypillisesti kamparaudan todettiin palaneen puhki konstruktiosta johtuen. Lisäksi havaittiin muutamia hitsausvirheitä, missä kamparauta oli hitsattu heikosti evään kiinni ja kamparaudan ja pohjan väli oli liian suuri sekä massaus massakotelon sisällä oli irronnut pohjasta aiheuttaen raon.

Soodakattilan vesipesut aiheuttavat myös sen, että massakotelojen rakojen kautta vesi syövyttää ja heikentää massauksia, jos ko. rakoja on kotelossa. Sularännin massauksissa on tärkeää tehdä työvaiheet massauksien kannalta oikein sekä käyttää sellaista massaa, joka ei kutistu eli ei tee rakoja.

5.1.1.3 Kouruvauriot ja niiden ympäristö

5.1.2 Seinät

- Hiiliteräksen ja ruostumattoman teräksen rajapinta
- Primääriaukon ohitusputket

5.1.3 Katto

5.2 VERHOPUTKISTO

5.3 TULISTIN

5.3.1 Ruiskujäähdyttimet

Ruiskujäähdytin hajonnut ([Vaurioilmoitus 11/2008](#))

- Soodakattilan tertiäritulistinelementin vaihdon yhteydessä suoritettiin tertiäritulistimen jakokammion endoskooppitarkastus.
- Tarkastuksessa havaittiin rikkoutuneen ruiskun osia kammion pohjalla.
- Ruiskujen kuvauksissa todettiin kahden ruiskun rikkoutuneen.
- Irronneet osat poistettiin jakokammioista ja ruiskut korvattiin väliaikaisilla ruiskuilla. Kaikki ruiskut vaihdetaan seuraavassa seisokissa.

Kestoisuustyöryhmän lausunto:

- Tyypillinen vaurio ruiskujäähdyttimellä, jossa ruiskutuskartio ruostumatonta terästä.
- Rakenne on tarkastettava säännöllisesti ja mahdollisuuksien mukaan korvattava muulla lämmönkestävällä materiaalilla.

5.4 KONVEKTIO-OSA

5.5 LIERIÖ

5.6 EKONOMAISERI

5.6.1 A- ja B-putket

5.6.2 Evän päät/kavennukset

5.7 LIUOTTAJA

Sulavesiräjähdyksen liuottajalla ([Vaurioilmoitus 13/1997](#))

- Kattilalla ollut sulakourujen tukkeutumisongelmia. Kourut saatiin välillä auki. Kattilassa ei ollut isoa kekoa, pikemminkin tulipesän pohja oli sulan peittämä.
- Sulakourut tukkeutuivat niin, että ajoittain oli vain 2/4 kourua osittain auki. Lopulta saatiin tukkeessa olleet 2 keskimmäistä sulakourua auki, jolloin sulantulo kattilasta ryöstäytyi valloilleen. Sulantulo oli niin voimakasta, että liuottaja täyttyi ja sulavesiräjähdyksiä tapahtui sulakouruilla ja liuottajalla.
- Räjähdyksen seurauksena sulaa roiskui ympäriinsä liuottajan ja sulakourujen alueella. Roisku sula sytytti kaapeleita yläpuoliselta n. 3,5 metrin korkeudella olleelta kaapelihyllyltä ja vaurioitti laitteita liuottajan alueella.
- Kattilaa ei pikapysäytetty eikä pikatyhjennetty.

Kestoisuustyöryhmän lausunto:



- Seisokissa pesty, pesuvedet puskuri altaaseen.
- Suolavesi ajettiin haihduttamolle. Orgaaninen aine loppui. Ajotapa virhe.

5.8 VESI- JA HÖYRYPUOLEN VAURIOT

5.9 ILMAN ESILÄMMITTIMET

5.10 MUUT

5.10.1 Kaasuräjähdyks

Kaasuräjähdyks ([Vaurioilmoitus 14/1992](#))

- Tapahtuman alkuunpanijaksi osoittautui höyrystinosan putki, jossa hitsausaumaan oli tullut vuoto ja vuodon aiheuttama vesisuihku kulutti viereisen putken niin ohueksi, että se lopulta repeytyi. Repeytynyt aukko oli kooltaan n. 10 * 25 mm
- Kuivakiehuntau toiminta esti kattilan ilmapuhaltimien käytön kattilan tuulettamiseksi.
- Kuivakiehuntau suojan toiminta tulee kytkeä siten, että toimenpiteet ovat samat kuin pikapysäytyksessä, jolloin kattilaa voidaan huuhdella sekundääri-ilmasuuttimien kautta ja primääritason ilmansyöttö on suljettu keon palamisen ehkäisemiseksi.

LIITE 1

Komponenttikohtaiset suositukset NDT-tarkastuksille

SEISOKINAIKAISET TARKASTUSKOHTEET JA MENETELMÄT

Visuaalinen tarkastus oletetaan tehtävän kaikille komponenteille aina, eikä mainita alla olevassa menetelmä kohdassa ilman erityistä tarvetta.

Kohde	Menetelmä	Kommentit
Syöttövesisäiliö	MT, TM	Saumat. Kaasunpoistimien visuaalinen tarkastus. Erityishuomio hienorakenneteräksissä säiliöissä ”Raex”.
Syöttövesilinja	TM, RT, VT	Eroosio/korroosio mm venttiilien ja mittauslaippojen jälkeen sekä käyrissä.
Päähöyrylinja	MT, REP, HT	Viruminen. Erityisesti isot yhteen ja liitokset sekä venttiilit. MT tarkastus suoritetaan hiotetulta pinnalta fluoresoivalla menetelmällä.
Tulistimet	MT, REP, HT TM MT VT, TM VT, (TM) VT, REP, HT, OK Digi RT	Viruminen, kammiot Eroosio/korroosio, tulistinputkien alakäyrät mukaan lukien paketista ulos tulleet käyrät. Sidehitsien päät. Suolavuodot kattokaappien läpivientikohdissa voivat olla putkivaurioiden esiaste. Nuohoimien kohdat joka seisokissa (eroosio/korroosio paketista irti päässeissä putkissa). Putkien värin ja muodon muutokset voivat johtua ylikuumenemisesta. Roikkutulistimien pohjakäyrien kerrostuma / vierasesineet
Höyryn jäähdyttimet	END, RT	Sisäkartion ja ruiskutussuuttimen kunto. Huomioi suuttimen eheys yhdekappaleen sisällä
Verhot/nokat	TM VT	Korroosio/eroosio. Kolhut ja muotovirheet (kamit)
Tulipesän seinät	TM VT, PT RT tai UT, PT VT, TM	Paksuusmittaus linjoittain (huomioi epäsymmetrinen oheneminen). Säröt/syöpymä compound/hiiliteräs-hitseissä. Jatkohitsit: kriittisimmät sularännien ympäristön hitsit (terminen rasitus). Evien eroosio / korroosio (jos silmämääräisesti havaitaan ”kulumaa” -> TM)
Seinät (eristepuoli)	VT, TM	Hiiliteräksen syöpyminen (onko ulkopuolelta pinnoittamattomia compound-hitsejä?).
Aukot	VT, PT TM	Säröt ilma-aukkojen ja sularännien ohitusputkissa ja evä rakenteissa. Katso Kuva L3 Aukkojen reunaputket. Huomioi kaikukäyttäytyminen (huono vesikemia)
Pohja/compound	VT PT, ET TM	Syöpymät ja kolhut. Katso Kuva L4 ja L5 Koko pohjan alue. Fluoresoiva menetelmä ja pohjan kuivaus (katso ETY:n ohje). Sivuseinien tiivistelyissä on tavattu alapuolista korroosiota (hiiliteräksen puoli). Katso Kuva L4
Pohja/hiiliteräs	VT, TM	Korroosio on usein hyvin tasaista, jonka johdosta oheneminen selviää vain paksuusmittauksella. Hitsien, compound-alueen ja tiivisterautojen tarkastus tehdään kuten edellä.
Pohjakaappi	VT	Sulavuodot ja muodonmuutokset
Lieriöt	VT MT UT	Sisäpuolinen tarkastus ennen puhdistustoimia, sillä pahimmat säröt/halkeamat näkyvät ruostejätkinä Sisäpinnan tarkastus vaipan ja päätyjen hitseille (myös juoksuputket, miesluukut, miesluukkujen saranat ja muiden varusteiden pienasaumat) sekä reikäkenttäalueet ja alalieriön pohja-alue pistokoeluonteisesti. Vaipan ja päätyjen hitsit. Onko esim. pääty/miesluukku-hitsissä rakenteellinen juurivirhe?
Keittopintaputkisto	VT	Keittopintaputkien päät lieriön sisäpuolelta ja putkien syöpyminen ulkopuolelta.

	TM UT VT, TM	Keittopintaputken korroosio lieriön vaipan kohdalla mankelointikohdan vieressä: tarkastus suoritetaan luotainpidikkeen avulla tai ultraääneen perustavalla IRIS-laitteella, joka vaatii kuitenkin putken vesitäytön. Huonon tuennan aiheuttama säröytyminen mankelointikohdan vieressä. Tarkastus tehdään pidikkeellä kuten edellä, mutta kulmaluotaimella. Nuohoimien kohdat.
Veden esilämmitin (ekonomaiserit)	TM TM, UT VT, TM PT, MT	Eroosio vesipuolella maksimivirtauskohdissa, kammiot ja yhdysputket. Jos syöttöveden lämpötila on alle 120°C, saattaa ilmetä kastepistesyöpymää aivan alakammion vieressä putkessa ja putki/alakammio-hitsissä Nuohoimien kohdat sekä paikat joihin kerääntyy suolaa (esim. seinän ja reunimmaisen elementin väli). Evien päät ja tukki/putki-hitsit.
Tukit	END, (TM)	Epäpuhtaudet, syöpymät, hitsit
Tuenta	VT	Pohjaputkien lepääminen palkkien päällä, ripustintankojen kireys, kattilan asema ja päähöyryputki sekä käynnissä että seisokissa
Vesikemia	VT END OKS, UT	Yleensä lieriön sisäpinnan punerrus kertoo huonosta vesikemiasta. Toisena selvänä indikaationa on epäpuhtaudet alajakotukeissa ja vesityslinjoissa. Oksidi- ja kerrostumakalvon paksuusmittaukset. Kohteina höyrystimien ja tulistimien putket
Nuohoimet	VT, TM	Ensimmäisessä elementissä seinästä katsottuna saattaa olla nuohoimen vuodon aiheuttamaa eroosiota/korroosiota. Tarkista nuohoimien venttiilit sekä höyrykierto (lauhteenpoisto)

LYHENTEET:

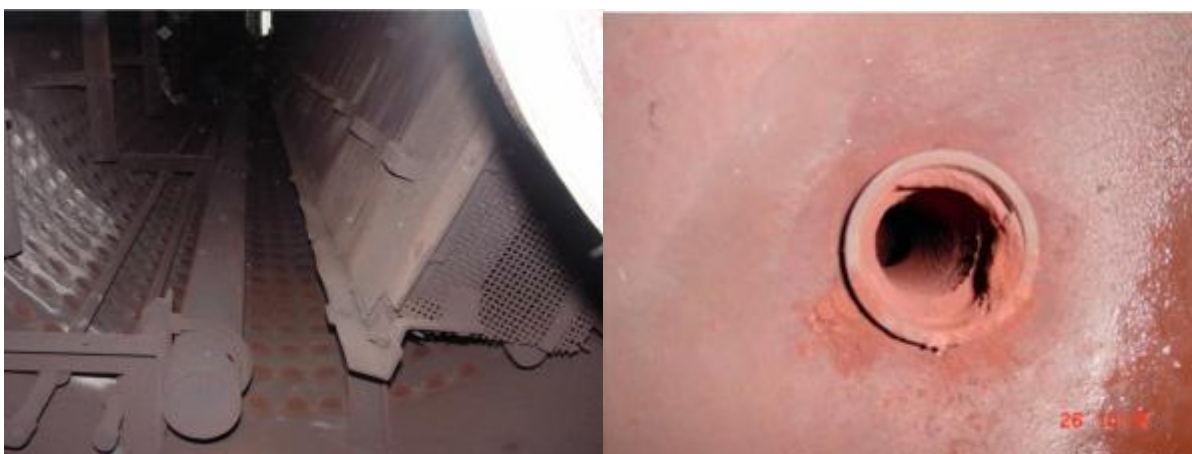
VT	=	silämääräinen tarkastus
TM	=	paksuusmittaus
PT	=	tunkeumanestetarkastus
MT	=	magneettijauhetarkastus
UT	=	ultraäänitarkastus
RT	=	radiografia
ET	=	pyörrevirtatarkastus
REP	=	jäljennetarkastus
HT	=	kovuusmittaus
AE	=	akustinen emissio
OKS	=	oksidikalvon paksuusmittaus
END	=	endoskooppitarkastus

VALOKUVIA SOODAKATTILAN ERI OSISTA JA VAURIOISTA



Kuva L1. Värimuutoksia seinällä

Kuva L1 on vauriokattilan seinältä. Osa vikakohdista oli mustunut. Kattilatarkastus pitää aina aloittaa silmämääräisellä tarkastuksella, jossa selvitetään väripoikkeamat normaalista. Erityisiä riskipaikkoja ovat mm. poltinaukkojen yläpuolet (virtauksen vaikutus liekkiin). Värimuutokset aiheuttavat aina lisätutkimuksia.



Kuva L2. Lieriössä epäpuhtauksia ja värimuutoksia

Kuva L2. Epäpuhtaudet ja harmaasta poikkeavat värimuutokset johtavat lisätutkimuksiin. Sen lisäksi että tehdään höyrystimensisäpinnan NDT-tarkastuksia

tulipesässä, tarkistetaan jakotukkien puhtausasteet. Oikean kuvan tapauksessa on riskinä höyrystinputkien sisäpuolen kerrostumat ja jopa tukkeumat vesityslinjoissa.



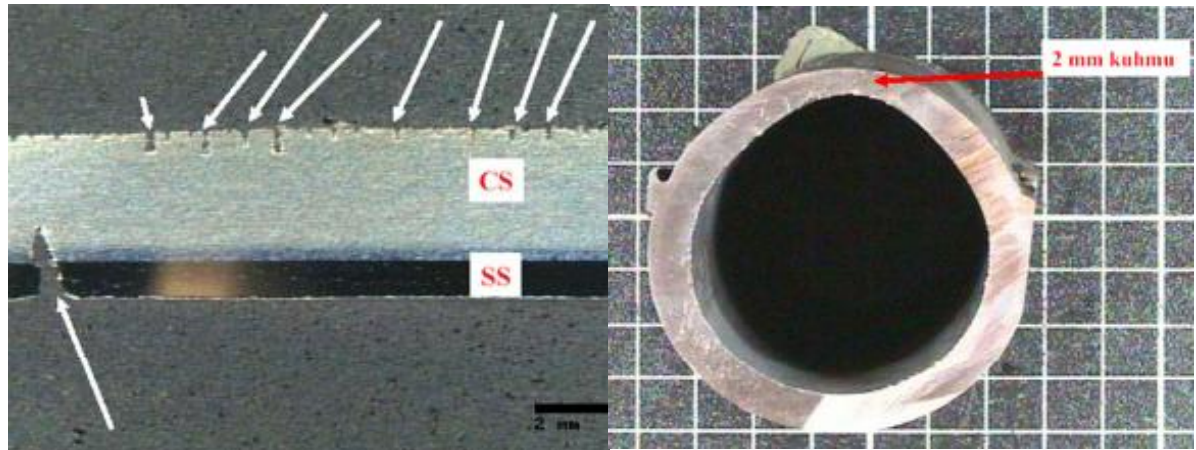
Kuva L3. Korroosioaurio ilma-aukon ohitusputkissa. Vikakohdat merkitty nuolilla

Kuvassa L3 on soodakattilan ilma-aukon ohitusputket, joissa vetyhyökkäys on aiheuttanut korroosioaurion. Kuvasta L3 selviää todennäköisin vikaantumiskohta.



Kuva L4. Korjauskohta pohja-seinä-kamparaudassa

Kuva L4. Pohjan ja seinien väliset kamparaudat on tarkastettava tunkeumanestemenetelmällä, kun pohja tyhjennetty. Jos pohjaa ei ole tyhjennetty, varmennetaan pohjakaapista, että kamparaudan rikkoutuminen ei ole aiheuttanut sulavuotoa.



Kuva L5. Kuvassa kiertohäiriön aiheuttama ylikuumeneminen pohjaputkessa, joka on aiheuttanut jopa muodonmuutoksen putkeen

Kuvissa L5 pohjaputken säröytyminen on edennyt compound-pinnoitteen läpi ferriittiseen materiaaliin. Vikaantumista voidaan todeta myös vesipuolella ja putkessa on selvä muodonmuutos. Ylikuumenemisen syynä voi olla kiertohäiriö aiheuttama korkean lämpövuon, jonka voi aiheuttaa ylileveä seinä-pohja-kamparauta tai pudonneen ”kamin” aiheuttama muodonmuutos tai saostumat vesipuolella.

LIITE 8
KTR: TOC-mittaukset Metsä Fibre Kemi, JP-analysis
– raportti 30.8.2013

RAPORTTI

METSÄ-BOTNIAN SOODAKATTILAN VESIANALYYSIT

Toteutus

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää Kemin Metsä-Botnia-tehtaan soodakattilan ioninvaihtosarjan yhteydessä olevan UV-laitteiston TOC-reduktiotehoa. TOC-näytteitä varten otettiin näytteet anioninvaihtosarjan (A1) jälkeen sekä sekavaihtimen (MB1) jälkeen UV-lampun ollessa päällä ja pois päältä. Lisäksi näytteet otettiin soodakattilan tulistetusta höyrykierrosta. Jokaisesta näytteestä otettiin kolme rinnakkaista näytettä. Näytteet analysoitiin Tekmar Pheonix 8000 analysaattorilla.

Tulokset

näyte nro	Näyte	ppm C	ppb	ka
1	MB 1	0,1508	151	
2	MB 1	0,1569	157	
3	MB 1	0,1556	156	154
4	MB UV	0,1045	105	
5	MB UV	0,1033	103	
6	MB UV	0,122	122	110
7	A 1	0,1588	159	
8	A 1	0,154	154	
9	A 1	0,1452	145	153
10	Höyry	0,3593	359	
11	Höyry	0,3406	341	
12	Höyry	0,5143	514	405

Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet

Tuloksista voidaan sanoa, että sekavaihdin (MB1) ei poista orgaanista hiiltä laisinkaan ilman UV-käsittelyä. UV-käsittelyn kanssa näyttäisi, että kokonaisorgaanista hiiltä poistuu noin 30 % (50 ppm) sekavaihtimessa (MB1). Voidaan olettaa, että UV joko pilkkoo orgaanista hiiltä pienemmiksi yhdisteiksi, jotka jäävät sekavaihtimeen tai UV ionisoi orgaaniset hiiliyhdisteet osittain, ja nämä virittyneet yhdisteet jäävät sekavaihtimeen. Mielenkiintoista on lisäksi höyryvesikierron orgaanisen hiilen määrä. Orgaanisen hiilen määrä lisääntyy kierrossa eli konsentroituu. Tämä viittaisi siihen, että tulistuksessa orgaaninen hiili ei hajoa.

UV:n vaikutuksen seuranta TOC:n reduktioon tulisi jatkaa, jotta raakaveden ja ioninvaihtosarjan toimivuuden vaikutukset saataisiin selville. Näytteiden otto hetkellä UV-laitteiston kaikki lamput oli toiminnassa ja juuri vaihdettu. UV-laitteiston tehoa tulisi seurata ajan funktiona myös sen takia, että saataisiin selville UV-lamppujen intensiteetin laskun vaikutukset TOC:n reduktioon.

UV-lamppujen vaihdon jälkeen näytteitä otettaisiin viikottain täyssuolapoistetusta vedestä, anionin vaihtimen jälkeen sekä sekavaihtimen jälkeen. Näytteistä määritettäisiin kokonaisorgaanisen hiilen, kokonais epäorgaanisen hiilen ja kokonaishiilen pitloisuudet. Näytteiden ottoa jatkettaisiin kunnes UV:lla ei ole vaikutusta TOC:n reduktioon.

Raportin on tehnyt,

30.8.2013

Jaakko Pellinen
JP-ANALYSIS

LIITE 9
YTR: POPE, Itä-Suomen Yliopisto
– loppuraportti 6.8.2013



ITÄ-SUOMEN
YLIOPISTO

Mittausraportti

HIUKKAS- JA TOKSISUUSMITTAUKSET UPM- KYMME OYJ:N KYMIN SELLUTEHTAALLA

Itä-Suomen yliopisto, Ympäristötieteen laitos, Pienhiukkas- ja aerosolitekniiikan laboratorio

Itä-Suomen yliopisto, Ympäristötieteen laitos, Inhalaatiotoksikologian laboratorio

Ilmatieteen laitos, Kuopion yksikkö

Hanna Koponen

Miika Kortelainen

Oskari Uski

Stefanie Kasurinen

Pasi Jalava

Ilpo Nuutinen

Kari Kuuspalo

Jarkko Tissari

Ari Leskinen

Kari Lehtinen

Jorma Jokiniemi

Maija-Riitta Hirvonen

Esipuhe

Tämä raportti on osa Tekesin julkisen tutkimuksen projektia ” Polttoperäisten päästöjen ja nanohiukkasten haitallisuuden määrittäminen uudella tutkimusmenetelmällä (POPE)” Pääösnumero 40469/10.

Hankkeen tavoitteena oli selvittää soodakattilan hiukkaspäästöjen kemiallisen koostumuksen ja toksikologisten ominaisuuksien välistä yhteyttä.

Hankkeessa kerättiin hiukkasnäytteet UPM-Kymmene Oyj:n Kymin sellutehtaan soodakattilan savukaasuista 26. – 30.11.2012 välisenä aikana. Näytteistä analysoitiin hiukkaspitoisuudet, kokojakaumat ja kemiallinen koostumus sekä toksikologiset vasteet.

Kuopiossa 6.8.2013.



Itä-Suomen yliopisto, Ympäristötieteen laitos

Pienhiukkas- ja aerosoliteknikan laboratorio

Professori



Itä-Suomen yliopisto, Ympäristötieteen laitos

Inhalaatiotoksikologian laboratorio

Professori

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	4
2.	MITTAUKSET JA ANALYYSIT.....	4
2.1.	Mittausjärjestelyt	4
2.2.	Näytteiden käsittely	6
2.3.	PM ₁ -päästöjen määrittäminen	6
2.4.	Hiukkasanalyysit.....	6
2.5.	Toksikologiset analyysit	7
3.	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	11
3.1.	PM ₁ -päästöt.....	11
3.2.	Hiukkasten koostumus.....	11
3.3.	Toksikologiset analyysit	14
4.	JOHTOPÄÄTÖKSET	18

1. JOHDANTO

Hiukkasnäytteet kerättiin 26. – 30.11.2012 sellutehtaan soodakattilan savukaasuista kahdesta pisteestä: (1) välittömästi sähkösuodattimen jälkeen ja (2) savukaasupesurin (yksivaiheinen, jokivettä käyttävä pesuri (liite 6)) jälkeen. Näytteistä laskettiin PM₁-päästöt (alle 1 µm kokoiset hiukkaset) sekä analysoitiin polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH) sekä alkuaine- ja ionikoostumus. Päästöjen lisäksi tutkittiin hiukkasnäytteiden aiheuttamia toksikologisia vasteita.

2. MITTAUKSET JA ANALYYSIT

2.1. Mittausjärjestelyt

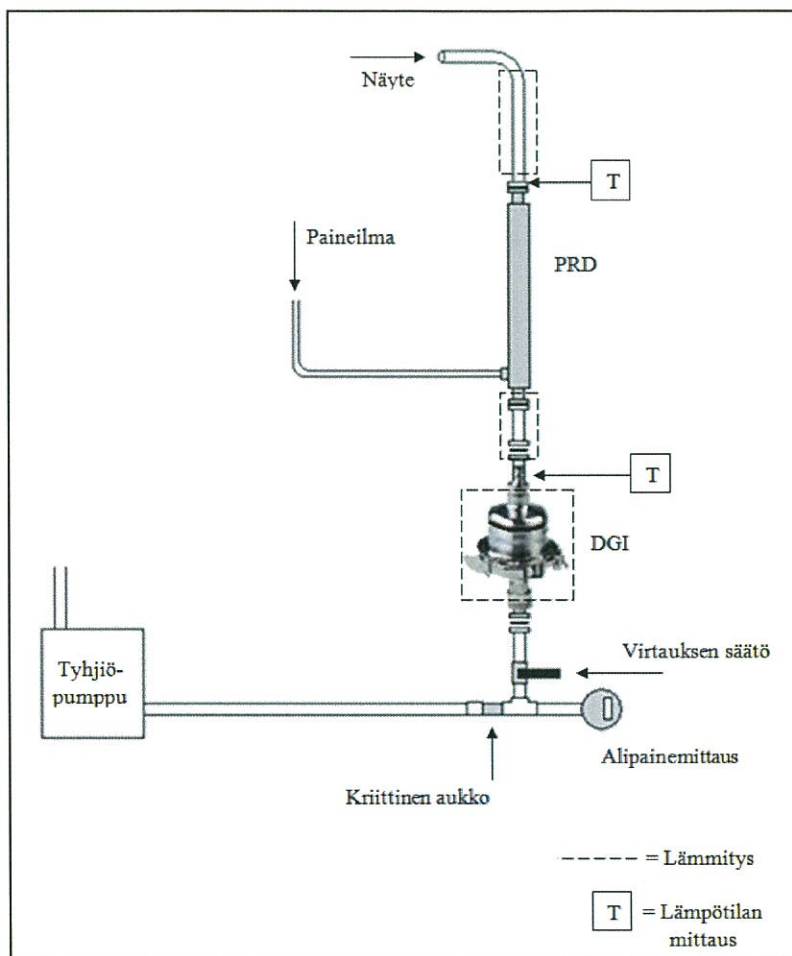
Mittaukset suoritettiin UPM-Kymmene Oyj:n Kymin sellutehtaalla 26. – 30.11.2012. Hiukkasnäytteitä otettiin kahdesta eri näytteenottopisteestä, niistä ensimmäinen sijaitsee savukaasukanavassa välittömästi sähkösuodattimen jälkeen ja toinen pesurin jälkeen savupiipussa. Sähkösuodattimen jälkeen kerättiin yhteensä kuusi näytettä, jotka yhdistettiin analyysijä varten kahdeksi uutoksi (UPM A ja UPM B). Savukaasupesurin jälkeen kerätty kolme näytettä yhdistettiin yhdeksi uutoksi (UPM Pesuri).

Hiukkasnäytteiden keräys suoritettiin DGI-keräimellä (Dekati Gravimetric Impactor). DGI on viisiasteinen gravimetrinen kaskadi-impaktori, jolla pystytään keräämään toksikologisten analyysien vaatimia suuria näytemääriä (Ruusunen ym. 2011). DGI jaottelee hiukkaset viiteen kokoluokkaan aerodynaamisen halkaisijan mukaan (>2,5 µm, 2,5-1 µm, 1-0,5 µm, 0,5-0,2 µm ja <0,2 µm). Keräysalustoina DGI:ssa käytettiin teflonsuodattimia (PTFE, valmistaja Millipore, huokoskoko 3 µm, mallit FSLW04700 ja FSLW09025).

Näytteen laimentamiseen käytettiin huokoisen putken laimenninta (PRD) (Lyyränen ym. 2004), johon syötettiin paineilmaa. Paineilma tuotettiin UPM Kymin laitteistolla ja se puhdistettiin öljypisaroista ja hiukkasista paineilmalinjaan asennetulla säädettävällä Wilkerson paineenalennin/pisarasuodattimella ja Wilkerson aktiivihilisuodattimella. Sähkösuodattimen jälkeisissä näytteenotoissa käytettiin jokaisen keräyksen aikana noin kaksinkertaista laimennusta. Pesurin jälkeisissä näytteenotoissa laimennusta jouduttiin nostamaan savukaasun runsaan kosteuden vuoksi noin seitsenkertaiseksi.

Hiukkaskeräyksen mittausjärjestely on esitetty kuvassa 1. Näytelinja lämmitettiin ennen laimenninta 110 °C:n lämpötilaan. Lisäksi DGI ja laimentimen jälkeinen linja lämmitettiin 60 °C:n lämpötilaan. Laimennusilman tilavuusvirtaus säädettiin ennen keräystä sopivaksi. Kokonaisvirtaus (näytevirtaus + laimennusilma) pidettiin keräyksen ajan noin 70 l/min säätämällä virtausta neulaventtiilin avulla siten, että alipaine ennen kriittistä aukkoa pysyi vakiona (Kuva 1). Alipaineen kasvaessa niin suureksi, ettei sitä voinut enää venttiiliä säätämällä rajoittaa katsottiin DGI:n pohjasuodattimen täyttyneen ja keräys lopetettiin. Keräysten pituudet vaihtelivat sähkösuodattimen jälkeisissä näytteenotoissa 120 minuutista 155 minuuttiin.

Pesurin jälkeisissä keräyksissä näytettä otettiin pisimmillään yli 17 tuntia. Keräysten välissä DGI puhdistettiin 70 %:lla etanoliliuoksella.



Kuva 1. Hiukkasmittausjärjestelmä.

Näytteitä kerättiin taulukon 1 mukaisesti. Lisäksi analyysihin otettiin mukaan kaksi blank- eli kontrollinäytettä. Blank-näytteenotossa osat asetetaan keräimeen kuten tavallisesti, mutta näytettä ei kerätä.

Taulukko 1. Kerätyt näytteet.

Päivämäärä	Mittauspiste	Näyte	Keräysaika
26.11.2012	Sähkösuodatin	POPE019	klo 15:23–17:53
26.11.2012	Sähkösuodatin	POPE020	klo 18:00–20:30
27.11.2012	Sähkösuodatin	POPE021	klo 10:10–12:10
27.11.2012	Sähkösuodatin	POPE022	klo 12:25–15:00
27.11.2012	Sähkösuodatin	POPE023	klo 15:15–17:30
27.11.2012	Sähkösuodatin	POPE024	klo 17:35–20:05
28.11.2012	Pesuri	POPE026	klo 14:11–21:01
28.–29.11.2012	Pesuri	POPE027	klo 21:15–9:15
29.–30.11.2012	Pesuri	POPE031	klo 21:25–15:00

Näytteet yhdistettiin seuraavasti:

- POPE019, POPE020 ja POPE021 yhdistettiin näytteeksi UPM A
- POPE022, POPE023 ja POPE024 yhdistettiin näytteeksi UPM B
- POPE026, POPE027 ja POPE031 yhdistettiin näytteeksi UPM Pesuri

2.2. Näytteiden käsittely

Suodattimet punnittiin täysmikrova'alla (tarkkuus 10 µg) ennen ja jälkeen keräyksen hiukkasmassan määrittämiseksi. Suodattimet säilytettiin pakkasessa keräysten ja punnitusten välillä. Hiukkaset uutettiin suodattimilta metanoliin ultraäänivesihauteessa ja uutos jaettiin lasiputkiin massaperusteisesti. Ylimääräinen metanoli haihdutettiin hiukkasnäytteistä pois typpivirrassa. Näytteet säilytettiin -20 °C:ssa toksisuuskokeita ja kemiallisia analyysyjä varten.

2.3. PM₁-päästöjen määrittäminen

PM₁-päästöjen laskemisessa käytettiin UPM:n toimittamia arvoja savukaasun kosteudelle ja happipitoisuudelle. Pitoisuudet (mg/m³) normitettiin 3 % happeen, 0 °C lämpötilaan ja kuivaan savukaasuun. Tulokset laskettiin myös massana tuotettua energiayksikköä kohti (mg/MJ), laskennassa käytettiin mustalipeän tehollisena lämpöarvona kiinteää arvoa 10,7 MJ/kg.

2.4. Hiukkasanalyysit

PAH-analyysit

Näytteiden uutto aloitettiin lisäämällä Kimax-putkiin 1 ml dikloorimetaania, minkä jälkeen näytteitä pidettiin kylmiössä yön yli. Seuraavaksi näytteisiin lisättiin 0,5 ml:a (500 nanogrammaa) sisäistä deuterioitua PAH-standardia (tuote Z-014J, AccuStandard Inc.) sekä 2 ml:aa dikloorimetaania. Näytteitä uutettiin ultraäänellä 15 minuutin ajan. Näytteisiin lisättiin 15 tippaa nonaania. Putkissa oleva dikloorimetaani haihdutettiin typpivirrassa niin, että näytteen tilavuudeksi jäi noin 100 µl, tämän jälkeen näytteisiin lisättiin 2 ml heksaania. Näytteiden heksaaniiuutteille tehtiin kolonnikromatografinen puhdistus alumiinioksidikolonnila. Aluminioksidikolonnit esikäsiteltiin valuttamalla niiden läpi noin 10 ml heksaania, minkä jälkeen näytteet välittömästi eluoiittiin kolonnien läpi. Kolonnit puhdistettiin ensin noin 10 ml:lla heksaania ja sitten noin 10 ml:lla dikloorimetaania omiin kimax-putkiinsa, jolloin PAH-yhdisteet eluoiutuivat kolonnien läpi. Lopuksi näytteiden dikloorimetaanifraktiot haihdutettiin vielä typpivirtauksessa noin 100 µl:an ja siirrettiin vial-pulloihin. Nollanäyte tehtiin käsittelemällä tyhjä Kimax-putki kuten edellä.

Näytteiden ajoon käytettiin kaasukromatografi-massaselektiivinen detektori – laitteistoa (6890N GC-5973 INERT MSD, Agilent Technologies) ja valittujen ionien seuranta (SIM). Kvantitointi tehtiin sisäisen standardin menetelmällä (naftaleeni-d8, asenafteeni-d10, fenantreeni-d10, kryseeni-d12 ja peryleeni-d12).

Ulkoisena standardina ajoissa käytettiin 30 PAH -yhdisteen standardiliuosta, joka sisälsi myös käytetyn sisäisen standardin. Menetelmän määrittäysraja on 0,1 ng/mg.

Alkuaineiden ja ionien määrittäminen

Alkuaineet ja ionit analysoitiin Eurofins Scientific Finland Oy:n laboratoriossa. Alkuaineet (Li, Be, B, Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Mo, Ag, Cd, Sb, Ba, Tl, Pb, Bi, Th, U) määritettiin ICP-MS (Inductive Coupled Plasma – Mass spectrometer) –menetelmällä (laite Agilent 7700), standardin EN ISO 17294-2 mukaisesti. Ionit (anioinit) (Br^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , F^- , PO_4^{3-}) määritettiin IC (Ion Chromatography) menetelmällä (laite Metrohm, malli Compact 882 ICplus, kolonni Metrosep a SUPP5-150/4.0), standardin EN ISO 10304-1/2 mukaisesti. Menetelmien määrittäysrajat olivat seuraavat: Be, B, V, Cr, Co, Ni, Cu, As, Se, Rb, Sr, Mo, Cd, Sb, Ba, Tl, Pb, Bi, Th ja U 0,005 µg; Li, Al, Ti, Mn, Zn ja Ag 0,025 µg; Fe 0,075 µg; Mg ja Ca 0,25 µg; Na, K, Br^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 1 µg; F^- 2 µg.

2.5. Toksikologiset analyysit

Koejärjestelyt

Ennen varsinaisia toksisuuskokeita hiukkasnäytteet liuotettiin pieneen määrään DMSO:ta ja steriiliä vettä. Näytteitä sonikoitiin ultraäänivesihauteessa 30 minuuttia ennen solujen altistamista. Ihmisen keuhkoepiteelisolulinjaa A549 ja hiiren makrofagisolulinjaa RAW264.7 altistettiin 24 tunnin ajan hiukkasnäytteille käyttäen neljää aikaisempien kokeiden perusteella valittua annosta (15, 50, 150 ja 300 µg/ml) (Jalava ym. 2010) ja kontrolleja (positiivinen ja negatiivinen kontrolli sekä blank-suodatinnäyte). Toksikologisille kokeiden annosvalinnalla tulee varmistaa sigman muotoinen annosvasteikäyrä; alin annos aiheuttaa vain vähäisen vasteen ja ylin annos voi aiheuttaa mitattavan reaktion maksimivasteen kyseisessä koejärjestelyssä käytettäessä vastespesifistä kontrollireagenssia.

Kaikki altistukset toistettiin kolmena itsenäisenä kokeen lukuun ottamatta UPM Pesuri näytettä, jota ei testattu A549 soluilla näytteen vähäisen määrän vuoksi. Altistuksen jälkeen mitattiin solususpensiosta akuuttia solukuolemaa MTT-testillä ja propidiumjodidi (PI) värjäyksellä. Solusyklin vaiheet ja ohjelmoitu solukuolema määritettiin virtausytometrillä etanoli-fiksatuista soluista. Tulehdusvälittäjäainetuotanto mitattiin myöhemmin pakastetuista kasvatusmediumeista ELISA-immunoassay-menetelmällä.

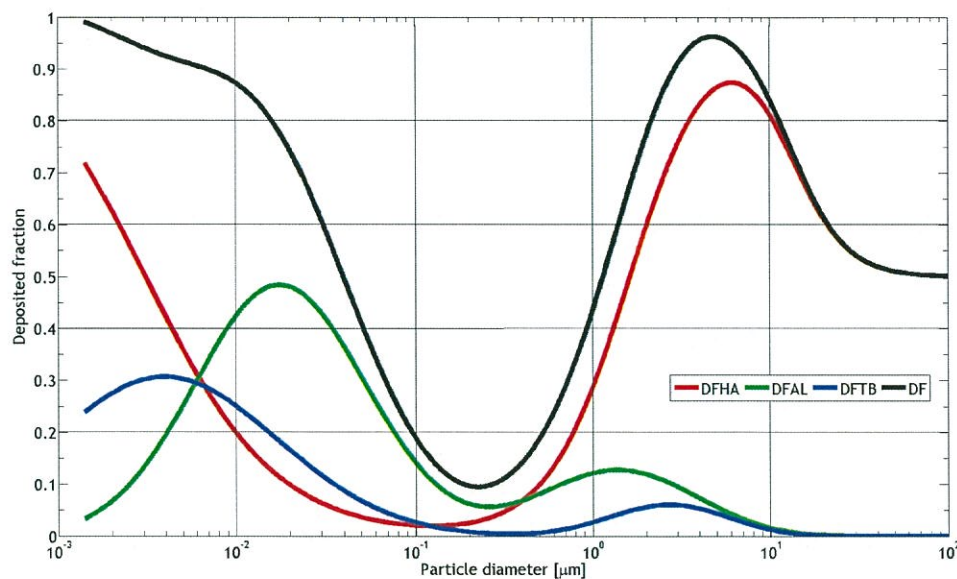
Soluviljely

Hiiren RAW264.7 monosyyttimakrofagisolulinjaa (ATCC, American Type Culture Collection) kasvatetaan RPMI 1640 kasvatusliuoksessa (sis. 10 % inaktivoitua FBS:ää, 2 mM L-glutamiinia ja 100 U/ml penisilliini-streptomysiiniä) ja ihmisen A549 keuhkoepiteelisolulinjaa. (ATCC, American Type Culture Collection) DMEM kasvatusliuoksessa (sis. 10 % inaktivoitua FBS:ää, 2 mM L-glutamiinia ja 100 U/ml penisilliini-streptomysiiniä). Molempia solulinjoja ylläpidetään + 37 °C:ssa ja 5 % hiilidioksidipitoisuudessa.

Solutoksisuus

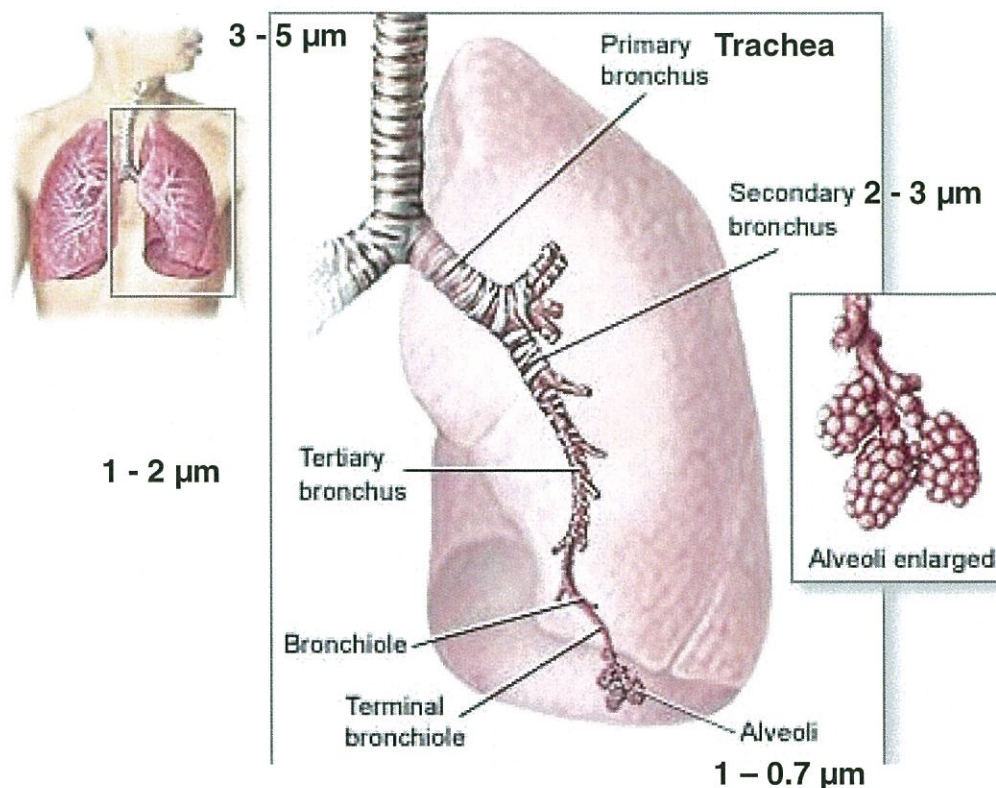
Solukuolema ja kudolvauriot liittyvät hengitystie- ja sydänsairauksien syntyyn. Solutoksisuus on yhdistetty mm. astman patogeneesiin ja muihin keuhkosairauksiin kuten esim. keuhkohtaumatautiin. Lisäksi viimeaikoina solutoksisuudella on myös osoitettu olevan yhteyksiä sydän- ja verisuonisairauksiin.

Solutoksisuus (nekroosi, apoptoosi) on yksi tärkeimmistä mekanismeista pienhiukkasten aiheuttamien terveyshaittojen takana. Pienhiukkasten koko vaikuttaa niiden kulkeutumiseen hengitysteissä (kuvat 2 ja 3). Karkeat pienhiukkaset (PM_{10} ; aerodynaaminen halkaisija 2.5 - 10 μm) pysähtyvät ylähengitysteihin, hienot hiukkaset ($PM_{2.5}$; 0.1 - 2.5 μm) pääsevät bronkusten (keuhkoputki) tasolle ja keuhkorakkuloihin, ja ultrapienet hiukkaset joiden halkaisija on alle 0.1 μm , päätyvät alveoleihin (keuhkorakkuloihin) asti. Hyvin pienet nanohiukkaset (halkaisija alle 10 nm) jäävät osin jo ylähengitysteihin ja osin keuhkoputkiin. Näin pieniä nanohiukkasia ei kuitenkaan yleensä esiinny polton päästöissä. Kuvassa 2 on esitetty hiukkasten depositiotehokkuus hiukkaskoon suhteen.



Kuva 2. Kokonaisdepositiosuus ($(=DF)$); ylähengitysteiden depositio-osuus (DFHA); keuhkorakkula-alueen depositio-osuus (DFAL) ja keuhkoputkialueen depositio-osuus (DFTB) hiukkaskoon funktiona

Kuvassa 3 on esitetty hengitysteistä havaittujen hiukkasten tyypillisiä kokoja.



Kuva 3. Hengitysteiden eri osista havaittujen hiukkasten tyypillisiä kokoja.

Nekroottisessa solukuolemassa solut turpoavat ja hajoavat, jolloin vapautuva solunsisältö aiheuttaa tulehdusreaktion. Näin ollen nekroosiin liittyy myös tulehdusreaktio. Apoptoottisessa (ohjelmoidussa) solukuolemassa solun DNA fragmentoituu, solu kutistuu ja kuolee. Apoptoosiin ei yleensä liity tulehdusta.

MTT - elävyytestesti: Solujen elävyys mitattiin spektrofotometrisesti määrittämällä toimivien mitokondrioiden ja endoplasmakalvoston määrää altistetuissa soluissa ja vertaamalla vastetta kontrollisoluihin. Toimintakuntoisen solun mitokondriot muuttavat MTT:n valoa absorboivaksi formazaaniksi, joka voidaan mitata aallonpituudella 570 nm.

Nekroottisten tai apoptoosin myöhäisessä vaiheessa olevien solujen osuuden määrittäminen: Propidiumjodidi (PI) läpäisee nekroottisten ja apoptoosin (ohjelmoitu solukuolema) myöhäisessä vaiheessa olevien solujen solukalvon. Näiden solujen osuus voidaan määrittää virtaussytometrisesti tuoreista soluista.

Solusyklianalyysi: Solusykli ja apoptoottisten solujen osuus analysoitiin virtaussytometrillä PI:llä värjätystä soluista, joiden solukalvo on heikennetty ennen värjäystä PI:a läpäiseväksi etanolilla.

Tulehdus

Tulehdusreaktioiden avulla elimistö pyrkii pääsemään vierasaineista eroon ja korjaamaan vaurioita kudoksessa. Tulehdusreaktiota säätelevät mm. sytokiinit ja solujen typpioksidituotanto. Sytokiinit ovat pieniä polypeptidejä, jotka muodostavat monimutkaisen verkoston elimistön puolustusjärjestelmässä. Nämä signaalimolekyylit säätelevät tulehdusvasteita ja ovat tärkeitä elimistön puolustautuessa haitallisille

altisteille, kuten pienhiukkasille sekä myrkyllisille kemikaaleille. Useat elimistön puolustussolut (esim. makrofagit) voivat altistuessaan aktivoitua tuottamaan typpioksidia. Kohonneet typpioksidipitoisuudet liittyvät tulehdussairauksiin esim. astmaan, keuhkohtaumatautiin, allergiaan ja sydänsairauksiin.

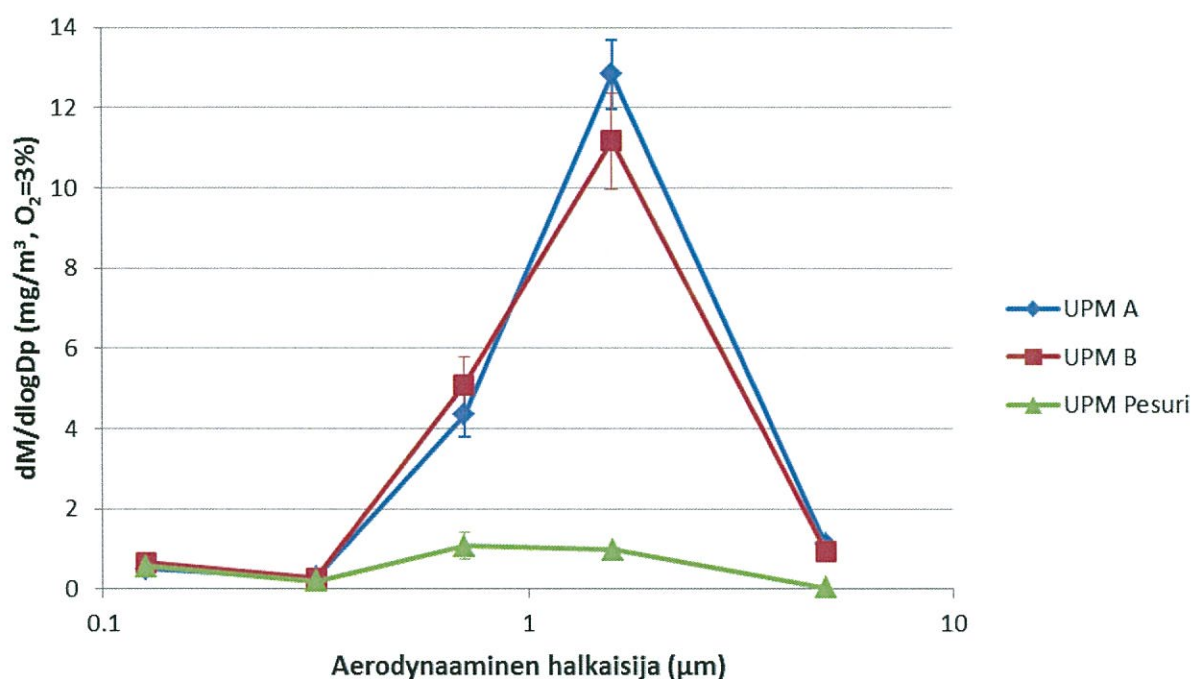
Sytokiinituotannon määrittäminen: RAW267.4 solujen sytokiinituotanto (TNF α ja MIP2) ja A549 solujen sytokiinituotanto (IL-6 ja IL-8) analysoitiin soluviljelymediumista kaupallisen ELISA (Enzyme-Linked Immunosorbent Assay) – kitin avulla spektrofotometrisesti.

Typpioksidituotannon määrittäminen: Tulehdusvasteisiin ja solukuolemaan vaikuttavan typpioksidin (NO) tuotanto määritettiin spektrofotometrisesti Griess:n reaktion kautta soluviljelymediumista.

3. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

3.1. PM₁-päästöt

PM₁-pitoisuudet olivat näytteessä UPM A $7,4 \pm 0,3 \text{ mg/m}^3$, näytteessä UPM B $6,9 \pm 0,4 \text{ mg/m}^3$ ja näytteessä UPM Pesuri $1,0 \pm 0,3 \text{ mg/m}^3$. Päästöt energiayksikköä kohti olivat vastaavasti $2,3 \pm 0,1 \text{ mg/MJ}$, $2,1 \pm 0,1 \text{ mg/MJ}$ ja $0,1 \pm 0,0 \text{ mg/MJ}$. Näytteiden massakokojakaumat ovat esitetty kuvassa 4.

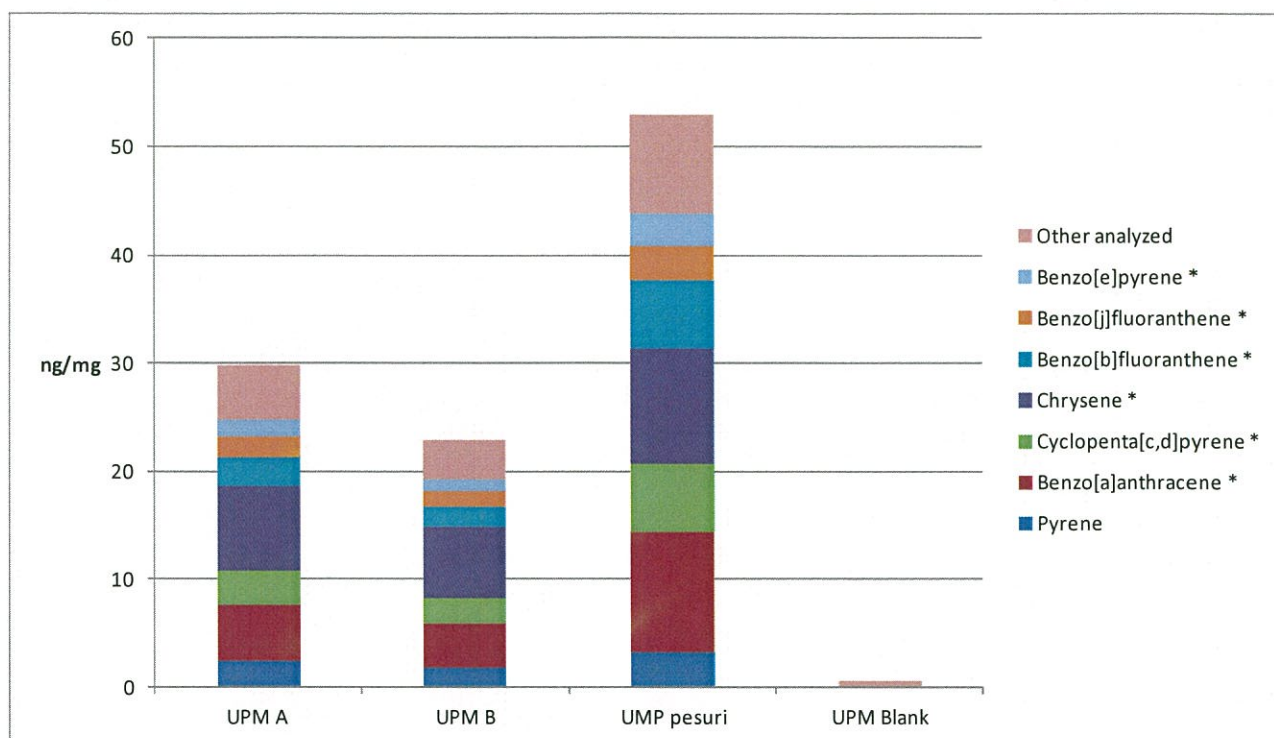


Kuva 4. Hiukkasmassakokojakaumat ja niiden vaihteluvälit sekä sähkösuodattimen että pesurin jälkeisistä näytteistä.

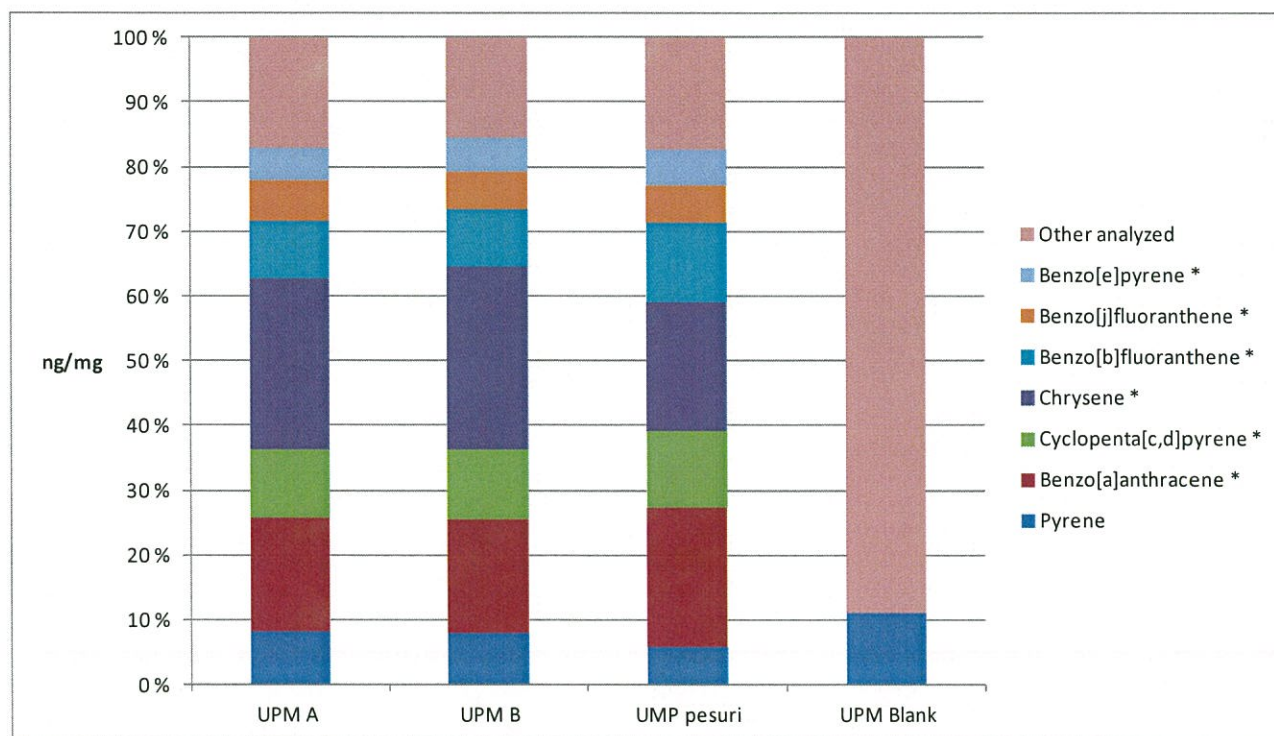
3.2. Hiukkasten koostumus

PAH-yhdisteet

PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuudet olivat näytteessä UPM A **29,8 ng/mg**, näytteessä UPM B **22,9 ng/mg**, näytteessä UPM Pesuri **52,9 ng/mg** ja näytteessä UPM blank **0,6 ng/mg** (kuva 5, liite 3). Genotoksisten PAH-yhdisteiden pitoisuudet olivat **27,2 ng/mg** (UPM A), **20,9 ng/mg** (UPM B) ja **48,6 ng/mg** (UPM Pesuri). Näytteessä UPM blank ainoa genotoksinen PAH-yhdiste oli fluoranteeni (**0,1 ng/mg**) (liite 3). PAH-yhdisteiden pääkomponentit olivat kryseeni, bentso(a)antraseeni, syklopenta(c,d)pyreeni, bentso(b)fluoranteeni, pyreeni, bentso(j)fluoranteeni ja bentso(e)pyreeni (kuva 5). Näytteiden UPM A, UPM B ja UPM Pesuri suhteelliset koostumukset olivat hyvin yhdenmukaisia (kuva 6).



Kuva 5. Näytteiden PAH-pitoisuudet pääkomponenteittain

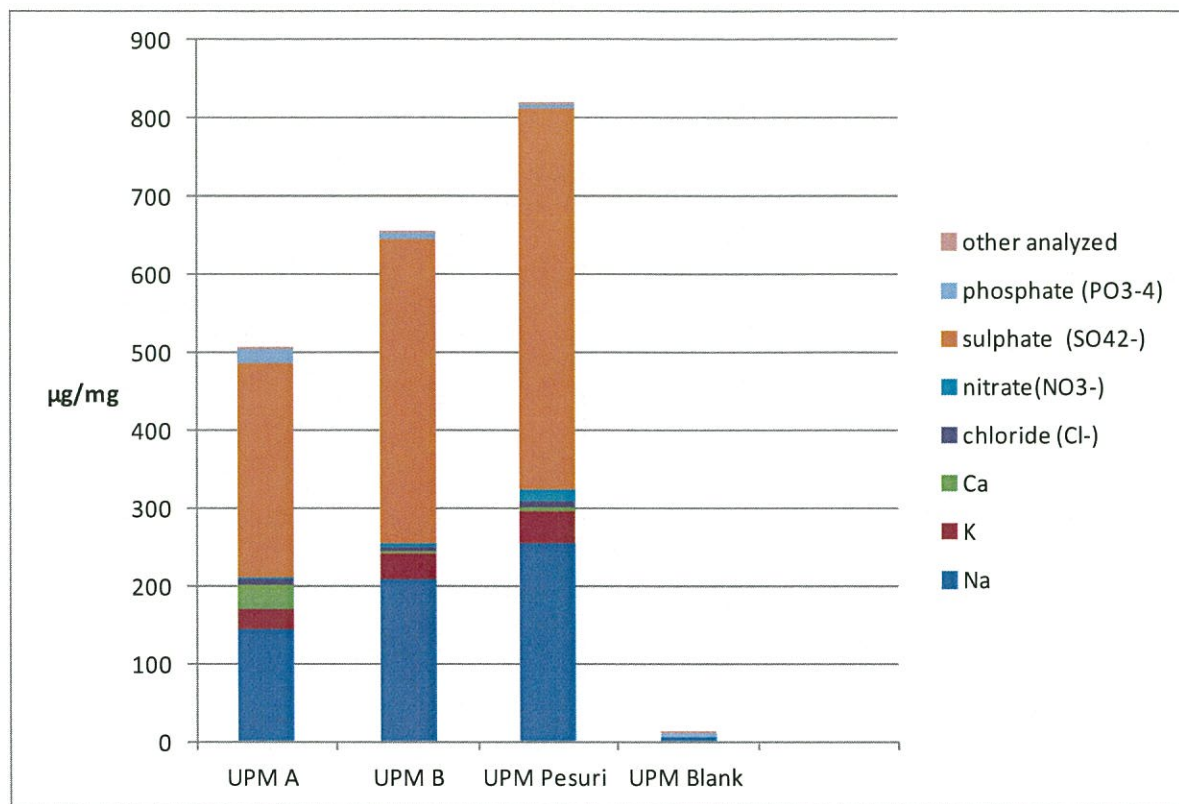


Kuva 6. PAH-yhdisteiden suhteelliset osuudet.

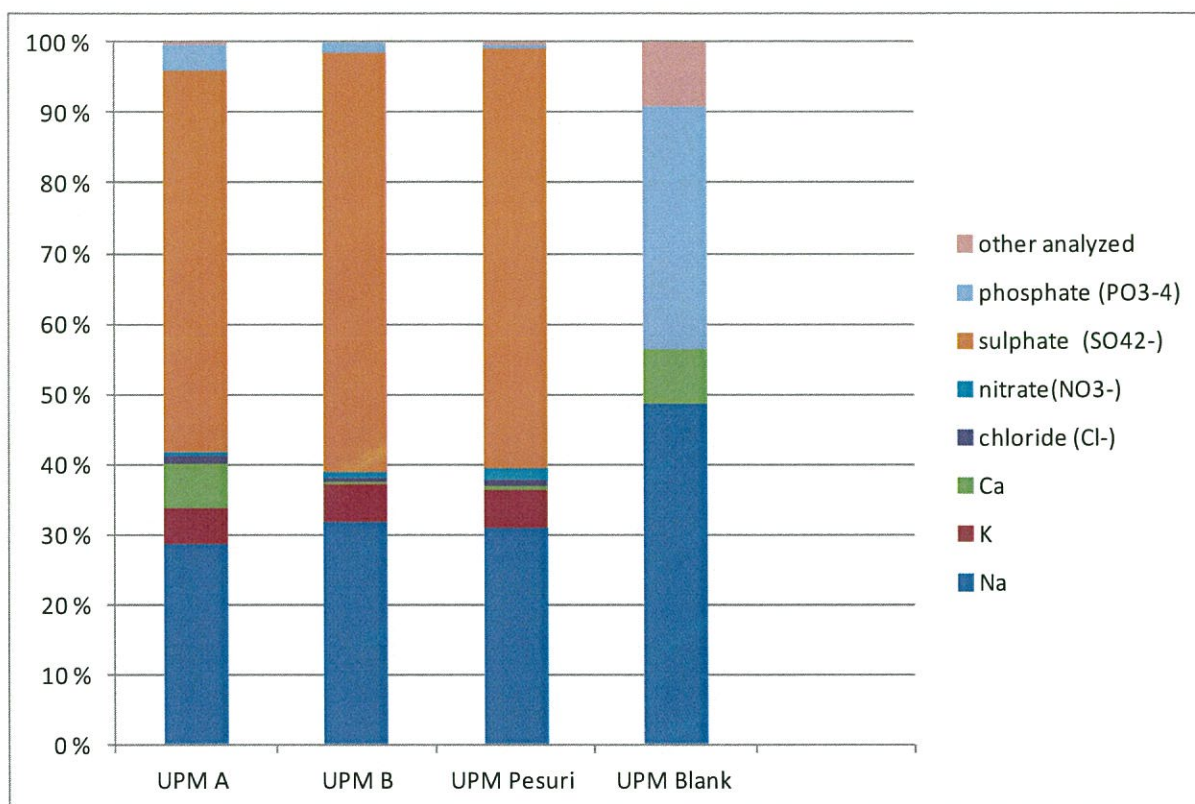
Kemiallinen koostumus

Alkuaine- ja ionimäärytyksissä saanto oli näytteelle UPM A **50,6 %**, näytteelle UPM B **65,5 %** ja näytteelle UPM Pesuri **82,0 %**. Pääkomponentit olivat sulfaatti (SO_4^{2-}), natrium (Na), kalsium (Ca), kalium (K),

fosfaatti (PO_4^{3-}) ja nitraatti (NO_3^-) (kuva 7, liite 4). Kaikki näytteet olivat koostumukseltaan samankaltaisia, lukuun ottamatta UPM A:n muita korkeampaa kalsiumpitoisuutta (kuva 8).



Kuva 7. Näytteiden kemialliset koostumukset pääkomponenteittain.

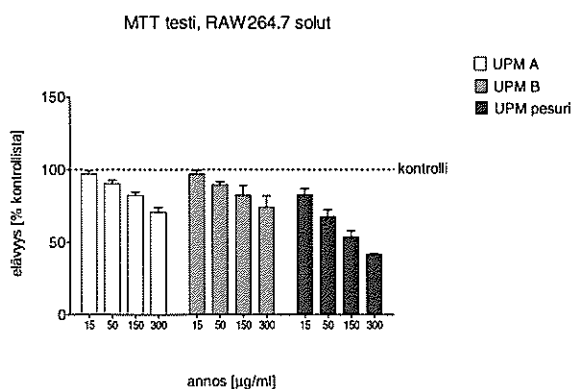
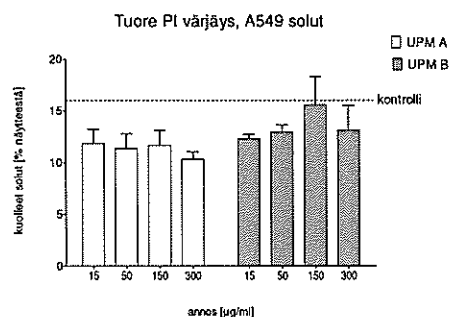
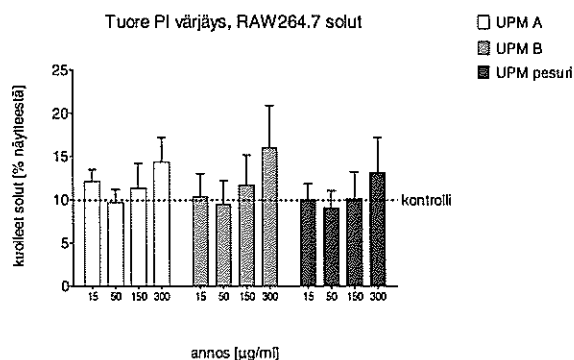
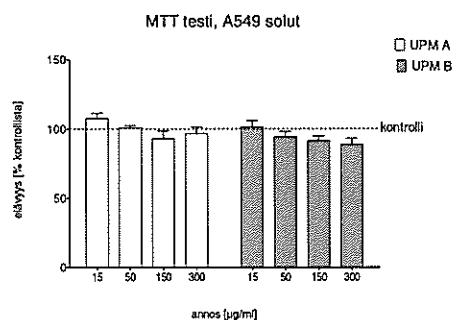


Kuva 8. Alkuaineiden ja ionien suhteelliset osuudet.

3.3. Toksikologiset analyysit

Solukuolema

Sähkösuodattimen jälkeen kerätyt päästöhiukkasnäytteet aiheuttivat solukuolemaa annosvasteisesti (kuva 9 A ja B). Merkittävin toksinen vaste todettiin hiiren soluissa kuitenkin pesurin jälkeen kerätyissä näytteissä. Korkeimmalla pesurin jälkeen kerätyllä hiukkasannoksella (300 µg/ml) makrofageja kuoli jopa 60 %. Valitettavasti näytteen niukkuuden takia pesurin jälkeen kerätyn näytteen toksisuutta ei voitu määrittää epiteelisoluissa. Makrofagien ja epiteelisolujen välillä oli tyypillinen herkkyysero niiden kyvyssä ilmentää toksikologisia vasteita. Tämä solulinjojen välinen herkkyysero liittyy solutyypin erilaisiin funktioihin elimistön puolustusjärjestelmässä. Akuuttia solukuolemaa (MTT-testi) oli enemmän makrofageissa kuin epiteelisoluissa. PI-testin solukalvon läpäisevyyttä mittaavien vasteiden suunta oli hyvin samankaltainen kuin akuutin solukuoleman mittauksissa, tosin vasteet eivät olleet niin voimakkaita. Makrofagien solukuolema saattaa heikentää immuunipuolustusjärjestelmää ja lisätä mm. mikrobien aiheuttamia infektoita keuhkoissa. Virtausytometrillä määritetyssä ohjelmoidussa solukuolemassa (apoptoosi) eikä solusykliissä havaittu eroja näytteiden ja kontrollin välillä.

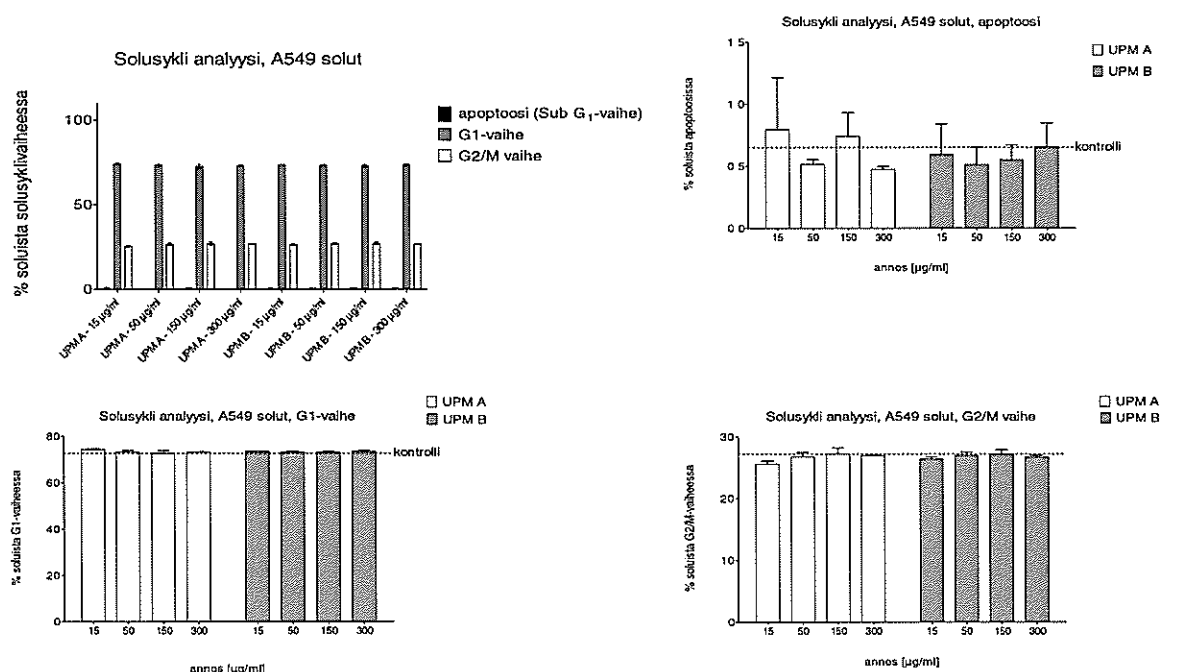
A**B**

Kuva 9. Päästöhiukkasten aiheuttama solukuolema A) MTT-testillä ja B) PI-menetelmällä hiiren RAW264.7 makrofageissa ja A549 ihmisen keuhkojen epiteelisoluissa hiukkasannoksilla 15-300 µg/ml.

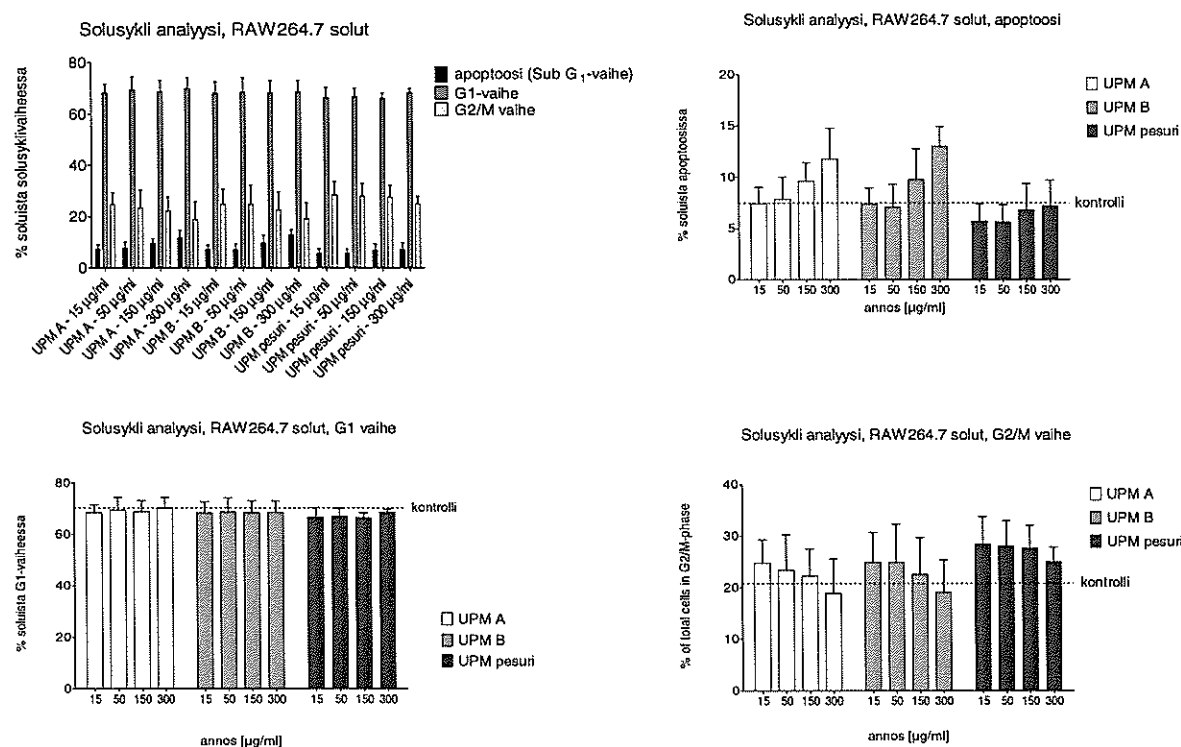
Solusyklianalyysi

Tutkitut polton päästöhiukkaset eivät aiheuttaneet muutoksia solujen normaaliin jakaantumissykliin kummassakaan solulinjassa (kuva 10). Genotoksisuuteen viittaavaa solusyklin pysähtymistä ei havaittu, mutta tuloksen varmistamiseksi genotoksisuuspotentiaalin määrittämiseen pitäisi käyttää myös muita menetelmiä.

A Ihmisen keuhkoepiteelisolulinja A549



B Hiiren makrofagisolulinja RAW264.7

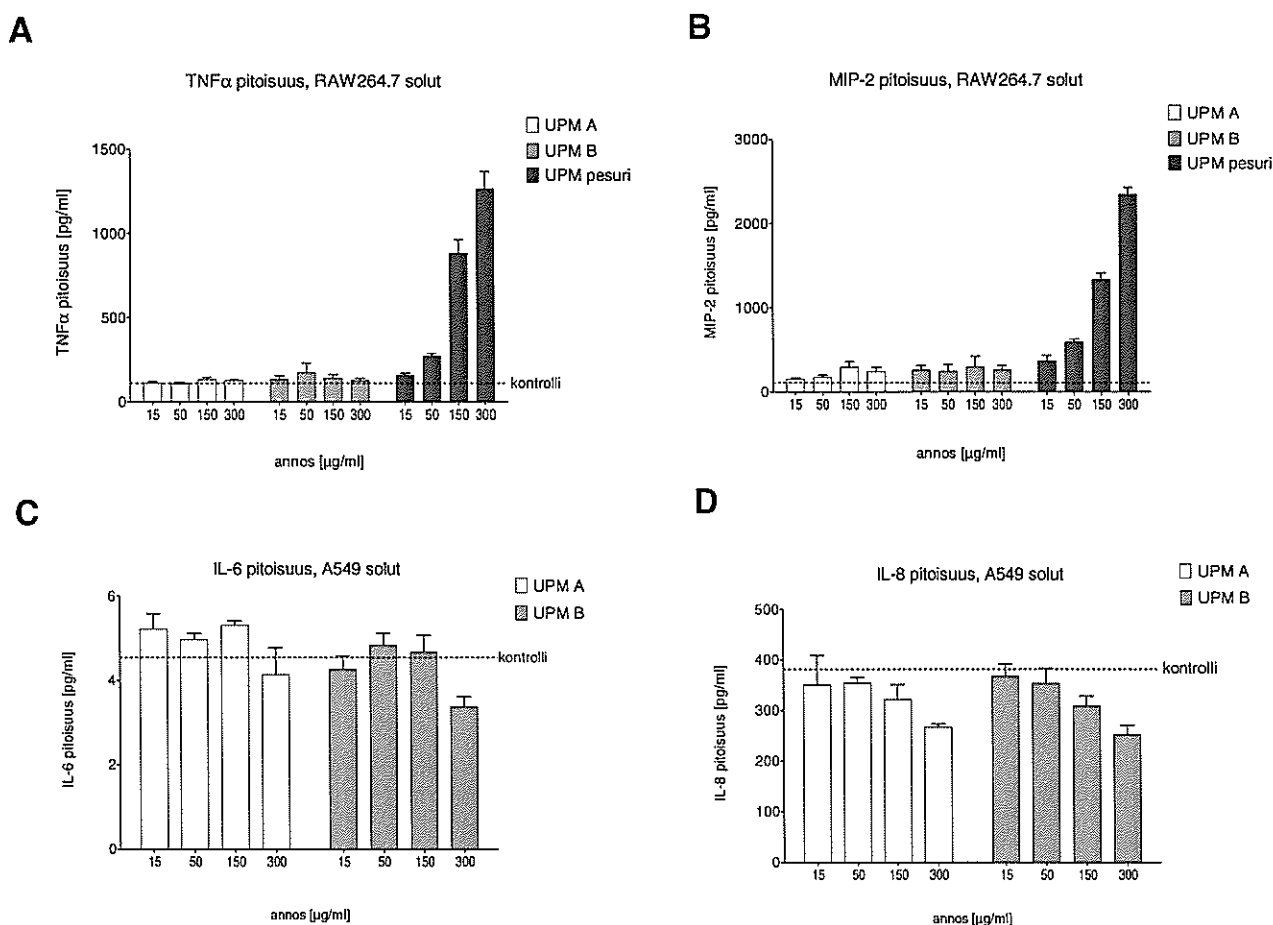


Kuva 10. Päästöhiukkasten aiheuttamat vasteet solusykliässä A) ihmisen keuhkoepiteelisolulinjassa A549 ja B) hiiren makrofagisolulinjassa RAW264.7, hiukkasannoksilla 15-300 µg/ml.

Tulehdusvälittäjäainetuotanto

Hiiren makrofagit ja ihmisen keuhkojen epiteelisolut tuottivat vain pieniä tulehdusvasteita altistettaessa niitä sähkösuodattimen jälkeen kerätyille näytteille. Sitä vastoin hiiren makrofagit tuottivat annosvasteisesti merkittäviä määriä tulehdusvälittäjäaineita altistuessaan pesurin jälkeen kerätyille hiukkasille (Kuva 11 A ja B). Epiteelisolujen tulehdusvälittäjäainetuotantoa ei voitu tutkia pesurin jälkeen kerätystä näytteestä johtuen vähäisestä näytemäärästä. Makrofageista mitatussa typpioksidituotannossa havaittiin muutoksia kontrollisoluihin verrattuna kaikilla näytteillä, mutta UPM A näyte aiheutti näistä selkeästi suurimman vaikutuksen. (liite 5)

Tulosten tulkinnan kannalta on tärkeää huomata että tulehdusvasteen puute voi johtua siitä, että jos hiukkaset ovat erittäin toksisia soluille aiheuttaen välittömän solukuoleman eli tulehdusvasteita käynnistäviä soluja ei ole hengissä (tyypillisesti esim. raskaan polttoöljyn polton hiukkaset).



Kuva 11. . Hiiren RAW264.7 makrofagien tuottamat A) TNF- α , B) MIP-2 ja ihmisen epiteelisolujen A549 tuottamat C) IL-6, D) IL-8 tulehduksen välittäjäaineet päästöhiukkasille (annokset 15-300 $\mu\text{g/ml}$).

4. JOHTOPÄÄTÖKSET

PAH-yhdisteiden pitoisuudet sähkösuodattimen jälkeen otetuissa näytteissä (UPM A 29,8 ng/mg, UPM B 22,9 ng/mg) olivat hieman suuremmat kuin esimerkiksi pellettitakan poltossa, mutta huomattavasti pienemmät kuin esimerkiksi puutakan ja raskaan polttoöljyn poltossa (Lamberg 2011, Kaivosoja 2013). Pesurin jälkeen kerättyjen hiukkasten PAH-pitoisuudet (52,9 ng/mg) olivat hieman korkeammat kuin ennen pesuria otetuissa näytteissä.

Näytteiden kemiallinen koostumus oli samankaltainen sähkösuodattimen jälkeen ja pesurin jälkeen kerätyissä näytteissä.

Kumpikaan sähkösuodattimen jälkeen kerätty hiukkasnäyte ei ollut merkittävästi toksinen hiiren makrofageille (RAW264.7) tai ihmisen keuhkojen epiteelisoluille (A549) alle 150 µg/ml annoksilla.

Sen sijaan pesurin jälkeen kerätty hiukkasnäyte laski merkittävästi hiiren makrofagien elävyyttä jo 50 µg/ml annoksella. Lisäksi näissä soluissa nähtiin altistuksen jälkeen merkittävästi kohonnut tulehdusvälittäjäaine tuotanto (TNFα and MIP-2) pesurin jälkeen kerätyille hiukkasille. UPM A näyte aiheutti kuitenkin kohonneen typpioksidituotannon soluissa. Koska ennen pesuria ja pesurin jälkeen kerättyjen hiukkasten kemiallinen koostumus poikkesi vain lievästi toisistaan, syyt vasteiden merkittäviin eroihin ovat vielä toistaiseksi tuntemattomat. On mahdollista että makrofagisolujen elävyyden lasku ja kohonnut tulehdusvälittäjäaineen tuotanto aiheutuvat maaperä- tai bakteeriperäisten komponenttien joutumisesta hiukkasmassaan esimerkiksi pesurissa käytetyn jokiveden mukana tai pesurin vesikierrrossa syntyvästä bakteerikontaminaatiosta. Päätelmiä tukee pesurin jälkeen kerätyn näytteen käynnistämä vasteprofiili, joka muistuttaa bakteerien aiheuttamia vasteita näissä soluissa. Lisäksi pesurin jälkeen kerätystä hiukkasnäytteestä löytyi teetetystä endotoksiinianalyysissä huomattava pitoisuus (5,8 EU/mg = endotoxin units) bakteeriperäistä komponenttia, sitä vastoin pitoisuus oli vain < 0.002 (EU/ mg) sähkösuodattimen jälkeen otetuissa näytteissä.

Näin ollen vaikka pesuri vähensi hiukkaspäästön määrää, oli se massayksikköä kohti toksisempaa kuin pääosin alkalisuoloista koostuva hiukkaspäästö sähkösuodattimen jälkeen. On tärkeää että jatkotutkimuksilla selvitetään pesurin jälkeisten hiukkaspäästöjen toksisuuden lähde.

KIRJALLISUUS

Jalava, P.I., Tapanainen, M., Kuusalo, K., Markkanen, A., Hakulinen, P., Happonen, M.S., Pennanen, A.S., Ihalainen, M., Yli-Pirilä, P., Makkonen, U., Teinilä, K., Mäki-Paakkanen, J., Salonen, R.O., Jokiniemi, J., Hirvonen, M.-R. 2010: Toxicological effects of emission particles from fossil- and biodiesel-fueled diesel engine with and without DOC/POC catalytic converter. *Inhalation Toxicology*, 22 Suppl 2:48-58

Jalava, P.I., Aakko-Saksa, P., Murtonen, T., Happonen, M.S., Markkanen, A., Yli-Pirilä, P., Hakulinen, P., Hillamo, R., Mäki-Paakkanen, J., Salonen, R.O., Jokiniemi, J., Hirvonen, M.-R. 2012: Toxicological properties of emission particles from heavy duty engines powered by conventional and bio-based diesel fuels and compressed natural gas. *Particle and Fibre Toxicology*, 9: 37

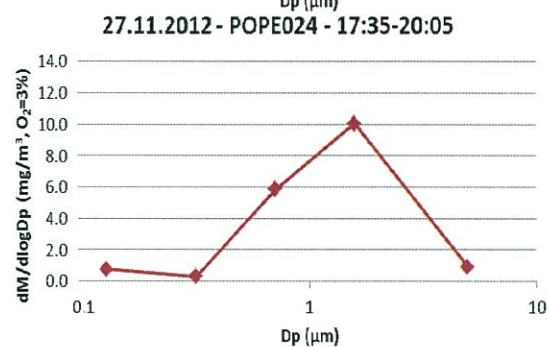
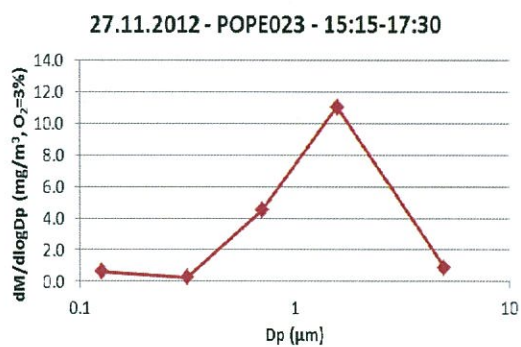
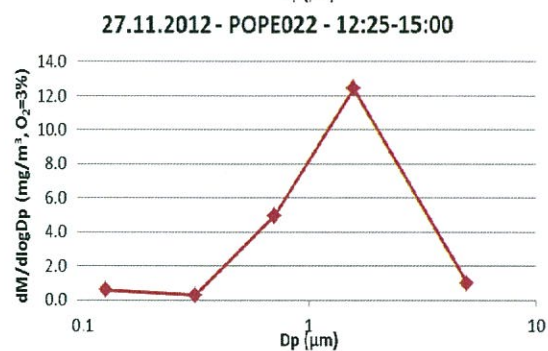
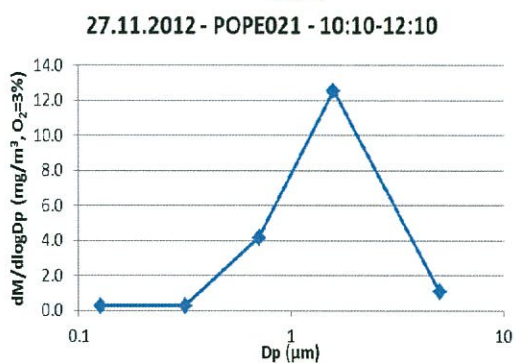
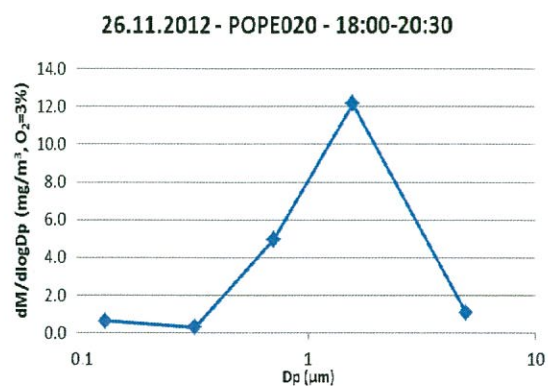
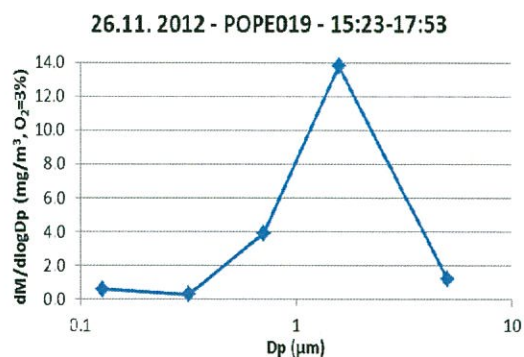
Kaivosoja, T., Jalava, P.I., Lamberg, H., Virén, A., Tapanainen, M., Torvela, T., Tapper, U., Sippula, O., Tissari, J., Hillamo, R., Hirvonen, M.-R., Jokiniemi, J., 2013. Comparison of emissions and toxicological properties of fine particles from wood and oil boilers in small (20-25 kW) and medium (5-10 MW) scale. *Atmospheric Environment*, 77, 193-201.

Lamberg, H., Nuutinen, K., Tissari, J., Ruusunen, J., Yli-Pirilä, P., Sippula, O., Tapanainen, M., Jalava, P.I., Makkonen, U., Teinilä, K., Saarnio, K., Hillamo, R., Hirvonen, M.-R., Jokiniemi, J. 2011: Physicochemical characterization of fine particles from small scale wood combustion for toxicological studies. *Atmospheric Environment* 2011, 45, 7635–7643

Lyyränen, J., Jokiniemi, J., Kauppinen, E.I., Backman, U. ja Vesala, H., 2004. Comparison of Different Dilution Methods for Measuring Diesel Particle Emissions. *Aerosol Science and Technology*, 38:12-23.

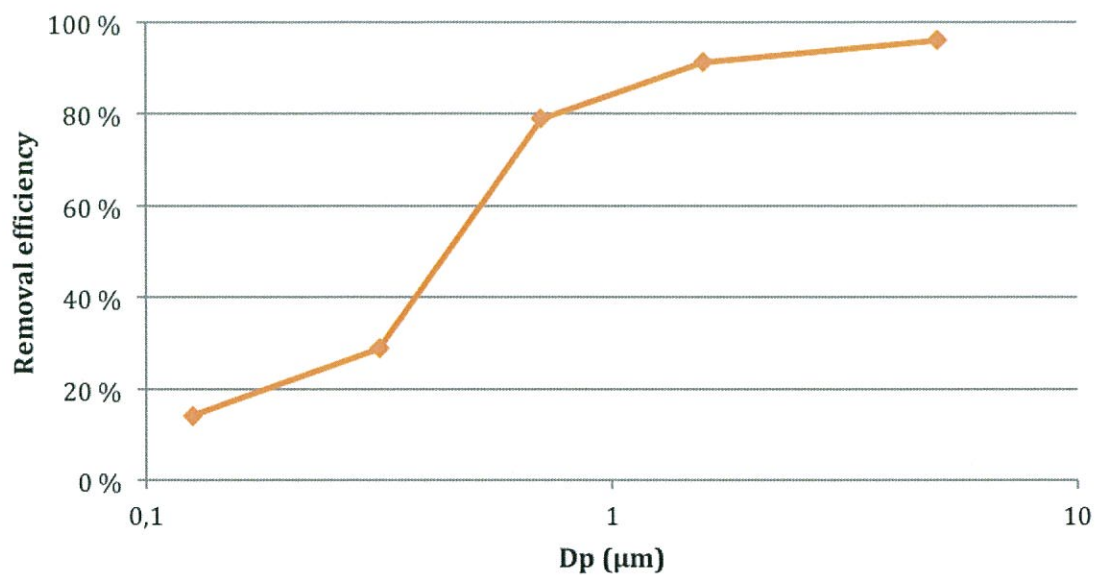
Ruusunen, J., Tapanainen, M., Sippula, O., Jalava, P.I., Lamberg, H., Nuutinen, K., Tissari, J., Ihalainen, M., Kuusalo, K., Mäki-Paakkanen, J., Hakulinen, P., Pennanen, A., Teinilä, K., Makkonen, U., Salonen, R.O., Hillamo, R., Hirvonen, M.-R. ja Jokiniemi, J., 2011. A novel particle sampling system for physico-chemical and toxicological characterization of emissions. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 401:3183-3195.

Liite 1. Pitoisuudet sähkösuodatimen jälkeen kerätyistä näytteistä.

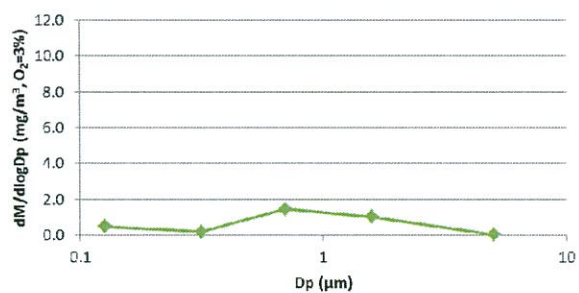


Liite 2. Pesurin erotustehokkuus ja pitoisuudet pesurin jälkeen kerätyistä näytteistä.

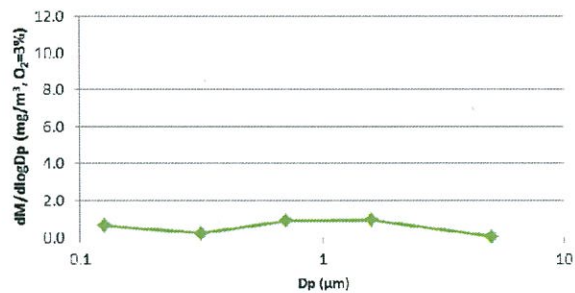
Scrubber removal efficiency



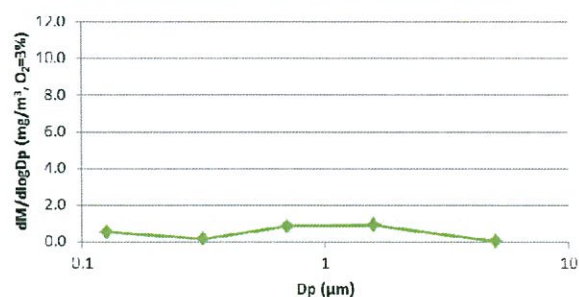
28.11.2012 - POPE026 - 14:11-21:01



28.-29.11.2012 - POPE027 - 21:15-9:15



29.-30.11.2012 - POPE031 - 21:25-15:00

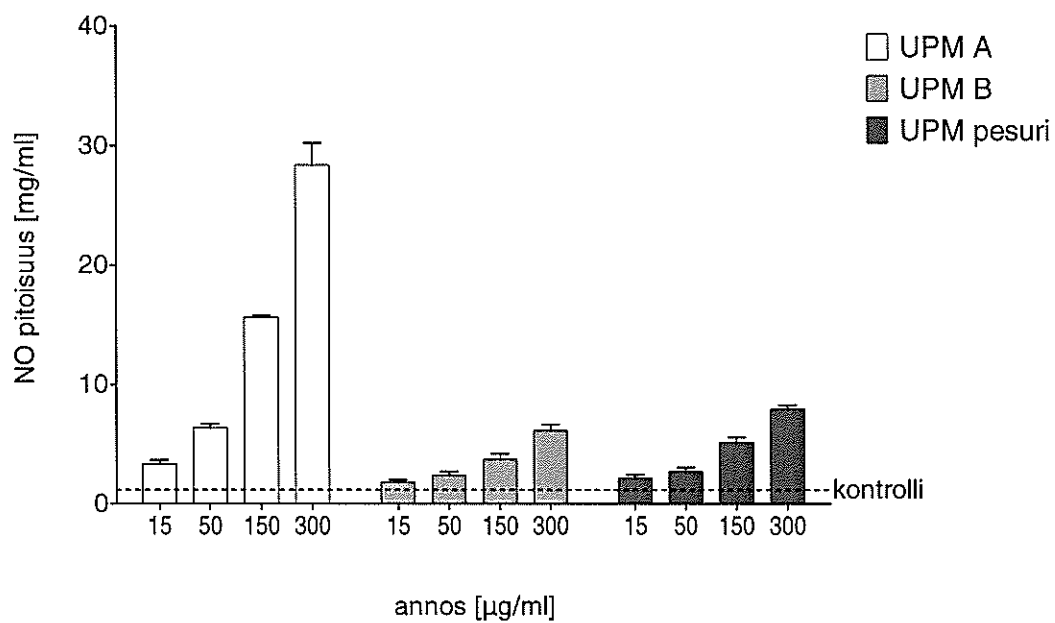


Liite 3. PAH-pitoisuudet

* Genotoxic				
	UPM A	UPM B	UMP pesuri	UPM Blank
Compound	ng/mg	ng/mg	ng/mg	ng/mg
Naphthalene	0,2	0,1	n.d.	0,1
Acenaphthylene	<DL	<DL	n.d.	<DL
Acenaphthene	<DL	<DL	n.d.	<DL
Fluorene	<DL	<DL	n.d.	<DL
Phenanthrene	0,1	0,1	1,1	0,3
Anthracene	<DL	<DL	n.d.	<DL
1-Methylphenanthrene *	<DL	<DL	0,9	<DL
Fluoranthene *	1,6	1,1	1,9	0,1
Pyrene	2,5	1,9	3,2	0,1
Benzo[c]phenanthrene *	1,7	1,4	2,1	<DL
Benzo[a]anthracene *	5,2	4,0	11,2	<DL
Cyclopenta[c,d]pyrene *	3,2	2,5	6,3	<DL
Triphenylene *	1,0	0,6	1,1	0,0
Chrysene *	7,8	6,5	10,6	<DL
5-Methylchrysenen *	<DL	0,0	n.d.	<DL
Benzo[b]fluoranthene *	2,7	2,0	6,4	<DL
Benzo[k]fluoranthene *	<DL	<DL	1,6	<DL
Benzo[j]fluoranthene *	1,9	1,4	3,1	<DL
Benzo[e]pyrene *	1,5	1,2	3,0	<DL
Benzo[a]pyrene *	0,4	0,2	n.d.	<DL
Perylene *	<DL	<DL	0,4	<DL
Indeno[1,2,3-cd]pyrene *	<DL	<DL	n.d.	<DL
Dibenzo[a,h]anthracene *	<DL	<DL	n.d.	<DL
Benzo[g,h,i]perylene *	0,2	<DL	n.d.	<DL
Anthanthrene *	<DL	<DL	n.d.	<DL
Dibenzo[a,l]pyrene *	<DL	<DL	n.d.	<DL
Dibenzo[a,e]pyrene *	<DL	<DL	n.d.	<DL
Coronene *	<DL	<DL	n.d.	<DL
Dibenzo[a,i]pyrene *	<DL	<DL	n.d.	<DL
Dibenzo[a,h]pyrene *	<DL	<DL	n.d.	<DL
Total	29,8	22,9	52,9	0,6
Tox	27,0	20,8	48,6	0,1

Liite 4. Alkuaine- ja ionipitoisuudet

		UPM A	UPM B	UPM Pesuri	UPM blank
Be	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
B	µg/mg	0,3	0,2	0,2	0,1
Na	µg/mg	145,0	208,2	254,4	5,7
Mg	µg/mg	<DL	<DL	0,6	<DL
Al	µg/mg	0,3	0,1	<DL	<DL
K	µg/mg	25,6	35,1	43,3	<DL
Ca	µg/mg	31,8	2,1	4,0	0,9
Ti	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
V	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Cr	µg/mg	<DL	<DL	0,1	<DL
Mn	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Fe	µg/mg	0,6	0,5	0,8	0,9
Co	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Ni	µg/mg	0,1	<DL	<DL	<DL
Cu	µg/mg	<DL	<DL	0,6	0,1
Zn	µg/mg	0,2	0,1	0,4	<DL
As	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Se	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Rb	µg/mg	0,1	0,2	0,2	<DL
Sr	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Mo	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Ag	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Cd	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Sb	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Ba	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Tl	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Pb	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Bi	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
Th	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
U	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
bromide (Br)	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
chloride (Cl ⁻)	µg/mg	6,0	5,0	9,0	<DL
nitrate(NO ₃ ⁻)	µg/mg	3,0	4,0	14,0	<DL
sulphate (SO ₄ ²⁻)	µg/mg	274,0	391,0	487,0	<DL
fluoride (F ⁻)	µg/mg	<DL	<DL	<DL	<DL
phosphate (PO ₃ ⁴⁻)	µg/mg	19,0	9,0	5,0	4,0
Total	µg/mg	506,2	655,4	819,6	11,6
Recovery	%	50,6	65,5	82,0	1,2

Liite 5. Typpioksidimääritys RAW267.4 solut**NO määrittäminen, RAW264.7 solut**

Liite 6. Tietoja savukaasupesurista (ote Toni Oravan ja Ilpo Nuutisen välisestä sähköpostikeskustelusta 3.7.2013)

1) Mikä malli oli käytössä laitoksessa? *Savukaasu on suoraan kosketuksessa lämmitettävään veteen. Pesurissa on täytekappalekerros ja pisaraneroittimet. Toisin sanoen savukaasu virtaa alaosaan täytekerroksen läpi ylöspäin kohti savupiippua.*

Onko siis tuolla teidän savukaasupesurilla joku malli/tyyppinimi tms. kenen valmistama esim? *Yksivaiheinen savukaasupesuri. Valmistaja on Metso Power.*

Löytyykö jotain toiminta-arvoja? *Kuumavesi pesurista ulos n. 60-65 C. Savukaasu ennen pesuria n. 175-183 C. Savukaasujen l-tila 40-60 C riippuen tuotantotasosta pesurin jälkeen. Maksimiteho on noin 100 MW.*

2) Onko jokivesi käsitelty ennen kun sitä laitetaan pesuriin? Ja jos on käsitelty, millä tavalla? *Jokivesi suodatetaan mekaanisesti rumpusuotimilla tiheään teräsverkon läpi. Desinfiointi tarkoituksessa raakaveden joukkoon annostellaan klooridioksidia ennen pumppausta tehtaalle.*

Tuleeko vesi suoraan Kymijoesta? *Vesi otetaan Kymijoesta edellä mainittujen toimenpiteiden kera.*

3) Mahdollistavat olosuhteet pesurin sisällä bakteerien kasvua? *Klooridioksidin annostelulla raakaveteen yritetään torjua bakteerikantojen muodostumista. Katso kohta 2.*

Eikös pesuriin tule se 170C-lämpöinen savukaasu, joka jäähtyy 100C -> 60C ja kerätty vesi oli noin 60C-lämpötilaltaan? *Vastaus on kohdassa 1.*

4) Onko pesuri nesteeseen lisätty biosidi? Jo on lisätty, mikä biosidi? *Ei lisätä biosidejä.*

Eli onko jotain kemikaaleja lisätty veteen? *Klooridioksidi on ainoa kemikaali, jota pesurissa olevassa vedessä on lisättyä.*

LIITE 10

**YTR: Soodakattilan ja meesauunin päästöhiukkasten
fysikaalis-kemialliset ja toksikologiset ominaisuudet,
Itä-Suomen Yliopisto - tutkimussuunnitelma**

TUTKIMUSSUUNNITELMA

Soodakattilan ja meesauunin päästöhiukkasten fysi- kaalis-kemialliset ja toksikologiset ominaisuudet SOTOX

Osallistujat:

Itä-Suomen Yliopisto

Maija-Riitta Hirvonen, Ph.D., professori

- Pasi Jalava, Ph.D, Mikko Happonen, Ph.D, Oskari Uski, Ph.D. student

Jorma Jokiniemi, Ph.D., professori

- Olli Sippula Ph.D, Jarkko Tissari, Ph.D., Ph. Heikki Lamberg Ph.D student, Miika Kortelainen Ph.D student, Ilpo Nuutinen research scientist / engineer

1 LÄHTÖKOHTA

1. Tausta ja tarve

Sellun valmistuksen päästöjen mahdollisten haitallisten ominaisuuksien ymmärtämiseksi on tärkeää selvittää sekä soodakattilan että meesauunin päästöjen fysikokemialliset ja toksikologiset ominaisuudet. Sellunkeitossa kemikaalien talteenotolla on suuri merkitys prosessin kannalta. Soodakattila on sellun tuotantoprosessin osa, jonka tehtävinä ovat kemikaalien talteenotto ja regenerointi (uudelleen muodostaminen), mustalipeän polttaminen sekä poltossa syntyvän lämmön talteenotto. Soodakattilassa erotetaan mustalipeästä rikki ja saadaan natriumsulfidia, natriumkarbonaattia ja natriumsulfaattia. Samalla poltetaan mustalipeän sisältämä biomassa, josta saadaan höyryä, joka käytetään sähköntuottoon. Meesauunissa tehtaassa karbonatisoituneesta kalkista tehdään uudelleen poltettua kalkkia. Meesauunin polttoaineena on polttoöljy tai maakaasu, jolla meesa poltetaan. Toisin sanoen soodakattila käyttää polttoaineenaan biomassaa ja meesauuni öljyä. Molemmat prosessit liittyvät olennaisesti kemikaalien ja kalkin kierrätykseen sulfaattisellumenetelmässä.

Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että öljyn polton ja biomassan polton hiukkasten kemiallinen koostumus ja toksisuus ovat toisistaan hyvin poikkeavia (Kaivosoja et al. 2013). Öljyn polton hiukkaset ovat olleet huomattavasti toksisempia kuin vastaavan mittakaavan biomassan polttolaitoksen päästöhiukkaset. Alustavissa tutkimuksissa soodakattilan päästöistä kerätyissä näytteissä toksisuus on ollut suhteellisen matalalla tasolla, joka johtuu päästöjen kemiallisesta koostumuksesta. Soodakattilaan liitetyt puhdistusjärjestelmät voivat kuitenkin vaikuttaa toksisuusprofiiliin huomattavasti.

Meesauunin päästöjen osalta ei ole aikaisempaa tutkimustietoa, joka yhdistäisi kemialliset analyysit ja toksikologian. Kuitenkin öljyn polton hiukkasten on havaittu aiheuttavan voimakaitakin toksisuusvasteita kaupunki-ilmassa (Jalava et al. 2009). Meesanpolttoprosessissa tulee myös jonkin verran kalkkihäviöitä ja on mahdollista, että kalsiumia päätyy myös päästöön. Kalsiumhiukkaset ovat kaupunki-ilmatutkimuksissa olleet yhteydessä lisääntyneisiin tulehdusvaikutuksiin (Happo et al. 2008). Näin ollen meesauunin päästöjen selvittäminen ja niiden toksisuuden määrittäminen on tärkeää arvioitaessa paperitehtaan päästöjen kokonaisvaikutusta.

2 Projektin tavoitteet

Tässä projektissa tutkitaan sellutehtaan päästöjen terveydelle haitallisia toksikologisia ominaisuuksia ja niihin liittyviä fysikaalisia tekijöitä ja kemiallisia komponentteja sekä soodakattilan että meesauunin osalta. Hankkeessa testataan seuraavia hypoteesejä

Tutkimushypoteesit:

1. Soodakattilan ja meesauunin päästöt poikkeavat toisistaan sekä kemiallisesti että toksikologisilta ominaisuuksiltaan. Lisäksi kokonaispäästöt kaasujen ja hiukkasten osalta

sekä hiukkaskoko ovat hyvin erilaiset.

2. Meesauunin päästöt muistuttavat raskaan polttoöljyn tai maakaasun päästöjä
3. Suodatintekniikalla voidaan estää em. haittoja molemmissa prosesseissa

Strategiset tavoitteet:

- Vastata tulevaisuuden lainsäädännön vaatimiin tutkimus- ja tuotekehitystarpeisiin
- Edistää yritystoiminnan kansainvälistä kilpailukykyä ja kansainvälistymistä toteuttamalla haasteellisia tutkimus- ja kehityshankkeita.

3 TOIMENPITEET

3.1 NÄYTTEEN KERÄYKSET (PROF. JORMA JOKINIEMI)

Kokeissa mitataan/kerätään soodakattilan ja meesauunin kaasumaiset päästöt, hiukkaspäästöt (TSP, PM_{2.5}) ja näiden hiukkasten fysikaalis-kemialliset ominaisuudet. Lisäksi kerätään näytteet toksikologisia kokeita varten.

Päästöistä mitataan hiukkasten massakokojakaumat impaktorilla, lukumääräkokojakaumat ELPI:llä (sähköinen alipaineimpaktori, Dekati Ltd) ja/tai SMPS/FMPS:llä (Mobility Particle Sizer, TSI Ltd.) sekä hiukkasten orgaanisen ja alkuainehiilen määrät (OC/EC). Lisäksi kerätään toksisuusnäytteet UEF:n FINE laboratoriossa kehitetyllä sykloni-impaktori-menetelmällä sekä analysoidaan näistä näytteistä PAH-pitoisuudet ja epäorgaanisen aineksen koostumus. Kaasumaiset päästöt analysoidaan FTIR laitteistolla.

Pienhiukkasnäytteet kerätään teflonsuodattimille. Ennen keräyksiä suodattimet pestään metanolilla, kuivataan ja punnitaan.

Keräysten jälkeen suodattimet punnitaan ja suodattimelle kerätyt pienhiukkaset uutetaan metanolilla ja kuivataan kemiallisia ja toksikologisia analyysejä varten. Metanoliuuton jälkeen suodattimet punnitaan vielä kerran ja lasketaan uuttotehokkuus.

3.2 PÄÄSTÖJEN KEMIALLINEN KARAKTERISOINTI (PROF. JORMA JOKINIEMI)

Kerättyjen näytteiden epäorgaanisen aineksen koostumus analysoidaan IC:llä (ionikromatografia) (K, Na, Cl, SO₄), karbonaatit määritetään termisoptisella menetelmällä. Metallit analysoidaan ICP-MS:llä (inductive coupled mass spectrometer) ja PAH yhdisteet GC-MS menetelmällä.

3.3 TOKSIKOLOGINEN KARAKTERISOINTI (PROF. MAIJA-RIITTA HIRVONEN)

Kerättyjen näytteiden toksikologiseen karakterisointiin käytetään nisäkässolumallia, jossa elistön puolustusjärjestelmän soluja altistetaan pienhiukkasille ja mitataan hengitys- ja sydänsairauksien riskiä kuvastavia tulehduksen ja solukuoleman biokemiallisia merkkiaineita. Li-

säksi mitataan perimään liittyvää myrkyllisyyttä (genotoksisuus).– Hiukkasten kemian (PAH-yhdisteet, alkuaineet ja, ionit) ja toksisuuden yhteydet analysoidaan (Taulukko 1)

Taulukko 1 : Analysoitavat näytteet, solualtistukset ja toksikologiset analyysit

	Kattila 1 sooda 1	Kattila 1 sooda 2	Kattila 2 meesa 1	Kattila 2 meesa 2	Blankit	Yhteensä
Näytteet						
PM 1	1 + Blank	1	1	1	3	6
Solualtistukset						
Altistukset tulehduksen ja solukuoleman markkereiden määrittämiseksi						
4 annosta /näyte	4	4	4	4	12	24
3 altistuskertaa /näyte	12	12	12	12	36	72
Altistukset genotoksisuuden määrittämiseksi						
4 annosta /näyte	4	4	4	4	12	24
2 altistuskertaa /näyte	8	8	8	8	24	48
Analyysit						
Tulehdus						
• Sytokiinit	72	72	72	72	48	264
Solukuolema						
• Nekroosi	24	24	24	24	12	84
• Apoptoosi	24	24	24	24	12	84
• Solusykli analyysit	24	24	24	24	12	84
Genotoksisuus						
• Comet assay	24	24	24	24	12	84
Analyysien kokonaismäärä	284					852

3.3.1 Solualtistus

Hiiren RAW264.7 makrofageja (ATCC, American Type Culture Collection) kasvatetaan hiilidioksidi-inkubaattorissa (+37 °C, CO₂ 5 %) RPMI1640 soluviljelymediumissa (10 % FBS-seerumi, 2 mM l-glutamiini ja 100 U/ml penisilliini-streptomysiini). Soluja altistetaan annosvasteisesti (37 °C, 5 % CO₂) vuorokauden ajan, jonka jälkeen näyte sentrifugoidaan (380 g, 10min) ja supernatantti pakastetaan sytokiinimäärittäystä varten (-70 °C). Altistetut solut käytetään solujen elävyyden ja solukuoleman selvittämiseen.

3.3.2 Mitattavat terveyshaittoja indikoivat biokemialliset vasteet

Tulehdus

- **Typpioksidimääritys (NO): Solujen** typpioksidituotanto mitataan määrittämällä stabiilia metaboliittia nitriittiä spektrofotometrisesti Griess:n menetelmällä.
- **Sytokiinimääritykset:** Altistetuista näytteistä määritetään seuraavat käynnistyneestä tulehdusreaktiosta kertovat sytokiinit solujen tuottamina proteiineina. (IL-1, IL-6, MIP-2 TNFα) ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay)–kitin avulla (R&D systems, MN, USA). Tulokset mitataan spektrofotometrisesti ja niitä verrataan altistamattomien kontrollisolujen tuottamiin tulehdusvälittäjäaineisiin.

Solukuolema

- **MTT-testi.** Solujen elävyys mitataan spektrofotometrisesti määrittämällä toimivien mitokondrioiden määrää altistetuissa soluissa.
- **Solusyklianalyysi.** DNA:n määrä soluissa analysoidaan propidiumjodidi (PI) värjätystä permeabilisoiduista soluista virtausytometrillä (Beckman Coulter) avulla. Analyysistä saadaan selville makrofagien solusyklin vaiheet.
- **Ohjelmoitu solukuolema (Apoptoosi).** Solusyklianalyysistä saadaan selville myös apoptoottisten solujen osuus kokonaissolumäärästä
- **Hallitsematon solukuolema (Nekroosi).** Nekroottisten solujen osuus määritetään PI-värjätystä tuoresolunäytteistä virtausytometrillä (Beckman Coulter). Tuorevärjäyksessä PI-väriaine värjää nekroottisten solujen sisältämän DNA:n, mutta ei läpäise muiden solujen solukalvoa.

Genotoksisuus

- Altistetuista soluista analysoidaan perimävaurioita ns. komeettatestillä. Tämä genotoksisuustesti mittaa DNA-vauriota juostekatkoksina.

3.4. RAPORTOINNIT

Tuloksista raportoidaan projektin seurantakokouksissa ja väliraporteissa. Tutkimustuloksista laaditaan tieteellisiä julkaisuja ja kansantajuisia lehtiartikkeleja. Tuloksia esitellään kansallisissa ja kansainvälisissä seminaareissa. Julkaisujen sisällöstä sovitaan hankkeeseen osallistuvien kanssa.

5 AIKATAULU

Tutkimus toteutetaan vuosina 2014-2015 taulukon 2. mukaisesti.

Taulukko 2. Tutkimusaikataulu 12 PM näytteelle.

Kuukausi	2014												2015					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
Näytteiden keräykset																		
Näytteiden uutto analyysiin																		
Kemialliset analyysit																		
Solualtistukset																		
Solukuoleman määrittäykset																		
Tulehduksen merkkiaineiden määrittäykset																		
Genotoksisuuden määrittäykset																		
Data-analyysit																		
Raportointi																		

6 Kustannusarvio

Hankkeen kokonaiskustannukset ovat **107 612 EUR** plus **arvonlisävero 25 827 EUR** eli yhteensä **133 438 EUR** sisältäen henkilöstö-, laite-, materiaali-, tila- ja matkakustannukset sekä arvonlisäveron (24 %).

LIITE 11

**YTR: Soodakattilan sähkösuodintuhkan hyötykäyttömahdollisuudet,
Oy Sirra Ab -alustava loppuraportti 25.11.2013**

Soodakattilan sähkösuodintuhkan hyötykäyttömahdollisuudet

Osahanke V: Sähkökemiallinen käsittely

Kurt Sirén
Oy Sirra Ab

20.11.2013

Tilaaja: Suomen Soodakattilayhdistys ry

OSAHANKE V: SÄHKÖKEMIALLINEN KÄSITTELY

TIIVISTELMÄ

Tarkasteltiin mahdollisuuksia käyttää sähkökemiallista käsittelyä soodakattilan lentotuhkan muuttamiseksi hyötykemikaaleiksi. Tarkasteluun otettiin mukaan klooridioksidilaitoksen hapan jätesuola. Sähkökemiallista käsittelyä voidaan käyttää yksin tai yhdistelmänä muiden osaprosessien kanssa. Muut osaprosessit olisivat esim. nykyiset kaupalliset tekniikat kuten lentotuhkan kiteytys tai uutto. Vaikutuksia ympäristöpäästöihin, lipeäkiertoon ja kemikaalisäästöihin ja -kuluihin laskettiin natrium-, rikki-, kalium- ja klooritaseen kautta. Todettiin että on mahdollista hyödyntää molempia suoloja kokonaisuudessaan ja siten lopettaa niiden liuottamisen. Hyödyntäminen olisi taloudellisesti tuottava, mutta investointien takaisinmaksuaika olisi yli kaksi vuotta.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	TAVOITE	5
3	YHTEENVETO AIKAISEMPIEN HANKKEIDEN TULOKSISTA	5
4	NATRIUMSULFAATIN MARKKINATILANTEEN KEHITYS	7
5	SÄHKÖKEMIALLINEN KÄSITTELY	7
5.1	Membraanien rajallisuudet	10
5.2	Virtahyötysuhde ja syöttövirran happamoituminen	11
6	TEKNIikka SOVELLETTUNA LENTOTUHKALLE	11
7	KLOORIDIOKSIDILAITOKSEN HAPAN SUOLA LÄHTÖAINEENA	12
8	MAHDOLLISIA YHDISTETTÄVIÄ TEKNIIKOITA.....	13
8.1	R8 - R10 -päivitys	13
8.2	GLSS -rikinhallintaprosessi	13
8.3	Kaupalliset kaliumin ja kloorin hallintaprosessit	16
9	TASELASKELMAT	16
9.1	Käytetyt hinnat	17
9.2	Keskiarvotehdas	17
9.3	Eri prosessitapauksia	18
9.3.1	Tapaus 1. BME-prosessi sovellettuna pelkästään lentotuhkalle	18
9.3.2	Tapaus 2. BME-prosessi sovellettuna pelkästään happamalle suolalle.....	19
9.3.3	Tapaus 3. Suolojen yhdistäminen.....	20
9.3.4	Tapaus 4. Lentotuhka BME-prosessiin, rikkitase GLSS:llä	21
9.3.5	Tapaus 5. Lentotuhka BME-prosessiin, GLSS, R10-suodin	22
9.3.6	Tapaus 6. Lentotuhka uuttoprosessiin, GLSS, R10-suodin.....	23
9.3.7	Tapaus 7. Lentotuhka kiteytysprosessiin, GLSS, R10-suodin.....	24
9.3.8	Tapaus 8. Natriumsulfaatin myynti.....	24
9.3.9	Tapaus 9. Natriumsulfaatin myynti, R10 -suodin	26
9.4	Yhteenvetotaulukot	27
10	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	27
11	KIRJALLISUUSVIITTEET.....	29

LIITTEET:

- Liite 1a. Tapaus 1. BME-prosessi sovellettuna pelkästään lentotuhkalle - taselaskelma
- Liite 1b. Tapaus 1. BME-prosessi sovellettuna pelkästään lentotuhkalle - ympäristövaikutus
- Liite 2a. Tapaus 2. BME-prosessi sovellettuna pelkästään happamalle suolalle - taselaskelma
- Liite 2b. Tapaus 2. BME-prosessi sovellettuna pelkästään happamalle suolalle - ympäristövaikutus
- Liite 2c. Tapaus 2. BME-prosessi sovellettuna pelkästään happamalle suolalle, hapon konsentrointi
- Liite 3a. Tapaus 3. Suolojen yhdistäminen - taselaskelma

- Liite 3b. Tapaus 3. Suolojen yhdistäminen - ympäristövaikutus
- Liite 4a. Tapaus 4. Lentotuhka BME-prosessiin, rikkitase GLSS:llä - taselaskelma
- Liite 4b. Tapaus 4. Lentotuhka BME-prosessiin, rikkitase GLSS:llä - ympäristövaikutus
- Liite 5a. Tapaus 5. Lentotuhka BME-prosessiin, GLSS, R10-suodin - taselaskelma
- Liite 5b. Tapaus 5. Lentotuhka BME-prosessiin, GLSS, R10-suodin - ympäristövaikutus
- Liite 6a. Tapaus 6. Lentotuhka uuttoprosessiin, GLSS, R10-suodin - taselaskelma
- Liite 6b. Tapaus 6. Lentotuhka uuttoprosessiin, GLSS, R10-suodin - ympäristövaikutus
- Liite 7a. Tapaus 7. Lentotuhka kiteytysprosessiin, GLSS, R10-suodin - taselaskelma
- Liite 7b. Tapaus 7. Lentotuhka kiteytysprosessiin, GLSS, R10-suodin - ympäristövaikutus
- Liite 8a. Tapaus 8. Natriumsulfaatin myynti - taselaskelma
- Liite 8b. Tapaus 8. Natriumsulfaatin myynti - ympäristövaikutus
- Liite 9a. Tapaus 9. Natriumsulfaatin myynti, R10 –suodin - taselaskelma
- Liite 9b. Tapaus 9. Natriumsulfaatin myynti, R10 –suodin - ympäristövaikutus
- Liite 10a. Yhteenveto: lähtöaineet ja tuotteet
- Liite 10b. Yhteenveto: ympäristövaikutukset ja kalium ja kloori talteenottokierrossa
- Liite 10c. Yhteenveto: Taloudellisuus

1 JOHDANTO

Pohjoisissa sellutehtaissa rikkitase on yleensä ylijäämäinen johtuen mäntyöljykeittoon tuotavasta rikkihaposta. Ylijäämä poistetaan liuottamalla soodakattilan lentotuhkaa jäteveteen. Samalla poistetaan tehtaan kemikaalikerrosta kalium ja kloori. Lentotuhkan lisäksi liuotetaan klooridioksidilaitoksen hapanta jätesuolaa, jonka määrä on vielä suurempi. Lentotuhkan ja jätesuolan liuottaminen on yli vuosikymmenen ollut ympäristölupaviranomaisten huomion kohteena. Sulfaatin haittavaikutuksiin kuuluu mm. se, että hapettomissa oloissa anaerobiset bakteerit pelkistävät sen sulfidiksi, josta kehittyy rikkivetykaasua, joka on myrkyllistä ja pahanhajuista. Yhdysvaltojen etelä-osavaltioissa ja Kanadan British Columbiassa on jo asetettu kieltoja lentotuhkan liuottamiselle joihinkin jokiin (1).

Ratkaisuja ympäristövaikutuksien vähentämiseen on haettu tuhkan puhdistamisesta natriumsulfaatiksi, joka kelpaisi raaka-aineeksi muulle teollisuudelle, ja sen muuttamisesta uudelleen käytettäväksi kemikaaleiksi, kuten rikkihapoksi ja natriumhydroksidiksi. Muutama sellutehdas, kuten Visy Australiassa, tuottaa natriumsulfaattia myyntiin. Maailmanmarkkinahinta on kuitenkin hyvin alhainen.

2 TAVOITE

Työn tavoitteena oli aikaisempien suodintuhkan hyötykäyttöhankkeiden tuloksien päivittäminen nykyiseen markkina- ja hintatilanteeseen sekä sähkökemiallisen käsittelymenetelmän käyttökelpoisuuden arviointi.

Natriumsulfaatin saatavuutta ja nykyistä hintatasoa tutkittiin internethauilla. Sähkökemiallisen menetelmän soveltuvuutta ja potentiaalia suolojen hyötykäytössä tutkittiin laskemalla sen vaikutuksia sellutehtaan natrium-, kalium- rikki- ja klooritaseeseen. Taseen kautta laskettiin ympäristöpäästöjä, kemikaalisäästöjä ja käyttökustannuksia. Käyttökustannuksissa huomioitiin kemikaalien lisäksi sähkön kulutus ja membraanikustannus. Käytännön kokeita tässä hankkeessa ei tehty.

3 YHTEENVETO AIKAISEMPIEN HANKKEIDEN TULOISTA

Aikaisemmissa osahankkeissa tutkittiin lentotuhkan puhdistamista, natriumsulfaatin käyttäjien puhtausvaatimuksia, markkinatilannetta ja kuljetustapaa. Kokeiden perusteella saatiin esille tarkoitukseen sopiva prosessi. Tehtiin myös pilot-kokeita kehitetyllä prosessilla. Aikaisempien osahankkeiden keskeisimmät tulokset on kuvattu alla.

Tutkimushankkeissa I ja II tutkittiin puhdistuskeinoja (2, 3). Todettiin että liuottamalla tuhka ja selkeyttämällä liuos saadaan niukkaliukoiset aineet pois. Vesiliukoiset aineet, kalium ja kloori, jäävät kuitenkin liuokseen. Haihdutuskiteyttämällä saadaan kiteinen natriumsulfaatti, joka erotetaan suodattamalla emäliuoksesta, ja pestään vedellä. Suurin osa liukoisista aineista voidaan konsentroida emäliuokseen, ja poistaa sen mukana. Natriumsulfaattituote on puhtaudeltaan verrattavissa kaupallisiin laatuihin. Kaliumia jää kuitenkin tuotteeseen haihdutusasteesta riippuen, mutta se ei välttämättä ole haitaksi, sillä useissa käyttökohteissa sitäkin tarvitaan. Tällaisia ovat lasin sulatus ja lannoitteet. Puhdistuskokeiden tuloksena päädyttiin prosessi-ehdotukseen, joka on tarkemmin kuvattu kohdassa 9.3.8.

Lentotuhka on hyvin kevyttä, ja sen kuljettaminen sellaisenaan on epätaloudellista. Autokuorman kokoa ei rajoita paino, vaan tilavuus. Osahankkeissa II ja III tutkittiin erilaisia keinoja saada tuhka tiiviimpään muotoon (3, 4). Selvityksen tuloksena oli se, että kompaktointi eli briketointi on edullisin tapa. Briketoinnissa lisätään pieni määrä vettä, ja puristetaan tuhka kahden telan väliin kompaktiksi levyksi, joka murenee paloiksi. Laite ei vaadi aktiivista operaattoria, ja on siksi edullisempi kuin esim. granulointi. Lentotuhkan ottotapa on myös merkityksellinen. Suppilotuhkaa ei saisi olla mukana, sillä tämä sisältää enemmän epäpuhtauksia kuin suodintuhka.

Yhtenä huolenaiheena lentotuhkan hyödyntämisessä on radioaktiivisuus. Tšernobylistä peräisin oleva cesiumisotooppi Cs-137 tulee puun mukana sellutehtaaseen, ja rikastuu lentotuhkaan. Sen puoliintumisaika on 30 vuotta, ja sen poishuuhtoutuminen luonnossa valumavesien mukana on hyvin vähäistä (5). Siksi hyvin suuri osa laskeumasta, suuruusluokka puolet, on edelleen jäljellä. Koetuhkassa Cs-137 aktiivisuus oli 2000 Bq/kg (4). Tason merkitystä voidaan havainnollistaa sillä, että toimenpiderajat elintarvikkeissa ovat alueella 400 – 1250 Bq/kg. Puhdistusprosessilla saatiin pois 93 % aktiivisuudesta, eli päädyttiin tasolle 136 Bq/kg, eli selkeästi alle jopa elintarvikerajoja. Elintarvikkeisiin tuote ei tietenkään kuitenkaan ole tarkoitettu. Työsuojeluongelmia tuhkan käsittelyssä tuskin myöskään synny, joskin puuraaka-ainevaihtelujen takia voi olla syytä kiinnittää huomiota tähänkin asiaan.

Natriumsulfaatin markkinatilannetutkimuksessa selvitettiin käyttökohteita, etsittiin potentiaalisia asiakkaita Suomessa, hahmotettiin hintatasoa ja selvitettiin käyttömääriä. Todettiin että maailmanlaajuisesti suurin käyttäjä on pesuaineteollisuus. Seuraavaksi suurimmat käyttäjät ovat lasiteollisuus ja metsäteollisuus. Myös lannoiteteollisuus käyttää natriumsulfaattia tietyissä tuotteissa, vaikka kaliumsulfaatti on sillä alalla merkittävämpi. Todettiin kuitenkin että käyttömäärät Suomessa eivät ole niin suuria että kaikki liuotettava lentotuhka mahtuisi sen markkinoille. On myös otettava huomioon että lentotuhkan lisäksi myös klooridioksidilaitoksen jätesuola olisi sijoitettava johonkin. Kuitenkin natriumsulfaatin tuottaminen voisi olla ratkaisu joillekin tehtaille, esim. niille jotka sijaitsevat sisävesistöjen äärellä, ja ovat suurimmassa riskissä joutua liuotuskiellon kohteeksi.

Osassa IV tutkittiin puhdistusprosessia pilot-mittakaavassa (6). Kiteytyskokeita tehtiin laitteistolla, joka oli rakennettu kaupallisen ARC-prosessin ollessa esikuvana (Andritz'in Ash Recrystallization). Erityisenä tutkimuksen kohteena oli saannon ja puhtauden suhde. Kun vettä haihdutetaan, saadaan aluksi melko puhdas natriumsulfaattituote. Kun haihdutus viedään pidemmälle, liuokseen konsentroituu yhä enemmän epäpuhtauksia, ja niitä jää yhä enemmän kidemassaan. Toisaalta saanto paranee. Puhtaus ja saanto ovat siten jossain määrin vastakkaisia asioita. Kidemassa voidaan liuottaa uudestaan ja kiteyttää toisen kerran, jolloin puhtaus paranee. Kalium saostuu kidemassaan, ja on siten vaikea poistaa täydellisesti, mutta toisaalta siitä ei monissa käyttökohteissa ole haittaa. On myös ajateltavissa että tuotetaan kahta laatua, puhdas- ja lannoitelaa.

Osahankkeessa IV tutkittiin myös lentotuhkaliuoksen selkeytymisnopeutta, mikä on tärkeää tehdasselkeyttimen mitoitus ajatellen. Pyrittiin myös havainnoimaan mahdollisia vaikeuksia prosessissa. Todettiin että sakka on varsin flokkimainen, ja että se laskeutuu melko hitaasti, ja on konvektiovirroille herkkä. Vuorokauden kuluttua saatiin kuitenkin melko selkeä liuos. Asiaan voidaan mahdollisesti vaikuttaa flokkaisaineilla, edellyttäen että ne tuotteen käytössä ovat hyväksyttävissä.

Pilotkokeiden perusteella prosessi todettiin toimivan ja olevan melko valmis. Merkittäviä vaikeuksia ei todettu. Kiteytyksessä syntyi kerrostumia lämpöpinnoille, mutta tämälntyyppisessä prosessissa sitä ei voi välttää. Tuotteen raekoko oli hyvä.

4 NATRIUMSULFAATIN MARKKINATILANTEEN KEHITYS

Suomessa natriumsulfaatin ainoa tuottaja, Valkeakosken viskoositehdas (entinen Säteri Oy), on lopettanut tuotantonsa. Toiminta on muutamaaan otteeseen käynnistynyt ja lopetettu uudestaan. Tuotantomäärä oli noin 30 000 tonnia vuodessa, josta suurin osa meni ulkomaille (7). Tuote oli hyvin puhdasta ja siksi varsin kallista. Sulfaattia hankitaan nykyään ulkomailta.

Maailmanlaajuisesti ylivoimaisesti suurin tuottaja on Kiina, joka tuottaa 65 – 70 % kaikesta natriumsulfaatista (8). Maassa on suuri joukko luonnonesiintymiä, ja vienti kasvaa 2 -3 % vuosittain (8). Tuotantokustannukset ovat alhaisia, mistä syystä Kiina on jo pitkään dominoinut maailmanmarkkinoita. Halvimmat laadut ovat hintaluokassa 45 – 50 \$/t suurina erinä, yleisen hintatason ollessa 70 – 90 \$/t (9). Elintarvikelaadut voivat nousta tasolle 480 \$/t. Lentotuhtasta tuotettua natriumsulfaattia ei voida ajatella käytettäväksi sellaisissa puhtausvaatimuksissa, minkä vuoksi realistisempi tuotteen hintataso lieenee alueella 85 – 120 \$/t, eli 64 – 93 €/t. Natriumsulfaattia on teollisissa maissa usein pidetty jätteenä, josta halutaan päästä eroon. Hinta on nyt jopa alhaisempi kuin se oli osahankkeen II selvityksen aikana (2005).

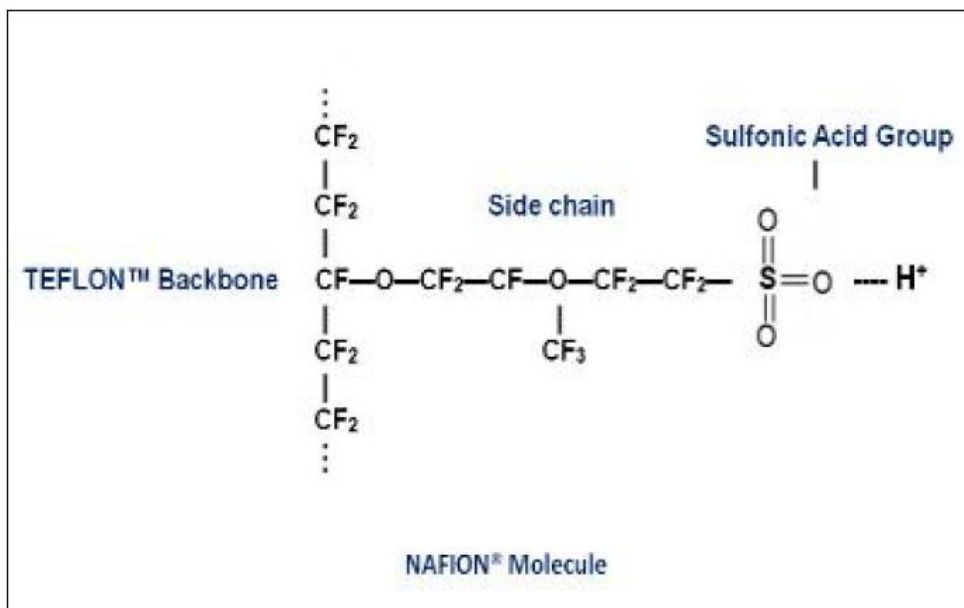
Vaikka natriumsulfaatin hinta on alhainen, kulutus on kasvusuunnassa, lähinnä johtuen siitä, että sen käyttö pesuaineissa kasvaa. Kasvu on luokkaa 2-3 % vuodessa (8). Yhtenä syynä tähän on se, että fosfaatin käyttö pesuaineissa vähennetään ympäristösuojelun takia. Metsä-teollisuudessa sen sijaan käyttö vähenee tehtaiden sulkemisasteen noustessa ja ympäristövaatimuksien kasvaessa.

Kun osahankkeessa II kartoitettiin natriumsulfaatin käyttäjiä ja käyttömääriä Suomessa, löytyi vain noin 6000 t/v määrä (3). Uusia suuria käyttäjiä ei ole sen jälkeen tullut, mutta huomioiden pienempien käyttäjien yhteenlaskettu määrä, käytön suuruusluokka Suomessa lieenee 10 000 t/v.

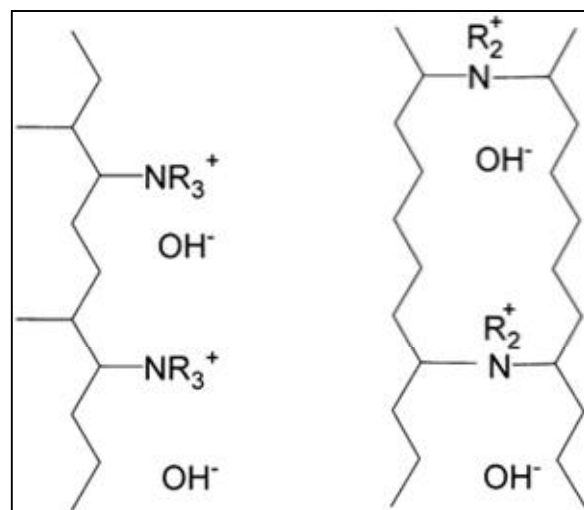
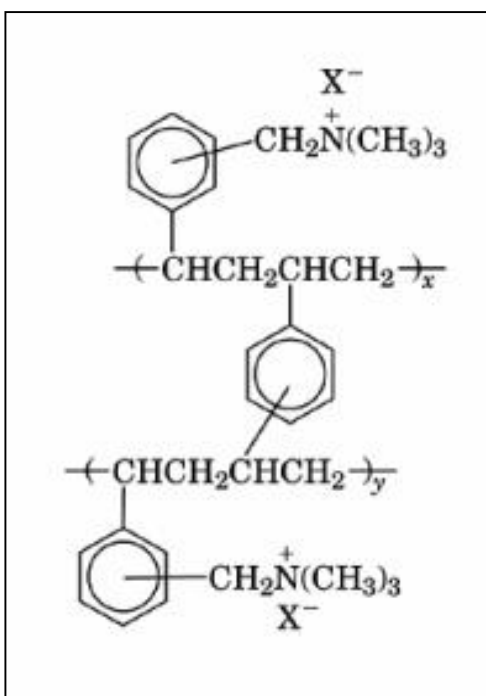
5 SÄHKÖKEMIALLINEN KÄSITTELY

Sähkökemiallisessa käsittelyssä hyödynnetään sähkökenttää ja ioniselektiivisiä membraaneja. Membraanien rooli on se, että ne pitävät muodostuneet tuotteet erillään toisistaan. Sellutehtaan suolojen käsittelyssä tuotteet ovat ensisijaisesti rikkihappo ja natrium- ja kaliumhydroksidi.

Membraani koostuu runkopolymeeristä, johon on liitetty varauksellisia ryhmiä. Runkopolymeeri voi olla teflonia, styreeni-divinyylibentseeniä tai muita materiaaleja. Kationivaihtomembraanissa on negatiivisia varauksia, yleensä sulfonaatti- tai karboksyyli-ryhmiä. Anionivaihtomembraanit perustuvat kvaternäärisiin tai sekundäärisiin amiiniryhmiin. Kuvissa 5-1 ja 5-2 on esitetty kationi- ja anionivaihtomembraanien tavallisimpia rakenteita.



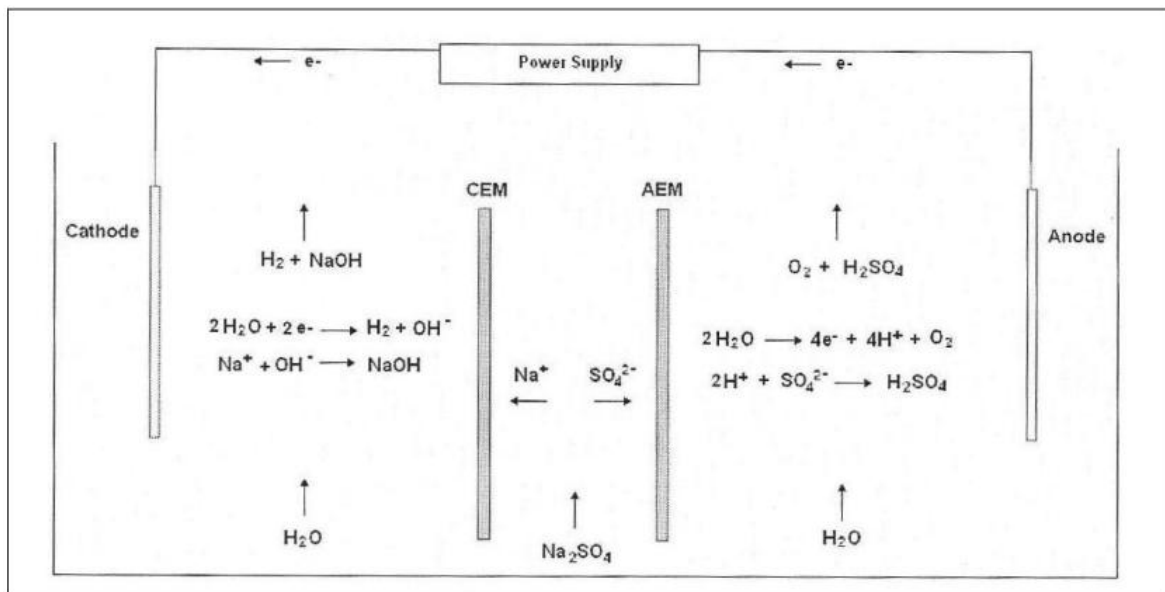
Kuva 5-1. Kationivaihtomembraanin rakenne (10)



Kuva 5-2. Anionivaihtomembraanin rakenne. R on orgaaninen ketju (1, 11)

Membraani on periaatteessa ionivaihdin kalvomuodossa. Varauksellinen ryhmä hylkii samanmerkkisiä ioneja, mutta sitoo vastaioneja. Vastaioni voi liikkua membraanin läpi siirtymällä varauksellisesta ryhmästä toiseen. Sähkökemiallisessa käsittelyssä liikkuminen saadaan aikaan ulkoisen sähkökentän avulla.

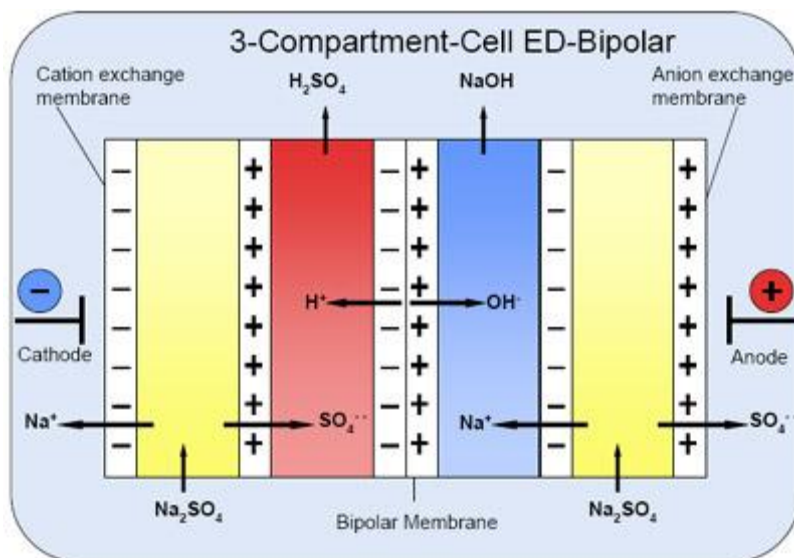
Membraaneja voidaan yhdistää lukuisilla eri tavoilla eri tarkoituksiin. Kun tarkoituksena on tuottaa happoa ja hydroksidia sulfaattisuoloista, kyseeseen tulevat käsittelytekniikat ovat ensisijaisesti suora elektrolyysi ja ns. bipoläärimembraani-elektrodialyysi. Suoran elektrolyysin periaate on esitetty kuvassa 5-3.



Kuva 5-3. Suora elektrolyysi (1).

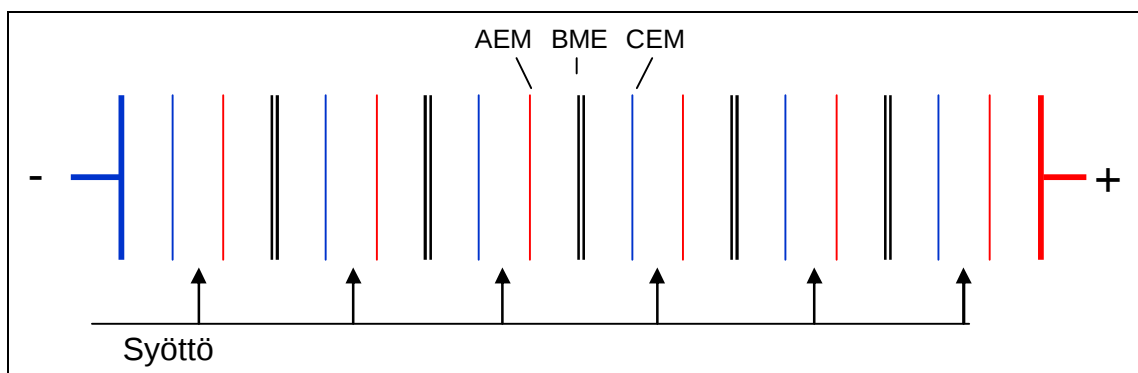
Hydroksidi- ja vetyioni muodostuvat katodissa ja anodissa hapetus-pelkistysreaktioiden avulla. Katodilla vesi hajoaa vetykaasuksi ja hydroksidiksi, anodilla hapeksi ja vetyioniksi. Suolan syöttö tapahtuu keskimmäiseen osastoon. Anodin puolella on anionivaihtomembraani ja katodin puolella kationivaihtomembraani. Kun anodilla syntyy positiivinen varaus, anionivaihtomembraanin läpi liikkuu sähköneutraalisuuden takia sisään sulfaatti-ioni, jolloin tuloksena on rikkihappo. Vastaavasti kun katodilla syntyy negatiivinen ioni, sisään liikkuu kationi, ja saadaan natriumhydroksidia. Suorassa elektrolyysissä solun jännite on 5,5 – 6 V.

Bipoläärimembraanielektrodialyysi on hieman kehittyneempi versio kalvotekniikasta. Periaate on esitetty kuvassa 5-4. Keskellä on yhdistetty kationi- ja anionimembraani. Membraanin sisällä veden luonnollisessa dissosiaatiossa syntyy vety- ja hydroksyyli-ioneja. Sähkökenttä vetää ne erilleen, ja bipoläärimembraani estää niiden uudelleen yhdistymisen. Tällä tavalla anodin suuntaan syntyy hydroksidiliuos ja katodin suuntaan happoliuos. Hydroksidiliuoksen toisella puolella on kationivaihtomembraani, joka erottaa sen syöttö- eli suolaliuoksesta. Hydroksyli-ionin muodostuessa membraanin läpi liikkuu sisään positiivinen vastaioni, niin että liuoksen sähköneutraalisuus säilyy. Happoliuosta erottaa vastaavasti anionivaihtomembraani, joka läpi liikkuu sisään anioni.



Kuva 5-4. Bipoläärimembraanielektrodialyysi (12).

Tekniikan etuja ovat että jännite on pienempi kuin suorassa elektrolyysissä, sillä hydroksyyli- ja vetyioni eivät synny hapetus-pelkistysreaktioiden kautta, vaan luonnollisesta dissosiaatiosta. Jännite on nykyaikaisilla kalvoilla 2,1 – 2,4 V (13). Tästä syystä sähkön kulutus on huomattavasti pienempi kuin suorassa elektrolyysissä. Lisäksi ei synny vety- ja happikaasua, jotka ovat räjähdysalttiita. Soluja voidaan liittää yhteen esim. 25 kpl nipuiksi, joissa on vain yksi anodi ja yksi katodi, kuva 5-5.



Kuva 5-5. Yhteenliitettyjä BME-soluja.

Yllä kuvatuista tekniikoista BME-tekniikka on selvästi edistyneempi, ja päähuomio on siksi tässä työssä kohdistettu siihen.

5.1 Membraanien rajallisuudet

Kun tuotepitoisuudet kasvavat suuriksi, membraanit eivät lopulta pysty enää pitättelemään ioneja konsentraatiogradienttia vastaan, ja ne alkavat vuotaa. Vetyioni on pieni ja vaikeasti hallittavissa, ja siksi vuoto-ongelma tulee vastaan aikaisemmin anionivaihtomembraaneilla kuin kationivaihtomembraaneilla. Tiedustelujen mukaan suurin saavutettava rikkihappokonsentraatio on 8 – 10 % (13). Kationivaihtomembraaneilla vuodot ovat pienempiä, ja voidaan saavuttaa suurempia pitoisuuksia. Niiden kohdalla suurempi ongelma on 2+ ja 3+ -arvoiset ionit, kuten Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} ja Fe^{2+} sekä muita. Kun nämä ionit liikkuvat membraanin läpi ja lähestyvät alkalisia puolia, ne saostuvat hydroksideina. Kiteet kasvavat membraanin sisällä, ja tukkivat tai jopa rikkovat sen (14). Tämä rajoittaa membraanien elinikää. Syöttöliuos

on siksi puhdistettava erittäin hyvin tällaisista ioneista. Tähän käytetään ionivaihtoa, suodatusta ym. menetelmiä.

5.2 Virtahyötysuhde ja syöttövirran happamoituminen

BME-solun virtahyötysuhde on noin 70 % (13). Syynä siihen, ettei se ole täydellinen, ovat membraanien vuodot. Suurin vuoto tapahtuu anionivaihtomembraanin läpi syöttöliuoksen suuntaan (13). Hapon ja alkalien muodostuminen ovat siksi hieman epätasapainossa, eli saadaan enemmän lipeätuotetta kuin happotuotetta. Suhde on ekvivalentteina ilmaistuna noin 2/3 lipeän eduksi (13).

Puuttuva happo löytyy syöttöosaston puolella. Vuodon seurauksena kiertävä suolaliuos siis happamoituu. Suolaliuos pidetään tavallisesti säiliössä, jonka kautta se kiertää BME-paketin läpi. Jos happo-osaston pitoisuus nousee tasolle 8 – 10 %, vuoto on luokkaa 40 – 45 %, ja happamoituminen on siten varsin merkittävä. Koska vetyioni on kationi, se alkaa siirtyä kationivaihtomembraanin läpi alkaliselle puolelle, ja tuhoaa siten muodostuneen lipeän. Tämän välttämiseksi syöttöliuoksen pH on pidettävä riittävän korkeana.

Hapon ja emäksen epätasapainon vuoksi syntyy hapan jäteliuos, ellei syöttöliuoksen pH:ta nosteta ja suolaa ei pystytä hyödyntämään kokonaisuudessaan. Tämän välttämiseksi voidaan kierrättää osa tuotetusta alkalista syöttöliuokseen. Tämä luonnollisesti verottaa tuotantoa, mutta mahdollistaa sen, että kaikki suola tulee hyödynnetyksi, eikä jätettä jää lainkaan.

Natriumsulfaatista tuotettu rikkihappo on liian laimeaa käytettäväksi sellaisenaan mäntyöljykeitossa (8 – 10 %). Se voidaan sekoittaa väkevämmän ostohapon kanssa haluttuun noin 30 %:iin, tai periaatteessa konsentroida haihduttamalla. Tämä ei kuitenkaan vaikuta järkevältä, sillä se voidaan yhtä hyvin käyttää sellaisenaan valkaisussa. Sellutehtaalle ei ole taloudellisesta näkökulmasta eroa säästetäänkö happoa mäntyöljykeitossa vai valkaisussa.

On myös mahdollista valmistaa NaHSO_4 rikkihapon sijaan. Silloin vetyionit ovat pääasiassa HSO_4^- -muodossa, eli anioneina, ja vain pieni osa on vapaassa H^+ -muodossa, eli kationeina. Silloin vuodot anionimembraanin läpi ovat pienemmät, ja sähköhyötysuhde on parempi. Sulfaatti puskuroi liuosta, ja pH pysyy korkeampana kuin jos tuotetaan rikkihappoa. Haittapuolena on se, ettei happoa tässä muodossa kannata käyttää valkaisussa, sillä silloin sen natriumsisältö menee suodoksien mukana ulos, ja menee hukkaan.

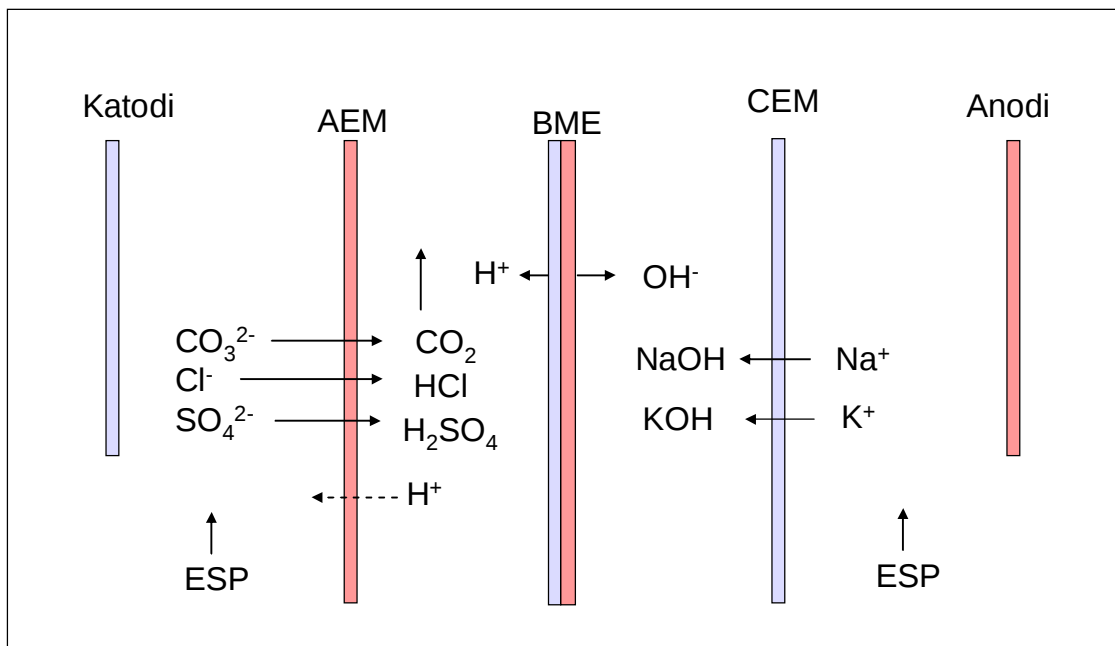
6 TEKNIikka SOVELLETTUNA LENTOTUHKALLE

Useimmat aikaisemmat tutkimukset on tehty joko klooridioksidilaitoksen happamalla suolalla tai malliaineena käytetyllä puhtaalla natriumsulfaatilla. Lentotuhka sisältää kuitenkin myös muita aineita. Nämä ovat ensisijaisesti kalium, kloori ja karbonaatti. Seuraavassa tarkastellaan näiden aineiden kohtaloa.

Kuvassa 6-1 on esitetty eri ionien kulkureittiä BME-prosessissa. Lentotuhkaliuoksessa oleva kalium liikkuu kationivaihtomembraanin läpi kuten natrium. Koska kaliumioni on hieman suurempi kuin natriumioni, se liikkuu hieman huonommin, ja voi tapahtua lievä rikastuminen syöttöpuolella (13). Pääasiallisesti se siirtyy kuitenkin tuotettuun alkaliin. Näin ollen saadaan NaOH :n lisäksi myös KOH .

BME-solun matalan jännitteen ansiosta kloridi ei hapetu alkuaineklooriksi, vaan pysyy kloridina. Se siirtyy muiden anionien tapaan anionimembraanin läpi, ja muodostaa tuotetun vetyionin kanssa suolahappoa.

Karbonaatti tuhoutuu kohdatessaan tuotettua happoa. Se poistuu CO_2 :na. On tärkeää että liuoksia pidetään liikkeessä, niin että muodostunut kaasu poistuu membraanien pinnoilta. Karbonaatti verottaa luonnollisesti hapon saantoa. Samalla siitä voi olla hyötyä, sillä se neutraloi ainakin osittain happopuolelta syöttöpuolelle vuotavaa happoa.



Kuva 6-1. Lentotuhkan eri ionien kohtalo BME-prosessissa.

Jos tuotettua lipeää käytetään valkaisuissa, saadaan tällä tavalla kaliumin poisto tehtaan lipeäkierrosta. Vastaavasti saadaan, jos tuotettua happoa käytetään valkaisuissa, myös kloorin poistoa. BME-tekniikkaa voidaan siten käyttää kaliumin ja kloorin poistomenetelmänä. Se voi siten korvata nykyisin käytössä olevaa lentotuhkan liuotusta.

KLOORIDIOKSIDILAITOKSEN HAPAN SUOLA LÄHTÖAINEENA

Hapan suola on helpompi lähtömateriaali sähkökemiallisessa käsittelyssä siksi, että se sisältää vähemmän epäpuhtauksia. Koska se on alusta alkaen hapanta, se vaatii myös vähemmän sähköä muodostaakseen rikkihappoa. Sen ympäristövaikutus on myös määrän takia suurempi. Jos sitä käytetään yksinään, se ei vaikuta talteenoton tasemuodostukseen, eikä lentotuhkan liuotusta voida lopettaa, sillä tätä tarvitaan edelleen kaliumin ja kloorin poistoon.

Yhdistämällä lentotuhka ja hapan suola voidaan vähentää suolapäästöjä kaikkein parhaiten. Kuten yllä todettiin, lentotuhkaa käsiteltäessä BME-tekniikkaa voi hyödyntää myös kaliumin ja kloorin poistossa. Yhdellä ja samalla tekniikalla saadaan siis sekä kalium ja kloori poistettua että rikkihappo hoidettua.

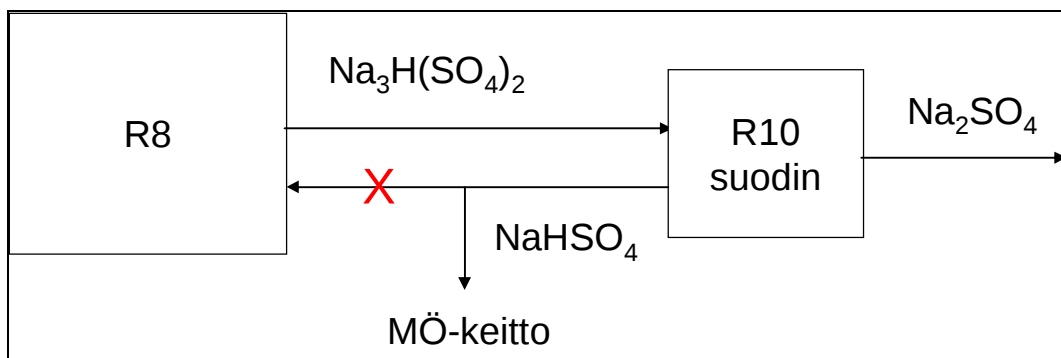
8 MAHDOLLISIA YHDISTETTÄVIÄ TEKNIIKOITA

BME-tekniikka voidaan myös yhdistää muiden tekniikoiden kanssa. Tällaisia ovat mm. R8-klooridioksidiprosessin päivittäminen R10 -prosessiksi, Green Liquor Simplified Stripping-prosessi (GLSS) sekä perinteiset kaliumin ja kloorinpoistotekniikat, eli lentotuhkan kiteytys ja uutto. Seuraavassa tarkastellaan miten nämä prosessit toimivat ja miten niitä voi hyödyntää.

8.1 R8 - R10 -päivitys

Yleisin klooridioksidiprosessi on R8, ja tämän työn laskelmat perustuvat sen jätesuolaan. Suola on natriumseskvisulfaattia, koostumukseltaan $\text{Na}_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$. Suola on tavallaan natriumsulfaatin ja rikkihapon seos. Happamuuden hyötykäyttöä varten R8-prosessi voidaan päivittää R10-prosessiksi, mikä tarkoittaa sitä, että siihen lisätään suodin. Suolaan lisätään pieni määrä vettä, joka liuottaa siitä vain osan. Kiinteäksi jää neutraali Na_2SO_4 ja liuokseen jää pääsiallisesti hapan NaHSO_4 . Happamuus saadaan siten konsentroitua liuokseen. NaHSO_4 -liuos palautetaan normaalissa R10-päivityksessä R8-prosessiin sen happamuuden uudelleenkäyttöä varten.

R10 -päivitystä on sanottu vähentävän R8-laitoksen kapasiteettia. Tässä ajateltu vaihtoehto on kuitenkin se, ettei NaHSO_4 -liuosta palauteta R8-prosessiin, vaan käytetään sen sijaan mäntyöljykeitossa. Tämä parantaa suolan hyödyntämistä mäntyöljyn valmistuksessa. Jos käytetään R8-suolaa sellaisenaan HDS-keittimessä, sitä voi käyttää vain vähän, sillä liiallinen sulfaatin tuominen aiheuttaa kiteytymistä ja puuroutumista laitteessa. NaHSO_4 -liuos sen sijaan sisältää vähemmän sulfaattia suhteessa happoon, minkä vuoksi sen happamuutta voi hyödyntää paremmin pienemmällä kiteytymisriskillä.



Kuva 8-1. R8-suolan käyttö mäntyöljykeitossa R10-päivityksen avulla.

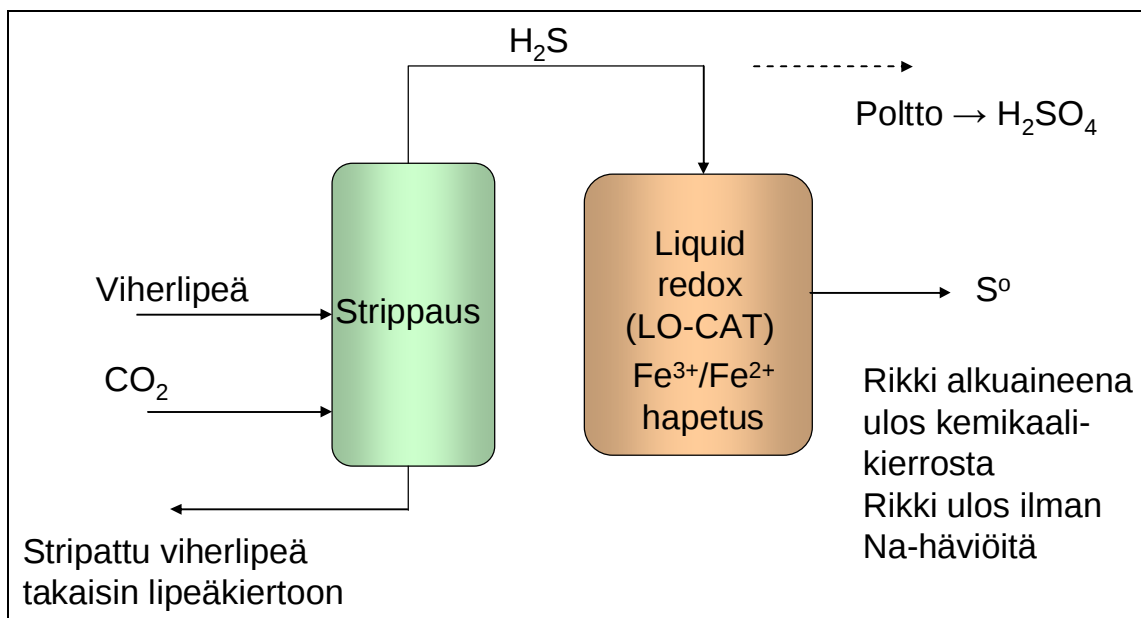
NaHSO_4 -liuoksen käyttö tuo kuitenkin enemmän rikkiä happoa kohden kuin rikkihappo, minkä vuoksi talteenoton rikkitase on hallittava jollakin muulla keinolla. Lentotuhkan liuotuksen lisääminen ei ole ympäristötavoitteiden mukaista, ja siitä syystä on otettava käyttöön jokin muu vaihtoehto. Ehdokkaina ovat mm. BME-käsittely ja alla kuvattu GLSS.

8.2 GLSS -rikinhallintaprosessi

Green Liquor Simplified Stripping -prosessi sai alkunsa KCL-projektissa ”Management of sulphur balance”. Metson ja Oy Sirra Ab:n yhteistyönä prosessia kehitettiin edelleen, ja vietiin pilot-asteelle (15). Prosessissa stripataan rikkivetyä viherlipeästä hiilidioksidilla, ensisijaisesti savukaasuilla. Hiilidioksidilla lipeän pH

lasketaan tasolle 9 – 9,5, jolloin hydroksidi muuttuu karbonaatiksi, ja karbonaatti osittain bikarbonaatiksi. Bikarbonaatti muodostaa sulfidin kanssa rikkivetyä, joka erottuu kaasumuodossa ja viedään jatkokäsittelyyn. Prosessi on kemiallisesti hyvin samankaltainen kuin vanhempi SCP-prosessi, mutta teknisesti yksinkertaisempi.

Rikkivety voidaan joko polttaa tai viedä liquid redox-prosessiin. Poltosta saadaan rikkidioksidia, josta voidaan tehdä rikkihappoa tai bisulfiittia. Rikkihapon valmistus vaatii kuitenkin melko kalliita laitteita, minkä vuoksi liquid redox-prosessi useimmissa tapauksissa lienee parempi vaihtoehto. Liquid redox-prosessissa rikkivety käsitellään liuoksella, joka sisältää kolme arvoista rautaa. Rauta hapettaa liuenneen sulfidin alkuainerikiksi, muuttuen itse kaksiarvoiseksi. Se pidetään liukoisena kompleksinmuodostajan avulla, sillä se muuten saostuisi sulfidina. Rauta regeneroidaan eli hapetetaan takaisin kolme arvoiseksi ilmahapella. Ilmaa puhalletaan liuoksen läpi erillisessä astiassa. Rauta siten toimii katalysaattorina, eikä kulu itse. Muodostunut alkuainerikki erotetaan suodattamalla. Prosessikokonaisuus on esitetty kuvassa 8-2.



Kuva 8-2. GLSS-prosessi liquid redox:lla.

GLSS-prosessin merkittävin etu on se, että rikki saadaan ulos sellutehtaan talteenottokierrosta ilman samanaikaisia natriumhäviöitä. Sen lisäksi että rikkitase voidaan hallita, tämä parantaa klooridioksidilaitoksen jätesuolan hyödyntämismahdollisuuksia. Jätesuola voidaan ottaa sisään talteenottokiertoa ja sen natrium ottaa talteen ilman että rikistä muodostuu ongelma. GLSS-prosessista ulos tuleva stripattu sulfidivapaa viherlipeä ei ole mitenkään menetetty, vaan se viedään takaisin lipeäkiertoon.

Kuvassa 8-3 on pilot-laitos koeajossa. Kuvassa 8-4 on prosessissa muodostunutta rikkiä. Alkuainerikki syntyy varsin helposti ilman tarkempia säätöjä, ja prosessi sietää kaasun pitoisuusvaihteluja erittäin hyvin.



Kuva 8-3. GLSS -pilot-laitos koeajossa.



Kuva 8-4. Prosessissa muodostunutta alkuainerikkiä.

8.3 Kaupalliset kaliumin ja kloorin hallintaprosessit

Kaupallisesti saatavat kaliumin- ja kloorinpoistoprosessit ovat kiteytys (CRP, ARC), uutto (AshLeach, Leaching), jäähdytyskiteytys (MPR) ja ionivaihto. Kaikilla näillä prosesseilla on yhteistä se, että sen lisäksi että ne ottavat talteen natriumin, ne myös palauttavat rikin talteenottokiertoon. Pohjoisissa tehtaissa, joissa on mäntyöljyn keitto, niiden käyttöönottoa vaikeuttaa rikkiä. Jos niihin yhdistetään esim. GLSS-prosessi rikkiä hallitsemiseksi, niitä voidaan kuitenkin käyttää. Kiteytys ja uutto on siksi otettu mukaan tarkasteltuihin yhdistelmävaihtoehtoihin.

9 TASELASKELMAT

BME-prosessin vaikutuksia sellutehtaan suolapäästöihin ja lipeäkiertoon laskettiin kokonaisvaltaisesti sellutehtaan taseen kautta. Laskettiin myös yhdistelmiä muiden prosessien kanssa. Tarkasteltiin vaikutuksia natriumin, kaliumin, rikin ja kloorin taseisiin. Näitä aineita on tarkasteltava yhdessä, sillä jos jokin toimenpide kohdistuu vain yhteen niistä, voi syntyä ongelmia toisen kanssa. Arvioitiin myös eri vaihtoehtojen taloudellisuutta. Laskentatyökaluna käytettiin aikaisemmissa hankkeissa kehitettyä ohjelmaa, johon lisättiin membraaniprosessi.

Vertailukohtana oli pohjoismainen keskiarvotehdas. Ensisijaisena sähkökemiallisena käsittelytekniikkana oli bipoläärimembraanielektrodialyysi. Tähän yhdistettiin R10-suotimen lisääminen R8- prosessiin, rikinpoistoon kehitetty GLSS-prosessi ja kaupalliset lentotuhkan kiteytys- ja uuttomenetelmät. Taselaskelmat on esitetty liitteissä (liitetaulukot a). Taulukkojen vasemmalla puolella on keskiarvotehdas, ja oikealla puolella on uusi tilanne, kun uusi prosessi tai -yhdistelmä on otettu käyttöön. Liitteissä 10a - c on yhteenvetotaulukko kaikista lasketuista vaihtoehtoista.

Liitetaulukoissa b on esitetty ympäristövaikutukset. Huomioitiin suodintuhtan ja jätesuolan liuotus, mahdolliset muutokset valkaisu- läpi poistuvissa suoloissa sekä joissakin tapauksissa syntyvä uusi jätevirta. Suolapäästöjen muutos on ilmoitettu kiloina per sellutonni ja prosentteina lentotuhkan ja jätesuolan yhteenlasketusta määrästä referenssitehtaassa. Normaaleja valkaisusta tulevia suolapäästöjä ei otettu huomioon, eli aivan kaikki sellutehtaan suolat eivät ole mukana, ainoastaan ne jotka tasapainottamissyistä liuotetaan suoraan jäteveeten.

Taulukoissa b on myös kaliumin ja kloorin pitoisuustason muutos talteenottokierrossa. Pääsääntöisesti pyrittiin pitämään nämä aineet suunnilleen entisellä tasolla, eli ei varsinaisesti pyritty alentamaan niitä, vaikka se tietenkin myös on mahdollista.

BME-prosessilla taselaskelmat on tehty siten, että osa tuotetusta lipeästä kierrätetään takaisin suolansyöttöosastoon pH-säätöä varten, niin että voidaan välttää happaman jätevirran syntyminen.

Vaihtoehtojen taloudellisuutta arvioitaessa huomioitiin taseen kautta syntyviä kemikaalisäästöjä ja -kulutuksia, BME-prosessin sähkönkulutus, membraanikustannus arvioituna yhden vuoden elinajan mukaan, sekä yleisiä laitteiden käyttökuluja noin 15 % investointihinnasta. Investointia ei tämän työn puitteissa ollut mahdollista arvioida muuta kuin hyvin ylimalkaisesti, mutta toisaalta epätarkkuudet käyttökuluissa eivät vaikuta kovinkaan ratkaisevasti kokonaiskuvaan.

Liitteiden b alaosassa on taseen perusteella lasketut kemikaalisäästöt ja kulutukset. Lipeäsäästöjä laskettaessa tuotettu kaliumhydroksidi on laskettu natriumhydroksidiksi. Membraanilipeä ja -happo on ajateltu käytettäväksi pääasiallisesti valkaisussa kaliumin- ja kloorin poiston takia. Otettiin myös huomioon säästöjä happaman jäteveden neutraloinnissa. Säästöt syntyvät siitä, että lähtötilanteessa liuotetaan hapanta suolaa, joka vaatii neutralointia ennen ulosmenoa, ja jos tätä suolaa käytetään hyödyksi lipeäkierrossa, tämä kustannus jää pois.

9.1 Kustannukset

Taloudellisessa arvioinnissa käytettiin taulukossa 9-1 esitettyjä kemikaalikustannuksia. Lipeä- ja rikkihappohintaan sisältyy rahti, joka arvioitiin olevan keskimäärin Suomessa 50 €/t.

Taulukko 9-1. Kemikaalien hinnat.

	Yksikkö	Hinta
NaOH	€/t	390
H ₂ SO ₄	€/t	115
CaO	€/t	130
Na ₂ SO ₄	€/t	90
GLSS-kemikaalit (16)	€/rikkitonni	120

Sähkön hintana käytettiin Nord Poolin spot-hintaa tammi-elokuun keskiarvona 2013.

Membraaneille käytetyt hinnat perustuvat tiedusteluun FuMA-Tech GmbH:lta Saksassa (13). Hintoihin vaikuttavat merkittävästi toimituksen määrä. Olettamuksena on suuri toimitus, jossa neliömetrihintaa on merkittävästi edullisempi kuin pienemmässä toimituksessa. Huomioitavaa on, että membraanin hinta vaikuttaa erityisen paljon prosessin taloudellisuuteen. Lopullinen hinta muodostuu luonnollisesti vasta neuvotteluissa, ja siksi tähän sisältyy merkittävä epätarkkuuden mahdollisuus. Hinnat on koottu taulukkoon 9-2.

Taulukko 9-2. Sähkön ja membraanien hinnat. CEM = kationivaihtomembraani, AEM = anionivaihtomembraani, BME = bipoläärimembraani

	Yksikkö	Hinta
Sähkö	€/MWh	41,60
CEM	€/m ²	130
AEM	€/m ²	130
BME	€/m ²	310

9.2 Keskiarvotehdas

Laskelmien lähtökohtana käytettiin keskiarvotehdasta, joka oli koottu pohjoismaisten tehtaiden tasetiedoista. Tietoja oli noin 13 tehtaasta. Tässä työssä uusia tasetutkimuksia ei tehty, vaan tiedot perustuvat julkaisuihin ja aikaisempiin töihin.

Yksittäinen tehdas voi luonnollisesti poiketa melko paljon keskiarvotehtaasta. Esimerkiksi natriumhydroksidi otetaan sisään hyvin vaihtelevalla tavalla. Jos esim. tehtaalla on hajukaasukattila, sisäänotto tapahtuu suurelta osin sen pesurin kautta. Monet tehtaot ottavat myös sisään osa happamasta suolasta suoraan talteenottoon. Tutkituista tehtaista enemmistö ei tehnyt sitä, minkä vuoksi se ei ole mukana keskiarvotehtaassa. Tällaiset erot eivät kuitenkaan muuta kokonaiskuvaa taseesta kovin paljon, sillä sisään otettavat kokonaisnatriumhydroksidimäärät ovat kuitenkin melko samankaltaisia.

Lentotuhkan koostumuksena käytettiin Soodakattilayhdistykselle aikaisemmin suomalaisista tehtaista koottua keskiarvoa (17). Koska uusien soodakattiloiden myötä karbonaattipitoisuus on kohonnut, tehtiin koostumuskorjaus tämän osalta. Lentotuhkan liuotusmäärä oli keskiarvotehtaassa 8,4 kg/ADt ja happaman suolan määrä 26 kg/ADt.

9.3 Eri prosessitapauksia

Osaprosesseja, tekniikoita ja lähtöaineita voidaan yhdistää hyvin monella tavalla. Alla on kuvattu vaihtoehtoja, jotka tuntuvat ensisijaisilta ja luontevilta. Ne antavat myös melko laajan kuvan suolaliuotusproblematiikasta ja eri suuntauksista sen ratkaisemiseksi. Yksittäisiä osaprosesseja voidaan monissa tapauksissa vaihtaa täysin muihin tekniikoihin ilman että kokonaiskuva muuttuu kovin paljon. Esimerkiksi kalium- ja klooriprosessi, tässä uutto ja kiteytys, voidaan vaihtaa jäähdytys-kiteytykseen tai ionivaihtoon lähes samalla lopputuloksella.

9.3.1 Tapaus 1. BME-prosessi sovellettuna pelkästään lentotuhkalle

Ensimmäisessä vaihtoehdossa nykyinen lentotuhkan liuotus korvataan BME-prosessilla. Tase on esitetty liitteessä 1a.

Koska lentotuhkan liuotus yksinkertaisesti vaihdetaan BME-prosessiin, ja tuotteita ei käytetä talteenottokierrossa, tämän tase ei muutu lainkaan. Ympäristön osalta tilanne paranee, sillä kuten tietenkin on tarkoitus, suolat eivät mene suoraan vesistöön, vaan hyötykemikaaleina valkaisuun kautta ulos. Kun suolat on muutettu hyötykemikaaleiksi, ne korvaavat valkaisuun ostohappoa ja -lipeää, ja vähentävät siten tehtaan kokonaispäästöjä. Vaikutukset keskiarvotehtaaseen ovat seuraavat, taulukko 9-3:

Taulukko 9-3. Tapaus 1: vaikutukset keskiarvotehtaaseen

		Na	S
Ympäristöpäästöt	Kg/ADt	-2,675	-1,646
	%	-28	-21
Lipeäkierto	Kaliumtason muutos	0 %	
	Klooritason muutos	0 %	
Taloudellisuus	k€	Kemikaalisäästöt	1920
		BME sähkönkäyttö	-456
		Membraanikuluja	-936

Käyttökuluja (15 %)	<u>-375</u>
Tuotto	153

Lentotuhkan liuotus voidaan tällä ratkaisulla lopettaa, mutta kun huomioidaan myös hapan suola, kokonaisrikkipäästöt vähenevät vain runsaat 20 %, ks. liite 1b. Tämä vaikuttaa pitkällä aikavälillä riittämättömältä, happaman suolan ollessa paljon suurempi päästölähde.

Vaikka kemikaalisäästöjä syntyy lähes 2 M€, prosessin tuotto ei ole kovin suuri, sillä suurin osa säästöistä kuluu sähköön ja membraaneihin. Ylivoimaisesti suurin kulu on membraanit. Tämä on myös eniten riskialtis tekijä, sillä jos membraanit eivät kestä kokonaista vuotta, niin kuin on ollut laskelman peruste, kulut muuttuvat olennaisesti. Toinen syy kehnonpuoleiseen tuottoon on se, että lentotuhka sisältää karbonaattia, joka kuluttaa osan tuotetusta haposta. Tavallaan käytetään sähköä karbonaatin hajottamiseen. Perusteet prosessin käyttöönottoon ovat kuitenkin muut kuin tuotot, eli vastaaminen todennäköisiin tuleviin ympäristönsuojeluvaatimuksiin.

Prosessia voidaan myös käyttää kaliumin ja kloorin hallintaan, ja lentotuhkan määrää voidaan lisätä. Tämä ei kuitenkaan laskelmien mukaan paranna taloudellisuutta juurikaan, mutta alentaa tietenkin kalium- ja klooritasoja lipeäkierrrossa.

9.3.2 Tapaus 2. BME-prosessi sovellettuna pelkästään happamalle suolalle

BME-prosessin soveltaminen pelkästään happamalle suolalle on eniten aikaisemmin tutkittu vaihtoehto (18, 19). Sen vaikuttavuus ympäristöön on suurempi kuin lentotuhkan. Tosin lentotuhkassa on myös raskasmetalleja, joita ei tässä työssä ole huomioitu.

Tämän vaihtoehdon huonona puolena on se, että lentotuhkan liuotus on jatkettava kuten aikaisemminkin. Tase ja vaikutukset on esitetty liitteessä 2a ja 2b. Vaikutukset ovat seuraavat, taulukko 9-4:

Taulukko 9-4. Tapaus 2: vaikutukset keskiarvotehtaaseen

		Na	S
Ympäristöpäästöt	kg/ADt	-6,841	-6,361
	%	-72	-79
Lipeäkierto	Kaliumtason muutos	0 %	
	Klooritason muutos	0 %	
Taloudellisuus	k€	Kemikaalisäästöt	5421
		BME sähkönkäyttö	-1074
		Membraanikuluja	-2208
		Käyttökuluja (15 %)	<u>-600</u>
		Tuotto	1549

BME-prosessilla olisi tällä ratkaisulla mahdollista vähentää sulfaattipäästöjä lähes 80 %. Kuten edellisessä tapauksessa lipeäkierron tase ei muutu. Tuotto on parempi kuin pelkällä lentotuhkalla, johtuen mm. siitä, ettei suola sisällä karbonaattia, ja siitä, että se on jo alusta alkaen hapanta. Siksi sähkönkulutus on pienempi.

Voidaan tuottaa huomattava määrä lipeää ja happoa. Happomäärä on niin suuri, ettei sitä todennäköisesti tarvita valkaisuissa, vaan sitä olisi käytettävä jossakin muualla, mahdollisesti esim. klooridioksidilaitoksella. Tässä tapauksessa ei ole varsinaista estettä käyttää happoa mäntyöljykeitossa, sillä kloori poistetaan lipeäkierrosta kuten aikaisemminkin liuottamalla lentotuhkaa. Klooripitoisuus lipeäkierrossa nousee hieman, referenssitehtaassa 12 %, ks. liite 2c. Membraanihappo on kuitenkin liian laimeata, ja on joko sekoitettava ostohapon kanssa tai konsentroitava. Hapolla on joka tapauksessa arvoa, eikä taloudellisesti ole eroa missä sitä käytetään. Taloudellisuus pysyy muuten samana kuin yllä olevassa tapauksessa, mutta konsentrintilaitos on uusi investointi, ja se aiheuttaa jonkin verran lisää käyttökuluja.

Kun klooridioksidilaitoksen jätesuolaa käytetään lähtöaineena, säästetään myös happaman jäteveden neutralointikuluja.

9.3.3 Tapaus 3. Suolojen yhdistäminen

Lentotuhkaa ja hapanta suolaa olisi ilmeisen järkevää käsitellä yhdessä. Silloin saadaan sekä kaliumin ja kloorin poisto että happaman suolan täydellinen hyödyntäminen. Suolapäästöt voidaan näiden suolojen osalta lopettaa kokonaan. Jos happo- ja lipeätuotteita ei käytetä talteenotossa, tämän tase ei muutu lainkaan. Rikkitase, kaliumin ja kloorin poisto, natriumin talteenottaminen ja suolaliuotuksen lopettaminen hoidetaan yhdellä ja samalla prosessilla, taulukko 9-5. Taselaskelma on liitteessä 3a.

Taulukko 9-5. Tapaus 3: vaikutukset keskiarvotehtaaseen

		Na	S
Ympäristöpäästöt	kg/ADt	-9,517	-8,007
	%	-100	-100
Lipeäkierto	Kaliumtason muutos	0 %	
	Klooritason muutos	0 %	
Taloudellisuus	k€	Kemikaalisäästöt	7351
		BME sähkönkäyttö	-1530
		Membraanikuluja	-3154
		Käyttökuluja (15 %)	<u>-675</u>
		Tuotto	2001

Happoa ja lipeää syntyy tässä vaihtoehdossa niin paljon, että valkaisuissa tuskin on käyttöä koko määrälle. Hapon määrä olisi 24,5 kg/ADt ja lipeän määrä (NaOH + KOH) 25,6 kg/ADt. Happoa voitaisiin mahdollisesti hyödyntää klooridioksidilaitoksella.

Tämä vaihtoehto toisi kaikkein suurimmat kemikaalisäästöt, jopa yli 7 M€ keskiarvotehtaassa, ks liite 3b. Tämä johtuu pääasiallisesti siitä, että syntyy lipeän lisäksi hyvin huomattava määrä rikkihappoa. Samalla myös käyttökustannukset ovat suuret. Suurin epävarmuus taloudellisesta näkökulmasta on membraanikustannus, joka on suurin yksittäinen tekijä. Jos membraanit eivät kestäkään kokonaista vuotta, vaan hajoavat etuajassa, tuotto käy nopeasti negatiiviseksi. Toisaalta on myös mahdollista että se kestää kauemmin kuin vuoden. Kaikki riippuu siitä, miten hyvin 2+ ja 3+-arvoisia kationeja pystytään poistamaan syöttöliuoksesta. Tätä asiaa on lähes mahdotonta arvioida ilman pitkäaikaista kokeilua. Taloudellisuuteen vaikuttaa myös se, riittääkö että vaihdetaan vain kationimembraanit, vai onko kaikki membraanit vaihdettava. Yleisenä arviona voitaneen pitää sitä, ettei ole järkevää mennä suoraan näin suureen laitokseen, vaan että olisi hankittava lisää kokeellista kokemusta esim. muutaman vuoden kestoisella kokeella pienemmällä laitoksella. Prosessi voi pitkän päällä olla tuottava, mutta on selvää että sen takaisinmaksuaika joka tapauksessa ulottuu useampaan vuoteen.

9.3.4 Tapaus 4. Lentotuhka BME-prosessiin, rikkitase GLSS:llä

Yhtenä mahdollisuutena voidaan nähdä sitä, että BME-tekniikalla käistellään pelkästään lentotuhkaa kaliumin ja kloorin poistamiseksi, otetaan R8-suola sellaisenaan sisään lipeäkiertoon, ja hallitaan rikkitase GLSS:llä. Laskelmat on esitetty liitteessä 4a ja b. Tällä ratkaisulla olisi parempi taloudellisuus ja pienemmät membraaniriskit kuin edellisellä vaihtoehdolla. Myös tällä ratkaisulla päästään nollapäästöihin kyseisten suolojen osalta, taulukko 9-6.

Taulukko 9-6. Tapaus 4: vaikutukset keskiarvotehtaaseen

		Na	S
Ympäristöpäästöt	kg/ADt	-9,517	-8,007
	%	-100	-100
Lipeäkierto	Kaliumtason muutos	0 %	
	Klooritason muutos	0 %	
Taloudellisuus	k€	Kemikaalisäästöt	5100
		BME sähkönkäyttö	-458
		Membraanikuluja	-940
		Käyttökuluja (15 %)	<u>-990</u>
		Tuotto	2712

Lipeäkierrossa syntyisi pieni klooritason nousu. Muutos ei kuitenkaan ole kovin hälyttävä, sillä kun pitoisuus on lentotuhkassa lähtötilanteessa 6,6 g/kg, se olisi nyt 8,7 g/kg. Kohoaminen johtuu happaman suolan kloorisisällöstä.

Taloudellisesta näkökulmasta tämä vaihtoehto on aikaisempia tuottavampi, ja riskit ovat pienemmät kuin vaihtoehdossa 3. Yksi syy parempaan tuottoon on se, että suurin osa lipeästä tehdään tässä tapauksessa kaustisoinnissa eikä sähköllä. Kaustisointi on selvästi halvempi tapa tuottaa lipeä kuin membraanitekniikka. Kuitenkin saadaan

lentotuhkan elektrodialyysikäsitteilyllä kalium ja kloori ulos lipeäkierrasta, ja saadaan samalla karbonaattivapaata lipeää valkaisimoon, jolla voidaan välttää mahdollisia kerrostumia alkalisissa vaiheissa. GLSS-prosessi käsittelee melko suuren osan viherlipeävirrasta, suuruusluokkaa 8 %, mutta tätä täytyy punnita suolojen täydellistä hyötykäyttöä vastaan. Stripattu lipeä palautetaan lipeäkiertoon.

Karkean arvion mukaan tällaisen prosessin takaisinmaksuaika liikkuisi noin 2,4 vuoden paikkeilla.

9.3.5 Tapaus 5. Lentotuhka BME-prosessiin, GLSS, R10-suodin

Lisäämällä R8-klooridioksidilaitokseen R10-suodin voidaan hyödyntää suolan happamuutta paremmin. Silloin voidaan korvata osa mäntyöljykeiton rikkihaposta natriumvetysulfaattiliuoksella. Noin 2/3 rikkihaposta voidaan referenssitehtaassa korvata, taulukko 9-7. Laskelmat ovat liitteissä 5a ja b.

Taulukko 9-7. Tapaus 5: vaikutukset keskiarvotehtaaseen

		Na	S
Ympäristöpäästöt	kg/ADt	-9,517	-8,007
	%	-100	-100
Lipeäkierto	Kaliumtason muutos	0 %	
	Klooritason muutos	32 %	
Taloudellisuus	k€	Kemikaalisäästöt	5664
		BME sähkönkäyttö	-458
		Membraanikuluja	-940
		Käyttökuluja (15 %)	<u>-1080</u>
		Tuotto	3186

BME-prosessi mahdollistaa suolojen täydellisen hyötykäytön ja päästöjen nollaamisen. Kuten muissa tapauksissa missä otetaan lipeäkiertoon jätesuolaa, klooritaso nousee lipeäkierrassa hieman, muttei hälyttävästi. Yhtenä etuna tässä ratkaisussa verrattuna edelliseen on se, että GLSS-prosessiin vietävä viherlipeävirta on pienempi.

Lisätty R10-suodin hieman nostaa investointia, ja käyttökulut (15 %) kasvavat siksi hieman. Nettotuotto on kuitenkin suurempi kuin edellisillä vaihtoehdoilla. Karkean arvion mukaan takaisinmaksuaika olisi luokkaa 2,3 vuotta. Yllä olevista kaikista vaihtoehdoista tämä olisi taloudellisin, tuottaen takaisinmaksun jälkeen pysyvästi yli 3 M€ vuodessa.

Tätä ratkaisua olisi mahdollista ottaa käyttöön askeleittain tietyillä rajoituksilla. R10-suodosta ei voida viedä mäntyöljykeittoon ilman samanaikaista rikin hallintaa. GLSS-prosessi olisi siksi hankittava ensin. GLSS-prosessi avaa mahdollisuuden hyödyntää jätesuolaa jo ilman muita osaprosesseja. Lisäämällä tämän jälkeen R10-suodinta saadaan suolan happamuus hyödynnetyksi, mutta ilman kalium- ja klooriprosessia ei vielä voida lopettaa lentotuhkan liuotusta. Tässä vaiheessa olisi siksi lisättävä joko

BME-prosessi, tai jokin perinteisistä kalium- ja klooriprosessia, kuten seuraavissa vaihtoehtoissa kuvataan tarkemmin.

9.3.6 Tapaus 6. Lentotuhka uuttoprosessiin, GLSS, R10-suodin

Tarkasteltiin tapausta, jossa ei ole BME-prosessia, vaan kaliumin ja kloorin poisto tehdään uuttomenetelmällä. Tällä ratkaisulla voidaan välttää membraanien tuomia riskejä kokonaan. Toisaalta ei saada karbonaattivapaata lipeää valkaisua varten, kuten BME-prosessilla. Uuttomenetelmä vaatii että karbonaattipitoisuus lentotuhkaliuoksessa on alhainen, sillä muuten nesteen erottaminen kiintoaineesta on vaikeaa. Karbonaatti poistetaan lisäämällä rikkihappoa. Tämä tuo jonkin verran lisää rikkiä lipeäkiertoon. Kun käytössä on GLSS, tämä ei ole ongelma, se ainoastaan kasvattaa jonkin verran ulos otettavan rikin määrää, taulukko 9-8. Tase on esitetty liitteessä 6a.

Taulukko 9-8. Tapaus 6: vaikutukset keskiarvotehtaaseen

		Na	S
Ympäristöpäästöt	kg/ADt	-9,517	-8,007
	%	-87	-91
Lipeäkierto	Kaliumtason muutos	-6 %	
	Klooritason muutos	6 %	
Taloudellisuus	k€	Kemikaalisäästöt	4236
		BME sähkönkäyttö	0
		Membraanikuluja	0
		Käyttökuluja (15 %)	<u>-885</u>
		Tuotto	3351

Suolapäästöt vesistöön eivät täysin nollaudu, sillä uuttoprosessista menee ulos poistovirta. Saavutetaan kuitenkin noin 90 % rikkipäästöjen väheneminen, mikä on varsin tyydyttävä tulos. Tase laskettiin sillä tarkoituksella että kalium- ja klooritaso lipeäkiertossa eivät muuttuisi kovin paljon, mutta toki on mahdollista käsitellä suurempi lentotuhkamäärä, ja alentaa siten tasot. Silloin poistovirta kasvaa, eikä päästä aivan samaan suolapäästöjen vähenemiseen.

Tasetta tarkasteltaessa nähdään että tuleva rikkimäärä hieman kasvaa. Kun nyt otetaan sisään lipeäkiertoon kaikki hapan suola, ja samalla uuttoprosessi ottaa talteen natriumin, tämä muuttuu ylijäämäiseksi. Toisin sanoen, vaikka natriumhydroksidia ei tuoda lainkaan lipeäkiertoon, natriumia on liikaa, ja se on vähennettävä jollakin tavalla. Voidaan käyttää pientä määrää hapetettua valkolipeää valkaisussa, vähentää Na₂SO₄:n sisäänottoa tai lisätä uuttoprosessiin menevä lentotuhkamäärää.

Tämä ratkaisu olisi varsin taloudellinen ja melko riskitön, ks. liite b. Takaisinmaksu-aika olisi laskelmien mukaan kaikkein lyhyin, 1,8 vuotta. Suorituskyvyltään se ei ole aivan yhtä hyvä kuin tapaus 5, sillä suoloja menee edelleen vesistöön. Voidaan tietenkin pohtia, kannattaisiko uuttoprosessin poistovirta ottaa talteen ja jalostaa, sillä siihen on konsentroitua kaliumia. Kaliumsulfatti on arvokkaampi kuin

natriumsulfaatti, ja olisi erityisesti lannoiteteollisuudelle tai lasiteollisuudelle käyttökelpoinen.

9.3.7 Tapaus 7. Lentotuhka kiteytysprosessiin, GLSS, R10-suodin

Lentotuhkan kiteyttäminen kaliumin ja kloorin poistoprosessina johtaa hyvin samankaltaiseen tilanteeseen kuin uutto. Kiteytyksellä on edelliseen tapauksen verrattuna se etu, ettei se välttämättä vaadi rikkihapon lisäämistä, joskin sitä kyllä joskus tehdään. Jos rikkihappoa ei lisätä, se vähentää jonkin verran GLSS-prosessin kautta ulos otettavaa rikkiylijäämää edelliseen tapaukseen verrattuna, taulukko 9-9. Tase on liitteessä 7a.

Taulukko 9-9. Tapaus 7: vaikutukset keskiarvotehtaaseen

		Na	S
Ympäristöpäästöt	kg/ADt	-9,517	-8,007
	%	-88	-91
Lipeäkierto		Kaliumtason muutos	-88 %
		Klooritason muutos	-91 %
Taloudellisuus	k€	Kemikaalisäästöt	4287
		BME sähkönkäyttö	0
		Membraanikuluja	0
		Käyttökuluja (15 %)	<u>-1005</u>
		Tuotto	3282

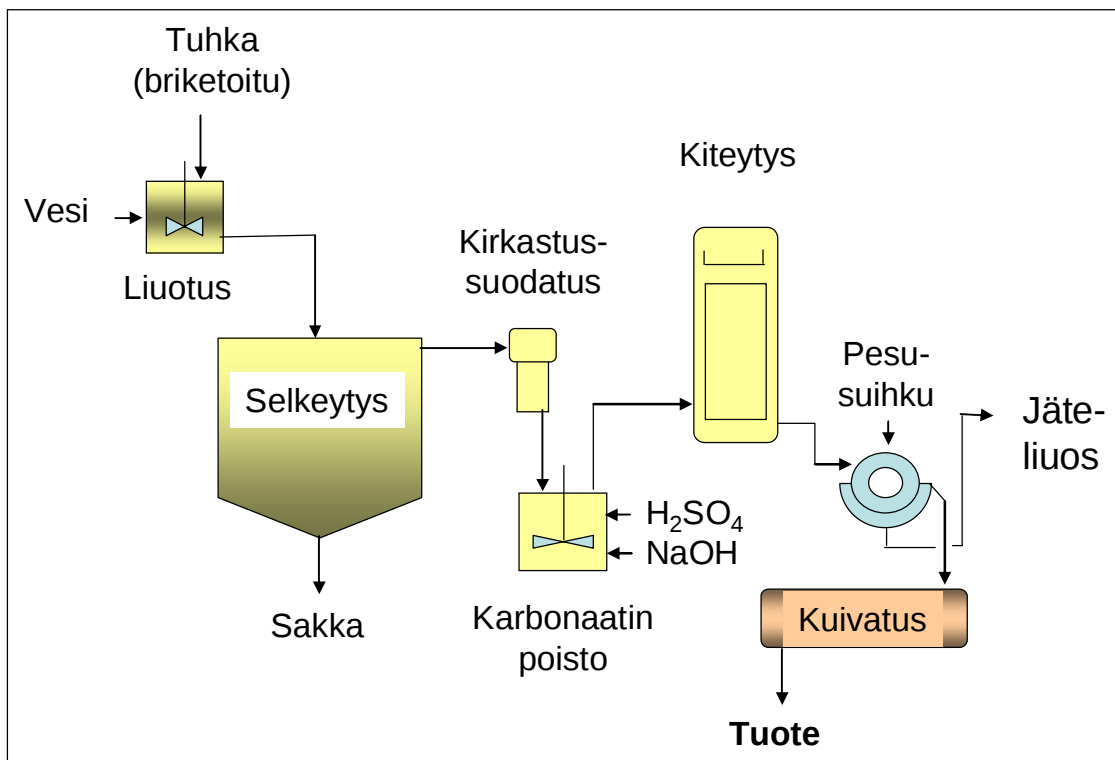
Kiteytys säästää kemikaaleja hieman paremmin kuin uutto, mutta laitteisto on hieman kalliimpi, ja jos lasketaan että käyttökulut ovat 15 % investoinnista, kulut ovat hieman suuremmat. Erot ovat kuitenkin niin pienet, ettei niiden perusteella voi sanoa että jompikumpi olisi edullisempi. Laskelmissa saatu takaisinmaksuaika oli noin 2,0 vuotta.

Kuten uutossa, happaman suolan sisäänotto kokonaisuudessaan aiheuttaa jopa natriumylimäärän. Natrium voidaan tasapainottaa useilla vaihtoehtoisilla keinoilla, kuten pienen hapetetun valkolipeämäärän käyttö valkaisussa, suuremman tuhkamäärän vieminen kaliumin- ja kloorinpoistoprosessiin tai jättämällä pieni osa neutraalista Na₂SO₄-määrästä ottamatta sisään lipeäkiertoon. Tehdaskohtainen tase voi myös poiketa keskiarvotehtaasta niin paljon, ettei ylijäämää edes synny.

9.3.8 Tapaus 8. Natriumsulfaatin myynti

Aikaisemmissa Soodakattilayhdistyksen hankkeissa tutkittiin mahdollisuuksia puhdistaa lentotuhka niin, että se kelpaisi raaka-aineeksi muuhun teollisuuteen. Puhdistus toteutettaisiin perinteisellä kaliumin- ja kloorinpoistoprosessilla, tässä tapauksessa kiteytyksellä, varustettuna erinäisillä lisävaiheilla. Ehdotettu prosessi on esitetty kuvassa 11.

Suurin puhdistusvaikutus saadaan selkeytysvaiheella (3). Selkeytys poistaa erityisesti niukkaliukoisia oksideja, karbonaatteja, silikaatteja, nokea ym. Karbonaatti on poistettava lisäämällä rikkihappoa tai klooridioksidilaitoksen hapanta suolaa. Kiteytys voidaan tehdä yhdessä tai, paremman puhdistuksen aikaansaamiseksi, kahdessa vaiheessa. Toinen vaihe voidaan tehdä jaksoittain samalla laitteistolla. Joissakin merkittävässä käyttökohteissa, kuten lasisulatuksessa tai lannoitteissa, kalium ei ole haitaksi, eikä sitä tarvitse poistaa.



Kuva 9-1. Ehdotettu prosessi myytävän natriumsulfaatin tuottamiseen.

Olisi ilmeisen järkevää tehdä puhdistus yhteisessä laitoksessa, joka puhdistaisi useamman tehtaan tuhkaa. Taloudellisuus riippuisi luonnollisesti siitä, montako tehdasta olisi mukana, miten suuret kuljetusmatkat olisivat, millaisella omistuspohjalla ja millaisilla kaupallisilla periaatteilla laitos toimisi. Laitos voisi toimia omakustannus-periaatteella metsäyhtiöiden omistuksessa tai erillisenä puhtaasti voittoa tavoittelevana yrityksenä. Lentotuhkan tiivistämiseen kuljetusta varten kunkin tehtaan olisi hankittava briketointilaitte. Laitoksen pitäisi sijaita yhden tehtaan alueella jotta voitaisiin hyödyntää olemassa olevaa infrastruktuuria.

Selvityksessä saatujen hintojen perusteella laskettu tuotto on esitetty alla sille tapaukselle, että pelkästään lentotuhkan liuotus korvataan puhdistuksella. Natriumsulfaatin saanto arvioitiin olevan 85 %. Loppuosa, kaliumia ja klooria sisältävä jätevirta, päästetään ulos, taulukko 9-10. Tase on esitetty liitteessä 8a.

Taulukko 9-10. Tapaus 8: vaikutukset keskiarvotehtaaseen

		Na	S
Ympäristöpäästöt	kg/ADt	-2,289	-1,339
	%	-24	-17

Liipeäkierto

Kaliumtason muutos 0 %

Klooritason muutos 0 %

Taloudellisuus	k€	Kemikaalisäästöt	418
		Käyttökuluja	?
		Tuotto	

Käyttökuluja on tässä tapauksessa vaikea arvioida, sillä ne riippuvat niin monista seikoista, kuten yllä on todettu.

Tämän ratkaisun taloudellinen tuotto olisi muihin vaihtoehtoihin pienekkö, mutta ensisijaisena tavoitteena on tietenkin ympäristövaatimuksiin vastaaminen. Yllä olevassa laskelmassa lähdettiin siitä, että kaliumin ja kloorin taso lipeäkierrossa säilyisi entisellään. Luonnollisesti voidaan myös lisätä käsiteltävän lentotuhkan määrää. Silloin saadaan tasot laskemaan, ja sitä kautta hyötyä soodakattilassa.

9.3.9 Tapaus 9. Natriumsulfaatin myynti, R10 -suodin

Lentotuhkan osuus liuotettavista suoloista on vain noin 20 %. Klooridioksidilaitoksen jätesuolaa käsittelemällä on helpompaa saavuttaa ympäristösuojeluvaikutusta. Jätesuolan happamuutta voidaan käyttää hyväksi karbonaatin poistamisessa lentotuhkaliuoksesta. Samalla sen kloori- ja kloraattijäännöksiä voidaan poistaa, sillä lentotuhka sisältää pieniä määriä sulfiittia, joka reagoi niiden kanssa, muodostaen sulfaattia. Lisäksi jätesuolan neutraali sulfaattiosa saadaan myytävään tuotteeseen.

R10-suotimesta saatua hapanta NaHSO_4 -liuosta voidaan käyttää mäntyöljykeitossa, jossa se riittää korvaamaan noin 2/3 ostorikkihaposta, taulukko 9-11. Tase on esitetty liitteessä 9a.

Taulukko 9-11. Tapaus 9: vaikutukset keskiarvotehtaaseen

		Na	S
Ympäristöpäästöt	kg/ADt	-8,700	-7,486
	%	-91	-93
Lipeäkierto		Kaliumtason muutos	-31 %
		Klooritason muutos	5 %
Taloudellisuus	k€	Kemikaalisäästöt	2274
		Käyttökuluja	?
		Tuotto	

R10-suodos tuo noin 3,4 kg/ADt rikkiä, ja sen tasapainottamiseen lentotuhkaa pitää ottaa ulos hieman enemmän kuin edellisessä tapauksessa. Taloudellisuus paranee merkittävästi edelliseen tapaukseen verrattuna. Pääasialliset syyt ovat että myytävän sulfaatin määrä kasvaa, ostorikkihapon määrä laskee ja jäteveden neutralointikustannukset vähenevät. Pieni kustannus syntyy siitä, että ostolipeää pitää lisätä hivenen.

Tällä ratkaisulla päästään yli 90 % suolapäästöjen vähentämiseen. Ainoastaan kiteytysprosessin jätevirta jäisi edelleen jäljelle. Jätevirralle ei ole laskettu arvoa, mutta kaliumsulfaatti on hieman arvokkaampi kuin natriumsulfaatti, ja olisi periaatteessa mahdollista jalostaa myytäväksi tuotteeksi. Silloin olisi mahdollista lopettaa suolojen liuotus kokonaan.

Tässä ratkaisussa tuotettava sulfaattimäärä on niin suuri, että yhden ainoan sellutehtaan tuotanto ylittäisi Suomen markkinat. Suurehkoissa referenssitehtaassa syntyisi 19600 tonnia vuodessa.

9.4 Yhteenvedotaulukot

Tärkeimmät luvut kaikista taselaskelmista on koottu taulukkoon liitteet 10a-c

Taulukossa 10a ovat prosessiyhdistelmien lähtöaineet, eli lentotuhka tai R8-jätesuola tai molempia, ja tuotteet. Natriumhydroksidia syntyy joko membraaniprosessilla tai kaustisoinnissa. BME-prosessilla saadaan rikkihappoa, mutta R10-suodinta käytettäessä saadaan liuos, joka sisältää pääasiallisesti natriumvetysulfaattia. Taulukossa natriumvetysulfaatti on laskettu ekvivalenttiseksi rikkihapoksi. Tässä on myös huomioitu että R10-suodos ei ole aivan puhdasta NaHSO_4 , vaan se sisältää myös vähän Na_2SO_4 . Tämä seikka on otettu huomioon kaikissa taselaskelmissa.

Taulukossa 10b on prosessien vaikutus ympäristöpäästöihin. On kuitenkin huomioitava että kyseessä ovat pelkästään suoraan jäteveteen liuotettavat suolat, eli lentotuhka ja klooridioksidilaitoksen hapan suola. Valkaisuusuodoksien sisältämät suolat eivät ole mukana, ainoastaan niiden mahdolliset muutokset. Lipeä- ym. vastaavat mahdolliset päästöt eivät myöskään ole mukana.

Suolapäästöjen muutokset on ilmoitettu kiloina per sellutonni ja prosentteina yhteenlasketusta määrästä. Talteenotossa tärkeitä muutoksia ovat kalium- ja klooritason muutokset. Niitä ei suoranaisesti pyritty muuttamaan, mutta R8-suolan tuominen nostaa klooripitoisuutta hieman, ja suuri lentotuhkan ulosotto alentaa sekä kalium- että klooripitoisuutta.

Taloudellisuutta arvioitaessa on pidettävä mielessä että membraanien elinikä, joka vuorostaan riippuu epäpuhtauksista, on epävarmin tekijä. Eräs tärkeä seikka taloudellisuuslaskelmissa on eri ratkaisussa tarvittavien laitteiden investointikustannus. Tämän työn puitteissa on voitu tehdä vain karkea arvio tästä. Arvio perustuu aikaisempiin KCL-tutkimuksiin, diplomityöhön (20) ja muihin julkaisuihin (18). Karkeudesta huolimatta arvio antaa käsityksen investoinnin suuruusluokasta, ja sitä kautta käyttökuluihin, jotka on arvioitu olevan 15 % investoinnista. Laskelmista käy ilmi, erityisesti BME-prosessin kohdalla, etteivät mahdolliset virheet käyttökuluissa vaikuta kovin ratkaisevasti kokonaiskuvaan. Kaikki prosessit on myös arvioitu samoilla perusteilla, ja ovat siten jokseenkin vertailukelpoisia.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Suolojen liuotusta on mahdollista lopettaa kokonaan, ja myös taloudellisesti kannattavalla tavalla. Investoinnit ovat kuitenkin sen verran merkittäviä, ettei tavanomaisesti vaadittua yhden vuoden takaisinmaksuaikaa ole saavutettavissa. Edullisimmilla ratkaisuilla saavutettava takaisinmaksuaika lienee 1,8 – 2,6 vuotta.

Sähkökemiallista käsittelyä voidaan yhdistää muiden tekniikoiden kanssa kokonaisratkaisuksi, jolla voidaan eliminoida suolaliuotuksen ympäristövaikutuksia, tasapainottaa rikki, poistaa kalium ja kloori lipeäkierrosta sekä säästää ostokemikaaleja.

Yksinään käytettynä sähkökemiallinen käsittely vaikuttaa riskialttiilta, sillä tarvitaan hyvin suurta membraanipinta-alaa, ja membraanit voivat tuhoutua epäpuhtauksien takia. Syöttöliuoksen puhtausvaatimukset ovat suuret erityisesti kaksi- ja kolmearvoisten ionien osalta. Membraanien kestävyyttä on vaikeaa arvioida ilman pitkäaikaista kokeilua, ja prosessin mahdollista käyttöönottoa kannattaisi siksi tehdä askeleittain riskejä pienentäen. Sähkökemiallisen käsittelyn etuna on se, että suoloja voidaan muuttaa suoraan hyötykemikaaleiksi. Erityisesti rikkihappoa ei voi tuottaa millään muulla tässä tutkitulla vaihtoehdolla. Saadaan myös karbonaattivapaa lipeä valkaisua varten.

Eri sähkökemiallisen käsittelyn versioista bipoläärimembraanielektrodialyysi (BME) vaikuttaa edullisimmalta, sillä sähköön käyttö ja haitallisten kaasujen kehitys on pienin. Tekniikkaa voidaan, jos lähtöaineena käytetään suodintuhkaa, käyttää kaliumin ja kloorin poistoon. Tässä tapauksessa tuotettu happo ja lipeä pitää käyttää valkaisussa, eikä palauttaa sellutehtaan lipeäkiertoon.

Sellutehtaan taseita laskettiin eri ratkaisulla, joissa yhdistettiin osaprosesseja eri tavoilla. Taseen kautta saatiin kokonaiskuva ratkaisujen ympäristövaikutuksista, vaikutuksista lipeäkiertoon sekä taloudellisuudesta. Vahvimmat ratkaisut olivat laskelmien perusteella yhdistelmät BME (lentotuhkalle) + GLSS + R10-suodin ja uutto/kiteytys + GLSS + R10-suodin. Näillä yhdistelmillä saadaan yli 3 M€ vuotuista tuottoa, kaliumin ja kloorin hallinta sekä suolojen liuottamisen lopettaminen täysin tai suurimmalta osalta.

Lentotuhkan käsitteleminen yksinään ei vaikuta tarkoituksenmukaiselta, sillä klooridioksidilaitoksen jätesuola aiheuttaa huomattavasti enemmän sulfaattipäästöjä, ja on myös ympäristöviranomaisten huomion kohteena. Jos halutaan tuottaa natriumsulfaattia myyntiin, se on helpointa tehdä R10-suotimella, jolla saadaan neutraalia ja verraten puhdasta Na_2SO_4 suoraan. Silloin saadaan suurempi ympäristövaikutus ainakin sulfaatin osalta kuin lentotuhkaa käsittelemällä. Jos tehdään myyntisulfaattia molemmista suoloista, ongelmana on lähinnä se, että yhden ainoan sellutehtaan tuotanto riittäisi täyttämään Suomen markkinat (ks. esim. liite 9b). Vienti on vaikeaa, sillä tuote on halpa ja monet muutkin haluavat päästä eroon ylijäämäsulfaatista. Kuitenkin tällainen ratkaisu voisi olla mahdollinen ainakin yhdelle tehtaalle, etenkin sellaiselle, joka sijaitsee Kaakkois Suomessa sisävesistön äärellä, missä on myös muita sellutehtaita, ja ympäristöpaineet ovat suurimmat.

Yleisesti ottaen vaikuttaa siltä, että suolojen hyödyntäminen sellutehtaan sisällä on tehokkain tapa ratkaista suolanliuotusongelma maanlaajuisesti. Se käy myös kaikille tehtaalle. Sellutehtaalla on oma prosessi, jolla se voi tuottaa natriumhydroksidia suoloista, eli soodakattila ja kaustisointi. Se tapahtuu silloin myös halvimmalla mahdollisella tavalla. Solmukohtana on rikkitase. Kuten laskelmista käy ilmi, jos ratkaistaan rikkitaseongelma, ratkaistaan myös suolanliuotusongelma. Rikkitase voidaan hallita monilla eri prosesseilla, kuten BME:llä, tekemällä rikkihappoa hajukaasukattilan savukaasuista ym., tai GLSS:llä. Useimmiten ratkaisua jarruttaa investoinnin hinta. GLSS lienee ratkaisuista halvin ja yksinkertaisin. Lipeäkierrosta ulos otettu rikki on sijoitettava johonkin, ja luonteva paikka olisi ulkopuolinen

riikkihapon tuottaja, joka tekisi siitä uudestaan rikkihappoa. Alkuainerikki on vaaratonta kuljettaa, ja rikki on mahdollisimman konsentroidussa muodossa. Tällä tavalla saataisiin kiertävä rikin kulku, joka rasittaisi ympäristöä kaikkein vähiten.

11 KIRJALLISUUSVIITTEET

1. Davis, S. et al. Candidate membranes for the electrochemical salt-splitting of sodium sulfate, J. Appl. Electrochem (2008) 38:777-783.
2. Sirén, K. Sähkösuodintuhkan puhdistus ja käsittely, Suomen Soodakattilayhdistys ry, raportti (2003).
3. Sirén, K. Sähkösuodintuhkan puhdistus ja käsittely, Osa II, Suomen Soodakattilayhdistys ry, raportti (2005).
4. Sirén, K. Sirén, K. Sähkösuodintuhkan puhdistus ja käsittely - Osa III – Kuljetusmuoto ja radioaktiivisuus, Suomen Soodakattilayhdistys ry, raportti (2006).
5. Rantavaara A. Puutavaran radioaktiivisuus, seloste STUK-A133, Säteilyturvakeskus (1996).
6. Sirén, K. Sähkösuodintuhkan puhdistus – Osa IV- Prosessin koeajo tehdaskaltaisella laitteistolla, Suomen Soodakattilayhdistys ry, raportti (2009).
7. Niemelä, K. Soodakattilan lentotuhkan hyötykäyttö - Esiselvitys Suomen Soodakattilayhdistykselle, KCL Reports 2659 (2003).
8. www.ihs.com/products/chemicalplanning/ceh/sodium-sulfate.aspx
8.11.2013
9. www.alibaba.com/showroom/sodium-sulfate-price.html, 7.11.2007
10. www.ion-power.com/index.html, 25.9.2013.
11. www.rsc.org, 21.11.2013
12. www.fumatech.com/EN/Membrane-technology/Membrane-processes ,
11.9.2013
13. Bauer, B. FuMa-Tech, st. Ingbert, Saksa, henkilökohtainen tiedonanto, (2013)
14. Du Pont Nafion Product Information Bulletin 97-01 (2013).
15. Välimäki, E. Samanaikainen korroosio-olosuhteiden ja tehtaan sulfiditeetin hallinta, Soodakattilapäivä 2012.
16. www.merichem.com/resources/technical_papers/optimization.php,
30.9.2013.

17. Sirén, K. SOTU-hanke, osatehtävä 2: Polttolipeän ja sähkösuodintuhkan analysointi, Suomen Soodakattilayhdistys ry (2004).
18. Thompson, R. et al, Caustic soda and sulfuric acid production from sodium sulfate by-product of chlorine dioxide generation – economics, Tappi J. (78) 6 (1995).
19. Törönen, M. Sulfaattiselutehtaan rikkitaseen säätö bipolaaritekniikalla, diplomityö, Lappeenrannan Teknillinen Korkeakoulu, Kemiantelekniiikan osasto (1990).
20. Johansson, U. Different Methods for the Purge of Chlorides and Potassium from Electrostatic Precipitator Dust in the Kraft Mill, diplomityö, Lund Institute of Technology, Dept. of Chemical Engineering (2005).

LIITTEET

- Liite 1a. Tapaus 1. BME-prosessi sovellettuna pelkästään lentotuhkalle - taselaskelma
- Liite 1b. Tapaus 1. BME-prosessi sovellettuna pelkästään lentotuhkalle - ympäristövaikutus
- Liite 2a. Tapaus 2. BME-prosessi sovellettuna pelkästään happamalle suolalle - taselaskelma
- Liite 2b. Tapaus 2. BME-prosessi sovellettuna pelkästään happamalle suolalle - ympäristövaikutus
- Liite 2c. Tapaus 2. BME-prosessi sovellettuna pelkästään happamalle suolalle, hapon konsentrointi
- Liite 3a. Tapaus 3. Suolojen yhdistäminen - taselaskelma
- Liite 3b. Tapaus 3. Suolojen yhdistäminen - ympäristövaikutus
- Liite 4a. Tapaus 4. Lentotuhka BME-prosessiin, rikkitase GLSS:llä - taselaskelma
- Liite 4b. Tapaus 4. Lentotuhka BME-prosessiin, rikkitase GLSS:llä - ympäristövaikutus
- Liite 5a. Tapaus 5. Lentotuhka BME-prosessiin, GLSS, R10-suodin - taselaskelma
- Liite 5b. Tapaus 5. Lentotuhka BME-prosessiin, GLSS, R10-suodin - ympäristövaikutus
- Liite 6a. Tapaus 6. Lentotuhka uuttoprosessiin, GLSS, R10-suodin - taselaskelma
- Liite 6b. Tapaus 6. Lentotuhka uuttoprosessiin, GLSS, R10-suodin - ympäristövaikutus
- Liite 7a. Tapaus 7. Lentotuhka kiteytysprosessiin, GLSS, R10-suodin - taselaskelma
- Liite 7b. Tapaus 7. Lentotuhka kiteytysprosessiin, GLSS, R10-suodin - ympäristövaikutus
- Liite 8a. Tapaus 8. Natriumsulfaatin myynti - taselaskelma
- Liite 8b. Tapaus 8. Natriumsulfaatin myynti - ympäristövaikutus
- Liite 9a. Tapaus 9. Natriumsulfaatin myynti, R10 –suodin - taselaskelma
- Liite 9b. Tapaus 9. Natriumsulfaatin myynti, R10 – suodin - ympäristövaikutus
- Liite 10a. Yhteenveto: lähtöaineet ja tuotteet
- Liite 10 b. Yhteenveto: ympäristövaikutukset ja kalium ja kloori talteenottokierrossa
- Liite 10c. Yhteenveto: Taloudellisuus

Tapaus 1. BME-prosessi sovellettuna pelkästään lentotuhkalle - taselaskelma

1	Start:	ESP	X	Product:	H2SO4	X	Concentr. eq.			
ESP		R8			NaHSO4					
	Initial					New				
In:	Na	S	K	Cl		Na	S	K	Cl	Remark
Wood and water	0,114	0,266	0,898	0,155		0,114	0,266	0,898	0,155	
NaOH make-up to liquor	3,076	0	0	0,003		3,076	0	0	0,003	
NaOH to O2-stage	4,536	0	0	0,004		4,536	0	0	0,004	
NaOH to NCG incinerator scrubbers	0	0	0	0		0	0	0	0	
H2SO4 to TO acidulation	0,000	2,479	0	0		0,000	2,479	0	0	
Others	2,208	2,419	0,140	0,081		2,208	2,419	0,140	0,081	
Membrane H2SO4 to TO						0,000	0,000	0,000	0,000	No membrane acid
Membrane process rest stream						0,000	0,000	0,000	0,000	
R8 intake						0,000	0,000	0,000	0,000	
R10 filtrate to TO						0,000	0,000	0,000	0,000	
R10 cake						0,000	0,000	0,000	0,000	
Sum	9,934	5,164	1,038	0,243		9,934	5,164	1,038	0,243	
Out:	Na	S	K	Cl		Na	S	K	Cl	
Wash loss	4,052	0,965	0,231	0,056		4,052	0,965	0,231	0,056	
Wastewaters	1,043	1,017	0,044	0,026		1,043	1,017	0,044	0,026	
Solid wastes	0,331	0,165	0,027	0,036		0,331	0,165	0,027	0,036	
Emissions to atmosphere	0,238	0,876	0,008	0,019		0,238	0,876	0,008	0,019	
Other exits	1,594	0,495	0,314	0,051		1,594	0,495	0,314	0,051	
RB dust purge	2,676	1,646	0,414	0,055		0,000	0,000	0,000	0,000	Stopped
RB dust to membrane process						2,676	1,646	0,414	0,055	To membrane
OxWL to bleaching						0,000	0,000	0,000	0,000	
GLSS sulphur removal process						0,000	0,000	0,000	0,000	
K & Cl removal process						0,000	0,000	0,000	0,000	
Sum	9,934	5,164	1,038	0,243		9,934	5,164	1,038	0,243	
Imbalance	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	

Tapaus 1. BME-prosessi sovellettuna pelkästään lentotuhkalle – ympäristövaikutukset

Method:	1											
Environmental impact:						Change in recovery cycle:						
		Old		New		Change:						
	Sewered:	Na	S	Na	S		Na	S		K	Cl	
	ESP	2,676	1,646	0,000	0,000	kg	-2,676	-1,645		%	%	
	R8	6,842	6,361	6,842	6,361	%	-28	-21		0,0	0,0	
	Bleachchange	0,000	0,000	0,000	0,000							
	Rest stream	0,000	0,000	0,000	0,001		Na	S				
	Sum	9,518	8,007	6,842	6,362	Used R8, %:	0	0				

Tapaus 1. BME-prosessi sovellettuna pelkästään lentotuhkalle – taloudellisuus

	Na	S	NaOH	H2SO4	CaO	O2	2013 €/kg	(750000 ADt)	
Chemical savings and costs	Na	S	NaOH	H2SO4	CaO	O2	€/kg	€/ADt	k€/year
Saved NaOH in recovery	0,000		0,000				0,390	0,00	0
Saved NaOH in bleaching	2,920		5,081				0,390	1,98	1486
NaOH to membrane process	0,000		0,000				0,390	0,00	0
Saved H2SO4 in TO		0,000		0,000			0,115	0,00	0
Saved H2SO4 in bleaching		1,645		5,031			0,115	0,58	434
Saved CaO (neutr.)		0,000			0,000		0,130	0,000	0
O2 consumed						0,000	0,120	0,000	0
Increase of make-up CaO					0,000		0,130	0,000	0
GLSS chemicals		0,000					0,120	0,000	0
Sold Na2SO4	0,000	0,000				0,000	0,130	0,000	0
				5,032		Chemical savings		2,560	1920
Power and membrane costs									
Power to membrane process					Power costs	€/kWh	0,0416	-0,607	-456
Membrane cost estimate	Area,m2:	1642,5			Membrane cost	€/m2	570	-1,248	-936
						Sum		0,704	528

[illegible]

Tapaus 2. BME-prosessi sovellettuna pelkästään happamalle suolalle - ympäristövaikutukset

Method:	2											
Environmental impact:										Change in recovery cycle:		
		Old		New		Change:						
	Sewered:	Na	S	Na	S		Na	S		K	Cl	
	ESP	2,676	1,646	2,676	1,646	kg	-6,841	-6,361		%	%	
	R8	6,842	6,361	0,000	0,000	%	-72	-79		0,0	0,0	
	Bleachchange	0,000	0,000	0,000	0,000							
	Rest stream	0,000	0,000	0,000	0,000		Na	S				
	Sum	9,518	8,007	2,677	1,646	Used R8, %:		100	100			

Tapaus 2. BME-prosessi sovellettuna pelkästään happamalle suolalle - taloudellisuus

	Na	S	NaOH	H2SO4	CaO	O2	2013 €/kg	(750000 ADt/y) €/ADt	k€/year	
Chemical savings and costs										
Saved NaOH in recovery	-0,001		-0,002				0,390	0,00	-1	
Saved NaOH in bleaching	6,841		11,903				0,390	4,64	3482	
NaOH to membrane process	0,000		0,000				0,390	0,00	0	
Saved H2SO4 in TO		0,000		0,000			0,115	0,00	0	
Saved H2SO4 in bleaching		6,361		19,457			0,115	2,24	1678	
Saved CaO (neutr.)		6,361			2,781		0,130	0,362	271	
O2 consumed						0,000	0,120	0,000	0	
Increase of make-up CaO					0,000		0,130	0,000	0	
GLSS chemicals		0,000					0,120	0,000	0	
Sold Na2SO4	0,000	0,000				0,000	0,130	0,000	0	
				19,457		Chemical savings		7,241	5431	
Power and membrane costs										
Power to membrane process					Power costs		€/kWh	0,0416	-1,432	-1074
Membrane cost estimate	Area,m2:	3873,825			Membrane cost		€/m2	570	-2,944	-2208
						Sum		2,864	2148	

Tapaus 2. BME-prosessi sovellettuna pelkästään happamalle suolalle, hapon konsentrointi

2c	Start:	ESP		Product:	H2SO4	X				
R8		R8	X		NaHSO4					
Acid concentrating equipment										
	Initial					New				
In:	Na	S	K	Cl		Na	S	K	Cl	Remark
Wood and water	0,114	0,266	0,898	0,155		0,114	0,266	0,898	0,155	
NaOH make-up to liquor	3,076	0	0	0,003		3,077	0	0	0,003	
NaOH to O2-stage	4,536	0	0	0,004		4,536	0	0	0,004	
NaOH to NCG incinerator scrubbers	0	0	0	0		0	0	0	0	
H2SO4 to TO acidulation	0,000	2,479	0	0		0,000	0,000	0	0	Saved
Others	2,208	2,419	0,140	0,081		2,208	2,419	0,140	0,081	
Membrane H2SO4 to TO						0,000	2,479	0,000	0,030	Concentrated
Membrane process rest stream						0,000	0,000	0,000	0,000	
R8 intake						0,000	0,000	0,000	0,000	
R10 filtrate to TO						0,000	0,000	0,000	0,000	
R10 cake						0,000	0,000	0,000	0,000	
Sum	9,934	5,164	1,038	0,243		9,935	5,164	1,038	0,273	
Out:	Na	S	K	Cl		Na	S	K	Cl	
Wash loss	4,052	0,965	0,231	0,056		4,052	0,965	0,231	0,063	
Wastewaters	1,043	1,017	0,044	0,026		1,043	1,017	0,044	0,029	
Solid wastes	0,331	0,165	0,027	0,036		0,331	0,165	0,027	0,040	
Emissions to atmosphere	0,238	0,876	0,008	0,019		0,238	0,876	0,008	0,021	
Other exits	1,594	0,495	0,314	0,051		1,594	0,495	0,314	0,057	
RB dust purge	2,676	1,646	0,414	0,055		2,676	1,646	0,414	0,062	Continued
RB dust to membrane process						0,000	0,000	0,000	0,000	
OxWL to bleaching						0,000	0,000	0,000	0,000	
GLSS sulphur removal process						0,000	0,000	0,000	0,000	
K & Cl removal process						0,000	0,000	0,000	0,000	
Sum	9,934	5,164	1,038	0,243		9,934	5,164	1,038	0,273	
Imbalance	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	

[illegible]

Tapaus 3. Suolojen yhdistäminen - ympäristövaikutukset

Method:	3											
Environmental impact:										Change in recovery cycle:		
		Old		New		Change:						
Sewered:		Na	S	Na	S			Na	S		K	Cl
ESP		2,676	1,646	0,000	0,000	kg		-9,517	-8,007		%	%
R8		6,842	6,361	0,000	0,000	%		-100	-100		0,0	0,0
Bleachchange		0,000	0,000	0,000	0,000							
Rest stream		0,000	0,000	0,000	0,000			Na	S			
Sum		9,518	8,007	0,000	0,001	Used R8, %:		100	100			

Tapaus 3. Suolojen yhdistäminen - taloudellisuus

							2013	(750000 ADt/y)	
Chemical savings and costs	Na	S	NaOH	H2SO4	CaO	O2	€/kg	€/ADt	k€/year
Saved NaOH in recovery	0,000		0,000				0,390	0,00	0
Saved NaOH in bleaching	9,761		16,984				0,390	6,62	4968
NaOH to membrane process	0,000		0,000				0,390	0,00	0
Saved H2SO4 in TO		0,000		0,000			0,115	0,00	0
Saved H2SO4 in bleaching		8,007		24,492			0,115	2,82	2112
Saved CaO (neutr.)		6,361			2,781		0,130	0,362	271
O2 consumed						0,000	0,120	0,000	0
Increase of make-up CaO					0,000		0,130	0,000	0
GLSS chemicals		0,000					0,120	0,000	0
Sold Na2SO4	0,000	0,000				0,000	0,130	0,000	0
				24,492		Chemical savings		9,802	7351
Power and membrane costs									
Power to membrane process				Power costs		€/kWh	0,0416	-2,040	-1530
Membrane cost estimate	Area,m2:	5517		Membrane cost		€/m2	570	-4,193	-3145
							Sum	3,569	2677

Tapaus 4. Lentotuhka BME-prosessiin, rikkitase GLSS:llä - taselaskelma

4	Start:	ESP	X	Product:	H2SO4	X				
ESP + R8		R8			NaHSO4					
GLSS sulphur removal process										
BME for K & Cl	Initial					New				
In:	Na	S	K	Cl		Na	S	K	Cl	Remark
Wood and water	0,114	0,266	0,898	0,155		0,114	0,266	0,898	0,155	
NaOH make-up to liquor	3,076	0	0	0,003		0,000	0	0	0,003	Saved
NaOH to O2-stage	4,536	0	0	0,004		0,771	0	0	0,004	Saved
NaOH to NCG incinerator scrubbers	0	0	0	0		0	0	0	0	
H2SO4 to TO acidulation	0,000	2,479	0	0		0,000	2,479	0	0	
Others	2,208	2,419	0,140	0,081		2,208	2,419	0,140	0,081	
Membrane H2SO4 to TO						0,000	0,000	0,000	0,000	No membrane acid
Membrane process rest stream						0,000	0,000	0,000	0,000	
R8 intake						6,841	6,361	0,000	0,078	Intake of R8
R10 filtrate to TO						0,000	0,000	0,000	0,000	
R10 cake						0,000	0,000	0,000	0,000	
Sum	9,934	5,164	1,038	0,243		9,934	11,525	1,038	0,321	
Out:	Na	S	K	Cl		Na	S	K	Cl	
Wash loss	4,052	0,965	0,231	0,056		4,052	0,965	0,231	0,074	
Wastewaters	1,043	1,017	0,044	0,026		1,043	1,017	0,044	0,034	
Solid wastes	0,331	0,165	0,027	0,036		0,331	0,165	0,027	0,048	
Emissions to atmosphere	0,238	0,876	0,008	0,019		0,238	0,876	0,008	0,025	
Other exits	1,594	0,495	0,314	0,051		1,594	0,495	0,314	0,067	
RB dust purge	2,676	1,646	0,414	0,055		0,000	0,000	0,000	0,000	Stopped
RB dust to membrane process						2,676	1,646	0,414	0,073	To membrane process
OxWL to bleaching						0,000	0,000	0,000	0,000	
GLSS sulphur removal process						0,000	6,361	0,000	0,000	GLSS
K & Cl removal process						0,000	0,000	0,000	0,000	
Sum	9,934	5,164	1,038	0,243		9,934	11,525	1,038	0,321	
Imbalance	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	

Tapaus 4. Lentotuhka BME-prosessiin, rikkitase GLSS:llä - ympäristövaikutukset

Method:	4											
Environmental impact:										Change in recovery cycle:		
		Old		New		Change:						
Sewered:		Na	S	Na	S			Na	S		K	Cl
ESP		2,676	1,646	0,000	0,000	kg	-9,517	-8,007		%	%	
R8		6,842	6,361	0,000	0,000	%	-100	-100		0,0	32,0	
Bleachchange		0,000	0,000	0,000	0,000							
Rest stream		0,000	0,000	0,000	0,000			Na	S			
Sum		9,518	8,007	0,000	0,001	Used R8, %:	100	100				

Tapaus 4. Lentotuhka BME-prosessiin, rikkitase GLSS:llä - taloudellisuus

	Na	S	NaOH	H2SO4	CaO	O2	2013 €/kg	(750000 ADt/y) €/ADt	k€/year
Chemical savings and costs									
Saved NaOH in recovery	6,841		11,903				0,390	4,64	3482
Saved NaOH in bleaching	2,920		5,080				0,390	1,98	1486
NaOH to membrane process	0,000		0,000				0,390	0,00	0
Saved H2SO4 in TO		0,000		0,000			0,115	0,00	0
Saved H2SO4 in bleaching		1,646		5,035			0,115	0,58	434
Saved CaO (neutr.)		6,361			2,781		0,130	0,362	271
O2 consumed						0,000	0,120	0,000	0
Increase of make-up CaO					0,000		0,130	0,000	0
GLSS chemicals		6,361					0,120	-0,763	-572
Sold Na2SO4	0,000	0,000				0,000	0,130	0,000	0
				5,035			Chemical savings		6,801
									5100
Power and membrane costs									
Power to membrane process						Power costs €/kWh	0,0416	-0,610	-458
Membrane cost estimate	Area,m2:	1649,7				Membrane cost €/m2	570	-1,254	-940
							Sum	4,937	3703

[illegible]

Tapaus 5. Lentotuhka BME-prosessiin, GLSS, R10-suodin - ympäristövaikutukset

Method:	5											
Environmental impact:								Change in recovery cycle:				
		Old		New		Change:						
	Sewered:	Na	S	Na	S			Na	S		K	Cl
	ESP	2,676	1,646	0,000	0,000	kg	-9,518	-8,008			%	%
	R8	6,842	6,361	-0,001	-0,001	%	-100	-100			0,0	32,0
	Bleachchange	0,000	0,000	0,000	0,000							
	Rest stream	0,000	0,000	0,000	0,000			Na	S			
	Sum	9,518	8,007	-0,001	0,000	Used R8, %:	100	100				

Tapaus 5. Lentotuhka BME-prosessiin, GLSS, R10-suodin - taloudellisuus

							2013	(750000 ADt/y)	
Chemical savings and costs	Na	S	NaOH	H2SO4	CaO	O2	€/kg	€/ADt	k€/year
Saved NaOH in recovery	6,842		11,904				0,390	4,64	3482
Saved NaOH in bleaching	2,920		5,080				0,390	1,98	1486
NaOH to membrane process	0,000		0,000				0,390	0,00	0
Saved H2SO4 in TO		1,591		4,865			0,115	0,56	420
Saved H2SO4 in bleaching		1,646		5,035			0,115	0,58	434
Saved CaO (neutr.)		6,362			2,782		0,130	0,362	271
O2 consumed						0,000	0,120	0,000	0
Increase of make-up CaO					0,000		0,130	0,000	0
GLSS chemicals		4,772					0,120	-0,573	-429
Sold Na2SO4	0,000	0,000				0,000	0,130	0,000	0
				9,900		Chemical savings		7,552	5664
Power and membrane costs									
Power to membrane process				Power costs		€/kWh	0,0416	-0,610	-458
Membrane cost estimate	Area,m2:	1649,7		Membrane cost		€/m2	570	-1,254	-940
							Sum	5,688	4266

Tapaus 6. Lentotuhka uuttoprosessiin, GLSS, R10-suodin - taselaskelma

6	Start:	ESP	X	Product:	H2SO4					
ESP + R8		R8			NaHSO4					
GLSS, R10										
Leaching for K & Cl	Initial					New				
In:	Na	S	K	Cl		Na	S	K	Cl	Remark
Wood and water	0,114	0,266	0,898	0,155		0,114	0,266	0,898	0,155	
NaOH make-up to liquor	3,076	0	0	0,003		0,000	0	0	0,003	Saved
NaOH to O2-stage	4,536	0	0	0,004		0,000	0	0	0,004	Saved
NaOH to NCG incinerator scrubbers	0	0	0	0		0	0	0	0	
H2SO4 to TO acidulation	0,000	2,479	0	0		0,000	0,888	0	0	2/3 replaced by R10 filtr.
Others	2,208	2,419	0,140	0,081		2,208	2,879	0,140	0,081	0,46 kg S from H2SO4
Membrane H2SO4 to TO						0,000	0,000	0,000	0,000	
Membrane process rest stream						0,000	0,000	0,000	0,000	
R8 intake						0,000	0,000	0,000	0,000	
R10 filtrate to TO						2,626	3,422	0,000	0,078	Intake of filtrate
R10 cake						4,216	2,940	0,000	0,000	Intake of Na2SO4-cake
Sum	9,934	5,164	1,038	0,243		9,164	10,396	1,038	0,321	
Out:	Na	S	K	Cl		Na	S	K	Cl	
Wash loss	4,052	0,965	0,231	0,056		4,052	0,965	0,217	0,069	
Wastewaters	1,043	1,017	0,044	0,026		1,043	1,017	0,041	0,032	
Solid wastes	0,331	0,165	0,027	0,036		0,331	0,165	0,025	0,044	
Emissions to atmosphere	0,238	0,876	0,008	0,019		0,238	0,876	0,008	0,023	
Other exits	1,594	0,495	0,314	0,051		1,594	0,495	0,295	0,063	
RB dust purge	2,676	1,646	0,414	0,055		0,000	0,000	0,000	0,000	Stopped
RB dust to membrane process						0,000	0,000	0,000	0,000	No membran process
OxWL to bleaching						0,701	0,191	0,068	0,008	Na-surplus removal
GLSS sulphur removal process						0,000	5,937	0,000	0,000	GLSS
K & Cl removal process						1,205	0,750	0,383	0,082	
Sum	9,934	5,164	1,038	0,243		9,164	10,396	1,038	0,321	
Imbalance	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	

Tapaus 6. Lentotuhka uuttoprosessiin, GLSS, R10-suodin - ympäristövaikutukset

Method:	6											
	Environmental impact:									Change in recovery cycle:		
		Old		New			Change:					
	Sewered:	Na	S	Na	S			Na	S		K	Cl
	ESP	2,676	1,646	0,000	0,000		kg	-8,314	-7,258		%	%
	R8	6,842	6,361	-0,001	-0,001		%	-87	-91		-6,0	22,8
	Bleachchange	0,000	0,000	0,000	0,000							
	Rest stream	0,000	0,000	1,205	0,750			Na	S			
	Sum	9,518	8,007	1,204	0,750		Used R8, %:	100	100			

Tapaus 6. Lentotuhka uuttoprosessiin, GLSS, R10-suodin - taloudellisuus

							2013	(750000 ADt/y)	
Chemical savings and costs	Na	S	NaOH	H2SO4	CaO	O2	€/kg	€/ADt	k€/year
Saved NaOH in recovery	7,612		13,244				0,390	5,17	3874
Saved NaOH in bleaching	0,436		0,758				0,390	0,30	222
NaOH to membrane process	0,000		0,000				0,390	0,00	0
Saved H2SO4 in TO		1,591		4,865			0,115	0,56	420
Saved H2SO4 in bleaching		0,000		0,000			0,115	0,00	0
Saved CaO (neutr.)		6,362			2,782		0,130	0,362	271
O2 consumed						0,159	0,120	-0,019	-14
Increase of make-up CaO					0,018		0,130	-0,002	-2
GLSS chemicals		5,937					0,120	-0,712	-534
Sold Na2SO4	0,000	0,000				0,000	0,130	0,000	0
				4,865		Chemical savings		5,648	4236
Power and membrane costs									
Power to membrane process					Power costs	€/kWh	0,0416	0,000	0
Membrane cost estimate	Area,m2:	0,0225			Membrane cost	€/m2	570	0,000	0
							Sum	5,648	4236

[illegible]

Tapaus 7. Lentotuhka kiteytysprosessiin, GLSS, R10-suodin - ympäristövaikutukset

Method:	7											
Environmental impact:										Change in recovery cycle:		
		Old		New		Change:						
	Sewered:	Na	S	Na	S		Na	S		K	CI	
	ESP	2,676	1,646	0,000	0,000	kg	-8,342	-7,258		%	%	
	R8	6,842	6,361	-0,001	-0,001	%	-88	-91		-6,1	5,7	
	Bleachchange	0,000	0,000	0,000	0,000							
	Rest stream	0,000	0,000	1,176	0,750		Na	S				
	Sum	9,518	8,007	1,175	0,750	Used R8, %:	100	100				

Tapaus 7. Lentotuhka kiteytysprosessiin, GLSS, R10-suodin - taloudellisuus

							2013	(750000 ADt/y)	
Chemical savings and costs	Na	S	NaOH	H2SO4	CaO	O2	€/kg	€/ADt	k€/year
Saved NaOH in recovery	7,612		13,244				0,390	5,17	3874
Saved NaOH in bleaching	0,454		0,789				0,390	0,31	231
NaOH to membrane process	0,000		0,000				0,390	0,00	0
Saved H2SO4 in TO		1,591		4,865			0,115	0,56	420
Saved H2SO4 in bleaching		0,000		0,000			0,115	0,00	0
Saved CaO (neutr.)		6,362			2,782		0,130	0,362	271
O2 consumed						0,166	0,120	-0,020	-15
Increase of make-up CaO					0,019		0,130	-0,002	-2
GLSS chemicals		5,469					0,120	-0,656	-492
Sold Na2SO4	0,000	0,000				0,000	0,130	0,000	0
				4,865		Chemical savings		5,716	4287
Power and membrane costs									
Power to membrane process				Power costs		€/kWh	0,0416	0,000	0
Membrane cost estimate	Area,m2:	0,0225	Membrane cost		€/m2	570		0,000	0
							Sum	5,715	4287
			Theor.						

Tapaus 8. Natriumsulfaatin myynti - taselaskelma

8	Start:	ESP	X	Product:	H2SO4		Concentr. eq.		
ESP		R8			NaHSO4				
Purification & sales									
Only ESP	Initial					New			
In:	Na	S	K	Cl		Na	S	K	Cl
Wood and water	0,114	0,266	0,898	0,155		0,114	0,266	0,898	0,155
NaOH make-up to liquor	3,076	0	0	0,003		3,076	0	0	0,003
NaOH to O2-stage	4,536	0	0	0,004		4,536	0	0	0,004
NaOH to NCG incinerator scrubbers	0	0	0	0		0	0	0	0
H2SO4 to TO acidulation	0,000	2,479	0	0		0,000	2,479	0	0
Others	2,208	2,419	0,140	0,081		2,208	2,419	0,140	0,081
Membrane H2SO4 to TO						0,000	0,000	0,000	0,000
Membrane process rest stream						0,000	0,000	0,000	0,000
R8 intake						0,000	0,000	0,000	0,000
R10 filtrate to TO						0,000	0,000	0,000	0,000
R10 cake						0,000	0,000	0,000	0,000
Sum	9,934	5,164	1,038	0,243		9,934	5,164	1,038	0,243
Out:	Na	S	K	Cl		Na	S	K	Cl
Wash loss	4,052	0,965	0,231	0,056		4,052	0,965	0,231	0,056
Wastewaters	1,043	1,017	0,044	0,026		1,043	1,017	0,044	0,026
Solid wastes	0,331	0,165	0,027	0,036		0,331	0,165	0,027	0,036
Emissions to atmosphere	0,238	0,876	0,008	0,019		0,238	0,876	0,008	0,019
Other exits	1,594	0,495	0,314	0,051		1,594	0,495	0,314	0,051
RB dust to K & Cl -process	2,676	1,646	0,414	0,055		2,676	1,646	0,414	0,055
RB dust to membrane process						0,000	0,000	0,000	0,000
OxWL to bleaching						0,000	0,000	0,000	0,000
GLSS sulphur removal process						0,000	0,000	0,000	0,000
Sum	9,934	5,164	1,038	0,243		9,934	5,164	1,038	0,243
Imbalance	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000
K & Cl purification process waste						0,387	0,247	0,134	0,036
Na2SO4 from ESP to sales						2,289	1,399	0,280	0,020
Na2SO4 from R10-filter to sales						0,000	0,000	0,000	0,000

Tapaus 8. Natriumsulfaatin myynti - ympäristövaikutukset

Method:	8											
Environmental impact:						Change in recovery cycle:						
		Old		New		Change:						
	Sewered:	Na	S	Na	S		Na	S		K	Cl	
	ESP	2,676	1,646	0,000	0,000	kg	-2,289	-1,399		%	%	
	R8	6,842	6,361	6,842	6,361	%	-24	-17		0,0	0,0	
	Bleachchange	0,000	0,000	0,000	0,000							
	Rest stream	0,000	0,000	0,387	0,247		Na	S				
	Sum	9,518	8,007	7,229	6,608	Used R8, %:	0	0				

Tapaus 8. Natriumsulfaatin myynti - taloudellisuus

	Na	S	NaOH	H2SO4	CaO	Na2SO4	2013 €/kg	(750000 ADt/y) €/ADt	k€/year
Chemical savings and costs									
Saved NaOH in recovery	0,000		0,000				0,390	0,00	0
Saved NaOH in bleaching	0,000		0,000				0,390	0,00	0
NaOH to membrane process	0,000		0,000				0,390	0,00	0
Saved H2SO4 in TO		0,000		0,000			0,115	0,00	0
Saved H2SO4 in bleaching		0,000		0,000			0,115	0,00	0
Saved CaO (neutr.)		0,000			0,000		0,130	0,000	0
O2 consumed						0,000	0,120	0,000	0
Increase of make-up CaO					0,000		0,130	0,000	0
GLSS chemicals		0,000					0,120	0,000	0
Sold Na2SO4, 85 % yield	0,000	1,399				6,198	0,090	0,558	418
				0,000		Chemical savings		0,558	418
Power and membrane costs									
Power to membrane process					Power costs	€/kWh	0,0416	0,000	0
Membrane cost estimate	Area,m2:	0,0225			Membrane cost	€/m2	570	0,000	0
						Sum		0,558	418

Tapaus 9. Natriumsulfaatin myynti, R10 -suodin - taselaskelma

9	Start:	ESP	X	Product:	H2SO4		Concentr. eq.		
ESP		R8			NaHSO4				
Purification & sales									
Increased amount + R10 in	Initial					New			
In:	Na	S	K	Cl		Na	S	K	Cl
Wood and water	0,114	0,266	0,898	0,155		0,114	0,266	0,898	0,155
NaOH make-up to liquor	3,076	0	0	0,003		3,428	0	0	0,003
NaOH to O2-stage	4,536	0	0	0,004		4,536	0	0	0,004
NaOH to NCG incinerator scrubbers	0	0	0	0		0	0	0	0
H2SO4 to TO acidulation	0,000	2,479	0	0		0,000	0,888	0	0
Others	2,208	2,419	0,140	0,081		2,208	2,419	0,140	0,081
Membrane H2SO4 to TO						0,000	0,000	0,000	0,000
Membrane process rest stream						0,000	0,000	0,000	0,000
R8 intake						0,000	0,000	0,000	0,000
R10 filtrate to TO						2,626	3,422	0,000	0,078
R10 cake						0,000	0,000	0,000	0,000
Sum	9,934	5,164	1,038	0,243		12,912	6,996	1,038	0,321
Out:	Na	S	K	Cl		Na	S	K	Cl
Wash loss	4,052	0,965	0,231	0,056		4,052	0,965	0,160	0,059
Wastewaters	1,043	1,017	0,044	0,026		1,043	1,017	0,030	0,027
Solid wastes	0,331	0,165	0,027	0,036		0,331	0,165	0,019	0,038
Emissions to atmosphere	0,238	0,876	0,008	0,019		0,238	0,876	0,006	0,020
Other exits	1,594	0,495	0,314	0,051		1,594	0,495	0,217	0,054
RB dust to K & Cl -process	2,676	1,646	0,414	0,055		5,654	3,477	0,606	0,123
RB dust to membrane process						0,000	0,000	0,000	0,000
OxWL to bleaching						0,000	0,000	0,000	0,000
GLSS sulphur removal process						0,000	0,000	0,000	0,000
Sum	9,934	5,164	1,038	0,243		12,912	6,995	1,038	0,321
Imbalance	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000
K & Cl purification process waste						0,818	0,522	0,283	0,075
Na2SO4 from ESP to sales						4,836	2,955	0,323	0,048
Na2SO4 from R10-filter to sales						4,216	2,940	0,000	0,000

Tapaus 9. Natriumsulfaatin myynti, R10 – suodin - ympäristövaikutukset

Method:	9											
	Environmental impact:									Change in recovery cycle:		
		Old		New		Change:						
	Sewered:	Na	S	Na	S		Na	S		K	Cl	
	ESP	2,676	1,646	0,000	0,000	kg	-8,700	-7,486		%	%	
	R8	6,842	6,361	0,000	0,000	%	-91	-93		-30,8	5,1	
	Bleachchange	0,000	0,000	0,000	0,000							
	Rest stream	0,000	0,000	0,818	0,522		Na	S				
	Sum	9,518	8,007	0,818	0,521	Used R8, %:	100	100				
	Varannan S ger en NaHSO4.											

Tapaus 9. Natriumsulfaatin myynti, R10 –suodin - taloudellisuus

	Na	S	NaOH	H2SO4	CaO	Na2SO4	2013	(750000 ADt/y)	
Chemical savings and costs	Na	S	NaOH	H2SO4	CaO	Na2SO4	€/kg	€/ADt	k€/year
Saved NaOH in recovery	-0,352		-0,612				0,390	-0,24	-179
Saved NaOH in bleaching	0,000		0,000				0,390	0,00	0
NaOH to membrane process	0,000		0,000				0,390	0,00	0
Saved H2SO4 in TO		1,591		4,865			0,115	0,56	420
Saved H2SO4 in bleaching		0,000		0,000			0,115	0,00	0
Saved CaO (neutr.)		6,362			2,782		0,130	0,362	271
O2 consumed						0,000	0,120	0,000	0
Increase of make-up CaO					0,000		0,130	0,000	0
GLSS chemicals		0,000					0,120	0,000	0
Sold Na2SO4, 85 % yield	0,000	5,895				26,115	0,090	2,350	1763
				4,865		Chemical savings		3,033	2274
Power and membrane costs									
Power to membrane process					Power costs	€/kWh	0,0416	0,000	0
Membrane cost estimate	Area,m2:	0,0225			Membrane cost	€/m2	570	0,000	0
							Sum	3,033	2274

Yhteenvetotaulukko: lähtöaineet ja tuotteet

Lähtöaineet ja tuotteet									
		Lähtömateriaali		Tuotteet					
Mene- telmä	Prosessit	8,44 kg/ADt ESP	26 kg/ADt R8	NaOH	NaOH	H2SO4	NaHSO4 lask.	Na2SO4	S
				BME kg/ADt	Kaust. kg/ADt		H2SO4 kg/ADt	Myynti kg/ADt	
						kg/ADt			kg/ADt
1	BME	X		5,081	0	5,031	0	0	0
2	BME		X	11,901	0	19,457	0	0	0
3	BME	X	X	16,984	0	24,492	0	0	0
4	BME + GLSS	X	X	5,080	11,903	5,035	0	0	6,361
5	BME + GLSS + R10	X	X	5,080	11,904	5,035	4,865	0	4,772
6	Uutto + GLSS + R10	X	X	0	14,002	0	4,865	0	5,937
7	Kiteytys + GLSS + R10	X	X	0	14,033	0	4,865	0	5,469
8	Na2SO4-myynti	X		0	0	0	0	6,198	0
9	Na2SO4-myynti + R10	X	X	0	-0,612	0	4,865	26,115	0

Yhteenveto: ympäristövaikutukset ja kalium ja kloori talteenottokierrossa

Vaikutukset ympäristöpäästöihin (suolojen liuotukseen) ja talteenottokiertoon							
Mene- telmä	Prosessit	Suolojen liuotus		Na	S	Talteenotto, muutos	
		Na	S			K	Cl
		kg/ADt	kg/ADt	%	%	%	%
1	BME	-2,676	-1,645	-28	-21	0,0	0,0
2	BME	-6,841	-6,361	-72	-79	0,0	0,0
3	BME	-9,517	-8,007	-100	-100	0,0	0,0
4	BME + GLSS	-9,517	-8,007	-100	-100	0,0	32,0
5	BME + GLSS + R10	-9,518	-8,008	-100	-100	0,0	32,0
6	Uutto + GLSS + R10	-8,314	-7,258	-87	-91	-6,0	22,8
7	Kiteytys + GLSS + R10	-8,342	-7,258	-88	-91	-6,1	5,7
8	Na ₂ SO ₄ -myynti	-2,289	-1,399	-24	-17	0,0	0,0
9	Na ₂ SO ₄ -myynti + R10	-8,700	-7,486	-91	-93	-30,8	5,1

Yhteenveto: Taloudellisuus

Taloudellisuus													
		Käyttö					Investointi (karkea arvio)						Takaisin-
Mene- telmä	Prosessit	Kemikaali- säästöt k€/year	BME-sähkön- kulutus k€/year	Membraani- kustannus k€/year	Käyttö- kust.(15 %) k€/year	Yhteensä k€/year	BME M€	GLSS M€	R10 M€	Leach M€	Cryst M€	Summa M€	maksuaika arvio, vuotta
1	BME	1920	-456	-936	-375	153	2,5					2,5	16,3
2	BME	5431	-1074	-2208	-600	1549	4					4	2,6
3	BME	7351	-1530	-3145	-675	2001	4,5					4,5	2,2
4	BME + GLSS	5100	-458	-940	-990	2712	2,5	4,1				6,6	2,4
5	BME + GLSS + R10	5664	-458	-940	-1080	3186	2,5	4,1	0,6			7,2	2,3
6	Uutto + GLSS + R10	4236	0	0	-885	3351		4,1	0,6	1,2		5,9	1,8
7	Kiteytys + GLSS + R10	4287	0	0	-1005	3282		4,1	0,6		2	6,7	2,0
8	Na2SO4-myynti	418	0	0	?	418 + ?					?	?	?
9	Na2SO4-myynti + R10	2274	0	0	?	2274 + ?			0,6		?	0,6 + ?	?

LIITE 12
LTR: Syöttövesipumppaus,
LUT – alustava raportti 10.11.2013

LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Technology

Department of Energy Technology

Master's Thesis

Bahnam Zakri

**OPTIMAL DESIGN OF BOILER FEED WATER PUMPING
SYSTEM:
SIMULATION AND TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS IN
VARIABLE LOAD**

Examiner: Professor, D.Sc. Esa Vakkilainen
Docent, D.Sc. Juha Kaikko

Supervisor: Professor, D.Sc. Esa Vakkilainen

Lappeenranta, 2013

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

Faculty of Technology

Department of Energy Technology

Bahnam Zakri

Optimal Design of Boiler Feed Water Pumping System: Simulation and Techno-economic Analysis in Variable Load

Master's thesis

90 pages, 30 figures, 13 tables and 2 appendices

Examiners: Professor, D.Sc. Esa Vakkilainen

Docent, D.Sc. Juha Kaikko

Keywords: boiler feed water pump, energy efficiency, simulation, optimization, variable speed pumping, steam power plant

Boiler feed water pumps are among the most energy-intensive auxiliary units in steam boiler plants. While maintaining high availability and reliability has traditionally dominated the optimized design of these pumps, they are good candidates for enhancing the energy efficiency of the plant, from system design viewpoint. This study seeks to establish an algorithm to optimize the life cycle costs of the boiler feed water pumping system in a variable load scheme. Using MATLAB programming tool, a holistic mathematical model is built for analysis, computation, and optimization of various pumping systems, including single and multiple pumps in constant or variable speed. IPSEpro process simulation tool is then employed to study the performance of each pumping solution in a medium-sized power plant, using real load data of the plant in off-design operation. Using this approach, net electrical efficiency and carbon emissions of the plant in different loads is compared under the application of each pumping system.

ACKNOWLEDGEMENTS

The achievement of this study is the result of knowledge provided by teachers and lecturers in my entire study life, to whom I always thank. I would like to thank prof. Vakkilainen, the supervisor of this study, for his helpful comments, rich ideas, and continuous support. He is always quick in response and available to meet, which is valuable for a short-term, laborious research task.

There are many persons to whom I should thank for their contribution to this study. Many thanks to Juha Viholainen, he gave me good ideas and comments regarding pumping systems and their simulation in MATLAB. I also thank D.Sc. Juha Kaikko for teaching IPSEpro tool and other helps during studies. My sincere thanks are dedicated to D.Sc. Tommi Ekholm from VTT for dedicating time and helping me in performing optimization tasks. I should also state my appreciation to prof. Risto Lahdelma from Aalto University for accepting me in courses relevant to this topic and providing links to useful experts in this subject.

I should thank EFEU program at CLEEN Ltd. for supporting this study, as well as Lappeenranta University of Technology for providing funds. I also appreciate Edward Paro from Sulzer Pumps Finland and Jukka Tolvanen from ABB Finland for their efforts to provide information about pumping systems. I cannot finish my acknowledgements without remembering my colleagues and friends who provided a nice environment for doing the task at LUT.

I state my warm thanks to Khakpoor family, Lina Teir and her family for their help and supports during my stay in Finland. The biggest thanks belong to my family, particularly to my mother who has been always inspiring me for being hardworking and determined.

TABLE OF CONTENTS

ABSTRACT	ii
ACKNOWLEDGEMENTS	iii
TABLE OF CONTENTS	1
ABBREVIATION AND SYMBOLS	4
LIST OF TABLES	5
LIST OF FIGURES.....	6
1. INTRODUCTION.....	7
1.1. Background.....	8
1.2. Objectives and Scope of the Study	9
1.3. Outline of the Thesis.....	9
2. CENTRIFUGAL PUMPS	11
2.1. General Characteristics.....	11
2.2. Pump Hydraulics and Curves	12
2.2.1. Head and Capacity	12
2.2.2. Performance Curves.....	17
2.2.3. Power and Efficiency	19
2.2.4. Cavitation and NPSH.....	23
2.2.5. Specific Speed and Affinity Laws	25
2.3. Centrifugal Pump Types and Configurations	27
2.3.1. Impeller and Casing Types	27
2.3.2. Suction Methods	29
2.3.3. Multistage Pumps.....	29
3. PUMP SIZING AND ENERGY EFFICIENCY	30
3.1. System Head Curve	30
3.2. Pump Selection	32
3.2.1. General Considerations	32
3.2.2. Pump Speed Selection.....	32
3.2.3. Oversizing	34
3.3. Pump Control Methods.....	34

3.3.1. Throttling and Bypassing	34
3.3.2. On-Off Control.....	35
3.3.3. Adjustment of Impeller Diameter or Changing Stage Numbers.....	36
3.3.4. Speed Control and Variable Speed Pumping	36
3.4. Multiple Pump Systems.....	37
3.4.1. Parallel Operation	37
3.4.2. Operation in Series	38
3.5. Pump Drivers and Transmission Systems	39
3.5.1. Mechanical Drives and Heat Engines	39
3.5.2. Steam Driven Pumps.....	40
3.5.3. Electric Drives.....	40
3.5.4. Driver's Speed Control Methods	40
3.5.5. Coupling Methods.....	41
3.6 Energy Efficiency Considerations	41
3.6.1. Pump Life Cycle Costs	41
3.6.2. Energy Efficient Design of Pumping System	42
3.6.3. Variable Speed and Energy Efficiency	42
4. BOILER FEED WATER PUMPING SYSTEM.....	43
4.1. System Characteristics.....	43
4.1.1. Design Point.....	44
4.1.2. Availability and Reliability	46
4.1.3. Suitable Driver for BFP	47
4.1.4. BFP Standard Requirements	47
4.2. Boiler Feed water Flow and Pressure Control in Part Load	48
4.2.1. Constant Pressure Operation.....	49
4.2.2. Sliding Pressure Control	49
4.2.3. Effect of the Boiler Type on Pumping System	49
4.3. Optimal Design.....	51
4.3.1. System Based Approach	51
5. OPTIMAL DESIGN OF BOILER FEED WATER PUMPS.....	52
5.1. Input Data	52
5.1.1 Experimental Data of the Flow	52
5.1.2. Available Pump Alternatives	53

5.1.3. Price Data Acquisition and Estimation	56
5.2. Modeling and Optimization.....	57
5.2.1. General Assumptions	58
5.2.2. Boiler Head Demand (System Head).....	59
5.2.3. Optimization Problem	59
5.2.4. Cost Analysis	60
5.2.5. Motor Efficiency and VFD Performance	61
5.3. Scenario 1: Single Pump Optimization.....	62
5.3.1. Problem Definition.....	63
5.3.2. Results and Discussion.....	64
5.4 Scenario 2: Multiple Pumps Optimization	70
5.4.1. Problem Definition.....	70
5.4.2. Results and Discussion.....	73
5.4.3 Role of Booster Pump	75
5.5 Scenario 3: Optimization of Operation in Parallel	76
5.5.1. Model Construction in MATLAB.....	77
5.5.2. Results and Discussion.....	77
6. SIMULATION IN MEDIUM-SIZE POWER PLANT.....	79
6.1. Case Study: Medium-size Power Plant.....	79
6.1.1. Fuel Composition.....	79
6.1.2. Unit Parameters	80
6.2. Modeling of Power Plant in IPSEpro	80
6.2.1. Building New Model for Pump Part Load Operation	81
6.3. Simulation of BFP Solutions in Power Plant.....	82
6.3.1. Plant Output and Emissions	83
7. CONCLUSION AND RECOMMENDATION	84
REFERENCES	87
APPENDIX	91

ABBREVIATION

aux	auxiliary
ASD	adjustable speed drive
bd	blowdown
BEP	best efficiency point
BFP	boiler feed water pump
BFPS	boiler feed water pumping system
BHP	brake horsepower
CHP	combined heat and power
CPI	consumer price index
CSP	constant speed pump/pumping
daf	dry-ash-free basis
desup	desuperheating
ECO	economizer
EN	European Standard
FWH	Feed water heater
gpm	(US) gallon per minute
HP	high pressure
hp	horsepower
LHV	lower heating value
LP	linear programming (linear optimization)
MILP	mixed integer linear programming
ms	multistage (pump)
NPSH	net positive suction head
NPSHa	net positive suction head available
NPSHr	net positive suction head required
NPV	net present value
SH	superheater
TH	total head
USCS	United States Customary System
VFD	variable frequency drive
VSD	variable speed drive
VSED	variable speed electric drive
VSP	variable speed pump/pumping
WHP	water horsepower

SYMBOLS

g	gravity acceleration [m/s^2]
H_f	friction head loss [Pa]
$H_{f,p}$	pipng friction head loss [Pa]
$H_{f,vf}$	valve/fitting friction head loss [Pa]
$h_{f,l}$	relative head loss [-]
K	valve/fitting resistant coefficient [-]
N	rotational speed [rpm]
n_q	pump specific speed [-]
n_s	suction specific speed [-]
P	power [W]
P	pressure[Pa]
Q	flow rate [m^3/s]
r	discount/interest rate [%]
$s.g$	specific gravity[-]
V	velocity [m/s]
Z	elevation [m]
η	efficiency [%]

LIST OF TABLES

Table 5.1 Pump models and their head and power curves	56
Table 5.2 Price estimation for basic pumps and multistage pumps	58
Table 5.3 Initial design point of the system and requirements of EN standard	60
Table 5.4 Input data for cost calculations	62
Table 5.5 Results of the calculations for pump 5 in CSP and VSP	66
Table 5.6 Energy and total costs for 6 pumps in constant and variable speed	67
Table 5.7 Optimizing pump stage number for variable speed	70
Table 5.8 Performance characteristics of three booster pumps	71
Table 5.9 Results of the calculations for pump 7 in CSP and VSP	75
Table 5.10 Optimizing pump numbers in for constant and variable speed	76
Table 6.1 Fuel characteristics of CHP plant	80
Table 6.2 Equipment parameters of CHP plant	82
Table 6.3 CHP plant performance in part load for constant/variable speed	84

LIST OF FIGURES

Figure 2.1 Main components of a centrifugal pump	11
Figure 2.2 Head-capacity envelope in for a typical centrifugal pump	18
Figure 2.3 Pump performance curves for a single diameter size	22
Figure 2.4 NPSH as a function of flow, and possible occurrence of cavitation	25
Figure 2.5 Change in performance curves and BEP point based on affinity laws	27
Figure 2.6 Single volute (left) and double volute (right) pump casing	28
Figure 3.1 System head components and intersection with pump head curve	30
Figure 3.2 Throttling the pump discharge and corresponding power loss	35
Figure 3.3 Changing the pump's speed and associated power saving	37
Figure 3.4 Parallel pumping system (two identical units)	38
Figure 3.5 Series operation of two identical pumps	39
Figure 3.6 Life cycle costs for a typical medium-sized industrial pump	42
Figure 4.1 Radially-split barrel-casing multistage boiler feed pump	43
Figure 4.2 Typical boiler feed water system	44
Figure 4.3 Head components of the boiler feed water pump (BFP)	46
Figure 4.4 Selection of the single BFP with safety margins and EN standard	48
Figure 4.5 Flow and pressure control system in a drum boiler	50
Figure 5.1 Annual load variation in a boiler plant	52
Figure 5.2 Load duration curve and load duty cycle	53
Figure 5.3 Pump data for a tentative operating point	54
Figure 5.4 Performance curves for one stage of each pump	56
Figure 5.5 Relation of motor efficiency with motor load factor	62
Figure 5.6 VFD factor based on change in frequency	63
Figure 5.7 Booster pump characteristics	64
Figure 5.8 BFP head curves and system demand curve after booster pump	69
Figure 5.9 Efficiency curve for six different pumps	69
Figure 5.10 Boiler pumps in parallel, booster pump, and system requirements	77
Figure 5.11 Determination of control strategy for parallel operation	79
Figure 6.1 Simplified layout of CHP plant	81
Figure 6.2 Input panel of pump model built for simulation of variable load	83

1. INTRODUCTION

Pumping systems account for 20% of the world's electricity consumption and up to half of the energy use in some industrial plants [1]. In steam power plants, the electrical energy consumed by the boiler feed water pump (BFP) is approximately 2 to 5% of the total generated electricity, up to several megawatts based on the plant size [2]. Optimized selection and control of BFPs can reduce their energy consumption resulting in higher net energy efficiency and less carbon emissions for the steam generating plants. However, there are several challenges in mitigation of energy losses of BFPs.

Boiler feed water pumping system (BFPS) is truly considered the heart of the steam generating plants. Since any failure or service outage results in heavy production losses, reliability and availability of BFPS must be carefully ensured. Pump engineers therefore tend to calculate and design the BFPS more conservatively to respond the probable future increases in the duty. Not only pump engineers, boiler standards also require relatively high safety margins that must be covered by the selected BFP, resulting in oversizing of the system. Moreover, the increasing use of intermittent renewable energy sources in power systems has imposed more load fluctuations to the central power stations. It further leads the BFPS to the part load operation, relatively far from the initial design point.

To address the mentioned challenges, the BFPS should be optimally designed for the entire life cycle. The optimization can be performed for the energy costs or more precisely for the total life cycle costs (LCC). Having the load pattern of the plant on a yearly basis can contribute the optimized selection of the new BFP when the existing system is retrofitted or replaced. In this study, the BFPS is optimally designed for a medium-size steam power plant, benefiting from the actual load data of an operating plant in Finland.

In the first scenario, a single constant-speed BFP is compared with variable speed and multiple pump alternatives to examine the LCC for each design. Next, a BFPS is examined to achieve the optimized control strategy for the given load regime in operation. The system comprises a booster pump and two identical parallel BFPs. MATLAB programming tool is used for building the mathematical model and optimization of the various pumping systems. To monitor the performance of the

steam power plant using each BFPS, the whole plant is modeled and simulated with IPSEpro simulation tool. Since some of the power losses in BFPs are absorbed by the pumped water in terms of heat, it affects the net energy efficiency of the plant in each pumping system. Having whole the plant simulated, such influences can be more precisely monitored. The empirical part of this study is limited to constant pressure drum boilers while sliding pressure is addressed in the theoretical part.

1.1. Background

Ever-rising energy prices and more stringent environmental regulations are strong motives to enhance the energy efficiency of the steam generating plants and reduction of in-house energy consumption. If not the most, BFPs are among the most energy consuming auxiliary units in boiler plants. BFPs are used to maintain the desirable boiler pressure and consequently the outgoing live steam pressure. Any fluctuation in load results in change in boiler pressure. It deviates the pump's operating point from the initial design point. To respond the load changes, the discharge pressure of the BFPs are traditionally regulated by a throttling valve or bypassing a share of the outlet stream. Using such approaches introduces significant losses in the system resulting in energy waste and faster wearing of the pump itself.

To reduce the losses, the operating point of the pump should be moved towards operating point of the system, for instance, by reduction of pump's rotational speed. Though the use of variable speed pumping (VSP) is not a new approach, the recent technological advancements in variable (adjustable) speed electric drives (VSED, ASD or simply VSD) has offered more economical achievements in VSP. In VSP systems, the reduction in driver's speed results in decrease in pump speed offering power savings in lower loads. While VSD technology has proved to be an economic option for low static head pumping systems, yet its usage in pumping applications with relatively high static head should be studied for each case [3].

BFPs are characterized for high static heads. However, continuous operation in part load and relatively high number of working hours offers further examination of VSP in BFPs. This study seeks to address this question. Though there is good literature in VSP in pumping stations and closed systems, yet the application of variable speed in BFPS and optimization of the whole system based on variable load data is not a properly covered topic.

1.2. Objectives and Scope of the Study

In this thesis, the author strives to find a theoretically defensible and practically acceptable approach for optimal design of the BFPS. Here, optimization objective is minimizing the life cycle costs of the BFPS, but minimization of energy consumption is also covered. Optimization is examined in two different steps: “selection” and “operating control”. First, BFPS is optimally selected among a set of available alternatives based on the available load data. In this approach, selection of a specific pump from a set of proposed BFPs is one criterion. Then, the number of main pumps in parallel, the stage number of each pump, and the best option among different available booster pumps are also examined. Based on “system design” concept, the optimized solution is determined for constant and variable speed schemes.

In the second optimization practice, the selected system is examined to find the optimized controlling strategy when two identical BFPs are in parallel. It means finding the best plan for running one or two pumps with constant or variable speed in different loads. In this section, optimization based on the energy efficiency of the BFPs is also briefly covered. However, the study remains limited to two identical pumps in this part to avoid complexity and clutter.

The monitoring of the performance of the each selected BFPS in a real power plant is another objective in this study. The application of BFPs in a thermal cycle of a combined heat and power (CHP) plant is also important in study of the total output of the plant in different loads. To do so, a medium-sized constant-pressure drum boiler plant is modeled and simulated in IPSEpro simulation environment. Using IPSEpro simulation tool, the net energy efficiency of the plant and turbine heat rate are determined under each pumping system. Moreover, the CO₂ emissions of the CHP plant are also determined for a biomass-fueled boiler.

1.3. Outline of the Thesis

Following the introduction in the first chapter, the basics of centrifugal pumps and their associated topics are reviewed in the second chapter. The focus is merely given to the topics related to the hydraulic performance characteristics rather than pump’s configuration and fluid dynamics. The required literature to understand the methods for calculation of main features of the pump, like power and efficiency, is also

introduced. At the end of this chapter, a brief review of the pump configuration is added to give the general understanding of the typical BFP's configuration.

In chapter 3, the selection criteria and sizing of the centrifugal pumps is discussed. The attention is mostly paid to the variables related to system design and more specifically for boiler applications. System head curve and pumping control strategies for maintaining the system requirements in different load is also reviewed. The application of multiple pumps and their influence on the pumping output, as well as different pumping drives and transmission devices are studied in this chapter. LCC analysis and energy efficiency considerations are other parts of this chapter to facilitate the reader with required knowledge in study of life cycle or energy optimization in pumping systems.

Chapter 4 directly deals with BFPs, from system characteristics to relevant standards and driving options. The main parameters in determination of the operating point of the BFP are examined. The difference in pressure regulating between two major boiler types is adequately discussed, i.e. sliding pressure in once-through boilers and constant pressure in drum boilers. Since some of the topics are generally reviewed in the previous chapters, the goal is to highlight the main differences of the BFPS from the others, not to discuss them in details. At the end, a brief explanation of the system based approach is given and influential factors in study of a BFPS are reviewed.

The empirical part of the thesis is introduced in chapter 5. After a short discussion of the optimization problem, different scenarios in optimal design of BFPS are examined. Selection of one single unit from a set of alternatives is the first scenario. Next, the number of multiple BFPs is optimized to minimize the LCC. Then, optimization is performed to determine the best strategy in operational control of two identical parallel pumps in different loads. Finally, different optimized solutions are simulated in a real power plant model to compare the outcome of the plant in each scenario. Last but not the least, results are discussed and a conclusion is drawn in the last chapter, chapter 6.

2. CENTRIFUGAL PUMPS

Pumps are divided to two major categories based on the principle by which energy is transferred to the liquid, positive displacement and kinetic. In positive displacement pumps, energy is periodically transferred to movable volumes of the liquid by direct application of a forcing device like reciprocating piston. This type of the energy addition directly increases the pressure of the liquid at the discharge line to the designated level. Reciprocating and rotary pumps are the most common sub-categories in the category of positive displacement pumps [4].

In kinetic pumps, energy from the pump driver is used to continuously increase the velocity of the liquid. Then, reduction in the velocity leads to a pressure increase as the goal of pumping process, based on the Bernoulli's equation. For the major part, kinetic pumps consist of centrifugal pumps besides several special types, e.g. regenerative turbines and special effect pumps. This second division is made based on the means by which the energy addition is applied. As the centrifugal pumps are the most common pump types, particularly for BFP applications, they are examined more detailed in this chapter. The other pump types are not further considered to avoid unnecessary details.

2.1. General Characteristics

In general, a centrifugal pump consists of three main components: shaft, impeller connected and rotated by the shaft, and casing (Fig.2.1).

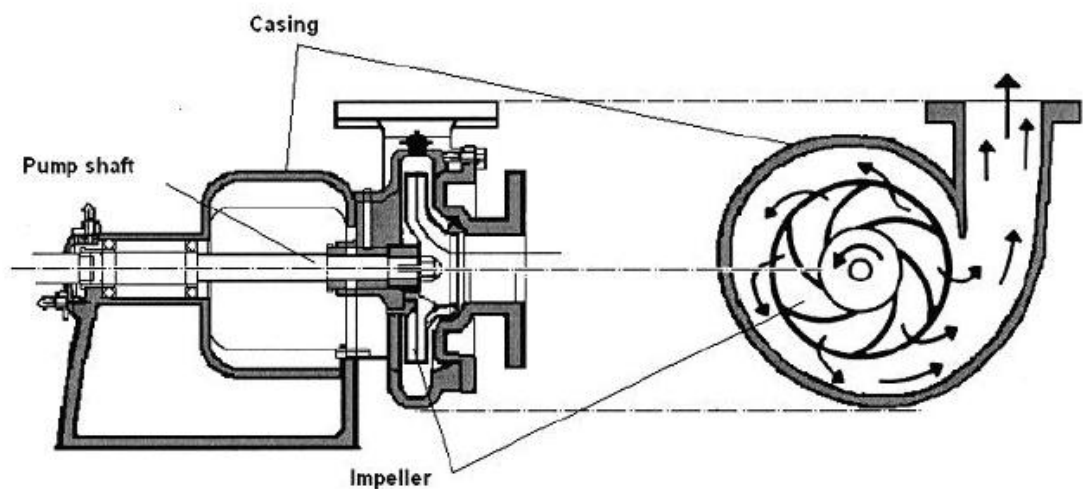


Figure 2.1 Main components of a centrifugal pump [5]

The impeller is attached to the shaft and liquid is forcing to move towards the discharge side by the rotation of the impeller. The consequent void (reduced pressure area) at the impeller inlet is then filled by the higher pressure at the pump casing inlet (suction pressure). Once the liquid enters the pump, it is directed to the impeller vanes resulting in velocity increase. Leaving the impeller outlet vane tip, the liquid reaches the maximum velocity. The kinetic energy of this velocity rise is transformed into pressure increase through a diffusion process occurring in the pump casing (Bernoulli Equation) [6]. The expansion in cross-sectional area of the casing ensures this pressure increase.

2.2. Pump Hydraulics and Curves

In this section, the basics of pump hydraulics are briefly discussed to provide adequate literature for the following parts. The focus is given to practical subjects related to the main requirements for sizing and selection of pumping systems, particularly centrifugal pumps. Performance curves are then introduced and the usage of each is briefly discussed.

2.2.1. Head and Capacity

Pumping systems are used to increase the pressure or head of a liquid flow. Head or total head (TH), usually expressed in meters or feet, is a differential pressure that is produced by pumping operation. The amount of produced head by a specific pump is constant at a certain flow rate, if the pump speed and impeller size remains intact. In other words, the produced head is a function of flow rate, or capacity, and varies with the flow rate handled by the pump. Pump capacity is usually expressed in liter per second (l/s), cubic meter per hour (m³/hr), or for the larger pumps cubic meter per second (m³/s). The equivalent in US customary system (USCS), depending on the pump size, is gallon per minutes (gpm), cubic feet per minute (cfm), or cubic meter per second (cfs).

2.2.1.1. Head

In general, based on the Bernoulli's Equation, the head developed by a pumping plant can be expressed as:

$$H_{pump} = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho g} + Z_{out} - Z_{in} + \frac{V_{out}^2 - V_{in}^2}{2g} \quad (2.1)$$

H_{pump} = head developed by pump [m]

P_{in} , P_{out} = inlet and outlet pressure of the pump [Pa]

ρ = liquid density [kg/m^3]

g = acceleration of gravity [m/s^2]

Z_{in} , Z_{out} = elevation at suction and discharge [m]

V_{in} , V_{out} = liquid velocity at suction and discharge of the pump [m/s]

In principle, a centrifugal pump increases the flow velocity and then converts some of this velocity into pressure through a diffusion process. The amount of developed head by the pump is related to the velocity:

$$H = \frac{V_{im}^2}{2g} \quad (2.2)$$

H = head [m]

V_{im} = velocity at the tip of the impeller [m/s]

g = gravity acceleration [m/s^2]

The impeller diameter and the velocity at the tip of the impeller are related:

$$V_{im} = r\omega \quad (2.3)$$

V_{im} = velocity at the tip of the impeller [m/s]

ω = rotational speed [rad.s^{-1}]

r = impeller radius [m]

Comparing the equation 2.2 and 2.3, the linear velocity can be eliminated for head:

$$H = \frac{(r\omega)^2}{2g} \quad (2.4)$$

Based on the equation 2.4, the head developed by the pump is merely a parabolic function of rpm and impeller diameter. The other important fact is that the head (expressed in units of meters or feet) is not a function of specific gravity of the pumped liquid. It means a pump moving a liquid up to a static distance of 100 m always has a head of 100 m, regardless of the gravity of pumped liquid. If liquids with different densities would be pumped by one pump with certain amount of head,

different end pressures and power consumption for each liquid are observed. The relationship between pressure and head can be expressed as follows:

$$P = \rho g H \quad (2.5)$$

P = pressure gauge at pump discharge [Pa]

H = head [m]

ρ = fluid density [kg/m^3]

g = acceleration gravity [m/s^2]

Therefore, it is important to convert the pressure units to the corresponding units of head (meters or feet etc.) before dealing with pump curves. It should be reminded that although head is theoretically specific energy and pressure is force over an area, they can be interchangeable terms in the gravitational field of the earth. As pumping systems studied in this work are near the earth surface, these terms are used interchangeably hereafter.

In order to calculate the suitable size of a centrifugal pump for a specific application, all the components existing in the system that introduce demand for head should be considered. In general, there are four different components for the system head referring to the liquid pressure, including:

1. Elevation head (H_z)
2. Pressure head (H_p)
3. Friction head (H_f)
4. Velocity head (H_v)

It is important to remember that the definition and name of these terms is slightly different in literature. In this study, the usage of these terms is based on the definition provided in this section. The sum of these four components results in total head (H_{tot}), which is the head that pump should overcome.

$$H_{tot} = H_z + H_p + H_f + H_v \quad [m] \quad (2.6)$$

A brief explanation of each component is provided in the following sections.

2.2.1.2. Elevation head

Elevation head is the total elevation difference that the liquid must be pumped. In general, elevation head is normally calculated by difference from the surface level of the liquid at the supply vessel to the upper level in the vessel where the liquid is pumping to. For instance, for a boiler pumping system, this head is difference in elevation of water surface from deaerator to the drum water level. In calculation of elevation head, the location of pump is not influential in the required head. If the supply vessel would be in a higher level than pump, there is a *suction head* in the system while having liquid level below the pump centerline introduces *suction lift* to the system [6]. If the pressure value is given by reading of gauge pressures at two different points in the suction and discharge piping of the pump, the elevation head is then the elevation difference between the two gauges, not the liquid levels at supply and delivery vessels.

2.2.1.3. Pressure head

Pressure head is the head needed for maintaining a pressure at upstream of the pump or overcome a vacuum at downstream. Pressure head is usually measured as the difference between the liquid surface pressure in the supply and delivery vessels. There is no pressure head in systems in which the pressure of supply and delivery vessels is the same, e.g. two atmospheric tanks. In this case, the term of pressure head is not considered in calculation of total head (eq.2.6). There is also no pressure head in closed loop single-phase systems without taking work out of the liquid, e.g. water circulating systems. In case suction vessel would be under vacuum conditions, the equivalent amount of vacuum in gauge pressure must be added to the delivery vessel gauge pressure, both converted in meters, in calculation of total head. It should be noted that pressure head is usually the main term in determining BFP total head. The combination of elevation head and pressure head is usually known as *static head*.

2.2.1.4. Friction head

Friction head is equal to the friction losses in the piping, fittings and valves that should be overcome by the operation of pump in the system. In a piping system, friction losses are related to the square of the velocity of the pumped liquid in a fully

turbulent flow. There is a direct correlation between piping size and friction head loss. Smaller size of the pipe, valves, and fittings for a specific flow rate, introduces larger friction head loss for the system though the piping cost is lower. In other words, by reducing the costs of piping system by means of designing smaller sizes, the cost of pumping system including pump, driver and accessories increases due to the rise in friction head loss. It also increases lifetime energy costs of the pumping systems for the larger size. By reducing some complicated formulae to tables and charts friction losses can be calculated for pipes, valves and fittings. Using these tables for a specific piping material and size, the friction head loss can be calculated through a piping system including pipe, valves and fittings:

$$H_f = H_{f,p} + H_{f,vf} \quad (2.7)$$

$$H_{f,p} = h_{f,l} \times \frac{L}{l} \quad (2.8)$$

$$H_{f,vf} = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.9)$$

H_f = friction head loss [m]

$H_{f,p}$ = piping friction head loss [m]

$H_{f,vf}$ = valve/fitting friction head loss [m]

$h_{f,l}$ = head loss coefficient per l units of piping linear length (pipe table)

L = piping length [m]

K = valve/fitting resistant coefficient given by the relevant chart or table [-]

$\frac{V^2}{2g}$ = velocity head given in the pipe table [m]

The total friction head loss is determined by summing up of all the friction losses of piping components in discharge and suction of the pump. It should be reminded that liquid flow rate and pipe size are two determining factors in calculation of friction losses. Friction losses are important to consider as they can cause head losses in suction line resulting in cavitation (further discussion in section 2.2.4). In boiler pumping systems, friction losses are not very large compared to pressure and static head but subject to study. The amount of friction losses increases in higher flow rates (higher velocities) resulting in a slight increase in boiler system head.

2.2.1.5. Velocity head

Velocity head is the change in the energy of a liquid in motion as a result of its velocity. The amount of velocity head is given for different pipe materials for different flow rates and diameter sizes. There are always two set points in suction and discharge side for calculation of different components of total head. Velocity head can be included in the total head calculations if the pressure head requirements are introduced as gauge readings at some points in the suction and discharge piping system (having velocity at set points). It appears in the same format expressed in equation 2.2. If set points for calculation of head for a system are chosen from the liquid level in supply and delivery vessels, the velocity head is zero as there is no velocity in these vessels.

In other cases in which velocity head component should be included in the head calculations, it can be expressed as the change in velocity head from suction to discharge of the pump. These values can be directly read from pipe tables. As the suction pipe size is typically bigger than discharge, velocity head is smaller, but not significantly. In boiler application, velocity head can be neglected if the head calculations are performed between deaerator and drum vessels (zero velocity).

2.2.1.6. Capacity

The required capacity at which the pump operates is normally dictated by the system requirements in which the pump is working. A specific process system is designed for a particular flow rate to meet its target. For instance, the steam production rate in the boiler, which is dictated by turbo-generator, specifies the amount of feed water needed for continuous operation. Despite of design operating point of the pump, it is usually possible to arrive at different flow rates dictated by the process nature. As mentioned before, since the pump head is dependent on its capacity, increase in the capacity results in lower heads and vice versa (Fig.2.2). This relationship is further discussed in next sections.

2.2.2. Performance Curves

The characteristic head–capacity curve shown in figure 2.2 is considered for a centrifugal pump operating at constant speed suitable for the pumping application. However, centrifugal pumps are usually capable to operate in a wider range of head

and flow, even at a constant speed. This is possible by trimming the impeller diameter from its maximum size to a predefined minimum size, without modifying the pump casing and configuration. The minimum trim size is defined and suggested by the manufacturer. A centrifugal pump produces a group of head-capacity performance curves for a specific pump speed based on impeller diameter size (figure 2.2).

The upper curve in this envelope indicates the maximum diameter size that fit into the pump casing and the lower boundary represents the minimum impeller size offered by the pump manufacturer for economical operation of this particular pump. The right end of each curve shows the maximum flow that can be handled with this pump while the left end of the curves indicate the lowest possible flow for having pump in operation, called *shutoff* point of the pump. Based on the suction and discharge size, maximum impeller diameter and pump speed, manufacturers usually publish a set of envelopes for a particular pump configuration.

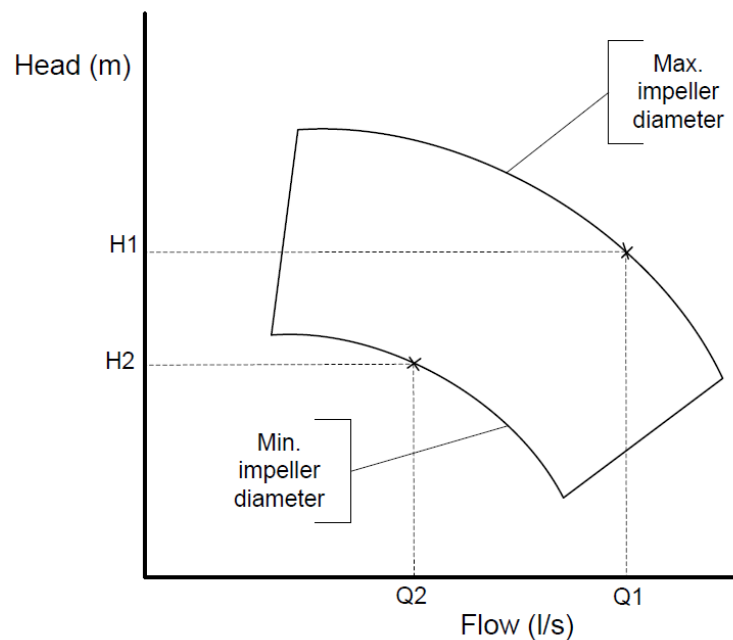


Figure 2.2 Head-capacity envelope in constant speed for a typical centrifugal pump

For instance, the pump illustrated in figure 2.2 is rated for operating point Q_1 and H_1 but by trimming the impeller the same pump can be used for new set point (Q_2 and H_2). The family of envelopes covers a wider range of head and flow than that of illustrated in figure 2.2. The family curves are a group of curves based on different sizes of suction, discharge, and impeller diameter in a constant speed for a particular

pump. Depending on flow-capacity requirements and size of the piping several configuration might be capable to meet the system requirements. Other selection criteria that are discussed in following sections decide that which of the configurations suits the system best.

2.2.3. Power and Efficiency

Centrifugal pumps convert the received power from the shaft into kinetic energy to increase the liquid velocity and subsequently provide adequate head. True understanding of this energy transfer process and different losses helps in proper selection of pump driver and evaluation of energy efficiency of the pumping system. Pump manufacturers provide horsepower (or simply power) data of the pump through performance curves. This power is called *brake horsepower* (BHP) and refers to the actual amount of power required by pump to maintain a certain amount of head and flow. BHP or shaft power is input power to the pump or output power from the driver. It is determined by some tests by the manufacturer and is given as a function of capacity in pump performance curves for the whole range of flow handled by a particular pump.

There are some losses in the power transfer by the pump resulting in decline in power output of the pump. Output power of the pump, also called *water horsepower* (WHP), can be calculated as follows:

$$P_{out} = \rho g Q H \quad (2.10)$$

P_{out} = output power of the pump (WHP) [W]

Q = flow rate [m^3/s]

H = head [Pa]

ρ = fluid density [kg/m^3]

Therefore, the total efficiency of the pump (η_{pump}) can be reduced as:

$$\eta_{pump} = \frac{\text{output power}}{\text{input power}} = \frac{P_{out}}{P_{shaft}} = \frac{\text{water horsepower}}{\text{brake horsepower}} = \frac{WHP}{BHP} \quad (2.11)$$

The data of power and efficiency of a particular pump is usually given by pump performance curves as a function of capacity (Fig. 2.4), though the equations above can be used for direct calculation based on head and capacity over the pump

operating time. There is another power related terms in pump terminology indicating the performance of pump driver called *wire-to-water horsepower*. This is the net power gained from pump and its driver to the liquid (water). If the efficiency of driver (η_{driver} , including transmission system) is known, then the net power consumption of the pumping system can be determined. For example, for an electric driver, P_{in} must be taken from available electricity source to raise the liquid head as of WHP.

$$\eta_{driver} = \frac{\text{output power to pump}}{\text{input power to driver}} = \frac{P_{shaft}}{P_{in}} \quad (2.12)$$

However, it should be reminded that in case of using other auxiliary devices to transfer power (e.g. variable speed device or gear box etc), wire-to-water power (P_{in}) is determined by combination of the efficiency of all the intermediate devices replacing(η_{driver}) in equation 2.12.

2.2.3.1. Energy losses in pump

The power losses through the energy transfer from shaft to the liquid by a centrifugal pump can be summarized in four groups:

A. Hydraulic losses:

They are sum of the losses due to friction in liquid passing the impeller and volute. Losses due to continuous change of the liquid direction in the pump are also considered in this category.

B. Volumetric losses:

The leakage of liquid from the discharge part back to the suction side is a source of loss in a centrifugal pump. The leaked liquid goes through the wear rings in a closed impeller pump while through the front of vanes in open impeller ones. Having pump in operation over a long time, internal clearances are may be opened due to erosion or wear resulting in increase in volumetric losses.

C. Mechanical losses

Mechanical losses are typical frictional losses in moving parts of the machine, e.g. between bearings with seals.

D. Disk friction losses and frictional losses

Rotation of impeller (rotating disk) in close proximity to the casing (fixed disk) results in disk friction losses (P_{df}). Frictional losses in the balancing device (disc or piston) are other source of power loss (P_f).

The pump total efficiency can be explained as the combination of the efficiency of pump in dealing with these losses:

$$\eta_{pump} = \eta_{hyd} \times \eta_{vol} \times \left(\eta_m - \frac{P_{df} + P_f}{P_{in}} \right) \quad (2.13)$$

η_{hyd} = hydraulic efficiency [-]

η_{vol} = volumetric efficiency [-]

η_m = mechanical efficiency [-]

P_{in} = pump input power [W]

P_{df} and P_f = disc friction and frictional losses [W]

To avoid complexity, more detailed explanation of each component of equation 2.13 can be studied in [4], [7], chapter 1, and [8]. Based on the pump configuration and complexity, some other terms can be added or combined in the terms of the equation 2.13. In pumping system design practices, it is more straightforward to divide the losses to two main parts, mechanical losses and other losses, which lead to an increase in liquid's temperature, called *internal losses*. Therefore, the efficiency of the pump can be reduced as:

$$\eta_{pump} = \eta_m \times \eta_i \quad (2.14)$$

η_m = mechanical efficiency

η_i = internal efficiency

The main idea of this section was to introduce the main sources of power loss in centrifugal pumps for better understanding of their performance and selection criteria.

2.2.3.1 Best efficiency point (BEP)

Pump manufacturers introduce a set of performance curves for their products to provide required data for the user. In addition to head-flow curves for different

impeller diameters, pump efficiency, brake horsepower and required suction head is usually supported for a pump in a given speed. These curves for a centrifugal pump in single impeller size and fixed speed are illustrated in figure 2.3.

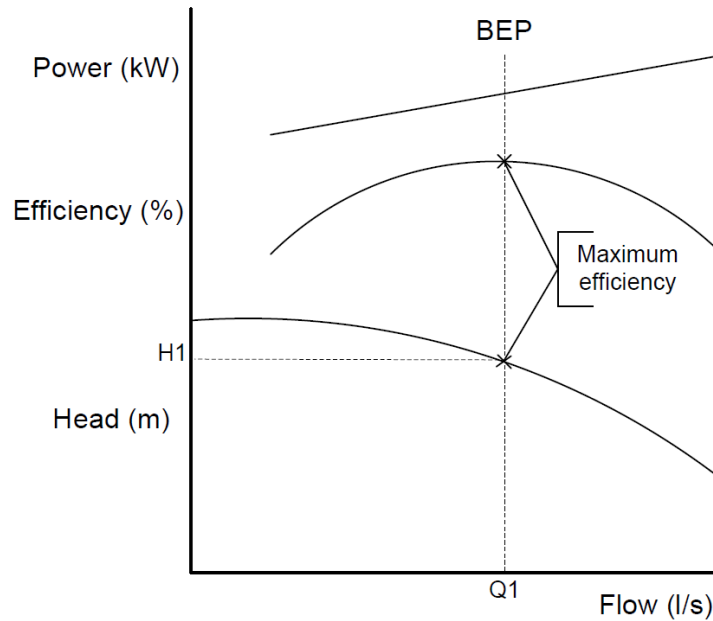


Figure 2.3 Pump performance curves for a single diameter size in constant speed

In a typical centrifugal pump, the head–flow diagram usually rises towards shutoff point developing lower amounts of flow in higher heads, and vice versa. The power curve is linearly rising as flow increases while the pump efficiency curve shows a maximum point in a parabolic behavior. Pump efficiency also varies with flow, reaching to a peak value at some intermediate point in flow regime known as the best efficiency point (BEP), then falling as flow develops. In other words, though the pump can develop higher flows or larger heads, the most energy efficient operating point of the pump remains in BEP, maintaining Q_1 and H_1 .

Having the pump operating in BEP not only reduces the energy consumption based on the pumped flow, but also decreases the maintenance costs caused by excessive radial loads [7]. BEP is the working point in which radial forces acting on the periphery of the impeller are minimal. This decreases the load on the shaft and radial bearing system preventing shaft deflection or mechanical seal and bearing unexpected failure. The far operation of the pump from BEP increases the risk of the above-mentioned symptoms, typically happening in low flows operation.

It should be reminded that the pump performance curves are typically supplied in ISO format, providing data for a set of impeller diameter sizes. In this case, efficiency and power are given in constant value curves in whole operating range supported in different impeller diameter sizes. Power is usually given in values available for commercial electric drives.

2.2.4. Cavitation and NPSH

In pumping a liquid, significant effort is devoted to understand the phenomenon of cavitation and preventing its occurrence. Cavitation happens when the liquid pressure during the pumping process falls below the vapor pressure at that temperature. It means having vapor bubbles mixed with liquid flow passing through the pump. In presence of pressure increase during the impeller vane, these bubbles implode at the same point resulting in erosion of the impeller, noise, vibration, and to the extreme extent failure of the device. Cavitation diminishes the hydraulic performance of the pump that can lead to incline in head and flow, known as *break away* [6], illustrated in figure 2.4.

The excessive vibration due to cavitation results in the failure of the seal and bearings of the pump. This is the most probable failure symptom of the cavitation and one of the reasons that offer a proper understanding of net positive suction head (NPSH) and cavitation in the pumping system design and usage. NPSH is the difference between total head and liquid vapor pressure at the pump inlet, defined by DIN 24260 [7]. In a pumping system, there are two definitions related to NPSH, called NPSH required and NPSH available.

2.2.4.1. NPSH_a

Available NPSH is defined by the plant characteristics in which the pump is operating. It is the head introduced at the pump suction above the liquid vapor pressure. NPSH_a is not dependant on the pump configuration and is calculated as follows [7]:

$$NPSH_a = \frac{P_e - P_v}{\rho \times g} + Z_e - Z_s + \frac{V_e^2}{2g} - H_{loss} \quad (2.15)$$

$NPSH_a$ = net positive suction head available [m]

P_e = absolute pressure on the fluid surface at supply vessel [Pa]

P_v = vapor pressure of the liquid at the pumping temperature [Pa]

Z_e = elevation of the liquid in supply vessel [m]

Z_s = elevation at the suction of the pump [m]

V_e = liquid mean velocity at intake vessel [m/s]

H_{loss} = head losses in suction piping [m]

NPSH_a is calculated by the pump engineer user then presented to the pump manufacturer as a part of the pump specification, besides head and flow etc. The higher the flow rate, the greater friction losses in the suction line resulting in lower NPSH_a at the pump inlet, while higher head is required (NPSH_r) due to more losses in the pump suction nozzle (Fig. 2.4).

2.2.4.1. NPSH_r

NPSH_r or net positive suction head required is the suction head needed at the impeller centerline over the vapor pressure of the liquid to avoid cavitation. NPSH_r is dependent on the pump inlet design, and is not related to the suction piping system. In other words, a centrifugal pump requires a certain pressure at the suction flange higher than the vapor pressure of the liquid at pumping temperature. Liquid encounters pressure losses entering the pump, caused by frictional effects as the liquid goes through the suction nozzle, before it reaches to the impeller vane where pressure increases again. NPSH_r is established by the pump manufacturer using special tests, and the value of NPSH_r is then illustrated on the pump performance curve as a function of pump capacity to be considered in pump selection (Fig. 2.4).

NPSH_r is sometimes shown in ISO format on the curve increasing at higher flow rates as the friction losses increase inside the pump inlet. For some pumps, NPSH_r is also higher in reduced impeller diameter sizes in an unchanged flow rate. Therefore, it should be considered in impeller diameter reductions that not to fall into the cavitation area. The quantitative value of NPSH that is obtained from the curves is given based on cavitation criteria in terms of percentage of head loss. For instance, NPSH₃ refers to the NPSH required for the pump in the cavitation condition resulting in 3% head drop. The calculation of available NPSH_a may be done in a more conservative manner considering safety margins to guarantee an adequate difference above the NPSH_r for a whole operating range of the pump over its life time.

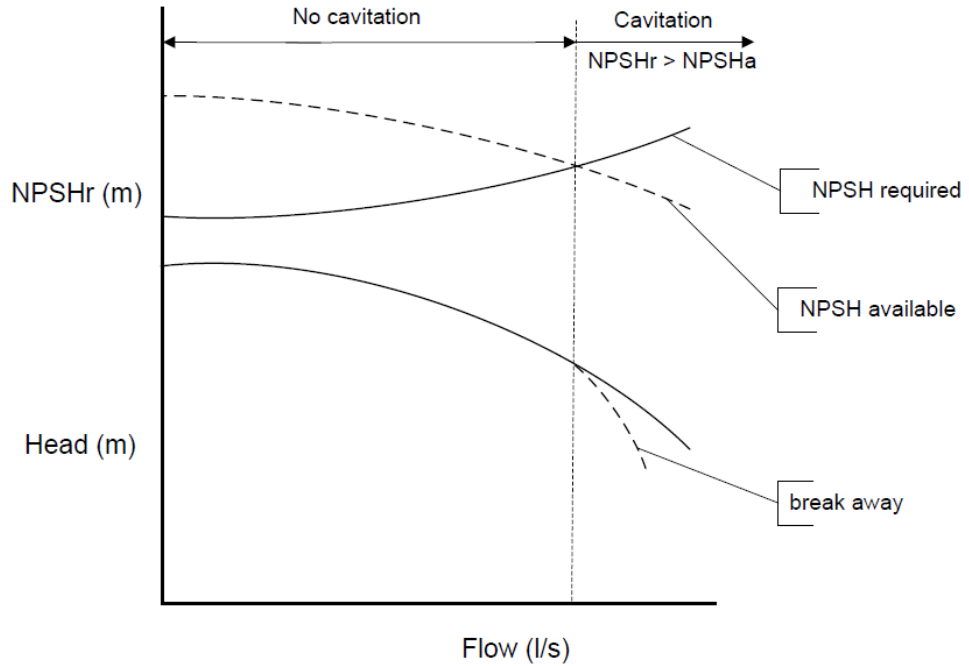


Figure 2.4 NPSH as a function of flow, and possible occurrence of cavitation

2.2.5. Specific Speed and Affinity Laws

Specific speed in pumping terminology is a dimensionless design index that is used by pump designers for describing the geometry of pump impellers and classifying their type. Specific speed for a particular pump provides information about the pump impellers shape, different performance curves for different shapes, and the variation in efficiency at the BEP for different centrifugal pumps [6]. This provides hints for the selection of best energy efficient pump for an application. Specific speed (n_q) is expressed as follows [7]:

$$n_q = N \times \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (2.16)$$

N = pump rotational speed [rpm]

Q = flow (flow per impeller eye for double-entry impellers) [m^3/s]

H = head (head per stage for multistage pumps) [m]

Specific speed is considered a dimensionless number that remains unchanged for a particular centrifugal pump through its operating range (different Q and H). It is calculated by equation 2.16, having rpm, capacity, and head at BEP picked from the

performance curves at full diameter. In other words, specific speed is an indicator for categorizing different pumps without being related to head and capacity at operating point. It is also a basis for the prediction of the pump performance at different speeds (affinity laws).

Based on the specific speed, centrifugal pumps can be categorized in three main groups. *Radial flow* pumps are low specific speed pumps (below 2000), which are known for low flow and high heads. They increase the head by radial movement of liquid from the shaft. High specific speed pumps (greater than 8000), known as *axial flow* pumps, are used for developing high flows in low heads. The intermediate region between these two categories is *mixed flow* pumps that have a combination of the other two's characteristics [6]. The slope and shape of the H-Q is also related to the specific speed, showing the steepest diagram for radial flow pumps while the flattest for axial flow pumps.

Based on the constant specific speed for a pump, the affinity laws can be derived. Affinity laws are used to predict the pump's behavior in speeds other than its nominal speed or different impeller diameters. Therefore, two sets of the rules can be derived of which the laws are as follows for rotational speed change:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.17)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (2.18)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (2.19)$$

In which, Q , N , H and P indicate pump's flow, rotational speed, head and shaft power, respectively. In second set of the laws, impeller diameter (D) can be used instead of speed (N). Equations 2.17-19 can be used for the calculation of head-capacity curves in different speeds. This is the method to predict the performance of the pump running in variable speed setting. However, it should be noted that the BEP of the pump at the new speed may change from the initial point (figure 2.5). By changing the pump's speed, the BEP efficiency does not change by value but shifting to a new head and capacity (Fig.2.5). The attention should be given to NPSH changes in varying the pump's speed.

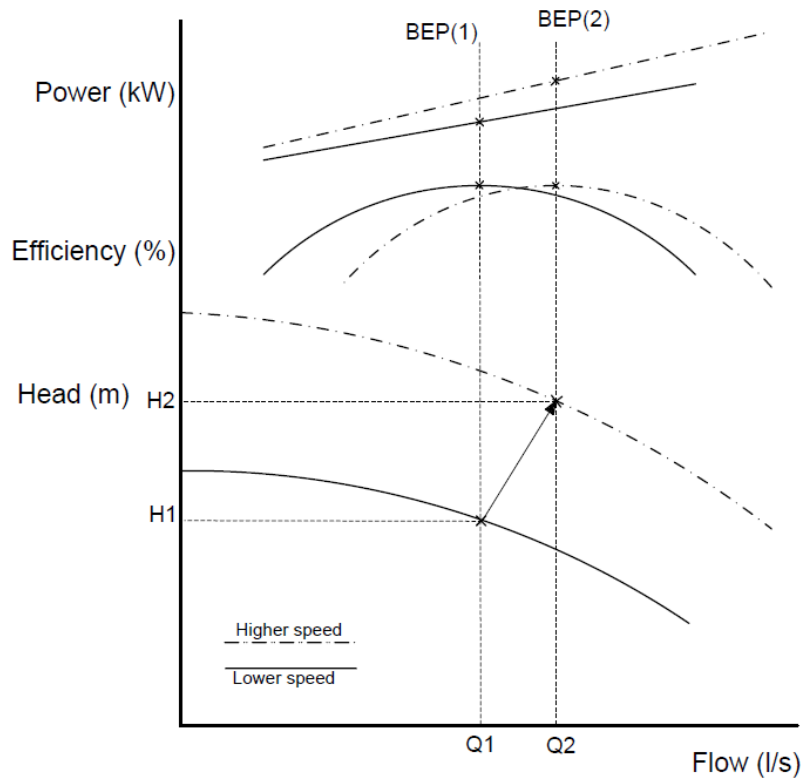


Figure 2.5 Change in performance curves and BEP point based on affinity laws

Some manufacturers offer the same relationship between NPSH and speed as expressed for head in equation 2.18, while others recommend lower powers for NPSH ratio, for example 1.5.

2.3. Centrifugal Pump Types and Configurations

There is an extensive number of configuration and mechanical features for centrifugal pumps that is beyond the scope of this study. Accordingly, it is the task of the pump user and supplier to choose the most suitable alternative for a particular application. In this section, some important definitions in pumping terminology regarding the pump's configuration are explained, without detailed technical discussions, to provide a basic knowledge about the terms used in consecutive chapters.

2.3.1. Impeller and Casing Types

In centrifugal pumps, impellers are divided to two major groups, *open* and *closed* [6]. The way that impeller vanes are seen from the suction side is the basis for this classification. Open impeller types are primarily suitable for pumping liquids that

contain solid particles. In closed impeller pumps, impeller vanes at the suction side are covered by a shroud and there is an axial-oriented hub directing liquid to the vane passes. Closed impeller pumps are suitable for relatively clean and noncorrosive liquids, high temperature pumping applications, and multi-stage pumps. In general, closed impeller pumps have higher efficiency and lower axial thrust- between 30% and 40% lower than open impeller [6].

The centrifugal pump casing can be *single volute* casing having one *cutwater* where the liquid is separated (Fig. 2.6). *Diffuser casing* is a more complicated casing including several flow passageways around the periphery of its impeller discharge. The liquid leaving impeller vanes enters the nearest flow path in the diffuser casing, rather than moving around the casing periphery in single volute casing. The main benefit of the diffuser casing configuration is the near balancing of radial forces that reduces shaft deflection and the need for a heavy-duty radial bearing system.

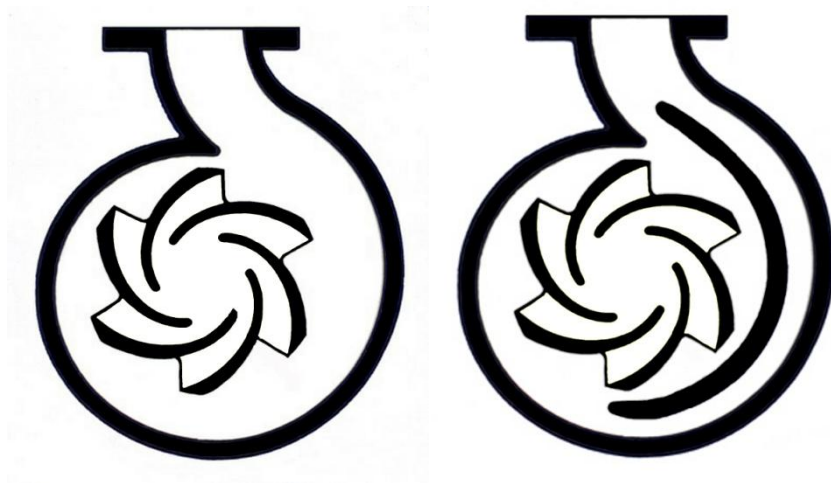


Figure 2.6 Single volute (left) and double volute (right) pump casing [9]

A combination of a single volute casing and a diffuser casing is a *double volute* casing (Fig.2.7). In double volute casing design, the volute is divided to two cutwaters resulting in lower radial loads. This casing is typically used for larger flow pumping applications allowing the use of smaller shaft and bearings. Pumps can be classified based on the assembly of their casing to axial split and radial split case pumps. In a *radial split case pump*, impellers and diffusers are joint together hold by a tube or rods. For heavier duties, like boiler feed water pumps, a special pump known as double barrel or double case is used to maintain high flow and heads.

2.3.2. Suction Methods

In terms of suction method, centrifugal pumps can be divided to single or double suction impellers. While in *single suction* impellers the liquid enters from one side of the impeller, in a *double suction* impeller liquid is received from both sides [6]. Double suction method is merely used with closed impellers and in conjunction with double volute casing, either as a single stage or the first stage of a multistage pump. The main advantage of double suction is lower, nearly zero, axial thrust as well as much lower NPSHr due to the presence of two flow paths at suction inlet. Hence, double suction impellers are more suitable for higher flows where the risk of NPSH related problems is higher.

End suction pumps are the most common type of centrifugal pumps receiving the liquid from the end and discharging it at the same side with a right angle from the shaft. *Closed-coupled* end suction pumps are directly linked to a motor eliminating pump's bearing system and common for low duty application. However, most of heavy duty, high temperature application benefit from *frame-mounted* end suction pumps, in which the motor and pump are separated but coupled with a shaft and bearing system. The latter is more suitable for industrial applications up to 1500 l/s capacity.

2.3.3. Multistage Pumps

Multistage pumps provide the highest head at the same speed by the use of multiple impellers operating in series. The liquid moves through the pump's case from each impeller to the following with an increase in head. Not only generating high heads, multistage pumps are known for higher efficiencies compared to single stage pumps providing the same duty. The design of the first stage can be different to maintain the NPSH requirements of the pump. Boiler feed water pumps are usually multistage pumps benefiting from barrel split case, closed impeller, double suction and double volute casing for relatively medium to large size applications.

3. PUMP SIZING AND ENERGY EFFICIENCY

The main performance characteristics of centrifugal pumps, including head-capacity relationship, were expressed and discussed in the previous chapter. In order to choose the most suitable pumping design for a particular application, the true understanding of the system behavior is also important. Pumps are selected to meet the requirements of the system in terms of head and capacity. The determination of system head curve is hence the first step in rating the pump. Pump selection criteria and related consideration for the fulfillment of the most energy efficient performance are other important issues that are discussed in this chapter. Variable speed pumping and multiple pumps are other topics covered in the following sections.

3.1. System Head Curve

System head curve is used to illustrate the head requirement of the system based on different flow rates [6]. System head consists of two major parts, static and dynamic components. In reference to the discussions in the previous chapter (sections 2.2.1.2-5), the static head represents the head requirements regardless the flow velocity and frictions in the piping system. Therefore, the static head, which consists of pressure and elevation head components, does not vary with flow fluctuations. *Dynamic head* or frictional head in reverse is totally a function of flow rate, starting from zero at shut-off point and increasing in higher capacities.

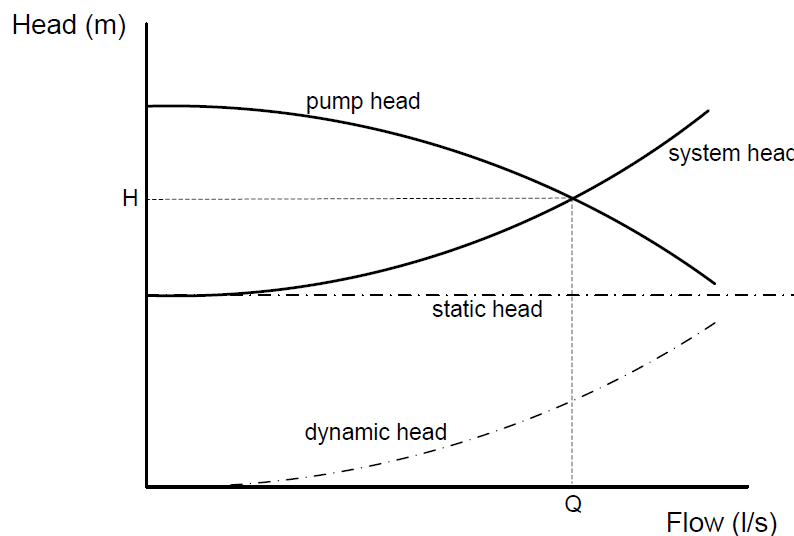


Figure 3.1 System head components and intersection with pump head curve

These two components of the system head curve and their combination is illustrated in figure 3.1.

In fact, the system head (H) is a parabolic function of capacity (Q) [10]:

$$H_{system} = H_{static} + H_{dynamic} = H_{static} + CQ^2 \quad (3.1)$$

In which, C is a constant value representing the terms producing dynamic head [10]:

$$C = \frac{f \frac{L}{d} + \sum K}{2gA^2} \quad (3.2)$$

L = piping length [m]

d = pipe diameter [m]

f = friction coefficient [-]

K = local head loss coefficient of fittings and valves [-]

g = gravitational acceleration [m/s^2]

A = pipe cross-sectional area [m^2]

Based on the equation 3.1, the higher the capacity, the more dynamic head of the system resulting in steeper system curve. Considering the system head curve and pump H-Q curve in figure 3.1, it should be noted there is one intersection between pump and system head curves occurring at design operating pump (Q , H). In case of any modification in the system resulting in higher demand for flow, the operating point moves towards the right direction on the system head curves. Having higher flow rate at new design point results in higher head demand for overcoming the extra dynamic head imposed to the system. It is obvious that the existing pump in figure 3.1 is no longer capable to meet the new head demand. However, for lower flow rates the same pump can be used while considering some solutions for decreasing the head. This will be discussed in detail in the following sections.

It should be noted that if the static head comprises the major share of the system head, e.g. boiler feed water system, the shape of the system head curve tends to flatten, with slight slope at higher flows. In this case, any minor variation in the system head can lead to great swings in the capacity.

3.2. Pump Selection

Having the system head curve behavior of a particular application, the most suitable pump can be selected for the system requirements. In fact, there may be many pumps that can satisfy the design point of the system. The right decision in selection of the pump depends on several parameters that are discussed in this section. Choosing the right and optimal pumping design not only fulfills the system requirements over a wider range of head-capacity fluctuations but also reduces the energy consumption, maintenance costs, and the risk of breakdown of the pump.

3.2.1. General Considerations

System head-capacity requirements, design operating point, off-design working regime, NPSH available at the pump inlet, and pump speed are general considerations in selection of the pump in consultation with a pump manufacturer. Providing pump specification, pump designer and manufacturer can decide about the most suitable pump configuration for a particular application. As system head and capacity are likely to change over the lifetime due to the increase in frictional losses, discharged liquid pressure and elevation difference, or flow fluctuations; the design should be so that the pump remains in an economical operation region.

Impeller trims are, to a limited extent, another way for adjusting the pump for the new head-capacity requirements. Varying the pump's speed, if applicable, is another strategy for meeting a wide range of head-capacity requirements. The combination of multiple pumps in parallel or series is another common way for heavy duty or complicated pumping systems.

3.2.2. Pump Speed Selection

The main question after rating the pump is the suitable speed for the operating conditions. As there are different alternative pumps that can fulfill the system requirements, the choice of appropriate speed depends on several criteria that come as follows. The previous experience and manufacturer recommendations are also very important in definition of pump speed.

3.2.2.1. Suction specific speed

In reference to the section 2.2.5 and equation 2.16, the suction specific speed (n_s) for a centrifugal pump can be expressed [6]:

$$n_s = N \times \frac{\sqrt{Q}}{NPSHr^{3/4}} \quad (3.3)$$

N = pump rotational speed [rpm]

Q = flow (flow per impeller eye for double-entry impellers) [m^3/s]

$NPSHr$ = net positive suction head required [m]

The values used in the equation are taken from pump BEP. The recommended value for suction specific speed (n_s) is between 7000 and 9000, more specifically 8500 [6]. After calculation of $NPSHa$ for the system, the value of $NPSHr$ can be determined by consideration of a safety margin (e.g. 3%). Having $NPSHr$ and recommended suction specific speed (n_s), Eq. 3.3 can be solved for rotational speed (N). This is the maximum speed for a given pump but not the only alternative.

3.2.2.2. Pump performance curves

Based on the Eq. 2.16, pump specific speed depends on the rotational speed. As mentioned before (section 2.2.5), for a particular application the shape of performance curve is related to pump specific speed. For instance, for a radial flow pump in which the specific speed is below 2000, the performance curve best suits applications with low flow and high heads. Therefore, the pump speed should be selected in a manner that fulfills this specific speed range (Eq. 2.16).

3.2.2.3. Efficiency

Another important issue in selection of pump speed is the gained efficiency at BEP. The efficiency of a particular pump is a function of flow and pump specific speed. The higher the capacity at BEP, the greater the efficiency at a constant specific speed. Though this approach is merely theoretical, it can picture the general pattern in speed selection to gain the highest efficiency at a given design capacity.

3.2.3. Oversizing

Oversizing the pump in design and procurement process can lead to severe economic and process losses during the pump lifetime. This is typical in calculating the design point of the pump to consider some fudge factors to ensure the capability of the pump for future increase in the duty. The accumulation of solids in piping systems can, for example, result in higher frictional losses after some years. It is also a matter of fact that the pump should be able to meet the possible extra loads. Though a safety factor seems to be reasonable in these cases, the overestimation in calculation of this factor can lead to selection of oversized pump and driver. Then, to run the pump in lower flows, the flow should be throttled resulting in deviation from the BEP. It not only increases the capital cost and energy consumption of the system, but also can result in higher maintenance costs and in an extreme condition deflection of the pump. The main idea of this study is also to provide a basis for optimal design of the pump size.

3.3. Pump Control Methods

After determination of pump design point and selecting the appropriate speed and pump configuration, the pump is put into operation. However, there are several reasons that the pump should be run in a working point other than the initial design point, e.g. the need for lower flows. A typical pump can theoretically operate in a broad range of flows and heads, illustrated in head –capacity curve. Since the system curve is not following the same pattern as the pump H-Q curve, some measures should be taken to adjust the working point of the pump back to the system requirements. There are different alternatives to modify the pump output that are discussed in this section.

3.3.1. Throttling and Bypassing

In constant speed pumping, throttling the pump's discharge pressure is a typical way to conform the pump output to system requirements. If the flow rate in the system declines under any circumstances, the system head at the new operating point does decrease due to the lower frictional losses while the pump head increases simultaneously. To return back the discharge to the desired pressure at the new flow, an artificial friction loss is imposed to the system by changing the valve position. It

should be noted that the system head curve has steeper slope due to the higher frictional losses in the new conditions (Fig. 3.2).

In reference to Eq. 2.10, the power consumption of the pump is directly related to the product of head and capacity, corresponding to the surface area under the pump head-capacity curve. The amount of power loss due to throttling is clearly illustrated by hatched lines in Fig. 3.1. If the system would be capable to change the pump head curve, by trimming the impeller or speed varying, the required power were only proportional to the gray area. In this example, a system rated at A_1 , encounters to flow reduction to Q_2 . The pump discharge head in this new flow is H_{2b} while system head has inclined to H_{2a} . To resolve the gap, system head curve is changed to intersect the pump head at B_1 by throttling the pump discharge (Fig. 3.2).

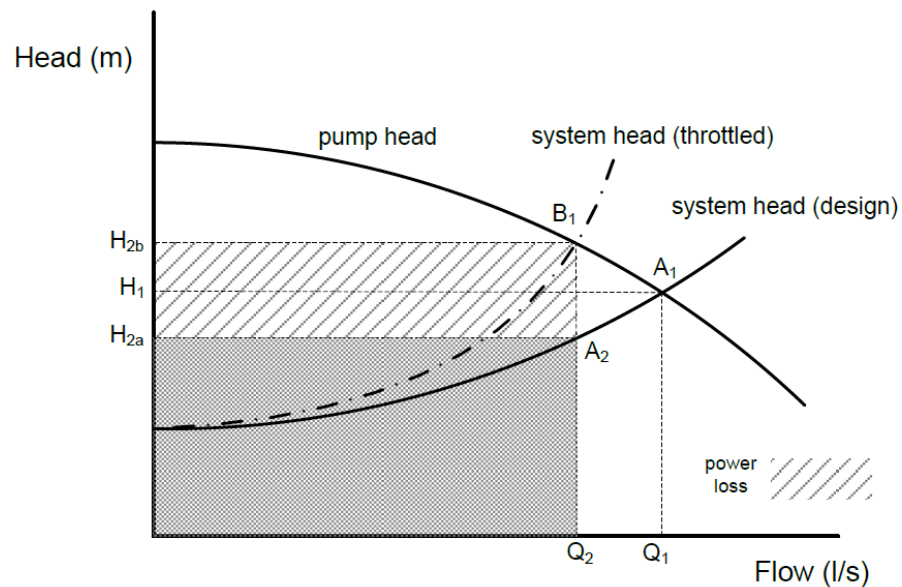


Figure 3.2 Throttling the pump discharge and corresponding power loss

Deviation of pump's operating point from BEP is the other negative effect of throttling that can increase life cycle costs of the pumping system. Bypassing a share of discharged flow ($Q_1 - Q_2$) back to the suction line is another method to maintain the new flow requirement. In this case, the pump power consumption remains constant as before while the system capacity is decreased. Bypassing is known as the least efficient way of pump control method [7].

3.3.2. On-Off Control

In some systems, flow requirements can be fulfilled by continuously switching the pump to off and on mode in a duty cycle. This method is typically applicable for

those systems that include a buffer system, e.g. storage tank or drum, from which the liquid is supplied in a constant flow rate. This tolerance facilitates the pumping system for having pauses or delays in supply, resulting in off-and-on operation. As the start-up of the pump has additional losses and is not recommended in industrial applications [11], this method remains for emergency conditions for such plants.

3.3.3. Adjustment of Impeller Diameter or Changing Stage Numbers

Trimming the impeller of the pump can empower it for operation in new working condition with lower capacities. As the other parts of the pump are not exchanged or modified, impeller trimming is considered an economical solution to a specific size recommended by the manufacturer (Fig.2.2). This strategy is mostly applicable for those systems that the amount of capacity is permanently reduced and is not returned back continuously. In some circumstances, a trimmed impeller can be replaced by a new one with larger diameter if the casing of the pump can fit it [6].

In some multistage pump configurations, e.g. radially spilt casing, the number of stages can be varied for different head requirements [12]. As this solution offers shut-down and maintenance practices for the servicing pump, it cannot be considered a good solution for continuous changes in system head, while efficient for bigger alterations. It should be reminded that the impeller trimming is not usually applicable for multistage pumps.

3.3.4. Speed Control and Variable Speed Pumping

While impeller adjustment is more suitable for long-term, limited increments in flow reduction, it is sometimes required to continuously adjust the pumping head-capacity characteristics. One of the methods to meet this requirement is changing the pumping rotational speed (rpm). As mentioned before, performance of the pump in different speeds is expressed by affinity laws (Eq. 2.17-19). Similar to impeller diameter, the lower speeds shift the pump H-Q curve while keeping the trend almost similar [6] (Fig. 3.3). By reducing the pump's speed (from N_1 to N_3) for lower flows (Q_3), the produced head is subsequently lower (H_3) eliminating the need for throttling. However, it should be noted that if the pump is rated at point A_1 in BEP, it does not necessarily mean that A_2 and A_3 are also operating in BEP. Affinity curve intersects the origin of coordinates while the system head curve does not (Fig.3.3).

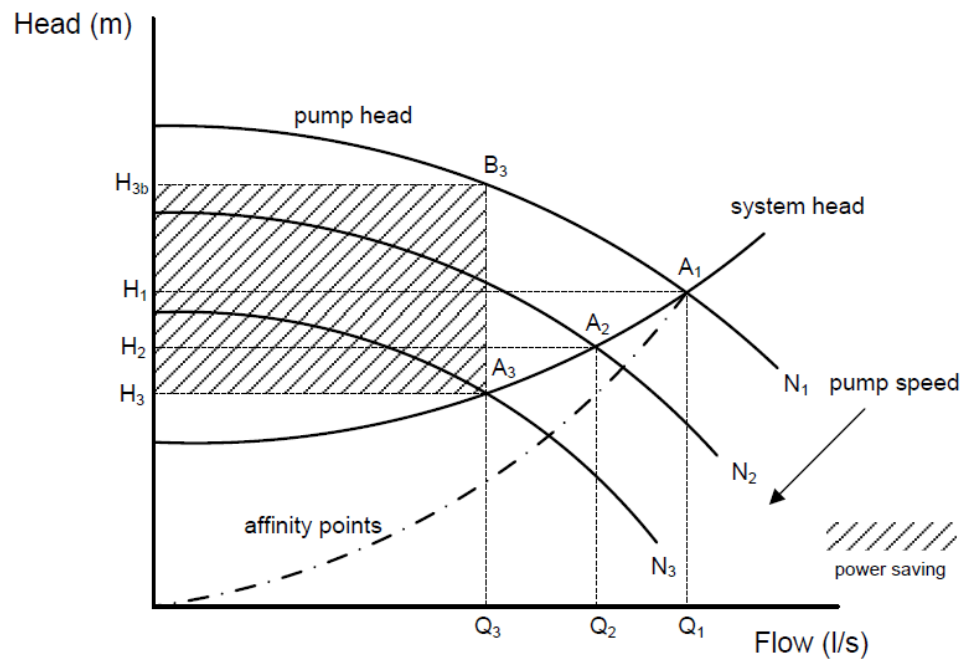


Figure 3.3 Changing the pump's speed and associated power saving

In variable speed pumping, the speed of the pump is continuously adjusted to the system requirements for lower or higher flows. There are different methods for varying the pump's speed. The speed can be changed directly from the pump's driver system, or by using a transmission system for changing the constant-speed from driver. These are discussed further in the following sections.

3.4. Multiple Pump Systems

Combination of two or more pumps can be used to fulfill the system head-capacity requirements. Multiple pumping systems allow reaching higher flows and heads using smaller units with more flexibility. There are two modes of configuration, series and parallel, which are discussed in this section.

3.4.1. Parallel Operation

Utilization of pumps in parallel increases the flexibility of the system to meet a wider range of flow fluctuations. In principle, pumps in parallel extend the pumping curve further to the right [6]. This fact is illustrated in Fig. 3.4 for two identical parallel pumps. Using two identical pumps in parallel doubles the flow for certain heads. However, it does not mean that if one pump supplies the flow of Q_1 , using two of them in parallel produces double flow (Fig. 3.4).

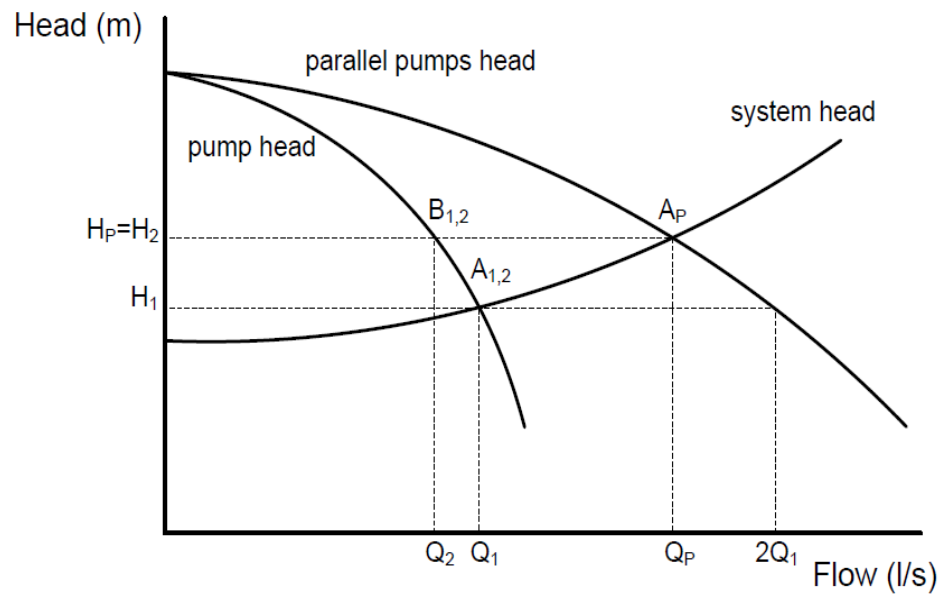


Figure 3.4 Parallel pumping system (two identical units)

Since the system head curve is not flat, it intersects the parallel pumps head curve at A_P which has a higher head compared to A_1 . Consequently, two pumps should be run at points B_1 and B_2 to produce the desired head (H_P). This example shows that bringing a new pump into the system in parallel changes the behavior of the initial pump, causing backward movement in pump head curve (from A_1 to B_1). This fact should be carefully considered to avoid operating pumps in unhealthy points after parallel combination.

3.4.2. Operation in Series

Pumping in series is a favorable solution for incremental increase in the head of the system, e.g. in pipeline applications. Pumps in series can produce high heads that are not economically possible to reach by single units while maintaining the desired flow rate. In power plants, a good example of this combination is the use of a booster pump to produce an initial head (NPSHa) for the following pump to prevent cavitation [13]. Using the pumps in series also diminishes the need for the use of high-pressure intermediate equipment in piping system resulting in lower costs and complexity. A combination of two identical pumps in series is illustrated in Fig. 3.5. If two single pumps operate at point A_1 and A_2 , the combination of them in series produces the upper head curve intersecting the system head curve at A_s . H_s is the developed head by two pumps that could not be achieved by the use of a single pump.

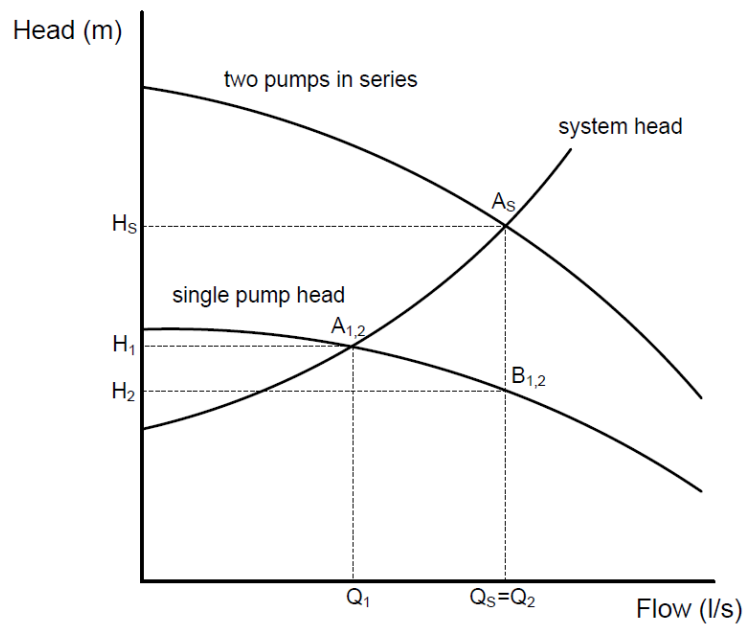


Figure 3.5 Series operation of two identical pumps

It should be noted that the new operating point of two pumps has moved farther in their head curve to B1 and B2, resulting in lower head (H_2) for each pump. The other obvious fact is the total flow is also increased through the operation in series (Fig. 3.5).

3.5. Pump Drivers and Transmission Systems

In order to rotate the shaft of a centrifugal pump a driver is needed. There are different sources for driving the pump including mechanical force, steam, and electric drivers. The choice of driver is highly dependent on the size of the system, economical features, and available alternatives.

3.5.1. Mechanical Drives and Heat Engines

In principle, any device capable for providing continuous rotational power can be considered as a pump driver. Compressed air engines (pneumatic engines), internal combustion engines, and gas engines are some examples that can be used in pumping applications [7]. For instance, having a diesel engine stand-by next to the electric drives can be considered a good alternative for systems with the need of high reliability. The ability for providing a wide range of speeds is one of the advantages of these engines. Steam turbines are other example that is discussed separately as they have been more frequently used in power plant applications.

3.5.2. Steam Driven Pumps

A steam turbine can be used for driving the pump's shaft by steam expansion. Since steam is directly used for rotating the pump, some of conversion losses are diminished. This practice is, for example, used in high capacity BFPs in large supercritical plants. The shaft can be whether directly connected to the generator shaft or separately installed. The required steam and the return, in forms of condensate or back pressure, can be chosen from different configurations based on plant layout [2].

3.5.3. Electric Drives

Electric drives are by far the most frequent pump drives for a wide range of applications, from small to ultra large pumps. Pump's shaft can be directly connected to the motor or a transmission system can be used for speed variation, e.g. a hydraulic system. The electric motors can be one of the asynchronous (squirrel-cage and slip-ring induction motors) or synchronous motors [7]. The electric motor can whether run at constant or variable speed.

3.5.4. Driver's Speed Control Methods

Controlling speed of the pump drive, and subsequently the pump itself, can reduce the energy and maintenance losses due to throttling. For those drives that are inherently speed controllable, e.g. steam turbine drives or gas engines, the pump's speed can be directly regulated by controlling the driver. For example, regulation of the amount of steam directed to the turbine connected to pump can change the pump's speed.

In electric motors, the speed of squirrel-case asynchronous motors can be controlled by frequency or voltage change for continuous variation, and *pole switching* for step changes. For the other asynchronous motor type (slip-ring induction), the speed control can be achieved means of resistance in the rotor current circuit (slip losses) or by means of *sub-synchronous converter cascade*. Although synchronous motors are designed for constant speed, in some cases their speed can be controlled by static frequency converters.

3.5.5. Coupling Methods

Centrifugal pumps can be connected to the electric motors by means of a transmission system for speed regulation. Variable speed gearing between pump and motor can be one of the following methods:

- Mechanical speed converters (step-less): belt drives and friction wheel drives
- Hydraulic speed converters: hydrostatic drives and hydrodynamic converters
- Electro-magnetic speed converters

The choice of suitable coupling method depends on different parameters, among which price, rated capacity of the motor, required space etc. Some studies have shown, in a similar load, the efficiency of the variable frequency drive (VFD) is higher than hydraulic coupling, 97.3 % compared to 93.7%, for 100% speed (full load) [14]. For lower loads, VFD shows even much greater efficiency compared to hydraulic coupling, 97% and 87%, respectively. The more detailed examination of different variable speed technologies is beyond the scope of this study.

3.6 Energy Efficiency Considerations

Pumping applications are accounted as one of the high energy consumer auxiliary units in industrial plants with great potential for energy saving [15]. Having the pump operating near the BEP is one of the concerns to reduce the amount of energy consumption and other costs arisen from unhealthy operation far from BEP on the curve, e.g. low flow or run out. Optimized rating of the pump and driver for the whole service flow spectrum should be carefully studied considering the entire life cycle costs.

3.6.1. Pump Life Cycle Costs

Life cycle cost (LCC) components of the pumping system should be evaluated to determine the most efficient pumping system for a certain application. The main components of LCC analysis are initial costs, installation and start-up costs, energy costs, operation costs, maintenance costs, downtime and production loss costs, environmental costs, and decommissioning/disposal costs [16]. The main LCC components in a typical industrial pumping system are illustrated in Fig. 3.6 [17]. Energy consumption costs are the highest share for power plant applications.

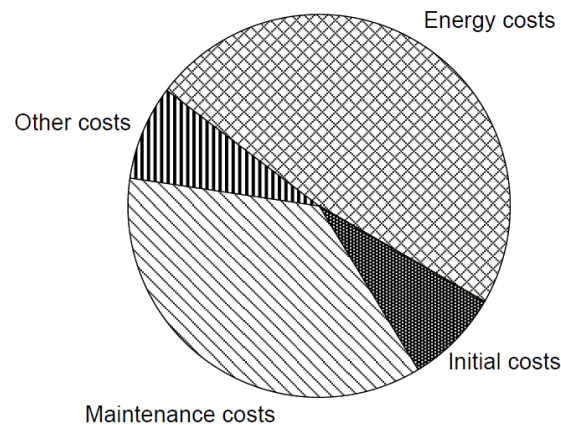


Figure 3.6 Life cycle costs for a typical medium-sized industrial pump

3.6.2. Energy Efficient Design of Pumping System

True understanding of the system requirement and pumping system characteristics is essential for an optimized pumping system design. There are several considerations to ensure an energy efficient pumping system. First, the design flow should not be oversized by overestimated losses or unnecessary safety factors. Oversizing the pump results in operation of the pump in flows lower than BEP resulting in acceleration in wear-out and higher energy consumption. The accurate selection of right pump configuration, right number of stages, suitable pump speed, and driver size for whole the flow range should be carefully studied to eliminate the need for extra costs. It should be reminded that the choice of most energy efficient alternative does not necessarily guarantee the lowest LCCs. The use of variable speed drive (VSD) is also considered to be an efficient option to avoid throttling losses.

3.6.3. Variable Speed and Energy Efficiency

Variable speed pumping (VSP) is gaining more popularity due to improvements in the technology of controlling methods. VSP can be a cost efficient choice for application with highly varying flow, including power station pumps. The energy saving opportunities in VSP was discussed in section 3.3.4 and was illustrated in Fig.3.3. The use of VSDs not only cuts energy costs but also keeps the operating point at BEP. However, initial and maintenance costs of such systems besides other constraints, e.g. space limit or the need for air-conditioned environment, should also be considered in design process.

4. BOILER FEED WATER PUMPING SYSTEM

Steam boilers are used in different process industries and power stations to produce high pressure superheated steam. BFP is a vital component that must withstand continuous operation of the plant as well as transient conditions in load. Although BFPs are available in a wide range of sizes and configurations, the most common BFP used in central power stations are diffuser/volute, horizontal, double-case barrel, single and double suction first-stage impeller, multistage, centrifugal pumps (Fig. 4.1).

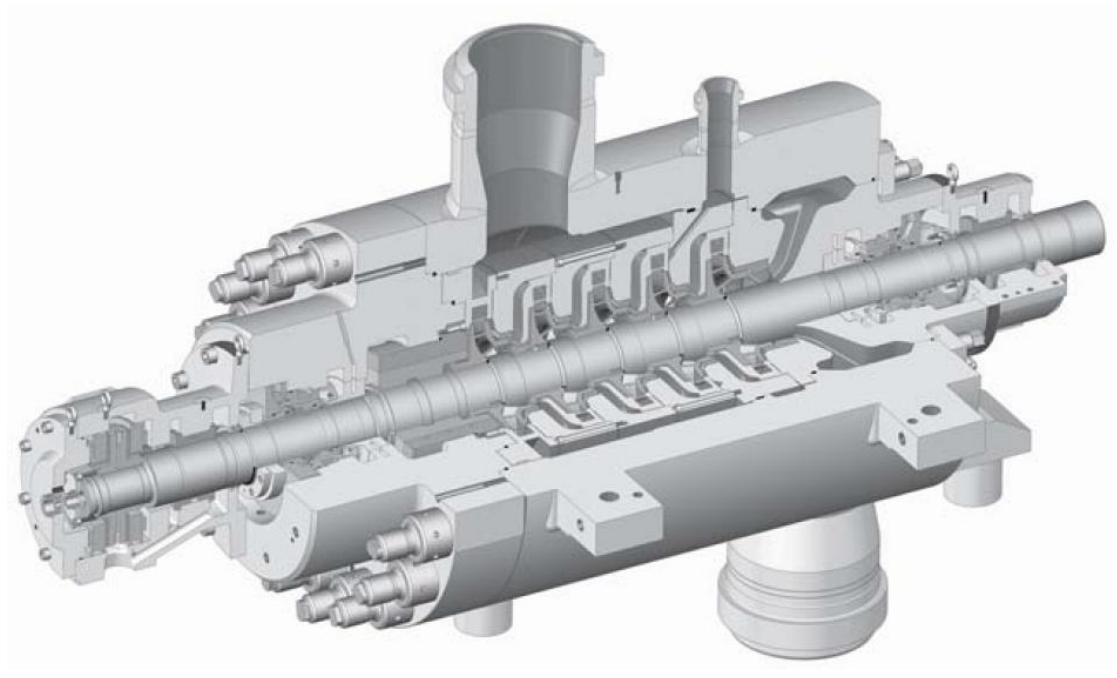


Figure 4.1 Radially-split barrel-casing multistage boiler feed pump [18]

4.1. System Characteristics

In order to ensure a proper design for BFPS, a true understanding of the system targeted for these pumps is important. BFPs are known for high demand of reliability and availability. BFP is a part of the boiler feed water system. A general boiler feed water system includes a deaerator at some elevation above the BFP suction level to provide a reservoir of deaerated, heated condensate water, as well as adequate NPSHa for main BFP [13]. The suction pipeline is designed so that limits the friction losses and maintains the required flow velocity to the BFP. A booster pump may be included before the main BFP to provide the required suction head. The booster

pump's driver can be separated or its shaft can be connected to the main BFP's driver.

Discharge of the BFP includes recirculation stream back to the deaerator. There are also control valves to monitor the system flow requirements. High pressure feed water heaters (HP-FWH) are other components of the boiler feed water system that are installed after BFP. A typical boiler feed water system including BFPs is illustrated in Fig. 4.2.

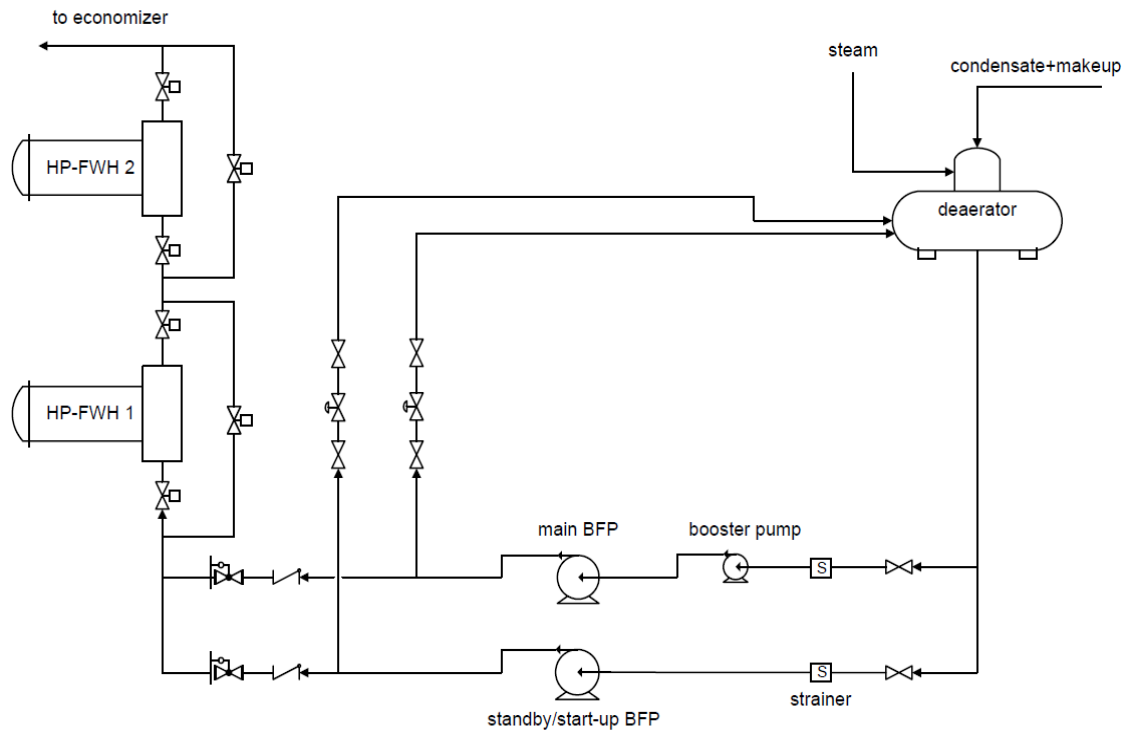


Figure 4.2 Typical boiler feed water system (booster pump + main BFP + standby)

4.1.1. Design Point

BFPs are characterized for high static head and capacity. The system head curve tends to be flat over a wide range of flow rate since the frictional losses are small compared to the boiler pressure. Flat-shape system head curve can be potentially a proper reason for the use of parallel pumps. The amount of design capacity of a BFP is calculated as follows [13]:

$$Q_{BFP} = Q_{steam} + Q_{bd} + Q_{sb} + Q_{aux} + Q_{desup} \quad (4.1)$$

Q_{BFP} = BFP design capacity

Q_{steam} = turbine throttle steam flow (open valves and typically 5% overpressure)

Q_{bd} = steam cycle blowdown/make-up flow

Q_{sb} = soot blowing steam flow (if applicable)

Q_{aux} = auxiliary or process steam flow (if applicable)

Q_{desup} = reheat steam desuperheater flow (if applicable)

A fudge margin of 5% is typical for making the system capable for future load rises [13].

The total design head developed by BFP is determined by difference between total discharge head and total suction head:

$$H_{BFP} = H_{dis} - H_{suc} \quad (4.2)$$

H_{BFP} = BFP total developed head [m]

H_{dis} = total discharge head [m] (calculated by Eq. 4.4 below)

H_{suc} = total suction head [m] (calculated by Eq. 4.3 below)

The total suction head of the system can be calculated as follows:

$$H_{suc} = P_{deaerator} + H_{static} - H_{friction} \quad (4.3)$$

$H_{deaerator}$ = deaerator pressure (at maximum turbine heat balance) [m]

H_{static} = static (elevation) head between deaerator low water level and BFP centerline [m]

$H_{friction}$ = frictional losses between deaerator and BFP suction connection [m]

As discussed earlier, the total suction head is also important in BFP hydraulics considerations to prevent cavitation by maintaining the adequate NPSHa for the pump. In other words, a suitable pump should be selected that its NPSHr would be amply lower than the system NPSHa. Industrial practices have proved that a safety margin of 50% above the manufacturer NPSHr (at 3% head reduction) is usually sufficient. Total discharge head (H_{dis}) is also calculated as follows:

$$H_{dis} = P_{turbine} + H_{tot,st} + H_{tot,f} \quad (4.4)$$

$P_{turbine}$ = turbine throttle pressure (at maximum turbine heat balance) [m]

$H_{tot,st}$ = total static (elevation) head between BFP and drum water level [m]

$H_{tot,f}$ = total frictional losses between BFP discharge and turbine [m]

The last term in Eq. 4.4 include the losses in piping between BFP and economizer, economizer friction loss, superheater friction loss, and main steam line friction losses. After determination of the total developed head by BFP (Eq. 4.2), a design safety margin of 5% is added to determine the design total head developed by BFP [13]. A schematic of the BFPS including head and NPSHa elements are illustrated in Fig. 4.3.

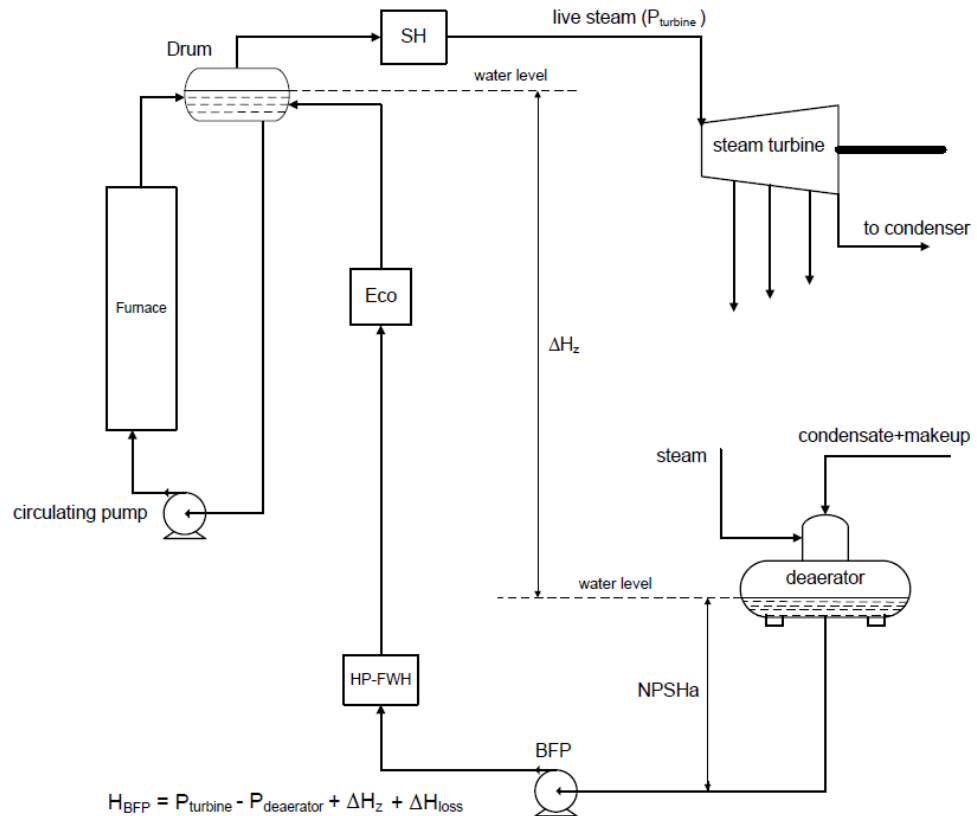


Figure 4.3 Head components of the boiler feed water pump (BFP)

4.1.2. Availability and Reliability

The continuous and steady performance of the BFP, as the heart of the boiler plant, is important in reduction of production losses. To avoid load interruption and drooping in pump head curve, BFPs are designed with low specific speed (1000 to 1800) [13]. Low value of specific speed ensures uniform, smooth, and stable head-capacity characteristics that is important in variable load operation. The continuously increasing head-capacity curve implies that BFP can be used in parallel from minimum flow to runout without problems such as excessive vibration, pressure pulsation, and cavitation. Head per stage is also another parameter in ensuring the

reliability of the BFP. In general, head per stages higher than 670 meters are not recommended [13].

From system design viewpoint, the combination of BFPs in parallel and series can improve the reliability of the BFPS. A booster pump prior to the main BFP can ensure the required NPSH as well as reduction of suction recirculation in main BFP. Stand-by BFP with different driving power is another typical practice for increasing the availability of the system.

4.1.3. Suitable Driver for BFP

Suitable pump drive can be determined based on the size of the plant and available alternatives. Electrical motor drives are typical pump drives for small and medium sized boiler plants. They can be directly connected to the pump shaft or be run by means of variable speed coupling devices. Steam driven pumps are usually used in large power plants. There are diverse steam sources for driving the pump in a large power station (higher than 300-400 MWth) with different treatment of the outgoing stream [2]. A reserve pump with different power source for start-up and emergency cases is recommended for steam-driven pumps.

4.1.4. BFP Standard Requirements

Boiler standards introduce other head and capacity requirements that should be taken into account in selection of pumping systems. European Committee for Standardization has a set of technical standards (EN). Standard EN 12952-7 deals with *Water-tube boilers and auxiliary installations: Requirements for equipment for the boiler*. In addition to the requirements for head and capacity, there are instructions for the use of multiple pumps in the BFPS.

4.1.4.1. EN flow requirements

In section 5.1.1 of this standard, the requirements for the number of BFPs are described. Based on the sections 5.1.1.1 and 5.1.1.2, the safety measures would be enough to cut off the heat supply and relieve the accumulated heat in boiler, a single pump can be installed for the duty, otherwise at least two BFPs. In section 5.1.2 of EN 12952-7, capacity of the BFP, the standard requires [19]: “*The feed pump capacity shall correspond at least to 1.25 times the allowable steam output of all*

steam boilers. For safety reasons 1.15 times of maximum continuous rating is enough". If the amount of blowdown exceeds 5% of the steam output, this amount should be also added to the maximum capacity.

4.1.4.2. EN head requirements

For head requirements of BFP, the EN standard demands the flow quantities corresponding to 1.1 times the allowable steam output pressure, in addition to the previous flow requirements. Based on the section 4.1.1 of this study and EN 12952-7 standard, the head-capacity requirements for the BFP can be illustrated as Fig. 4.4. These are the working points that must be covered when selecting a BFP. However, there is no obligation to meet both head and capacity requirements of the EN standard at one single point [20]. Fig. 4.4 illustrates the selection process of BFP to meet all the duty requirements. It also reveals the imposed power loss to the system from the first day of operation, if constant speed BFP is used. This is partly because of conservativeness in engineering calculation (oversizing), safety margins to meet the possible increase of load in the future, and standard requirements.

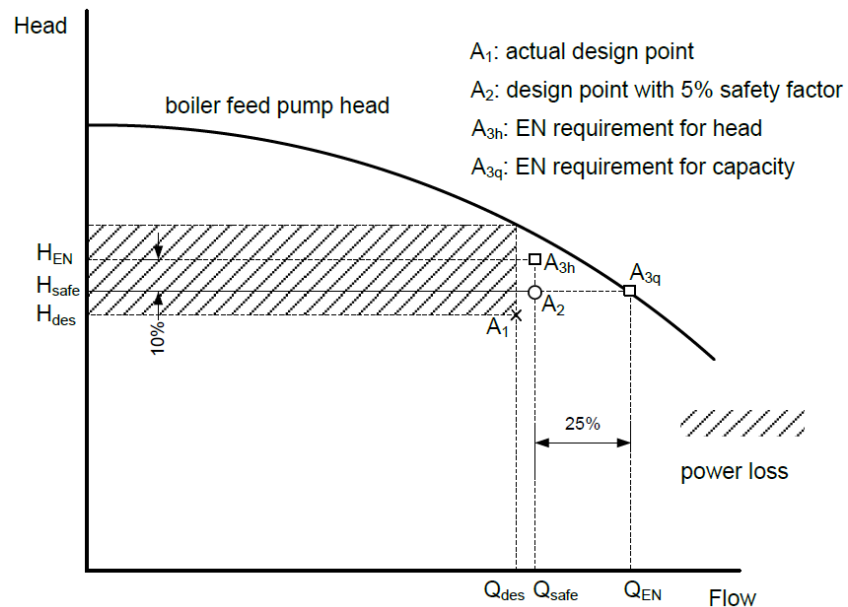


Figure 4.4 Selection of the single BFP with safety margins and requirements of EN standard

4.2. Boiler Feed water Flow and Pressure Control in Part Load

Controlling strategy of the output pressure and capacity of the boiler sets the BFP head and flow control method. The live steam mass flow outgoing from the boiler decides the output of the plant. For steam power plants, the output load depends on

live steam mass flow, temperature and pressure. In load transient conditions, the live steam temperature is usually kept constant to gain better efficiency and to avoid thermal stresses in the turbine blades [21]. Therefore, the turbine pressure is the other designating factor to control the output load. There are two main methods for controlling the turbine pressure, constant pressure operation and sliding pressure control. The main controlling streams and units for maintaining the desired flow and head in BFPS are illustrated in Fig. 4.5.

4.2.1. Constant Pressure Operation

In this method, the output pressure of the boiler remains constant during the load variation. The output load of the turbine is then adjusted by whether throttling valve before turbine inlet or by governing control of the turbine inlet nozzles. Despite marginal pressure change delays in drum boilers, this method results in constant pressure at the boiler and BFP during the load changes. In other words, to control the pumping system in part load operation, the only changing parameter is the pump capacity.

4.2.2. Sliding Pressure Control

In this method, the boiler output pressure is also varying during the load fluctuations. Using this approach in part load operation, the pressure reduction in the turbine is maintained by reduction of the live steam pressure. Though this method diminishes the throttling losses and reduces the BFP power consumption, the temperature changes in evaporator due to the pressure variations is complex to control [21]. In general, each of these controlling methods can be used for any boiler type. In practice, however, the controlling method depends on the boiler type. In the following section, the difference between two major boiler types is briefly explained.

4.2.3. Effect of the Boiler Type on Pumping System

There are two major boiler types in the industrial scale, drum boilers and once-through boilers. In addition to pressure control method which discussed above, the boiler type and associated features are important in optimizing the BFP for the whole load spectrum.

4.2.3.1. BFP control in drum boilers

In drum boilers, a storage capacity provides live steam resulting in some delays in flow demand. The changes in water level in drum transfers to the control valve so that the flow can be controlled by pump (Fig. 4.5). Live steam properties in drum boilers are usually controlled using the constant pressure method. Therefore, the total head developed by the BFP is approximately constant during the load variations. It results in a flat-shape system head curve that is amply dependant on static head raised from boiler pressure demand. Since medium-sized boiler plants are typically equipped by drum boilers, this type of boiler and relevant BFP control practices are examined in this study.

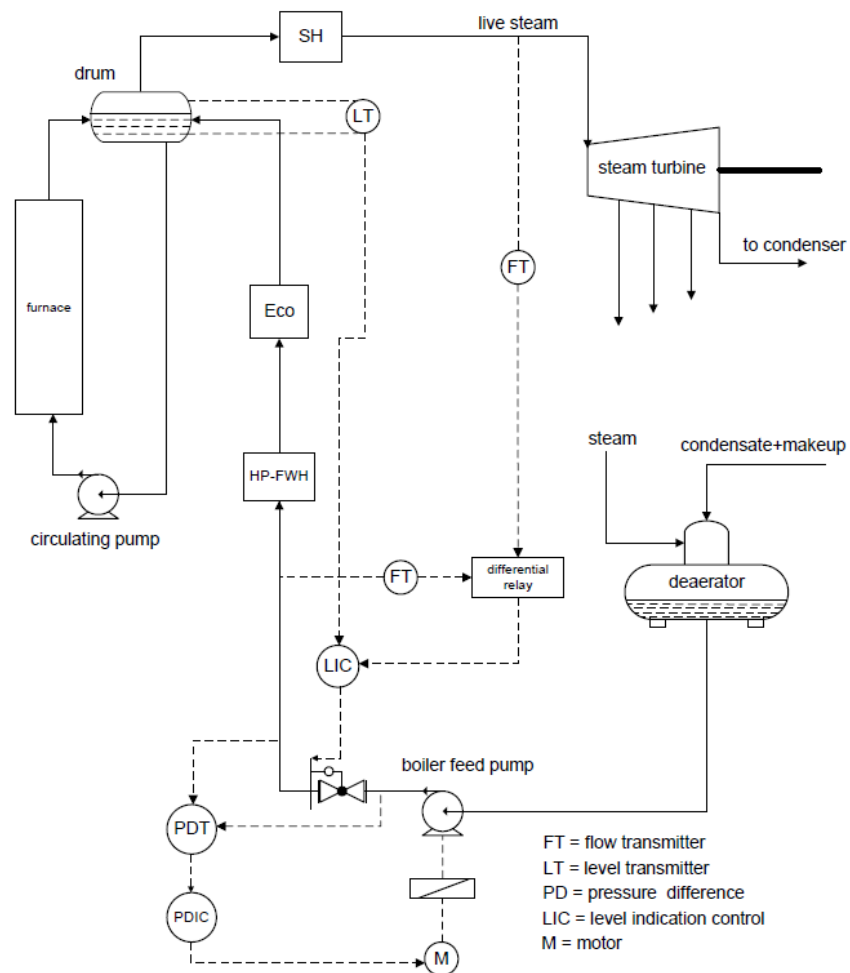


Figure 4.5 Flow and pressure control system in a drum boiler

4.2.3.2. BFP control in once-through boilers

The flow demand of once-through boilers directly decides the BFP capacity. Since there is no storage system in this type of boilers BFP must respond very quickly to

load changes. Another important feature of once-through boilers is the sliding pressure control method that changes the BFP's head consequently. As these boilers are mostly used in large plants, their BFP systems are not investigated in detailed in this thesis.

4.3. Optimal Design

BFPs are among the highest energy consumers in boiler auxiliaries subject to increase the net energy efficiency of the plant with optimal design. Optimal design of the BFP can relate to three steps. The first step relates to increasing the hydraulic performance of the pump through enhancement in pump configuration, manufacturing design, material improvement, fluid dynamics studies etc that target the construction stages. The optimal selection BFP, driver, and VSP method for the operating conditions, as well as piping considerations are the second step in reducing losses in the BFP. Precise engineering practices and good consultation provided by the manufacturer can contribute to this goal, e.g. be elimination of oversizing. Finally, performing system analysis, design, and engineering is another important strategy in increasing the energy efficiency of BFPS. The focus of this study is mainly on this segment but addressing the second approach as well.

4.3.1. System Based Approach

System level engineering is one important research area in improvement of energy efficiency of the industrial plants. It comprises system analysis, integration and optimization instead of merely focusing on individual components [22]. For BFPSs, the system approach involves the optimized design of the BFPs (single or multiple), driver, and speed control strategy for the whole operating range of the system during the life cycle. The optimization goal can be minimization of the LCC or energy consumption. Since BFPs are traditionally oversized in favor of availability, the new advancements in pump, driver, and speed control technologies increase the reliability of the optimization practices.

5. OPTIMAL DESIGN OF BOILER FEED WATER PUMPS

In the empirical part of this study, an optimal BFPS is designed for a real power plant, based on available annual load data. Based on the literature provided in the previous chapters, the optimality of the design is examined based on different criteria, like life cycle costs and energy consumption. Since the choice of energy efficient BFPS is one of the practical problems in boiler plants, the method, results and conclusions of this study can be used for other similar instances.

5.1. Input Data

In this section, the required input data of the optimization problem is examined. To find the optimal solution for each problem setting, the method by which the data is obtained or calculated is discussed in details. The efforts have dedicated to provide a set of reliable input data to increase the accuracy and applicability of the results.

5.1.1 Experimental Data of Flow

As discussed earlier, one of the bases of this study relates to the fluctuations in water capacity of the BFPs. Not only the initial design point is important in the selection of an optimized BFPS, the load pattern during the pump operation can affect the selection process. To start the mathematical modeling and definition of the optimization problem, a real annual load data of a boiler plant operating in Finland is received and analyzed. The load pattern is presented in Fig. 5.1 for one year.

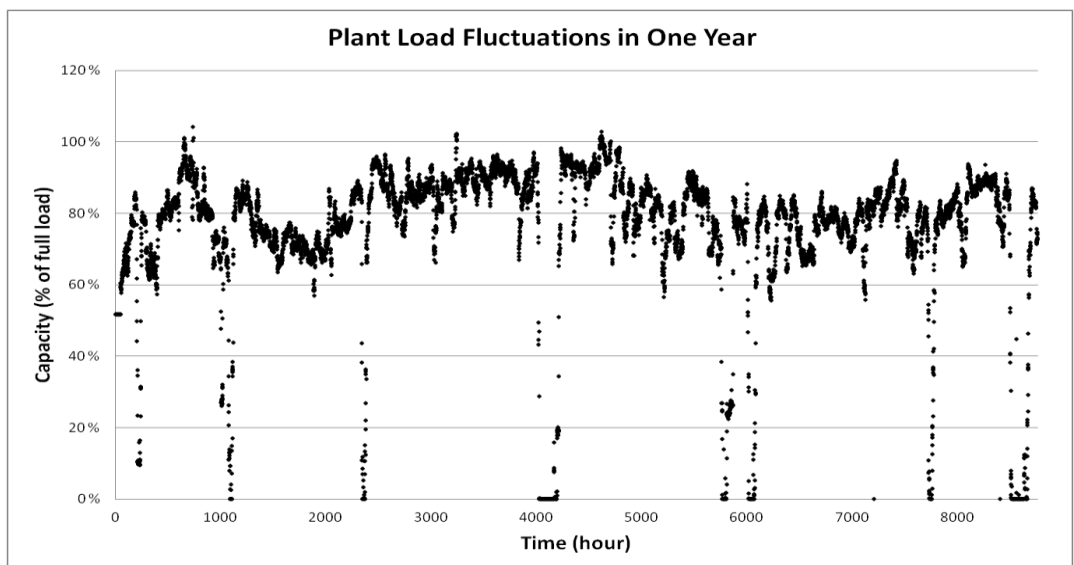


Figure 5.1 Annual load variation in a boiler plant

The data is then sorted and portrayed in terms of annual load duration curve and load duty cycle (Fig. 5.2). Based on the data, the change in water capacity of the system is fairly distributed over time, providing a good example for variable load pumping.

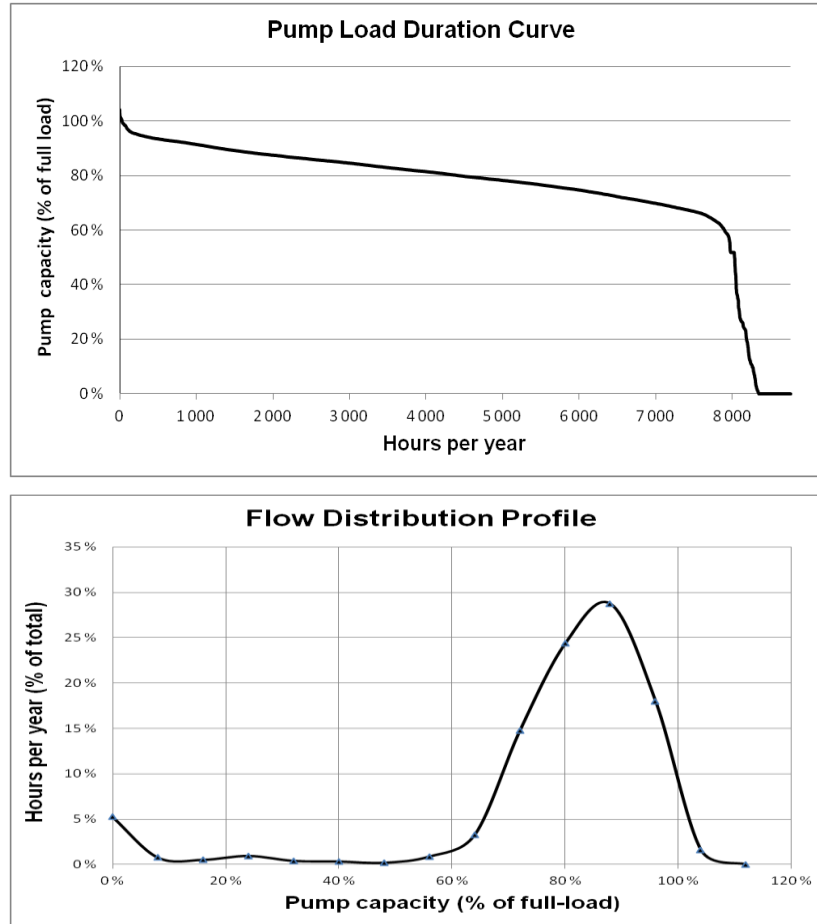


Figure 5.2 Load duration curve (above) and load duty cycle (below) of the system

In order to produce the load probability distribution profile, the flow measurements are rounded by a domain of 10 lit/s. It means in Fig. 5.2 below, the marker points represent a flow range of ± 5 lit/s around the point. While it is difficult to predict the load pattern before the operation of a new plant, it is possible and beneficial to use the real load data in the substitution of old BFPs or in retrofitting a boiler plant for the improvement of energy efficiency.

5.1.2. Pump Alternatives

One of the basic requirements for making an optimal selection for BFPs is to have a set of feasible alternatives. The BFP type (based on the configuration) is one of the parameters that must be considered in optimization of BFPs. In real life engineering problems, this process resembles the selection of the BFP among a set of alternatives

proposed by one or several manufacturers. The results can be however used for making more sophisticated specification for the optimal choice in design and engineering steps to find the best fit in the market.

It was important in this study to provide a diverse, practical, and reliable set of pumps for comparison and analysis in different problem settings. To ensure practical and usable results, the input pump data should be as realistic as possible. The data of the pumps used for the analysis in this study are for a set of pumps manufactured by Goulds Pumps Inc. First, by reviewing the products features, the most suitable pumps for BFPS are chosen from models 3360, 3393, and 3311 [23]. Then, the required performance data is acquired from pump selection tools provided by the manufacturer. This ensures the reliability and applicability of the technical data. A sample of selection process and data acquisition is portrayed in figure 5.3.

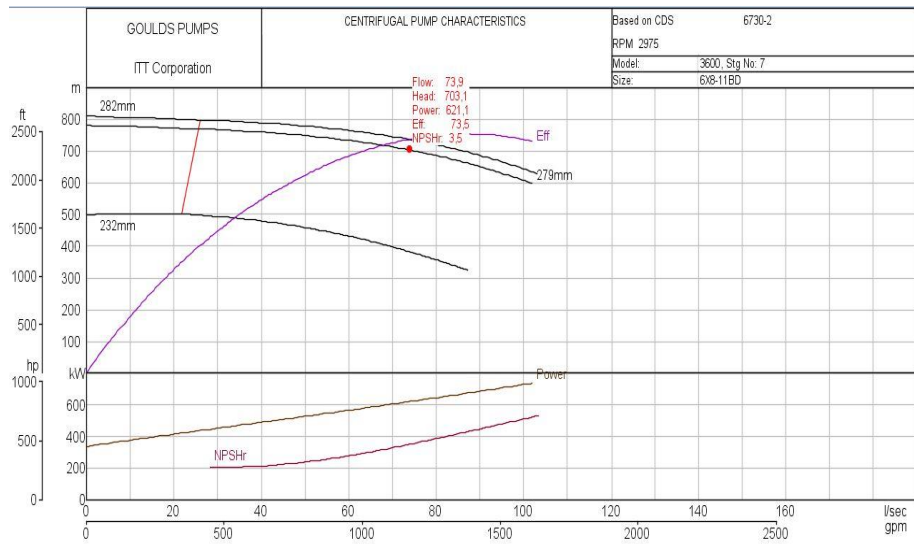


Figure 5.3 Pump data for a tentative operating point (Goulds Pumps ITT tool)

Then, the data of the performance curves for one stage of the pumps is summarized, and the trends of head and power are derived. To ease the referencing to the products, the main models used in this study and their main characteristics are collected in table 5.1. These coefficients presented in table below are used in head (H_{pump}) and power (P_{pump}) curves based on equations below:

$$H_{pump} = aQ^2 + bQ + c \quad (5.1)$$

$$P_{pump} = a'Q^2 + b'Q + c' \quad (5.2)$$

It should be noted that power curves could be approximated with linear functions, but polynomial is more accurate [24].

Table 5.1 Pump models and their head and power curves

One stage	Data from manufacturer [23]		Head equation coefficients			Power equation coefficients		
	Model	pump ID	c	b	a	c'	b'	a'
			meter	m/(lit/s)	m/(lit/s) ²	kW	kW/(lit/s)	kW/(lit/s) ²
pump1	3600	6x8-11B	112	0.115	-0.002	43.6	1.124	-0.002
pump2	3600	6x8-14AD	94	0.134	-0.005	32.5	0.858	-0.002
pump3	3600	6x8-14AD	71	0.083	-0.002	33.2	0.500	-0.001
pump4	3600	6x8-13DX	58	0.079	-0.002	20.9	0.519	-0.002
pump5	3600	6x8-14AD	193	0.172	-0.003	81.7	1.875	-0.004
pump6	3600	6x8-11BD	159	0.191	-0.004	49.2	1.850	-0.004
pump7	3600	4x6-11B	106	0.265	-0.009	12.6	1.396	-0.007
pump8	3600	4x6-11A	90	0.138	-0.008	12.4	0.975	-0.004
pump9	3600	4x6-10D	70	0.324	-0.011	15.1	0.605	-0.003
pump10	3311	4x5-11C	60	0.221	-0.010	8.4	0.675	-0.004
pump11	3600	4x6-10D	173	0.172	-0.010	23.1	2.223	-0.009
Pump12	3600	4x6-11BD	145	0.228	-0.012	19.7	1.674	-0.006

The performance curve of the different pumps is portrayed in Fig. 5.4 for one stage. The more detail of the performance of each pump will be discussed where needed.

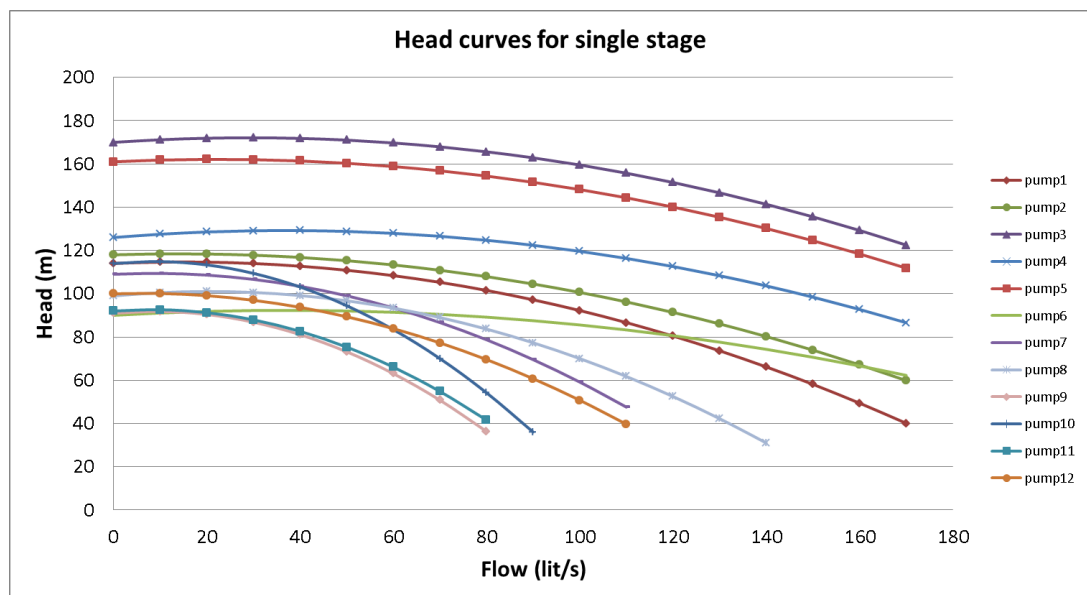


Figure 5.4 Performance curves for one stage of each pump

As the curves illustrate, a set of diverse pumps are selected to provide different combinations for optimization practices.

5.1.3. Price Data Acquisition and Estimation

The prices of the pumps presented in table 5.1 are not given in [23]. However, the prices for the pumps are estimated in this study using an internal purchasing bill for a boiler pumping system. In order to estimate the current price of the pumps, after currency unit conversion, an inflation factor is implemented, based on consumer price index (CPI). According to the statistics provided by Statistics Finland, the overall inflation factor (CPI) between 2002 (date of pricing for the reference pump) and 2013 can be determined as 1.2 times the initial prices [25]. There are different methods to estimate pump price based on an initial price. One of the well established and recognized methods for cost estimation of equipment used in process and power engineering is Walas method. Based on Walas, having base price of a centrifugal pump for a given flow and head, the change in price for higher capacities can be estimated as follows [26]:

$$C = F_M \times F_T \times C_b \times U_e \quad [€] \quad (5.3)$$

C = pump capital cost [€]

F_M = pump material cost factor

F_T = pump type cost factor

C_b = base cost [\$]

U_e = currency unit conversion from \$ to €

Considering $U_e = 0.76$ and $F_M = 2$ for stainless steel, the other two terms in Eq. 5.3 can be calculated using equations below, for a multistage pump [26].

$$F_T = \exp [9.8849 - 1.6164(\ln Q\sqrt{H}) + 0.0834(\ln Q\sqrt{H})^2] \quad (5.4)$$

$$C_b = 1.55 \exp [8.833 - 0.6019(\ln Q\sqrt{H}) + 0.0519(\ln Q\sqrt{H})^2] \quad (5.5)$$

In which, Q and H are capacity (gpm) and head (ft), respectively.

Equation 5.3 is useful in determination of an approximate price when there is no information beyond head and capacity at design point. However, in this study, the

base price of the reference pump is known. Hence, the Eq. 5.6 seems to be more suitable for capital cost estimation [27].

$$C = C_b \times \left(\frac{P}{P_b}\right)^n \quad [\text{€}] \quad (5.6)$$

C = pump capital cost [€]

C_b = pump base cost [€]

P = pump power [kW]

P_b = pump base power [kW]

n = price ratio

Based on Couper, price ratio of 0.7 seems to be accurate enough for centrifugal pumps [27]. Based on the available data, having power of 2000 kW and price of 240,000 € for the reference boiler pump, the price can be estimated by change in power. After adjusting the pump prices to today's prices based on inflation rate, the prices of different pump types can be estimated for any number of the possible stages as a function of base price (Eq. 5.6). For instance, the estimated prices can be compared for 4-stage and 6-stage units (table 5.2). Pump head and power curve is also adjusted based on the number of stages.

Table 5.2 Price estimation for basic pumps and multistage pumps

	Price for 4-stage (€)	Price for 6-stage (€)
pump1	101,500	134,800
pump2	122,000	162,000
pump3	172,800	229,500
pump4	134,000	178,400
pump5	153,000	203,200
pump6	106,100	140,700
pump7	68,800	91,400
pump8	76,200	101,300
pump9	49,600	65,800
pump10	62,400	82,900
pump11	49,400	65,700
Pump12	64,600	85,700

The calculation of the VSD costs is not easy and straightforward. In absence of a precise price list and data, the cost of VSD is approximated based on the horsepower (hp) of the electric motor. It is assumed that the variable speed technique is based on

VFD and the plant has available infrastructure and place for installing VFD facilities and related systems, like air-conditioning system. Based on the data presented in [28], the average cost of VFD can be correlated to the motor size, offering 120 €/hp for middle-size and larger motors.

5.2. Modeling and Optimization

In order to define the problem and set the suitable approach for solving it, first some assumptions should be taken into consideration. This is done to ease the modeling task and to eliminate the parameters that are not highly effective compared to important variables. After defining the required variables, the general problem is decomposed to several sub-models for clarification of the effect of each parameter. This is important to monitor the effect of each variable individually, then in a group of them, to provide adequate understanding for analysis, interpretation of the results, and modifying the variables to meet the target. Then, optimization problem is defined and solved based on the available set of variables in each sub-system. However, the main assumptions presented in the previous subsections, as well as 5.2.4 are fixed in all simulation practices.

5.2.1. General Assumptions

The main objective is to model the BFPS so that it can be optimized for different conditions. First, it is assumed that the selected pumps can be used in the same system. In other words, the piping and fittings can be adjusted for suction and discharge of each pumping solution. Since the boiler applications are mainly known for high static head, the effective elements in frictional losses, e.g. pipe size, are not considered in this study. However, the general effect of frictional losses is taken into account in determination of system head curve.

It is assumed that the pumping system is used for a drum boiler with constant pressure in part load operation. Hence, the static head is assumed to be fixed in different loads.

5.2.2. Boiler Head Demand (System Head)

Based on the available load data presented in section 5.1, and considering the flow of 35 lit/s as full load capacity, the flow regime is known for entire operating range. The system head characteristics are determined based on Eq. 3.1, for the boiler plant:

$$H_{system} = H_{static} + CQ^2 = 960 + 0.0175Q^2 \quad [m] \quad (5.7)$$

Now, having the system head curve (Eq. 5.7), full load capacity, and annual flow range the system characteristics are well known. Considering full load flow of 100 lit/s, the corresponding design head for this system is determined equal to 1135 m. In other words, if the selection was based on a single operating point, head and capacity of 1135 m and 100 lit/s were respectively the characteristics of the initial design point, for the selection of a suitable pump.

Based on the section 4.1.4 of this study, the standard requirements for this boiler plant can be summarized in table 5.3. After determination of the limits that pumps should cover, we can optimize the most cost efficient BFPS for this boiler plant.

Table 5.3 Initial design point of the system and requirements of EN standard

System requirements	Design point	EN requirements		Final set points *	
		Flow margin	head margin		
		25%	10%	1	2
Head (m)	1135	-	1249	1135	1249
Flow (lit/s)	100	125	-	125	100

* Both these points must be covered by BFPS to meet EN standard (illustrated in Fig.4.4)

5.2.3. Optimization Problem

Optimization is to find the best possible solution among a set of feasible alternatives when the favorability can be measured with some specific, numerical measure [29]. A classic optimization problem is defined as follows:

$$\min/\max_{x,y} f(x,y) \quad (5.8)$$

so that:

$$g(x,y) \leq C \quad (\text{inequality constraints})$$

$$h(x,y) = D \quad (\text{equality constraints})$$

$$a \leq x \leq b$$

$$c \leq y \leq d$$

In which, x, y are *variables* that can be changed to minimize/maximize the *objective function* $f(x, y)$. Constraint *parameters* are a, b, c, d, C , and D , which are not controllable. These parameters with $g(x, y)$ and $h(x, y)$, i.e. *constraint functions*, define the feasible region for the solutions. If the variables are selected from real numbers the problem is linear programming (LP), and if they are integers or binary numbers, the problem is called discrete programming (discrete optimization). More explanation will be given in solution of each optimization problem in the following sections.

5.2.4. Cost Analysis

In this study, the cost analysis and cost optimization is performed based on *energy costs* and *installation costs*. Energy cost refers to the electricity consumption of the given pumping solution, based on the price of electricity. The electricity price is 0.084 €/kWh for industrial consumer in Finland [30]. The electricity price is considered to be constant during the 10-year lifetime for all the pumps. The working hours of the pumping system is also determined from the data presented in subsection 5.1.1. Total yearly operating hours is 8400 hours for whole load range.

Installation cost includes capital cost for purchasing the pump, and VFD device in variable speed systems. In order to determine the yearly installments of the initial price for cost calculations, the following equation is used [29]:

$$YI = NPV \times r(1 - (1 + r))^{-T} \quad [€] \quad (5.9)$$

YI = yearly installment [€]

NPV = net present value [€]

r = annual discount/interest rate

T = lifetime (years)

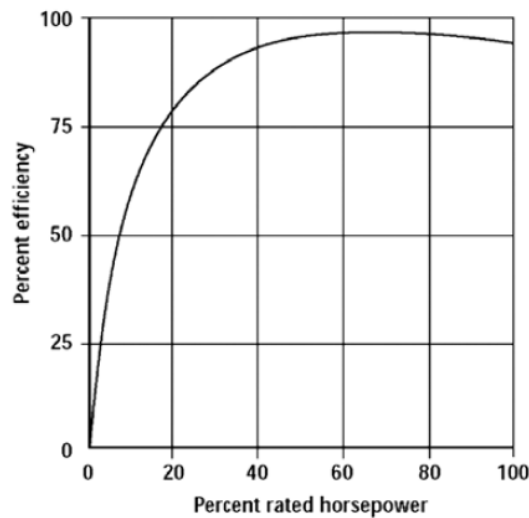
Assuming 10% interest rate, the whole capital price of the pump (and VFD if needed) is distributed in equal yearly installments. Therefore, NPV is the sum of capital investment for the pump and VFD device at present. A summary of the assumptions and data used for all scenarios are presented in table 5.4.

Table 5.4 Input data for cost calculations

	Value	Unit	Source
pump lifetime	10	years	estimation
electricity price	0.084	€/kWh	[30]
interest rate	10	%	[24]
inflation ratio (1996-2012)	1.2	-	[25]
VFD costs	120	€/hp	[28]
operating time	8400	hour/a	given
water density	0.9	kg/lit	T = 168C

5.2.5. Motor Efficiency and VFD Performance

Motor efficiency in par load operation and lower speeds is another important parameter that is often ignored in the calculation of cost savings of VSP. In other words, VSP reduces the motor speed and load in part load operation, resulting in lower electricity consumption compared to constant speed. However, the motor efficiency is also reduced in lower loads and speed. Though this reduction may not make a structural change in the results, the profit can be exaggerated if it is ignored.

**Figure 5.5** Relation of motor efficiency with motor load factor

The dependence of the efficiency of an electric motor based on load is portrayed in Fig. 5.5 [31]. This relation may be slightly different based on the size of the motor, but the general trend is similar.

Moreover, the relation of the motor efficiency and changes in frequency can be explained for VFD pumping systems. Though based on [31] the precise estimation or calculation of overall motor efficiency operating under VFD is

very complex, some approximations can produce a general trend. The overall efficiency of the motor can be calculated in different speeds, presented as different frequencies [32]:

$$\text{Motor overall efficiency} = \text{VFD factor} \times \text{nominal motor efficiency} \quad (5.10)$$

In which, nominal motor efficiency means the motor efficiency in 100% speed at specified load. VFD factor represents the inefficiencies arisen from the use of VFD device in the system. The change of idealized VFD factor (motor and VFD controller) against the frequency variations is depicted in Fig. 5.6.

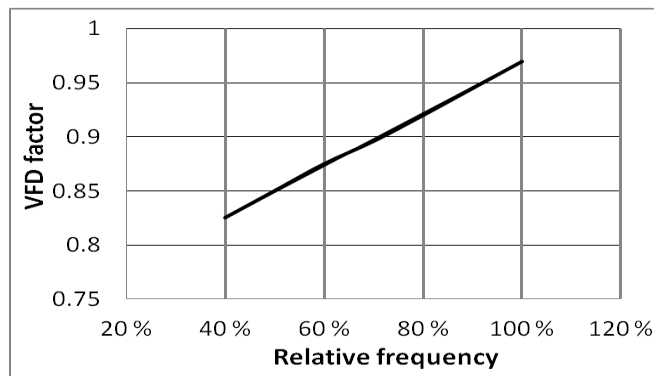


Figure 5.6 VFD factor based on change in frequency

Relative frequency shows the ratio of the frequency at variable frequency to the nominal frequency of the motor. The effects of part load operation and VFD are considered in the calculation of motor efficiency and electricity consumption of the BFPS in this study.

5.3. Scenario 1: Single Pump Optimization

As mentioned before, the problem is divided to several subsets to monitor the effect of each variable more clearly. First, the target is to select the best possible BFP (single unit) from a set of available alternatives. This approach resembles the final decision making process after receiving the proposals from different manufacturers or several options from one manufacturer. Using this approach, the difference between variable and constant speed operation will be clearly examined. Besides the pump type and pump speed, the number of stages is another variable in finding the optimized solution.

The hydraulic characteristics of the pumps are known, i.e. head, NPSH, and power curves. The initial price of each pump, price as a function of stage numbers, lifetime, electricity price, maintenance/operational costs, and interest/discount rate are also known for the calculation of the total costs. In variable speed operation, VSP costs, VFD efficiency in different loads, and speed limits are also set based on available data from the literature.

5.3.1. Problem Definition

The goal in this step is to find a single main pump that is most optimized solution for the system. A booster pump is designated to work in series with the main pump. In this step, the booster pump is fixed for all alternatives to decrease the degree of complexity of the problem. Therefore, we are just to optimize the type and stage number of the main pump in constant and variable speed in variable load. The characteristics of the booster pump which is used for this optimization problem is shown in Fig. 5.7. It is assumed that NPSH is high enough in whole flow range. According to equation 5.6, the price of this booster pump is estimated to be 102,300€. As this price is fixed for all simulation cases in constant and variable speed, it is not a variable in energy and cost calculations in this scenario.

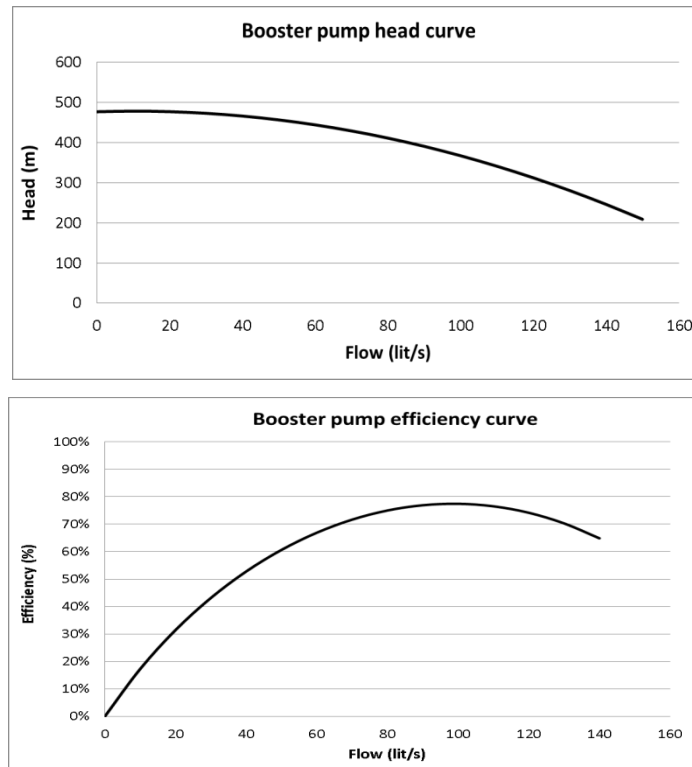


Figure 5.7 Booster pump (1) characteristics, head (above) and efficiency (below)

Among the set of available options, pumps 1 to 6 are selected for single unit operation. This is due to the wide range of flow that these pumps can supply to meet the system demand (the design flow of 100 lit/s). However, to meet the operating point and standard limits the number of stages should be optimized. As discussed before, the main goal of this scenario is to compare and analyze the role of VSP in the selection process of one single BFP.

5.3.2. Results and Discussion

After selection of six pumps (number 1 to 6 from table 5.1) for meeting the system demand, their performance and characteristics are examined and compared to find the best alternative. First, the number of stages should be determined so that the pump can handle the system demand. Here, the system demand is the system head curve given by Eq. 5.7 minus the head supplied by booster pump given in Fig. 5.6 left. The result of this head difference is shown in table 5.5 under *demand on main pump* values.

Then, having the load distribution (from Fig. 5.2), power consumption of each pump and motor size can be calculated based on the Eq. 5.2. Next, using working hours and price of electricity, the energy consumption and energy costs are calculated. Finally, using the interest rate and lifetime, the total costs are calculated for each main pump. The summary of calculations for pump 4 is presented in table 5.5. The calculations are performed for both constant and variable speed to compare the energy costs and total costs.

Based on the results, this pump is capable to meet the head demand of the system in both constant speed and variable speed. The variable speed system needs a smaller motor, resulting in lower capital cost for motor and other advantages of the use of smaller motor. The results show a higher overall efficiency in constant speed pumping (CSP) compared to VSP. This is due to the use of VFD facilities and lower load factors in lower speeds. However, the total energy consumption in VSP is much lower than CSP, 6800 and 10,300 MWh/a, respectively. It indicates that VSP offers 34% reduction in energy consumption compared to CSP for this pump.

Table 5.5 Results of the calculations for pump 5 in CSP and VSP

Pump 5 (with 7 stages)	Constant speed					Variable speed			
	Load cycle				EN load	Load cycle			
	65%	85%	Full	105%	125%	65%	85%	Full	105%
Yearly Hours (%)	30%	42%	25%	3%	-	30%	42%	25%	3%
Flow (lit/s)	65	85	100	105	125	65	85	100	105
System head (m)	1034	1086	1135	1153	1135	1034	1086	1135	1153
Booster head (m)	437	401	367	355	297	437	401	367	355
Demand on main pump (m)	597	685	768	798	838	597	685	768	798
Main pump supply (7-stage) (m)	1105	1071	1037	1024	965	597	685	768	798
Power (kW)	1056	1189	1287	1320	(1451)	502	716	930	1012
Energy consumption ¹ (MWh/a)	2660	4193	2704	333	-	1266	2526	1952	255
Pump total energy use (MWh/a)	9,890				-	6,000			
Pump efficiency (%)	74 %	80 %	81 %	81 %	-	80 %	81 %	80 %	79 %
Relative speed (%)	100%	100%	100%	100%	(100%)	75 %	82 %	88 %	90 %
Motor standard power (hp)	without EN demand= 1750				2000	1750 (without EN demand, 1500)			
Motor load factor (%)	71 %	80 %	86 %	88 %	(97%)	38 %	55 %	71 %	78 %
VFD factor (%)	-	-	-	-	-	91 %	93 %	94 %	95 %
Motor efficiency (%)	97 %	97 %	96 %	96 %	(94 %)	82 %	88 %	91 %	91 %
Overall efficiency (%)	63 %	71 %	74 %	75 %	(68 %)	61 %	69 %	72 %	73 %
Total energy use² (MWh/a)	10,250				-	6,840			

1. Energy consumed by pump itself, not including motor and VFD inefficiencies

2. Including all pump, VFD, and motor inefficiency factors

Another significant result of this set of calculations is the need for larger pump and motor for meeting the EN requirements. Though this oversizing causes big losses in CSP, it may favor the use of VSP to reduce the losses. For instance, while a 1750 hp motor can properly handle the pumps for loads up to 105% of the full load, a 2000 hp motor is needed to meet the EN requirements. This oversized motor can be however useful to increase the motor efficiency. This is due to the fact that motor efficiency is higher in load factors around 75%. As the results show, having one size bigger motor gives the load factor of 88% even for pump loads higher than 100% full load.

It should be noted that the same pump assembly is used for both systems, though number of stages may be less for VSP. In other words, the difference in the output of the system is just compared for the use of VSP and CSP with exactly the same pump. Using VSP for this pump, it is possible to reduce one stage but still meeting the demands with lower costs. The total energy consumption then further reduces to 6830 MWh/a. However, lower stages (less than 6) increases the costs of VSP as the speed must exceed nominal speed to meet the demand. Therefore, the optimal number of stages for CSP is 7 while for VSP is 6 for the pump 5.

After performing the same approach for all the alternatives, the energy consumption and total costs for each pump can be calculated. The comparison among 6 BFPs is illustrated in table 5.6 in constant and variable speed. The maximum number of stages is limited to 10 stages to remain in proper boundaries for estimations.

Table 5.6 Comparing energy costs and total costs for 6 pumps in constant and variable speed

		unit	booster pump	pump1	pump2	pump3	pump4	pump5	pump6
Constant speed	stage number	-	-	10	10	6	8	7	10
	pump price	€	102300	192800	231600	229500	218100	226400	201000
	Meeting EN	-	-	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No
	Total yearly energy costs ¹	€/a	312000	-	921200	793100	840200	861000	-
	motor size	hp	700	-	2000	2000	2000	2000	-
	Total yearly costs²	€/a	326000	-	959000	831000	876000	898000	-
Variable speed	Total yearly energy costs ¹	€/a	312000	550900	618300	574600	604000	574300	602700
	VFD price ³	€	-	210000	210000	210000	210000	210000	210000
	motor size	hp	700	1750	1750	1750	1750	1750	1750
	Total yearly costs⁴	€/a	326000	616500	690100	646100	673600	645400	669600
	Notice: booster pump costs should be added to each option in calculation of the final costs of the boiler feed water pumping system								

1. Electricity costs including pump + motor efficiency

2. Including energy costs and capital costs of the pump (not motor) in 10 yearly installments

3. Based on the motor size

4. Including energy costs and capital costs of the pump + VFD (not motor) in 10 yearly installments

The first result seen in the table is the domination of energy costs in total costs for all the alternatives, with more than 89% of the annual costs in pump lifetime. It indicates that the least energy consuming option offers the least total costs. This is partly due to the high number of operating hours (8400 hours/a) for the system. Pumps 1 and 6 cannot meet the EN requirements within the number of stages so they

are not among feasible solutions for CSP. However, the use of VSD facilitates these two pumps to meet the EN demand.

The most significant result from the simulation and calculations in this scenario is different optimized solutions based on speed regulation method. Among all six available options, pump 3 shows the least energy and total costs in CSP, with 793,000 and 831,000 €/a, respectively. It means pump 3 with 6-stage configuration is the optimized solution for constant speed scheme. However, among those pumps that can be used with constant speed, pump 5 has slightly better results in variable speed. Among those pumps applicable for CSP (pumps 2, 3, 4 and 5), pump 5 has the minimum energy and total costs in variable speed, 574,300 and 645,400 €/a respectively. It means if the plant owner is to select a pumping system for CSP and it is likely to upgrade the system to VSP in the future, pump 5 can be the most optimized solution.

However, pump 1 shows to be the best optimized solution for VSP among all six options, with 550,900 and 616,500 €/a for energy and total costs. In other words, while this pump cannot be used in CSP due to inability to meet the EN requirements, it is the best option in VSP. Therefore, if the BFPS is designed for running in variable speed from the beginning, the most cost efficient option is pump 1. This is the answer for one of the main questions of this study. Knowing the speed regulation method may change the optimized BFPS for a boiler plant.

Most of the pumps show the need for a smaller motor in VSP. It should be noted that the price estimation in this study may not be completely precise. The results are however reliable as the energy costs are dominant in calculation of total costs. All in all, using a VSD pumping solution for this energy-intensive application (BFPS) shows to be economical, with payback period of lower than two years. Other advantages and disadvantages of VFD should however be considered in making the final decision. Other additional costs in installation and maintenance of the pumps, motor, and VFD are not considered in this study.

The final performance curve of six pump alternatives, as well as system head curve after the booster pump is shown in Fig. 5.8. EN requirements are illustrated with cross individual points on the graph.

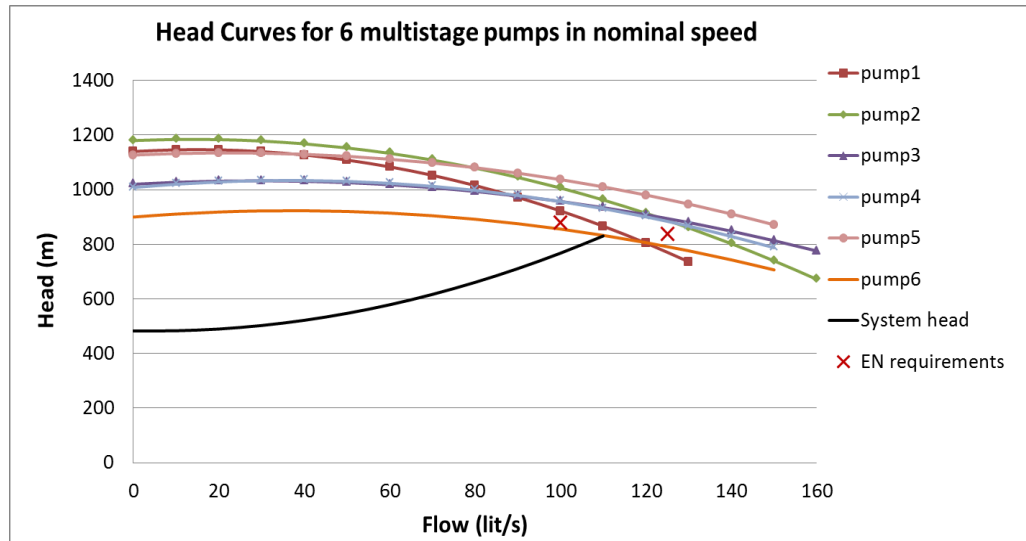


Figure 5.8 BFP head curves in CSP and system demand curve after booster pump

As we can see, pump 1 is able to handle the system demand but not for meeting EN flow requirements. One reason in difference in performance of different pumps in variable load is the change in efficiency of the pumps in different loads (Fig. 5.9).

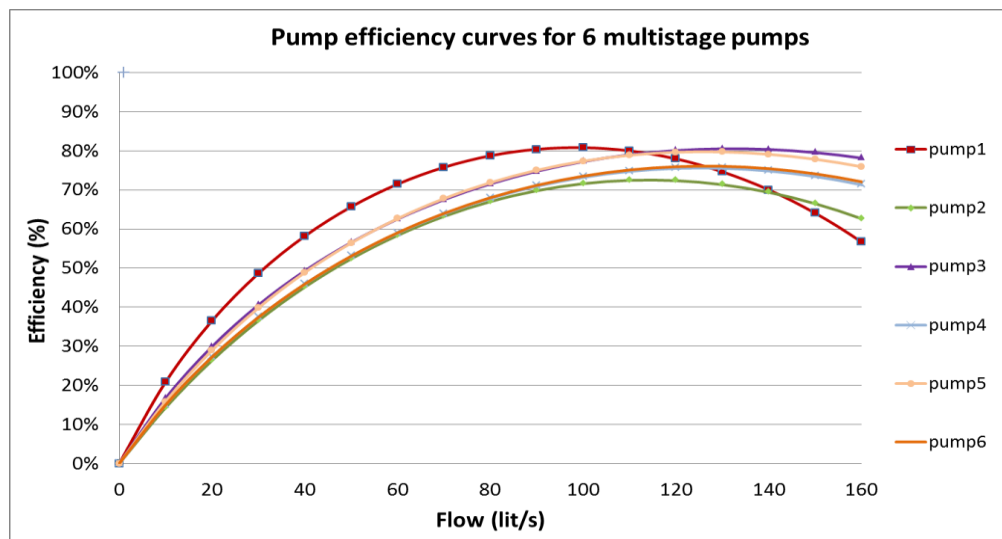


Figure 5.9 Efficiency curve for six different pumps

For example, for pump3 and 6, the efficiency increases in full load and higher loads in this load regime. However, for pumps 1, efficiency tends to increase in loads slightly less than full load, to a specific limit.

It is possible to further optimize the number of stages for each pump in variable speed. It means after selection of variable speed regulation, the pump may be smaller in size, resulting in lower energy consumption (table 5.7). Comparing the results show that it is almost possible to reduce the number of stages for variable speed.

Pump 1 shows again the minimum total operating costs among all alternatives, with 606,500 €/a. It should be noted that stage numbers lower than the optimum for variable speed will result in higher power consumption in higher loads due to relative speed values higher than 100%.

Table 5.7 Optimizing pump stage number for variable speed

		unit	booster pump	pump1	pump2	pump3	pump4	pump5	pump6
Constant speed	stage number	-	-	10	10	6	8	7	10
	pump price	€	102300	192800	231600	229500	218100	226400	201000
	Meeting EN	-	-	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No
	Total yearly energy costs ¹	€/a	312000	-	921200	793100	840200	861000	-
	motor size	hp	700	-	2000	2000	2000	2000	-
	Total yearly costs ²	€/a	326000	-	959000	831000	876000	898000	-
Optimal variable speed	stage number	-	-	7	8	5	7	6	9
	pump price	€	102300	150200	198100	202000	198600	203200	186800
	Total yearly energy costs ¹	€/a	312000	547900	617200	577400	605100	574300	605400
	VFD price ³	€	-	210000	210000	210000	210000	210000	210000
	motor size	hp	700	1750	1750	1750	1750	1750	1750
	Total yearly costs ⁴	€/a	326000	606500	683600	644500	671500	641600	670000
	Notice: booster pump costs should be added to each option in calculation of the final costs of the boiler feed water pumping system								

1. Electricity costs of pump + motor

2. Including energy costs and capital costs of the pump (not motor) in 10 yearly installments

3. Based on the motor size

4. Including energy costs and capital costs of the pump + VFD (not motor) in 10 yearly installments

Therefore, having the load pattern offers more sophisticated selection process. For example in this scenario (single pump optimization), if the optimization process would be performed based on a single design point, which is full-load operating point, pump 3 favors all the alternatives in CSP and VSP. However, among pumps working in both speed regulations, the results showed that pump 5 is the optimal solution for VSP in variable load (table 5.7). If pump 3 was selected without having the load data, which was the most optimized solution in that case, the extra yearly costs in VSP would be 4,000 € higher compared to pump 5. It would result in higher energy consumption equal to 370 MWh during pump lifetime.

In conclusion, using VSD offers energy savings for all four options that can be used in constant and variable speed. Pump 5 shows the highest reduction in energy consumption in variable load with 3412 MWh/a, which offers 33.3% energy savings.

For the other alternatives, using VSP has energy savings between 27% and 33%, compared to CSP.

5.4 Scenario 2: Multiple Pumps Optimization

In this scenario, two more options are introduced to the optimization process. First, the number of main pumps in parallel can be varied from 1 to 4, using identical units. Moreover, the selection of booster pump can be optimized among three available options. Hence, the final goal is to select the optimized BFPS by varying the number of stages, the number of pumps in parallel, the booster pump alternatives, and the pump type itself.

5.4.1. Problem Definition

First, three booster pumps are introduced for evaluation in different settings. The booster pumps are selected from the same source, model 3393 [23]. These booster pumps have different head and prices, to capacitate the optimization in different head demands. The performance characteristics and price estimation of these units are presented in table 5.8. Among these booster pumps, booster 1 is the same unit that was used in the first scenario (Fig. 5.7).

Table 5.8 Performance characteristics of three booster pumps

Booster pumps (model 3393) 6x8-13A RS (2 sizes) 6x8-13B RS [23]		Head					Power			
		Load cycle				EN load	Load cycle			
		65%	85%	Full	105%	125%	65%	85%	Full	105%
Flow (lit/s)		22.8	29.8	35.0	36.8	43.8	22.8	29.8	35.0	36.8
	Price (€)	Head (m)					Power (kW)			
Booster 1	85200	437	401	367	355	437	393	430	456	464
Booster 2	104000	442	426	410	405	442	489	520	544	552
Booster 3	81700	431	397	364	352	431	383	420	445	453

One of these booster pumps can be selected to contribute the main pumps to overcome the head. It is assumed that NPSH_r is maintained in the whole flow range. It should be noted that these booster pumps are always in constant speed operation,

even if the main pumps are in VSP mode. Among the main pumps, pumps 7 to 12 are chosen for this scenario. Therefore, the goal of optimization problem is to find the best pump type among six alternatives while optimizing the number of stages (1 to 12), the number of pumps in parallel (1 to 4), and the most suitable booster pump (one from three units).

Therefore, the optimization problem can be explained as a classic discrete optimization problem (convex). The objective function and constraints can be defined as follows:

$$\min_{n_i, m_i, s_i, m_j} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^3 m_i n_i (CE_i + CP_i) + m_j (CE_j + CP_j) \quad [€/a] \quad (5.11)$$

in which:

$i = \{1, 2, \dots, 6\}$ main pump types (six alternatives)

$j = \{1, 2, 3\}$ booster pump types (three alternative)

n = number of identical pumps in parallel

$m = \{0, 1\}$ binary number to control which unit is in use or not

s = number of stages of the main pumps

CE = energy costs (€/a)

CP = pump (and VFD in variable speed) capital costs (€/a)

So that (constraints):

n : positive integer number $1 \leq n \leq 4$

Only one booster pump must be selected: $\sum_{j=1}^3 m_j = 1$

Only one main pump can be selected: $\sum_{i=1}^6 m_i = 1$

Each pump has a minimum and maximum flow set: $Q_{min,i} < Q_i < Q_{max,i}$ [lit/s]

in which flow rate of each parallel pump (identical) is: $Q_i = Q_o / n_i$ [lit/s]

The sum of head of main pump and booster pump should be higher than system head in EN flow requirement(Q_{EN}):

$$\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^3 m_i H_i(Q_{EN}) + m_j H_j(Q_{EN}) \geq H_{EN} \quad (5.12)$$

in which H_{EN} is EN head requirement.

Other supporting equations that lead to the objective function can be explained as follows:

$$\begin{aligned}
 \text{Head of each main pump:} \quad H_i &= H_i(Q_i) = s_i(a_i Q_i^2 + b_i Q_i + c_i) & [\text{m}] \\
 \text{Head of booster pump:} \quad H_j &= H_j(Q_o) = a_j Q_o^2 + b_j Q_o + c_j & [\text{m}] \\
 \text{Main pump power:} \quad P_i &= P_i(Q_i) = s_i(\acute{a}_i Q_i^2 + \acute{b}_i Q_i + \acute{c}_i) & [\text{kW}] \\
 \text{Booster pump power:} \quad P_j &= P_j(Q_o) = \acute{a}_j Q_o^2 + \acute{b}_j Q_o + \acute{c}_j & [\text{kW}]
 \end{aligned}$$

To calculate the energy costs, the power consumption is multiplied in working hours and price of electricity. In calculation of pump capital cost for each year during the lifetime, the capital price is multiplied in installment factor, which can be obtained from Eq. 5.9. These equations are to be optimized (minimized) in objective function:

$$CE = P_i \times WH \times PE \quad [€/a]$$

$$CP = PP \times IR \quad [€/a]$$

Q_o = given duty of the whole pumping system (lit/s)

Q_i = duty of each pump working in parallel (lit/s)

a, b, c = coefficients for pump head equation

$\acute{a}, \acute{b}, \acute{c}$ = coefficients for pump power equation

WH = working hours (hr/a)

PE = electricity price (€/kWh)

PP = pump capital price (including VFD in variable speed) (€)

IR = annual installment factor (1/year)

Now, the optimization problem is properly defined. Number of possible combination of the solutions can be determined as follows:

Number of possible solutions

$$\begin{aligned}
 &= \text{number of booster pumps} \times \text{number of main pumps} \\
 &\times \text{number of available stages} \\
 &\times \text{number of possible parallel units}
 \end{aligned}$$

$$= 3 \times 6 \times 12 \times 4 = 864$$

Among these solutions, the feasible ones should meet the constraints. Then, the optimized solution has the minimum total costs.

5.4.2. Results and Discussion

It is possible to decompose the problem to several subsets so that the solution can be reached more quickly and reliably. In this case, the optimized solution in each region is searched, and then compared to other regions to find the global solution. For example, the optimization problem can be solved for each pump individually and compared together. The summary of the results for this approach in constant and variable speed are collected in table 5.9 for pump 7.

Using pump 7, the optimized solution can be reached with 2 parallel pumps, each with 9 stages. This combination offers the minimum energy consumption and total costs for the system, when pump 7 is used. Based on the results, system overall efficiency is again higher in constant speed. Total yearly energy consumption in variable speed is 2084 MWh/a lower than constant speed, promising 28.3% savings in energy costs. The need for larger motors for meeting EN standards in any speed regulation is another result of this survey. After adaption of the same approach for each pump type, the optimization problem defined in Eq. 5.11 can be solved. The summary of the results for each pump type and the final solution are portrayed in table 5.10.

According to the results of this analysis presented in table 5.10, the optimal solution in constant speed is the same as variable speed. Pump 11 shows lower energy consumption and total costs in constant speed, 1.051 and 1.106 M€/a, respectively. In variable speed mode, pump 11 still promises to be the best choice with 0.873 M€/a for energy costs and total costs of 0.970 M€/a. Therefore, speed regulation strategy does not affect the optimal choice for boiler pumping system in this scenario. Comparing pumps' performance in variable speed reveals that the number of pumps in parallel can be reduced for some cases, pump 9 and 10. It means while three units should work in parallel to overcome the duty in constant speed, two units are enough in variable speed. This is significant savings in capital, energy, and operating costs. The number of stages is also lower in variable speed compared to constant speed for pump 11 and 12.

Table 5.9 Results of the calculations for pump 7 in CSP and VSP

Pump 7 (2 parallel pumps, each 9 stages)	Constant speed					Variable speed			
	Load cycle				EN load	Load cycle			
	65%	85%	Full	105%	125%	65%	85%	Full	105%
Yearly Hours (%)	30%	42%	25%	3%	-	30%	42%	25%	3%
Boiler capacity (lit/s)	65	85	100	105	125	65	85	100	105
Pump capacity (lit/s)	32.5	42.5	50	52.5	62.5	32.5	42.5	50	52.5
System head (m)	1034	1086	1135	1153	1135	1034	1086	1135	1153
Optimized booster pump, head (m)	442	426	410	405	379	442	426	410	405
Demand on main pumps (m)	591	661	725	748	756	591	661	725	748
Main pumps supply (9-stage) (m)	954	922	892	880	827	591	661	725	748
Power (1 pump) (kW)	425	475	512	525	-	237	324	408	441
Energy consumption ¹ (MWh/a)	1070	1675	1076	132	-	597	1142	857	111
Pumps' total energy use ² (MWh/a)	2 x 3953 = 7906				-	2 x 2706 = 5412			
Pump efficiency (%)	60 %	64 %	66 %	67 %	(67%)	63 %	66 %	67 %	67 %
Relative speed (%)	100%	100%	100%	100%	(100%)	80 %	87 %	93 %	95 %
Motor standard power (1 pump) (hp)	without EN demand= 750				800	800 (without EN demand, 600)			
Motor load factor (%)	71 %	80 %	86 %	88 %	(96 %)	40 %	54 %	68 %	74 %
VFD factor (%)	-	-	-	-	-	92 %	94 %	95 %	95 %
Motor efficiency (%)	97 %	97 %	96 %	96 %	(94 %)	84 %	89 %	92 %	92 %
Overall efficiency³ (%)	58 %	62 %	64 %	64 %	(63%)	53 %	59 %	62 %	62 %
System total energy use⁴ (MWh/a)	2 x 4096 = 8192				-	2 x 3054 = 6108			

1. The sum of energy consumed by main pumps, not including motor and VFD inefficiencies

2. Based on brake horsepower for two parallel main pumps

3. Including main pumps, VFD, and motor inefficiency factors

4. For two main pumps, including inefficiency factors in main pumps, VFD, and motor

According to the results (table 5.10), the optimal solution for energy consumption may be different from the optimized solution based on total costs. For instance, pump 9 has the higher total costs while lower energy costs compared to pump 7 in VSP. Since price estimation in this study is not completely precise, the results based on energy consumption are more reliable for making final decision. Using VSP offers

energy savings between 24% and 30% for different main pumps in this scenario. The highest savings in variable speed operation belongs to pump 10 with 2700 MWh/a resulting in 226,000 € cost savings per year.

Table 5.10 Optimizing pump numbers in series and parallel for constant and variable speed

		unit	pump7	pump8	pump9	pump10	pump11	pump12
Optimal constant speed	parallel pumps	-	2	2	3	3	2	2
	stage number	-	9	9	10	8	12	10
	1 pump price	M€	0.121	0.135	0.094	0.101	0.107	0.123
	booster pump	-	b2	b2	b2	b2	b2	b1
	meeting EN	-	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	total yearly energy costs ¹	M€/a	1.069	1.110	1.089	1.145	1.051	1.089
	motor size ²	hp	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Optimal variable speed	total yearly costs³	M€/a	1.129	1.174	1.155	1.215	1.106	1.149
	parallel pumps	-	2	2	2	2	2	2
	stage number	-	9	9	10	8	10	9
	total yearly energy costs ¹	M€/a	0.894	0.934	0.890	0.919	0.873	0.905
	VFD price ⁴	M€	0.192	0.192	0.192	0.216	0.192	0.192
	motor size	hp	2400	2400	2400	2600	2400	2400
	total yearly costs⁵	M€/a	0.985	1.051	0.988	1.024	0.970	1.012
Notice: booster pump power and costs are included								

1. Total electricity costs of the system (booster pump + main pumps)

2. Including booster + main pumps

2. Including electricity costs and capital costs of the pumps (not motor), in 10 yearly installments

4. Based on the motor size

5. Including energy costs and capital costs of the pump + VFD (not motor) in 10 yearly installments

5.4.3 Role of Booster Pump

One of the variables in this scenario is the booster pump connected in series to the main BFPs. The booster pump can be selected from three different alternatives in optimization problem. Since these three units have different characteristics and prices (table 5.8) they can affect the optimal solution. In this study, booster pumps are always in constant speed operation even when the main BFPs are in VSP mode. The combination of parallel BFPs and booster pump is portrayed in Fig. 5.10 for pump 7. As mentioned earlier, when main BFPs cannot reach the system head curve, booster pump contribute in raising the resultant head of the pumps.

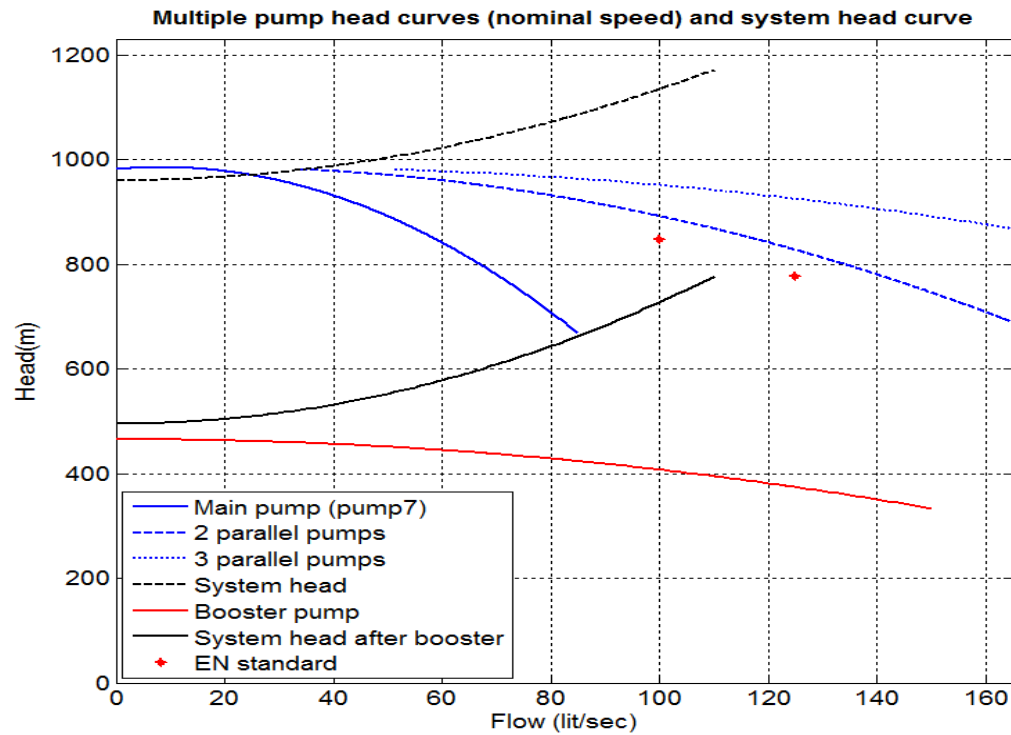


Figure 5.10 Boiler pumps in parallel, booster pump, and system requirements

5.5 Scenario 3: Optimization of Operation in Parallel

In the previous scenarios the selection process of an optimized BFPS were described. The optimal design for a single main BFP (scenario 1) and combination of BFPs in series and parallel (scenario 2) was illustrated. However, to optimize the life cycle costs of a pumping system, some measures should be considered after the initial selection. In this section, the focus is dedicated to optimal control of BFPS in operation. Here, “control” means to adapt the most suitable strategy in running the available units for different loads. There are some studies in this field discussing only two parallel units [15]. In some studies, the effect of pump’s driver is only examined [33]. There are many other studies that optimize pumping systems, based one single operational point [34], or one single pump.

In this study, two identical BFPs are studied in this scenario in series with a booster pump. It is assumed that both BFPs are driven with synchronous speed. To find the optimized control strategy, the feasible solutions should be defined based on some constraints. The constraints can be minimum flow (shut-off) and maximum flow (run-out) or some other criteria, like pump efficiency [35]. Then, based on the system characteristics, the most optimized operation method can be determined.

5.5.1. Model Construction in MATLAB

A mathematical model based on algorithm analysis is built in MATLAB for the optimization of pumps in parallel operation. Load data of the system during the operation time is imported to the code, sorted and weighted. Then, the appropriate pumps that may fir the system whether individually or in combination are introduced to the tool. The algorithm first checks the input data of each pump and synchronize them in unified units and intervals. Then, the applicability of combining pumps in parallel and series is examined. If so, head curves and power consumption is calculated in each possible combination of pumps for the entire flow range. Next, the results are produced for different speed regulation within the acceptable speed spectrum.

In each step, the ability of the BFPS to cover the system head and standard requirements is monitored. The final results are visualized in each step to provide better cognition about the optimization results and discover the drawbacks, if needed.

5.5.2. Results and Discussion

To automatically control a multi-pump system in variable speed, the speed limits should be specified. They can be based on torsional and lateral speeds provided by the manufacturer. The nominal speed of the pump and motor should also be known to define the criterion for the optimization problem. Example below deals with a BFPS including two identical pumps in parallel.

In this scenario, pump 7 is examined to establish a control strategy for parallel operation. The characteristics of one stage of this pump can be calculated using equations 5.1-2 with the data provided in table 5.1. The variable load data for the boiler is also given in sub-section 5.1.1 and Eq. 5.7. As it was mentioned in scenario 2 of this study, two units of pump 7 in parallel provide the most optimized solution in variable speed for the initial selection (table 5.10). Now, using the optimization model developed in this section, the optimized control strategy for running these two pumps can be seen in Fig. 5.11.

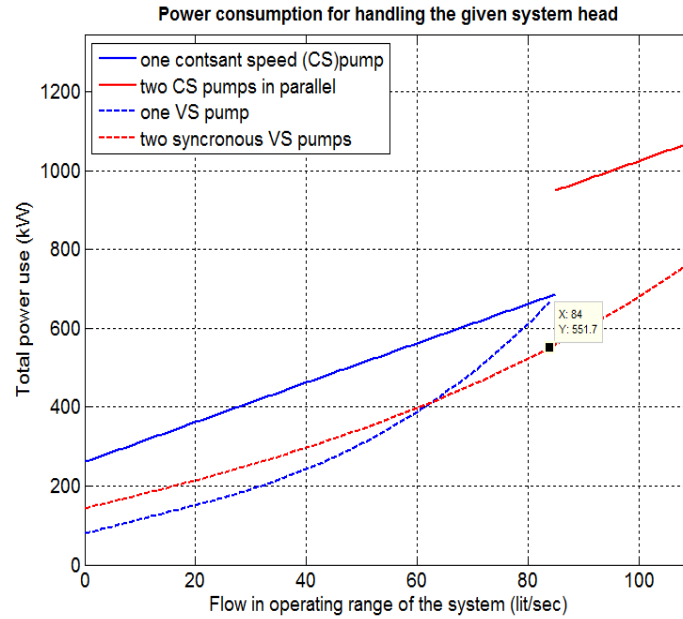


Figure 5.11 Determination of control strategy for parallel operation

According to the results illustrated in Fig. 5.11, the power consumption of one and two (parallel) pumps depends on speed regulation. The dash lines show the pump(s) brake horsepower in variable speed. This result is determined for the given pump curves and system head presented in Fig. 5.10. For the given system, one pump can be run in constant speed up to 84 lit/s, and then two pumps must be used to handle the duty. In variable speed, in single or parallel operation, the power consumption is lower but reaching the linear curves at the end, which is the nominal speed.

An important result that can be seen is the lower power consumption for parallel pumps from flow of 62 to 84 lit/s, where one single pump can also be used. It means that although one single pump can handle the task up to 84 lit/s in any speed regulation, two parallel pumps (using VSD) have lower energy consumption for the flow range between 62 and 84 lit/s. Two parallel pumps consume 550 kW at flow of 84 lit/s against 660 kW used by one single pump. It offers 465 MWh electricity cuts in one year for 50% operation, saving 38,000 € for the system. Therefore, the optimized pattern to control the operation of the pumps in parallel is the lowest intersection of all power curves, subject to minimum flow and pump efficiency limits. The right limit in figure indicates the highest flow rate in healthy operation.

6. SIMULATION IN MEDIUM-SIZE POWER PLANT

In the previous chapter, the optimal design of BFPS was studied in two scenarios: selection process and operation phase. The attention paid to find the most optimized solution from *system design* viewpoint. The result showed that combining BFPs in series and parallel can reduce the life cycle costs adapting the most suitable speed regulation for a continuously variable load. In this chapter, the performance of BFPS is further studied in a power plant to include possible influences between the pumps and other units. In other words, this chapter is dedicated to survey the change in power plant performance and output in variable load, considering the electricity consumption of the boiler pumps in different settings.

6.1. Case Study: Medium-size Power Plant

A 250MWth boiler in operation in a CHP plant is considered as the case for this analysis. The CHP plant is targeted for production of 50MW electricity and 165MW heat for the neighboring district heating (DH) network. The boiler is a drum boiler with constant pressure regulation in part load operation. The steam flow variation is assumed the same as load data presented in section 5.1. It means the effect of blowdown, desuperheating, and soot-blowing is neglected, maintaining the identical load variation pattern in BFP and turbine inlet. Hence, the operation of the plant in part load is directly translated into the load variation in BFPs. Eliminating the lateral and auxiliary units, the plant layout for the main units is portrayed in Fig. 6.1.

6.1.1. Fuel Composition

The plant is in operation in Finland. Fuel composition is taken into account to calculate the carbon emissions. The characteristics of the fuel are presented in table 6.1 for the plant in question. The missing data is acquired from [36].

Table 6.1 Fuel characteristics of CHP plant

Fuel characteristics	share	LHV _{daf}	Moisture	Dry content					
				C	H	N	O	S	ash
	%	MJ/kg	%	%dry	%dry	%dry	%dry	%dry	%dry
Wood chips	83	18.5	38	50.2	6.4	0.5	42	0.05	0.8
Peat	10	7.7	53	54.3	5.4	1.4	34.1	0.4	4.4
Coal	7	25.3	9	73.4	4.6	1.6	8.1	0.6	11.7
Mixed fuel	100	17.9	37.5	52.3	6.2	0.7	38.8	0.1	1.9

The CHP plant is equipped with a multifuel boiler benefiting from a mixture of different solid fuels, namely biomass (wood chips), coal and peat.

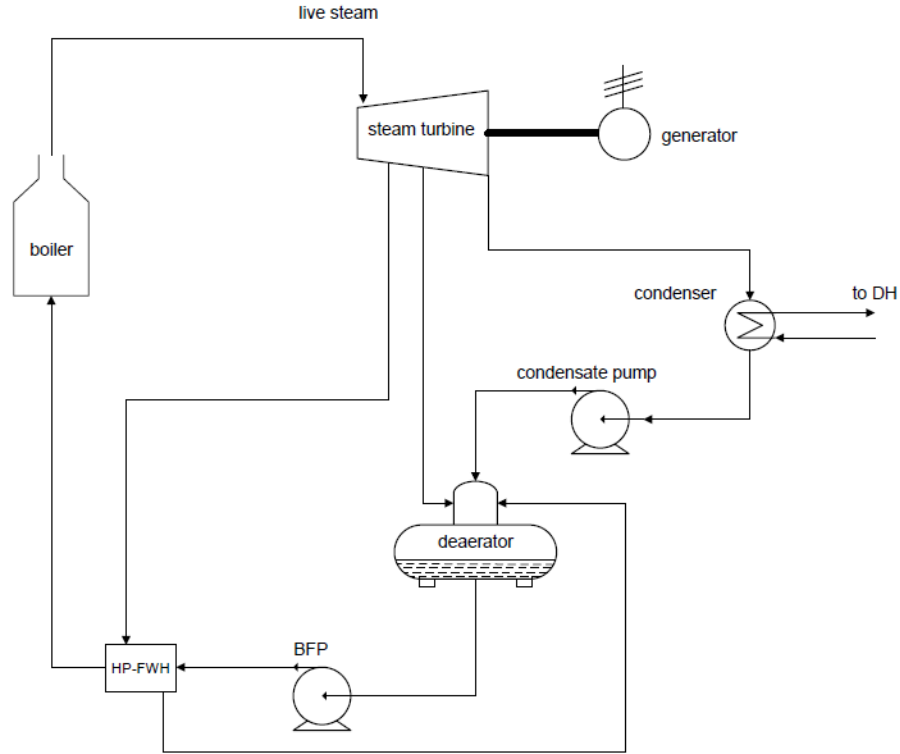


Figure 6.3 Simplified layout of CHP plant

6.1.2. Unit Parameters

The most relevant parameters of the plant units needed for simulation are presented in table 6.2. For the BFP, the duty at design operating point is known. In simulation practices, the data of the pumps examined in this study will be used when the corresponding pumping system is in question. For example, if the BFP is a single unit in constant speed, the suitable unit is selected from pump 1 to 6 presented in section 5.3 (scenario 1) while for multiple pumps from section 5.4 (scenario 2).

6.2. Modeling of Power Plant in IPSEpro

To examine the BFPS in operation in CHP plant, IPSEpro modeling tool is used in this study. IPSEpro is a equation based tool for simulation, modeling, analysis and design of components and processes in energy and process engineering [37]. IPSEpro is capable for building new models and development of the existing model library, using a Model Development Kit. In order to build the CHP plant in question,

the unit parameters depicted in table 6.2 is used, as well as BFP characteristic presented in previous chapter.

Table 6.2 Equipment parameters of CHP plant

Equipment	Parameter	Unit	Value
Boiler	steam pressure	bar	92
	steam temperature	°C	530
	steam flow	kg/s	90
	efficiency	%	92
	Air ratio	-	1.3
	pressure loss	bar	9
Turbine	inlet pressure	bar	90
	inlet temperature	°C	525
	isentropic eff.	%	80
	mechanical eff.	%	91
Generator	electrical eff.	%	95
	mechanical eff.	%	93
Condenser	inlet pressure	bar	0.95
	DH temp.	°C	90
Condensate pump	efficiency	%	77
	mechanical eff.	%	95
Deaerator	pressure	bar	4.85
BFP	design flow	lit/s	100
	pressure	bar	102
HP FWH	steam pressure	bar	9.5
	water pressure loss	bar	1

6.2.1. Building New Model for Pump Part Load Operation

To analysis the plant performance in part load operation, the simulations should be performed for units in part load. Among units available in model library of IPSEpro, pump and motor do not provide ability for part load modeling. Therefore, one of tasks performed in this study is to build part load models for BFP and electric motor (including VFD) so that speed regulation in variable can be studied.

For building a part load model for boiler pumps in IPSEpro, new equations should be encoded to the model library kit. These new equations are pump performance curve data, pump brake horsepower and efficiency relationship (Eq. 2.10-11), and affinity laws (Eq. 2.15-17). In the presence of geometric data of the piping, NPSH requirements can also be added (Eq. 2.15). After definition of mentioned equations,

the developed head and corresponding power, efficiency, and speed regulation (in VSP) can be determined in different loads. A typical pumping system comprising of two parallel units in addition to relevant data window for newly-built pump model is illustrated in Fig. 6.2.

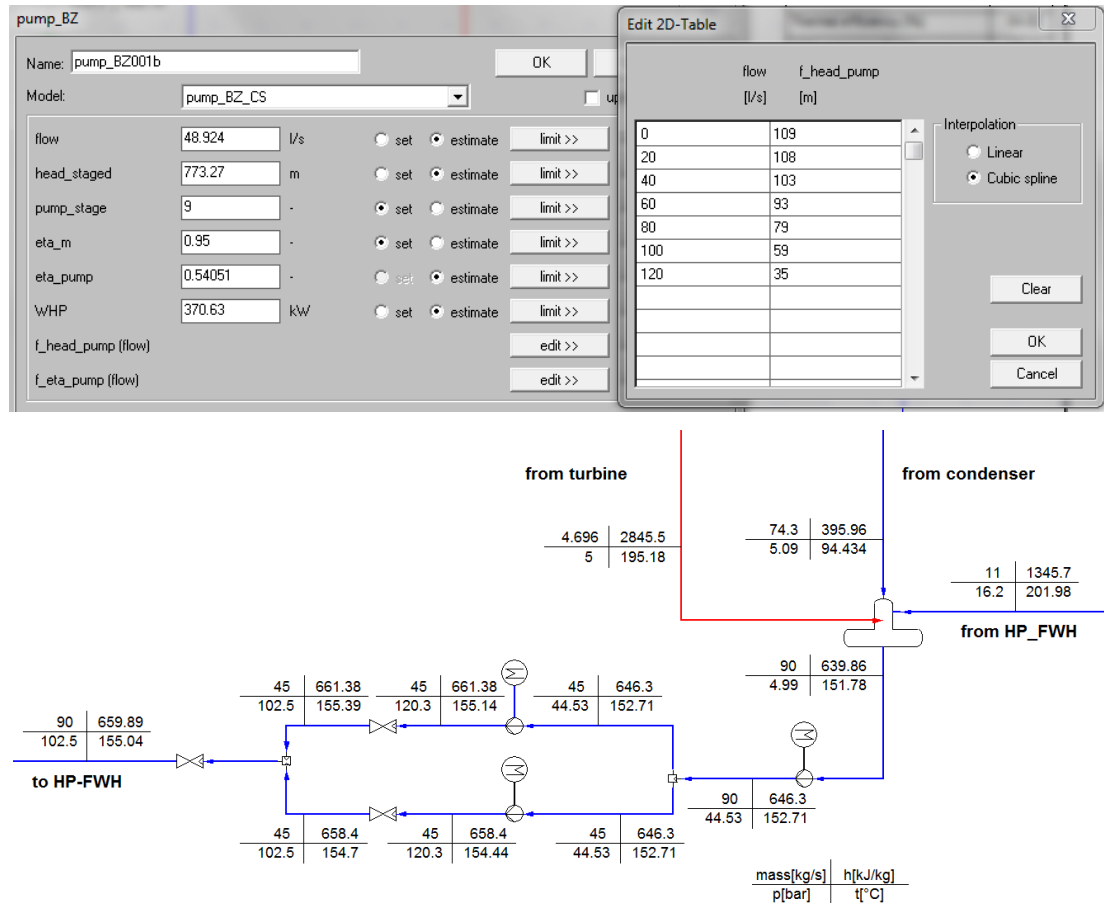


Figure 6.4 Input panel of pump model built for simulation of variable load (above) and layout of boiler feed pumping system in IPSEpro (below)

6.3. Simulation of BFP Solutions in Power Plant

After construction of new pump model in the simulation tool, the entire CHP plant can be simulated in full load and part load. New pump and motor models can incorporate the necessary characteristics of the pumping system in part load operation, as well as speed regulation. To model the CHP plant, unit parameters presented in table 6.2 is used, as well as pump data from previous chapter. Boiler model comprises economizer, steam drum, furnace, combustor (burner), circulation pump, and superheater. Using this approach, any fluctuation in parameters can be more precisely simulated. A layout of the plant in full load operation is illustrated in

Appendix 1. BFPS includes a booster pump (booster 1) and two parallel units (pump 9), which were studied earlier in second scenario.

6.3.1. Plant Output in Variable Load under Speed Regulation

Having the CHP plant model built, plant output and performance can be evaluated in different loads. Carbon emissions can be calculated for any simulation case as the composition of mixed fuel is known (table 6.1). The results of analysis of the CHP plant in part load for two pumping scheme is illustrated in table 6.3.

Table 6.3 CHP plant performance in part load for constant and variable speed boiler pumps

CHP	Load	Flow	Head demand	Pump head	Relative speed	Pumps power	Net power output	Plant electric eff.	Plant thermal eff.
unit	%	kg/s	bar	bar	%	MW	MW	%	%
Constant speed	100%	90	102	121	100	2.06	58.8	22.5	65.2
	80%	72	102	130	100	1.90	46.8	21.6	66.2
	60%	56	102	137	100	1.69	34.9	20.6	67.5
Variable speed	100%	90	102	102	90	1.60	59.3	22.7	65.1
	80%	72	102	102	83	1.36	47.4	21.9	66.0
	60%	56	102	102	78	1.13	35.5	21.0	67.2

A sample layout of the CHP plant in operation with 60% load using variable speed pumps is portrayed in Appendix 2. The required equipment parameters and assumptions are also illustrated in the same layout.

According to the results, the net electrical output of the CHP plant is higher in variable speed pumping, as expected. In 60% load, the plant offers 35.5 MWe in VSD while 34.9 MWe with constant speed BFPs. Moreover, the electric efficiency shows an increase of 2%. It offers 5370 tons reduction in carbon emissions each year. However, it is seen that thermal efficiency in constant speed is slightly higher, due to increase in feed water enthalpy before feed high pressure water heat. This additional heat is in fact the waste heat caused by throttling the extra pressure provided by pumps in constant speed.

7. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATION

The ultimate goal of this study was to examine the optimal design of boiler feed water pumping systems, to minimize the energy consumption and total costs. By using a “system design” approach, the optimal pumping solution can be discovered by consideration of different pumps, combination of multiple pumps, and speed regulation. Boiler feed pumps are characterized for high static head that offers an approximately flat system head. Therefore, one of the main goals of the study was to examine the feasibility and economic analysis of variable speed pumping in such pumping systems.

To increase the reliability of the analysis, pump alternatives were selected from a set of boiler pumps manufactured by Goulds Pumps. The data for the water flow of the boiler pumps were obtained from an operating power plant in Finland. The flow pattern offers a variable load scheme during the year. Pump price estimation in this study is based on correlation between pump’s power and capital price of a reference pump with known power. Since operating hours of the boiler pumps is relatively high, the energy costs dominate the total life cycle costs. Comparing the results in different cases shows that energy costs comprise about 90% of the yearly costs. The optimization process was divided to three different scenarios to ease the study of each variable. The detailed results are presented at the end of each section.

In utilization of one single boiler feed pump with a booster pump in series, speed regulation method and number of stages of the pumps were optimized. Variable speed in main pump showed a reduction in energy costs, up to 33%, compared to constant speed pumping. This corresponds to savings up to 285,000 € per year in energy costs, for handling the system in question. This is partly due to the variable load operation of the boiler pumps. Optimal solution can be different based on speed regulation. While some pumps showed better results in constant speed, the optimized solution in variable speed was different. Load variation pattern showed to be effective in selection of the best solution. This can be related to the fact that pumps’ performance is different in different loads, based on energy efficiency curves. Therefore, knowing the load data, as well as speed regulation method before selection of the pumps can contribute in more precise optimization process.

In second scenario, the effect of multiple pumping was studied in details. The optimal solution was based on adjustment of the stage numbers, number of pumps in parallel, the most suitable booster pump, and speed regulation. The results showed that variable speed may even lessen the number of pumps in parallel from three to two. Number of stages can be 12% less in variable speed, offering lower power consumption. This further economizes the employment of variable speed facilities. However, the use of variable speed can reduce load factor, and efficiency of the electric motor in lower loads.

The power cuts caused by using variable speed in multiple pumps offered up to 28% savings in energy costs. Multiple pumps offered lower power use compared to single main pump in constant and variable speed. Using two parallel constant-speed pumps has 1,051,000 €/a as electricity costs in optimized case, which offers 5% cost reduction compared to optimal solution in case of one main pump. However, in variable speed, both single-unit and two parallel pumps have almost equal energy costs.

Not only the optimal design is applied in selection process of the boiler pumps, it should be also employed in operation control method. In this study, a mathematical model was developed to examine the most optimized strategy in controlling the pumps in parallel operation to minimize the costs. The results illustrated that energy consumption can be offset by controlling pumps far enough from low efficiency operation. For instance, using two identical pumps in synchronous speed can consume less electricity rather than using only each of them for handling the flow, in some specific ranges. This specific flow range can be discovered by using the algorithm developed in this study.

Then, a multiple boiler pumping system was analyzed in a multi-fuel CHP plant operating in different loads. The results agreed with the previous findings in energy savings caused by variable speed. However, the difference in power plant efficiency is not proportionally significant. This is due the heat passed to the water in throttling method in constant speed. Variable speed pumping can lower the carbon emissions up to 5400 tons during the year, in a 300MWth CHP plant with biomass, peat, and coal as fuel.

In conclusion, this study illustrates that the use of variable speed pumping can be beneficial in boiler applications. This depends on the degree of variation in load, and operating hours in each load segment. This is also due to the fact that meeting EN standards leads the boiler pumping systems to be oversized. Therefore, the pump is in permanent part load operation, even maintaining the full load demand of the boiler. However, other benefits and drawbacks of variable speed pumping should be carefully considered in making the final decision for a given boiler pumping system.

The future study can be focused on optimal control method in operation of two or more boiler pumps in parallel in asynchronous speed. Development of variable speed control equipment has provided new technological opportunities in running parallel pumps in different speeds. The application of variable to booster pump can be another topic for further examination. From system design viewpoint, the proportion by which the load can be divided between multiple pumps, in series and parallel, based on speed regulation method is an important step to improve system energy efficiency. This approach is applied for boiler pumps in this study, but can be further used for other pumping systems. The optimized speed regulation algorithm for pumps in operation can be also applied to other systems with more complicated characteristics.

REFERENCES

1. VTT (Technical Research Center of Finland). *Energy use: Visions and technology opportunities in Finland*. Helsinki: Edita Prima Ltd; 2007.
2. Stępczyńska K, Łukowicz H, Dykas S. Diverse configurations of the boiler feed pump drive for the ultra-supercritical 900-MW steam plant. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2012;3(3):1-9.
3. Grundfos Industry. *Pump handbook*. Bjerringbro, Denmark: GRUNDFOS Management As.; 2004.
4. Karassik IJ, Messina JP, Cooper P, Heald CC, eds. *Pump handbook*. third ed. New York: McGraw & Hill; 2001. Krutzsch W. C. and Cooper P., eds. *Pump Handbook*.
5. Taskinen T. *Calculation analysis of energy saving tools for fan and pump applications*, [thesis]. Lappeenranta University of Technology; 2008.
6. Volk M. *Pump characteristics and applications*. second ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis; 2005.
7. Sulzer Pump Ltd. *Centrifugal pump handbook*. Third ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2010.
8. Gülich JF. *Centrifugal pumps*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2008.
9. Mackay R. Which process pump should be used. <http://www.pump-zone.com/topics/pumps/which-process-pump-should-i-use-ansi-or-api>. Updated 2006. Accessed March 12, 2013.
10. Liu H. Chapter 9: Pumps and turbines. In: *Pipeline engineering*. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, Lewis Publisher; 2003.
11. United Nations Environment Programme (UNEP). Energy efficiency guide for industry in Asia. <http://www.energyefficiencyasia.org/energyequipment>. Updated 2006. Accessed 24 March, 2013.

12. Goulds Pumps. Goulds 3393 high pressure, multistage ring section pumps.
<http://www.gouldspumps.com/Products/3393/>. Accessed 24 March, 2013.
13. Black & Veatch Co. *Power plant engineering*. New York: Chapman & Hall; 1996.
14. TIMEC CO. Selecting variable speed drives for flow control. Roanoke, Virginia, USA: TIMEC Corporation; 2011.
15. Viholainen J, Tamminen J, Ahonen T, Ahola J, Vakkilainen E, Soukka R. Energy-efficient control strategy for variable speed-driven parallel pumping systems. *Energy Efficiency*. 2012.
16. Soukka R. *Advanced course in life cycle assessment (BH60A2101)*. Lappeenranta University of Technology; 2013.
17. US Department of Energy's Office of Industrial Technologies (OIT). Pump life cycle costs: A guide to LCC analysis for pumping systems. Washington, USA: US Department of Energy; 2001.
18. Sulzer Pump Ltd. HPT high pressure barrel casing pumps.
<http://www.sulzer.com/en/Products-and-Services/Pumps-and-Systems/Barrel-Casing-Pumps/HPT>. Updated 2012. Accessed 15 April, 2013.
19. European Committee for Standardization. *EN 12952-7: "Water-tube boilers and auxiliary installations – part 7: Requirements for equipment for the boiler"*. rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels; 2002.
20. Grundfos Industry. *Engineering manual: Industrial boilers*. Bjerringbro, Denmark: GRUNDFOS Holding AS.; 2009.
21. Spliethoff H. Steam power stations for electricity and heat generation. In: *Power generation from solid fuels*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer; 2010.
22. CLEEN Ltd. Efficient energy use (efeu) research program: Factsheet. CLEEN: Cluster for Energy and Environment Web site.

http://www.cleen.fi/en/Comms/EFEU_FACTSHEET_FINAL.pdf. Published 2012. Accessed 15 April, 2013.

23. Goulds Pumps. Pump products by industry: Power generation.

<http://www.gouldspumps.com/Products/List.aspx?t=Industry&q=47>. Accessed 20 March, 2013.

24. Pettersson F, Westerlund T. Global optimization of pump configurations using binary separable programming. *Comput Chem Eng*. 1996;21(5):521-529.

25. Statistics Finland. Consumer price index. Prices and Costs Web site.

http://www.stat.fi/til/khi/tau_en.html. Updated 2013. Accessed 1 May, 2013.

26. Walas SM. *Chemical process equipment: Selection and design*. Newton, MA, USA: Butterworth-Heinemann; 1990.

27. Couper JR. Estimation of capital requirements. In: *Process engineering economics*. Monticello, New York: Marcel Dekker Inc.; 2003.

28. Easton Consultants Inc. *Variable frequency drives*. Stamford, Connecticut, USA: Northwest Energy Efficiency Alliance; 2000.

29. Lahdelma R, Ekholm T. *Models and optimization of energy systems (ene-59.4010)*. Helsinki, Finland: Department of Energy Technology, Aalto University; 2013.

30. Statistics Finland. Energy prices :Appendix figure 5. price of electricity by type of consumer.

http://www.stat.fi/til/ehi/2012/04/ehi_2012_04_2013-03-20_kuv_005_en.html. Published Autumn 2012. Accessed 18 April, 2013.

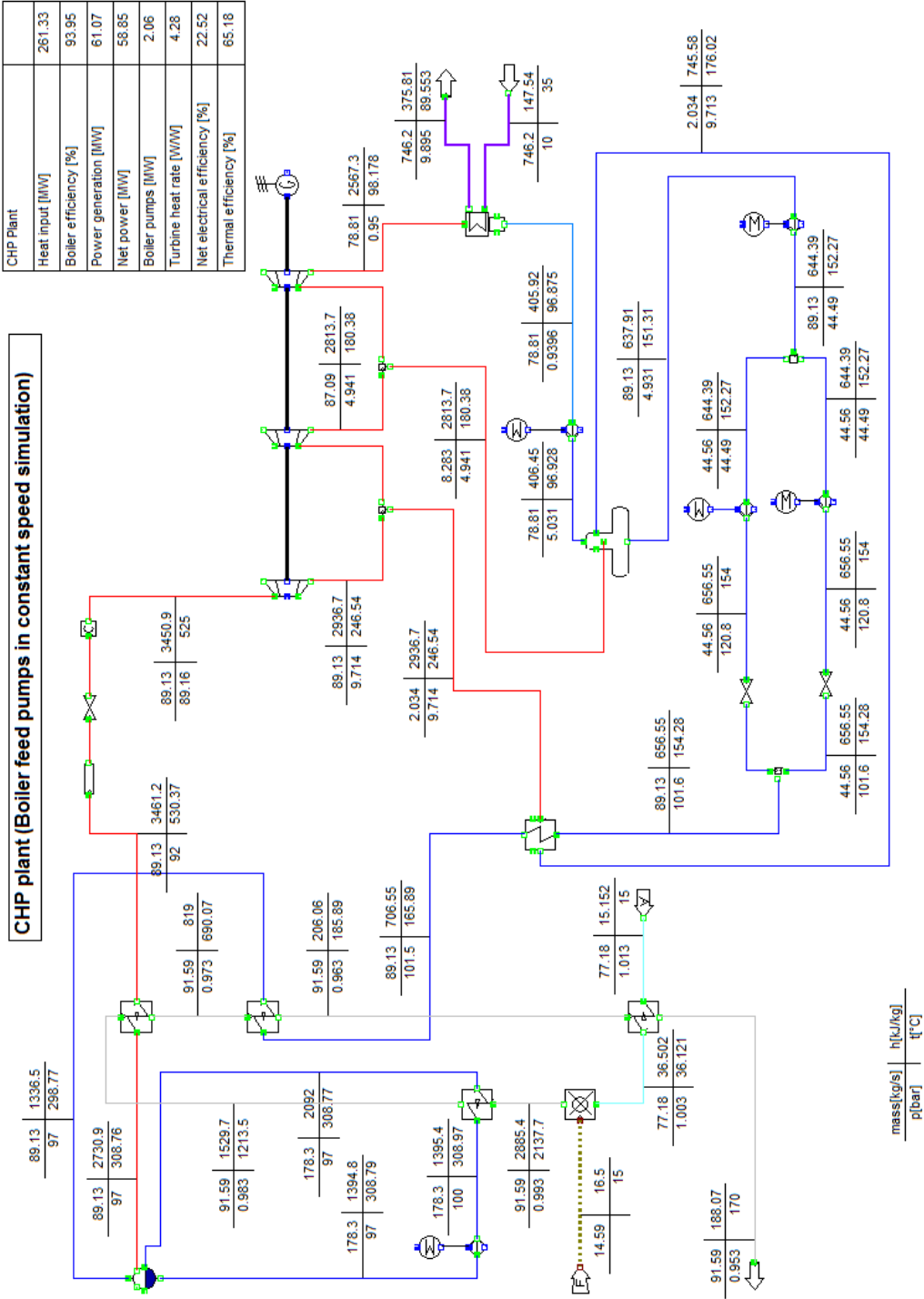
31. Natural Resources Canada. *Variable frequency drives: Energy efficiency reference guide*. Ontario, Canada: CEATI International; 2009.

32. Burt C, Piao X, Gaudi F, Busch B. *Electric motor efficiency under variable load and efficiency*. San Luis, Obsipo, CA: California Polytechnique State University; 2006.

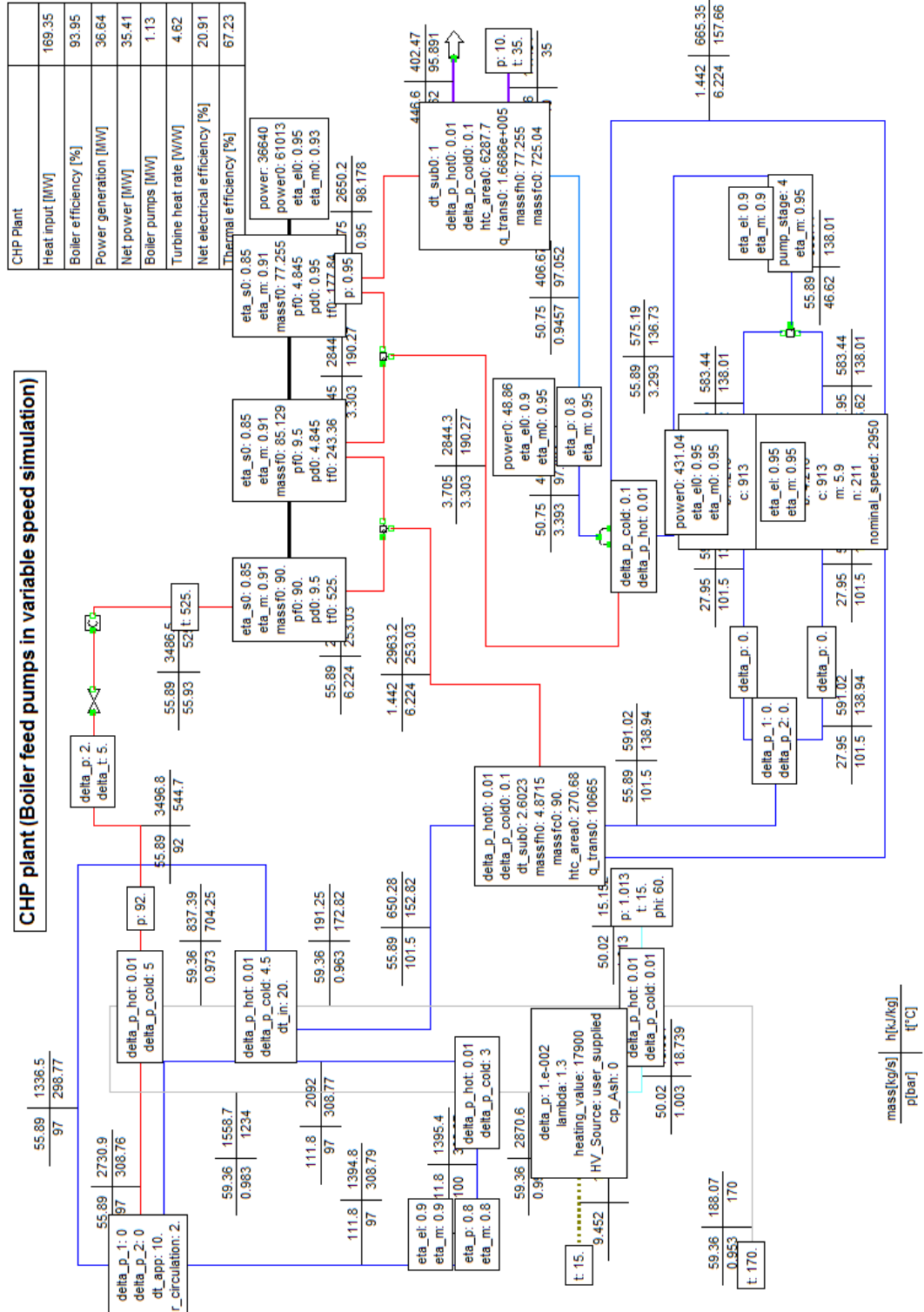
33. Van der Westhuizen W, Cattaert T. Power station pump selection: Part 2. *World Pumps*. 2010;2010(1):14-17.
34. Hodgson J, Walters T. Optimising pumping systems to minimize first or life cycle costs. *Proceedings of International Pump Users Symposium*. 2003.
35. Larralde E, Ocampo R. Centrifugal pump selection process. *World Pumps*. 2010;2010(2):24-28.
36. Alakangas E. Properties of solid biofuels and comparison to fossil fuels. International database of solid biofuel properties Web site. <http://www.phydades.info>. Accessed 15 May, 2013.
37. SimTech. Design suite. SimTech Simulation Technology Web site. <http://www.simtechnology.com/IPSEpro>. Updated 2011. Accessed 11 May, 2013.

APPENDIX

Appendix 1: CHP plant layout in full load operation using two parallel boiler feed pumps and a booster pump



Appendix 2: CHP plant layout in 60% load operation using two parallel boiler feed pumps in variable speed and a booster pump in constant speed



LIITE 13
LTR: Syöttövesipumppaus,
LUT – esitys 10.11.2013



Open your mind. LUT.

Lappeenranta University of Technology



Open your mind. LUT.

Lappeenranta University of Technology

Syöttövesipumppujen optimaalinen valinta

Lappeenranta University of Technology
Prof. Esa Vakkilainen

Tarkasteltavat tapaukset



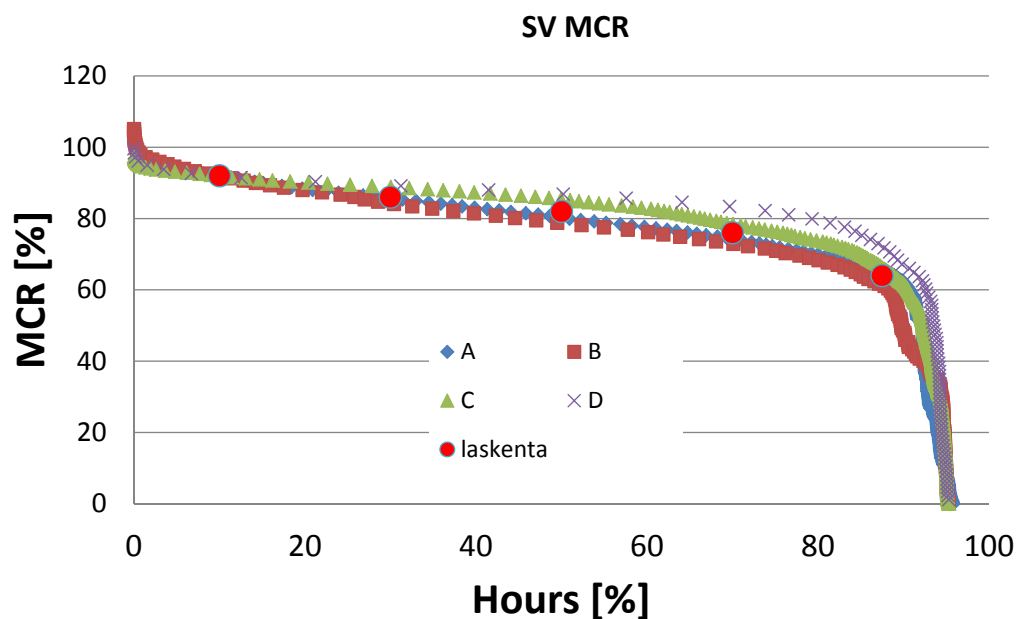
- Saatu dataa Suomesta neljästä kattilasta
 - Kaukopää SK6
 - Kaukopää SK5
 - Joutseno
 - Kymi
- Jokaisesta kattilasta kerätty vähintään vuoden ajalta tuntidata syöttövesivirtauksesta ja paineesta
- Kattiloiden toiminnan perusteella valittu tyypilliset toimintapisteet
- Saatujen SV-pumppujen datojen perusteella saatiin tyypillinen pumpun hyötysuhdekäyrä
- Investointikustannus perustuu saatuihin kustannuksiin (Wisa, Kymi)
- Pumppauskustannus perustuu kussakin toimintapisteessä pumppaustehon minmointiin valitsemalla sopiva määrä pumppuja

18.8.2013

LUT SVPUMP

3

Tarkasteltavissa tapauksissa pysyvyyskäyrät samanlaisia

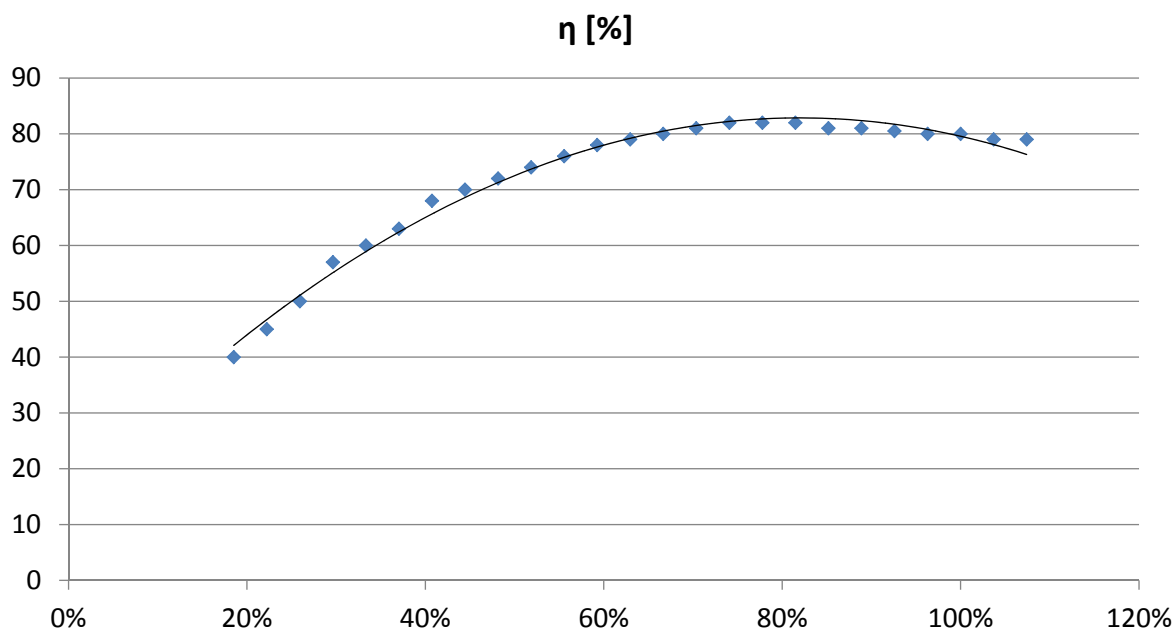
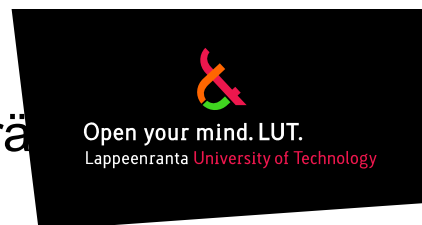


18.8.2013

LUT SVPUMP

4

Tyypillinen pumpun hyötysuhdekäyrä

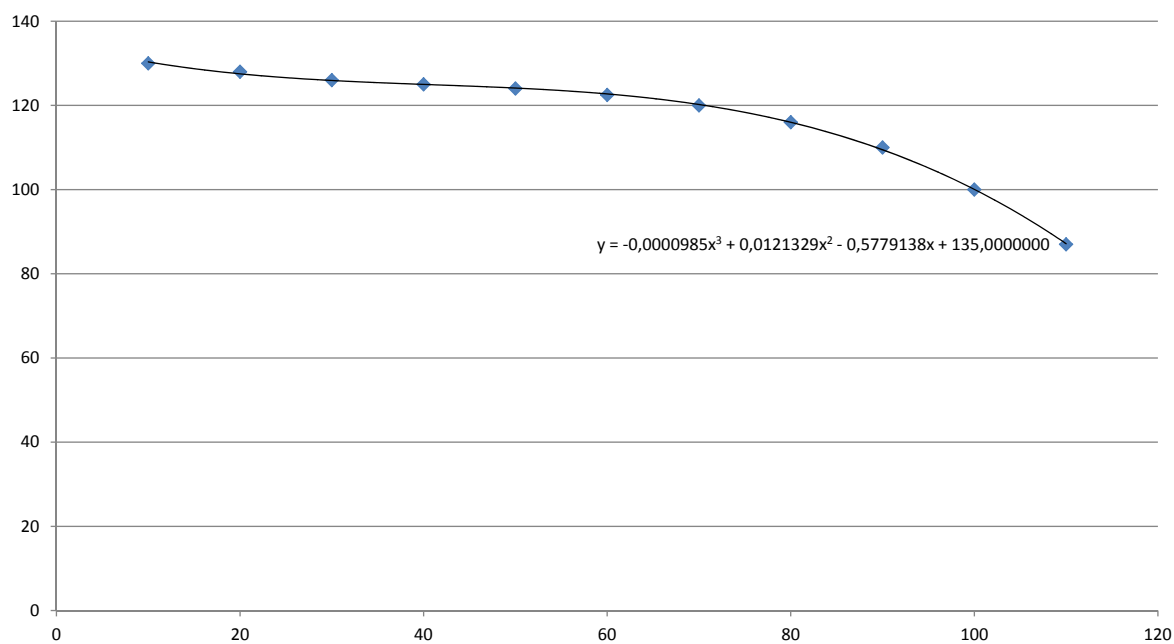


18.8.2013

LUT SVPUMP

5

Tyypillinen pumpun nostokorkeus (kuristussäätö)



18.8.2013

LUT SVPUMP

6

Valittiin tyypillinen tapaus



virtaus[MCR]	100 kg/s
paine sisään	0.5 MPa
paine ulos	10.3 MPa
SV-paineennousu	9.8 MPa
josta virtaushäviöt	1.2 MPa
tiheys	922 kg/m ³
sähkön hinta	40 €/MWh
ajoaika	8313 h/a
Moottorin η	92 %

18.8.2013

LUT SVPUMP

7

Laskettiin varmuuden vuoksi kaikki tapaukset (varalla turbopumppu)



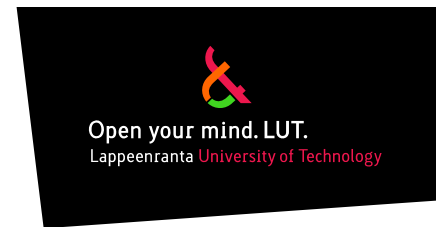
	1					
käytössä olevat pumput	1*140					
Pumpun suunnittelu %MCR	168					
	2	1				
käytössä olevat pumput	2*70	1*70				
Pumpun suunnittelu %MCR	84	84				
	3	2	1			
käytössä olevat pumput	3*45	2*45	1*45			
Pumpun suunnittelu %MCR	54	54	54			
	4	3	2	1		
käytössä olevat pumput	4*33	3*33	2*33	1*33		
Pumpun suunnittelu %MCR	40	40	40	40		
	5	4	3	2	1	
käytössä olevat pumput	5*25	4*25	3*25	2*25	1*25	
Pumpun suunnittelu %MCR	30	30	30	30	30	
	6	5	4	3	2	1
käytössä olevat pumput	6*20	5*20	4*20	3*20	2*20	1*20
Pumpun suunnittelu %MCR	24	24	24	24	24	24

18.8.2013

LUT SVPUMP

8

Laskelmaesimerkki



käytössä olevat pumput	1*140	2*70	1*70	3*45	2*45	1*45	4*33	3*33	2*33	1*33	5*25	4*25	3*25	2*25	1*25	6*20	5*20	4*20	3*20	2*20	1*20	1
Pumppujen suunnittelu %MCR	168	84	84	162	54	54	158.4	40	40	40	150	30	30	30	30	144	24	24	24	24	24	24
Apistite mcr/pumppu	92.0	46.0	92.0	30.7	46.0	92.0	23.0	30.7	46.0	92.0	18.4	23.0	30.7	46.0	92.0	15.3	18.4	23.0	30.7	46.0	92.0	92.0
mcr/mcr_design	0.55	0.55	1.10	0.57	0.85	1.70	0.58	0.77	1.16	2.32	0.61	0.77	1.02	1.53	3.07	0.64	0.77	0.96	1.28	1.92	3.83	3.83
η [%]	75 %	75 %	75 %	76 %	83 %	31 %	77 %	83 %	71 %	31 %	79 %	83 %	79 %	31 %	31 %	80 %	83 %	81 %	62 %	31 %	31 %	31 %
Paine MCR	98 %	90 %	98 %	89 %	90 %	98 %	88 %	89 %	90 %	98 %	88 %	88 %	89 %	90 %	98 %	88 %	88 %	88 %	89 %	90 %	98 %	98 %
η_paine [%]	95 %	95 %	92 %	95 %	99 %	78 %	97 %	99 %	96 %	66 %	97 %	99 %	90 %	67 %	45 %	98 %	99 %	90 %	85 %	48 %	32 %	32 %
kust. [k€]	102	94	106	91	82	302	88	81	99	357	86	80	93	320	523	84	80	90	126	452	736	736
1750-3500 20-40%																						
Apistite mcr/pumppu	86.0	43.0	86.0	28.7	43.0	86.0	21.5	28.7	43.0	86.0	17.2	21.5	28.7	43.0	86.0	14.3	17.2	21.5	28.7	43.0	86.0	86.0
mcr/mcr_design	0.51	0.51	1.02	0.53	0.80	1.59	0.54	0.72	1.09	2.17	0.57	0.72	0.96	1.43	2.87	0.60	0.72	0.90	1.19	1.79	3.58	3.58
η [%]	73 %	73 %	79 %	74 %	83 %	31 %	75 %	82 %	76 %	31 %	77 %	82 %	81 %	45 %	31 %	78 %	82 %	82 %	69 %	31 %	31 %	31 %
Paine max [%]	97 %	90 %	97 %	89 %	90 %	97 %	88 %	89 %	90 %	97 %	88 %	88 %	89 %	90 %	97 %	88 %	88 %	88 %	89 %	90 %	97 %	97 %
η_paine [%]	92 %	90 %	85 %	92 %	99 %	82 %	94 %	98 %	92 %	68 %	95 %	98 %	90 %	76 %	48 %	92 %	97 %	95 %	92 %	77 %	34 %	34 %
kust. [k€]	100	95	101	90	76	265	87	77	90	319	84	77	85	184	453	85	77	79	98	262	639	639
3500-5250 40-60 %																						
Apistite mcr/pumppu	82.0	41.0	82.0	27.3	41.0	82.0	20.5	27.3	41.0	82.0	16.4	20.5	27.3	41.0	82.0	13.7	16.4	20.5	27.3	41.0	82.0	82.0
mcr/mcr_design	0.49	0.49	0.98	0.51	0.76	1.52	0.52	0.69	1.04	2.07	0.55	0.68	0.91	1.37	2.73	0.57	0.68	0.85	1.14	1.71	3.42	3.42
η [%]	72 %	72 %	80 %	73 %	82 %	33 %	74 %	81 %	78 %	31 %	75 %	81 %	82 %	53 %	31 %	77 %	81 %	83 %	73 %	31 %	31 %	31 %
Paine max [%]	96 %	90 %	96 %	89 %	90 %	96 %	88 %	89 %	90 %	96 %	88 %	88 %	89 %	90 %	96 %	88 %	88 %	88 %	89 %	90 %	96 %	96 %
η_paine [%]	90 %	90 %	90 %	90 %	98 %	84 %	95 %	98 %	92 %	70 %	95 %	98 %	97 %	82 %	51 %	97 %	98 %	98 %	96 %	89 %	38 %	38 %
kust. [k€]	99	92	88	90	74	227	84	74	83	293	82	74	74	138	403	79	74	72	84	216	540	540
5250-7000 60-80 %																						
Apistite mcr/pumppu	76.0	38.0	76.0	25.3	38.0	76.0	19.0	25.3	38.0	76.0	15.2	19.0	25.3	38.0	76.0	12.7	15.2	19.0	25.3	38.0	76.0	76.0
mcr/mcr_design	0.45	0.45	0.90	0.47	0.70	1.41	0.48	0.64	0.96	1.92	0.51	0.63	0.84	1.27	2.53	0.53	0.63	0.79	1.06	1.58	3.17	3.17
η [%]	69 %	69 %	82 %	70 %	81 %	48 %	71 %	80 %	81 %	31 %	73 %	79 %	83 %	63 %	31 %	74 %	79 %	83 %	77 %	31 %	31 %	31 %
Paine max [%]	95 %	90 %	95 %	89 %	90 %	95 %	88 %	89 %	90 %	95 %	88 %	88 %	89 %	90 %	95 %	88 %	88 %	88 %	89 %	90 %	95 %	95 %
η_paine [%]	90 %	90 %	98 %	90 %	95 %	88 %	90 %	95 %	94 %	72 %	90 %	94 %	98 %	34 %	56 %	91 %	93 %	98 %	88 %	74 %	40 %	40 %
kust. [k€]	94	88	72	86	71	138	85	75	72	261	82	73	67	258	336	80	73	67	80	240	470	470
7000-8513 80-95 %																						
Apistite mcr/pumppu	64.0	32.0	64.0	21.3	32.0	64.0	16.0	21.3	32.0	64.0	12.8	16.0	21.3	32.0	64.0	10.7	12.8	16.0	21.3	32.0	64.0	64.0
mcr/mcr_design	0.38	0.38	0.76	0.40	0.59	1.19	0.40	0.54	0.81	1.62	0.43	0.53	0.71	1.07	2.13	0.44	0.53	0.67	0.89	1.33	2.67	2.67
η [%]	63 %	63 %	83 %	65 %	78 %	69 %	65 %	75 %	83 %	31 %	67 %	75 %	82 %	77 %	31 %	69 %	75 %	80 %	82 %	56 %	31 %	31 %
Paine max [%]	93 %	89 %	93 %	88 %	89 %	93 %	88 %	88 %	89 %	93 %	88 %	88 %	89 %	93 %	93 %	88 %	88 %	88 %	88 %	89 %	93 %	93 %
η_paine [%]	87 %	87 %	96 %	88 %	89 %	90 %	88 %	89 %	93 %	98 %	88 %	88 %	90 %	93 %	78 %	89 %	90 %	93 %	97 %	85 %	54 %	54 %
kust. [k€]	87	84	61	80	64	77	79	69	57	189	77	69	59	85	199	75	68	61	57	97	287	287
KUST. YHT [k€]/a	481	410		367			360				357					354						

18.8.2013

LUT SVPUMP

9

Tulokset kuristussäätö (edullisimman määrän ajon mukaan)



INVESTOINTI					
Pumppu [kpl]	1	2	3	4	5
Mit. virtaus/pumppu [kg/s]	168	84	54	39.6	30
Nostokorkeus [MPa]	11.27	11.27	11.27	11.27	11.27
k€	202	249	274	294	303
Sähkömoottorit [kW]	3100	1500	1000	700	600
k€	272	245	246	240	258
Turbopumppu	2567	1283	825	605	458
k€	506	312	229	184	152
Asennus ym					
k€	142	197	244	286	325
YHT	1290	1087	1047	1044	1068
INV. KUST. YHT [k€]/a	184	155	150	149	153
PUMPPAUS [k€]/a	684	609	593	593	588
KOKONAISKUST. [k€]/a	868	764	742	742	741

18.8.2013

LUT SVPUMP

10

Tulokset nestekytkin (edullisimman määrän ajon mukaan)



INVESTOINTI					
Pumppu [kpl]	1	2	3	4	5
Mitoitus virtaus/pumppu [kg/s]	168	84	54	39.6	30
Nostokorkeus [MPa]	11.27	11.27	11.27	11.27	11.27
k€	202	249	274	294	303
Sähkömoottorit [kW]	3100	1500	1000	700	600
k€	272	245	246	240	258
Turbopumppu	2567	1283	825	605	458
k€	506	312	229	184	152
Nestekytin [kW]	3400	1700	1100	800	700
k€	290	357	395	421	480
Asennus ym					
k€	112	148	179	207	233
YHT	1382	1311	1323	1347	1425
INV. KUST. YHT [k€]/a	197	187	189	192	204
PUMPPAUS [k€]/a	543	420	404	404	381
KOKONAISKUST. [k€]/a	740	607	593	597	585

18.8.2013

LUT SVPUMP

11

Tulokset invertteri (edullisimman määrän ajon mukaan)



INVESTOINTI						
Pumppu [kpl]		1	2	3	4	5
Mitoitus virtaus/pumppu [kg/s]	168	84	54	39.6	30	
Nostokorkeus [MPa]	11.27	11.27	11.27	11.27	11.27	
k€		202	249	274	294	303
Sähkömoottorit [kW]	3100	1500	1000	730	550	
k€		272	245	246	247	243
Turbopumppu	2567	1283	825	605	458	
k€		506	312	229	184	152
Invertteri [kW]	3400	3300	3300	3200	3100	
k€		304	367	415	442	463
Asennus ym						
k€		142	197	244	286	325
YHT		1427	1370	1408	1454	1486
INV. KUST. YHT [k€]/a		204	196	201	208	212
PUMPPAUS [k€]/a		481	410	367	360	357
KOKONAISKUST. [k€]/a		685	606	568	568	569

18.8.2013

LUT SVPUMP

12

Tulokset



- Näyttää siltä että **kolme pumppua ja turbopumppu** on kaikissa tapauksissa edullisin tai ainakaan eroa neljä pumppua ja turbopumppu on pieni.
- Kaksi pumppua ja turbopumppu on aina kallis vaihtoehto
- Yksi pumppu ja turbopumppu on aina kallein vaihtoehto
- Syöttövesipumppujen teho on ylimitoitettu osittain standardin vaatimuksesta



LIITE 14
LTR, Smelt Dissolution Kinetics,
ÅA - tarjous 26.11.2012

Proposal – Smelt Dissolution Kinetics

26 Nov 2012

Nikolai DeMartini, ÅAU

The kinetics of smelt dissolution is relevant to the design and safety of smelt dissolving tanks and their operation. Smelt dissolution will depend predominantly on smelt particle size, salt solubility, agitation and cooling of the hot smelt particle down to below the boiling point of the liquor. Salt solubility in the case of smelt dissolution is interesting in that there are two potentially important salt solubility limits. One is pirssonite which is a $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$ double salt and the second is the solubility of sodium salts such as sodium carbonate or burkeite which have a much higher solubility than pirssonite [1,2], Figure 1. Once calcium in green liquor is consumed in the formation of pirssonite, the next salt will be sodium carbonate or burkeite depending on the $\text{CO}_3:\text{SO}_4$ mole ratio of the smelt [3]. The implication is that the driving force for salt dissolution will still be high even as the pirssonite solubility limit is approached, because the salt should continue to dissolve once all the calcium in the smelt/weak wash is consumed.

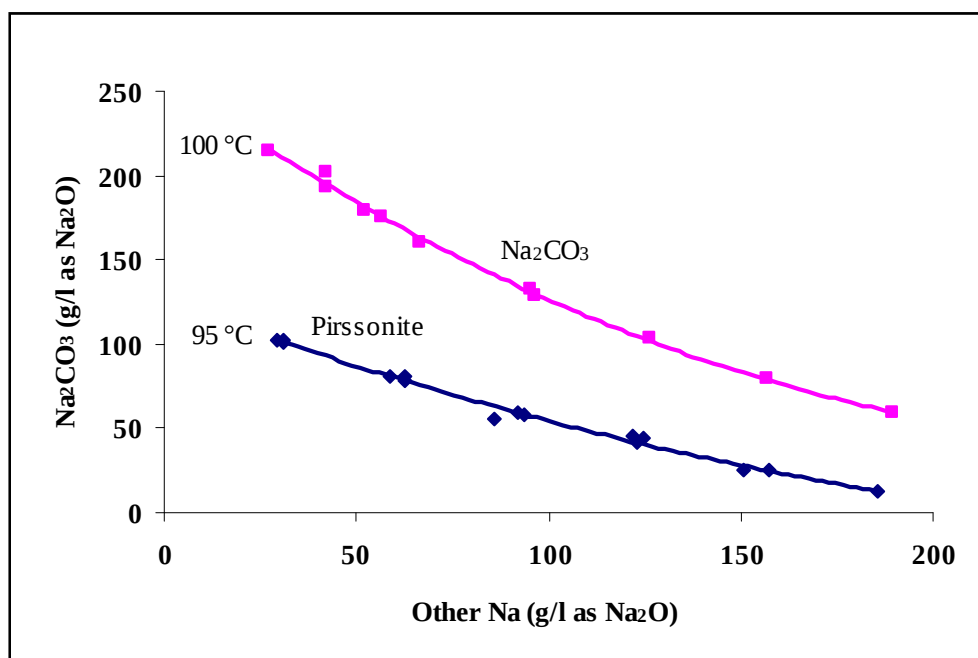


Figure 1. Literature values for the solubility limits of pirssonite at 95 °C [1] and sodium carbonate at 100 °C [2]. Note: Sodium carbonate has inverse solubility, so at 95 °C, sodium carbonate will be slightly more soluble than at 100 °C.

This work would focus on the variables: temperature, salt composition, crystal size and agitation speed. The temperature and smelt composition will affect the solubility limits. Mill smelt will be crushed in a glovebox and sieved in a glove box and heated to 100 °C and then added to the mill weak wash which will be preheated to the desired dissolution temperature. Samples will be taken at regular time intervals to measure the dissolution. Different temperatures will result in different initial solubility limit driving forces.

This work will provide fundamental data to improve our understanding of dissolution in smelt dissolving tanks. This has implications for operation and design and safety. This data combined with ongoing research at the University of Toronto and for the AF&PA can also help understand what variables are crucial in understanding smelt dissolving tank explosions. The heat transfer away from molten smelt particles needs to be studied by modeling in a follow up project, but is sufficiently complicated because of the 3 phase flow that it would need to be accounted for.

The cost for this project is **18 800 €** + VAT.

References

1. Frederick, W.J. Jr.; Krishnan, R.; Ayers, R.J. Pirssonite deposits in green liquor processing. TAPPI J. 73(2): 135-140 (1990).
2. Green, S.J.; Frattali, F.J. The system sodium carbonate-sodium sulfate-sodium hydroxide-water at 100°. J. Am. Chem. Soc. 68: 1789-94 (1946).
3. Shi, B.; Frederick, W. J. Jr.; Rousseau, R. W., Nucleation growth and composition of crystals obtained from solutions of Na₂CO₃ and Na₂SO₄. Ind. Eng. Chem. Res., 42(25): p. 6343-6347 (2003).

LIITE 15
LTR, Feeding and Combustion of Black Liquor Pellets,
ÅA – tarjous 26.11.2012

Proposal – Feeding and Combustion of Black Liquor Pellets

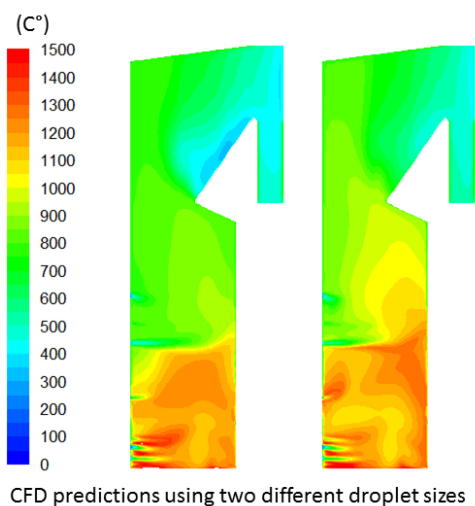
Anders Brink, Markus Engblom, Nikolai DeMartini, Mikko Hupa

Laboratory of Inorganic Chemistry at Åbo Akademi University

This project is designed to make a preliminary study of the feeding and combustion of black liquor pellets in a Kraft recovery boiler. The uniform distribution of fed particle size has interesting implications for the practical operation of a Kraft recovery boiler and could lead to better control of operational challenges such as carryover and emissions. The proposal is composed of two parts – CFD modeling of a Kraft recovery boiler firing pellets and laboratory work to support the CFD modeling. The CFD modeling will use an existing model, of a modern Kraft recovery boiler, modified for pellet feeding rather than black liquor spraying. The CFD model will give some preliminary information on how recovery boiler operation (for ex. air staging) will change with pellet firing. The two main parameters to be considered are pellet size and feeding location. Two pellet sizes and two feeding locations will be modeled.

The laboratory work will be a small part of the project to support the CFD modeling. The laboratory work will be done to determine the softening temperature of the pellets, the swelling and pyrolysis behavior and combustion times. Emissions will also be obtained. Pellets from both black liquor and black liquor mixed with 10% sawdust will be made in the lab and tested. The pellets with 10% sawdust will be tested for comparison to the behavior of pellets from black liquor only, but will not be considered in the CFD modeling in this project. The pellets will be pressed at ÅAU using dried black liquor and air dried sawdust. The pelletizing work will provide some initial feel for the pelletizing of dry black liquor. The laboratory work will be carried out in a single particle reactor which has been used to characterize both black liquor and pellet behavior during combustion at ÅAU.

The cost for this project will be **20 700 € + VAT**.



LIITE 16

**LTR: Probe Study of Corrosion in the Economizers of a Kraft Recovery
Boiler during start-up
–tarjous 14.12.2012**

**Proposal for SKY: Probe Study of Corrosion in the Economizers of a Kraft Recovery Boiler during Start-up on Oil****14 December 2012**

Nikolai DeMartini, Tor Lauren, Emil Vainio, Mikko Hupa

This proposal is for a probe study during the start-up of the Kraft recovery boiler at the Botnia mill in Rauma. The probe will be put in the economizer section of the recovery boiler during the start-up on oil. The air cooled probe will be kept at 90 °C. In addition to measuring corrosion, the concentration of SO₃ in the flue gas will be measured by a salt method refined at ÅAU. This is a follow-up to the probe study carried out in the economizer section of Rauma in 2012 during normal operation, during a wash and during oil firing following the wash. During these earlier studies, no significant corrosion was seen and no acid dewpoint was seen. The question was why none was seen during oil firing. In part this was presumably due to the very high air-to-fuel ratio. During start-up, the amount of oil fired would be higher and the air-to-fuel ratio would be more reasonable and thus higher levels of SO₃ are expected.

The cost for the proposed work is 11 000 € + VAT.

LIITE 17
Lipeäkierron kemiallisten parametrien optimointi
– projektiehdotus 12.3.2013

Ehdotus Suomen Soodakattilayhdistys ry:n projektiksi

Projektin nimi: Lipeäkierron kemiallisten parametrien optimointi.

Osa 1 Soodakattilan ja liuottajan merkitys ja vaikutukset lipeäkierron kemiallisessa optimoinnissa

Osa 2 Kaustisoinnin merkitys ja vaikutusmahdollisuudet lipeäkierron kemiallisessa optimoinnissa

Osa 3 Keittämön prosessiparametrien merkitys ja vaikutusmahdollisuudet lipeäkierron kemiallisessa optimoinnissa

Kuvaus: TAVOITE:

Projektin tavoitteena on lisätä helposti ymmärrettävää ja hyödynnettävää tietoa soodakattilan merkityksestä selluloosatehtaan lipeäkierron optimoinnin avuksi. Tarkoituksena on parantaa selluloosatehtaan kokonaishyötysuhdetta

Lopullisena tavoitteena projektissa on tarkoitus luoda yksinkertainen esitys josta selviää helposti eri prosessimuuttujien vaikutukset selluloosatehtaan lipeäkiertoon.

TAUSTA:

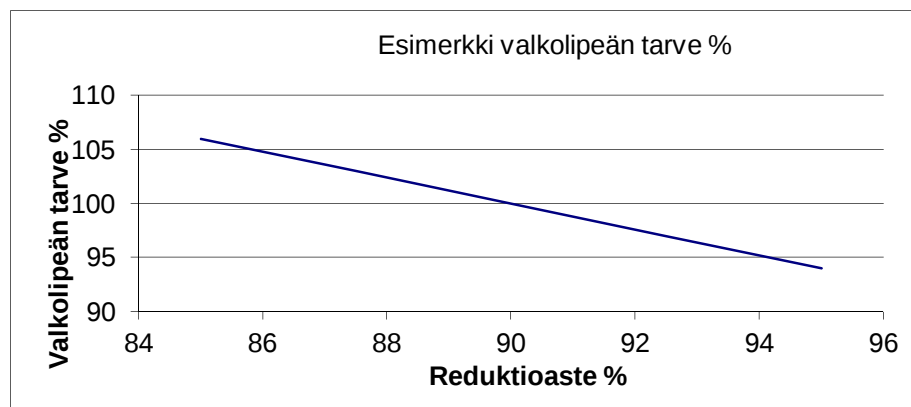
Selluloosatehtaan ja myös erityisesti lipeäkierron optimointiin on olemassa laajoja tietokoneohjelmia. Näiden pääasiallisena käyttäjäkuntana ovat pääasiassa yliopistot ja tutkijat. Nämä ohjelmat sopivat huonosti käyttäjälähtöiseen lipeäkierron optimointiin juuri monipuolisuutensa vuoksi. Nämä ohjelmat ovat kuitenkin tämän projektin toteutuksessa ja tulosten tarkastelussa avainasemassa

Projektiehdotus on kolmiosainen. Myöhemmässä vaiheessa selvitetään kokonaisuuden jakaminen esitetyn mukaisesti tai mahdollinen yhdistäminen.

Projekti kuvaus:

Osa 1 Soodakattilan ja liuottajan merkitys ja vaikutus koko lipeäkierron kemiallisessa optimoinnissa

Liuottimen säädöillä luodaan perusta lipeäkierron alkali väkevyyksille ja sulfiditeetille. Työn teoreettisessa osassa soodasulan reduktioasteen merkitys lipeäkiertoon selvitetään ja esitetään esimerkin omaisesti / graafisesti



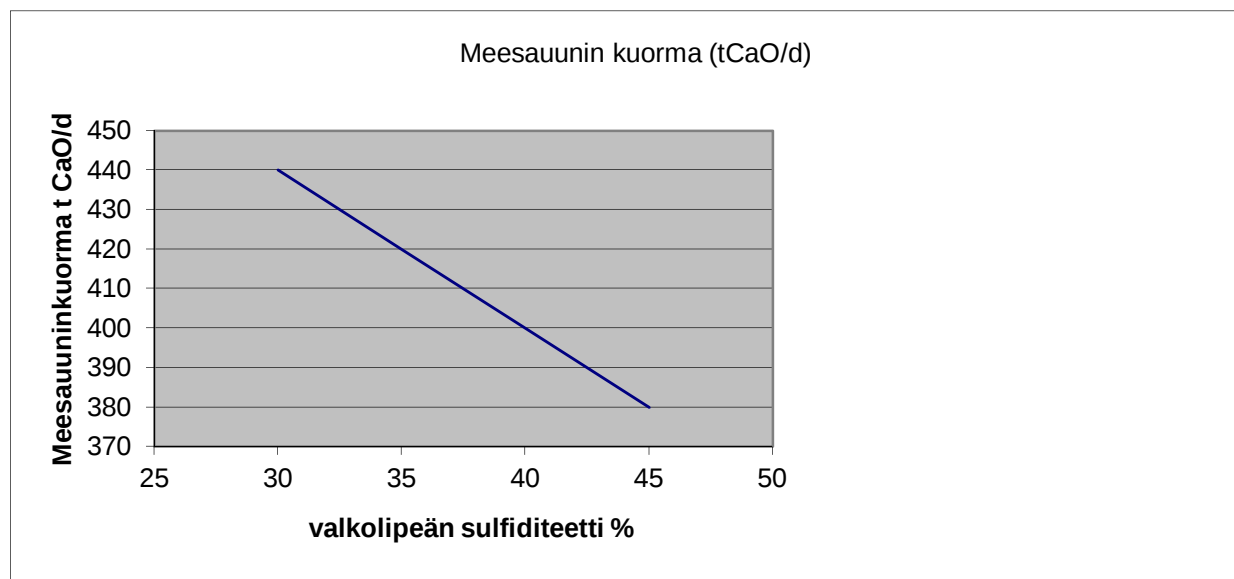
Vastaavasti esitetään reduktioasteen vaikutus esimerkiksi haihdutustarpeeseen soodakattilan höyrynkehitykseen jne.

Osio sisältää kokeellisen tarkastelun jossa selvitetään soodalipeän kemiallisten ominaisuuksien muuttuminen (mm reduktioaste) ajan funktiona sekä soodakattilan alasajo ja ylösajotilanteissa ja myös erilaisilla (minimi) kattilan lipeäkuormilla. Tähän tarkasteluun käytetään uutta Metso Recovery Analyzer -pilot laitteistoa ja alkalianalysaattoria joilla saadaan jatkuvaa mittaus tietoa mm. soodalipeän reduktioasteesta.

Osassa tarkastellaan myös liuottimeen tulevien ”ylimääräisten” karbonaattivirtojen (esimerkiksi savukaasupesurilta) merkitystä meesauunin kuormitukseen. Osioon käytetään mahdollisuuksien mukaan alkalianalysaattorin tuottamaa tietoa.

Tehtaiden haluttua sulfiditeetti tasoa määriteltäessä on yleisesti pidetty määräävänä korroosiota lipeäkierrossa ja myös hajukaasupäästöjen kasvua sulfiditeetin kasvaessa. Yleisesti ottaen sulfiditeetin kasvu parantaa tuotetun sellun ominaisuuksia. Edellä olevia vaikutuksia tarkastellaan teoreettisesti ja tehdas taseista.

Keijo Salmenoja ja Minna Nyman ovat esittäneet julkisuudessa seuraavanlaisen riippuvuuden tietyin kokoiselle tehtaalle ja tietyillä lipeän vahvuuksilla.



Meesauunin kuormituksen laskiessa saadaan merkittävä fossiilisten polttoaineiden tarpeen väheneminen. Osiossa tehdään yleisesti sovellettava vertailu valkolipeän sulfiditeetin vaikutuksesta mm meesauunin kuormitukseen.

Osa 2 Kaustisoinnin merkitys ja vaikutusmahdollisuudet koko lipeäkierron kemiallisessa optimoinnissa

Kaustisoinnin prosessiarvojen, kaustisiteetin ja aktiivialkali pitoisuuden merkitys lipeäkiertoon ja selluloosatehtaaseen on selvittävissä kemiallisella tarkastelulla. Nämä tarkastelut ovat käsityksen mukaan yksikäsitteisiä ja voidaan tehdä tietokone ohjelma tarkastelulla ja ne eivät siten vaatisi tehdaskokeita ja tehdaskohtaisia tarkasteluja. Osio olisi tehtävissä tutkijatyönä.

Osa 3 Keittämön prosessiparametrien merkitys ja vaikutusmahdollisuudet koko lipeäkierron kemiallisessa optimoinnissa.

Osion sisältämiä prosessi parametreja sovelletaan tehdas mittakaavan optimoinnissa käsityksen mukaan hyvin vähän vaikka ne vaikuttavat olevan suurimerkityksellisiä.

Alkalin annostus-suhteella puuhun (alkali/puu suhde) huolehditaan riittävästä jäännösalkalistasosta sellun pesussa ligniinin takaisinsaostumisen välttämiseksi sekä saostumien estämisessä haihduttamalla. Lisämuuttujana alkalipuu suhteen määrittämisessä toimii myös halu säätää tai vähentää lajittamon rejektin määrää ja kiertoa. Alkalipuusuhteessa saattaa olla ja on jopa 15 % vuodenaika vaihtelu tähän näiden samojen lopputuloksien saavuttamiseksi. Alustavassa tarkastelussa alkaliannostuksen muutos merkitsee noin 5 % muutosta soodakattilan korkeapainehöyryn tuotannossa.

Osiossa tehdään vastaavat tasetarkastelut kuin edellä on esitetty esimerkiksi seuraaville prosessimuuttujille alkali/puusuhteesta riippuvana: Tarvittava valkolipeäntuotanto, soodakattilan höyryntuotanto, meesauunin kalkintuotanto ja haihdutustarve sekä rejektin määrän muutokset ja sen vaikutus sellun tuotantoon. Kirjallisuusselvityksessä selvitetään lisäksi ligniinin takaisinsaostumista ja haihduttamon likaantumista jäännösalkali pitoisuudesta riippuen. kokeellisesti selvitetään myös jäännösalkali pitoisuuden riippuvuutta alkalipuusuhteesta.