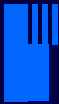


APPENDIX 1

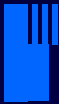
**Project budget and schedule
23.9.2011**



SKYREC Budget 5.10.2011

- Projects paid: 702 869,37 €
- Projects to be invoiced: 53 425,00 €
- Sum (projects ordered): 756 294,37 €

- Project budget total: 805 000 €
- $805\,000\text{ €} - 756\,294\text{ €} = 48\,706\text{ €}$ left



Projects to be invoiced

Company, Project name	will be invoiced (total cost)
ÅA, Dew point measurements	30 000 €
ÅA: Corrosion tests in reducing conditions – PART II A&B	15 350 € (30 700 €)
Boildec Oy: Material testing in furnace test 5 continuation	8 075 €
Sum	53 425 €
Project XXX	48 706 €
Sum	102 131 €



Projects paid (1/4)

WP1: New recovery boiler concepts	
ÅA: Co-combustion of mixed fuels, part 1	7 500 €
ÅA: Corrosion tests in reducing conditions – PART II A	15 350 €
ÅA: Co-combustion of mixed fuels, part 2, Wood + lean BL	16 500 €
ÅA: Co-combustion of mixed fuels, part 2, Biosludge	7 100 €
ÅA: Utilization of Pyrolysis Gases from the Recovery Boiler	8 500 €
LUT: Pulp mill optimal steam pressure levels	16 000 €
LUT: Recovery boiler as once-through boiler	33 800 €
Sum	89 400 €



Projects paid (2/4)

WP2: Increasing superheated steam temperature	
ÅA: Corrosion tests in reducing conditions – PART I	37 000 €
ÅA: Corrosion tests in reducing conditions – PART II	15 350 €
VTT: Corrosion study of recovery boiler superheater materials	104 000 €
Sum	156 350 €



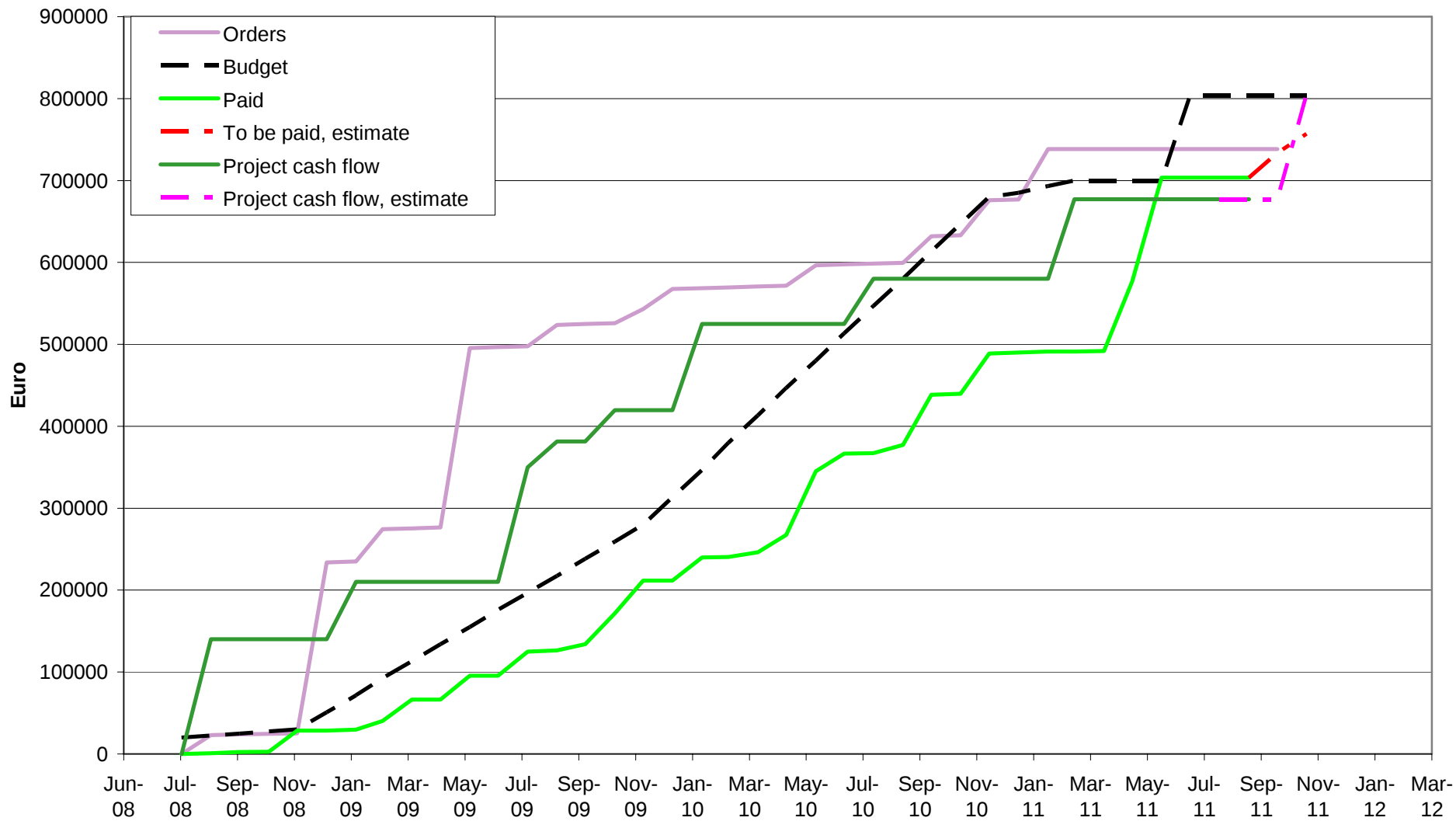
Projects paid (3/4)

WP3: Increasing recovery boiler pressure	
Boildec: Material testing in furnace, tests 1-4	100 264 €
VTT: Analyzes for Boildec tests 1-4	35 800 €
Boildec: Material testing in furnace, test 5	20 000 €
VTT: Analyzes for Boildec test 5	11 500 €
Oulun Yliopisto: Ceramic structural materials	15 000 €
LUT: Dynamic char bed	14 800 €
Sum	197 364 €



Projects paid (4/4)

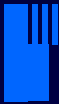
WP4: Ensuring boiler and feedwater quality	
Teollisuuden vesi: Effect of water quality to airheater corrosion, TOC-balance	24 600 €
Teollisuuden vesi: TOC removal methods and their applicability in make-up water treatment	45 000 €
Teollisuuden Vesi: FRBC's Water quality recommendation	31 500 €
VTT: Literature study amines	17 700 €
VTT: Magnetite formation	65 000 €
OY: Reduction of TOC from recovery boiler make-up water	10 000 €
Cewic: Activated carbon and UV-treatment - field test	15 500 €
Cewic: Activated carbon and UV-treatment – field test, part 2	18 942 €
Sum	228 242 €





Things to be done

- Final seminar 20.10 at Sokos Hotel President in Helsinki
- Final report by the end of October
- Ordering last projects
- Monitoring last projects



Schedule

23.9.2011



- Dew point measurements report ready ?
- Corrosion tests report ready ?
- Furnace material test 5 finished in December (2700 h)
- Furnace material report ready ?

APPENDIX 2

LUT

**Pulp mill optimal steam pressure levels –
final report 29.7.2011**

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Aapo Hiltunen

SELLUTEHTAIDEN HÖYRYTASOJEN OPTIMAALISET PAINEET

Työn tarkastajat:

Professori Esa Vakkilainen

Yliassistentti Aija Kivistö

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Aapo Hiltunen

Sellutehtaiden höyrytasojen optimaaliset paineet

Diplomityö

2011

99 sivua, 27 kuvaa, 24 taulukkoa, 6 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen,

Yliassistentti, TkL Aija Kivistö

Hakusanat: Sellutehdas, Höyryn paine, Höyryn painetaso

Keywords: Pulp Mill, Steam Pressure, Steam Pressure Level

Sellutehtaiden kannattavuutta pyritään lisäämään parantamalla tehtaiden energiatehokkuutta ja tehostamalla tuotantoa. Yksi keino tehtaan sähköntuotannon lisäämiseksi on höyrytasojen paineiden alentaminen tehtaan tuotantoprosesseissa. Tällöin höyry voidaan paisuttaa turbiinissa matalampaan paineeseen. Höyryn painetasojen alentaminen kuitenkin lisää tehtaan investointikustannuksia siirtoputkistojen kokojen ja lämmönsiirtopinta-alojen kasvaessa.

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa osana Suomen Soodakattilayhdistyksen projektia ”Skyrec – Soodakattilan sähköenergiatehokkuuden nostaminen uudelle tasolle”. Tässä diplomityössä määritetään 600 000 tonnia sellua vuodessa tuottaville Suomeen sopiville sellutehdastyypeille taloudellisesti optimaaliset höyryn painetasot. Optimaaliset höyryn painetasot määritettiin painetasojen mukaisten energiataseiden sekä investointiarvioiden perusteella. Työn taselaskennat tehtiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston Millflow-laskentasovelluksella. Matalapainetason mukaisia investointikustannuksia arvioitiin tehtaiden putkiston, haihduttamon ja kuivauskoneen osalta. Tulosten mukaan höyrytasojen paineet on taloudellisesti kannattavaa valita tehtaan laitteiston ja prosessien mukaan alhaisimmiksi mahdollisiksi. Lisäksi työssä tarkastellaan välipainehöyryn ja nuohoushöyryn paineiden alentamisen vaikutuksia tehtaan sähköntuotantoon sekä joillekin tehtaan prosesseille rakennettavan oman matala- tai välipainelinjan käytön kannattavuutta. Diplomityöhön kerättiin tietoa suomalaisilla sellutehtailla käytössä olevista höyryn paineista sekä syistä painetasojen valintaan.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree programme of Energy Technology
Aapo Hiltunen

Optimal Pressures of Steam Pressure Levels in Pulp Mills

Master's Thesis

2011

99 pages, 27 figures, 24 tables, 6 appendixes

Examiners: Professor, D.Sc Esa Vakkilainen
Chief Assistant, Lic. Sc. Aija Kivistö

Keywords: Pulp mill, Steam Pressure, Steam Pressure Level

Pulp mills are trying to increase their profitability by improving energy effectiveness and intensifying production in mills. One way to improve electricity production in mills is to lower steam pressures in pulping processes. In that case steam can be expanded to lower pressure in turbine. However, lowering the steam pressures increases also investment costs of mill because of bigger pipe sizes and heat transfer areas.

This master's thesis was done in Lappeenranta University of Technology as a part of Finnish Recovery Boiler Committees project "Skyrec – Increasing Recovery Boiler Efficiency to New Level". In this master's thesis is specified the economically optimal steam pressure for Finnish pulp mill types producing 600,000 tons of pulp per year. In the work for different pulp mill types used in Finland were formed energy balances and investment estimations in accordance with steam pressure levels. Energy balance calculations were done with Millflow-calculation application. The optimal steam pressure levels were determined on the bases of energy balances and cost estimations. The investment costs accordant with low pressure steam level were calculated for the part of piping, pulp dryer and evaporator. On the bases of the results it is economically profitable to choose the lowest possible steam pressure levels defined by pulping processes and equipments. In addition in the work was estimated the effect of lowering the middle pressure steam and sootblowing steam pressures for electricity production in pulp mills. In the work was also examined profitability of building own middle or low pressure steamlines for some pulping processes. For this master's thesis was also gathered information about steam pressures used in Finnish pulp mills and about the reasons of choosing the pressure levels.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa osana Suomen Soodakattilayhdistyksen projektia ”Skyrec – Soodakattilan sähköenergiatehokkuuden nostaminen uudelle tasolle”.

Opiskelu-aika yliopistossa on ollut eräs mielenkiintoisimmista ja vaiherikkaimmista ajanjaksoista elämässäni. Tämän diplomityön valmistumisen myötä tämä vaihe elämässäni päättyy. Haluan kiittää erityisesti Professori Esa Vakkilaista ammattitaitoisesta työn ohjaamisesta sekä erinomaisen vaihto-opintomahdollisuuden järjestämisestä Moskovaan. Haluaisin kiittää myös perhettäni läpi elämän kestäneestä tuesta ja kannustuksesta sekä opiskelukavereitani korvaamattomista hetkistä yhdessä opiskelujen aikana ja niiden ulkopuolella.

Lappeenrannassa 26.07.2011

Aapo Hiltunen

SISÄLLYSLUETTELO:

1	JOHDANTO	12
2	SELLUTEHTAAN TOIMINTA.....	17
2.1	Puun käsittely.....	17
2.2	Sulfaattisellun keitto.....	18
2.2.1	Eräkeitto	18
2.2.2	Vuokeitto	19
2.3	Massan pesu ja lajittelu	21
2.4	Happidelignifiointi	22
2.5	Valkaisu	23
2.6	Kuivaus.....	24
2.7	Kemikaalikierto.....	24
2.7.1	Haihduutamo	25
2.7.2	Soodakattila	28
2.7.3	Nuohomet	30
2.7.4	Kattilan vesi-höyrykierto.....	32
2.7.5	Kaustisointi.....	33
2.7.6	Meesauuni.....	35
2.8	Kuorikattila	36
2.9	Höyryturbiini	38
2.10	Höyryn paineen säätö.....	38
3	HÖYRYN KULUTTAJAT	40
3.1	Haihduutamo.....	41
3.2	Sellun kuivuri.....	42
3.3	Keitin	42
3.4	Valkaisu	44

3.5	Soodakattila	44
4	LASKENTA.....	45
4.1	Taselaskenta.....	45
4.2	Putkiston halkaisijan määrittäminen	48
4.3	Putken seinämävahvuuden laskeminen	50
4.4	Putkiston investointikustannukset.....	51
4.5	Haihduksen investointikustannukset	52
4.6	Kuivauskoneen investointikustannukset	54
4.7	Vuosittaisten kokonaisinvestointien laskeminen	54
4.8	Turbiinin tehon laskeminen	55
5	TAPAUSTEN LASKENTA-ARVOT	59
5.1	Höyryn painearvot energiataseiden laskennassa.....	60
5.2	Tehdastyypin prosessilämmön kulutus laskennassa.....	61
5.3	Turbiinin toiminta-arvot	63
5.4	Nuohoushöyryn paineen alentaminen	64
5.5	Toisen matalapainetaso rakentaminen.....	65
5.6	Toisen välipainetaso rakentaminen	67
6	SUOMESSA KÄYTETTÄVÄT HÖYRYN PAINETASOT	69
7	VÄLIPAINETASON LASKEMISTA RAJOITTAVAT TEKIJÄT.....	72
8	HÖYRYN PAINETASON VAIKUTUS SÄHKÖN TUOTANTOON	73
8.1	Höyryn painetasojen muutoksen vaikutus sähkön myyntituloihin	73
8.2	Turbiinin marginaalinen rakennusaste	75
8.3	Nuohoushöyryn paineen vaikutus sähkön myyntituloihin	76
9	HÖYRYN PAINETASON VAIKUTUS INVESTOINTEIHIN.....	78
9.1	Putkiston investointikustannukset.....	78
9.2	Haihduksen investointikustannukset	80
9.3	Kuivauskoneen investointikustannukset	81

9.4	Kokonaisinvestoinnit.....	81
10	MATALAPAINETASON OPTIMAALINEN PAINE	83
11	HERKKYYSTARKASTELU	85
12	RINNAKKAISTEN HÖYRYLINJOJEN RAKENTAMINEN.....	86
12.1	Toisen matalapainelinjan rakentamisen kannattavuus.....	86
12.2	Toisen välipainelinjan rakentamisen kannattavuus	88
13	JOHTOPÄÄTÖKSET	90
14	YHTEENVETO	92

LIITTEET

LIITE I:	Sähköpostikeskustelu sellutehdasprosessien painetasovaatimuksista
LIITE II:	Matalapainehöyryn paineen mukaiset kannattavuuslaskelmat
LIITE III:	Rinnakkaisen välipaineputkiston laskennan arvot ja tulokset
LIITE IV:	Tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen kyselyyn käytettävistä painetasoista ja syistä tasojen valintaan
LIITE V:	Esimerkki talteenottolinjan ja kuivauskoneen uusinnan kustannuslaskelmista
LIITE VI:	Haihduuttamon investointilaskelmat

SYMBOLILUETTELO

A	pinta-ala [m^2]
A_0	vuosittainen maksu [€]
a	lainan maksuaika, investoinnin pitoaika [a]
$c_{a,i}$	annuiteetti tekijä [-]
c_p	ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
d	halkaisija [m]
f	kitkakerroin [-]
h	ominaisentalpia [kJ/kg]
I	investointi [€]
i	investoinnin / lainan korko [%]
k	kertavastus [-]
l	pituus [m]
m	massa [kg]
mk	materiaalikustannus [€/kg], [€/m ²]
n	varmuuskerroin [-]
P	teho [kW]
p	paine [bar, Pa]
Q	lämpö [MW]
q_m	massavirta [kg/s]
R'	reaali kaasuvakio [kJ/kgK]

s_0	teoreettinen seinämänvahvuus [mm]
T	lämpötila [°C]
t	aika [a, h]
w	nopeus [m/s]
X	kuiva-aine pitoisuus [$\text{kg}_{\text{kuiva-ainetta}} / \text{kg}_{\text{vettä}}$]
α	rakennusaste [-]
η	hyötysuhde [-]
Φ	lämpövirta [W]
ρ	tiheys [kg/m^3]
σ_{sall}	laskentajännitys [N/mm^2]
σ_l	materiaalilujuus [N/mm^2]

Alaindeksit

1	alkutila
2	lopputila
e	sähkö
h	haihduttamo
k	kuivauskone
kp	kiehumapiste
l	lauhde
m	muodostumis-

p	putkisto
pap	paperi
pr	prosessi
pt	polytrooppinen
s	isentrooppinen
sat	saturaatio-/ lauhtumis-
sis	sisä-
t	tuntuva
teh	tehollinen
th	prosessilämpö
tun	tunnettu
u	ulkoinen

Lyhenteet

abs	absoluuttinen
ADt	ilmakuiva sellutonni
BPR	kiehumapisteen nousu
HPK	hienopaperikone
KK	kuorikattila
LP	matalapainehöyry
MP	välipainehöyry

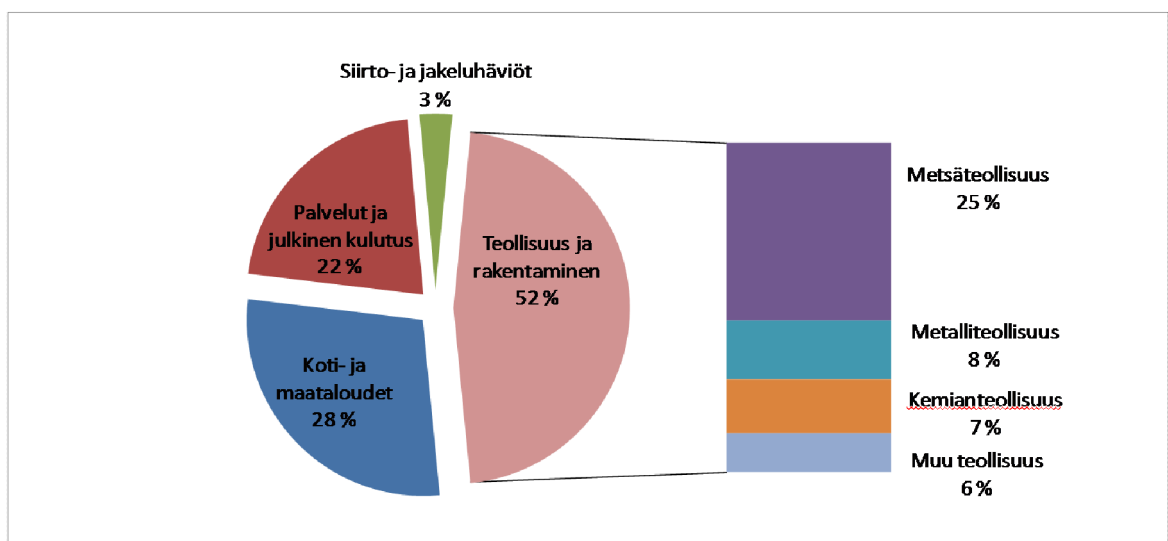
MP1	turbiinin väliottopaine 1
MP2	turbiinin väliottopaine 2
NH	nuohoushöyry
TH	tuorehöyry
ST	sellutehdas

1 JOHDANTO

Metsäteollisuudella on Suomessa pitkä historia, ja sillä on merkittävä vaikutus Suomen kansantalouteen. Metsäteollisuus on eräs maamme suurimmista teollisuudenaloista, ja Suomen kansainvälinen kilpailukyky on rakentunut monilta osin sen varaan.

Metsäteollisuuden tärkeimmät osa-alueet ovat massa- ja paperiteollisuus. Metsäteollisuus työllistää suoraan noin 50 000 ihmistä ja luo noin 15 % teollisuuden työpaikoista Suomessa. Sellu- ja paperiteollisuus kattoivat vuonna 2009 lähes 17 % Suomen teollisuustuotannon arvosta. Vuonna 2010 metsäteollisuuden viennin osuus Suomen koko tavaran viennin osuudesta oli noin viidennes. (Tilastot 2011) Metsäteollisuuden viennin arvo henkeä kohti ja osuus koko viennistä ovatkin maailman suurimmat. (Suomen metsäteollisuus 2011)

Metsäteollisuudella on myös suuri vaikutus maamme energiankulutukseen. Kuvassa 1 on esitetty Suomen sähköenergiankulutus sektoreittain. Vuonna 2010 sähkön kokonaiskulutus oli Suomessa 87,5 TWh, josta metsäteollisuuden osuus oli neljännes. Metsäteollisuus kulutti yli 50 % teollisuuden käyttämästä sähköstä. (Suomen virallinen tilasto 2011) Sellu- ja paperiteollisuus ovat metsäteollisuuden suurimmat energiankuluttajat.

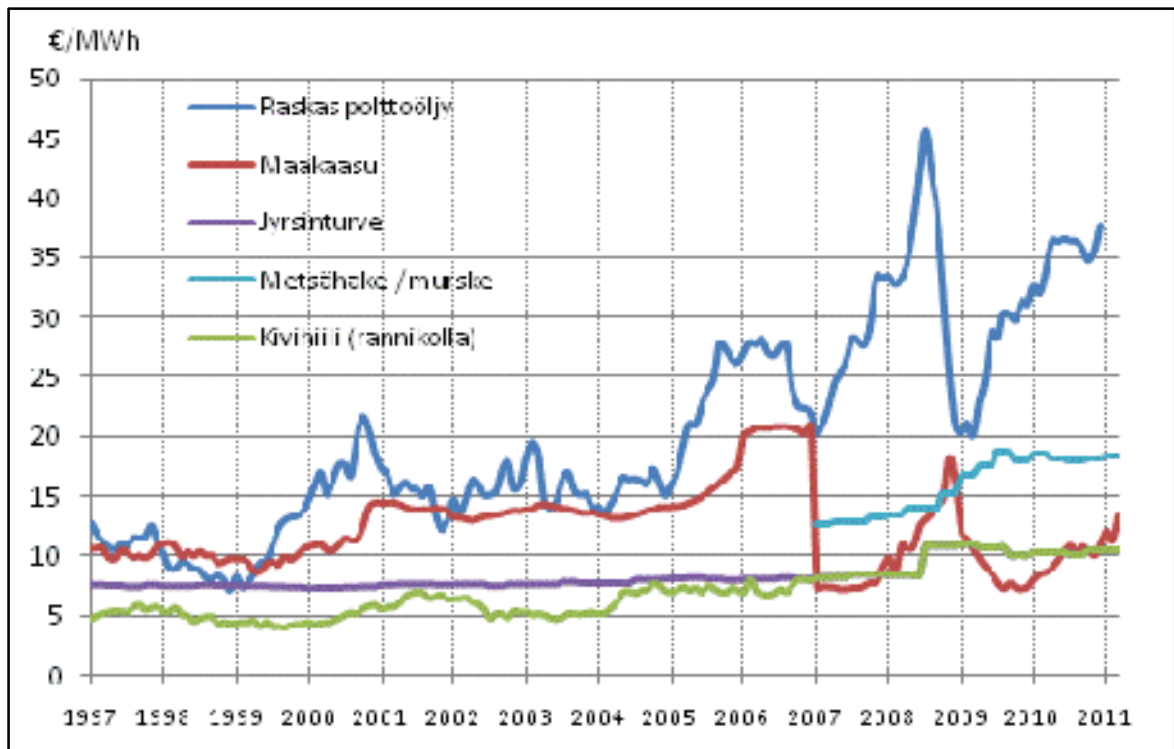


Kuva 1. Sähkön kulutus sektoreittain Suomessa vuonna 2010. (Lähdettä mukaillen: Sähkönkulutus 2011)

Polttoaineiden hintojen noususta ja sellun hinnan laskusta johtuva kilpailun kiristymisen sekä taloudellinen taantuma ovat johtaneet mittaviin säästötoimiin suomalaisilla tehtailla.

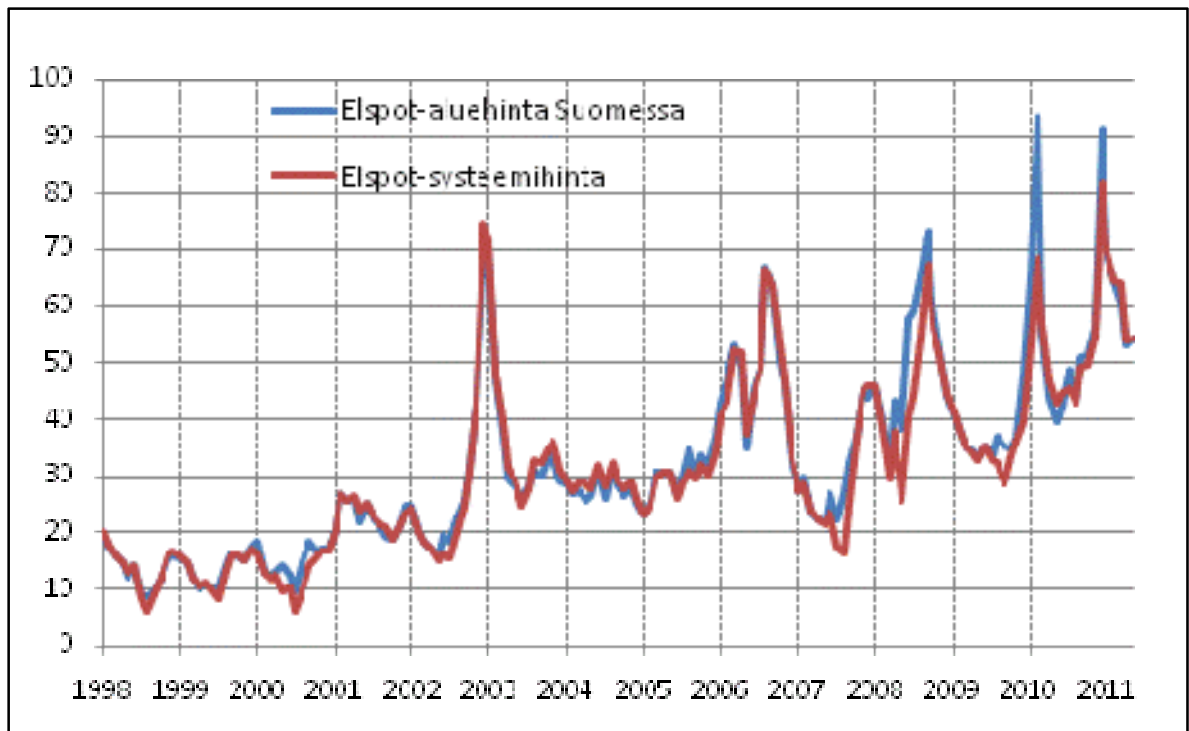
Tehtaiden tuotantokapasiteettia on pienennetty ja tehtaita on jouduttu lakkauttamaan. Liiketuloksen osuus liikevaihdosta on pienentynyt kaikilla metsäteollisuuden aloilla. Tehtaat joutuvat tekemään mittavia investointeja kilpailukykyänsä säilyttämiseksi ja säästöjen aikaansaamiseksi ilman tuotantokapasiteetin vähenemistä. (Kivistö 2010, 1)

Tehtaiden suuresta energian kulutuksesta johtuen sähkön ja tehdaspolttoaineiden hinnat vaikuttavat merkittävästi niiden talouteen. Kuvassa 2 on esitetty voimalaitospolttoaineiden hinnankehitys viime vuosikymmeninä. Kuvasta voidaan todeta voimalaitospolttoaineiden hintojen yli kaksinkertaistuneen viimeisten 15 vuoden aikana. Viime vuosina uusiutuvien polttoaineiden käytöllä on saatu aikaan merkittäviä säästöjä tehtaiden energiantuotantokuluissa. Suomalaisilla sellu- ja paperitehtailla noin 80 % lämmöstä ja sähköstä tuotetaan puuperäisillä polttoaineilla, ja tehtaat pystyvät tuottamaan noin 40 % tarvitsemastaan sähköstä itse. (Tilastot 2011) Suomen on edelleen vähennettävä aiheuttamiaan CO₂-päästöjä EU:n velvoitteiden mukaisesti. Suomalaisilla sellutehtailla fossiilisia polttoaineita käytetään vain meesauunin polttoaineena ja kattiloiden tuki- ja kuormapolttimissa. Prosessien tehostumisen ja tekniikan kehittymisen myötä selluntuotannon ominaisenergiankulutus on vähentynyt viime vuosikymmeninä. Vajaassa 40 vuodessa sellutehtaiden lämmönkulutus on pienentynyt noin 15 % ja sähkönkulutus noin 5 % tuotettua ilmakeivää sellutonnin (ADt) kohden. Energian kulutuksen vähenemiseen ovat vaikuttaneet muun muassa sellun keittovaiheen energiankulutuksen pieneneminen, kuivauksen tehostuminen, lipeähaihduttamon vaihdeluvun lisääntyminen sekä jätelämmön talteenoton kehittyminen. (Kivistö 2010, 1–3)



Kuva 2. Voimalaitospolttoaineiden hinnat sähköntuotannossa. (Energian hinnat 2011A)

Tuotantoprosessien optimoinnilla ja sähköntuotannon maksimoinnilla pyritään saamaan aikaan säästöjä tehtaiden energiankulutuksessa ja lisäämään tehtaan tuloja. Suurista tuotantomääristä ja sähkön korkeasta hinnasta johtuen sähkön ja lämmön tuotannon lisäämiseksi tehdyt investoinnit ovat kannattavia. Kuvassa 3 on esitetty Nord Pool Spot –sähköpörssin kuukausikeskiarvot sähkön hinnalle. Kuvasta voidaan havaita sähkön hinnan yli nelinkertaistuneen viimeisen 10 vuoden aikana. Vuonna 2010 Suomessa myytävän sähkön hinta oli Euroopan korkein. (Metsäteollisuus 2010) Aiemmin mainittujen seikkojen vuoksi prosessien energiatehokkuuden ja tehtaiden energiaomavaraisuuden parantaminen on tärkeää sellu- ja paperiteollisuuden kannattavuuden lisäämiseksi. Tämän vuoksi suomalaisilla paperi- ja sellutehtailla tehdään runsaasti tutkimustyötä ja investoidaan paljon uusiin tehokkaampiin energiaratkaisuihin.



Kuva 3. Nord Pool Spot-sähköpörssin kuukausikeskiarvot. (Energian hinnat 2011 B)

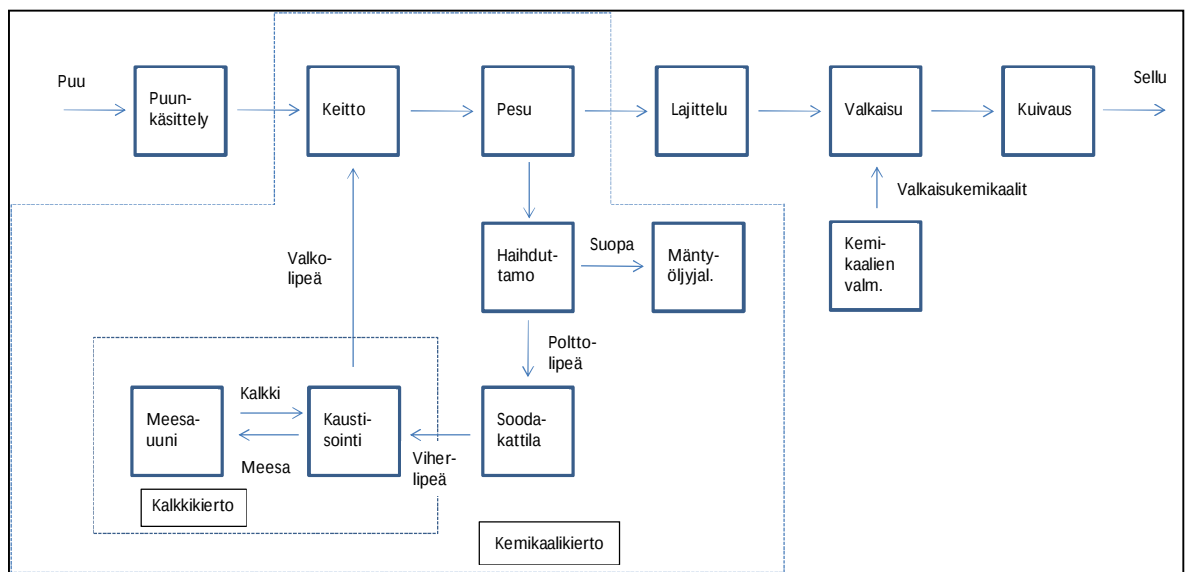
Edellä mainituista syistä johtuen sellu- ja paperitehtailla pyritään löytämään keinoja lämmönkulutuksen vähentämiseksi ja sähköntuotannon lisäämiseksi. Useilla tehtailla käytettävät höyryn painetasot on määritetty vanhojen laitteistojen mukaan, eikä niitä ole optimoitu uusista laitteistoinvestoinneista huolimatta. Alan kirjallisuudessa ja tutkimisissa ei ole yleisohjetta painetasojen vaikutuksesta tehtaan sähkön tuotantoon ja kulutukseen. Sähköntuotantoa voitaisiin lisätä alentamalla tehtaan höyryn painetasoja ja paisuttamalla höyry turbiinissa matalampaan vastapaineeseen. Matalampien höyrynpaineiden käyttö merkitsee kuitenkin myös suurempia investointikustannuksia höyrylinjojen ja laitteiden lämmönsiirtopintojen kokojen kasvaessa.

Tämän työn tavoitteena on selvittää suomalaisten sellutehdastyypien optimaaliset matalapainehöyrytasojen paineet sekä tarkastella höyrytasojen paineiden muuttumisen vaikutusta tehtaan sähkön kulutukseen ja tuotantoon. Erilaisille tehdastyypeille on muodostettu vuosikeskiarvotaseet sekä investointiarviot käytettävien höyryn painetasojen mukaan. Paineen muuttumisesta aiheutuvia investointeja on arvioitu putkiston, haihduttamon ja kuivurin osalta. Investointiarvioissa ei ole huomioitu painetason muuttumisesta aiheutuvia kustannuksia tehtaan muissa prosesseissa ja laitteissa. Vuosikeskiarvotaseiden ja investointiarvioiden avulla on määritetty taloudellisesti

optimaaliset paineet tehdastyypin matalapainehöyrylle. Työssä tarkastellaan myös välipainehöyryn sekä nuohoushöyryn paineiden alentamisen vaikutuksia tehtaassa sähköntuotantoon. Lisäksi työssä tarkastellaan nykyisten matala- ja välipainetasojen rinnalle rakennettavien alempien painetasojen vaikutuksia tehtaassa vuosikeskiarvotaseeseen sekä muodostetaan tapauksille investointiarviot.

2 SELLUTEHTAAN TOIMINTA

Suomessa kemiallisen sellun valmistus tapahtuu sulfaattisellumenetelmällä. Sulfaattisellumenetelmässä puukuitujen erottaminen toisistaan tapahtuu keittokemikaalien ja lämmön avulla. Tehdas koostuu kuitulinjasta, jossa massanvalmistus tapahtuu, sekä kemikaalikierrosta, jossa tuotetaan kemikaaleja keittoon, sekä lämpöä tehtaan prosesseihin. Kemikaalikierto on jaettu lipeäkiertoon ja kalkkikiertoon. Mahdollisimman suuri osa keitossa tarvittavista kemikaaleista pyritään palauttamaan uudelleen käytettävään muotoon. Kuvassa 4 on kuvattu sulfaattisellutehtaan periaatteellinen prosessijako, sekä edellä kuvattua kemikaalien kiertoa. Seuraavissa kappaleissa on kuvattu pääpiirteittäin tyypillisen suomalaisen sulfaattisellutehtaan toiminta.



Kuva 4. Sulfaattisellutehtaan periaate toimintakaavio.

2.1 Puun käsittely

Suomessa sellun raaka-aineena käytetään pääasiassa mänty- ja koivutukkeja sekä jonkin verran haapaa. Tukit ovat noin 2–6 metriä pitkiä ja halkaisijaltaan noin 7–15 cm. Ne tuodaan auto-, laiva- tai junakuljetuksena tehtaan puukentälle, josta ne siirretään kuorintaan. Kuorinnan ensimmäisessä vaiheessa puut pestään irtoliasta lämpimällä vedellä,

joka myös sulattaa jäiset puut. Varsinainen kuorinta tapahtuu kuorintarummussa, jossa puut hankautuvat toisiaan vasten ja kuori jauhautuu irti. Kun irronneesta kuoresta on poistettu kivet ja muut epäpuhtaudet, se revitään ja puristetaan, jonka jälkeen kuori kuljetetaan hakekentälle varastoitavaksi. Kuori voidaan polttaa tehtaan kuorikattilassa.

Kuorimisen jälkeen rangat syötetään hakkurille, jossa niistä hakataan tasakokoisia ellipsimäisiä paloja. Yleisimmin hakettaminen tapahtuu kiekkohakkurilla, jossa puun leikkaaminen tapahtuu pyörivällä teräkiekolla. Hakettamisen jälkeen hakkeesta seulotaan sellun raaka-aineeksi sopiva tasalaatuinen ja oikean kokoinen hake. Sopimaton hake, oksat ja kepit murskataan ja poltetaan kuoren joukossa. Sellun keittoon menevä hake kuljetetaan hakekentälle varastoitavaksi avovarastoihin tai hake siiloihin. (Kivistö 2008, 1-3)

2.2 Sulfaattisellun keitto

Sellun keitossa puukuidut erotetaan toisistaan liuottamalla kuitujen sidosaine, ligniini puusta lämmön ja kemikaalien avulla. Keittokemikaaleina käytetään natriumhydroksidia (NaOH) ja natriumsulfidia (Na_2S). Lisäksi keittokemikaalit sisältävässä valkolipeässä on muun muassa natriumkarbonaattia (Na_2CO_3) ja natriumsulfaattia (Na_2SO_4). Sellun keittotekniikoina käytetään joko vuokeittoa tai eräkeittoa. Eräkeitto oli ainoa keittotapa aina 1950-luvulle saakka. 1960-luvun alussa energiatehokkaampi vuokeitin alkoi kilpailla eräkeittimen kanssa. Eräkeitteletekniikassa tapahtui merkittäviä parannuksia vasta 1980-luvulla, kun keittimen energiatehokkuus ja kemikaalien käyttötehokkuus parantuivat merkittävästi SuperBatch- keittimen myötä. (Gullichsen, Fogelholm1999, A493)

2.2.1 Eräkeitto

Eräkeitossa keittimessä valmistetaan yksi hake-erä kerrallaan ennen sen tyhjentämistä ja uuden erän keittämistä. Käytössä on useita keittimiä, jotka toimivat kukin eri vaiheessa keittoa. Käytetyt keittoliemet kierrätetään, jotta niiden sisältämä lämpöenergia ja keittokemikaalit saataisiin talteen ja voitaisiin hyödyntää seuraavassa keittoerässä.

Keittimen haketäyttö tehdään matalapainehöyryn kanssa, jolloin hakkeesta saadaan poistettua reaktiota haittaavaa ilmaa. Täytön jälkeen keittimeen pumpataan edellisestä keittoerästä talteen otettua mustalipeää. Lipeä poistaa hakkeesta lopun ilman ja esilämmittää sen 80–90 °C:een. Lämminlipeätäytön loppuvaiheessa keittimen yläosassa oleva venttiili suljetaan ja keittimen paine nousee. Tämän jälkeen alkaa kuumalipeätäyttö, jossa keittimeen pumpataan 160–170 °C lämpöistä mustalipeää ja poistetaan lämminlipeää. Talteen otettava lämminlipeä pumpataan lämminmustalipeäakkuun. Kun keitin on 140 °C lämpötilassa, aloitetaan myös kuuman valkolipeän pumppaus. Tämän jälkeen keitin lämmitetään keittolämpötilaansa noin 165–170 °C. Yleensä tässä vaiheessa tarvitaan vain 10–15 °C:n lämmönnosto. Lämmitys tapahtuu höyryllä joko kierrättämällä lipeää lämmönsiirtimissä tai suoralla höyrylämmityksellä, jolloin höyryn lauhteita ei saada talteen. Varsinainen keittoaika on noin 35–60 minuuttia. Keitto keskeytetään pumppaamalla keittimiin 60–80 °C lämpötilassa olevaa pesulipeää. Keitossa käytetty kuumamustalipeä poistuu paineistettuihin kuumamustalipeäakkuihin. Syrjäytyksen jälkeen keitin tyhjennetään ja massa pumpataan puskusäiliöön. Puskuvaiheessa keittimen lämpötila on alle 100 °C. (Kivistö 2008, 5–7)

Eräkeiton etuja ovat muun muassa pieni höyryn tarve, joustavuus ja kemikaalien tehokas hyödyntäminen. Nykyaikaisia eräkeitto menetelmiä ovat Cold Blow-, SuperBatch- ja Enerbatch-menetelmät. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A494–497) Suomessa eräkeitton menetelmää käytetään muun muassa UPM Kymmenen Kaukaan tehtailla. (Vakkilainen, keskustelu 19.08.2010)

2.2.2 Vuokeitto

Vuokeitossa käytetään vain yhtä jatkuvatoimista keitinastiaa. Keittäminen tapahtuu vuokeittimessä hydraulisena tai höyry-nestefaasikeittona. Hydraulisessa keitossa lipeän lämmitys tapahtuu epäsuorasti lämmönsiirtimissä kun taas höyry-nestefaasikeitintä lämmitetään suoralla höyrylämmityksellä. Keittimen yläosaan syötetään koko ajan haketta ja keitettyä sellumassaa poistetaan sen alaosaan. Kuvassa 5 on esitetty yleiskuva vuokeittolaitteistosta ja keittimen ainevirroista.

Keitin on jaettu vyöhykkeisiin, joissa keiton eri vaiheet tapahtuvat. Ensimmäisessä vaiheessa hake syötetään hakesiilosta matalapainesulkusyöttimellä pasutusastiaan. Pasutusastiassa hakkeesta poistetaan höyryn avulla ilmaa. Höyrynä voidaan käyttää keittimen jälkeisen mustalipeän paisumisesta saatavaa höyryä tai matalapainehöyryä. Kuvassa 5 höyrylinjat näkyvät sinisellä. Kaikissa keittimissä pasutusastiassa tapahtuvaa esihöyrytystä ei kuitenkaan tehdä. Pasutusastiasta hake tippuu romuloukkuun, jossa hake upotetaan lipeään. (Virkola 1983, 367–369) Korkeapainepurkain siirtää hakkeen romuloukusta 100–150 kPa:n matalapaineesta yli 1 MPa:n prosessipaineeseen. Hake pumpataan lipeävirran mukana syöttökiertopumpulla keittimen yläruuville. Kuvassa 5 hakkeen kulku pasutusastialta keittimeen on kuvattu punaisella nuolella. Tyypillisesti hydraulisen keittimen paine on noin 10–15 bar ja lämpötila noin 100–135 °C. Keittimessä hake valuu ylhäältä alaspäin kaikkien keittovaiheiden läpin. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A513–519)

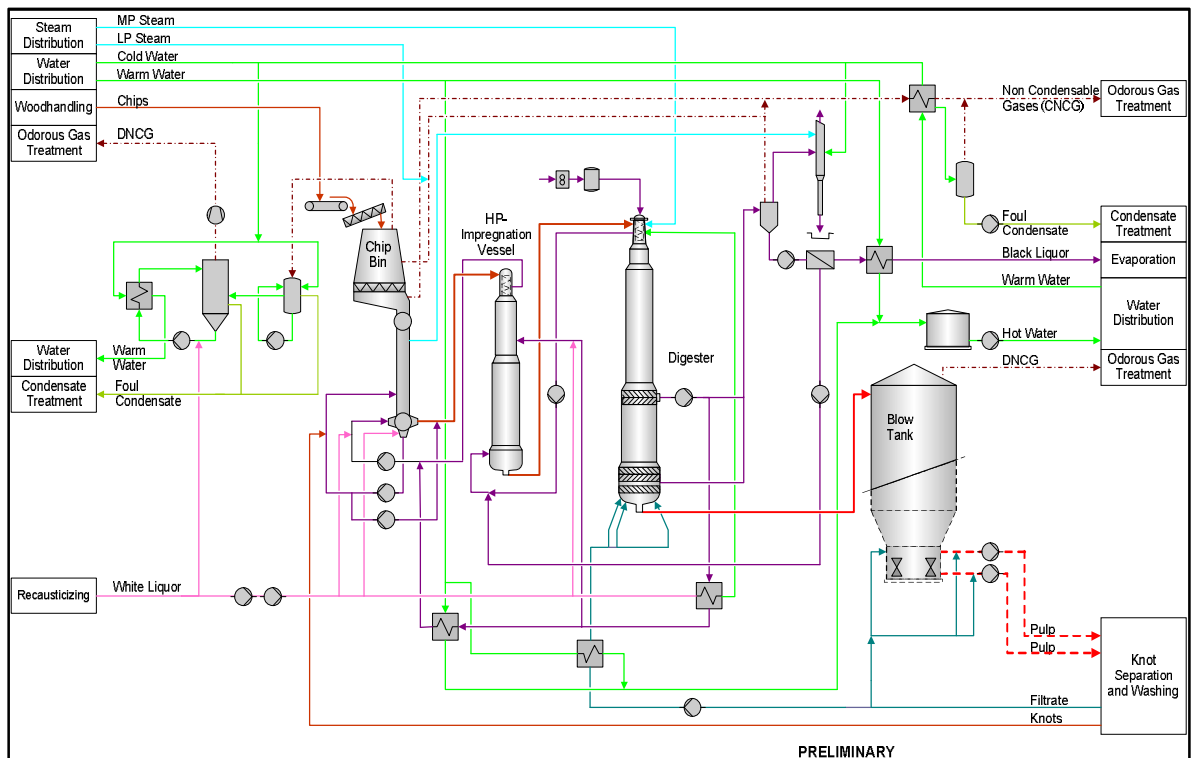
Keittimen yläosassa sijaitsee imeytysvyöhyke, jossa valkolipeä imeytyy hakkeeseen. Vaiheen lämpötila on noin 115–125 °C ja imeytysaika 45–60 minuuttia. Lipeä poistetaan imeytysvyöhykkeen alaosaan ja lämmitetään noin 150 °C:een. Tämän jälkeen se palautetaan keittimeen keskusputkesta suunnilleen samalle tasolle.

Toisen vaiheen jälkeen lipeä lämmitetään 150–170 °C keittolämpötilaan. Hake viipyy keittovaiheessa 1.5–2.5 tuntia. Keittovaihetta seuraa lipeän poistovaihe, jossa hakkeeseen sitoutumaton lipeä poistetaan keittimestä. Poistettu lipeä paisutetaan ilmakehän paineeseen, jolloin se kiehuu. Syntynyt höyry käytetään hakkeen esihöyrytykseen pasutusastiassa ja höyrytimessä.

Keitto pysäytetään keittimen alaosaan sijaitsevassa pesuvaiheessa. Pesu voidaan suorittaa esimerkiksi Hi-Heat menetelmällä, jossa massaa pestään vastavirtaan kulkevalla pesusuodoksella. Pesuvaiheessa kiertävän suodoksen lämpötila on noin 130 °C ja pesuaika 1–4 tuntia. Lisäksi keittimen pohjalle pumpataan alle 80 °C:n lämpötilassa olevaa pesulipeää. Suurin osa pesulipeästä pumpataan valmiin massan mukana puskusäiliöön. Massan poistolämpötila on noin 85–90 °C. Kuvassa 5 keitetyn sellumassan pumpppausta keittimen pohjalta puskusäiliöön kuvataan punaisella nuolella. Keittolipeä ja osa

pesulipeästä pumpataan paisuntavaiheiden kautta haihduttamolle. Mustalipeälinja näkyy kuvassa 5 violetina viivana.

Vuokeyton etuina eräkeittoon verrattuna ovat muun muassa energiatehokkuus, tilatehokkuus, pienempi tehontarve sekä pienemmät ainevirrat. (Gullichsen, Fogelholm1999, A513–519)

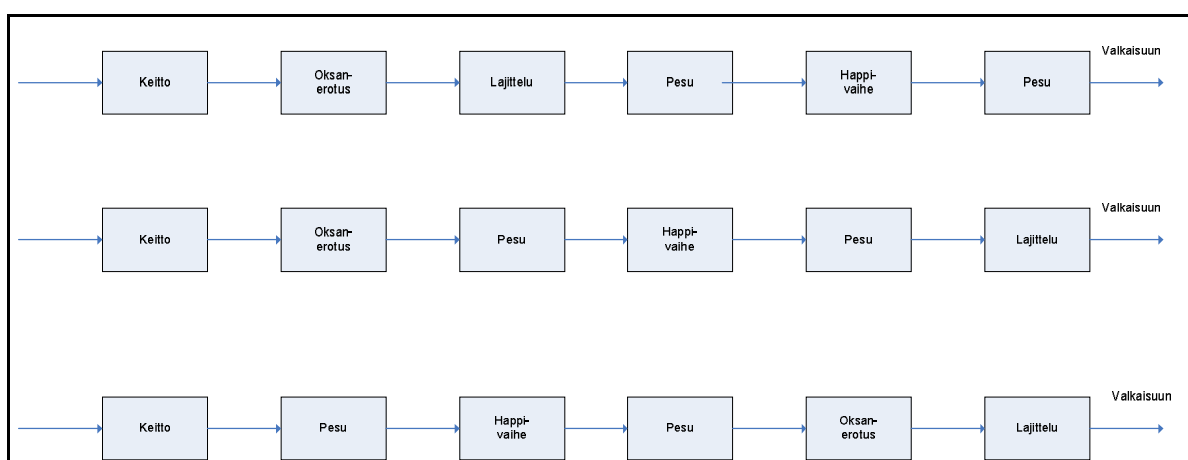


Kuva 5. Vuokeyttolaitteisto (Pöyry Oy 2006)

2.3 Massan pesu ja lajittelu

Keiton jälkeen massa pestään ja lajitellaan. Pesu tehdään usein vaiheittain vastavirtapesuna. Vastavirtapesussa vaiheen pesunesteenä käytetään aina edellisestä vaiheesta saatavaa pesulientä. Tällöin vain viimeisen vaiheen pesu tapahtuu puhtaalla vedellä. Tällöin valtaosa massan sisältämistä jäänöskemikaaleista saadaan talteen ja jäteveden puhdistustarve pienenee. (Virkola 1983, 683)

Lajittelun tarkoituksena on poistaa pestystä massasta kiinteät epäpuhtaudet mahdollisimman pienin primäärikuituhäviöin. Massan epäpuhtauksia ovat muun muassa hajoamaton puu, oksat ja hiekka. Epäpuhtauksia erotetaan massan joukosta kokoeroon perustuen seulalla tai tiheyseroon perustuen syklonissa. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A15, A122) Massaa pestään myös valkaisuvaiheiden välissä. Pesu-, valkaisu- ja lajitteluvaiheiden järjestys voi vaihdella. Kuvassa 6 on esitetty vaihtoehtoisia järjestyksiä massan pesulle ja lajittelulle.



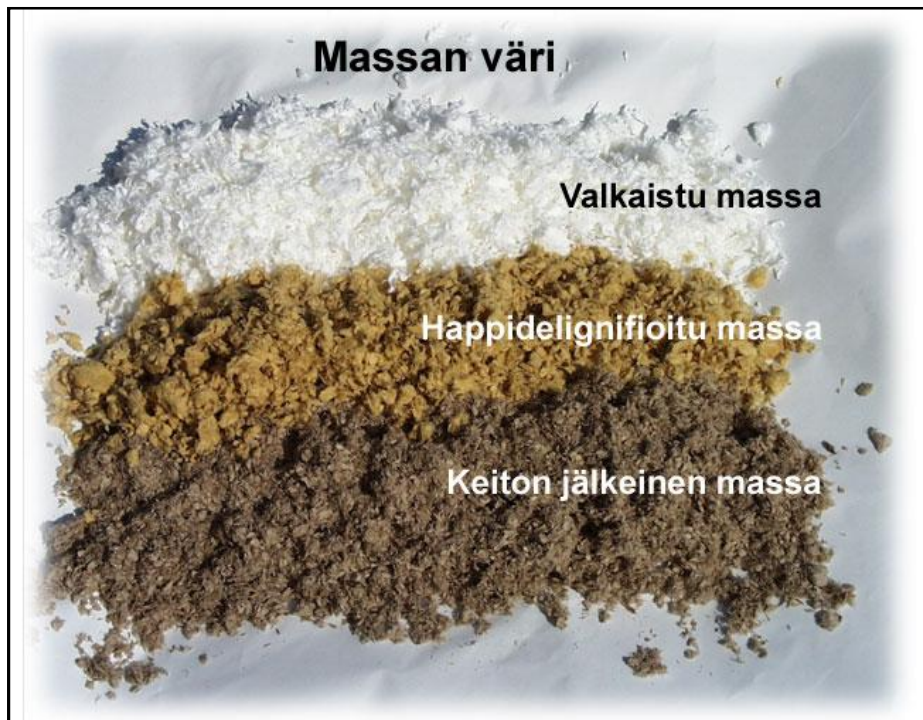
Kuva 6. Pesu-, lajittelu- ja happivaiheen sijoitus mahdollisuuksia.

2.4 Happidelignifiointi

Sellu ja useimmat puun polysakkarideista ovat luonnostaan kirkkaan värisiä, mutta ligniini antaa niille tummemman värin. Korkeasta ligniinin erotusasteesta huolimatta kemiallinen sellu on vielä tummaa pesuvaiheen jälkeen. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A15) Ligniininipitoisuuden alentaminen ennen valkaisu on tärkeää myös tehtaan ympäristön suojelun kannalta. Happidelignifioinnissa sellu pumpataan sekoittimeen alkaalin, kuten oksidoidun valkolipeän, sekä hapen ja höyryn kanssa. Tämän jälkeen kaasut erotetaan sellusta ja sellu pestään ennen valkaisu. Happidelignifiointi on korkeista pääomakustannuksista huolimatta kannattava, koska sillä voidaan alentaa valkaisu kemikaalitarvetta ja pienentää merkittävästi tehtaan jätevesi kuormitusta. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A137–139)

2.5 Valkaisu

Happidelignifioinnin lisäksi massaa valkaistaan myös kemiallisesti. Massan vaaleuden lisäksi valkaisulla voidaan vaikuttaa epäpuhtauksien määrään, massan viskositeettiin ja lisätä massan alfaselluloosapitoisuutta. (Virkola 1983, 811) Valkaisu voidaan tehdä poistamalla massasta värin aiheuttavaa ligniiniä tai värjäämällä sitä. Valkaistu ligniini kellertyy ajan myötä ja aiheuttaa myös paperin kellertymisen. Kuvassa 7 on esitetty sellumassan väri eri valkaisuvaiheiden jälkeen. Kuvasta näkyy selvästi sellun luonnostaan kellertävä väri. Valkaisu voidaan tehdä ECF (Elemental Chlorine Free) tai TCF (Total Chlorine Free) -menetelmällä. ECF-valkaisu tapahtuu klooridioksidilla (ClO_2), kun taas TCF-valkaisussa käytetään kloorikemikaalien sijasta happikemikaaleja kuten happea, vetyperoksidia ja otsonia. (Kivistö 2008, 11)



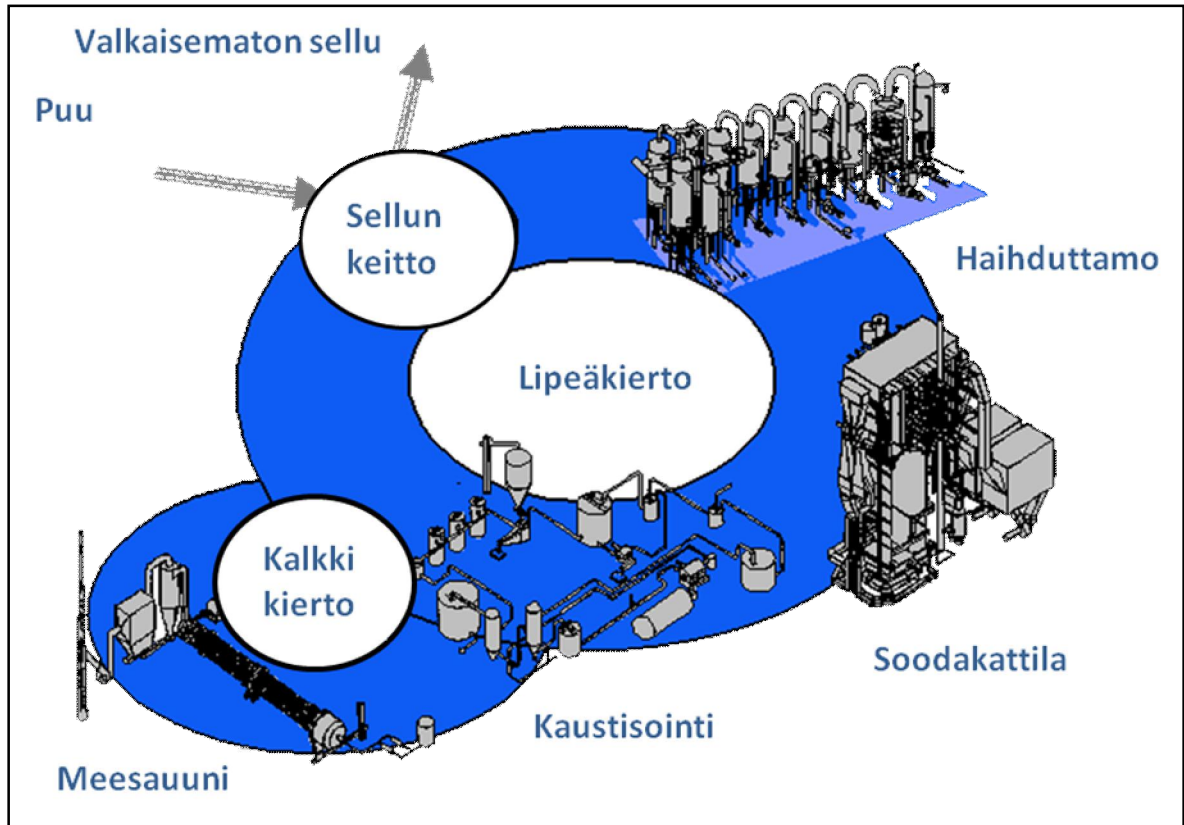
Kuva 7. Sellumassan väri. (KnowPulp 6.0)

2.6 Kuivaus

Valmis sellu kuivataan noin 90 % kuiva-ainepitoisuuteen. Integroidussa sellu- ja paperitehtaassa sellua ei aina kuivata, vaan se siirretään pumppumassana suoraan paperitehtaalalle. Sellua kuivataan ensin puristamalla, jolloin päästään noin 35–50 % kuiva-ainepitoisuuteen. Tämän jälkeen kuivaus tapahtuu konvektio- tai kontaktikuivauksena. Säteilukuivausta ei käytetä sellun kuivaamiseen. Kontaktikuivaus tapahtuu sylinterikuivaimessa, joka koostuu joukosta höyryllä lämmitettäviä valurautasyhintereitä. Massaraina kulkee kuivaimen läpi sylinterien pinnalla, jolloin sen sisältämä kosteus haihtuu ilmaan. Useimmiten mekaanisen massan kuivaus tapahtuu kuitenkin puhallinkuivaimella. Puhallinkuivauksessa kuivaimen yli kulkevaa massarainaa leijutetaan höyryllä lämmitetyllä kuivausilmalla niin ettei se pääse kosketuksiin kuivaimen kanssa. (Virkola 1983, 969–984) Kuivauksessa voidaan hyödyntää myös öljyn tai maakaasun palamisessa syntyviä kuumia savukaasuja. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A225)

2.7 Kemikaalikierto

Kemikaalikierron tarkoituksena on keitossa käytettyjen kemikaalien talteenotto ja regenerointi uudelleen käytettävään muotoon sekä mustalipeän sisältämän puuaineksen hyödyntäminen energian tuotannossa. Kemikaalikierto koostuu lipeä- ja kalkkikierrosta. Lipeäkierron tehtäviin kuuluvat pesulipeän haihdutus lipeän kuiva-ainepitoisuuden nostamiseksi ja mustalipeän polttaminen sekä keittokemikaalien talteenotto ja regenerointi uudelleen käytettävään muotoon. Kalkkikierrossa natriumkarbonaatista kaustisoidaan natriumhydroksidia ja meesa regeneroidaan kalkiksi meesauunissa. Kuvassa 8 on esitetty sellutehtaan kemikaalikierto. Kuten kuvasta voidaan havaita, toimivat lipeä- ja kalkkikierto osittain päällekkäin.

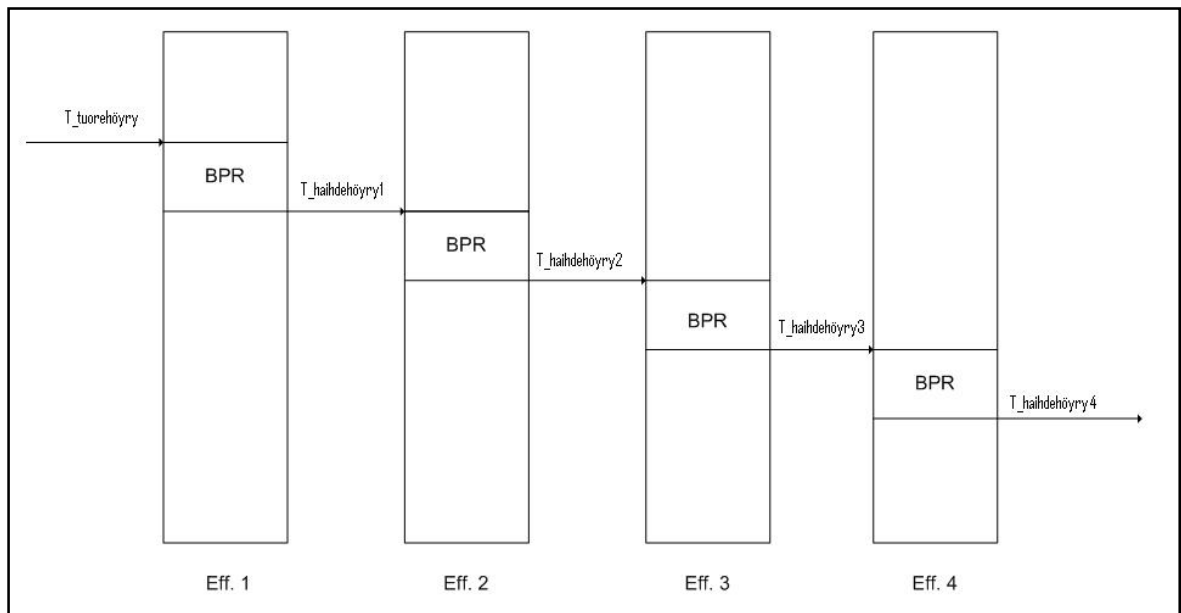


Kuva 8. Sulfaattisellutehtaan kemikaalikierto (Lähdettä mukaillen: Vakkilainen 2007, 5)

2.7.1 Haihduttamo

Keitosta saatavan lipeän kuiva-ainepitoisuus on noin 17 %. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on nostettava yli 65 prosenttiin, jotta sen polttaminen soodakattilassa olisi mahdollista. Jotta lipeän poltosta ei syntyisi rikkipäästöjä, on mustalipeän kuiva-ainepitoisuus kuitenkin nostettava haihduttamolla yli 70 %:iin. Suomalaisilla sellutehtailla mustalipeän kuiva-ainepitoisuus nostetaan haihduttamolla keskimäärin 77–78 % :iin. (Vakkilainen, keskustelu 19.08.2010) Pesusta haihduttamolle tulevaa syöttölipeää vahvistetaan 20 % kuiva-ainepitoisuuteen haihduttimen jälkeisellä vahvistuslipeällä. Haihduttaminen tapahtuu 5–7 sarjaan kytketyssä haihdutinyksikössä. Jotta höyrynkulutus olisi taloudellista, tuorehöyryä käytetään vain viimeisessä vaiheessa vahvamustalipeän haihduttamiseen. Seuraavissa vaiheissa lipeän lämmittämiseen käytetään edellisten vaiheiden lipeän haihdehöyryä. Tällöin lipeä ja höyry virtaavat haihdutinyksiköstä toiseen vastakkaisiin suuntiin. Nestemäisillä seoksilla, jotka sisältävät hajoamattomia orgaanisia

aineita, epäorgaanisia aineita tai molempia, on korkeampi kiehumispiste kuin vedellä. Tätä lipeän ja veden kiehumispisteiden eroa sanotaan kiehumispisteen nousuksi. (Boiling Point Rise; BPR). (Gullichsen, Fogelholm 1999, B38) Kuvassa 9 on esitetty periaattekuva, josta voidaan nähdä lipeän kiehumapisteen nousu, sekä haihdehöyryn lämpötilan muutos haihdutinyksiköistä toiseen mentäessä. Jotta haihtuminen olisi mahdollista, yksikössä vallitseva paine ja lämpötila laskevat aina seuraavaan mentäessä. Paineen laskun aikaansaamiseksi viimeistä haihdutinvaihetta seuraa tyhjäpumppu tai höyryejektori. (Kivistö 2008, 16–20)

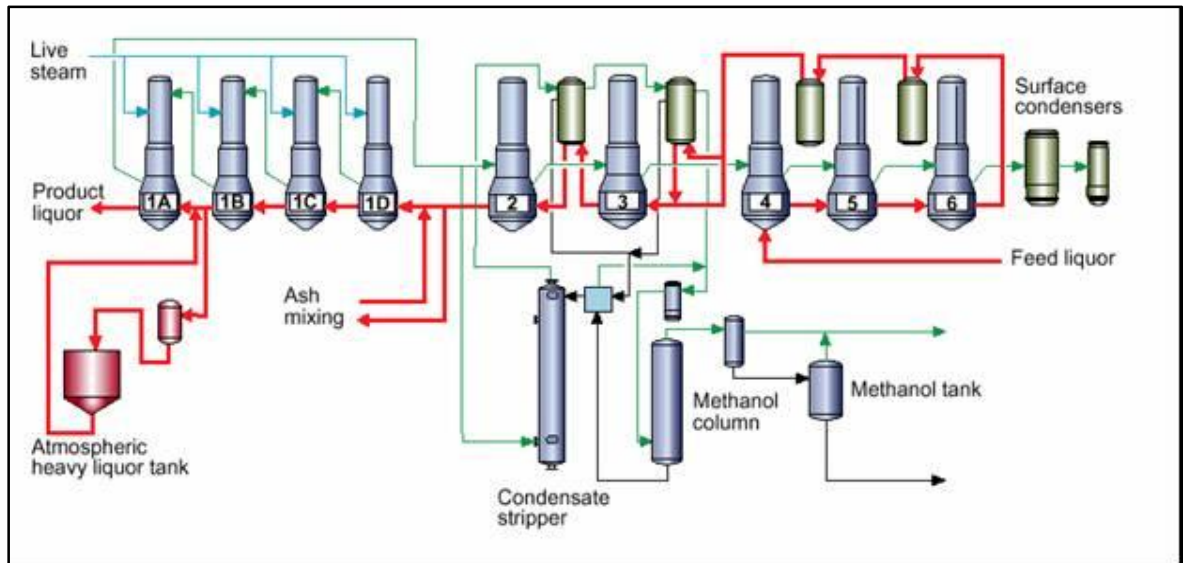


Kuva 9. Höyryjen lämpötilat haihdutinyksiköissä.

Haihdutin yksiköiden lisääminen on mahdollistanut mustalipeän haihduttamisen yli 80 % kuiva-ainepitoisuuteen. Kuiva-ainepitoisuuden noustessa lipeän viskositeetti kuitenkin nousee ja se on varastoitava paineistettuna ja aiempaa korkeammassa lämpötiloissa. Korkeammat lämpötilat voidaan välttää lämpökäsittelyllä, jolloin lipeän viskositeettiä saadaan laskettua. (Kivistö 2008, 16)

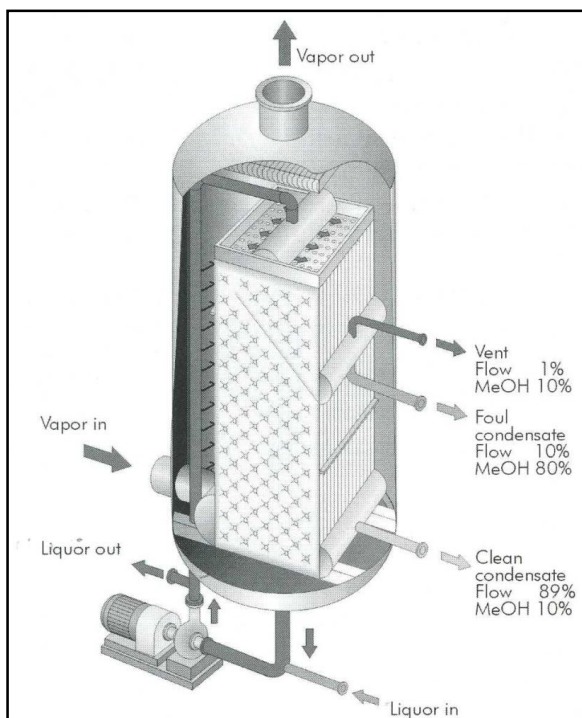
Kuvassa 10 on esitetty monivaihehaihduttamon toimintaperiaate. Lipeää seisotetaan välilipeäsäiliöissä haihdutinvaiheiden välissä, jotta mustalipeän sisältämä suopa ehtisi nousta sen pinnalle. Suopa kaadetaan lipeän pinnalta suopasäiliöön ja jatkojalostetaan esimerkiksi mäntyöljyksi. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A83–91) Kuten kuvasta 10 nähdään, syötetään lipeä keskimmäisiin haihdutinyksiköihin, joista se kulkee alkuun höyryn kanssa saman suuntaisesti haihduttamon viimeisiin yksiköihin. Ensimmäinen

haihdutinvaihe on jaettu useampaan haihdutinyksikköön. Niiden järjestystä voidaan vaihdella, jolloin ne eivät tukkeudu.



Kuva 10. Monivaihehaihduttamon toimintaperiaate. (Vakkilainen 2007, 25)

1980-luvun puoliväliin saakka nousevakalvohaihdutin (Rising film) oli laajamittaisessa käytössä. Nousevakalvohaihduttimessa lipeä pumpataan haihdutinyksikön pohjalle, josta se alkaa nousta haihduttimen putkia pitkin ensin lämmiten ja lopulta kiehuun. Haihduttamiseen käytetty höyry syötetään putkinipun ulkopuolelle. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B46) Myöhemmin on otettu käyttöön, kuvassa 11 esitetyn mukaisia, laskevakalvohaihduttimia (falling-film). Laskevakalvohaihduttimessa lipeä pumpataan haihduttimen yläosaan, josta se valuu lamellien tai putkien pintaa pitkin haihduttimen pohjalle. Lauhtuva höyry virtaa lamellin sisällä, lipeän kiehuessa sen pinnalla. Haihdutinyksiköissä puhtaat ja likaiset lauhdet sekä haihduttamisessa syntyvät metanoli ja haisevat rikkiyhdisteet saadaan erikseen talteen. Edellisten lisäksi käytössä on ollut myös muun muassa pakkokierto-lauhduksia. (Kivistö 2008, 16–20)



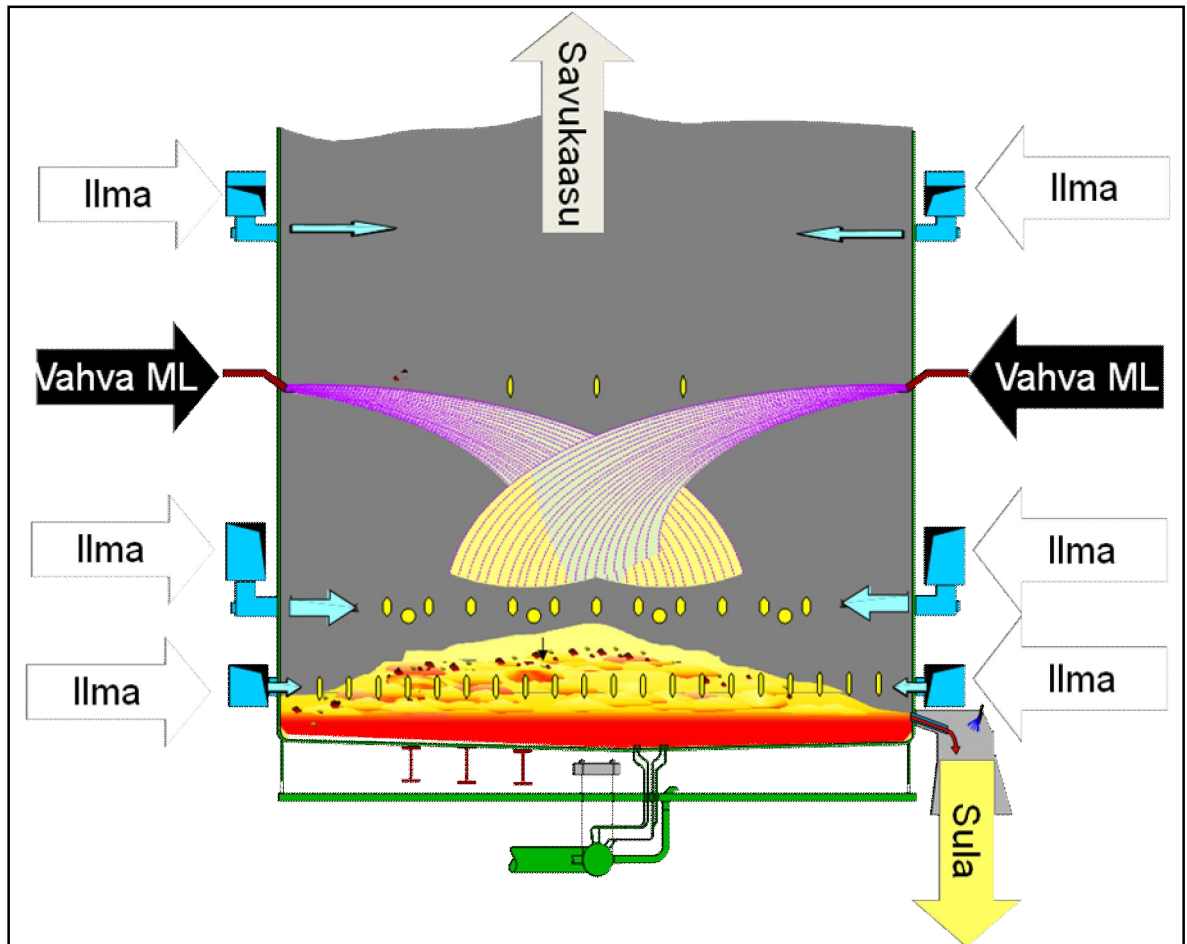
Kuva 11. Lamelli tyyppinen laskevakalvohaihdutin. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B47)

2.7.2 Soodakattila

Soodakattilan tarkoitus on talteenottaa mustalipeän sisältämät keittokemikaalit ja regeneroida ne uudelleen käytettävään muotoon sekä minimoida tehtaan jätevirtoja ympäristöystävällisellä tavalla. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B109–113)

Polttolipeä ruiskutetaan pieninä pisaroina kattilan tulipesään lusikkasuuttimilla. Tulipesässä pisara kuivuu ja haihtuvat aineet palavat. Jäännöshiili ja suurin osa epäorgaanisista aineista putoavat tulipesän pohjalle kekoon, jossa jäännöshiili palaa. Kemikaalit sulavat lämmön vaikutuksesta ja natriumsulfaatti redusoituu natriumsulfidiksi. Parhaissa soodakattiloissa kemikaalien reduktioaste on jopa 99 %. Tulipesän pohjalle syötetään primääri-ilmaa vain sen verran, että keon lämpötila pysyy 1000–1100 °C:ssa. Sekundääri-ilmalla varmistetaan keossa kaasuuntuneiden aineiden palaminen. Kuvassa 12 esitetyssä periaatekuvassa näkyy hyvin tulipesään syötettävän ilman monivaiheisuus. Pääasiassa natriumsulfidista (Na_2S) ja natriumkarbonaatista (Na_2CO_3) koostuva

kemikaalisula johdetaan sularännejä pitkin liuotinsäliöön, jossa siihen sekoitetaan valkolipeää. Tällöin siitä muodostuu viherlipeää. (Huhtinen et al. 2000, 164–166)



Kuva 12. Lipeän polttaminen soodakattilan tulipesässä. (Lähdettä mukaillen: Vakkilainen 2007, 41)

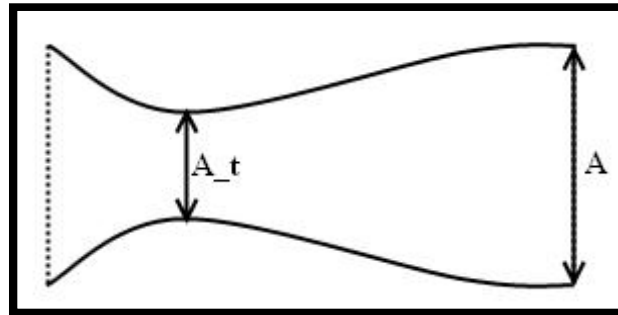
Palamisen ja reduktioreaktion aikana osa lipeän kemikaaleista höyrystyy. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B122) Höyrystyneet kemikaalit ja lentotuhka, josta yli 90 % on natriumsulfaattia, poistuvat tulipesästä savukaasuvirran mukana. Kiinteässä muodossa oleva lentotuhka poistetaan savukaasuista kattilan jälkeisellä sähkösuotimella. Sula tuhka jähmettyy kattilan lämmönsiirtopinnoille muodostaen vaikeasti poistettavia kerrostumia. (Huhtinen et al. 2000, 166) Kerrostumat heikentävät lämmönsiirtimien lämpövirtaa ja aiheuttavat, savukaasujen virtausnopeuden noususta johtuvaa, painehäiviötä savukaasuvirrassa. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B124) Kerrostumien muodostumista

voidaan vähentää alentamalla savukaasujen happipitoisuutta, nostamalla polttolipeän kuiva-ainepitoisuutta sekä mitoittamalla tulipesä riittävän suureksi, jolloin savukaasujen lämpötila tulistin alueella on riittävän alhainen. (Huhtinen et al. 2000, 166)

2.7.3 Nuohoimet

Savukaasukanavia ja putkipintoja on nuohottava jatkuvasti niille kertyvän lian vuoksi. Soodakattilan tulistinpintojen nuohoukseen käytetään korkeapainehöyryllä toimivia ulos vedettäviä höyrynuohoimia. Koska nuohoinputket työnnetään kattilaan vain nuohouksen ajaksi, ja niiden valmistamiseen käytetään kuumankestäviä materiaaleja, voidaan niitä käyttää jopa 1500 °C lämpötilassa tulistimien nuohoukseen. (Huhtinen 2000, 214) Nuohoinputket ovat 4–6 metriä pitkiä ja halkaisijaltaan 7.15–15 cm. Ne liikkuvat tulistin putkiston välissä 1–3 m/min nopeudella. Jotta nuohoaminen tapahtuisi koko lämmönsiirtimen leveydellä, on nuohoimet sijoitettu kattilan vastakkaisille puolille. Nuohoushöyryä ruiskutetaan soonisella nopeudella pyörivien nuohoinputkien päässä olevista suuttimista. Yleensä nuohoinputkessa käytetään kahta 2.5–3.8 cm kokoista suutinreikää. (Teir 2003, 97) Nuohoimessa käytettävä höyry otetaan yleensä reduktioventtiilillä tulistin vaiheiden välisestä putkesta. Jotta höyryn kulutus pysyisi mahdollisimman tasaisena, käytössä on yleensä kokoajan yksi nuohoin. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B124)

Nuohoimen päässä olevat suuttimet ovat suppeneva-laajeneva tyyppisiä Laval-suuttimia. Suuttimen avulla höyry saadaan purkautumaan suuttimesta ylääänin nopeudella. Alisoonisella nopeudella virtaava höyry saadaan kiihtymään äänen nopeuteen paisuttamalla sitä suppenevassa suuttimessa. Kun painesuhde suuttimen yli on riittävän suuri, alkaa kaasu kiihtyä ylisooniseen nopeuteen suuttimen kurkun jälkeen. Kuvassa 13 on esitetty Laval -suuttimen perusmuoto. Suuttimen muodon kannalta ratkaisevimmat mitat ovat suuttimen kurkun (A_t) ja suun (A) pinta-ala.



Kuva 13. Laval -suuttimen perusmuoto.

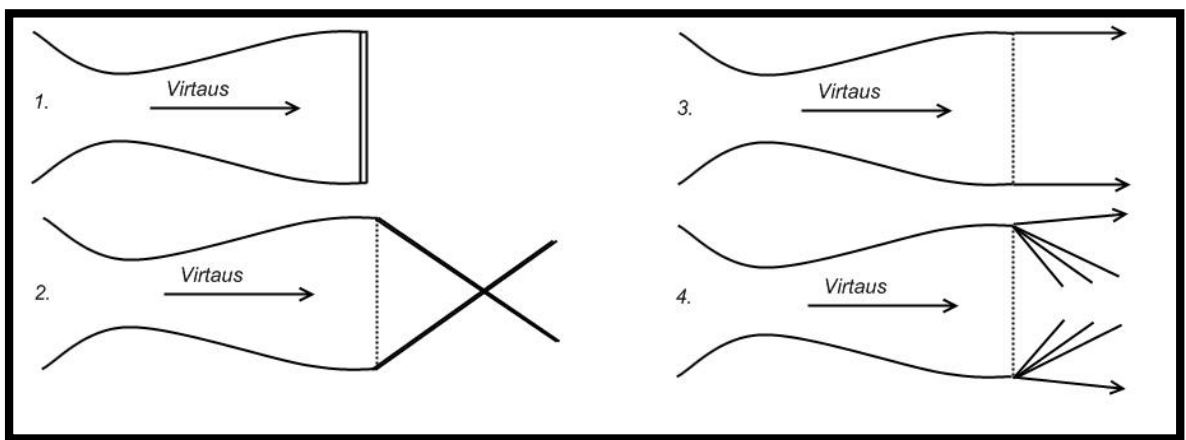
Höyryn nopeuden kannalta ratkaisevaa on suuttimen kurkun ja suun pinta-alojen sekä paineiden suhde. Määritetyn virtausnopeuden (Machin luvun) saavuttamiseksi tarvittava paine-ero voidaan ratkaista seuraavalla yhtälöllä.

$$\frac{p}{p_t} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} * M^2\right)^{\frac{-\gamma}{\gamma-1}} \quad (1)$$

missä	p	paine suuttimen jälkeen [Pa]
	p_t	paine suuttimen kurkussa [Pa]
	γ	[-]
	M	Machin luku [-]

Höyry saavuttaa äänen nopeuden suuttimen kurkussa mikäli painesuhde suuttimen kurkun ja suuttimen jälkeisen tilan välillä on vähintään $\frac{p}{p_t} = 0,546$. Tällöin virtauksella on sooninen nopeus suuttimen kurkussa. Painesuhde ei kuitenkaan ole riittävän suuri, jotta virtaus kehittyisi ylisooniseksi suuttimen laajenevassa osassa. Suuttimen laajenevaan osaan muodostuu kohtisuora tiivistysisku, jossa kaasun paine kasvaa äkillisesti ja virtausnopeus tippuu jälleen alisooniseksi. Kun painesuhdetta edelleen kasvatetaan siirtyy tiivistysaalto lähemmäksi suuttimen päätä ja lopulta sen ”yli”. Kuvassa 14 on esitetty tiivistys- ja paisunta-aaltojen muodostuminen suuttimessa. Ensimmäisessä kohdassa on kuvattu tapaus, jossa kohtisuora tiivistysaalto muodostuu aivan suuttimen päähän. Kun painesuhdetta kasvatetaan edelleen, syntyy suuttimen päässä vinoja tiivistysaaltoja (kuvan 14 kohta 2).

Painesuhdetta edelleen kasvatettaessa löydetään kuvan kolmannen kohdan mukainen tila, jossa kaasu virtaa suuttimesta puhtaasti ilman tiivistysaaltoja. Mikäli painesuhdetta edelleen kasvatetaan, muodostuu suuttimen päähän vinoja paisunta-aaltoja. Tapauksen mukainen ”alipaisuminen” on kuvattu kuvan neljännessä kohdassa. Kaasu voi saavuttaa suuttimen kurkussa maksimissaan äänennopeuden. Tämän vuoksi suutin ”tukkeutuu” painesuhteen ylittäessä kriittisen arvon, eikä virtauksen massavirta enää kasva. (Backman et al. 2006, 38–43)

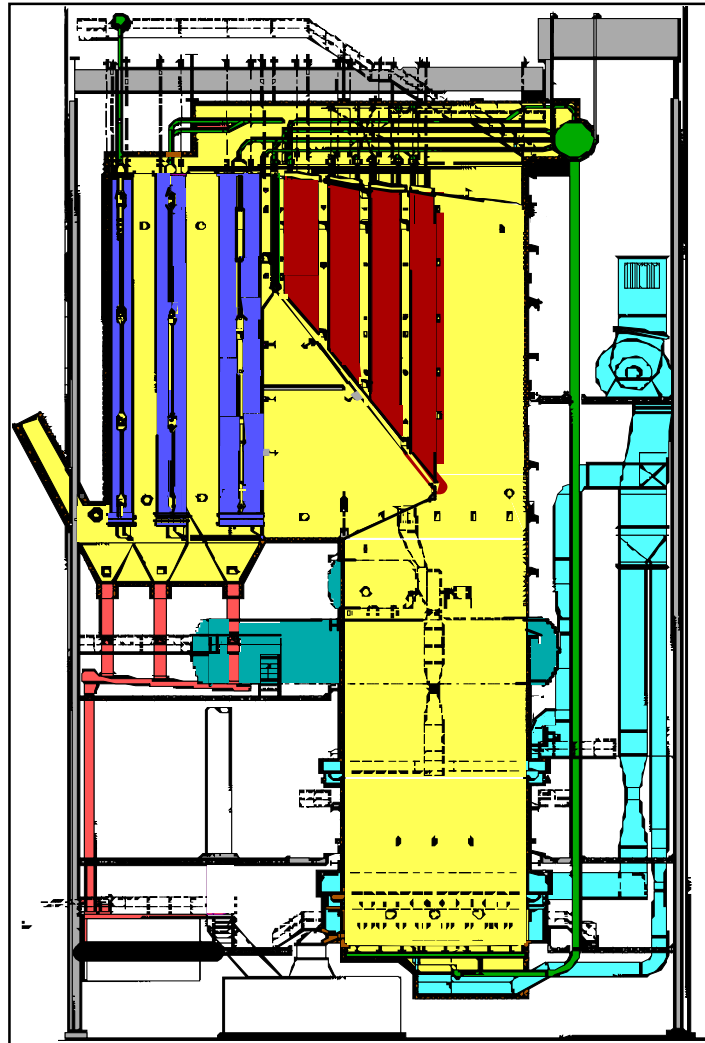


Kuva 14. Tiivistys- ja paisunta-aaltojen muodostuminen Laval-suuttimessa.

2.7.4 Kattilan vesi-höyrykierto

Monissa teollisuuden höyrykattiloissa käytetään jokseenkin samanlaista vesi-höyrykiertoa polttoaineesta riippumatta. Kattilan syöttövesisäiliöstä pumpattavaa vettä esilämmitetään savukaasuilla ekonomaiserissa. Ekonomaiserista vesi pumpataan lieriöön, josta se virtaa kattilan alaosaan tulipesän seinät muodostaviin höyrystin putkiin. Kuvassa 15 esitetyssä soodakattilan periaatepiirroksessa lieriö ja laskuputki on kuvattu vihreällä. Luonnonkiertokattiloissa vesi virtaa lieriöstä höyrystinputkiin höyryn ja veden tiheyseron vuoksi. Kun kattilan paine ylittää kriittisen pisteen (221 bar) luonnonkierto ei ole enää mahdollinen, koska lieriön laskuputken ja höyrystinputkien välinen tiheysero on liian pieni. Tällöin joudutaan käyttämään pakkokiertokattilaa, jossa vesi pumpataan lieriöstä höyrystinputkiin pakkokiertopumpun avulla. Putkissa muodostunut höyry virtaa takaisin

lieriöön, jossa höyry ja vesi erotetaan toisistaan. Lieriöstä erotettu höyry tulistetaan kattilan tulistimissa ja johdetaan turbiinille. Kuvassa 15 tulistimia on kuvattu punaisella. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B255–264)



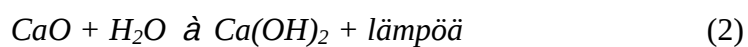
Kuva 15. Soodakattilan periaatepiirros. (Vakkilainen 2007, 53)

2.7.5 Kaustisointi

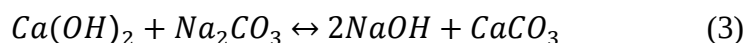
Kaustisointilaitos mahdollistaa sellutehtaan jatkuvan toiminnan ilman suurta kemikaalien korvaustarvetta. Kaustisoinnin päätehtävä on tuottaa riittävästi valkolipeää keiton

tarpeisiin. Kaustisoinnin yhteydessä toimivalla meesauunilla meesasta voidaan valmistaa kaustisoinnissa tarvittavaa poltettua kalkkia.

Kaustisoinnin ensimmäisessä vaiheessa soodakattilalta tulevaa viherlipeä selkeytetään ja siitä poistetaan sakkaa. Meesauunilta saatava poltetu kalkki sammutetaan viherlipeään sammuttimessa. Tällöin viherlipeän vesi reagoi kalkin kanssa. Reaktiossa syntyy kalsiumhydroksidia (Ca(OH)_2) sekä lämpöä. Viherlipeän lämpötila nousee reaktion vaikutuksesta 14–17 °C. Sammutusreaktio on esitetty seuraavassa yhtälössä.



Syntynyt kalsiumhydroksidi reagoi edelleen viherlipeän natriumkarbonaatin (Na_2CO_3) kanssa muodostaen natriumhydroksidia (NaOH) sekä kalsiumkarbonaattia (CaCO_3). Reaktio päättyy tasapainotilaan. Reaktio tapahtuu kiinteiden ja liuenneiden aineiden välillä, jonka vuoksi se on hidas. Kalkkimaitoa pidetään sekoitussäiliössä 2–2.5 tuntia, jotta reaktio ehtii päätyä tasapainotilaan. Seuraavassa yhtälössä on esitetty kaustisointireaktio.



Kaustisoinnista tuleva valkolipeä sisältää kaikki keitossa tarvittavat kemikaalit. Reaktiossa syntynyt meesa (CaCO_3) erotetaan valkolipeästä. Meesaa pestään toisiolauhteilla tai vedellä. Pesusta saatavaa suodosta (heikkovalkolipeää) sekoitetaan soodakattilalta saatavaan sulaan viherlipeän muodostamiseksi. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B135–142)

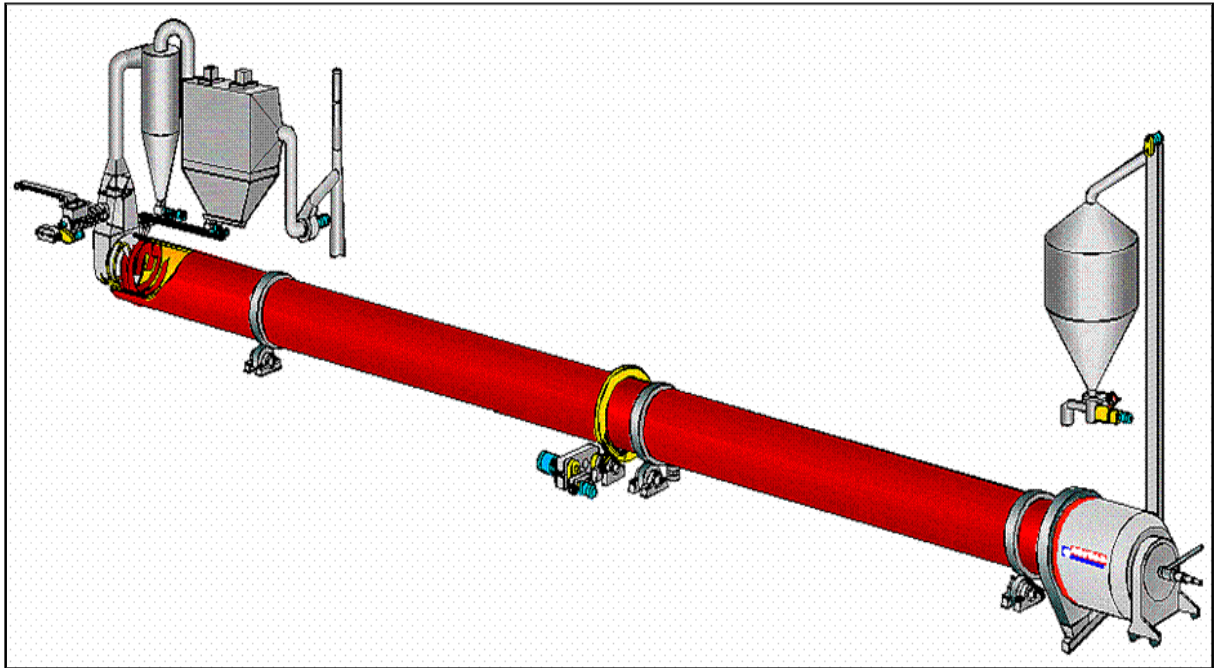
2.7.6 Meesauuni

Pesty meesa kuivataan ja siitä valmistetaan kalkkia meesauunissa. Meesaa kuivataan meesasuoitimella ja mahdollisella syklonilla, jonka jälkeen se syötetään uuniin noin 80 % kuiva-ainepitoisuudessa. (Kiiskilä, Mattelmäki 1992, 16) Uunissa meesa kuivuu, lämpenee, kalsinoituu ja lopuksi siitä sintrautuu palloja. Kalkin lisäksi reaktiossa syntyy hiilidioksidia (CO₂). Tämän vuoksi meesauunin CO₂-päästöt voivat olla jopa 80 % modernin sellutehtaan CO₂-kokonaispäästöistä. (Vakkilainen 2008, 7) Kalsiumkarbonaatista eli meesasta muodostuu lämmön vaikutuksesta kalkkia seuraavan reaktion mukaisesti:



Kalkkia poistetaan jonkin verran kierrosta ja korvataan ostokalkilla, jotta prosessiin kuulumattomat NPE (Non Process Elements) -aineet, kuten pii (Si) ja magnesium (Mg) saataisiin poistettua. Kalkkia on myös vaihdettava, jotta sen reaktioteho ei laske. Kalkkia voidaan polttaa noin 300–600 kertaa ennen kuin sen reaktiivisuus alkaa heiketä. (Vakkilainen, keskustelu 19.08.2010)

Meesauunina käytetään pyörivää kiertouunia. Meesa syötetään pulverimaissa muodossa pyörivään rumpuun. Rummun materiaalina käytetään keraamista tiiltä, sekä metallivaippaa. Jotta meesa saadaan valumaan uunin päässä olevaa poltinta kohti, on rummun oltava hieman kallellaan. Valmis kalkki valuu uunin poltinpäässä olevan hartian yli kalkin jäähdystimeen, jossa sen sisältämää lämpöä siirretään palamisilmaan. Meesauunin polttoaineena käytetään yleensä maakaasua tai polttoöljyä. Kuvassa 16 on esitetty yleiskuvaus meesauunista.



Kuva 16. Meesauunin yleiskuva. (Vakkilainen 2007, 90)

2.8 Kuorikattila

Puunkäsittelyssä syntyvä puun kuorijäte voidaan hyödyntää tehtaan höyryntuotannossa. 1970-luvulle asti kuori poltettiin arinakattiloissa, mutta myöhemmin leijupetikattilat ovat korvanneet ne. Huonon ja epätasalaatuisen polttoaineen polttaminen on mahdollistunut tehokkaasti leijupetikattiloiden kehittymisen myötä.

Kuori kuljetetaan mekaanisesti polttoainesiilosta pudotusputkille, joista ne putoavat tasaisesti pedin päälle. Kattilan tulipesässä olevaa hiekkapetiä leijutetaan primääri-ilmalla. Kuplapetikattilassa hiekan leijutusnopeus on niin alhainen, että perimateriaali pysyy tulipesässä muodostaen veden kiehumista muistuttavan kuplivan pedin. Kiertoleijupetikattilassa leijutusnopeus on niin nopea, että petimateriaalia tempautuu ilman mukana tulipesästä. Petimateriaali erotetaan kaasusta syklonissa ja palautetaan tulipesään. Polttoaineen ja petimateriaalin kiertoa tulipesässä ja syklonissa on kuvattu kuvassa 17 esitetyssä kiertoleijupetikattilan poikkileikkauskuvassa. Polttoaine voidaan syöttää kattilaan myös tulipesään palaavan hiekan mukana. (Kivistö 2010, 8) Polttoaineen palaminen tapahtuu tulipesässä petimateriaalin joukkossa. Pedin suuren lämpökapasiteetin

2.9 Höryturbiini

Höryturbiinissa höyryn lämpö- ja paine-energia muutetaan turbiinin akselilla pyöriväksi mekaaniseksi energiaksi. Höryturbiinityypit jaetaan aksiaali- ja radiaaliturbiineihin. Nimensä mukaisesti höyry virtaa aksiaaliturbiinissa akselin suuntaisesti ja radiaaliturbiinissa akselin säteen suuntainen. (Huhtinen et al. 2008, 109) Turbiini koostuu akselin mukana pyörivästä roottoriosasta ja kiinteästä staattoriosasta. Turbiinin pyörivä mekaaninen energia muutetaan sähköenergiaksi samalle akselille kytketyn generaattorin avulla. Valmistettavien turbiinien tehot vaihtelevat 0,5–600 000 kW. (Huhtinen et al. 2008, 109)

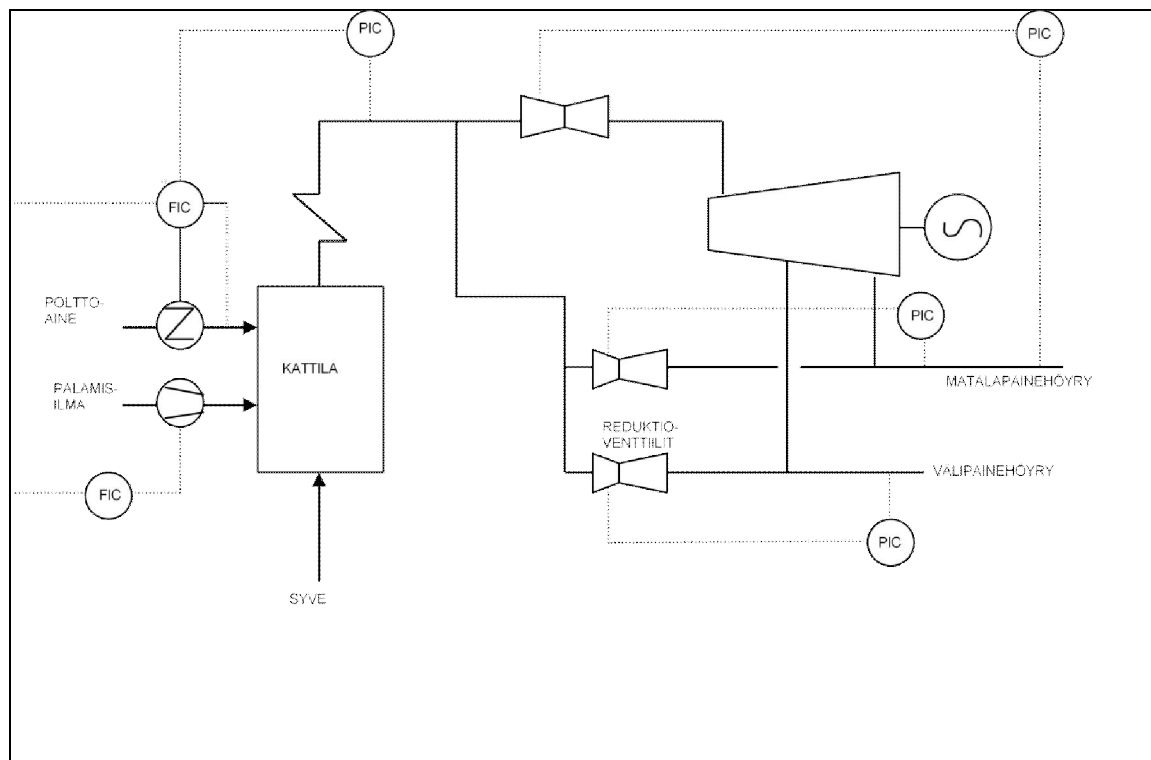
Sellutehtaiden tarvitsema energia tuotetaan vastapainevoimalaitoksissa lämmön ja sähkön yhteistuotantona. Tehtaalla käytetään yleensä vastapaineturbiinia, jossa kattilan tuorehöyry paisutetaan tehtaan matalapainetasoon. Tehtaalla tarvittavat väli- ja korkeapainehöyry saadaan turbiinin välitoista. (Huhtinen et al. 2008, 63–75) Tehtaan prosesseilta yli jäävä höyry voidaan paisuttaa loppuun turbiinin jälkeisessä lauhdeperässä tai hyödyntää lämmöntuotantoon kaukolämpöperässä.

Laitoksen rakennusaste kuvaa sähkön tuotannon suhdetta prosessilämmön kulutukseen. Metsäteollisuudessa käytettävien vastapainevoimalaitosten rakennusasteet ovat verrattain alhaisia 0,15–0,5. (Kivistö 2010, 9)

2.10 Höyryn paineen säätö

Sellutehtailla käytettävissä vastapainehöyryä tuottavissa CHP -laitoksissa (Combined Heat and Power) höyryn paineen ja sähkötehon säätöön käytetään kiinteää paineen säätöä. Kiinteässä paineen säädössä tuorehöyryn paine pyritään pitämään vakiona säätämällä kattilan polttoaine- ja palamisilmavirtaa. Sellutehtaalla höyrynpaineiden on pysyttävä vakioina, kulutuskohteiden määräämällä tasolla, jolloin sähkötehoa ei säädetä lainkaan. Vastapaineen säätö tapahtuu ensisijaisesti turbiinin säätöventtiilin avulla matala- ja välipainehöyrylinjojen paineiden perusteella. Säätötapa reagoi nopeasti höyryn paineen muutoksiin. Tuorehöyrynpaineen säätäminen polttoainevirtaa säätämällä on huomattavasti

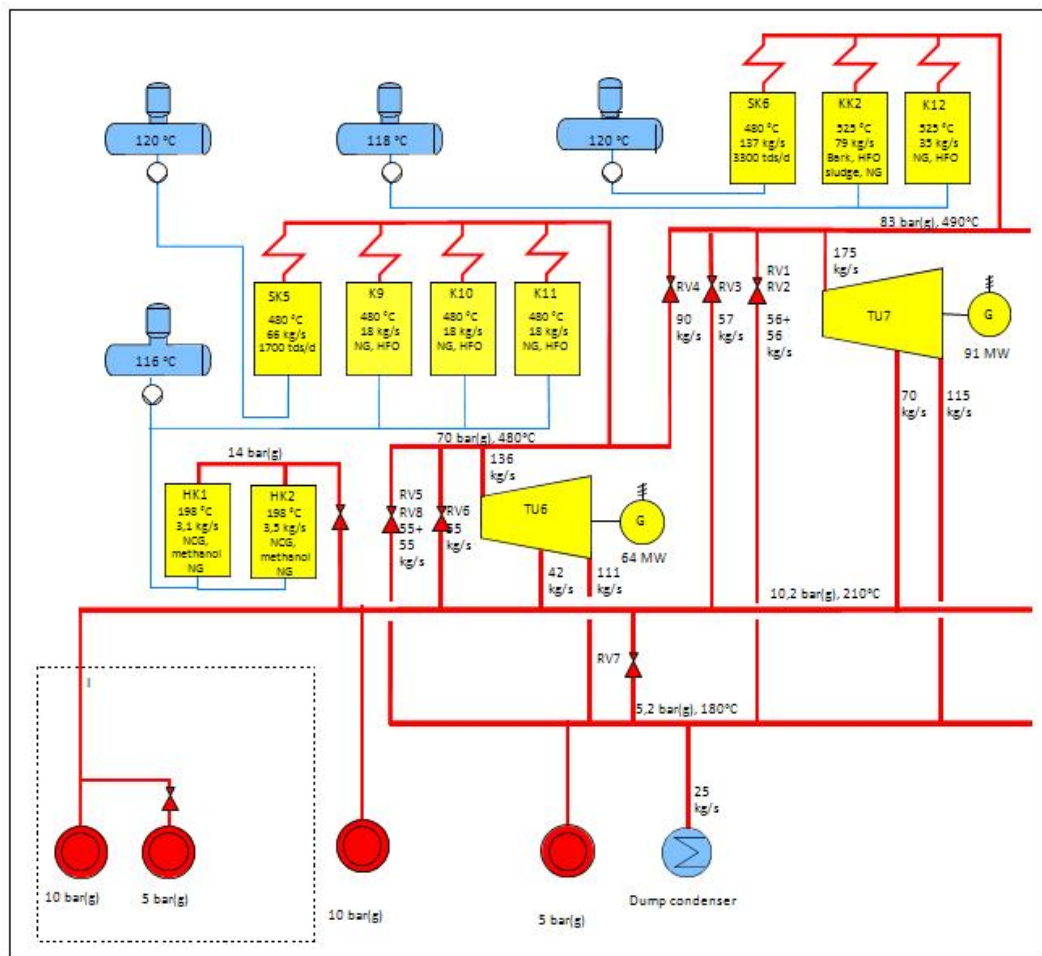
hitaampaa. Polttoainevirran säätäminen vaikuttaa myös syötettävän palamisilman määrään. Mikäli turbiinia ei käytetä, voidaan matala- ja välipainehöyry ottaa reduktioventtiilin kautta suoraan tuorehöyryputkesta. Kuvassa 18 on esitetty höyrynpaineen säätöön käytettävien höyrynpaineen, sekä palamisilman ja polttoaineen virtausmittareiden käyttöperiaate. Kuvan periaatekytkennän mukaan prosessihöyryn painetta säädetään turbiinin säätöventtiilillä. Lisäksi palamisilma- ja polttoainesäätimet seuraavat tuorehöyryn painemittaria. Käytännön toteutus voi kuitenkin olla huomattavasti monimutkaisempi. (Huhtinen et al. 2008, 154–158)



Kuva 18. CHP-laitoksen höyrynpaineen säätö.

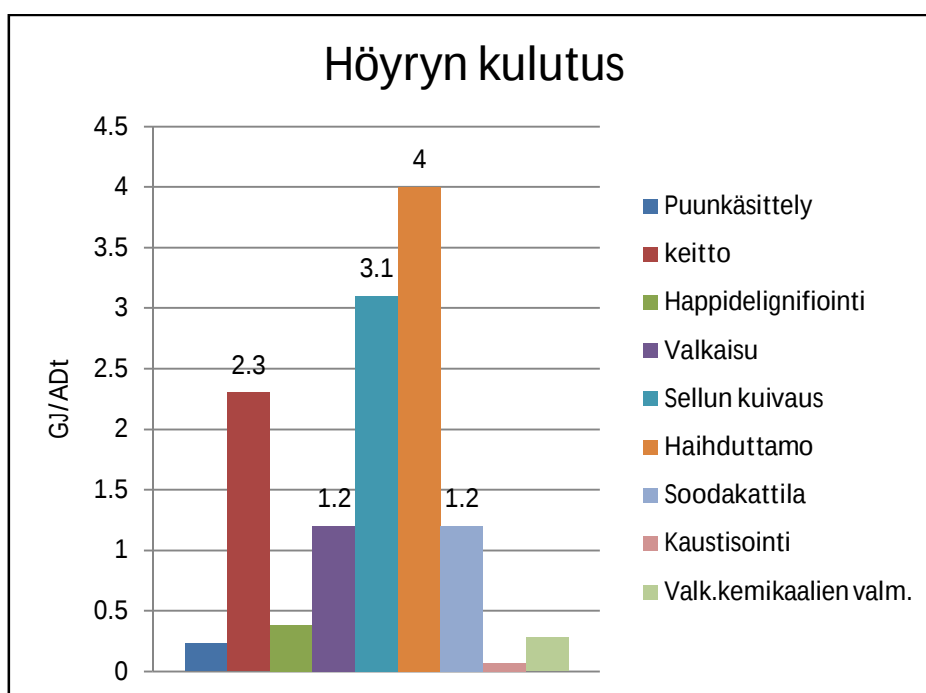
3 HÖYRYN KULUTTAJAT

Sellutehtaat kuluttavat lämpöenergiaa pääasiassa korkea-, väli-, ja matalapainehöyrynä sekä lämpimänä vetenä. Höyryä käytetään prosessien lämmittämiseen ja paineistamiseen. Nykyaikaisen sellutehtaan lämmönkulutus on noin 12–15 GJ/ADt. (Kivistö 2010, 1–3) Joissakin tapauksissa höyryn tuotantoon osallistuu useampi kattila ja höyryturbiini, jolloin käytössä voi olla useampia tuorehöyryn painetasoja. Kuvassa 19 on esitetty yleiskuva sellutehtaan höyryverkosta. Sooda- ja kuorikattilan lisäksi höyryntuotantoon voi osallistua esimerkiksi maakaasu- tai raskas polttoöljykäyttöisiä apukattiloita ja hajukaasukattila. Kuvasta voidaan todeta sellutehtaan monipuoliset höyryntuottomahdollisuudet sekä kyky reagoida höyryverkon kuormituksen vaihteluihin ja laitteiden vikaantumisiin tehokkaasti.



Kuva 19. Sellutehtaan höyryverkko.

Tehtaat kuluttavat korkeapainehöyryä vain kattilan nuohoimilla ja turbiinilla. Kuvassa 20 on esitetty Markus Niemisen diplomityössä (2007, 86) esitettyjen sellutehtaiden höyryn kulutusten keskiarvot. Sellutehtaan suurimpia höyryn kuluttajia ovat haihduttamo, sellun kuivaus, keitto, valkaisu, sekä soodakattila. Integroidulla sellu- ja paperitehtaalla paperikone on tehtaan merkittävin höyrynkuluttaja. Lämmönkulutuksesta 75–80 % tapahtuu matalapainehöyrynä ja noin 20–25 % välipainehöyrynä. (Kivistö 2010, 2) Seuraavissa kappaleissa on esitelty sellutehtaan suurimpien lämmönkuluttajien höyrynkulutuksia.



Kuva 20. Sellutehtaan höyrynkulutuksen keskiarvot.

3.1 Haihduttamo

Sellutehtaan suurin höyryn kuluttaja on haihduttamo. Haihduttamo käyttää pääasiassa matalapainehöyryä, sekä jonkin verran välipainehöyryä. Haihduttamo on usein suurin este matalapainetason paineen alentamiselle. Painetason laskeminen pienentäisi haihduttamon kapasiteettia ja siten kattilan höyryn tuotantoa. Tämän vuoksi haihduttamon kapasiteetilla määrittää osaltaan myös uusien tehtaiden vastapainetason. Haihduttamon höyryn kulutukseen vaikuttavat tulevan pesulipeän kuiva-ainepitoisuus ja lämpötila, haihduttamon

vaiheiden lukumäärä sekä erityisesti lähtevän polttolipeän kuiva-ainepitoisuus. Lämmön tarvetta voidaan pienentää lisäämällä haihdutinvaiheiden lukumäärää. (Nieminen 2007, 56) Keskimäärin 7 -vaiheisen haihduttamon lämmön ominaiskulutus on 380–570 MJ/t_{H₂O}. Lämmön kulutuksesta noin 75 % on matalapainehöyryä ja 25 % välipainehöyryä. (Kivistö 2008, 20) Uusissa haihduttamoissa mustalipeä haihdutetaan yli 80 % kuiva-ainepitoisuuteen. Kuiva-ainepitoisuuden nosto yli 80 % vaatii välipainehöyryn käyttöä. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B308)

3.2 Sellun kuivuri

Sellun kuivuri on sellutehtaan toiseksi suurin höyryn kuluttaja. Kuivauksen lämmönkulutus on noin 2,0–2,7 GJ/ADt matalapaineista höyryä. (Kivistö 2008, 15) Kuivauksen puristinvaiheen tehokkuudella on merkittävä vaikutus kuivauksen lämmön kulutukseen. Viira- ja puristinosan kehittyminen ovat pienentäneet kuivurin lämmöntarvetta. Nykyaikaisissa kuivureissa puristinsosan jälkeinen sellun kuiva-ainepitoisuus voi olla jopa 52 %. Myös lämmöntalteenoton ja huuvan jälkeisellä kuivausilman lämpötilalla on merkittävä vaikutus kuivurin lämmön kulutukseen. Puristusvaiheen tehostamisen lisäksi höyrynkulutusta voidaan pienentää tehostamalla lämmöntalteenottoa ja toisiolauhteen hyödyntämistä. Kuivurilta poistuvaa kosteaa ilmaa voidaan käyttää myös kuivausilman lämmittämiseen. (Nieminen 2007, 54, 76)

3.3 Keitin

Sellutehtaan suurin välipainehöyryn kuluttaja on sellunkeitin. Tämän vuoksi sen lämmönkulutuksella on suuri vaikutus tehtaan sähköntuotantoon. Keittimen höyryn tarve on 1,7–2,4 GJ/ADt riippuen käytettävästä puulajikkeesta. Keittimen lämmönkulutus riippuu paljon valko- ja mustalipeälämmönsiirtimien kapasiteetista. Keittovaiheen lämmönkulutukseen vaikuttavat muun muassa keitossa käytettävän lipeän ominaisuudet sekä keitto-olosuhteet. Keiton lämpötila ja keittoaika valitaan sellun raaka-aineena käytettävän puulajin mukaan ja siksi sillä on myös merkittävä vaikutus vaiheen höyryn

kulutukseen. Myös puun kosteus, lämpötila ja laatu vaikuttavat keitto-ominaisuuksiin. Keittoon vaikuttavien ominaisuuksien vaihtelu lisää höyrynkulutusta. Lämmönsiirtimien tyypillä ei ole niinkään suurta vaikutusta höyrynkulutuksen määrään. (Nieminen 2007, 45–47) Modifioidun eräkeiton kehittyminen on mahdollistanut sellun keittämisen eräkeittoprosessilla vuokeittoa alhaisemmassa lämpötilassa. Vuokeittimen keittolämpötila on noin 150–170 °C. Keittolämpötila ei kuitenkaan saisi nousta pysyvästi yli 165 °C:n. Korkeampi keittolämpötila johtaa epäyhdenmukaisemman sellun valmistukseen. Keittolämpötila riippuu puulajikkeesta, keittoajasta ja keittimen tyypistä. Eukalyptuksen keittolämpötila on noin 140–150 °C ja kovien sekä pehmeiden puulajikkeiden korkeampi, noin 150–170 °C. Taulukossa 1 on esitetty syrjäytys- ja eräkeitTIMIEN lämmöntarve koivu- ja mäntysellulle.

Taulukko 1. Keiton lämmön kulutus mänty- ja koivusellulle. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B306)

		Syrjäytyseräkeitto	Vuokeitto
Mäntysellu	Välipainehöyry	1,6-1,9 GJ/ADt	1,7- 2,0 GJ/ADt
	Matalapainehöyry	0,3-0,5 GJ/ADt	0,2-0,4 GJ/ADt
Koivusellu	Välipainehöyry	1,4-1,6 GJ/ADt	1,5-1,7 GJ/ADt
	Matalapainehöyry	0,3-0,4 GJ/ADt	0,2-0,4 GJ/ADt

Moderneissa keittimissä keittoajat ovat pidempiä ja siksi myös keittolämpötilat ovat alhaisempia. (Nieminen 2007, 68) Lipeän lämmitys keittolämpötilaan tapahtuu eräkeitossa suoralla höyrylämmityksellä ja vuokeitossa epäsuorasti. Käytettäessä suoraa höyrylämmitystä höyryn lauhteita ei saada talteen. Keitossa kiertävää mustalipeää lämmitetään välipainehöyryllä. Höyryn kulutus on kuitenkin minimaalista, koska tarvittava lämpötilan nousu keittolämpötilaan on yleensä vain 10–15 °C. Vuokeitto on eräkeittoa energiatehokkaampi prosessi. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A493–541) Keittimen pesuvaihe kuluttaa pääasiassa sähköä. Pesuvaiheen sähkönkulutus on noin 20–30 kWh/ADt.

3.4 Valkaisu

Keiton jälkeinen sellun valkaisu kuluttaa sekä matala- että välipainehöyryä. Höyryä käytetään sellun lämmitykseen valkaisuvaiheissa. ECF-valkaisun lämmönkulutus on noin 0,4–0,6 GJ/ADt matalapainehöyryä, sekä noin 0–0,1 GJ/ADt välipainehöyryä. (Nieminen 2007, 51) Kulutukseen vaikuttavat valkaisuvaiheiden lukumäärä, lämpötila sekä vaiheiden väliset lämpötilaerot. Lämpötilojen nousu sekä vaiheiden välisten lämpötilaerojen kasvu valkaisuprosessissa on lisännyt valkaisuvaiheen energian kulutusta. (Kivistö 2008, 11) Lisäksi muun muassa happivalkaisu ja peroksidivaiheen käyttö lisäävät höyrynkulutusta. Mikäli valkaisussa on paineellisia vaiheita, siinä käytetään välipainehöyryä. Höyrynkulutusta voidaan vähentää muun muassa sekundäärilämpöjen hyödyntämisellä. (Nieminen 2007, 51) Happidelignifioinnin lämmönkulutus on noin 0,3–0,5 GJ/ADt matalapainehöyryä ja 0,1–0,2 GJ/ADt välipainehöyryä. (Nieminen 2007, 49)

3.5 Soodakattila

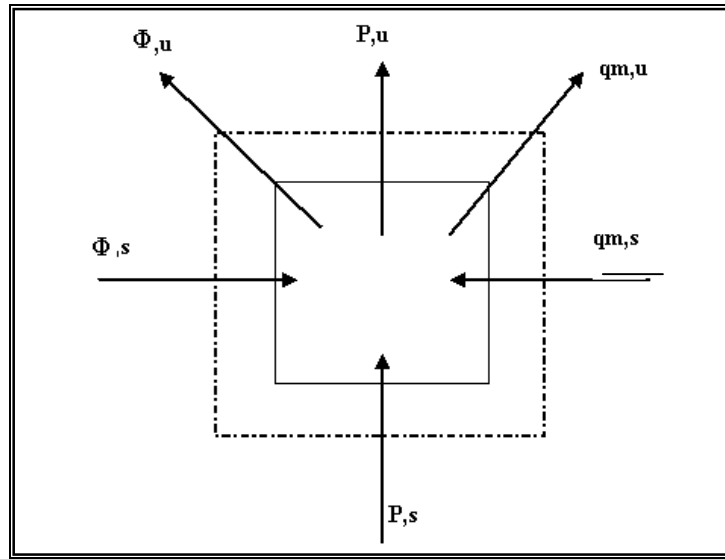
Soodakattila kuluttaa höyryä nuohoimissa, palamisilman ja syöttöveden höyryesilämmittimissä sekä lipeän esilämmitykseen. (Kivistö 2008, 24) Pieni määrä höyryä käytetään myös sulan hajottamiseen. Palamisilma lämmitetään ensin matalapainehöyryllä 110–120 °C:een ja välipainehöyryllä lopulliseen 150 °C:een. Kattilan nuohoimet käyttävät noin 2,5–4 % kattilan tuottamasta tuorehöyrystä. (Nieminen 2007, 58) Nykyaikaisissa soodakattiloissa palamisilman esilämmitykseen voidaan käyttää jopa 4 eri höyrynpainetasoa. (Vakkilainen, keskustelu 19.08.2010) Kattilan nuohoushöyry otetaan vanhemmissa kattiloissa korkeapainehöyrynä tulistinvaiheiden välisestä putkesta reduktioventtiilin kautta, mutta uudemmissa kattiloissa käytetään turbiinin väliotosta saatavaa matalampi paineista höyryä. (Vakkilainen, keskustelu 14.07.2010) Soodakattilan lämmönkulutus riippuu sen koosta ja tyypistä. Modernin soodakattilan lämmönkulutus on noin 0,9–1,6 GJ/ADt. (Nieminen 2007, 59)

4 LASKENTA

Seuraavissa kappaleissa on esitetty työssä tehtyjen laskentojen teoria. Kappaleessa on pyritty kuvaamaan työssä käytetyt laskentatavat ja menetelmät. Työn energiataselaskelmat toteutettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston tekemällä Millflow v. 1.15-laskentasovelluksella. Taseiden laskentaan ei ollut käytettävissä mittaustuloksia, joten laskennan lähtöarvoiksi valittiin kokemukseräiset tyypilliseen suomalaiseen sellutehtaaseen sopivat arvot. Mittaustulosten puuttuminen vaikuttaa merkittävästi muun muassa häviöenergiavirtojen arvioimiseen. Muodostetut energiataseet ovat yleislaskelmia, joiden soveltaminen käytäntöön vaatii mittausten ja tarkempien laskelmien tekemistä. Taseiden avulla määritettiin tehdastyyppien höyryn painetasojen mukaiset vuotuiset energiankulutukset, energiantuotto ja painetasojen muutosten investointiarviot. Investointiarviot muodostettiin putkiston, haihduttamon ja kuivauskoneen osalta. Vuotuisten sähkön myyntitulojen ja investointiarvioiden avulla tehdastyypeille määritettiin optimaaliset matalapainehöyryn painetasot.

4.1 Taselaskenta

Taselaskennalla pyritään selvittämään energiavirtojen suuruudet tarkasteltavien rajapintojen yli. Taselaskelmien avulla voidaan selvittää tunnuslukuja prosessin hyötysuhteeseen ja kulutukseen liittyen. Prosessien energiatehokkuutta ja energian kulutusta voidaan tehostaa vertailemalla taselaskennasta saatuja tunnuslukuja aiemmin saatuihin tuloksiin sekä muiden yksiköiden vastaaviin lukuihin. (Auvinen 2004, 10) Taseesta pyritään muodostamaan mahdollisimman täydellinen tarkan kokonaiskuvan saamiseksi. Koska kaikkia vuotoja, häviöitä ja energiavirtojen määriä ei voida koskaan määrittää täydellisesti, muodostettu energiatase ei vastaa täysin todellisuutta. Tämän vuoksi taselaskennan arvoina käytetään usein arvioita ja tyypillisiä kokemukseräisiä arvoja. Taseiden laskennassa tulee huomioida kaikki taserajan ylittävät massa- ja energiavirrat. Kuvassa 21 on esitetty peruskuvaa taseelle, jossa taserajan ylittää lämpö- ja sähkötehoa sekä ainemassavirta.



Kuva 21. Energia- ja massatase

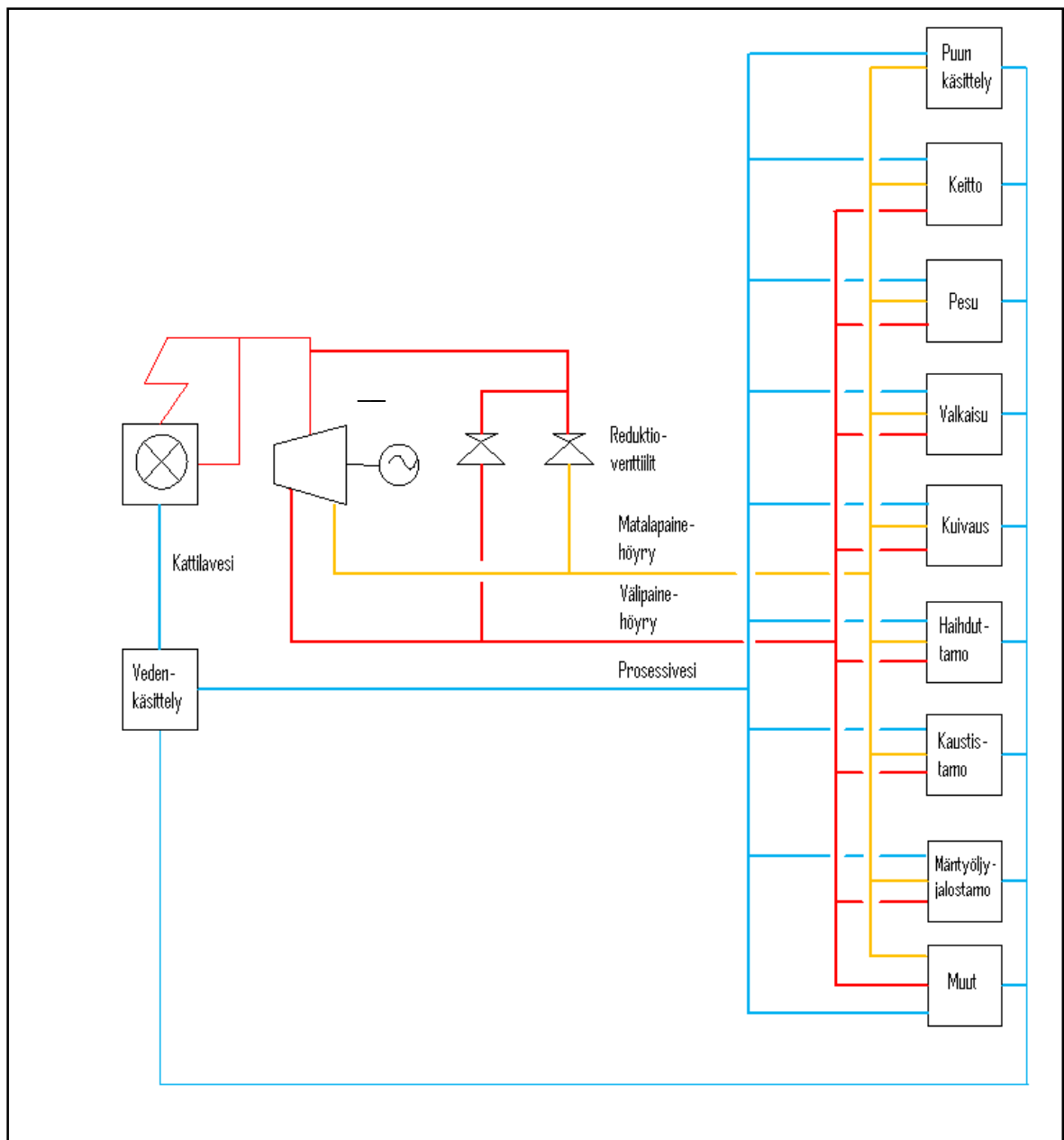
Koska taseeseen ei varastoidu energiaa eikä massaa, tulevien ja lähtevien virtojen summat ovat yhtä suuret. Tällöin taseen energiayhtälöksi voidaan kirjoittaa:

$$\sum_{i=1}^n \Phi + \sum_{i=1}^n P + \sum_{i=1}^n q_{m,i} * (h_{t,i}(T) + h_{m,i}) = 0 \quad (5)$$

missä	Φ	taserajan ylittävä lämpövirta [W]
	P	taserajan ylittävä sähköteho [W]
	q_m	taserajan ylittävä massavirta [kg/s]
	h_t	tuntuva entalpia [kJ/kg]
	h_m	muodostumisentalpia [kJ/kg]

Taserajan ylittävä lämpöenergia on sellun tuotantoprosesseissa pääasiassa höyryä ja lämmintä vettä. Näiden lisäksi prosesseissa tarvitaan sähköenergiaa. Kuvassa 22 on esitetty periaatteellinen kuva höyryn ja veden kierrosta tuotantoprosesseissa. Sellutehtaalla taseiden rajoina voidaan käyttää kutakin valmistusvaihetta tai prosessia. Lisäksi tehdas jaetaan alueisiin ainevirtojen mukaan. Prosessien ainevirrat koostuvat muun muassa höyry-, vesi-, lauhde-, kuitu- ja kemikaalivirroista. Kuitulinja koostuu valmistusvaiheista,

joissa raakapuusta saatavasta kuidusta valmistetaan sellua. Kemikaalikierto koostuu keittokemikaalien regenerointiin ja valmistukseen tarvittavista prosesseista. Kemikaalikierron osana toimiva kalkkikierto mahdollistaa valkolipeän jatkuvan valmistuksen. Sulfaattisellutehtaan prosesseista ja ainevirroista on esitetty peruskuvaus aiemmin kuvassa 4.



Kuva 22. Höyryn ja veden kierto sellutehtaalla.

4.2 Putkiston halkaisijan määrittäminen

Höyryn paineen valinnalla on merkittävä vaikutus sellutehtaan investointeihin. Varsinkin matalapainetasoa alennettaessa höyryn massavirta lisääntyy merkittävästi höyryn ominaistilavuuden kasvaessa ja energiasisällön pienentyessä. Tämä lisää tehtaan investointikustannuksia putkikokojen ja lämmönsiirtopinta-alojen kasvaessa. Välipainetason muuttumisesta johtuvat muutokset putkistoinvestoinneissa ovat tehdasmittakaavassa suhteellisen pieniä, koska putkikoot ovat pieniä ja muuttuvat vain vähän. Välipaineen muuttaminen vaikuttaa kuitenkin jonkin verran valkaisun, haihduhtamon ja kuivauskoneen laitteistoinvestointeihin. Tässä työssä ei ole tarkasteltu välipaineen muutosten vaikutusta tehtaan investointikustannuksiin. Investointikustannuksia arvioitaessa materiaalikustannukset valittiin niin suuriksi, että niiden oletettiin kattavan myös putkiston rakentamisen työn osuus.

Sellutehtaalla käytetään jokseenkin saman kokoista välipainehöyryverkkoa koko tehtaan alueella. Matalapainehöyryputkiston koko puolestaan vaihtelee osastoittain. (Esa Vakkilainen, keskustelu 26.05.2010) Turbiinilta lähtevä siirtoputkiston riittävän tarkka mitoitus on laitoksen käytön ja talouden kannalta merkittävä. Liian suuri putkisto lisää erityisesti rakennusvaiheen kustannuksia muun muassa putkiston ja putkisiltojen materiaalikustannusten kasvaessa. Liian pieneksi mitoitettu siirtoputkisto lisää virtaushäviöitä ja kulutuskohteella käytettävän höyryn teho pienenee. Putkisto ei myöskään tällöin pysty vastaamaan laitoksen kapasiteetin vaihteluihin. (Pipe and pipe sizing 2010) Putkiston investointikustannuksia arvioitiin tässä työssä siirtoputkistojen osalta.

Höyryputkisto voidaan mitoittaa höyryn virtausnopeuteen tai putkiston painehäviöön perustuen. Mitoituksen apuna voidaan käyttää virtausnopeuteen tai painehäviöön perustuvia putkiston mitoitusaulukoita ja kuvaajia, joiden avulla putkikoko voidaan valita standardikokoisista putkista. Liian suuren painehäviön ja kulumisen välttämiseksi höyryn virtausnopeudet tulisi olla:

- Kylläiselle höyrylle 25–30 m/s
- Tulistetulle höyrylle:
 - o 30–40 m/s höyryn paineella 40 bar
 - o 17–22 m/s höyryn paineella 80 bar

- o 15–20 m/s höyryn paineella 125 bar

Turbiinilta lähtevän prosessihöyryn paine valitaan tehtaan prosessien tarpeiden mukaisesti. Putkistoa suunniteltaessa tiedetään yleensä kulutuskohteilla tarvittavan höyryn massavirta, paine ja lämpötila. (Huhtinen 2008, 86) Myös höyryn lämpötila on otettava huomioon valittaessa putkiston materiaalia. Suomalaisilla sellutehtailla välipainehöyryn lämpötila vaihtelee 194–295 °C välillä. Taulukossa 2 on esitetty höyryn massavirran ja paineen mukaisia putkistolle sopivia halkaisijoita.

Taulukko 2. Putkikoon valintataulukko höyrylle. (Lähdettä mukaillen: Huhtinen et al. 2008, 86)

Höyrymäärä	kg/h	15	30	60	120	250	500	1000	2000	4000
	kg/s	0,004	0,008	0,017	0,033	0,069	0,14	0,28	0,56	1,11
Paine	Putkikoko DN									
0-0,05	MPa	20	25	40	65	100	125	200	250	350
0,05- 0,15		15	20	32	40	65	80	125	150	250
0,15- 0,35		15	15	25	32	50	65	100	125	200
0,35- 0,65		15	15	20	25	40	50	65	100	150
0,65- 1,3		15	15	15	20	32	40	65	80	125

Kun höyryn tiheys ja massavirta tiedetään, voidaan putken halkaisija myös laskea. Näin ollen virtauksen tarvitsema putken vähimmäishalkaisija voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_m}{\rho \cdot \pi \cdot w}} \quad (6)$$

missä	d	putken halkaisija [m]
	q_m	höyryn massavirta [kg/s]
	ρ	höyryn tiheys [kg/m ³]
	w	höyryn virtausnopeus [m/s].

Putkistoa suunniteltaessa putkiston painehäviö pyritään pitämään mahdollisimman vähäisenä. Tällöin höyryä ei tarvitse ottaa turbiinilta tarpeettoman korkeassa paineessa.

Painehäviötä lisäävät muun muassa putkiston mutkat, supistajat ja venttiilit. Putken kokonaispainehäviö voidaan laskea seuraavasti.

$$\Delta p = \left(\Sigma k + \frac{f \cdot l}{d} \right) * \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (7)$$

missä	Δp	höyryn painehäviö [Pa]
	Σk	kertavastusten summa [-]
	f	kitkakerroin [-]
	l	Putken pituus [m]
	d	putken sisähalkaisija [m]

Putkiston kertavastukset koostuvat venttiilien, mutkien, laippojen ja muiden putkiston osien kertavastuksista. Kertavastuksien arvot saadaan taulukoista. Putken kitkakerroin saadaan esimerkiksi Moodyn- käyrästä pinnankarheuden ja putken halkaisijan suhteen sekä Reynoldsin -luvun funktiona.

4.3 Putken seinämävahvuuden laskeminen

Putken seinämävahvuus on standardikokoisissa putkissa yleensä riittävän suuri. Putket ja putkisillat tulee kuitenkin mitoittaa siten, että putkisto voidaan tarvittaessa täyttää kokonaan vedellä. (Esa Vakkilainen, keskustelu 28.07.2010) Koska putkiston materiaalikustannuksilla on suuri vaikutus putkikoon valintaan, tarpeettoman paksu seinämäisten putkien käyttöä vältetään. Välipaineputkiston käyttöpaine ei yleensä vaikuta putkiston seinämän vahvuuteen vaan putki valitaan standardikokoisista putkista, kuten esimerkiksi NP10 tai NP16. Putken minimi seinämänpaksuus (s_o) voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä.

$$s_o = \frac{p \cdot d_u}{2 \cdot \sigma_{sall} + p} = \frac{p \cdot d_{sis}}{2 \cdot \sigma_{sall} - p} \quad (8)$$

missä	s_o	teoreettinen seinämänvahvuus [mm]
	p	höyrynpaine [MPa]
	d_u	putken ulkohalkaisija [mm]
	d_{sis}	putken sisähalkaisija [mm]
	σ_{sall}	laskenta- eli sallittujännitys [N/mm ²]

Yhtälössä 8 esiintyvä laskentajännitys voidaan laskea seuraavasti.

$$\sigma_{sall} = \frac{\sigma_l}{n} \quad (9)$$

missä	σ_l	materiaalin lujuusarvo [N/mm ²]
	n	varmuuskerroin [-]

4.4 Putkiston investointikustannukset

Höyryn massavirran ja höyryn tilanarvojen avulla voidaan ratkaista putkiston koko aiemmin esitetyllä tavalla. Putkiston investointikustannus lasketaan putkiston painon ja materiaalin kilohinnan mukaan. Putkiston massa voidaan laskea halkaisijan ja seinämän vahvuuden, sekä putkimateriaalin tiheyden avulla seuraavasti:

$$m = \pi \cdot d_s \cdot s \cdot l \cdot \rho \quad (10)$$

missä	m	putkiston massa [kg]
	s	putken seinämänvahvuus [m]
	ρ	materiaalin tiheys [kg/m ³]

4.5 Haihduttamon investointikustannukset

Tässä työssä haihduttamon investointeja arvioidaan haihdutuspinta-alaan perustuen. Tämän vuoksi investointien laskemiseksi on määritettävä haihdutinyksikköjen lämmönsiirtopintojen alat. Pinta-alan avulla voidaan haihduttamoinvestoinnin suuruutta aiemmin rakennettujen haihduttamojen investointikustannusten perusteella. Kustannusarviosta saadaan luotettavampi käyttämällä tietoa jo rakennettujen haihduttamojen kustannuksista.

Lämmönsiirtopinta-alojen määrittämiseen käytetään haihduttamon tehollista lämpötilaeroa haihdutinyksikköä kohden ja rakennetun haihduttamon tunnettua lämmönsiirtopinta-alaa. Haihduttamon tehollinen lämpötilaero voidaan laskea seuraavasti:

$$\Delta T_{teh} = (T_h - T_l) - \sum \Delta T_{kp} - \sum \Delta T_p \quad (11)$$

missä	ΔT_{teh}	tehollinen lämpötilaero [°C]
	T_h	1. yksikköön tulevan höyryn lämpötila [°C]
	T_l	viimeisestä yksiköstä poistuvan höyryn lauhtumislämpötila [°C]
	ΔT_{kp}	kiehumapisteen nousu (BPR) [°C]
	ΔT_p	painehäviöstä johtuva lämpötilaerohäviö [°C]

Yhtälössä 11 oleva kiehumapisteen nousu voidaan laskea seuraavalla Gullichsenin ja Fogelholmin (1999, B20) esittämällä yhtälöllä.

$$\Delta T_{kp} = 6.173X - 7.48X(X)^{0.5} + 32.747X^2 \quad (12)$$

missä	X	kuiva-aine pitoisuus [$\text{kg}_{\text{kuiva-ainetta}} / \text{kg}_{\text{vettä}}$]
-------	-----	--

Tässä työssä painetason mukainen haihduttamon tarvitsema lämmönsiirtopinta-ala (A_h) määritetään rakennetun haihduttamon tehollisen lämpötilaeron ($\Delta T_{teh,tun}$) ja määritettävän haihduttamon tehollisen lämpötilaeron ($\Delta T_{teh,h}$) suhteen sekä käytössä olevan haihduttamon lämmönsiirtopinta-alan avulla. Lämmönsiirtopinta-alan ja haihdutinyksikön tehollisen lämpötilaeron oletetaan muuttuvan samassa suhteessa. Lämmönsiirtopinta-ala saadaan ratkaistua annetuin ehdoin seuraavasta yhtälöstä.

$$\frac{A_h}{A_{tun}} = \frac{\Delta T_{teh,tun}}{\Delta T_{teh,h}} \quad (13)$$

missä	A_h	haihduttamon lämmönsiirtopinta-ala [m ²]
	A_{tun}	tunnettu haihduttamon lämmönsiirtopinta-ala [m ²]
	$\Delta T_{teh,tun}$	tunnettu haihduttamon tehollinen lämpötilaero yksikköä kohti [°C]
	$\Delta T_{teh,h}$	tehollinen lämpötilaero yksikköä kohden [°C]

Haihduttamon investoinnin määrittämiseen käytetään kokemusperäistä haihdutuspinta-alan perustuvaa neliöhintaa. Haihduttamon hinta ei kuitenkaan muutu täysin samassa suhteessa pinta-alan muutoksen kanssa, joten investointia on korjattava kertoimella. Korjauskerroin voidaan määrittää seuraavan yhtälön avulla. Yhtälössä käytettävä potenssi on tapauskohtainen ja voidaan valita kirjallisuuden perusteella.

$$K_k = \left(\frac{A_h}{A_{tun}} \right)^{0.7} \quad (14)$$

missä	K_k	Investoinnin korjauskerroin [-]
-------	-------	---------------------------------

Kun tiedetään kokemusperäinen haihduttamon investointikustannus tietyllä haihdutuspinta-alalla, uuden haihduttamon kustannusarvio voidaan laskea, edellä laskettujen arvojen avulla, seuraavan yhtälön mukaisesti.

$$I_h = K_k * mk_h * A_h \quad (15)$$

missä	I_h	haihduttamon investointikustannus [€]
	mk_h	tunnettu materiaalikustannus [€/m ²]

4.6 Kuivauskoneen investointikustannukset

Haihduttamon tapaan myös kuivauskoneen investoinnin arvioimiseen käytettiin kokemusperäistä kuivauskoneen neliöhintaa. Kuivauskoneen investoinnin suuruus määritettiin viimeaikaisten uusimisprojektien mukaan ja arvioidaan telaston osuus koko kuivauskoneen investoinnista. Telaston pinta-alan oletettiin muuttuvan samassa suhteessa haihdutuskapasiteetin kanssa. Näin ollen höyryn paineen mukaisen haihdutuskapasiteetin muutoksen avulla määritettiin telaston pinta-alan muutos. Koska telaston pinta-ala ja investointikustannus eivät muutu täysin samassa suhteessa, investointia korjataan kertoimella. Kerroin laskettiin kuivauskoneen arvojen mukaisesti aiemmin esitetyllä yhtälöllä 14. Kuivauskoneen investointi lasketaan kuivauskoneen arvojen mukaisesti yhtälöllä 15.

4.7 Vuosittaisten kokonaisinvestointien laskeminen

Aiemmin esitettyjen yhtälöiden avulla voidaan määrittää laitoksen kokonaisinvestoinnit kullekin painetasolle. Tehtaan tuottojen ja kulujen oletetaan pysyvän saman suuruusina jokaisena tarkasteluvuotena. Tämän vuoksi investointien vuosittainen takaisinmaksuerä lasketaan annuiteettimenetelmällä. Investointien vuosittainen maksuerä voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä.

$$A_0 = \frac{I_a}{c_{a,i}} \quad (16)$$

missä	A_0	vuosittainen maksuerä [€]
	I_a	investointi [€]
	$c_{n,i}$	annuiteetti tekijä [-]

Yhtälössä 16 oleva annuiteettitekijä määrittää vuosittaisen lyhennyksen nykyarvon ennalta määritettynä pitoaikana. Annuiteettitekijä voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä.

$$c_{n,i} = \frac{i \cdot (1+i)^a}{(1+i)^a - 1} \quad (17)$$

missä	i	investoinnin/lainan korko [%]
	a	lainan maksuaika, investoinnin pitoaika [a]

4.8 Turbiinin tehon laskeminen

Höyryn sisältämä energia muutetaan liike-energiaksi turbiinin staattorin ja roottorin siipisysteemien avulla, höyryn paisuessa korkeammasta paineesta matalampaan. (Larjola 2002, 9) Turbiinin tehoa määritettäessä pyritään selvittämään höyryn paisuessaan luovuttaman energian määrä. Turbiiniin teho voidaan laskea vaihe kerrallaan, etenemällä väliliottojen väli kerrallaan. Vaiheen tuottama mekaaninen teho voidaan laskea seuraavasti.

$$P = \eta * q_m * (h_1 - h_2) \quad (18)$$

missä	P	turbiinin mekaaninen teho [kW]
	η	turbiinin mekaaninen hyötysuhde
	q_m	höyryn massavirta [kg/s]
	h_1	entalpia ennen turbiini vaihetta [kJ/kg]
	h_2	entalpia turbiinin jälkeen [kJ/kg]

Höyryn entalpiat turbiinivaiheissa voidaan määrittää höyryn paineen ja lämpötilan funktiona taulukoista. Turbiiniväliliottojen paineet valitaan prosessin höyryntarpeen mukaan. Höyryn lämpötila vaiheen lopussa voidaan laskea seuraavan yhtälön avulla.

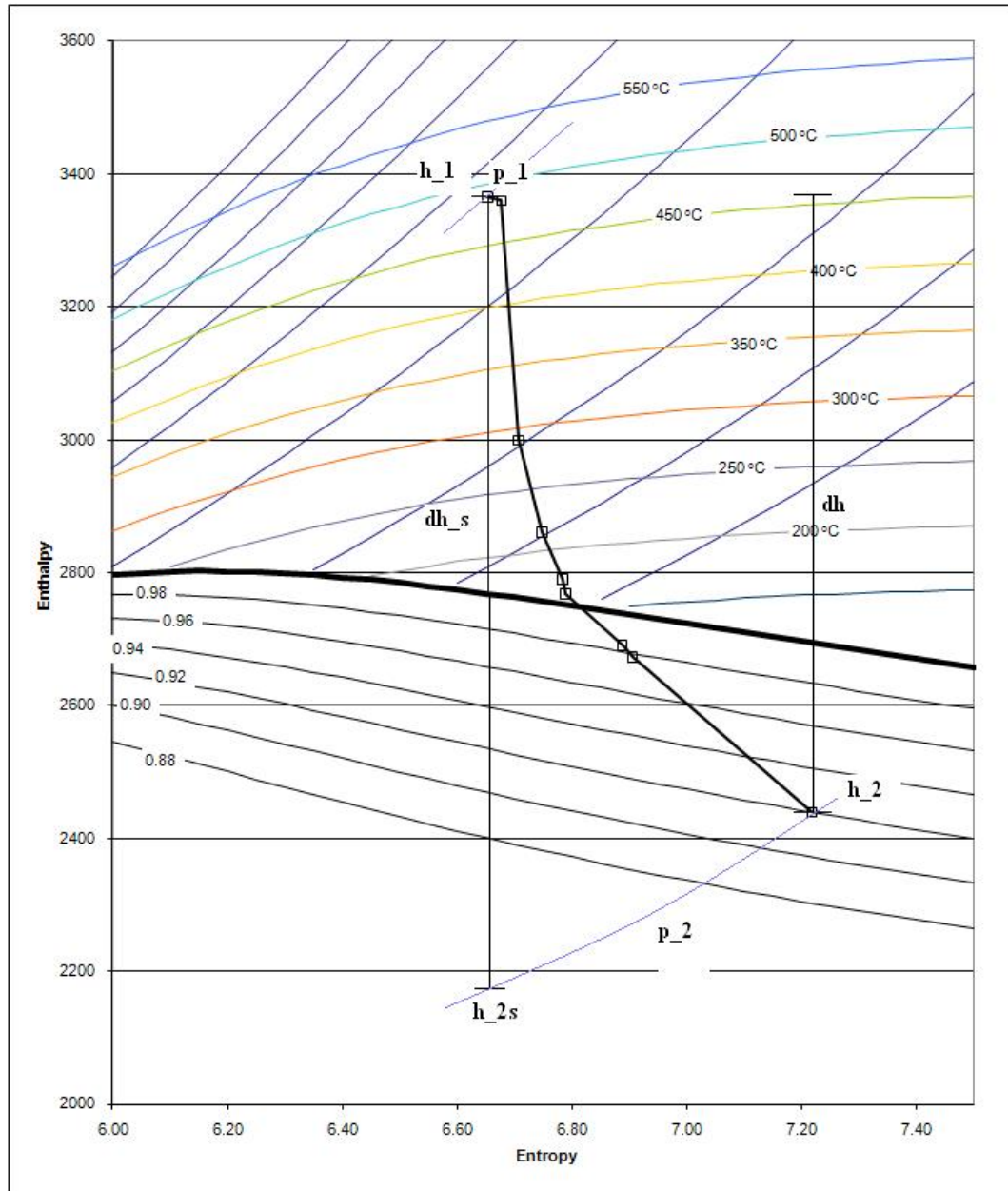
$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}^{\frac{R' \cdot \eta_{pt}}{c_p}} \quad (19)$$

missä	T_2	höyryn lämpötila vaiheessa [°C]
	T_1	höyryn lämpötila edellisessä vaiheessa [°C]
	p_1	höyryn paine edellisessä vaiheessa [kPa]
	p_2	höyryn paine vaiheessa [kPa]
	R'	höyryn reali kaasuvakio [kJ/kgK]
	η_{pt}	turbiinin polytrooppinen hyötysuhde [-]
	c_p	höyryn ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

Turbiinin hyötysuhde (η) voidaan laskea turbiinin todellisen ja isentrooppisen paisunnan entalpiamuutosten avulla. Turbiinin isentrooppinen ja todellinen paisunta on esitetty h,s-tasossa kuvassa 23. Kuvan väli dh_s kuvaa höyryn entalpian muutosta sen paisuessa isentrooppisesti paineesta 1 paineeseen 2. Turbiinin hyötysuhde (η) voidaan laskea todellisen ja isentrooppisen paisunnan entalpian muutosten avulla seuraavalla yhtälöllä.

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (20)$$

missä	h_{2s}	entalpia isentrooppisen paisunnan jälkeen [kJ/kg]
-------	----------	---



Kuva 23. Turbiinin paisuntakäyrä.

Turbiinivaiheiden lämpötilojen ratkaisussa käytetään kokemusperäisiä turbiinin isentrooppisia hyötysuhteita. Tyypillisiä höyryturbiinin isentrooppisia hyötysuhteita on esitetty taulukossa 3. Turbiinin isentrooppinen hyötysuhde on kuitenkin tapauskohtainen ja vaihtelee jonkin verran turbiinityyppien ja valmistajien kesken.

Taulukko 3. Höyryturbiinin kokemusperäisiä isentrooppi hyötysuhteita.
(Lähdettä mukaillen: Voimalaitosopin perusteet 2007)

	η_s	Turbiinivaihe
Turbiinissa yksi välitulistus	86,5- 88,2	Väli- ja matalapainepesä
	75,0- 84,5	Korkeapainepesä
Turbiinissa ei välitulistusta	81,5- 87,0	Koko turbiini

Sellutehtaan energiantuotanto tapahtuu pääasiassa sähkön ja lämmön yhteistuotantona. Vastapainevoimalaitoksen sähköntuotanto riippuu sellutehtaan prosessilämmön kulutuksesta. Laitoksen rakennusaste kuvaa sähköntuotannon suhdetta laitoksen prosessilämmönkulutukseen. (Kivistö 2010, 9) Laitoksen rakennusaste (α) voidaan laskea seuraavasti.

$$\alpha = \frac{P_e}{Q_{pr}} \quad (21)$$

missä α rakennusaste [-]
 P_e sähköteho [MW]
 Q_{pr} prosessilämpöteho [MW]

5 TAPAUSTEN LASKENTA-ARVOT

Höyryn painetasojen muuttumisen vaikutusta sellutehtaiden energiankulutukseen ja -tuotantoon tarkasteltiin muodostamalla esimerkkitapaukset Suomeen sopivista sellutehdastyypeistä. Esimerkkitapauksille laskettiin energiataseet, joiden avulla määritettiin painetasojen muutosten vaikutus vuotuisiin sähkön myyntituloihin ja menoihin. Energiataseissa laskettiin 600 000 tonnia sellua vuodessa tuottavien sellutehtaiden sähkön- ja lämmöntuotanto ja -kulutus eri prosesseissa. Taselaskenta suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston Millflow-laskentasovelluksella. Lisäksi tehdastyypeille laskettiin matalapainetasojen mukaiset investointiarviot. Taseet laskettiin seuraaville tehdastyypeille.

- Case A: Perinteinen sellutehdas
- Case B: Perinteinen sellutehdas + kuorikattila
- Case C: Perinteinen sellutehdas +hienopaperikone
- Case D: Perinteinen sellutehdas +hienopaperikone + kuorikattila
- Case E: Moderni sellutehdas
- Case F: Moderni sellutehdas + kuorikattila
- Case G: Moderni sellutehdas + hienopaperikone
- Case H: Moderni sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila

Taselaskennan ja investointiarvioiden avulla määritettiin tehdastyypien taloudellisesti optimaaliset matalapainehöyryn paineet. Lisäksi laskennalla tarkasteltiin välipaine- ja nuohoushöyryn paineiden alentamisen vaikutuksia laskentatapausten energian tuotantoon ja vuotuisiin sähkön myyntituloihin. Taselaskennalla tutkittiin myös tapauksia, joissa osa prosessien tarvitsemasta matala- tai välipainehöyrystä korvataan matalampi paineisella höyryllä. Laskennalla pyrittiin selvittämään onko rinnakkaisen matala- tai välipaineputkiston rakentaminen ja käyttö taloudellisesti kannattavaa.

Modernien sekä perinteisten sellutehtaiden taselaskenta suoritettiin samalla tavalla. Modernin sellutehtaan lämmönkulutuksen arvioitiin olevan 1 GJ/ADt pienempi ja sähkönkulutuksen 60 kWh/ADt pienempi kuin perinteisellä sellutehtaalla.

Laskettaessa hienopaperikone-sellutehdasintegraatin energiataseita oletettiin ettei sellua kuivata ennen sen siirtämistä hienopaperikoneelle. Tämän vuoksi sellun kuivaimen sähkön- ja lämmönkulutus jätettiin huomioimatta tasetta laskettaessa. Tehdasintegraatin oletettiin tuottavan 650 000 tonnia paperia 600 000 tonnia sellua kohden. Hienopaperikoneen oletettiin aiheuttavan sellutehtaalla $5400 \text{ MJ/t}_{\text{pap}}$ lisälämmön kulutuksen ja $650 \text{ kWh/t}_{\text{pap}}$ lisäsähkön kulutuksen. Hienopaperikoneen aiheuttama lisälämmön ja -sähkön kulutus sisältää myös paperimassan kuivaukseen tarvittavan energian. Lisäksi hienopaperikoneen arvioitiin aiheuttavan 20% lisäyksen jätevedenpuhdistamon sähkönkulutuksessa.

Seuraavissa kappaleissa on esitetty laskennassa käytetyt lähtöarvot ja laskentaperiaatteet.

5.1 Höyryn painearvot energiataseiden laskennassa

Jokaiselle tehdastyypille muodostettiin perustase, ja tutkittiin höyrynpaineen muutosten vaikutusta tehtaan energiataseeseen. Laskenta suoritettiin muuttamalla tarkasteltavan höyrytason painetta turbiinin väliotossa ja höyryn kuluttajilla muiden väliottohöyryjen arvojen pysyessä vakioina. Näin pyrittiin selvittämään käytettävien höyryn painetasojen vaikutus tehtaan energiataseeseen ja sähkön tuotantoon. Jokaisen tehdastyypin taseita tarkasteltiin 4 eri matala- ja välipainetasolla. Höyryn paineet pyrittiin valitsemaan niin, että ne soveltuvat suomalaiselle sellutehtaalle. Prosessihöyryn lämpötilat valittiin laskennassa käytettävän turbiinin väliottohöyryjen lämpötilojen mukaisesti. Laskennassa käytetyt höyryn arvot on esitetty taulukossa 4. Laskentatapauksissa 1–4 muutettiin matalapainetason (LP) painetta ja tapauksissa 5–7 välipainetason (MP) painetta.

Taulukko 4. Taselaskennassa käytetyt höyryn arvot.

Laskenta- tapaus:	LP		MP		MP3	
	[bar](abs)	[°C]	[bar](abs)	[°C]	[bar](abs)	[°C]
1.	3	134	11	226	25	317
2.	4	144	11	226	25	317
3.	5	152	11	226	25	317
4.	6	165	11	226	25	317
5.	4	144	13	243	25	317
6.	4	144	15	258	25	317
7.	4	144	17	273	25	317

Välipainehöyrytaso MP3 valittiin turbiinin toiminnan kannalta sopivaksi siten, että sitä voidaan käyttää kattiloiden nuohoushöyrynä. Kaikissa laskentatapauksissa tuorehöyryn paine oli 96 bar (abs) ja lämpötila 495 °C ja turbiinin sisääntulopaine 93 bar (abs) ja lämpötila 493 °C.

Työn taselaskennassa ei huomioitu höyryn painetason nostamisesta mahdollisesti aiheutuvaa palaavan lauhteen lämpötilan nousua. Kun höyryn kuluttajille syötettävä prosessihöyryn paine nousee riittävästi on mahdollista, että laitteilta palaavan lauhteen joukossa on myös höyryä. Lauhteen on kuitenkin oletettu palaavan vetenä aina samassa lämpötilassa höyryn paineen nostosta huolimatta. Laskennassa ei myöskään otettu huomioon laitteiston mahdollisia vaatimuksia höyryn paineelle eikä talvi- ja kesäkausien välisiä eroja taselaskennassa.

5.2 Tehdastyypin prosessilämmön kulutus laskennassa

Prosessilämmön kulutus ja höyryn massavirrat riippuvat tehtaalla käytettävistä prosesseista ja höyryn painetasoista. Painetasoa nostettaessa höyrymassavirta kulutuskohteille pienenee. Taulukossa 5 on esitetty laskennassa käytetyt turbiinin väliottohöyryjen massavirrat laskennan lähtötasolla. Tällöin tehtaan matalapainetaso on 3 bar (abs) ja välipainetaso 11 bar (abs). Tehtaaseen lisätyt prosessit lisäävät sen lämmön ja sähkön tarvetta. Merkittävin matalapainehöyryn sekä sähkön kulutusta lisäävä tekijä on hienopaperikone. Taulukossa on esitetty myös tapausten ominaislämmönkulutus sekä

ominaissähkönkulutus tuotettua sellutonna kohden laskennan lähtötasolla. Modernin sellutehtaan ominaislämmönkulutus on noin 1 GJ/ADt pienempi kuin perinteisen sellutehtaalla.

Taulukko 5. Prosessilämmön kulutus laskennassa.

	LP (3bar)	MP (11bar)	Lämmön kulutus	Ominais- lämmön- kulutus	Ominais- sähkön- kulutus
	[kg/s]	[kg/s]	[MW]	[GJ/ADt]	[kWh/ADt]
Case A: Perinteinen sellutehdas	57.4	22.8	188	17.5	733
Case B: Perinteinen sellutehdas + kuorikattila	59.1	23.5	194	17.7	761
Case C: Perinteinen sellutehdas + hienopaperikone	78.4	22.8	240	20.1	1221
Case D: Perinteinen sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila	80.1	23.5	246	20.4	1249
Case E: Moderni sellutehdas	54.4	21.5	178	16.5	674
Case F: Moderni sellutehdas + kuorikattila	56.1	22.2	183	16.7	700
Case G: Moderni sellutehdas + hienopaperikone	76.5	21.5	232	19.2	1174
Case H: Moderni sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila	78.1	22.2	237	19.5	1200

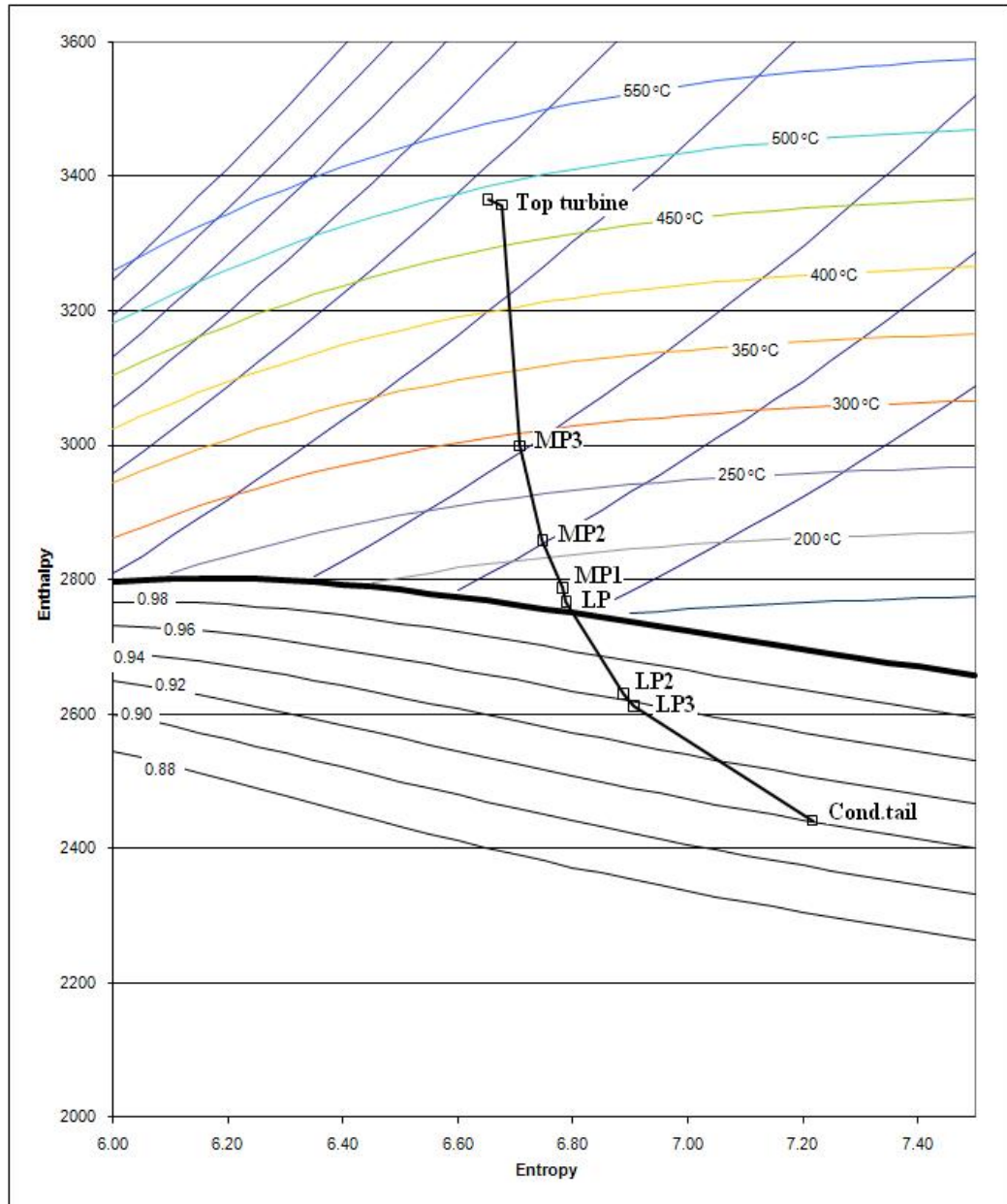
Sellutehtaan prosessit kuluttavat matalapainehöyryä merkittävästi enemmän kuin välipainehöyryä. Matalapainetason nostamisella on huomattavasti suurempi vaikutus sähköntuotantoon kuin välipainetason nostamisella. Painetason nosto vähentää prosessihöyryn tarvetta höyryn energiasisällön kasvaessa. Taselaskennassa huomattiin tuotantoprosessien tarvitseman matalapainehöyryn tarpeen vähenevän 0,3 kg/s mikäli se otetaan turbiinilta 1 bar korkeammassa paineessa. Vastaavasti välipainehöyryn massavirta pienenee 0,12 kg/s mikäli väliottopainetta nostetaan 1 bar.

5.3 Turbiinin toiminta-arvot

Turbiinin toiminta-arvot valittiin suunnittelupisteessä (design point) siten, että turbiinin väliottopaineet sen toimintapisteessä ovat prosessin kannalta sopivat. Laskennalla haettiin tila, jossa turbiini tuottaa maksimaalisen tehon juuri ennen tukkeutumistaan.

Myös tapauksissa, joissa höyryn tuotantoon osallistui soodakattilan lisäksi kuorikattila, sähköön tuotanto tapahtui yhdellä turbogeneraattorilla. Näin muuttujien määrä turbiiniprosessissa saatiin pysymään pienempänä ja muutosten vaikutuksista saatiin luotettavampi kuva. Prosesseissa tarvittavat korkea- ja välipainehöyryt otettiin myös turbiinin väliotoista. Höyry paisutettiin turbiinissa tehtaan matalapainetasoon ja prosessista yli jäänyt matalapainehöyry paisutettiin loppuun lauhdeperässä. Turbiinin lämpötila- ja painejakauma sekä väliottohöyryjen lämpötilat perustuvat teoreettiseen laskentaan. Siksi taselaskennassa käytettävät höyrynarvot eivät aina vastaa täysin käytännön arvoja.

Joissakin laskentavaiheissa turbiinin paisunta päättyi lauhdeperässä kosteaksi höyryksi. Uusissa teollisuusturbiineissa höyryn kostealle alueelle paisutus on ollut käytäntönä, koska käytön aikaisesta kulumisesta johtuen turbiinin häviöt lisääntyvät ja hyötysuhde heikkenee. Tällöin paisuntakäyrän loppupiste nousee h,s -tasossa ylöspäin ja höyry on tulistettua myös turbiinin loppu päässä. (Vakkilainen, keskustelu 28.06.2010) Kuvassa 24 on esitetty eräs laskennassa käytetty turbiinin paisuntakäyrä h,s -tasossa. Kuvasta nähdään matalapainetason (LP) olevan vielä tulistettua höyryä.



Kuva 24. Turbiinin paisuntakäyrä.

5.4 Nuohoushöyryn paineen alentaminen

Kattiloiden nuohoushöyryn paineen valinta ei yleensä perustu suutinvirtaukseen. Nuohouslaitteet kestävät yleensä tarvittavaa suuremman paineen ja nuohoushöyryn paineeksi valitaan korkeapainehöyry, koska nuohoustehon uskotaan olevan parempi korkeammalla paineella. Käytännössä nuohoushöyry voi saavuttaa suuttimessa äänen

nopeuden jo noin 16 bar paineessa. Höyryn äänen nopeus on noin 600 m/s. Tätä suuremmilla paineilla suutin tukkeutuu eikä massavirta enää kasva. Höyryvirtaus romahtaa suuttimen jälkeisissä tiivistysaalloissa, jolloin sen virtausnopeus tippuu alle äänen nopeuden. Alentamalla nuohoushöyryn painetta voitaisiin kuitenkin lisätä turbiinin sähköntuotantoa, vaikka nuohoushöyryn massavirta pysyykin samana. Nuohoushöyryn paineen alentaminen ei merkittävästi vaikuta laitoksen investointikustannuksiin, sillä nuohouksessa käytettävät suuttimet ja putkisto pysyvät samanlaisina. Nuohoushöyrylle voidaan käyttää saman kokoista siirtoputkistoa paineen ollessa 25–40 bar. Mikäli nuohoushöyryn painetta lasketaan alle 25 bar on luultavammin siirryttävä 100 mm putkistosta 125 mm putkikokoon. Tämän vuoksi nuohoushöyryn paineen valinta ei juurikaan vaikuta laitoksen investointikustannuksiin. (Vakkilainen, keskustelu 14.07.2010)

Työssä tarkasteltiin nuohoushöyryn paineen alentamisen vaikutuksia tehtaan sähköntuotantoon. Tasetarkastelussa soodakattilan nuohoushöyry otettiin turbiinin välilotosta 40, 32, 22 ja 20 bar (abs) paineessa, nuohoushöyryvirran ollessa 4.5 kg/s. Laskenta suoritettiin myös siinä tapauksessa, että 0.5 kg/s tai 1.0 kg/s korkeapaineisesta nuohoushöyryvirrasta korvattiin 11 bar (abs) välipainehöyryllä. Nuohoushöyryn kokonaismassavirta pysyi samana kaikissa laskennan vaiheissa. Tarkastelu ei huomioi nuohoushöyryn paineen alentamisen vaikutusta nuohoustehokkuuteen.

5.5 Toisen matalapainetason rakentaminen

Taselaskennalla tarkasteltiin myös tapausta, jossa 5 bar (abs) matalapainehöyry korvattiin joissakin tehtaan prosesseissa matalampi paineisellä höyryllä. Laskennalla selvitettiin rinnakkaisen matalapainelinjan rakentamisen kannattavuutta ja vaikutuksia tehtaan sähkön tuotantoon. Taselaskenta suoritettiin tapaukselle, jossa 5 bar matalapainehöyrylinjan rinnalle rakennettiin 3.5 bar matalapainelinja. Matalalampi paineisellä höyryllä korvattiin osittain tai kokonaan haihduttamon, kuivauskoneen ja syöttöveden esilämmittimen matalapainehöyryn tarve, tehtaan muiden prosessien käyttäessä 5 bar (abs) matalapainehöyryä. Tarkastelu suoritettiin kyseisille prosesseille, koska ne ovat tehtaan suurimpia matalapainehöyryn kuluttajia. Laskennalla pyrittiin selvittämään kuinka suuri höyryvirran tulee olla, jotta linjaston rakentaminen on kannattavaa. Linjaston

investointikustannuksia arvioitiin putkiston osalta. Koska haihduttamo sijaitsee voimalaitoksen läheisyydessä, sen investointikustannukset olisivat pienimmät ja siksi uudella höyrylinjalla pyritään korvaamaan ensisijaisesti haihduttamon matalapainehöyryn tarve. Taulukossa 6 on esitetty tarkastelussa käytettyjen matalapainehöyryjen massavirrat ja lämmön kulutukset. Taulukosta nähdään, että höyryn paineen muutos on niin pieni ettei tarvittavan höyryn massavirta merkittävästi lisäänty. Paineen muutos vaikuttaa kuitenkin hiukan kattilan syöttöveden esilämmitys tarpeeseen.

Taselaskenta suoritettiin perinteiselle sellutehtaalle, jossa on kuorikattila. Tarkastelussa tehtaan välipainetaso oli 11 bar (abs). Toisen matalapainetason höyry otettiin turbiinin lauhdeperän välilotosta 3.5 bar (abs) paineessa. Rinnakkaisen matalapainetason rakentamisen investointikustannukset on laskettu aiemmin esitetyn putkiston investointikustannusten laskennan mukaisesti. Investointiarviot on laskettu vain uuden putkiston osalta eikä niissä ole otettu huomioon mahdollista lisäinvestointia kuivauskoneessa, haihduttamossa tai turbiinissa. Painetason muuttamisesta syöttöveden esilämmittimellä arvioitiin aiheutuvan 2.5 miljoonan euron investointikustannukset esilämmittimessä.

Taulukko 6. Laskenta-arvot rinnakkaisille matalapainelinjastoille.

Tapaus:	Höyryn kuluttaja:	LP 3.5 bar		LP 5 bar	
		[kg/s]	[MW]	[kg/s]	[MW]
1.	Haihduuttamo	10	24	7	17
	Kuivauskone	0	0	18	47
	SYVE- esilämmitin	0	0	16	36
	YHTEENSÄ	10	24	41	100
2.	Haihduuttamo	17	41	0	0
	Kuivauskone	0	0	18	47
	SYVE- esilämmitin	0	0	16	36
	YHTEENSÄ	17	41	34	83
3.	Haihduuttamo	17	41	0	0
	Kuivauskone	10	24	9	24
	SYVE- esilämmitin	0	0	15	33
	YHTEENSÄ	27	65	24	57
4.	Haihduuttamo	17	41	0	0
	Kuivauskone	20	47	0	0
	SYVE- esilämmitin	0	0	13	30
	YHTEENSÄ	37	88	13	30
5.	Haihduuttamo	17	41	0	0
	Kuivauskone	20	47	0	0
	SYVE- esilämmitin	13	30	0	0
	YHTEENSÄ	50	118	0	0

5.6 Toisen välipainetason rakentaminen

Työssä tarkasteltiin myös toisen välipainehöyrylinjaston rakentamismahdollisuuksia keittimelle. Tarkastelulla pyrittiin selvittämään kuinka suuri välipainehöyryvirran on oltava, jotta oman linjaston rakentaminen tulee kannattavaksi. Tarkastelu tehtiin perinteiselle sellutehtaalle, jossa käytetään kuorikattilaa. Laskennassa keittimen 13 bar (abs) välipainevirta korvattiin osittain tai kokonaan 9 bar (abs) välipainehöyryllä. Taulukossa 7 on esitetty välipainehöyryn massavirrat, joilla tarkastelu on tehty. Tasetarkastelussa prosesseissa käytettävä matalapainehöyryn paine oli 4 bar (abs) ja lämpötila 144 °C. Liitteessä III on esitetty toisen välipaineputkiston kannattavuuslaskelmien arvoja ja tulokset.

Taulukko 7. Toisen välipainelinjaston laskemisessa käytetyt höyryn massavirrat.

	MP	MP2
Paine [bar] (abs)	13	9
Lämpötila [°C]	243	203
Massavirta [kg/s]	10.4	0
	9.4	1
	8.4	2
	6.4	4
	4.4	6
	2.4	8
	0.4	10
	0	10.4

Toisen välipainelinjaston investointi kustannukset on laskettu putkiston osalta aiemmin kuvatulla tavalla. Lisäksi uuden välioton rakentamisesta turbiinille arvioitiin aiheutuvan 200 000 € lisäinvestointi. Taulukossa 8 on esitetty putkiston mitoituksessa käytetyt muut laskenta-arvot. Siirtoputkiston on arvioitu olevan 25 % koko putkiston pituudesta.

Taulukko 8. Putkiston laskenta-arvot.

Laskentajännitys	350	[N/mm ²]
Varmuuskerroin	1.3	[-]
Siirtoputkiston pituus	200	[m]
Putkiston kokonaispituus	800	[m]
Materiaalin tiheys	7800	[kg/m ³]

6 SUOMESSA KÄYTETTÄVÄT HÖYRYN PAINETASOT

Projektia varten kerättiin tietoa suomalaisilla sellutehtailla käytettävistä höyryn painetasoista. Suomen Soodakattilayhdistyksen tekemässä kyselyssä pyrittiin selvittämään erityisesti käytettävät höyrytasot ja niiden paineet sekä paineiden valintaan vaikuttaneet syyt. Kyselyyn vastanneiden 12 suomalaisen sellutehtaan käyttämät höyryn painearvot on koottu taulukkoon 9. Liitteeseen IV on koottu tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen painetasokyselyyn.

Taulukko 9. Suomen sellutehtailla käytettävät höyrynpainetasot.

Tehdas:	Tuore- höyry	Tuore höyry2	Nuohous höyry	Väli- paine	Väli- paine2	Matala paine	Matala paine2	Muu höyry
				[bar](g)				
1. Enocell	81	-	25	12	-	5	-	0,0059
2. Joutseno	93	-	24	10,5	6,8	3,5	-	-
3. Kemi	84	-	28	12,5	9	3,5	-	-0,6
4. Kymi	100	114	24	13,7	-	4,6	3,9	-0,64
5. Oulu	84	100	24	10,8	-	2,8	-	-
6. Pietar- saari	102	-	27	17	11,5	5,5	3,5	-
	-	-	16	-	-	-	-	-
7. Rauma	92	-	28	11	-	3,5	-	-
8. Sunila	63	-	35	10	-	2,5	-	-
9. Varkaus	64	110	30	17	8	2	-	4
10. Ääne- koski	83,2	-	33	12,3	11,8	4,4	4,2	-
11. Imatra	83	67	-	10,1	-	5,1	-	-
12. Kotka	80	-	-	13	-	6	4	-

Yleisesti höyryn painetasojen valintaan ovat vaikuttaneet laitoksen käyttöönottovuosi, käytettävä laitteisto sekä tehdastyyppi. Myös sähkön hinnan kehityksellä on ollut vaikutusta höyryn paineiden valintaan.

Kattilan rakennusvuosi määrää käytettävän tuorehöyryn paineen. Tuorehöyryn painetta on pyritty nostamaan uusissa laitoksissa lisäämällä näin laitoksen sähkön tuotantoa. Kattiloiden kehitys näkyy selkeästi tuorehöyryn paineiden merkittävänä nousuna viime vuosikymmeninä. Kyselyyn vastanneilla tehtailla 80-luvulla rakennettujen kattiloiden

tuorehöyrynpaineet ovat 64–83 bar. Kattiloiden tuorehöyryn paineita ei kuitenkaan näyttäisi olevan nostettu myöhemmistä höyryverkon ja tulistinputkistojen uusimisesta huolimatta. 90-luvulla käyttöön otettujen kattiloiden tuorehöyryn paineet ovat 81–92 bar. Kattilatekniikan ja materiaalien kehityksen myötä tuorehöyrynpaineet ovat nouseet 2000-luvulla jo yli 100 bariin. Myös tuorehöyryn lämpötila on voitu nostaa yli 500 °C. Korkeimmat höyrynpaineet ovat käytössä laitoksissa, joissa on käytössä kaksi tuorehöyryn painetasoa. Syynä korkeisiin tuorehöyrynpaineisiin voitaneen kuitenkin pitää merkittäviä päivityksiä kattilan tulistimissa tai uuden tyyppisiä kattiloita. Kyselyn mukaan kattilan lisäksi tuorehöyrytason valintaa on vaikuttanut myös sähkön hinnan kehitys.

Kyselyyn vastanneilla tehtailla kattiloiden nuohoushöyryn paineet ovat 16–35 bar. Nuohoushöyryn painetta voitaisiin alentaa, mutta se vaatisi, esimerkiksi Metsä-Botnian Rauman tehtailla, vanhojen diamond-nuohoimien korvaamista uudemmilla gemini-nuohoimilla.

Välipainehöyrytasojen valintaan ovat vaikuttaneet merkittävimmin keittimen sekä happivaiheen höyryn paineelle ja lämpötilalle asettamat vaatimukset. Myös mäntyöljyn jalostamon vaatimukset ovat joissakin tapauksissa vaikuttaneet käytettävään höyryn painetasoon. Soodakattilayhdistyksen kyselyn mukaan sellutehtaiden välipainetasot ovat 10–17 bar. Yleisimmin välipainehöyryn paine on kuitenkin noin 12 barin luokkaa.

Tehtaiden matalapainetasot on valittu yleisesti haihduttamon, sellun kuivurin sekä paperi- tai kartonkikoneiden vaatimusten mukaisesti. Myös käytettävä säätötapa vaikuttaa matalapainehöyryn painetasoon. Esimerkiksi Metsä-Botnian Rauman tehtaalla käytetään samaa matalapaineverkkoa viereisen paperitehtaan kanssa. Matalapaineverkon paine on alhaisempi (3,45 bar) kun paperitehtaalte menevä väliventtiili säätää sitä kuin apulauhduttimen säätäessä (3,6 bar) painetta.

Yleisimmin matalapainetason laskemista rajoittaa haihduttamon kapasiteetti. Tämän vuoksi haihduttamalla käytettävä tekniikka ja haihduttamolle valittu painetaso ovat merkittävimpiä perusteita välipainetason valinnalle. Kyselyn perusteella suomalaisten sellutehtaiden matalapaineverkon paineet ovat 2–6 bar. Laitoksen käyttöönottovuosi voi myös vaikuttaa matalapainetasojen valintaan. 80-luvulla käyttöönotetuissa laitoksissa matalapaine- ja vastapainetasot ovat 2–3 baria kun taas 90-luvulla käyttöönotetuissa laitoksissa vastaavat paineet ovat yleisimmin 3,5 baria. 2000-luvulla käyttöönotettujen

laitosten matala- ja vastapainehöyryjen paineet vaihtelevat 4,4–5,5 bar:n välillä. Matalapainehöyryn paineen nousu johtuneen luultavimmin haihduttamon kapasiteetin noususta 70-luvulta lähtien. Haihduttamolta lähtevän polttoliipeän kuiva-ainepitoisuus on nykypäivänä noin 80–85 %. Kuiva-ainepitoisuuden nousun myötä myös haihdutinyksiköiden lämpötilaerot ovat kasvaneet. Tämän vuoksi haihduttamiseen tarvitaan korkeampi paineista höyryä ja lipeä on säilytettävä paineistettuna. (Nieminen 2007, 28) Korkeamman kuiva-ainepitoisuuden ansiosta myös soodakattilan höyryn tuotanto on kasvanut. Myös uusimpien valkaisuprosessien käyttö lisää välipainehöyryn käyttöä. Valkaisussa on käytettävä välipainehöyryä mikäli siinä on paineellisia vaiheita. (Kivistö 2008, 11) Uusimpien valkaisuprosessien lämpötilat ovat myös korkeampia ja vaiheiden väliset lämpötilaerot suurempia. (Kivistö 2010, 1) Myös nämä syyt voivat vaikuttaa korkeampaan välipainehöyryn tarpeeseen.

Yleisesti ottaen suomalaisilla sellutehtailla käytetään samankaltaisia höyrytasoja. Suurimmat erot tehtaiden välillä löytyvät tuorehöyryjen paineissa. Suomalaisilla tehtailla painetasoja on tarkastettu laitteiston ja linjastojen uusinnan yhteydessä. Kyselyn perusteella painetasoa ei kuitenkaan ole lähdetty muuttamaan vaan on nähty järkevämmäksi rakentaa uusittavat koneet aiemmalle painetasolle. Näin vältetään mittavilta laitteistoinvestoinneilta. Valitut höyryn painetasot eivät kuitenkaan välttämättä ole tehtaan energiatehokkuuden ja sähköntuotannon maksimoinnin kannalta parhaat mahdolliset. Tekniikan kehittyminen näkyy selvästi painetasojen alentumisena.

7 VÄLIPAINETASON LASKEMISTA RAJOITTAVAT TEKIJÄT

Sellutetehtaan suurimmat välipainehöyryn kuluttajat ovat keittovaihe sekä haihduttamo. Ne rajoittavat usein välipainetason paineen alentamista. Haihduttamon ensimmäisessä vaiheessa käytettävän välipainehöyryn painetta on jo onnistuneesti laskettu suomalaisilla sellutehtailla. (Vakkilainen, keskustelu 09.06.2011) Työtä varten kysyttiin Andritz Oy:n sekä Pöyry Oy:n mielipiteitä keittämön tarvitsemasta välipainetasosta. Sähköpostikeskustelut laitteiston höyryn paineen tarpeesta on esitetty liitteessä I. Kyselyn mukaan keitin tarvitsee lehtipuun keitossa vähintään 7 bar (g) ja havupuun keitossa 9 bar (g) välipainehöyryä. Happivaihe tarvitsee kuitulinjan korkeimman höyryn paineen. Happivaiheen tarvitsema höyrynpaine on 10–11 bar ylipainetta. Mikäli tehtaan muut osat tulevat toimeen tätä alhaisemmilla höyryn paineilla, voidaan välipainetasoa nostaa happivaiheelle höyryejektorilla eli termokompressorilla. Ejektorin investointi kustannukset ovat varsin pienet, joten välipainetason laskemisesta saadaan merkittävä hyöty sähkön tuotannossa. Happivaiheessa voidaan myös käyttää boosteripumppua reaktoreiden välissä, jolloin sen tarvitsema höyryn paine on 7 bar ylipainetta.

Välipainetason alentaminen voidaan myös mahdollistaa rakentamalla joillekin tehtaan prosesseille oma välipainehöyrylinja. Prosessissa tarvittavan välipainehöyryvirran on oltava riittävän suuri, jotta linjaston rakentaminen ja uuden turbiinivälioton rakentaminen on kannattavaa. Työssä tehtyjen laskelmien mukaan 9 bar (abs) välipainelinjan rakentaminen keittimelle tulee kannattavaksi kun höyryvirta on vähintään 4 kg/s. Rinnakkaisten höyrytasojen rakentamista kannattanee harkita ainakin haihduttamon, keittimen, sellun kuivurin tai turbiinin uusinnan yhteydessä.

8 HÖYRYN PAINETASON VAIKUTUS SÄHKÖN TUOTANTOON

Höyryn painetasojen muuttumisen vaikutusta sellutehtaan sähköntuotantoon tarkasteltiin laskemalla taseet kappaleessa 5 esitetyille tapauksille. Muutoksia sähköntuotannossa tarkasteltiin taulukon 4 mukaisilla höyryn arvoilla. Taseiden avulla laskettiin kussakin tapauksessa myytäväksi jäävän sähkön määrä. Tehtaan oletettiin toimivan 350 vuorokautta eli 8400 tuntia vuodessa. Myyntisähköön tuotto laskettiin Nord Pool sähköpörssin määrittelemän sähkön spot area- hinnan mukaan. Tapausten myyntivoitot on laskettu 22.06.2010 määritetyn sähkön hinnan mukaan. Nord Poolin määrittelemä sähkön hinta oli tuolloin 45,17 €/MWh. Työssä ei ole otettu huomioon ennustetta sähkön hinnan muutoksesta.

Seuraavissa kappaleissa on esitetty aiemmin kuvattujen laskentojen tulokset höyryn painetasojen vaikutuksesta sellutehtaiden energian tuotantoon ja kulutukseen.

8.1 Höyryn painetasojen muutoksen vaikutus sähköön myyntituloihin

Taulukossa 10. on esitetty laskennan tulokset höyryn painetasojen muutoksien vaikutuksesta sähköön vuotuisiin myyntituloihin. Laskennassa huomattiin matalapainetason nostamisella olevan suurin vaikutus tapauksen D (Perinteinen sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila) mukaiseen tehtaaseen. Matalapainetason nostamisella aiheutuu 1 250 000 €/bar menetys kyseisen tehdastyypin sähköön vuotuisissa myyntituloissa. Pienimmät menetykset matalapainetason nostamisesta aiheutuvat tapauksen E (Moderni sellutehdas) mukaisen tehtaan sähköön myyntituloihin. Tällöin sähköön myyntivoiton menetys on 890 000 €/bar vuodessa. Taulukon tuloksista voidaan todeta matalapainehöyryn paineen valinnalla olevan suurin merkitys tehdastyypeissä, joissa höyryn kulutus on suuri.

Taulukon 10 tuloksista voidaan todeta välipainetason muuttamisella olevan saman suuruinen vaikutus kaikkien tehdastyypien sähköön myyntituloihin. Välipainehöyryn

kulutuksissa ei ole merkittäviä eroja tehdastyyppien välillä, jonka vuoksi myös vaikutus sähkön myyntituloihin on saman suuruinen kaikissa tapauksissa.

Taulukko 10. Höyrytasojen paineen muutoksen vaikutus vuotuisiin sähkön myyntituloihin.

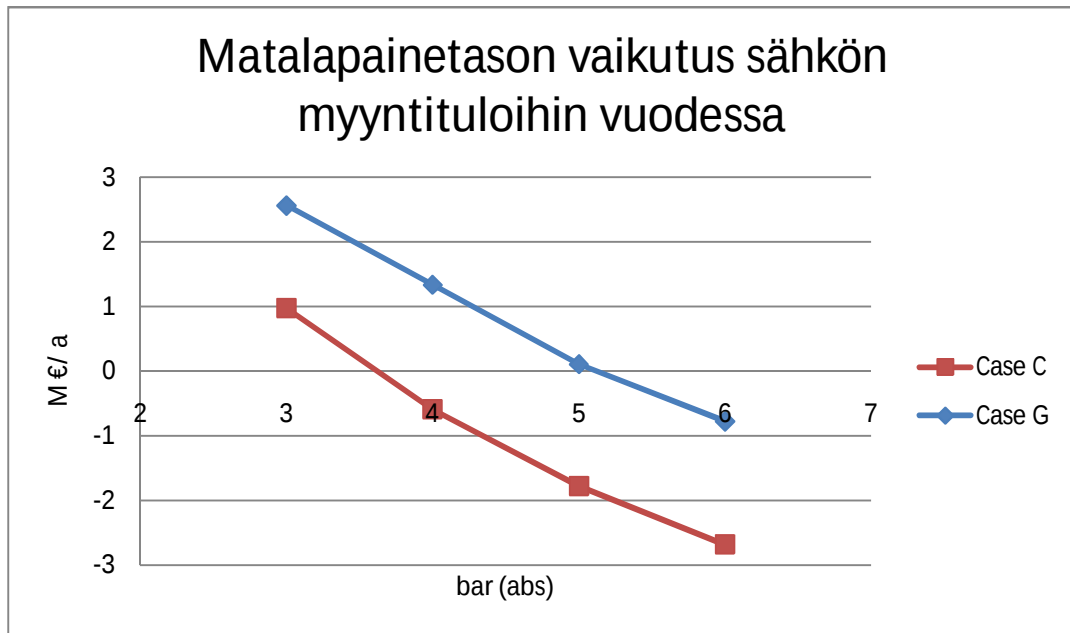
Höyryn painetason vaikutus sähkön myyntituloihin	LP:	MP:
	[1000 €/bar/a]	[1000 €/bar/a]
Case A: Perinteinen sellutehdas	1030	70
Case B: Perinteinen sellutehdas + kuorikattila	1000	70
Case C: Perinteinen sellutehdas + hienopaperikone	1190	70
Case D: Perinteinen sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila	1250	70
Case E: Moderni sellutehdas	890	70
Case F: Moderni sellutehdas + kuorikattila	960	70
Case G: Moderni sellutehdas + hienopaperikone	1110	70
Case H: Moderni sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila	1230	70

Taulukossa 11 on esitetty taselaskennan tulokset vuotuisista sähkön myyntituloista. Tulokset on esitetty vertailtavan matala- ja välipainehöyryn paineen mukaan. Muut höyryn paineet ovat aiemmin esitetyn taulukon 4 mukaisia. Taulukosta 11 nähdään, että tehdas saa pienimmät vuotuiset sähkön myyntitulot tapausten C ja G mukaisissa sellutehdas-hienopaperikone integraateissa, joissa syntyvää kuorijätettä ei polteta. Tehdastyyppien höyryn kulutus on suurin ja höyryn tuotanto vähäistä.

Taulukko 11. Vuotuiset sähkön myyntitulot matala- ja välipainetason paineiden mukaan. [Milj.€/a]

Paine [bar](abs)	Sähkön myynti tulot vuodessa [Milj. €/a]							
	LP				MP			
	3	4	5	6	11	13	15	17
Case A	17.0	15.7	14.8	13.9	15.7	15.5	15.4	15.3
Case B	31.1	29.8	28.9	28.1	29.8	29.7	29.5	29.4
Case C	0.9	-0.6	-1.8	-2.7	-0.6	-0.7	-0.9	-1.0
Case D	15.1	13.5	12.3	11.3	13.5	13.4	13.2	13.1
Case E	19.4	18.0	17.2	16.5	18.0	17.9	17.8	17.6
Case F	33.4	32.3	31.3	30.6	32.3	32.1	32.0	31.9
Case G	2.6	1.3	0.1	-0.8	1.3	1.1	1.0	0.9
Case H	17.0	15.5	14.2	13.3	15.5	15.3	15.2	15.1

Kuvassa 25 on esitetty tapausten C (Perinteinen ST + HPK) ja G (Moderni ST + HPK) sähkön myyntitulojen muutos vuodessa. Kuvan 25 ja taulukon 11 tuloksista voidaan todeta perinteisen sellutehdas-hienopaperikone integraatin (ilman kuorikattilaa) kuluttavan enemmän sähköä mitä se pystyy tuottamaan mikäli matalapainetaso yli 4 bar (abs). Modernissa sellutehdas-hienopaperikone integraatissa (ilman kuorikattilaa) vastaava tapahtuu kun matalapainetaso on yli 5 bar (abs).



Kuva 25. Matalapainetason mukaiset vuotuiset sähkön myyntitulot tapauksissa C ja G [milj. €/a]

8.2 Turbiinin marginaalinen rakennusaste

Taulukossa 12 on esitetty laskennan mukaisen turbiinin marginaaliset rakennusasteet (α). Rakennusastetta laskettaessa prosessihöyryn on oletettu palaavan 90 °C lämpöisenä lauhteena. Koska painetasojen nostaminen vähentää turbiinin sähköntuottoa, se pienentää myös laitoksen rakennusastetta. Matalapainetason (LP) nostaminen alentaa turbiinin rakennusastetta noin $0.02 \text{ MW}_e/\text{MW}_{th}$. Välipaineen muuttamisella on huomattavasti pienempi vaikutus painetason marginaaliseen rakennusasteeseen.

Taulukko 12. Turbiinin marginaali rakennusaste.

Turbiinivaihe	α	
	[MW _e / MW _{th}]	[MWe/(kg/s)]
Reduktio	0	0
MP3 (25bar)	0.12	0.31
MP2 (11bar)	0.19	0.48
MP1 (7 bar)	0.23	0.67
LP (3 bar)	0.30	0.82

8.3 Nuohoushöyryn paineen vaikutus sähkön myyntituloihin

Soodakattilan nuohoushöyryn paineen valinnan vaikutusta tehtaen sähköntuotantoon tarkasteltiin alentamalla turbiinin väliotosta saatavan nuohoushöyryn painetta. Lisäksi tarkasteltiin tilannetta, jossa osa nuohoushöyrystä korvattiin matalampi paineisella höyryllä. Taulukossa 13 on esitetty laskennan tulokset nuohoushöyryn paineen vaikutuksesta tehtaan sähkön myyntituloihin. Vertailupisteenä käytetään tilannetta, jossa soodakattilan nuohoukseen käytetään 4.5 kg/s 40 bar (abs) höyryä. Taulukossa on myös esitetty tulokset tapauksille, joissa osa korkeapaineisesta (MP3) nuohoushöyrystä on korvattu 11 bar (abs) (MP2) välipaineihöyryllä. Alentamalla nuohoushöyryn paine 40 bar:sta 20 bar voidaan aikaansaada 260 000 € korkeammat sähkön myyntitulot vuodessa. Nuohoushöyryn korvaamisella matalampi paineisella höyryllä on merkittävä vaikutus sähkön tuotantoon tapauksissa, joissa käytetään korkeaa nuohoushöyryn painetta.

Taulukko 13. Nuohoushöyryn vaikutus sähkön myyntituloihin.

	MP3: 40 bar (abs)	MP3: 32 bar (abs)	MP3: 22 bar (abs)	MP3: 20 bar (abs)	Vaikutus myyntituloihin [1000€/bar/a]
MP3: 4.5 kg/s MP2: 0 kg/s	0	123	239	260	13.0
MP3: 4 kg/s MP2: 0.5 kg/s	52	155	271	289	12.0
MP3: 3.5 kg/s MP2: 1 kg/s	96	191	300	309	11.0

Koska nuohoukseen käytettävän höyryn massavirta on pieni, merkittävien säästöjen aikaan saaminen edellyttää suurta nuohoushöyryn paineen alentamista. Nuohoushöyryn paineen alentamisesta ei kuitenkaan synny merkittäviä investointikustannuksia.

9 HÖYRYN PAINETASON VAIKUTUS INVESTOINTEIHIN

Investointilaskelmissa hyödynnettiin tietoja viimeisimmistä tehdyistä talteenottolinjastojen ja kuivauskoneiden uusimisprojekteista. Liitteessä V on esitetty näihin tietoihin perustuva esimerkkilaskelma talteenottolinjaston ja kuivauskoneen uusimisen investointikustannuksista. Tämän työn investointilaskelmat ovat esimerkin kaltaisia. Investointiarviot ja haihduttamon sekä kuivauskoneen mitoituksessa tehdyt tekniset valinnat perustuvat suurelta osin aiemmin tehtyihin projekteihin. Seuraavissa kappaleissa on esitetty laskelmien tulokset höyryn painetasojen muuttamisen vaikutuksista tehtaan investointikustannuksiin. Painetason muuttamisesta aiheutuviissa investointikustannuksissa ei ole huomioitu tehtaan muita lämmönsiirtimiä. Lämmönsiirtimien investointikustannusten arvioidaan olevan noin 10–20 % lasketuista investointikustannuksista. Tämän vuoksi niiden oletetaan jäävän lasketatarkkuuden sisälle.

9.1 Putkiston investointikustannukset

Putkiston investointikustannuksia laskettaessa määritettiin sellutehtaalle rakennettavien höyryn siirtoputkistojen pituus sekä tehtaalla tarvittavien putkistojen kokoluokkien määrä ja materiaali viimeaikaisimpien talteenottolinjastojen uusimisprojektien kustannuslaskelmien avulla. Projektien putkikoot otettiin huomioon myös esimerkkitapausten putkistojen mitoituksessa. Siirtoputkiston oletettiin olevan 25 % rakennettavasta koko putkiston pituudesta. Investointikustannuksissa laskettavien tapausten höyryputkisto valmistetaan mustasta S2333-teräksestä, jonka tiheys on 7800 kg/m³. Putkistoinvestointien kustannukset laskettiin putkiston painon mukaan teräksen hinnan ollessa 6 €/kg. Putkiston materiaalihinta on niin korkea, jotta se kattaa myös muutoksen työ- ja muut kulut. Höyryn paineen muutos ei kasvata merkittävästi nuohous- ja välipainehöyryputkistojen investointeja. Tämän vuoksi investointiarvioita ei tehty välipainetasojen mukaan. Laskennan tulokseksi saadut putkiston koko ja paino on esitetty matalapainetason mukaan taulukossa 14. Putkiston kokonaispaino muuttuu noin 24 000 kg/bar höyryn matalapainetason muuttuessa.

Taulukko 14. Nuohoushöyry- (NH), välipaine- (MP) ja matalapaineputkiston (LP) koko ja paino.

	Paine	Pituus	Halkaisija	Seinämän paksuus	Siirtoputkiston paino (25 %)	Koko putkiston paino
	p [bar](abs)	l [m]	DN [mm]	s [mm]	m [kg]	m [kg]
NH	28	100	150	20	7351	-
MP	14	700	400	13	89196	-
LP	3	700	1300	13	289887	-
		700	150	9	23157	409591
	4	700	1200	13	267588	-
		700	150	9	23157	387292
	5	700	1100	13	245289	-
		700	150	9	23157	364993
	6	700	1000	13	222990	-
		700	150	9	23157	338835

Matalapainehöyryn paineiden mukaan lasketut putkistoinvestoinnit on esitetty taulukossa 15. Investointikustannukset pienenevät matalapainetason kohotessa noin 566 000 €/bar. Taulukossa on myös esitetty investoinnin muutos lähtötasoon (3 bar) verrattuna. Kuten taulukosta 15 nähdään, 6 bar matalapainetasolla putkiston investointikustannukset ovat noin 1.7 miljoonaa euroa pienemmät kuin 3 bar matalapainetasolla.

Taulukko 15. Putkiston investointikustannus

Paine	Kokonais-paino	Materiaali hinta	Kokonais-hinta	Investoinnin muutos (3 bar)
[bar] (abs)	[kg]	[€/kg]	[1000 €]	[1000 €]
3	409 591	6	9 830	-
4	387 292	6	9 295	- 540
5	364 993	6	8 760	-1 070
6	338 835	6	8 132	-1 700

9.2 Haihduttamon investointikustannukset

Haihduttamon investointikustannusten määrittämiseksi laskettiin haihduttamon tarvitsema lämmönsiirtopinta-ala kullakin matalapainetasolla. Aiemmin tehtyjen talteenottolinjastojen uusimisprojektien kustannuslaskelmien avulla määritettiin haihduttamon investointikustannus haihdutuspinta-alaa kohden. Liitteessä VI on esitetty haihduttamon investointikustannusten määrittämiseksi tehtyjä laskelmia. Taulukoon 16 on koottu kappaleen 4.5 *Haihduttamon investointikustannus* mukaisten laskelmien tulokset sekä matalapainetaso mukaiset haihduttamon kokonaisinvestoinnit ja investoinnin muutos (3 bar) perustasoon verrattuna. Taulukossa 16 esitetty kiehumapisteennousu (BPR) on laskettu taulukkoarvoihin perustuen, haihdutinvaiheessa olevan lipeän kuiva-ainepitoisuuden mukaan. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B21) Taulukon 16 tulosten perusteella voidaan todeta haihduttamon investointikustannusten muuttuvan noin 3 266 000 €/bar matalapainehöyryn paineen muuttuessa. Taulukon arvot 4 bar höyryn paineessa vastaavat käytössä olevan haihduttimen arvoja.

Taulukko 16. Höyrynpaineen mukaiset haihduttimen toiminta-arvot ja investoinnit.

Paine	[bar](abs)	3	4	5	6
BPR	[°C]	21			
Poistuvan höyryn lämpötila	[°C]	55			
Tehollinen lämpötilaero	[°C]	35.0	45.0	53.3	60.3
Vaiheen tehollinen lämpötilaero	[°C]	5.0	6.4	7.6	8.6
Pinta-ala	[m ²]	75 273	58 420	49 403	43 668
Neliöhinta	[€/m ²]	419	500	562	613
Kokonais-investointi	[1000 €]	31 500	29 200	27 800	26 800
Investoinnin muutos	[1000 €]	-	-2 300	-3 700	-4 700

9.3 Kuivauskoneen investointikustannukset

Kuivauskoneen investointikustannukset on laskettu telaston hintaan perustuen. Telaston hinta on arvioitu olevan 50 % koko kuivauskoneen hinnasta. Telaston hinta määritettiin viimeisimpien kuivauskoneen uusimisprojektien mukaan. Telaston investoinniksi arvioitiin 4 miljoonaa euroa höyryn paineen ollessa 4 bar (abs). Kuivauskoneen puristin osan investointien oletettiin pysyvän samana (4 milj. €) painetason muutoksesta huolimatta. Telaston pinta-ala on laskettu, viimeaikasimpien kuivauskoneiden uusimisprojektien tietojen avulla, höyrynpaineen mukaiseen haihdutuskapasiteetin muutokseen perustuen. Taulukossa 17 on esitetty kuivauskoneen investointikustannukset matalapainetason suhteen. Taulukossa esitetty pinta-ala -% kuvaa pinta-alan muutosta vertailutasoon (100%) nähden. Vertailutasona pidettiin käytössä olevan kuivauskoneen uusimisprojektin tietoja 4.7 bar paineessa. Pinta-alan ja haihdutuskapasiteetin oletettiin muuttuvan samassa suhteessa. Investoinnin muutosta verrataan 4 bar (abs) lähtötasoon, joka on määritelty tehtyjen talteenottolinjastojen ja kuivauskoneen uusimisprojektien tietojen perusteella. Tätä pidettiin investointien vertailutasona.

Taulukko 17. Kuivauskoneen investointikustannukset matalapainetason mukaan.

Paine	Pinta-alan muutos	Investoinnin muutos	Telaston investointi	Kuivurin Kokonais- investointi	Kokonais- investoinnin muutos
[bar] (abs)	[-%]	[-%]	[1000 €]	[1000 €]	[1000 €]
3	113	104	41 762	81 760	1 760
4	105	100	40 000	80 000	0
5	98	96	38 470	78 470	-1 530
6	92	93	37 110	77 110	-2 890

9.4 Kokonaisinvestoinnit

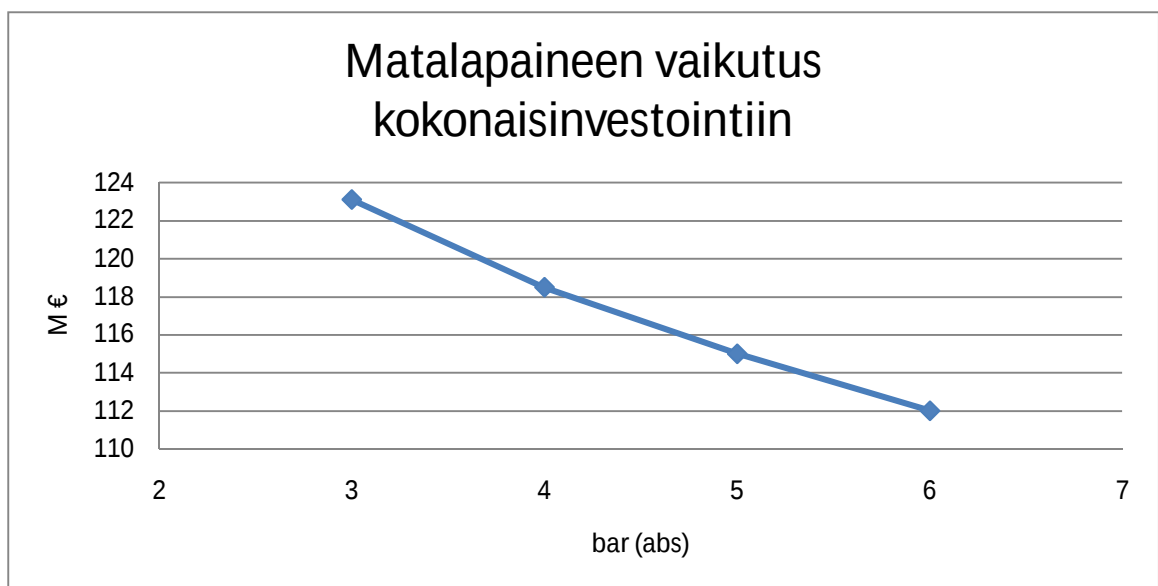
Edellä esitettyjen investointilaskelmien perusteella on laskettu laitoksen kokonaisinvestointiarvio matalapainehöyryn paineen suhteen. Investoinnin vuosittainen lyhennys on laskettu annuiteettimenetelmällä. Investoinnin takaisinmaksuaikana on käytetty 10 vuotta ja korkona 12 %, jotka ovat tyypillisiä arvoja laitteistoinvestoinneille.

Taulukossa 18 on esitetty edellä esitettyjen investointien perusteella lasketut kokonaisinvestointikustannukset sekä investoinnin vuosittainen lyhennys.

Taulukko 18. Painetasomuutoksen kokonaisinvestointikustannukset.

LP	[bar] (yp)	3	4	5	6
Putkisto	[1000 €]	9 830	9 300	8 760	8 130
Haihdutin	[1000 €]	31 520	29 210	27 780	26 770
Kuivauskone	[1000 €]	81 760	80 000	78 470	77 110
YHT.	[1000 €]	123 110	118 510	115 000	112 010
Korko	12 %				
Maksuaika [a]	10				
Lyhennys	[1000 €/a]	-21 790	-20 970	-20 350	-19 820

Kuvassa 26 on esitetty höyryn matalapainetason vaikutus laskettuihin kokonaisinvestointeihin.



Kuva 26. Matalapainetason vaikutus kokonaisinvestointeihin.

10 MATALAPAINETASON OPTIMAALINEN PAINE

Työssä laskettujen sähkön myyntitulojen ja investointien vuosilyhennysten avulla tapauksille laskettiin matalapainetason mukaiset nettotulot vuodessa. Matalapainetasojen mukaiset sähkön myyntitulot on esitetty aiemmin kappaleen 8.2 taulukossa 11 ja kokonaisinvestointikustannukset kappaleen 9.4 taulukossa 18. Taulukossa 19 on esitetty tapausten matalapainetason mukaiset investointien vuosilyhennykset sekä vuotuiset nettotulot. Liitteessä II esitettyyn taulukkoon on koottu laskentatapausten matalapainetason mukaiset investointikustannukset, vuotuiset sähkön myyntitulot, sekä vuotuiset nettotulot.

Taulukko 19. Matalapainehöyryn paineen mukaiset vuotuiset nettotulot.

Matalapainehöyryn paine [bar] (abs)	3	4	5	6
Investoinnin vuosilyhennys [1000 €/a]	-21 790	-20 970	-20 350	-19 820
	Nettotulot [1000 €/a]			
Perinteinen sellutehdas	-4 764	-5 286	-5 582	-5 890
Perinteinen sellutehdas + KK	9 291	8 874	8 501	8 265
Perinteinen sellutehdas +HPK	-20 898	-21 566	-22 133	-22 505
Perinteinen sellutehdas +HPK + KK	-6 733	-7 456	-8 086	-8 518
Moderni sellutehdas	-2 658	-2 934	-3 204	-3 358
Moderni sellutehdas + KK	11 642	11 283	10 951	10 727
Moderni sellutehdas + HPK	-19 225	-19 705	-20 247	-20 601
Moderni sellutehdas + HPK + KK	-4 805	-5 512	-6 125	-6 532

Taulukon tuloksien perusteella voidaan havaita painetason muutoksesta aiheutuvien investointien olevan niin suuria, että investointi on tappiollinen ensimmäisinä pitovuosina. Mikäli painetason muutoksen yhteydessä ei kuitenkaan uusita kuivurin puristin osaa, pienentyvät investointikustannukset 40 miljoonaa euroa. Tällöin tapausten vuotuiset nettotulot ovat taulukon 20 mukaiset. Tässä tapauksessa investointi on tappiollinen vain tehtaissa, joissa käytetään hienopaperikonetta, mutta ei kuorikattilaa. Tuloksista nähdään, että perinteisellä sellutehdas-hienopaperikoneintegraatissa, jossa on kuorikattila matalapainetason alentaminen on kannattavaa vain jos painetaso lasketaan alle 3 bar (abs).

Taulukko 20. Tehtaiden nettotulot ilman kuivurin puristin osan uusimista.

Matalapainehöyryn paine [bar] (abs)	3	4	5	6
Investointikustannukset	-14 710	-13 890	-13 280	-12 740
	Nettotulot [1000 €/a]			
Perinteinen sellutehdas	2 316	1 793	1 497	1 190
Perinteinen sellutehdas + KK	16 370	15 953	15 580	15 345
Perinteinen sellutehdas +HPK	-13 819	-14 487	-15 054	-15 425
Perinteinen sellutehdas +HPK + KK	346	-377	-1 007	-1 438
Moderni sellutehdas	4 421	4 146	3 876	3 721
Moderni sellutehdas + KK	18 722	18 362	18 030	17 806
Moderni sellutehdas + HPK	-12 146	-12 626	-13 168	-13 522
Moderni sellutehdas + HPK + KK	2 274	1 568	955	547

Saatujen nettotulojen perusteella voidaan todeta tapausten taloudellisesti optimaaliset matalapainehöyryn paineet. Optimaaliset matalapainehöyryn paineet on esitetty taulukossa 21. Taulukosta nähdään optimaalisten paineiden olevan tarkasteluvälin alhaisimmat (3 bar) kaikissa tapauksissa. Laskennassa huomattiin kuitenkin optimaalisen paineen olevan joissakin tapauksissa korkeampi mikäli painetason muutoksesta aiheutuva kuivauskoneen investointi pienentyy merkittävästi. Kuivauskoneen investointikustannus on tarkastelluista kohteissa suurin ja siksi merkittävä.

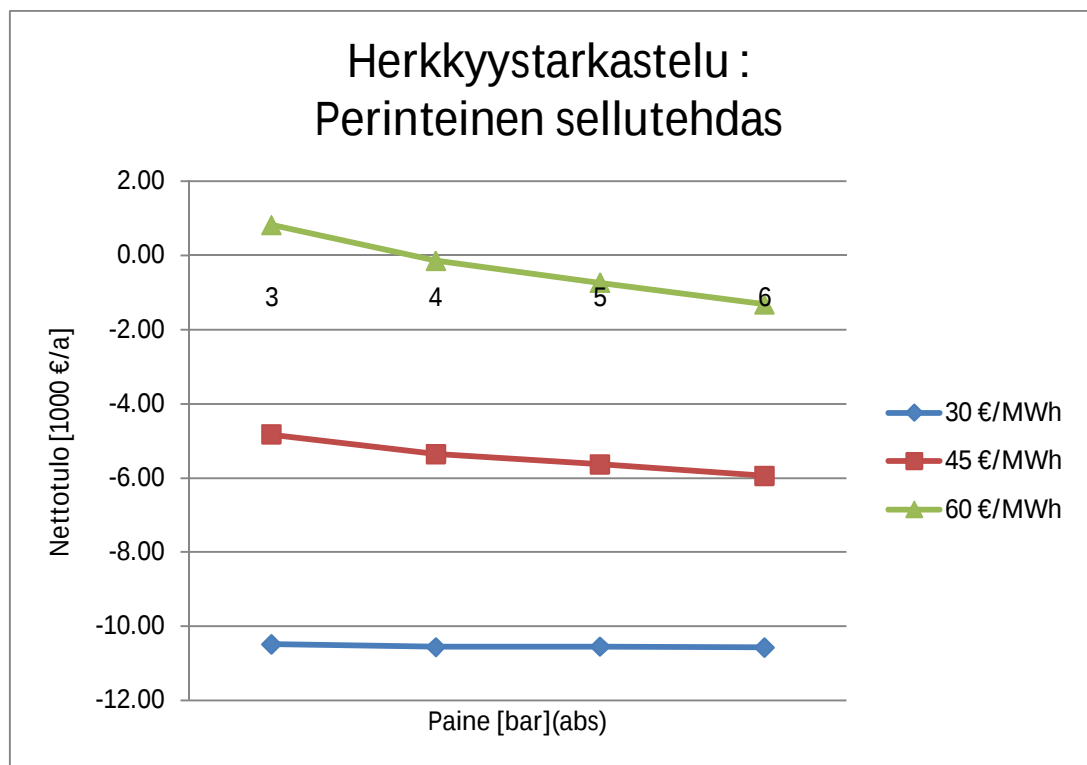
Taulukko 21. Matalapainehöyryn taloudellisesti optimaalisimmat paineet.

Tapaus	[bar](abs)
Perinteinen ST	3
Perinteinen ST + KK	3
Perinteinen ST + HPK	3
Perinteinen ST + KK+ HPK	3
Moderni ST	3
Moderni ST + KK	3
Moderni ST + HPK	3
Moderni ST + KK + HPK	3

11 HERKKYYSTARKASTELU

Työssä tehtiin suuntaa antava herkkyystarkastelu sähkön hinnan vaikutuksesta matalapainehöyryn optimaalisiin paineisiin. Sähkön hinnan vaikutusta tarkasteltiin sen ollessa 30 €/MWh, 45 €/MWh ja 60 €/MWh. Alustava tarkastelu tehtiin perinteisen sellutehtaan, perinteisen sellutehtaan, jossa kuorikattilan sekä perinteisen sellutehdas-hienopaperikoneintegraatin, jossa kuorikattila mukaisille tapauksille. Matalapainehöyryn optimaalinen paine oli kaikilla sähkön hinnoilla, kaikissa tarkastelluissa tapauksissa, 3 bar. Mikäli investointikustannukset muuttuvat voi herkkyystarkastelukin kuitenkin antaa erilaiset tulokset.

Kuvassa 27 on esitetty sähkönhinnan muutoksen vaikutus tehtaan nettotuloihin perinteisellä sellutehtaalla. Kuvasta nähdään painetason valinnalla olevan suurin merkitys tehtaan taloudelle kun sähkön hinta on korkea. Sähkön hinnan ollessa 60 €/MWh voidaan muuttamalla matalapainetaso 6 bar:sta 3 bar:iin aikaansaada yli 2 miljoonaa euroa suuremmat tulot. Kuvasta 27 nähdään myös tehtaan kannattavuuden lisääntyvän merkittävästi sähkön hinnan noustessa, koska sähkön myynnistä saatavat tulot kasvavat.



Kuva 27. Sähkön hinnan vaikutus perinteisen sellutehtaan sähkön myyntiin.

12 RINNAKKAISTEN HÖYRYLINJOJEN RAKENTAMINEN

Työssä tarkasteltiin toisen matala- ja välipainelinjaston rakentamisen kannattavuutta perinteiselle sellutehtaalle, jossa käytössä on kuorikattila. Laskennassa käytetyt arvot on esitelty kappaleissa 5.4 ja 5.5. Seuraavissa kappaleissa on esitetty taselaskennan tulokset matala- ja välipainehöyryvirtojen korvaamisesta matalampi paineisella höyryllä, sekä uusien linjastojen investointiarviot.

12.1 Toisen matalapainelinjan rakentamisen kannattavuus

Toisen matalapainelinjan rakentamisen kannattavuutta tarkasteltiin muodostamalla tase perinteiselle sellutehtaalle, jossa käytetään kuorikattilaa. Tehtaalla käytettävä 5 bar (abs) matalapainehöyryvirta korvattiin osittain tai kokonaan 3.5 bar (abs) matalapainehöyryllä haihduttamalla, kuivurilla ja syöttöveden esilämmittimellä. Tapauksille muodostettiin investointiarviot, jossa kuivurille ja haihduttamolle oletettiin rakennettavan omat putkistot. Investointeja arvioitiin höyryn massavirran mukaan mitoitettavan putkiston osalta. Investointiarviossa ei ole otettu huomioon painetason muutoksesta aiheutuvia lisäinvestointeja haihduttamossa tai kuivauskoneessa. Lisäksi painetason muutoksesta syöttöveden esilämmittimellä arvoitiin aiheutuvan 2 500 000 €:n lisäinvestointi. Koska haihduttamo sijaitsee voimalaitoksen vieressä, sinne rakennettavan putkiston investointikustannukset ovat huomattavasti pienemmät kuin kuivauskoneelle rakennettavan. Tämän vuoksi matalampi paineisella höyryllä pyrittiin korvaamaan ensisijaisesti haihduttamon matalapainehöyryn tarve. Haihduttamolle rakennettavan siirtoputkiston pituudeksi määritettiin 100 metriä ja kuivauskoneelle 500 metriä. Siirtoputkistojen pituuden arviotiin olevan 25 % rakennettavan putkiston kokonaispituudesta. Investointiarvio on laskettu työssä aiemmin kuvatulla tavalla 12 % korolla ja 10 vuoden takaisin maksuajalla.

Taulukossa 22 on esitetty taselaskennan tuloksena saadut tehtaan vuosittaiset sähkön myyntitulot sekä toisen matalapainelinjan rakentamisesta aiheutuvat investointikustannukset. Taulukon 22 ensimmäisessä tapauksessa matalampi paineisella

3.5 bar (abs) höyryllä on korvattu vain osittain haihduttamon höyryvirta ja tapauksessa 2 kokonaan. Tapauksissa 3 ja 4 on korvattu vastaavalla tavalla kuivurin höyryvirta. Koska tapauksen 3 investointeihin kuuluu myös kuivauskoneelle rakennettava höyryputkisto, jäävät tehtaan vuotuiset nettotulot tappiollisiksi. Tapauksessa 5 alemmalla 3.5 bar (abs) matalapainehöyryllä on korvattu haihduttamon, kuivauskoneen sekä syöttöveden esilämmittimen matalapainehöyryn tarve. Taulukosta nähdään, että haihduttamolle rakennettavan 3 bar (abs) matalapainelinjan rakentaminen tulee kannattavaksi höyryvirran ylittäessä 10 kg/s. Myös kuivauskoneelle rakennettavan oman matalapainehöyrylinjan rakentaminen on kannattavaa kun turbiinilta otettavan 3 bar (abs) kokonais matalapainehöyryvirta on suurempi kuin 37 kg/s.

Taulukko 22. Toisen matalapainelinjan rakentamisen kannattavuus.

	Höyryn massavirta [kg/s]		Sähkön myyntitulo	Investointi- kustannus	Investoinnin vuosilyhennys [1000 €/a]	Nettotulo	Nettotulon muutos
	LP 3.5 bar	LP 5 bar					
Perinteinen ST + KK	0	50	28 860	0	-0	28 860	-
1.	10	41	28 940	420	-74	28 860	0
2.	20	34	29 050	535	-94	28 950	90
3.	27	24	29 330	2 637	-466	28 830	-30
4.	37	13	29 560	3 402	-602	28 960	100
5.	50	0	29 780	5 902	-1 044	28 730	-130

Laskennan tuloksista voidaan päätellä, että korvaamalla haihduttamon matalapainehöyryn tarve 3.5 bar (abs) höyryllä voidaan saada 90 000 € suuremmat sähkön myyntitulot vuodessa. Mikäli lisäksi kuivurin höyryvirta korvataan matalampi paineisellä höyryllä sähkön myyntitulot ovat noin 100 000 € suuremmat vuodessa kuin lähtötilanteessa. Kuivurille rakennettavan putkilinjan investointikustannukset voivat kuitenkin olla huomattavasti laskettua pienemmät, jolloin investointi on kannattavampi. Tuloksista voidaankin päätellä, että toisen matalapainehöyrylinjan rakentaminen on kannattavaa ensisijaisesti haihduttamolle. Myös kuivurin lisääminen uuteen matalapainehöyryverkkoon tuo vain vähäisen lisäyksen sähkön myyntituloihin. Rinnakkaisen matalapainelinjan rakentaminen kannattanee parhaiten turbiinin, haihduttamon, kuivauskoneen tai syöttöveden esilämmittimen uusimisien yhteydessä. Tällöin painetason muutoksesta aiheutuvat investoinnit voidaan minimoida. Taulukon 22 tuloksista nähdään, että

syöttöveden esilämmittäminen matalampi paineisella höyryllä ei ole kannattavaa suuresta investointikustannuksesta johtuen.

12.2 Toisen välipainelinjan rakentamisen kannattavuus

Työssä selvitettiin kuinka suuri välipainehöyryvirran on oltava keittimelle, jotta oman höyrylinjan rakentaminen alemmalla painetasolla tulee kannattavaksi. Tarkastelussa keittimen 13 bar (abs) välipainehöyry korvattiin 9 bar (abs) välipainehöyryllä. Laskennassa käytetyt arvot esiteltiin aiemmin kappaleessa 5.5. Taulukossa 23 on esitetty laskennan tulokset putkiston mitoituksista, sekä investointiarviot. Investointiarvioissa on huomioitu putkiston investointikustannukset sekä välioton rakentamisesta johtuva 200 000 € lisäinvestointi turbiinilla.

Taulukko 23. Välipaineputkiston investointikustannukset.

Massavirta (9 bar)	Halkaisija	Seinämän paksuus	Paino	Putkiston hintaa	Kokonais- kustannus	Lyhennys vuodessa
[kg/s]	[mm]	[mm]	[kg]	[€]	[€]	[€]
0	0	0.0	0	0	0	0
1	100	1.7	3 283	20 000	-220 000	-39 000
2	140	2.4	6 566	40 000	-240 000	-42 000
3	170	2.9	9 850	59 000	-259 000	-46 000
4	200	3.4	13 133	79 000	-279 000	-50 000
6	240	4.1	19 699	118 000	-318 000	-56 000
8	280	4.8	26 266	158 000	-358 000	-63 000
10	315	5.3	32 832	197 000	-397 000	-70 000

Taulukossa 24 on esitetty taselaskennan tulokset uuden välipainetason rakentamisen vaikutuksista sähkön myyntivoittoon ja nettotuloihin investionnin vuosilyhennyksen jälkeen. Tuloksista voidaan nähdä, että keittimen välipainetason muuttaminen 13 bar (abs):sta 9 bar (abs):aan on kannattavaa kun höyryvirta on suurempi kuin 4 kg/s. Muutettaessa keitin toimimaan kokonaan 9 bar (abs) välipainehöyryllä voidaan saada noin 60 000 € suuremmat sähkön myyntitulot vuodessa. Uuden turbiiniväliotun rakennuskustannuksista johtuen rinnakkaisen välipainelinjan rakentaminen on

kannattavampaa mikäli myös haihduttamo voidaan muuttaa toimimaan matalammalla välipainehöyryn tasolla.

Taulukko 24. Välipaineputkiston investoinnin kannattavuus

Massavirta (9 bar)	Sähkön tuotanto	Sähkön kulutus	Sähköä myyntiin	Sähkön myyntivoitto	Sähkön myynnin muutos	Nettotulon muutos
[kg/s]	[MW]	[MW]	[MW]	[M€]	[€]	[€]
0	93.61	52.36	41.25	15.65	0	0
1	93.65	52.36	41.29	15.67	15 000	-24 000
2	93.69	52.37	41.32	15.68	27 000	-16 000
3	93.73	52.37	41.36	15.69	42 000	-4 000
4	93.77	52.37	41.40	15.71	57 000	8 000
6	93.85	52.38	41.47	15.73	83 000	27 000
8	93.91	52.40	41.51	15.75	99 000	35 000
10	93.99	52.40	41.59	15.78	129 000	59 000

13 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tarkasteltiin sellutehtaan höyrytasojen paineiden vaikutusta tehtaan sähköntuotantoon ja -kulutukseen sekä määritettiin matalapainehöyryn optimaaliset paineet suomalaisille sellutehdastyypeille. Sellutehdastyypeille muodostettiin energiataseet sekä laskettiin painetasojen muutosten mukaiset investointikustannusarviot.

Laskennan mukaan kaikilla sellutehdastyypeillä matalapainehöyryn paineeksi kannattaa valita alhaisin mahdollinen paine. Näin ollen uusilla tehtailla matalapainetasoksi on taloudellisesti kannattavinta valita laitteiston vaatimusten mukaisesti alhaisimmat paineet. Suurista investointikustannuksista johtuen matalapainetason alentaminen ei ole kannattavaa kaikissa jo rakennetuissa tehtaissa. Painetason muuttamisella voidaan lisätä tehtaan tuloja kuitenkin tehdastyypeissä, joissa käytetään kuorikattilaa, mutta ei hienopaperikonetta. Muissa tehdastyypeissä tehty investointi on tappiollinen ensimmäisinä pitovuosina. Mikäli painetason muuttamisen yhteydessä ei kuitenkaan uusita kuivurin puristin osaa, on investointi kannattava. Tällöin painetason muuttamisesta aiheutuvat investointikustannukset ovat merkittävästi pienemmät. Näin ollen matalapainetason alentaminen aiheuttaa tehtaalle tappiota ensimmäisinä pitovuosina vain sellaisissa sellutehdas-hienopaperikoneintegraateissa, joissa ei ole kuorikattilaa. Matalapainetason alentaminen on todennäköisesti kannattavaa kaikilla sellutehdastyypeillä mikäli se tehdään turbiinin tai suurimpien höyryn kuluttajien uusimisen yhteydessä. Tällöin ylimääräisiä investointeja ei merkittävästi synny.

Matalapainetason alentamisen lisäksi sähköön myyntituloja voidaan lisätä tekemällä toinen turbiiniin väliotto alhaisemmalla matalapainetasolla ja rakentamalla oma matalapainelinja suurimmille matalapainehöyryn kuluttajille. Laskelmien mukaan oman matalapainelinjan rakentaminen on kuitenkin kannattavaa ensisijaisesti vain lipeähaihduttamolle, sillä linjaston investointikustannukset ovat tällöin pienimmät. Putkiston suurien investointikustannusten vuoksi oma matalapaineputkisto kannattanee rakentaa kuivauskoneelle ainakin laajempien talteenottolinjastojen uusimisen yhteydessä. Oma matalapainehöyrylinja kannattanee rakentaa myös syöttöveden esilämmittimelle ainakin

esilämmittimen uusimisen yhteydessä. Muussa tapauksessa oman matalapainelinjan rakentamisesta syöttövedenesilämmittimelle aiheutuu liian suuret muutostkustannukset.

Laskennan perusteella myös välipainetason alentamisella voidaan lisätä tehtaan sähkönmyyntituloja. Välipainetason alentamisesta aiheutuvat investointikustannukset ovat huomattavan pieniä. Mikäli välipainehöyryn painetta nostetaan keittimelle höyryjektorilla tai vaiheiden välissä käytetään boosteripumppua, voidaan tehtaalla käyttää huomattavasti matalampaa välipainehöyrytasoa. Joissakin tapauksissa välipainehöyryä voidaan ottaa keittimelle ja haihduttamolle myös reduktioventtiilin kautta korkeammasta paineesta. Työssä tehtyjen laskelmien perusteella myös rinnakkaisen välipainelinjaston rakentaminen alemmalla painetasolla on kannattavaa. Oman välipainelinjaston rakentaminen on kannattavaa ainakin keittimelle.

Työssä lasketun suuntaa antavan herkkyytstarkastelun mukaan sähkön myyntitulojen kasvu painetasoa muutettaessa on voimakkaampi kun sähkön markkinahinta on korkea. Työssä tehdyt laskelmat on laskettu Nord Pool Spot -sähköpörssin kesäkuun 2010 hinnan mukaan. Sähkön hinta on kuitenkin jo tämän jälkeen noussut, ja painetason muutoksista saatava hyöty on suurempi.

Työssä tehdyissä investointilaskelmissa huomioitiin vain putkiston, haihduttamon ja kuivurin investointikustannukset. Tämän vuoksi lisätutkimus painetason alentamisen vaikutuksista kaikkiin prosesseihin ja tarkempien investointilaskelmien tekeminen on tarpeellista. Lisäksi on tarpeellista selvittää höyrytasojen alentamisen vaikutus tehtaan muihin lämmönsiirtimiin, lauhduttimiin ja esilämmittimiin. Alhaisimpien mahdollisten höyrytasojen määrittämiseksi tulisi myös selvittää prosessien ja laitteiden tarvitsemat höyryn vähimmäispaineet.

14 YHTEENVETO

Metsäteollisuus on eräs suurimmista energian kuluttajista Suomessa. Suuren kulutuksen vuoksi tehtaiden energiatehokkuudella ja energian hinnalla on merkittävä vaikutus tehtaiden talouteen. Voimalaitospolttoaineiden hinnat ovat yli kaksinkertaistuneet viimeisen 15 vuoden aikana ja sähkön hinta on yli nelinkertaistunut Suomessa viimeisen 10 vuoden aikana. Polttoaineiden ja sähkön hinnan noususta sekä sellun hinnan laskusta ja taloudellisesta taantumasta johtuen suomalaiset tehtaot ovat joutuneet tekemään mittavia säästöjä, ja tehtaota on jouduttu lakkauttamaan. Tulevaisuudessa energian tuotanto voi olla vielä tärkeämmässä roolissa tehtaiden kilpailukyvyn kannalta, mikäli selluteollisuus ei kuulu päästövapaisiin aloihin. Tehtaiden suuren energiankulutuksen vuoksi sähkön tuotannon lisääminen ja energiatehokkuuden parantaminen ovat tehokkaita keinoja tehtaiden kilpailukyvyn parantamiseksi. Viime vuosikymmeninä tehtaiden energiatehokkuus on parantunut merkittävästi muun muassa keittovaiheen energian kulutuksen pienenemisen, kuivauksen tehostumisen, lipeähaihduksen vaiheluvun lisääntymisen sekä jätelämmön talteenoton kehittymisen myötä. (Kivistö 2010, 1–3) Tehtaiden sähkön tuotanto on myös lisääntynyt kattiloiden kehittymisen myötä tuorehöyryn paineiden noustua.

Eräs keino tehtaan sähkön tuotannon lisäämiseksi on höyrytasojen paineiden alentaminen tehtaiden tuotantoprosesseissa. Tällöin höyry voidaan paisuttaa turbiinissa matalampaan paineeseen ja lisätä näin sähkön tuotantoa. Alhaisemmat höyryn paineet kuitenkin lisäävät tehtaan investointikustannuksia putkistojen ja lämmönsiirtopintojen kokojen kasvaessa. Alan kirjallisuudessa ja tutkielmissa ei ole yleisohjetta paineen alentamisen vaikutuksista sellutehtaan talouteen ja sähkön tuotantoon. Tämän diplomityön tavoitteena on määritellä tyypillisille, Suomeen sopiville, sellutehdastyypeille optimaaliset matalapainehöyryn paineet sekä tutkia höyrytasojen paineiden alentamisen vaikutusta tehtaan energiantuotantoon. Työssä tarkastellaan välipainehöyryn ja nuohoushöyryn paineiden alentamisen vaikutusta sellutehtaan sähkön tuotantoon. Lisäksi työssä tutkitaan sähkön tuotannon lisäämismahdollisuuksia korvaamalla joissakin tuotantoprosesseissa matala- tai välipainehöyry matalampi paineisella höyryllä ja rakentamalla turbiinilta oma höyrylinja prosessille.

Tässä työssä erilaisille Suomeen sopiville tehdastyypeille muodostettiin energiataseet, joiden avulla määritettiin tehtaiden energian tuotanto ja kulutus eri matala- ja välipainetasoilla. Lisäksi työssä laskettiin matalapainetasojen mukaiset investointiarviot. Energiataseiden ja investointiarvioiden avulla tehdastyypeille määritettiin optimaaliset matalapainehöyryn paineet. Tasetarkastelun ja investointikustannusarvioiden avulla tutkittiin myös lipeähaihduttamolle, kuivauskoneelle ja syöttöveden esilämmittimelle rakennettavan oman matalapainelinjaston kannattavuutta sekä oman välipainelinjaston rakentamisen kannattavuutta keittimelle ja haihduttamolle. Työn taselaskennat suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston Millflow-laskentasovelluksella. Investointiarvioiden laskemisessa hyödynnettiin tietoja viimeisimmistä talteenottolinjastojen ja kuivauskoneiden uusimisprojekteista.

Laskennan tulosten mukaan sellutehtaiden matalapainetason optimaalinen höyrynpaine on kaikilla tehdastyypeillä vertailtujen arvojen alhaisin. Näin ollen sellutehtaan matalapainetaso on kannattavaa valita prosessien ja laitteiston vaatimusten mukaan alhaisimmaksi mahdolliseksi. Laskentatulosten mukaan matalapainetason alentaminen on kannattavaa tehdä vanhoilla tehtailla vain tehdastyypeillä, joissa käytetään kuorikattilaa mutta ei hienopaperikonetta. Mikäli kuitenkin paineen alentaminen voidaan tehdä ilman kuivauskoneen uuden puristinosan investointia, on se kannattavaa myös muilla tehdastyypeillä. Tehtaan sähkön tuotannon lisääminen on kannattavaa myös rakennettaessa turbiinilta oma matalapainelinjasto alhaisemmalla paineella haihduttamolle. Lisäämällä myös kuivauskone tähän painelinjastoon saadaan aikaan vain vähäinen taloudellinen hyöty. Laskentatulosten mukaan höyryn paineen alentaminen ja oman höyrylinjaston rakentaminen syöttöveden esilämmittimelle ei ole kannattavaa painetason muutoksesta aiheutuvien esilämmittimen investointikustannuksien suuruudesta johtuen. Painetason muuttaminen syöttöveden esilämmittimellä voi kuitenkin olla kannattava esilämmittimen uusimisen yhteydessä. Työn laskennassa ei otettu kantaa välipainehöyryn paineen muuttumisen vaikutuksiin tehtaan investointikustannuksissa. Välipainehöyryn ja nuohoushöyryn paineen alentamisella voidaan kuitenkin aikaansaada mittavia säästöjä. Välipaineputkiston ja nuohoushöyrysuuttimien investointien oletettiin olevan verrattain pieniä saavutettuun hyötyyn verrattuna. Tehtyjen investointikustannusarvioiden mukaan uuden välipainelinjaston rakentaminen alhaisemmalla painetasolla tulee kannattavaksi jo varsin pienellä höyrynvirralla, ainakin lipeähaihduttamolle tai keittimelle.

Tulosten perusteella sekä matala että välipainetasot kannattaa valita laitteiston mukaan alhaisimmiksi mahdollisiksi. Haihduttamo ja keitin ovat suurimmat välipainehöyryn kuluttajat. Välipainetaso voidaan valita jopa keittimen ja haihduttamon vaatimaa painetasoa alhaisemmiksi mikäli paineen nostamiseksi kyseisille prosesseille voidaan käyttää höyryejektoria. Näin voidaan aikaan saada suuria säästöjä. Keittimen painetasovaatimusta voidaan myös hiukan alentaa käyttämällä boosteripumppua vaiheiden välillä.

Työssä tehdyn suuntaa antavan herkkyystarkastelun mukaan paineen alentamisella aikaansaatu sähkön myyntitulojen kasvu on voimakkaampi kun sähkön markkinahinta on korkea. Sähkön hinta on noussut Suomessa diplomityön laskelmien tekemisen jälkeen. Sähkön hinnan noustua painetason muuttaminen on tullut kannattavammiksi kaikilla sellutehdastyypeillä.

Työssä tehdyt investointiarviot on tehty vain putkiston, haihduttamon ja kuivauskoneen osalta. Tämän vuoksi tarkemman lisätutkimuksen tekeminen höyryn painetasojen vaikutuksesta tehtaan prosessien investointikustannuksiin on tarpeellinen. Lisäksi on tarpeellista selvittää painetasojen muutoksen vaikutukset sellutehtaan muihin lämmönsiirtimiin, lauhduttimiin ja esilämmittämiin sekä selvittää laitteiston asettamat vaatimukset höyryn vähimmäispaineille.

LÄHTEET

Auvinen Janne 02.04.2004. Paperitehtaan lämpöenergian hallinta. Diplomityö. Hamina. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energia- ja ympäristötekniikan osasto.

Backman Jari et al. 2006. Kaasudynamiikka (BH40A1100)- kurssin luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikan osasto, Virtaustekniikan laboratorio.

Cymic boilers-esite. [www-tuotedokumentti]. Metso. [Viitattu: 18.06.2010]. Saatavissa: [http://www.metso.com/energy/boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090517-22575-9DCEB/\\$File/CYMIC.pdf](http://www.metso.com/energy/boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090517-22575-9DCEB/$File/CYMIC.pdf)

Energian hinnat A [verkkojulkaisu]. ISSN=1799-7984. 1. vuosineljännes 2011, Liitekuvio 4. Voimalaitospolttoaineiden hinnat sähköntuotannossa . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 18.7.2011]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/ehi/2011/01/ehi_2011_01_2011-06-22_kuv_004_fi.html

Energian hinnat B [verkkojulkaisu]. ISSN=1799-7984. 1. vuosineljännes 2011, Liitekuvio 6. Nord Pool Spot -sähköpörssin kuukausikeskiarvot . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 18.7.2011]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/ehi/2011/01/ehi_2011_01_2011-06-22_kuv_006_fi.html.

Gullichsen Johan, Fogelholm Carl-Johan. 1999. Papermaking science and Technology, Book 6 A-B, Chemical Pulping. ISBN 952-5216-00-4

Hsieh, J.S., Wang, T. 2005 [Tappi- verkkojulkaisu] On the Relationship Between Pulping Temperature and Kraft Pulp Kappa Uniformity at the Single Fiber Level, 2005 Engineering, Pulping & Environmental Conference. [Viitattu: 29.07.2010]. Saatavissa: <http://www.tappi.org/Bookstore/Technical-Papers/Conference-Papers/2005/05EPE>

Huhtinen Markku et al. 2008. Voimalaitostekniikka. Opetushallitus. ISBN 978-952-13-3476-4.

Huhtinen et al. 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki. ISBN 951-37-3360-2

Kiiskilä Erkki, Esko Mattelmäki. 1992. Ahlstrom recovery processes- esite.

Kivistö Aija. 2010. 3. Energian kulutus ja hankinta. BH61A0500 Puunjalostusteollisuuden energiatalous- kurssin luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiatekniikan osasto.

Kivistö Aija. 2008. 2. Sulfaattisellun valmistus. BH61A0500 Puunjalostusteollisuuden energiatalous- kurssin luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiatekniikan osasto.

KnowPulp 6.0. [www-oppimisympäristö]. Päivitetty 12/2007. [Viitattu: 25.08.2010] Saatavissa: <http://kansi.cc.lut.fi/knowpulp/suomi/kps/ui/instructions/participants/ui.htm>

Kuvio 10. [Tilastokeskuksen www-sivuilla]. Päivitetty 24.3.2010, [Viitattu: 31.05.2010]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/ehkh/2009/04/ehkh_2009_04_2010-03-24_kuv_010.html

Larjola Jaakko 25.10. 2002. Turbokoneet, suunnittelun ja laskennan perusteet. Osa 1. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Low Nox Retrofit. [Andritzin www-sivuilla]. 2010 [Viitattu: 18.06.2010]. Saatavissa: <http://www.andritz.com/ANONID341E2AD94B1C0F0C/ppp/ppp-processes/ppp-processes-chemical-recovery/ppp-processes-chemrec-recoveryboiler/ppp-chemicalrecovery-recbo-lownox.htm>

Liikevaihto. [Metsäteollisuuden tietopalvelu www-sivuilla]. Päivitetty: 21.06.2011. [Viitattu: 18.07.2011] Saatavissa: <http://www.metsateollisuus.fi/tilastopalvelu2/tilastokuviot/Talous/Forms/DispForm.aspx?ID=38&RootFolder=%2ftilastopalvelu2%2ftilastokuviot%2fTalous%2fJulkinen-FI&Source=http%3A%2F%2Fwww.metsateollisuus.fi%2Ftilastopalvelu2%2Ftilastokuviot%2FTalous%2FForms%2FAllItems.aspx>

Metsäteollisuus. [Metsäteollisuuden tietopalvelu www-sivuilla]. 11.10.2010. [Viitattu: 13.06.2011]. Saatavissa: http://www.metsateollisuus.fi/tilastopalvelu2/tilastokuviot/Energia/Julkinen-FI/d10Energia_023.ppt

Nieminen Markus. 2007. Energy utilisation in kraft pulp mills. Helsinki: Helsinki University of technology, Department of mechanical engineering.

Pöyry Oy. 02.11.2006. Gunns Bell Bay Pulp Mill General Presentation.

Sihvo Liisa (Toim.). 1969. Tekniikan käsikirja 4: Sähkötekniikka, Voimalaitos- ja lämpötekniikka. Jyväskylä: K.J Gummerus Osakeyhtiön Kirjapainossa.

Pipe and pipe sizing. [Spirax Sarcon www- sivuilla]. Päivitetty 2010,
[Viitattu: 15.06.2010] Saatavissa: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/steam-distribution/pipes-and-pipe-sizing.asp>

Suomen metsäteollisuus. [Metsäteollisuuden www-sivuilla]. Päivitetty 07.04.2011.
[Viitattu: 18.07.2011] Saatavissa:

<http://www.metsateollisuus.fi/tilastopalvelu2/tilastokuviot/Perustietoa/Forms/DispForm.aspx?ID=79&RootFolder=%2ftilastopalvelu2%2ftilastokuviot%2fPerustietoa%2fJulkinen%2dFI&Source=http%3A%2F%2Fwww%2Emetsateollisuus%2Efi%2Ftilastopalvelu2%2Ftilastokuviot%2FPerustietoa%2FForms%2FAllItems%2Easpx%3FRootFolder%3D%252Ftilastopalvelu2%252Ftilastokuviot%252FPerustietoa%252FJulkinen%252DFI>

Teir Sebastian 2003. Steam Boiler Technology. Espoo. ISBN: 951-22-6759-4

Suomen virallinen tilasto (SVT): Teollisuuden energiankäyttö [verkkojulkaisu].
ISSN=1798-775X. 2009. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 18.7.2011].

Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/tene/2009/tene_2009_2010-10-27_tie_001_fi.html.

Sähkönkulutus. [Metsäteollisuuden www-sivuilla]. Päivitetty 30.06.2011

[Viitattu: 18.07.2011]. Saatavissa:

<http://www.metsateollisuus.fi/tilastopalvelu2/tilastokuviot/Energia/Forms/DispForm.aspx?ID=20&RootFolder=%2ftilastopalvelu2%2ftilastokuviot%2fEnergia%2fJulkinen-FI&Source=http%3A%2F%2Fwww.metsateollisuus.fi%2Ftilastopalvelu2%2Ftilastokuviot%2FEnergia%2FForms%2FAllItems.aspx>

Tilastot. [Metsäteollisuuden www-sivuilla]. Päivitetty 19.05.2011

[Viitattu: 18.07.2011]. Saatavissa:

<http://www.metsateollisuus.fi/Infokortit/metsateollisuusnumeroina/Sivut/default.aspx?imported=True#>

Vakkilainen Esa. Esitelmä. 04.01.2007. Bell Bay Pulp Mill Recovery Presentation. Pöyry Oy.

- Vakkilainen Esa. 2008. Alternative fuels for lime kilns. Pöyry Forest Industry.
- Vakkilainen Esa. 26.05.2010. Keskustelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Vakkilainen Esa. 28.06.2010. Keskustelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Vakkilainen Esa. 14.07.2010. Keskustelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Vakkilainen Esa. 19.08.2010. Keskustelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Vakkilainen Esa. 09.06.2011 Keskustelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Virkola Nils-Erik. 1983. Puumassan valmistus II osa 1. Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. ISBN 951-99117-3-1
- Voimalaitosopin perusteen (BH50A0200) – Kurssin laskuharjoitus 2. Syksy 2007. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Energiatekniikan osasto.

Sähköpostikeskustelu sellutehdasprosessien painetasovaatimuksista.

From: peter.ryder@poyry.com
Sent: 16. helmikuuta 2011 16:45
To: Esa Vakkilainen
Subject: Re: minimum medium pressure level

Esa,

I am working in Canada at the moment with Pertti Winter who I shall ask his advice. I will get back to you with his opinion also.

During the gunns project we investigated this with Andritz and Kvaerner and we came up with the cooking plant minimum of about 9 bar.

regards

From: "Esa Vakkilainen" <Esa.Vakkilainen@lut.fi>
To: <peter.ryder@poyry.com>
Date: 16/02/2011 08:25 PM
Subject: minimum medium pressure level

Peter

Do you have any opinion on the minimum possible medium pressure level in pulp mill. We want to make it low so the electricity is maximized. But there are probably limitations in cooking and in bleaching. What are they?

Esa Vakkilainen
Professor - Sustainable energy systems
phone +358 - 40 - 357 8684
fax +358 - 5 - 621 6399
Lappeenranta University of Technology
Energy Technology
P.O. Box 20, FIN-53851 LAPPEENRANTA

Sähköpostikeskustelu sellutehdasprosessien painetasovaatimuksista.

From: Tuominen Kari [Kari.Tuominen@andritz.com]
Sent: 3. maaliskuuta 2011 9:34
To: Esa Vakkilainen; Tikka Petri
Cc: Heinola Marja
Subject: RE: sellutehtaan painetasot

Terve vielä Esa,

toinen mahdollisuus tuon happivaiheen painetasoasian ratkaisemiseksi on käyttää boosteripumppua reaktoreiden välillä. Tällöin paineeksi riittää 7 bar.

T: Kari

-----Original Message-----

From: Tuominen Kari
Sent: 01 March 2011 16:40
To: 'Esa Vakkilainen'; Tikka Petri
Cc: Heinola Marja
Subject: RE: sellutehtaan painetasot

Terve Esa,

keittämön tarvitsema painetaso on n. 7 bar (g) lehtipuulla ja 9 bar(g) havulla. Happivaihe on edelleen se, joka kuitulinjalla tarvitsee korkeimman paineen, 10-11 bar(g) riippuen vähän järjestelyistä. Tämä saattaa olla halvinta tehdä ejektorilla, jos lopputehdas pärjää pienemmällä ja saa siitä kovia säästöjä.

T: Kari

Sähköpostikeskustelu sellutehdasprosessien painetasovaatimuksista.

-----Original Message-----

From: Esa Vakkilainen [mailto:Esa.Vakkilainen@lut.fi]

Sent: 16 February 2011 11:21

To: Tikka Petri; Tuominen Kari

Cc: Heinola Marja

Subject: sellutehtaan painetasot

Tervehdys

Ohessa nykyinen versio projektista sellutehtaan painetasot. Tarkennamme vielä taloudellisia tarkasteluita.

Soodakattilayhdistyksen pyynnöstä lähestymme kysymyksillä

- mikä on keiton kannalta alin mahdollinen välipaine
- mikä on valkaisun kannalta alin mahdollinen välipaine

Vastauksia näihin ja muihinkin mahdollisiin kysymyksiin otamme vastaan mielellämme.

Esa Vakkilainen

Professor - Sustainable energy systems

phone +358 - 40 - 357 8684

fax +358 - 5 - 621 6399

Lappeenranta University of Technology

Energy Technology

P.O. Box 20, FIN-53851 LAPPEENRANTA

Matalapainetason mukaiset kannattavuuslaskelmat.

			Matalapainehöyryn paine [bar] (abs)			
			3	4	5	6
Investointi kustannukset	(10a, 12%)	[1000€/a]	-15540	-13890	-12880	-12130
Perinteinen ST	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	17025	15687	14772	13935
	Nettotulo	[1000€/a]	1 483	1 793	1 896	1 801
Perinteinen ST + kk	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	31080	29847	28855	28089
	Nettotulo	[1000€/a]	15538	15 953	15 979	15 956
Perinteinen ST + HPK	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	890	-593	-1779	-2681
	Nettotulo	[1000€/a]	-14 651	-14 487	-14 655	-14 814
Perinteinen ST + kk+ HPK	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	15055	13518	12268	11306
	Nettotulo	[1000€/a]	-487	-377	-608	-827
Moderni ST	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	19130	18040	17150	16466
	Nettotulo	[1000€/a]	3 589	4 146	4 274	4 332
Moderni ST + kk	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	33431	32256	31305	30551
	Nettotulo	[1000€/a]	17 889	18 362	18 429	18 417
Moderni ST + HPK	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	2564	1268	107	-777
	Nettotulo	[1000€/a]	-12 978	-12 626	-12 769	-12 910
Moderni ST + kk + HPK	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	16983	15461	14229	13292
	Nettotulo	[1000€/a]	1 442	1 568	1 353	1 158

Matalapainetason mukaiset kannattavuuslaskelmat tapauksessa, jossa kuivurin puristin osaa ei uusita painetason muutoksen yhteydessä.

			Matalapainehöyryn paine [bar] (abs)			
			3	4	5	6
Investointi kustannukset	(10a, 12%)	[1000€/a]	-14 710	-13 890	-13 280	-12 740
Perinteinen ST	sähkön myynti	[1000€/a]	17 025	15 687	14 772	13 935
	Nettotulo	[1000€/a]	2316	1793	1497	1190
Perinteinen ST + kk	sähkön myynti	[1000€/a]	16 370	15 953	15 580	15 345
	Nettotulo	[1000€/a]	16 370	15 953	15 580	15 345
Perinteinen ST + HPK	sähkön myynti	[1000€/a]	890	-593	-1 779	-2 680
	Nettotulo	[1000€/a]	-13 819	-14 487	-15 054	-15 425
Perinteinen ST + kk+ HPK	sähkön myynti	[1000€/a]	15 055	13 518	12 268	11 306
	Nettotulo	[1000€/a]	346	-377	-1007	-1438
Moderni ST	sähkön myynti	[1000€/a]	19 130	18 040	17 150	16 466
	Nettotulo	[1000€/a]	4421	4146	3876	3721
Moderni ST + kk	sähkön myynti	[1000€/a]	33 431	32 256	31 305	30 551
	Nettotulo	[1000€/a]	18 722	18 362	18 030	17 806
Moderni ST + HPK	sähkön myynti	[1000€/a]	2 564	1 268	106	-777
	Nettotulo	[1000€/a]	-12 146	-12 626	-13 168	-13 522
Moderni ST + kk + HPK	sähkön myynti	[1000€/a]	16 983	15 462	14 229	13 292
	Nettotulo	[1000€/a]	2274	1568	955	547

Rinnakkaisten välipaineputkistojen laskennan arvot ja tulokset.

Höyryn arvot:		
Paine	[bar](abs)	9
Lämpötila	[°C]	203
Tiheys	[kg/m ²]	4.3
Nopeus	[m/s]	30

Putkisto:							
Laskentajännitys 350 N/mm ²					Varmuuseroin 1.3		
Massavirta [kg/s]	Pituus [m]	Halkaisija [mm]	Seinämän paks. [mm]	Kokonais paino [kg]	Putkist.hinta [€]	Kokonais kust. [€]	Vuosi lyhennys [€]
0	800	0	0.0	0	0	0	0
1	800	100	1.7	3308	19846	219846	-38 909
2	800	140	2.4	6566	39399	239399	-42 370
3	800	170	2.9	9739	58436	258436	-45 739
4	800	200	3.4	13231	79384	279384	-49 447
6	800	245	4.2	19850	119101	319101	-56 476
8	800	280	4.8	26195	157172	357172	-63 214
10	800	315	5.4	32948	197689	397689	-70 385

Sähkö:						
Massavirta	Tuotanto	Kulutus	Myyntiin	Sähkön myynti	Erotus	Muutos vertailutasoon
[kg/s]	[MW]	[MW]	[MW]	[M€]	[€]	[€]
0	93.6	52.36	41.25	15.65	0	0
1	93.7	52.36	41.29	15.67	15177	-23706
2	93.7	52.37	41.32	15.68	26560	-15810
3	93.7	52.37	41.36	15.69	41737	-4119
4	93.8	52.37	41.40	15.71	56914	7571
6	93.9	52.38	41.47	15.73	83474	27158
8	93.9	52.40	41.51	15.75	98651	35362
10	94.0	52.40	41.59	15.78	129006	58744

Tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen kyselyyn käytettävistä painetasoista ja syistä tasojen valintaan.

Tehdas	Oy Metsä-Botnia Ab Rauman tehdas	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	Startti 1996. Siirtyminen ECF-valkaisuun 2007	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	92	490
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry	28	340
Välipaine	11	200
Välipaine 2	-	-
Matalapaine	3.45-3.6	150
Matalapaine 2	-	-
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: Sellutehtaalla yhteinen matalapaineverkko viereisen paperitehtaan kanssa. 3,5 bar valittu ilmeisesti sellu- ja paperikoneprosessien mukaan. Tällä hetkellä paine joko 3,45 bar (kun paperitehtaallemenevä väliventtiili säättää) tai 3,6 bar (kun apulauhdutin säättää). Tämän hetkisen painetason määräävät melko samanaikaisesti samanaikaisesti turbiini (minimi ulostulopaine), haihuttamo (1D:n kapasiteetti) sekä keittämö (valkolipeä- ja mustalipeälämmönvaihtimien kapasiteetti). Nuohoushöyrylle 28 bar toimii nykyisillä vanhanaikaisilla (vanhat diamondit) nuohoimilla. Siirtymällä gemini-putkiin voitaisiin päästä alaspäin.		

Tehdas	Enocell Oy	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	1992	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	81	480
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry	25	?
Välipaine	12	194
Välipaine	12	194
Välipaine 2	-	-
Matalapaine	5	150
Matalapaine 2	-	-
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	0.0059	38
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: haihuttamon ja keittämön kapasiteetit		

Tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen kyselyyn käytettävistä painetasoista ja syistä tasojen valintaan.

Tehdas	Botnia Joutseno	
Käyttöönottovuosi (suurimmat uudistukset)	1998	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	93	491
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry	24	335
Välipaine	10,5	213
Välipaine 2	6,8	195
Matalapaine	3,5	146
Matalapaine 2	-	-
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: Matalapaineverkon paineen laskua rajoittaa haihduttamo.		

Tehdas	MB Äänekoski	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	1985, kattilarevisio 2004	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	83.2	479
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry	33	380
Välipaine (turbiinilta)	12.3	295
Välipaine 2 (tukilta, ruisk. jälkeen)	11.8	210
Matalapaine (turbiinilta)	4.3-4.5	168-170
Matalapaine 2 (tukilta)	4.1-4.4	160-165
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: Välipaine ja matalapainetasot kulutuskohteiden mukaan: keitin vaatii korkean välipaineen, kuivakone ja haihduttamo matalapaineen. Haihduttamo voisi ajaa pienemmällä paineella, mutta kap pienenee --> höyrystys pienenee --> sähköntuotanto pienenee. Nykyisen painetason voitot/tappiot on +/- 0		

Tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen kyselyyn käytettävistä painetasoista ja syistä tasojen valintaan.

Tehdas	MB Kemi	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	Soodakattila 1990 Turbiini tg5 1996 Höyryverkosto 1970-2010	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	84	480
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry	28	370
Välipaine	12.5	200
Välipaine 2	9	200
Matalapaine	3.5	155
Matalapaine 2	-	-
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-0.6	76
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: Kartonki koneen ja kuivauskoneen vaatimat paineet		

Tehdas	UPM Pietarsaaren sellutehdas	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	2004	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	102	505
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry, tulistin	27	335
keittopinta ja ekot	16	260
Välipaine	17	260
Välipaine 2	11.5	215
Matalapaine	5.5	180
Matalapaine 2	3.5	148
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: Sähkön hinnan kehitys à tuorehöyrylle, Välipaine ja matalapaine à koneiden, keittämön ja haihduttamon vaatimuksien mukaan.		

Tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen kyselyyn käytettävistä painetasoista ja syistä tasojen valintaan.

Tehdas	Varkauden tehdas	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	1980 soodakattila: tehon nosto 76 MW --> 102 MW 06/1988 tehon nosto 102 MW --> 121.7 MW 12/1988 sulakourun puoleinen pohja ja takaseinän alaosa uusittu 1996 3-tulistin uusittu 1997 kattopukisto uusittu 1998 1-tulistin uusittu 1999 2-tulistin uusittu 2005 vertikaali-ilmajärjestelmä 2007 höyry-vesikierron kasvattaminen lisäämällä lieriöön syklooneja 42 --> 44 kg/s 2008	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry Soodakattilalta	64	475
Tuorehöyry 2 Kuorikattilalta	110	535
Nuohoushöyry	30	350
Välipaine	17	280
Välipaine 2	8	275
Vastapaine	4	185
Matalapaine	2	175
Muu höyry (esim.lauhdeperä)	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: PK3 kuivaussylinterit 4 bar Haihduttamo 4 bar		

Tehdas	UPM-Kymmene, Kymi		
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	Talteenottolaitos 2008		
Painetasot	Nimellispaine bar (g)	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry (SK3)	102	100	500
Tuorehöyry 2 (Kymin Voima)	114	114	540
Nuohoushöyry (SK3 turb. välipaine)	28	24	305
Välipaine (SK3 turb.)	13.5	13.7	240
Välipaine 2	-	-	-
Matalapaine (SK3 vastap.höyry)	5	4.6	160
Matalapaine 2	3.5	3.9	160
Muu höyry: Kymin Voima kaukolämpöperä	-	-0.64	78
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan:	-paperikoneiden kuivauskapasiteetti -keittimien vaatimukset		

Tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen kyselyyn käytettävistä painetasoista ja syistä tasojen valintaan.

Tehdas	Oulu			
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C	Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	Kommentti
Tuorehöyry Soodakattila	84	480	1988	-
Tuorehöyry 2 (Leijukattila)	80-100	max 525	1997	Ajetaan yleensä samassa verkossa soodakattilan kanssa.
Nuohoushöyry	24	335	-	Turbiinin väliotto
Välipaine	10.8	220	-	-
Välipaine 2	-	-	-	-
Matalapaine	2.8	142		Kylläinen
Matalapaine 2	-	-	-	-
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-	-	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan:	Tuorehöyryb arvot tyypilliset 80 luvulle. Nohoushöyryn paine myös aikana nuohoin tekniikan valinta Välipainehöyryn paine tason määrännyt monta asiaa. Jatkuvan keittimen maksimi painetarve, Happi vaiheen vaatima maksimi paine ja lämpötila ja mäntyöljy tislamon vaatimukset. Vastapaine paine optimoitiin kun lipeälinja / haihduttamo / voimalaitos uusitiin 1988 ja sen kuivauskone oli jo aiemmin rakennettu ko paineellein. Myöhemmin paperikoneiden rakentamisen yhteydessä on painetaso aina tarkistettu ja todettu että uusin kone on järkevintä rakentaa sähkön tuotanto maksimi moiden alkaen jo aiemmin valitusta painetasosta			

Tehdas	Storaenso Oyj, Sunilan tehdas	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	Pääkattilat: SK10 1965, SK11 1988	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	63	480
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry	35	300
Välipaine	10	280
Välipaine 2	-	-
Matalapaine	2.5	160
Matalapaine 2	-	-
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: Historia		

Esimerkki talteenottolinjan ja kuivauskoneen uusinnan kustannuslaskelmista.

[illegible]

Haihduuttamon investointilaskelmat

Wood		Mixed							
No of effects		7							
Black liquor side heat transfer area				p_steam	bar	3	4	5	6
HD	m2					BPR	BPR	BPR	BPR
Eff 1A+1B+1C	m2	21300							
					78 %	19.6	19.6	19.6	19.6
Eff II	m2	8900			55 %	8	8	8	8
Eff III	m2	7470			40 %	5	5	5	5
Eff IV	m2	7000			25 %	3	3	3	3
Eff V	m2	6850			21 %	2.5	2.5	2.5	2.5
Eff VI	m2	7000			18 %	1.5	1.5	1.5	1.5
Eff VII	m2	7000			15 %	1	1	1	1
Sum	m2	65520							
Sum II-IV	m2	44220				40.6	40.6	40.6	40.6
Feed liquor dry solids	%	14.2							
Virgin liquor dry solids	%	85							
Evaporation									
	tH2O/h	950							
				p_steam	bar	3	4	5	6
Specific loading	kg H2O/m	14.49939		T_sat	oC	133.5	143.6	151.8	158.8
Primary condensor	m2	2300							
Secondary condensor	m2	3000		T_hönkä	oC	55	55	55	55
Sum Condensor	m3	5300		(pintalauhduutin)					
LP-steam									
	kg/s	37.7							
	MJ/tH2O	338.5443		dT_over.	oC	78.5	88.6	96.8	103.8
MP-steam									
	kg/s	9.6		dT	oC	35.0	45.0	53.3	60.3
	MJ/tH2O	86.17323		dT/period	oC	5.0	6.4	7.6	8.6
Total steam	MJ/tH2O	424.7176							
Cooling water									
	in oC	25		Area diff.	%	128.8 %	100.0 %	84.6 %	74.7 %
	out oC	50		Area´	m2	75272.5	58420.0	49402.6	43668.2
				INV corr.	%	83.7 %	100.0 %	112.5 %	122.6 %
Electricity	kW	1870		squar.price	€/m2	418.7	500.0	562.3	613.0
				INV	k€	31517.7	29210.0	27777.2	26767.8
Calculated Evaporator	35000 k€			Diff.	k€	0.0	2307.7	3740.5	4749.9
	0.300 k€/m2								

APPENDIX 3

ÅA

**Dew point measurements –
presentation 4.10.2011**

Dew Point Measurements in Rauma and Heinola

Emil Vainio
Tor Lauren
Nikolai DeMartini
Mikko Hupa

Objective/Methodology

Purpose: to get reliable information of the low temperature corrosion in recovery boiler flue gases being cooled further.

1. Dew point measurements made with a commercial instrument (Land).
2. Corrosion measurements made with our air-cooled probes and samples analyzed with SEM-EDS.
3. H_2SO_4 analysis planned with Isopropanol. This was found to not be sensitive enough and an two alternative methods (salt and controlled condensation) were used at Heinola and the salt method was used at Rauma.

Mills

- Two mills chosen –Rauma (Kraft) and Heinola (sulfite)
- Rauma chosen as a representative Kraft pulp mill
 - $O_{2,\text{excess}} = 2.3 \%$ (mill measurement)
 - H_2O flue gas = 20% (calculated based on excess O_2)
- Heinola chosen because of high SO_2
 - $SO_2 = 1200\text{-}1600$ ppm (before scrubber, our measurements)
 - $O_{2,\text{excess}} = 5.0 \%$ (mill measurement)
 - H_2O flue gas = 14% (calculated based on excess O_2)

Mill Measurements

- Measurements
 - o Dew point measured with a commercial dew point analyzer (Land)
 - o Corrosion probe (temperature controlled to within +/- 5°C)
 - o H₂SO₄ (salt method and controlled condensation)
 - o SO₂
- The measurements were carried out between the ESP and scrubber
 - o Rauma: average gas temperatures: 180/182/165 °C for days 1/2/3 respectively (low load + oil on day 3)
 - o Heinola: average gas temperature 152 °C in two days of sampling

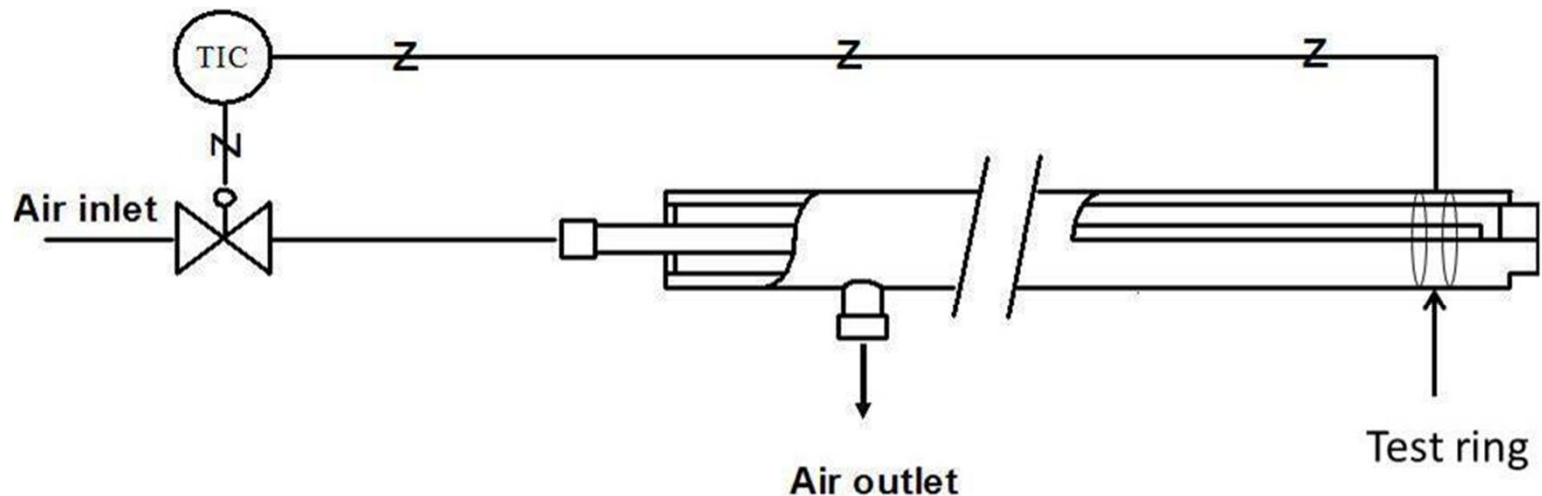
Dew Point Measurements

- Dew point probe made by Land
- Cooled probe has two electrodes at the end
- When an electrolyte (acid or water) condenses between electrodes, electricity is conducted resulting in a signal



Corrosion Experiments

- Conducted with air cooled probe
- 1 ring of carbon steel
- Thermocouple in the ring to measure/control the ring material temperature - PID controller used to adjust air flow



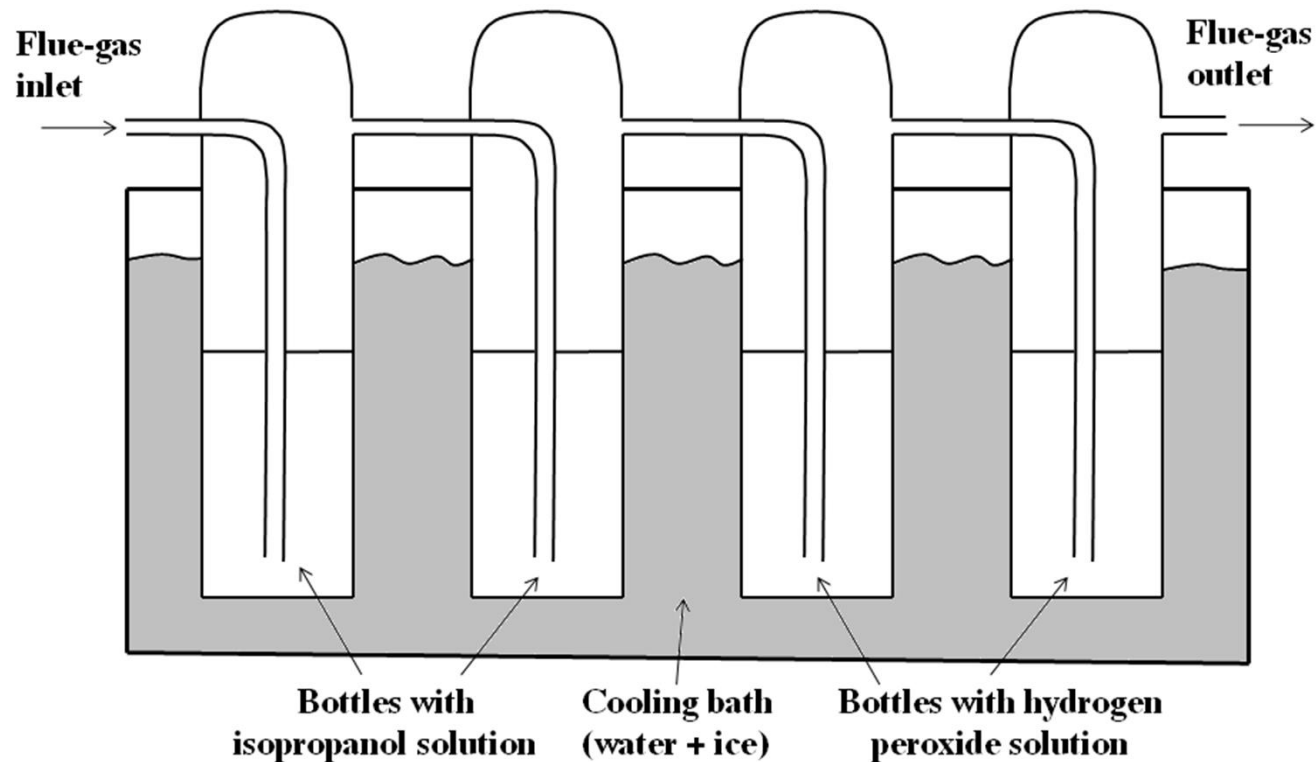
SO₂ & H₂SO₄ Measurements

- Plan was to use Isopropanol (IPA) to capture H₂SO₄ followed by hydrogen peroxide to capture SO₂
- SO₂ was successfully captured in hydrogen peroxide solution (4 vol-%) and subsequently analyzed by titration
- Isopropanol found to also absorb some SO₂ (some literature references found the same) – too much for observing small amounts of H₂SO₄
- Two new methods were tested
 - Salt method
 - Controlled condensation

SO₂ & H₂SO₄ Analysis:

IPA method (EPA method 8)

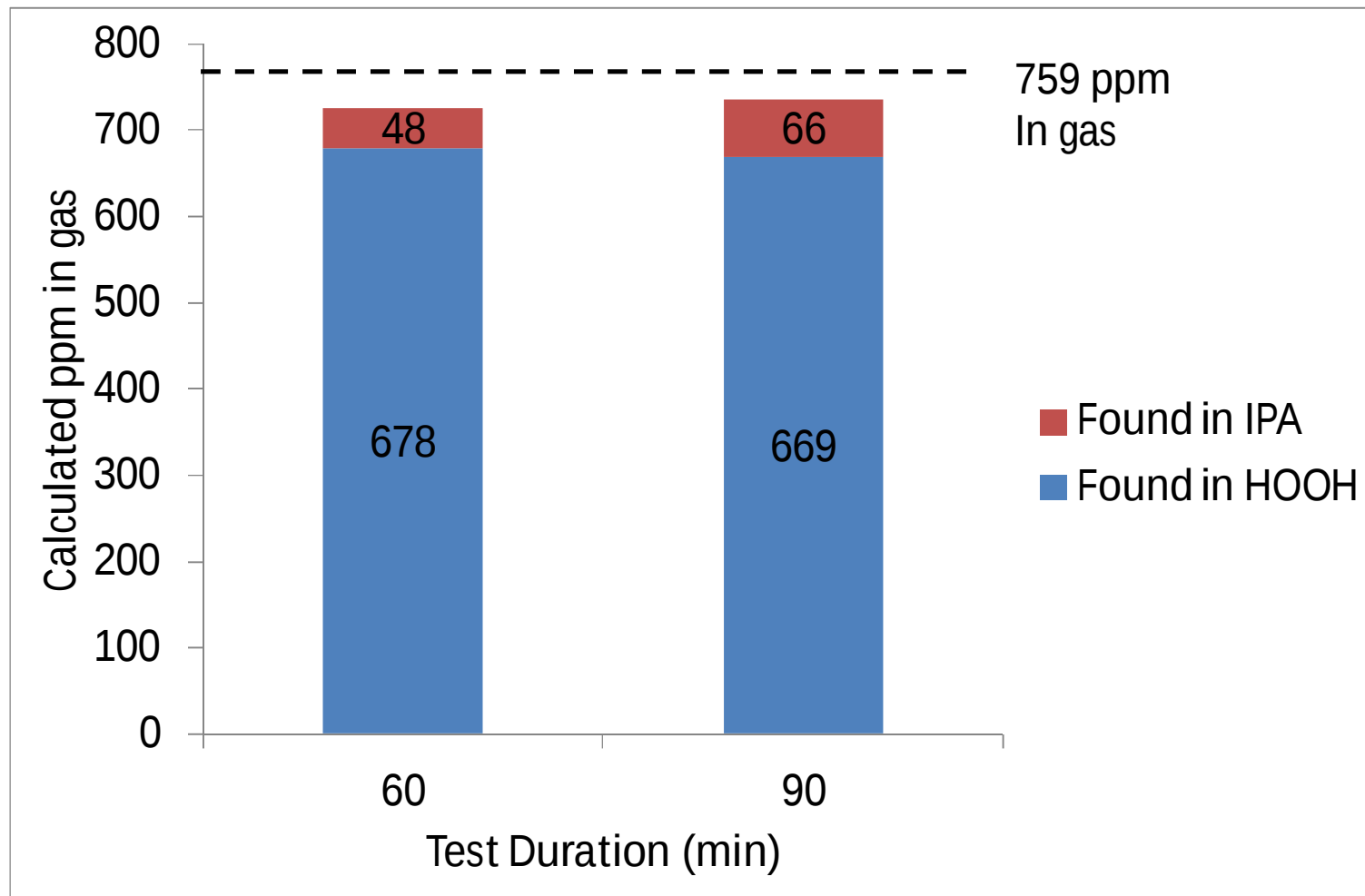
- Isopropanol solution to absorb H₂SO₄
- Hydrogen peroxide solution to absorb SO₂



SO₂ & H₂SO₄ Analysis: IPA method (EPA method 8)

- Prior to Heinola, we bubbled SO₂ calibration gas (759 ppm SO₂ in N₂) through the isopropanol and hydrogen peroxide solutions
- There is no H₂SO₄ in the calibration gas, so expectation of no H₂SO₄ in the isopropanol
- SO₂ absorption by hydrogen peroxide was complete (no SO₂ in gas after HOOH) and titration of the hydrogen peroxide gave accurate results

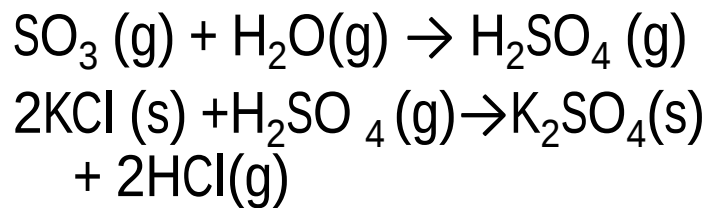
SO₂ & H₂SO₄ Analysis: IPA method (EPA method 8)



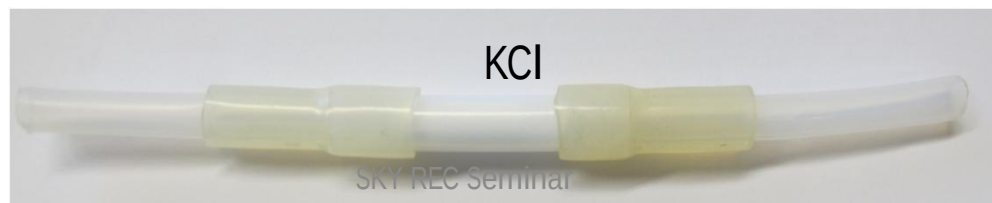
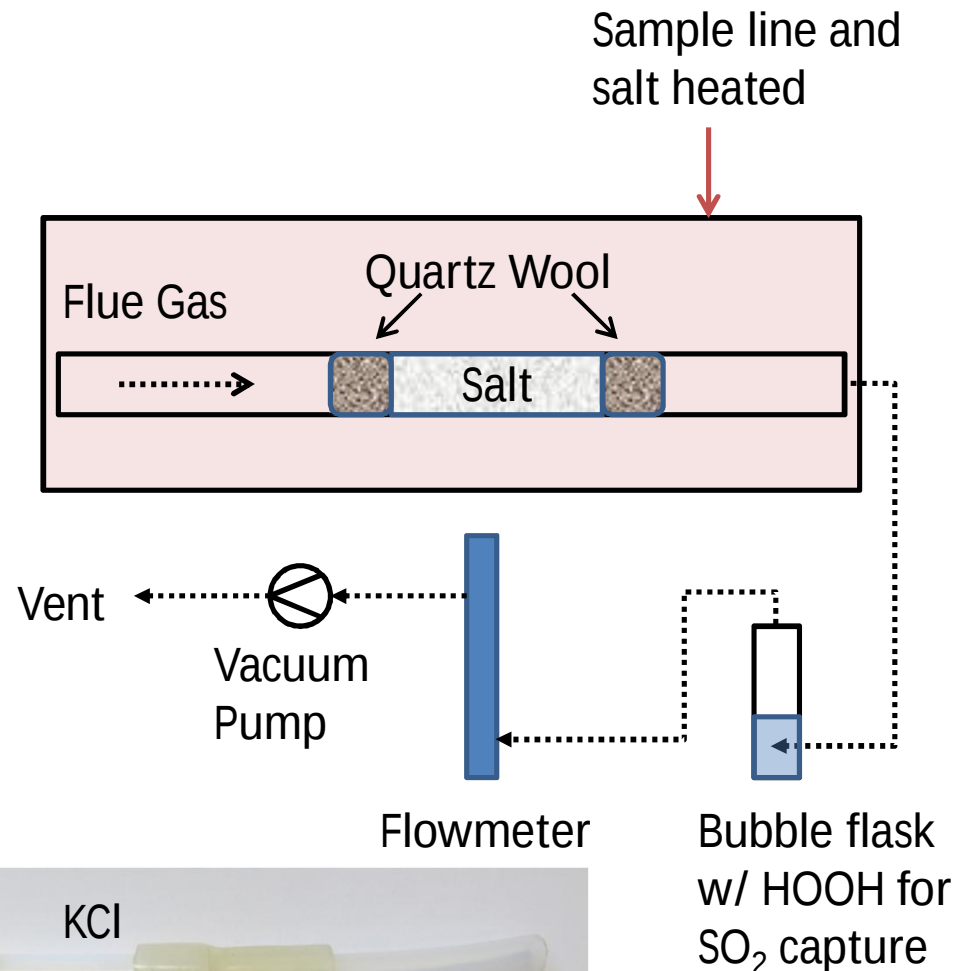
SO₂ & H₂SO₄ Analysis: Salt Method

- Salt method

- Gas is passed through a tube of KCl that will react with H₂SO₄ to form a sulfate salt

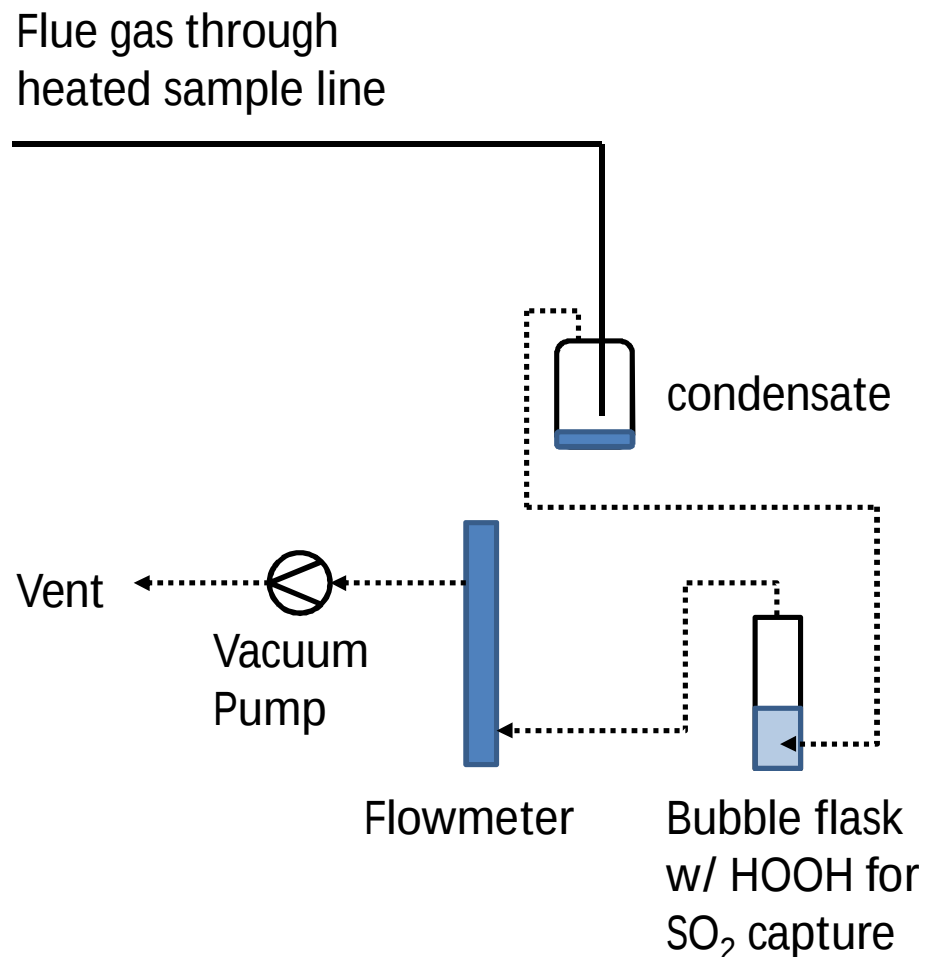


- Salt then analyzed for sulfur. Advantage of KCl is that K and Na can be analyzed, with Na associated with fume



SO₂ & H₂SO₄ Analysis: Controlled Condensation

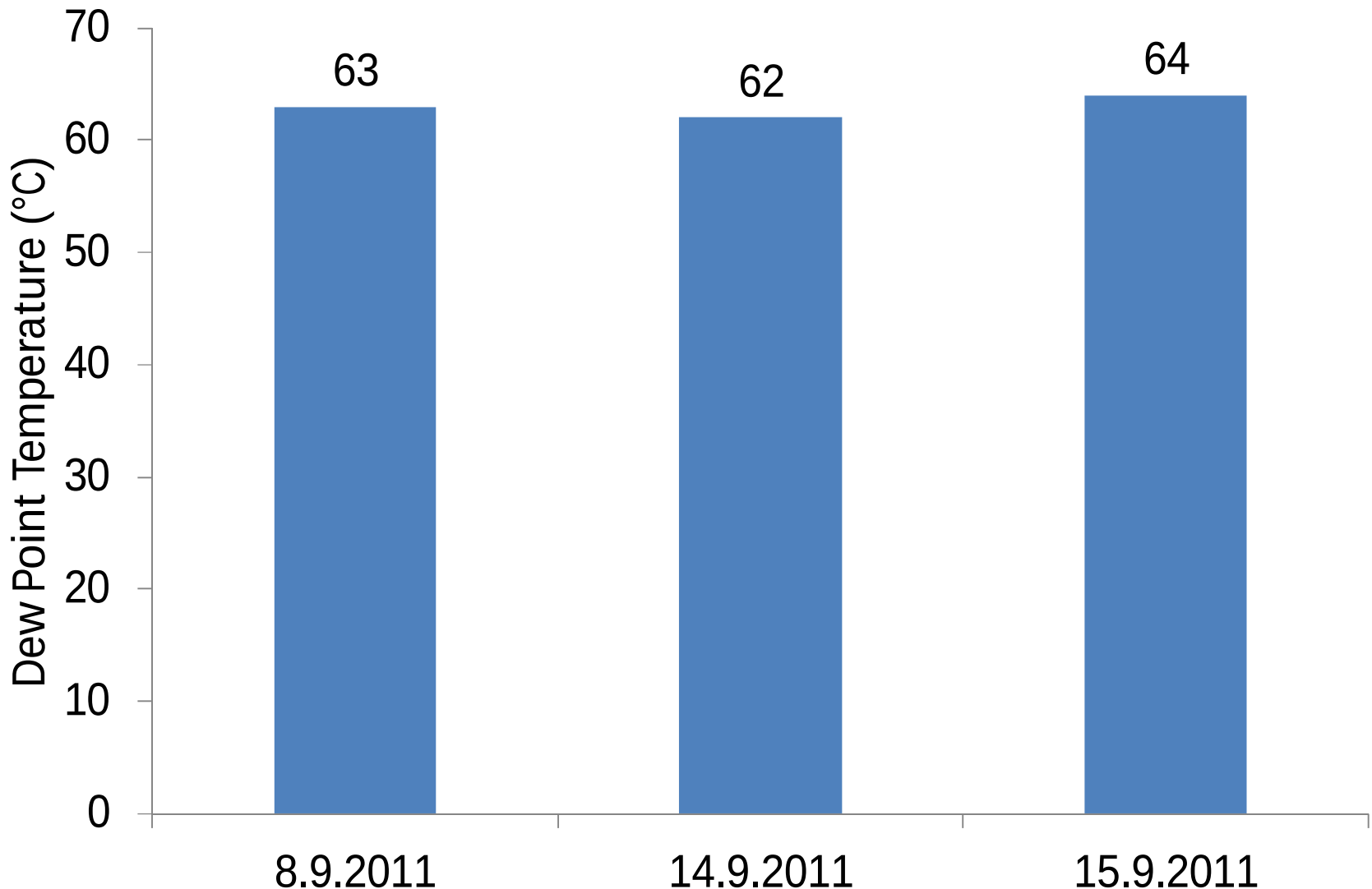
- Controlled condensation
 - o Gas passed through a cooled line to condense H₂SO₄
 - o 85 °C chosen for condensing temperature
 - o Only used at Heinola



Rauma

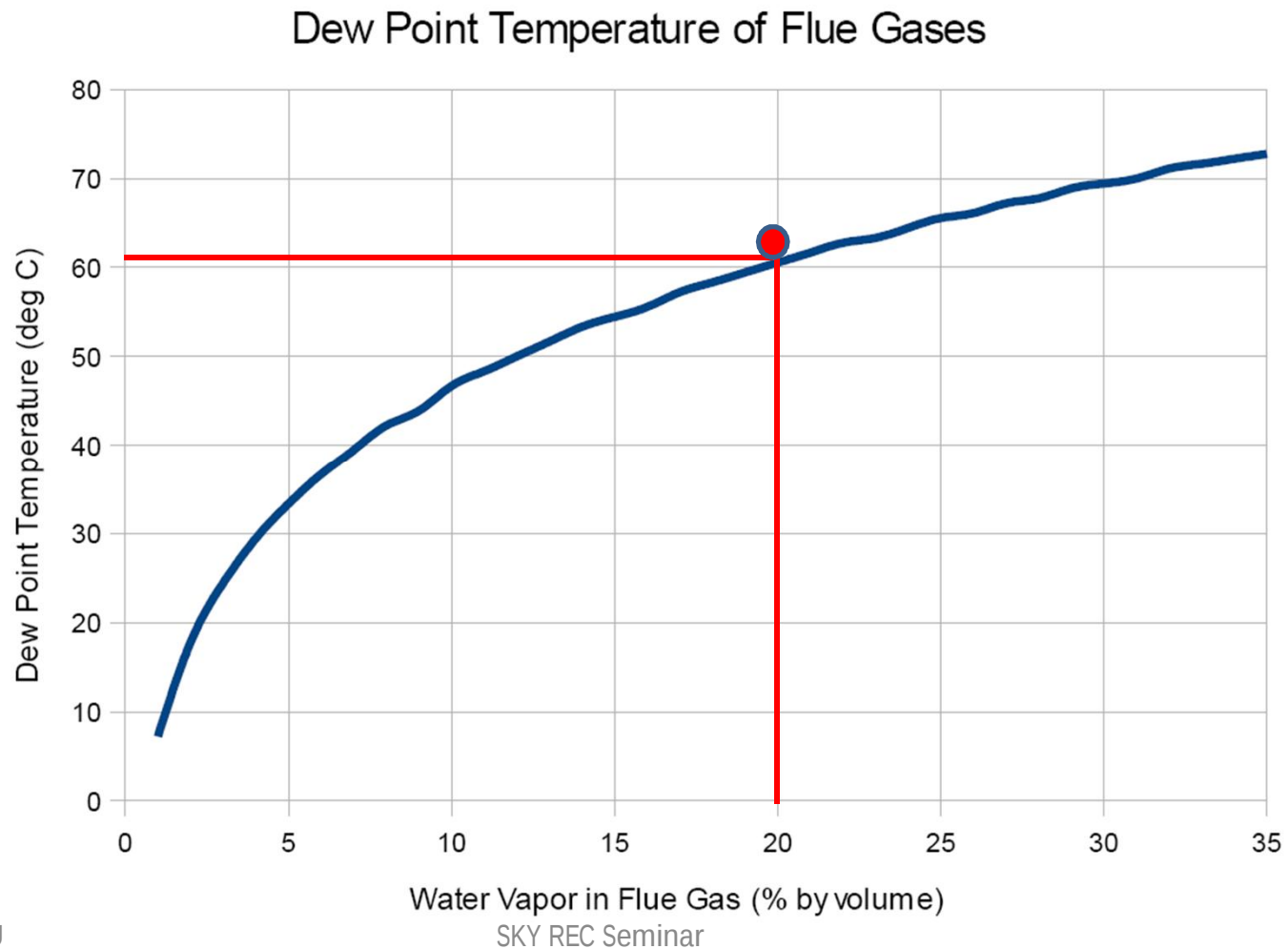
Sampling Dates: 8,15-16.9.2011

Rauma Dew Point Measurements

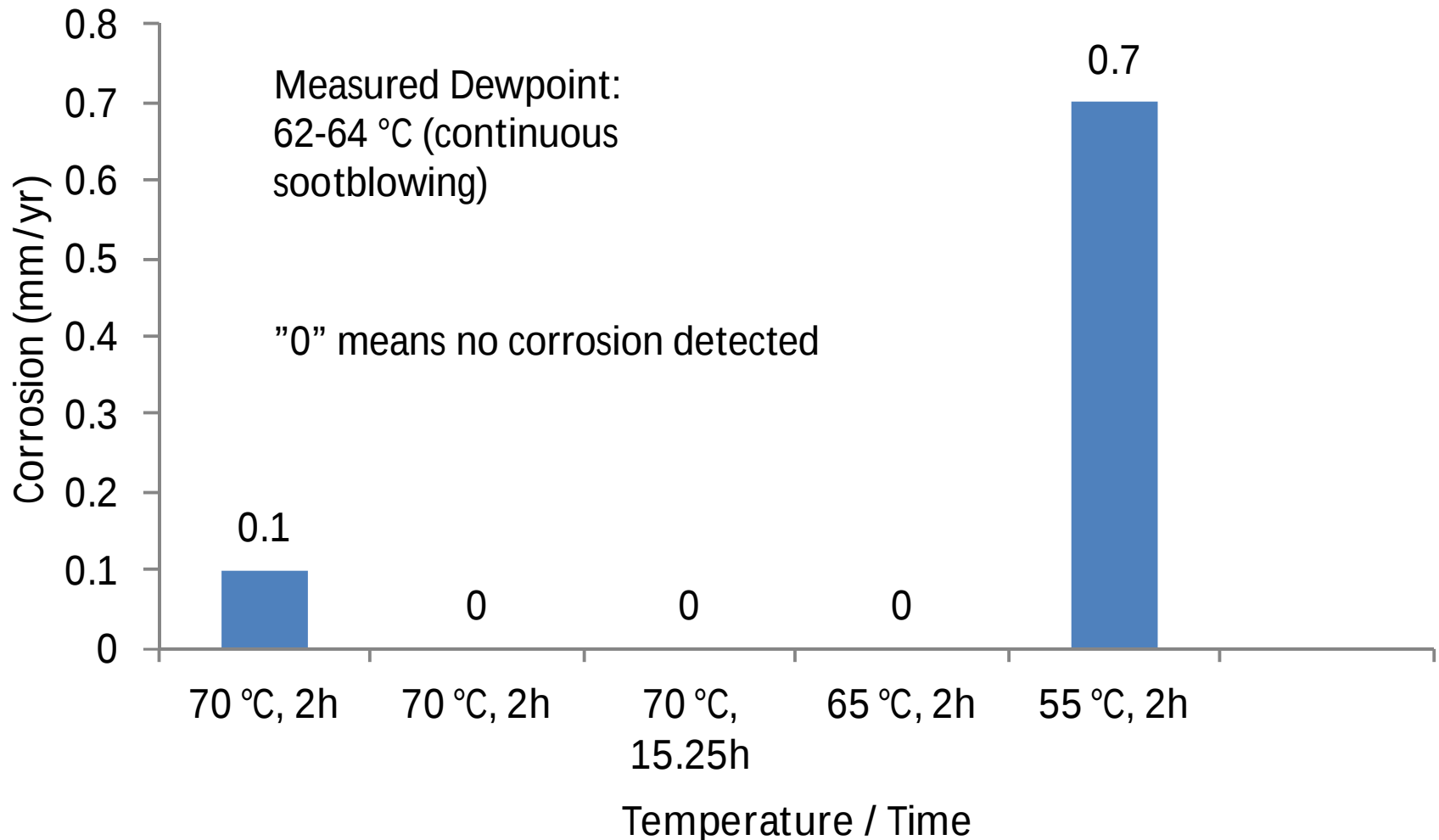


Dew Point

● = measured dew point



Rauma: Corrosion Probe Results



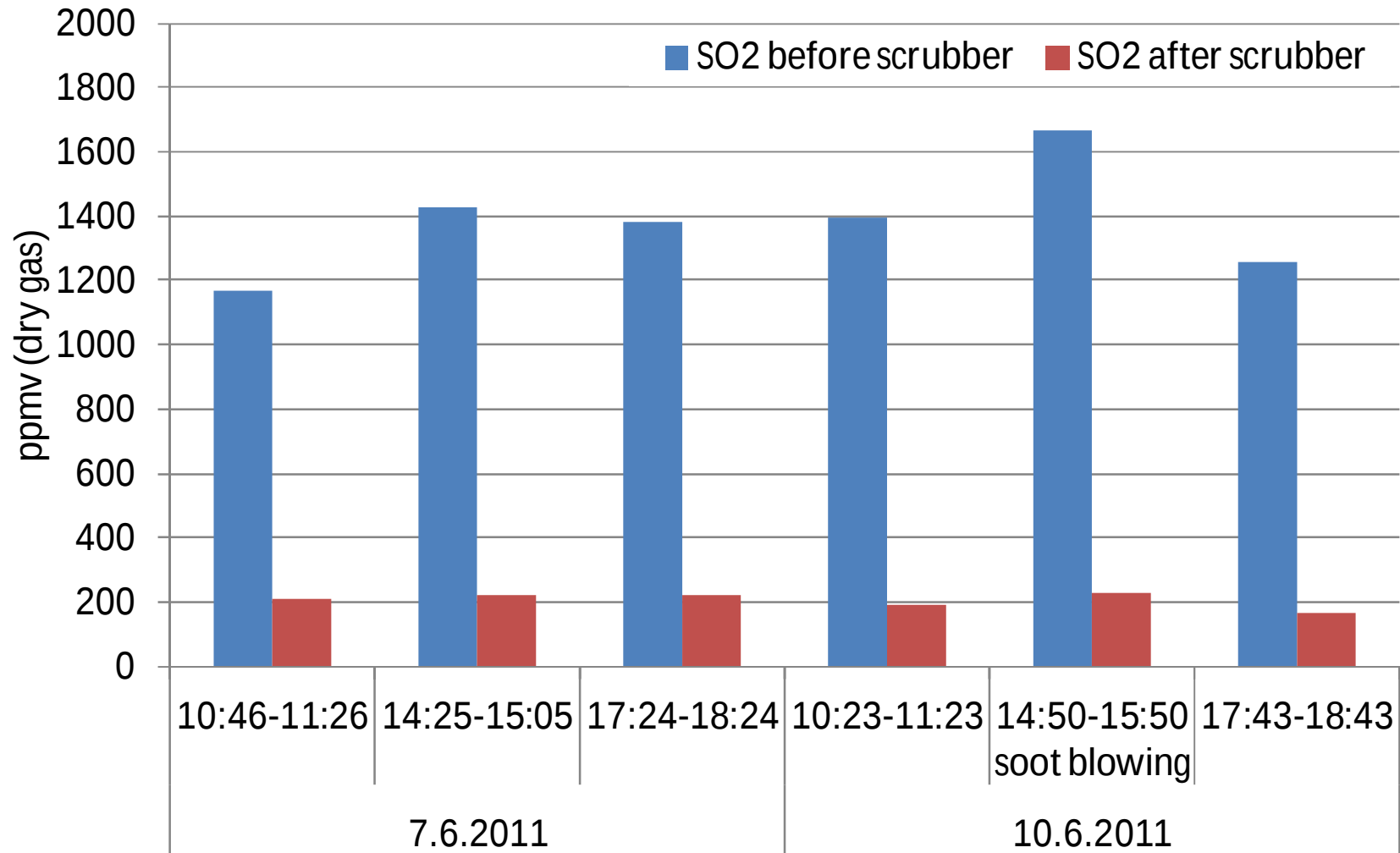
Rauma: SO_2 & H_2SO_4

- Mill operated at:
 - Normal load
 - Reduced load with oil added
- No SO_2 detected at any condition
- No H_2SO_4 detected at any condition

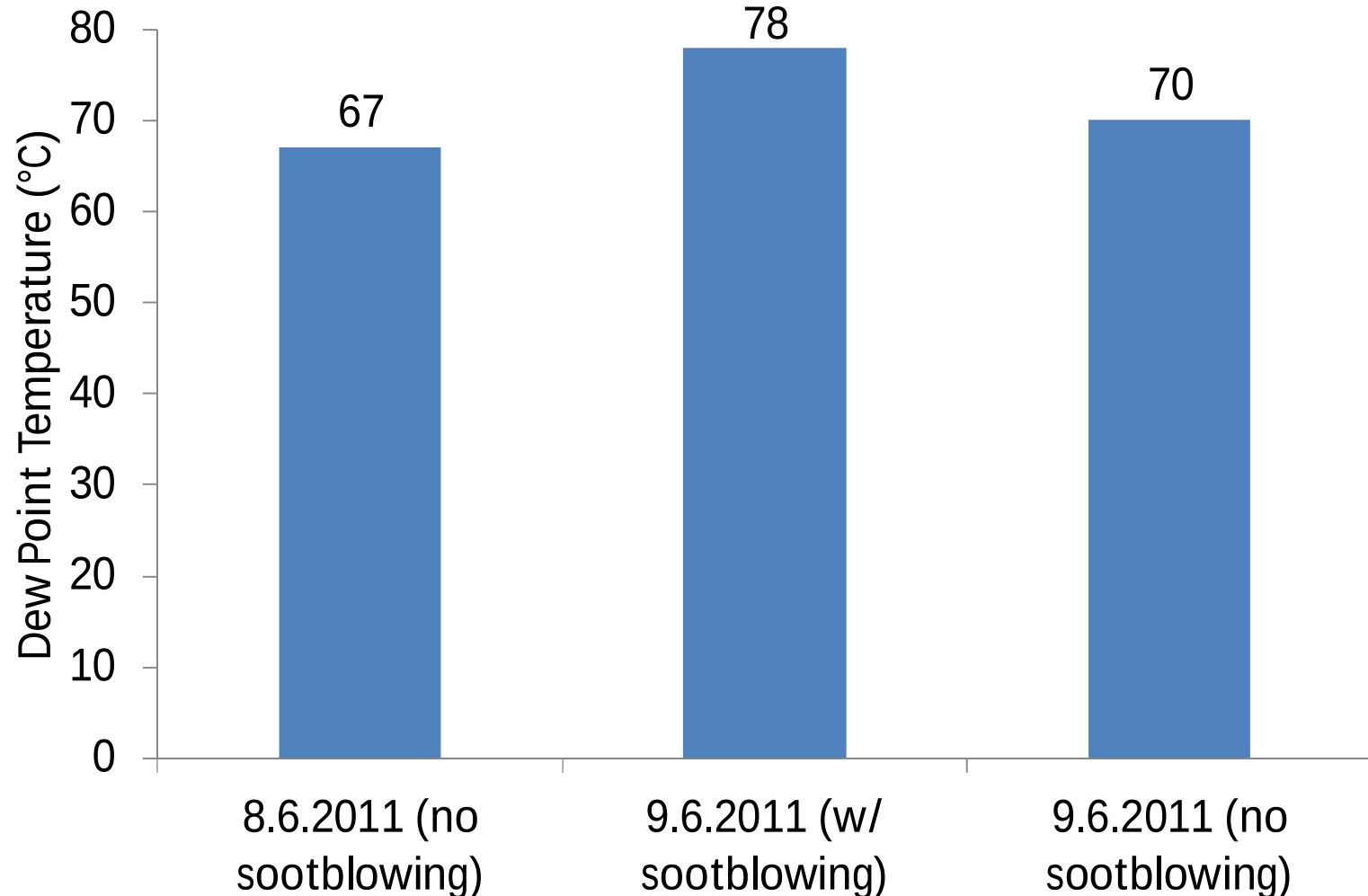
Heinola

Sampling Dates: 7-10.6.2011

Heinola: SO₂ Before and After Scrubber

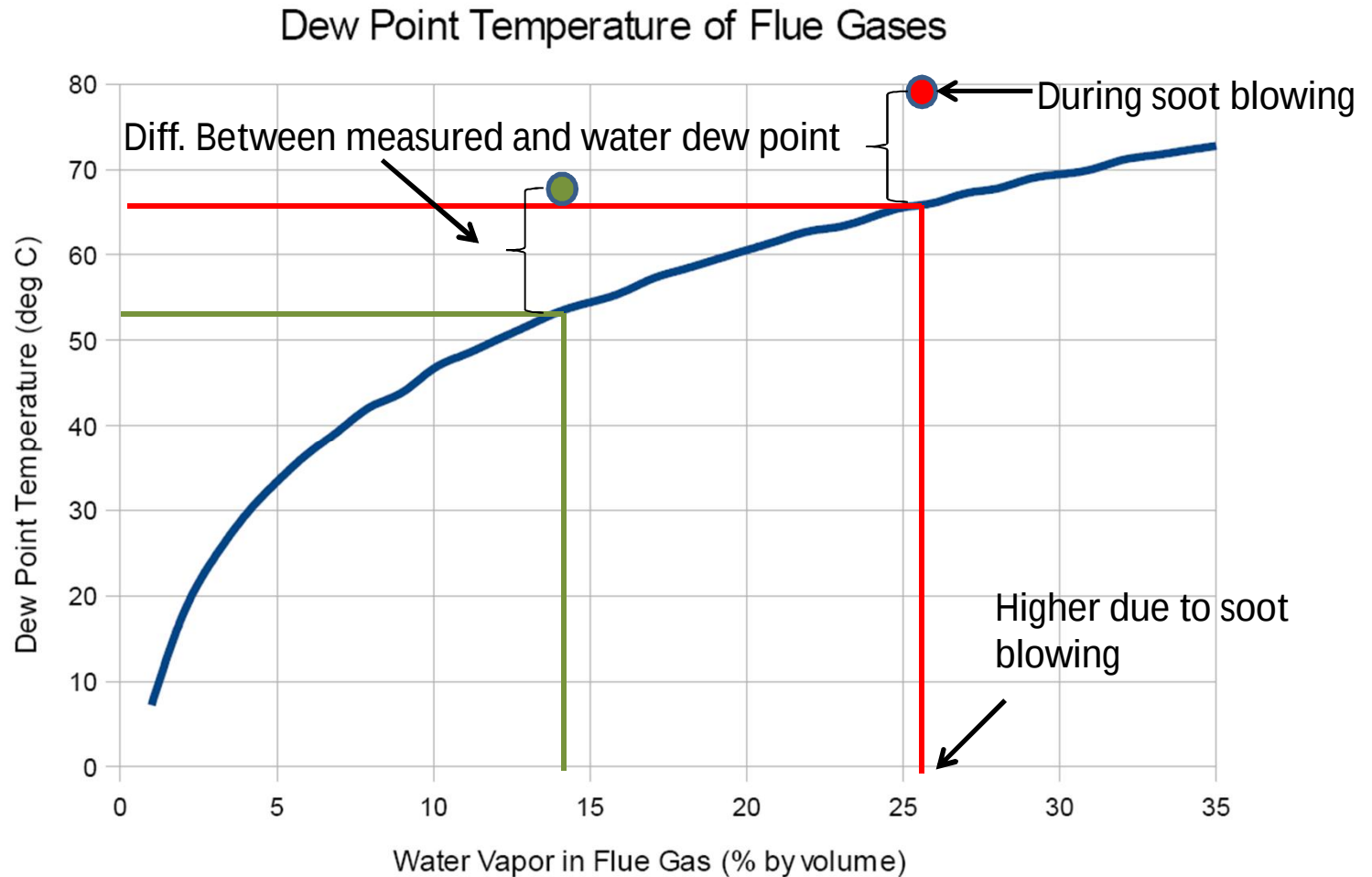


Heinola: Dew Point Measurements (from dew point analyzer)

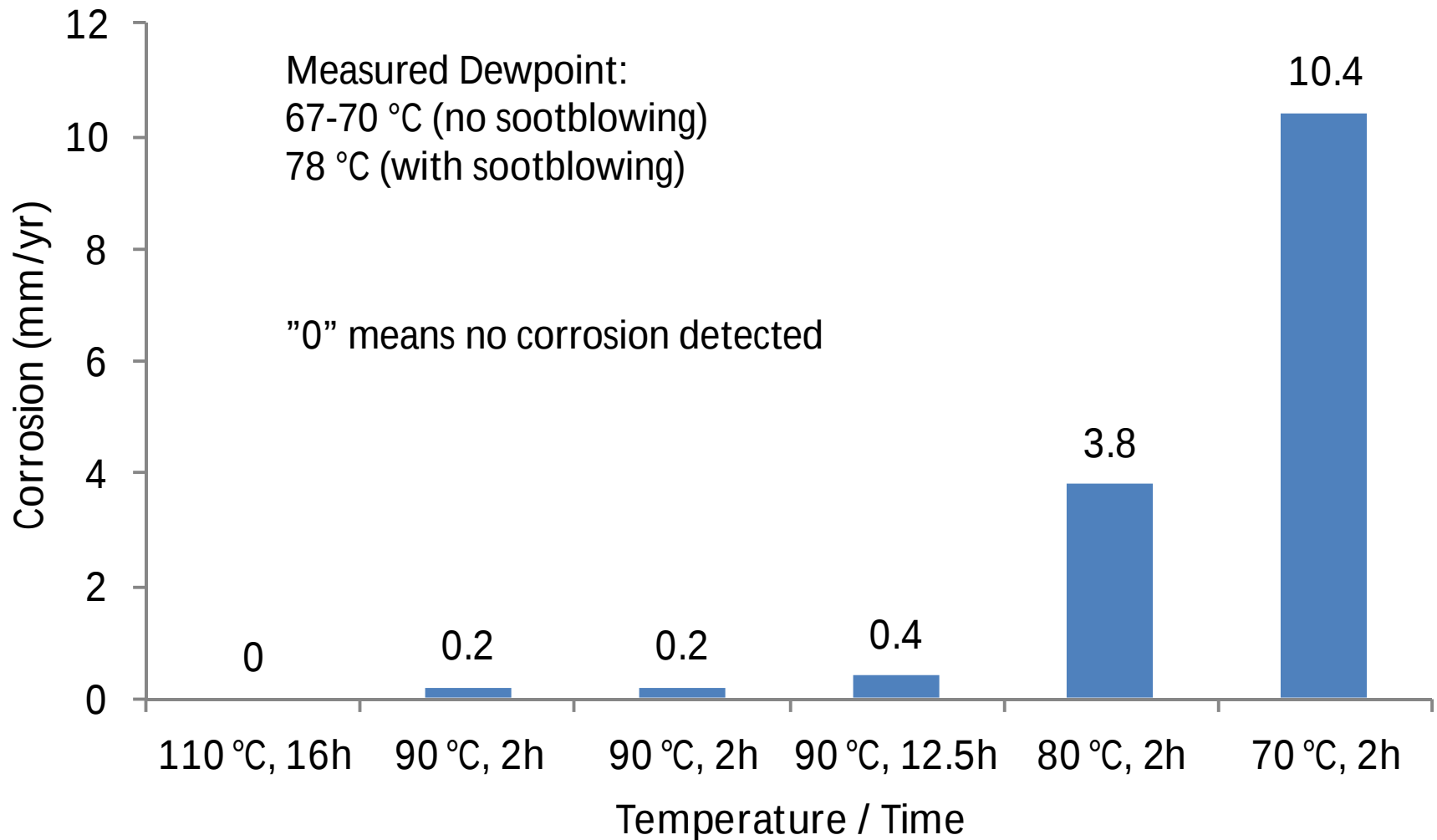


Heinola: Dew Point

● ● = measured dew point



Heinola: Corrosion Probe Results



Heinola: H₂SO₄

- Salt method
 - < 1 ppm
- Controlled condensation (85 °C)
 - 1-4 ppm
- Dewpoint less than 80 °C which means no sulfuric acid

Conclusions

- Dewpoint
 - Acid dewpoint was not found at either mill
 - Water dewpoint was measured in Rauma
 - Elevated dewpoint found at Heinola, but not acid dewpoint
- H_2SO_4
 - Isopropanol method was not applicable
 - Salt method appears to work well
 - $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{SO}_3$ theory needs further clarification

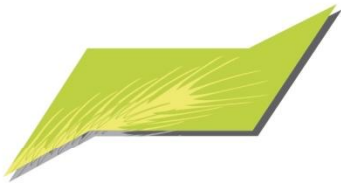
Conclusions

- Corrosion
 - At Rauma corrosion started below 65 °C (dewpoint was 62-64 °C)
 - At Heinola, corrosion started at 80-90 °C (slightly higher than the dewpoint)

APPENDIX 4

ÅA

**Corrosion tests in reducing conditions, PART II –
presentation 5.10.2011**



PROCESS CHEMISTRY CENTRE



Skyrec II

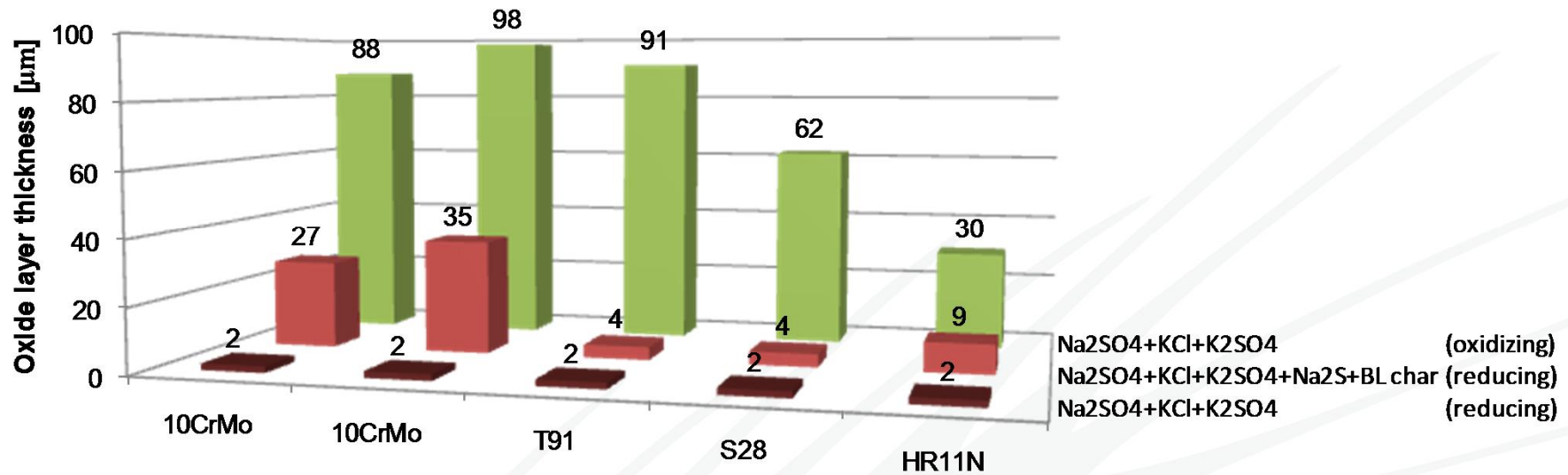
October 5th 2011



SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS
FINNISH RECOVERY BOILER COMMITTEE

Skyrec II - trial test

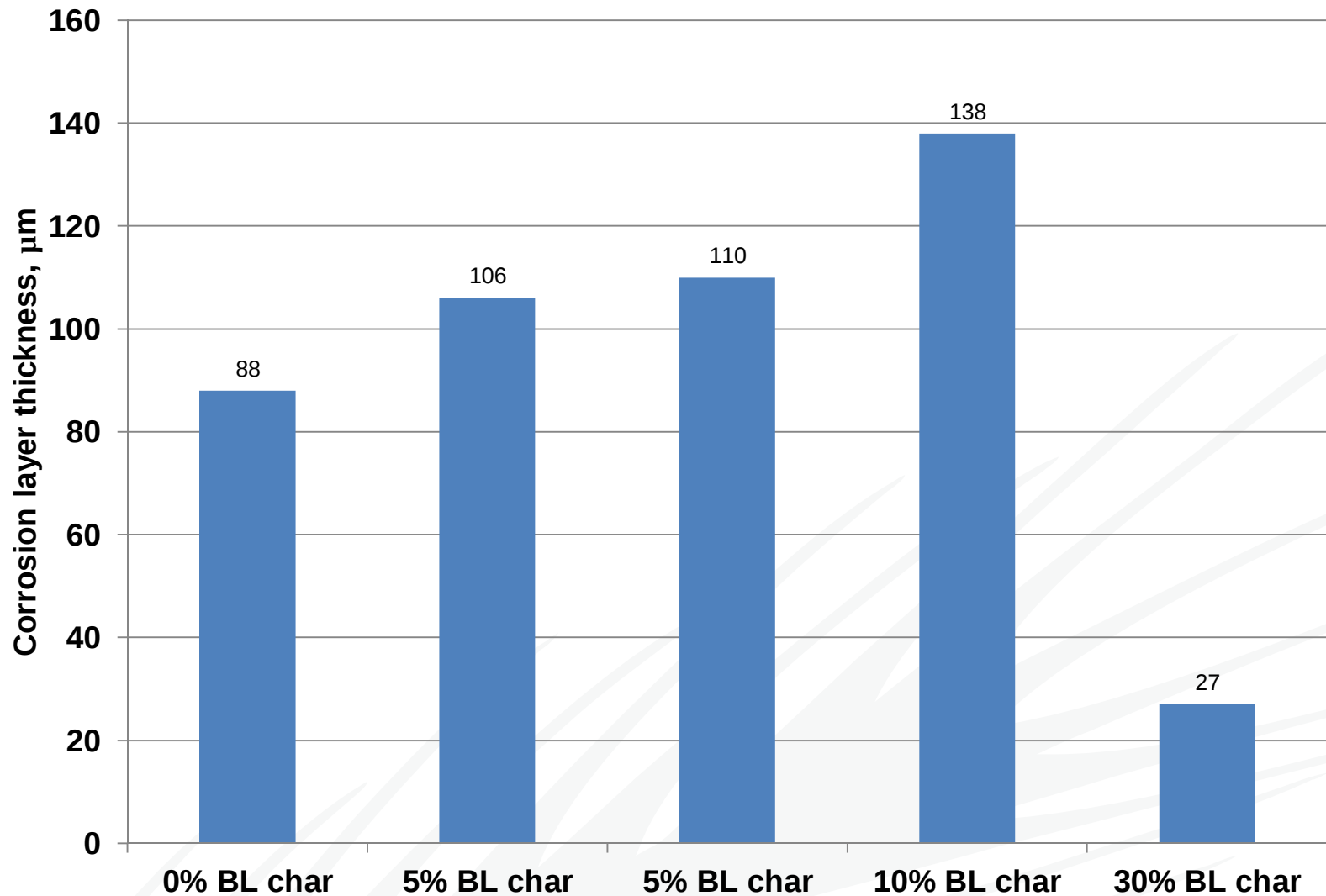
Reducing vs. Oxidising conditions at 550 °C.
Exposures with Salt 10 and 10r50+BL char



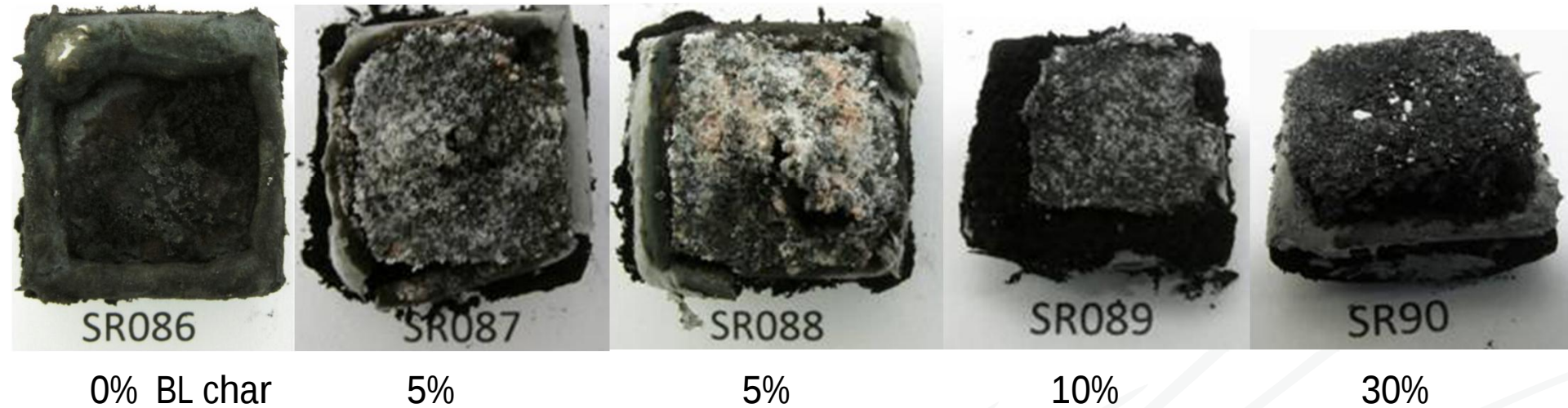
Skyrec II - Testing of wood char effect

- 5 samples of 10CrMo were tested
- 10r50 mixture ($\text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{KCl}$) was used
- 0, 5, 5, 10 and 30 % of BL char was added to the synthetic ash respectively and mixtures were placed on the samples
- tests were done in reducing atmosphere at 565 °C for 168 h

Results - BL char effect - oxide layer thickness



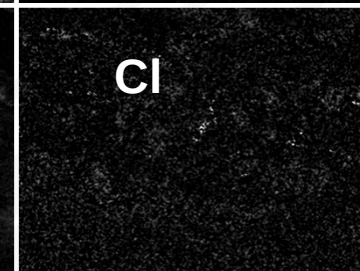
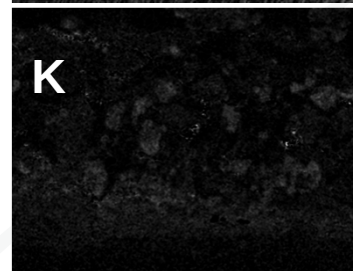
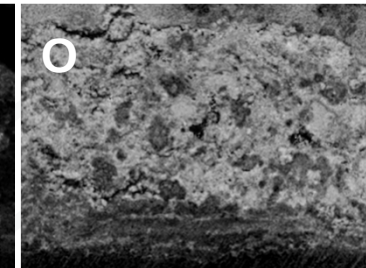
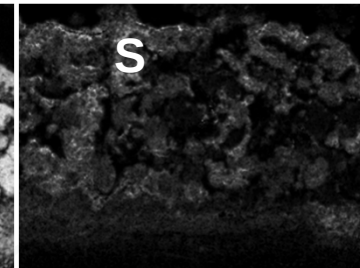
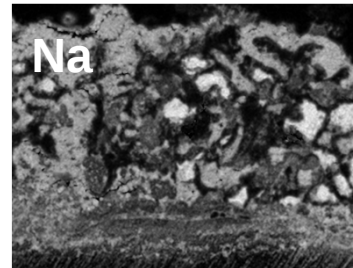
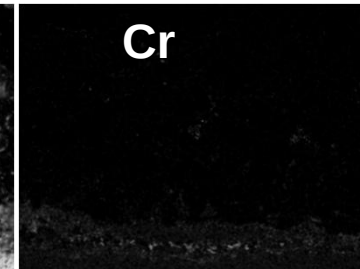
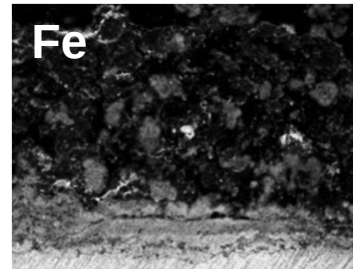
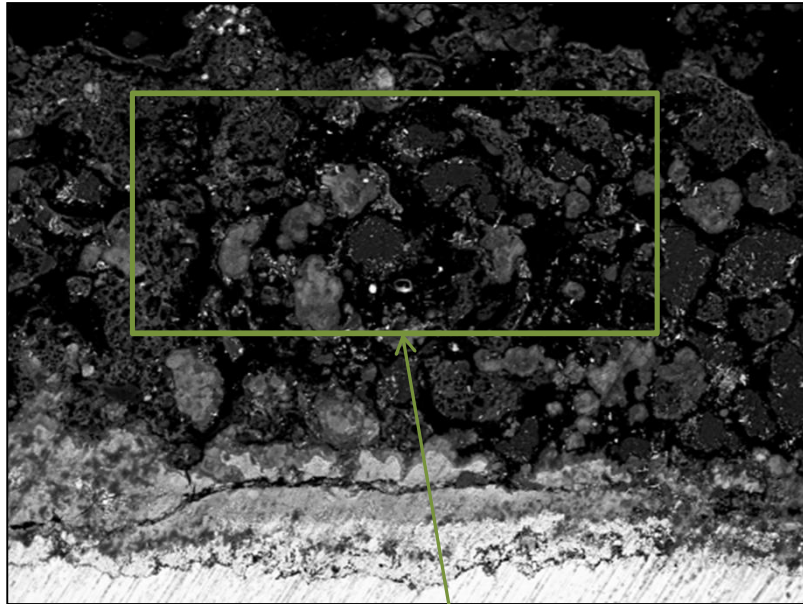
Results – digital pics of the samples after test



After the test, the salt containing BL char was swollen and very brittle. Surrounding of the sample was full of black, soot like powder.

Results – x-ray maps

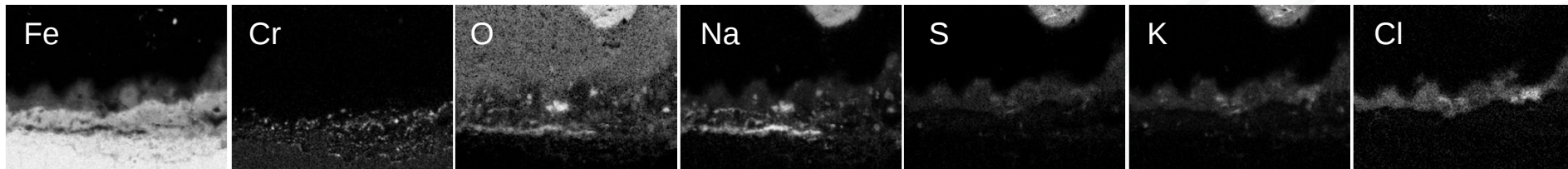
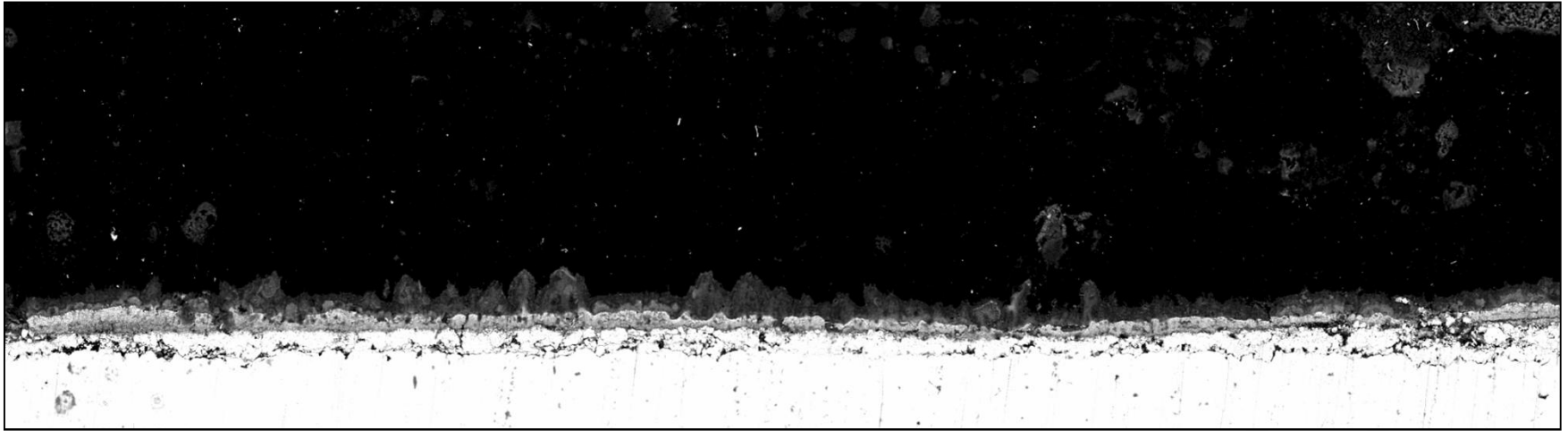
($\text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{KCl}$, **no BL char**)



"Separate" salt particles

Results – x-ray maps

($\text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{KCl}$, 30-wt% BL char)



Not much of the corrosion products were found on the surface of the sample exposed to salt containing 30% BL char. The surface was, however, visibly damaged.

The sample was swollen and it was difficult to retain all the products which were on the surface exactly as they were (this was case for all the samples containing BL char)

Remarks

- in all cases the corrosion rates were significant
- when no BL char was added to the salt mixture, the surface of the steel was mainly internally degraded
- BL char additions (5 and 10%) caused increased material degradation with visibly consumed material. Internal oxide + material degradation occurred (outer corrosion products > higher oxidation thanks to the oxygen from the BL char?!)
- addition of 5% of BL char seems to be enough
- reasonably low corrosion rate was measured when 30% BL char was added - too big dilution of the salt
- BL char addition seems to influence (decrease slightly) T_0 of the salt mixture
 - I. When no BL char was added, the separate salt particles were visible
 - II. When BL char was added, the salt looked more molten like on the SEM pics, also the salt cake was heavily swollen and brittle after taking out from the oven, surrounded with black soot like powder

Skyrec II - project

1. High temperature behavior of steels under alkali- sulfates/sulfides and chlorides containing synthetic ashes in reducing atmosphere

Temperatures: 525°C, 565°C

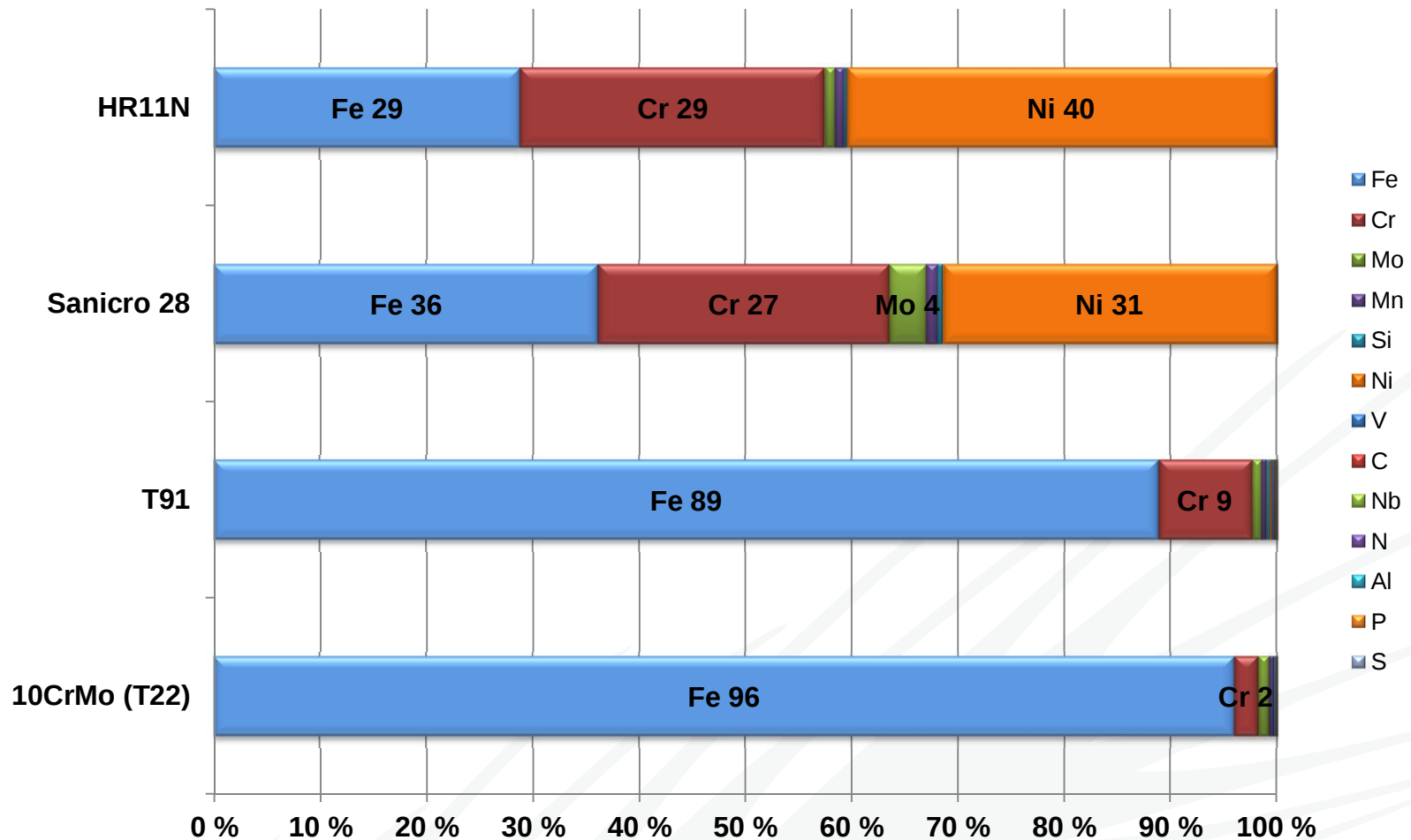
Salts:

mol%	Na ₂ SO ₄	Na ₂ S	K ₂ SO ₄	KCl	BL char wt%
5	100				
5r10	90	10	0	0	5
5r50	50	50	0	0	5
5r80	20	80	0	0	5
10	78		17	5	
10r10	70	8	17	5	5
10r50	39	39	17	5	5
10r80	15	62	17	5	5

Steels: 10CrMo9-10, T91, S28, HR11N

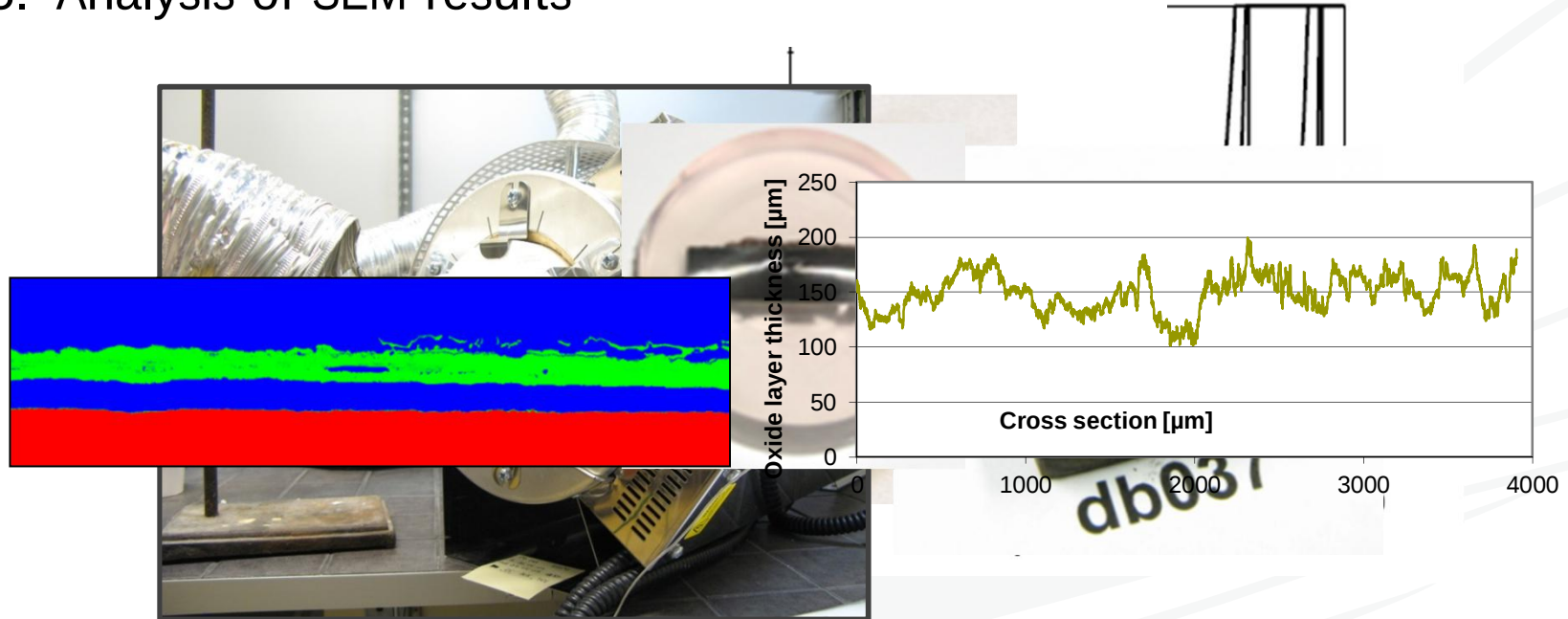
Atmosphere: reducing (5% CO + 95% N₂ – 2 l/min)

Skyrec II - tested steels composition



Laboratory method for HT corrosion tests

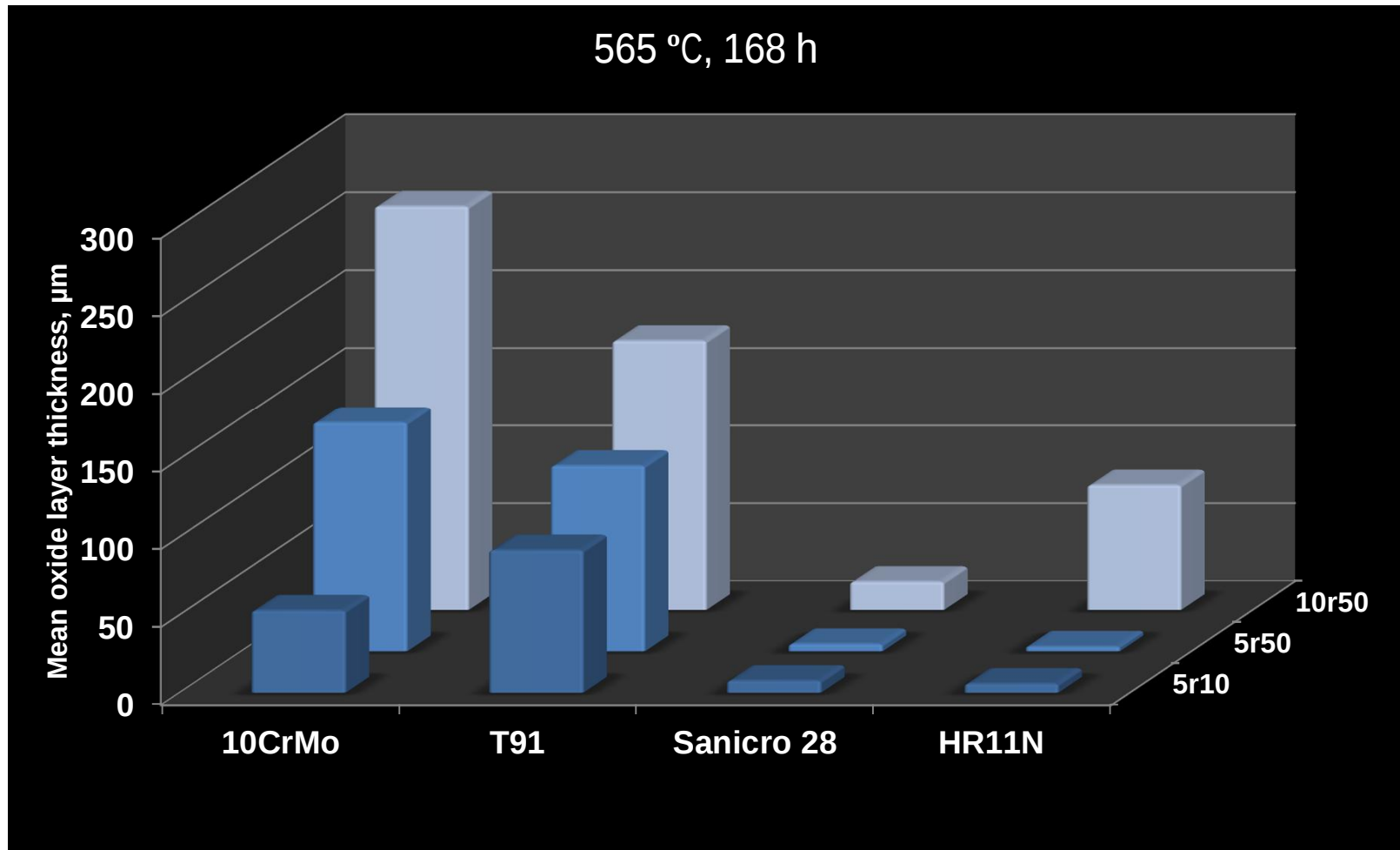
1. Preparation of salts
2. Preparation of steel samples for the experiment
3. Tube furnace tests
4. Preparation of samples for SEM/EDXA
5. Analysis of SEM results



Skyrec II – tests matrix

Temperatures	Steel	Salt	Status
525, 565	10CrMo	10r10	October
525, 565	T91	10r10	October
525, 565	10CrMo	10r10	October
525, 565	HR11N	10r10	October
525, 565	Sanicro 28	10r10	October
565	T91	10r50	174
565	HR11N	10r50	38
565	Sanicro 28	10r50	18
565	10CrMo	10r50	260
565	HR11N	10r50	80
525, 565	T91	10r80	October
525, 565	10CrMo	10r80	October
525, 565	Sanicro 28	10r80	October
525, 565	HR11N	10r80	October
525, 565	T91	10r80	October
565	10CrMo	5r10	15
565	T91	5r10	92
565	Sanicro 28	5r10	8
565	HR11N	5r10	6
565	10CrMo	5r10	53
565	HR11N	5r50	2
565	10CrMo	5r50	147
565	Sanicro 28	5r50	5
565	HR11N	5r50	3
565	T91	5r50	119
525, 565	T91	5r80	SEM
525, 565	10CrMo	5r80	SEM
525, 565	Sanicro 28	5r80	SEM
525, 565	HR11N	5r80	SEM
525, 565	T91	5r80	SEM

Skyrec II – results



Skyrec II – remarks

- First results show that increase of Na_2S in the salt mixture (5r10 vs. 5r50) enhances slightly corrosion on low alloy steels (10CrMo and T91)
- S28 and HR11N showed quite good resistance to 5r10 and 5r50 salts – corrosion $< 10 \mu\text{m}$
- Low alloy materials (10CrMo and T91) corroded badly in all three tested salts: 5r10, 5r50 and 10r50
- Salt 10r50 caused extreme degradation to 10CrMo, T91 and HR11N
- S28 performed best out of tested materials (relatively low corrosion with 5r salts but already significant with 10r50)
- Salt 10r50 caused swelling of the salts+corrosion products
- Swelling was not observed after exposures with 5r salts

Skyrec II – To be done

- Corrosion tests to be finished (4 more runs)
- Detailed analysis of all the samples from Skyrec II
- Final reporting (date to be decided)
- Corroded samples will be reported in a printed version of the report
- All the results (SEM/EDX) will be delivered on the CD

APPENDIX 5

**Boildec Oy
Field tests of furnace materials –
test No.4 report 7.6.2011**

Prepared by: Jussi Vänskä

Date: 7.6.2011

Subscriber: Finnish recovery boiler committee

FURNACE TUBE TEST PROBE

The aim of this test was to expose selected materials to recovery boiler furnace conditions for longer period than 1000 hours that was used in previous tests so that the average material temperature (on furnace side surfaces) is $440^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. The total test period was now 2720 hours. Materials tested in this test were 3R12 (304L), San 67, carbon steel and HN52 ("N").

The test was started by installing the test probe in place on 2nd of February 2011 at noon. Set value for system pressure was set at 9,4 bar(a). The test began when pressure exceeded 8,0 bar(a) at 1:26 pm. The saturation temperature of heat transfer oil exceeded then 370°C according to thermocouple readings (and was about 20°C more than water saturation temperature at 170 bar pressure).

The test was completed on 6th of June 2011 at 8:48 am when the probe had been exposed to boiler furnace conditions for 2720 hours. During the whole 2720 hour test period the system pressure stayed above 8 bar(a) 2154 hours.

The calculated average temperature on the surface of the top test piece (3R12) was 435°C and 442°C on the surface of the lowest test piece ("N"). The total exposure time was 2720 hours of which the pressure stayed above 8 bar(a) 2154 hours, i.e. 79 % of the time.

As the estimated surface temperatures in all test pieces were reasonable close to the target value of 440°C for a significant portion of the test duration and there were no uncontrolled excursion of material temperatures, the test was carried out successfully.

Instrumentation of the test device

The test probe was equipped with four thermocouples, two of which installed vertically and horizontally in the middle of the top (3R12) and the lowest ("N") test pieces. Other two thermocouples were installed inside the tip, one measuring the cooling oil temperature and the other one inside surface temperature. The set value for system pressure was selected on the basis of the thermocouple readings and the data from previous tests. The pressure was adjusted with a cooling fan regulated by PI controller. When the pressure was set at 9,4 bar(a) the upper thermocouple inside the test

Prepared by: Jussi Vänskä

Date: 7.6.2011

Subscriber: Finnish recovery boiler committee

pieces gave readings around 420 °C and the lower one temperatures around 425 °C.

The probe was also equipped with two electric heating elements to make sure that the system pressure would not drop too low when the tip of the probe is sprayed by black liquor (the probe was installed in an empty liquor gun opening, i.e. close to operating liquor guns). The electric heating elements were automatically turned on/off when temperature of the test device dropped below/increased above the set point. The set point was selected so that the system pressure would remain above 5 bar(a) (with cooling oil saturation temperature more than 345°C) all the time the probe is installed.

Inner side surface temperature, cooling oil temperature and system pressure during the test

In figure 1 are shown the temperature on the inner side surface, cooling oil saturation temperature and system pressure between 4th of February and 10th of Mars.

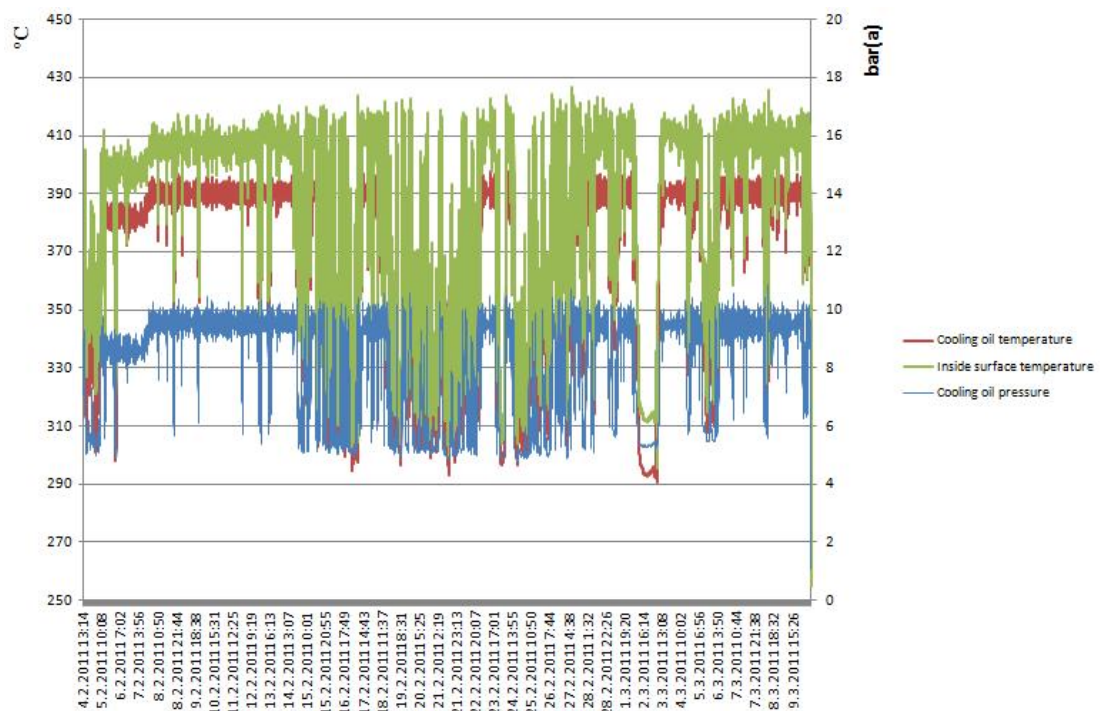


Figure 1. Inner side surface temperature, cooling oil saturation temperature and system pressure 4.2 – 10.3.2011.

Prepared by: Jussi Vänskä

Date: 7.6.2011

Subscriber: Finnish recovery boiler committee

During the first 814 hours of the test (4.2 – 10.3.2011) the black liquor guns were positioned some of the time in a manner that the tip got sprayed by black liquor and the heat flux wasn't strong enough to keep the cooling oil pressure constant. That can be seen in figure 1 as heavy fluctuation in cooling oil pressure and temperature.

In figure 2 are shown the temperatures in the middle of the top and the lowest test pieces 4.2 – 10.3.2011.

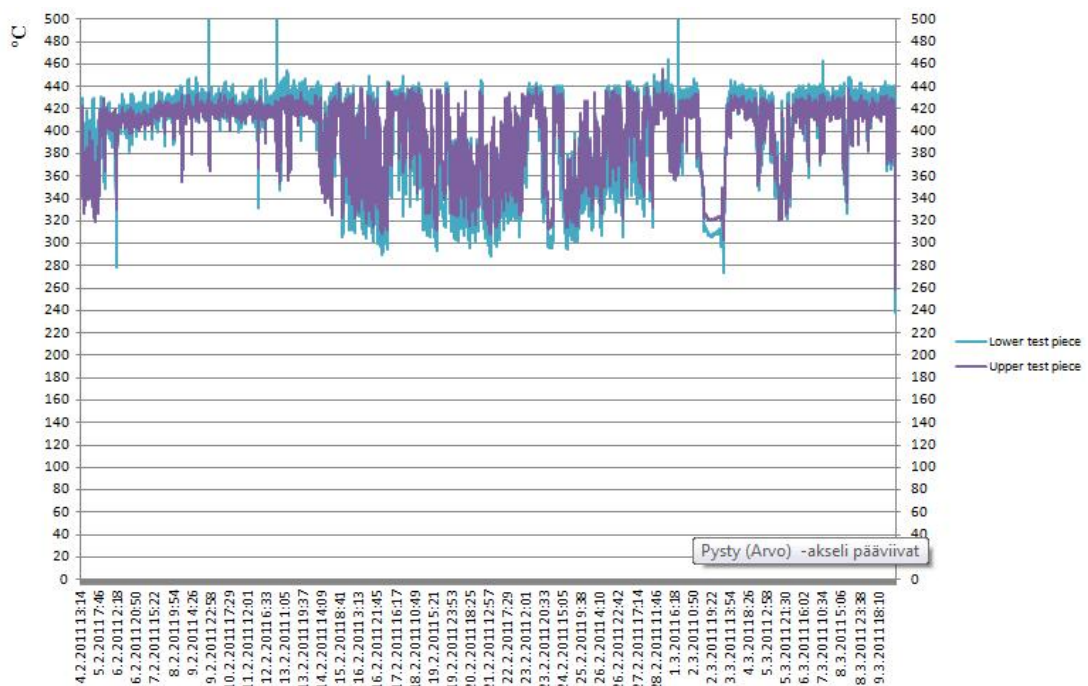


Figure 2. Temperatures in the middle of the top and the lowest test pieces 4.2 – 10.3.2011.

On 10th of Mars there was discovered a small leak in the test probe cooling oil system and the probe had to be drawn out of the liquor gun opening and cooled down for repairing the leak. The test probe was back in operation on next day.

In figure 3 are shown the temperature on the inner side surface, cooling oil saturation temperature and system pressure between 11th and 31th of Mars.

Prepared by: Jussi Vänskä

Date: 7.6.2011

Subscriber: Finnish recovery boiler committee

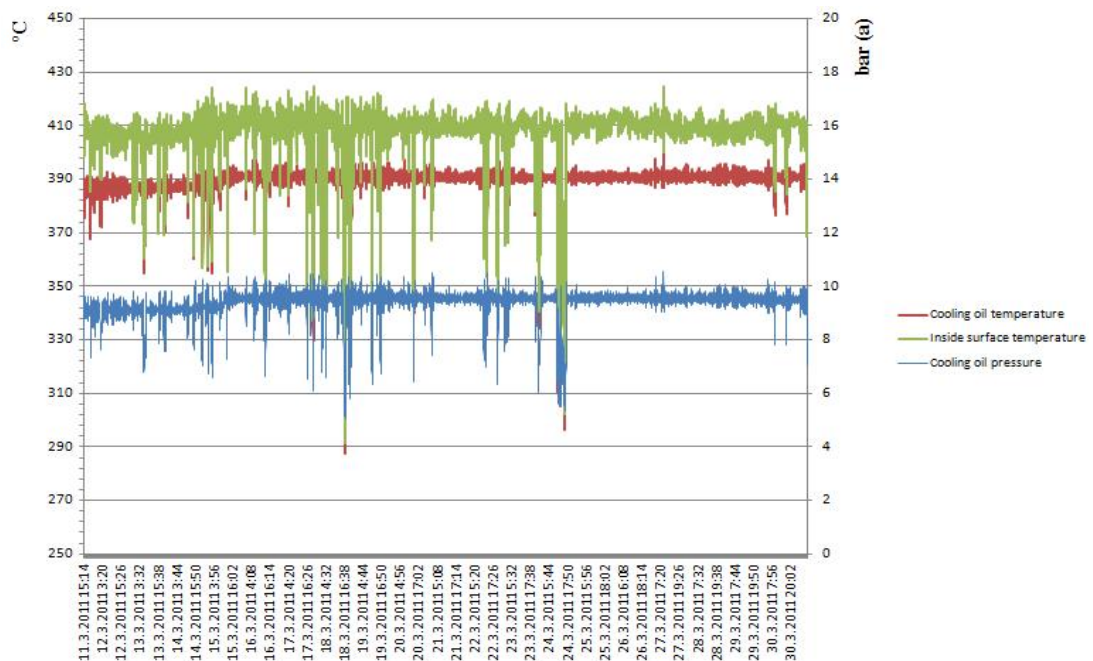


Figure 3. Inner side surface temperature, cooling oil saturation temperature and system pressure 11 - 31.3.2011.

Both thermocouples installed inside the test pieces broke down after installing the probe back on liquor gun opening after repairing the leak.

On 31th of March there was discovered again a small leak in the test probe cooling oil system and the probe had to be drawn out of the liquor gun opening and cooled down for repairing the leak. The test probe was back in operation on 4th of April.

In figure 4 are shown the temperature on the inner side surface, cooling oil saturation temperature and system pressure between 4th of April and 6th of June.

Prepared by: Jussi Vänskä

Date: 7.6.2011

Subscriber: Finnish recovery boiler committee

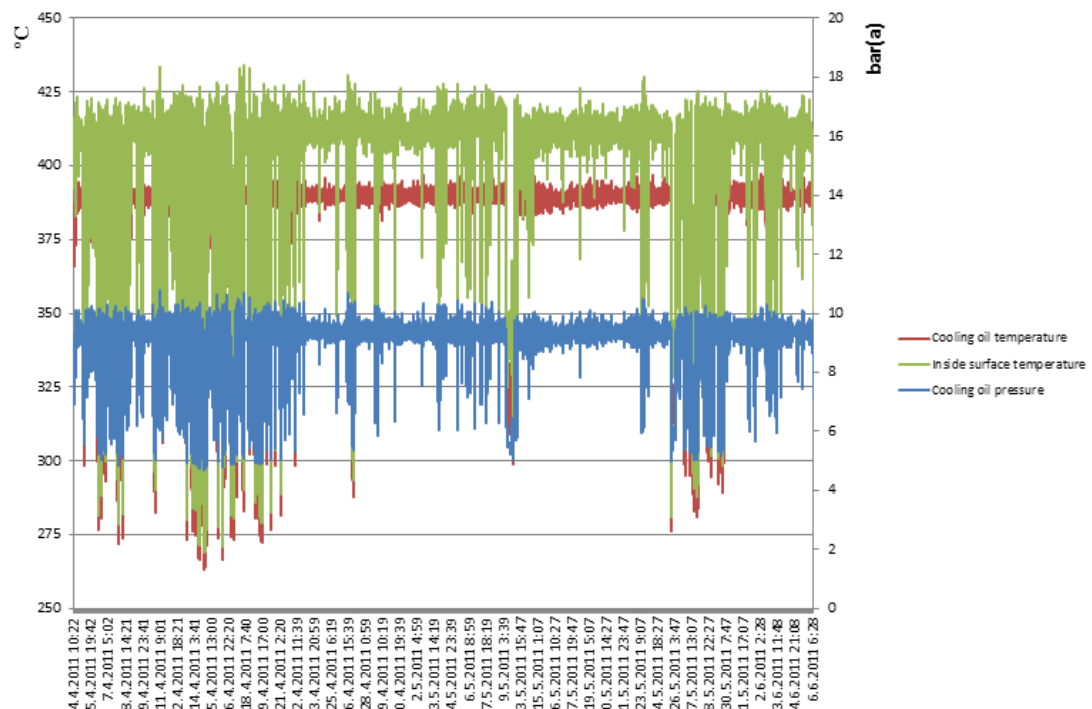


Figure 4. Inner side surface temperature, cooling oil saturation temperature and system pressure 4.4 – 6.6.2011.

During the whole 2720 hour test period the system pressure stayed above 8 bar(a) 2154 hours.

Material temperatures

Temperatures on test piece furnace side surfaces can be calculated by using average heat fluxes across the test pieces that can be calculated from the measured inner side surface temperature and the temperatures in the middle of the test pieces. When the thermocouples placed in the middle of the top and the lowest test pieces were still working (4.2 – 10.3.2011) and gave temperature readings between 400 – 445 °C, the measured temperature difference between the top test piece and probe inner side surface was 11,0 °C on average. At that time the average temperature on the probe inner side surface was 407,8 °C, i.e. the average temperature in the middle of the lowest test piece was 418,8 °C. The temperature difference for the lowest test piece and the inner side surface was accordingly 17,0 °C, i.e. the average temperature in the middle of the lowest test piece was 424,8 °C.

Prepared by: Jussi Vänskä

Date: 7.6.2011

Subscriber: Finnish recovery boiler committee

Heat transfer coefficient for 3R12 material (top test piece) at 400 °C is 22 W/m°C, 45,3 W/m°C for carbon steel at 400 °C and cladding thicknesses 1,65 mm for 3R12 material and 5,41 mm for carbon steel. Heat transfer coefficient for "N" material (lowest test piece) 400 °C is 18,5 W/m°C and material thickness 3,65 mm.

Average heat flux across the top test piece can now be calculated to be 142 kW/m² and 173 kW/m² across the lowest test piece. With these average heat fluxes the average surface temperature on the top test piece furnace side surface is 435 °C and 442 °C on the lowest test piece surface.

In figure 5 are illustrated the temperature distributions in the middle of the top and the lowest test pieces during 4.2 – 10.3.2011, when the thermocouples were still working properly and the cooling oil pressure was close to set value (> 8 bar(a)).

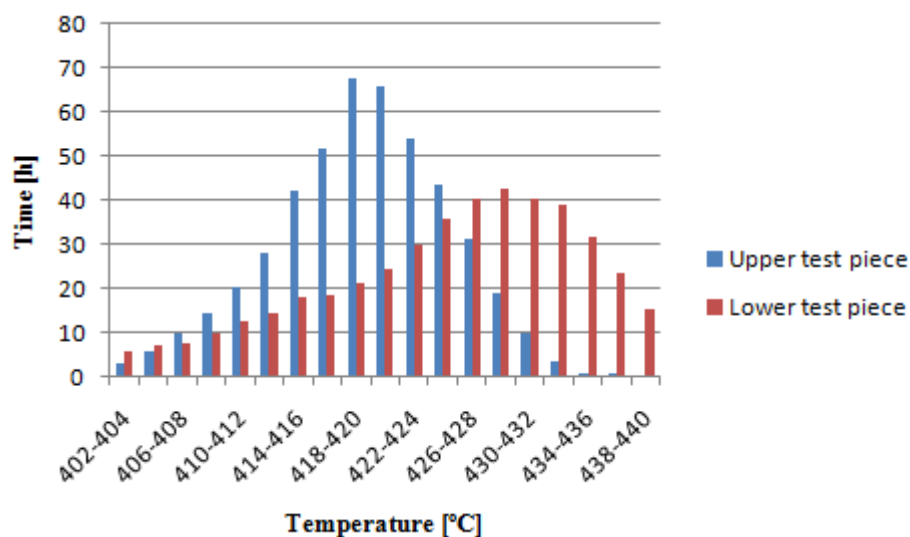


Figure 5. Temperature distributions in the middle of the top and the lowest test pieces 4.2 – 10.3.2011 when the cooling oil pressure was close to set value (> 8 bar(a)).

Summary

The calculated average temperature on the surface of the top test piece (3R12) was 435°C and 442°C on the surface of the lowest test piece ("N"). The total exposure time was 2720 hours of which the pressure stayed above 8 bar(a) 2154 hours, i.e. 79 % of the time.

Prepared by: Jussi Vänskä

Date: 7.6.2011

Subscriber: Finnish recovery boiler committee

The temperatures in other two test pieces were not measured, but there is no reason to believe that they would have been markedly different from those of the upper test piece.

As the estimated surface temperatures in all test pieces were reasonable close to the target value of 440°C for a significant portion of the test duration and there were no uncontrolled excursion of material temperatures, the test was carried out successfully.

APPENDIX 6

**Boildec Oy
Field tests of furnace materials –
offer test No.5 extension 9.9.2011**



Markus Nieminen
Soodakattilayhdistys

9.9.2011

TULIPESÄSONDIPROJEKTIN LISÄKOKEEN JATKAMINEN

Toimituksen sisältö

Viimeisen kokeen kestoa jatketaan suunnitellusta 1000 tunnista tavoitteena tehdä koe yhtä pitkänä kuin edellinen koe, jonka kesto oli 2700 tuntia.

Aikataulu

Suunniteltu 1000 tuntia saavutetaan n. 16.9. Jos koetta jatketaan seisokkiin saakka, joka alkaa 2.10. tulee kokeen kestoksi n. 1300 tuntia. Jos koetta jatketaan edelleen seisokin jälkeen niin, että kokeen kokonaiskestoksi tulee 2700 tuntia, tulee koetta jatkaa vielä kahdeksan viikon ajan. Tällöin koe loppuisi joulukuun toisella viikolla (viikko 49). Yhteensä kokeen pituus kasvaa tällöin noin 10 viikkoa pidemmäksi kuin alun perin oli suunniteltu.

Kustannukset

Kokeen jatkamisesta aiheutuvat kustannukset ovat 2880 euroa + 420 euroa/viikko. Jos siis koetta jatketaan 10 viikolla, ovat kustannukset 7080 euroa (+ alv). Kustannukset aiheutuvat laitteiston paikoiltaan poistosta ja uudelleen käyttöönotosta seisokin yhteydessä sekä kerran viikossa tehtävästä laitteiston tarkastuksesta ja tiedonkeruusta paikan päällä.

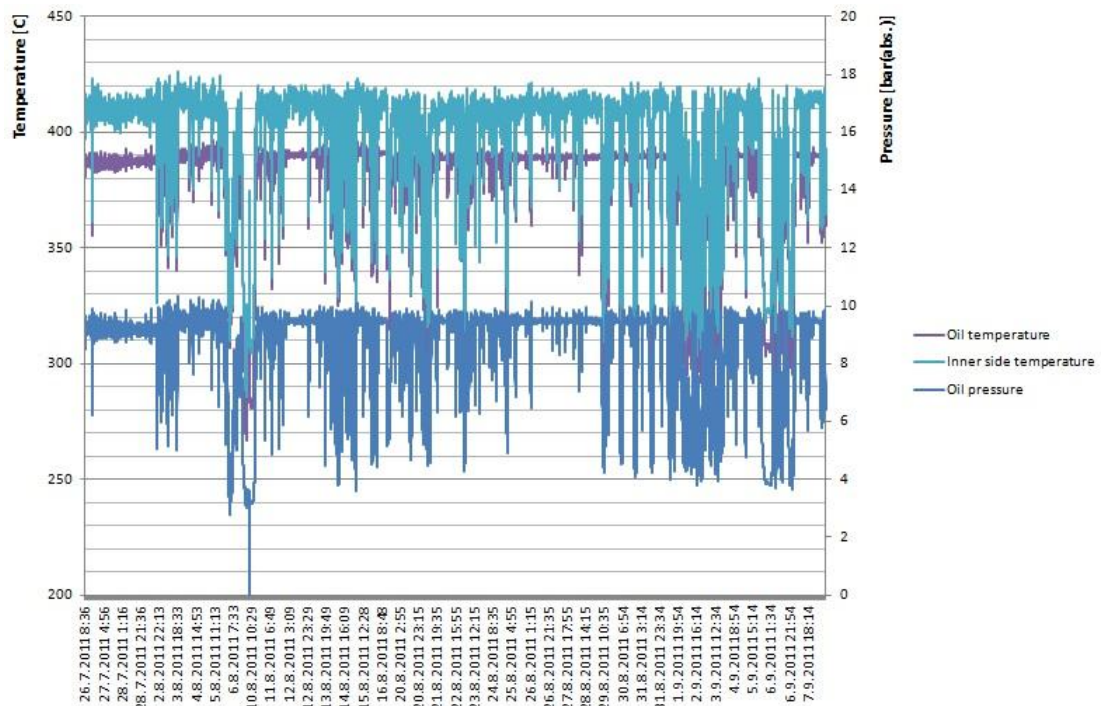
Kokeen jatkamiseen liittyvät riskit

Sondin paine- ja lämpötilasäätö on toiminut hyvin niin, että liian korkeilta lämpötiloilta on välttytty. Sisäpinnan lämpötilamittaus ja öljyn lämpötilamittaus toimivat edelleen eikä tuloksissa oli havaittavissa muutoksia, jotka viittaisivat esim. sondin sisäpinnan likaantumiseen. Instrumentoinnin ja säädön osalta koetta voidaan jatkaa ilman, että riski kokeen epäonnistumisesta laitteiston vikaantumisen takia kasvaa merkittävästi. Koepalojen sisälle asennetut, osin sondin pinnassa kulkevat termoelementit vikaantuivat jo kokeen alussa.

Kuten kuvasta 1 nähdään, sondin paine ja lämpötila on heilahdellut ajoittain huomattavasti (säätöarvoista alaspäin), kun sondin pinnalle on satanut



palamatonta mustalipeää tai kattilan kuormaa on muutettu. On mahdollista, että nämä muutokset jännityksissä rasittavat hitsisaumoja, jolloin säröjen riski voi kasvaa. Tähän mennessä sondissa ei ole ollut kertaakaan hitsisaumavuotoa, joka olisi syntynyt kokeen aikana, mutta tällaisen mahdollisuutta ei voida sulkea pois pitkän kokeen aikana.



Kuva 1. Sondin paine ja lämmönsiirtoaineen ja koepalan sisäpinnan lämpötilat 26.7. – 7.9.2011

Laskutus

Työ laskutetaan, kun koe on päättynyt ja, jos koe saadaan onnistuneesti päätökseen, koepalat on toimitettu VTT:lle.

Vantaalla, 9.9.2011

Timo Karjunen

APPENDIX 7

VTT

**Analysis of the furnace test materials –
presentation 8.9.2011**

SKYREC

Probe Tests in Lower Furnace

- *First characterisation results from Probe 4*

Pekka Pohjanne
VTT Technical Research Centre of Finland
08.09.2010

Corrosion resistance evaluation – Procedures

~~A. Weight loss / weight gain:~~

- ~~Extremely difficult/impossible due to used specimen geometry and probe type (welded bevelled tube sector specimens)~~

B. Wall thickness measurements (corrosion rate)

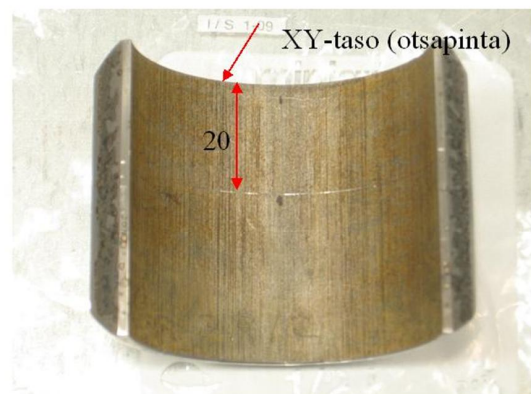
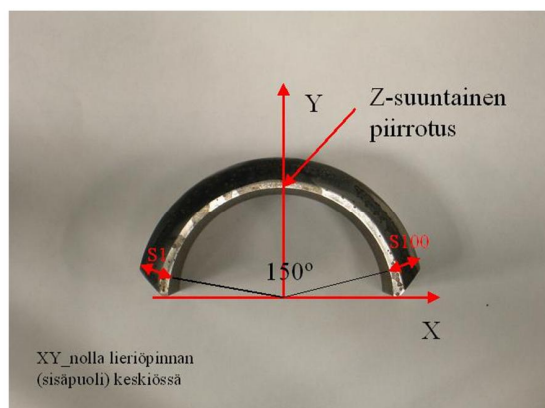
- Before testing
 - Thickness profiles at a function of circumference from three locations (axial direction) – Coordinate measurement machine, 100 points / location (Mikes)
- After the test
 - Wall thickness & type of corrosion from cross sections from the same locations as the thickness profiles. **Do not give reliable results, e.g. problems in alignment and specimens edges round in polishing which cause error to WT measurements.**
 - Replaced with thickness profile measurements

C. Characterisation and corrosion mechanism – Next step

- Optical microscope & SEM/EDS from metallographic cross sections after the profile measurements

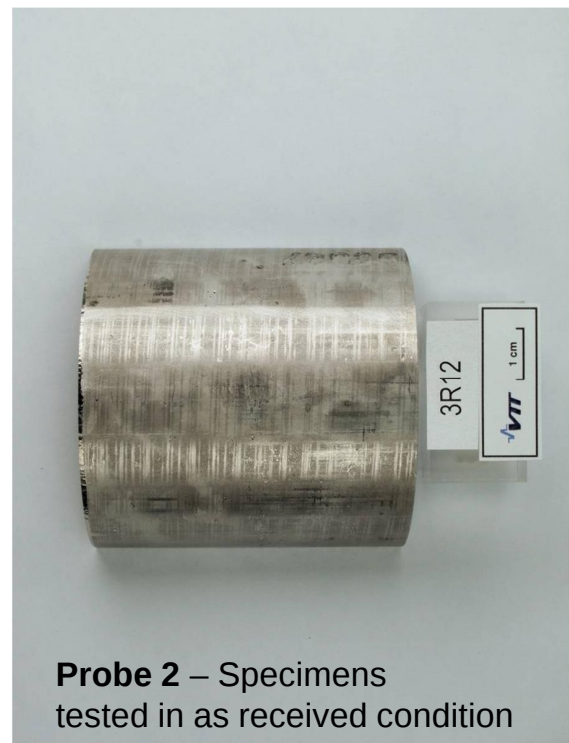
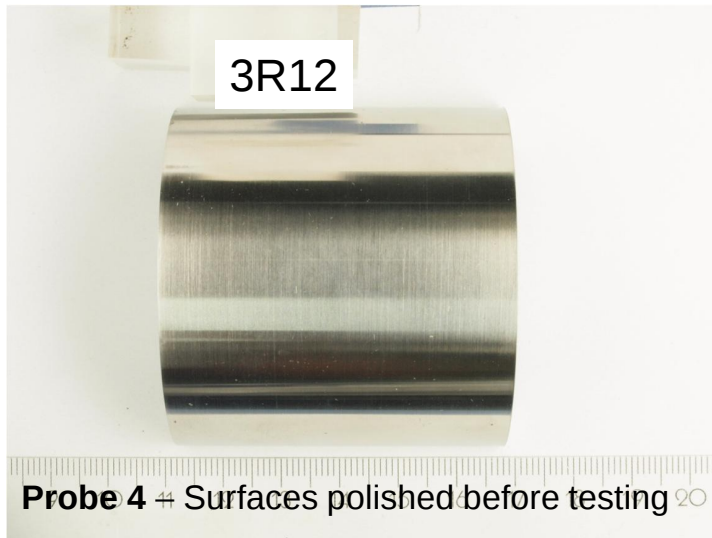
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Duration	02.03. – 15.04.2010 (1006 h)	10.06. – 23.06.2010 (1023 h)	16.7. – 6.9.2010 (1250 h)	2.2 – 6.6.2011 (2720 h)	
T_{ave}	432...435 °C	435...440 °C		435...442 °C	
T_{max}	< 530 °C	< 462 °C			
Materials	3R12, 3RE28, SAN28, AN38	3R12, 3XRE28, HR11N, AN67	3R12, HR11N, SAN 38, Super 625	C-steel 3R12, Super 625 SAN67	3R12, SAN28, HR11N, SAN38

Thickness profiles (Mikes)

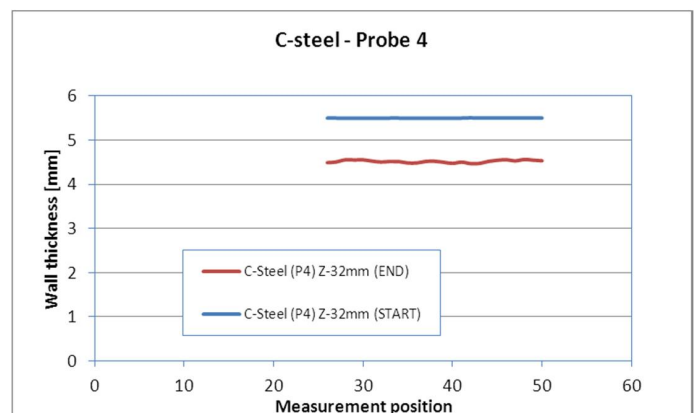
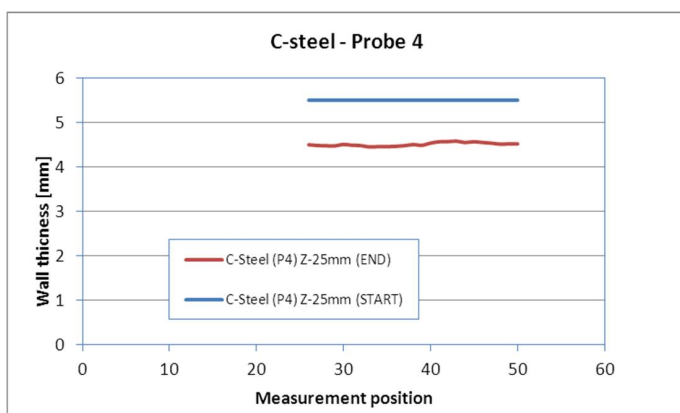


- As a function of circumference (100 points (S1...S100))
- Axial direction – Z 15mm, 25mm and 32 mm

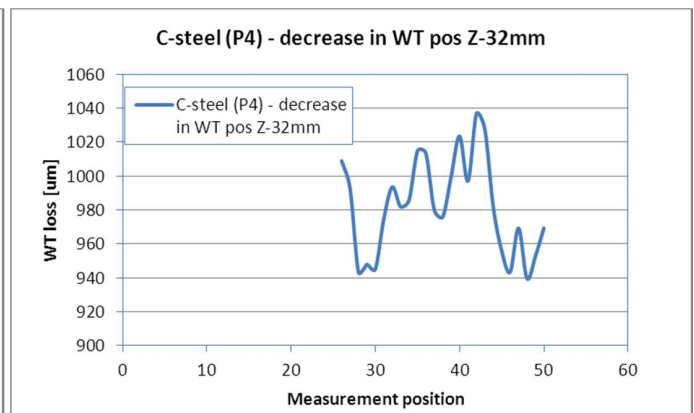
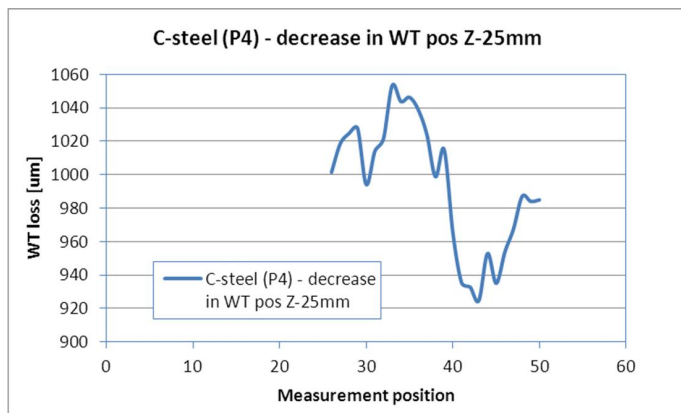
Probe 3 and 4 – Examples of surface qualities



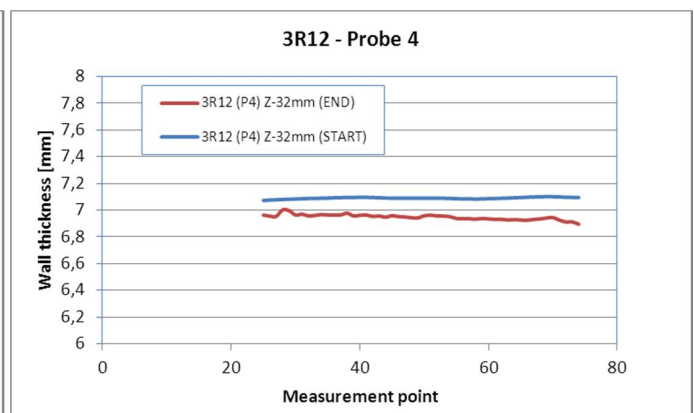
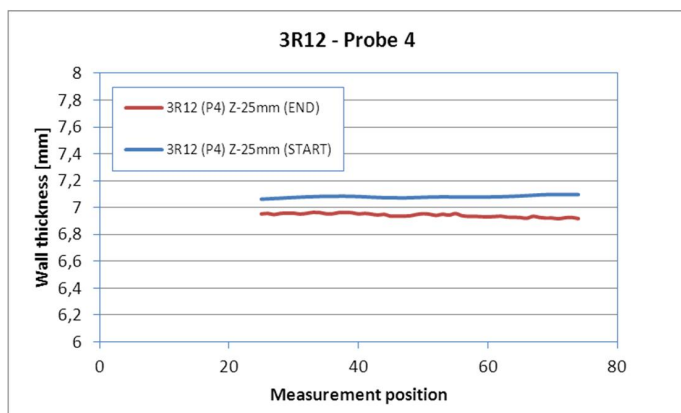
Probe 4 – WT measurements



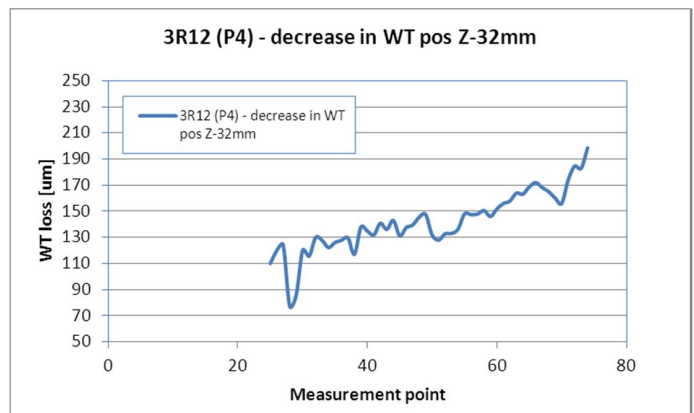
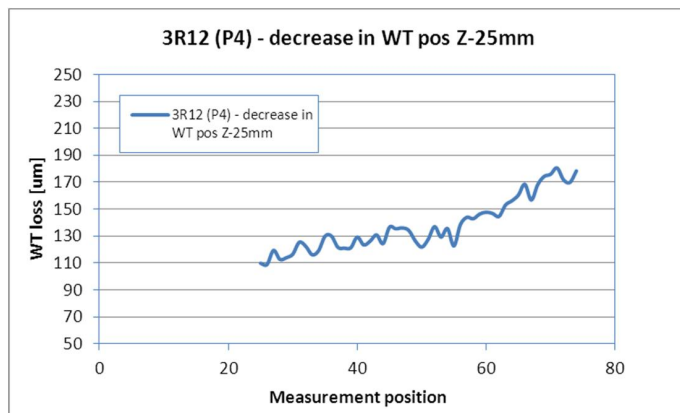
Probe 4 – WT measurements



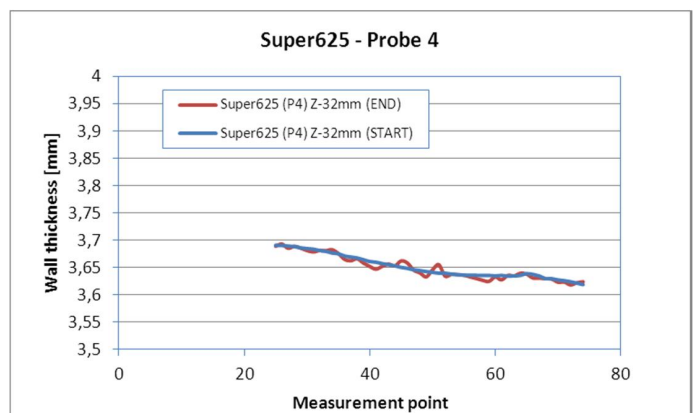
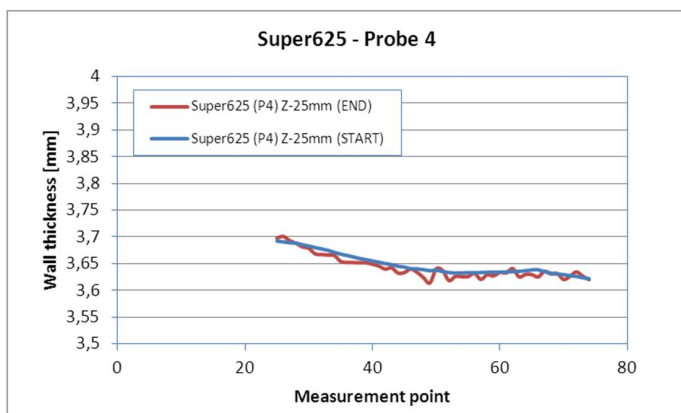
Probe 4 – WT measurements



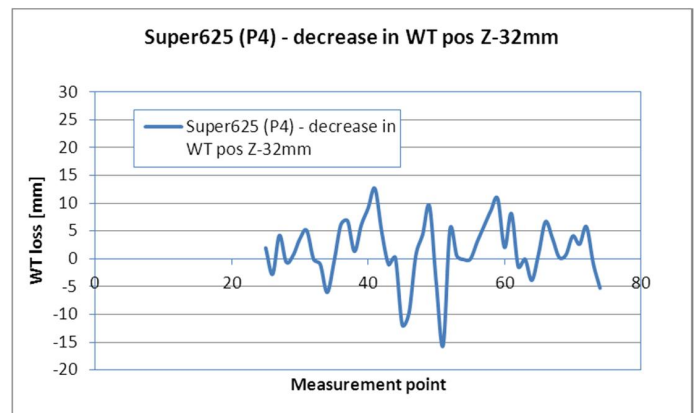
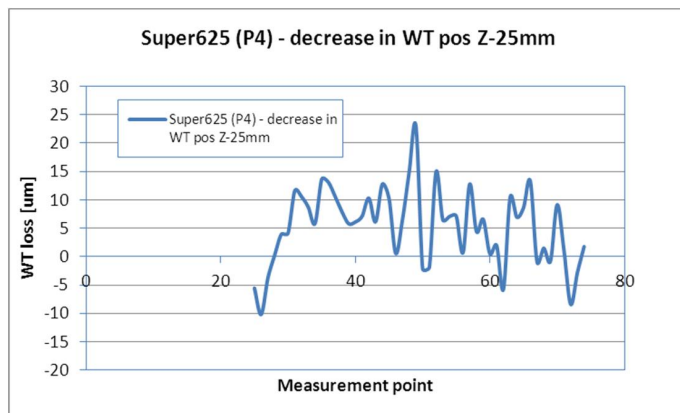
Probe 4 – WT measurements



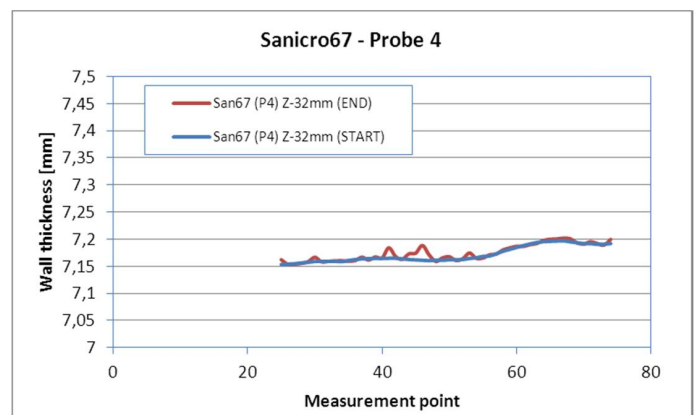
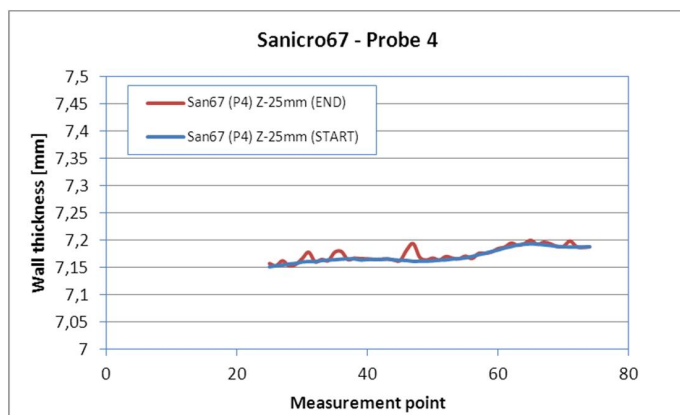
Probe 4 – WT measurements HR11N -> Super625



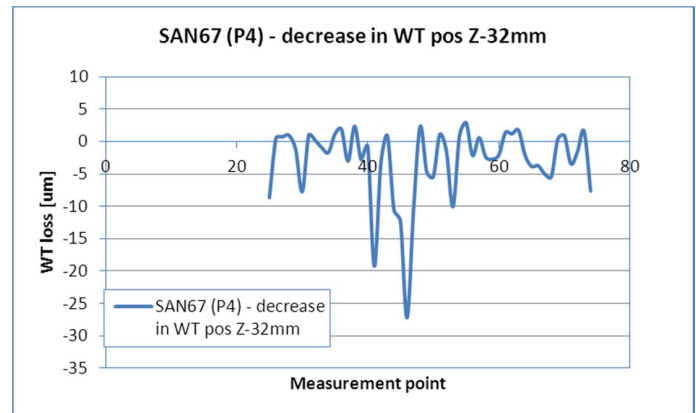
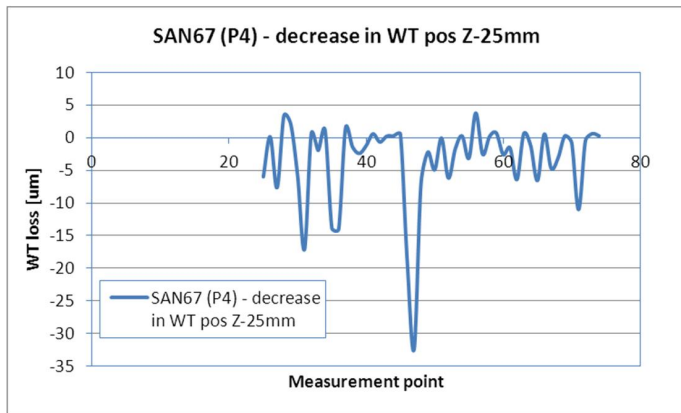
Probe 4 – WT measurements



Probe 4 – WT measurements



Probe 4 – WT measurements



APPENDIX 8

FRBC material recommendation – chapter 3: Repair of pressure vessels

1 PAINEASTIAN KORJAUKSET

1.1 Yleistä

Soodakattilan käyttövarmuuden ja käyttöturvallisuuden ylläpitämiseksi on tehtävä korjauksia, joiden sisältö ja laajuus ~~on~~ 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.

~~Viime vuosien aikana on tapahtunut runsaasti muutoksia paineastioita koskevissa määräyksissä ja ohjeissa muun muassa jäsenyydestä EU-jäsenyyden vuoksi. Asiakirjat, joihin tässä kappaleessa viitataan, ja muut paineastioita käsittelevät ohjeet ja standardit, muuttuvat edelleen tämän kehityksen seurauksena kohtuullisen nopealla aikataululla. Tekstiin on pyritty lisäämään linkkejä internetsivuille joilta voi ladata viimeisimmät versiot ohjeista/standardeista.~~

1.2 Oppaat

[TUKES on julkaissut seuraavia oppaita liittyen painelaitteisiin:](#)

[Painelaiteopas:](#)

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

[Painelaitteiden kunnossapito:](#)

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

[Painelaitteiden määräaikaistestaukset:](#)

http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_opaat/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

1.2.1.3 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](#)

Field Code Changed

Field Code Changed

julkaistu kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksessä painelaiteturvallisuudesta (KTMp 953/ 1999).Nykyisessä paineastia-asetuksessa 549/73 (ja sen muutoksissa 672/75, 636/77, 1106/81, 257/84, 506/87, 1024/91, 1477/93 ja 1162/95) rinnastetaan asennus sekä muutos- ja korjaustyö paineastian valmistukseen. Tulevaan säännöstöön on suunniteltu muutoksia, joissa valmistaminen ja toisaalta asennus-, korjaus- ja muutostyöt ovat selkeästi eriteltynä. Tuleva painelaitedirektiivi ei nimittäin pidä sisällään korjaus- ja muutostöitä.

A

Painelaite tarkoittaa säiliöitä, putkistoja, varolaitteita ja paineenalaisia lisälaitteita. Painelaitteiden osiksi luetaan tarvittaessa myös paineenalaisiin osiin kiinnitetyt osat kuten laipat, yhteyt, 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 täyttymisestä. Vaarattomimpiin painelaitteisiin ei tule CE-merkintää.

Painelaitesäädösten vaatimuksia on tarkemmin kuvattu TUKESin julkaisemassa painelaiteoppaassa.setusmuutoksessa (1162/95) todetaan mm: "Paineastian valmistajalla tulee olla 1) palveluksessaan asiantunteva henkilöstö, 2) käytettävissään asianmukaiset tilat ja paineastian valmistuksessa tarvittavat koneet, välineet ja laitteet, sekä 3) käytössään riittävät hallinnolliset ja tekniset menettelyt paineastioita koskevien säännösten ja määräysten täyttämiseksi. Paineastioita saa valmistaa vain toiminnanharjoittaja, jonka 1. momentissa mainitut toimintaedellytykset tarkastuslaitos on arvioinut riittäviksi. Lisäksi valmistuksen on tapahduttava 4. luvussa tarkoitetun valmistajan valvojan valvonnassa." Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että mikä tahansa konepaja ja sen henkilöstö eivät saa tehdä paineastian valmistusta ja korjauksia. Valmistusta tarkastaa tällä hetkellä TTK (tulevaisuudessa voi Suomessa olla muitakin tarkastuslaitoksia) ja määräysten noudattamista valvoo TUKES.

Myös A-ryhmään kuuluvaan putkistoon sovelletaan Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksen 71/75 (ja sen muutokset 394/84, 1027/91 ja 1192/95) mukaan paineastia-asetuksen valmistusta ja valmistuksen valvojaa koskevia säännöksiä sekä paineastian suunnittelusta ja valmistuksesta annettua Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöstä 391/84 (ja sen muutoksia 1026/91 ja 1190/95).

1.31.4 Hitsauksen laatu

Standardit SFS-EN ISO 3834-2SFS-EN 729 2:1995, "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. ~~Muun muassa TTK on arvioinut ja sertifioinut eräiden hitsattavien yritysten laatujärjestelmän. Myös lämpökäsittelyn laadunhallintaan saataneen tulevaisuudessa vastaavanlainen standardi.~~

1.41.5 Hitsaajan pätevyystodistukset

Korjaustyötä tekevällä hitsaajalla on oltava voimassa oleva pätevyyskoe, joka on teräksille standardin SFS-EN 287-1 mukainen.

1.51.6 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:

- ~~– jossa yksityiskohtaisesti esitetään tiettyyn hitsaussovellutukseen vaadittavat muuttujat toistettavuuden varmistamiseksi. Hitsausohjeen hyväksyntä voidaan hankkia perustuen aikaisempiin hitsauskokemuksiin~~
- ~~– hyväksytty testattuihin hitsausaineeseen~~
- ~~– menetelmäkokeeseen~~
- ~~– standardi hitsausohjemenetelmään~~
- ~~– tai esituotannolliseen kokeeseen."~~

~~ja jossa esitetään vaadittavat hitsausmenetelmän muuttujat toistettavuuden varmistamiseksi tuotantohitsauksessa (otteet standardista SFS-EN ISO 15607/SFS-EN 288-1).~~

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 hitsausuositukset~~
- ~~– SFS-EN 12952-5 Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 5: Paineellisten osien valmistus~~

1.61.7 Asennus-, korjaus- ja muutostyöt

Käytössä olevien painelaitteiden asennus-, korjaus- ja muutostöissä sovelletaan kauppaja 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~~

Formatted: Normal C1

Formatted: Bullets and Numbering

– 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 aineen koetusta 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.

"Käyttöön hyväksytyn paineastian saa korjata paineastian valmistuksessa käytetyn ja hyväksytyn rakennesuunnitelman mukaan, ellei vaurioitumisen syy muuta edellytä. Korjaus- ja muutostyön tarkastamista varten on tarvittaessa tehtävä piirustukset ja lujuuslaskelmat, jotka on toimitettava vähintään kahtena kappaleena tarkastuslaitokseen." (Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös – paineastiain suunnittelusta ja valmistuksesta 391/84 ja sen muutokset 1026/91 ja 1190/95). Kyseisessä tapauksessa tarkastuslaitos on TTK.

Korjaustyöhön ja asennukseen liittyy seuraavanlaisia asiapapereita:

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

Edellä mainituista asiapapereista jää yleensä yksi kappale paineastian omistajalle ja yksi valmistajalle. ~~Aikaisemmasta käytännöstä poiketen TTK ei enää tarvitse kopiota kyseisistä asiapapereista.~~

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

1.7.1.8 Painekoe

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös (953/1999) Standardi SFS 3321 toteaa antaa ohjeet paineastian painekokeen suorittamisesta:

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

Painekoe 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.

Nestepainekoe on tehtävä vähintään paineella, joka on 1,3 kertaa suurin sallittu käyttöpaine ja kaasupainekoe paineella, joka on 1,1 kertaa suurin sallittu käyttöpaine. Jos erityiset syyt vaativat, tarkastuslaitos voi hyväksyä käytettäväksi muun koepaineen.

Painekoe 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.”Kyseisessä standardissa todetaan, että painekoe on yleensä suoritettava nestepainekokeena, jolloin nesteinä käytetään vettä. Painekokeen aikana paineastian seinämien lämpötila ei saa ylittää +50 C:ta ilman perusteltua syytä. Kuitenkin on muistettava, että paineastian kuormittaminen matalassa lämpötilassa voi vahingoittaa haurasmurtumiselle altista materiaalia. Mikäli esimerkiksi lieriömateriaali on sellaista terästä, että haurasmurtumariskin välttämiseksi paineastian seinämän lämpötila +50 C joudutaan ylittämään, on tällaisessa tapauksessa syytä arvioida ja tiedostaa kaikki riskit (henkilövahingonmahdollisuus) ja sopia kokeen suorituksesta tarkastuslaitoksen (TTK) kanssa.

1.8.1.9 Korjauksen luonne

1.8.1.9.1 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 tulevalle työmaalla.

1.8.2.1.9.2 Ennalta arvaamattoman tapahtuman korjaus

Tilanne muuttuu oleellisesti, kun joudutaan korjaustilanteeseen yllättäen joko vaurion tai huoltoseisokkitarkastuksen 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.

1.8.31.9.3 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 ajaututaan 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. Pyöristämällä 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.

1.9.4 Häätäkorjaukset (UUSI OTSIKKO 30.8.2010)

Formatted: Bullets and Numbering

APPENDIX 9

FRBC material recommendation – chapter 4: Recovery boiler inspections

SISÄLLYSLUETTELO

1	SOODAKATTILATARKASTUKSET.....	2
1.1	Yleistä.....	2
1.2	Tarkastusmenetelmät	3
1.2.1	Silmämääräinen tarkastus/VT (visual testing).....	4
1.2.2	Paksuusmittaus/ TM (thickness measurement)	4
1.2.3	Magneettijauhetarkastus / MT (magnetic particle examination).....	5
1.2.4	Tunkeumanestetarkastus / PT (liquid penetrant examination)	5
1.2.5	Radiografia/RT (radiographic examination)	6
1.2.6	Ultraäänitarkastus / UT (ultrasonic examination)	7
1.2.7	Pyörrevirtatarkastus/ET (eddy current testing).....	8
1.2.8	Jäljennemenetelmä/REP (replica).....	8
1.2.9	Endoskooppitarkastus/END (endoscopy).....	9
1.2.10	Akustinen emissioseuranta / AE (acoustic emission).....	9
1.2.11	Lämpökuvaus (thermography)	10
1.2.12	Kovuusmittaus/HT (hardness test)	10
1.2.13	T-Scan paksuusmittaus	10
1.2.14	IRIS-tekniikka	11
1.2.15	Sisäpuolisen kerrostuman / magnetiittikalvon paksuusmittaus	11
1.2.16	Guided Wave	13
1.2.17	RFET (kaukokenttämenetelmä pyörrevirtatekniikalla, Remote Field Electromagnetic Technique).....	14
1.2.18	Magneettinen vuotokenttätarkastus (MFL)	14
1.2.19	Jäännös jännitystilat.....	14
1.2.20	Ainetta rikkovat tarkastukset	15
1.3	Tarkastettavat kohteet.....	15
1.4	Vesipainekoe korjausten jälkeen	15
1.5	Dokumentointi	15

1 SOODAKATTILATARKASTUKSET

1.1 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 painelaite-turvallisuudesta 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 tarkastus-kohdetta varten vahvistamalla kunnonvalvontajärjestelmällä, jos se vaikutukseltaan vas-taa määräaikaistarkastusta. Kunnonvalvontajärjestelmästä on TUKES julkaissut ohjeen P2-2000.

Tämä suituksen lähtökohtana on, että soodakattilalle tehdään tarkastuksia jokaisessa vuosiseisokissa.

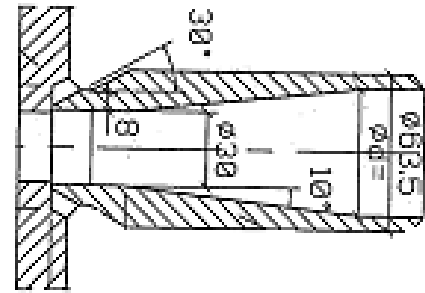
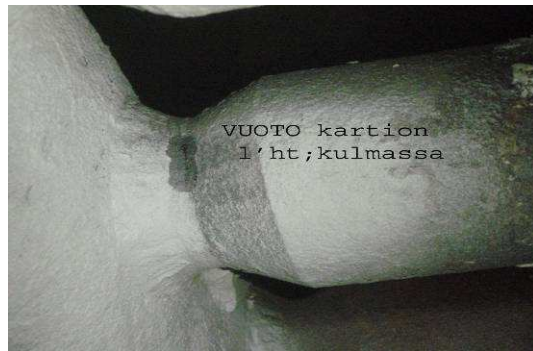
Soodakattilatarkastuksien onnistumisen perusedellytykset ovat:

- pitkäntähtäimen tarkastussuunnitelmat ja tarkastusohjeet
- pätevoidetyt 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 täy-sin korvaavia. Esimerkiksi ultraäänitarkastus paljastaa huonosti kolmiulotteiset viat, ku-ten esim. huokokset. Röntgen on herkkä säteilykeilan suuntaisille tasomaisille vioille, mutta epäherkkä säteilysuunnasta poikkeaville vioille.

NDT-menetelmien avulla voidaan ohjata hitsauksen laatua. On myös järkevää panos-taa hitsausvalvontaan, johon tärkeänä osana kuuluvat menetelmä- ja hitsaajakohtaiset työkokeet. Kun tarkastuslaajuus on vähemmän kuin 100 % tulee, vaaditun tarkastus-laajuuden täytyä hitsaajakohtaisesti.

Valmistuksen aikana tarkastusmenetelmiä ja -laajuutta arvioitaessa on huomioitava vi-ranomaismääräykset sekä kohteen sijainti sulavesiräjähdyssä, korjattavuutta ja käytön-aikaisia tarkastuksia ajatellen. Suunnitteluvaiheessa tulee jo arvioida mahdolliset vi-kaantumismekanismit ja käyttää NDT-asiantuntijoita arvioimaan rakenteiden tarkastet-tavuus.



Kuva 1. Ekonomaiserin jakotukin yhde.

Kuvassa 1 on hitsiliitos, jonka luotettava volymetrinen tarkastus NDT-menetelmillä on käytännössä mahdotonta. Valokuvan perusteella  on yhteen perusaineen epä-jatkuvuuskohdassa, joka paikantuu hyvin lähellä HAZ-aluetta. 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.

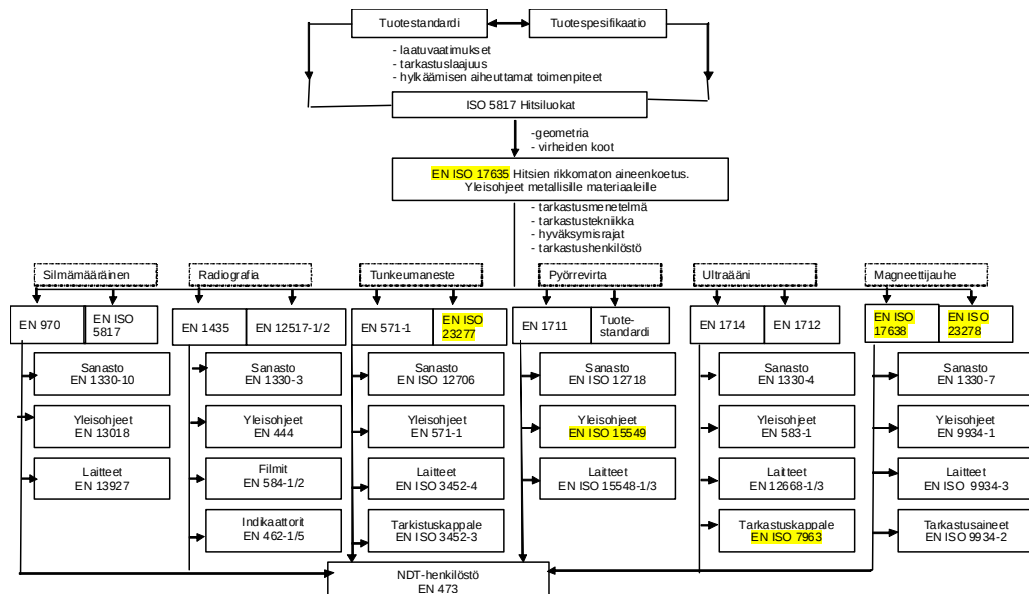
 Revision aikaisissa tarkastuksissa menetelmä valitaan sen mukaan, mitä vauriomekanismeja ollaan etsimässä. Tarkastuksissa haetaan seuraavia ilmiöitä tai vauriomekanismeja: eroosio, korroosio, väsyminen, viruminen, ylikuumentuminen, jännityskorroosio, korroosioväsyminen, terminen väsyminen, puutteellisen tuennan aiheuttamat rasitukset, 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.

1.2 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.



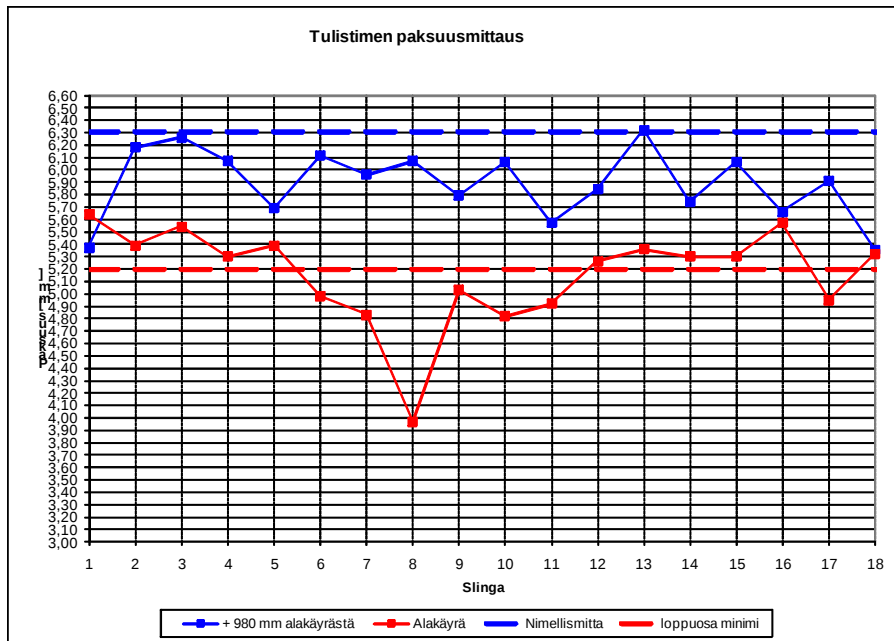
Kaavio 1. Kaaviossa on esitetty vuoden 2010 lopussa voimassa ja työn alla olevat hitsien tarkastukseen liittyvät standardit. Tarkemmin standardit löytyvät linkin (<http://www.metsta.fi/komiteat/laajuus.html#rikkomatonak>) kohdasta NDT standardisoinnin tilannekatsaus. Standarien päivityksestä löytyy myös tietoa MetSta:n nettisivuilta kohdasta standardit.

1.2.1 Silmäääräinen tarkastus/VT (visual testing)

- Menetelmistä kaikkein tärkein
- Hitsien silmäääräinen tarkastus EN-SFS 970
- 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!

1.2.2 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 kerrannaiskaiujen vaimenemisen seuraamisen, mikä antaa viitteitä sisäpuolisesta likaantumuksesta tai korroosiosta.
- Vaativissa mittauskohteissa suositellaan tarkastajalle UT:n EN-pätevyyttä.
- Ohentuminen voi olla epäsymmetristä: esim. seinäputken mittauksessa mittausikkuna on evästä evään.
- Kohdassa erikoismenetelmät käsitellään muita paksuusmääritys menetelmiä mm. EMAT ja RFET.



Kuva 2. Tulistimen paksuusmittaustulokset kaaviona.

Kuvassa 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.

1.2.3 Magneettijauhetarkastus / 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 särötyyppisiä 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.

1.2.4 Tunkeumanestetarkastus / PT (liquid penetrant examination)

- Hitsausliitosten tunkeumanestetarkastuksen standardit: SFS-EN ISO 23277 "Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsien tunkeumanestetarkastus. Hyväksymisrajat". 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 paitsi huokoisille materiaaleille.

- Paljastaa pintaan asti ulottuvat viat (myös pintahuokokset ja kuonan, jotka eivät näy luotettavasti magneettijauhetarkastuksessa)
- Vaatii pinnan puhdistamisen metallipinnalle.

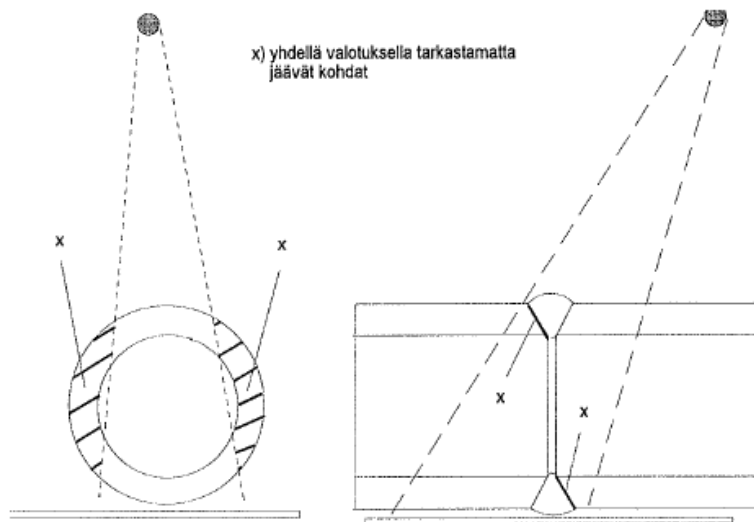
Kattilaolosuhteissa on suositeltavaa käyttää fluoresoivaa menetelmää, joka helpottaa tunkeumanesteen poistoa/puhdistusta erityisesti silloin, kun käytetään vedellä poistettavaa tunkeumanestettä. Riittävä puhtausaste nähdään heti uv-valossa eikä kohdetta tarvitse puhdistaa varmuuden vuoksi, kuten värillisellä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



Kuva 3. Fluoresoivalla tunkeumanesteellä tarkastetun pohjan särönäyttämiä

1.2.5 Radiografia/RT (radiographic examination)

- Standardit: SFS EN 1435 (ISO 17636) "Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsausliitosten radiografinen kuvaus" ja SFS-EN 12517-1 "Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Osa 1: Teräksestä, nikkelistä, titaanista ja niiden seoksista hitsattujen hitsausliitosten arviointi radiografisella kuvauksella. Hyväksymisrajat" Näihin standardeihin on odotettavissa muutoksia lähitulevaisuudessa 2011.
- 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 1 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 filmitekniikkaan, rajalliset säteilymäärät ja säteilykeilan suuntaaminen mahdollista.



Kuva 4. Ellipsikuvauksessa yhdellä valotuksella tarkastamatta jäävät alueet.

Soodakattilaympäristöön soveltuvana sovelluksena on isotoopilla suoritettu korroosiokuvaus.

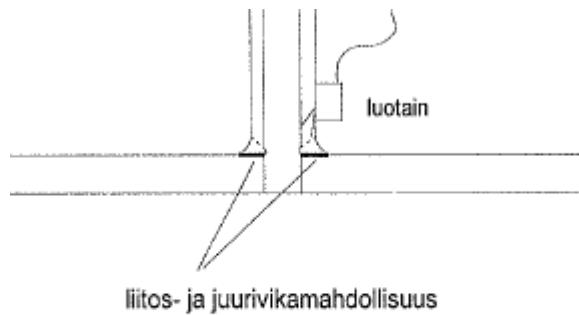
1.2.6 Ultraäänitarkastus / UT (ultrasonic examination)

Standardit: SFS-EN 1714 ”Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsausliitosten ultraäänitarkastus”, SFS-EN 1712 ” Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsausliitosten ultraäänitarkastus. Hyväksymisrajat” ja 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 koh-tisuoraan äänikeilaan nähden, mikä paksummassa aineessa edellyttää useamman luotauskulman käyttämistä. Nykyaikaisella vaiheistetulla UT-tarkastuslaitteistolla mahdollistaa useamman luotauskulman samanaikaisen käytön yhdellä scannauksella. Hittiin nähden poikittaiset viat vaativat hitsin suuntaisen luotauksen. Hitsien tarkastuksessa UT-menetelmää on syytä täydentää pintamenetelmillä, jotta kaiken suuntaiset pintaviat todetaan.



Ultraäänitarkastusta voidaan käyttää standardin vastaisesti ohuiden materiaalien (seinämä < 8 mm) tarkastuksessa. Esim. jakotukin ja putken välistä pienaliitosta (kuva 2), 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).



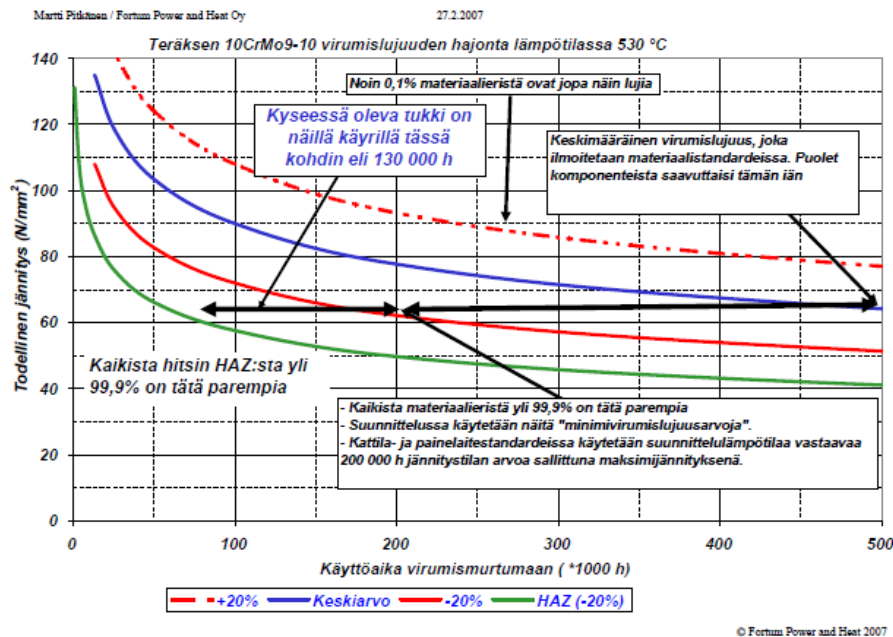
Kuva 5. Jakotukin ja putken välinen pienaliitos.

1.2.7 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.

1.2.8 Jäljennemenetelmä/REP (replica)

- Paineastiat ja putkistot
- Virumisasteen arviointi SFS 3280 / ISO 3057 / Nordtest ohjeen mukaisesti.
- Menetelmällä määritetään metallin virumis- ja hajoamisaste mikrorakenteesta jäljenteen avulla. Viruminen alkaa tyypillisesti yli 450 °C lämpötiloista ja on materiaalista riippuvainen.
- Ennen hitsien jäljennetarkastusta suoritetaan aina magneettijauhetaustatarkastus fluoresoivalla menetelmällä.
- Jäljennemenetelmällä voidaan paljastaa virumisasteen lisäksi ylikuumeneminen ja selvittää säröilyn syytä ainetta rikkomatta.



Kaavio 2. 10CrMo9-10 KP-tukin perusaineen ja hitsin virumislajuuden hajonta ja käyttäytyminen käyttötuntien mukaan. Perusmateriaalille suunniteltu käyttöikä 200 000 h (-20%) saattaa HAZ-alueella pudota jopa alle 100 000 käyttötunnin n 60 N/mm² jännitystasolla. Syynä tähän HAZ:n heikempi virumislajuus /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.

1.2.9 Endoskooppitarkastus/END (endoscopy)

- Endoskoopilla tai putkistokameralla päästää tarkastamaan rakenteita ahtaissa koh-teissa, 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.

1.2.10 Akustinen emissioseuranta / AE (acoustic emission)

- Paineekokeiden ja rakenteiden käytönaikainen valvonta
- Voidaan käyttää rakenteen kuunteluun säröilyn ja rasituksien toteamiseksi sekä atmosfääriin kuunteluun vuotojen ilmaisemiseksi. Putkirikko kasvaa vuodon seura-uksena ja pienikin vuoto voi aiheuttaa viereisen putken vaurioitumisen, mikä lisää esim. sulavesiräjähdyriskiä.
- Rakenteen kuuntelu tehdään aaltotankojen (hitsattu putkeen) välityksellä. Ne mah-dollistavat antureiden asennuksen eristeen ulkopuolelle ja samalla pudottavat antu-reiden lämpötilaa.
- AE-seuranta auttaa ohjaamaan muiden tarkastusmenetelmien käyttöä.
- Antaa tietoa ajokäyttäytymisen vaikutuksista ja siitä, missä vaiheessa käyttöä vioit-tuminen mahdollisesti tapahtuu.

1.2.11 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.

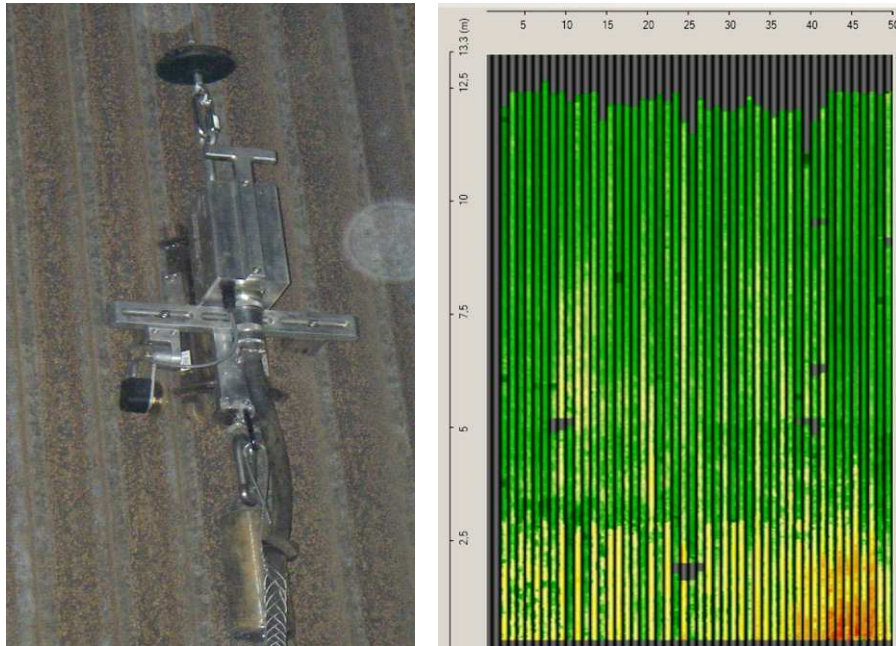
1.2.12 Kovuusmittaus/HT (hardness test)

- Kovuusmittaus korreloi hyvin mittauskohteen lujuusominaisuuksien kanssa.
- Kovuusmittaustulokset kertovat materiaalteknisistä muutoksista esim. vauriotilanteissa.
- Hitsauksen laadunhallinta (HAZ kovuus piikit) päähöyryputkistossa.
- Kovuusmittausmenetelmä 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.

1.2.13 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 6. T-scan laitteisto kattilan seinällä ja Client ohjelmiston tuottamaa visuaalista paksuusmittaustulosta tarkastuksista.

1.2.14

IRIS-tekniikka



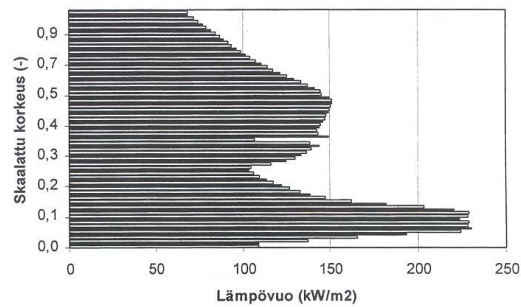
- Ultraäänitekniikkaan perustuva menetelmä, joka soveltuu ferriittisten tuubien sisäpuoliseen tarkastukseen
- Putken suunnassa lähetty ääni käännetään peilin avulla putken seinämän suuntaan putkeen ollessa vesitäytössä ja peiliä pyöritetään vesiturpiinilla tai sähköisesti.
- Menetelmä on tarkempi kuin pyörrevirtamenetelmällä tehty tarkastus, mutta huomattavasti hitaampi ja työlämpi.

1.2.15

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 7 on lämpövuon jakautuminen etuseinän keskellä primääritason alapuolelta nokan tasolle kattilassa, jossa perinteisesti laskettuna keskimääräinen lämpövuoto 90 kW/m^2 . Kuvan mukaan primaari-ilma-aukkojen alueella lämpövuoto ylittää 230 kW/m^2 .



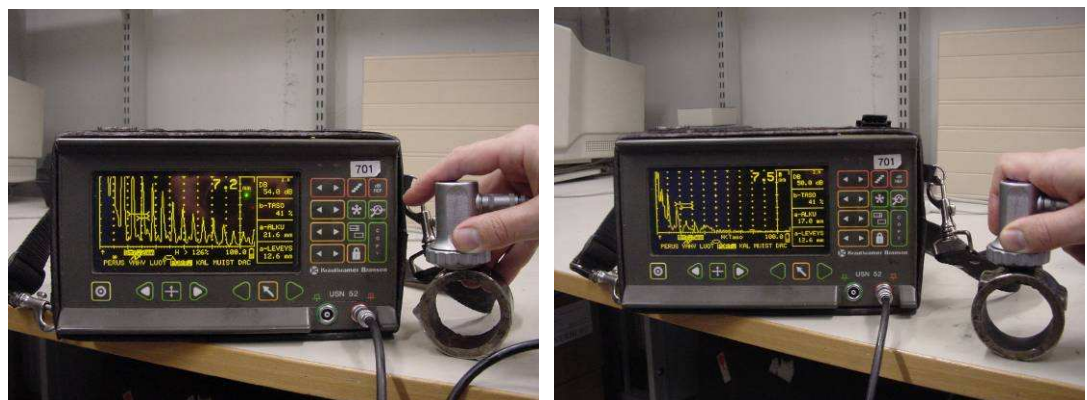
Kuva 7. Lämpövuon jakaantuminen kattilan etuseinällä.

Korroosiovaurioita 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 lämpövuota.

Vetyhyökkäys aiheuttaa aina sulavesiräjähdyriskin ja mittavat korjaustoimenpiteet.

Ilmiötä voi tutkia ultraäänimenetelmillä seuraavasti:

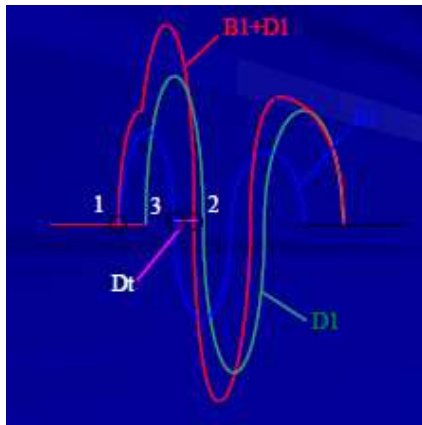
Alkava sisäpinnan korrosio tai paksu epäpuhtauksista koostuva kerros vaimentaa ultraääntä voimakkaasti. Normaalisti ultraäänilaitteen a-näytössä näkyy useampi taustakäyri kuten kuvan 8 vasemman puoleisessa a-näytössä. Jos korroosiovaihe on alkanut tai sisäpinnalla on paksu epäpuhtauksista koostuva kerros, niin taustakäyri vaimenevat voimakkaasti kuten kuvan oikean puoleisessa näytössä. Vaimennuksen arviointi vaatii kuitenkin tarkastajalta kokemusta, sillä vaimennukseen vaikuttaa ulkopinnan kunto/puhtaus ja käyrissä geometria.



Kuva 8. A-näytöt ehjästä putkesta ja vetyhyökkäyskohdalta.

Kerrostuman tarkempi määrittäminen 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 kerrostumailman/veden rajapinnasta heijastuva aalto levittää signaalia verrattuna puhtaasta metalli-ilma/vesi signaaliin, katso kuva 10. Tässä mittauksessa käytetään pitkittäistä aaltomuotoa ja menetelmällä luvataan päästävän jopa 20–40 μm minipaksuuteen.



Kuva 9. Ultraäänikaikujen käyttäytyminen saostuma/putki rajapinnassa

Molemmat tarkemmat mittaustavat vaativat erillisen kalibrointipalan, jolla varmenne- taan äänennopeus kerrostumassa.

Sisäpuolisen kerrostuman mittauksissa on muistettava, että ongelmakohdat saattavat olla hyvin paikallisia. Jos kattilassa todetaan epäpuhtauksia ja edellä olevat mittausta- vat antavat viitteitä sisäpuolisista kerrostumista, niin varmin tapa on ottaa kattilasta näytepalat, joista mitataan laboratoriossa kerrostumien paksuus ja koostumus. NDT- menetelmät kohdistavat näytepalojen oton ongelmakohtiin.

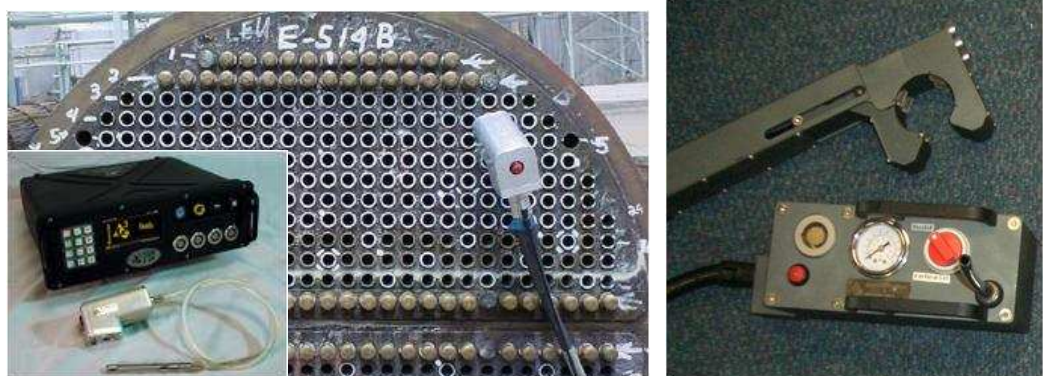
1.2.16

Guided Wave

Guided wave tekniikka perustuu ultraääneen, joka on matalataajuisista ja etenee materiaa- lin pinnansuuntaisesti.

- 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 ja tuubiputkien tarkastaminen ns. kouran avulla (Kuva 10).



Kuva 10. Guided wave laitteiston sovelluksia lämmönvaihtimelle sekä tuubiputkistolle /Guided ultrasonics ltd/.

1.2.17 RFET (kaukokenttämenetelmä pyörrevirtatekniikalla, Remote Field Electromagnetic Technique)

Sisäpuolinen pyörrevirtatarkastus ferriittisille putkille, jolla voidaan todeta laaja-alaiset ohentumat (esim. nuohoimen aiheuttama kuluma). Esimerkiksi keittopintaputkien ohenemien mittaaminen.



Kuva 11. RFET laitteisto putkiston tarkastukseen /Testex Incorporation/

1.2.18 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. ultraääni-menetelmällä. 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.

1.2.19 Jäännös jännitystilat

Materiaalin jäännösjännitystiloja voidaan mitata ainetta rikkomatta. Mittausmenetelmät perustuvat barkhausenin-kohinaan ja röntgendiffraktioon.

Barkhausen-kohina on materiaalista mitattava magneettinen parametri. Se on riippuvainen jännösjännityksistä. Menetelmä vaatii kalibrointipalat, joihin tarkastuskohdetta verrataan.

Röntgendiffraktio menetelmässä mitataan jännitysten kiteisessä metallissa synnyttämien siirtymien aiheuttamia muutoksia tilavälikioissa. Tutkittavaan näytteeseen kohdistetaan röntgensäde kahdessa kulmassa. Intensiteetinhuippukohdan ja muodon perusteella voidaan laskea vastaava jännitystila. Mittausherkkyyks on noin 50 N/mm².

1.2.20 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.

1.3 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.

1.4 Vesipainekoe korjausten jälkeen

Kattilan korjauksen jälkeen yleensä suoritetaan painekoe, jolla varmistetaan kattilan tiiveys ja käytettävyyden 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 °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.

1.5 Dokumentointi

Kaikista tarkastuksista, mukaan lukien silmämääräiset ja toteamisluontoiset tarkastukset, on tehtävä selkeät pöytäkirjat ja raportit, joista selviää erityisesti korjaustarpeet. Korjaus-

kohdat 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

APPENDIX 10

Cewic
TOC removal methods – field tests of activated carbon,
UV-treatment and RO-treatment –
presentation 5.10.2011

Activated carbon and UV treatment in TOC removal field tests



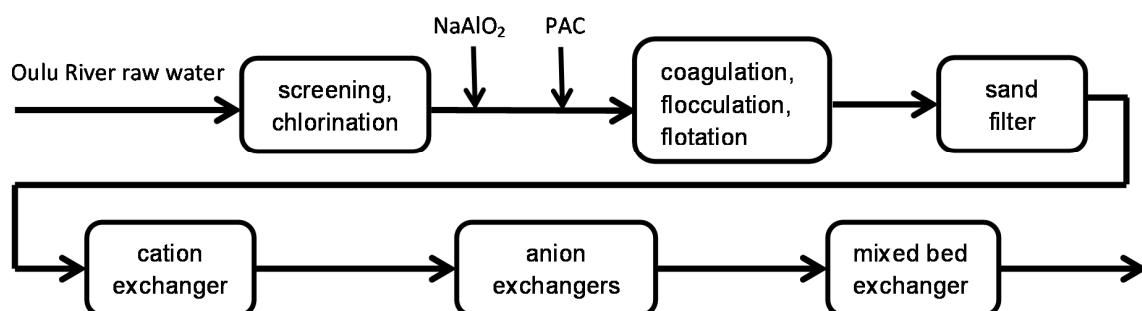
Main participants in the project



Contents

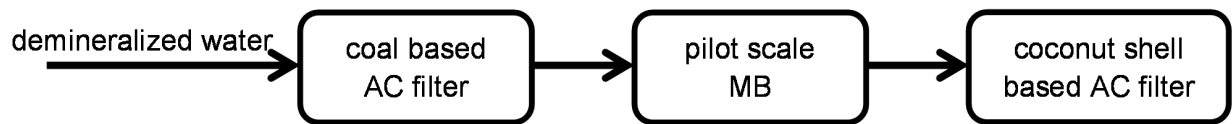
- * Active carbon tests
 - * TOC reductions
 - * Effects on conductivity of water
 - * Silica
- * UV treatment tests
 - * TOC reductions
 - * Effects of number of UV lamps, wavelenght, H_2O_2 and TiO_2 catalyst
- * LC-OCD measurement results

Active carbon tests: experimental set-up

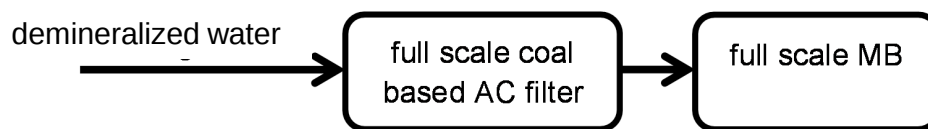


Water treatment process of Stora Enso Oulu mill

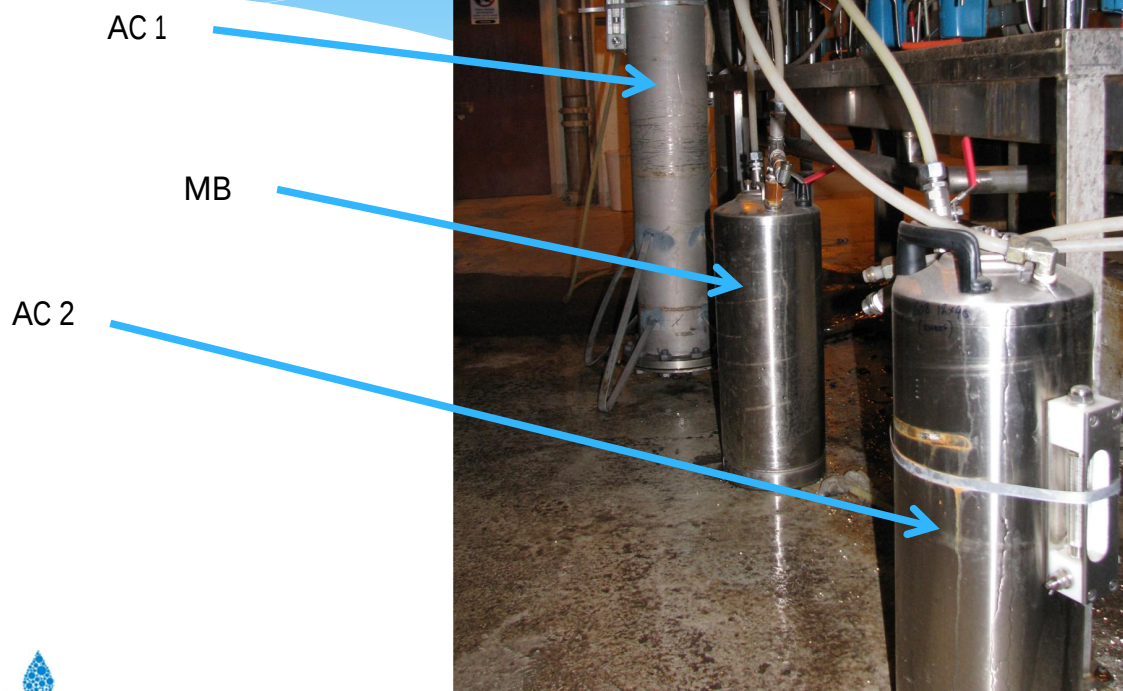
Active carbon tests: experimental set-up



Test scheme of pilot scale AC filters.

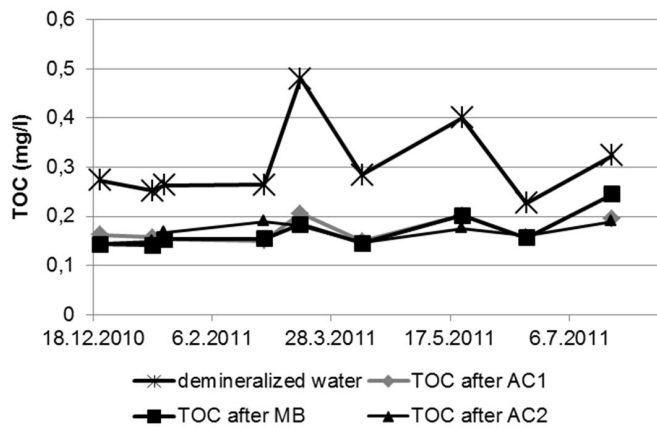


Test scheme of full scale AC filters.



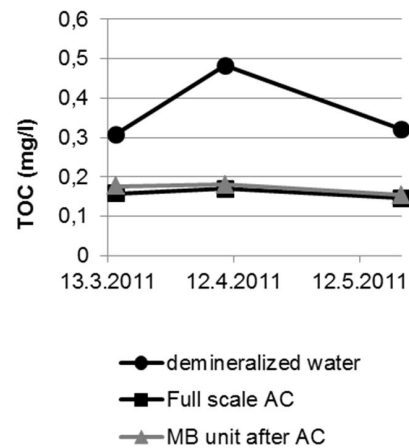
Active carbon: TOC reductions

Pilot scale AC filters



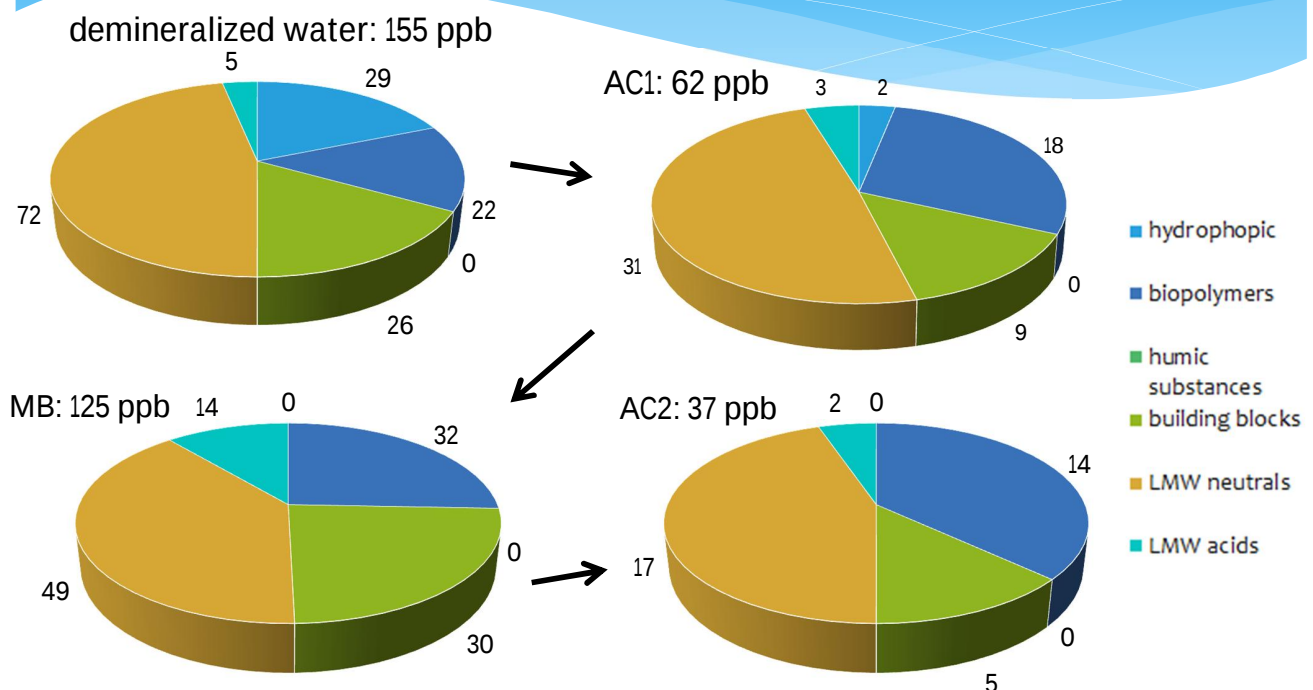
Residual TOC removal 38 – 57 %

Full scale AC filters



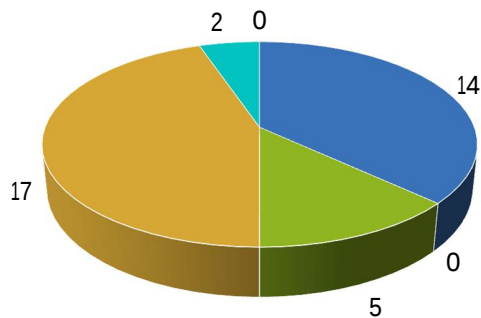
Residual TOC removal 40 – 65 %

Active carbon: LC-OCD results (after ~ 10 months in use)

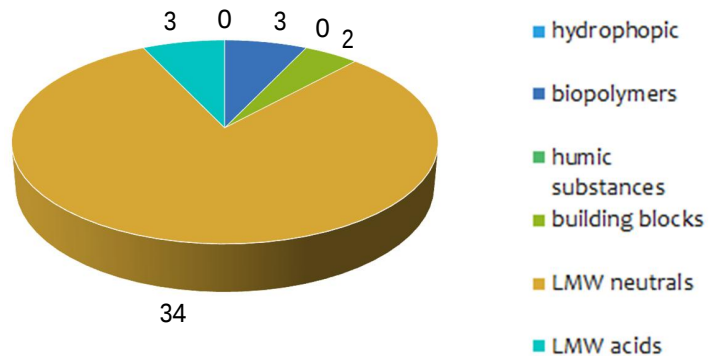


AC vs. RO (LC-OCD)

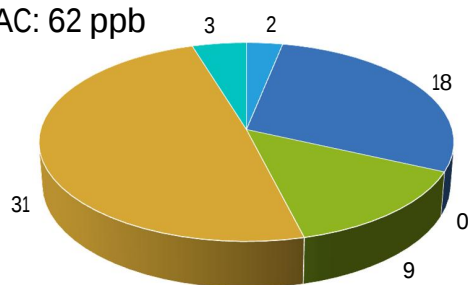
AC + MB + AC: 37 ppb



RO (Ahlholmens Kraft): 42 ppb

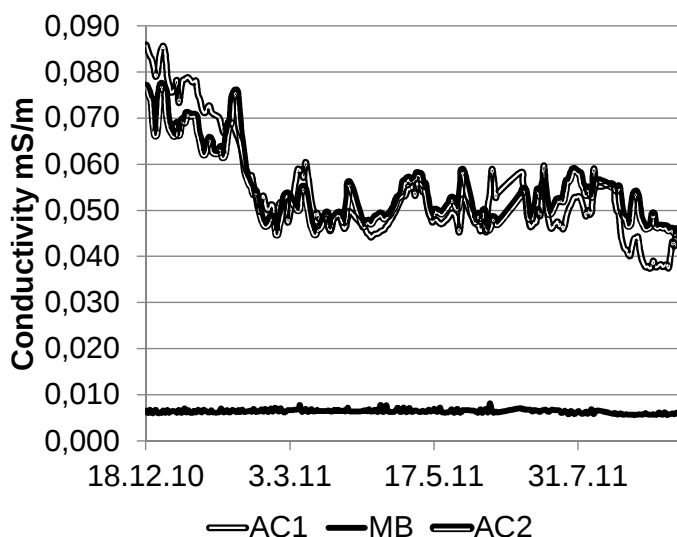


AC: 62 ppb

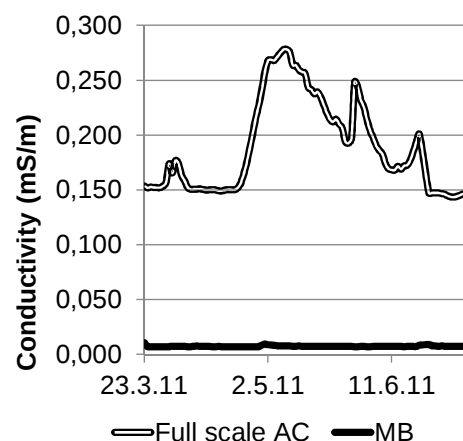


Active carbon: conductivity

Pilot scale AC filters and MB unit



Full scale AC filter

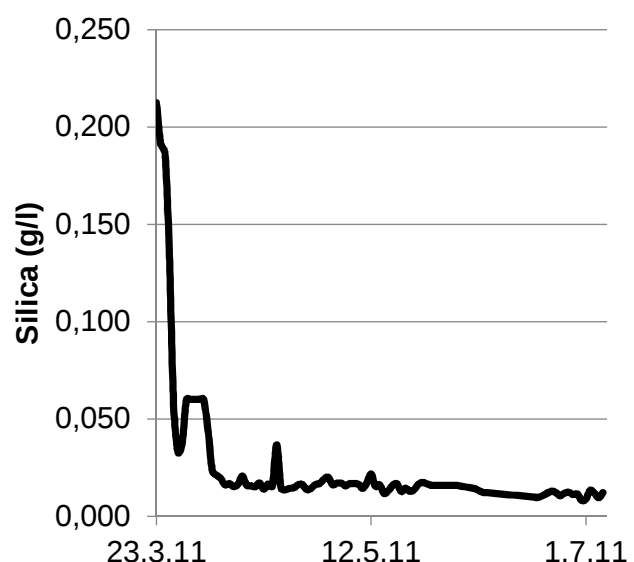


Active carbon: conductivity, some remarks

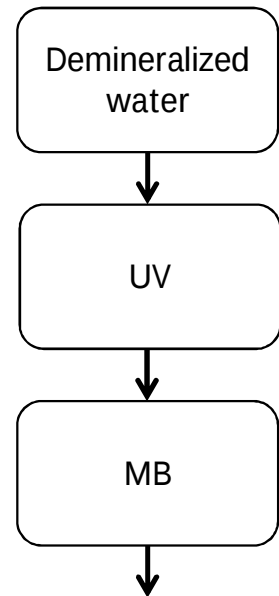
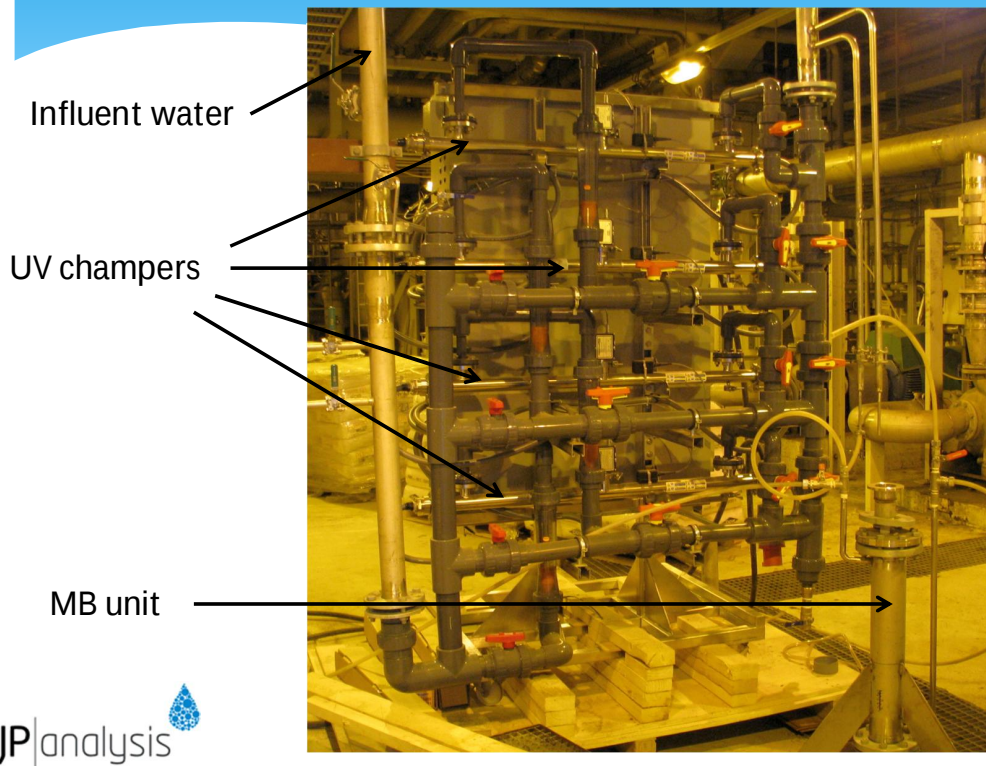
- * MB unit needed after AC to decrease conductivity
- * Correlation between TOC removal efficiency and conductivity was a bit unclear (linear R^2 only ~ 0,5)
- * Conductivity rise at AC bed was due release of ionized compounds from AC itself – not ionization of TOC
- * AC bed was not operating as biological filter because of low nutrient content of water

Active carbon: silica

- * Silica causes severe scale problems in water-steam cycle
- * Measured on-line during full scale test
- * New AC bed released silica for ~ 2 weeks
- * Silica was removed with subsequent MB



UV treatment: experimental set-up



UV treatment: results

- * One chamber: max. 30 % TOC removal
- * Four chambers: only 4 % increase in TOC removal
- * Effect of TiO₂ catalyst: negligible
- * Effect of H₂O₂: ? (experimental set-up failed: plastic piping released organic compounds)
- * Effect of wavelength:
 - * Medium pressure lamp (wavelength peaks at 254 nm and 185 nm): better (30 % TOC removal)
 - * Low pressures lamp (wavelength peak sharply at 185 nm): not that effective

TiO₂ catalyst



- * TiO₂ should enhance hydroxyl radical formation
- * This type of catalyst (porous net) had no effect

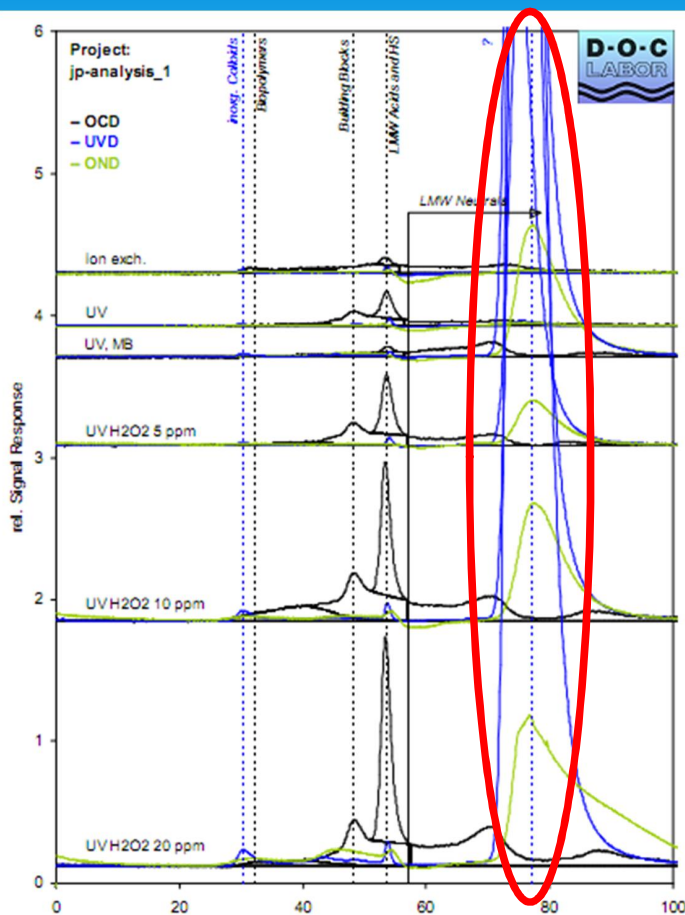
UV treatment: H₂O₂ dosing



H₂O₂ (35 %), elevated to ~ 40 m from dosing point



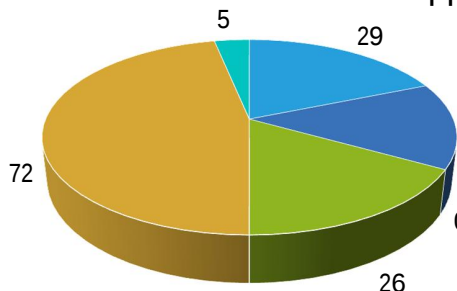
Flowmeter



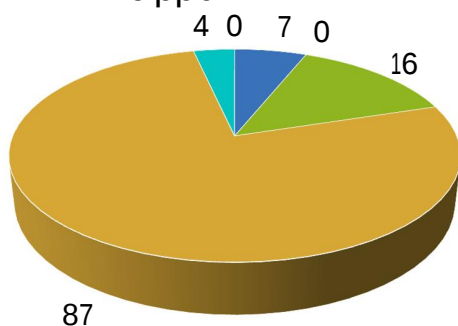
* Unknown peaks in LC-OCD chromatogram which are probably plastic additives

UV treatment: LC-OCD

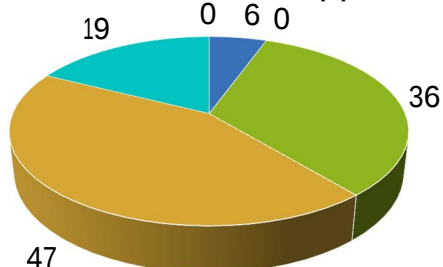
demineralized water: 155 ppb



UV + MB: 113 ppb



UV: 108 ppb



hydrophobic
biopolymers
humic substances
building blocks
LMW neutrals
LMW acids

Conclusions: AC

- * Active carbon can remove up to 40 - 60 % of residual organic material (TOC)
- * AC bed lifetime before regeneration is at least 10 months
- * Subsequent MB is needed to remove elevated conductivity and silica
- * AC works fine in full scale

Conclusions: UV

- * UV treatment was able to remove up to 30 % of residual TOC
- * Removal efficiency did not improve with:
 - * Lower wave length (more energy)
 - * H₂O₂ (oxidant)
 - * TiO₂ (catalyst)
 - * Number of UV chambers (contact time)
- * Possible reason for this: water should be pretreated with e.g. RO (this is normal procedure in microelectronic or pharmaceutical industry water treatment)



Thank you!
Questions, comments

Jaakko.pellinen@jp-analysis.fi

+358505916109



APPENDIX 11

**Teollisuuden Vesi Oy
FRBC's Water quality guidelines –
presentation 5.10.2011**



TOC removal methods and water quality recommendation

Maija Vidqvist
Teollisuuden Vesi Oy

SKYREC 20.10.2011

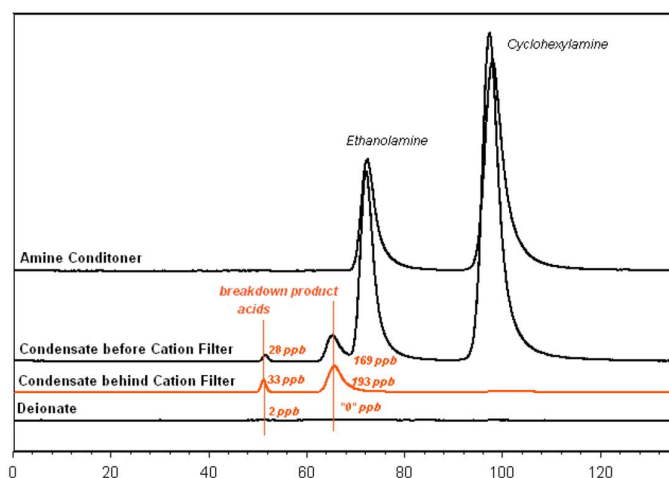
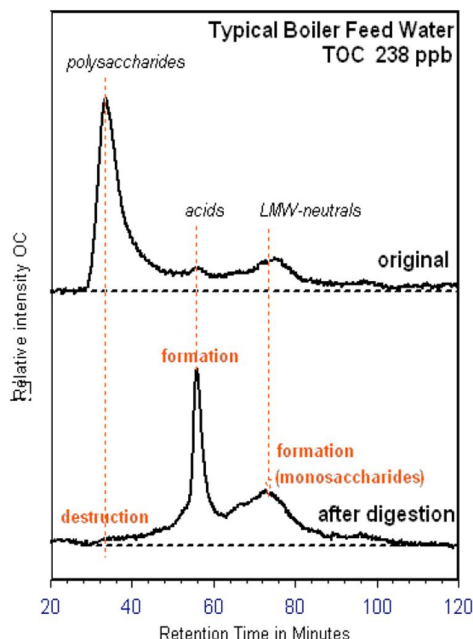
TOC removal methods and water quality recommendation

- Air preheater leakages
- Water quality recommendation
- Measurements
 - A, 108 t/h (1959)
 - B, 504 t/h (1996)
 - C, 144 t/h (2004)
- TOC removal methods



SKYREC 20.10.2011

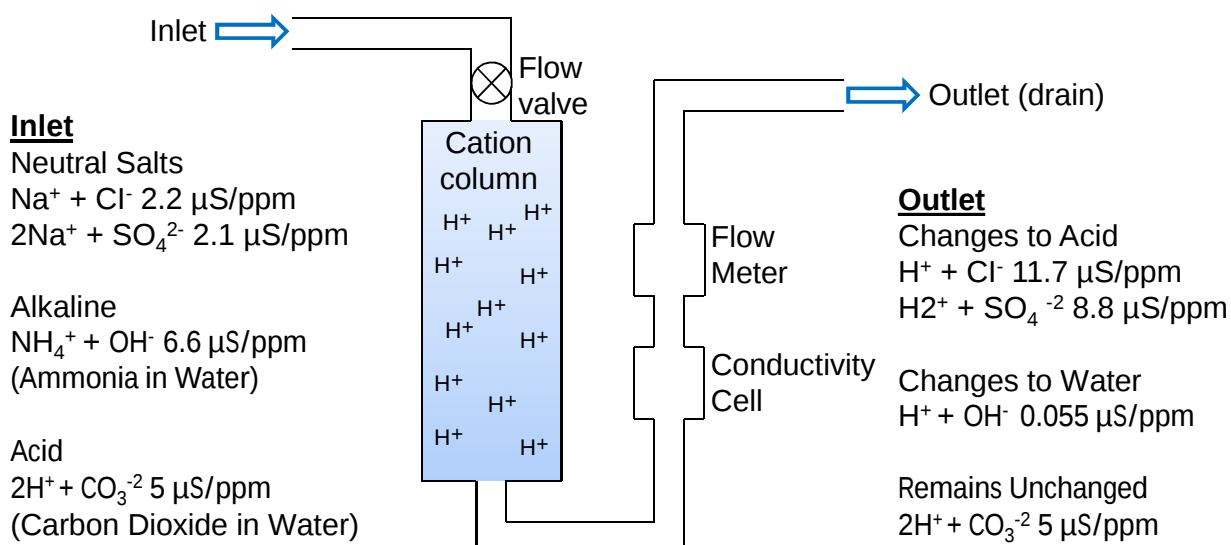
Organics in the steam cycle



SKYREC 20.10.2011

Source: Doc-Labor S. Huber

Acid conductivity vs. direct conductivity

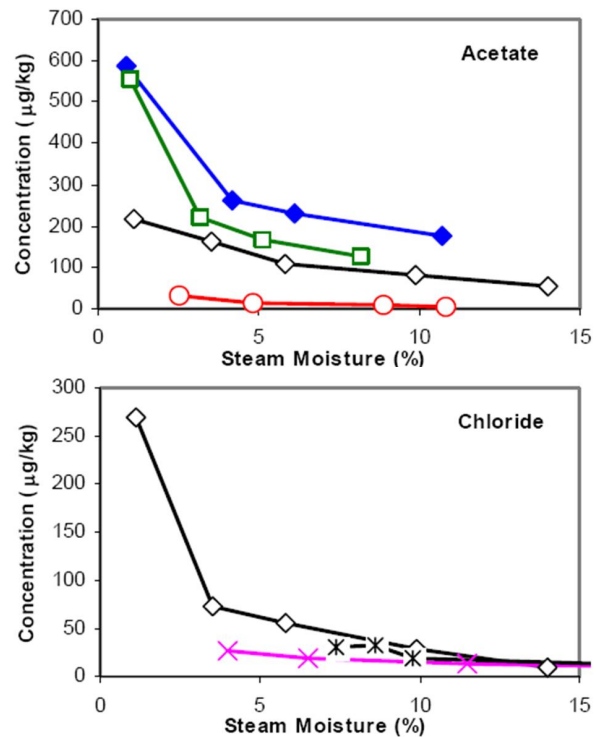


SKYREC 20.10.2011

TOC in the water-steam cycle

- ▀ Increases cation conductivity
- ▀ Decreases (first) condensate pH
- ▀ Increases risk for corrosion
- ▀ Increases the consumption of the chemicals
- ▀ Makes it difficult to follow water quality and changes

SKYREC 20.10.2011



Source: Svoboda R., *Investigations into the Composition of Water Phase in Steam Turbines*

Boiler and steam water quality recommendations

- ▀ Based on VGB and EPRI guide lines
- ▀ Optimized chemistry only attained with inorganic chemistry
- ▀ First set of values published (what we know) for organic volatile chemicals
- ▀ No values given for filming amines
- ▀ Action limits
- ▀ 8,5 MPa, 11 MPa and 16 Mpa
- ▀ With and without Cu-metals
- ▀ Na_3PO_4
- ▀ Recovery boilers

SKYREC 20.10.2011

Optimised vs. acceptable water chemistry

Optimised water chemistry		Acceptable water chemistry	
		inorganic	Organic
Feed water	Ammonia (O)	Ammonia + Hydrazine (R)	Ammonia/ETA + Hydrazine/organic scavenger
Boiler water	Na ₃ PO ₄ Low content	Na ₃ PO ₄ High content	Na ₃ PO ₄ High content
Condensate treatment	100 % ion exchange	Softener/ Mechanical filter	Softener/ Mechanical filter
Cu-alloys	No	Yes	Yes
Probability on air leakages	Unsubstantial	Substantial	Substantial

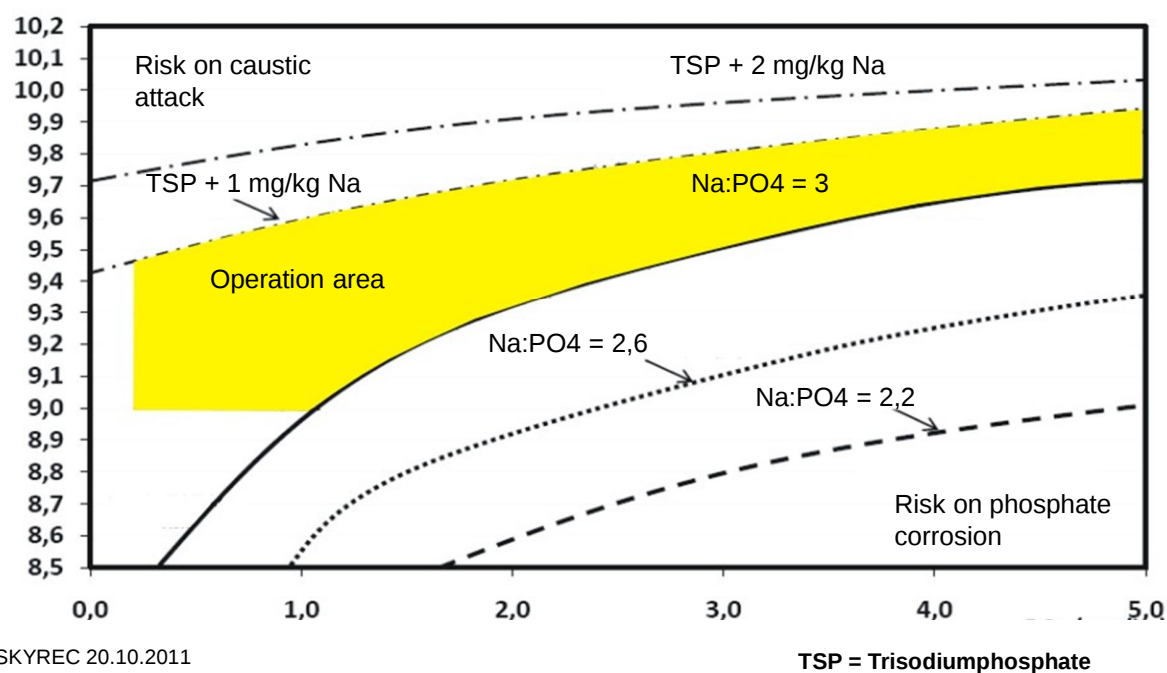
SKYREC 20.10.2011

Make-up water quality

Make-up water quality before make-up water tank		
Conductivity	mS/m	≤ 0,008
SiO₂	µg/kg	≤ 5
Na	µg/kg	≤ 3
Cl	µg/kg	≤ 3
SO₄	µg/kg	≤ 3
TOC	µg/kg	< 200
Fe (total)	µg/kg	≤ 5

SKYREC 20.10.2011

Phosphate Chemistry/Operation area



Condensate quality (minimum requirement)

Condensate		Ammonia	Ammonia and organic amine
pH		8.5 - 10.0	
Cation conductivity	mS/m	< 0.05	<0.08
Direct conductivity	mS/m	< 1.0	
SiO ₂	µg/kg	< 20	
Na	µg/kg	< 20	
TOC	µg/kg	<200	<600
O ₂	µg/kg	≤ 20	
Fe	µg/kg	≤ 10	
Cu	µg/kg	≤ 5	
Hardness	dH	< 0.01	

Action levels

Action level or range	Characterisation	Responsibility for action	Action during operation	Action during start-up
O	Normal operation value. Water chemistry related problems are eliminated.	Operator	The maintenance of chemical control through the monitoring of key parameters.	
O -AL1	Acceptable range. Water chemistry related problems and increase of costs unlikely.	Water Chemist	Identify the possibilities for optimisation. Justify the cost of improvement.	
AL1				
AL1 – AL2	Loss of chemical control possibly leading to long term damage.	Operator	Find and eliminate the cause within one week of operation. Further actions to minimise possible damage.	Action level 1 for key parameters should be achieved in 24 hours after turbine start-up.

SKYREC 20.10.2011

Action levels

Action level or range	Characterisation	Responsibility for action	Action during operation	Action during start-up
AL2				
AL2 – AL3	Loss of chemical control possibly leading to short and long term damage.	Operator	Find and eliminate the cause within one day. Further actions to minimise damage.	AL2 for steam parameters until turbine is brought into service.
AL3				
AL3 Outside	Chemistry out of control connected with immediate damage	Operation manager or supervisor	The unit is recommended to be shut down within 1 hour using normal shut down procedures if one of the key parameters is outside AL3.	Boiler blow-down or condensate drain until AL3 is attained for the key parameters.

SKYREC 20.10.2011

Vesi-höyrykierto ohjearvot, 16 MPa kattila/epäorgaaninen syöttövesikemia, kierrossa ei kuparimateriaaleja

Recommendations for water quality, 16 MPa, drum boiler/inorganic chemistry, no Cu-metals

Kattilavesi

Parametri	O	TR1	TR2	TR3	Näytetiedot
pH	9,4-9,6	9,4-9,6	9,0-9,9	8,5-10,2	a, c
Suora johtokyky mS/m	<1,0	<1,5	2	3	a, c
SiO ₂ ppb	cts. kuvaaja 9				b
Na ppb	cts. kuvaaja 10				b, c
Cl	cts. kuvaaja 11				b
SO ₄	cts. kuvaaja 12				b, d
Cu ppb	<3	3	-	-	b, d
Fe ppb	<5	5	-	-	b, d
PO ₄	≤1,75	≤2,25	-	-	b, c

Tulistettu höyry

Parametri	O	TR1	TR2	TR3	Näytetiedot
pH	9,3-9,6	9,3-9,6	8,8-10,0	8,0-10,5	a
Kationivaihde jk. mS/m	≤0,02	0,03	0,06	0,1	a, c
SiO ₂ ppb	≤5	10	20	40	a, c
Na ppb	≤5	10	20	40	a, c
TOC ppb	<100	100	-	-	b, d
Fe ppb	≤5	10	20	-	b, d
Cu					

Lauhde

Parametri	O	TR1	TR2	TR3	Näytetiedot
pH	9,3-9,6	8,5-10,0	-	-	a, c
Kationivaihde jk. mS/m	≤0,02	0,05	-	-	a, c
Happi ppb	5-20	>20	-	-	a, c, e
SiO ₂ ppb	≤5	20	-	-	a, c
Na ppb	≤5	20	-	-	a, c
Kovuus °dH	-	0,01	-	-	b
Cu ppb	≤5	10	-	-	b, d
Fe ppb	≤5	10	-	-	b
TOC ppm	<0,1	0,2	-	-	b, d

Syöttövesi

Parametri	O	TR1	TR2	TR3	Näytetiedot
pH	9,3-9,6	9,3-9,6	9,0-10,2	8,0-10,5	a, c
Kationivaihde jk. mS/m	≤0,02	0,03	0,06	0,1	a, c
Happi ppb	5-20	1-5	≥10	≥20	a, c
SiO ₂ ppb	≤5	10	20	40	a/b, d
Na ppb	≤5	10	20	40	a, d
Kovuus °dH	-	-	0,01	-	b
Cu ppb	≤5	10	20	-	b
Fe ppb	≤5	10	20	-	b
TOC ppm	<0,1	0,2	-	-	b, d

Lisävesi

Parametri	O	Näytetiedot
Suora johtokyky mS/m	0,008	a, c
SiO ₂ ppb	≤5	a, c
Na ppb	≤5	a, c
TOC ppm	≤0,2	b, d

Näytetiedot

Selitys	
a	jatkuvatoiminen mittaus
b	käsimittaus
c	pääparametri/vähimmäisvaatimus
d	ongelmatilanteissa analysoitavissa
e	tarve arvioidava prosessikohtaisesti

Vesi-höyrykierto ohjearvot, 16 MPa kattila/orgaaninen syöttövesikemia, kierrossa ei kuparimateriaaleja

Recommendations for water quality, 16 MPa, drum boiler/organic chemistry, no Cu-metals

Kattilavesi

Parametri	O	TR1	TR2	TR3	Näytetiedot
pH	9,4-9,6	9,4-9,6	9,0-9,9	8,5-10,2	a, c
Suora johtokyky mS/m	<1,0	<1,5	2	3	a, c
SiO ₂ ppb	cts. kuvaaja 9				b
Na ppb	cts. kuvaaja 10				b, c
Cl	cts. kuvaaja 11				b
SO ₄	cts. kuvaaja 12				b, d
Cu ppb	<3	3	-	-	b, d
Fe ppb	<5	5	-	-	b, d
PO ₄	≤1,75	≤2,25	-	-	b, c

Tulistettu höyry

Parametri	O	TR1	TR2	TR3	Näytetiedot
pH	9,3-9,6	9,3-9,6	8,8-10,0	8,0-10,5	a
Kationivaihde jk. mS/m	≤0,02	0,05	0,1	0,12	a, c
SiO ₂ ppb	≤5	10	20	40	a, c
Na ppb	≤5	10	20	40	a, c
TOC ppb	<100	100	-	-	b, d
Fe ppb	≤5	10	20	-	b, d
Cu					

Lauhde

Parametri	O	TR1	TR2	TR3	Näytetiedot
pH	9,3-9,6	8,5-10,0	-	-	a, c
Kationivaihde jk. mS/m	≤0,02	0,06	-	-	a, c
Happi ppb	5-20	>20	-	-	a, c, e
SiO ₂ ppb	≤5	20	-	-	a, c
Na ppb	≤5	20	-	-	a, c
Kovuus °dH	-	0,01	-	-	b
Cu ppb	≤5	10	-	-	b, d
Fe ppb	≤5	10	-	-	b
TOC ppm	<0,1	0,2	-	-	b, d

Syöttövesi

Parametri	O	TR1	TR2	TR3	Näytetiedot
pH	9,3-9,6	9,3-9,6	9,0-10,2	8,0-10,5	a, c
Kationivaihde jk. mS/m	≤0,02	0,05	0,1	0,12	a, c
Happi ppb	5-20	1-5	≥10	≥20	a, c
SiO ₂ ppb	≤5	10	20	40	a/b, d
Na ppb	≤5	10	20	40	a, d
Kovuus °dH	-	-	0,01	-	b
Cu ppb	≤5	10	20	-	b
Fe ppb	≤5	10	20	-	b
TOC ppm	<0,1	0,2	-	-	b, d

Lisävesi

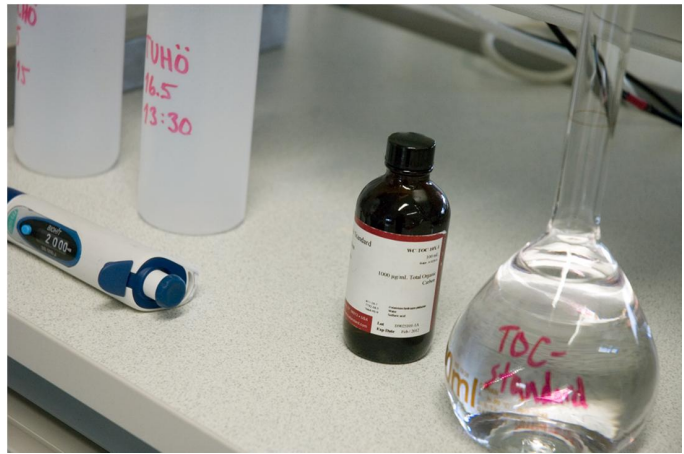
Parametri	O	Näytetiedot
Suora johtokyky mS/m	0,008	a, c
SiO ₂ ppb	≤5	a, c
Na ppb	≤5	a, c
TOC ppm	≤0,2	b, d

Näytetiedot

Selitys	
a	jatkuvatoiminen mittaus
b	käsimittaus
c	pääparametri/vähimmäisvaatimus
d	ongelmatilanteissa analysoitavissa
e	tarve arvioidava prosessikohtaisesti

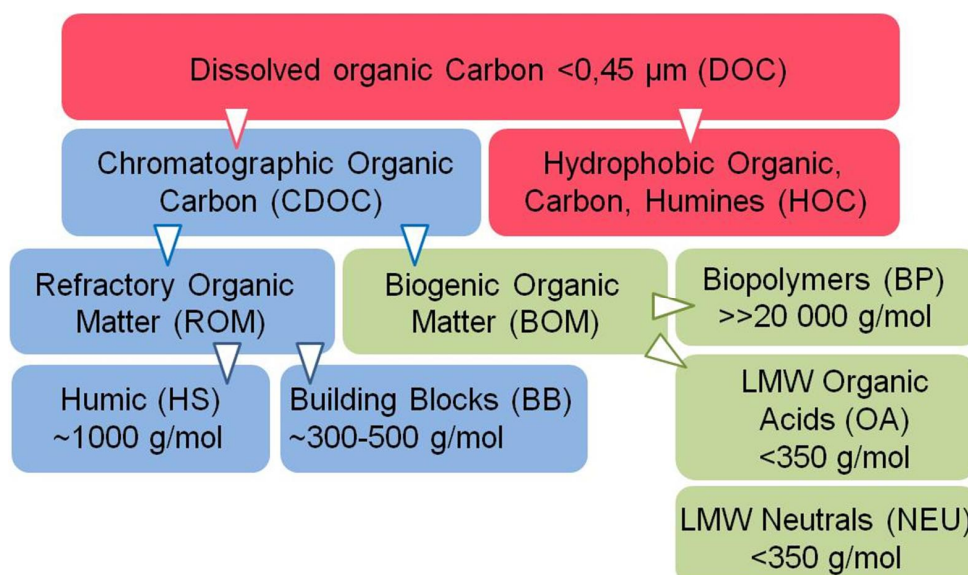
TOC removal methods

- ▀ Nature of TOC in the raw water
- ▀ Measurements
 - How the present traditional treatment works?
- ▀ Removal methods and their efficiency



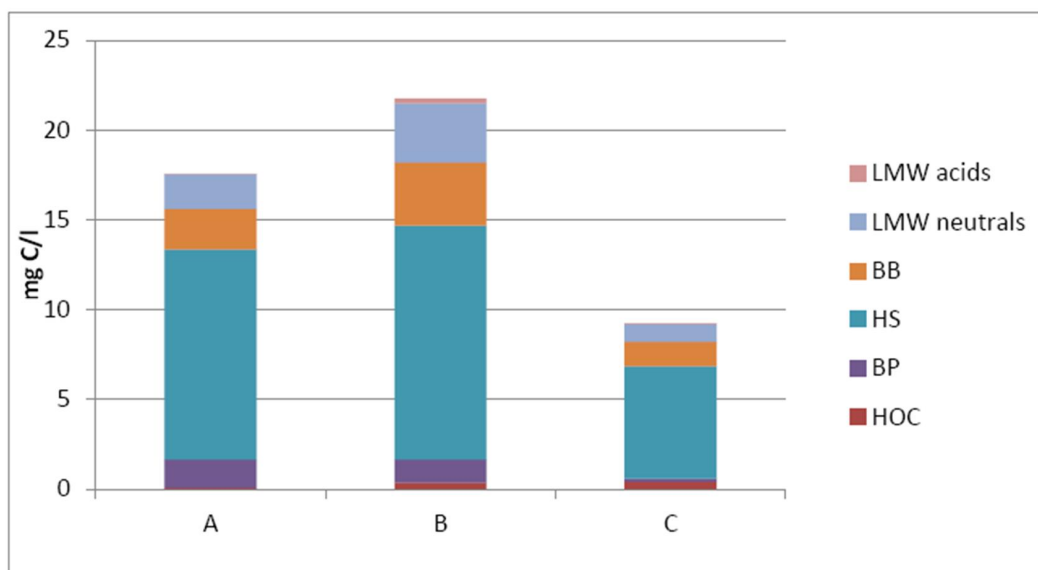
SKYREC 20.10.2011

Organic carbon in raw water



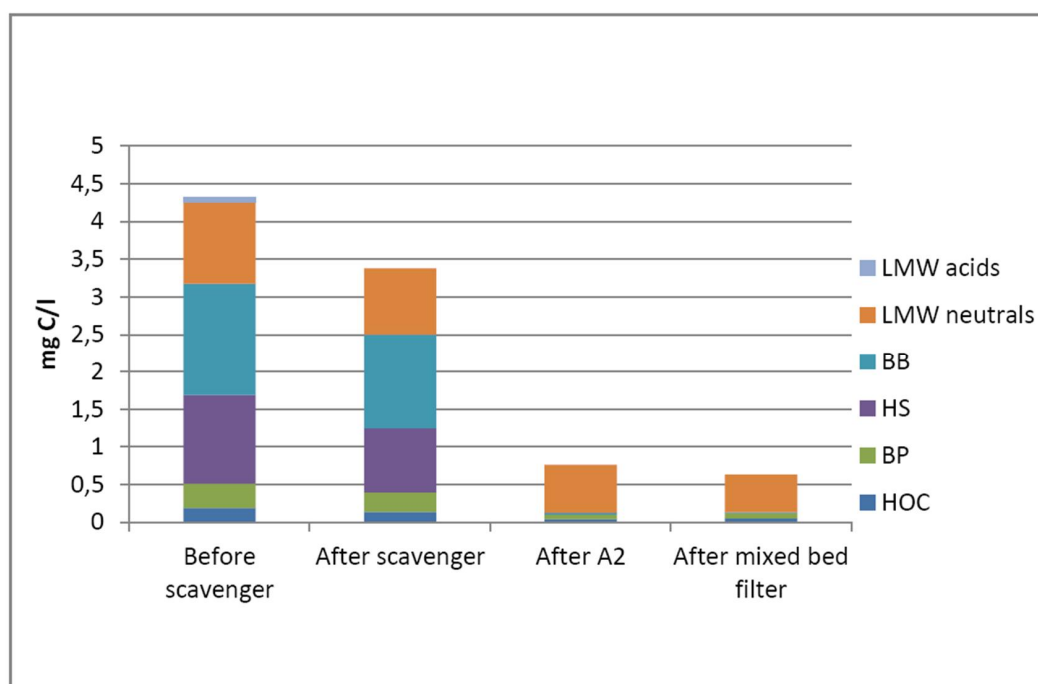
SKYREC 20.10.2011

Nature of TOC in the surface water



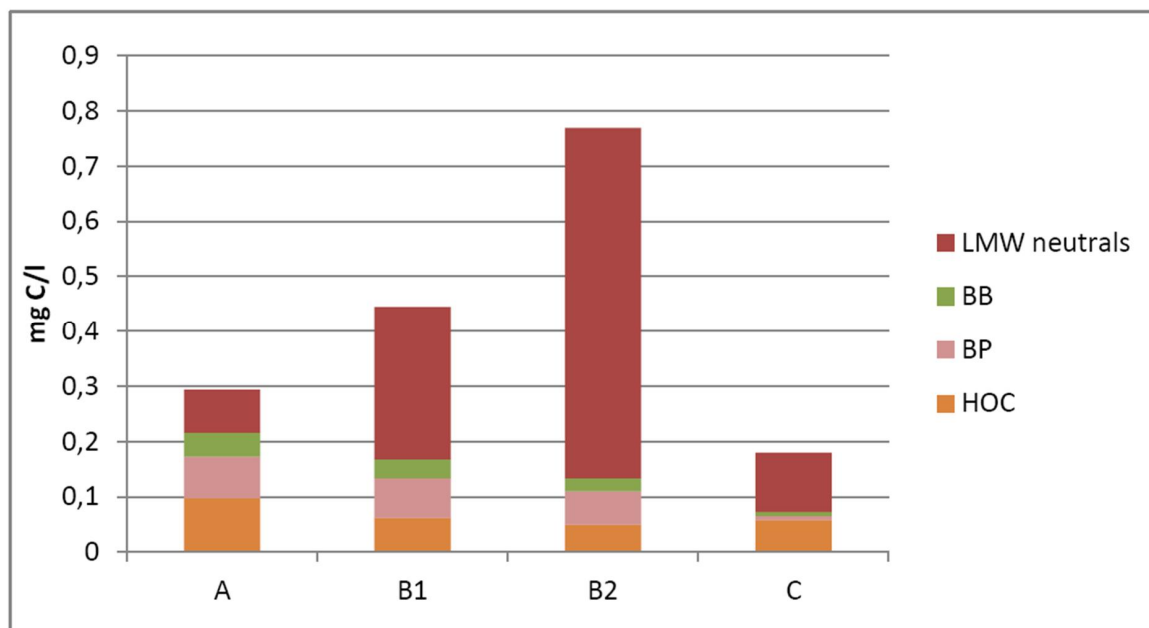
SKYREC 20.10.2011

Ion exchange/ TOC removal / Example



SKYREC 20.10.2011

Make-up water quality / Boiler units A, B and C



SKYREC 20.10.2011

Different water treatment methods and TOC removal

Removal method	Principle	TOC-reduction rate	Comments and notes
UV-AOP	Destroys neutral organic molecules with the help of OH-radicals. Decomposition products are carbon dioxide and organic acids, which can be removed with ion exchange.	30 % > 30 % when combined with ion exchange	Efficiency depends on the inlet TOC and actual organic components present in the water. Could be installed also before ion exchange, but preferably after strong anion before mixed bed filter. Some units installed to achieve TOC guarantee level of 0,2 mg/l.
UV- 185 nm	Destroys smaller organic non-ionic components to CO ₂ .	20...70 %	The system is used in ultrapure water units. Not competitive, if TOC concentration > 0,1 mg/l

SKYREC 20.10.2011

Removal method	Principle	TOC-reduction rate	Comments and notes
Reverse osmosis	Removes efficiently TOC. Cut-off value for non-ionic compounds > 100 g/mol.	> 95 %	The best available technology to remove biopolymers and uncharged organic molecules.
Nanofiltration	Removes efficiently both organics and ionic compounds. Cut-off value for non-ionic compounds is > 300...500 g/mol.	80...90 %	Alternative treatment for chemical treatment with simultaneous salt removal (60...80 %). Colour removal units in operation e.g. in Norway for waters with high TOC values.
Activated Carbon	Based on adsorption. Capacity dependent on water quality and TOC components. Efficiency may be very high with the new filters.	20..80%, 50% for biological filters with high retention times.	Is used within drinking water treatment units to remove taste and odour. After first operation period the efficiency in TOC removal retains.

SKYREC 20.10.2011

Conclusions

- ▀ TOC nature dependent on time and place
- ▀ Know your boiler and turbine limits
- ▀ Verify TOC reduction rate and total costs before installation of a new system
- ▀ Consider 100 % condensate treatment



SKYREC 20.10.2011

Acknowledgements

- ▀ Finnish Recovery Boiler Committee
- ▀ Steering group
 - ▀ Keijo Salmenoja, Andritz
 - ▀ Tero Arvilommi, Stora Enso
 - ▀ Marja Heinola, Andritz
 - ▀ Arja Lehtikoinen, Metso
 - ▀ Toni Orava, UPM
 - ▀ Toni Wahlman, Botnia
- ▀ Colleagues / Teollisuuden Vesi
 - ▀ Jani Vuorinen
 - ▀ Pekka Sirkiä
 - ▀ Laura Saarinen
 - ▀ Toni Kuusilehto
 - ▀ Esa Melin



APPENDIX 12

SKYREC final seminar – final programme

SKYREC SEMINAR 2011

Sokos Hotel Presidentti, Helsinki, 20.10.2011

PROGRAM

08.30 - 08.55	Registration open
08.55	Welcoming words <i>Matti Tikka, UPM-Kymmene Oyj</i>
09.00 – 09.30	Project summary <i>Esa Vakkilainen, Lappeenranta University of Technology</i>
09.30 - 10.00	Co-combustion of mixed fuels <i>Niklas Vähä-Savo, Åbo Akademi</i>
10.00 - 10.15	Coffee break
10.15 – 10.45	Dew point measurements <i>Emil Vainio, Åbo Akademi</i>
10.45 – 11.15	Improving heat recovery in biomass-fired boilers - project presentation <i>Doug Singbeil, FPInnovations</i>
11.15 – 12.15	Lunch
12.15 – 12.45	Field tests of superheater materials <i>Martti Mäkipää/Markku Orjala, VTT</i>
12.45 – 13.15	Corrosion tests of superheater materials in reducing conditions <i>Dorota Bankiewicz, Åbo Akademi</i>
13.15 – 13.45	Coffee break
13.45 – 14.15	Field tests of furnace materials <i>Timo Karjunen, Boildec Oy / Pekka Pohjanne, VTT</i>
14.15 – 14.45	Ceramics in furnace <i>Riku Mattila, Oulu University</i>
14.45 – 15.00	Coffee break
15.00 – 15.30	TOC removal methods and water quality recommendation <i>Maija Vidqvist, Teollisuuden Vesi Oy</i>
15.30 – 16.00	Activated carbon and UV-treatment in TOC removal- field tests <i>Tero Luukkonen, JP-Analysis</i>
16.00	Closing the seminar