



SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS
FINNISH RECOVERY BOILER COMMITTEE

Suomen Soodakattilayhdistys ry

**Soodakattilan vastaanottokokeet
Materiaali- ja energiatase**

**Esa Vakkilainen
Pöyry Forest Industry Oy**

4.12.2006

Raportti 5/2006

Esipuhe

Tämän soodakattilan vastaanottokokeiden sekä materiaali- ja energiataseiden laskennan ohje on tehty Soodakattilayhdistyksen Lipeätyöryhmässä. Puheenjohtajana on toiminut Keijo Salmenoja Oy Metsä-Botnia Ab. Jäseninä olivat Esa Ruonala Stora Enso Oyj, Sanna Siltala UPM-Kymmene Oyj, Aki Hakulinen Kvaerner Power Oy, Kurt Siren Oy Keskuslaboratorio-Centrallaboratorium AB, Juha Koskiniemi Andritz Oy, Mika Salo Oy Metsä-Botnia Ab, Jyrki Rautkorpi PöyryForest Industry Oy ja Mikko Hupa Åbo Akademi. Lipeätyöryhmän sihteerinä toimi Jens Kohlmann Pöyry Forest Industry Oy. Asiantuntijana materiaali- ja energiataseen osalta toimi Esa Vakkilainen Pöyry Forest Industry Oy.

Tästä ohjeesta on laadittu sekä suomen- että englanninkielinen versio. Tavoite on ollut esittää modernin soodakattilan taselaskenta.

Haluamme kiittää Rainer Backmania, Umeå University ja Saied Kochesfahania, US Borax Inc. avusta boraattien termodynaamisten ominaisuuksien arvojen hakemisessa.

Yhteenveto

Soodakattilan massa- ja energiataseita tarvitaan takuukokeita suoritettaessa, energiahallintajärjestelmän laskennoissa ja erilaisia päästölaskelmia suoritettaessa. Modernien soodakattiloiden taselaskentaan ei ole olemassa käyttökelpoista ohjetta. Soodakattilan taseista on olemassa 1996 ilmestynyt TAPPI suositus ”Performance Test Procedure: Sodium Base Recovery Units”, jonka käyttöä haittaa amerikkalaiset yksiköt ja osin virheelliset tulkinnat. Yleistä kattiloiden taselaskentaa käsittelee käytöstä poistuva DIN 1942 "Acceptance Test on Steam Generators", joka ei erikseen huomioi soodakattiloita.

Tässä suosituksessa on myös otettu mukaan boraateilla tapahtuva autokaustistus soodakattilan tulipesässä. Tätä harjoitetaan jo joissain Skandinaavisissa tehtaissa.

Tässä taselaskentaohjeessa nojaututaan uuteen eurooppalaiseen kattiloiden taselaskentastandardiin EN 12952-15:2003 "Water-tube boilers and auxiliary installations - Part 15: Acceptance tests". Suositus perustuu siten polttoliipeävirtaukseen ja polttoliipeän kuiva-aineeseen. Massa- ja energiataseet laaditaan polttoliipeävirtauksen massayksikköä kohti.

Sisältö

Esipuhe

Yhteenveto

1	YLEISTÄ	6
1.1	SOVELLUSKOHDE	6
1.2	TASEIDEN PERUSTE	6
1.3	SOVELLETTAVAT KATTILAT	6
1.4	RAJAUKSET	7
1.4.1	LISÄVIR RAT	7
1.4.2	BORAATTI	7
1.4.3	PÄÄSTÖT	7
1.5	SOPIMUKSESSA HUOMIOITAVAA	8
2	KÄYTETTÄVÄT NORMIT	9
2.1	MITTAUKSIA KOSKEVIA NORMIA	9
2.2	ANALYYSIMENETELMIÄ KOSKEVIA NORMIA	10
2.3	NÄYTTEENOTTOA KOSKEVIA NORMEJA	10
2.4	AINEOMINAISUUKSIA KOSKEVIA NORMEJA	11
3	TASELASKENTA	12
3.1	STANDARDITILA	12
3.2	KATTILAN HYÖTYSUHDE	12
3.3	MATERIAALITASE	18
3.3.1	REAKTIOT POLTETTAVAA 1 KG MUSTALIPEÄÄ KOHTI	20
3.3.2	SULATASE	22
3.3.3	SAVUKAASUVIRTA	23
3.3.4	KUIVA SAVUKAASUVIRTA	24
3.4	HÖYRYYN SIIRTYVÄ LÄMPÖ	25
3.5	SYÖTETTÄVÄ LÄMPÖ JA ENERGIA	25
3.6	SUORAN HYÖTYSUHDELASKENNAN ONGELMAT	26
3.7	HYÖTYSUHTEN MÄÄRITYS EPÄSUORALLA TAVALLA	27
3.7.1	KATTILAAN TUOTU LÄMPÖ JA MUU ENERGIA	28
3.7.2	HYÖDYKSI SAATU LÄMPÖ	29
3.7.3	SYÖTTÖVESIVIRRRAN JA HÖYRYVIRRRAN LASKENTA	30
3.8	SOODAKATTILAN HYÖTYSUHDE	31
3.9	KUIVA-AINEEN VAIKUTUS	31
4	SOODAKATTILAN ERITYISKYSYMYKSET TASEESSA	35
4.1	LAIHOJEN HAJUKAASUJEN KÄSITTELEMINEN TASEESSA	35
4.2	VÄKEVIEN HAJUKAASUJEN KÄSITTELEMINEN TASEESSA	35
4.3	LIUOTINHÖNGÄN POLTON KÄSITTELEMINEN TASEESSA	35
4.4	METANOLIN JA TÄRPÄTIN KÄSITTELEMINEN TASEESSA	35
4.5	HAKULIPEÄKATTILAN KÄSITTELEMINEN TASEESSA	35

4.6	MUSTALIFEÄN TUNTUVA LÄMPÖ	37
4.7	HÄVIÖIDEN LASKENTA	37
4.7.1	SAVUKAASUHÄVIÖ	37
4.7.2	HÄVIÖ PALAMATTOMANA	37
4.7.3	HÄVIÖ SULAN LÄMMÖSSÄ	37
4.7.3.1	Sulan entalpia	38
4.7.3.2	Muodostumislämpö	39
4.7.3.3	Reduktiolämpö	39
4.7.4	HÄVIÖ SÄHKÖSUOTIMEN TUHKASSA	40
4.7.5	SÄTEILY- JA JOHTUMISHÄVIÖIDEN LASKENTA	40
4.8	MUSTALIFEÄN LÄMPÖARVO JA ANALYYSI	41
5	TAKUUKOE OHJEET	43
5.1	TAKUIDEN TOTEAMISEN PERUSTEET	43
5.2	TAATTAVAT SUUREET	44
5.2.1	MUUTEN SELVITETTÄVÄT SUUREET	44
5.2.2	LISÄMITTAUKSET	44
5.2.3	HÖYRYKATTILAN OSIEN TOIMITUS MONELTA TOIMITTAJALTA	45
5.3	TAKUUKOKEEN AIKAINEN TILA	45
5.3.1	NUOHOUSHÖYRYN JA MUIDEN PUHDISTUSTAPOJEN KÄYTTÖ	45
5.3.2	YLEISET EHDOT	45
5.3.3	ESIKOE AJOT	45
5.4	VAKIOAJOTILANNE	46
5.4.1	VAKIOTILANTEEN SAAVUTUS	46
5.4.2	VAKIOAJON VALVONTA	46
5.4.3	POLTON VIRITYS	46
5.5	TAKUUKOE	46
5.5.1	TAKUUKOKEEN PITUUS	46
5.5.2	VAATIMUKSET KOKEEN ALULLE JA LOPULLE	46
5.5.3	ARVOJEN LUENTATAAJUUS	47
5.5.4	SALLITUT POIKKEAMAT	47
5.6	KOESUUNNITELMA	49
5.7	NÄYTTEENOTTO	49
5.7.1	POLTTOLIFEÄ	50
5.7.2	TUHKAVIRTAUS	50
5.7.3	TUHKANÄYTTEET	51
5.7.4	SULANÄYTTEET	52
5.7.5	VESI- JA HÖYRYNÄYTTEET	52
5.7.6	EMISSIONITTAUKSET	52
5.8	REDUKTION MÄÄRITYS	52
6	VIRHETARKASTELU	54
7	VIITTEET	55



Liitteet

- | | |
|-----|-------------------------------------|
| I | Tyypillisiä lisävirtojen analyysijä |
| II | Tyypillinen materiaalitaselaskelma |
| III | Tyypillinen energiataselaskelma |
| IV | Häviöiden suuruuksia |
| V | Savukaasuominaisuuksia |

1 YLEISTÄ

Soodakattilan massa- ja energiataseita tarvitaan takuukokeita suoritettaessa, energiahallintajärjestelmän laskennoissa ja erilaisia päästölaskelmia suoritettaessa. Modernien soodakattiloiden taselaskentaan ei ole olemassa käyttökelpoista ohjetta. Soodakattilan taseista on olemassa 1996 ilmestynyt TAPPI suositus ”Performance Test Procedure: Sodium Base Recovery Units”, jonka käyttöä haittaa amerikkalaiset yksiköt ja osin virheelliset tulkinnot. Soodakattiloiden materiaali ja energiataselaskentaa ovat käsitelleet Gullichsen (1968), Clement *et al.* (1963), Adams ja Frederick (1988) sekä Vakkilainen (2000b). Yleistä kattiloiden taselaskentaa käsittelee käytöstä poistuva DIN 1942 ”Acceptance Test on Steam Generators”, joka ei erikseen huomioi soodakattiloita.

Tässä taselaskentaohjeessa nojaututaan uuteen eurooppalaiseen kattiloiden taselaskentastandardiin EN 12952-15:2003 ”Water-tube boilers and auxiliary installations - Part 15: Acceptance tests”.

1.1 Sovelluskohde

Tämä ohje on laadittu modernien soodakattiloiden hyötysuhteen määrittämiseen sekä niiden vastaanotto- ja takuukokeita varten. Ohje sisältää

- Takuukokeen suoritusohjeita
- Ehdotuksen taserajoista
- Arvioita mittausten epävarmuuksista
- Suosituksia näytteenottotäyttyksistä ja tavoista
- Suosituksia analysointitavoista

1.2 Taseiden peruste

Suositus perustuu polttolipeävirtaukseen ja polttolipeän kuiva-aineeseen. Samoin käytetään mustalipeän alemmaa lämpöarvoa kuten EN 12952-15:2003 esittää. Massa- ja energiataseet laaditaan polttolipeävirtauksen massayksikköä kohti. Takuukokeen aikana ei hyötysuhteen määrittämiseen tarvita tarkkaa mustalipeän virtauksen mittausta.

Samoin lämpörasitus, HHRR on haluttu esittää yksikössä alempi lämpöarvo kertaa massavirta jaettuna pohja-alalla.

1.3 Sovellettavat kattilat

Tätä ohjetta pitää harkiten soveltaa muuhun kuin modernin soodakattilan kokeisiin. Sellaisenaan tätä ei suoraan voida soveltaa muuntotyypisiin kattiloihin. Erillisharkintaa vaativat ainakin

- NSSC kattilat
- Magnesium- ja kalsiumpohjaisten talteenottolaitosten kattilat
- Harppakattilat
- Mustalipeän kaasutusprosessit

1.4 Rajaukset

1.4.1 Lisävirrat

Aikaisemmista taseohjeista poiketen, tämä ohje esittää tavan käsitellä soodakattilaan pääpolttoaineen lisäksi syötettävät lisävirrat. Tyypillisiä lisävirtoja modernissa soodakattilassa ovat:

- Laihojen hajukaasujen poltto
- Väkevien hajukaasujen poltto
- Liuotinhöngän poltto
- metanolin ja tärpätin poltto.

Näiden lisäksi tulee mustalipeän mukana polttoon virtoja kuten

- Kemikaalilisäykset
- Jätehappo
- Bioliete
- Suopa.

Koska taseet perustuvat polttolipeävirtaukseen, kuuluvat kaikki mustalipeän mukana pesään menevät kemikaalilisäykset automaattisesti mukaan. Onkin syytä määrittellä raja-arvot sallituille kemikaalilisäyksille takuukokeen aikana. Tyypillisesti vaihtelevan suuruisia lisäysvirtoja ei sallita takuukokeen aikana. Eli esimerkiksi kemikaalilisäykset ja suovan poltto jätetään tekemättä. Mustalipeän mukana jatkuvasti menevät virrat suositellaan kuitenkin pidettäväksi päällä. Tällaisia ovat kemikaalien valmistuksen jätehappo ja bioliete. Kuitenkin sellaiset jatkuvat virrat, jotka laitetaan erikseen tulipesään, kuten väkevät ja laimeat hajukaasut sekä liuotinhöngät, on syytä pitää päällä takuukokeen aikana.

1.4.2 Boraatti

Tässä suosituksessa on myös otettu mukaan boraateilla tapahtuva autokaustistus soodakattilan tulipesässä. Tätä harjoitetaan jo joissain Skandinaavisissa tehtaissa (Björk et al., 2005).

1.4.3 Päästöt

Tässä suosituksessa on oletettu, että soodakattila toimii kuten tyypillinen moderni soodakattila. Tällöin erityisiä päästömittauksia ei tarvita hyötysuhteen toteamiseksi. Mikäli palamattomien määrä on epätyypillisen korkea (CO, VOC), suositellaan lisämittauksia ja näiden lisähäviöiden huomioimista hyötysuhteessa.



1.5 Sopimuksessa huomioitavaa

Tämä ohje on tarkoitettu modernien soodakattiloiden kauppasopimuksen osaksi. Sopimukset solmitaan tyypillisesti kauan ennen varsinaisia vastaanotto- ja takuukokeita. Suositellaan, että kauppasopimuksessa viitataan

- Käytettävään vesi- ja höyrytaulukkaan
- Käytettävään kaasujen entalpianlaskentatapaan
- Käytettävään kaasumaisten päästöjen mittausstandardiin
- Käytettävien kemiallisten analyysien standardiin
- Referenssilämpötilaan
- Laitoksen puhtauteen kokeen alkaessa
- Kokeen kokonaisaikaan ja kunkin koejakson pituuteen
- Laitoksen omien mittareiden lisäksi käytettäviin mittavälineisiin ja/tai mittauspalveluihin
- Tarvittaviin mittaus- ja näytteenottopaikkoihin
- Ulospuhalluksen ja nuohouksen määrään kokeen aikana
- Sellaisiin korjauksiin mitä ei lasketa tässä standardissa esitetyllä tavalla
- Näytteidenottotaajuuteen ja -tapaan
- Taserajaan, jos se on jokin muu kuin kattilahuoneen seinät.



2 KÄYTETTÄVÄT NORMIT

Takuukokeita tehtäessä ja kattilan hyötysuhdetta määriteltäessä oletetaan, että käytetään yleisesti alalle vakiintunutta tapaa ja noudattaen parasta käytettävissä olevaa tekniikkaa. Mittaukset suoritetaan mittauksia koskevien normien mukaan. Analyysit tehdään sellutehtaan ympäristöön sopivien menetelmien mukaan. Näytteenotossa noudatetaan tehtyjä suosituksia. Emissiomittaukset suoritetaan standardien mukaisesti.

2.1 Mittauksia koskevia normia

Tässä taselaskentaohjeessa on lähdetty siitä, että jollei mitään muuta sopimuksessa ole määritetty, niin vastaanotto- ja takuukokeita tehtäessä käytetään seuraavia normeja ja standardeja:

EN 837-1

Pressure gauges -Part 1: Bourdon tube pressure gauges -Dimensions, metrology, requirements ja testing

EN 873-3

Pressure gauges -Part 3: Diaphragm ja capsule pressure gauges - Dimensions, metrology, requirements ja testing

EN 60751

Industrial platinum resistance thermometer sensors (IEC 751: 1983+ A1: 1986)

EN ISO 5167-1

Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices - Part 1: Orifice plates, nozzles ja Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full (ISO 5167-1: 1991)

IEC 584-1

Thermocouples -Part 1: Reference tables

IEC 584-2

Thermocouples -Part 2: Tolerances

ISO 5168

Measurement of fluid flow - Estimation of uncertainty of a flow-rate measurement



2.2 Analyysimenetelmiä koskevia normia

SCAN-N 22:77

Mustalipeän kuiva-aineen määrittäminen
SCAN-N 33:94

Efektiiivisen alkalien määrittäminen
KCL 67:87

NaOH pitoisuuden määrittäminen
SCAN-N 31:94

Sulfidipitoisuuden määrittäminen
SCAN-N 6:64 tai SCAN-N 6:85

Sulfaattipitoisuuden määrittäminen
KCL 66:81

Mustalipeän ylemmän lämpöarvon määrittäminen
SCAN-N 37:98

Natrium, kalium
SCAN-N 35:96 tai ASTM D 4239 / LECO SC-444

Rikki
ASTM D 5373 / LECO CHN-1000 / LECO CHN-600

Hiili, vety
ASTM D 4208

Kloori
SFS 3866, 3869, 5265, 5293 sekä 5624

Emissiostandardeja

2.3 Näytteenottoa koskevia normeja

Sulan näytteenotto suoritetaan esimerkiksi ”ETY-soodakattilavaliokunta. Suositus sulan ja viherlipeän reduktioasteen määrittämiseksi” VK-15 394V-02 mukaisesti.

2.4 Aineominaisuuksia koskevia normeja

Veden ja vesihöyryn termodynaamiset ominaisuudet tulee määritellä esimerkiksi seuraavassa julkaisussa esitetyn mukaan “Properties of water and steam, IAPWS-IF97: The Industrial Standard IAPWS-IF97 for the Thermodynamic Properties and Supplementary Equations for Other Properties” by W. Wagner ja A. Kruse, Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K, 1998, ISBN: 3540643397.

Sulan komponenttien ja kaasujen aineominaisuuksia löytyy esimerkiksi National Institute of Standards and Technologyn verkkosivulta <http://webbook.nist.gov/>. Verkkosivun aineominaisuudet perustuvat uusimpaan JANAF taulukkoon (Chase, 1998).

3 TASELASKENTA

Tässä taselaskentaohjeessa nojaututaan uuteen eurooppalaiseen kattiloiden taselaskentastandardiin EN 12952-15:2003 "Water-tube boilers ja auxiliary installations - Part 15: Acceptance tests". Koska kyseistä standardia laadittaessa ei ole erikseen otettu kantaa soodakattiloiden erityiskysymyksiin, on seuraavassa esitetty tarkennuksia ja lisämäärittelyjä esimerkiksi eri häviöiden laskemiseksi.

Kattilan materiaali- ja energiataseiden laskenta muodostaa tarkastelujen perustan. Tehtaan energia- ja massataseet vaativat laskentaa standarditavalla. Taseita tarvitaan taloudellisuuden arviointiin ja kustannuslaskentaan. Soodakattiloiden materiaali ja energiataselaskentaa ovat käsitelleet Gullichsen (1968), Clement *et al.* (1963), Adams ja Frederick (1988) sekä Vakkilainen (2000b). Ainoa soodakattilan massa- ja energiataselaskentaa käsittelevä standardi on niin sanottu Tappi-tase (Performance, 1996).

Tämä suositus ei vaadi soodakattilan materiaali- ja energiataseelta standardimuotoa. Jotta materiaali- ja energiatase olisi tämän suosituksen mukainen, on sen noudatettava tässä esitettyä laskentatapaa ja aineominaisuuksia. Esimerkkilaskelma on esitetty liitteenä.

3.1 Standarditila

Termiä "standarditila" käytetään tässä esittämään entalpian 0-kohtaa ja se on $P_n = 0,101325 \text{ MPa}$ ja $t_n = 0 \text{ °C}$. Laskelmat suositellaan tehtäväksi käyttäen lämpötilaa 0 °C taselämpötilana. Taselämpötila voi olla myös joku muu sopimuksessa esitetty lämpötila.

3.2 Kattilan hyötysuhde

Kattilan hyötysuhde kertoo siitä, kuinka hyvin valittu prosessi ja laitteisto muuntavat palamislämpöä höyryksi. Parhaimmissa kiinteän polttoaineen kattiloissa hyötysuhde lähenee 90 %. Öljy ja kaasukattiloissa voi hyötysuhde olla lähes 95 %.

Kattilan hyötysuhde määritellään hyödyksi saadun lämmön ja kattilaan tuodun energian suhteena

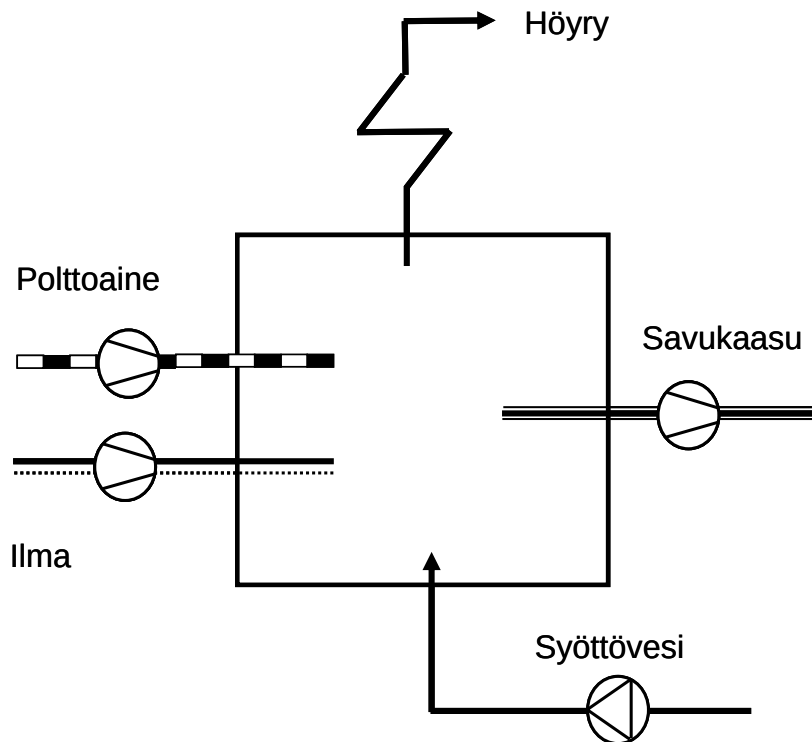
$$\eta = \frac{Q_{\text{abs}}}{Q_{\text{in}}}$$

1

missä

η	on kattilan hyötysuhde
Q_{abs}	hyödyksi saatu lämpö (höyryyn siirtynyt lämpö)
Q_{in}	kattilaan tuotu lämpö ja muu energia

Hyötysuhteen määrittäminen vaatii, että määritetään kattilan taserajat ja ratkaistaan taserajat ylittävien virtojen energiasisältö. Taserajat pitää määrittää siten, että kaikki massa- ja energiavirrat voidaan ratkaista riittävällä tarkkuudella. Käytännössä pienet virrat jätetään huomiotta. Kun määritellään kattilan hyötysuhdetta kaikki sisäiset reaktiot ja kierrot voidaan jättää huomiotta. Hyötysuhteen määrittämiseen käytetään vain taserajan ylittävien virtojen ominaisuuksia.

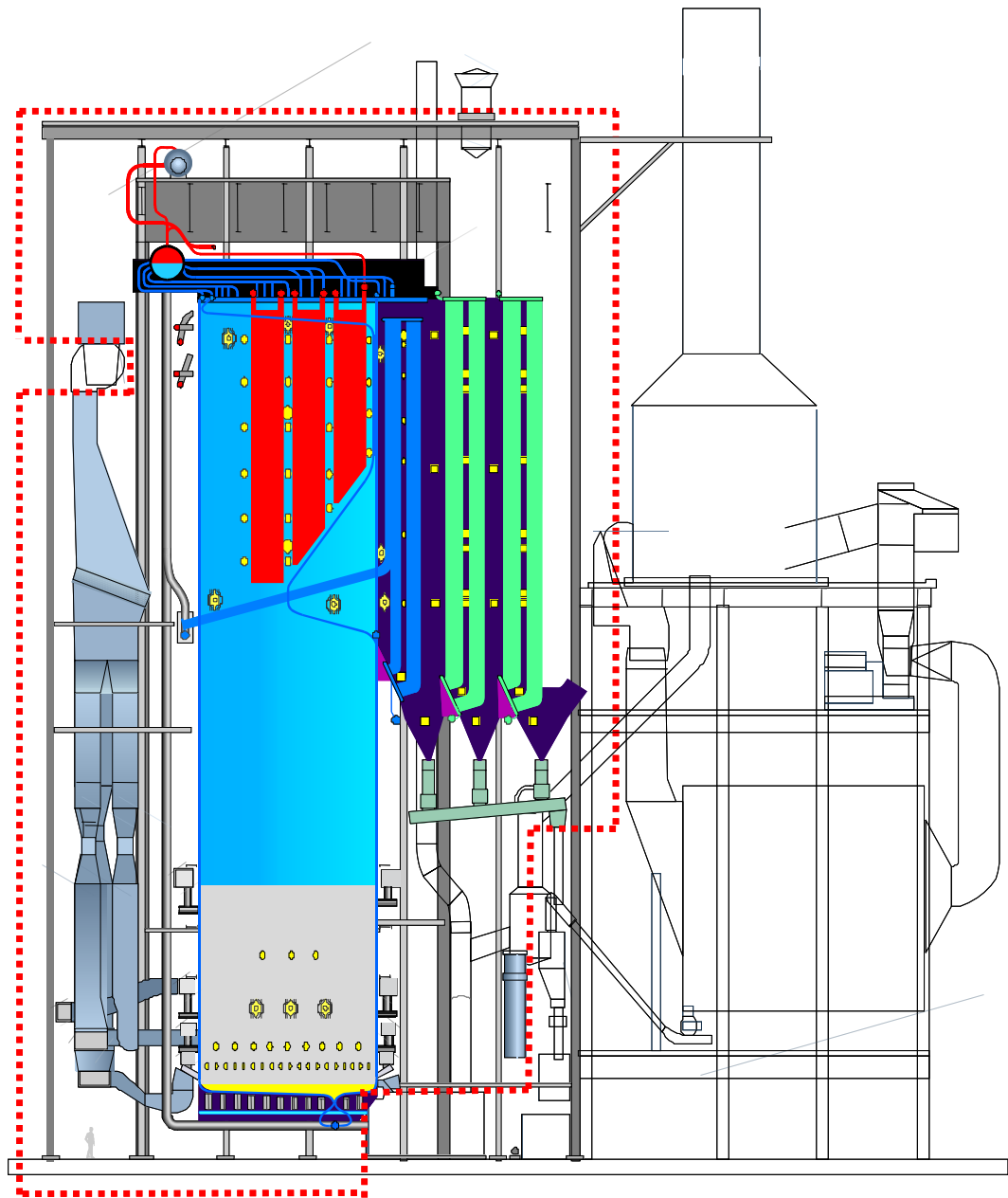


Kuva 3-1, Yksinkertainen kattilaprosessi

Kuva 3-1 esittää yksinkertaista kattilaprosessia. Polttoaine ja tarvittava ilmamäärä syötetään kattilaan. Polttoaine reagoi ilman sisältämän hapen kanssa. Muodostuva savukaasu imetään ulos. Palamisessa vapautuva lämpö siirtyy kattilaan pumpattavaan syöttöveeteen. Lämpö muuttaa veden höyryksi.

Kattilan taserajat voidaan asettaa monella tavoin. Esimerkiksi kattilahuone on yleensä käytännöllinen taseraja. Apulaitteiden kuten puhaltimien ja pumppujen hyötysuhteen ja häviöiden ei pitäisi vaikuttaa kattilan hyötysuhteeseen. Toisaalta pakkokierto pumpun, savukaasun kierrätyksen ja monen muun sisäisen laitteen toiminta pitäisi huomioida, varsinkin kun erilaisten kattilatyypin hyötysuhteita vertaillaan toisiinsa. Kattilan taserajaan kuuluukin osa mutta eivät kaikki kattilahuoneen sisällä olevista apulaitteista.

Soodakattilalle voidaan määrittää taseraja EN 12952-15 mukaan. Kuva 3-2 esittää tyypillistä taserajaa soodakattilalle. Taserajan ylittävät virtaukset on esitetty Kuvas-
sa 3-3. Virtojen määritelmät ja arvot on esitetty Taulukossa 3-1.

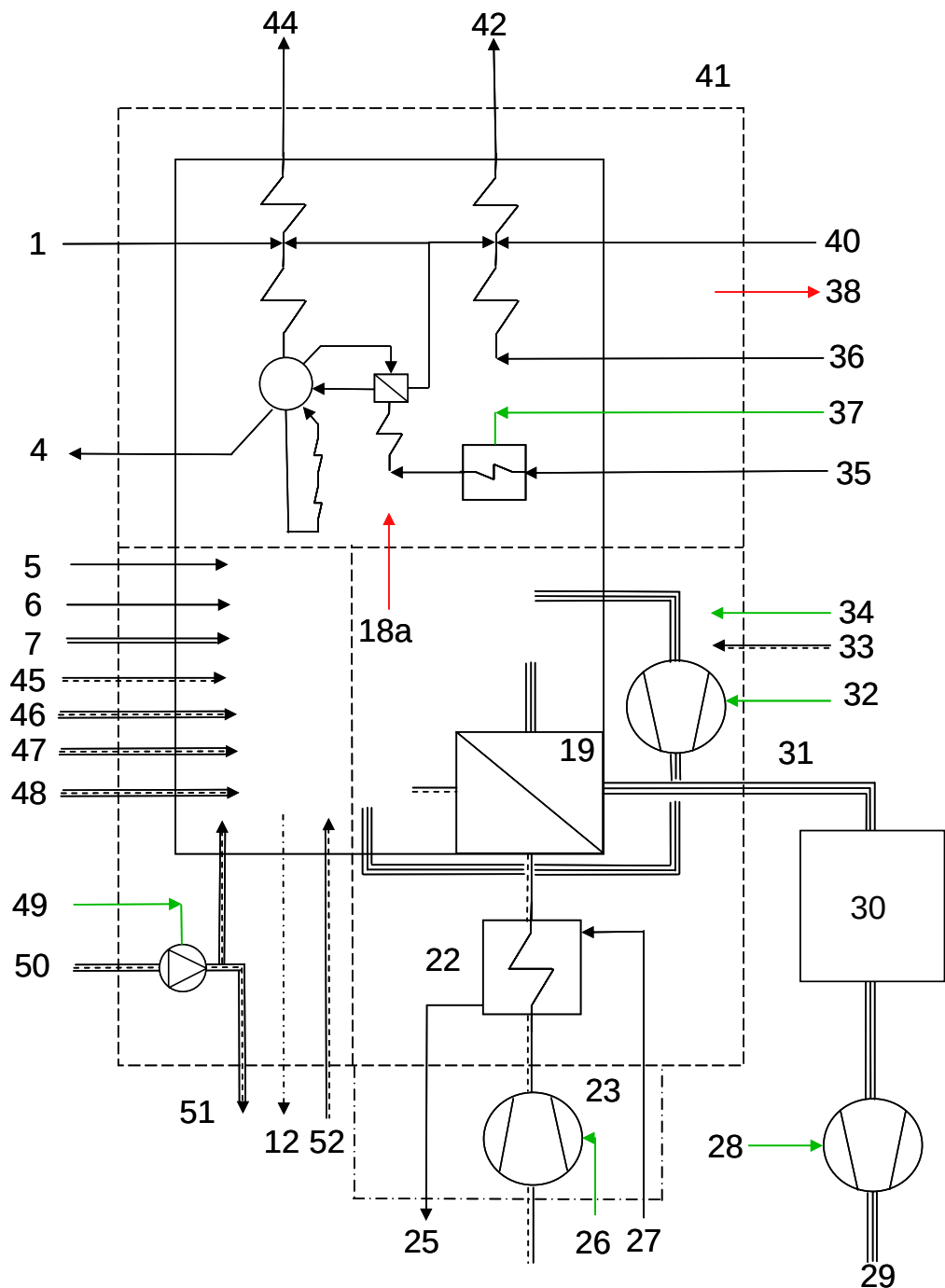


Kuva 3-2, Tyyppillinen taseraja soodakattilalle

Kommentteja taserajan määritelmään

- Mustalipeän käsittely, varastointi ja syöttölaitteet ovat taserajan ulkopuolella. Mustalipeän esilämmitys ja siihen liittyvät laitteet ovat taserajan sisäpuolella.
- Ilmapuhallin ja kanavisto on taserajan ulkopuolella. Ensimmäisestä lämpöpinnasta, ilman esilämmitin, alkaen ovat laitteet taserajan sisällä.
- Tulipesä ja siihen liittyvät laitteet ovat taserajan sisäpuolella. Sulan käsittely ja liuotinsäiliö ovat taserajan ulkopuolella.

- Savukaasun puhdistuslaitteet ovat taserajan ulkopuolella. Mahdollinen savukaasun kierrätyspuhallin on taserajan ulkopuolella.
- Kaikki höyry- ja vesilämmönvaihtimet, jotka jäädyttävät savukaasuja ovat taserajan sisäpuolella.
- Pakkokierto pumpput ovat taserajan sisällä.
- Säästöjärjestelmä, instrumentointi ja sähköistys ovat taserajan ulkopuolella.



Kuva 3-3, Soodakattilan taseraja tulo-, poisto- ja häviövirtoineen

Kattilan hyötysuhdelaskentaa varten on jokaisen virtauksen määrä, paine, lämpötila ja koostumus arvioitava. Mustalipeästä ja muista polttoainevirroista sekä hajukaasuista on niiden elementaarianalyysi määriteltävä.

Taulukko 3-1, Virrat kuvassa 3-3

No	Suure	Symboli
1	Ruiskutusvesi	m_{SS}, h_{SS}
4	Ulospuhallus	m_{BD}, h_{BD}
5	Ulkoinen jäähdytys	Q_{EC}
6	Höyryhajotus	m_{AS}, h_{AS}
7	Öljy, kaasu	$m_H, H_{(N)H}, h_H$
12	Sulahäviö	Q_{SL}
18a	Käytettävissä oleva lämpö	Q_N
19	Ilman savukaasuesilämmitin	
22	Höyryesilämmitin	
23	Ulkopuolinen höyry	
25	Kondensaatti	h_{SA2}
26	Ilmapuhallin	P_{FD}
27	Höyry (MP&LP)	m_{AS}, h_{AS}
28	Savukaasupuhallin	P_G
29	Pölyhäviö	Q_{FA}
30	Pölyn erotus	Q_{DC}, P_{DC}
31	Häviö palamattomana	m_F, h_G
32	Savukaasukierrätyspuhallin	P_{UG}
33	Vuotoilma	m_{LA}, h_{LA}
34	Muu sähkö	P
35	Syöttövesi	m_{FW}, h_{FW}
36	Välitulistushöyry sisään	m_{RH1}, h_{RH1}
37	Syöttöveden kp-esilämmitin	Q_{HPFW}
38	Säteily- ja johtumishäviö	Q_{RC}
40	Ruiskutus välitulistukseen	m_{SR}, h_{SR}
41	Normaali taseraja	
42	Välitulistushöyry	m_{RH2}, h_{RH2}
44	Päähöyry	m_{ST}, h_{ST}
45*	Laimea hajukaasu	m_{DG}, h_{DG}
46*	Väkevä hajukaasu	$m_{CG}, H_{(N)CG}, h_{CG}$
47*	Metanoli	$m_{ME}, H_{(N)ME}, h_{ME}$
48*	Tärpähti	$m_{TP}, H_{(N)TU}, h_{TP}$
49*	Mustalipeäpumpun teho	P_M
50*	Mustalipeä	$m_{BL}, H_{(N)BL}, h_{BL}$
51*	Mustalipeän kierrätys	m_{BR}, h_{BR}
52*	Liuottimen hönkä	m_{DT}, h_{DT}

* numerointi noudattaa EN 12952-15 paitsi 45 ja sitä suuremmat

Taulukko 3-2, Esimerkkiarvoja Kuvan 3-3 suureille

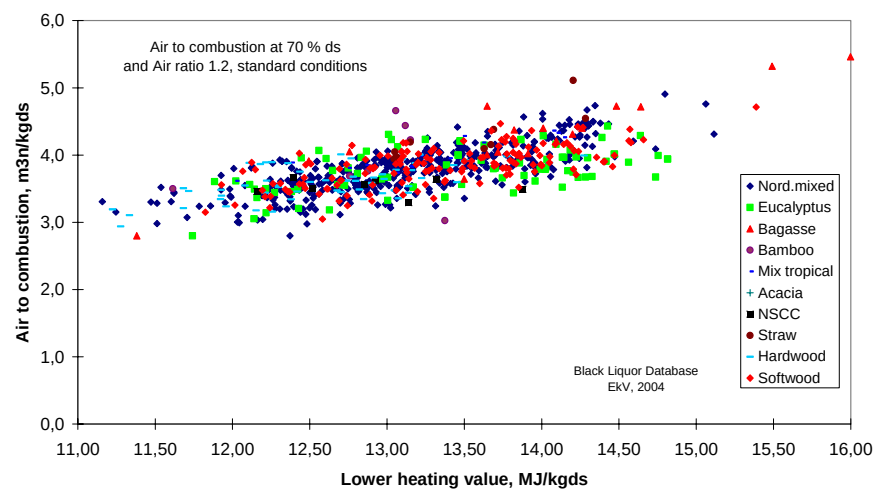
No	Suure	Arvo
1	Ruiskutusvesi	10 kg/s , 115 °C, 11 MPa
4	Ulospuhallus	2,3 kg/s , 10,5 MPa(sat)
5	Ulkoinen jäähdytys	0 MW
6	Höyryhajotus	0 kg/s
7	Öljy, kaasu	0 kg/s
12	Sulahäviö	Q_{SL}
18a	Käytettävissä oleva lämpö	Q_N
19	Ilman savukaasuesilämmitin	
22	Höyryesilämmitin	-> 108,8 °C
23	Ulkopuolinen höyry	
25	Kondensaatti	h_{SA2} (60 °C)
26	Ilmapuhallin	P_{FD}
27	Höyry (MP&VP)	m_{AS}, h_{AS}
28	Savukaasupuhallin	$P_G(\eta = 0,6)$
29	Pölyhäviö	100 mg/m ³ n(kuiva)
30	Pölyn erotus	
31	Häviö palamattomana	2 MW
32	Savukaasukierrätyspuhallin	0
33	Vuotoilma	5 %, 30 °C
34	Muu sähkö	4 MW
35	Syöttövesi	m_{FW} , 115 °C, 11 MPa
36	Välitulistushöyry sisään	0 kg/s
37	Syöttöveden kp-esilämmitin	0 MW
38	Säteily- ja johtumishäviö	2 MW
40	Ruiskutus välitulistukseen	0 kg/s
41	Normaali taseraja	
42	Välitulistushöyry	0 kg/s
44	Päähöyry	m_{ST} , 490 °C, 9,1 MPa
45*	Laimea hajukaasu	15 m ³ /s
46*	Väkevä hajukaasu	0,8 kg/s, 17,8 MJ/kg
47*	Metanoli	0 kg/s
48*	Tärpätti	0 kg/s
49*	Mustalipeäpumpun teho	$P_M(\eta = 0,6)$
50*	Mustalipeä	4000 tka/d, 13 MJ/kgka, 140 °C
51*	Mustalipeän kierrätys	0 kg/s
52*	Liuottimen hönkä	0,5 m ³ /kgka, 50 °C

* numerointi noudattaa EN 12952-15 paitsi 45 ja sitä suuremmat

Näiden suureiden lisäksi pitää tietää mustalipeän ja muiden polttoaineiden analyysit. Hajukaasuille, metanolille ja tärpätille on Liitteenä I esimerkkianalyysejä. Analyysin määrittäminen hajukaasuille on kallista ja hankalaa. Mikäli näiden lisävirtausten osuus muodostuvasta savukaasuvirrasta on pieni, voidaan yhteisesti sovittaessa käyttää esimerkkianalyysia.

3.3 Materiaalitase

Polton hallinta edellyttää polttoainevirtaan suhteutettua ilmavirtaa. Yhden mustalipeäyksikön polttamiseen tarvittava ilmamäärä riippuu sen vesipitoisuudesta ja lämpöarvosta. Vain orgaaninen osuus mustalipeästä palaa. Mustalipeän lämpöarvon nousu, Kuva 3-4, lisää polttoilman tarvetta. Kuvaa 3-4 voidaan käyttää esimerkiksi puhaltimien mitoittamiseen. Tärkein käyttö on käytännössä esiintyvien ilmavirtojen alue. Soodakattilan pitää pystyä toimimaan paitsi suunnittelulipeällä, myös muilla tavanomaisilla mustalipeillä. Tavallisesti varsinainen suunnittelu ja toiminnan laskenta edellyttää tarkan mustalipeän elementaarianalyysin käyttöä.



Kuva 3-4, Mustalipeän ilman tarve alemman lämpöarvon funktiona

Tyypillinen biopolttoaine koostuu hiilestä, vedystä, timestä, rikistä ja hapesta. Mustalipeässä on lisäksi paljon tuhkaa; natrium-, kalium- ja klooriyhdisteitä. Yleensä polttoaineen muodostavia yhdisteitä ei voida määrittellä. Stökiometrinen ilman tarve, I , voidaan kuitenkin laskea, kun polttoaineen oletetaan koostuvan kolmesta osasta:

- Orgaaninen osuus, mikä palaa
- Reaktiivinen epäorgaaninen osuus, mikä reagoi ennalta määrätyiksi lopputuotteiksi.
- Reagoimaton osuus, mikä läpäisee polton muuttumattomana

Massatase laaditaan yleensä mustalipeän painoyksikköä kohti. Kun eri virtaukset tiedetään esimerkiksi kiloa polttolipeää kohti, on kunkin tilanteen massatase helppo laatia kertomalla kaikki virrat mustalipeävirralla.

Esimerkki, laske Taulukon 3-3 mukaisen mustalipeän ilman tarve.

Taulukko 3-3, Esimerkkianalyysi Kuvan 3-4 mustalipeälle

Alkuaine	paino- %
C	32,5
H	3,3
N	0,09
S	6,1
Na	20,0
K	3,0
Cl	0,25
B	0,5
Inertit	0,1
Happi (erotus)	34,16

Lisäksi tiedetään että reduktioaste on 96 % ilmaistuna sulfidin moolisuhteena sulfaattiin ja sulfidiin sulassa. Autokaustisointiaste on 80 % ilmaistuna moolisuhteena $\text{Na}_3\text{BO}_3/(\text{NaBO}_2+\text{Na}_3\text{BO}_3)$. Mustalipeän kuiva-aine on 85 %. Ilmakero on 1,1625 (~3 % O_2 savukaasuissa), SO_2 -emissio on 13 mg/m^3 n kuivassa kaasussa ja pölypäästö on 0,2 g/kgka. Nuohoushöyryn määrä on 119 g/kgka. Väkevien hajukaasujen mukana tulee rikkiä 10,8 g/kgka ja vettä 21,6 g/kgka. Ilman kosteus on 22 g/kg kuivaa ilmaa. Pölyn virtaus on esitetty Taulukossa 3-4. Kiertotuhkan määrä on 100 g/kgka ja sen virtaus on esitetty Taulukossa 3-5.

Taulukko 3-4, Esimerkkipölyvirrat, Kuva 3-3

Elementti	Virtaus, g/kgka
Na	0,1158
K	0,0260
Cl	0,0035
-CO ₃	0,0662
-SO ₄	0,1682
-S	0,0004
-B	0,0000

Taulukko 3-5, Esimerkkituhkavirrat, Kuva 3-3

Elementti	Virtaus, g/kgka
Na	30,47
K	6,84
Cl	0,93
-CO ₃	17,41
-SO ₄	44,25
-S	0,10
-B	0,00

3.3.1 Reaktiot poltettavaa 1 kg mustalipeää kohti

Polttoliipeävirta sisään

	massa, g/kgka	mol/kgka	lopputuote
Hiili	325	$325/12,011=27,059$	CO ₂ , Na ₂ CO ₃
Vety	33	$33/2,016=16,369$	H ₂ O, (HCl)
Typpi	0,9	$0,9/28,0134=0,032$	N ₂
Happi	341,6	$341,6/31,999=10,675$	CO ₂ , SO ₂ , Na ₂ CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , K ₂ SO ₄ , K ₂ CO ₃ , H ₂ O, NaBO ₂ , Na ₃ BO ₃
Kloori	2,5	$2,5/35,453=0,071$	NaCl, KCl, HCl
Kalium	30	$30/78,197=0,384$	K ₂ S, K ₂ SO ₄ , K ₂ CO ₃ , KCl,
Rikki	61	$61/32,060=1,903$	SO ₂ , K ₂ S, Na ₂ S, Na ₂ SO ₄
Natrium	200	$200/45,980=4,350$	Na ₂ S, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , NaCl, NaBO ₂ , Na ₃ BO ₃
Boori	5	$5/10,811=0,463$	NaBO ₂ , Na ₃ BO ₃
Vesi	$1000*(1/0,85 - 1)$ = 175,5	$176,5/18,015=9,796$	H ₂ O

Rikkitase

	mol/kgka	massa, g/kgka	lopputuote
	1,903	61,0	rikki
	0,333	10,7	hajukaasuissa
	-0,000	-0,0	SO ₂
	-0,002	-0,1	pölyssä -SO ₄
	-0,000	-0,0	pölyssä -S
	-0,461	-14,8	tuhkassa -SO ₄
	-0,003	-0,1	tuhkassa -S
Yhteensä	1,770	56,7	S sulassa
	$0,04*1,770=0,071$	2,3	-SO ₄ sulassa
	$0,96*1,770=1,699$	54,5	-S sulassa

Klooritase

	mol/kgka	massa, g/kgka	lopputuote
	0,071	2,5	tuotu kloori
	0,000	-0,0	pölyn NaCl ja KCl
	-0,026	-0,9	tuhkan NaCl ja KCl
	-0,000	-0,0	savukaasujen HCl
Yhteensä	0,044	1,6	Cl sulassa

Booritase

	mol/kgka	massa, g/kgka	lopputuote
	0,462	5,0	tuotu boori
	-0,000	-0,0	pölyssä
	-0,000	-0,0	tuhkassa
Yhteensä	0,462	5,0	boori sulassa
	0,370	4,0	Na ₃ BO ₃ sulassa
	0,092	1,0	NaBO ₂ sulassa

Natrium- ja kaliumtaseet pitää ratkaista yhdessä. Voidaan olettaa, että boraatti reagoi vain natriumyhdisteiden kanssa ja sulan yhdisteet muodostuvat sulan natrium/kalium suhteessa. Toistaiseksi ei tiedetä esim. Na₂S ja K₂S suhdetta sulassa, mutta tämä puute ei aiheuta virhettä massataseeseen.

Natriumtase

	mol/kgka	massa, g/kgka	lopputuote
	4,350	200,0	tuotu natrium
	-0,003	-0,1	pölyn Na ₂ SO ₄ , NaCO ₃ ja NaCl
	-0,663	-30,5	tuhkan Na ₂ SO ₄ , NaCO ₃ ja NaCl
Yhteensä	3,684	169,4	natrium sulassa
	-0,066	-3,0	Na ₂ SO ₄ sulassa
	-1,573	-72,3	Na ₂ S sulassa
	-0,555	-25,5	Na ₃ BO ₃ sulassa
	-0,046	-2,1	NaBO ₂ sulassa
	-0,020	-0,9	NaCl sulassa
	1,425	65,5	Na ₂ CO ₃ sulassa

Kaliumtase

	mol/kgka	massa, g/kgka	lopputuote
	0,384	30,0	tuotu kalium
	-0,000	-0,0	pölyn K ₂ SO ₄ , K ₂ CO ₃ ja KCl
	-0,087	-6,8	tuhkan K ₂ SO ₄ , K ₂ CO ₃ ja KCl
Yhteensä	0,296	23,1	kalium sulassa
	-0,005	-0,4	K ₂ SO ₄ sulassa
	-0,126	-9,9	K ₂ S sulassa
	-0,002	-0,1	KCl sulassa
	0,163	12,7	K ₂ CO ₃ sulassa

Muiden mustalipeän epäorgaanisten komponenttien 1 g/kgka oletetaan poistuvan sulan mukana reagoimatta.

Hiilitase

	mol/kgka	massa, g/kgka	lopputuote
	27,059	325,0	hiili
	-0,001	-0,0	pölyn Na ₂ CO ₃ ja K ₂ CO ₃
	-0,290	-3,5	tuhkan Na ₂ CO ₃ ja K ₂ CO ₃
	-1,587	-19,1	Na ₂ CO ₃ sulassa
Yhteensä	25,180	302,4	CO₂

Happitase

	mol/kgka	massa, g/kgka	lopputuote
	10,675	341,6	happi
	-25,184	-805,7	CO ₂
	-0,003	-0,1	CO ₃ ja SO ₄ pölyssä
	-1,357	-43,4	CO ₃ ja SO ₄ tuhassa
	-0,001	0,0	SO ₂
	-0,142	-4,5	K ₂ SO ₄ ja Na ₂ SO ₄ sulassa
	-2,375	-76,0	K ₂ CO ₃ ja Na ₂ CO ₃ sulassa
	-0,555	-17,8	Na ₃ BO ₃ sulassa
	-0,092	-3,0	NaBO ₂ sulassa
	-8,185	-261,9	H ₂ O
Yhteensä	-27,220	-871,0	

Kostean ilman tarve on $1,1625 \cdot 0,871 / 0,22925 = 4,4537$ kg/kgka

Jos sovellamme hiilen ja lämpöarvon välistä korrelaatiota, niin saamme lämpöarvoksi (LHV) 12,6 MJ/kgka. Kuvasta 3-4 ilman tarve on 3,2 ... 4 m³n/kgka tai 3,8 ... 4,8 kg/kgka.

3.3.2 Sulatase

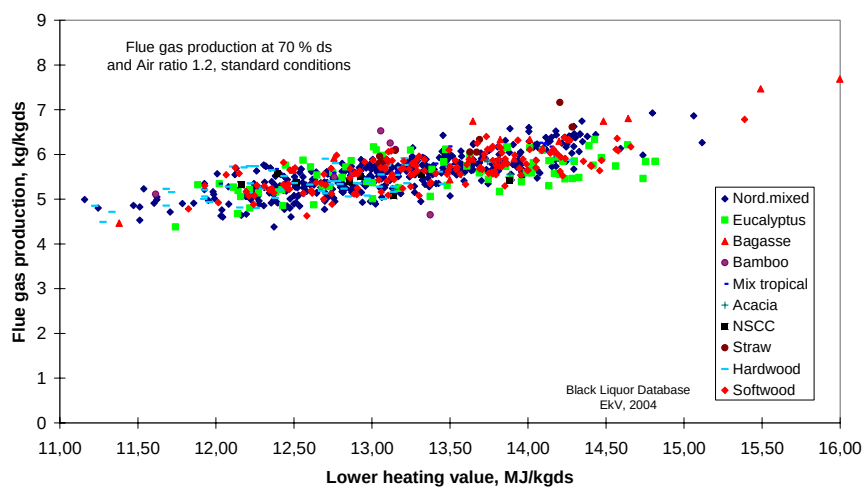
Sulavirta saadaan, kun summataan kaikki eri virrat.

Esimerkki; Laske sulamäärä edelliselle esimerkille

	mol/kgka	massa, g/kgka	lopputuote
	0,127	14,0	K ₂ S sulassa
	1,577	123,1	Na ₂ S sulassa
	0,066	9,3	Na ₂ SO ₄ sulassa
	0,005	0,9	NaCl sulassa
	0,041	2,4	KCl sulassa
	0,003	0,2	Na ₂ CO ₃ sulassa
	1,421	150,6	K ₂ CO ₃ sulassa
	0,162	22,4	Na ₃ BO ₃ sulassa
	0,370	47,3	NaBO ₂ sulassa
	0,092	6,1	NaCl sulassa
	-	1	muu epäorgaaninen
Yhteensä		377,4	

Sulavirta on 0,3774 kg/kgka.

3.3.3 Savukaasuvirta



Kuva 3-5, Mustalipeän savukaasumäärä alemman lämpöarvon funktiona.

Mustalipeän savukaasumäärä riippuu mustalipeän lämpöarvosta, Kuva 3-5. Yksinkertaisimmillaan voidaan savukaasumäärän arviointiin käyttää ennalta määrättyä savukaasun ja ilman suhdetta. Tarkempi savukaasumäärä voidaan laskea yksinkertaisella massataseella, kun ilma-, mustalipeä- ja sulavirta tunnetaan.

Esimerkki; Laske savukaasuvirta edelliselle esimerkille.

Savukaasun massavirta saadaan jo lasketuista virroista

	massa, g/kgka	virta	
	1000	polttolipeä	
	176,5	vesi polttolipeässä	
	4453,7	ilma	
	118,8	nuohoushöyry	
	10,8	rikki hajukaasuissa	
	21,6	vesi hajukaasuissa	
	-0,2	pöly	
	-100	tuhka	
	-377,4	sula	
Yhteensä	5308,8	savukaasu	

Savukaasuvirta on 5.309 kg/kgka. Ympäristöraportointia varten tarvitaan usein kuiva savukaasuvirta. Kuiva savukaasuvirta voidaan laskea vähentämällä mustalipeän vesi, nuohoushöyry, ilman sisältämä vesi ja mustalipeän sisältämän vedyn palamisesta syntyvä vesi.

3.3.4 Kuiva savukaasuvirta

Massatase

	massa, g/kgka	virta	
	5308,8	märkä savukaasu	
	-176,5	vesi polttolipeässä	
	-118,8	nuohoushöyry	
	-21,6	vesi hajukaasuissa	
	-0,022*4453,7	vesi ilmassa	
	-16,371*0,01802	vesi mustalipeän vedystä	
Yhteensä	4820,9	kuiva savukaasu	

Vuotojen osuus pitää ottaa huomioon määrättäessä soodakattilan ilma- ja savukaasuvirtoja. Ilmapuhaltimien tuottama ilmavirta on vähemmän kuin laskennallinen ilmavirta, koska osa ilmasta (~5 %) vuotaa kattilaan aukoista. Usein savukaasuvirta piipussa on merkittävästi isompi kuin savukaasuvirta ekoilta sähkösuotimen tiivistysilman ja savukaasukanaviston vuotojen takia.

3.4 Höyryyn siirtyvä lämpö

Hyödyksi saatu lämpö on kaikkien höyryvirtoihin siirtyvien lämpövirtojen summa. Hyödyksi saatu lämpö riippuu kattilatyypistä ja hyötysuhdelaskennan taserajoista. Yleensä hyödyksi saatu lämpö voidaan määritellä seuraavasti.

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{ms}} + Q_{\text{rh}} + Q_{\text{bd}} \quad 2$$

missä

Q_{ms}	päähöyryyn siirtyvä lämpö
Q_{rh}	välitulistushöyryyn siirtyvä lämpö
Q_{bd}	ulospuhallukseen siirtyvä lämpö

Ilman lämmitykseen tai nuohoukseen käytettävää höyryä ei lasketa mukaan hyödyksi saaduksi lämmöksi.

3.5 Syötettävä lämpö ja energia

Kattilaan syötettävä energia koostuu kahdesta osasta. Osa energiavirroista riippuu polttoainevirrasta, ja osa ei ole verrannollinen polttoainevirtaan. Seuraavat energiavirrat ovat tyypillisesti verrannollisia polttoainevirtaan:

- Polttoaineen kemiallisen reaktion vapauttama lämpö, H_u (palamislämpö)
- Apupolttoaineiden kemiallisen reaktion vapauttama lämpö, H_u (palamislämpö)
- Polttoaineen esilämmityksen lämpö, Q_f
- Ilman esilämmityksen lämpö, Q_a

Esimerkkejä energiavirroista, jotka eivät ole suoraan verrannollisia polttoainevirtaan, ovat

- Savukaasupuhaltimen ja ilmapuhaltimen akseliteho
- Kiertopumppujen akseliteho
- Savukaasun kierrätyksen akseliteho

Taselaskennassa on tyypillistä määritellä hyödyksi saatu lämpö tulo- ja lähtötilan erona. Siksi osaa tulevista energiavirroista ei lasketa syöttövirroiksi. Tällaisia virttoja ovat esimerkiksi

- Syöttövedessä tuleva lämpö
- Ruiskutusvedessä tuleva lämpö
- Tulevan välitulistushöyryn lämpö

3.6 Suoran hyötysuhdelaskennan ongelmat

Taselaskentastandardi EN 12952-15:2003 "Water-tube boilers ja auxiliary installations - Part 15: Acceptance tests" mukaan hyötysuhde on mahdollista laskea myös epäsuoralla menetelmällä. Kun massavirrat, ominaislämpökapasiteetit ja lämpötilat ovat tunnettuja, voidaan hyötysuhde ilmaista esimerkiksi seuraavalla yksinkertaistetulla kaavalla.

$$\eta = \frac{Q_{ms} + Q_{rh} + Q_{bd}}{H_u * m_f + Q_f + Q_a + \sum P} \quad 3$$

tai virtojen tilojen avulla

$$\eta = \frac{m_{ms} * (h_{ms} - h_{fw}) + m_{rh} * (h_{rh,out} - h_{rh,in}) + m_{bd} * (h_{bd} - h_{fw})}{H_u * m_f + m_f * (h_{f,out} - h_{f,in}) + m_a * (h_{a,out} - h_{a,in}) + \sum P} \quad 4$$

missä

H_u	on polttoaineen lämpöarvo
m_f	on polttoaineen massavirta
Q_f	on polttoaineen esilämmittämiseen käytetty lämpö
Q_a	on ilman esilämmityksen lämpö
$\sum P$	on mekaanisten ja sähköisten tehojen summa
m_{ms}	on päähöyryn massavirta
m_{rh}	on välitulistushöyryn massavirta
m_{bd}	on ulospuhalluksen massavirta
m_a	on ilman massavirta
h_{ms}	on päähöyryn entalpia
h_{fw}	on syöttöveden entalpia
h_{bd}	on ulospuhalluksen entalpia
$h_{rh,out}$	on välitulistushöyryn poistoentalpia
$h_{rh,in}$	on välitulistushöyryn tuloentalpia
$h_{f,out}$	on polttoaineen poisto entalpia
$h_{f,in}$	on polttoaineen tuloentalpia
$h_{a,out}$	on ilman poistoentalpia
$h_{a,in}$	on ilman tuloentalpia

Yllä olevaa hyötysuhdeyhtälöä on yksinkertaistettu. Katsomalla Kuvaa 3-2 huomamme että ainakin seuraavat soodakattilalle tyypilliset virrat on unohdettu

- Hajukaasut
- Metanoli, tärpätti
- Lauhde
- Vuotoilma
- Nuohous
- Monet sähkövirrat

- Savukaasun puhdistuksen virrat
- Apupolttoainevirrat
- LVI -virrat

Voidaan hyvin esittää, että nämä virrat ovat pieniä ja vaikuttavat vain vähän hyötysuhteeseen. Toisaalta on vaikea vetää tämä johtopäätös etukäteen ilman mittaus-
ta. Tämä pienten virtausten mittaustarve on suoran menetelmän suurin ongelma.

Toinen ongelma aiheutuu mittauksiin liittyvästä epävarmuudesta. Koska jokainen massavirta mitataan, niin kokonaisvirhe kasvaa suureksi. Siksi suoraa tapaa käytetään vain harvoin kattiloiden hyötysuhdemittauksissa.

3.7 Hyötysuhteen määrittäminen epäsuoralla tavalla

Soodakattilan hyötysuhde määritetään aina epäsuoralla tavalla. Hyötysuhdeyhtälö voidaan järjestää seuraavaan muotoon

$$\eta = 1 - \frac{Q_{in} - Q_{abs}}{Q_{in}} \quad 5$$

ja jopa edelleen

$$\eta = 1 - \sum \frac{Q_{loss,i}}{Q_{in}} \quad 6$$

missä

$Q_{loss,i}$ on i:s häviötermi

Soodakattilan päähäviöt ovat:

- Savukaasun mukana poistuvasta lämmöstä aiheutuva häviö
- Palamattomasta aiheutuva häviö
- Sulan tuntuva lämpö
- Säteily- ja johtumishäviö

Useimmille häviöille on olemassa kokemusperäinen suuruusluokka, joten ne voidaan arvioida tarkemmin kuin suoraan mittaamalla. Epäsuora menetelmä antaa siksi paremman tarkkuuden kun arvioidaan kattilahyötysuhdetta.

3.7.1 Kattilaan tuotu lämpö ja muu energia

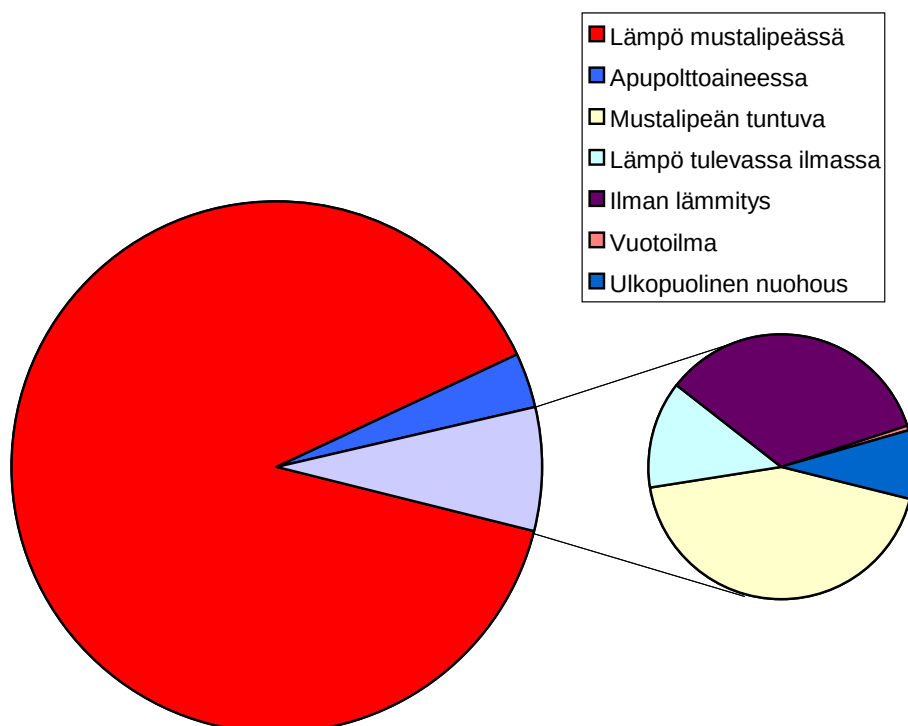
Esimerkki; Laske aikaisemmalle tapaukselle tuotu lämpö ja hyväksi saatu lämpö. Päähöyryn arvot ovat 9,1 MPa(a) ja 490 °C. Syöttöveden arvot ovat 11,0 MPa(a) ja 115 °C. Savukaasu poistuu lämpötilassa 155 °C. Ilman lämpötila puhaltimille on 30 °C ja se esilämmitetään keskimäärin 108,8 °C. Ulospuhallus on 0,050 kg/kgka lieriön paineesta 10,36 MPa(a). Mustalipeän ylempi lämpöarvo HHV on 13,00 MJ/kgka ja se poltetaan 140 °C lämpötilassa. Säteily ja johtumishäviöt ovat 38 kJ/kgka. Palamaton ja muu on 40 kJ/kgka. Valmistajan marginaali on 67 kJ/kgka. Apupolttoaineteho (väkevät hajukaasut) on 577 kJ/kgka.

Polttolipeän mukana syötettävä lämpö

Sisään	massavirta	entalpia	
	kg/kgka	kJ/kg	kJ/kgka
Mustalipeän (HHV)	1,1765	13000,0	13000,0
Vetykorjaus	0,033	-2440/8,937*0,033	-719,6
Mustalipeän (LHV)	1,1765		12280,4
Vesikorjaus	0,1765	-2440*0,1785	-430,6
Mustalipeä polttotilassa	1,1765		11849,8

Tuotava lämpö

Sisään	massavirta	entalpia	
	kg/kgka	kJ/kg	kJ/kgka
Mustalipeän lämpöarvo	1,1765	11849,8	11849,8
Apupolttoaineessa			577,0
Mustalipeän tuntuva	1,1765	140*2,64	434,8
Ilma	4,454	(30-0)*1,0336	131,2
Ilman esilämmitys	4,454	(108,8-30)*1,0336	344,6
Vuotoilma	0,223	(30-0)*1,0336	6,9
Ulkopuolinen nuohous	0,1188	3054,8-2792,0	31,2
Tuotu yhteensä			13375,6



Kuva 3-6, Lämpövirrat sisään esimerkksisoodakattilalle.

Kuten nähdään kuvasta 3-6, suurin osa lämpövirrasta tulee mustalipeän palamisesta vapautuvasta lämmöstä. Muita suuria lähteitä ovat mustalipeän tuntuva ja ilman esilämmitys.

3.7.2 Hyödyksi saatu lämpö

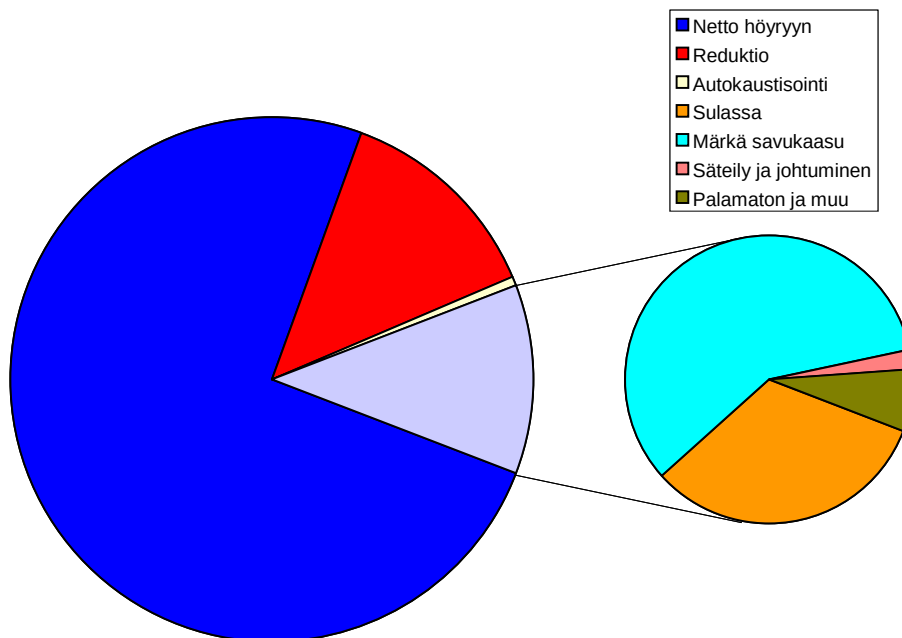
Hyödyksi saatu lämpövirta voidaan laskea, jos ensin lasketaan häviöt yhteensä ja vähennetään tämä tuodusta lämmöstä. Hyödyksi käytetään höyryn kehitykseen käytettävissä oleva lämpö sekä eri yhdisteiden reduktio ja autokaustisointilämmöt. Ainearvoja eri komponenteille löytyy luvusta 4.

Ulos			
Na ₂ S reduktio	0,123	13092	1611,4
K ₂ S reduktio	0,0139	9629	134,4
SO ₂ reduktio	0,000052	5531	0,3
Autokaustisointi Na ₃ BO ₃	0,0473	1535	72,6
Märkä savukaasu	5,309	155*1,107	910,4
Häviö sulan tuntuvana	0,377	0,377*1350	509,0
Säteily ja johtuminen	-	0,283*12846,5	37,9
Palamaton ja muu	-	0,3*12846,5	40,1
Marginaali	-	0,5*12846,5	66,9
Häviöt yhteensä			3382,9

Höyryn kehitykseen käytettävissä oleva lämpö on

$$13375,6 - 3382,9 = 9992,2$$

Kuva 3-7, esittää miten tuotu lämpö poistuu. Suurin osa tuodusta lämmöstä menee höyryn lämmöksi. Reduktioreaktio vie melkein puolet lopusta. Autokaustistus boilerilla vie melko vähän. Varsinaisista häviöistä suurimmat ovat savukaasuhäviö ja sulahäviö.



Kuva 3-7, Tuodun lämmön käyttö esimerkkipöydä

3.7.3 Syöttövesivirran ja höyryvirran laskenta

Höyryn entalpia tilassa 9.1 MPa(a) ja 490 °C on 3360.7 kJ/kg.

Veden entalpia tilassa 11.0 MPa(a) ja 115 °C on 490.3 kJ/kg.

Kylläisen veden entalpia paineessa 10,36 MPa(a) on 1423.3 kJ/kg.

Nuohoushöyryn entalpia lämpötilassa 155 °C on 2792.0 kJ/kg.

Höyryn massavirta x voidaan siten ratkaista yksinkertaisella taseella

$$x \cdot 3360.7 - 0.050 \cdot 1423.3 - (x + 0.050) \cdot 490.3 - 0.000 \cdot 2792.0 = 9992.2$$

Ratkaisemalla saadaan

Höyryn massavirta, x on 3.465 kg/kgka.

Syöttöveden massavirta on $3.465 + 0.050 + 0.000 = 3.565$ kg/kgds.

On huomattava, että ulkopuolista nuohousta käytettäessä taseeseen tulee 0, muussa tapauksessa nuohoushöyryvirta.

3.8 Soodakattilan hyötysuhde

Soodakattilan päätehtävä on lämmön kehitys mustalipeän sisältämästä orgaanisesta aineksesta. Tämän lisäksi se muuntaa mustalipeän kemikaaleja hapettuneesta tilasta redusoituun tilaan. Tämä on kokonaisprosessin kannalta hyödyllistä työtä, ja se vaatii yli 10 % tuodusta lämmöstä. Soodakattilan hyötysuhdetta laskettaessa on tämä työ huomioitava.

$$\eta = 1 - \sum \frac{Q_{\text{loss},i}}{Q_{\text{in}}} + \frac{Q_{\text{dR}}}{Q_{\text{in}}} \quad 7$$

missä

Q_{dR} on reduktiolämmöt yhteensä

Esimerkki; Laske tuodun polttoaineen lämpöön perustuva kokonaishyötysuhde edelliselle esimerkille.

$$\eta_{\text{LHV}} = 1 - \frac{\text{Häviöt}}{\text{Tuotu}} - \frac{\text{Reduktio}}{\text{Tuotu}} = 1 - \frac{3382,9}{13375,6} + \frac{1818,7}{13375,6} = 88.3\% \quad 8$$

Pelkän höyryn kehityksen hyötysuhde

$$\eta_{\text{LHV}2} = \frac{\text{Lämpö höyryyn}}{\text{Tuotu}} = \frac{9992,6}{13375,6} = 74.7\% \quad 9$$

Soodakattilan hyötysuhde vastaakin moderneja biopolttoainekattiloita.

3.9 Kuiva-aineen vaikutus

Viime vuosina on kuiva-aine haihduttamolta noussut. Tässä käydään läpi esimerkin 3000 tka/d soodakattilaa. Vaikka laskenta koskee vain tätä kattilaa, niin tuloksien pitäisi olla samansuuntaisia suurimmalle osalle moderneja soodakattiloita.

Soodakattilan suunnitteluparametrit on esitetty Taulukossa 3-6. Materiaalitase on laskettu matalasta 65 % kuiva-aineesta aina korkeaan 90 % kuiva-aineeseen, Taulukko 3-7. Mustalipeän elementaarianalyysin on oletettu pysyvän vakiona. Vastaa- vasti on energiatase laskettu samoille arvoille, Taulukko 3-8.

Taulukko 3-6, 3000 tka/d soodakattilan pääarvot

Parametri		
Maksimi kapasiteetti	t ka /d	3000
Höyryn paine	bar	90,0
Höyryn lämpötila	°C	490
Syöttöveden paine	bar	110
Syöttöveden lämpötila	°C	115
Primääri-ilma osuus	%	35,0
Primääri-ilma lämpötila	°C	120
Sekundääri-ilma osuus	%	50,0
Sekundääri-ilma lämpötila	°C	120
Tertiääri-ilma osuus	%	15,0
Tertiääri-ilma lämpötila	°C	50
Savukaasun loppulämpötila	°C	155
Mustalipeän analyysi		
C	paino-%	32,5
Na	paino-%	20,5
S	paino-%	6,1
O ₂	paino-%	34,16
H ₂	paino-%	3,3
K	paino-%	3,0
Muut	paino-%	0,35
Lipeän lämpöarvo	MJ/kgka	13,0
Kuiva-aine polttoon	paino-%	60 - 95
Lipeän lämpötila polttoon	°C	140,0
Häviö pölynä	g/kgka	0,2
Reduktio	%	96
Nuohoushöyryvirta	g/kgka	119
Taselämpötila	°C	0

Taulukko 3-7, Materiaalitase mallikattilaille

Kuiva-aine, %	65	70	75	80	85	90
Polttolipeä, kg/s	53,4	49,6	46,3	43,4	40,8	38,6
Ilma, kg/s	149,3	149,8	150,3	150,8	151,3	151,8
Nuohous, kg/s	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Tuhka ja pöly, kg/s	2,1	2,4	2,8	3,1	3,5	3,8
Sula, kg/s	14,1	13,8	13,6	13,3	13,1	12,9
Savukaasu, kg/s	195,1	191,7	188,8	186,3	184,2	182,3

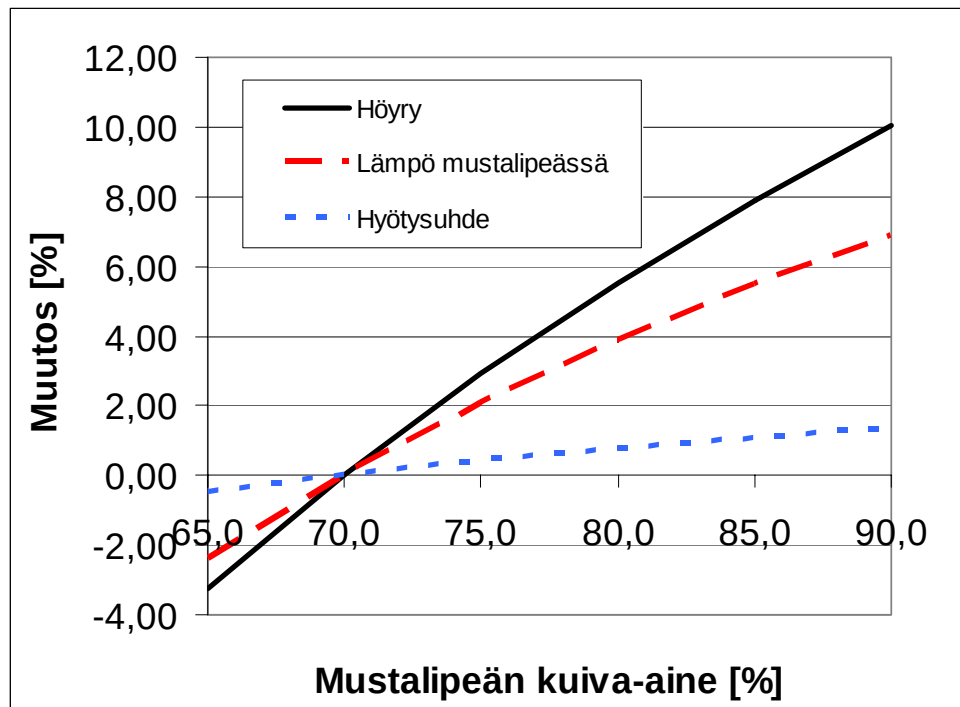
Taulukko 3-8, Energiatase mallikattilalle, kJ/kgka

Kuiva-aine, %	65	70	75	80	85	90
Lämpö mustalipeässä, kJ/kgka	10967	11235	11467	11670	11850	12009
Apupolttoaineessa, kJ/kgka	577	577	577	577	577	577
Mustalipeän tuntuva, kJ/kgka	569	528	493	462	435	411
Lämpö ilmassa, kJ/kgka	476	478	480	481	483	484
Ulkopuolinen nuohous, kJ/kgka	31	31	31	31	31	31
Yhteensä sisään, kJ/kgka	12620	12849	13048	13222	13376	13512
Sulassa, kJ/kgka	547	537	528	518	509	499
Reduktio+autokaustistus, kJ/kgka	2001	1956	1910	1864	1819	1773
Märkä savukaasu, kJ/kgka	965	948	933	921	910	901
Säteily ja johtuminen + palamaton + marginaali, kJ/kgka	137	139	141	143	145	146
Häviöt yhteensä, kJ/kgka	3650	3580	3513	3447	3383	3320
Netto höyryyn, kJ/kgka	8970	9269	9535	9775	9993	10192
Höyryä, kg/kgka	3,093	3,197	3,289	3,373	3,449	3,518
kg/s	107,4	111,0	114,2	117,1	119,8	122,2
Hyötysuhde, %	86,9	87,4	87,7	88,0	88,3	88,5

Materiaalitaseessa ilmavirta ja mustalipeävirta ovat vakioita. Savukaasuvirta pienenee, kun mustalipeän mukana tuleva vesimäärä laskee kuiva-aineen noustessa. Sulan ja tuhkan yhteismäärä pysyy lähes vakiona. Korkeammalla kuiva-aineella alkalimetalleja höyrystyy runsaammin, jolloin tuhkaa muodostuu enemmän ja sulaa vähemmän. Huolimatta siitä, että höyryvirta nousee kuiva-aineen noustessa, on nuohous pidetty vakiona.

Mustalipeässä tuotu efektiivinen lämpö nousee kuiva-aineen noustessa. Tämä johtuu siitä, että kilo kuiva-ainetta tuottaa enemmän lämpöä, kun sitä kohti poltetaan vähemmän vettä.

Savukaasun lämpöhäviö pienenee, kun savukaasun massavirta pienenee. Savukaasuhäviö pienenee, kun vettä savukaasuissa on vähemmän. Höyryn massavirta nousee, kun sekä tuotu lämpö nousee että häviöt pienenevät kuiva-aineen noustessa.



Kuva 3-8, Mustalipeän kuiva-aineen muutoksen vaikutus lämpöön polttoaineessa, höyryn kehitykseen ja hyötysuhteeseen

Höyryn tuotanto nousee merkittävästi kuiva-aineen noustessa. Kuiva-aineen noustessa 70 %:sta 80 %:iin höyryvirtaus nousee 5,5 %. Kuiva-aineen nousu onkin luokkaa 2,5 % kuiva-aineen 5 % nousua kohti.

Höyryn tuotannon hyötysuhde nousee kuiva-aineen noustessa. Kuiva-aineen noustessa 70 %:sta 80 %:iin hyötysuhde nousee 0,8 %.

4 SOODAKATTILAN ERITYISKYSYMYKSET TASEESSA

Käytettäessä eurooppalaista kattiloiden taselaskentastandardia EN 12952-15:2003 "Water-tube boilers ja auxiliary installations - Part 15: Acceptance tests", joudutaan ottamaan kantaa joihinkin soodakattiloille ominaisiin kysymyksiin. Erityisesti keskitytään määrittämään seuraavaa:

- Tapa hajukaasujen (laihojen ja väkevien) käsittelemiselle taseessa
- Tapa liuotinhöngän polton käsittelemiselle taseessa
- Tapa metanolin ja tärpätin käsittelemiselle taseessa
- Tapa käsitellä hakulipeäkattiloita
- Säteily- ja johtumishäviöiden laskenta

4.1 Laihojen hajukaasujen käsitteleminen taseessa

Laihojen hajukaasujen poltto soodakattilassa käsitellään kuten kostea lisäilma, jolle ei muuta ole sovittu. Jotta laihat kaasut olisivat yleensä polttokelpoisia, on niissä olevan rikin määrän oltava pieni. Tällöin kaasut eivät tyypillisesti sisällä polttokelpoista lämpöä. Virhe hyötysuhteessa on pieni, Liite IV.

4.2 Väkevien hajukaasujen käsitteleminen taseessa

Väkevät hajukaasut käsitellään kuten apupolttoaineen poltto pääpolttoaineen yhteydessä. Takuukokeessa voidaan käyttää sopimuksen lämpöarvoa ja analyysiä käyttöolosuhteille korjattuna (vesipitoisuus), tai sen puuttuessa liitteen mallianalyysiä ja lämpöarvoa.

4.3 Liuotinhöngän polton käsitteleminen taseessa

Liuotinhöngän poltto käsitellään kuten laihojen hajukaasujen tuonti kattilaan. Liuotinhöngän lämpöarvoksi voidaan olettaa nolla ja analyysiksi vesihöyryn ja kuivan ilman seos.

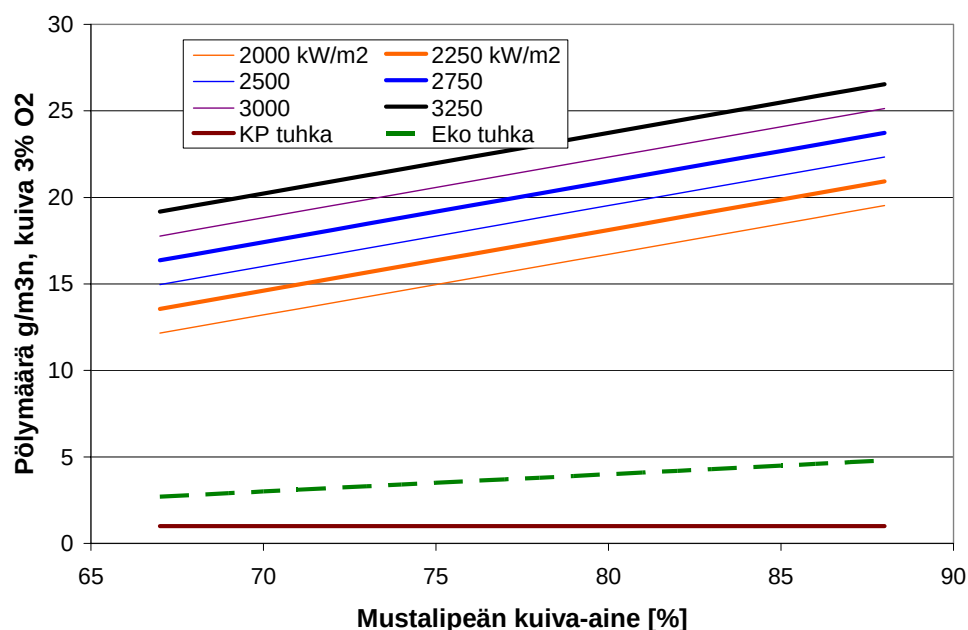
4.4 Metanolin ja tärpätin käsitteleminen taseessa

Metanoli ja tärpätti käsitellään kuten apupolttoaineen poltto pääpolttoaineen yhteydessä. Takuukokeessa voidaan käyttää sopimuksen lämpöarvoa ja analyysiä käyttöolosuhteille korjattuna (vesipitoisuus), tai sen puuttuessa liitteen mallianalyysiä ja lämpöarvoa.

4.5 Hakulipeäkattilan käsitteleminen taseessa

Tuhkan sekoitustavalla mustalipeään ei ole merkitystä taseen kannalta. Taseraja katkeaa sekoitussäiliön kohdalla. Täten sillä, onko kysymyksessä hakulipeäkattila vai perinteinen tuhkan sekoitus, ei tasemielessä ole merkitystä.

Tuhkan määrä kuivassa savukaasussa nousee mustalipeäkuorman ja kuiva-aineen kasvaessa. Kuva 4-1 esittää tuhkavirtoja modernista soodakattilasta.



Kuva 4-1, Kuiva-aineen vaikutus tuhkavirtoihin; KP tuhka alin viiva, EKO tuhka seuraavaksi ylempi viiva, SS tuhka ylimmät viivat eri HHRR(LHV).

Kuvan 4-1 tuhkavirta voidaan esittää seuraavilla yhtälöillä

$$q_{ESP} = 0.3509 \cdot ds - (2800 - HHRR) / 1000 \cdot 5.6158 - 6.865 \pm 3 \quad 10$$

$$q_{ECO} = 0.1 \cdot ds - 4 \pm 2 \quad 11$$

$$q_{BB} = 1 \pm 1 \quad 12$$

missä

q_{ESP}	pölyvirta sähkösuotimeen jaettuna kuivalla savukaasuvirralla 3 % O ₂ , g/m ³ n, kuiva
q_{ECO}	pölyvirta ekonomaiserin tuhkasuppilosta jaettuna kuivalla savukaasuvirralla 3 % O ₂ , g/m ³ n, kuiva
q_{BB}	pölyvirta keittopinnan tuhkasuppilosta jaettuna kuivalla savukaasuvirralla 3 % O ₂ , g/m ³ n, kuiva
ds	polttolipeän kuiva-aine, %
$HHRR$	lämpörasitus, kJ/m ²

$$HHRR = LHV \cdot MCR / A_{bottom} \quad 13$$

missä

LHV	polttolipeän kuiva-aineen alempi lämpöarvo, kJ/kgka
MCR	polttolipeän kuiva-ainevirta, kgka/s
A_{bottom}	soodakattilan pohja-ala, m ²

4.6 Mustalipeän tuntuva lämpö

Ei ole syytä erikseen määrittää mustalipeän tuntuva lämpöä takuukoetta varten. Takuukokeessa voidaan käyttää sopimuksen arvoa käyttöolosuhteille korjattuna (kuiva-aine, lämpötila), tai sen puuttuessa tuntevan lämpöarvon sovitetta mustalipeälle.

4.7 Häviöiden laskenta

Häviöiden laskennassa suositellaan käytettäväksi tämän dokumentin esittämiä ai-neominaisuuksia. Mikäli näistä poiketaan, on asiasta ilmoitettava sopimuksessa.

4.7.1 Savukaasuhäviö

Merkittävin höyrykattilalaitoksen häviöistä on savukaasuhäviö. Savukaasuhäviö riippuu savukaasun lämpötilasta ja virrasta. Mitä korkeampi on ilmakerroin, sitä suurempi on savukaasuhäviö.

Savukaasujen pitäisi poistua mahdollisimman alhaisessa lämpötilassa häviöiden minimoimiseksi. Tavallisesti taloudelliset seikat, laiteratkaisut ja korroosiokysymykset johtavat siihen, että soodakattilan savukaasun loppulämpötila asettuu välille 150 ... 200 °C.

4.7.2 Häviö palamattomana

Soodakattilassa palavat polttoaineet eivät suinkaan pala täydellisesti. Termodyna-miikka rajoittaa polttoprosessia. Täten savukaasuissa on aina jonkin verran CO, H₂ ja muita hiilivetyjä. Häviö palamattomissa kaasuissa on kuitenkin pieni, Liite IV.

Biopolttoaineita poltettaessa hiili ei aina pala täydellisesti. Tämä tarkoittaa, että tuhkassa on aina jonkin verran hiiltä. Savukaasujen tuhkassa oleva palamatonta hiili sekoitetaan tuhkan mukana takaisin polttolipeään, joten tasemielessä se ei aiheuta häviötä. Yleensä lentotuhkan hiilipitoisuus on moderneissa soodakattiloissa pieni.

Soodakattilan sulassa poistuu palamatonta hiiltä. Tämän hiilen sisältämä hukka-lämpö on erittäin pieni, Liite IV.

4.7.3 Häviö sulan lämmössä

Sulahäviön määrittämiseksi sulan virtaus ja entalpia pitää ratkaista.

4.7.3.1 Sulan entalpia

Sulan komponentin (esim. Na₂S) entalpia voidaan esittää seuraavalla yhtälöllä:

$$h_c = h_m + c_p(T_{\text{smelt}} - T_{\text{ref}})$$

missä

h_c	sulan komponentin entalpia, J/kg
h_m	komponentin sulamislämpö, J/kg
c_p	sulan komponentin ominaislämpökapasiteetti, J/kg °C
T_{smelt}	sulan lämpötila, °C
T_{ref}	referenssilämpötila, °C

Sulavirran entalpia on komponenttien entalpiavirtojen summa;

$$H_{\text{SMELT}} = \sum_{i=1}^n m_i h_{c,i}$$

missä

H_{smelt}	sulan entalpia, J
m_i	komponentin i massaosuus, kg
$h_{c,i}$	komponentin i ominaisentalpia, J/kg

Sulan komponenttien sulamislämpöjä ja ominaislämpökapasiteetteja on Taulukossa 4-1.

Taulukko 4-1, Tyypillisten sulan komponenttien sulamislämpöjä, ominaislämpökapasiteetteja ja sulan komponentin entalpia lämpötilassa 850 °C

Yhdiste	h_m kJ/mol	c_p kJ/mol °C	$h_c(850\text{ °C})$ kJ/mol
Na ₂ CO ₃	29.7	0.1586	164.5
Na ₂ S	19.2	0.1164	118.1
Na ₂ SO ₄	23.8	0.1912	186.3
NaCl	28.3	0.0582	77.8
Na ₂ S ₂ O ₃	29.7	0.1332	142.9
K ₂ CO ₃	27.9	0.1596	163.6
K ₂ S	16.2	0.1052	105.6
K ₂ SO ₄	34.4	0.1918	197.4
KCl	14.9	0.0735	77.4
NaBO ₂	33.5	0.1082	125.5
Na ₃ BO ₃	35.5	0.1832	191.2

Muille sulan yhdisteille voidaan käyttää arvoa $h_m = 200$ kJ/kg, $c_p = 0.94$ kJ/kg °C ja $h_l = 1350$ kJ/kg.

4.7.3.2 Muodostumislämpö

Sulakomponentin muodostumislämpö on sen muodostavan reaktion yhdisteiden muodostumislämpöjen summa, Taulukko 4-2.

Taulukko 4-2,
Muodostumislämpöjä tyypillisille soodakattilan sulan yhdisteille

Yhdiste	Moolipaino kg/kmol	Dh _F (25 °C)	
		MJ/kg	kJ/mol
Na ₂ S	78,04	-4,691	-366,1
Na ₂ SO ₃	126,05	-8,687	-1095,0
Na ₂ SO ₄	142,04	-9,769	-1387,6
Na ₂ S ₂ O ₃	158,11	-7,107	-1123,7
Na ₂ CO ₃	105,99	-10,669	-1130,8
NaCl	58,443	-7,036	-411,2
K ₂ S	110,26	-3,416	-376,6
K ₂ SO ₄	174,25	-8,251	-1437,7
K ₂ CO ₃	138,2	-8,323	-1150,2
KCl	74,55	-5,858	-436,7
NaBO ₂	65,8	-14,828	-975,7
Na ₃ BO ₃	127,78	-11,373	-1453,3
H ₂ O _(g)	18,0152	-13,422	-241,8
SO _{2(g)}	64,06	-4,633	-296,8
CO _{2(g)}	44,01	-8,941	-393,5

4.7.3.3 Reduktiolämpö

Käyttämällä taulukon 4-2 muodostumislämpöjä saadaan reduktiolämmöiksi

Taulukko 4-3, **Reduktiolämpöjä tyypillisille sulayhdisteille**

Yhdiste	Dh _R	
	kJ/kg	kJ/mol
Na ₂ S	13092	1021,5
NaCl	0	0
Na ₂ SO ₄	0	0
Na ₂ CO ₃	0	0
Na ₂ SO ₃	2325	292,6
Na ₂ S ₂ O ₃	5787	914,2
K ₂ S	9629	1061,1
KCl	0	0
K ₂ SO ₄	0	0
K ₂ CO ₃	0	0
NaBO ₂	0	0
Na ₃ BO ₃	2033	259,8
SO ₂	5531	353,5

4.7.4 Häviö sähkösuotimen tuhkassa

Tuhkahäviö sähkösuodintuhkan lämmössä on taas niin pieni, että suurikin virhe massavirrassa aiheuttaa vain pienen hyötysuhdevirheen, Liite IV.

Sähkösuodintuhkan voidaan olettaa poistuvan savukaasun lämpötilassa. Tuhkavirta on tyypillisesti luokkaa 10 % mustalipeävirrasta. Tuhkan ominaislämpökapasiteetti c_p on 0,98 kJ/kgK. Tuhkahäviön suuruusluokka on siten 15 kJ/kgka. Oletusarvona tuhkahäviö sisältyy luokkaan muut häviöt.

4.7.5 Säteily- ja johtumishäviöiden laskenta

Lämpöä siirtyy kuumista kattilapinnoista kattilahuoneeseen. Pääsääntöisesti tämä lämpö lämmittää polttoilmaa ennen sen joutumista puhaltimeen. Hyödyksi saadun lämmön osuus ei muuta soodakattilan hyötysuhdetta, mutta muuttaa tarvittavaa esilämmitysenergiaa. Säteily- ja johtumishäviöt ovat kattilan kuormasta riippumattomia.

Säteily- ja johtumishäviöitä soodakattilasta on vaikeaa mitata. Kattilaa ympäröivään ilmatilaan vaikuttaa lukuisa määrä virtoja. Tyypillisesti säteily- ja johtumishäviöitä voidaan arvioida yhtälön 16 mukaisesti. Kerroin 0.0257 on hiili- (0.022) ja ruskohiili- (0.0315) kattiloiden arvojen välillä. Yhtälö on esitetty yhdessä vastaavan Tappi häviöfunktion kanssa (Performance, 1996) Kuvassa 4-2.

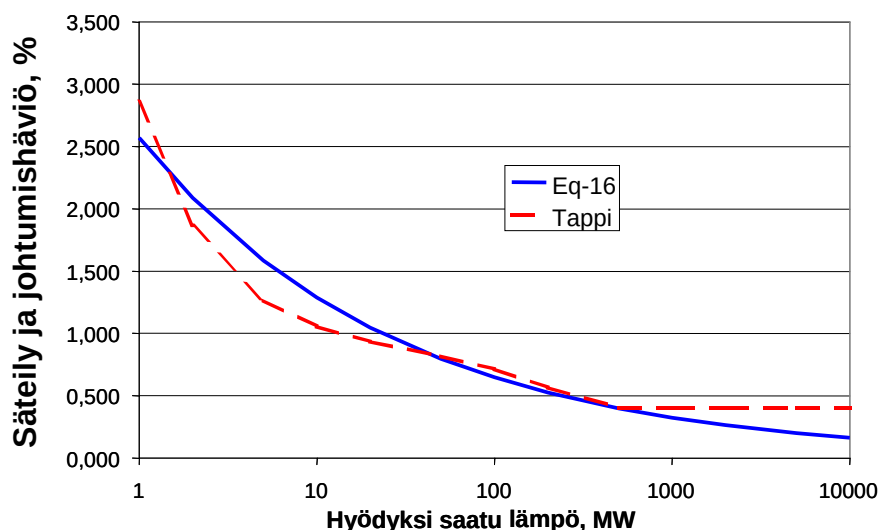
$$\Phi_{RC} = 0.0257 * \Phi_s^{0.7}$$

16

missä

Φ_{RC} on säteily ja johtumishäviö, MW

Φ_s on hyödyksi saatu lämpö nimelliskuormalla, MW



Kuva 4-2, Säteily ja johtumishäviöitä; yhtälö 16 ja Tappi

Suurin osa häviölämmöstä on putkistosta (50 %). Kanavat ja säiliöt vastaavat vain pienestä osasta häviöitä (10 %). Tulipesä vastaa noin neljänneksestä (22 %). Melkein yhtä suuri osa häviöistä on sähkölaitteista (18 %) (Ahtila, 1997).

Eri tavalla laskettuja ja mitattuja häviöitä on vertailtu Taulukossa 4-4. On huomattava että Tappi-häviöfunktioita ei voida käyttää kattiloille, joiden koko ylittää 3500 tka/24h.

Taulukko 4-4,
Laskennalliset häviöt (yhtälö 16, Tappi) verrattuna mitattuihin
lämpöhäviöihin suomalaisissa kattiloissa (Ahtiala, 1997)

Kattila	Koko	Häviö, Yhtälö 12	Tappi	Mitattu
	tka/d	kJ/kgka	kJ/kgka	kW
Sunila SK11	1000	63.3	72.9	870
Kaukopää, SK6	3000	45.6	44.6	1590
Rauma, SK3	3200	44.7	43.3	1600
Kaukas, SK3	3350	44.1	42.6	2000

4.8 Mustalipeän lämpöarvo ja analyysi

Jollei muuta sovita, mustalipeän takuukokeen aikainen lämpöarvo ja analyysi määritellään hyväksytyssä laboratoriossa. Mustalipeän happipitoisuus voidaan määritellä analyysin kokonaisvirheen selvittämiseksi.

Mustalipeän ylempi ja alempi lämpöarvo kuivassa polttoaineessa voidaan muuntaa tunnetulla kaavalla

$$LHV = HHV - 2.443 * (M_{H_2O} / M_{H_2}) * H \quad 17$$

missä

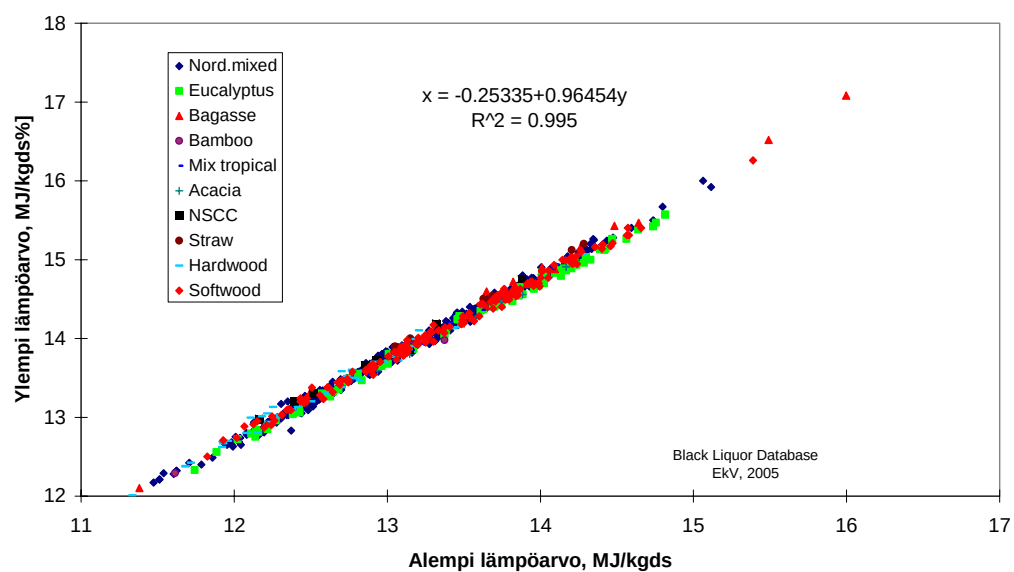
H on vedyn massaosuus kuivassa mustalipeässä, -

M_i on i:n moolipaino, kg/kmol

Mustalipeän vetypitoisuuden ja hiilipitoisuuden suhde on lähes vakio, ja mustalipeän ylempi lämpöarvo on hiilipitoisuuden funktio. Siksi erittäin hyvällä tarkkuudella voidaan mustalipeän alempi lämpöarvo esittää ylemmän korrelaationa

$$LHV = 0.96454 * HHV - 0.25335 \pm 0.05 \quad 18$$

Tyypillisesti on kuivan mustalipeän alempi lämpöarvo noin 0.7 MJ/kgka pienempi kuin sen ylempi lämpöarvo. On huomattava että yleensä lämpöarvon analyysitarkkuus on 0.1 MJ/kgka. Yhtälön 18 esittämä korrelaatio pätee hyvin kaikentyyppisille mustalipeille, Kuva 4-3.



Kuva 4-3, Mustalipeän ylempi lämpöarvo alemman funktiona

5 TAKUUKOE OHJEET

Soodakattilan materiaali- ja energiataseen määrittämisessä takuukokeissa on huomioitava

- Takuiden toteamisen perusteet
- Taattavat suureet
- Takuukokeen aikainen tila
- Vakiotilan saavuttaminen
- Takuukokeen suoritus
- Mitä näytteitä otetaan, kuinka usein ja mistä
- Reduktion määrittäminen; laihaliipeäanalyysi/analyysi viherliipeästä, kokonaisrikki

5.1 Takuiden toteamisen perusteet

Jollei muuta ole sovittu, kaikki takuut koskevat kattilan toimimista vakiokuormalla. Sopimuksessa pitää eritellä mitkä takuut ovat absoluuttitakuuta ja mitä takuu arvoja pitää redusoida takuukokeen olosuhteisiin perustuen. Tyypillisesti esimerkiksi ilmapäästöt ovat absoluuttitakuuta.

Usein takuuarvoille on asetettu reunaehtoja, kuten virtauksen tila toimitusrajalta. Tällöin takuuarvot muuttuvat reunaehtojen muuttuessa.

Seuraavat asiat pitää aina ottaa huomioon taattavia arvoja määriteltäessä:

- Polttoaineen ominaisuudet (analyysi, lämpöarvo (LHV), tuhkaominaisuudet) ja puulaji.
- Syöttöveden ja ruiskutusveden ominaisuudet (paine, lämpötila);
- Välitulistushöyryn paine, lämpötila ja massavirta;
- Ilman lämpötila.

Nämä aineominaisuudet kannattaa määritellä vain taserajalla.

Reunaehtojen muutokset pitää huomioida korjauksina taattavaan suureeseen. Korjaus lasketaan teollisuudessa tavanomaisesti käytetyllä tavalla.

Jollei muuta ole sovittu, niin analyysimenetelminä käytetään luvun 2 analyysimenetelmiä.

Tyypillisesti on olemassa joukko mitättömämpiä reunaehtoja, joiden arvo poikkeaa sopimuksessa määrittelystä. Näitä muutoksia ei tarvitse huomioida korjauksina takuukokeissa taattaviin suureisiin. Tällaisia reunaehtoja ovat esimerkiksi

- Ilman paine ja kosteus
- Apulaitteiden lämmityshöyryjen paineet
- Paineilman paine
- Kylmän, kuumen ja lämpimän veden lämpötila

5.2 Taattavat suureet

Soodakattilan takuukokeet suoritetaan, jotta voidaan määrittää taattavat suureet.

Seuraavat ovat pääparametreja:

- Jatkuva kapasiteetti (MCR); pääsääntöisesti tämä suure pitäisi ilmoittaa tonneina tuhkallista lipeää polttoon päivässä, vaihtoehtoisesti tämä voidaan esittää kiloina päähöyryn virtausta sekunnissa.
- Päähöyryn paine ja lämpötila
- Reduktioaste ja autokaustisoinnin ollessa kysymyksessä autokaustisointiaste
- Hyötysuhde tai häviöt, tai savukaasun loppulämpötila

Seuraavat parametrit ovat myös usein takuun kohteena:

- Hyötysuhde tai höyryntuotanto tietyllä polttoaineella, polttoainesekoituksilla ja osakuormalla;
- Höyryn arvot/ruiskutusvesivirta tietyllä polttoaineella, polttoainesekoituksilla ja osakuormalla;
- Painehäviö tulistimien ja välitulistimien yli;
- Polttoilman ja savukaasun painehäviöt;
- Happipitoisuus tai ilmakerroin tietyllä polttoaineella ja osakuormalla;
- Nuohoushöyryn käyttö;
- Apuenergian käyttö;
- Palamattomat savukaasuissa;
- Savukaasuemissiot.

5.2.1 Muuten selvitettävät suureet

Takuukokeessa ei tyypillisesti voida selvittää sellaisia takuita, jotka koskevat pitkää ajanjaksoa

- Kattilan aukipysyvyys
- Apulaitteiden käytettävyys.

Näiden suureiden takuun toteamisesta on sovittava erikseen.

5.2.2 Lisämittaukset

Soodakattilan takuukokeeseen kuuluu joskus lisämittausten käyttö kattilan toiminnan arvioimiseksi:

- Veden ja höyryn paine ja lämpötila eri kohdissa (ekonomaiserin keitto, tulistus);
- Palaminen (keon stabiilius)
- Ilman paine, lämpötila ja nopeus (virtausmäärä) eri pisteissä ilmakehässä (poltton symmetria ja stabiilisuus);
- Savukaasun koostumus, paine, lämpötila ja nopeus (massavirta) eri pisteissä savukaasukanavissa.

Tehtävistä lisämittauksista sovitaan erikseen sopimuksen yhteydessä.

5.2.3 Höyrykattilan osien toimitus monelta toimittajalta

Jos höyrykattilalaitoksen osia on toimitannut yhtä useampi toimittaja, on mahdollista, että joudutaan tekemään lisämittauksia ja –taseita, jotta kaikkien osakokonaisuuksien toimittajien takuitten täyttyminen voidaan todeta.

5.3 Takuukokeen aikainen tila

Takuukoetta suoritettaessa on kokeen aikaiset käyttöarvot huolellisesti merkittävä ylös. Samoin on suositeltavaa merkitä ylös takuukokeen aikaisten arvojen ja kokeita edeltävän ajanjakson arvojen merkittävät erot.

5.3.1 Nuohoushöyryn ja muiden puhdistustapojen käyttö

Soodakattila pitää suunnitella siten, että takuuarvot saavutetaan kattilan ollessa normaalisti likaantunut. Normaali likaisuus saavutetaan, kun kattilaa on käytetty muutama viikko vesipesun jälkeen. Kattilan likaisuus todetaan ennen takuukokeen alkua. Jos soodakattilan mukana on toimitettu nuohouslaitteita (höyrynuohoimia, kuulanuohoimia), on niitä käytettävä jatkuvasti kattilan puhdistamiseksi ennen takuukoetta.

Takuukoetta edeltävänä aikana on kattilaa nuohottava saman ohjelman mukaan kuin takuukokeen aikana. Nuohoushöyryn käytöllä pyritään pitämään kattilan pitkäaikainen likaantuminen minimissä, joten takuuarvolla tarkoitetaan vähintään kuukausittaista keskimulutusta. On huomattava, että nuohoushöyryn käyttö ei juuri riipu kattilakuormasta.

5.3.2 Yleiset ehdot

Kaikkien kohdassa 5.1 mainittujen parametrien ja reunaehtojen oikeellisuus ennen takuukoetta tulee käydä läpi. Kokeet tulee suorittaa siten, että virtaukset ja niiden arvot ovat mahdollisimman lähellä sopimukseen merkittyjä arvoja. Jos koetta ei voida suorittaa niin, että toimitaan ennalta määrätyillä ajoarvoilla, kokeet voidaan, mikäli niin ennalta sovitaan, ajaa muillakin ajoarvoilla. Poikkeamat on kuitenkin pyrittävä pitämään minimissä. Mikäli arvot poikkeavat sopimuseroista, pitää tämä poikkeama huomioida takuissa.

5.3.3 Esikoeajot

Ennen varsinaista takuukoetta toimittajalle pitää antaa mahdollisuus tehdä laitoksella esikoeajot. Tällöin tarkastetaan käytettävien mittalaitteiden tarkkuus ja koulutetaan henkilökunta takuukokeen aikana tarvittaviin tehtäviin (mm. näytteenotto).

On suositeltavaa, että esitakuukokeiden aikaiset ajoarvot kirjataan ylös. Jos esitakuukoe-arvot ovat sinällään hyväksyttäviä, voidaan esitakuukokeen sopia olleen varsinainen takuukoe. Tämä vaatii kuitenkin kaikkien sopijaosapuolien hyväksyntää.



5.4 Vakioajotilanne

Takuut koskevat yksiselitteisesti vain vakioajotilannetta. Jos kattila toimii voimakkaassa muutostilanteessa, ei takuukokeen luotettava suoritus ole mahdollista.

5.4.1 Vakiotilanteen saavutus

Koska takuuarvot koskevat vakiotilannetta, on ennen takuukokeen alkua varmistettava vakiotilanteen olemassaolo. Vakiotilanteen saavuttamiseen menevä aika vaihtelee voimakkaasti toimittajasta riippuen. Normaalisti oletetaan, että soodakattila on ollut jatkuvassa ajossa useita päiviä ennen takuukoetta. Ennen takuukoetta on myös pyrittävä ajamaan takuukuormaa vastaavaa höyryvirtaa takuukoetta vastaava aika. Vakiotilanne todetaan kaikkien osapuolten toimesta ennen takuukokeen alkua.

5.4.2 Vakioajon valvonta

Takuukokeen aikana kaikki merkittävät ajoarvot kirjataan ylös. Suositellaan, että polttoaine- ja höyryvirtojen paineista, lämpötiloista ja massavirroista otetaan tunti-keskiarvojen lisäksi minuuttitrendit. Arvoja käytetään jo takuukokeen aikana toteamaan vakioajo.

5.4.3 Polton viritys

Tyypillisesti toimittaja virittää kattilaa ennen takuukoetta. Tällöin on huolehdittava siitä, että polttoainevirtojen ominaisuudet mahdollisimman hyvin vastaavat takuukokeen aikaista tilannetta.

5.5 Takuukoe

5.5.1 Takuukokeen pituus

Takuukokeen pituuden on oltava vakiotilanteen saavuttamisen toteamiseen riittävä aika. Koska soodakattilan takuukoe sisältää useita mittauksia ja näytteenottoja joihin liittyy virhemarginaali, suositellaan, että takuukokeen yhden kuorman minimi ajoaika olisi kuusi tuntia.

5.5.2 Vaatimukset kokeen alulle ja lopulle

Takuukokeen alku ja loppuhetkillä seuraavat suureet on pyrittävä saamaan niin lähelle toistaan kuin mahdollista:

- Lieriön veden pinta ja höyryn paine;
- Höyryn ja syöttöveden virtaus
- Mahdollisuuksien mukaan ilman jako ja lämpötilat
- Mahdollisuuksien mukaan näköhavaintoon perustuen keon muoto
- Savukaasun happipitoisuus.

Soodakattilalle on tärkeää, että sulakeossa oleva ainemäärä on mahdollisimman sama ennen ja jälkeen takuukokeen.

Mitattava aika on pitempi kuin takuukokeeseen käytettävä aika. Suositellaan, että yllämainitut arvot merkitään muistiin jo ennen takuukoetta sekä sen jälkeen vakio-tilan varmistamiseksi.

5.5.3 Arvojen luentataajuus

Mittausarvot tulee merkitä muistiin mahdollisimman usein, jotta keskiarvosta tulee luotettava. Pääsääntöisesti käytetään automaatiojärjestelmään talletettuja arvoja. Jos arvoja joudutaan merkitsemään ylös käsin, ainakin seuraava mittausarvojen merkintätaajuus on suositeltava:

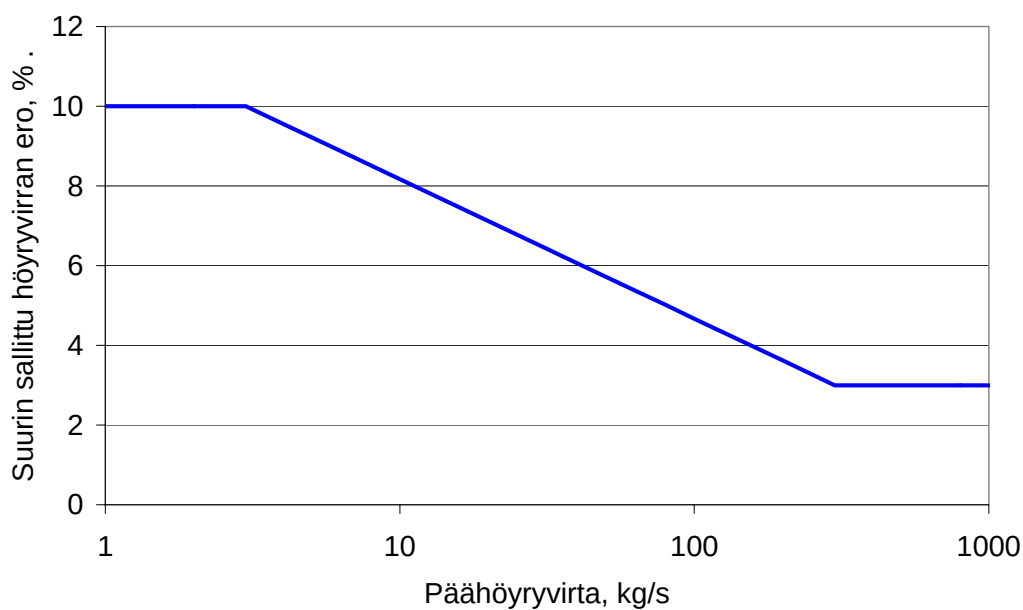
- Virtausmittarit 3 minuutin välein
- Savukaasuanalyysit 5 minuutin välein
- Paine- ja lämpötilamittaukset 10 minuutin välein
- Näytteet 120 minuutin välein

Mittausarvoista muodostetaan tuntikeskiarvot kaikille takuukokeen tunneille ja kahdelle takuukoetta edeltävälle sekä kahdelle takuukoetta seuraavalle tunnille.

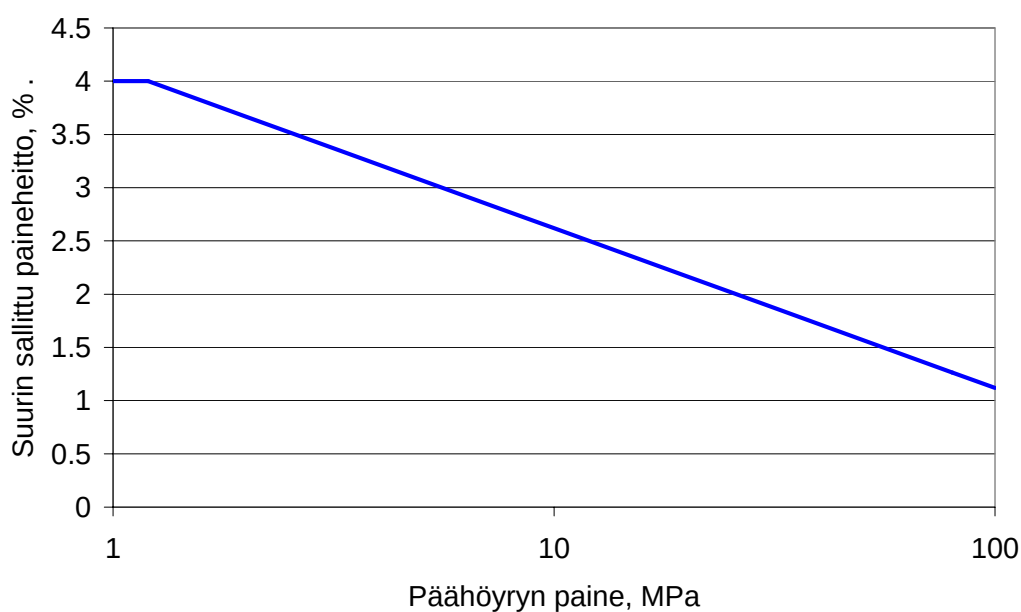
5.5.4 Sallitut poikkeamat

Takuukokeen aikana ei kattilan tuottaman kokonaishöyryn massavirta saa poiketa enempää kuin 3...10 % takuukokeen aikaisesta keskimääräisestä kokonaishöyryvirrasta. Jos nuohoushöyry otetaan kattilasta (nuohoushöyry ei tule kattilan ulkopuolelta), lasketaan nuohoushöyry mukaan kattilan kokonaishöyryvirtaan. Graafisesti tämä on esitetty kuvassa Kuva 5-1 (EN 12952-15:2003). Vastaavasti Kuva 5-2 esittää suurinta sallittua painevaihtelua (EN 12952-15:2003). Savukaasun lämpötilan pitää myös olla vakio-tilassa. Lämpötilaeron vaihtelun savukaasun loppulämpötilan ja syöttöveden lämpötilan välillä on pysyttävä alle ± 3 %.

Jollei sopimuksessa ole muuta määrätty, mustalipeän voidaan katsoa olevan takuiden ajoon sopivaa, jos sen lämpöarvo ei poikkea enempää kuin 0.8 MJ/kgka takuun mukaisesta lämpöarvosta, ja sen kuiva-aine ei poikkea enempää kuin 3 prosenttiyksikköä takuun mukaisesta kuiva-aineesta. Poikkeamat on huomioitava takuiden redusoinnissa. Jos takuun mukaista lipeää ei ole kyetty toimittamaan, ei takuukoetta voida hyväksyä.



Kuva 5-1, Suurin sallittu höyryvirran poikkeama takuukokeen aikana(EN 12952-15:2003)



Kuva 5-2, Suurin sallittu päähöyryn paineen poikkeama takuukokeen aikana(EN 12952-15:2003)

Jos Kuvien 5-1 ja 5-2 mukaiset raja-arvot ylitetään, koe voidaan joutua hylkäämään.

5.6 Koesuunnitelma

Koesuunnitelma voi olla esimerkiksi seuraavanlainen:

		TAKUUKOESUUNNITELMA
Maanantai	8 - 12	Aloituskokous koesuunnitelman läpikäynti, koekuormien sopiminen, näytteenotosta sopiminen, mittaussuunnitelma
	12 - 16	Mittaustarkkuuden toteaminen emissiomittauspaikkojen ja näyttämien tarkistus, lämpötilojen ja virtausten mittauspaikat ja näyttämien tarkistus mahdollisten lisämittausten asennus
	22	100 % kuorma alkaa viritys
Tiistai	9 – 15	100 % kuorma kattilan kokeet nimelliskuormalla, emission mittaukset, ajoarvojen kirjaus, näytteiden otto lipeästä, sulasta ja tuhkasta
	22	60 % kuorma alkaa viritys
Keskiviikko	9 – 15	60% kuorma kattilan kokeet minimikuormalla, emission mittaukset, ajoarvojen kirjaus, näytteiden otto lipeästä, sulasta ja tuhkasta
	22	70 % kuorma alkaa viritys
Torstai	9 – 15	70 % kuorma kattilan kokeet, emission mittaukset, ajoarvojen kirjaus, näytteiden otto lipeästä, sulasta ja tuhkasta
Perjantai	8 – 17	Varapäivä Käytetään jos jonkin kuorman ajo ei ollut mahdollista varsinaisena koepäivänä
	9 - 11	Päätöskokous Takuukokeen päätös, sovitaan tulosten jatkotarkastelun aikataulu

5.7 Näytteenotto

Takuukokeen aikana on tarvittavista virroista tehtävä näytteenotto. Tarkoitus on saada käyttöön oikeat aineominaisuudet ja koostumukset. Tavallisesti otetaan kahdet rinnakkaiset näytteet, joista toista käytetään analyysiin ja toinen varastoidaan siltä varalta, että ensimmäisen näytteen kanssa esiintyy ongelmia.

Tyypillisille näytteidenotoille on esitetty näytteenottoväli. On mahdollista tehdä näytteenottoa tiheämminkin, mutta tavallisesti tämä ei paranna tarkkuutta, mutta lisää analyysikustannuksia.

5.7.1 Polttoliipeä

Polttoliipeän näytteenotto voidaan tehdä useasta paikasta

- Lipeävirtauksesta suuttimille
- Lipeävirtauksesta vahvalipeäsäiliöltä
- Lipeävirtauksesta polttoliipeäsäiliöltä

Polttoliipeän näytteenottokota valitaan mahdollisimman edustavaksi. Viive näytteenottokohdan ja lipeäsuuttimien välillä ei saa olla yli 15 minuuttia

Korkeakuiva-aineinen lipeä paisuu, joten lipeän näytteenottojäähdyttimen käyttö on suotavaa. Jos jäähdytintä ei käytetä, on mitattavaan kuiva-aineeseen käytettävä korjausta. Korkeakuiva-aineinen lipeä on kuumaa, joten näytteenottoastian on kestävä korkea lämpötilaa.

Näytteenotto on suoritettava siten, että eri näytteet otetaan tiheämmin kuin neljän tunnin välein. Tyypillisesti mustaliipeänäytteet otetaan

- Koejakson alussa
- Koejakson aikana noin kahden tunnin välein
- Koejakson lopussa

Mustaliipeän elementaarianalyysi tehdään tyypillisesti vain yhdestä koontinäytteestä. Koontinäytteeseen sekoitetaan sama määrä mustaliipeää jokaiselta näytteenottohetkeltä. Kuiva-aine määritellään tyypillisesti jokaisesta näytteestä erikseen. Polttoliipeän lämpöarvo tehdään jakamalla näytteet ainakin kahteen yhtä pitkää ajanjaksoa edustavaan kokoomänäytteeseen ja analysoimalla ne. Jos mustaliipeän ominaisuudet vaihtelevat koejaksolla paljon, on analyysijä suoritettava enemmän.

Mustaliipeän typpipitoisuuden analysointiin suositellaan Kjeldahl-analyysiä. Mustaliipeän typpipitoisuuden analysointi LECO-analyysaattorilla ei anna luotettavaa tulosta. Natriumanalyysin suorittamisessa on noudatettava erityistä huolellisuutta.

5.7.2 Tuhkavirtaus

Tuhkavirtauksen määrittämiseksi suositellaan, että sähkösuotimelle menevän kaasuvirran tuhkapitoisuus määritellään, ja käytetään koejaksoa edustavan materiaalitaseen savukaasumäärää sähkösuotimille menevän tuhkavirtauksen määrittämiseksi. Keittopinnan tuhkavirtaus ja ekonomaiserin tuhkavirtaus voidaan arvioida luvun 4.5 avulla. Kokonaistuhkavirta on siten sähkösuodintuhkavirran, keittopintatuhkavirran ja ekonomaiserituhkavirran summa.

Vaihtoehtoinen tapa ratkaista tuhkavirta on määrittää tuhkan rikkipitoisuus ja määrittää sekoitussäiliölle rikkitase tuhka- ja lipeävirtausten sekä niiden rikkipitoisuuksien avulla. Mustaliipeänäytteet täytyy ottaa kahdesta virrasta

- Mustaliipeä tuhkan sekoitukseen
- Mustaliipeä tuhkan sekoituksesta

Näytteenotto tehdään tyypillisesti mustalipeän sekoitukseen vievien ja poistuvien linjojen pumpuilta. Viive näytteenottokohdan ja lipeäsuuttimien välillä ei saa olla yli 15 minuuttia

Jos näytteenotto tehdään korkeakuiva-aineisesta lipeästä (>65 %) se paisuu, joten lipeän näytteenottojäähdyttimen käyttö on suotavaa. Jos jäähdytintä ei käytetä, on mitattavaan kuiva-aineeseen käytettävä korjausta. Lipeä on kuumaa, joten näytteenottoastian on kestettävä korkeaa lämpötilaa.

Tuhkamäärän laskemiseksi näytejaksot tuhkan sekoitukseen ja tuhkan sekoituksesta jaetaan suunnilleen yhtä pitkiin osiin. Analyysit tehdään erikseen kaikista neljästä kokoomanäytteestä. Suositellaan, että kustakin näytteestä analysoidaan kuiva-aine ja rikkipitoisuus. Tuhkavirta voidaan määrittää laskemalla rikkivirtauksen kasvu mustalipeävirrassa. Kuiva-ainetta käytetään näytteen edustavuuden tarkistamiseksi.

5.7.3 Tuhkanäytteet

Tuhkanäytteitä otetaan tuhkamäärän laskemiseksi sekä K ja Cl tason määrittämiseksi tuhkassa. Koska tuhkaa kerätään useasta eri lähteestä, on jokaisesta otettava näyte. Tyypillisesti tuhkanäyte otetaan

- Sähkösuodintuhkan kuljettimilta
- Keittopinnan tuhkasuppilon kuljettimelta
- Ekonomaiserien tuhkasuppilon kuljettimelta

Usein vaaditaan monen näytteen ottoa ja niiden yhdistämistä, jotta saadaan aikaan edustava näyte. Esimerkiksi voidaan joutua ottamaan näyte jokaiselta ekonomaisereilta tulevasta tuhkasta erikseen, ja sitten tekemään niistä kokoomanäyte. Vastaavasti voidaan joutua tekemään sähkösuodintuhkan kanssa, jos eri kammioista tulevat tuhkavirrat johdetaan erikseen sekoitussäiliölle.

Tuhkanäytteet otetaan tyypillisesti kahden tunnin välein. Kahden peräkkäisen näytteen välillä ei pitäisi kulua enempää kuin kolme tuntia, mutta vähintään tunti. Tyypillisesti tuhkanäytteitä otetaan

- Koejakson alussa
- Koejakson aikana noin kahden tunnin välein
- Koejakson lopussa

Suositellaan että kustakin virrasta tehdään oma yhdistelmänäyte ja analysoidaan siitä Na, K, Cl, CO₃ ja SO₄ (tai kokonais S). Jos käytetään boraatti autokaustistusta, niin suositellaan myös B analysointia.

Kun määritellään rikkipitoisuutta tuhkavirrassa tuhkamäärän laskemiseksi, jokainen virta jaetaan yhtä pitkää jaksoa edustavaan kokoomanäytteeseen. Jokaisesta analysoidaan kokonaisrikki. Virran rikkipitoisuutta vastaa analyysien keskiarvo. Tuhkan rikkipitoisuus on siten massavirtauksilla painotettu rikkipitoisuus sekoitussäiliöön. Jos jotain massavirtaa ei ole mitattu, voidaan sen arvona käyttää luvussa 4.5 esitettyä arvoa.

5.7.4 Sulanäytteet

Sulasta otetaan näytteitä reduktion määrittämiseksi. Reduktioaste määritetään kaikista sulavirroista liuotinsäiliöön.

Reduktiot sulasta otetaan tyypillisesti kahden tunnin välein. Kahden peräkkäisen näytteen välillä ei pitäisi kulua enempää kuin kolme tuntia, mutta vähintään tunti. Tyypillisesti reduktionäytteitä otetaan

- Koejakson alussa
- Koejakson aikana noin kahden tunnin välein
- Koejakson lopussa

Taattava reduktio on onnistuneiden näytteiden keskiarvo, kun niistä on ainakin 10 % korkeimmista ja 10 % matalimmista arvoista poistettu.

5.7.5 Vesi- ja höyrynäytteet

Vesi- ja höyrynäytteitä tarvitaan kaasun poiston toiminnan selvittämiseksi ja pisanerotuksen toiminnan selvittämiseksi.

Vesi- ja höyrynäytteet otetaan käyttäen olemassa olevia näyteasemia.

Tavallisesti analyysieihin riittää kaksi vähintään kahden tunnin välein otettua näytettä.

5.7.6 Emissiomittaukset

Emissiomittaukset on suositeltavaa tehdä tehtaan omilla jatkuvatoimisilla mittalaitteilla. Ulkopuolisia mittausspalveluja voi käyttää tehtaan mittalaitteiden kalibrointiin.

Savukaasun sisältämän tuhkapitoisuuden mittaus tehdään omilla jatkuvatoimisella mittalaitteella on vaikeaa. Savukaasun tuhkapitoisuuden määrittäminen tulisi suorittaa hyväksytyillä menetelmillä käyttäen luotettavaa ulkopuolista mittausspalvelua.

5.8 Reduktion määrittäminen

Sulan tärkein ominaisuus on sen reduktio. Reduktio esitetään tyypillisesti sulfidin (-S) moolisuhteena sulfidin ja sulfaatin (-SO₄) summaan,

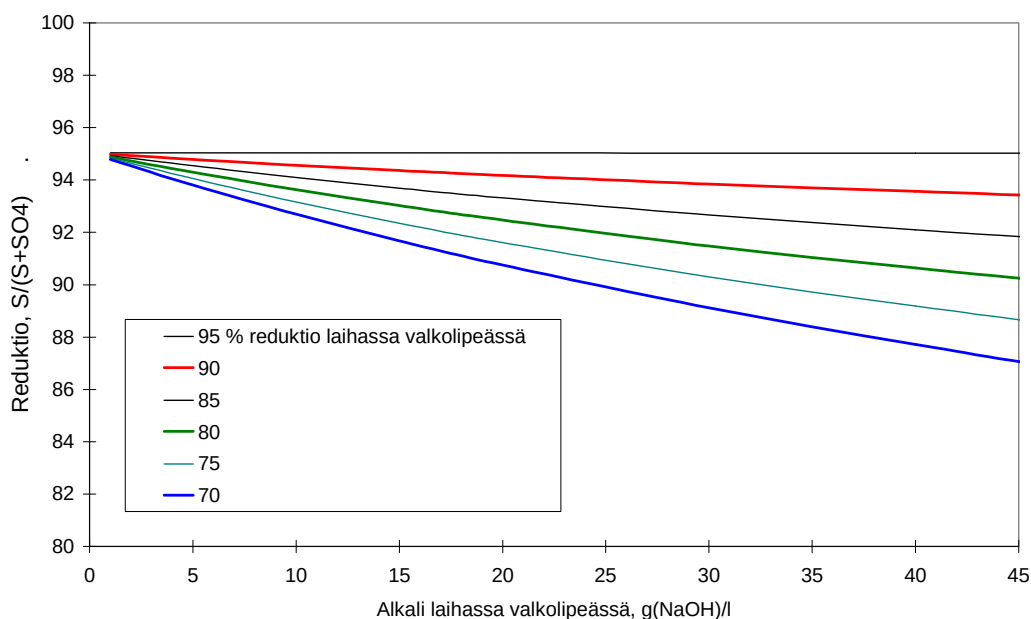
$$\text{Reduktio} = \frac{-S}{-S + -SO_4}$$

19

Mitä korkeampi reduktioaste on, sitä vähemmän hyödytöntä alkalia lisätään keittoon. Hyvin toimivissa soodakattiloissa päästään reduktioasteisiin 95...98 %. Yleensä reduktio paranee, kun keon lämpötila nousee. Termodynaamisista tasapainolaskelmista tiedämme, että sula sisältää erittäin vähän natriumoksidaa ja tiosulfaattia.

Sulan näytteenotto suositellaan tehtävän suosituksen ”ETY-soodakattila valiokunta, Suositus sulan ja viherlipeän reduktioasteen määrittämiseksi” VK-15 394V-02 mukaan. Tätä menetelmää voidaan käyttää, jos reduktio analysoidaan tehtaalla.

Jos reduktion määrittäminen tehdään ulkopuolisen laboratorion toimesta, suositellaan, että näytteenotto tehdään lasiputkimenetelmää käyttäen.



Kuva 5-3, Laihan valkoliipeän koostumuksen vaikutus reduktioon viherlipeässä, reduktio sulassa on 95 %, sulfiditeetti 35 %

Usein tehtaat määrittävät reduktion viherlipeästä. Laihan valkoliipeän sisältämä alkali johtaa sulan reduktiota pienempiin arvoihin, Kuva 5-3. Usein moderneissa tehtaissa reduktio viherlipeässä on 2...3 prosenttiyksikköä alhaisempi kuin sulassa.

Reduktio voidaan määrittellä myös sulfidin suhteena kokonaisrikkiin

$$Reduktio = \frac{-S}{S_{tot}}$$

20

Kahden eri menetelmän mukaan määritellyt reduktioasteet eivät vastaa toisiaan. Ei ole epätavallista, että tulos eroaa kaksikin prosenttiyksikköä. Mitattua reduktioastetta ei voida luotettavasti muuttaa yhden menetelmän lukuarvosta toisen menetelmän mukaiseksi.

6

VIRHETARKASTELU

Käytettyjen mittalaitteitten ja analyysimenetelmien virhe vaikuttaa aina takuukokeen tulokseen. Pääsääntöisesti kaikki käytettävät mittalaitteet on kalibroitava ennen takuukoetta. Jollei yksittäiselle mittalaitteelle suoriteta sen mittauksen virhetarkastelua, voidaan virheen takuukokeessa olettaa olevan Taulukon 6-1 mukainen.

Taulukko 6-1, Mittauksen aiheuttama vähimmäisvirhe takuukokeessa

Mittaussuure	Virhe		Hyötysuhde
	%	Yksikkö	%
Lämpötila nokalla (pyrometri)	±5	±50 °C	-
Lämpötila ennen kp (kalibroitu anturi)	±5	±30 °C	-
Lämpötila ennen kp (verkkomittaus, kalibroitu anturi)	±2	±12 °C	-
Lämpötila ekon jälkeen (kalibroitu anturi)	±2	±3 °C	0.2
Lämpötila ekon jälkeen (verkkomittaus, kalibroitu anturi)	±0.5	±1 °C	0.05
Ilman lämpötila (kalibroitu anturi)	±0.5	±0.2 °C	0.00
Lämpöarvo mustalipeä (KCL)	±0.6	±0.1 MJ/kgka	1.0
Mustalipeä hiili (LECO)	±1.4	±0.5 %-yks	0.05
Mustalipeä vety (LECO)	±0.2	±0.01 %-yks	0.03
Mustalipeä rikki (KCL)	±5	±0.2 %-yks	0.6
Reduktio (1 näyte, KCL)	±1	±1.0 %	0.1
Reduktio (10 näytettä ka., KCL)	±0.2	±0.2 %	0.03
Kuiva-aine (kalibroitu refraktometri)	±2.5	±2 %	0.7
Kuiva-aine (1 näyte, KCL)	±0.5	±0.4 %	0.1
NO _x (kalibroitu laitosmittaus 0-200)	±3	±6 ppm	-
NO _x (ulkopuolinen mittaja)	±3	±2 ppm	-
SO ₂ (kalibroitu laitosmittaus 0-500)	±3	±15 ppm	-
SO ₂ (ulkopuolinen mittaja)	±3	±2 ppm	-

VIITTEET

1. Adams, Terry N., Frederick, Wm. James, Grace, Thomas M., Hupa, Mikko, Iisa, Kristiina, Jones, Andrew K., Tran, Honghi, 1997, Kraft recovery boilers. AF&PA, TAPPI PRESS, Atlanta, 381 p. ISBN 0-9625985-9-3.
2. Ahtila, Pekka, 1997, Optimization of recovery boiler plant air systems by new design method ja process integration. Acta polytechnica Scandinavica. Me. Mechanical engineering series; 127, Finnish Academy of Technology, 137 p. ISBN 952-5148-34-3.
3. Björk, Maria, Sjögren, Tomas, Lundin, Tommy, Rickards, Helen and Kochesfahani, Saied , 2005, [Partial borate autocauticizing trial increases capacity at Swedish mill](#). Tappi Journal, Vol. 84, No. 4, April 2001, pp. 15 - 19 p.
4. Chase, M.W., Jr., 1998, NIST-JANAF Thermochemical Tables. Fourth Edition, J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph 9, 1998, 1-1951.
5. Clement, J. L., Coulter, J. H. ja Duda, S., 1963, B&W Kraft recovery unit performance calculations. *Tappi*, Vol. 46, No. 2, p. 153.
6. Gullichsen, Johan, 1968b, Heat values of pulping spent liquors. Preprints of the Symposium on Recovery of Pulping Chemicals, Helsinki, The Finnish Pulp ja Paper research Institute ja Ekono, pp. 85 - 100.
7. Performance test procedure: Natrium base recovery units, 1996, CA Report No. 84041601, March 1996, Tappi Press, 54 p. ISBN 0-89852338.
8. Vakkilainen, Esa, 2000, Recovery boiler. Chapter 13 in Chemical Pulping, Book 6, series editors Johan Gullichsen ja Carl-Johan Fogelholm, Finnish Paper Engineers' Association ja TAPPI. ISBN 952-5216-06-3.
9. Water tube boilers and auxiliary installation – Part 15: Acceptance Test on Steam Generators, 2003, 12952-15:2003 E, CEN European Committee for Standardization, 89 p.

LIITE I

Tyypillisiä lisävirtojen analyysejä

LIITE I.1

CNGC GAS

Name:

Temperature before heating

60 °C

Mass fractions

Gas:	mol	kg	m3n	Fuel gas.	mol	mol -%	vol -%	kg	wt-%		%
CH4	12.00	0.193	0.27	CO2	224.91	8.163	8.117	9.898	12.97	C	27.74
C2H2	0.00	0.000	0.00	H2O	539.75	19.589	19.600	9.726	12.74	H	8.82
C2H4	0.00	0.000	0.00	SO2	19.00	0.690	0.674	1.217	1.59	O	27.98
C2H6	6.81	0.205	0.15	N2	1907.79	69.240	69.290	53.437	70.02	N	17.26
C3H6	0.00	0.000	0.00	O2	63.87	2.318	2.319	2.043	2.68	S	6.24
C3H8	1.16	0.051	0.03	Total	2755.33	100.000	100.000	76.322	100.000	H2O	11.96
C4H8	0.00	0.000	0.00							Ash	0.00
C4H10	1.03	0.060	0.02							Sum	100.00
C6H6	0.00	0.000	0.00								
C7H8	0.00	0.000	0.00	Stoch.O2	425.83	mol	dry-O2	2.884	vol -%	HHV	544.50 MJ/kmol
H2	0.00	0.000	0.00	Stoch.air	142.14	m3n/kmol					18.30 MJ/kg
H2S	1.00	0.034	0.02	Comb.air	163.46	m3n/kmol	5.49	m3n/kg fuel		LHV	471.60 MJ/kmol
CH3SH	0.00	0.000	0.00		209.50	kg/kmol	7.04	kg/kg fuel			15.85 MJ/kg
CH3SCH3	4.00	0.249	0.09	Flue gas.	188.43	m3n/kmol	6.33	m3n/kg fuel		HHV	24.31 MJ/m3n
CH3SSCH3	7.00	0.659	0.16		233.17	kg/kmol	7.84	kg/kg fuel		LHV	21.06 MJ/m3n
CH3OH	169.00	5.415	3.79	Air ratio	1.150						
HCN	0.00	0.000	0.00	kgH2O/kgA	0.0130						
NH3	0.00	0.000	0.00					0.19762			
O2	0.00	0.000	0.00	FLUE GAS ELEMENTARY W%							
CO	0.00	0.000	0.00			C	H2	O2	N2	S	
CO2	0.69	0.030	0.02		[%]	[12.011]	[2.016]	[31.99]	[28.013]	[32.06]	
N2	60.00	1.681	1.34	CO2	8.117	0.975		2.597			
H2O	64.68	1.165	1.45	H2O	19.600		0.395	3.135			
TOTAL	327.37	9.741	7.33	SO2	0.674					0.000	
TOTAL dry	262.69	8.576	5.88	N2	69.290				19.410		
Density		1.329 kg/m3n		O2	2.319			0.742			

LIITE I.2

Metanoli

Temperature before heating				52 °C				Mass fractions			
Gas:	mol	kg	m3n	Fuel gas.	mol	mol -%	vol -%	kg	wt-%		%
CH4	0.00	0.000	0.00	CO2	77.20	8.679	8.630	3.398	13.87	C	32.82
C2H2	0.00	0.000	0.00	H2O	182.24	20.489	20.499	3.284	13.41	H	10.98
C2H4	0.00	0.000	0.00	SO2	2.30	0.259	0.253	0.147	0.60	O	42.12
C2H6	0.00	0.000	0.00	N2	606.87	68.229	68.273	16.998	69.40	N	3.57
C3H6	0.00	0.000	0.00	O2	20.85	2.345	2.345	0.667	2.72	S	2.61
C3H8	0.00	0.000	0.00	Total	889.46	100.000	100.000	24.494	100.000	H2O	7.90
C4H8	0.00	0.000	0.00							Ash	0.00
C4H10	0.00	0.000	0.00							Sum	100.00
C6H6	0.00	0.000	0.00								
C7H8	0.00	0.000	0.00	Stoch.O2	139.03	mol	dry-O2	2.950	vol -%	HHV	620.77 MJ/kmol
H2	0.00	0.000	0.00	Stoch.air	163.90	m3n/kmol					20.36 MJ/kg
H2S	0.40	0.014	0.01	Comb.air	188.48	m3n/kmol	6.18	m3n/kg fuel		LHV	533.83 MJ/kmol
CH3SH	1.00	0.048	0.02		241.57	kg/kmol	7.92	kg/kg fuel			17.51 MJ/kg
CH3SCH3	0.90	0.056	0.02	Flue gas.	214.85	m3n/kmol	7.05	m3n/kg fuel		HHV	27.71 MJ/m3n
CH3SSCH	0.00	0.000	0.00		264.29	kg/kmol	8.67	kg/kg fuel		LHV	23.83 MJ/m3n
CH3OH	74.40	2.384	1.67	Air ratio	1.150						
HCN	0.00	0.000	0.00	kgH2O/kgA	0.0130						
NH3	0.00	0.000	0.00					0.13366			
O2	0.00	0.000	0.00	FLUE GAS ELEMENTARY W%							
CO	0.00	0.000	0.00			C	H2	O2	N2	S	
CO2	0.00	0.000	0.00		[%]	[12.011]	[2.016]	[31.99]	[28.013]	[32.06]	
N2	3.60	0.101	0.08	CO2	8.630	1.037		2.761			
H2O	12.39	0.223	0.28	H2O	20.499		0.413	3.279			
TOTAL	92.69	2.826	2.08	SO2	0.253					0.000	
TOTAL dry	80.30	2.602	1.80	N2	68.273				19.125		
Density		1.361 kg/m3n		O2	2.345			0.750			

Liite I.3

Turpentine

Temperature before heating				72 oC						Mass fractions		
Gas:	mol	kg	m3n	Fuel gas.	mol	mol -%	vol -%	kg	wt-%		%	
CH4	0.00	0.000	0.00	CO2	1001.90	13.508	13.435	44.094	20.56	C	80.77	
C2H2	0.20	0.005	0.00	H2O	1006.88	13.575	13.584	18.144	8.46	H	10.86	
C2H4	0.00	0.000	0.00	SO2	0.80	0.011	0.011	0.051	0.02	O	0.00	
C2H6	0.00	0.000	0.00	N2	5226.99	70.471	70.534	146.408	68.26	N	0.19	
C3H6	0.20	0.008	0.00	O2	180.65	2.436	2.437	5.779	2.69	S	0.17	
C3H8	0.00	0.000	0.00	Total	7417.22	100.000	100.000	214.476	100.000	H2O	8.01	
C4H8	0.00	0.000	0.00							Ash	0.00	
C4H10	0.00	0.000	0.00							Sum	100.00	
C6H6	0.00	0.000	0.00									
C10H16	100.00	13.623	2.90	Stoch.O2	1204.35	mol	dry-O2	2.820	vol -%	HHV	3385.93	MJ/kmol
H2	0.00	0.000	0.00	Stoch.air	781.48	m3n/kmol					38.28	MJ/kg
H2S	0.10	0.003	0.00	Comb.air	898.70	m3n/kmol	10.16	m3n/kg fuel		LHV	3121.56	MJ/kmol
CH3SH	0.50	0.024	0.01		1151.80	kg/kmol	13.02	kg/kg fuel			35.29	MJ/kg
CH3SCH3	0.20	0.012	0.00	Flue gas.	985.88	m3n/kmol	11.14	m3n/kg fuel		HHV	128.51	MJ/m3n
CH3SSCH3	0.00	0.000	0.00		1273.73	kg/kmol	14.40	kg/kg fuel		LHV	118.48	MJ/m3n
CH3OH	0.00	0.000	0.00	Air ratio	1.150							
HCN	0.00	0.000	0.00	kgH20/kgA	0.0130							
NH3	0.00	0.000	0.00					0.33424				
O2	0.00	0.000	0.00	FLUE GAS ELEMENTARY W%								
CO	0.00	0.000	0.00			C	H2	O2	N2	S		
CO2	0.00	0.000	0.00		[%]	[12.011]	[2.016]	[31.99]	[28.013]	[32.06]		
N2	1.00	0.028	0.02	CO2	13.435	1.614		4.298				
H2O	66.21	1.193	1.48	H2O	13.584		0.274	2.173				
TOTAL	168.41	14.898	4.44	SO2	0.011					0.000		
TOTAL dry	102.20	13.705	2.95	N2	70.534				19.759			
Density		3.358 kg/m3n		O2	2.437			0.779				

LIITE II

Tyypillinen materiaalitaselaskelma

Liite II

Soodakattilayhdistys
Massatase
Mallitase, lyhyt laskenta

27.06.2006
ESV

Lähtötietoja

	Mustalipeäanalyyysi		
(1)	Lämpöarvo (HHV)	13.0	MJ/kgka
(2)	Hiili	32.5	massa-%
(3)	Vety	3.30	massa-%
(4)	Typpi	0.09	massa-%
(5)	Rikki	6.1	massa-%
(6)	Natrium	20.0	massa-%
(7)	Kalium	3.00	massa-%
(8)	Kloori	0.25	massa-%
(9)	Boori	0.50	massa-%
(10)	Happi	34.16	massa-%
(11)	NPE	0.10	massa-%
(12)	Yhteensä	100.00	massa-%
(13)	Reduktio rikille	96.00	mooli-% S/(SO4+S)
(14)	Autokaustisointiaste boorille	80.00	mooli-% Na3BO3/(Na
(15)	Kuiva-aine	85.00	%
(16)	SO2	0.000052	g/kgka
		~ 13.00	mg/m3n
(17)	HCl	0.000010	g/kgka
		~ 3.00	mg/m3n
(18)	Pölyn Na	0.0000609	kg/kgka
(19)	Pölyn K	0.0000137	kg/kgka
(20)	Pölyn Cl	0.0000019	kg/kgka
(21)	Pölyn -CO3	0.0000348	kg/kgka
(22)	Pölyn -SO4	0.0000885	kg/kgka
(23)	Pölyn -S	0.0000002	kg/kgka
(24)	Pölyn -B	0.0000000	kg/kgka
(25)	Pölyä	0.0002000	kg/kgka
		~ 50.00	mg/m3n
(26)	Tuhkaa kiertoon	0.1000000	kg/kgka
(27)	Rikki hajukaasuissa	0.0108000	kg/kgka
(28)	Vesi hajukaasuissa	0.0216000	kg/kgka
(29)	Ilmageroin	1.1625000	-
(30)	Vettä ilmassa	0.0220000	kg/kgki
(31)	Suora esilämmitys	0.0000000	kg/kgka
(32)	Nuohoushöyry	0.1188000	kg/kgka
		~ 3.43	%

Tuleva mustalipeä

		massa, g/kgka	kg/kmol	mol/kgka	lopputuote
(33)	Hiili	C	325.0	12.011	27.059 CO2, Na2CO3, KCO3
(34)	Vety	H2	33.0	2.016	16.371 H2O
(35)	Typpi	N	0.9	28.013	0.032 N2
(36)	Rikki	S	61.0	32.060	1.903 SO2, K2S, Na2S, Na2SO4, K2SO4
(37)	Natrium	Na2	200.0	45.980	4.350 Na2S, Na2SO4, Na2CO3, NaCl
(38)	Kalium	K2	30.0	78.197	0.384 K2S, K2SO4, K2CO3, KCl
(39)	Kloori	Cl	2.5	35.453	0.071 NaCl, KCl
(40)	Boori	B	5.0	10.811	0.462 NaBO2, Na3BO3
(41)	Happi	O	341.6	31.999	10.675 CO2, SO2, Na2CO3, Na2SO4, K2SO4,
(42)	Vesi	H2O	176.5	18.015	9.796 H2O
(43)	Inertti		1.0	-	-
(44)	Yhteensä		1176.5		71.101

Rikkitase

		<i>massa, gS/kgka</i>	<i>molS/kgka</i>	<i>lopputuote</i>
(45)	(36)	61.0	1.903	tuotu rikki
(46)	(27)	10.8	0.337	rikki hajukaasuissa
(47)	(16)	0.0	0.000	rikkihäviö SO ₂ ssa
(48)	(22)	0.0	-0.001	sähkösuodinpölyn Na ₂ SO ₄ ja K ₂ SO ₄
(49)	(23)	0.0	0.000	sähkösuodinpölyn Na ₂ S ja K ₂ S
(50)	(22)*(27)/(25)	-14.8	-0.461	sähkösuodintuhkan Na ₂ SO ₄ ja K ₂ SO ₄
(51)	(23)*(27)/(25)	-0.1	-0.003	sähkösuodintuhkan Na ₂ S ja K ₂ S
(52)	Yhteensä	56.9	1.775	Rikki sulassa
(53)	(52)*(13)	54.6	1.704	Sulfidi (S) sulassa
(54)	(52)*(1-(13))	2.3	0.071	Sulfaatti (SO ₄) sulassa

Klooritase

		<i>massa, gCl/kgka</i>	<i>molCl/kgka</i>	<i>lopputuote</i>
(55)	(39)	2.5	0.071	tuotu kloori
(56)	(20)	0.0	0.000	sähkösuodinpölyn NaCl ja KCl
(57)	(20)*(27)/(25)	-0.9	-0.026	sähkösuodintuhkan NaCl ja KCl
(58)	(17)	0.0	0.000	savukaasujen sisältämä HCl
(59)	Yhteensä	1.6	0.044	Cl sulassa

Booritase

		<i>massa, gB/kgka</i>	<i>molB/kgka</i>	<i>lopputuote</i>
(60)	(40)	5.0	0.462	tuotu boori
(61)	(24)	0.0	0.000	boorihäviö sähkösuodinpölyssä
(62)	(24)*(27)/(25)	0.0	0.000	boorihäviö tuhassa
(63)	Yhteensä	5.0	0.462	boori sulassa
(64)	(63)*(14)	4.0	0.370	Na ₃ BO ₃ sulassa
(65)	(63)*(1-(14))	1.0	0.092	NaBO ₂ sulassa

Natriumtase

		<i>massa, gNa/kgka</i>	<i>molNa/kgka</i>	<i>lopputuote</i>
(66)	(37)	200.0	4.350	tuotu natrium
(67)	(18)	-0.1	-0.001	sähkösuodinpölyn Na ₂ SO ₄ , NaCO ₃ ja
(68)	(18)*(27)/(25)	-30.5	-0.663	sähkösuodintuhkan Na ₂ SO ₄ , NaCO ₃ j
(69)	Yhteensä	169.5	3.686	natrium sulassa
(70)	(53)*(69)/((69)+(79))	-3.0	-0.066	Na ₂ SO ₄ sulassa
(71)	(54)*(69)/((69)+(79))	-72.5	-1.577	Na ₂ S sulassa
(72)	(59)*(69)/((69)+(79))	-0.9	-0.021	NaCl sulassa
(73)		-25.5	-0.555	Na ₃ BO ₃ sulassa
(74)		-2.1	-0.046	NaBO ₂ sulassa
(75)	Jäännös	65.3	1.421	Na ₂ CO ₃ sulassa

Kaliumtase

		<i>massa, gK/kgka</i>	<i>molK/kgka</i>	<i>lopputuote</i>
(76)	(37)	30.0	0.384	tuotu kalium
(77)	(19)	0.0	0.000	sähkösuodinpölyn K ₂ SO ₄ , K ₂ CO ₃ ja K
(78)	(19)*(27)/(25)	-6.8	-0.087	sähkösuodintuhkan K ₂ SO ₄ , K ₂ CO ₃ ja
(79)	Yhteensä	23.1	0.296	kalium sulassa
(80)	(53)*(79)/((69)+(79))	-0.4	-0.005	K ₂ SO ₄ sulassa
(81)	(54)*(79)/((69)+(79))	-9.9	-0.127	K ₂ S sulassa
(82)	(59)*(79)/((69)+(79))	-0.1	-0.002	KCl sulassa
(83)	Jäännös	12.7	0.162	K ₂ CO ₃ sulassa

Kalium sulassa 7.4 %
Natrium sulassa 92.6 %

Hiilitase

		<i>massa, gC/kgka</i>	<i>molC/kgka</i>	<i>lopputuote</i>
(84)	(32)	325.0	27.059	tuotu hiili
(85)	(21)	0.0	-0.001	sähkösuodinpölyn Na ₂ CO ₃ ja K ₂ CO ₃
(86)	(21)*(27)/(25)	-3.5	-0.290	sähkösuodintuhkan Na ₂ CO ₃ ja K ₂ CO ₃
(87)	(75)+(83)	-19.0	-1.583	CO ₃ sulassa
(88)	Jäännös	302.5	25.184	CO ₂

Happitase

		massa, gO/kgka	molO/kgka	lopputuote
(89)	(40)	341.6	10.675	tuotu happi
(90)	(88)	-805.9	-25.184	CO ₂
(91)	(21)+(22)	-0.1	-0.003	CO ₃ ja SO ₄ pölyssä
(92)	((21)+(22))*(27)/(25)	-43.4	-1.357	CO ₃ ja SO ₄ tuhkassa
(93)	(16)	0.0	-0.001	SO ₂
(94)	(68)+(80)	-4.5	-0.142	Na ₂ SO ₄ ja K ₂ SO ₄ sulassa
(95)	(75)+(83)	-76.0	-2.375	Na ₂ CO ₃ ja K ₂ CO ₃ sulassa
(96)	(73)	-17.8	-0.555	Na ₃ BO ₃ sulassa
(97)	(74)	-3.0	-0.092	NaBO ₂ sulassa
(98)	(34).(17)	-261.9	-8.185	H ₂ O
(99)	Yhteensä	-871.0	-27.220	Hapen tarve

Kostean ilman tarve

		massa, g/kgka	lopputuote
(100)	(29)*(99)*c	4357.8	kuivaailmaa
(101)	(100)*(30)	95.9	vettä ilmassa
(102)	(100)+(101)	4453.7	kostea ilmaa

Sulaa

		massa, g/kgka	kg/kmol	mol/kgka	lopputuote
(103)	(81)	14.0	110.26	0.127	K ₂ S sulassa
(104)	(71)	123.1	78.04	1.577	Na ₂ S sulassa
(105)	(70)	9.3	142.04	0.066	Na ₂ SO ₄ sulassa
(106)	(80)	0.9	174.25	0.005	K ₂ SO ₄ sulassa
(107)	(72)	2.4	58.443	0.041	NaCl sulassa
(108)	(82)	0.2	74.55	0.003	KCl sulassa
(109)	(75)	150.6	105.99	1.421	Na ₂ CO ₃ sulassa
(110)	(83)	22.4	138.2	0.162	K ₂ CO ₃ sulassa
(111)	(73)	47.3	127.78	0.370	Na ₃ BO ₃ sulassa
(112)	(74)	6.1	65.8	0.092	NaBO ₂ sulassa
(113)	(11)	1.0			NPE
(114)	Yhteensä	377.4			Sulan määrä

Savukaasuja

		massa, g/kgka	lopputuote
(115)	(44)	1176.5	lipeää
(116)	(102)	4453.7	ilmaa
(117)	(25)	-0.2	pölynä
(118)	(27)	-100.0	tuhkana
(119)	(31)	0.0	suora esilämmitys
(120)	(32)	118.8	nuohous
(121)	(27)	10.8	rikki hajukaasuissa
(122)	(28)	21.6	vesi hajukaasuissa
(123)	(114)	-377.4	sulaa
(124)	Yhteensä	5303.8	savukaasuja

Sisään

	massa, g/kgka
(125) lipeää	1176.5
(126) ilmaa	4453.7
(127) suora esilämmitys	0.0
(128) nuohous	118.8
(129) rikki hajukaasuissa	10.8
(130) vesi hajukaasuissa	21.6
(131) Yhteensä	5781.4

Ulos

	massa, g/kgka
pölynä	0.2
tuhkana	100.0
sulaa	377.4
savukaasuja	5303.8
Yhteensä	5781.4

LIITE III

Tyypillinen energiataselaskelma

Liite III

Soodakattilayhdistys
Energiatase
Mallitase, lyhyt laskenta

27.06.2006

ESV

Lähtötietoja

			%
(1) Ref.lämpötila	0	°C	
(2) Lämpöarvo (HHV)	13000.0	kJ/kgka	97.2
(3) Kuiva-aine	85.0	%	
(4) suoran jälkeen	85.0	%	
(5) Vety	3.30	massa-%	
(6) Mustalipeän cp	2.64	kJ/kg°C	
(7) Mustalipeän lämpötila	140.0	°C	
(8) Lämpö apupolttoaineessa	577.0	kJ/kgka	
(9) Ilman lämpötila	30.0	°C	
(10) Polttoilman lämpötila	108.8	°C	
(11) Vuotoilman osuus	5.00	massa-%	
(12) Ilman cp	1.03	kJ/kg°C	
(13) Nuohoushöyry	0	(0=ulkoa,1=sisältä)	
(14) Nuohoush.entalpia	3054.8	kJ/kg	
(15) Hörystymisl.ref.tilassa	2500.9	kJ/kg	
(16) Sulan lämpötila	851.6	°C	
(17) Savukaasun l.tila	155.0	°C	
(18) Savukaasun cp	1.11	kJ/kg	
(19) Savukaasun höyry	2792.0	kJ/kg	
(20) Säteily ja johtuminen	0.283	%	
(21) Palamaton ja muu	0.300	%	
(22) Marginaali	0.500	%	
(23) Syöttöveden entalpia	490.3	kJ/kg	
(24) Höyryn entalpia	3360.7	kJ/kg	
(25) Ulospuhallus entalpia	1423.3	kJ/kg	
(26) Ulospuhallusvirtaus	0.0500	kg/kgka	

Sisään

		kJ/kgds	%
(27) Lämpöarvo LHV (I=2440)	12280.4		91.8
(28) Ref.lt korjaus	0		0.0
(29) Vesi mustalipeässä	-430.6		-3.2
(30) Lämpö mustalipeässä		11849.8	88.6
(31) Apupolttoaineessa		577.0	4.3
(32) Mustalipeän tuntuva		434.8	3.3
(33) Lämpö ilmassa			
(34) tuleva		131.2	1.0
(35) lämmitys		344.6	2.6
(36) vuoto		6.9	0.1
(37) Ulkopuolinen nuohous		31.2	0.2
(38) Yhteensä sisään		13375.6	100.0

Häviöt

		kJ/kgds	%
(39) Sulassa	(Na ₂ +K ₂)S	171.6	1.3
(40)	(Na ₂ +K ₂)SO ₄	13.1	0.1
(41)	(Na ₂ +K ₂)CO ₃	259.1	1.9
(42)	(Na+K)Cl	3.7	0.0
(43)	Na ₃ BO ₃ +NaBO ₂	60.1	0.4
(44)	Inertti	1.4	0.0
(45) Reduktio	Na ₂ S	1611.4	12.0
(46)	SO ₂	0.3	0.0
(47)	K ₂ S	134.4	1.0
(48) Autokaustisointi	Na ₃ BO ₃	72.6	0.5
(49) Sula+reduktio+autokaustisointi		2327.6	17.4
(50)			
(51) Märkä savukaasu		910.4	6.8
(52) säteily ja johtuminen		37.9	0.3
(53) palamaton ja muu		40.1	0.3
(54) marginaali		66.9	0.5
(55) Yhteensä		3382.9	25.3
(56) Netto höyryyn		9992.6	74.7
(57) Hyötysuhde (HHV)	%	68.8	
(58) Hyötysuhde (LHV)	%	74.7	
(59) Hyötysuhde (LHV, reduktio,	%	88.3	
(60) Hyötysuhde (NHV)	%	89.1	

Höyryntuotanto

	kg/kgka	
(61) Syöttövesi	3.5151	162.7366
(62) Ulospuhallus	0.0500	2.3148
(63) Nuohous	0.1188	5.5000
(64) Höyry	3.4651	160.4218

Sisään

massa, g/kgka

(65) Lämpö mustalipeässä	11849.8
(66) Apupolttoaineessa	577.0
(67) Mustalipeän tuntuva	434.8
(68) Lämpö tulevassa ilmassa	131.2
(69) Ilman lämmitys	344.6
(70) Vuotoilma	6.9
(71) Ulkopuolinen nuohous	31.2
(72)	13375.6

Ulos

massa, g/kgka

Netto höyryyn	9992.6
Reduktio	1746.1
Autokaustisointi	72.6
Sulassa	508.9
Märkä savukaa	910.4
Säteily ja johtui	37.9
Palamaton ja n	107.0
	13375.6

LIITE IV

Häviöiden suuruuksia

Liite IV

Soodakattilayhdistys
Energiatase
Häviölaskentaa

27.06.2006
ESV

Sekalaiset häviöt

Palamaton savukaasuissa	14.32 kJ
Palamaton sulassa	0.03 kJ
Palamaton tuhkassa	1.28 kJ
Sähkösuodintuhkan lämpö	15.22 kJ
Lämpöarvon korjaus taseläm	-77.65 kJ
Akselitehot	86.40 kJ
Yhteensä	39.61 kJ
	0.30 %

Palamaton savukaasuissa

Savukaasuvirta (kuiva)	4.558 kg/kgka
Savukaasun tiheys	1.376 kg/m ³ n
CO	200 ppm v
CO + 0,5*O ₂ -> CO ₂	283 MJ/kmol
Häviö CO	8.37 kJ
H ₂	100 ppm v
H ₂ + 0,5*O ₂ -> H ₂ O	241.8 MJ/kmol
Häviö CO	3.58 kJ
VOC	20 ppm v
CH ₄ + 2*O ₂ -> 2H ₂ O + CO ₂	802.3 MJ/kmol
Häviö VOC	2.37 kJ
Häviö yhteensä	14.32 kJ
	0.11 %

Palamaton sulassa

Sulavirta	0.38 kg/kgka
Hiilipitoisuus sulassa	2.54 mg/kg sulaa
Hiilipitoisuus viherlipeässä	400 mg/m ³
Viherlipeää	2.40 l/kgka
Häviö hiilessä	32.00 MJ/kg hiiltä
Häviö yhteensä	0.03 kJ
	0.00 %

Palamaton tuhkassa

Tuhkavirta	0.10 kg/kgka
Hiilipitoisuus tuhkassa	400 mg/kg tuhkaa
Häviö hiilessä	32.00 MJ/kg hiiltä
Häviö yhteensä	1.28 kJ
	0.01 %

Sähkösuodintuhkan lämpö

Tuhkavirta	0.100 kg/kgka
Savukaasuvirta (kuiva)	3.313 m3/kgka
Tuhkavirta	30.2 g/m3n
Lämpötila	155 oC
Tuhkan cp	0.982 kJ/kgK
Häviö tuhkan lämmössä	15.22 kJ
	0.11 %

Lämpöarvon korjaus taselämpötilaan

Polttoainevirta	1.176 kg/kgka
Ominaislämpökapasiteetti	2.640 kJ/kgK
Häviö tuhkan lämmössä	-78 kJ
	-0.58 %

Akselitehojen huomioonotto

Akselitehot	86 kJ/kgka
	0.65 %

LIITE V

Savukaasuominaisuuksia

Appendix V

Calculation of flue gas properties for a mixture

	CO2	H2O	SO2	N2	O2	CO	H2	Mixture
E1	-8.4952	-9.0771	-9.8553	-7.4596	-7.2367	-7.9112	-7.2956	-7.8825
E2	24.74	33.22	31.21	26.57	24.62	28.97	24.45	27.11
E3	24.875	1.328	17.321	3.275	7.926	0.071	9.955	7.276
E4	-6.752	1.768	-3.725	-0.176	-1.860	0.108	-6.242	-1.213
E5	-8.3957	7.4312	-8.0402	5.2744	3.1092	2.1630	-24.4049	2.4422
E6	0.08415	0.00968	0.06845	0.07161	0.07479	0.09700	1.03473	0.06715
E7	3.327E-06	0.0001103	-3.239E-05	-1.3E-05	1.635E-05	-6E-05	-0.0015319	6.071E-06
E8	-8.453E-09	-3.025E-08	1.836E-08	2.08E-09	-1.459E-08	2.257E-08	1.402E-06	-4.447E-09
E9	-1.47366	-1.60121	-0.11323	2.44488	2.07235	2.89722	1.29196	1.06544
E10	0.0618969	0.0333459	0.0438088	0.0583692	0.0712374	0.0579242	0.0323359	0.0568142
E11	-2.454E-05	1.214E-05	8.726E-07	-2.574E-05	-3.417E-05	-3.018E-05	-2.813E-05	-2.15E-05
E12	5.383E-09	-6.27E-09	-5.237E-09	6.55E-09	1.001E-08	9.73E-09	1.824E-08	4.957E-09
E13	0.5059	1.2438	0.3417	0.7997	0.6998	0.7999	11.1273	0.7505
E14	22.263	22.408	21.887	22.403	22.394	22.404	22.432	22.376
E15	188.9	461.5	129.8	296.8	259.8	296.8	4124.3	278.8
E16	44.010	18.016	64.060	28.016	31.999	28.010	2.016	29.817

Enthalpy coefficient
Enthalpy coefficient
Enthalpy coefficient
Enthalpy coefficient
Conductivity coefficient
Conductivity coefficient
Conductivity coefficient
Viscosity coefficient
Viscosity coefficient
Viscosity coefficient
Viscosity coefficient
Conversion kg-> m3n
Volume
Rm
Mole veight

Composition, mol - %

CO2	H2O	SO2	N2	O2	CO	H2	Sum
19.071	14.123	0.123	63.305	3.125	0.230	0.023	100.000

Input

Composition, vol -%

CO2	H2O	SO2	N2	O2	CO	H2	Sum
18.975	14.143	0.120	63.381	3.127	0.230	0.023	100.000

Isobaric Properties for flue gas

Isobaric Data for P = 0.10130 MPa

Temperat ure (K)	Pressure (MPa)	Density (mol/l)	Density (kg/m3)	Volume (l/mol)	Volume (m3/kg)	Enthalpy (kJ/mol)	Enthalpy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/m3n)	Viscosity (uPa*s)	Therm. Cond. (W/m*K)	Phase
200	0.1013	0.06092	1.816	16.4153	0.5505	-2.180	-73.1	-97.4	11.6077	0.016079	vapor
250	0.1013	0.04874	1.453	20.5191	0.6882	-0.670	-22.5	-29.9	14.0024	0.019540	vapor
273.15	0.1013	0.04460	1.330	22.4191	0.7519	0.040	1.3	1.8	15.0808	0.021147	vapor
300	0.1013	0.04061	1.211	24.6229	0.8258	0.872	29.2	39.0	16.3081	0.023014	vapor
350	0.1013	0.03481	1.038	28.7267	0.9634	2.445	82.0	109.3	18.5286	0.026498	vapor
400	0.1013	0.03046	0.908	32.8305	1.1011	4.047	135.7	180.9	20.6676	0.029989	vapor
450	0.1013	0.02708	0.807	36.9343	1.2387	5.679	190.5	253.8	22.7288	0.033484	vapor
500	0.1013	0.02437	0.727	41.0382	1.3763	7.339	246.1	328.0	24.7160	0.036979	vapor
550	0.1013	0.02215	0.661	45.1420	1.5140	9.026	302.7	403.4	26.6328	0.040471	vapor
600	0.1013	0.02031	0.605	49.2458	1.6516	10.740	360.2	480.0	28.4830	0.043957	vapor
650	0.1013	0.01874	0.559	53.3496	1.7893	12.479	418.5	557.7	30.2703	0.047434	vapor
700	0.1013	0.01741	0.519	57.4534	1.9269	14.242	477.7	636.5	31.9983	0.050897	vapor
750	0.1013	0.01625	0.484	61.5572	2.0645	16.030	537.6	716.4	33.6709	0.054344	vapor
800	0.1013	0.01523	0.454	65.6610	2.2022	17.840	598.3	797.3	35.2918	0.057771	vapor
850	0.1013	0.01433	0.427	69.7649	2.3398	19.671	659.7	879.1	36.8646	0.061175	vapor
900	0.1013	0.01354	0.404	73.8687	2.4774	21.524	721.9	961.9	38.3931	0.064553	vapor
950	0.1013	0.01283	0.382	77.9725	2.6151	23.397	784.7	1045.6	39.8810	0.067901	vapor
1000	0.1013	0.01218	0.363	82.0763	2.7527	25.289	848.1	1130.2	41.3320	0.071216	vapor
1050	0.1013	0.01160	0.346	86.1801	2.8903	27.199	912.2	1215.5	42.7498	0.074495	vapor
1100	0.1013	0.01108	0.330	90.2839	3.0280	29.126	976.8	1301.7	44.1382	0.077734	vapor
1150	0.1013	0.01059	0.316	94.3878	3.1656	31.070	1042.0	1388.5	45.5009	0.080931	vapor
1200	0.1013	0.01015	0.303	98.4916	3.3032	33.029	1107.7	1476.1	46.8415	0.084080	vapor
1250	0.1013	0.00975	0.291	102.5954	3.4409	35.002	1173.9	1564.3	48.1639	0.087180	vapor
1300	0.1013	0.00937	0.279	106.6992	3.5785	36.989	1240.6	1653.1	49.4717	0.090228	vapor
1350	0.1013	0.00903	0.269	110.8030	3.7161	38.989	1307.6	1742.5	50.7686	0.093218	vapor
1400	0.1013	0.00870	0.259	114.9068	3.8538	41.001	1375.1	1832.4	52.0583	0.096149	vapor
1450	0.1013	0.00840	0.251	119.0106	3.9914	43.024	1442.9	1922.8	53.3447	0.099017	vapor
1500	0.1013	0.00812	0.242	123.1145	4.1290	45.056	1511.1	2013.6	54.6313	0.101819	vapor

Data fitted to NIST equations

Chase, M.W., Jr., NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition, J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph 9, 1998, 1-1951. [all data]

SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS RY
RAPORTTISARJA

- 1/2005 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Konemestaripäivä 26.1.2005, esitelmät
Sokos hotelli Kaarle/UPM-Kymmene Oyj, Wisaforest, Pietarsaari
26.1.2005 (16A0913-E0065)
- 2/2005 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Selvitys: Soodakattila tulevaisuudessa - materiaalivaihtoehtojen valinta osaprojekti
Pekka Pohjanne, VTT/ Hannu Hänninen TKK/ Timo Kiesi, TKK
14.1.2005 (16A0913-E0066)
- 3/2005 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattila-alan yhteistoiminta
Vuosikertomus 2004
31.3.2005 (16A0913-E0067)
- 4/2005 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Vuosikokous 31.3.2005, Silja Opera Helsinki
Pöytäkirja (16A0913-E0068)
- 5/2005 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilan perusinstrumentointiselvitys
Pekka Jussila/Jaakko Pöyry Oy
(16A0913-E0069) 29.4.2005
- 6/2005 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilan lipeärenkaan instrumentointiselvitys
Pekka Jussila/Jaakko Pöyry Oy
(16A0913-E0070) 15.6.2005
- 7/2005 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilapäivä 20.10.2005
Best Western Hotel Haaga, Helsinki
(16A0913-E0071) 13.10.2005

SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS RY
RAPORTTISARJA

- 1/2006 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Konemestaripäivä 26.1.2006, esitelmät
Sokos Hotelli Seurahuone/Laminating Papers Oy, Kotka
(16A0913-E0072) 18.1.2006
- 2/2006 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattila-alan yhteistoiminta
Vuosikertomus 2005
30.3.2006 (16A0913-E0073)
- 3/2006 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Vuosikokous 30.3.2006, If Vahinkovakuutusyhtiö Oy, Helsinki
Pöytäkirja (16A0913-E0074)
- 4/2006 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilapäivä 1.-3.11.2006
Viking Line
(16A0913-E0075)
- 5/2006 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilan vastaanottokokeet
Materiaali- ja energiatase
Esa Vakkilainen, Pöyry Forest Industry Oy
(16A0913-E0078) 4.12.2006