



A. Nuotio

10.3.2020

1(7)

Suomen Soodakattilayhdistys ry

YMPÄRISTÖTYÖRYHMÄN KOKOUS 1/2020

AIKA 29.1.2020 klo 10.00 – 15:00

PAIKKA Jaakontalo

LÄSNÄ

Kari Saari
Teemu Klemetti
Jukka Röppänen
Antti Tikkanen
Anna Nuotio

UPM-Kymmene Oyj, Pietarsaari, PJ
Stora Enso Oyj, Imatra
Andritz Oy, Helsinki
AFRY Finland Oy, Vantaa, siht.
AFRY Finland Oy, Vantaa, siht.

Liite 1 Projektiraportti: “Selvitys tyypillisistä savukaasuvirroista [m³/ADt] eri puulajeilla”, LUT

JAKELU:

Julkaistu: Soodakattilayhdistyksen kotisivulla

Tiedote: Hallitus, Yhdyshenkilöt, Ympäristötyöryhmä

Sihteeristö

1 POISSAOILOILMOITUKSET

Jarmo Mansikkasalo	Valmet Technologies Oy, Tampere
Jorma Torniainen	Eurofins Labtium Oy, Espoo
Oskari Frösén	AFRY Finland Oy, Vantaa
Kurt Sirén	Oy Sirra Ab, Kirkkonummi

2 ASIALISTA

Sihteeri ehdotti asialistaan lisättävän projektiehdotukset.

3 EDELLISTEN KOKOUKSIEN PÖYTÄKIRJAT

Pöytäkirja 3/2019 käytiin läpi ja hyväksyttiin muutoksitta.

Pöytäkirja 4/2019 käytiin läpi ja hyväksyttiin muutoksitta. Kokouksessa keskusteltiin Olli Dahlin vapauttamisesta toistaiseksi työryhmän toiminnasta. Sihteeristö lupasi tarkastella löytyisikö Tampereen tai Oulun yliopistoista tutkimusryhmää, joka toimii aktiivisesti soodakattiloiden ja talteenotto-prosessien parissa. Sihteeri selvitti kyseisten yliopistojen tutkimusryhmien toimintaa, jotka eivät kuitenkaan vaikuttaneet soveltuvan ympäristötyöryhmän toimintaan.

Valmistuneista projekteista "Evaluation of three different gas phase chemistry mechanisms for predicting NO_x emission formation in recovery boilers, ÅA", heräsi aiemmin keskustelua projektin jatkokehittämisestä. Sihteeri otti yhteyttä Markus Engblomiin ja tiedusteli oliko Åbo Akademiassa tarkoitus jatkaa tutkimusta. Tällä hetkellä Åbo Akademiassa ei kuitenkaan ollut selkeitä jatkosuunnitelmia projektille, mutta aihe saattaa jalostua tulevaisuudessa.

4 KÄYNNISSÄ OLEVAT PROJEKTIT

4.1 Selvitys tyypillisistä savukaasuvirroista [m³/ADt] eri puulajeilla, LUT

Tausta:

Nykyisen BAT:n kirjoitustyön aikana havaittiin, että osa tehtaiden ilmoittamista savukaasumäärissä tekniselle työryhmälle (TWG) eivät olleet oikeita, koska savukaasumäärä ei täsmännyt ilmoitetun pitoisuuden (mg/Nm³) kanssa. Oikeiden lukujen ilmoittaminen on tärkeää, koska BAT päästöraja-arvojen muodostamiseen käytetään tehtailta saatavaa tietoa.

Tavoite:

Selvitys on varautumista seuraavan BAT-referenssidokumentin valmisteluun. Projektin tavoitteena on selvittää, miten tehtaan käyttämä puuraaka-aine vaikuttaa soodakattilan tyypillisiin savukaasuvirtoihin [m³/ADt]. Sellutehtaan käyttämä puulaji vaikuttaa sellun saantoon ja talteenottoon menevään orgaanisen määrään.

Sellutehtaan savukaasuvirtojen määrittelyyn ei ole olemassa yksinkertaista työkalua. Työssä tehdään jokaiselle tehtaalle oma savukaasulaskenta-Excel. Savukaasuvirtaa olisi hyvä tutkia toisaalta uuden tehtaan näkökulmasta ja toisaalta tavallisen suomalaisen integroidun ja integroimattoman tehtaan kannalta sekä miten näissä vaihto-ehdoissa savukaasuvirta määritetään. Tehtaan oma savukaasumäärän laskenta auttaa myös tarkistamaan ympäristömittausten savukaasuvirtauksen laskentaa.

Tilanne:

LUT lähetti raportin työryhmälle kommentoitavaksi 8.12.2019. Raportin yleisenä johtopäätöksenä oli, että mänty- ja koivusellun merkittävästi poikkeavat savukaasumäärät aiheuttavat erisuuruisen päästömäärän käytettäessä samaa päästöjen pitoisuutta. BAT -dokumentti asettaa mänty- ja koivusellua valmistavat tehtaat eriarvoiseen asemaan sallittujen soodakattilan päästöjen pitoisuuksien vuoksi, koska se ei ota tarpeeksi huomioon savukaasumäärissä olevaa eroa.

Lisäksi työryhmä listasi seuraavia kommentteja:

- Tiivistelmässä tulisi olla koko työn summaus, eli lisäyksenä mikä oli tutkimuksen lopputulos.
- Sisällysluettelossa on sekaisin suomea ja englantia.
- Taulukoissa ei mainita missä muodossa savukaasu on eli pitäisi tarkentaa onko kyseessä oleva savukaasu märkää, kuivaa ja missä happipitoisuudessa. Taulukko 6.4 on ainoa missä mainitaan savukaasun tila.
- Kuva 2.1 Onko 1992 startannut kattila väärässä paikassa?
- Yleisesti eri tehtaiden koodistot ja taulukot eivät vastaa toisiaan. Lisäksi tehtaita on eri määrä eri taulukoissa. Ilmeisesti ongelma johtuu siitä, että työssä on käytetty useamman tutkimuksen tietoa milloin tietoa on myös kerätty eri kerroilla. Tämä pitäisi selkeästi ilmaista ja taulukot tarkistaa. Esim. taulukko 2.1 ei vastaa taulukkoa 6.3, mutta vastaisi taulukkoa 7.1 (puulajit ja kuiva-aineet eivät täsmää).
- Kappale 4, lause loppuu kesken.
- Yleisesti työssä voisi pohtia työn ja tiedonkeruun merkittävyyttä mm., koska keräysajankohdasta ei ole tietoa eikä kerätyn arvon edustavuudesta ole selvyyttä, johtopäätöksiä on haastava tehdä. Minkä mittauksen perusteella tehtaat ovat raportoineet tuloksensa? Jokaisella tehtaalla on kerran vuodessa riippumattoman tahon tekemä tarkka mittaus savukaasuista, missä mm. NO_x ja SO_x kalibroidaan eri parametrien suhteen. Ovatko tehtaat mahdollisesti käyttäneet tätä dataa täyttäessään kyselylomaketta?
- Sivun 38, ”Toimitettuun tietojenkeruuseen oli päässyt virheellistä dataa. Kaikkien ligniinien lämpöarvo oli sama. Tämä oli onneksi helppo korjata raportoituihin tuloksiin”. Mitä tällä tarkoitetaan, voisiko lausetta avata?

Käytännössä raportin tulisi olla johtopäätöksineen viimeisen päälle valmis, jos työtä aiotaan käyttää BAT-työssä. Sihteerin lupasi lähettää työryhmän kommentit Esa Vakkilaiselle ja pyytää hänet seuraavaan kokoukseen esittelemään raporttia.

4.2 Hajukaasujen polttosuosituksen päivitys

Tausta:

Viime vuosina tapahtuneiden hajukaasuonnettomuuksien takia yhdistys käynnisti esiselvitystyön hajukaasujärjestelmien turvallisuuden parantamiseksi. Kirsi Hovikorven tekemässä esiselvityksessä todetaan että yhdistyksen nykyinen suositus, ei käsittele ollenkaan hajukaasujen keräilyä jossa suurin osa onnettomuuksista tapahtuu.

Tavoite:

Päivittää yhdistyksen hajukaasusuositus, revisio C (edellinen päivitys B tehtiin 2012-2014).

Tilanne: Hajukaasutyöryhmä kokoontui edellisen kerran 16.1. ja jatkoi päivitystyötä laitetoimittajien kanssa. Päivitetty tilanne suosituksesta on tulossa piakkoin projektin kotisivuille.

Työryhmän pitää vielä käsitellä seuraavat luvut 11.6-11.10 ja 12. Lisäksi työryhmä oikolukee suosituksen kokonaisuudessaan ennen kommentteille lähettämistä. Työryhmä kokoontuu seuraavan kerran 12.3.2020. Työryhmän sihteeri totesi vaadittavan noin kaksi kokoontumiskertaa, jotta työ saadaan valmiiksi. Tällöin suositus saataisiin ympäristötyöryhmälle kommentoitavaksi ennen kesää. Työ kestää luultavasti noin vuoden pidempään mitä työryhmä oli alun perin arvioinut.

5 MUUT HANKKEET

5.1 Meesauunin päästöt eri polttoaineilla

Tavoite:

Selvittää meesauunissa käytettävien polttoaineiden vaikutusta savukaasuvirtaan/päästöihin. Keskustelu biopolttoaineiden käytöstä ja päästöistä alkaa, kun BREF-dokumenttia päivitetään. Tutkittaisiin seuraavia polttoaineita:

- Kaasutuskaasu esim. kuoren kaasutus
- Biomassa esim. sahanpuru
- Ligniini
- Vety
- Verrokki: maakaasu ja polttoöljy

Lisäksi projektissa voitaisiin tutkia polttoaineen vaikutusta kalkkikiertoon ja muut mahdolliset ristikkäisvaikutukset. NPE tason kasvua voitaisiin tarkastella suhteessa ostokalkin määrään sekä säästönä suhteessa öljyyn tai muihin perinteisiin polttoaineisiin. Työryhmä kuitenkin totesi, että tämä on mahdollisesti hankalaa toteuttaa käytännössä.

Toteutus:

Kyselyjen ja ympäristöraporttien perusteella tehtävä tutkimus. NPE analyysin osuus voitaisiin mahdollisesti suorittaa laboratorioanalyysillä. Parhaassa tapauksessa dataa saataisiin ennen ja jälkeen polttoainemuutoksen tai vertailukohtana tehtaan ajopätkiä milloin käytetään fossiilisia polttoaineita.

Kyselytutkimuksessa voitaisiin pyytää online mittauksen raakamittauksesta (epävarmuusvähentämätön tulos) sekä lupaehtoon verrannollista mittauksesta, missä raportoidaan pitoisuus ja ominaispäästö.

Toimenpiteet/työryhmän kommentit:

Hallitus näki selvää tilausta tällaiselle yhteistyöprojektille ruotsalaisen sisaryhdistyksen kanssa. SNRBC:n hallitus tarjoutui auttamaan yhteyden muodostamisessa ruotsalaisiin tehtaisiin tarpeen mukaan, mutta ei tässä vaiheessa halunnut lähteä mukaan itse projektiin. Työryhmässä keskusteltiin myös mahdollisuudesta pyytää Skogindustrinia mukaan tutkimukseen.

Työryhmä sopi, että kaikille tehtaille lähetetään kysely, mitä vaihtoehtoisia polttoaineita tehtaalla on käytössä sekä haluuako kyseinen tehdas lähteä mukaan tutkimukseen. Kun työryhmä on saanut alustavan määrän mukaan lähtevien tehtaiden määrästä, voidaan pyytää tarjousta itse tutkimuksen suorittamisesta. Tutkimuksen voisi toteuttaa riippumaton taho kuten yliopisto (esimerkiksi: LUT, Åbo Akademi ja Aalto) tai VTT.

5.2 Valmistautuminen BAT Reference-dokumentin päivitykseen

Tausta: BAT Reference-dokumentti tullaan päivittämään tulevaisuudessa ja työryhmässä nähtiin tarpeelliseksi alkaa valmistautua tulevaan päivityskierrokseen. Työryhmän mielestä tulisi avata keskustelu Metsäteollisuus ry:n kanssa valmistautumisesta ja rooliasta sen suhteen, miten SKY voi auttaa valmistautumistyössä.

Toteutus: Keskusteluaiheita Metsäteollisuus ry:n kanssa olisivat ainakin normaaliajona määrittäminen ja mittauksien käsittelyyn liittyvät asiat. Tällä hetkellä poikkeustilanteet on määritelty BAT:ssa, mutta esimerkiksi soodakattilan kuorman jokainen tehdas saa määrittää itse, mikä saattaa aiheuttaa eriarvoisuutta tehtaiden ja maiden välillä. Mittausdatan kerääminen on tällä hetkellä toteutettu kansallisesti ainakin Suomessa, mutta eri maiden välillä ei ole yhtenäistä datan verifiointimenetelmää edustavuuden varmistamiseksi. Lisäksi työryhmä nosti esille mahdollisuuden, että tulevaisuudessa mittausdatan tulisi olla aiempaa tarkempaa. Olisikin järkevää kysellä SKY:n jäsenyhteisöiltä etukäteen kuinka mittaus hoidetaan tällä hetkellä.

Tilanne: Hallitus kannatti ajatusta avata keskustelu Metsäteollisuus ry:n kanssa. SKY tarjoaa apuaan relevanteilta osin, mutta pitäytyy poissa edunvalvontatyöstä. Sihteeri on ottanut yhteyttä Metsäteollisuus ry:n vastuuhenkilöön, mutta yhteyttä ei ole vielä muodostettu. Metsäteollisuus ry:ltä tulee myös tiedustella mitä lähtötietoja/dataa he tarvitsisivat.

Työryhmä totesi, että seuraaviin asioihin tulisi kiinnittää huomiota:

- Erityishuomiota kiinnitettävä typen oksideihin ja hiukkaspäästöihin
- Meesauuniin fossiilivapaiden polttoaineiden vaikutus (mm. kuoren kaasutuksen tuotekaasu, sahanpurun tuotekaasu)
- Mittausten raportointi yhtenäisesti Euroopan välillä, koska maitten välissä on suuria eroja
- Tehtaan häiriötilanteiden vaikutuksien huomioiminen
- Raakaveden taustavesipitoisuuden huomioiminen
- Hajukaasujen poltossa tulisi ottaa huomioon poltetaanko laimeita ja väkeviä. Nykyisellään tätä ei huomioida.
- Puulajin vaikutus
- Lipeän kuiva-ainepitoisuuden huomioiminen tarkemmin

Koska huomioitavissa asioissa oli mukana ”Selvitys tyypillisistä savukaasuvirroista [m3/ADt] eri puulajeilla” projektin sisältöön liittyviä asioita, työryhmä totesi, että Esa Vakkilaiselta pyydetään seuraavassa kokouksessa kommenttia myös valmistautumisessa BAT-reference dokumentin päivitykseen.

Lisäksi keskustelua heräsi kattilan suolan hyötykäytöstä kiertotalouden hengessä. Kurt Siren on tutkinut Soodakattilayhdistykselle sähkösuodintuhkan käsittely- ja hyötykäyttöä moniosaisessa tutkimuksessa. Raportit on julkaistu yhdistyksen tutkimusraporttitietokannassa.

6 PROJEKTIEHDOTUKSET

Esa Vakkilainen oli ehdottanut hajukaasutyöryhmälle tutkimusta fossiilivapaasta soodakattilasta ja yleisesti fossiilivapaasta sellutehtaasta. Työryhmä totesi aiheen sopivan hyvin yhteen projektin ”Meesauunin päästöt eri polttoaineilla” kanssa.

Nykyisellään soodakattilalle löytyy fossiilivapaita vaihtoehtoja ilman suurempia investointeja tai muutoksia polttimiin. Tämän vuoksi mm. pikiöljyä on käytetty vaihtoehtoisena polttoaineena. Pikiöljyn saatavuus on kuitenkin rajoitettua ja tämän vuoksi tarvittaisiin laajempaa katsausta eri vaihtoehtoista. Työssä voitaisiin tarkastella polttoaineominaisuuksia (mm. viskositeetti, energiatiheys, säilyvyys ja ominaispäästö) sekä vaadittavia laitteistoja ja niiden materiaaleja. Työryhmä jatkaa projektiaihion kehittämistä seuraavassa kokouksessa.

Mahdollisesti jatkossa työryhmä voisi toteuttaa suuremman projektikonaisuuden fossiilivapaasta sellutehtaasta missä keskiössä olisivat meesauuni, hajukaasukattila ja soodakattila. Lisäksi tulisi kiinnittää huomioita asioihin, mistä tehtaast olisivat halukkaita antamaan lähtötietoja.



7 MUUT ASIAT

Operaattoripäivät peruttiin poikkeuksellisen vähäisen osallistujamäärän vuoksi.

Yhdistyksen vuosikokous pidetään huhtikuun lopussa 2020 Helsingissä.

8 SEURAAVA KOKOUS

Työryhmä päätti siirtää seuraavan kokouksen 25.3.2020.

Lisäksi kokouksessa sovittiin alustavat syksyn kokoukset pidettäväksi 8.9.2020 sekä 18.11.2020.

Vakuudeksi

Anna Nuotio

**Projektiraportti:
“Selvitys tyypillisistä savukaasuvirroista [m³/ADt] eri puulajeilla”
LUT**

LUT University

Esa Vakkilainen, Kari Luostarinen, Simo Lyytinen

Savukaasumäärän laskenta Suomen soodakattiloissa

Lappeenranta 2019

Abstract

Esa Vakkilainen, Kari Luostarinen, Simo Lyytinen

Flue gas amount in Finnish recovery boilers

Lappeenranta 2019

45 pages

This work updates flue gas calculation procedure in Finnish recovery boilers with new 2019 data used for verification. It was prepared under FRBC Liquor firing subcommittee.

Finnish recovery boiler committee wanted to clarify how the typical flue gas flow in recovery boilers [m^3/ADt] is affected by the type of wood used in pulping. It is known that wood species used affect the pulp yield and the organic portion that is directed to recovery with black liquor.

A simple calculation tool to determine the flue gas flow to recovery boiler has not been available. The object is to look at how in ordinary Finnish integrated and non-integrated mill one can determine the flue gas flow.

Flue gas calculation helps also to check the correctness of flue gas flow in environmental measurements.

Keywords: flue gas flow, recovery boiler, forest industry

Tiivistelmä

Esa Vakkilainen, Kari Luostarinen, Simo Lyytinen
Savukaasumäärän laskenta Suomen soodakattiloissa
Lappeenranta 2019
45 sivua

Työssä päivitetään Soodakattilayhdistyksen valitseman, tehtaiden edustajista ja muista toimijoista koostuvan Lipeätyöryhmän valvonnassa savukaasumäärän laskentaa ja vertaillan tuloksia suomalaisilla soodakattiloilla vuonna 2019 kerättyihin tietoihin.

Suomen Soodakattilayhdistys on ollut halukas selvittämään, miten soodakattilassa pulajit vaikuttavat tyypillisiin savukaasuvirtoihin [m^3/ADt]. Sellutehtaan käyttämä puulaji vaikuttaa sellun saantoon ja talteenottoon mustalipeän mukana menevään orgaanisen määrään.

Sellutehtaan savukaasuvirtojen määrittelyyn ei ole olemassa yksinkertaista työkalua. Savukaasuvirtaa olisi hyvä tutkia toisaalta miten tavallisella suomalaisella integroidulla ja integroimattomalla tehtaalla savukaasuvirta määritetään.

Savukaasumäärän laskenta auttaa myös tarkistamaan ympäristömittausten savukaasuvirtauksen laskentaa.

Hakusanat: savukaasumäärä, soodakattila, metsäteollisuus

Contents

Abstract

Contents

Lyhenteet	7
1 Johdanto	9
2 Suomen soodakattilat	11
2.1 Kohdekattilat	11
2.2 Mustalipeät	12
3 Savukaasumäärät	16
3.1 IPPC BAT BREF	16
3.2 Savukaasumäärät maittain ja puulajeittain	17
3.3 Savukaasumäärät Suomessa	19
4 Sellun keitto	21
4.1 Keitossa käytetyt puulajit	21
4.2 Keittoprosessin erot havu- ja lehtipuilla.....	22
5 Savukaasumäärän laskenta	24
5.1 Mustalipeän lämpöarvon laskeminen	24
5.2 Alkuaineanalyysin approksimointi.....	25
5.3 Savukaasumäärän laskeminen	28
6 Laskennan tulokset	30
6.1 Tyypilliset savukaasuvirrat eri saannoilla	30
6.2 Suomen sellutehtaiden savukaasuvirrat.....	32
7 Tiedonkeruu	35
8 Yhteenveto	39
Viitteet	40
Liite A: Kyselykaavake	43
Liite B: Laskentasiivu	44
Liite C: Saadut vastaukset	50

Lyhenteet

ADt	ilmakuiva tonni sellua
d	päivä
ka	kuiva-ainetta
kgka	kilogramma kuiva-ainetta
MCR	Suurin jatkuva kapasiteetti
tka	tonnia kuiva-ainetta

1 Johdanto

Suomen Soodakattilayhdistys on aiemmin teettänyt kandityön Lyytinen, Simo (2017). ”Soodakattilan savukaasuvirrat eri puulajeilla” (<http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201704246240>). Suomen Soodakattilayhdistys oli halukas selvittämään miten soodakattilassa puulajit vaikuttavat tyypillisiin savukaasuvirtoihin [$\text{m}^3\text{n}/\text{ADt}$]. Sellutehtaan käyttämä puulaji vaikuttaa sellun saantoon ja talteenottoon menevään orgaanisen määrään. Sellutehtaan savukaasuvirtojen määrittelyyn ei ole olemassa yksinkertaista työkalua. Savukaasuvirtaa olisi hyvä tutkia toisaalta lähtökohtana uusi tehdas ja toisaalta miten tavallisella suomalaisella integroidulla ja integroimattomalla tehtaalla savukaasuvirta määritetään. Savukaasumäärän laskenta auttaa myös tarkistamaan ympäristömittausten savukaasuvirtauksen laskentaa.

Tässä raportissa täydennetään kandityön tuloksia tehdyn mallilaskennan ja koottujen 2019 tulosten perusteella. Mallilaskennassa on pyritty yksinkertaisesti tekemään työkalu, jolla soodakattilan mitattua savukaasuvirtaa voidaan tarkentaa, kun sitä verrataan laskennalliseen arvoon.

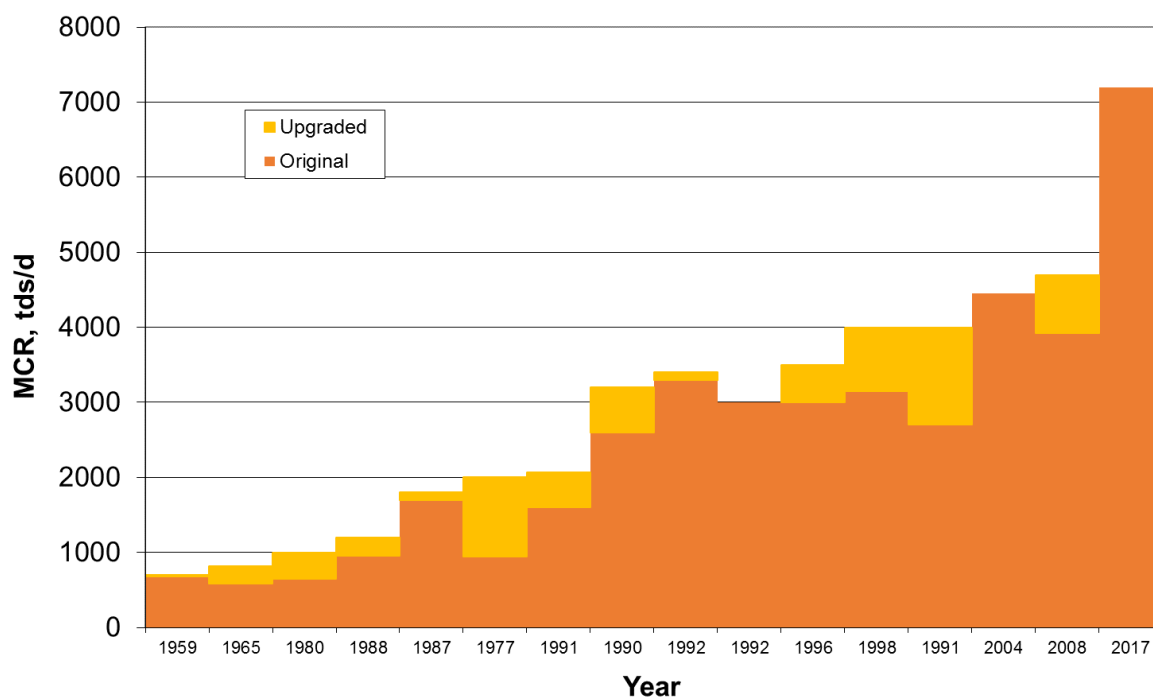
Tietoja on kerätty lähettämällä tehtaille kyselylomakkeet 2019, joista on koostettu vuoden lopulla yhteenveto.

2 Suomen soodakattilat

Tietoja Suomen soodakattiloista on kerätty aiemmin LUT-yliopiston tekemässä Soodakattilayhdistyksen projektissa ”Mustalipeän polttomenetelmät Suomen soodakattiloissa 2018”. Mukana oli 14 suomalaista sellutehdasta.

2.1 Kohdekattilat

Suomessa on käytössä yhteensä 16 soodakattilaa. Kattiloiden lipeän polttoteho vaihteli 650 tka/d aina 6750 tka/d keskitehon ollessa 2700 tka/d. Ikäero vanhimman ja nuorimman välillä oli 58 vuotta ja keski-ikä oli 29 vuotta. Kattiloiden tietoja on ilmoitettu Taulukossa 2.1 ja mustalipeän polttokapasiteetit on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1: Suomalaiset soodakattilat, ikä ja suurin lipeän polttokapasiteetti.

Taulukko 2.1: Tietoja kattiloista (ikä vuonna 2019)

Koodi	Käynnistys- vuosi	Ikä	Tulipesän leveys [m]	Tulipesän syvyys [m]	Tulipesän korkeus [m]	Pohjan ala [m ²]	Lipeän poltto normaali [tka/d]
N	1959	60	6.9	6.9	17.3	47.1	650
A	1965	54	7.6	7.6	15.5	57.8	820
P	1980	39	7.4	6.4	22.2	47.8	1000
B	1988	31	8.0	8.0	18	64.0	1150
D	1987	32	10.1	10.4	27.6	105.0	1500
M	1977	42	9.9	9.9	23	98.0	1850
L	1991	28	10.1	10.4	27.8	105.0	2070
K	1990	29	12.6	11.8	31.5	148.7	3000
E	1992	27	13.7	13.3	40.7	182.2	3000
R	1992	27	12.6	11.8	37.4	148.6	3000
J	1996	23	12.6	12.6	38.5	158.8	3000
F	1998	21	12.5	13.3	36.5	166.3	3900
C	1991	28	12.4	12.8	35.6	158.7	4000
O	2004	15	14.4	15.6	41	224.6	4000
T	2008	11	14.0	14.0	36.5	196.0	4700
U	2017	2	18.3	17.7	38.6	323.3	6750

2018 poltettiin Suomessa tyypillisesti 44390 tka/d. Mediaanikattila poltti 3000 tka/d ja keskimääräinen kattila poltti 2800 tka/d.

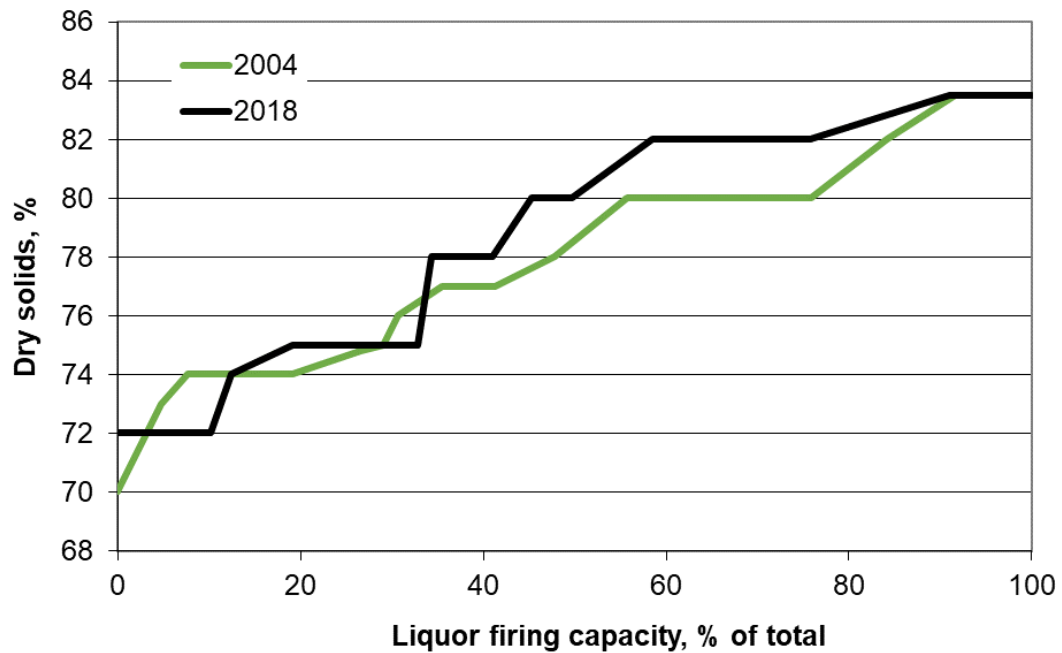
2.2 Mustalipeät

Tehtaiden ilmoittamat mustalipeäarvot vuonna 2018 on ilmoitettu taulukossa 2.2. Kuusi kattilaa käyttää pelkästään havua. Kymmenen kattilaa käyttää pääsääntöisesti sekalipeää. Käytännössä keitettävissä puulajeissa ei ole tapahtunut suurta muutosta, vaan n. 36 % on lehtipuulipeää.

Mustalipeän kuiva-aine on noussut vuodesta 2004 vuoteen 2018 noin 1 %-yksikön eli tasolta 78 % tasolle 79 %. Korkeampi kuiva-aine lisää kattilan kapasiteettia, pienentää rikki- ja pölypäästöjä sekä lisää höyryn ja sähkön tuotantoa. Suomessa siirryttiin 1990-luvun lopulla useissa tehtaissa noin 80 % lipeän kuiva-aineeseen. Kun 2004 vielä seitsemän kattilaa ilmoitti lipeän kuiva-aineeksi 75 % tai sen alle niin 2018 enää kuusi kattilaa toimi samoin.

Taulukko 2.2: Tietoja poltettavista lipeistä 2018

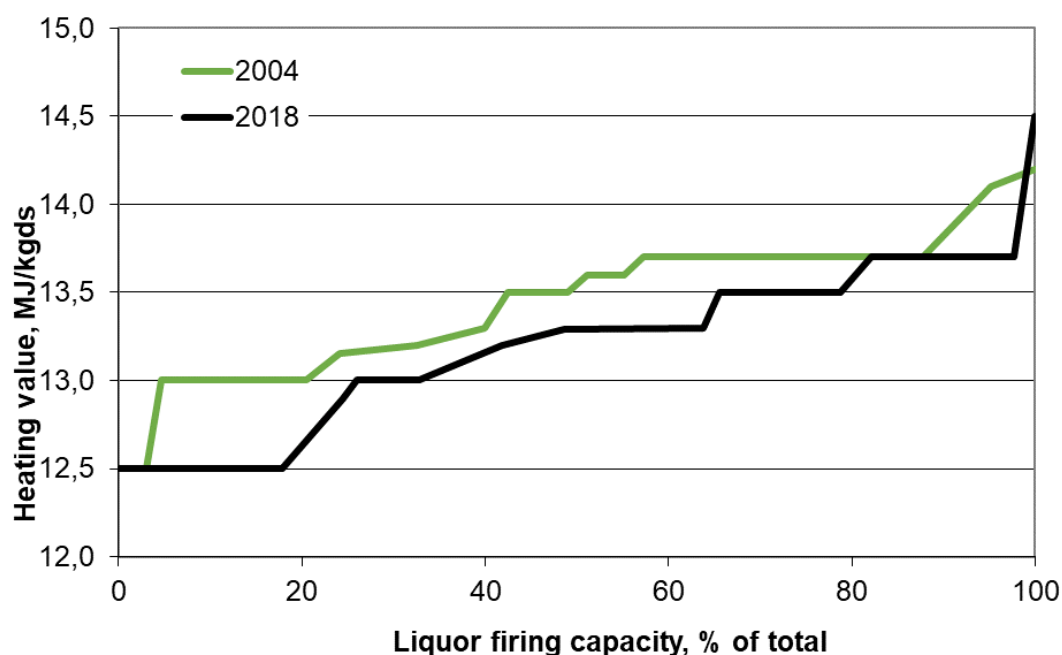
Koodi	Puulaji havu [%]	Puulaji koivu [%]	Kuiva-aine [%]	Polttoliipeän HHV [MJ/kgka]
A	50	50	80	13.5
B	35	65	80	13.5
C	65	35	75	12.5
E	40	60	72	13.7
F	100		80	12.5
J	65	35	78	13
K	100		82	13.29
L	30	70	75	13.7
M	100		78	13.7
N	52	48	75	13
O	100		83.5	13.2
P	38	62	72	13.5
R	100		74	12.9
T	32	68	82	13.5
U	50	50	82	13.3



Kuva 2.2: Mustaliipeän kuiva-aineet vuosina 2004 ja 2018 suhteellisen polttokapasiteetin mukaan.

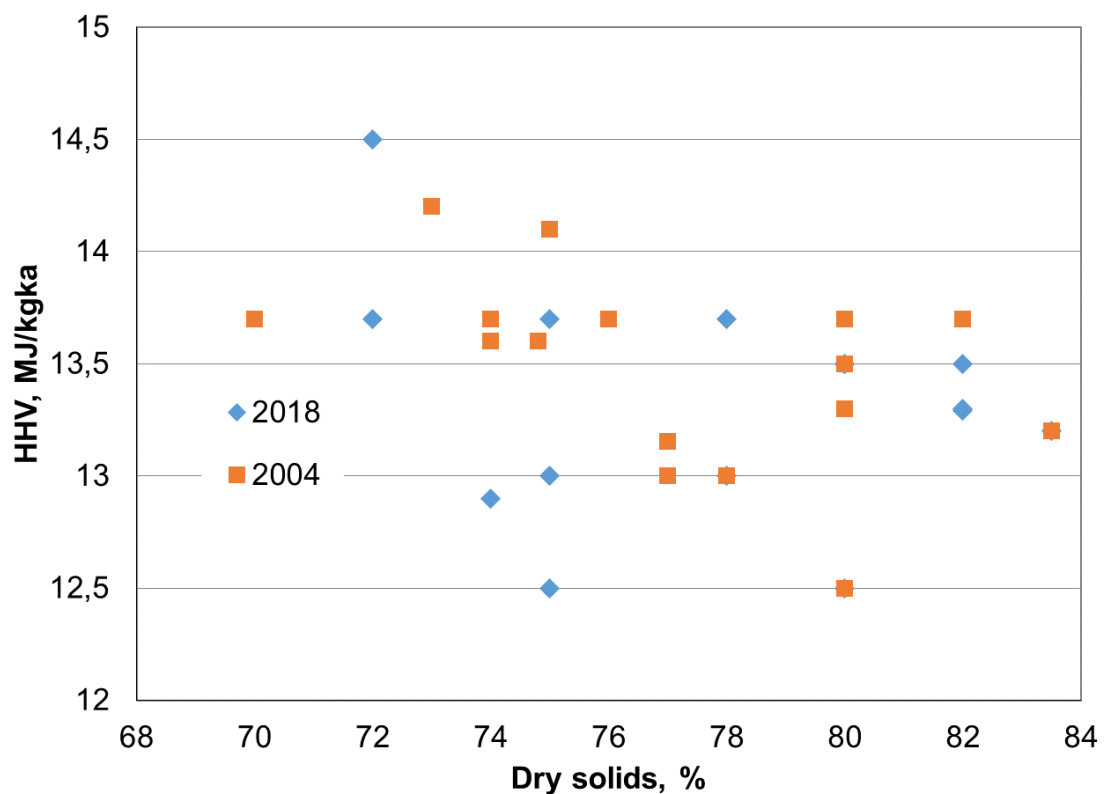
Kun 2004 seitsemän kattilaa ilmoitti lipeän kuiva-aineeksi 80 % tai sen yli, niin 2018 kahdeksan toimi samoin. Kahdeksan kattilaa ilmoitti kuiva-aineen laskeneen ja viidellä se oli noussut. Kuiva-aineen laskua selittää esimerkiksi suurempi kattilan polttokapasiteetti ilman että haihduttamon kapasiteettia on lisätty. Yleensä tehtailla ei ole tehty suuria korvausinvestointeja kuiva-aineen nostoon, jos rikkipäästöt eivät ole lähteneet nousuun.

Mustalipeän kuiva-aineen lämpöarvo on laskenut vuodesta 2004 vuoteen 2018 noin 0.3 MJ/kg:ka eli 2 %. Suomessa on jatkuvasti pyritty parantamaan keiton saantoa eli suurempi osa puun orgaanisesta aineksesta päätyy selluksi. Matalampi kuiva-aineen lämpöarvo lisää kattilan kapasiteettia, kun se ilmaistaan tka/m². Vain kahdella kattilalla raportoitiin hieman korkeampi mustalipeän kuiva-aineen lämpöarvo. Muut kattilat raportoivat laskevia lämpöarvoja eli korkeampaa saantoa keitossa.



Kuva 2.3: Mustalipeän kuiva-aineen lämpöarvot vuosina 2004 ja 2018 suhteellisen polttokapasiteetin mukaan.

Lämpöarvolla ja kuiva-aineella ei ole kovin systemaattista korrelaatiota, kuva 2.4. Kuiva-ainetta on nostettu monella tehtaalla, vaikka keittoon ei ole tehty muutoksia ja vastaavasti toisinpäinkin. Voisi helposti olettaa, että uusi tehdas takaa hyvän saannon ja korkean lipeän kuiva-aineen. Näin varmaan onkin, mutta ne saadaan aikaan myös tehtaalla, joka on käynnistysvuodeltaan vanhempi.



Kuva 2.4: Mustalipeän lämpöarvot 2004 ja 2018 kuiva-aineen mukaan.

3 Savukaasumäärät

Poltettavan mustalipeän ominaisuudet (lämpöarvo ja kuiva-aine) vaihtelevat eri tehtaiden välillä. Lämpöarvo muodostuu keitettävän puulajin ja keittomenetelmän mukaan. Kuiva-aine riippuu haihduttamosta ja sen ajovauhdista. Lipeän ominaisuudet voivat vaihdella huomattavasti, lyhyessäkin ajassa kun keiton puulaji tai keiton massatyyppi muuttuu.

3.1 IPPC BAT BREF

Euroopan komission parhaan käytettävissä olevan teknologian päivitetty raportti vuodelta 2015 asettaa ohjearvoja paperi- ja selluteollisuuden prosesseille ja päästöille. Dokumentin mukaiset eri päästöjen pitoisuudet taulukon 3.1 mukaan ei ota huomioon eri puulajien vaikutusta soodakattilan savukaasumäärään. Raportti asettaa rajat päästöjen pitoisuuksille, mikä asettaa eri puulajia käyttävien tehtaiden ominaispäästöjen tarkastelun eriarvoiseen asemaan. Koska vuosittainen ominaispäästö määrä riippuu savukaasumäärästä tuotettua sellutonnia kohden, tulisi eri puulajien ominaissavukaasumäärät ottaa huomioon. Vuosittainen ominaispäästö määrä lasketaan päästöjen pitoisuuden avulla kerrottuna savukaasumäärällä tuotettua ilmakeivää sellutonnia kohden.

Taulukko 3.1: Parhaan käytettävissä olevan tekniikan mukaiset päästötasot soodakattilalle

Päästötyyppi		Vuosikeskiarvo [mg/m ³ n] (6 % O ₂)	Vuosikeskiarvo [kg/ADt] (6 % O ₂)
SO ₂	DS < 75 %	5 - 50	-
	DS 75 - 83 %	5 - 25	
TRS	-	1 - 5	-
Kaasumainen rikki (TRS ja SO ₂ -S)	DS < 75 %	-	0,03 - 0,17
	DS 75 - 83 %	-	0,03 - 0,13
NO _x (havupuu)	DS < 75 %	120 - 200	0,8 - 1,4
	DS 75 - 83 %		1,0 - 1,6
NO _x (lehtipuu)	DS < 75 %	120 - 200	0,8 - 1,4
	DS 75 - 83 %		1,0 - 1,7
Hiukkaset	Uusi laitos	10 - 25	0,02 - 0,2
	Olemassa olevat	10 - 40	0,02 - 0,3

Euroopan komission raportissa nostetaan esille ainoastaan eukalyptusta käyttävät tehtaat ja niiden ominaispäästöt. Koska eukalyptuksen keiton saanto on merkittävästi korkeampi kuin havu- ja lehtipuilla yleensä, ovat niiden ominaispäästöt myös pienemmät (European Commission 2015). Myös pohjoismaisten puulajien väliset erot pitäisi ottaa huomioon ominaispäästöjen tarkastelussa. Esimerkiksi mänty- ja koivusellun väliset erot keiton saannossa vaikuttavat oleellisesti tuotettuihin ominaissavukaasumääriin.

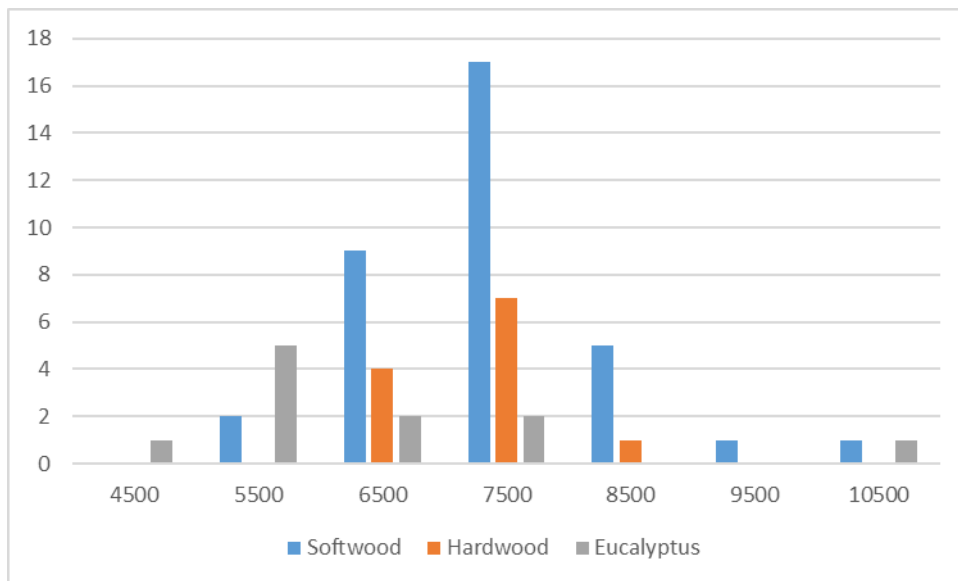
Taulukossa 3.1 on esitetty päästötasot alle 75 % kuiva-ainepitoisuuksille (DS) ja kuiva-ainepitoisuuksille välillä 75 - 83 %. Päästöjen vuosikeskiarvot on määritetty 6 % happipitoisuudella soodakattilassa.

3.2 Savukaasumäärät maittain ja puulajeittain

Taulukko 3.2: Maittain raportoidut savukaasumäärien keskiarvot

Averages	m ³ n/ADt
Austria	7289
Finland	7299
France	7696
Germany	7574
Portugal	6055
Spain	7121
Sweden	7236

Taulukossa 3.2 on Euroopan unionin IPCC BAT BREF dokumenttiin raportoidut maakohtaiset keskiarvot. Keskimäärin maat raportoivat lähes samoja savukaasuvirtoja per sellutonni. Ainoastaan Portugali (eukalyptus) raportoi merkittävästi pienempiä arvoja.



Kuva 3.1: Savukaasumäärät tehtaittain BAT BREF; kpl tehtaita $\pm 500 \text{ m}^3\text{n/ADt}$ kukin luokka.

Tehtaat eivät raportoineet kustakin puulajista tehtyä sellumäärää, vaan ainoastaan käytettiin mitä puulajeja. On kuitenkin mahdollista raportoida savukaasumäärät laajoina joukkoina, taulukko 3.3 ja kuva 3.1. Esimerkiksi eukalyptustehtaat käyttävät käytännössä vain eukalyptusta. Samoin havutehtaat käyttävät vain mäntyä ja kuusta. Mahdolliset puhtaat lehtipuutehtaat, mutta pääasiassa sekä havua että lehtipuuta käyttävät tehtaat on ryhmitelty joukoksi Seka.

Taulukko 3.3: Raportoidut soodakattilan savukaasumäärät puulajiryhmittäin, $\text{m}^3\text{n/ADt}$

Puulaji	Keskiarvo	Hajonta	Maksimi	Minimi
Havu	7487	1114	10491	5394
Seka	7213	598	8092	6076
Eukalyptus	6263	1640	10366	4235

Huomataan että edelleen havu- ja sekatehtaiden keskimääräiset savukaasumäärät ovat erittäin lähellä toisiaan, mutta kun lehtipuun määrää lisätään, niin savukaasumäärä laskee koska saanto on suurempi. Erityisesti eukalyptustehtaiden keskimääräiset savukaasumäärät paljon pienempiä.

Merkille pantavaa on myös, että kolme tehdasta raportoi yli 9000 m³n/ADt savukaasuvirtoja, jotka ovat isohkoja.

3.3 Savukaasumäärät Suomessa

Suomalaisissa tehtaissa Euroopan unionin IPCC BAT BREF dokumenttiin raportoitu savukaasumäärä vaihtelee, taulukko 3.4. Savukaasumäärä per tonni tuotettua sellua vaihtelee paljon. Savukaasumäärän vaihtelua ei ole aiemmin systemaattisesti tutkittu. Raportoinnin tarkistamiseksi oikeanpuolisena sarakkeena on savukaasumäärä, joka saataisiin, jos raportoitu NO_x sellutonnin kohti jaettaisiin raportoidulla pitoisuudella. Jos raportointi on kohdallaan, niin raportoitu ja laskettu savukaasumäärä olisivat lähes samat. Näin onkin suurelle osalle tehtaista.

Taulukko 3.4: Raportoidut NO_x päästöt ja savukaasumäärä verrattuna laskennalliseen arvoon suomalaisille soodakattilalle

	Raportoitu		Laskettu	
	kgNO ₂ /ADt	mgNO ₂ /m ³ n	m ³ n/ADt	m ³ n/ADt
A+B	1.58	150	10491	10533
C	1.36	175	6800	7760
D+E	1.26	220	5800	5727
F	1.78	162	8250	10988
I	1.22	171	7128	7135
J	1.42	193	7630	7358
K	1.85	252	7356	7341
L	1.35	170	7250	7941
M	2.01	236	7600	8517
O	1.05	124	7400	8468
P	1.63	202	8000	8069
R	1.13	149	7600	7584
T	1.43	185	6642	7730

Taulukossa 3.4 on tehtaot, joilla on kaksi kattilaa (A+B ja D+E) raportoitu molemmat kattilat yhdessä. Alhaisin savukaasumäärä on $5800 \text{ m}^3\text{n/ADt}$ ja suurin savukaasumäärä on $10491 \text{ m}^3\text{n/ADt}$. Herää kysymys, että jos savukaasumäärä tuotettua sellutonnia kohti vaihtelee 1:2, niin voiko tehtailla kuitenkin olla sama päästövaatimus $\text{kgNO}_x\text{/ADt}$. On huomattava, että vaikka savukaasujen maakohtaiset keskiarvot ovat lähellä toisiaan, niin yksittäisten tehtaiden savukaasumäärät eroavat toisistaan paljon.

4 Sellun keitto

Suomessa keitettiin 2018 noin 8694000 tonnia kemiallista sellua.

4.1 Keitossa käytetyt puulajit

Sellun valmistuksessa käytetyt puulajit voidaan jakaa havu- ja lehtipuulajeihin. Suomessa käytetään tyypillisesti lehtipuista koivua sekä havupuista mäntyä ja kuusta. Sulfaattisellun keitossa mäntypuun käyttö on kuitenkin yleisempää. Maailmalla käytetään näiden lisäksi muun muassa lehtipuihin kuuluvaa eukalyptusta.

Selluloosan keittoon vaikuttavia puulajien ominaisuuksia ovat muun muassa kuidun pituus ja kokojakauma, puun kemiallinen koostumus, tiheys sekä vesipitoisuus. Myös puun kasvupaikan sijainti ja ikä sekä lahoamisaste vaikuttavat keittoprosessiin ja siten myös keiton tulokseen. Tärkeimmät keiton parametreihin vaikuttavat ominaisuudet ovat kuitenkin puun morfologinen ja kemiallinen koostumus. (Gustafsson et al. 2011)

Havu- ja lehtipuiden erot kemialliselta koostumukseltaan vaikuttavat sellun keittoon sekä polttoon menevään mustalipeään. Puun tärkeimmät rakenneosat ovat selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini. Selluloosan osuus havu- ja lehtipuissa on tyypillisesti samaa luokkaa eli noin 40 - 45 % puun kuiva-aineesta. Havupuut sisältävät kuitenkin yleensä lehtipuita vähemmän hemiselluloosaa ja enemmän ligniiniä. (Willför *et al.* 2011) Suuruusluokat eri puiden kemiallisia koostumuksista on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1: Eri puulajien koostumuksia

Puulaji	Selluloosa, %	Hemiselluloosa, %	Ligniini, %	Uuteaineet, %
Kuusi	42	28	28	2
Mänty	42	26	27	5
Koivu	40	37	20	3
Eukalyptus	50	20	27	3
Akaasia	50	24	23	3

Lehtipuut sisältävät tyypillisesti useita erityyppisiä soluja, kuten kuitu-, putkilo-, peruskudos- sekä säteittäisiä peruskudossoluja. Eri solujen määrä ja jakautuminen vaihtelevat eri puiden välillä. Toisin kuin havupuut, lehtipuut eivät koostu suurimmaksi osaksi yhdestä tietyntyypistä solusta. Lehtipuiden kuidut ovat tyypillisesti huomattavasti lyhyempiä ja ohuempia verrattuna havupuihin.

Mustalipeä sisältää keiton aikana puusta liuenneita orgaanisia aineita, epäorgaanisia keittokemikaaleja ja vettä. Puun orgaanisesta aineksesta neljä merkittävintä ovat ligniini, polysakkaridit, karboksyylihapot sekä uuteaineet. (Vakkilainen 2000) Mustalipeän orgaanisen aineen määrä vaikuttaa suoraan syntyviin savukaasuihin.

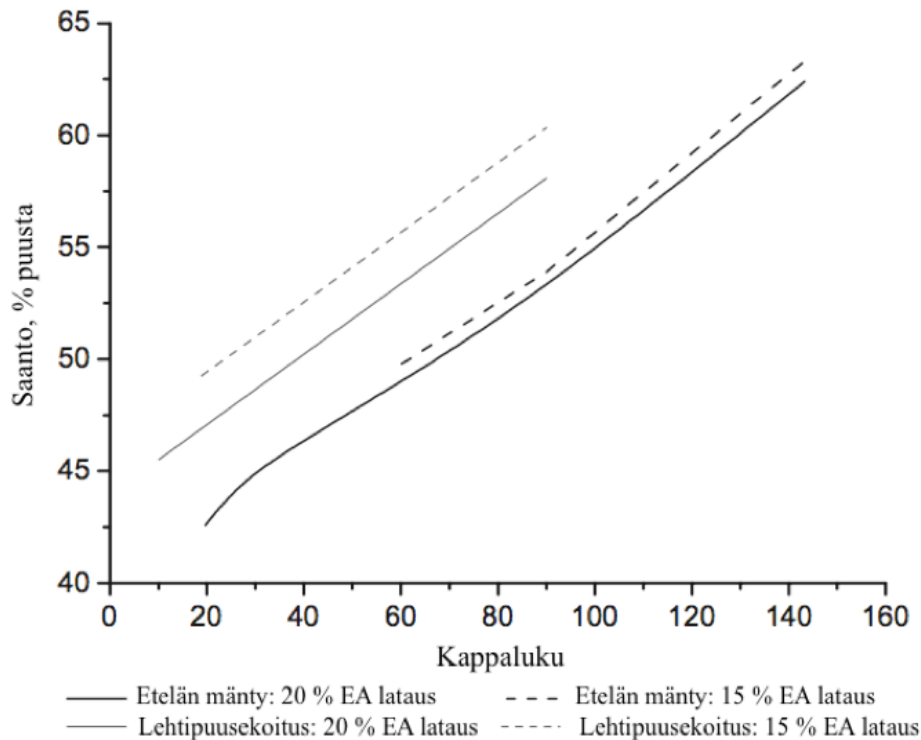
4.2 Keittoprosessin erot havu- ja lehtipuilla

Sellun keitossa käytettävän puulajin kemiallinen ja morfologinen koostumus määräävät pääosin keiton lopputuloksen, mutta myös keiton ominaisuuksilla on vaikutusta lopputulokseen. Keiton ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa ainoastaan puulajin ominaisuuksien sallimissa rajoissa. (Gustafsson *et al.* 2011)

Selluloosan hyvän laadun ja korkean saannon saamiseksi ligniinin poisto eli delignifointi rajoitetaan yleensä tiettyyn rajaan, jolle käytetään termiä kappaluku. Havupuille valkaistavan massan kappaluku on yleensä 25 - 30 ja lehtipuulle 14 - 20. (Sixta *et al.* 2006) Kappaluvulla tarkoitetaan kuiduissa jäljellä olevaa ligniinin määrää keiton jälkeen. Ligniinin poistoa jatketaan keiton jälkeen happivalkaisuvaiheessa, jonka takia ilmoitetaan yleensä myös kappaluku happivalkaisun jälkeen.

Keiton saantoprosentti vaikuttaa mustalipeään jäävään orgaanisen aineksen määrään. Saannolla tarkoitetaan sitä prosenttiosuutta, joka kuivasta puusta saadaan selluksi. Selluloosan keiton saanto on tyypillisesti havupuilla luokkaa 46 - 49 % ja lehtipuilla 50 - 53 %. Keiton saanto riippuu kappaluvusta ja havupuille tyypillisesti saantoprosentti nousee 0,14 % yhtä kappaluvun nostoa kohden, kun taas lehtipuilla se nousee 0,16 %. Aktiivisen alkaliannoksen määrä keitossa vaikuttaa myös keittoprosessin saantoon.

Lehtipuilla vaikutus on huomattavasti suurempi johtuen pienestä glukomannaanien määrästä. Prosentin nosto aktiivisen alkaalin määrässä laskee saantoa noin 0,15 % havupuulle, kun lehtipuulle se laskee noin 0,4 %. Keiton saanto kappaluvun suhteen lehtipuulle sekä männylle on esitetty kuvassa 4.1. (Sixta *et al.* 2006)



Kuva 4.1. Keiton saanto kappaluvun suhteen (Sixta *et al.* 2006).

Käytetty puulaji vaikuttaa delignifioinnin nopeuteen. Ligniinin poiston nopeus on eri havu- ja lehtipuiden kohdalla, mikä johtuu niiden sisältämän ligniinin erilaisesta rakenteesta. Havupuiden ligniini on pääosin *guaiacyl* -ligniiniä, kun lehtipuiden ligniini koostuu *guaiacyl* -ligniinistä ja *syringul* -ligniinistä. *Syringul* -ligniinin määrä vaikuttaa suoraan parantavasti ligniinin poiston nopeuteen. (Sixta *et al.* 2006) Koska lehtipuut sisältävät havupuita vähemmän ligniiniä, myös se nopeuttaa keittoa. Lehtipuun ligniini on myös sellaisessa muodossa, että siihen päästään helpommin käsiksi. Tästä johtuen lehtipuiden ligniinin poiston nopeus on suurempi kuin havupuiden. (Gustafsson *et al.* 2011)

5 Savukaasumäärän laskenta

Savukaasumäärän laskentaa on kehitetty Soodakattilayhdistyksen projekteissa perustuen alun perin amerikkalaiseen kirjallisuuteen. Soodakattilassa muodostuvat tyypilliset savukaasuvirrat lasketaan sellutehtaan keiton parametrien sekä muiden tuotantolukujen perusteella. Koska mustalipeän alkuaineanalyysiä ei ole käytössä, approksimoidaan se mustalipeän kuiva-aineen korkeamman lämpöarvon avulla. Mustalipeän lämpöarvo määritetään soodakattilan massataseen ja rakenneosien lämpöarvojen avulla. Alkuaineanalyysin perusteella voidaan määrittää muodostuvien savukaasujen määrä.

5.1 Mustalipeän lämpöarvon laskeminen

Soodakattilan massataseesta voidaan laskea muodostuvan mustalipeän eri komponenttien määrät tuotettua sellutonnin kohti. Mustalipeän kokonaislämpöarvo saadaan komponenttien lämpöarvojen summasta painotettuna komponenttien massaosuuksilla. Eri osakomponenttien lämpöarvot on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1: Mustalipeän eri komponenttien lämpöarvot.

Komponentti	Lämpöarvo, kJ/kg
Havupuun ligniini	26,900
Lehtipuun ligniini	25,110
Hiilihydraatit	13,555
Pihka, rasvahapot	37,710
Natriumsulfidi	12,900
Natriumthiosulfaatti	5,790

Alkuarvoina korkeamman lämpöarvon laskentaan tarvitaan käytetty puulaji ja keiton ominaisuuksia, kuten valkaisemattoman ilmakeiuvan sellun päivätuotanto, happivalkaisun saanto ja keiton kokonaissaanto, kappaluvut ennen ja jälkeen happivalkaisun, pesuvaiheiden tehokkuus valkaistulle ja valkaisemattomalle sellulle sekä suovan talteenoton tehokkuus. Lisäksi tarvitaan tietää, kuinka paljon syntyy vettä puun happojen

neutraloinnissa, lauhtumattomien kaasujen määrä sekä rikkipitoisuus lauhtumattomissa kaasuissa. Valkolipeästä syötetään alkuarvoina laskentaan aktiivisen alkaaliannoksen osuus puuta kohti, valkolipeän sulfiditeetti sekä kuiva-ainepitoisuus, kaustisoinnin tehokkuus ja valkolipeän reduktioprosentti. Happivalkaisussa käytetyn hapettuneen valkolipeän määrä sekä metanolin muodostuminen happivalkaisussa tulee myös syöttää laskentaan. Näiden avulla voidaan laskea mustalipeän eri komponenttien määrät tuotettua valkaistua ilmakeivää sellutonnin kohden ja sitä kautta mustalipeän kuiva-aineen lämpöarvo. Laskennan avulla saadaan myös mustalipeän kuiva-aineen massavirta soodakattilaan tuotettua ilmakeivää sellutonnin kohden. Laskenta perustuu Frederickin (1997) esittämään mustalipeän lämpöarvon laskentaan. Esimerkilaskelma mustalipeän lämpöarvon laskennasta mäntypuulle on esitetty liitteissä A ja B. Laskennassa käytetään alkuarvoina teoreettisia tyypillisiä arvoja. tehdaskohtaiseksi se saadaan vaihtamalla arvot vastaamaan tarkasteltavan tehtaan toimintaa.

5.2 Alkuaineanalyysin approksimointi

Saadun mustalipeän kuiva-aineen lämpöarvon avulla voidaan approksimoida sen alkuaineanalyysi savukaasulaskentaa varten. Alkuaineanalyysiin kuuluu yleensä hiilen, vedyn, typen, rikin, natriumin, kaliumin, kloridin sekä hapen massaosuudet. Korkeamman lämpöarvon perusteella ratkaistaan ensin hiilen määrä. Approksimointi perustuu satojen mustalipeäanalyyysien perusteella tehtyihin korrelaatioihin (Vakkilainen 2000). Alkuaineanalyysin approksimointi perustuu Vakkilaisen (2000) esittämään laskentaan.

$$C = 2,2022 \cdot HHV + 3,4839 \quad (1)$$

missä	C	hiilen massaosuus	[m-%]
	HHV	mustalipeän korkeampi lämpöarvo	[MJ/kgka]

Jos liitteen mukaisilla keiton parametreilla mäntysellulle saatiin lämpöarvoksi 15,132 MJ/kg_{ka}, niin yhtälön 1 mukaan voidaan laskea muodostuneen mustalipeän sisältämä hiilen massaosuus.

$$C = 2,2022 \cdot 15,132 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{ka}}} + 3,4839 = 36,8 \%$$

Mustalipeän sisältämän vedyn massaosuus voidaan laskea hiilen massaosuuden avulla. Massaosuuden laskenta perustuu tehtyihin mustalipeäanalyyseihin (Vakkilainen 2000).

$$H = 0,104 \cdot C \quad (2)$$

missä H vedyn massaosuus [m-%]

Sijoittamalla yhtälöön 2 jo laskettu hiilen massaosuus mustalipeässä, saadaan laskettua vedyn massaosuus. Esimerkkilaskelman mukaisella hiilen massaosuudella saadaan vedyn määräksi laskettua.

$$H = 0,104 \cdot 36,8 \% = 3,8 \%$$

Epäorgaanisten aineiden määrä voidaan approksimoida mustalipeän korkeamman lämpöarvon avulla. Epäorgaaninen osuus sisältää natriumin, rikin, kaliumin ja kloridin massaosuudet kuiva-aineessa.

$$IO = 51,8462 - 1,8012 \cdot HHV \quad (3)$$

missä IO epäorgaanisten massaosuus [m-%]

Mäntysellun mustalipeän korkeammalla lämpöarvolla 15,132 MJ/kg_{ka} voidaan määrittää epäorgaanisten aineiden osuus. Yhtälön 3 mukaisesti saadaan mustalipeän epäorgaanisten massaosuudeksi.

$$IO = 51,8462 - 1,8012 \cdot 15,132 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{ka}}} = 24,6 \%$$

Natriumin massaosuus mustalipeässä voidaan laskea epäorgaanisten massaosuuden ja rikin, kaliumin sekä kloridin erotuksena. Rikin, kaliumin ja kloridin massaosuuksille käytetään mustalipeäanalyyysien perusteella määritettyjä arvoja.

$$\text{Na} = \text{IO} - \text{S} - \text{K} - \text{Cl} \quad (4)$$

missä	S	rikin massaosuus	[m-%]
	K	kaliumin massaosuus	[m-%]
	Cl	kloorin massaosuus	[m-%]

Esimerkin mukaisilla mustalipeän arvoilla saadaan laskettua sen sisältämä natriumin määrä. Yhtälön 4 mukaan saadaan natriumin massaosuudeksi laskettua.

$$\text{Na} = (24,6 - 4,5 - 1,5 - 0,3) \% = 18,3 \%$$

Mustalipeän sisältämän hapen määrä saadaan, kun oletetaan ettei mustalipeä sisällä muita alkuaineita. Hapen määrä voidaan laskea vähentämällä 100 % jo lasketut muiden alkuaineiden massaosuudet.

$$\text{O} = 100 \% - \text{C} - \text{H} - \text{N} - \text{S} - \text{Na} - \text{K} - \text{Cl} \quad (5)$$

missä	O	hapen massaosuus	[m-%]
-------	---	------------------	-------

Esimerkiksi mäntysellun valmistuksessa muodostuvan mustalipeän sisältämä hapen määrä voidaan laskea yhtälön 5 mukaisesti. Hapen määräksi saadaan esimerkin mukaisilla arvoilla laskettua.

$$\text{O} = (100 - 36,8 - 3,8 - 0,1 - 4,5 - 18,3 - 1,5 - 0,3) \% = 34,7 \%$$

Näin saadaan mustalipeän kuiva-aineelle approksimoitua alkuaineanalyysi. Lasketut alkuaineanalyysit mänty- ja koivusellulle esimerkkiarvoilla on esitetty taulukossa 5.2. Laskuissa on käytetty havusellulle saantoa 45 % ja koivusellulle 51 %.

Taulukko 5.2: Laskettu mustalipeän alkuaineanalyysi massaosuuksina.

Komponentti	Koivu [m-%]	Mänty [m-%]
C	33,1	36,8
H	3,4	3,8
N	0,1	0,1
S	4,9	4,5
Na	20,9	18,3
K	1,5	1,5
Cl	0,3	0,3
O	35,7	34,7
IO	27,6	24,6

Alkuaineanalyysin perusteella voidaan määrittää muodostuneiden savukaasujen määrä sekä ominaissavukaasumäärä tuotettua ilmakeuivaa sellutonnin kohden käyttämällä Soodakattilayhdistyksen taselaskentaa. Savukaasumäärä lasketaan kuutiona savukaasua yhtä tuotettua ilmakeuivaa sellutonnin kohden.

5.3 Savukaasumäärän laskeminen

Soodakattilassa syntyy savukaasuja mustalipeän palamisen seurauksena. Savukaasut muodostuvat stökiometristen palamistuotteiden lisäksi kattilaan tulevasta ylimääräisestä palamisilmasta, palamisilman mukana tulleesta tyydestä sekä lisätystä vesihöyrystä. Stökiometrisiä eli täydellisen palamisen palamistuotteita mustalipeälle ovat hiilidioksidi ja vesihöyry, jotka muodostuvat hiilen ja vedyn palamisesta. Vesihöyryä tulee lisää savukaasuihin nuohouksen, ilmankosteuden ja mustalipeän sisältämän veden ansiosta. (Adams 1997) Palamisreaktioita voidaan tarkastella stökiometrisillä palamisyhtälöillä.



Savukaasujen kokonaismäärän laskeminen perustuu Adamsin (1997) esittämään sula- ja savukaasukomponenttien taselaskentaan. Osa hiilestä reagoi natriumin, kaliumin ja hapen kanssa muodostaen natrium- sekä kaliumkarbonaattia. Kaikki mustalipeän sisältämä hiili

ei siis pala hiilidioksidiksi muodostaen savukaasuja. Natrium, rikki, kloori ja kalium muodostavat sulareaktioissa natrium- ja kaliumkarbonaatin lisäksi muun muassa natriumsulfidia, natriumsulfaattia ja natriumkloridia. (Adams 1997) Palamisen ilmakertoimena käytetään laskennassa 1,2 eli palamisessa on 20 % ylimääräistä ilmaa.

Savukaasujen tiheydeksi oletetaan $1,234 \text{ kg/m}^3$. Ilman kosteuden oletetaan olevan $0,0135 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$ kuivaa ilmaa. Laskennassa jätetään huomioimatta natriumsulfaattilisäys, koska Suomen soodakattiloilla sitä ei ole enää käytössä. Nuohoushöyryn ja mustalipeän lämmityshöyryn vaikutukset muodostuviin savukaasuihin jätetään huomioimatta, koska tarkastellaan ainoastaan puulajin vaikutusta kuivaan savukaasuun. (Vakkilainen 2017.) Tarkasteltavien tehtaiden savukaasut lasketaan edellä esitetyllä tavalla mänty- ja koivusellulle sekä kokonaissavukaasumäärä painotettuna puun käytön prosenttiosuuksilla.

6 Laskennan tulokset

Kappaleessa neljä esitettyä laskentamenetelmää käyttäen pystytään laskemaan soodakattilaan menevän mustalipeän massavirta tuotettua sellutonna kohden, approksimoimaan mustalipeän ominaisuuksia sekä laskemaan syntyvä savukaasuvirta. Savukaasuvirtojen laskentaan ei ollut käytössä todellisia keiton parametreja vaan laskenta suoritettiin teoreettisilla arvoilla.

6.1 Tyypilliset savukaasuvirrat eri saannoilla

Työssä laskettiin mänty- sekä koivusellulle tyypilliset savukaasuvirrat käyttäen modernille tehtaalte tyypillisiä keittoparametreja sekä tuotantoa. Käytetyt laskennan alkuarvot mänty- ja koivusellulle on esitetty liitteessä. Savukaasumäärä laskettiin havusellulle saantoprosenteilla 41 - 48 %. Koivusellulle käytettiin laskennassa saantoprosentteja 48 - 55 %. Käytännössä saantoprosentin vaihtuessa muutkin keiton arvot voivat vaihdella. Esimerkiksi saannon ja keiton kappaluvun riippuvuus kuvan 3.1 mukaisesti vaikuttaisi laskentaan, mutta tätä ei kuitenkaan huomioitu taulukoissa.

Taulukko 6.1: Tyypilliset savukaasumäärät männylle eri saantoprosenteilla.

Saanto [%]	Savukaasumäärä [$\text{m}^3\text{n}/\text{ADt}$]
41	10040
42	9698
43	9371
44	9059
45	8761
46	8476
47	8203
48	7942

Taulukko 6.2: Tyypilliset savukaasumäärät koivulle eri saantoprosenteilla.

Saanto [%]	Savukaasumäärä [$\text{m}^3\text{n}/\text{ADt}$]
48	7005
49	6774
50	6553
51	6341
52	6136
53	5940
54	5750
55	5568

Taulukoista 6.1 ja 6.2 voidaan huomata, että mänty- ja koivusellulle lasketut teoreettiset savukaasumäärät eri saantoprosenteilla vaihtelevat merkittävästi puulajien välillä.

Koivusellun suurempi saantoprosentti ja eroavaisuudet puuaineen koostumuksessa pienentävät soodakattilan ominaissavukaasumäärää. Keiton eroavaisuudet, kuten kappaluku vaikuttavat syntyvän mustalipeän orgaanisen eli palavan aineksen määrään. Kappaluku ennen happivalkaisua käytettäessä koivusellua oli esimerkin mukaisissa laskuissa 18, kun mäntysellulla käytettiin arvoa 28. Esimerkiksi koivusellulle tyypillisellä saantoprosentilla 51 % ja mäntysellun saannolla 45 % männyn savukaasumäärä on 2420 normaalikuutiometriä enemmän tuotettua sellutonnia kohden. Edellä mainituilla saantoprosenteilla mäntysellun savukaasumäärä on 38 % koivusellua suurempi. Vaikka tarkastelisi 48 % saannolla mänty- ja koivusellun tuotannosta saatavan mustalipeän polton savukaasuja, voidaan huomata koivun savukaasumäärän olevan pienempi. Jos vertaillaan saatuja tuloksia männyn- ja koivun välillä alkaen pienimmistä saantoprosenteista koko tarkasteluvälille, mäntysellun tuotannolla soodakattilan savukaasumäärät ovat keskimäärin 43 % koivusellua suuremmat. Erot johtuvat keiton erilaisista ominaisuuksista käytettäessä koivua ja mäntyä. Koivu sisältää tyypillisesti vähemmän ligniiniä, kuin havupuut sekä sen keitossa ligniinin poistoa voidaan jatkaa pitempään eli pienempään kappalukuun. Tämän takia saantoprosentti on korkeampi ja mustalipeään jää vähemmän palavaa orgaanista ainesta.

Laskennan perusteella voidaan todeta, että mänty- ja koivusellun merkittävästi poikkeavat savukaasumäärät aiheuttavat erisuuruisen päästömäärän käytettäessä samaa päästöjen pitoisuutta. BAT -dokumentti asettaa mänty- ja koivusellua valmistavat tehtaat eriarvoiseen asemaan sallittujen soodakattilan päästöjen pitoisuuksien vuoksi, koska se ei ota tarpeeksi huomioon savukaasumäärissä olevaa eroa. Esimerkiksi BAT BREF taulukon mukaan sallittu NO_x -päästöjen vuotuinen keskiarvo on 120 - 200 mg/m^3 niin havu- kuin lehtipuulle. Vuotuiset keskiarvot NO_x -päästöille laskettuna koivulle 51 % saannolla ja männylle 45 % saannolla ovat 1,3 kg NO_x/ADt ja 1,8 kg NO_x/ADt . Havusellua valmistava tehdas tuottaa siis teoreettisilla savukaasumäärillä 0,5 kg enemmän NO_x -päästöjä tuotettua sellutonnia kohden. Taulukon mukaan sallittu NO_x -päästöjen vuotuinen keskiarvo on 75-83 % kuiva-aineella havusellulla on 1,0 - 1,6 kg NO_x/ADt ja koivusellulla 1,0 - 1,7 kg NO_x/ADt .

6.2 Suomen sellutehtaiden savukaasuvirrat EU-raportti

Suomen sellutehtaille laskettiin teoreettiset savukaasumäärät ja verrattiin niitä EU raportoinnissa ilmoitettuihin savukaasumääriin. Vertailua laskettujen ja ilmoitettujen savukaasumäärien välillä haittaa se että keiton parametrit vaihtelevat. Vertailukelpoisempia tuloksia saadaan, vain jos jokaisen tehtaan savukaasumäärä lasketaan kyseisen tehtaan keiton- ja tuotannonparametrien mukaisesti.

Laskennassa tarkasteltiin 15 soodakattilaa 13 eri sellutehtaalla. Kahden tehtaan soodakattiloita ei sisällytetty tarkasteluun. Tehtaat on nimetty kirjaimilla A-M, koska tehtaita ei haluta yksilöidä. Tehtailla F ja H on käytössä kaksi soodakattilaa, joiden savukaasuja tarkasteltiin työssä yhteenlaskettuna. Eri tehtaiden tuotannosta tiedettiin ainoastaan niiden käyttämän havu- ja lehtipuun määrä prosentteina sekä mustalipeän kuiva-ainepitoisuus polttoon mennessä. Tiedot perustuvat BAT-raportoinnin kyselylomakkeisiin Suomen sellutehtaille koskien vuoden 2008 tietoja (European Commission 2011). Havupuuna käytettiin laskennassa mäntyä, vaikka tehtailla käytetään todennäköisesti myös pieniä määriä kuusta. Saantoprosenttina käytettiin eri tehtaiden laskennassa männylle 45 % ja koivulle 51 %. Kullekin tehtaalle laskettiin savukaasumäärä mänty- ja koivupuulle edellä esitetyn laskennan mukaisesti. Laskennassa alkuarvoihin vaihdettiin kullekin tehtaalle sen mustalipeän tunnettu kuiva-ainepitoisuus. Tehtaan kokonaissavukaasumäärä laskettiin yhteen havu- ja koivusellun savukaasumääristä eri puulajien prosenttiosuuksilla painotettuna. Taulukossa 6.3 on esitetty eri tehtaiden puun käytön prosenttiosuudet, mustalipeän kuiva-ainepitoisuudet sekä ilmoitetut, että lasketut savukaasumäärät.

Tehtailla F ja H savukaasumäärän ilmoittaminen poikkeaa merkittävästi muista tehtaista. Tehtaalla F kahden soodakattilan savukaasumäärät on ilmoitettu yhtenä lukuna, joka on huomattavasti teoreettista savukaasumäärää pienempi. Tehtaalla H on ilmoitettu savukaasumäärä kummallekin soodakattilalle erikseen, mikä yhteenlaskettuna poikkeaa melko merkittävästi teoreettisesti lasketusta savukaasumäärästä.

Taulukko 6.3. Suomen sellutehtaiden soodakattiloiden ilmoitetut sekä lasketut savukaasumäärät.

Tehdas	Havu [%]	Koivu [%]	Mustalipeän kuiva-aine [%]	Savukaasu (ilmoitettu) [m ³ n/ADt]	Savukaasu (laskettu) [m ³ n/ADt]	Savukaasu (ero) [m ³ n/ADt]
A	44	56	70,0	7128	7529	401
B	100	0	81,0	8250	8620	370
C	65	35	82,0	7356	7761	405
D	100	0	78,0	7630	8688	1058
E	62	38	73,2	7500	7885	385
F	45	55	73,0	5800	7477	1677
G	100	0	70,0	7250	8898	1648
H	100	0	80,0	4235 / 6256	8642	1849
I	60	40	75,0	-	7793	N.A.
J	35	65	77,0	7600	7144	-456
K	60	40	78,0	6800	7725	925
L	38	62	82,3	6642	7109	467
M	52	48	82,0	7400	7450	50

Taulukosta 6.3 voidaan huomata, että ilmoitetut arvot vastaavat melko hyvin keskimääräisillä luvuilla kaskettuja arvoja muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Pääsääntöisesti laskettu savukaasumäärä on ilmoitettua arvoa n. 10% isompi. Liian suuret lasketut savukaasumäärät voivat johtua käytetyistä laskentaparametreista. Laskennassa käytetyt keiton saannot ovat ehkä liian huonoja tai happipitoisuudet ylempiä. Lisäksi erilaiset matalalämpöiset lisävirrat kuten bioliete lisäävät poltettavia tonneja, mutta eivät lisää kuivaa savukaasuvirtaa. Pelkästään havupuuta käyttävillä tehtailla, lasketut savukaasumäärät ovat huomattavan paljon ilmoitettua suurempia. Tehtailla, joissa poltetaan mustalipeitä korkealla kuiva-aineella, teoreettiset savukaasumäärät vastasivat parhaiten ilmoitettuja arvoja.

Tehtaiden ominaissavukaasumäärät vaihtelevat melko paljon riippumatta käytettyjen puulajien prosenttiosuuksista. Taulukosta 6.3 voidaan kuitenkin huomata, että pääsääntöisesti koivun suurempi käyttö tuotannossa näkyy pienemmissä ominaissavukaasumäärissä. Jos ei huomioida tehtaan F ilmoittamaa savukaasumäärää

5800 m³n/ADt kahdelle soodakattilalle, pienin ilmoitettu sekä laskettu savukaasumäärä on tehtaalla L jonka keitto poikkeaa muista. Tehdas L käyttää tuotannossaan 62 % koivua sekä 38 % havua, ja se käyttää ilmoitetuista arvoista suurinta mustalipeän kuiva-ainepitoisuutta. Suuren kuiva-aineosuuden ja koivunkäytön johdosta tehtaan L ilmoittama savukaasumäärä on 6642 ja laskettu 7109 m³n/ADt.

6.3 Vertailu laskennan ja raportoidun savukaasuviran välillä

Eräs Suomen sellutehdas (tehdas M) raportoi laajasti omasta savukaasuvirrastaan sekä tehtaan toiminnasta. Siksi on mahdollista tavanomaista paremmin vertailla laskentaa ja mittauksia.

Taulukko 6.4. Joitain pääparametrejä, tehdas M.

Muuttuja	Laatu	Mitattu	Laskettu
Savukaasumäärä (kuiva)	m ³ n/kgka	4.35	4.81
Savukaasumäärä (märkä)	m ³ n/kgka	5.31	5.51
Savukaasu sellutonnin kohti (kuiva)	m ³ n/ADt	6983	7298
Savukaasu sellutonnin kohti (märkä)	m ³ n/ADt	8519	8351

Edelleen oletusarvoilla laskettu on isompi. On huomattava, että tässä soodakattilassa on pesuri, jolloin mitattu märkä savukaasumäärä laskee (vettä lauhtuu pesurissa) verrattuna laskennalliseen märkään savukaasumäärään (vesihöyry savukaasuissa poistuu lahtumattomana).

7 Tiedonkeruu

Soodakattiloiden savukaasumääristä haluttiin kerätä tarkennettuja tietoja kyselyllä, joka lähetettiin 8/2019 kaikille soodakattiloille Suomessa. Tietoja pyydettiin vielä uudestaan. Vastausprosenttiin jäi parantamista, mutta puolelle eli kahdeksalle kattilalle kuudestatoista saatiin tarkennettu laskenta (raportoijat D,E,F, M,N,O,P ja U).

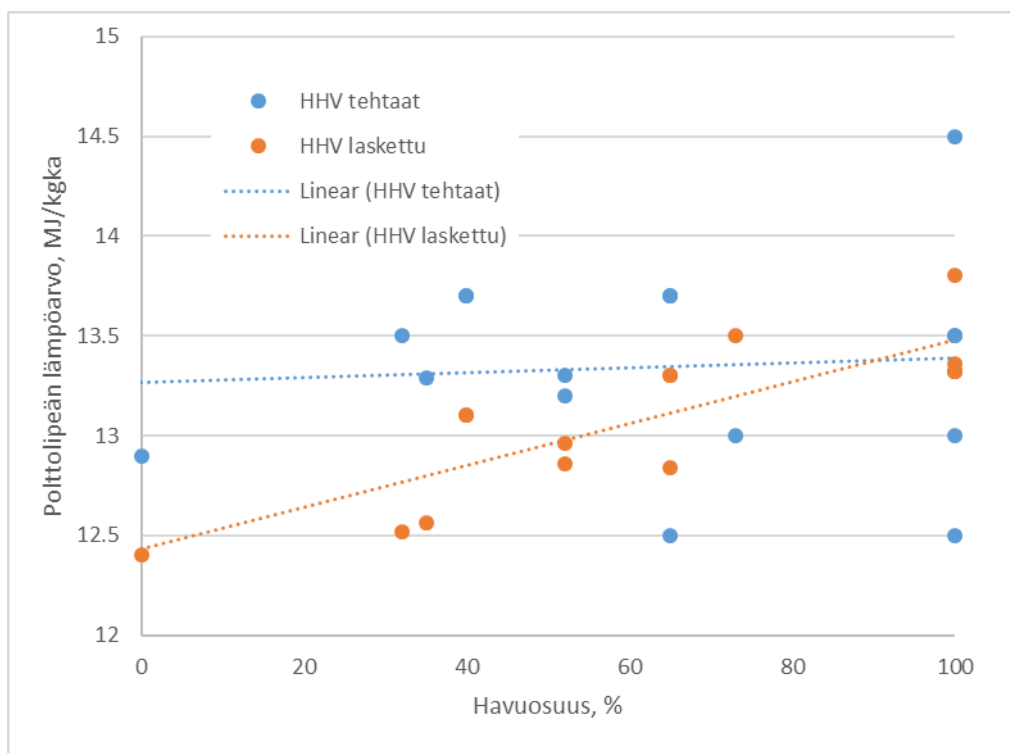
7.1 Vertailu kahdeksassa kattilassa

Kooste raportoiduista tiedoista ovat liitteessä. Raportoinnin tueksi on käytetty myös äskeistä Soodakattilayhdistyksen raporttia, ” Mustalipeän polttomenetelmät Suomen soodakattiloissa (2018)”. Taulukossa 7.1 on koottuna 2018 toiminnassa olleet Suomen soodakattilat. Neljä ensimmäistä saraketta on mustalipeän polttomenetelmistä ja kaksi viimeistä on tässä raportissa kerätyistä tiedoista. HHV tarkoittaa polttolipeän lämpöarvoa.

Taulukko 7.1. Suomen sellutehtaiden soodakattiloiden lasketut savukaasumäärät 2018.

Kattila	Havu [%]	Koivu [%]	Mustalipeän kuiva-aine [%]	HHV (ilmoitettu) [MJ/kaka]	HHV (laskettu) [MJ/kgka]	Savukaasu (laskettu) [m ³ n/ADt]
A	100	0	80	13.5	13.32	6966
B	100	0	80	13.5	13.32	6966
C	65	35	75	12.5	13.30	6301
D	40	60	72	13.7	13.10	5957
E	40	60	72	13.7	13.10	5957
F	100	0	80	12.5	13.36	7167
J	100	0	78	13.0	13.32	6967
K	35	65	82	13.29	12.56	5731
L	65	35	75	13.7	13.30	6301
M	65	35	78	13.7	12.84	5522
N	73	27	77	13.0	13.50	6830
O	52	48	83.5	13.2	12.86	5906
P	100	0	72	14.5	13.80	4754
R	0	100	74	12.9	12.40	5066
T	32	68	82	13.5	12.52	5674
U	52	48	82	13.3	12.96	6073
keskiarvo				13.3	13.1	6133

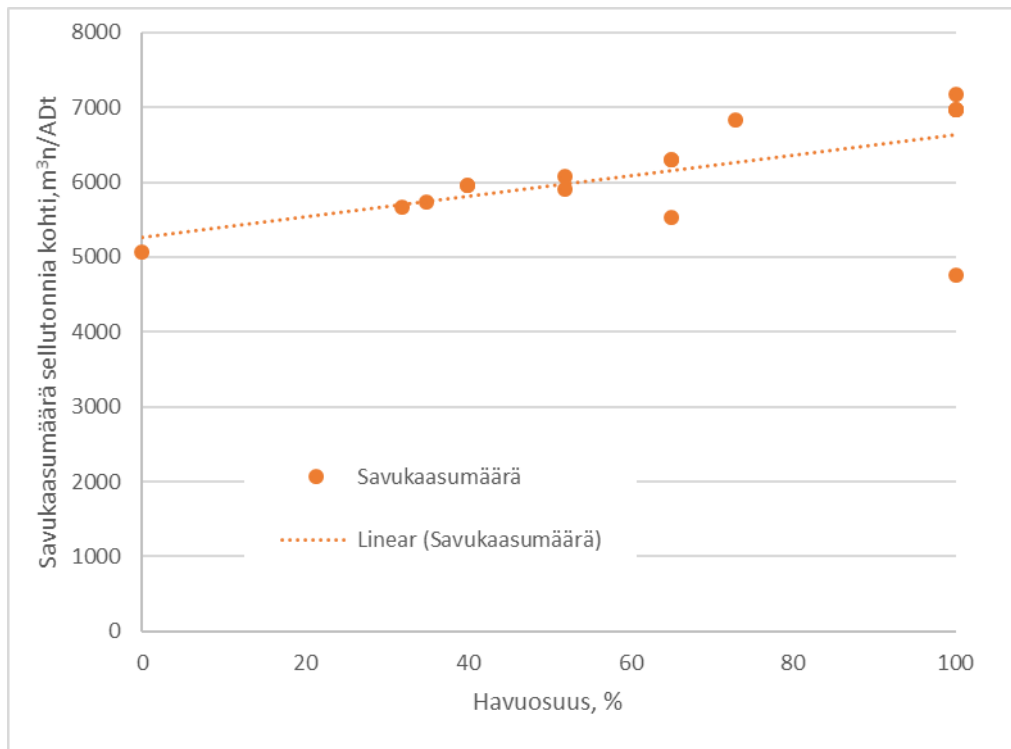
Laskennalliset mustalipeän lämpöarvot ja aiemmin kerätyt mustalipeän lämpöarvot ovat lähellä toisiaan, kuva 7.1. Kuitenkaan kerätyt lämpöarvot eivät ole voimakkaasti puulajipitoisuuden mukaan korreloivia, toisin kuin laskennalliset. Yleensä kuitenkin kirjallisuudessa lehtipuulipeän lämpöarvo on alhaisempi kuin havulipeän. Koska keräysajankohdasta ei ole tietoa eikä kerätyn arvon edustavuudesta ole selvyyttä, johtopäätöksiä on haastava tehdä.



Kuva 7.1. Polttoliipeän lämpöarvo puulajin mukaan.

Laskennallinen savukaasumäärä on esitetty kuvassa 7.2 puulajin funktiona. Kuten mustalipeän lämpöarvosta saattaa päätellä, savukaasumäärä on selkeästi puulajiin korreloiva. Havulla tulee enemmän savukaasua kuin lehtipuulla. Kuvassa näkyy myös keittotavan (saannon) vaikutus eli samalla havupitoisuudella on eroja savukaasumäärässä.

Valitettavasti raportoidut savukaasumäärät eivät olleet yksikäsitteisiä kerätyissä tiedoissa. Kuitenkin kuva 7.2 auttaa yhdistyksen jäseniä arvioimaan mitä kuiva savukaasumäärä voisi olla.



Kuva 7.2. Savukaasumäärä tonnia valkaistua selluloosaa kohti puulajin mukaan.

7.2 Haasteita laskennassa

Eräs haaste tehdyssä tiedonkeruussa on se, että talteenottohenkilöstön piti täyttää kupongissa tietoja, jotka kuuluvat enemmän kuitulinjan henkilöstön tietotaidon piiriin.

Savukaasumäärän raportoinnissa on iso haaste se, että pitää erittäin tarkasti miettiä mitä seuraavista savukaasuvirroista raportoidaan.

- kuiva savukaasuvirta nimellisolosuhteissa, NTP $\text{m}^3\text{n}(\text{kuivaa})/\text{s}$
- kostea savukaasuvirta nimellisolosuhteissa, NTP $\text{m}^3\text{n}(\text{kostea})/\text{s}$

– kuiva savukaasuvirta todellisissa olosuhteissa	$\text{m}^3(\text{kuivaa})/\text{s}$
– kostea savukaasuvirta todellisissa olosuhteissa	$\text{m}^3\text{n}(\text{kostea})/\text{s}$
– kuiva savukaasuvirta nimellisolosuhteissa, NTP, 6% O_2	$\text{m}^3\text{n}(\text{kuivaa})/\text{s}$
– kostea savukaasuvirta nimellisolosuhteissa, NTP, 4% O_2	$\text{m}^3\text{n}(\text{kostea})/\text{s}$
– kuiva savukaasuvirta todellisissa olosuhteissa, 3% O_2	$\text{m}^3(\text{kuivaa})/\text{s}$
– kostea savukaasuvirta todellisissa olosuhteissa, 2% O_2	$\text{m}^3\text{n}(\text{kostea})/\text{s}$

Kun puhutaan ominaissavukaasumäärästä paljon sotkua aiheuttaa juuri kuiva- ja kostea savukaasu, sekä päästöraportoinnin vaatimus mittaushappipitoisuuden korjaamiseen raportointihappipitoisuuteen, esim. 3% tai 6% O_2 kuivissa.

Vuotojen takia happipitoisuus nousee kohti piippua, jossa happipitoisuus on tyypillisesti suurin ja siten suurin virtausmäärä. On huomattava, että jos pitoisuus ja savukaasuvirtaus raportoidaan samassa yksikössä ei virhettä päästöjen massavirrassa tule.

Toimitettuun tietojenkeruuseen oli päässyt virheellistä dataa. Kaikkien ligniinien lämpöarvo oli sama. Tämä oli onneksi helppo korjata raportoituihin tuloksiin. Vaikutus oli, että havumustalipeän lämpöarvo oli 0.96 MJ/kgka liian korkea. Koivumustalipeän lämpöarvo oli oikein. Vastaavasti kokonaislämpömäärä kattilaan oli liian korkea riippuen havuosuudesta. Massavirrat olivat oikein.

8 Yhteenveto

Lähtökohtana työlle oli Suomen Soodakattilayhdistyksen tarve selvittää eri puulajien käytön vaikutuksia muodostuviin ominaissavukaasuihin ja päästöjen määrään. Työn tavoitteena oli selvittää soodakattilan tyypilliset savukaasumäärät eri puulajeilla sekä tarkistaa laskennallisesti Suomen soodakattiloiden ilmoittamat savukaasumäärät.

Teoriaosuudessa tarkasteltiin soodakattiloita sekä niiden toimintaa ja tehtäviä yleensä. Lisäksi työssä tarkasteltiin eri puulajien eroja sekä niiden vaikutusta selluloosan keittoon ja syntyvään mustalipeään. Laskennallisessa osuudessa määritettiin ominaissavukaasumäärä keiton saannon funktiona männylle sekä koivulle. Lisäksi laskettiin teoreettiset savukaasumäärät Suomen sellutehtaille käyttäen kaikille tehtaille samoja keiton arvoja.

Soodakattiloiden kirjallisuustarkastelun, kerätyn tiedon sekä laskennan tuloksien perusteella muodostuvissa savukaasumäärissä voitiin havaita selvä ero männyn ja koivun välillä. Ominaissavukaasumäärän erot tulisi ottaa myös tarkemmin huomioon päästötarkastelussa käytettäessä eri puulajeja. Todellisilla keiton ominaisuuksilla työssä esitettyä laskentamenetelmää voitaisiin hyödyntää soodakattiloiden savukaasumittausten tarkistamisessa, varsinkin ennen seuraavaa raportointikierrosta.

Tarkka savukaasumäärän tunteminen on hyvin tärkeää soodakattiloiden ympäristötarkastelun näkökulmasta, joten savukaasujen määrittystä tulee jatkossakin kehittää. Kun tunnetaan soodakattiloiden todelliset ominaissavukaasumäärät, voitaisiin myös päästötavoitteita kohdentaa paremmin eri puulajeja käyttäville tehtaille.

Viitteet

- Barynin, Jan A. and Dickinson, J. A., 1985, Considerations for the uprating of recovery boilers. Proceedings of 1985 International Chemical Recovery Conference, New Orleans, Louisiana, Book 1, pp. 49–53.
- Burton, Dave, 2000, Practical experiences with ABB recovery boilers. UEF Conference on Behavior of Inorganic Materials in Recovery Boilers, Bar Harbor, Maine, 4 - 9 June 2000. United Engineering Foundation, 28 p.
- European Commission, 2015, Best Available Techniques (BAT), Reference document for the Pulp and Paper Industry. JRC Science and Policy Report [e-document]. [retrieved June 13 2017]. From: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>
- Finnish Forest Industry, 2017, [online]. [retrieved December 19 2017]. From: <http://www2.forestindustries.fi/statistics/tilastokuviot/Energy/Forms/DispForm.aspx?ID=81&RootFolder=%2fstatistics%2ftilastokuviot%2fEnergy%2fJulkinen%2dEN&Source=http%3A%2F%2Fwww2%2Fforestindustries%2Efi%2Fstatistics%2Ftilastokuviot%2FEnergy%2FForms%2FAllItems%2Easpx>:
- La Fond, John F.; Verloop, Arie and Jansen, Johan H., 1993, Recovery boiler fireside capacity: an update of theory and practice. *Tappi Journal*, Vol. 76, No. 9, September 1993, pp. 107–113.
- Frederick, James Wm., 1997, Black Liquor Properties. in *Kraft Recovery Boilers*. Atlanta, Tappi Press, 381 p. ISBN 0962598593.
- Gustafsson, Jan; Alén, Raimo; Engström, Johan; Korpinen, Risto; Kuusisto, Petteri; Leavitt, Aaron; Olsson, Krister; Piira, Jussi; Samuelsson, Anders and Sundquist, Jorma, 2008, Pulping. in *Chemical Pulping part 1, Papermaking Science and Technology vol 6*. Porvoo. Paperi ja Puu Oy. 748 p. ISBN 9789525216417
- Haaga, Kari; Vettenranta, Aino and Mansikkasalo, Jarmo, 2017, XXL size recovery boilers, present status and future prospects. Proceedings International Chemical Recovery Conference 2017, May 24-26, 2017, Halifax (NS), Canada, 10 p. ISBN 9781772890037.
- Haaga, Kari, 2014, XXL recovery boilers, how we developed them. in Vakkilainen, Esa; Lampinen, Päivi and Nieminen, Markus, Eds. *Continuous development of recovery boiler technology–50 years of cooperation in Finland*. Vantaa, 135 p.
- Heinola, Marja and Salmenoja, Keijo, 2014, High energy recovery boilers. in Vakkilainen, Esa; Lampinen, Päivi and Nieminen, Markus, Eds. *Continuous*

development of recovery boiler technology–50 years of cooperation in Finland. Vantaa, 135 p.

Juvonen, Tuukka, 2004, Mustalipeän polttomenetelmät Suomen soodakattiloissa. Suomen Soodakattilayhdistys ry (Finnish Recovery Boiler Committee), Report 3/2004, 3.5.2004, 80 p.

Järvinen, Mika; Kankkunen, Ari and Miikkulainen, Pasi, 2016, Controlling the Droplet Size and Initial Velocity of Flashing Black Liquor Sprays. Proceedings 2016 Pulping, Engineering, Environmental, Recycling, Sustainability (PEERS) Conference, 9 p.

Lindberg, Andreas, 2010, NO_x-päästöt soodakattilasta 6.9.2010. (16A0913-E0116) Suomen Soodakattilayhdistys r.y. (Finnish Recovery Boiler Committee), Report 8/2010, 22 p.

Luostarinen, Kari; Vakkilainen, Esa K.; Cardoso, Marcelo; Matheus de Almeida, Gustavo and Hamaguchi, Marcelo, 2018, Variation of recovery boiler NO_x-emissions based on wood species, boiler age and other operating parameters. *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes*, Vol. 7, No. 3, pp. 23–30.

Maakala, Viljami and Miikkulainen, Pasi, 2015, Dimensioning a recovery boiler furnace using mathematical optimization. *Tappi Journal*, Vol. 14, No. 2, February 2015, pp. 119–129.

Maakala, Viljami; Järvinen, Mika, and Vuorinen, Ville, 2017, Mixing of high momentum flux jets with a confined crossflow: computational analysis and applications to recovery boiler air systems. Proceedings International Chemical Recovery Conference 2017, May 24-26, 2017, Halifax (NS), Canada, 10 p. ISBN 9781772890037.

Sixta, Herbert; Potthast, Antje and Krottschek, Andreas W., 2006, Chemical pulping. In Handbook of Pulp, edited by Herbert Sixta, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 978 p. ISBN 3527309993.

Vakkilainen, Esa. 2000. Chemical recovery. In: Papermaking Science and Technology Book 6B; Chemical Pulping , Jyväskylä, Fapet Oy, p.7.

Vakkilainen, Esa, 2005, Kraft recovery boilers–Principles and practice. Suomen Soodakattilayhdistys r.y., (Finnish Recovery Boiler Committee), Valopaino Oy, Helsinki, Finland, 246 p. ISBN 9529186037.

Vakkilainen, Esa, 2007, Recovery boiler liquor spraying practices. International Chemical Recovery Conference May 29-June 1, 2007, Quebec City, QC, Canada, 6 p.

Wallén, Jonas; Viiala, Juhani and Björkström, Ingvar, 2002, Operational performance of Billerud Gruvön's new recovery boiler with environmental friendly solutions.

Proceedings of 2002 TAPPI Fall Technical Conference, September 8 - 11, San Diego, Ca, 10 p.

Walsh, Alan R. and Srandell, Olof, 1992, Use of design and operating data to determine recovery boiler upgrade potential. Proceedings of 1992 International Chemical Recovery Conference, Seattle, Washington, June 7-11, pp. 421–428.

Willför, Stefan; Alén, Raimo; van Dam, Jan; Liu, Zhiming and Tähtinen, Miia, 2011, Raw Materials. in Chemical Pulping part 1, Papermaking Science and Technology vol 6. Porvoo. Paperi ja Puu Oy. 748 p. ISBN 9789525216417.

Liite A: Kyselykaavake

Pyydetin täyttämään datasivu

Keitto

Keitettävä puulaji

Keittomäärät tyypillisesti

Keiton saanto

Valkolipeä

Sulfiditeetti

Kaustisiteetti

Reduktio

Kattila

Kuiva-aine

Happipitoisuus

Mitattu savukaasumäärä (kattilan mittaukset)

Raportoitu savukaasumäärä (päästöraportti)

Kommentti

Havu

60 %

45 %

Koivu

40 %

51 %

35 %

80 %

94 %

35 %

80 %

94 %

75 %

3 %

4.5 m³n/kgka

3.5 m³n/kgka

75 %

3 %

4.2 m³n/kgka

3.2 m³n/kgka

Mustalipeän lämpöarvo

15132

**kJ/kg
MLka**

13448

kJ/kg MLka

Lämpö soodakattilaan

26.787

GJ/t sellua

19.545

GJ/t sellua

Mustalipeän kuva-aine sellua kohti

1.70

tDS/Adt

1.38

tDS/Adt

Savukaasuvurta

Havu

4.79 m³n/kgka

4.18 m³n/kgka

7400 m³n/Adt

8472 m³n/Adt

Koivu

4.20 m³n/kgka

3.63 m³n/kgka

5271 m³n/Adt

6099 m³n/Adt

Keskimäärin

Savukaasun happi ajotilassa (kuiva)

3.00 %

Savukaasun happi ajotilassa (märkä)

2.61 %

Savukaasumäärä (märkä)

4.42 m³n/kgka

Raportoitu savukaasumäärä

4.38 m³n/kgka

Mitattu savukaasumäärä

3.38 m³n/kgka

Savukaasu sellutonnin kohti (kuiva)

6367 m³n/Adt

Savukaasu sellutonnin kohti (märkä)

7314 m³n/Adt

Liite B: Laskentasiivu

Laskentasiivun yhteenveto

<u>Soodakattilan savukaasulaskenta</u>				
Muuttujat:				
Tulokset:				
Keiton parametrit (alkuarvot)				
Keiton puulaji	1		Puulaji	
Ilmakuivattu valkaisuamaton selluloosa	3000	t/24 h	1	Mänty
Happivalkaisun saanto	96	%	2	Kuusi
Kuivatun valkaisuamattoman sellun saanto puusta	45	%	3	Koivu
Keiton kappaluku ennen happivalkaisua	28		4	Eukalyptus
Keiton kappaluku happivalkaisun jälkeen	14		5	Muu
Pesun tehokkuus valkaisuamattomalla sellulla	99	%		
Pesun tehokkuus valkaistulla sellulla	99	%		
Suovan erotuksen tehokkuus	80	%		
Puun happojen neutraloinnissa syntyvä vesi	100	kg/t sellua		
Lauhtumattomien kaasujen tuotanto keitossa	3	% puusta		
Rikin määrä lauhtumattomissa kaasuissa	2	kg/t sellua		
Valkoliipeä				
Aktiivinen alkaliannos, Na ₂ O-% puusta	18.6	%	24.0	NaOH-% puusta
Valkoliipeän sulfiditeetti	35	%		
Valkoliipeän kuiva-ainepitoisuus (väkevyys)	15	% jolla		
Kaustisoituminen	80	%		
Valkoliipeän reduktio	94	%		
Mustaliipeän kuiva-ainepitoisuus	80	%		
Hapettunut valkoliipeä				
Hapettuneen valkoliipeän käyttö happivalkaisussa	200	kg/t sellua		
Metanolin muodostuminen happivalkaisussa	0.2	kg/t sellua		
Lämpöarvo	14383	kJ/kg Mlka		
Lämpö soodakattilaan	25.461	GJ/t valkaistu sellu		
Lämpö soodakattilaan	0.796	GJ/s		
Massavirta	5088.2	tka/24h		
Massavirta	58.9	kgka/s		

Savukaasuvirta				
Savukaasut 1.2	4.46	m ³ n/kgds		
Kuivat savukaasut	3.94	m ³ n(dry)/kgds		
Savukaasuvirta (kuiva)	6966	m ³ n/Adt		
Savukaasuvirta (märkä)	7890	m ³ n/Adt		
Orgaaniset yhdisteet				
Ilmakuivattua valkaistua sellua		2880	t/24h	
Kuivattua valkaistua sellua		2592	t/24h	
Kuivaa valkaisematonta sellua		2700	t/24h	
Kuivaa puuta tarvitaan		6000	t/24h	
Puun tarve 1000 kg valkaistun sellun tuottamiseen		2222	kg/t sellua	
Häviöt haihtuvina (sisältäen TRS-yhdisteet)		67	kg/t sellua	
TRS-yhdisteiden häviöt (metyylimerkaptania)		3	kg/t sellua	
Puun happojen neutraloinnissa syntyvä vesi		100	kg/t sellua	
Orgaaniset yhdisteet mustalipeässä		1157	kg/t sellua	
Orgaaniset yhdisteet sellussa		995	kg/t sellua	
Puun ligniini valmistettaessa 1000 kg sellua		600	kg/t sellua	
Ligniini valkaisemattomassa sellussa		42	kg/t sellua	
Mustalipeän sisältämä ligniini		558	kg/t sellua	
Mäntyöljy pihkasta ja rasvahapoista		24	kg/t sellua	
Mäntyöljyn jäännös		0	kg/t sellua	
Mäntyöljyn talteenotto		19	kg/t sellua	
Mäntyöly mustalipeässä		5	kg/t sellua	
Muiden orgaanisten yhdisteiden muodostuminen		89	kg/t sellua	
Muut orgaaniset yhdisteet selluun		1	kg/t sellua	
Muut orgaaniset yhdisteet mustalipeään		88	kg/t sellua	
Orgaaniset hapot mustalipeään		507	kg/t sellua	
<u>Orgaaniset ainekset yhteensä mustalipeässä</u>		<u>1157</u>	kg/t sellua	
Ligniinin lämpöarvo		14116	kJ/kg sellua	
Pihkan ja rasvahappojen lämpöarvo		176	kJ/kg sellua	
Orgaanisten happojen lämpöarvo		6666	kJ/kg sellua	
Muiden orgaanisten yhdisteiden lämpöarvo		1624	kJ/kg sellua	
Orgaanisten yhdisteiden lämpöarvo yhteensä		<u>22582</u>	kJ/kg sellua	

Epäorgaaniset yhdisteet			
Valkoliipeä			
Aktiivinen alkaaliannos, NaOH-% kuivasta puusta		24 %	
Aktiivinen alkaali kg/t valkais. sellua, Na ₂ O		413 kg/t sellua	
Aktiivinen alkaali kg/t valkaisem. sellua, NaOH		529 kg/t sellua	
NaOH lataus Na ₂ O:na		269 kg/t sellua	
NaOH lataus NaOH:na		347 kg/t sellua	
Na ₂ S lataus Na ₂ O:na		145 kg/t sellua	
Na ₂ S lataus NaOH:na		187 kg/t sellua	
Aktiivisen alkalin konsentraatio, Na ₂ O		113 g/l	
Aktiivisen alkalin konsentraatio, NaOH		146 g/l	
TTA konsentraatio, Na ₂ O		176 g/l	
TTA konsentraatio, NaOH		227 g/l	
Valkoliipeän tiheys		1169 g/l	
Na ₂ CO ₃ valkoliipeässä Na ₂ O:na		54 kg/t sellua	
Na ₂ SO ₄ valkoliipeässä Na ₂ O:na		9 kg/t sellua	
Epäorgaaniset yhdisteet valkoliipeässä yhteensä		<u>641</u> kg/t sellua	
Epäorgaaniset yhdisteet valkoliipeässä Na ₂ O:na		476 kg/t sellua	
Mustaliipeä			
NaOH mustaliipeässä		123 kg/t sellua	
Orgaanisesti sitoutunut Na mustaliipeässä		129 kg/t sellua	
Na ₂ S mustaliipeässä		175 kg/t sellua	
Na ₂ CO ₃ mustaliipeässä		91 kg/t sellua	
Na ₂ SO ₄ mustaliipeässä		20 kg/t sellua	
Epäorgaaniset yhdisteet mustaliipeässä		<u>539</u> kg/t sellua	
Epäorgaanisten yhdisteiden (Na₂S) lämpöarvo		2120 kJ/kg sellua	
Epäorgaaniset yhdisteet puussa			
NaOH sellussa		1 kg/t sellua	
Orgaanisesti sitoutunut Na sellussa		1 kg/t sellua	
Na ₂ S sellussa		2 kg/t sellua	
Na ₂ CO ₃ sellussa		1 kg/t sellua	
Na ₂ SO ₄ sellussa		0 kg/t sellua	
Epäorgaaniset yhdisteet sellussa		<u>5</u> kg/t sellua	
<u>Mustaliipeän kuiva-aineen määrä keitosta</u>		<u>1696</u> kg/t sellua	

Happivaihe				
Valkaistun massan muodostuminen		960	kg/t sellua	
Epäorgaaniset yhdisteet valkaistussa massassa		6	kg/t sellua	
Orgaaniset yhdisteet valkaistussa massassa		954	kg/t sellua	
Valkaisemattoman sellun häviö valkaisussa		40	kg/t sellua	
Ligniini valkaistussa sellussa		23	kg/t sellua	
Ligniinin liukeneminen valkaisun jäteveeseen		19	kg/t sellua	
Metanolin muodostuminen		0.2	kg/t sellua	
Orgaaniset hapot valkaisun jäteveeseen		20	kg/t sellua	
<u>Orgaaniset yhdisteet valkaisun jätevedessä</u>		40	kg/t sellua	
Valkoliipeän hapettumisreaktio: $2\text{Na}_2\text{S} + 2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + 2\text{NaOH}$				
Hapettuneen valkoliipeän käyttö happivalkaisussa		200	kg/t sellua	
Hapettumattoman valkoliipeän kuiva-aine		15	%	
Hapettumattoman valkoliipeän kuiva-aine		150	kg/t valkoliipeää	
Hapettumattoman valkoliipeän vesi		850	kg/t valkoliipeää	
Hapettumattoman valkoliipeän Na ₂ S-osuus		28	%	
Hapettumattoman valkoliipeän NaOH-osuus		54	%	
Hapettumattoman valkoliipeän Na ₂ CO ₃ -osuus		14	%	
Hapettumattoman valkoliipeän Na ₂ SO ₄ -osuus		3	%	
Yhteensä		100	%	
Valkoliipeän hapetusreaktio: $2\text{Na}_2\text{S} + 2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + 2\text{NaOH}$				
Na ₂ S tonnissa hapettumatonta valkoliipeää		43	kg/t hapettumatonta valkoliipeää	
Na ₂ S ₂ O ₃ hapettumisreaktiossa		43	kg/t hapettumatonta valkoliipeää	
NaOH muodostuminen hapettumisreaktiossa		22	kg/t hapettumatonta valkoliipeää	
Veden häviö hapettumisreaktiossa		5	kg/t hapettumatonta valkoliipeää	
NaOH hapettuneessa valkoliipeässä		103	kg/1021 kg valkoliipeää	
Na ₂ S ₂ O ₃ hapettuneessa valkoliipeässä		43	kg/1021 kg valkoliipeää	
Na ₂ CO ₃ hapettuneessa valkoliipeässä		22	kg/1021 kg valkoliipeää	
Na ₂ SO ₄ hapettuneessa valkoliipeässä		5	kg/1021 kg valkoliipeää	
Vesi hapettuneessa valkoliipeässä		845	kg/1021 kg valkoliipeää	
Hapettunut valkoliipeä yhteensä		1017	kg	
Happivalkaisussa Na ₂ S ₂ O ₃ hapettuu kokonaan Na ₂ SO ₄				
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + 2\text{O}_2 + 2\text{NaOH} \Rightarrow 2\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$				
Happivalkaisun NaOH käyttö tiosulfaatin hapettamiseen		22	kg/1021 kg valkoliipeää	
Happivalkaisun Na ₂ SO ₄ syntyy tiosulfaatin hapettamisessa		78	kg/1021 kg valkoliipeää	
Happivalkaisun H ₂ O syntyy tiosulfaatin hapettamisessa		5	kg/1021 kg valkoliipeää	
Veden ja epäorgaanisten summa valkaisun jäännöksessä		1078	kg	

NaOH happivalkaisun jäännöksessä		15	kg/t sellua	
Na ₂ S ₂ O ₃ happivalkaisun jäännöksessä		0	kg/t sellua	
Na ₂ CO ₃ happivalkaisun jäännöksessä		4	kg/t sellua	
Na ₂ SO ₄ happivalkaisun jäännöksessä		15	kg/t sellua	
Epäorgaaniset yhdisteet yhteensä valkaisun jäteveteen		34	kg/t sellua	
Kuiva-aineet valkaisun jäännöksessä		74	kg/t sellua	
Ligniinin lämpöarvo valkaisun jäännöksessä		492	kJ/kg sellua	
Orgaanisten happojen lämpöarvo valkaisun jäännöksessä		268	kJ/kg sellua	
Na ₂ S ₂ O ₃ lämpöarvo valkaisun jäännöksessä		0	kJ/kg sellua	
Valkaisun jäännöksen lämpöarvo yhteensä		760	kJ/kg sellua	
Mustalipeän ja valkaisu- ja jäännöksen kuiva-aineet yhteensä		1770	kg/t sellua	
Mustalipeän kokonaislämpöarvo		25461	kJ/kg sellua	
<u>Mustalipeän kuiva-aineen lämpöarvo</u>		<u>14383</u>	kJ/kg mustalipeän ka	
Kuiva-aine kattilaan		1770	kg/t sellua	
Kuiva-aineesta orgaanista		67.63	%	
Mustalipeää kattilaan (kostea)		2213	kg/t sellua	
Mustalipeän tiheys		1400	g/l	
<u>Lämpö soodakattilaan</u>		<u>25.46</u>	GJ/t sellua	
		<u>0.796</u>	GJ/s	
	Moolimassat			
Na ₂ O	61.97894	g/mol		
NaOH	39.99707	"		
Alkali konversio NaOH		=	1.2906665	Na ₂ O

LÄHTÖARVOJA YM				
Compounds in liquor and their heating values				
	SI heating value			
ORG. ACIDS FROM CARBOHYDRATES				
softwood (Pine)	13155	kJ/kg		
softwood (Spruce)	13340	kJ/kg		
hardwood (Birch)	13555	kJ/kg		
Hardwood (Euca)	13555	kJ/kg		
LIGNIN				
softwood (Pine)	25300	kJ/kg		
softwood (Spruce)	26900	kJ/kg		
hardwood (Birch)	25110	kJ/kg		
Hardwood (Euca)	25110	kJ/kg		
ivat arvot ovat:				
it smaller				
e bit larger)				
softwoodlignin		26377	kJ/kg	
hardwoodlignin		24702	kJ/kg	
Acids from carbohydrates		17585	kJ/kg	
RESINS				
rosins and fatty acids	36710	kJ/kg		
OTHER ORGANIC COMPOUNDS				
other organic compounds	18455	kJ/kg		
INORGANIC SUBSTANCES				
Na ₂ S ₂ O ₃	5790	kJ/kg		
Na ₂ S	12090	kJ/kg		
Na ₂ SO ₄	0	kJ/kg		
NaOH	0	kJ/kg		
Na ₂ CO ₃	0	kJ/kg		
Others	0	kJ/kg		
SMELLY GASES AND VOLATILES				
CH ₃ SH	26100	kJ/kg		
CH ₃ SCH ₃	30900	kJ/kg		
CH ₃ SSCH ₃	23600	kJ/kg		
methanol	22300	kJ/kg		
turpentine	29200	kJ/kg		
REACTION HEATS	465	MJ/t pulp		

Liite C: Saadut vastaukset

		A	B	C	D	E	F
		<i>Havu</i>	<i>Havu</i>	<i>Havu</i>	Havu	Havu	Havu
Mustalipeän lämpöarvo	kJ/kg MLka	14383	14383	14383	14421	14421	14429
Lämpö soodakattilaan	GJ/ADt	25.46	25.46	25.46	25.37	25.37	26.20
Mustalipeää	tDS/Adt	1.70	1.70	1.70	1.68	1.68	1.74
Savukaasu 1.2 (märkä)	m ³ n/kgka	4.46	4.46	4.52	4.60	4.60	4.47
Savukaasu 1.2 (kuiva)	m ³ n/kgka	3.94	3.94	3.94	3.95	3.95	3.95
Savukaasu (kuiva)	m ³ n/ADt	6966	6966	6966	6940	6940	7167
Savukaasu (märkä)	m ³ n/ADt	7890	7890	8010	8085	8085	8115
Happipitoisuus	%	3.00	3.00	3.00	5.80	5.80	2.00
Mitattu savukaasumäärä	m ³ n/ADt	4.20	4.20	4.20	4.80	4.80	4.25
Raportoitu	m ³ n/ADt	3.20	3.20	3.20	4.80	4.80	3.50
		<i>Koivu</i>	<i>Koivu</i>	<i>Koivu</i>	Koivu	Koivu	Koivu
Mustalipeän lämpöarvo	kJ/kg MLka	13018	13018	13018	13225	13225	13680
Lämpö soodakattilaan	GJ/ADt	18.92	18.92	18.92	19.74	19.74	20.51
Mustalipeää	tDS/Adt	1.38	1.38	1.38	1.42	1.42	1.42
Savukaasu 1.2 (märkä)	m ³ n/kgka	3.98	3.98	4.05	4.18	4.18	4.21
Savukaasu 1.2 (kuiva)	m ³ n/kgka	3.49	3.49	3.49	3.55	3.55	3.70
Savukaasu (kuiva)	m ³ n/ADt	5066	5066	5066	5301	5301	5545
Savukaasu (märkä)	m ³ n/ADt	5783	5783	5881	6235	6235	6305
Happipitoisuus	%	3.00	3.00	3.00	5.80	5.80	2.20
Savukaasu 1.2 (märkä)	m ³ n/kgka	4.33	4.33	4.24	5.00	5.00	4.47
Raportoitu	m ³ n/kgka	4.50	4.50	4.40	4.80	4.80	4.30
Savukaasu (kuiva)	m ³ n/ADt	6966	6966	6301	5957	5957	7167
Savukaasu (märkä)	m ³ n/ADt	7890	7890	7265	6975	6975	8115

		J	K	L	M	N	O
		Havu	Havu	Havu	Havu	Havu	Havu
Mustalipeän lämpöarvo	kJ/kg MLka	14383	14383	14383	14256	14990	14380
Lämpö soodakattilaan	GJ/ADt	25.46	25.46	25.46	23.65	24.75	23.80
Mustalipeää	tDS/Adt	1.70	1.70	1.70	1.58	1.64	1.58
Savukaasu 1.2 (märkä)	m ³ n/kgka	4.54	4.43	4.52	4.45	4.77	4.45
Savukaasu 1.2 (kuiva)	m ³ n/kgka	3.94	3.94	3.94	3.89	4.14	3.93
Savukaasu (kuiva)	m ³ n/ADt	6966	6966	6966	6455	6830	6505
Savukaasu (märkä)	m ³ n/ADt	8036	7847	8010	7384	7873	7368
Happipitoisuus	%	3.00	3.00	3.00	7.00	4.60	2.80
Mitattu savukaasumäärä	m ³ n/ADt	4.20	4.20	4.20	4.17	0.00	3.90
Raportoitu	m ³ n/ADt	3.20	3.20	3.20	4.15	0.00	3.90
		Koivu	Koivu	Koivu	Koivu	Koivu	Koivu
Mustalipeän lämpöarvo	kJ/kg MLka	13018	13018	13018	13026	13242	13180
Lämpö soodakattilaan	GJ/ADt	18.92	18.92	18.92	18.40	19.20	16.82
Mustalipeää	tDS/Adt	1.38	1.38	1.38	1.34	1.38	1.20
Savukaasu 1.2 (märkä)	m ³ n/kgka	4.00	3.95	4.05	4.02	4.16	4.03
Savukaasu 1.2 (kuiva)	m ³ n/kgka	3.49	3.49	3.49	3.49	3.56	3.53
Savukaasu (kuiva)	m ³ n/ADt	5066	5066	5066	4925	5162	4510
Savukaasu (märkä)	m ³ n/ADt	5821	5747	5881	5680	6025	5143
Happipitoisuus	%	3.00	3.00	3.00	7.00	4.60	2.80
Savukaasu 1.2 (märkä)	m ³ n/kgka	4.41	4.01	4.24	5.24	5.09	4.16
Raportoitu	m ³ n/kgka	4.50	4.31	4.40	4.16	4.92	3.90
Savukaasu (kuiva)	m ³ n/ADt	6966	5731	6301	5522	6830	5906
Savukaasu (märkä)	m ³ n/ADt	8036	6482	7265	6344	7873	6700

		P	R	T	U		
		Havu	Havu	Havu	Havu		
Mustalipeän lämpöarvo	kJ/kg MLka	14485	14383	14383	14531		
Lämpö soodakattilaan	GJ/ADt	17.37	25.46	25.46	23.99		
Mustalipeää	tDS/ADt	1.12	1.70	1.70	1.58		
Savukaasu 1.2 (märkä)	m ³ n/kgka	4.63	4.54	4.43	4.48		
Savukaasu 1.2 (kuiva)	m ³ n/kgka	3.96	3.94	3.94	3.98		
Savukaasu (kuiva)	m ³ n/ADt	4754	6966	6966	6565		
Savukaasu (märkä)	m ³ n/ADt	5549	8036	7847	7391		
Happipitoisuus	%	3.00	3.00	3.00	3.20		
Mitattu savukaasumäärä	m ³ n/ADt	4.20	4.20	4.20	4.49		
Raportoitu	m ³ n/ADt	3.20	3.20	3.20	3.20		
		Koivu	Koivu	Koivu	Koivu		
Mustalipeän lämpöarvo	kJ/kg MLka	13018	13018	13018	13318		
Lämpö soodakattilaan	GJ/ADt	18.92	18.92	18.92	18.72		
Mustalipeää	tDS/ADt	1.38	1.38	1.38	1.33		
Savukaasu 1.2 (märkä)	m ³ n/kgka	4.05	4.06	3.95	4.05		
Savukaasu 1.2 (kuiva)	m ³ n/kgka	3.49	3.49	3.49	3.58		
Savukaasu (kuiva)	m ³ n/ADt	5066	5066	5066	5027		
Savukaasu (märkä)	m ³ n/ADt	5881	5902	5747	5694		
Happipitoisuus	%	3.00	3.00	3.00	3.20		
Savukaasu 1.2 (märkä)	m ³ n/kgka	4.50	3.95	3.99	4.27		
Raportoitu	m ³ n/kgka	4.50	4.20	4.30	4.49		
Savukaasu (kuiva)	m ³ n/ADt	4754	5066	5674	6073		
Savukaasu (märkä)	m ³ n/ADt	5549	5902	6419	6848		