

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Soodakattilan savukaasuvirrat eri puulajeilla

Flue gas flows of a recovery boiler with different wood
species

Työn tarkastaja: Professori Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja: Professori Esa Vakkilainen

Lappeenranta 24.4.2017

Simo Lyytinen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Simo Lyytinen

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Professori Esa Vakkilainen

Kandidaatintyö 2017: Soodakattilan savukaasuvirrat eri puulajeilla

Sivuja 30, kuvia 2, taulukoita 8 ja liitteitä 3.

Hakusanat: soodakattila, savukaasut, mustalipeä, saanto

Soodakattiloiden ympäristötarkastelussa Euroopan komission BAT -raportti ei erittele eri puulajien käytön vaikutusta päästötavoitteisiin. Työn tavoitteena on selvittää eri puulajien käytön vaikutusta soodakattilan ominaissavukaasumäärään sekä tarkistaa teoreettisesti Suomen soodakattiloiden savukaasumäärät. Työ liittyy Soodakattilayhdistys ry:n selvityspyyntöön tyypillisistä savukaasumääristä.

Työssä tarkasteltiin soodakattiloiden tehtäviä ja ominaisuuksia yleisesti sekä pohdittiin savukaasumäärään vaikuttavia tekijöitä. Kirjallisuuden perusteella tarkasteltiin myös eri puulajien eroja ja niiden vaikutusta selluloosan keittoon sekä mustalipeän syntyyn. Laskentaosuudessa laskettiin savukaasumäärät männylle ja koivulle saantoprosentin funktiona. Lisäksi laskettiin teoreettiset savukaasumäärät Suomen soodakattiloille ja verrattiin niitä vuoden 2008 ilmoitettuihin savukaasumääriin.

Teoriaosuuteen sekä laskennan tuloksiin pohjautuen voidaan todeta, että ominaissavukaasumäärässä on selvä ero männyn ja koivun välillä. Erot tulisi ottaa selkeämmin huomioon soodakattiloiden ympäristötarkastelussa ja päästöarvoissa. Tarkempi ja luotettavampi vertailu laskettujen ja ilmoitettujen arvojen välillä voitaisiin tehdä, jos tiedettäisiin tarkasti tehtaiden keiton ominaisuudet. Savukaasujen tarkka määrittäminen on tärkeässä roolissa soodakattiloiden ympäristötarkastelussa.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Symboli- ja lyhennekuettelo	4
1 Johdanto	6
2 Soodakattila	7
2.1 Soodakattilan tehtävät ja toiminta	7
2.2 Palamisilman syöttö	8
2.3 Mustalipeän palaminen.....	10
2.4 Päästöt ilmaan.....	11
3 Savukaasuvirtoihin vaikuttavat tekijät	13
3.1 Keitossa käytetyt puulajit	14
3.2 Keittoprosessin erot havu- ja lehtipuilla.....	15
3.3 Euroopan Komission BAT-raportti	13
4 Savukaasuvirtojen laskenta	17
4.1 Mustalipeän lämpöarvon laskeminen	17
4.2 Alkuaineanalyysin approksimointi	18
4.3 Savukaasumäärän laskeminen	21
5 Laskennan tulokset	23
5.1 Tyypilliset savukaasuvirrat eri saannoilla	23
5.2 Suomen sellutehtaiden savukaasuvirrat.....	24
6 Yhteenveto	28
Lähdeluettelo	29

Liite 1. Esimerkki mustalipeän lämpöarvon määrityksestä

Liite 2. Esimerkki savukaasumäärän laskennasta männylle

Liite 3. Laskennan alkuarvot mänty- ja koivusellulle

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO**Kemialliset merkit**

C	hiili
Cl	kloori
CO	hiilimonoksidi
CO ₂	hiilidioksidi
H	vety
H ₂ O	vesi
K	kalium
K ₂ CO ₃	kaliumkarbonaatti
N	typpi
Na	natrium
NaCl	natriumkloridi
Na ₂ CO ₃	natriumkarbonaatti
Na ₂ S	natriumsulfidi
Na ₂ SO ₄	natriumsulfaatti
NaOH	natriumhydroksidi
NO _x	typen oksidit
O	happi
S	rikki
SO ₂	rikkidioksidi

Lyhenteet

BAT	paras käytettävissä oleva teknologia
DS	dry solids, kuiva-aine
HHV	korkeampi lämpöarvo
IO	epäorgaaniset aineet
TRS	pelkistyneet rikkiyhdisteet
VOC	palamattomat orgaaniset yhdisteet

1 JOHDANTO

Mustalipeän polttoon tarkoitettujen soodakattiloiden osuus Suomen energiantuotannossa on merkittävä. Metsäteollisuuden jäteliemien osuus Suomen uusiutuvan energian tuotannosta on yli kolmannes (SVT 2017). Sellun vienti on viime vuosina kasvanut tasaisesti ja esimerkiksi vuodesta 2014 vuoteen 2015 se kasvoi 4 %. Samaan aikaan viennin arvo kasvoi 12,9 %. (Metsäteollisuus ry. 2017.)

Teollisuuden ja energiantuotannon tiukentuneet päästötavoitteet velvoittavat vähentämään soodakattiloiden päästöjä. Euroopan komission parhaan käytettävissä olevan teknologian (BAT) dokumentti vuodelta 2015 asettaa ohjearvot metsäteollisuuden ja sellutehtaiden päästöille. Dokumentti ei erittele eri puulajeja käyttävien sellutehtaiden päästöjä eikä savukaasujen määriä, vaikka sellutehtaan käyttämä puulaji vaikuttaa sellun saantoprosenttiin ja sitä kautta soodakattilalle menevään palavan orgaanisen aineksen määrään. Työ liittyy Suomen Soodakattilayhdistyksen ympäristötyöryhmän haluun selvittää tyypilliset savukaasumäärät eri puulajeilla.

Työn tavoitteena on selvittää eri puulajien käytön vaikutusta soodakattilan tyypillisiin savukaasuvirtoihin. Työssä lasketaan teoreettinen savukaasumäärä mänty- ja koivusellutehtaalte eri saantoprosenteilla. Lisäksi lasketaan Suomen soodakattiloille teoreettiset savukaasumäärät tehtaiden käyttämien puulajien osuuksien mukaisesti. Näitä teoreettisia savukaasumääriä verrataan eri tehtaiden raportoiimiin savukaasuihin.

Teoriaosuudessa käydään läpi modernin soodakattilan ominaisuuksia sekä savukaasuihin vaikuttavia tekijöitä. Kirjallisuuden perusteella paneudutaan myös eri puulajien eroihin sekä niiden vaikutuksiin muodostuvissa savukaasuissa. Laskennallinen osuus koostuu soodakattilan tyypillisten savukaasumäärien määrittämisestä eri puulajeille ja tehtaille.

Tutkimuksen pohjalta voidaan parantaa eri puulajien muodostamien savukaasuvirtojen laskentaa Suomen soodakattiloissa. Kun tiedetään soodakattiloiden tyypilliset savukaasumäärät, voidaan arvioida savukaasumittausten paikkansapitävyyttä sekä kohdistaa päästötavoitteita paremmin eri puulajeja käyttäville sellutehtaille.

2 SOODAKATTILA

Selluloosan valmistuksessa käytetyin menetelmä on sulfaattikeitto, jossa puuraaka-aineesta erotetaan kuidut voimakkaan alkaalisessa keitossa. Sulfaattikeitossa vaikuttavina kemikaaleina ovat natriumhydroksidi (NaOH) ja natriumsulfidi (Na_2S). Keitossa puuraaka-aineen kuituja sitova ligniini ja osa hemiselluloosasta liukenevat keittolipeään, jolloin saadaan erotettua puun kuidut selluloosaksi. Kuitujen erotuksen ja pesun jälkeen keittolipeästä jää jäljelle mustalipeää. Mustalipeä sisältää pääosin puusta irronneita orgaanisia yhdisteitä sekä keitossa käytettyjä epäorgaanisia kemikaaleja. (Hupa & Hyöty 2002, 522.)

Soodakattila on sellutehtaan mustalipeän polttoon ja keittokemikaalien talteenottoon tarkoitettu höyrykattila. Soodakattilassa poltetaan sulfaattisellun keitossa syntyvää mustalipeää, jolloin saadaan tuotettua höyryä ja sähköä tehtaan tarpeisiin. Samalla soodakattilan avulla otetaan talteen selluloosan keitossa käytettyjä kemikaaleja jatkokäsittelyä ja käyttöä varten. Soodakattilan tehokas toiminta on ratkaisevassa osassa sellutehtaan toiminnassa. (Hupa & Hyöty 2002, 522-524.)

Suomessa on tällä hetkellä käytössä 17 soodakattilaa, maailmalla soodakattiloita on yhteensä noin 700. Soodakattilat tuottavat yli kolmanneksen Suomen uusiutuvan energian tuotannosta eli voidaan puhua yhdestä merkittävimmästä uusiutuvan energian lähteestä. (Soodakattilayhdistys ry 2017.)

2.1 Soodakattilan tehtävät ja toiminta

Soodakattilalla on kaksi päätehtävää. Mustalipeän epäorgaanisten keittokemikaalien talteenotto sekä orgaanisen aineksen palamisesta vapautuvan lämpöenergian hyödyntäminen höyryntuotannossa. Tämän kaksiluonteisen toiminnallisuuden vuoksi soodakattilan suunnittelu ja käyttö ovat huomattavasti haasteellisempia kuin tavanomaisen muuta polttoainetta käyttävän höyrykattilan. (Adams 1997, 3.) Soodakattilan kolmas päätavoite on myös tehtaan muiden päästölähteiden ympäristöystävällinen vähentäminen niitä polttamalla (Vakkilainen 2005, 2-1).

Soodakattilan ensimmäinen päätehtävä on ottaa talteen sellun keitossa käytetyt kemikaalit eli rikki ja natrium sopivassa muodossa jatkokäsittelyä varten. Epäorgaanisten

aineiden talteenotto koostuu useasta eri osaprosessista, jotka tapahtuvat yhtä aikaa soodakattilassa. Soodakattila pyrkii pelkistämään kattilan pohjalla olevan sulan rikin natriumsulfidiksi sekä muodostamaan sulaa epäorgaanista ainesta jatkokäsittelyyn. Tämä epäorgaaninen sula sisältää pääosin natriumkarbonaattia ja natriumsulfidia. Sula johdetaan kattilan pohjasta ulos liotussäiliöön, jossa se liukenee laihaan valkolipeään muodostaen viherlipeää. Soodakattila pyrkii myös ottamaan talteen epäorgaaniset yhdisteet savukaasuista sekä muodostamaan natriumhöyryä palamisessa syntyneiden rikkiyhdisteiden talteenottoa varten. (Vakkilainen 2005, 1-2.)

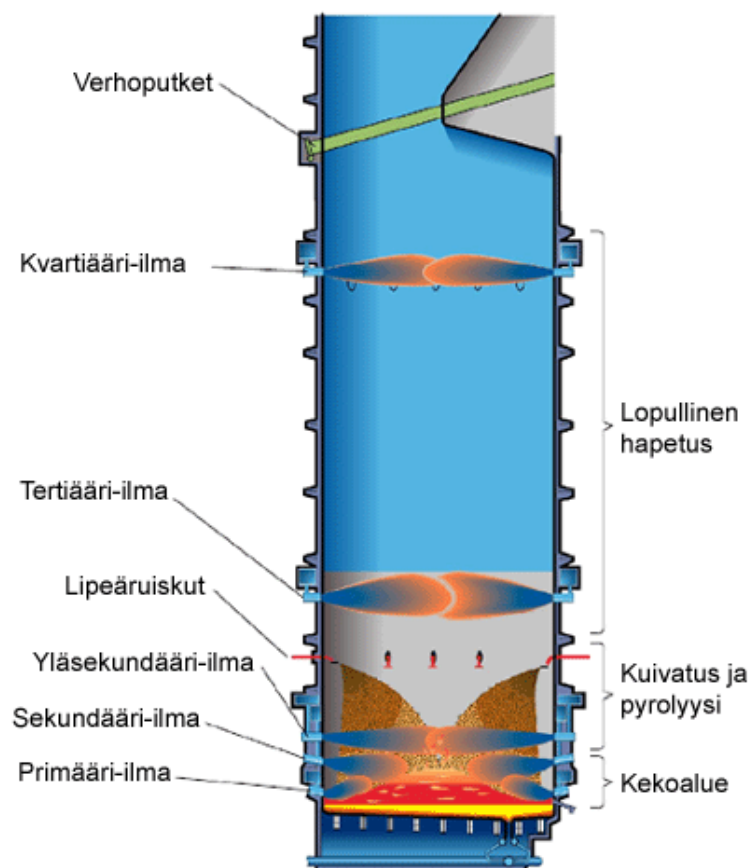
Sellutehtaan sähkön- ja lämmöntuotanto on toinen soodakattilan päätehtävistä. Höyryntuotannon osalta soodakattilan yläosa ei juurikaan poikkea muista höyrykattiloista. Soodakattilalle tulevan mustalipeän orgaaniset aineet palavat monivaiheisen palamisprosessin seurauksena. Palamisen vapauttama lämpö höyrystää keittoputkiston vettä konvektion ja säteilyn ansiosta. Soodakattila voidaan höyryntuotannon kannalta jakaa kahteen osaan: tulipesä ja konvektiivinen lämmönsiirto-osa. Noin 40 % lämmönsiirrosta savukaasujen ja höyrystettävän veden välillä tapahtuu tulipesän seinämien vesiputkirakenteissa. Modernissa soodakattilassa on sen yläosassa tulistinosa, loput keittoputkista sekä ekonomaiseri eli syöttöveden esilämmitin. Kattilan yläosassa savukaasujen lämpöä käytetään lämmönsiirron höyryn tulistukseen ja syöttöveden esilämmittämiseen kylläiseen tilaan. (Adams 1997, 7-8.)

Moderneille soodakattiloille tyypillisiä tuorehöyryn arvoja ovat 490 °C lämpötila ja 9,2 MPa paine. Soodakattiloiden höyryn lämpötilat ovat hieman pienempiä kuin tavallisen höyrykattilan, mikä johtuu palamiskaasujen voimakkaasta korrosoivasta vaikutuksesta tulistimissa. Pienemmillä lämpötiloilla korroosiota saadaan vähennettyä. Yli 500 °C tuorehöyryn lämpötiloja on korroosio-ongelmista huolimatta kuitenkin käytössä isoissa soodakattiloissa. (Vakkilainen 2005, 2-4, 2-7.)

2.2 Palamisilman syöttö

Soodakattilan hyvä toiminta edellyttää tehokkaan ja optimoidun ilman syötön palamistilaan. Ilmansyöttöjärjestelmän tulisi toimittaa tarvittava määrä ilmaa mustalipeän täydellisen palamisen mahdollistamiseksi. Parhaan palamistuloksen saamiseksi polttoaineen ja ilman sekoitus palamistilassa tulisi olla mahdollisimman hyvä. (Jones

1997, 183-184, 197.) Palamisilma syötetään soodakattilaan yleensä kolmessa tai neljässä tasossa. Tyypillisesti 80 - 90 % kokonaisilman määrästä syötetään ensimmäisen ja toisen tason ilmansyötöstä. (Vakkilainen 2005, 7-3.) Ilmasyötön tasojen lukumäärät ja sijoitus vaihtelevat hieman valmistajien välillä. Kuvassa 2.1 on esitetty tyypillisen soodakattilan tulipesä ja ilmansyötön tasot (KnowPulp 2011).



Kuva 2.1. Soodakattilan tulipesän rakenne ja ilmansyöttötasot (KnowPulp 2011).

Ensimmäisen tason eli primääri-ilman syöttö (primary air) on soodakattilan valmistajasta riippumatta melko saman tyyppinen. Primääri-ilma syötetään useasta suutimesta kattilan jokaiselta reunalta lähes tulipesän alaosassa. Ensimmäisen ilmansyötön tavoitteena on pitää peti poissa seinämiltä ja ylläpitää hyvä pedin lämpötila. Kolmiportaisessa ilmansyöttöjärjestelmässä primääri-ilman osuus on noin 35 - 40 % kokonaisilman määrästä. (Jones 1997, 199) Sekundääri-ilman syötöllä on suurin vaikutus tulipesän toimintaan. Se syötetään yleensä hieman pedin yläpuolelle ylläpitämään pedin toivottua lämpötilaa. Oikealla lämpötilalla voidaan pienentää päästöjä sekä saada reduktio tapahtumaan parhaalla mahdollisella tavalla. Toisen tason ilmansyötön päätarkoitus on

polttaa pedistä vapautuvia kaasuja. (Vakkilainen 2005, 7-5.) Toisen tason ilmansyötön osuus kokonaisilman määrästä on kolme- tai neliporaisella järjestelmällä 20 - 50 % (Jones 1997, 190). Kolmannen tason eli tertiääri-ilman syötön tarkoituksena on polttaa loput haihtuvat, jotka nousevat tulipesän alaosista. Palamisilman tulee sekoittua hyvin tulipesän kaasujen kanssa hyvän palamisen aikaansaamiseksi. (Vakkilainen 2005, 7-5.) Tänä päivänä soodakattiloiden korkeus on kasvanut merkittävästi, jolloin tertiääri-ilman syötön ja tulipesän yläosan väliin jää todella korkea alue. Lisäämällä neljäs eli kvartiääri-ilman syöttö, voidaan käyttää tämä tyhjä alue hyödyksi. Kvartiääri-ilmalla voidaan vähentää ilman määrää tulipesän alemmissa osissa, joka pienentää tyypillisesti soodakattilan NO_x -päästöjä sekä alentaa keon lämpötilaa. (Jones 1997, 205.)

2.3 Mustalipeän palaminen

Selluloosan keitosta jäljelle jääneen heikon mustalipeän kuiva-aineen osuus on ainoastaan noin 15 %. Ennen sen polttamista soodakattilassa lipeän kuiva-ainepitoisuus tulee saada välille 60 - 85 %. Soodakattilalle menevästä mustalipeästä puhutaan usein vahva- tai polttolipeänä. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuutta nostetaan monivaiheisessa haihdutusyksikössä. (Hupa & Hyöty 2002, 522.)

Mustalipeä on heikkolaatuinen polttoaine, jos sitä verrataan muihin tavanomaisiin voimalaitoskattiloissa käytettyihin polttoaineisiin. Se sisältää haihdutustavasta riippuen vielä 20 - 40 % vettä ja sen kuiva-aineosuudesta jopa 40 % on palamattomia epäorgaanisia aineita. Mustalipeä on suuresta veden ja tuhkan määrästä sekä pienestä lämpöarvosta johtuen haasteellinen polttoaine poltettavaksi. (Hupa & Hyöty 2002, 525.)

Mustalipeä ruiskutetaan palamistilaan pisaroina, joiden keskihalkaisija on noin 2 - 3 mm. Liian pienellä pisarakoolla palamattomat osat voivat kulkeutua savukaasujen mukana ulos, joten mustalipeä ruiskutetaan melko karkeana. Näin palamattomat pisarat saadaan kattilan pohjan kekoon palamisen loppuun saattamiseksi ja epäorgaanisen aineen talteen ottamiseksi. Mustalipeän palaminen voidaan jakaa tyypillisesti neljään vaiheeseen. Palamisen vaiheet ja niiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.1 (Vakkilainen 2005, 4-1,2.)

Taulukko 2.1. Mustalipeäpisan palamisen vaiheet (Vakkilainen 2005, 4-1).

Vaihe	Tapahtumat	Aika [s]
1. Mustalipeäpisan kuivuminen	Veden höyrystyminen, halkaisija pysyy vakiona alkulaajenemisen jälkeen	0,1 - 0,2
2. Haihtuvien vapautuminen	Näkyvä liekki, syttyminen, pisara laajenee, haihtuvat vapautuvat ja palavat	0,2 - 0,3
3. Koksen palaminen	Liekki ei näy, pelkistymisreaktiot, pisan halkaisija pienenee	0,5 - 1,0
4. Sulan reaktiot	Vakio tai kasvava pisan halkaisija, uudelleen hapettuminen	1,0 →

Mustalipeän palamiselle tyypillistä on sen voimakas turpoaminen palamisen aikana. Turpoaminen johtuu voimakkaasta haihtuvien aineiden vapautumisesta ja mustalipeäpisan pinnan ominaisuuksista. Palamisen vaiheet tapahtuvat käytännössä osittain yhtä aikaa. Esimerkiksi haihtuvien aineiden vapautuminen voi tapahtua jo pinnassa, vaikka pisan keskellä olisi vielä kuivuminen käynnissä. (Vakkilainen 2005, 4-2.)

2.4 Päästöt ilmaan

Tänä päivänä teollisuuden ja energiantuotannon ympäristövaikutukset ovat yhä enemmän tarkastelun alla. Sellutehtaalla suurin yksittäinen kaasumaisten päästöjen aiheuttaja on soodakattila, ja yksi soodakattiloiden kehitystrendeistä onkin ollut niiden ympäristöystävällisyyden parantaminen. Täysin päästöttömiksi soodakattiloita on mahdotonta saada, mutta päästötasot voidaan minimoida oikealla kattilan suunnittelulla ja optimoidulla ajotavalla. Soodakattiloiden kaasumaisiin päästöihin vaikuttavat karkeasti arvoituna kattilan ikä, poltettavan mustalipeän kuiva-ainepitoisuus ja soodakattilan kuorma. Näiden lisäksi merkittävä vaikutus on kattilan ohjauksella ja optimoidulla ajotavalla. (Vakkilainen 2005, 11-1.)

Soodakattilan tyypillisiä kaasumaisia päästöjä ovat rikkidioksidi (SO_2), typenoksidit (NO_x), pelkistyneet rikkiyhdisteet (TRS) ja hiukkaspäästöt. Muita päästöjä ovat muun muassa hiilimonoksidi (CO), hiilidioksidi (CO_2) ja palamattomat orgaaniset yhdisteet

(VOC). Koska mustalipeä on biopolttoaine, sen tuottaman hiilidioksidin oletetaan palautuvan luonnon orgaaniseen ainekseen, eikä sitä näin ollen huomioida päästöjen tarkastelussa. (Vakkilainen 2005, 11-1,3.) Euroopan Komission parhaan saatavilla olevan teknologian BAT mukaiset päästötasot soodakattilalle on esitetty taulukossa 2.2 (European Commission 2015, 794-795).

Koska eri päästöjen määrät kiloina aikayksikköä kohden ulos soodakattilan piipusta ovat suoraan verrannollisia savukaasumäärään, on savukaasumäärän tarkka määrittäminen merkittävässä roolissa ympäristötarkastelussa. Tässä työssä selvitetään tyypilliset savukaasumäärät eri puulajeille, jotta voitaisiin verrata mitattuja arvoja teoreettisesti laskettuihin arvoihin. Tarkastelun perusteella voidaan arvioida, pitävätkö mittaukset paikkaansa.

Taulukko 2.2. Parhaan käytettävissä olevan tekniikan mukaiset päästötasot soodakattilalle (European Commission 2015, 794-795).

Päästötyyppi		Vuosikeskiarvo [mg/Nm ³] (6 % O ₂)	Vuosikeskiarvot [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 tai perusparanneltu laitos	10 - 25	0,02 - 0,2
	Olemassa olevat	10 - 40	0,02 - 0,3

Taulukossa 2.2 on esitetty päästötasot alle 75 % kuiva-ainepitoisuuksille (DS) ja kuiva-ainepitoisuuksille välillä 75 - 83 %. Päästöjen vuosikeskiarvot on määritetty 6 % happipitoisuudella soodakattilassa.

3 SAVUKAASUVIRTOIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Mustalipeän palaminen soodakattilassa muodostaa palamis- eli savukaasuja. Savukaasujen koostumukseen ja määrään vaikuttavat mustalipeän koostumus sekä polton ylimääräisen ilman määrä. Kaikissa polttoprosesseissa käytetään yli-ilmaa täydellisen palamisen saamiseksi. (Adams 1997, 22.)

Mustalipeän ominaisuuksiin vaikuttaa käytetty puulaji, sellun keiton ominaisuudet, käytetty laitteisto ja keiton jälkeinen käsittely. Tärkeimpiä mustalipeään vaikuttavia sellun keiton ominaisuuksia ovat eri kemikaalien pitoisuudet keittolipeässä, aktiivisen alkaaliannoksen ja keittolipeän määrä puuta kohden sekä keiton lämpötila ja kesto. (Vakkilainen 2008, 16.)

3.1 Euroopan komission BAT-raportti

Euroopan komission parhaan käytettävissä olevan teknologian päivitetty raportti vuodelta 2015 asettaa ohjeavrot paperi- ja selluteollisuuden päästöille. Dokumentin mukaiset eri päästöjen pitoisuudet taulukon 2.2 mukaan ei huomioi riittävästi 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 sellutonnin kohden, tulisi eri puulajien ominaissavukaasumäärät ottaa huomioon. Vuosittainen ominaispäästö määrä lasketaan päästöjen pitoisuuden avulla kerrottuna savukaasumäärällä tuotettua ilmakeivaa sellutonnin kohden.

Euroopan komission raportissa nostetaan esille ainoastaan eukalyptusta käyttävät tehtaalla ja niiden ominaispäästöt. Koska eukalyptuksen keiton saanto on merkittävästi korkeampi kuin havu- ja lehtipuilla yleensä, ovat niiden ominaispäästöt myös pienemmät (European Commission 2015, 254-255). On kuitenkin otettava huomioon myös esimerkiksi pohjoismaisten puulajien väliset erot ominaispäästöjen tarkastelussa. Esimerkiksi mänty- ja koivusellun väliset erot keiton saannossa vaikuttavat oleellisesti tuotettuihin ominaissavukaasumääriin.

3.2 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. (KnowPulp 2011.)

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, 198, 277.)

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, 43.) Suuruusluokat eri puiden kemiallisia koostumuksista on esitetty taulukossa 3.1 (KnowPulp 2011).

Taulukko 3.1. Eri puulajien kemiallinen koostumus (KnowPulp 2011).

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

Puulajien morfologinen koostumus, eli kuitujen dimensiot sekä kokojakauma, vaihtelevat puulajien välillä. Havupuiden solut koostuvat noin 90 - 95 % trakeideista eli kuituisista soluista. Suurin osa trakeideista on pitkittäisiä soluja. Kuitujen pituudet voivat vaihdella eri havupuidenkin välillä, mutta tyypillisesti havupuiden kuidut ovat pituudeltaan noin 2

- 6 mm. Kuitujen paino pituusyksikköä kohden on tyypillisesti 10 - 30 mg/100 m. (Willför et al. 2011, 36.)

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 tietyntyypisestä solusta. Lehtipuiden kuidut ovat tyypillisesti huomattavasti lyhyempiä ja ohuempia verrattuna havupuihin. (Willför et al. 2011, 38.)

Mustalipeä sisältää keiton aikana puusta liuenneita orgaanisia aineita, epäorgaanisia keittokemikaaleja ja vettä. Puun orgaanisesta aineksesta neljä merkittävintä ovat ligniini, polysakkaridit, karboksyylihapot sekä uuteaineet. (Vakkilainen 2008, 16.) Mustalipeän orgaanisen aineen määrä vaikuttaa suoraan syntyviin savukaasuihin.

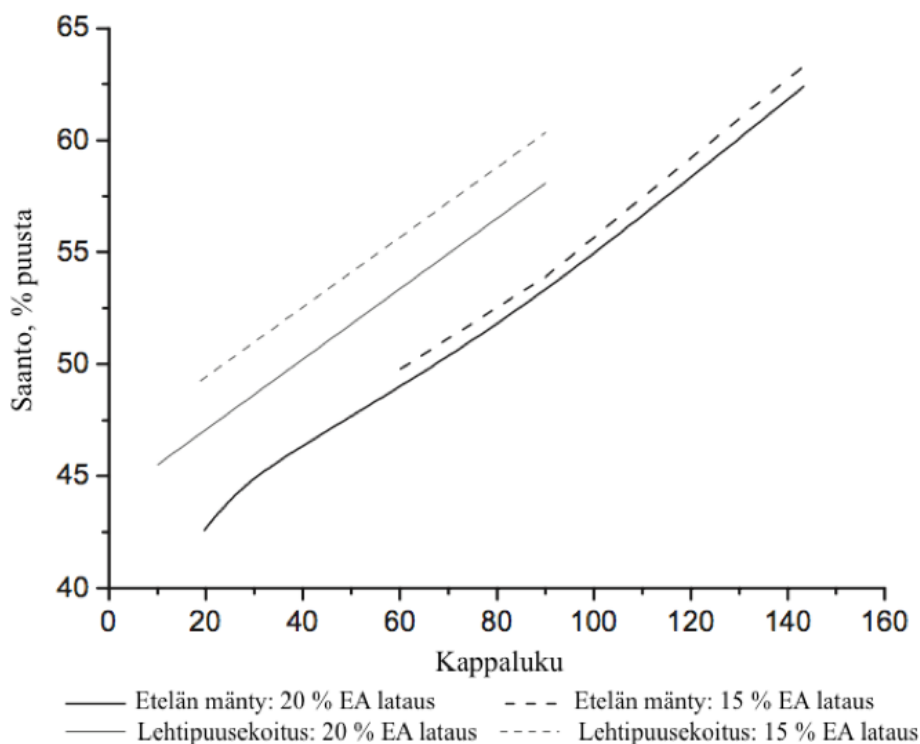
3.3 Keittoprosessin erot havu- ja lehtipuilla

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, 277.)

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, 111.) Kappaluvulla tarkoitetaan kuiduissa jäljellä olevaa ligniinin määrää keiton jälkeen. Ligniinin poistoa jatketaan keiton jälkeen happivalkaisuvaiheessa, jonka takia ilmoitetaan yleensä myös kappaluku happivalkaisun jälkeen. (KnowPulp 2011.)

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 %. (KnowPulp 2011.) Keiton saanto riippuu kappaluvusta ja havupuille tyypillisesti saantoprosentti nousee 0,14 % yhtä kappaluvun nostoa kohden, kun taas lehtipuilla se nousee 0,16 %. Aktiivisen alkaaliannoksen 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 3.1. (Sixta et al. 2006, 229-230.)



Kuva 3.1. Keiton saanto kappaluvun suhteen (Sixta et al. 2006, 230).

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, 209.) Koska lehtipuut sisältävät havupuita vähemmän ligniiniä, myös se nopeuttaa ligniinin poistoa. Lehtipuun ligniini on sellaisessa muodossa, että siihen päästään helpommin käsiksi. Tästä johtuen lehtipuiden ligniinin poiston nopeus on suurempi kuin havupuiden. (Gustafsson et al. 2011, 280.)

4 SAVUKAASUVIRTOJEN LASKENTA

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.

4.1 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 4.1 (Frederick 1997, 78).

Taulukko 4.1. Mustalipeän eri komponenttien lämpöarvot (Frederick 1997, 78).

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 ilmakehän 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 rikki-pitoisuus lauhtumattomissa kaasuissa. Valkolipeästä syötetään alkuarvoina laskentaan aktiivisen alkaaliannoksen osuus puuta kohti, valkolipeän sulfiditeetti sekä kuiva-ainepitoisuus, kaustisoinnin tehokkuus ja valkolipeän reduktioprosentti. Lisäksi tarvitaan mustalipeän kuiva-

ainepitoisuus haihduttamon jälkeen. Happivalkaisussa käytetyn hapettuneen valkolipeän määrä sekä metanolin muodostuminen happivalkaisussa tulee myös syöttää laskentaan. Näiden avulla voidaan laskea mustalipeän eri komponenttien määrät tuotettua valkaistua ilmakeuivaa sellutonnia kohden ja sitä kautta mustalipeän kuiva-aineen lämpöarvo. Laskennan avulla saadaan myös mustalipeän kuiva-aineen massavirta soodakattilaan tuotettua ilmakeuivaa sellutonnia kohden. Laskenta perustuu Frederickin (1997, 79-80) esittämään mustalipeän lämpöarvon laskentaan, eikä sitä esitellä tarkemmin tässä työssä. Esimerkkilaskelma mustalipeän lämpöarvon laskennasta mäntypuulle on esitetty liitteessä 1. Laskennassa käytetään alkuarvoina teoreettisia arvoja, koska käytössä ei ole todellisen tehtaan keiton tietoja.

4.2 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, mutta korrelaatioiden kertoimissa käytetään päivitettyjä julkaisemattomia arvoja.

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

missä C hiilen massaosuus [m-%]

HHV mustalipeän korkeampi lämpöarvo [MJ/kg_{ka}]

Liitteen 1 mukaisilla keiton parametreilla mäntysellulle saatiin lämpöarvoksi 15,132 MJ/kg_{ka}. 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, 2017).

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

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. (Ibid.)

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

missä IO epäorgaanisten massaosuus [m-%]

Liitteen 1 mukaisella 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. (Ibid.)

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

missä S rikin massaosuus [m-%]

K kaliumin massaosuus [m-%]

Cl kloorin massaosuus [m-%]

Esimerkiksi liitteen 1 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 4.2. Laskuissa on käytetty havusellulle saantoa 45 % ja koivusellulle 51 %.

Taulukko 4.2. 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 määrää sekä ominaissavukaasumäärä tuotettua ilmakeivaa sellutonna kohden. Savukaasumäärä lasketaan kuutiona savukaasua yhtä tuotettua ilmakeivaa sellutonna kohden.

4.3 Savukaasumäärän laskeminen

Soodakattilassa syntyy savukaasuja mustalipeän palamisen seurauksena. Savukaasut muodostuvat stökiometristen palamistuotteiden lisäksi kattilaan tulevasta ylimääräisestä palamisilmasta, palamisilman mukana tulleesta tpestä 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, 20-21.) Palamisreaktioita voidaan tarkastella stökiometrisillä palamisyhtälöillä (Raiko 2002, 36).



Savukaasujen kokonaismäärän laskeminen perustuu Adamsin (1997, 20-21) 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, 20.) Sulareaktioita ei tarkastella työssä tarkemmin.

Esimerkki savukaasumäärän laskemisesta on esitetty liitteessä 2. Esimerkissä on määritetty savukaasujen määrä liitteen 1 mukaisen keiton arvoilla ja saadulla mustalipeän lämpöarvolla sekä sen perusteella approksimoidulla mustalipeän alkuainekoostumuksella. Palamisen ilmakeitoimenä käytetään laskennassa 1,2 eli palamisessa on 20 % ylimääräistä ilmaa.

Savukaasujen tiheydeksi oletetaan 1,234 kg/m³. Ilmankosteuden oletetaan olevan 0,0135 kg H₂O/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.

5 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.

5.1 Tyypilliset savukaasuvirrat eri saannoilla

Työssä laskettiin mänty- sekä koivusellulle tyypilliset savukaasuvirrat käyttäen modernille tehtaalle tyypillisiä keittoparametreja sekä tuotantoa. Käytetyt laskennan alkuarvot mänty- ja koivusellulle on esitetty liitteessä 3. 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 laskennassa.

Taulukko 5.1. Tyypilliset savukaasumäärät männylle eri saantoprosenteilla.

Saanto [%]	Savukaasumäärä [Nm ³ /ADt]
41	10040
42	9698
43	9371
44	9059
45	8761
46	8476
47	8203
48	7942

Taulukko 5.2. Tyypilliset savukaasumäärät koivulle eri saantoprosenteilla.

Saanto [%]	Savukaasumäärä [Nm ³ /ADt]
48	7005
49	6774
50	6553
51	6341
52	6136
53	5940
54	5750
55	5568

Taulukoista 5.1 ja 5.2 voidaan huomata, että mänty- ja koivusellulle lasketut teoreettiset savukaasumäärät eri saantoprosenteilla vaihtelevat merkittävästi puulajien välillä. Koivusellun suurempi mahdollinen saantoprosentti ja eroavaisuudet keitossa 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 tehtaات eri-arvoiseen asemaan sallittujen soodakattilan päästöjen pitoisuuksien vuoksi, koska se ei ota tarpeeksi huomioon savukaasumäärissä olevaa eroa. Esimerkiksi taulukon 2.2 mukaan sallittu NO_x -päästöjen vuotuinen keskiarvo on 120 - 200 mg/Nm³ 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 2.2 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.

5.2 Suomen sellutehtaiden savukaasuvirrat

Suomen sellutehtaille laskettiin teoreettiset savukaasumäärät ja verrattiin niitä ilmoitettuihin savukaasumääriin. Täysin tarkkaa vertailua laskettujen ja ilmoitettujen savukaasumäärien välillä ei voitu kuitenkaan tehdä, sillä keiton parametrit vaihtelevat tehtaiden välillä. Vertailukelpoisempia tuloksia saataisiin, jos jokaisen tehtaan

savukaasumäärä laskettaisiin kyseisen tehtaan keiton- ja tuotannonparametrien mukaisesti. Koska tarkkoja tehdastietoja ei ole saatavissa, työssä vertailtiin ainoastaan teoreettisesti savukaasumäärää eri puulajeilla käyttäen laskennassa samoja keiton arvoja kaikille tehtaille.

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 5.3 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 5.3. Suomen sellutehtaiden soodakattiloiden ilmoitetut sekä lasketut savukaasumäärät.

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

Taulukosta 5.3 voidaan huomata, että ilmoitetut arvot vastaavat melko vaihtelevasti teoreettisia arvoja muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Pääsääntöisesti laskettu savukaasumäärä on ilmoitettua arvoa hieman isompi. Liian suuret lasketut savukaasumäärät voivat johtua käytetyistä laskentaparametreista. Laskennassa käytetyt keiton parametrit eivät välttämättä niin tuoreita, kuin todellisilla tehtailla Suomessa tänä päivänä. Pelkästään havupuuta käyttävillä tehtailla, käyttäen alhaista mustalipeän kuiva-ainepitoisuutta, lasketut savukaasumäärät ovat huomattavan paljon ilmoitettua suurempia. Tehtailla, joissa käytetään korkeamman kuiva-aineen mustalipeitä, teoreettiset savukaasumäärät vastasivat parhaiten ilmoitettuja arvoja.

Tehtaiden ominaissavukaasumäärät vaihtelevat melko paljon riippumatta käytettyjen puulajien prosenttiosuuksista. Taulukosta 5.3 voidaan kuitenkin huomata, että pääsääntöisesti koivun suurempi käyttö tuotannossa näkyy pienemmissä ominaissavukaasumäärissä. Jos ei huomioida tehtaan F ilmoittamaa savukaasumäärää 5800 Nm³/ADt kahdelle soodakattilalle, pienin ilmoitettu sekä laskettu savukaasumäärä on tehtaalla L. 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 $7109 \text{ Nm}^3/\text{ADt}$.

Jos tiedettäisiin sellutehtaiden tuotannon ja keiton ominaisuudet, laskennan avulla voitaisiin tarkistaa melko luotettavasti ilmoitetut savukaasumäärät. Esitettyä laskentamenetelmää hyväksi käyttäen voitaisiin tarkistaa savukaasumäärät, jos epäillään mahdollista virhettä mittauksissa tai tehtaan omassa laskennassa. Tarkka savukaasumäärän tunteminen on hyvin tärkeää ympäristövaikutusten tarkastelussa, minkä takia savukaasujen määrittästä tulisi edelleen kehittää.

6 YHTEEVETO

Ympäristövaikutusten arviointi ja tiukentuneet päästötavoitteet velvoittavat pienentämään soodakattiloiden päästöjä. Lähtökohtana työlle oli Euroopan Komission BAT-dokumentin soodakattiloiden päästöjen ohjearvojen toimimattomuus eri puulajeilla. Tämän vuoksi Suomen Soodakattilayhdistyksellä oli 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 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. Suomen sellutehtaille lasketut soodakattilan teoreettisen ominaissavukaasumäärät pitivät melko vaihtelevasti paikkaansa. Jos olisi ollut käytössä tehtaiden todelliset keiton ominaisuudet, vertailu oltaisiin voitu tehdä huomattavasti luotettavammin. Todellisilla keiton ominaisuuksilla työssä esitettyä laskentamenetelmää voitaisiin hyödyntää soodakattiloiden savukaasumittausten tarkistamisessa.

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.

LÄHDELUETTELO

Adams Terry N. 1997. General Characteristics of Kraft Black Liquor Recovery Boilers. Teoksessa: Adams et al. Kraft Recovery Boilers. Atlanta. AF&PA. American forest & Paper Association. Tappi Press. ISBN: 0-9625985-9-3.

European Commission. 2011. BAT questionnaires for Finnish Pulp Mills year 2008. Directorate-General. Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies (Seville). Sustainable Production and Consumption Unit. European IPPC Bureau. Käsitelty 8.2.2011. [Julkaisematon asiakirja].

European Commission. 2015. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the production of Pulp, Paper and Board. JRC Science and Policy Reports. Luxemburg. European Union. Report EUR 27235 EN. 906s. ISBN: 978-92-79-48167-3.

Frederick James Wm. 1997. Black Liquor Properties. Teoksessa: Adams et al. Kraft Recovery Boilers. Atlanta. AF&PA. American forest & Paper Association. Tappi Press. ISBN: 0-9625985-9-3.

Gustafsson Jan et al. 2011. Pulping. Teoksessa: Chemical Pulping part 1, Fibre Chemistry and Technology. 2nd edition. Papermaking Science and Technology vol 6. Porvoo. Paperi ja Puu Oy. 748s. ISBN: 978-952-5216-41-7.

Hupa Mikko, Hyöty Paavo. 2002. Mustaliipeän poltto ja soodakattila. Teoksessa: Raiko Risto et al. Poltto ja palaminen. Jyväskylä. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. Teknillistieteelliset akatemit. Gummerus Kirjapaino Oy. 750s. ISBN: 951-666-604-3.

Jones Andrew K. 1997. Recovery Boiler Air Supply and Gas Flows. Teoksessa: Adams et al. Kraft Recovery Boilers. Atlanta. AF&PA. American forest & Paper Association. Tappi Press. ISBN: 0-9625985-9-3.

KnowPulp. 2011. Prowledge Oy. Julkaistu 12/2011. [sellutekniikan ja automaation oppimisympäristö]. [viitattu: 18.3.2017]. Saatavissa: <http://www.knowpulp.com/suomi/> (Vaatii kirjautumisen).

Metsäteollisuus ry. 2017. Tilastot. Massa ja paperiteollisuus. Vienti. [verkkojulkaisu]. [viitattu: 30.1.2017]. Saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/toimialat/15-Massa-%20ja%20paperiteollisuus/>

Raiko Risto. 2002. Palamisen termodynaamiset perusteet. Teoksessa: Raiko Risto et al. Poltto ja palaminen. Jyväskylä. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. Teknillistieteelliset akatemit. Gummerus Kirjapaino Oy. 750s. ISBN: 951-666-604-3.

Sixta Herbert, Potthast Antje & Krottschek Andreas W. 2006. Chemical Pulping Processes. Teoksessa: Sixta Herbert (toim). Handbook of Pulp volume 1. Mörlenbach. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 608s. ISBN: 978-3-527-30999-3.

Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkkojulkaisu]. ISSN=1799-795X. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 30.1.2017]. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/ehk/tau.html>

Vakkilainen Esa K. 2000. Estimation of elemental composition from proximate analysis of black liquor. Paperi ja Puu – Paper and timber. Vol. 82/No. 7/2000. Helsinki. Paperi- ja puutavaralehti.

Vakkilainen Esa K. 2005. Kraft recovery boilers – Principles and practise. Suomen Helsinki. Soodakattilayhdistys ry. Valopaino Oy. ISBN: 952-91-8603-7.

Vakkilainen Esa K. 2008. Chemical Recovery. Teoksessa: Chemical Pulping part 2, Recovery of Chemicals and Energy. 2nd edition. Papermaking Science and Technology vol 6. Jyväskylä. Paperi ja Puu Oy. 387s. ISBN: 978-952-5216-26-4.

Vakkilainen Esa K. 2017. Professori. Uusiutuvat energiajärjestelmät. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta. Asiantuntija.

Willför Stefan et al. 2011. Raw Materials. Chemical Pulping part 1, Fibre Chemistry and Technology. 2nd edition. Papermaking Science and Technology vol 6. Porvoo. Paperi ja Puu Oy. 748s. ISBN: 978-952-5216-41-7.

LIITE 1. ESIMERKKI MUSTALIPEÄN LÄMPÖARVON MÄÄRITYKSESTÄ

Muuttujat:
Tulokset:

Keiton parametrit (alkuarvot)

Keiton puolaji	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 valkaistua sellua	
Lauhtumattomien kaasujen tuotanto keitossa	3 % puusta	
Rikin määrä lauhtumattomissa kaasuissa	2 kg/t valkaistua sellua	

Valkoliipeä	
Aktiivinen alkaliannos, Na2O-% puusta	18,6 %
Valkoliipeän sulfiditeetti	35 %
Valkoliipeän kuiva-ainepitoisuus	15 %
Kaustisoituminen	80 %
Valkoliipeän reduktio	94 %
Mustaliipeän kuiva-ainepitoisuus	75 %

Hapettunut valkoliipeä	
Hapettuneen valkoliipeän käyttö happivalkaisussa	200 kg/t valkaistua sellua
Metanolin muodostuminen happivalkaisussa	0,2 kg/t valkaistua sellua

Orgaaniset yhdisteet

Ilmakuivattua valkaistua sellua	2880 t/24h
Kuivattua valkaistua sellua	2592 t/24h
Kuivaa valkaisuamattonta sellua	2700 t/24h
Kuivaa puuta tarvitaan	6000 t/24h
Puun tarve 1000 kg valkaistun sellun tuottamiseen	2222 kg/t valkaistua sellua
Häviöt haihtuvina (sisältäen TRS-yhdisteet)	67 kg/t valkaistua sellua
TRS-yhdisteiden häviöt (metyylimerkaptaania)	3 kg/t valkaistua sellua
Puun happojen neutraloinnissa syntyvä vesi	100 kg/t valkaistua sellua
Orgaaniset yhdisteet mustaliipeässä	1157 kg/t valkaistua sellua
Orgaaniset yhdisteet sellussa	995 kg/t valkaistua sellua
Puun ligniini valmistettaessa 1000 kg valkaistua sellua	600 kg/t valkaistua sellua
Ligniini valkaisuamattomassa sellussa	42 kg/t valkaistua sellua
Mustaliipeän sisältämä ligniini	558 kg/t valkaistua sellua
Mäntyöljy pihkasta ja rasvahapoista	24 kg/t valkaistua sellua
Mäntyöljyn jäännös	0 kg/t valkaistua sellua
Mäntyöljyn talteenotto	19 kg/t valkaistua sellua
Mäntyöly mustaliipeässä	5 kg/t valkaistua sellua
Muiden orgaanisten yhdisteiden muodostuminen (4 % puusta)	89 kg/t valkaistua sellua
Muut orgaaniset yhdisteet selluun	1 kg/t valkaistua sellua
Muut orgaaniset yhdisteet mustaliipeään	88 kg/t valkaistua sellua
Orgaaniset hapot mustaliipeään	507 kg/t valkaistua sellua
Orgaaniset ainekset yhteensä mustaliipeässä	<u>1157</u> kg/t valkaistua sellua

Ligniinin lämpöarvo	15009 kJ/kg valkaistua sellua
Pihkan ja rasvahappojen lämpöarvo	181 kJ/kg valkaistua sellua
Orgaanisten happojen lämpöarvo	6868 kJ/kg valkaistua sellua
Muiden orgaanisten yhdisteiden lämpöarvo	1668 kJ/kg valkaistua sellua
Orgaanisten yhdisteiden lämpöarvo yhteensä	23726 kJ/kg valkaistua sellua

Epäorgaaniset yhdisteet

Valkolipeä

Aktiivinen alkaaliannos, NaOH-% kuivasta puusta	24 %
Aktiivinen alkaaliannos kg/t valkaisuamatonta sellua, Na ₂ O	413 kg/t valkaistua sellua
Aktiivinen alkaaliannos kg/t valkaisuamatonta sellua, NaOH	529 kg/t valkaistua sellua
NaOH lataus Na ₂ O:na	269 kg/t valkaistua sellua
NaOH lataus NaOH:na	347 kg/t valkaistua sellua
Na ₂ S lataus Na ₂ O:na	145 kg/t valkaistua sellua
Na ₂ S lataus NaOH:na	187 kg/t valkaistua sellua
Aktiivisen alkalin konsentraatio, Na ₂ O	113 g/l
Aktiivisen alkalin konsentraatio, NaOH	146 g/l
Valkolipeän tiheys	1169 g/l
Na ₂ CO ₃ valkolipeässä Na ₂ O:na	54 kg/t valkaistua sellua
Na ₂ SO ₄ valkolipeässä Na ₂ O:na	9 kg/t valkaistua sellua
Epäorgaaniset yhdisteet valkolipeässä yhteensä	<u>641</u> kg/t valkaistua sellua
Epäorgaaniset yhdisteet valkolipeässä yhteensä Na ₂ O:na	476 kg/t valkaistua sellua

Mustalipeä

NaOH mustalipeässä	123 kg/t valkaistua sellua
Orgaanisesti sitoutunut Na mustalipeässä	129 kg/t valkaistua sellua
Na ₂ S mustalipeässä	175 kg/t valkaistua sellua
Na ₂ CO ₃ mustalipeässä	91 kg/t valkaistua sellua
Na ₂ SO ₄ mustalipeässä	20 kg/t valkaistua sellua
Epäorgaaniset yhdisteet mustalipeässä	<u>539</u> kg/t valkaistua sellua

Epäorgaanisten yhdisteiden (Na₂S) lämpöarvo	2262 kJ/kg valkaistua sellua
---	-------------------------------------

Epäorgaaniset yhdisteet puussa

NaOH sellussa	1 kg/t valkaistua sellua
Orgaanisesti sitoutunut Na sellussa	1 kg/t valkaistua sellua
Na ₂ S sellussa	2 kg/t valkaistua sellua
Na ₂ CO ₃ sellussa	1 kg/t valkaistua sellua
Na ₂ SO ₄ sellussa	0 kg/t valkaistua sellua
Epäorgaaniset yhdisteet sellussa	<u>5</u> kg/t valkaistua sellua

Mustalipeän kuiva-aineen määrä keitosta	<u>1696</u> kg/t valkaistua sellua
---	------------------------------------

Happivaihe

Valkaistun massan muodostuminen	960 kg/t valkaistua sellua
Epäorgaaniset yhdisteet valkaistussa massassa	6 kg/t valkaistua sellua
Orgaaniset yhdisteet valkaistussa massassa	954 kg/t valkaistua sellua

Valkaisemattoman sellun häviö valkaisussa	40 kg/t valkaistua sellua
Ligniini valkaistussa sellussa	23 kg/t valkaistua sellua
Ligniinin liukeneminen valkaisun jäteveeseen	19 kg/t valkaistua sellua
Metanolin muodostuminen	0,2 kg/t valkaistua sellua
Orgaaniset hapot valkaisun jäteveeseen	20 kg/t valkaistua sellua
Orgaaniset yhdisteet valkaisun jätevedessä	<u>40</u> kg/t valkaistua sellua

Happivalkaisu

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 valkaistua sellua
Hapettumattoman valkoliipeän kuiva-aine	15 %
Hapettumattoman valkoliipeän kuiva-aine	150 kg/t hapettumatonta valkoliipeää
Hapettumattoman valkoliipeän vesi	850 kg/t hapettumatonta 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 %
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 hapettumatonta valkoliipeää
Na ₂ S ₂ O ₃ hapettuneessa valkoliipeässä	43 kg/1021 kg hapettumatonta valkoliipeää
Na ₂ CO ₃ hapettuneessa valkoliipeässä	22 kg/1021 kg hapettumatonta valkoliipeää
Na ₂ SO ₄ hapettuneessa valkoliipeässä	5 kg/1021 kg hapettumatonta valkoliipeää
Vesi hapettuneessa valkoliipeässä	845 kg/1021 kg hapettumatonta valkoliipeää
Hapettunut valkoliipeä yhteensä	1017 kg
Happivalkaisussa Na ₂ S ₂ O ₃ hapettuu kokonaan Na ₂ SO ₄ Na ₂ S ₂ O ₃ + 2O ₂ + 2NaOH => 2Na ₂ SO ₄ + H ₂ O	
Happivalkaisun NaOH käyttö tiosulfaatin hapettamiseen	22 kg/1021 kg hapettumatonta valkoliipeää
Happivalkaisun Na ₂ SO ₄ syntyy tiosulfaatin hapettamisessa	78 kg/1021 kg hapettumatonta valkoliipeää
Happivalkaisun H ₂ O syntyy tiosulfaatin hapettamisessa	5 kg/1021 kg hapettumatonta valkoliipeää
Veden ja epäorgaanisten summa valkaisun jäännöksessä	1078 kg
NaOH happivalkaisun jäännöksessä	15 kg/t valkaistua sellua
Na ₂ S ₂ O ₃ happivalkaisun jäännöksessä	0 kg/t valkaistua sellua
Na ₂ CO ₃ happivalkaisun jäännöksessä	4 kg/t valkaistua sellua
Na ₂ SO ₄ happivalkaisun jäännöksessä	15 kg/t valkaistua sellua
Epäorgaaniset yhdisteet yhteensä valkaisun jäteveeseen	34 kg/t valkaistua sellua
Kuiva-aineet valkaisun jäännöksessä	74 kg/t valkaistua sellua
Ligniinin lämpöarvo valkaisun jäännöksessä	523 kJ/kg valkaistua sellua
Orgaanisten happojen lämpöarvo valkaisun jäännöksessä	276 kJ/kg valkaistua sellua
Na ₂ S ₂ O ₃ lämpöarvo valkaisun jäännöksessä	0 kJ/kg valkaistua sellua
Valkaisun jäännöksen lämpöarvo yhteensä	799 kJ/kg valkaistua sellua
Mustaliipeän ja valkaisujäännöksen kuiva-aineet yhteensä	1770 kg/t valkaistua sellua
Mustaliipeän kokonaislämpöarvo	26787 kJ/kg valkaistua sellua
<u>Mustaliipeän kuiva-aineen lämpöarvo</u>	<u>15132 kJ/kg mustaliipeän kuiva-ainetta</u>

LIITE 2. ESIMERKKI SAVUKAASUMÄÄRÄN LASKENNASTA MÄNNYLLE

Sulan ja stökiömetrisen palamisen lopputuotteet

Sula

Na ₂ S mustalipeästä	0,103 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Na ₂ SO ₄ mustalipeästä	0,012 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
NaCl mustalipeästä	0,005 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Na ₂ CO ₃	0,268 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
K ₂ CO ₃	0,027 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Sulaa yhteensä	0,414 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta

Stökiömetriset palamistuotteet

CO ₂	1,230 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
H ₂ O	0,345 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta

Hapen tarve

O ₂ tarve Na ₂ SO ₄	0,005 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
O ₂ tarve Na ₂ CO ₃	0,121 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
O ₂ tarve K ₂ CO ₃	0,009 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
O ₂ tarve CO ₂	0,895 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
O ₂ tarve H ₂ O	0,306 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Hapen tarve yhteensä	1,337 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta

Ilmaa

Happea mustalipeästä	0,347 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Hapen tarve yhteensä	1,337 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Hapen tarve palamisilmasta	0,990 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Stökiömetrinen palamisilma	4,267 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Typpeä stökiömetrisessä palamisilmassa	3,277 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Ylimääräinen ilma yhteensä	0,853 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Ilmavirta yhteensä	5,120 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta

Vesihöyry

Vesihöyry mustalipeän vedestä	0,333 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Ilmankosteus	0,069 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Lisätty vesihöyry yhteensä	0,402 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta

Savukaasumäärä

Savukaasuvirta yhteensä	6,11 kg/kg mustalipeän kuiva-ainetta
Savukaasuvirta yhteensä	4,95 m ³ n/kg mustalipeän kuiva-ainetta
<u>Savukaasuvirta yhteensä</u>	<u>8761</u> m ³ n/ADt

LIITE 3. LASKENNAN ALKUARVOT MÄNTY- JA KOIVUSELLULLE

Keiton parametrit (Mänty)

Keiton puulaji	1	Puulaji
Ilmakuivattu valkaisematon selluloosa	3000 t/24 h	1 Mänty
Happivalkaisun saanto	96 %	2 Kuusi
Kuivatun valkaisemattoman sellun saanto puusta	45 %	3 Koivu
Keiton kappaluku ennen happivalkaisua	28	4 Eukalyptus
Keiton kappaluku happivalkaisun jälkeen	14	5 Muu
Pesun tehokkuus valkaisemattomalla sellulla	99 %	
Pesun tehokkuus valkaistulla sellulla	99 %	
Suovan erotuksen tehokkuus	80 %	
Puun happojen neutraloinnissa syntyvä vesi	100 kg/t valkaistua sellua	
Lauhtumattomien kaasujen tuotanto keitossa	3 % puusta	
Rikin määrä lauhtumattomissa kaasuissa	2 kg/t valkaistua sellua	
Valkoliipeä		
Aktiivinen alkaliannos, Na2O-% puusta	18,6 %	
Valkoliipeän sulfiditeetti	35 %	
Valkoliipeän kuiva-ainepitoisuus	15 %	
Kaustisoituminen	80 %	
Valkoliipeän reduktio	94 %	
Mustaliipeän kuiva-ainepitoisuus	75 %	
Hapettunut valkoliipeä		
Hapettuneen valkoliipeän käyttö happivalkaisussa	200 kg/t valkaistua sellua	
Metanolin muodostuminen happivalkaisussa	0,2 kg/t valkaistua sellua	

Keiton parametrit (Koivu)

Keiton puulaji	3	Puulaji
Ilmakuivattu valkaisematon selluloosa	3000 t/24 h	1 Mänty
Happivalkaisun saanto	95 %	2 Kuusi
Kuivatun valkaisemattoman sellun saanto puusta	51 %	3 Koivu
Keiton kappaluku ennen happivalkaisua	18	4 Eukalyptus
Keiton kappaluku happivalkaisun jälkeen	13	5 Muu
Pesun tehokkuus valkaisemattomalla sellulla	99 %	
Pesun tehokkuus valkaistulla sellulla	99 %	
Suovan erotuksen tehokkuus	80 %	
Puun happojen neutraloinnissa syntyvä vesi	100 kg/t valkaistua sellua	
Lauhtumattomien kaasujen tuotanto keitossa	3 % puusta	
Rikin määrä lauhtumattomissa kaasuissa	2 kg/t valkaistua sellua	
Valkoliipeä		
Aktiivinen alkaliannos, Na2O-% puusta	19 %	
Valkoliipeän sulfiditeetti	35 %	
Valkoliipeän kuiva-ainepitoisuus	15 %	
Kaustisoituminen	80 %	
Valkoliipeän reduktio	95 %	
Mustaliipeän kuiva-ainepitoisuus	75 %	
Hapettunut valkoliipeä		
Hapettuneen valkoliipeän käyttö happivalkaisussa	200 kg/t valkaistua sellua	
Metanolin muodostuminen happivalkaisussa	0,2 kg/t valkaistua sellua	