

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

NEYTES14

2017

Miikael Hyrkäs

# SORBENTIN VAIKUTUS VOIMAKATTILAN RIKKIDIOKSIDI- JA VETYKLORIDIPÄÄSTÖIHIN

- Rauman Biovoima Oy

# ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin Rauman Biovoima Oy:n toimeksiannosta Rauman biovoimalaitoksella vuodenvaihteessa 2016–2017. Insinööriyön lähtökohta oli lähes ihanteellinen sen tekijälle: ongelmanratkaisukykyä, perehtyvyyttä ja oma-aloitteellisuutta vaativa. Haluan kiittää työn alulle saattajaa ja opinnäytetyöpaikan mahdollistamisesta yhtiön toimitusjohtajaa diplomi-insinööri Timo Pitkästä.

Opinnäytetyö alkoi solmimalla kolmen kuukauden työsopimus UPM Paper ENA Oy:n kanssa. UPM vastaa biovoimalaitoksen operoimisesta. Haluan osoittaa kiitokseni biovoimalaitoksen käyttöhenkilökunnalle tehokkaasta yhteistyöstä koeajojen aikana. Hyvä yhteistyö takasi viestinnän onnistumisen. Erityisesti haluan kiittää käyttöinsinööri Jukka Reilamaa ja päivämestari insinööri Mika Korteniemeä henkilökohtaisesta ohjauksesta mitä sain opinnäytetyön aikana.

Tekemäni insinööriyö on julkinen asiakirja. Tutkimuksesta saadut mittaustulokset ja tehdyt kustannuslaskelmat tuovat Rauman Biovoimalle kilpailukykyä. Ne osoittavat tekniikan käyttönotosta aiheutuvia operatiivisia kustannuksia. Tarkat luvut ovat yhtiösalaisuuksia ja tästä syystä liitetiedostot on merkitty salassa pidettäviksi. Näin ollen koeajon mittaustuloksia ei esitetä tarkkana numerodatana, vaan insinööriyössä perehdytään ympäristölain asettamiin päästöarvoihin ja puhutaan yrityksen asettamista ”tavoitearvoista”.

Lopuksi haluan vielä mainita, että Turun ammattikorkeakoulun puolesta ohjaavana opettajanani toimi lehtori Paavo Paju. Haluan kiittää Paavoja kaikesta siitä opastuksesta ja vahvasta ammattiosaamisesta, jota hän on osoittanut ollessaan mukana työn alkumetreiltä saakka.

Turussa 1. kesäkuuta 2017

Miikael Hyrkäs

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Energia- ja ympäristötekniikka

2017 | 45

Ohjaajat:

Paavo Paju, Lehtori, Turun ammattikorkeakoulu

Jukka Reilama, käyttöinsinööri, UPM Paper ENA Oy, Rauma

Miikael Hyrkäs

# SORBENTIN VAIKUTUS VOIMAKATTILAN RIKKIDIOKSIDI- JA VETYKLORIDIPÄÄSTÖIHIN

- Rauman Biovoima Oy

Opinnäytetyössä on perehdytty kolmen eri sorbentin syötön vaikutukseen biovoimalaitoksen rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöihin. Työssä analysoitiin koeajo-olosuhteissa tehtyjen mittausten tuloksia. Lisäksi on tehty arviointi koeajon puhdistustekniikan riittävydestä parhaan mahdollisen tekniikan asettamaan tulevaisuuden päästörajoitustavoitteeseen.

Opinnäytetyössä on käsitelty lisäaineiden reaktiot savukaasujen kanssa ja sen vaikutukset rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöjen määrän alenemiseen. Työn toimeksiantajana on Rauman Biovoima Oy. Koeajon suoritus paikkana ja laitteistona on ollut Rauman Biovoima Oy:n HYBEX-kerrosleijukattila. Biovoimalaitoksen tämän hetkisenä savukaasupäästöjen puhdistustekniikkana on tulipesäkalkin syöttö ja letkusuodatin.

Euroopan ympäristölainsäädännössä asetetut päästödirektiivit tiukentavat suurten voimalaitosten hakemien ympäristölupien ehtoja. Tästä on seurauksena savukaasujen päästörajojen aleneminen. Kun tämän hetkinen puhdistus ei ole riittävä vastaamaan tulevaisuuden tavoitetta, pitää sitä kehittää. Sorbentin reagointi savukaasujen kanssa on toiminut koeajoissa rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöjä alentavasti. Toimeksiantajan asettamat tavoitearvot saavutettiin kahdella koeajolisäaineella kolmesta riittävän päästödatan tukemana.

ASIASANAT:

Biovoimalaitos, Kerrosleijukattila (BFB), Savukaasujen puhdistus, Savukaasut, Sekapoltto, Sorbentti.

Miikael Hyrkäs

# INFLUENCE OF SORBENT FOR POWER BOILER'S SULFURIC AND HYDROCHLORIC EMISSIONS

- Rauman Biovoima Oy

This thesis work studies the effects of three different sorbents on sulfuric and hydrochloric emissions in mixed combustion. The thesis analyzes the results of measurements conducted in test run conditions. In addition, an evaluation of the sufficiency of the test run flue gas treatment techniques was made compared to the expected future emission limit set by the legislation.

The thesis examines reductions of sulfuric and hydrochloric emissions caused by sorbent additives reacting with flue gases. The client of the thesis was Rauman Biovoima Oy. The place of the test runs was HYBEX-bubbling fluidized bed boiler of Rauman Biovoima Oy. The current flue gas treatment techniques of the biopower plant are limestone injection into the boiler and fabric filter.

The emission directives set in the European environmental legislation will tighten the terms of environmental permits given to large combustion power plants. This will result in a reduction of flue gas emission limits as the current flue gas treatment is not sufficient to meet the future standard. Sorbent's reaction with flue gases resulted in reductions in the sulfuric and hydrochloric emissions. The aimed values set by the client were met by two of the three sorbent additives supported with the adequate emission data.

## KEYWORDS:

Biopower plant, Bubbling fluidized bed boiler (BFB), Flue gases, Flue gas treatment, Mixed combustion, Sorbent.

# SISÄLTÖ

<b>LYHENTEET JA SYMBOLIT</b>	<b>8</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>10</b>
<b>2 TOIMEKSIANTAJA</b>	<b>11</b>
2.1 Rauman Biovoima Oy	11
2.2 UPM Paper ENA Oy	11
2.3 UPM-Kymmene Oyj	12
<b>3 YMPÄRISTÖLAINSÄÄDÄNTÖ</b>	<b>13</b>
3.1 Kansainvälinen ympäristölainsäädäntö	13
3.2 Euroopan unionin ympäristölainsäädäntö	13
3.2.1 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU	14
3.2.2 BAT (Best Available Techniques)	14
3.2.3 BREF-asiakirja	17
3.3 Suomen ympäristölainsäädäntö	18
3.4 Ympäristölupa	19
3.5 Päästömittaustandardi	20
<b>4 LAITTEISTO JA MITTAAMINEN</b>	<b>22</b>
4.1 Kerrosleijukattila	22
4.2 Letkusuodatin	23
4.3 Lisäaineen syöttö koelaitteistolla	24
4.4 Mittaaminen	25
4.5 Mittalaitteet	26
<b>5 POLTTOAINEET</b>	<b>28</b>
5.1 Biomassa	28
5.2 Sekaliete	29
5.3 Kierrätyspolttoaine	29
<b>6 SAVUKAASUJEN PUHDISTUS</b>	<b>31</b>
6.1 Savukaasut	31
6.2 Savukaasujen puhdistus	31
6.3 Koeajon savukaasujen puhdistus	32

6.4 Sorbentit	32
6.4.1 Tuote 1 (Ca(OH) <sub>2</sub> )	34
6.4.2 Tuote 2 (Ca(OH) <sub>2</sub> )	35
6.4.3 Tuote 3 (NaHCO <sub>3</sub> )	35
<b>7 KOEAJO</b>	<b>36</b>
7.1 Koeajosuunnitelma	36
7.2 Koeajon tavoite	37
7.3 Koeajon tulokset	38
<b>8 YHTEENVETO</b>	<b>40</b>
8.1 Ennalta huomioon ottamattomat vaikutukset	40
8.2 Tulosten korrelointi ja analysointi	41
8.3 Arvio BAT/BREF FD -päästövaatimusten saavuttamisesta	42
<b>9 KOKOAVA TARKASTELU</b>	<b>43</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>45</b>

## KAAVAT

Kaava 6.1 Kalsiumhydroksidin reagointi rikkidioksidin kanssa (British lime association 2017).	33
Kaava 6.2 Kalsiumhydroksidin reagointi vetykloridin kanssa (British lime association 2017).	33
Kaava 6.3 Natriumvetykarbonaatin reagointi rikkidioksidin kanssa (Karpf 2015, 11).	33
Kaava 6.4 Natriumvetykarbonaatin reagointi vetykloridin kanssa (Karpf 2015, 11).	34

## KUVAT

Kuva 1 Voimalaitosalue (UPM Paper ENA, valokuva-arkisto).	11
Kuva 2 Jätevedenpuhdistamo (UPM Paper ENA, valokuva-arkisto).	12
Kuva 3 Kolmivaiheinen prosessi, ennen kuin ympäristönsuojeluasetus tiukentuu.	17
Kuva 4 Aker Kvaerner HYBEX -kerrosleijukattila (UPM Paper ENA, valokuva-arkisto).	22
Kuva 5 Alstom-letkusuodatin LKPB (UPM Paper ENA, valokuva-arkisto).	23
Kuvat 6 ja 7 Tomalin syöttölaitteisto ja suursäkin vaihto.	24
Kuvat 8 ja 9 Y-haaroituskappale ja syöttökohdat savukaasukanavaan.	25

## KUVIOT

Kuvio 5.1 HK6:n käyttämät polttoaineet vuonna 2013 (Rauman Voima 2015, 3–4). 28

## TAULUKOT

Taulukko 3.1 BAT-tekniikoita rikkidioksidin- ja vetykloridin poistoon sekapoltoissa (European Commission 2006, 525).	15
Taulukko 3.2 Oletetut tulevat BAT-päästötasot kiinteitä biopolttoaineita käyttäville LCP-voimalaitoksille SO <sub>2</sub> osalta (European Commission 2016, 777).	16
Taulukko 3.3 Oletetut tulevat BAT-päästötasot kiinteitä biopolttoaineita käyttäville LCP-voimalaitoksille HCl:n osalta (European Commission 2016, 777).	16
Taulukko 3.4 Vuorokausikeskiarvo päästörajat jätteenpolttolaitokselle (VA 151/2013, liite 2).	19
Taulukko 3.5 Vuorokausikeskiarvo päästörajat kiinteää polttoainetta käyttävälle polttovoimalaitokselle (VA 936/2014, liite 2).	19
Taulukko 3.6 Ympäristöluvassa kirjatut päästöarajat Rauman Biovoima Oy:n HK5- ja HK6-rinnakkaispolttolaitoksille (Rauman Voima 2015, 10).	20
Taulukko 5.1 Kierrätyspolttoaineiden laatuluokat (Euroopan komissio 2006, 18).	30
Taulukko 7.1 Yhteenveto koeajon tuloksista.	39

# LYHENTEET JA SYMBOLIT

## Lyhenteet

AST	<i>Annual Surveillance Test</i> , eli vuosittainen valvonta.
BAT	<i>Best Available Techniques</i> , eli paras käyttökelpoinen tekniikka. Kehittyneet ja tehokkaat menetelmät sekä tavat, jotka ovat kansainvälisesti julkistettu. Huomioon otetaan tekniset ja taloudelliset näkökohdat.
BREF	<i>BAT Reference Document</i> , eli parhaan käyttökelpoisen tekniikan vertailuasiakirja. Euroopan unionin komission organisoima tiedon vaihdon vertailuasiakirja teollisuuden ja viranomaisten välillä.
BFB	<i>Bubbling Fluidized Bed</i> , eli kerrosleijutekniikkaa käyttävä polttovoimalaitoksen kattila.
ELY	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus.
HK6	Rauman Biovoima Oy:n järjestysnumero kuudentena oleva BFB-kattila, jonka savukaasupäästöjä opinnäytetyö tutkii.
LCP	<i>Large Combustion Plant</i> , eli suuri polttolaitos, tai kaasuturbiini, jonka tuotantoteho on enemmän kuin 50 MW.
REF	<i>Recovered Fuel</i> , eli kierrätyspolttoaine.
QAL	<i>Quality Assurance Level</i> , eli laadunvarmistuksen taso.
QAL1	<i>Quality check of the measuring procedure</i> , eli mittausmenetelmän soveltuvuus käyttökohteeseen.
QAL2	<i>Quality assurance of installation</i> , eli kiinteästi asennetun mittalaitteen kalibrointi ja validointi referenssimenetelmän avulla.
QAL3	<i>Ongoing quality assurance during operation</i> , eli käytönaikainen laadunvarmistus.

## Symbolit

(g)	Gas, aine on kaasumaisessa olomuodossa
-----	--



(s)	<i>Solid</i> , aine on kiinteässä olomuodossa
bar	Baari
g	Gramma
kg	Kilogramma
mol	Mooli
s	Sekunti
µm	Mikrometri
mm	Millimetri
mg	Milligramma
MW	Megawatti
nm	Nanometri
Nm <sup>3</sup>	Normaaliolosuhteiden ilman kuutiometri
VI	Roomalaisten aakkosten järjestysnumero kuusi
°C	Lämpötila celsiusasteina
%	Prosenttiosuus
§	Pykälä

# 1 JOHDANTO

Tämän insinööriyön lähtökohtana on Euroopan ympäristölaki ja sitä noudattava Suomen kiristynyt ympäristönsuojelulainsäädäntö. Suomessa ympäristöön haitallisten päästöjen valvovana elimenä toimii alueen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY), aluehallintovirasto ja kunnan ympäristönsuojeluviranomainen. Teollisuudelle toimintokohtaisen ympäristöluvan myöntää aluehallintovirasto, mikäli ympäristöluvan on oltava myös vesilain mukainen. Ympäristönsuojelulain tiukentuvat päästädirektiivit vaativat kaikkia markkinoilla olevia energia-alan toimijoita vähentämään voimalaitoksien polttoreaktiossa syntyviä haitallisia savukaasupäästöjä. Päästöjen on oltava yhden mukaiset *Best Available Techniques* (BAT), parhaan mahdollisen tekniikan, kanssa.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Rauman Biovoima Oy:n kerrosleijukattilan rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöjen vähentymistä sorbenttia syöttämällä. Työssä kartoitetaan, päästäänkö ja millä kolmesta eri lisäaineesta päästään toimeksiantajan asettamiin tavoitearvoihin. Tuloksia verrataan nykyiseen päästöjenhallintaan ja päästokeskiarvoihin. Tutkimustulokset ja analyysit ovat keskeisiä Rauman Biovoima Oy:n investointipäätöksessä uudesta savukaasujen puhdistustekniikasta. Koeajotilanne toimii vertailukohtana seuraavaa ympäristölupahakua valmistaessa.

Tutkimusaineisto kerätään kolmesta koeajosta, jotka suoritetaan neljän päivän pituisina jaksoina. Jokaisessa jaksossa kokeillaan eri sorbentti-lisäaineen syöttöä savukaasukanavaan ennen letkusuodatinta. Syöttöä tehdään sekä nykyisen puhdistustekniikan kanssa että ilman. Tulokset korreloidaan muiden päästöihin vaikuttavien tekijöiden osalta ja haluttuihin tavoitearvoihin pääsemisestä tehdään selvitys.

Opinnäytetyön alussa esitellään toimeksiantaja ja tutkimuksesta ajankohtaisen tekevä ympäristölainsäädäntö. Tämän jälkeen jatketaan laitteiston ja savukaasujen puhdistuksen yleisellä teorialla, jonka tunteminen on tärkeää mittaustuloksia analysoidessa. Työssä kuvataan lisäaineiden syöttöjärjestelmä, mittauslaitteet, koeajosuunnitelma ja saadut tulokset. Opinnäytetyön lopuksi otetaan esille ennalta huomioon ottamattomat vaikutukset ja tehdään päätelmiä koeajojen tavoitteiden täyttymisestä.

## 2 TOIMEKSIANTAJA

### 2.1 Rauman Biovoima Oy

Rauman Energia omistaa 28 % Rauman Biovoima Oy:stä. Biovoimalaitos tuottaa Rauman Energialle kaukolämpöä ja sähköä. Pohjolan Voima Oy omistaa yhtiöstä 72 %. Voimalaitos sijaitsee Sampaanalanlahdella UPM Paper ENA Oy:n tehdasalueella ja tuottaa prosessihöyryä, kaukolämpöä sekä sähköä. (Pohjolan Voima 2015; Pohjolan Voima 2016; Rauman Energia 2017.)



Kuva 1 Voimalaitosalue (UPM Paper ENA, valokuva-arkisto).

### 2.2 UPM Paper ENA Oy

UPM Paper ENA Oy on yksi UPM-Kymmene Oyj:n kuudesta liiketoiminta-alueesta. Yhtiön toiminta-ajatus on luoda lisäarvoa uusiutuvista ja kierrätettävistä raaka-aineista. UPM Paper ENA rajoittuu Euroopan ja Pohjois-Amerikan paperinvalmistuksen tehdasalueisiin. Raumalla tehdasalue kattaa kolme paperikonelinjaa, kuorimon, kaksi hiomoa ja kuumahiertämöä, revintämassaosaston, vesilaitoksen, biologisen jätevedenpuhdistamon ja biovoimalaitoksen. Forchem Oy:n mäntytislaamo ja Metsä Fibren sellutehdas sijaitsevat myös tehdasalueella. (UPM-Kymmene 2015, 1.)



Kuva 2 Jätevedenpuhdistamo (UPM Paper ENA, valokuva-arkisto).

UPM on osaomistajana Pohjolan Voima Oy:ssä 42,83 %:n omistusoikeudella ja on tätä kautta kytköksissä Rauman Biovoimaan. UPM:n työntekijät vastaavat biovoimalaitoksen operoimisesta ja ylläpitämisestä. Rauman Biovoima Oy:n toimitusjohtaja Timo Pitkänen toimii myös UPM:n Rauman tehdasalueen energiapäällikkönä. (Pohjolan Voima 2015.)

### 2.3 UPM-Kymmene Oyj

Vuonna 2015 UPM:n liikevaihto oli 10 138 miljoonaa euroa, eli 10,1 miljardia euroa. Yhtiön liikevoitto oli samana vuonna 898 miljoonaa euroa ennen kertaluontoisia eriä. UPM on ollut neljänä peräkkäisenä vuotena mukana Dow Jonesin kestävän kehityksen indeksissä. Yhdistyneet Kansakunnat kutsui UPM:n mukaan *Global Compact* LEAD-foorumiin. Osoituksena ulkopuolisesta tunnustuksesta yhtiölle; LEAD:n jäseniksi on kutsuttu 50 vastuullisuuden edelläkävijäyrittäystä eri maista ja teollisuudenaloilta. UPM on ensimmäinen LEADiin kutsuttu metsäteollisuusyhtiö ja ensimmäinen suomalaisjäsen. (UPM-Kymmene 2015, 1–2.)

## 3 YMPÄRISTÖLAINSÄÄDÄNTÖ

### 3.1 Kansainvälinen ympäristölainsäädäntö

Lainsäädäntö määrittää yhteiset pelisäännöt. Ympäristölainsäädännön tarkoituksena on pitää huolta yhteisesti jaetusta maapallon tilasta. Tällä hetkellä ei ole yhtä yhtenäistä kansainvälistä ympäristölainsäädäntöä. Valtiot toimivat itse asioistaan päättävinä, vaikkakin ottavat ohjeistuksensa asiantuntijoiden suosituksista. Yhteinen kansainvälinen ympäristölainsäädäntö pystyisi auttamaan parhaiden toimintatapojen jakamisessa ja ei kestävien toimintatapojen estämisessä. On perustettu globaaleja organisaatioita ja yhdistyksiä ajamaan ympäristöystävällistä näkökulmaa, kuten *Brundtland Commission* ja *United Nations Environment Programme* (UNED). Globaaleissa organisaatioissa on osallisina satoja maita, instituutioita ja yrityksiä, jotka ovat sitoutuneet noudattamaan yhteisesti sovittuja protokollia.

Mainitaan esimerkkinä kestävästä kehityksestä UNED:n asettama *Sustainable Development Goals* (SDG), kestävä kehitys tavoitteet. Seitsemäntenä tavoitteena on edullinen ja puhdas energia. Se kannustaa sijoittajia, sekä yrityksiä, uusiutuvien ja puhtaiden energianlähteiden pariin. Tämä luo tulevaisuuden painetta nykyisille ympäristöpäästöjä tuottaville energiantuotantomuodoille, koska näiden tavoitteiden mukana kehittyvä tekniikka johtaa yhä tiukentuviin päästömääräyksiin ympäristöluvuissa ja päästökaupoissa. (United Nations Development Programme 2016.)

### 3.2 Euroopan unionin ympäristölainsäädäntö

Euroopan unioni on auktorisoitu asettamaan päästömääräykset sen jäsenmaille. Määräys, englannin kielen sana *regulation*, on lainsäädännöllisesti sitova asetus, jota on noudatettava. Päästömääräykset ovat yleispiirteellisiä, eivät tarkkoja arvoja. Niiden tarkoituksena on olla pohja yksityiskohtaisempia lainsäädännöllisiä päätöksiä varten.

Euroopan unionin asettamat direktiivit ovat lainsäädännöllisiä tavoitteita, joihin jäsenmaiden on päästävä. Jokaisella jäsenvaltiolla on vastuu muokata omaa lainsäädäntöään sen mukaisesti, että he yksittäisinä valtioina pääsevät yhdessä asetettuihin tavoitteisiin. Opinnäytetyö on valmistavaa tutkimusta Rauman Biovoima

Oy:tä varten, jotta tulevaisuudessa pystytään vastaamaan Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviin 2010/75/EU.

### 3.2.1 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU

Direktiivi 2010/75/EU on annettu 24. päivänä marraskuuta 2010 koskien teollisuuden päästöjä. Siitä käytetään nimitystä IE-direktiivi (IED). Lyhenne tulee englanninkielisestä nimestä *Industrial Emission Directive*. Direktiivin aihe on yhtenäistetty ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen ja vähentäminen. Se on hyvin kattava ja käsittelee energian tuotannoista aiheutuvia veteen, ilmaan ja maaperään kulkeutuvia päästöjä. Direktiivi antaa yleispiirteellisiä päästötavoitearvoja eri tuotantotavoille ja eri polttoaineille. Se ottaa ohjeistuksensa BATsta. IED:n liitteen VI osassa neljä kohdassa 3.2.1 on maininta 100–300 MW lämpöteholtaan olevan jätteen rinnakkaispolttovoimalaitoksen rikkidioksidi- ja vetykloridipäästörajoista. Ne on asetettu olevan 200 (SO<sub>2</sub>) mg/Nm<sup>3</sup> ja 20 (HCl) mg/Nm<sup>3</sup> (6 %:n jäännöshappipitoisuus) LCP-laitokselle, kun käytettävä polttoaine on biomassassa. (2010/75/EU, 17, 71.)

### 3.2.2 BAT (Best Available Techniques)

BAT, paras mahdollinen tekniikka, on mainittu direktiivin 2010/75/EU ensimmäisen luvun kolmannen artiklan momentissa kymmenen. BAT on määritelty direktiivissä seuraavasti:

Parhaalla käytettävissä olevalla tekniikalla (*best available techniques*, BAT) tietyn toiminnan ja siinä käytettävien menetelmien tehokkainta ja edistyneintä astetta, joka osoittaa sellaiset tekniset ja käytännölliset ominaisuudet, jotka soveltuvat käytännön pohjaksi raja-arvoille ja muille lupaehtoilta, joilla on tarkoitus estää, tai milloin se ei ole mahdollista, vähentää päästöjä ja vaikutuksia koko ympäristöön (2010/75/EU, 23).

Momentin kymmenen alemmat ryhmät ovat a, b ja c, joissa on määritetty sanatarkasti, mitä tekniikoilla, käytettävissä olevilla tekniikoilla ja parhaalla tarkoitetaan. Näin ollen BAT on tiivistettynä määritetty teknillisesti ja taloudellisesti kannattaviin toimintatapoihin ja menetelmiin, jotka tehokkaimmalla tavalla pyrkivät ympäristön suojelun korkeaan tasoon. (2010/75/EU, 23.)

Taulukko 3.1 BAT-teknikoita rikkidioksidin- ja vetykloridin poistoon sekapoltossa (European Commission 2006, 525).

Technique	Environmental benefit	Applicability		Operational experience	Cross-media effects	Economics	Remarks	
		New plants	Retrofitable					
<b>Particulate matter</b>								
ESP	Reduction of dust and heavy metals	Possible	Possible	High		Plant specific	Techniques that have been considered in the determination of BAT within the fuel specific chapters can also be considered when secondary fuel is co-combusted. However, the co-combustion of secondary fuel can lead to the following effects:  ∞ a change in the flue-gas volume and composition, with consequences for the heat transfer and flue-gas cleaning systems (e.g. deactivation of SCR catalyst by As, P, F and alkali metals), and interference with FGD systems  ∞ good and even combustion conditions have to be enabled (including flame stability, flame temperature, formation of an oxidative atmosphere at the surfaces of the boiler, prevention of the formation of 'strands')  ∞ emissions to the air (especially emissions of Hg, heavy metals, dioxins and furans, HCl, HF, unburned carbon, and CO) may be increased.  In particular, when secondary fuel with a higher volatile metal contents (Hg) than in conventional fuel is used, the additional injection of activated carbon is a technique that should be considered in the determination of BAT	
Fabric filters	Reduction of dust and heavy metals	Possible	Possible	High				
<b>SO<sub>2</sub></b>								
Wet, semi dry or dry FGD techniques	Reduction of SO <sub>2</sub> , HCl, HF dust and heavy metals	Possible	Possible	High		Plant specific		
<b>NO<sub>x</sub></b>								
Primary and/or secondary measures	Reduction of NO <sub>x</sub>	Possible	Possible	High		Plant specific		
<b>Heavy metals and others such as VOC and dioxins</b>								
ESP or fabric filters, wet, semi-dry or dry FGD techniques and, as an additional option, the injection of activated carbon	Reduction of SO <sub>2</sub> , HCl, HF dust and heavy metals (in particular Hg) as well as VOC and dioxin	Possible	Possible	High		Plant specific		

Note: To control air emission, also other techniques can be applied, therefore references is given to the sections of the BREF describing the techniques available for solid, liquid fuel and gaseous fuels and in Chapter 3

BAT-teknikat on julkaistu englannin kielellä. Vain tiivistelmät BATsta suomennetaan viralliseen muotoon. Taulukkoa 3.1 luetaan vasemmalta oikealle päin. Esimerkiksi sähkösuodatin (ESP) on tekniikka, jota käytetään. Ympäristöhyöty sähkösuodattimen käytöstä on pölyn, hiukkasten ja raskas metallien puhdistuminen savukaasusta. Tekniikkaa on mahdollisuus soveltaa uusiin ja jo olemassa oleviin polttovoimaloihin. Sähkösuodattimen käytöstä on paljon kokemusta ja taloudellinen kannattavuus täytyy katsoa voimalaitoskohtaisesti.

Mahdollisuus BAT, tai päästöraja-arvo, poikkeamaan on kahdessa poikkeustilanteessa. Kun laitoksen maantieteellisen sijainnin tai paikallisten ympäristöolosuhteiden vaatimukset ovat poikkeavat, tai kun voimalan tekniset ominaisuudet ovat sen kaltaiset. Näissä tapauksissa otetaan huomioon periaate, että päästötasojen saavuttaminen ei johtaisi ylitsepääsemättömän suuriin kustannuksiin ympäristöhyötyihin verrattuna. (2010/75/EU, 29.)

Poikkeusrajojen saaminen päästöihin on mahdollista, mikäli toinen edellä mainituista tilanteista täyttyy. Asiasta pitää tehdä selvitys ympäristölupahakemukseen, ja pyyntö poikkeamaan raja-arvoissa. Poikkeuslupaa ei automaattisesti saa, sillä tilanteessa mennään ympäristön näkökulma edellä, eikä taloudellinen. Rauman Biovoiman höyrykattilalla (HK6) tilanne ei ole poikkeustilannetta vastaava, joten tulevaisuuden parhaimpaan käytössä olevaan tekniikkaan päästään laiteinvestoinnilla.



Taulukko 3.2 Oletetut tulevat BAT-päästötasot kiinteitä biopolttoaineita käyttäville LCP-voimalaitoksille SO<sub>2</sub> osalta (European Commission 2016, 777).

Combustion plant total rated thermal input (MW <sub>th</sub> )	BAT-AELs for SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )			
	Yearly average		Daily average or average over the sampling period	
	New plant	Existing plant <sup>(2)</sup>	New plant	Existing plant <sup>(5)</sup>
< 100	15–70	15–100	30–175	30–215
100–300	< 10–50	< 10–70 <sup>(1)</sup>	< 20–85	< 20–175 <sup>(3)</sup>
≥ 300	< 10–35	< 10–50 <sup>(1)</sup>	< 20–70	< 20–85 <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> For existing plants burning fuels where the average sulphur content is 0.1 wt-% (dry) or higher, the higher end of the BAT-AEL range is 100 mg/Nm<sup>3</sup>.  
<sup>(2)</sup> These BAT-AELs do not apply to plants operated < 1500 h/yr.  
<sup>(3)</sup> For existing plants burning fuels where the average sulphur content is 0.1 wt-% (dry) or higher, the higher end of the BAT-AEL range is 215 mg/Nm<sup>3</sup>.  
<sup>(4)</sup> For existing plants burning fuels where the average sulphur content is 0.1 wt-% (dry) or higher, the higher end of the BAT-AEL range is 165 mg/Nm<sup>3</sup>, or 215 mg/Nm<sup>3</sup> if those plants have been put into operation no later than 7 January 2014 and/or are FBC boilers combusting peat.  
<sup>(5)</sup> These levels are indicative for plants operated < 500 h/yr.

Taulukko 3.3 Oletetut tulevat BAT-päästötasot kiinteitä biopolttoaineita käyttäville LCP-voimalaitoksille HCl:n osalta (European Commission 2016, 777).

Combustion plant total rated thermal input (MW <sub>th</sub> )	BAT-AELs for HCl (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(1bis)</sup> <sup>(1ter)</sup>				BAT-AELs for HF (mg/Nm <sup>3</sup> )	
	Yearly average or average of samples obtained during one year		Daily average or average over the sampling period		Average over the sampling period	
	New plant	Existing plant <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup>	New plant	Existing plant <sup>(4)</sup>	New plant	Existing plant <sup>(5)</sup>
< 100	1–7	1–15	1–12	1–35	< 1	< 1.5
100–300	1–5	1–9	1–12	1–12	< 1	< 1
≥ 300	1–5	1–5	1–12	1–12	< 1	< 1

<sup>(1bis)</sup> For plants burning fuels where the average chlorine content is ≥ 0.1 wt-% (dry), or for existing plants co-combusting biomass with sulphur-rich fuel (e.g. peat) or using alkali chloride-converting additives (e.g. elemental sulphur), the higher end of the BAT-AEL range for the yearly average for new plants is 15 mg/Nm<sup>3</sup>, the higher end of the BAT-AEL range for the yearly average for existing plants is 25 mg/Nm<sup>3</sup>. The daily average BAT-AEL range does not apply to these plants.  
<sup>(1ter)</sup> The daily average BAT-AEL range does not apply to plants operated < 1500 h/yr. The higher end of the BAT-AEL range for the yearly average for new plants operated < 1500 h/yr is 15 mg/Nm<sup>3</sup>.  
<sup>(2)</sup> These BAT-AELs do not apply to plants operated < 1500 h/yr.  
<sup>(3)</sup> The lower end of these BAT-AEL ranges may be difficult to achieve in the case of plants fitted with wet FGD and a downstream gas-gas heater.  
<sup>(4)</sup> These levels are indicative for plants operated < 500 h/yr.

Taulukoissa 3.2 ja 3.3 on virallista julkistusta odottavat BAT-päästöarvot rikkidioksidille ja vetykloridille. Opinnäytetyön alussa mainittiin kiristyvistä ympäristönsuojelulainsäädännöstä. Se tarkoittaa päästöraja-arvojen tiukentumista käytännössä. Tiukentuvien raja-arvojen alapuolelle pitää päästä, jotta tulevaisuudessa saa ympäristöluvan. Tämän johdosta käytetään osittain viite- ja lähdemateriaalina vielä virallista julkistamista odottavaa aineistoa. Sorbentin syöttämisen tavoitteena on katsoa millä kolmesta lisäaineesta päästään tulevaisuuden BAT-tavoitearvoon. Ne ovat



taulukoiden 3.2 ja 3.3. mukaan rikkidioksidille 10–70 mg/Nm<sup>3</sup> ja vetykloridille 1–9 mg/Nm<sup>3</sup>, kun kyseessä on jo olemassa oleva suuri voimalaitos.

### 3.2.3 BREF-asiakirja

*Best available techniques Reference Document* (BREF) on se asiakirja, johon jäsenmaiden parhaat toimintatavat on kirjattu tiedon jakamista varten. LCP BREF on suunnattu toimijoille, joiden voimalaitos on yli 50 MW lämpötehoaan. Se listaa parhaat toimintatavat kiinteitä polttoaineita käyttäville voimalaitoksille, tarkoittaen myös kaasua ja nesteitä. Euroopan komission viimeisin virallinen julkaistu LCP BREF on vuodelta 2006. (European Commission 2006.)

BREF Final Draft on vielä luonnos- ja tarkistusvaiheessa, mutta on kuitenkin julkisesti luettavissa. Kyseiseen asiakirjaan tulee muokkauksia hyvin harvoin, sillä tekniikat ovat lähestulkoon samat, mutta tavat soveltaa paranevat. BREFissä mainitaan rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöjen puhdistus toimintatapoja, kuten kalkin injektointi, savukaasupesurin kuiva ja märkäpesu, sekä lisäaineen syöttö savukaasukanavaan (European Commission 2016). Kun BREF Final Draftin sisältämät tiedot ja tekniikat julkaistaan, niistä tulee sen hetkiset BAT-toimintatavat. Tämä tarkoittaa, että nykyinen BREF päivittyy BREF Final Draftista niiltä toimintaohjeiden osilta, jotka saavat virallisen hyväksynnän.



Kuva 3 Kolmivaiheinen prosessi, ennen kuin ympäristönsuojeluasetus tiukentuu.

### 3.3 Suomen ympäristölainsäädäntö

Suomen ympäristölainsäädännön perustana on ympäristönsuojelulaki (YSL) 527/2014. Lain tarkoituksena on ehkäistä ympäristön pilaantumista ehkäisemällä ja vähentämällä päästöjä, sekä poistamalla pilaantumisesta aiheutuvia haittoja. Näillä keinoilla, ja torjumalla ympäristövahingot, pyritään turvaamaan monimuotoinen ympäristö. Lainsäädännöllä edistetään luonnonvarojen kestävää käyttöä, mikä johtaa kestäväan kehitykseen. Ilmastonmuutosta torjutaan vähentämällä, sekä ehkäisemällä, jätteiden määrää ja haitallisuutta. Laki tehostaa ympäristöä pilaavan toiminnan vaikutuksen arviointia. Se ohjaa ympäristöluvan hakijaa ottamaan huomioon ympäristölle aiheutuva kuorma kokonaisvaltaisesti. (YSL 527/2014, 1§.)

YSL 527/2014 on täysin yhdenmukainen Euroopan unionin ohjeistaman ympäristölainsäädännön kanssa. Pykälässä viisi YSL 527/2014 määrittelee muun muassa parhaan mahdollisen tekniikan samalla tavalla kuin Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2010/75/EU (2010/75/EU, 23; YSL 527/2014, 5§).

Toiminta, jossa on vaarana ympäristön pilaantumista, on luvanvarainen. Ympäristölupa on hankittava aina kun toiminnassa on riski vesistön pilaantumiselle, riski jäteveden johtumisen seurauksena tapahtuvalle noron pilaantumiselle tai kohtuuttomalle rasitukselle naapuruussuhteisiin. Koeluonteisen toiminnan lyhytaikaiset poikkeamat määräyksiin ovat mahdollisia, kun kokeillaan uutta tekniikka. Opinnäytetyötä koskeva projekti on ilmoitettu ELYlle, ja he ovat hyväksyneet koeajon mahdolliset poikkeavat tilanteet päästöihin. (YSL 527/2014, 27, 31§.)

HK6:n toimii rinnakkaispolttolaitoksena. Kattilassa käytetään useaa polttoainelähdettä, joille jokaiselle on määrätty omat päästöraja-arvot. Päästöraja-arvot ovat luettavissa käytettävää toimintatapaa koskevasta asetteesta. Asetteet ovat eroteltu muun muassa voimalaitoksen koon, käytettävän polttoaineen ja energiantuotantotavan perusteella. Valtioneuvoston asetus (VA) 151/2013 jätteen polttamisesta ja asetus (VA) 936/2014 suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamisesta ovat yhdessä perusta HK6:n rinnakkaispolton päästöraja-arvoille.

Taulukko 3.4 Vuorokausikeskiarvo päästörajat jätteenpolttolaitokselle (VA 151/2013, liite 2).

Epäpuhtaus	Raja-arvo, mg/m <sup>3</sup> (n)
Hiukkasten kokonaismäärä	10
Kaasumaiset ja höyrymäiset orgaaniset aineet orgaanisen hiilen kokonaismääränä (TOC)	10
Suolahappo (HCl)	10
Fluorivety (HF)	1
Rikkidioksidi (SO <sub>2</sub> )	50
Typsimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO <sub>2</sub> ) typpidioksidina; koskee käytössä olevia jätteenpolttolaitoksia, joiden nimelliskapasiteetti on yli 6 tonnia/tunti, sekä uusia jätteenpolttolaitoksia	200
Typsimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO <sub>2</sub> ) typpidioksidina; koskee käytössä olevia jätteenpolttolaitoksia, joiden nimelliskapasiteetti on enintään 6 tonnia/tunti	400

Taulukko 3.5 Vuorokausikeskiarvo päästörajat kiinteää polttoainetta käyttävälle polttovoimalaitokselle (VA 936/2014, liite 2).

Polttoaineteho (P) MW	Biomassa (mg/Nm <sup>3</sup> )		Turve (mg/Nm <sup>3</sup> )		Kivihiili ja muut kiinteät polttoaineet (mg/Nm <sup>3</sup> )	
	SO <sub>2</sub>	HCl	SO <sub>2</sub>	HCl	SO <sub>2</sub>	HCl
100 ≤ P ≤ 300	200	20	300	20	250	25

Taulukoista 3.4 ja 3.5 huomaa kuinka vetykloridin (HCl) päästöarvot ovat eri suuruiset poltettaessa jätettä ja turvetta. Toiminnanharjoittajan omankädenoikeuden ja soveltamisen sijaan on ympäristölupaan merkitty voimalaitoskohtaiset lupa-rajat.

### 3.4 Ympäristölupa

Ympäristöluvan saadakseen toimijan pitää täyttää YSL 527/2014 ja ympäristönsuojeluasetteen (YSA) 713/2014 vaatimukset. Kansainvälisen ja Suomen ympäristölainsäädännön noudattamisen helpottamiseksi on toimintakohtaiset asetteet, jotka täyttämällä saa ympäristöluvan. Ympäristölupaa pitää hakea sen myöntävältä viranomaiselta ja se on voimassa toistaiseksi tai määräajaksi. Ympäristöluvan saatuaan toimijan pitää pysyä sovitussa ehdoissa. Ympäristöluvan hakuprosessi on monivaiheinen.

Määräyksessä annettuja päästöraja-arvoja katsotaan noudatetun, jos yksikään raja-arvoon verrattava päästöjen kuukausittainen keskiarvo ei ylitä päästöraja-arvoja, yksikään raja-arvoon verrattava päästöjen vuorokausikeskiarvo ei ylitä 110 prosenttia päästöraja-arvoista, ja 95 prosenttia kaikista vuoden aikana raja-arvoon verrattavista päästöjen tuntikeskiarvoista ei ylitä 200 prosenttia päästöraja-arvoista (Rauman Voima 2015, 9).

Ympäristöluvassa kerrotaan hyvin tarkasti, miten laitoksen toimintaa pitää tarkkailla ja kuinka arvot pitää antaa. Siinä luetellaan syyt, minkä takia annetut päästörajat ovat sen suuruiset kuin ovat ja kuinka muutosta hakiessa tulee toimia.

Taulukko 3.6 Ympäristöluvassa kirjatut päästöraja-arvot Rauman Biovoima Oy:n HK5- ja HK6-rinnakkaispolttolaitoksille (Rauman Voima 2015, 10).

	HK5	HK6
typenoksidit (NO <sub>2</sub> :na)	251 mg/m <sup>3</sup> (n)	252 mg/m <sup>3</sup> (n)
rikkidioksidi	168 mg/m <sup>3</sup> (n)	169 mg/m <sup>3</sup> (n)
hiukkaset	19 mg/m <sup>3</sup> (n)	19 mg/m <sup>3</sup> (n)
hiilimonoksidi	123 mg/m <sup>3</sup> (n)	123 mg/m <sup>3</sup> (n)
orgaaninen hiili (TOC)	15 mg/m <sup>3</sup> (n)	15 mg/m <sup>3</sup> (n)
suolahappo (HCl)	16 mg/m <sup>3</sup> (n)	60 mg/m <sup>3</sup> (n)
fluorivety (HF)	1,5 mg/m <sup>3</sup> (n)	4 mg/m <sup>3</sup> (n)
kadmium+tallium	0,05 mg/m <sup>3</sup> (n)	0,05 mg/m <sup>3</sup> (n)
elohopea	0,05 mg/m <sup>3</sup> (n)	0,05 mg/m <sup>3</sup> (n)
muut raskasmetallit*	0,5 mg/m <sup>3</sup> (n)	0,5 mg/m <sup>3</sup> (n)
dioksiinit ja furaanit	0,1 ng/m <sup>3</sup> (n)	0,1 ng/m <sup>3</sup> (n)

\*antimoni+arseeni+lyijy+kromi+koboltti+kupari+mangaani+nikkeli+vanadiini

Kun vertaa taulukkoa 3.6 aikaisempiin taulukoihin 3.4 ja 3.5, huomaa, kuinka päästöraja-arvoja on sovellettu. Ne on asetettu laitoskohtaisesti omiksi päästörajoiksi.

### 3.5 Päästömittaustandardi

Eurooppalaisen standardoimisen valvovana elimenä toimii *European Committee for Standardization* (CEN), organisaatio. CENin jäsenmaita vaaditaan hyväksymään osa standardeista kansallisiksi standardeiksi ilman muokkausta. Suomi on osa CEN-organisaatiota, joten päästöjenmittaus standardit on Suomen Standardisoimisliitto ry asettanut eurooppalaisten standardien mukaisiksi. (European Committee for Standardization 2017.)

Standardi SFS-EN 15259 on tullut voimaan Suomessa vuonna 2008 ja on eurooppalaiselta tunnukseltaan EN 15259:2007. Se määrittää ilmanlaadunmittaamista kiinteästä lähteestä. Standardi käsittelee mittauskohtia, -paikkoja, -tavoitteita, -suunnitelmia ja -raportteja. Se korvasi aikaisempia SFS 3869-, SFS 3869:Sv- ja SFS 5625 standardeja. (Suomen Standardisoimisliitto (SFS) 2012.)

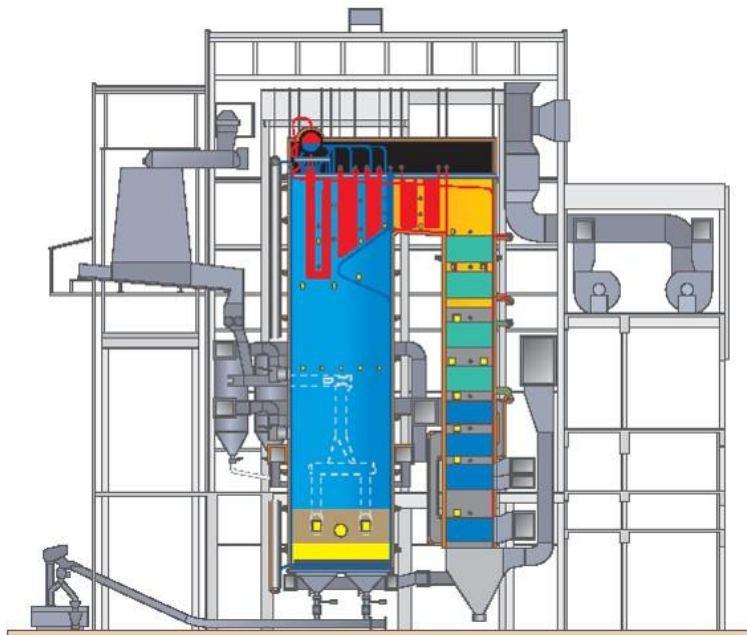
Kaikkia vaadittavia standardeja ei ole lueteltu, mutta muita mainittavia ilmanlaatuohjaavia standardeja on muun muassa SFS-EN 14181, SFS-EN 14789, SFS-EN 15267, SFS-5624 ja SFS-EN 14212. Opinnäytetyön tarkoituksena ei ole käsitellä syvällisemmin itse standardeja, vaan todeta, että toimintatavat ja laitteet ovat standardien mukaisia.

## 4 LAITTEISTO JA MITTAAMINEN

### 4.1 Kerrosleijukattila

Kerrosleijukattila saa nimensä käytettävästä leijupolttotekniikasta. Niin kutsuttu peti kuplii käyttölämpötilassa 750–950 °C. Se muodostaa kerroksen, jossa petihiekka pysyy ja polttoaine palaa. Tekniikan ansiosta kerrosleijukattila sopii erityisesti huonolaatuisille polttoaineille. Leijutusmateriaali on luonnonhiekkaa, joka on raekooltaan alle 1,2 mm. BFB-kattilan nimitys tulee sen englanninkielisestä nimestä *Bubbling Fluidized Bed boiler*. (Hyppänen & Raiko 2002, 490.)

Rauman biovoimalaitoksella syötetään sekapolttona bio- ja kierrätyspolttoainetta kattilan pedille. Poikkeustilanteissa ja kattilan sytytyksessä on lupa käyttää öljyä ja hiiltä polttoaineena. HK6:n muodostaman polttolaitoksen polttoaineteho on 120 MW. (Reilama 2017.)



Kuva 4 Aker Kvaerner HYBEX -kerrosleijukattila (UPM Paper ENA, valokuva-arkisto).

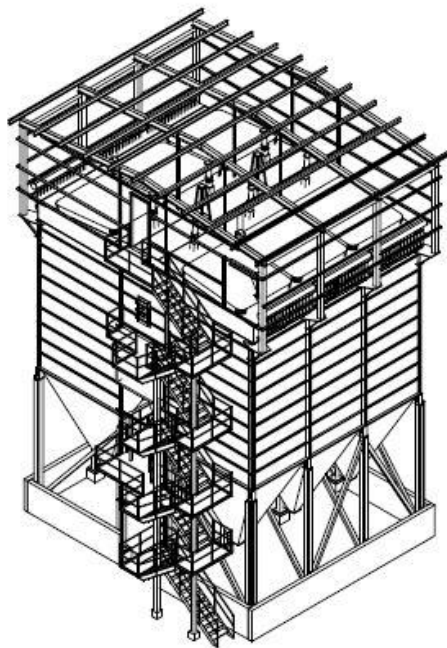
Kerrosleijukattilaa operoidaan Metso DNA -automaatiojärjestelmällä. Syötetystä polttoaineesta vapautuu palamisreaktiossa energiaa ja muodostuu lopputuotteeksi

savukaasuja. Kattilasta saatavat suurimmat tuorehöyryvirran arvot ovat 40 kg/s, 118 bar ja 535 °C. (Rauman Voima 2017a, 12.)

#### 4.2 Letkusuodatin

HK6:lla on käytössä Alstom Finland Oy:n toimittama letkusuodatin. Sen tehtävänä on puhdistaa savukaasuja hiukkasista ja pölystä. Letkusuodatin on erinomainen vaihtoehto pölypäästöjen vähentämiseen. Raumalla olevan letkusuodattimen pölypäästöjen takuuarvoksi toimittaja lupaa 5 mg/Nm<sup>3</sup> (Alstom Finland Oy 2005).

Suodatinletkujen käytettävä materiaali on huovan osalta 80 %:sti polytetrafluorieteeniä (PTFE) ja 20 %:sti polyimidiä (P84). Lisäksi niiden päällä on PTFE-pinnoitus. Letkut ovat kestävyydeltään lähes kaikki kemikaalit kattavaa. Materiaali ei ole syttyvää. (Rauman Voima 2017b, 3.)



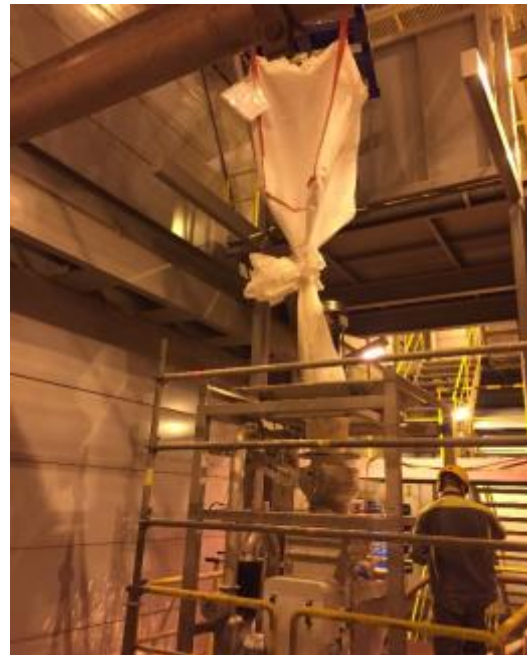
Kuva 5 Alstom-letkusuodatin LKPB (UPM Paper ENA, valokuva-arkisto).

Letkusuodatinyksikkö koostuu 127 mm halkaisijaltaan olevista 7 m pitkistä suodatinletkuista. 2064 suodatinletkua on ryhmitetty kuuteen lohkoon. Automaatiojärjestelmällä ohjataan palamisilmaa menemään haluttujen letkusuodatin lohkojen lävitse, minkä seurauksena savukaasu puhdistuu. Suurin sallittu

käyttölämpötila on 180 °C. Alhaisilla lämpötiloilla ajaminen ei ole toivottua. Lämpötilan madaltuessa savukaasut lähenevät kastepistettä, jolloin seurauksena on kondensoitumisesta johtuvaa tukkeutumista ja korroosiota. (Rauman Voima 2017c, 3, 5.)

#### 4.3 Lisäaineen syöttö koelaitteistolla

Sorbentin syöttö savukaasukanavaan tapahtuu Tomalin syöttölaitteella. Lisäaine annostellaan syöttölaitteistolle 500–1000kg kokoisista suursäkeistä. Lisäaineen syöttölaitteistossa ei ole lisäainesiltoa, josta se annosteltaisiin. Suursäkki vaihdetaan edellisen loputtua. Järjestely on tilapäinen, mutta koeajon onnistumisen kannalta kriittinen. Yksi kolmesta tärkeimmästä mitattavasta arvosta on lisäaineensyötön määrä.



Kuvat 6 ja 7 Tomalin syöttölaitteisto ja suursäkin vaihto.

Vuokralaite kuljettaa 30 metrin matkan lisäainetta 100 millimetriä halkaisijaltaan olevaa putkea pitkin ennen kuin haaroittuu Y-haaroituskappaleella. Haaroittumisen jälkeen putket ovat 80 mm halkaisijaltaan. Savukaasukanavaan on kaksi syöttökohtaa, joiden kautta lisäaine syötetään keskelle kanavaa. Lisäaineen käyttäminen syöttölaitteistolla vaatii työntekijän läsnäoloa.





Kuvat 8 ja 9 Y-haaroituskappale ja syöttökohdat savukaasukanavaan.

Syöttölaitteiston puhallin ja savukaasukanavan imu aiheuttavat putkeen virtauksen, jonka suunta on kohti savukaasukanavaa. Tästä syystä putki ei mene tukkoon suurellakaan syöttömäärällä. Lisäaineet säilytetään kuivassa paikassa kosteudelta suojattuna. Kerran viikossa linja avataan ja tarkistetaan mahdollisen ahtauman välttämiseksi.

Liitteessä 2 on kuvattu sorbentin sekoittuminen tasaisesti savukaasukanavaan. Virtaus on syöttöpisteiden kohdalla turbulenttista, joka edesauttaa sorbentin sekoittumista. Savukaasujen lämpötila on syöttökohdassa alle 180 astetta ja viilenee letkusuodattimelle mennessä 140–160 asteeseen.

#### 4.4 Mittaaminen

Opinnäytetyön keskeisin tutkimus kohdistuu rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöjen vähentämiseen. Näiden kahden suureen lisäksi mitataan myös muita määreitä. Suoraan verrannollisia suureita, jotka vaikuttavat näiden kahden aineen päästömääriin, on muun muassa käytettävä polttoaine, kattilan kuorma, savukaasun lämpötila sekä määrä, tulipesäkalkin kulutus ja lisäaineen kulutus. Kyseisten suureiden arvoja tarkkaillaan, sillä niitä käytetään korreloimaan tuloksia. Ne myös auttavat mittausdatan analysoimisessa.

Mallinnus- ja tallennusjärjestelmänä toimii Vtrin EMS V4.6. Se kokoaa laitteilta reaaliaikaiset päästöarvot ja tallentaa ne muistiin. Tärkeimmät mittauspisteet ovat letkusuotimen jälkeen. Sieltä kerätään tieto savukaasupuhdistuksen jälkeisistä päästöistä, joita verrataan ympäristöluvan asettamiin arvoihin. Puolentunnin keskiarvoista lasketaan vuorokausikeskiarvot. Vuorokautiset päästömäärät kootaan ja raportoidaan ympäristöluvassa esitettyjen ehtojen mukaisesti. Sen lisäksi toiminnanharjoittajan kuuluu lähettää kerran vuodessa vuoden kokonaispäästöt valtion valvontaviranomaiselle sekä kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselle (VA 936/2014, 21§).

#### 4.5 Mittalaitteet

Mittalaitteista mainitaan kolme tärkeintä arvoa mittaavaa laitteistoa. Savukaasujen pitoisuuksia mittaa Gasmel Technologies Oy:n laite CX4000. Laite käyttää savukaasujen konsentraation määrittämiseen Fourier-muunnokseen perustuvaa infrapunatekniikkaa (FTIR). Laitteella on hyvin pieni epätarkkuus, joka auttaa realistisen tuloksen saamisessa.

Lähes kaikki kaasut absorboivat infrapunavaloa kullekin kaasulle ominaisilla aallonpituuksilla. Mittaamalla kullakin aallonpituudella kaasun absorboiman valon määrä saadaan aikaan spektri. Millään kahdella eri aineella ei ole täysin samanlaista infrapunasektriä. Tuntemattoman kaasuseoksen spektristä voidaan mitata seoksen sisältämien kaasujen määrä, kun tunnetaan seoksen sisältämien puhtaiden kaasujen spektrit. (Temet Instruments, 9.)

FTIR-tekniikalla saadaan rikkidioksidin ja vetykloridin pitoisuus ympäristöluvan verrattavassa muodossa. Kahden tärkeimmän arvon, rikkidioksidin ja vetykloridin, mittatarkkuus puhdistuksen jälkeen on luotettava (Temet Instruments, 9).

Opinnäytetyön kohdassa 3.4. mainittiin mittausstandardeista, ja kuinka mittalaitteet ja toimintatavat ovat niiden mukaisia. Mittalaite CX4000 täyttää SFS-EN 14181 mukaiset laadunvarmistus kriteerit. Laadunvarmistus on todennettu QAL1, QAL2, QAL3 ja AST-menetelmillä.

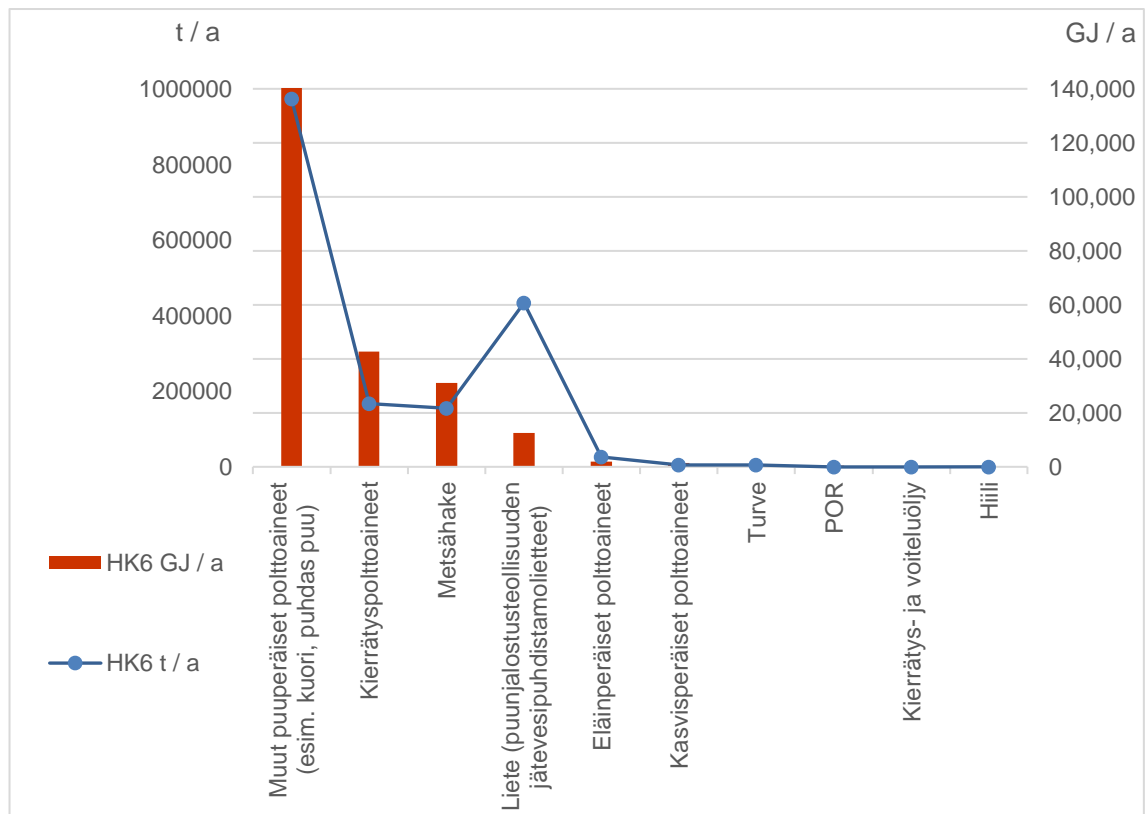
Savukaasujen mittaus ennen letkusuodatinta on tilattu koeajojen ajaksi ulkoiselta toimijalta. Heidän laitteenaan käytetään Gasmel Technologies Oy:n samaan tekniikkaan perustuvaa laitetta. Näin ollen todetaan, että kerättävät datat ovat täysin

vertailukelpoisia, sillä omistajuudella ei ole väliä arvojen saamiseen. Rikkidioksidin ja vetykloridin päästöarvot ennen lisäaineen syöttöä ovat myös luotettavia, sillä heidän laitteensa täyttää myös SFS-EN 14181 standardin asettamat laadunvarmistus kriteerit.

Sorbentin syöttömäärän laskee Tomalin syöttölaitteisto. Laitte käyttää neljää syöttöruuvia lisäaineen annosteluun. Syöttömäärä ei ole vakio, vaikka syöttönopeus on asetettu samaksi. Syöttönopeutta säädetään syöttöruuvien pyörintänopeutta kasvattamalla. Sen ei kuitenkaan oleteta olevan riittävän tarkka mittausta varten. Tästä syystä pidetään yllä päiväkirjaa suursäkkien käytöstä.

## 5 POLTTOAINEET

Rauman Biovoimalaitoksella käytetään polttoaineena biopolttoaineita, kierrätyspolttoainetta ja jätevedenpuhdistamon lietettä. Paperi- ja sellutehtaan muuten hukkaan menevää massaa, esimerkiksi kuitulietettä, käytetään polttoaineena.



Kuvio 5.1 HK6:n käyttämät polttoaineet vuonna 2013 (Rauman Voima 2015, 3–4).

### 5.1 Biomassa

Energiateollisuudessa biopolttoaineet kuuluvat uusiutuviin energian lähteisiin. Puupolttoaineiden osuus Suomen energiantuotannosta oli 25 % vuonna 2015. Vuonna 2015 uusiutuvan energian osuus kasvoi 35 %:n osuuteen energian kokonaiskulutuksesta, joten biomassalla on suuri merkitys pyrkiessä kestäväen kehityksen asettamiin uusiutuvien energianlähteiden tavoitteisiin. (Suomen virallinen tilasto 2016.)

Biomassoihin kuuluvat orgaaniset aineet, joihin on sitoutunut energiaa yhteyttämisen kautta. Raumalla käytettäviä biopolttoaineita on muun muassa paperi- ja sellutehtaalla syntyvä havupuun kuori, osittain kierrätyspolttoaine, tehtaan jäteliemet, metsätähdemurske, hakkuutähteet sekä ostokuori ja -hake. Listaan voidaan myös lisätä eloperäiset maa-, karja- ja kotitalousjätteet. (Rauman Energia 2017.)

## 5.2 Sekaliete

Sekaliete sisältää biolietettä ja tehtaiden kuitulietettä. Primäärilietteeksi kutsuttua kuitulietettä saadaan tehtaiden kuitu- ja täyteainepitoisista vesistä. Vettä raskaammat kiintoaineet laskeutuvat esiselkeyttimen pohjalle, josta ne voidaan erottaa jätevedestä primäärilietteeksi. Primääriliete sisältää puuperäisiä aineita muun muassa kuituja, ligniiniä, selluloosaa, hemiselluloosaa ja kuorimassaa. (Ojanen 2001, 11.)

Tehdasalueella toimiva jätevedenpuhdistamo puhdistaa metsäteollisuuden sekä Rauman ja Eurajoen kuntien jätevedet. Jäteveden puhdistuksessa muodostuu biolietettä, jota kutsutaan myös sekundäärilietteeksi. Jätevettä pitää käsitellä monivaiheisesti saadakseen siitä biolietettä. Yksinkertaistettuna, biolietettä muodostuu mikrobien käyttäessä jäteveden liukoista ja kolloidista orgaanista ainetta ravinnoksi. Sen myötä mikrobimassa kasvaa muodostaen biolietettä. Bioliete sisältää myös kuollutta soluainesta, sekä lietteeseen adsorboitunutta puun uute- ja sidosaineita (Ojanen 2001, 11.)

Koostumukseltaan sekaliete voi olla hyvin kosteaa sekä tuhka-, rikki- ja typpipitoista. Sekalietettä ajaessa pitää varmistaa peti- ja palamislämmön riittävän korkea lämpötila, sekä ilmavaiheistus. Kuten kuvion 5.1 taulukosta voi tulkita, lietteestä saa vähän energiaa verrattuna käytettyyn määrään. Kuvio 5.1 osoittaa tuloksen sille, miten sekaliete voi olla hyvin kosteaa, ja näin ollen ei tuota suurta lämpöarvohyötyä palaessaan kattilassa.

## 5.3 Kierrätyspolttoaine

Biovoimalaitoksen kierrätyspolttoaineeseen käytetään kolmea eri komponenttia: käsiteltyä puuta, erilliskerättyä paperi- ja pakkausjätettä sekä energiajätteistä valmistettua *Recovered Fuel* (REF) 1 ja 2 polttoainetta. Käyttämällä

kierrätyspolttoaineita hiilijalanjälki pienenee, sillä kierrätyspolttoaine korvaa fossiilisia polttoaineita.

Suomessa poltettiin vuonna 2014 noin 50 % yhdyskuntajätteestä. Vuonna 2004 Suomessa poltettiin 12 % yhdyskuntajätteestä. Määrä on nelinkertaistunut kymmenessä vuodessa. Kaatopaikalle vietiin alle yksi viidesosa kaikesta jätteen kokonaismäärästä 2014. (Suomen virallinen tilasto 2015.)

Kierrätyspolttoaine sisältää vaihtelevat määrät rikkiä ja klooria. Kloorin osuus voi olla jopa kaksi massaprosenttia. Ihanne tilanne koeajojen ajaksi olisi homogeeninen REF. Polttoaineen laatua tarkkaillaan, että se voidaan ottaa huomioon tuloksia analysoidessa.

## REF-luokitus

Standardissa SFS-EN 15359:2011 on kirjoitettu kiinteiden kierrätyspolttoaineiden luokitusjärjestelmästä. Listattuna on vaatimukset polttoaineen ominaisuuksista ja laaduista. Näistä tärkeimmät ovat lämpöarvo, klooripitoisuus ja elohopeapitoisuus. Yleisenä nimikkeenä käytetään REF-luokitusta.

Taulukko 5.1 Kierrätyspolttoaineiden laatuluokat (Euroopan komissio 2006, 18).

Luokitusominaisuus	Tilastollinen mitta	Yksikkö	Luokat				
			1	2	3	4	5
Tehollinen lämpöarvo (NCV)	Keskiarvo	MJ/kg (ar)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Luokitusominaisuus	Tilastollinen mitta	Yksikkö	Luokat				
			1	2	3	4	5
Klooripitoisuus (Cl)	Keskiarvo	% (d)	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3
Luokitusominaisuus	Tilastollinen mitta	Yksikkö	Luokat				
			1	2	3	4	5
Elohopeapitoisuus (Hg)	Mediaani 80. prosentti-piste	mg/MJ (ar)	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50
		mg/MJ (ar)	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,30	≤ 1,00

Rauman Biovoima käyttää REF 1 ja REF 2 laatuista kierrätyspolttoainetta. Taulukko 5.1 havainnollistaa, että REF 3, 4 ja 5 laatuisten käyttö aiheuttaa suuremmat päästöt. REF 1 ja 2 polttoaineet aiheuttavat vähiten korroosiota kattilalle, sisältävät suurimman lämpöarvon ja aiheuttavat vähiten savukaasupäästöjä. Polttoaineen toimittajan vastuulla on, että REF-kuormat täyttävät asetetut laatuvaatimukset.

## 6 SAVUKAASUJEN PUHDISTUS

### 6.1 Savukaasut

Polttoaine, joka palaa kerrosleijukattilassa, muuttuu kiinteästä olomuodosta kaasumaiseksi. Kaasumaisessa olomuodossa ollessaan polttoaineen alkuaineet ovat yleensä sitoutuneet happeen tai vetyyn. Savukaasujen haitallisten päästöjen määrät ovat ilmoitettu opinnäytetyössä aikaisemmin mainitussa kohdassa ympäristölupa 3.3.1, katso taulukko 3.6.

Savukaasut vaikuttavat elinympäristöön ja ilmanlaatuun. Suuri määrä rikkiä ilmassa aiheuttaa haposateita. Haposateella on normaalia sadetta matalampi pH arvo ja on suoraan yhteydessä elinympäristön happamoitumiseen. Samoin kuin rikki muodostaa helposti rikkihappoa ulkoilman kanssa, niin myös kaasumuodossa oleva vetykloridi muuttuu suolahapoksi jäähtyessään. Haposateet aiheuttavat muun muassa korroosiota metallipinnoilla. (EPA 2017.)

HK6:n operoija pystyy vaikuttamaan ohjausjärjestelmän säädöillä haitallisten savukaasupäästöjen määrään. Ilmansyötön vaiheistus, savukaasun yli-ilmamäärän optimointi ja kattilan petilämpöjen säätö ovat keinoja, joilla operoija pystyy vaikuttamaan palamisreaktioon ja sitä kautta päästöjen määrään. (Reilama 2017.)

### 6.2 Savukaasujen puhdistus

HK6:n kerrosleijukattilan savukaasujen puhdistuksessa on tällä hetkellä mahdollista käyttää kolmea eri tekniikkaa. Kaksi näistä on käytössä koko ajan, sammutetun kalkin syöttö tulipesään ja letkusuodatin puhdistus. Kolmas on varalla, ammoniakkin syöttö tulipesään. Näiden tekniikoiden käyttö riittää tämän hetkisen ympäristöluvan päästörajoihin pääsemiseen. Kuitusuodattimet, joihin letkusuodattimet kuuluvat, ovat parasta mahdollista tekniikkaa hiukkasten ja raskasmetallien puhdistukseen (Euroopan komissio 2006, 7–8).

Tulipesäkalkkina toimii erään toimittajan sammutettu kalkki. Tulipesäkalkki tulee bulkkitarvarana, jonka raekoko on 90 %:sti alle 90 µm. Syöttö tapahtuu pienellä kuormalla sekundääritasolta ja korkeammalla kuormalla tertiääritasolta. Tasolla tarkoitetaan

kerroksen korkeutta. Seitsemäs kerros on HK6:n korkein kerros, mutta vain toiselta ja viidenneltä kerrokselta voidaan syöttää tulipesäkalkkia. Taso säädetään siitä syystä, että tulipesäkalkin adsorptiokyky kasvaa korkeammassa lämpötilassa (Iisa, Kilpinen & Yrjas 2002, 354).

Letkusuodatin vähentää hiukkasia ja muita partikkeleita savukaasusta. Letkusuodatin on jaettu kuuteen lohkoon, joista viisi on aina ajossa. Jos vain muutama kammio on käytettävissä, on sinne ohjattava pienempi savukaasumäärä. Paineilmapulssit toimivat letkusuodattimen puhdistajana. Se varistaa letkujen ulkopinnalle kertyneen pölyn pohjasuppiloon. Tuhka kerätään konttiin tuhkanpoistoa varten. (Rauman Voima 2017c, 2, 5.)

Ammoniakin syöttö ei ole ollut päällä kahteen vuoteen. Sen tarkoituksena on olla varajärjestelmänä, jos typenoksidi- päästöt kasvavat merkittävästi. Sillä saadaan typpioksidipäästöt laskemaan luparajoihin tarvittaessa. (Reilama 2017.)

### 6.3 Koeajon savukaasujen puhdistus

Koeajojen päätarkoitus on mitata sorbentin käytön vaikutusta HK6 voimakattilan rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöihin sekä tulipesäkalkin kanssa että ilman. Ammoniakin syötöllä ei ole vaikutusta kyseisiin päästöihin, joten sitä ei käytetä koeajon aikana. Tulipesäkalkin syötöllä on vaikutus rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöihin, joten sitä tekniikkaa käytetään tavoitepäästöraja-arvoihin pyrittäessä. Letkusuodattimella on vaikutus rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöjen lisäksi pöly ja hiukkaspäästöihin, joten se on koko koeajon ajan käytössä.

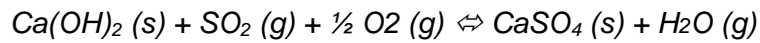
Lisäaineen syöttö savukaasukanavaan, ennen letkusuodatinta, on HK6:lle uusi tekniikka. Aikaisemmin mainitulla Tomalin syöttölaitteistolla, ja suursäkeistä syötettävällä lisäaineella, pyritään pääsemään toimeksiantajan asettamiin tavoitearvoihin. Sen lisäksi, että koitetaan päästä mahdollisimman pieniin arvoihin, pyritään löytämään kustannuksellisesti optimaalinen syöttömäärä.

### 6.4 Sorbentit

Sorbenttien adsorptio-ominaisuudet tulevat esille tarkastellessa reaktioyhtälöitä. Lisäaine reagoi savukaasujen kanssa sitomalla niiden alkuaineita lopputuotteisiin.



Kaava 6.1 Kalsiumhydroksidin reagointi rikkidioksidin kanssa (British lime association 2017).



$\text{Ca(OH)}_2$  = kalsiumhydroksidi, sammutettu kalkki

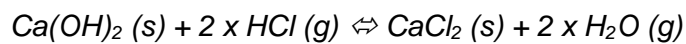
$\text{SO}_2$  = rikkidioksidi

$\text{O}_2$  = happi

$\text{CaSO}_4$  = kalsiumsulfaatti, kipsi

$\text{H}_2\text{O}$  = Vesi

Kaava 6.2 Kalsiumhydroksidin reagointi vetykloridin kanssa (British lime association 2017).



$\text{Ca(OH)}_2$  = kalsiumhydroksidi, sammutettu kalkki

$\text{HCl}$  = vetykloridi

$\text{CaCl}_2$  = Kalsiumkloridi

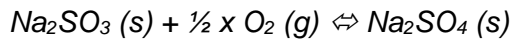
$\text{H}_2\text{O}$  = vesi

Sammutetun kalkin tarkoitus on poistaa kaasulomuodossa olevia päästöjä reaktioyhtälöiden kaava 6.1 ja kaava 6.2 mukaisesti. Lisäaine reagoi myös muiden savukaasujen kanssa, kuten halogenoitujen happojen kanssa. Muita aineita ei käsitellä tässä opinnäytetyössä tarkemmin. Sorbentit sitovat komponentit itseensä ja muodostavat lopputuotetta, joka ei läpäise pöly- ja hiukkassuodatinta. Lopputuote päätyy pöly ja hiukkassuodattimen, eli letkusuodattimen, pohjalle, josta se kuljetetaan jatkokäsiteltäväksi.

Kolmas tutkittava sorbentti on natriumbikarbonaatti. Lisäaine eroaa kemialliselta koostumukseltaan kahdesta muusta sorbentista, joten myös lopputuotteet ovat erilaiset kemiallisen reaktion jälkeen.

Kaava 6.3 Natriumvetykarbonaatin reagointi rikkidioksidin kanssa (Karpf 2015, 11).





$\text{NaHCO}_3$  = natriumvetykarbonaatti, ruokasooda

$\text{SO}_2$  = rikkidioksidi

$\text{O}_2$  = happi

$\text{CO}_2$  = hiilidioksidi

$\text{H}_2\text{O}$  = vesi

$\text{Na}_2\text{CO}_3$  = natriumkarbonaatti

$\text{Na}_2\text{SO}_3$  = natriumsulfiitti

$\text{NaSO}_4$  = natriumsulfaatti

Kaava 6.4 Natriumvetykarbonaatin reagointi vetykloridin kanssa (Karpf 2015, 11).



$\text{NaHCO}_3$  = natriumvetykarbonaatti, ruokasooda

$\text{HCl}$  = vetykloridi

$\text{NaCl}$  = Natriumkloridi, ruokasuola

$\text{H}_2\text{O}$  = vesi

Natriumbikarbonaatin vaikutus savukaasujen rikkidioksidiin, kaava 6.3, ja vetykloridiin, kaava 6.4, tapahtuu vastaavanlaisella reaktiolla kuin sammutetulla kalkilla. Se reagoi myös muiden savukaasujen kanssa, kuten halogenoitujen happojen kanssa. Aineita tullaan vertailemaan koeajojen tuloksien perusteella keskenään.

#### 6.4.1 Tuote 1 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )

Tuote 1 on granuloitua sammutettua kalkkia. Toimii adsorptio-ominaisuuksiensa puolesta erityisesti rikki- ja klooriaineita sitovasti. Vaikuttaa myös muita päästöjä sitovasti. Ainetta kutsutaan nimellä kalsiumhydroksidi. Tuotteen pH on 12,4, joten se on vahvasti emäksinen aine. Molekyyliaino on 74,09 g/mol. (Tuote 1, 1.)

#### 6.4.2 Tuote 2 (Ca(OH)<sub>2</sub>)

Tuote 2 on granuloitua sammutettua kalkkia. Kemiallisilta ominaisuuksiltaan vastaava kuin tuote 1. Jauhe on vahvasti emäksistä, pH arvoltaan 12,4. Toimittaja lupaa, että tämän tuotteen avulla päästään alle rikkidioksidi-, vetykloridi ja vetyfluoridipäästörajojen. Tuotteen patentoidun tuottamistavan johdosta heidän tuotteella on normaalia suurempi reagoimispinta-ala suhteessa massaansa. Suuren reagoimispinta-alan johdosta tuotetta voi annostella pienemmässä moolisuhteessa savukaasuihin, mutta päästen samaan lopputulokseen. Molekyyliainepaino on 74,09 g/mol. (Tuote 2a, 1,8; Tuote 2b, 4–6.)

#### 6.4.3 Tuote 3 (NaHCO<sub>3</sub>)

Natriumvetykarbonaattiksi, NaHCO<sub>3</sub>, kutsuttu aine tunnetaan yleisemmin nimellä ruokasooda. Tuote 3 on pH arvoltaan 8,4. Toimittajan tuoteseloste ilmoittaa tiheydeksi 700–1150 kg/m<sup>3</sup>. Tämä pitää ottaa huomioon käyttövaiheessa. Muun muassa tästä syystä syöttömäärät pitää mitata painon, eikä tilavuuden mukaan. Tuote on hajuton ja ympäristölle vaaraton. Molekyyliainepaino on 84,0 g/mol. (Tuote 3a, 1; Tuote 3b, 2–3.)

## 7 KOEAJO

### 7.1 Koeajosuunnitelma

Koeajosuunnitelman laati ulkoinen toimija. Ulkoiselta toimijalta tilattiin muutosehdotus HK6:lle ja koeajosuunnitelma siitä, kuinka rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöjä saataisiin alemmaksi. Päätetyksi tekniikaksi tuli sorbentin syöttö savukaasukanavaan. Energian tuottamiseen palamisreaktion kautta liittyvässä kirjassa Poltto ja palaminen sanotaan: ”Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksena rikinpoisto kalkkileijukerroksen avulla on erittäin tehokasta ja menetelmällä on helppo saavuttaa yli 95 %:n rikinpoisto”, puhuttaessa tulipesäkalkin käytön ja sorbentin syötön yhteisvaikutuksesta (Iisa, Kilpinen & Yrjas 2002, 355).

Koeajot tehtiin viikoilla 47, 48 ja 49 vuonna 2016. Jokaiselle lisäaineelle varattiin oma viikko koeajoa varten. Neljän päivän pituisten ajojaksojen mitattavat arvot olivat savukaasun kosteus ( $H_2O$ ), happipitoisuus ( $O_2$ ), rikkidioksidi ( $SO_2$ ) ja vetykloridi (HCl). Savukaasujen pitoisuudet mitattiin ennen lisäaineen syöttöä savukaasukanavasta ja letkusuodattimen jälkeen piipusta. Pitoisuudet mitattiin FTIR-tekniikalla. Gasmetin laite tallensi pitoisuudet minuuttidatana, eli se mittasi pitoisuudet minuutin välein. Näitä kahta päästöarvoa, ennen sorbentin syöttöä ja sorbentin syötön jälkeen, verrataan toisiinsa.

Muita seurattavia määreitä oli kattilan kuorma, savukaasun lämpötila, savukaasun määrä, tulipesäkalkin syöttömäärä, käytettävä polttoaine ja lisäaineen kulutus. Näistä erityisesti lisäaineen kulutus oli ratkaisevassa roolissa. Lisäaineen syöttölaitteiston epätarkan mittaamisen takia, ja kaksinkertaisen mittaustiedon saamiseksi, otettiin ylös lisäainetta sisältävien suursäkkien paino, suursäkkien syötön aloitus kellonaika ja suursäkkien syötön lopetus kellonaika. Säkkien vaihtoon kulunut aika laskettiin lopetus ja aloitus kellonaikeiden erotuksella. Painon ja syöttöön kuluneen ajan avulla saatiin laskettua keskimääräinen lisäaineen kulutus ilman syöttölaitteiston omaa mittausta.

Kaikesta toiminnasta pidettiin yllä päiväkirjaa kronologisessa järjestyksessä. Päiväkirjaan merkittiin muun muassa muutokset, huomiot ja poikkeustilanteet. Päiväkirjaan kirjattiin toimenpiteet, jotka tehtiin koeajo-ohjelman mukaisesti, esimerkiksi tulipesäkalkin asettaminen manuaaliohjaukselle ja syöttö 6 % maksimi syötöstä 5.12.2016 klo 04.00. Mainitaan vielä, että lisäaineen syötön annostelumäärien

muutokset kirjattiin ylös päiväkirjaan, sekä milloin otettiin polttoaine- ja tuhkanäytteet. Liitteessä 1 on esitetty koeajosuunnitelma.

## Näytteet

Näytteet otettiin polttoaineesta ja tuhkasta. Näytteet otettiin sitä varten, jos halutaan myöhemmin tehdä tarkempaa tutkimusta eri komponenttien osuuksista. Polttoaineelle tehtävästä laboratorioanalyysistä saadaan aineen pitoisuudet alkuaineprosentteina, esimerkiksi 5 % hiiltä (C), 10 % vetyä (H), 30 % typpeä (N), 1,1 % rikkiä (S) ja 0,5 % klooria (Cl). Polttoaineen sisältämät rikki- ja kloorimäärät ovat suoraan verrannolliset savukaasun rikkidioksidi- ja vetykloridipitoisuuksiin.

Tuhkanäytteestä saadaan selville reagoimaton sorbentti. Kun kaikki syötetty lisäaine ei reagoi, se tarkoittaa liian suurta syöttömäärää. Liian suurella lisäainesyötöllä tulee mittausarvoksi suurempi vaadittava moolisuhde sorbentin ja savukaasupäästöjen välille. Tästä on seurauksena liian suuri kustannuslaskelma. Tämä johtaa operatiivisten kustannusten näyttävän suuremmalta kuin mikä vaadittava käyttökustannus olisi. Tuhkanäytteestä voidaan hakea muun muassa seuraavia yhdisteitä  $\text{CaSO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{NaSO}_3$ ,  $\text{NaSO}_4$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ja  $\text{NaCl}$ . Nämä ovat reaktion lähtö- ja lopputuotteita.

Polttoainenäyte otettiin neljä kertaa päivässä ja tuhkanäyte kaksi kertaa päivässä. Näytteet otettiin koeajon ajan samana kellonaikana joka päivä. Päivän ensimmäinen polttoainenäyte otettiin kolmen tunnin päästä kalkituksen aloittamisesta. Viimeinen polttoainenäyte otettiin päivän päätteeksi. Tuhkanäytteet otettiin kuusi tuntia kalkituksen aloittamisesta ja päivän päätteeksi. Näytteet säilöttiin auringonvalolta suojattuna tiiviisiin näyteämpäreihin, joihin merkattiin näytteenottoaika ja -päivämäärä. Näytteet otettiin samoista paikoista samanlaisella tavalla päivittäisten ja viikoittaisten vertailujen mahdollistamiseksi.

## 7.2 Koeajon tavoite

Liitteen 1 koeajosuunnitelmasta voi lukea päivittäiset tavoitteet tulipesäkalkin syötön, lisäaineen syötön ja päästöarvojen osalta. Koeajosuunnitelman laatijan, ulkoisen

toimijan, toimesta on laskennallisesti arvioitu lisäaineiden syöttömäärät, joilla pitäisi päästä päästöarvotavoitteisiin.

Syöttömäärää kuitenkin vaihdettiin päivän mittaan päästömäärien mukaan. Tavoitteena oli löytää oikeat syöttömäärät jokaiselle tuotteelle. Lisäaineen syöttöä lisättiin ja vähennettiin sen mukaan, että päästiin päivittäiseen päästöarvotavoitteeseen. Lisäaineensyötön ollessa vakio päästömäärien muutos päivän mittaan johtuu aikaisemmin mainitusta käytettävän polttoaineen koostumuksen vaihtelevuudesta.

Kattilakuorman toivottiin olevan suuri koeajojen aikana. On tyypillistä kattilan käyttäytymistä, että täydellä kattilakuormalla syntyy suurin päästömäärä. Koeajossa haluttiin nähdä tilanne, jossa kattilassa on maksimikuorma ja käytössä on paljon rikkiä ja klooria sisältävää polttoainetta. Kyseinen tilanne on haastavin tulevaisuuden ympäristöluparajan alle pääsemiseen. Tavoite oli, että myös pahimmassa tilanteessa koeajon savukaasujen puhdistustekniikat yhdessä riittävät tulevaisuuden BAT-tavoitearvoihin pääsemiseen.

Koeajon tavoitteena oli myös tehdä vertailua kolmen eri lisäaineen kesken. Millä tuotteella oli paras rikkidioksidin ja vetykloridin sitomiskyky, sekä mikä kolmesta tuotteesta oli kustannustehokkain.

### 7.3 Koeajon tulokset

Koeajoista ei saatu samanlaisia tuloksia kuin koeajosuunnitelman laskennalliset- ja odotusarvolliset tulokset olivat. Koeajo-ohjelmaan jouduttiin tekemään päivittäisiä muutoksia muuttuvista tekijöistä johtuen. Jokainen sorbentti vähensi rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöjä. Tuotteilla 2 ja 3 päästiin koeajosuunnitelman tavoitearvoihin.

Tuotteella 1 ei päästy toimeksiantajan asettamiin tavoitearvoihin. Lisäämällä tuote 1 ylisyötön puolelle ei riittänyt saamaan rikkidioksidipäästöjä BAT-tavoitearvon alle, mutta riitti saamaan vetykloridipäästöt BAT-tavoitearvon alle. Kattilakuorman ollessa 60 % ei päästy laskennallisella syöttömäärällä rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöarvoissa toimeksiantajan asettamiin tavoitearvoihin. Tuhkan joukossa oli reagoimatonta alkutuotetta. Se osoittaa, että tässä käyttökohteessa tuote 1 ei ole riittävän tehokas reagoimaan ja laskemaan päästöjä toimeksiantajan asettamiin tavoitearvoihin. Liitteessä 3 on osoitettu tasepisteiden lisäaineen syöttömäärät sekä päästömäärät ennen ja jälkeen lisäaineensyötön. Liitteestä 3 on luettavissa tuotteen 1 aikaansaama reduktio

rikkidioksidi ja vetykloridi määrissä tietyllä lisäaineen keskiarvo syöttömäärällä. Liitteessä 4 on mallinnettu tasepisteiden aikaista päästökäyttäytymistä mittauspisteissä.

Tuotteen 2 toimittaja lupasi markkinointiesitteessään, että tuotetta 2 käyttämällä pääsee jopa 50 % pienempään käyttömäärään kuin vastaavilla tuotteilla. (Tuote 2b, 5). Tämä lupaus piti paikkansa tuloksien perusteella. Tuotetta 2 syöttämällä päästiin BAT-tavoitearvoihin. Rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöt saatiin noin 60 %:n kattilakuormalla pysymään selvästi alle tavoitearvojen. Verrattuna koeajo-ohjelman oletusarvoihin tuote 2 ei myöskään päässyt laskennallisella syöttömäärällä tavoitearvoihin. Syöttömäärää ja moolisuhdetta ei tarvinnut kasvattaa paljoa, että tavoite päästöarvoihin päästiin. Liitteestä 5 on luettavissa tuotteen 2 aikaansaama reduktio rikkidioksidi ja vetykloridi määrissä tietyllä lisäaineen keskiarvo syöttömäärällä. Liitteessä 6 on mallinnettu tasepisteiden aikaista päästökäyttäytymistä mittauspisteissä.

Tuotteella 3 päästiin toimeksiantajan asettamiin tavoitearvoihin. Syöttömäärää jouduttiin kasvattamaan yli laskennallisen ja arvioidun määrän, että päästiin BAT-tavoitearvoihin rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöjen osalta. Noin 60 %:n kattilakuormalla päästiin reilusti alle toimeksiantajan asettamien tavoitearvojen. Lisäämällä syöttöä entisestään saatiin rikkidioksidi ja vetykloridipäästöt jopa nollaan. Verrattuna koeajo-ohjelman laskettuihin oletusarvoihin tuotteen 3 syöttöä jouduttiin kasvattamaan paljon, että päästiin syöttömäärissä tavoitearvoihin. Liitteessä 7 on luettavissa tuotteen 3 aikaansaama reduktio rikkidioksidi ja vetykloridi määrissä tietyllä lisäaineen keskiarvo syöttömäärällä. Liitteessä 6 on mallinnettu tasepisteiden aikaista päästökäyttäytymistä mittauspisteissä.

Taulukko 7.1 Yhteenveto koeajon tuloksista.

Tuote	Toimeksiantajan tavoitearvo	BAT-tavoitearvo	BAT-tavoitearvon syöttömäärä	Keskiarvo reduktioprosentti koeajojen ajan
1	Ei päästy	SO <sub>2</sub> osalta	Ylisyöttöä paljon	Katso liite 9
2	Päästiin	SO <sub>2</sub> ja HCl osalta	Ylisyöttöä vähän	Katso liite 9
3	Päästiin	SO <sub>2</sub> ja HCl osalta	Ylisyöttöä melko paljon	Katso liite 9

## 8 YHTEENVETO

### 8.1 Ennalta huomioon ottamattomat vaikutukset

Koeajon tuloksiin aiheutti suorasti ja epäsuorasti monta eri asiaa. Suurin asia, jota ei pystytty säätämään toivotulla tavalla, oli päästöjen määrä mittauspisteessä ennen lisäaineen syöttöä savukaasukanavaan. Tämä olisi vaatinut vakio kattilakuormaa ja homogeenistä polttoainetta. Käytettävä polttoaine vaihtelee niin paljon, että muodostuvat savukaasupäästöt ovat erittäin hankalasti ennustettavissa. Polttoaine saattaa vaihdella hyvinkin paljon pelkästään kahden samasta paikkaa peräkkäin tulevan polttoainekuorman kesken.

Useina hetkinä savukaasupäästöt kasvoivat todella suuriin lukemiin, johon olisi pitänyt reagoida lisäämällä lisäaineen syöttöä. Syöttöjärjestelmää ajettiin käsiajolla, jolloin ei pystytty reagoimaan riittävän nopeasti päästöjen kasvuun. Liitteistä 7 ja 8 on havaittavissa, kuinka esimerkiksi tasepisteessä 17 päästömäärät vähenevät puoleen puolesta tunnissa ja sen jälkeen kasvavat kaksinkertaiseksi taas puolesta tunnissa. Odottamattomia tilanteita, jossa kattilakuorma väheni, mutta päästömäärät kasvoivat, tuli vastaan hyvin usein. Optimaalisin vertailu tuotteiden kesken olisi saatu päästömäärillä, jotka olisivat pysyneet samoina päivien ja viikkojen kesken.

Vaihtuva polttoaine tuotti ongelmia muiden epätarkkuutta aiheuttavien asioiden havaitsemisessa. Samalla tavalla lisäaineen reduktiovaikutuksen edistäviä asioita oli hankala havaita tästä syystä. Muun muassa savukaasun kosteuden ja lämpötilan vaikutusta lisäaineen reduktioon pyrittiin seuraamaan, mutta sen vaikutusta ei pystytty määrittämään. Myöskään tulipesäkalkin vaikutusta lisäaineiden reduktioarvoon ei pystytty määrittämään.

Positiivisiakin ennalta huomioon ottamattomia vaikutuksia ilmeni. Tuotteet 1 ja 2 vaikuttivat rikkidioksidia ja vetykloridia vähentävästi jopa tunnin lisäaineen syöttämisen jälkeen. Tuotteiden 1 ja 2 vaikutus ei toisaalta alkanut heti lisäaineen syöttämisen jälkeen, vaan siinä oli kalkituksen pituinen viive. Kalkitus tehtiin liitteen 1 koeajosuunnitelman mukaisesti.



Tuote 3 oli täysin päinvastainen tuotteisiin 1 ja 2 nähden. Tuote 3 vaikutti rikkidioksidi ja vetykloridi päästöjä vähentävästi heti syötön aloitettua. Tuote 3 myös lopetti vaikuttamisen lähes heti syöttämisen lopettamisen jälkeen.

## 8.2 Tulosten korrelointi ja analysointi

Koeajoissa mitatut tasepisteet, ja niistä saadut arvot, eivät ole toisiinsa täysin verrattavissa useasta syystä. Kuten aikaisemmin on mainittu, painotetaan analysoinnissa, että päästöjen määrä vaihteli tunneittain, päivittäin ja viikoittain liikaa. Tästä syystä mittaukset eivät ole suoraan vertailukelpoisia tuotteiden kesken.

Liitteiden 4,6 ja 8 mallinnuksia tarkastellessa huomaa, että lisäaineen syöttöä voi olla liian paljon ja liian vähän samaan aikaan. Yleensä mitattavista arvoista vetykloridi, HCl, on tippunut nollaan lisäaineensyötöstä johtuen. Tällöin vetykloridia varten on syöttöä liikaa. Samaan aikaan rikkidioksidipäästöt, SO<sub>2</sub>, vaatisivat lisäsyöttöä. Tällöin syöttöä on liian vähän rikkidioksidia varten. Liitteistä 3,5 ja 7 voi huomata, kuinka vetykloridin reduktiomäärät ovat 100 %. Se osoittaa, että lisäaineen syöttöä on ollut liikaa vetykloridia varten. Liiallinen syöttö aiheuttaa sen, että liitteen 9 kustannuslaskelma HCl:n reduktion osalta näyttää liian suurelta. Ajoittain syöttöä oli liikaa myös rikkidioksidin osalta. Tästä johtuu, että liitteen 9 kustannuslaskelma SO<sub>2</sub>:n reduktion osalta näyttää hieman liikaa.

Tasepisteet olivat eri pituisia ja niitä oli erimäärä eri tuotteilla. Eniten mittausdataa saatiin tuotteella 2, joten sen tulokset ovat suurimmalla todennäköisyydellä luotettavimmat. Tuotteen 1 lisäainesäkkien syötön aloittamisessa oli ensimmäisinä päivinä hankaluuksia. Tästä johtuen mittaustuntimäärät olivat pienemmät tuotteen 1 osalta. Koeajoa oli kuitenkin riittävästi tuotteen 1 käyttäytymisen havaitsemiseksi. Tuotteesta 3 oli riittävästi mittausdataa.

Liitteissä 3,5 ja 7 on käytetty syöttömääränä keskimääräistä syöttömäärää tuotteille. Aikaisemmin kerrottiin syötön tapahtuvan suursäkeistä, joiden vaihdosta aiheutuu syöttökatkoksia mittauksen aikana. Suurempiin reduktioprosentteihin ja edullisempaan operatiiviseen kustannuslaskelmaan olisi päästy jatkuvalla syötöllä.

Ulkoisen toimijan puolesta annetut lasketut syöttömäärät tilavuusvirtailmamäärään verrattuna eivät riittäneet haluttuun reduktiomäärään. Päästöihin ja ilmapirtaan verrattuna moolisuhde nousi yli liitteessä 1 arvioidun. Tästä vedetään johtopäätös, että

muita vaikuttavia tekijöitä sorbentin vaikutukseen voimakattilan vetykloridi- ja rikkidioksidipäästöihin on, mutta niitä ei pystytty havaitsemaan koeajon aikana.

### 8.3 Arvio BAT/BREF FD -päästövaatimusten saavuttamisesta

Tuotteilla 2 ja 3 osoittautui päästä ajoittain toimeksiantajan asettamiin tavoitearvoihin. BREF FD:n BAT-tavoitearvoihin on mahdollista päästä SO<sub>2</sub>- ja HCl-päästöissä koeajonaikaisten savukaasujen puhdistustekniikoiden avulla. Tulipesäkalkki, letkusuodatin ja sorbentin syöttö yhdessä osoittautuivat HK6:lla toimivaksi konseptiksi.

Koeajojen aikaiset suuret päästömäärät mittauspisteellä ennen lisäaineen syöttöä savukaasukanavaan on normaalista poikkeava tilanne. Tulipesäkalkin syöttö oli koeajojen aikana normaalista pienempi, mistä johtui, että päästömäärät olivat normaalista suuremmat mittauspisteellä ennen lisäaineen syöttöä. Yleensä päästömäärät ovat kyseisessä kohtaa alle ympäristöluvan määrittämän luparajan. Liitteiden 4, 6 ja 8 tasepisteiden mallinnukset osoittavat, että erityisesti rikkidioksidi arvot ovat kyseisessä pisteessä kaksi tai kolmekertaa suurempia kuin normaalisti. BREF FD:n BAT-minimiarvoihin pääseminen edellyttää, että savukaasupäästöt eivät ole liian suuret tulipesäkalkin vaikutuksen jälkeen.

Liitetiedostojen mittausarvoissa ei ole otettu huomioon epävarmuus vähennystä. Se on rikkidioksidin osalta 20 % ja vetykloridin osalta 30 % ympäristöluparajasta. Kun päästöraja tiukentuu, niin epävarmuustekijän suuruus tulee myös pienenemään mg/m<sup>3</sup> osalta. Epävarmuus vähennys on otettu huomioon, että myös ilman epävarmuus vähennystä on mahdollista päästä BAT-tavoitearvoihin.

## 9 KOKOAVA TARKASTELU

Koeajojen kolmesta priorisoidusta arvosta saatiin kerättyä useammalta kerralta samanlainen data sorbentin syötön vaikutuksesta HK6:n rikkidioksidi- ja vetykloridipäästöihin. Projektin aikana päästiin ajoittain kahdella eri lisäaineella toimeksiantajan asettamiin tavoitearvoihin ja BAT-tavoitearvojen alle. Jatkuvaa tavoitearvojen alapuolella pysymistä ei saavutettu, koska lisäaineen syöttöä ei oltu automatisoitu. Jo hetkellinen pääsy tavoitearvoihin osoittaa, että kyseiseen tilanteeseen kuitenkin päästään.

Ääritapausten päästöt on mahdollista puhdistaa BAT-tavoitearvoihin suurella laadukkaalla sorbentin ja tulipesäkalkin koordinoitulla käytöllä. Koeajon aikana oltiin jopa yli ääritapausten, koska tulipesäkalkkia ei syötetty riittävästi. Tuloksissa on mukana arvot, jolloin on käytetty väärin savukaasun puhdistustekniikoita. Hetkien, jolloin savukaasun puhdistustekniikoita on käytetty väärin, ei pidä sekoittaa hetkiin, jolloin tekniikoita on käytetty oikein. Tämän opinnäytetyön tekemisen yhtenä haasteena ja mielenkiintona on ollut löytää oikeat hetket, joita voidaan käyttää ”hyvänä datana”. Mielestäni tässä on onnistuttu, mutta liitteiden 3–9 tulkitseminen on hankalaa ilman täydellistä perehtymistä koeajon tapahtumiin.

Kustannuslaskelmat on jätetty salassapitovelvollisuuksien vuoksi insinööriyön ulkopuolelle. Ne on käsitelty yhtiön hallituksen kanssa käydyssä koeajon raportointi tilaisuudessa. Lisäaineen syötöstä aiheutuu operatiivisia kustannuksia, sekä varmasti kunnossapito- ja investointikustannuksia. Oletetut kustannukset tekniikan käyttöönotolle eivät kuitenkaan ole ylitsepääsemättömän suuret, mutta ne vaativat huomion. Paremmen syöttölaitteiston, useamman syöttökohdan ja hyvän seurannan avulla pääsee operatiivisissa kustannuksia edullisempaan tulokseen.

Lisäaineen syötön käytöstä tulee olemaan vastuussa kattilan käyttöhenkilökunta. Näen heidän hyvän perehdyttämisen olevan avainasemassa tekniikan käyttöönotolle. Hyvällä perehdytyksellä käyttöhenkilökunta vähentää operatiivisia kustannuksia ja huonolla perehdytyksellä voi jopa pilata kattilan.

Insinööriyön tekeminen oli todella mielekästä. Ääritapaukset, poikkeustilanteet ja muuttuvat tekijät toivat hyvän lisän, joka antoi haastetta. Saatujen tulosten toivotaan motivoivan sen lukijoita ympäristöstävällisyyteen ja kestävään kehitykseen.



## LÄHTEET

Alstom Finland 2005. Letkusuodatin Rauman Voimalle. 16.5.2005. Viitattu 25.1.2017. Saatavissa: <http://www.alstom.com/fi/press-centre/2005/5/letkusuodatin-rauman-voimalle/>

British lime association. Flue gas treatment. Dry scrubbing. Viitattu 13.3.2017. Saatavissa: [http://www.britishlime.org/technical/flue\\_gas\\_treatment.php](http://www.britishlime.org/technical/flue_gas_treatment.php)

EPA 2017. What is acid rain. United States environmental protection agency. Viitattu 31.3.2017. Saatavissa: <https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>

Euroopan Komissio 2006. Ympäristön pilaantumisen ehkäisemisen ja vähentämisen yhtenäistäminen. Tiivistelmä. Suuria polttolaitoksia koskeva BREF-asiakirja. Toukokuu 2005. 12.9.2016. Saatavissa: <https://circabc.europa.eu/sd/a/5da8aaa3-e905-41e9-ae2c-567d06756e51/LCP%20FI>

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (IED) 2010/75/EU (32010L0075). Euroopan unionin virallinen lehti EUVL L 334. 17.12.2010. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32010L0075>

European Commission 2006. Integrated Pollution Prevention and Control; Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants, 2006

European Commission 2016. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. Final Draft. June 2016. Luonnos. Viitattu 19.1.2017.

European Committee for Standardization 2017. European Standardization. Viitattu 19.1.2017. Saatavissa: <https://www.cen.eu/you/EuropeanStandardization/Pages/default.aspx>

Hyppänen T. & Raiko R. 2002. Leijupoltto. Kirjassa: Poltto ja palaminen. Toim. M. Hupa, I. Kurki-Suonio, R. Raiko & J. Saastamoinen. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemit, 490–521.

Iisa K., Kilpinen P. & Yrjas P. 2002. Rikin oksidien muodostuminen ja poistaminen. Kirjassa: Poltto ja palaminen. Toim. M. Hupa, I. Kurki-Suonio, R. Raiko & J. Saastamoinen. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemit, 343–370.

Karpf R. 2015. Basic features of the dry absorption process for flue gas treatment systems in waste incineration. Prof. Dr.-Ing. Rudi H. Karpf. 13.3.2015. Lich, Saksa. Saatavissa: [http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Karpf\\_paper\\_on\\_dry\\_absorption\\_systems.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Karpf_paper_on_dry_absorption_systems.pdf)

Ojanen P. 2001. Sellu- ja paperitehtaiden lietteiden käsittely ja hyötykäyttö sekä niitä rajoittavat tekijät. Lappeenranta: Kaakkois-Suomen Ympäristökeskus.

Pohjolan Voima 2015. Omistajat. Viitattu 14.11.2016. Saatavissa: <http://www.pohjolanvoima.fi/yritys/omistajat-ja-hallinto>

Pohjolan Voima 2016. Rauma, Rauman Voima. Viitattu 14.11.2016. Saatavissa: <http://www.pohjolanvoima.fi/energiantuotanto/lampovoima/rauma>

Rauman Energia 2017. Sähköntuotanto. Viitattu 25.1.2017. Saatavissa: <https://raumanenergia.fi/yritystietoa/sahkontuotanto>

Rauman Voima 2015. Ympäristölupa. Päätös 367/2015/1. Saatavissa: [https://tietopalvelu.ahtp.fi/Lupa/AvaaLiite.aspx?Liite\\_ID=2094124](https://tietopalvelu.ahtp.fi/Lupa/AvaaLiite.aspx?Liite_ID=2094124)

Rauman Voima 2017a. HK6 kattila. Kattilan ja eri järjestelmien toimintakuvaus.

Rauman Voima 2017b. HK6 savukaasujen letkusuodatin. Tekninen erittely.

Rauman Voima 2017c. HK6 savukaasujen letkusuodatin. Toimintakuvaus.

Reilama J. 2017. Käyttöinsinööri. UPM Paper ENA Oy. Haastattelu 17.1.2017

Suomen Standardisoimisliitto (SFS) 2012. Jätteet energiaksi. Viitattu 20.12.2016. Saatavissa: [http://www.sfs.fi/ajankohtaista/uutiset?14\\_m=589](http://www.sfs.fi/ajankohtaista/uutiset?14_m=589)

Suomen virallinen tilasto (SVT) 2015. Jo puolet yhdyskuntajätteistä polttoon. Helsinki. Tilastokeskus. 1.12.2015. Viitattu 26.1.2017. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/jate/2014/jate\\_2014\\_2015-12-01\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/jate/2014/jate_2014_2015-12-01_tie_001_fi.html)

Suomen virallinen tilasto (SVT) 2016. Energian kokonaiskulutus laski vuonna 2005. Helsinki. Tilastokeskus. 7.12.2016. Viitattu 19.12.2016. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/ehk/2015/ehk\\_2015\\_2016-12-07\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehk/2015/ehk_2015_2016-12-07_tie_001_fi.html)

Temet Instruments. Gasmeter Cx-4000. Tuotetietolehtinen.

Tuote 1. Tuotteen käyttöturvallisuustiedote. Päiväys 14.11.2012.

Tuote 2a. Tuotteen käyttöturvallisuustiedote. Päiväys 6.6.2016.

Tuote 2b. Tuotteen tuotelehtinen.

Tuote 3a. Tuotteen data sheet. Sodium bicarbonate.

Tuote 3b. Tuotteen käyttöturvallisuustiedot. Päiväys 3.5.2015.

United Nations Development Programme 2016. Sustainable development goals. Viitattu 13.12.2016. Saatavissa: <http://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals/>

UPM-Kymmene 2015. Vuosikertomus 2015.

UPM Paper ENA. Valokuva-arkisto.

Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta (VA) 151/2013. Helsinki. Ympäristöministeriö. 20.2.2013.

Valtioneuvoston asetus suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamisesta (VA) 936/2014. Helsinki. Ympäristöministeriö. 2011.2014

Ympäristönsuojelulaki (YSL) 527/2014. Naantali. Ympäristöministeriö. 1.9.2014; 23 §:n 2 mom. 1.1.2015