



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

STIINA VILENIUS  
ARINAKATTILAN HYÖTYSUHTEEN MÄÄRITYS  
JÄTTEEN ENERGIAHYÖDYNTÄMISESSÄ  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Risto Raiko  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Luonnontieteiden tiedekunnan  
kokouksessa 4.6.2014

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

**VILENIUS, STIINA:** Arinakattilan hyötysuhteen määrittäminen jätteen energiahyödyntämisessä

Diplomityö, 70 sivua, 5 liitesivua

Lokakuu 2014

Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka

Tarkastaja: professori Risto Raiko

Avainsanat: Jätteen energiahyödyntämislaitos, arina, kattilan hyötysuhde, energiatase

Työn tavoitteena oli arinakattilan hyötysuhteen ja siihen vaikuttavien osatekijöiden määrittäminen jätteen energiahyödyntämisessä. Työn teoreettisessa osuudessa keskitytään arinatekniikkaan ja sen ominaispiirteisiin, kun polttoaineena käytetään jätepohjaista polttoainetta. Työ sisältää tutkimuskohteena olevan Ekokem Oyj:n Voimala 2:n arinakattilan sisään ja ulos kulkevien energiavirtojen määrittämisen. Muodostetun kattilan energiataseen avulla luotiin kattilan hyötysuhteen laskentaohjelma. Kattilan hyötysuhteen laskentamenetelmäksi valittiin epäsuora laskentamenetelmä pääasiassa polttoaineen tarkan massavirran määrittämisen vaikeuden vuoksi. Lisäksi valittu laskentatapa antaa tarkempaa tietoa prosessin energiavirroista kuin suora laskentamenetelmä.

Laskentaohjelman avulla pyrittiin selvittämään eri prosessiparametrien vaikutuksia kattilan hyötysuhteeseen sekä polttoaineen läpimenoaikaan. Ohjelman syöttötiedoissa ainoastaan yhtä prosessiparametria muutettiin kerrallaan muiden pysyessä vakiona. Tällä tavoin oli tarkoituksena saada selville yksittäisten muutosten vaikutukset prosessiin. Laskentaohjelman tuloksien paikkaansa pitävyyttä testattiin Voimala 2:lla suoritettujen koeajojen tulosten avulla. Koeajojen tulokset muutettiin vertailukelpoisiksi laskentaohjelmasta saatujen tulosten kanssa kompensoimalla tärkeimmät prosessiparametrit, kuten höyryn virtaus, yhteneviksi laskentaohjelman vastaavien prosessiparametrien kanssa jätteen massavirran avulla.

Tulokseksi saatiin, että savukaasujen happipitoisuuden asetusarvon nostaminen vaikuttaa kattilan hyötysuhteeseen negatiivisesti ja primääri-ilman lämpötilan lisääminen positiivisesti, mutta molemmat muutokset kasvattavat jätteen massavirtaa. Sen sijaan syöttöveden lämpötilan nosto vähentää jätteen massavirtaa ja laskee kattilan hyötysuhdetta. Ainoastaan teoriassa testatut jätteen lämpöarvon vaihtelun muutokset jätteen massavirtaan olivat merkittäviä. Lämpöarvon kasvun myötä jätteen massavirta laski, kun taas kattilan hyötysuhde parani. Tutkimuksissa löydettiin myös potentiaalia matalan lämpöarvon omaavan jätteen polttokäsittelyn lisäämiselle.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

**VILENIUS, STIINA:** Determination of the grate boiler efficiency in waste-to-energy incineration

Master of Science Thesis, 70 pages, 5 appendix pages

October 2014

Major: Power Plants and Combustion Technology

Examiner: Professor Risto Raiko

Keywords: Waste-to-energy plant, grate, boiler efficiency, energy balance

The aim of this thesis was to determine the grate boiler efficiency and find the components that have an influence on the grate boiler efficiency in waste-to-energy incineration. The theoretical part of this thesis focuses on grate technology and its main features, especially when the fuel is waste-based. The thesis includes the solving of incoming and outgoing energy flows of the grate boiler in Ekokem's Waste-to-energy plant 2. The boiler efficiency calculation program was created with the help of boiler's energy balance. The indirect method was chosen to be the method used to determine boiler efficiency in this thesis mainly because of the difficulty of defining the fuel mass flow rate. In addition, the chosen method gives more detailed information of the energy flows in process than direct method.

It was tried to figure out what kind of effects different process parameters has on boiler efficiency and fuel mass flow rate by means of the calculation program. Only one process parameter was changed in input data of the program at a time while other parameters stayed constants. The purpose was to find out the effects of the separate process changes by this way. The truth of the calculation conclusions were tested by performing a few tests in Waste-to-energy plant 2 and comparing the results. The results of the tests were transformed comparable with calculation program's results by compensating the most important process parameters, such as steam mass flow, with fuel mass flow rate to be convergent with corresponding process parameters in calculation program.

The result was that the increase of the oxygen concentration set point in the flue gas has negative effects on boiler efficiency while the decrease of the primary air temperature has positive effects on the efficiency but both changes increase the mass flow rate of waste. Instead, increase of the feed water temperature decreases both the mass flow rate of waste and boiler efficiency. The variation of the fuel heating values was tested only in theory and the effects on the mass flow rate of waste were remarkable. The mass flow rate of waste decreased along with the increase of the heating value, whereas the boiler efficiency improved. This study also points out the potential to incinerate more fuel with a low heating value.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ekokem Oyj:n energiatuotantolaitokselle Voimala 2:lle Riihimäellä. Työn päätutkimuskohteena oleva arinakattilan hyötysuhde sekä siihen vaikuttavien tekijöiden tutkiminen ovat energiatehokkuuden kannalta keskeisiä tekijöitä voimalaitoksen toiminnassa.

Työ on ollut kaikin puolin opettavainen ja mielenkiintoinen kokonaisuus, jossa olen päässyt hyödyntämään opinnoistani kertyneitä tietoja monipuolisesti.

Työn tarkastajalle, professori Risto Raikolle haluan esittää kiitokseni arvokkaista ohjeista ja parannusehdotuksista sekä kannustuksesta työn kaikissa vaiheissa. Työn ohjaajina toimivat Ekokem Oyj:n energiantuotannon käyttöpäällikkö Joonas Karhu sekä tutkimus- ja kehityspäällikkö Toni Andersson. Haluan kiittää heitä ennen kaikkea mielenkiintoisesta aiheesta, käytännön neuvoista ja asiantuntevasta ohjauksesta. Suuret kiitokseni myös koko Ekokem Oyj:n henkilökunnalle työhöni liittyvästä avusta sekä mukavasta työympäristöstä.

Kiitos Hannulle tärkeästä tuesta ja positiivisuudesta erityisesti työn tekemisen aikana. Lisäksi kiitän koko perhettäni sekä ystäviäni hyvistä neuvoista sekä kannustuksesta tämän työn ja kaikkien opiskeluvuosieni ajalta.

Tampereella 16.12.2014

Stiina Vilenius

# SISÄLLYS

|   |     |
|---|-----|
| Merkinnät ja lyhenteet.....                               | vii |
| 1 Johdanto .....  | 1   |
| 1.1 Työn tausta .....                                     | 1   |
| 1.2 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset .....           | 2   |
| 1.3 Tutkimusmenetelmät.....                               | 3   |
| 1.4 Työn rakenne ja rajaus .....                          | 3   |
| 2 Ekokem .....  | 4   |
| 2.1 Yrityskuvaus .....                                    | 4   |
| 2.2 Voimalat.....   | 6   |
| 2.2.1 Voimala 1.....                                      | 7   |
| 2.2.2 Voimala 2.....                                      | 8   |
| 3 Arinapoltto .....                                       | 11  |
| 3.1 Palaminen arinalla.....                               | 11  |
| 3.1.1 Polttoaineen lämmitys ja kosteuden poistuminen..... | 11  |
| 3.1.2 Haihtuvien aineiden vapautuminen ja palaminen.....  | 12  |
| 3.1.3 Jäännöshiilen palaminen .....                       | 13  |
| 3.2 Yhdyskuntajätteen energiapoltto arinalla.....         | 13  |
| 3.2.1 Jäte polttoaineena.....                             | 13  |
| 3.2.2 Arinatekniikka jätteen energiahyödyntämisessä.....  | 18  |
| 3.2.3 Savukaasupäästöt .....                              | 20  |
| 3.2.4 Jätteen palamisessa muodostuvat tuhkat.....         | 23  |
| 3.2.5 Höyryn arvot ja korroosio.....                      | 25  |
| 4 Höyrykattilan hyötysuhde ja häviöt .....                | 29  |
| 4.1 Suora menetelmä.....                                  | 29  |
| 4.2 Epäsuora menetelmä .....                              | 30  |
| 4.2.1 Savukaasuhäviöt .....                               | 31  |
| 4.2.2 Palamattoman polttoaineen häviöt.....               | 33  |
| 4.2.3 Säteilyhäviöt .....                                 | 36  |
| 4.2.4 Ulospuhallushäviöt .....                            | 37  |
| 4.2.5 Omakäyttöhäviöt.....                                | 37  |
| 4.2.6 Tuhkan termiset häviöt .....                        | 38  |
| 4.2.7 Arinan jäähtymisestä johtuvat häviöt.....           | 38  |
| 4.2.8 Muut häviöt.....                                    | 39  |
| 5 Case: Voimala 2 .....                                   | 40  |
| 5.1 Polton hallinta .....                                 | 40  |
| 5.2 Kattilan energiatase .....                            | 47  |
| 6 Koeajot Voimala 2:lla .....                             | 51  |
| 6.1 Koeajojärjestelyt .....                               | 51  |
| 6.2 Koeajojen suoritus ja tehdyt mittaukset .....         | 52  |
| 7 Tulokset ja niiden tarkastelu .....                     | 54  |
| 7.1 Kattilan hyötysuhdelaskennan tulokset.....            | 54  |

|       |                                 |    |
|-------|---------------------------------|----|
| 7.1.1 | Savukaasujen jäännöshappi ..... | 55 |
| 7.1.2 | Syöttöveden lämpötila .....     | 56 |
| 7.1.3 | Primääri-ilman lämpötila .....  | 57 |
| 7.1.4 | Jätteen lämpöarvo .....         | 58 |
| 7.2   | Koeajojen tulokset.....         | 60 |
| 7.2.1 | Savukaasujen jäännöshappi ..... | 61 |
| 7.2.2 | Syöttöveden lämpötila .....     | 62 |
| 7.2.3 | Primääri-ilman lämpötila .....  | 62 |
| 7.3   | Virhetarkastelu .....           | 63 |
| 8     | Yhteenveto .....                | 66 |
|       | Lähteet.....                    | 68 |

## LIITTEET

Liite 1: Kattilan hyötysuhteen laskentaohjelma

Liite 2: Koeajojaksojen prosessidata

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

### Symbolit

|           |   |                 |
|-----------|---|-----------------|
| $A$       | pinta-ala   | $[m^2]$         |
| $C$       | hiilen massaosuus prosentteina<br>kuivassa ja tuhkattomassa poltto-<br>aineessa |                 |
| $E$       | päästöpitoisuus   | $[mg/Nm^3]$     |
| $c_p$     | ominaislämpö vakiopaineessa   | $[kJ/kgK]$      |
| $H$       | vedyn massaosuus prosentteina<br>kuivassa ja tuhkattomassa poltto-<br>aineessa  |                 |
| $h$       | ominaisentalpia   | $[kJ/kg]$       |
| $k$       | dimensioton kerroin   |                 |
| $\dot{m}$ | massavirta  | $[kg/s]$        |
| $O$       | hapen massaosuus prosentteina<br>kuivassa ja tuhkattomassa poltto-<br>aineessa  |                 |
| $p$       | 1. paine  | $[Pa]$          |
|           | 2. tuhkan hehkutushäviö   | $[%]$           |
| $\dot{Q}$ | lämpövirta  | $[W]$           |
| $q$       | häviöosuus  |                 |
| $q_i$     | alempi lämpöarvo  | $[MJ/kg]$       |
| $q_s$     | ylempi lämpöarvo  | $[MJ/kg]$       |
| $S$       | rikin massaosuus prosentteina<br>kuivassa ja tuhkattomassa poltto-<br>aineessa  |                 |
| $T$       | lämpötila   | $[K, ^\circ C]$ |
| $\dot{V}$ | tilavuusvirta   | $[m^3/s]$       |
| $x$       | 1. massaosuus   |                 |
|           | 2. tilavuusosuus  |                 |
| $y$       | massapitoisuus  | $[mg/Nm^3]$     |

### Kreikkalaiset kirjaimet

|          |                             |            |
|----------|-----------------------------|------------|
| $\alpha$ | 1. lämmönsiirtokerroin      | $[W/m^2K]$ |
|          | 2. kohdennettu päästölisäys |            |
| $\beta$  | kohdennettu päästökerroin   |            |
| $\eta$   | hyötysuhde                  | $[%]$      |
| $\Sigma$ | summa                       |            |

## Alaindeksit

|      |   |
|------|---|
| H    | höyry   |
| JV   | jäähdytysvesi                                   |
| K    | kattila   |
| k    | 1. komponentti<br>2. konvektio<br>3. kuiva-aine |
| KP   | korkeapaine                                     |
| KU   | kuona   |
| KV   | kattilavesi                                     |
| LT   | lentotuhka                                      |
| M    | mitattu   |
| OK   | omakäyttö                                       |
| p    | palamaton                                       |
| PA   | polttoaine                                      |
| PI   | palamisilma                                     |
| prim | primääri-ilma                                   |
| R    | raaka-arvo                                      |
| r    | säteily   |
| ref  | referenssipiste                                 |
| sek  | sekundääri-ilma                                 |
| S    | standardoitu                                    |
| SK   | savukaasu                                       |
| SV   | syöttövesi                                      |
| UP   | ulospuhallus                                    |
| V    | vesi  |

## Lyhenteet

|      |   |
|------|---|
| a    | annum, vuosi  |
| CHP  | Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (engl. Combined Heat and Power)   |
| CO   | Hiilimonoksidi eli häkä   |
| eko  | Syöttöveden esilämmitin (engl. ekonomiser)  |
| FT   | Virtausmittaus  |
| FTIR | Fourier muunnos infrapuna –tekniikkaan perustuva savukaasujen analysointimenetelmä (engl. Fourier Transform Infrared) |
| h    | hour, tunti   |



|      |   |
|------|---|
| LOI  | Tuhkan hehkutushäviö, joka kuvaa hapettavan kuumennuksen aiheuttamaa kuivan näytteen massan muutosta (engl. Loss on Ignition) |
| LTO  | Lämmöntalteenotto   |
| luvo | Palamisilman esilämmitin (saks. luftvorwärmer)  |
| m-%  | Massaprosentti, aineen massan osuus koko seoksen massasta.  |
| MCR  | Maximum Continuous Rating, suurin jatkuva teho  |
| ME   | Mittausarvo (engl. Measurement)   |
| MSW  | Municipal Solid Waste, kiinteä yhdyskuntajäte   |
| OFA  | Over Fire Air, kaasujen palotilaan syötettävä sekundääri-ilma   |
| OW   | Öljyinen vesi, jota syötetään suoraan polttoprosessiin hävitettäväksi (engl. Oiled Water).                                    |
| QT   | Johtokykymittaus  |
| SP   | Asetusarvo (engl. Set Point)  |
| SNCR | Selektiivinen ei-katalyyttinen typen oksidien pelkistys   |
| TOC  | Orgaanisen hiilen kokonaismäärä tuhkassa (engl. Total Organic Carbon)   |

## Termit

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Absorbentti              | Aine, joka sitoo itseensä haitta-aineita puhdistusprosessissa.  |
| CCA-puu                  | Kromia, kuparia ja arseenia sisältävä kyllästetty jättepuu.   |
| Luonnonkiertokattila     | Vesiputkikattila, jossa veden ja vesihöyryn kierto lieriön ja höyrystimen välillä perustuu veden ja höyryn tiheyseroon. |
| NO <sub>x</sub> -päästöt | Typen oksideja (NO ja NO <sub>2</sub> ) merkitään symbolilla NO <sub>x</sub> .  |
| Porttimaksu              | Maksu, jonka jätteen energiahyödyntämislaitos perii jokaisesta vastaanotetusta jätetonnista.                            |
| Set point                | Käyttäjän määrittämä asetuservo voimalaitoksen prosessiarvolle.   |
| SO <sub>x</sub> -päästöt | Rikin oksideja (SO <sub>2</sub> ja SO <sub>3</sub> ) merkitään symbolilla SO <sub>x</sub> .                             |
| Taseraja                 | Raja, jonka yli kattilaan tulevia ja meneviä energiavirtoja tarkastellaan.  |
| Tuorehöyry               | Höyryvoimalaitoksen prosessikierrossa oleva höyry ennen turbiinia.  |
| Yhdyskuntajäte           | Kotitalousjäte ja jäte, joka on koostumukseltaan tai luonteeltaan samanlaista kuin kotitalousjäte.                      |

# 1 JOHDANTO

Nykypäivän energiateollisuus kohtaa tulevaisuudessa yhä enemmän haasteita kasvavan energiankulutuksen ja fossiilisten polttoaineiden käyttörajoitusten johdosta. Uusiutumattomien luonnonvarojen ehtyessä jätteen energiahyödyntäminen tarjoaa vaihtoehtoisen menetelmän tuottaa energiaa ja samalla vähentää ilmastonmuutosta kiihdyttävien biohajoavien jätteiden virtoja kaatopaikoille. Jätteen energiahyödyntäminen on jätepohjaisen voimalaitoksen toiminnan merkittävin motivaattori ja samalla jätteen tilavuuden pienentäminen sekä inerttisuuden lisääminen edesauttavat kestävien ympäristöratkaisujen tavoitteita. Merkittävä hyöty jätteen energiahyödyntämisessä saavutetaan sähkön ja lämmön yhteistuotannolla CHP-laitoksissa, jolloin yhteistuotannon hyötysuhde on korkeampi kuin erillistuotannon. Alhaiset tuotannon päästöt omaavalla kaukolämmöllä on tärkeä ja arvostettu asema Suomen energiajärjestelmässä luotettavana ja toimintavarmana lämmitysmuotona.

Tässä luvussa esitellään työn aihepiiri sekä jäsennellään työ. Luvussa kerrotaan työn taustat, tavoitteet ja käytetyt tutkimusmenetelmät. Lisäksi määritellään tutkimuskysymykset, joihin työn tavoitteena on vastata. Työn aihepiiri rajataan diplomityön puitteisiin sopivaksi sekä kuvataan työn sisältö.

## 1.1 Työn tausta

Ensimmäiset jätteenpolttolaitokset otettiin käyttöön jo 1800-luvun lopussa, mutta vasta 1970-luvulla jätteenpoltosta alettiin kiinnostua energiantuotantomielessä öljyn hinnan nousun myötä (Vesanto 2006). Vuonna 2012 Suomessa poltettiin noin 0,9 miljoonaa tonnia yhdyskuntajätettä. Yhdyskuntajätteen kokonaismäärä kasvoi 2,74 miljoonaan tonniin. Jätteen käsittely jakaantui tasaisesti kolmeen osaan energiakäytön, materiaalikierrätyksen ja kaatopaikkasijoituksen kesken. Polton osuus kohosi näin ollen lähelle läntisen Euroopan maiden keskiarvoa, mutta ei ole kuitenkaan laskenut kierrätyksen osuutta jätteenkäsittelyssä. Vielä viisi vuotta aiemmin kaatopaikoille vietiin yli puolet yhdyskuntajätteestä. (Suomen virallinen tilasto 2012)

Suomen jätelakiin ja sitä kautta Euroopan unionin jätelainsäädäntöön perustuva Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (331/2013) lopettaa käytännössä kokonaan orgaanisen ja biohajoavan jätteen sijoittamisen kaatopaikoille vuoteen 2016 mennessä. Rajoitukset koskevat yli 10 prosenttia orgaanista ainesta sisältävää jätettä, kuten esimerkiksi muoveja, tekstiilejä, puupohjaisia tuotteita ja biojätettä. Rakennus- ja purkujätteen osalta rajoitukset ovat kuitenkin täysimääräisesti voimassa vasta vuoden 2020 alussa. (Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 2013) EU:n jätelainsäädännön mukaiseen jätehierarchyään kuuluu etusijajärjestyk-

sessä jätteen määrän ja haitallisuuden vähentäminen, uudelleenkäytön valmistelu, kierrätys, hyödyntäminen energiana tai muu hyödyntäminen sekä viimeisenä vaihtoehtona loppukäsittely (Ympäristöministeriö 2014). Euroopan yhteisön tavoitteiden saavuttamiseksi voidaan Suomen kaatopaikoille sijoittaa lähinnä ainoastaan vakaita epäorgaanisia jätteitä vuoden 2015 jälkeen. Muut jätteet tulee ensisijaisesti kierrättää uusiokäyttöön tai raaka-aineeksi. Mikäli edellä mainitut menetelmät eivät onnistu, tulee jäte käyttää energiantuotannossa. Energiahyödyntäminen tulee kuitenkin olemaan keskeinen keino asetettujen tavoitteiden saavuttamiseksi. (Ekokem 2014b)

Energiahyödyntämisen tehostamiseen liittyy oleellisesti kattilan hyötysuhde, eli kattilasta hyödyksi saatava lämpövirta verrattuna kattilaan tuotuun energiavirtaan. Suurissa laitoksissa kattilan hyötysuhde on 90 % luokkaa, mutta arvo riippuu paljolti kattilan tekniikasta sekä käytettävästä polttoaineesta (Raiko 2006). Palamisprosessin eri tekijöiden vaikutusten ymmärtäminen on tärkeää kattilahuötysuhteen määrittämisessä.

Ekokem Oyj:n Voimalat 1 ja 2 Riihimäellä tuottavat sähköä ja kaukolämpöä polttokelpoisesta jätteestä. Vaihtelevien polttoprosessin osatekijöiden vuoksi polttoa ohjataan jatkuvasti, jotta prosessi pysyisi tasaisena ja täyttäisi kaikki vaatimukset. Jätteenpolttodirektiivi- ja asetus määrittävät savukaasujen epäpuhtauksille tiukat raja-arvot, joista kerrotaan tarkemmin luvussa 3.2.3. Lisäksi jätteenpolttoasetuksen mukaan savukaasujen lämpötilan on oltava viimeisen ilmanlisäyksen jälkeen yli 850 °C vähintään kahden sekunnin ajan. Tässä työssä tullaan tutustumaan polton ohjauksen toimintaan ja säätöihin niiltä osin kuin ne vaikuttavat kattilan hyötysuhteeseen ja häviöihin.

## 1.2 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Päätutkimustapauksena on tutkia, mikä on Ekokemin Voimala 2:n laskennallinen hyötysuhde ja millaisia vaikutuksia hyötysuhteeseen yksittäisillä parametrien muutoksilla teoriassa ja käytännössä on. Työn tulisi vastata ainakin seuraaviin kysymyksiin: ”Mikä on jätteen energiahyötykäytön polttoprosessin arinakattilan hyötysuhde eri toimipisteillä?” ja ”Mitä vuorovaikutuksia eri säätöpiireillä on ja miten ne vaikuttavat toisiinsa?”

Työn tavoitteena on selvittää arinakattilan toiminnan tehostamismahdollisuuksia sekä tutkia millä asetusarvoilla saavutetaan kaikin puolin parhaat tulokset. Tarkoituksena on myös tutkia mahdollisuutta lisätä matalan lämpöarvon omaavan jätteen määrää poltossa vuositasolla. Paremmuuden mittana voidaan käyttää kattilan taserajan ylittävien energiavirtojen tehostamista sekä taloudellista näkökulmaa. Päämääränä on tutkia kattilahuötysuhteen parantamisen mahdollisuuksia siten, ettei se vaikuta oleellisesti laitoksen kannattavuuteen.

### 1.3 Tutkimusmenetelmät

Työssä tutkimuksen kohteena oleva Voimala 2 on oma yksilöllinen kokonaisuutensa, mutta työn tutkimustuloksia voidaan soveltaa jossain määrin myös Voimala 1:een laitosten palamisprosessien ollessa hyvin samanlaiset. Pääasialliset tutkimustulokset tuotetaan laskennallisesti ja käyttötestitapauksilla. Tutkimuksessa sovelletaan tapaus- eli case-tutkimusmenetelmää. Case-tutkimus on empiirinen tutkimus, jota käytetään analysoitaessa tiettyä toimintoa tietyssä rajatussa kontekstissa. Case-tutkimus tarkastelee tapauksen taustainformaatiota sekä on monipuolisen tiedon käytön työkalu ja sen avulla voidaan selvittää tutkimuksen kannalta oleellisia prosesseja sekä vuorovaikutussuhteita. (Zainal 2007)

Muita työssä käytettyjä tutkimusmenetelmiä ovat suulliset tiedonannot sekä kirjallisuuteen perehtyminen. Tutkimuksen tukena on käytetty myös sähköpostikeskusteluja Ekokemin henkilökunnan kanssa.

### 1.4 Työn rakenne ja rajaus

Työ koostuu jätteen energiahyödyntämiseen liittyvää teknologiaa ja arinakattilan hyötysuhdelaskentaa käsittelevästä osuudesta sekä suoritettuna tutkimuksen kuvaavasta osuudesta. Työssä perehdytään ensiksi taustalla vaikuttavaan palamisprosessiin ja sen säätöön, mikä antaa pohjaa tutkimuksen tekemiselle. Lukuun 2 on koottu yrityskuvaus Ekokem Oyj:stä ja laadittu yksinkertaiset prosessikuvaukset Voimaloille 1 ja 2. Arinalla palamisen vaiheita ja yhdyskuntajätteen polttoa arinalla sekä siihen liittyviä seikkoja kuvataan luvussa 3. Luvussa 4 esitellään höyrykattilan hyötysuhdelaskennan teoreettiset taustat ja työn kannalta oleellisten häviöiden laskenta. Tarkemman tarkastelun kohteena olevan Voimala 2:n palamisprosessin säätö ja kattilan energiavirtaukset käsitellään luvussa 5. Luvussa 6 kuvataan suoritettut kokeet yksityiskohtaisesti. Luvussa 7 esitellään saadut tulokset sekä tarkastellaan niitä lähemmin ja lopuksi lukuun 8 on koottu yhteenveto.

Työn aihepiiri on rajattu jätteen energiahyödyntämiseen ja siihen liittyvien kattilan taserajan ylittävien energiavirtausten tarkasteluun. Työssä keskitytään erityisesti Ekokemin Voimala 2:een ja sen kattilan energiatehokkuuden edelleen kehittämiseen eri polton parametreilla. Työn tutkimusosuudessa palamisprosessia tarkastellaan muuttamalla yhtä prosessiarvoa kerrallaan muiden pysyessä vakioina.

## 2 EKOKEM

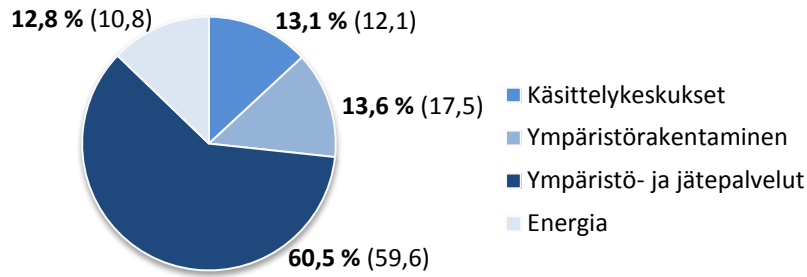
Materiaali- ja energiatehokkuus ovat tärkeitä kriteerejä kestäväan kehitykseen perustuvaa kierrätysyhteiskuntaa tavoitellessa ja siitä syystä myös Ekokem Oyj:lle ympäristöhuollon yrityksenä tärkeitä toiminnan ohjaajia. Ekokem on alun perin perustettu vuonna 1979 vastaamaan ongelmajätteen, nykyään vaarallisen jätteen, käsittelyn hoitamisesta (Ekokem 2014a). Siitä lähtien toimintaa on laajennettu sekä kansallisella että kansainvälisellä tasolla yrityksen tavoitteiden mukaisesti.

Nykyään Ekokem tuottaa jätteestä energiaa, raaka-aineita ja uudistuotteita sekä hallitsee jätehuollon koko elinkaaren. Osaamisalueisiin kuuluvat pilaantuneen maan ja veden puhdistus, jätteenpolton kuonien käsittely uudelleen käyttöä varten sekä hyödyntämiseen kelpaamattomien vaarallisten ja muiden jätteiden loppusijoittaminen. Materiaalin kierrätys on Ekokemin toiminnassa ensisijainen tavoite, jonka myötä savutetaan myös muita etuuksia, kuten energiantuotanto. (Ekokem 2014a) Luvussa 2.1 käsitellään Ekokemin toimintaa ja taustoja, jonka jälkeen keskitytään Riihimäellä sijaitsevien Voimala 1:n ja 2:n prosessikuvauksiin.

### 2.1 Yrityskuvaus

Päätoimipiste sijaitsee Riihimäellä, jossa vaarallisten jätteiden käsittely ja kaukolämmön tuotanto on aloitettu vuonna 1984. Riihimäen lisäksi Ekokemillä on toistakymmentä alueellista toimipaikkaa ympäri Suomen. Toimintaa laajennettiin merkittävästi kansainväliseksi vuonna 2012, kun ruotsalainen Sakab AB liitettiin osaksi Ekokem-konsernia. Tällä hetkellä toimintaa on toteuttamassa 480 Ekokemin omaa työntekijää Suomessa ja Ruotsissa. (Ekokem 2014a) Vuoden 2013 lopussa Suomen valtio oli Ekokemin suurin omistaja yhteensä 34,1 %:n osuudella. Yksityisten sijoittajien osuus oli 33,8 % ja kuntien ja kuntien omistamien yhteisöjen osuus 32,1 %. (Ekokem 2014b)

Koko konsernin liikevaihto vuonna 2013 oli 196,0 miljoonaa euroa, joka vastaa 19,4 %:n kasvua edellisvuoteen verrattuna. Liikevoittoa konsernille kertyi 28,1 miljoonaa euroa, joten kasvua kertyi 12,6 % vuoteen 2012 nähden. Elokuussa 2013 uudistetut liiketoiminta-alueet jakautuvat neljään yhteistyötä keskenään tekevään osaan; ympäristö- ja jätepalveluihin, käsittelykeskusliiketoimintaan, energia- ja vesiliiketoimintaan sekä ympäristörakentamiseen. Seuraavan sivun kuva 2.1. ilmentää vuoden 2013 liikevaihdon jakaumaa eri liiketoiminta-alueiden kesken. Kuvassa on nähtävillä myös vuoden 2012 osuudet sulkeisiin merkittynä.



**Kuva 2.1.** Ekokemin liikevaihdon jakauma liiketoiminta-alueittain vuonna 2013 (mukailten lähteestä Ekokem 2014a).

Liiketoiminta-alueista ainoastaan ympäristörakentamisen liiketoiminta laski vuonna 2013 ulkomaan projektitoiminnan alasajon vuoksi. Muut liiketoiminta-alueet kasvoivat. (Ekokem 2014a)

Liiketoiminnan riskit liittyvät mahdollisiin lainsäädännön ja kilpailuolosuhteiden muutosten aiheuttamiin kysynnän vaihteluihin sekä jätteiden käsittelyn suuriin investointeihin. Asiakasyritysten tuottavuuden tehostamisen tärkeyden ja toimintaympäristön haastavuuden vuoksi voidaan Ekokemin asemaa ympäristö- ja jätteenhuollon asiantuntijapalveluita tarjoavana yrityksenä pitää vahvana, ja kysynnällä on kasvupotentiaalia. Tästä syystä Ekokem seuraa ja arvioi jatkuvasti asiakastytyvyyttä, liiketoimintaympäristöään ja kilpailutilannetta. (Ekokem 2014b)

Yritystoiminnan pääarvot ovat vastuullisuus, uudistushakuisuus, yksilön arvostaminen sekä rehellisyys. Myös turvallinen ja ympäristöystävällinen työskentely ovat tärkeä osa toimintaa. Lupaehtojen mukaisia ilmapäästölyityksiä vuonna 2013 ei tapahtunut yhtään ja Riihimäen kaikkien laitosten mitatut savukaasupitoisuudet alittivat lupaehtojen päästörajat. (Ekokem 2014a)

Yrityksellä on laaja osaaminen jätteitä vähentävien ja hyödyntävien ratkaisujen suhteen. Luonnonvarojen säästämiseen tähtäävä jätteiden käsittelykapasiteetti on laaja ja koostuu seuraavista tekijöistä

- 3 jätevoimalaa
- 2 vaarallisen jätteen polttolaitosta
- 2 hyötyvoimalaitosta
- 2 fysikaalis-kemiallista käsittelylaitosta
- 7 jätevesien käsittelylaitosta
- Loisteputkien ja elohopean käsittelylaitokset
- Rakennusjätteen lajittelukentät
- 7 loppusijoituspaikkaa pilaantuneille maille ja teollisuusjätteille
- Siirrettävä polttokuonan käsittelylaitteisto
- Uusiomuovin ja uusiovoiteluöljyn valmistuslaitokset
- REF-polttoaineen valmistus

Ekokem panostaa tutkimustyöhön omien tutkijoiden, tutkimuslaboratorioiden ja tietopalvelun avulla sekä ottaa osaa aktiivisesti alan tutkimushankkeisiin. Liikevaihdostaan vuonna 2013 Ekokem panosti 1,8 % tutkimukseen ja kehitykseen, millä halutaan kehittää asiantun-

tijuutta ja saavuttaa kilpailuetua. Investointeja tehtiin yhteensä 16,0 miljoonan euron arvosta ja suurin osa investoinneista koostui samana vuonna käyttöön otetuista Jepuan hyötyvoimalaitoksesta ja kaukolämmöntuotantoa tehostavista absorptiolämpöpumpuista. Tutkimustoiminnan pääpaino on vuonna 2014 muun muassa muovikierrätyksen kehittämisessä ja tehostamisessa, vesienkäsittelyn kehittämisessä, tuhkan ja kuonan käsittelymenetelmien edelleen kehittämisessä sekä metallien talteenotto-prosessin tehostamisessa. Lisäksi Ekokem toteuttaa vuosittain kymmeniä asiakaslähtöisiä tutkimushankkeita, joilla pyritään yhteistyössä asiakkaiden kanssa tehostamaan materiaali- ja energiatehokkuutta. (Ekokem 2014a)

Jäteasetuksesta tulevan vaatimuksen mukaisesti energiatehokkuusluvun on oltava vähintään 0,65, jotta jätteen käsittely luokitellaan energiahyödyntämiseksi. Ekokemin voimaloiden yhteinen energiatehokkuusluku on 0,96. Jätteestä tuotettiin vuonna 2013 Riihimäelle ja Hyvinkäälle kaukolämpöä 462 GWh ja sähköä tuotettiin yhteensä 106 GWh, josta 57 GWh ohjattiin valtakunnan verkkoon. Energiantuotantoon Riihimäen voimalaitoksilla käytettiin jätettä 320 000 tonnia, josta syntyi 50 000 tonnia kuonaa ja 10 000 tonnia loppusijoitettavaa jätettä. (Ekokem 2014a)

## 2.2 Voimalat

Ekokemin Voimala 1 on otettu käyttöön Riihimäellä vuonna 2007, minkä myötä kaukolämmön toimitus laajeni myös Hyvinkäälle. Toinen voimala, Voimala 2, käynnistettiin vuonna 2012 ja sähkön tuotanto kasvoi samalla merkittävästi. Voimalat ovat CHP-laitoksia eli niissä tuotetaan sekä kaukolämpöä että sähköä kierrätykseen kelpaamattomasta jätteestä. (Ekokem 2014a) Molemmissa voimaloissa poltetaan pääasiassa syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä sekä erilaisia teollisuuden ja kaupan jätteitä, mutta poltettavina jakeina käytetään myös muita kiintoaineita kuten murskattua rakennusjätettä, vaarallista jätettä sekä puu- ja muovijätettä. Lisäksi polttoon syötetään likaista vettä haihdutukseen ja likaveden sisältämät jakeet palavat samalla kattilassa. Voimalaitoksien luonnonkiertokattilat ovat varustettu jätteenpolttoasetuksen vaatimusten mukaisilla kahdella käynnistys- ja tukipolttimilla riittävän palamislämpötilan varistamiseksi ja apupolttoaineena käytetään kevyttä polttoöljyä. Tulipesään syötetään myös ammoniakivettä typen oksidien neutraloimiseksi. (Ekokem 2014c; Ekokem 2009; Vanhatalo 2012)

Voimaloiden jätteen energiahyödyntämistekniikat ovat hyvin pitkälle samankaltaisia savukaasujen puhdistusprosessien ollessa kuitenkin huomattavan erilaiset. Arinakattilalaitoksien polttolämpötilat vaihtelevat välillä 850–1100 °C. Poltossa vapautuva lämpö siirtyy kattilan putkistoissa virtaavaan veteen tai höyryyn. Voimaloiden arinakattiloissa vaakavedon tulistimilta lähtevien tuorehöyryjen arvot ovat 320 °C / 25 bar. Tulistuksen jälkeen korkeapaineinen ja –lämpötilainen höyry johdetaan höyryturbiineille, joissa höyryn entalpia muuttuu liike-energiaksi ja generaattoreilla edelleen sähköenergiaksi. Jätteenkäsittelykapasiteetiltaan Voimala 2 on jonkin verran pienempi kuin Voimala 1. (Ekokem 2009)

### 2.2.1 Voimala 1

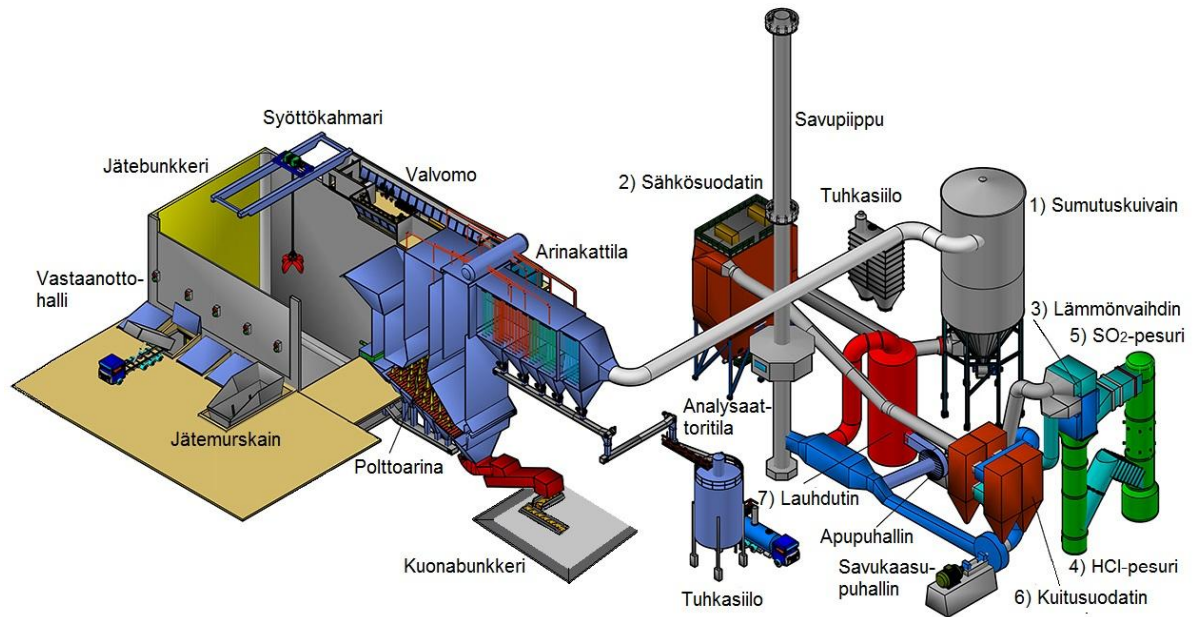
Voimalalla poltettava jäte puretaan aluksi syöttöbunkkeriin sellaisenaan tai murskan läpi ajettuna, missä sitä sekoitetaan kahmarin avulla tasalaatuisuuden varmistamiseksi. Jäte nostetaan kahmarilla syöttösuppilon, josta se ohjataan syöttötyöntimien avulla arinalle tasaisen paksuksi kerrokseksi. Pieniä polttoaine-eriä voidaan ohjata bunkkerin ulkopuolelta suoraan syöttösuppilon koirakuljettimella. (Ekokem 2014c) Voimalan jätteenkäsittelykapasiteetti on noin 150 000–160 000 tonnia vuodessa ja kattilan höyryn tuotanto normaalisti 19,0 kg/s.

Viisivaiheisella mekaanisella porrasarinalla jäte poltetaan 1200–1600 °C kuumuudessa, minkä seurauksena jätteen paino vähenee noin 30 prosenttiin ja tilavuus noin 10 prosenttiin. Arinapalat liikkuvat koko ajan edestakaisin työntäen jätettä kohti koko arinan levyistä kuonanpoistokuilua, jonka kautta palamaton aines putoaa lopulta vedellä täytettyyn sammutusaltaaseen. (Ekokem 2014c) Kuona työnnetään sykleittäin hydraulisesti toimivalla kuokalla sammutusaltaasta kuonankuljettimille, joiden avulla kuona ohjataan kuonabunkkeriin.

Jätepatjan paksuuden on oltava arinalle tullessa noin 1500 mm, jotta myös arinan takimainen osa osallistuisi aktiivisesti polttoaineen loppuun palamiseen. Palamisilma ohjataan arinalle lähinnä primääri- ja sekundääri-ilmana. Laitoksen arinakattilan on toimittanut Fisia Babcock Environment GmbH. Arinan polttoaineteho on 55 MW ja pinta-ala 64,26 m<sup>2</sup>. Arina koostuu kahdesta pitkittäissuuntaisesta arinaradasta. Arinapinnat ovat kolmen ensimmäisen arinalohkon osalta vesijähdytteiset ja viimeisten kahden arinalohkon osalta ilmajähdytteiset. (Ekokem 2014c; Fisia Babcock Environment GmbH 2007)

Arinan alle hitsattujen arinasuppiloiden kautta kerätään arinapalojen väleistä tippuva kuona talteen. Kokonaisuudessaan arinakuonassa on noin 10 prosenttia rautaa ja 1–2,5 prosenttia muita metalleja, kuten alumiinia ja kuparia. Voimaloiden kuonista erotetaan kierrätykseen yli 5000 tonnia metalleja vuodessa. Metallien erotuksen ja käsittelyn jälkeen kuonaa voidaan hyödyntää esimerkiksi maanrakennusmateriaalina. (Ekokem 2014a; Ekokem 2014c; Fisia Babcock Environment GmbH 2007) Kattilatuhka kerätään erikseen kattilahallin ulkopuolella sijaitsevaan kattilatuhkasiilon. Voimala 1:n havainnekuvassa 2.2 on esitetty jätteen energiapolttoprosessi toiminnallisine komponentteineen. Savukaasun puhdistuksen vaiheet on numeroitu 1–7.





**Kuva 2.2.** Voimala 1:n havainnekuva (mukailtu lähteestä Ekokem 2014c).

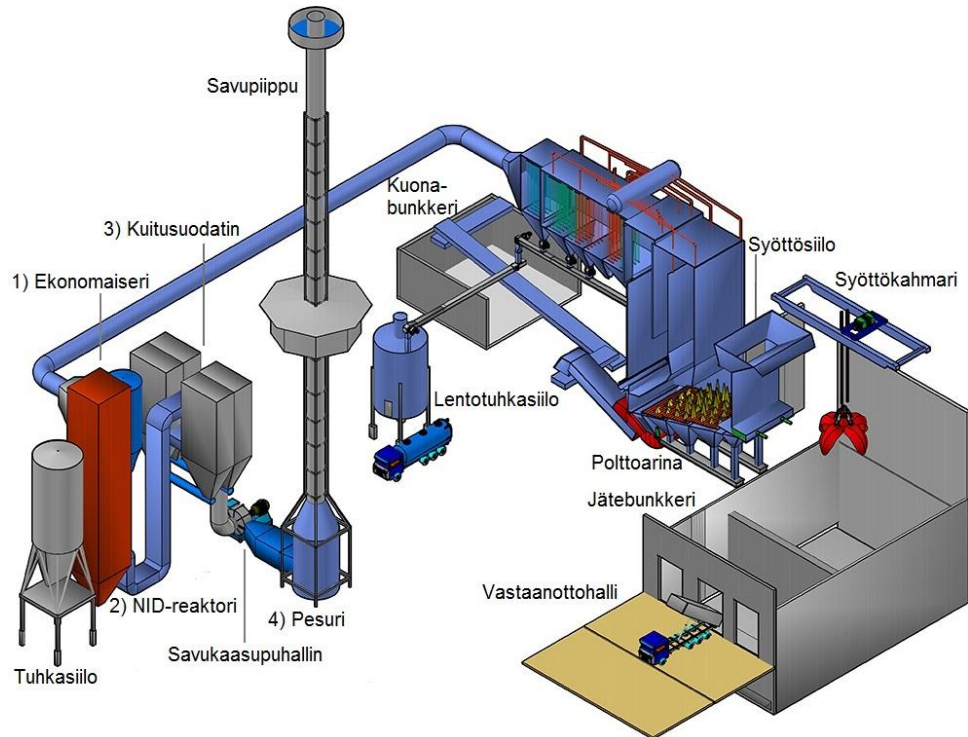
Savukaasujen puhdistuksen ensimmäisessä vaiheessa sumutuskuivain (Niro atomizer) laskee savukaasujen lämpötilaa kaasunpesun prosessissa syntyvien jätevesien avulla, jotka käytännössä koostuvat HCl-pesurin poistoliuoksesta. Niron jälkeen savukaasut johdetaan kahdesta korkeajännitevyöhykkeestä koostuvaan sähkösuodattimeen, jonka pölynerotusaste kokonaisuudessaan on 99,7 %. Seuraavassa vaiheessa savukaasujen märkäpesureissa, suolahappo- ja rikkidioksidipesureissa, savukaasuista poistetaan HCl- ja HF-yhdisteet sekä rikkidioksidi kalsiumhydroksidiliuoksen avulla. SO<sub>2</sub>-pesurista poistetaan pesuliuosta tiheyden kasvaessa yli asetusarvon ja liuos ohjataan sentrifugiin, jossa kiinteä kipsi erotetaan lavalle ja jäljelle jäävä liuos ohjataan kierrätysvesisäiliöön uudelleen käytettäväksi. (Tähtinen 2011a)

Ennen kuitusuodatinta savukaasujen lämpötilaa nostetaan kyllästymislämpötilasta, noin 70 °C, lämpötilaan noin 125 °C lämmönvaihtimessa, jossa samalla lasketaan pesureille menevien savukaasujen lämpötilaa, ja savukaasujen sekaan syötetään aktiivihiehen ja kalkin seosta. Kyseinen seos toimii absorbenttina, joka kiinnittyy suodattimessa suodinpinnoille ja absorboi savukaasuista dioksiinit, furaanit sekä elohopean. Sumutuskuivaimelta, sähkösuodattimelta ja kuitusuodattimelta kerätyt tuhkat kuljetetaan lentotuhkasiiloon. (Tähtinen 2011a) Ennen savukaasujen piippuun johtamista voidaan niiden sisältämä lämpöenergia siirtää kaukolämpöveden savukaasun lauhduttimessa (Ekokem 2014c).

### 2.2.2 Voimala 2

Voimala 2:lla jäte kipataan suoraan syöttöbunkkeriin kahden jäteluiskan kautta, eikä siellä ole erillistä murskaa eikä koirakuljetinta. Murskalle on kuitenkin olemassa varaus, mikäli sellainen halutaan voimalalle myöhemmin asentaa. Syöttöbunkkerin rakenne eroaa Voimala 1:n syöttöbunkkerin rakenteesta siten, että se on jaettu betoniseinämällä kahteen osaan,

joista suurempi alue toimii jätteen sekoituslohkona. Neljävaiheinen arina on 60 m<sup>2</sup> suurinen ja polttoaineteho on 35 MW. Arinalohkoista kaksi ensimmäistä on vesijäähdytteisiä ja kaksi viimeistä ilmajäähdytteisiä. Polttoilma puhalletaan arinallevyjen alta ja lisäilmaa syötetään tulipesän seinälle. (Ekokem 2014c) Laitoksen kattilan on toimittanut Babcock & Wilcox Vølund (Vanhatalo 2012). Voimalan jätteenkäsittelykapasiteetti on noin 110 000 tonnia vuodessa ja kattilan höyryn tuotanto normaalisti 13,5 kg/s. Voimala 2:n havainnekuva 2.3 selventää voimalaitoskokonaisuutta ja sen pääkomponentteja. Savukaasun puhdistuksen vaiheet on numeroitu 1–4.



**Kuva 2.3.** Voimala 2:n havainnekuva (Ekokem 2014c).

Savukaasut ohjataan ennen varsinaista savukaasunpuhdistusta kaukolämpö ekonomaiseriin, jossa osa savukaasujen sisältämästä lämpöenergiasta siirretään kaukolämpövedeen. Ekonomaiserin puhdistusjärjestelmänä toimii kuulanuohousjärjestelmä. Ekonomaiserin jälkeen savukaasut puhdistetaan kaasumaisista komponenteista tulokanavaan integroidussa NID-reaktorissa (engl. Novel Integrated Deacidification) savukaasuihin syötettyjen absorbenttien avulla. Aktiivihiili sitoo itseensä raskasmetalleja sekä dioksiineja ja se syötetään savukaasuihin ennen reaktoria. Sammutettu kalkki ja osa kuitusuodattimilta kerätystä kiertopölystä annostellaan fluidisoituna reaktoriin. Kalkki reagoi reaktorissa happamien komponenttien kanssa (SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, HF ja HCl). (Tähtinen 2011b)

Reaktorin jälkeen on kuitusuodatin, joka erottaa kiintoainepartikkelit savukaasuvirrasta. Reaktori ja kuitusuodattimet voidaan ohittaa ohituskanavalla, jota voidaan käyttää myös savukaasujen takaisinkierrätykseen pienillä kuormilla. Ekonomaiserin pohjasuppilosta, reaktorista ja kuitusuodattimien pölytaskuista lopputuotepöly ohjataan ruuvikuljettimien ja pneumaattisten kuljettimien avulla lopputuotesiiloon. (Tähtinen 2011b)

Savukaasupuhaltimen jälkeen on piipun alaosaan integroitu märkäpesuri, joka puhdistuksen ohella hyödyntää savukaasun lämpöenergiaa talteen kaukolämmöksi. (Ekokem 2014c). Pesurin on toimittanut ruotsalainen Götaverken Miljö Ab, joka on kehittänyt märkäpesureihin tarkoitettua aktiivihiihtä sisältävää polypropeenisen täytekappaletyypin. Adiox -nimiset täytekappaleet sitovat hiilen avulla itseensä erittäin haitallisia dioksiineja ja lopulta materiaali voidaan käytöstä poistettaessa hävittää polttamalla. (Vesanto 2006)

## 3 ARINAPOLTTO

Arinapoltto on kiinteille polttoaineille tarkoitettu perustekniikka ja nykyään erilaisia arinaratkaisuja on kehitetty hyvin monenlaisia. Arinaksi kutsutaan sitä tulisijan osaa, jonka päällä polttoaine poltetaan joko hitaasti liikkuvana tai paikallaan pysyvänä kerroksena. (Huhtinen et al. 2004) Arinapoltto sopii useimmille kiinteille polttoaineille, mutta tässä luvussa keskitytään ainoastaan jätteeseen polttoaineena.

Luku 3.1 selventää arinalla tapahtuvaa palamisprosessia ja erittelee kiinteän polttoaineen palamisen päävaiheet. Luvussa 3.2 syvennyttään jätteenpolton erityisvaatimuksiin arinalla. Ensiksi käydään läpi jätteen ominaisuudet polttoaineena, käytössä olevat arinarakenteet sekä poltossa muodostuvat päästöt ja tuhkat. Lopuksi perehdytään jätteenpolton höyryn arvoihin ja korroosioon.

### 3.1 Palaminen arinalla

Polttoaineen syötön jälkeen jäte käy arinalla eteenpäin liikkeessaan läpi kuivumisvaiheen, haihtuvien aineiden vapautumis- ja syttymisvaiheen sekä jäännöshiilen palamisvaiheen. Arinalla on luonnollisesti samanaikaisesti eri palamisen vaiheissa olevia kappaleita. Yksittäisessä polttoainepartikkelissa palamisen vaiheet tapahtuvat useimmiten järjestyksessä, mutta suurissa polttoainepartikkeleissa vaiheet voivat olla osittain päällekkäisiä. (Raiko et al. 2002)

Palamisnopeus riippuu oleellisesti kiinteän kappaleen fysikaalisista, kemiallisista ja rakenteellisista ominaisuuksista. Fysikaalisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan tässä tapauksessa ominaislämpöä ja lämmönjohtavuutta, kun taas kemialliset ominaisuudet viittaavat reaktiivisuuteen, pyrolysoitumislämpöön sekä polttoaineen lämpöarvoon. Rakenteellisiin ominaisuuksiin kuuluvat partikkelikoko, tiheys ja huokoisuus. Lisäksi palamiseen oleellisesti vaikuttavia osaprosesseja ovat reaktionopeudet ja -mekanismit sekä lämmön- ja aineensiirto. (Raiko et al. 2002)

#### 3.1.1 Polttoaineen lämmitys ja kosteuden poistuminen

Poltettava partikkeli lämmitetään arinalla aluksi kuivumislämpötilaan, jolloin polttoaineen sisältämä vesi alkaa höyrystyä ja herkimmin haihtuvat yhdisteet alkavat vapautua. Kosteiden polttoaineiden palamistehokkuutta rajoittaa hidas syttymisnopeus ja suurin osa arinasta tai tulipesästä onkin varattava polttoaineen kosteuden poistumiseen ja syttymislämpötilan

saavuttamiseen. Koska kuivuminen laskee tulipesän keskimääräistä lämpötilaa, tulisi siihen käytettävän ajan olla mahdollisimman lyhyt. (Huhtinen et al. 2004; Raiko et al. 2002)

Arinan läpi puhallettavan palamisilman esilämmitys edistää jätteen kuivumista ja palamisherkkyyttä lämmittäen lähinnä aivan ilmasuuttimien päällä olevaa jätettä. Tulipesän säteily lämmittää polttoainekerroksen pintaa tehokkaasti ja säteilyä voidaan tehostaa jätteen syöttöalueen ympärille muurattavilla lämpöä varastoivilla ja heijastavilla lämpöeristeillä. Lämpö siirtyy kuivumisalueelle hitaasti myös johtumalla palavasta kuumasta polttoainekerroksesta. Lisäksi kosteuden poistumista voidaan nopeuttaa kasvattamalla kappaleen haihtumispintaa eli pienentämällä palakokoa sekä tulipesän oikeanlaisella geometrialla. Vastavirtaperiaate, jossa kuumat savukaasut johdetaan oikeanlaisella tulipesän geometrialla arinan alkuosaan nopeuttaa jätteen kuivumista ja syttymistä. (Huhtinen et al. 2004, Raiko et al. 2002)

### 3.1.2 Haihtuvien aineiden vapautuminen ja palaminen

Polttoaineen kuivumisen jälkeen polttoaine pyrolysoituu eli muuntuu kaasumaiseen ja tervamaiseen muotoon lämmöntuonnin johdosta. Polttoaineen pyrolysoituvia komponentteja eli haihtuvia aineita ovat muun muassa hiilimonoksidi (CO), vety (H<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) sekä hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>). Herkimmin haihtuvat ainesosat, kuten hiilivedyt ja hiilimonoksidi, alkavat vapautua heti kuivumis- ja lämmitysvyöhykkeen jälkeen, mutta saavuttavat syttymislämpötilan vasta 500–700 °C:n lämpötilassa. Huonommin haihtuvat tervakaasut eli raskaat hiilivedyt vapautuvat viimeisenä, mutta voivat syttyä jo 250–400 °C:n lämpötilassa. Kaasumaiset komponentit nousevat polttoainekerroksesta kaasutilaan, jonne syötetään sekundääri-ilmaa. Kaasut ja ilman happi reagoivat keskenään luovuttaen samalla lämpöä ympäristöön. Tervakaasujen alhainen syttymislämpötila edesauttaa muiden kaasujen syttymistä kehittyvän lämmön vaikutuksesta. Osa kevyemmistä ainesosista ehtii kuitenkin poistua savukaasujen mukana syttymättöminä pyrolysoitumisjärjestyksen ollessa tällöin epäedullinen. (Huhtinen et al. 2004; Babcock & Wilcox Vølund 2012)

Pyrolysoituminen on yleensä endoterminen prosessi, jota seuraa haihtuvien aineiden ekso-terminen syttymis- ja palamisprosessi. Haihtuvien aineiden vapautuminen jatkuu ilman ulkopuolista energiaa, kun lämpötila on noussut riittävän korkeaksi. Palamisprosessin luovuttama lämpö edesauttaa myös jäljelle jäävien kiinteiden polttoainepartikkeleiden syttymistä. Tälle vaiheelle on ominaista näkyvät liekit ja voimakas palamistapahtuma. Optimaalista kaasujen palaminen on silloin, kun savukaasujen lämpötila on 800–1000 °C ja CO-pitoisuus on pieni. CO:n palaminen ja muuntuminen CO<sub>2</sub>:ksi edellyttää kuitenkin yli 700 °C:n lämpötilaa, ilman ylimäärän oikeaa suhdetta savukaasuissa sekä savukaasun ja sekundääri-ilman riittävää sekoittumista kaasujen palotilassa. Tulipesän rakenne suunnitellaan siten, että se edesauttaa kaasujen sekoittumista ja palamista arinan yläpuolella korkeassa lämpötilassa. (Babcock & Wilcox Vølund 2012; Huhtinen et al. 2004; Raiko et al. 2002; Vesanto 2006)

### 3.1.3 Jäännöshiilen palaminen

Viimeisessä vaiheessa polttoaineesta jäljelle jäävää kiinteää ainetta kutsutaan jäännöshiileksi, joka kaasuuntuu ja palaa pinnaltaan ilman liekkiä, mikäli lämpötila on riittävä ja happea on tarpeeksi saatavilla. Jäännöshiilen loppuun palamisessa ja kaasuuntumisessa polttoainepartikkelin pintaan ja sisäosiin diffusoituvat molekyylit reagoivat heterogeenisesti jäännöshiilen kanssa. Arinapolttolle on ominaista, että suurin osa polttoaineen sisältämästä tuhkasta poistuu arinalta pohjatuhkana, eikä savukaasujen mukana. Tästä johtuen oikein mitoitettulla jäännöshiilen palamisvaiheella on palamishyötysuhteen kannalta merkittävä osuus arinapoltoissa. (Raiko et al. 2002)

Jäännöshiilen palamisvaihe on tyypillisesti hidas ja vaatii huomattavan osan arinan pinta-alasta. Eri jätetyyppien loppupolttoajat vaihtelevat suuresti, mikä tekee prosessin hallinnasta haastavaa. Jäännöshiilen palamisaikaa voidaan muuttaa polttoainepartikkelin palakokoa pienentämällä. Palamisajan kiihdyttäminen lämpötilatasoa nostamalla sen sijaan saattaa johtaa epäedulliseen tuhkan sulamiseen. (Babcock & Wilcox Vølund 2012; Raiko et al. 2002)

## 3.2 Yhdyskuntajätteen energiapoltto arinalla

Arinatekniikkaa on pidetty varmana ja yksinkertaisena vaihtoehtona polttaa jätettä jo pitkään. Prosessi kestää oikein säädettynä melko hyvin jätteen lämpöarvon, kosteuden ja tuhkapitoisuuden vaihtelut, eikä jäte tarvitse monimutkaista esikäsittelyä ennen polttoa. Suurimmat jätekomponentit poistetaan jäteseoksesta tai murskataan. Käytettävät arinat ovat yleisimmin pyöriviä tai edestakaisin liikkuvia mekaanisia viistoarinoita. Arinat ovat joko ilma- tai vesijähdytteisiä tai vaihtoehtoisesti saman arinan eri osissa voidaan hyväksikäyttää molempia jäähdytystekniikoita.

EU:n jätteenpoltoille asettamat päästöraajat ovat varsin tiukat, mikä asettaa savukaasun puhdistukselle tiettyjä vaatimuksia. Tuhkia jätteenpoltoissa syntyy huomattavia määriä, etenkin pohjatuhkaa eli kuonaa. Kuonaa pystytäänkin käyttämään hyödyksi esimerkiksi maanrakennuksessa, kun taas dioksiineja ja raskasmetalleja sisältävä lentotuhka luokitellaan vaaralliseksi jätteeksi. Lentotuhkat stabiloidaan ja loppusijoitetaan käsittelykeskuksen lähetyvillä sijaitsevalle kaatopaikalle. Jätteenpolton ominaisuuksiin kuuluu myös normaalisti melko alhaisena pidettävät höyryn arvot kattilakorroosiosta johtuen.

### 3.2.1 Jäte polttoaineena

Jätteen koostumus on hyvin epähomogeeninen ja sen ominaisuudet vaihtelevat niin tuhkan ja kiviaineksen pitoisuuden, haihtuvien kaasujen ja kiinteän hiilen pitoisuuden, kosteuspiitoisuuden kuin tilavuuden suhteen. Kiintojätettä syntyy pääasiassa kotitalouksien, kauppa- ja teollisuusyritysten sekä kunnallisen jätehuollon toimesta. Kotitalousjätteeseen voidaan jaotella keittiöjäte, ruokajäte, pakkausmateriaalit, paperi, muovi, metalli, lasi, puutarhajäte,

puu, tekstiilit sekä muut kiinteät aineet. Teollisuusjäte koostuu kotitalousjätteen kaltaisesta jätteestä, liike- ja toimistotilojen pakkausmateriaaleista ja pienistä eristä tuotannon jäännösaineita. Vaarallinen jäte sisältää muun muassa rakennusjätettä, sairaalajätettä, kemikaalijätettä sekä suuria eriiä tuotannon jäännösaineita. (Babcock & Wilcox Vølund 2012)

Energiantuotannon kannalta polttoaineen merkittävin ominaisuus on sen lämpöarvo. Lämpöarvo voidaan ilmaista joko kalorimetrinen eli ylempänä lämpöarvona tai tehollisena eli alempana lämpöarvona. Kalorimetrinen lämpöarvo,  $q_s$ , on massayksikköä kohti vapautuva lämpömäärä poltettaessa polttoainenäyte täydellisesti pommikalorimetrissä. Vapautuva energia mitataan kalorimetrin lämpötilan muutoksen avulla. Kalorimetrillä mitattu polttoaineen lämpöarvo on kuitenkin liian suuri sovellettavaksi normaalipolttoon, sillä pommikalorimetrissä polttoaineen kosteus ja vedyn palaessa syntynyt vesihöyry tiivistyvät palamista-  
pahtuman jälkeen nesteeksi. Myös polttoaineen rikki ja typpi palavat oksideiksi pommikalorimetrissä ja muodostavat veden kanssa happoja. Määritettäessä ylempää lämpöarvoa tarkasti, on myös eksotermisen reaktion tuloksena syntyvien rikki- ja typpihappojen määrä selvitettävä ja tehtävä niin sanottu happokorjaus lämpöarvoon. (Huhtinen et al. 2004; Raiko et al. 2006)

Todellisuudessa palamisessa syntynyt vesihöyry kulkeutuu savukaasujen mukana pois prosessista. Tehollinen lämpöarvo,  $q_i$ , vastaa paremmin käytännön olosuhteita, jolloin palamisprosessissa syntynyt vesi jää höyryfaasiin, eikä vesihöyryn lämpösisältöä pystytä näin ollen hyödyntämään. Ylemmästä lämpöarvosta saadaan alempi lämpöarvo, kun siitä vähennetään polttoainekiloa kohti tiivistyneen veden lauhtumislämpö, joka on 2443 kJ/kg lämpötilan ollessa 25 °C. (Huhtinen et al. 2004; Raiko et al. 2006)

Kirjallisuudessa on annettu useita korrelaatioita eri polttoaineiden lämpöarvoille, mutta jätteen lämpöarvot vaihtelevat suuresti ja lämpöarvon tarkka laskenta on tästä syystä vaikeaa. Polttoaineiden lämpöarvojen laskemiseksi on kuitenkin kehitetty yleisiä kaikille polttoaineille sopivia empiirisiä korrelaatioita. Dulongin mukaan kuiva-aineen ylempi lämpöarvo voidaan laskea elementaarianalyysin avulla yhtälöstä

$$q_{s,k} = 338,2 * C + 1442,8 * \left( H - \frac{O}{8} \right) + 94,2 * S \quad (3.1)$$

Polttoaineen koostumuksen vaihdellessa voidaan kuiva-aineen ylempi lämpöarvo laskea myös Grumell & Daviesin mukaan

$$q_{s,k} = (15,22 * H + 937) * \left[ \frac{C}{3} + H - \frac{(O-S)}{8} \right] \quad (3.2)$$

Kaavoissa C, H, O ja S ovat kuivan ja tuhkattoman polttoaineen alkuainepitoisuuksia painoprosentteina. (Raiko et al. 2002, Raiko et al. 2006)

Kuiva-aineen ylemmän lämpöarvon avulla saadaan laskettua kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo  $q_{i,k}$

$$q_{i,k} = q_{s,k} - 219,6 \cdot H \quad (3.3)$$

Seuraavaksi voidaan laskea vielä kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo

$$q_{i,w} = q_{i,k} \cdot \left( \frac{100-w}{w} \right) - 24,4 \cdot w, \quad (3.4)$$

jossa  $w$  on polttoaineen kosteus painoprosentteina kostean polttoaineen painosta. (Pitkänen 2009)

Ekokemin Voimala 1:llä ja Voimala 2:lla polttoaineen lämpöarvoa laskee jatkuvasti voimaloilla käytössä oleva Metso DNA- prosessinohjausjärjestelmä. Laskennat perustuvat sen hetkisten mittausarvojen avulla muodostettuun kattilan energiataseeseen. Tehollista lämpöarvoa järjestelmä laskee kaavalla

$$q_{i,PA} = \frac{\dot{Q}_{PA}}{\dot{m}_{PA}}, \quad (3.5)$$

missä  $\dot{Q}_{PA}$  on polttoaineen sisältämä lämpöteho ja saadaan selville kattilan tehon ja kokonaishäviön sekä palamisilman ja polttimien tehon avulla

$$\dot{Q}_{PA} = \dot{Q}_K + \dot{Q}_{häviöt} - \dot{Q}_{PI} - \dot{Q}_{polttimet} \quad (3.6)$$

Kattilan teho  $\dot{Q}_K$  saadaan käytännössä höyryn ja syöttöveden sisältämien tehojen erotuksena. Palamisilman tehon arvoon  $\dot{Q}_{PI}$  vaikuttaa lähinnä primääri-ilman tilavuusvirta sekä lämpötila. Kokonaishäviöön lasketaan mukaan savukaasuhäviö, säteilyhäviö sekä kuonan ja tuhkan termiset ja palamattoman polttoaineen häviöt. Polttimet eivät normaalissa ajotilanteessa ole käytössä, jolloin kaavan 3.6 viimeinen termi on merkityksetön. Järjestelmä laskee kaikki edellä mainitut arvonsa kolmen edellisen tunnin keskiarvoina, mutta polttoaineen massavirran lisäksi tunnin viiveellä.

Useista eri lähteistä laaditun datan mukaan yhdyskuntajätteellä on seuraavanlainen koostumus:

- orgaaninen aines 30–40 m-%
- paperi/kartonki 15–25 m-%
- muovit 7–15 m-%
- metalli, lasi, tekstiilit 1–7 m-% (jokainen komponentti vaihtelee ko. välillä)
- muut 18–30 m-%



Koostumuksen vaihteluväli on laaja ja sen seurauksena myös palamistekniset ominaisuudet, kuten lämpöarvo sekä kosteuden ja tuhkan massapitoisuudet, vaihtelevat suuresti. Jätteen koostumus voi vaihdella paikkakuntaakohtaisista jätetuoltomääräyksistä, jätteenkeräyslähteistä, eri vuodenaajoista, teollisuusjätteen ja vaarallisen jätteen osuuksista, lajittelun tiedotuksesta, ihmisten valvotuneisuudesta lajitella sekä jätteen sekoittumistehokkuudesta riippuen. (Bankiewicz 2012; Horttanainen et al. 2013)

Yhtä täsmällistä arvoa yhdyskuntajätteen palamisteknisille ominaisuuksille ei voida antaa ja ne vaihtelevat eri lähteistä riippuen. Suuntaa antavia arvoja on koottu taulukkoon 3.1.

**Taulukko 3.1.** Yhdyskuntajätteen palamistekniset ominaisuudet (mukailten Babcock & Wilcox Vølund 2012; Ekokem 2009; Horttanainen et al. 2013).

| Lähde                        | Kosteuspitoisuus [m-%] | Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa [MJ/kg] | Tuhkapitoisuus [m-%] |
|------------------------------|------------------------|--|----------------------|
| Babcock & Wilcox Vølund 2012 | 10–50                  | 8,37–10,05                                   | 10–25                |
| Horttanainen et al. 2013     | 29                     | 15   | 16 (kuiva-aineesta)  |
| Ekokem (YVA-selostus)        | 15–40                  | 7–16   | 10–35                |

Eri lähteiden mukaisen lämpöarvot eivät ole aina täysin vertailukelpoisia keskenään, sillä tutkimusten lähtötilanne voi olla erilainen, esimerkiksi jätteiden lajittelun aste. Horttanainen et al. 2013 mukaan Itä-Suomessa tehdyn tutkimuksen tuloksena syntypaikkalajitellun yhdyskuntajätteen keskimääräinen tehollinen lämpöarvo saapumistilassaan oli 15 MJ/kg. Syntypaikkalajitellusta jätteestä on lajiteltu jätteen syntypaikalla erilleen biojäte, keräyspaperi, -pahvi, ja -kartonki sekä lasi ja metalli. Syy suhteellisen korkeaan lämpöarvotulokseen löytyy muovien osuuden kasvusta ja kosteutta lisäävän biojätteen osuuden laskusta yhdyskuntajätteen seassa. Ekokemin Voimala 2:n kattilatoimittajan, Babcock & Wilcox Vølundin, mukaan yhdyskuntajätteen keskimääräinen tehollinen lämpöarvo saapumistilassaan on suhteellisen alhainen vaihdellen välillä 8,37–10,05 MJ/kg, kun taas Ekokemin teettämän YVA-selvityksen mukaan lämpöarvo vaihtelee välillä 7–16 MJ/kg. Myös eri lähteiden mukaiset yhdyskuntajätteen kosteus- ja tuhkapitoisuudet vaihtelevat huomattavasti, mikä vahvistaa yhdyskuntajätteen palamisteknisien ominaisuuksien tarkan ja suoraviivaisen määrittämisen ongelmallisuuden.

Yleiseen kokemukseen ja tutkimuksiin perustuva ympäristösäännösten mukainen vaihteluväli jätteen polttolämpötilalle on 1000–1150 °C. Riittävä lämpötila edistää polttoaineen ja savukaasujen optimaalista palamista sekä vähentää kuonan, dioksidien ja typpiyhdisteiden muodostumista. Polton ollessa tasaista voidaan arinalle syöttää pieniä määriä kuivahkoa yhdyskuntalietettä muiden jätteiden sekaan. Päinvastaisessa tapauksessa, jäteseoksen kosteuden ylittäessä 60–62 % joudutaan kehittyneissäkin arinakonstruktioida käyttämään pa-

lamista tukevia, jätettä paremman lämpöarvon omaavia tukipolttoaineita. (Babcock & Wilcox Vølund 2012 ; Raiko et al. 2002; Vesanto 2006)

Voimala 1:llä ja Voimala 2:lla käsiteltävästä jätteestä suurin osa on syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä, jonka laadun hallinta on ajoittain haastavaa jätteen energiahyödyntämisessä. Jätteen koostumukseen vaikuttaa erityisesti lajittelun tehokkuus, mutta myös muut seikat kuten vuodenajat. Yhdyskuntajätteestä tulee erotella sen syntypaikalla pois muun muassa ongelmajätteet sekä hyödynnettävissä olevat pahvit ja paperit, jolloin lajiteltu jäte sisältää pääasiassa muovi-, paperi-, pahvi- ja styroxpakkauksia sekä taloustavaraa, vaippoja, tekstiilejä ja muuta vastaavaa. Suuret väärin lajitellut jäte-erät voivat aiheuttaa laatuongelmia polttoprosessissa, joita voidaan kuitenkin pyrkiä välttämään jäte-erien silmämääräisillä tarkastuksilla. (Ekokem 2009).

Ekokemin voimaloiden jätteen syöttöä polttoprosesseihin porrastetaan perustuen kokemukseräiseen tietoon erilaisten jätteiden lämpöarvoista ja muista palamiseen vaikuttavista ominaisuuksista sekä ennalta sovittuja jätejakeiden osuuksia noudattamalla. Kaikkien jätteiden tai jäte-erien lämpöarvoja ei tutkita etukäteen, joten lämpöarvo on pääosin todennettavissa ainoastaan palamisprosessin mittausten kautta. Jätteen lämpöarvon on asetettava Voimala 1:llä välille 9–12 MJ/kg ja Voimala 2:lla välille 8–12 MJ/kg olettaen, että jätteen sekoittaminen on jatkuvaa. Etukäteen tehtävän voimaloiden jätteen vastaanoton viikko-ohjelman tavoitteena on pitää jätepinta syöttöbunkkerissa vakiona ja jätteen laatu tasaisena. Jätevoimaloiden vastaanottobunkkereissa voidaan pitää yllä noin 10±15 päivän varastoa, mutta jätteen viipymä varastossa halutaan kuitenkin pitää mahdollisimman lyhyenä. Varastoinnin avulla voimalaitoksen toiminta ei vaadi keskeytymättömiä polttoainekuljetuksia ja lisäksi varastointi edesauttaa jätteen laatuvaihtelujen tasaamista mahdollistamalla jäte-erien tasaisen sekoituksen. (Ekokem 2010; Hakulinen 2014)

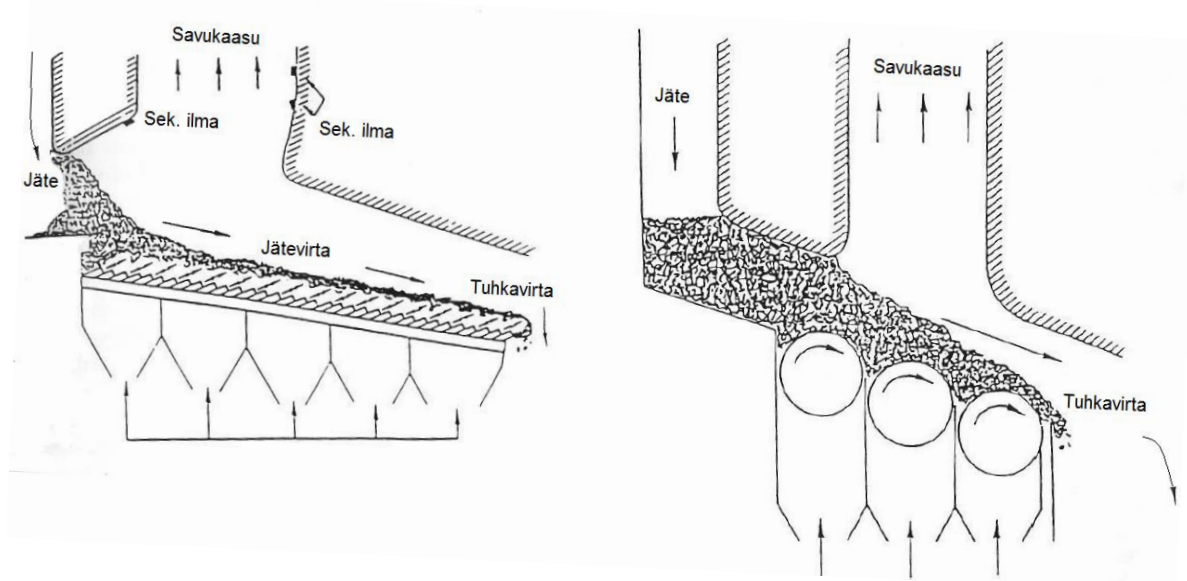
Kuten jo aikaisemmin todettiin, on Voimala 1:n jätteenkäsittelykapasiteetti noin 150 000–160 000 tonnia vuodessa ja Voimala 2:n jätteenkäsittelykapasiteetti noin 110 000 tonnia vuodessa. Viikossa voimaloille otetaan vastaan 5000–6000 tonnia jätettä. Pääsyötteenä on yhdyskuntajäte, jonka osuus polttoaineseoksesta on 50–60 %. Autohajottamojätteen eli fluffin osuus saa olla korkeintaan 10 % syötteen määrästä, kuten myös muun vaarallisen jätteen. Niiden orgaanisten halogeenien massapitoisuus kokonaiskloorina ilmaistuna on oltava alle 1 %. Kaupan ja teollisuuden jäte vastaa 20–30 %:n osuudesta. Voimala 1:llä vesipitoisten yhdyskunta- ja teollisuuslietteiden osuus saa olla korkeintaan 5 %, Voimala 2:lla korkeintaan 10%. Voimala 1:n murskan käsittelyä vaativan jätteen palakoko ylittää 50 cm ja sen osuus polttoaineseoksesta on enintään 5 %. Jätteen murskauksen johdosta mahdollisesti irtoava pöly sekä vastaanottohallin ilma ohjautuvat bunkkerin alipaineen vuoksi bunkkeriin ja sieltä polttoon. Pölymäisen jätteen, suuren energiasisällön ja 0-energiasisällön omaavan jätteen sekä ainoastaan Voimala 1:llä käsiteltävän CCA-puun eli kyllästetyn jätepuun käsittely on aina suunniteltava erikseen. CCA-puun murskauskapasiteetti on enintään 30 000 tonnia/a. (Ekokem 2010; Ekokem 2009; Hakulinen 2014)

### 3.2.2 Arinatekniikka jätteen energiahyödyntämisessä

Nykyään jätteen energiahyödyntämislaitosten arinat ovat lähes poikkeuksetta kaltevia ja jätettä sekoittavia ja poltto on ohjattavissa säätämällä ilman syöttöä arinan eri osiin. Eri kattilavalmistajat tarjoavat toisistaan poikkeavia ratkaisuja esimerkiksi tulipesän muodon osalta, mutta arinan liike ja jätteen sekoittuminen saadaan useimmiten aikaan samalla tekniikalla hydraulisesti työntyvien ja kääntyvien pintakappaleiden avulla. Edestakaisin liikuteltavissa olevien arinarautojen työntö on 100 mm luokkaa. Arinaraudat ovat tyypillisesti valurautaa, jonka lämmönkestävyyttä voidaan parantaa kromiseostuksella. Joissain arinoissa liike tuotetaan värinällä, mekaanisilla sekoittimilla tai pyörivillä rullilla. Kattilan rakenne voi olla joko vaaka- tai pystysuora. (Raiko et al. 2002; Vesanto 2006)

Arinan käyttöikä voi lisätä arinajäähdytyksellä, joka vähentää arinapalkkien termistä kulumista. Arinaa voi jäähdyttää joko vedellä, ilmalla tai molemmilla. Suuret arinat ovat pääsääntöisesti vesijäähdytteisiä ja pienet useimmiten ilmajäähdytteisiä. Perinteinen ilmajäähdytys tapahtuu primääri-ilmalla siten, että primääri-ilma johdetaan jätepatjaan arinan palkeissa olevien aukkojen kautta. Vesijäähdytyksessä arinapalkit jäähdytetään niihin upotetun jäähdytysjärjestelmän avulla, joka on integroitu lämmönvaihtimeen. Ilmajäähdytteinen arinatulipesä sallii jätteen lämpöarvon asettuvan välille 5–15 MJ/kg, kun taas nestejäähdytteisessä arinatulipesässä poltettavan jätteen lämpöarvon on oltava 10–20 MJ/kg. Nestejäähdytteinen arina mahdollistaa paremman polton säädön, koska jäähdytys ei ole sidottu primääri-ilman säätöön. Toisaalta se on teknisesti ilmajäähdytteistä vaativampi toteuttaa. Tämän vuoksi nestejäähdytteinen ratkaisu on myös kalliimpi vaihtoehto. (Raiko et al. 2002; Vesanto 2006)

Arinat voidaan luokitella niiden rakenteen mukaan kiinteisiin tasoarinoihin, kiinteisiin viistoarinoihin, mekaanisiin viistoarinoihin, ketjuarinoihin sekä erikoisarinoihin. Jätteen energiahyödyntämisessä käytettävät arinat ovat tyypillisesti myötävirtaan tai vastavirtaan syötäviä mekaanisia viistoarinoita tai valssiarinoita, joiden tehtävä on siirtää jätettä eteenpäin kohti tuhkan poistopäätä, sekoittaa jätettä sekä sekoittaa arinan läpi puhallettava palamisilma jätteen sekaan. Seuraavan sivun kuva 3.1 havainnollistaa mekaanisen myötäsyöttävän viistoarinan (kuvassa vasemmalla) ja valssiarinan (kuvassa oikealla) rakenteita.



**Kuva 3.1.** Mekaaninen viistoarina ja valssiarina. (Raiko et al. 2002).

Vasta- ja myötäsytöarinat ovat mekaanisia viistoarinoita, joissa polttoaine ei liiku pelkän painovoiman ansiosta. Tästä syystä mekaaniset viistoarinat voidaan rakentaa vähemmän kalteviksi kuin kiinteät viistoarinat, joiden normaali kaltevuuskulma vaihtelee välillä 35–38 %. (Huhtinen et al. 2004; Raiko et al. 2002)

Myötäsytöarinalla arinaraudat liikkuvat polttoainevirran suuntaisesti ja vastasyötöarinalla luonnollisesti polttoainevirtaa vastaan. Vastasyötöarinalla on erittäin hyvät sekoitusominaisuudet, mutta jätteen siirtymänopeuteen ei voida vaikuttaa, vaan se määräytyy kiinteän arinakulman perusteella. Vasta- ja myötäsytöarinoille on ominaista erinomainen primääri-ilman sekoitus. Toisaalta niissä on paljon mekaanisesti kuluvia osia, jolloin niiden käyttöikä on lyhyempi kuin valssiarinoilla. Arinaraudat ovat vaihdettavissa ja niitä joudutaan uusimaan kulumisen vuoksi muutaman vuoden välein. (Huhtinen et al. 2004; Raiko et al. 2002)

Valssiarina muodostuu sylinterinmuotoisista pyörivistä valsseista, joiden ulkokehä muodostuu rengasmaisista arinaraudoista. Valssien pyörimisnopeutta voidaan säätää jätteen palamisnopeuden mukaan. Valssien välissä on scraper-rautoja, joiden tarkoitus on siirtää jäte valssilta toiselle estäen samalla jätettä putoamasta valssien välistä. Primääri-ilma tuodaan valssiin, josta se siirtyy arinaraudoissa olevien reikien kautta jätteeseen. Ajan mittaan valssien väliset raudat kuitenkin kuluvat ja arinapuolen paine pienenee, jolloin primääri-ilma ohjautuu valssien väliin. Kun ilma ei ohjautu valssin läpi, valssien jäähdytys heikkenee ja kulumisnopeus kasvaa. Valssiarinan etuna on helppo siirtymänopeuden säädettävyys ja arinan hyvä mekaaninen kestävyys. (Huhtinen et al. 2004; Raiko et al. 2002)

### 3.2.3 Savukaasupäästöt

Jätteenpoltoille asetetut päästörajoitukset ovat hyvin tiukat verrattuna muihin energian tuotantomenetelmiin. Savukaasupäästöjä voidaan rajoittaa joko primäärisin eli polttoteknisin keinoin tai sekundäärisin eli savukaasujen puhdistukseen perustuvien keinoin. Päästöt muodostuvat epäorgaanisista yhdisteistä, orgaanisista yhdisteistä, raskasmetalleista sekä pölystä. Jätteenpoltto-direktiivi ja -asetus määrittävät savukaasujen epäpuhtauksien massapitoisuuksille tiukat raja-arvot. Lisäksi jätteenpoltoasetuksen mukaan savukaasujen lämpötilan on oltava viimeisen ilmanlisäyksen jälkeen yli 850 °C vähintään kahden sekunnin ajan. (Vesanto 2006)

Suomessa käytössä olevat päästörajoitukset eli savukaasujen eri päästökomenttien tietyn aikavälin keskiarvot enimmäismäärät ovat luettavissa seuraavan sivun taulukosta 3.2. Savukaasujen raja-arvot on standardoitava 11 vol-%:n happipitoisuuden kuivissa savukaasuissa seuraavien kaavojen avulla.

$$E_S = \frac{21-11}{21-O_M} \cdot E_M \cdot k \quad (3.7)$$

jossa  $E_S$  on standardin mukaisesti laskettu päästö-pitoisuus,  $E_M$  mitattu päästö-pitoisuus,  $O_M$  mitattu happipitoisuus ja  $k$  redusointikerroin kuivien savukaasujen laskemiseksi. Kaikilla päästö-pitoisuuksilla tarkoitetaan massaa yksikössä  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ , kun taas happipitoisuus ilmoitetaan tilavuusprosentteina. Kerroin saadaan kaavasta

$$k = \frac{100}{100-H_2O_M} \quad (3.8)$$

jossa  $H_2O_M$  kuvastaa savukaasujen vesipitoisuutta tilavuusprosentteina. Mitattu päästö-pitoisuus voidaan laskea päästökomenttikohdaisen kalibrointifunktion avulla

$$E_M = E_R \cdot \beta + \alpha \quad (3.9)$$

Päästökerroin ja -lisäys  $\beta$  ja  $\alpha$  voidaan määrittää uudelleen tapauskohtaisesti. Parametrilla  $E_R$  tarkoitetaan kunkin päästökomenttin mitattua raaka-arvoa. (Heikkilä 2014; Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta 2013)

**Taulukko 3.2.** Yhdyskuntajätettä polttavan laitoksen päästönormit Suomessa (Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta 2013).

| Päästökomponentti                     | 30 min. ka. [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 24 h ka. [mg/Nm <sup>3</sup> ]                        |
|---------------------------------------|-----------------------------------|---|
| Pöly                                  | 30                                | 10  |
| TOC                                   | 20                                | 10  |
| HCl                                   | 60                                | 10  |
| HF                                    | 4                                 | 1   |
| SO <sub>2</sub>                       | 200                               | 50  |
| NO <sub>x</sub>                       | 400                               | 200   |
| CO                                    | 100                               | 50  |
| Hg                                    | 0,05                              | 0,05 (ka. 30 min. – 8 h väliseltä ajalta)             |
| Kadmium ja tallium yhteensä (Cd + Tl) | 0,05                              | 0,05 (ka. 30 min. – 8 h väliseltä ajalta)             |
| Muut raskasmetallit*                  | 0,5                               | 0,5 (ka. 30 min. – 8 h väliseltä ajalta)              |
| Dioksiinit ja furaanit (PCDD/PCDF)    |                                   | 0,1*10 <sup>-6</sup> (ka. 6 h – 8 h väliseltä ajalta) |

\* Muut raskasmetallit tarkoittavat antimonia (Sb), arsenia (As), lyijyä (Pb), kromia (Cr), kobolttia (Co), kuparia (Cu), mangaania (Mg), nikkeliä (Ni) ja vanadiinia (V).

Lisäksi jätteenpoltoasetuksessa on määritetty päästökomponenttien mittaustuloksille tietty prosentuaalinen osuus, joka ei saa ylittyä. Tätä osuutta kutsutaan luottamusvälin arvoksi. Standardin mukaisesti lasketusta päästöpitouudesta vähennetään sen ja luottamusvälin prosentuaalisen arvon tulo, jolloin tulos on suoraan verrattavissa päästönormin raja-arvoon. Luottamusvälien osuudet on lueteltu taulukossa 3.3.

**Taulukko 3.3.** Savukaasujen päästökomponenttien prosentuaaliset luottamusvälit (Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta 2013).

|                 |      |
|-----------------|------|
| CO              | 10 % |
| SO <sub>2</sub> | 20 % |
| NO <sub>x</sub> | 20 % |
| TOC             | 30 % |
| HCl             | 40 % |
| HF              | 40 % |

Ekokemin voimalaitoksilla päästöjen massapitoisuuksia tarkkaillaan jatkuvatoimisesti savupiippujen analysaattoreiden avulla (Ekokem 2014c). FTIR-analysaattori mittaa ja päivittää minuutin välein TOC-, HCl-, HF-, SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- ja CO-päästöjen pitoisuuksia savukaasuissa kaasufaasin molekyylien värähdys- ja rotaatio-spektroskopiaan perustuen. Savukaasujen pölypitoisuutta mitataan jatkuvatoimisesti laserin hajontaan perustuvalla tekniikalla

erillisellä pölyanalysointilaitteella. Elohopeapitoisuuden määrittämiseen käytetään pääpiirteittäin samantapaista lasertekniikkaa. Dioksiinit ja furaanit kerätään adsorptiomenetelmällä näyteaineeseen, joka lähetetään muiden tarpeellisten tietojen kanssa laitetoimittajalle analysoitavaksi. Edellä mainittujen mittausten lisäksi savukaasusta kerätään säännöllisin väliajoin laboratorionäytteitä raskasmetallipitoisuuksien selvittämiseksi. (Gasmet 2007; Heikkilä 2014) Taulukkoon 3.4 on kerätty Voimaloiden 1 ja 2 keskimääräiset savukaasupäästöt vuodelta 2013 havainnollistamaan savukaasun koostumusta.

**Taulukko 3.4.** Voimaloiden 1 ja 2 keskimääräiset savukaasupäästöt vuonna 2013 (Kaila 2014).

| Päästökomponentti                       | Voimala 1 [mg/Nm <sup>3</sup> ] | Voimala 2 [mg/Nm <sup>3</sup> ] |
|---|---------------------------------|---------------------------------|
| Pöly*                                   | 2,23                            | 0,02                            |
| TOC*                                    | 0,58                            | 0,86                            |
| HCl*                                    | 3,01                            | 0,04                            |
| HF*                                     | 0,03                            | 0,11                            |
| SO <sub>2</sub> *                       | 5,2                             | 4,6                             |
| NO <sub>x</sub> *                       | 175,4                           | 164,9                           |
| CO*                                     | 3,0                             | 2,9                             |
| Hg*                                     | 0,002                           | 0,005                           |
| Kadmium ja tallium yhteensä (Cd + Tl)** | 0,002                           | 0,001                           |
| Muut raskasmetallit**                   | 0,10                            | 0,34                            |
| Dioksiinit ja furaanit (PCDD/PCDF)***   | 0,02                            | 0,001                           |

\* Käyttötunneilla painotetuista kuukausikeskiarvoista lasketut vuosikeskiarvot; jatkuvatoiminen mittaus.

\*\* Vuosimittauksissa määritetty, kahden näytteen keskiarvo.

\*\*\* Näyteenkeräysajoilla painotettu keskiarvo, vähintään 6 kpl näytteitä/a.

Yllä olevan taulukon 3.4 vuosikeskiarvolukemat osoittavat, että Ekokemin molempien Voimaloiden savukaasupäästöt alittavat reilusti taulukon 3.2 mukaiset Suomessa käytössä olevat vuorokautiset päästönormit yhdyskuntajätettä polttavalle laitokselle.

Savukaasujen HCl-, HF- ja SO<sub>2</sub>-päästöt ovat suoraan verrannollisia arinalle syötetyn jätteen kloori-, fluori- ja rikkipitoisuuksiin, eikä niihin voida juurikaan vaikuttaa tulipesässä. Tulipesään mahdollisesti syötettävät kalkkiyhdisteet tosin pystyvät sitomaan edellä mainittuja yhdisteitä pohjatuhkaan, mikä taas heikentää tuhkan laatua. NO<sub>x</sub>-, CO-, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>- ja PCDD/PCDF-päästöt määräytyvät pitkälti polton palamisen täydellisyyttä kuvaavien parametrien mukaan. Niiden päästökertymää voidaankin käyttää polttoprosessin säädön ja optimoinnin apuna. (Raiko et al. 2002)

Partikkelipäästöihin voidaan primääri-ilmamäärän lisäksi vaikuttaa tavalla, jolla ilma puhalletaan arinalohkojen läpi. Mitä suurempi kaasujen nopeus jätepatjan pinnalla on, sitä suurempi hiukkasemissio todennäköisesti syntyy. Useat raskasmetallit ovat savukaasuissa hiukkasiin sitoutuneita, joten hyvä hiukkasten erotus vähentää tehokkaasti myös näitä pääs-

töjä. Osa raskasmetalleista, kuten Hg ja Cd, höyrystyy kaasuihin. Yleisesti kaasunpuhdistuksessa on tällä hetkellä käytössä kolme eri menetelmää, joita ovat kuiva, puolikuiva ja märkä menetelmä. Jätepohjaisilla voimalaitoksilla merkittävät investointikustannukset koostuvat laajamittaisesta savukaasunpuhdistuksesta. (Raiko et al. 2002)

### 3.2.4 Jätteen palamisessa muodostuvat tuhkat

Jätteenpoltossa syntyy kuonan ja lentotuhkan lisäksi myös kattilatuhkaa sekä pieniä määriä arinan läpi valunutta osittain palanutta jätettä. Lisäksi prosessissa syntyy savukaasujen puhdistusjätettä, APC-jätettä (engl. Air Pollution Control Residue), joka luokitellaan poikkeuksetta vaaralliseksi jätteeksi ja kerätään normaalisti yhdessä lentotuhkan kanssa, jolloin seosta voidaan kutsua pelkästään APC-jätteeksi. Kuona ja palamaton materiaali, kuten metalli, poistuvat arinan loppupäästä laitoksen pohjatuhkajärjestelmään. Palamisen loppuvaiheessa kuona voi olla osittain sulanutta ja sintrautunutta korkeiden lämpötilojen vuoksi. Kuona putoaakin yleensä arinan päästä vedellä täytettyyn sammutusastiaan, josta se siirtyy edelleen jatkokäsittelyä varten. Kuona on ikäännytyksen, seulonnan ja metallien magneettierotuksen jälkeen usein soveliasta hyötykäyttöön. (Laine-Ylijoki et al. 2005; Vesanto 2006; Österbacka 2014)

Kuonan hyötykäyttö on yksinkertaisempaa kuin muiden kiinteiden jäännöstuotteiden hyötykäyttö. Jätteenpoltton kuona käytetään hyödyksi useimmiten maanrakennuksessa, joissa se korvaa hiekan, soran ja murskeen. Käsitelty kuona voidaan hyödyntää maanrakennusmateriaalina muun muassa kantavassa ja jakavassa kerroksessa tierakenteissa sekä kaatopaikkojen rakentamisessa kaasunkeräyskerroksessa. Kaasunkeräyskerroksessa kuona poistaa rikkivedyn poistamatta kaasuseoksesta häkää ja metaania. Tuhkien aiheuttamat kustannukset riippuvat tuhkien käsittelymenetelmistä, kuljetuskustannuksista, välivarastoinnista ja loppusijoituskohteesta. (Laine-Ylijoki et al. 2005; Vesanto 2006; Österbacka 2014)

Kuonaa muodostuu noin 15–25 % poltettavan jätteen painosta. Kattilatuhkaa muodostuu vain noin 0,5–1 % arinalle syötettävän polttoaineen painosta ja se on koostumukseltaan hienojakoista sen sisältämien huokoisten ja tiivistyneiden alkalisuolojen takia. Huokoisista tuhkapartikkeleista koostuvaa lentotuhkaa syntyy noin 1–2 % polttoaineen massasta ja se voidaan erottaa savukaasuista syklonien ja sähkö- ja kuitusuodattimien avulla. APC-jätettä syntyy NO<sub>x</sub>-yhdisteiden, happamien kaasujen, mikro-orgaanisten haitta-aineiden sekä elohopean poistamisen yhteydessä. APC-jäte muodostuu noin 2–3 % syötetyn jätteen painosta ja se sisältää puhdistusprosessista riippuen ylimääräisen reagenssin, kuten kalkin, aktiivihieksen, natriumkarbonaatin tai natriumhydroksidin sekä poistetut epäpuhtaudet ja reaktiotuotteet. Yhteensä lentotuhkaa ja APC-jätettä muodostuu arviolta 2–4 %. Merkittävä osa raskasmetalleista höyrystyy korkean palamislämpötilan vuoksi ja kerääntyy kattila- ja lentotuhkiin, minkä vuoksi ne käsitellään vaarallisena jätteenä. Osittain raskasmetallit osallistuvat kuitenkin myös kiintoainereaktioihin ja jäävät osaksi tuhkan kiderakennetta. Pohjatuhkan ja muiden tuhkien erilaisten koostumuksien ja ominaisuuksien vuoksi ne on käsiteltävä aina erillään toisistaan. (Laine-Ylijoki et al. 2005; Österbacka 2014)



Tuhkien ympäristövaikutukset liittyvät lähinnä niiden sisältämiin orgaanisiin aineisiin, suoloihin ja haitta-aineiden liukoisuuteen. Viimeaikaisten tutkimusten mukaan kaliumsuolat voivat olla jopa suurin syypää tuhkien ympäristövaikutuksissa. Tärkeimpiä tuhkien käsittelymenetelmiä ovat varastointi, pilottivaiheessa olevat pesu- ja uuttotekniikat, kiinteytys- ja stabilointitekniikat sekä hieman harvemmin käytössä oleva terminen loppukäsittely. Kuonasta voidaan poistaa magneettiset metallit magneettierottimella ja ei-magneettiset metallit pyörrevirtaerottimella, induktioerottimella ja röntgenerottimella sekä muut epäpuhtaudet seulonnalla. (Laine-Ylijoki et al. 2005; Österbacka 2014)

Varastoinnilla eli ikäännyttämisellä pyritään parantamaan tuhkien, lähinnä kuonien, kemiallista stabiiliutta ja pienentämään haitallisten aineiden liukoisuutta. Pesutekniikan avulla tuhkista saadaan eroteltua vesiliukoiset ainesosat, mutta tällöin ongelma siirtyy osittain pesuveteen. Kiinteytys- ja stabilointitekniikoita käytetään haitta-aineiden liukoisuuden pienentämiseksi tai hidastamiseksi. Kiinteytyksessä materiaali eristetään yhtenäiseksi kiinteäksi rakenteeksi ja stabiloinnissa taas muutetaan materiaalin kemiallisia ominaisuuksia vähemmän liikkuvaan, liukoiseen tai myrkylliseen muotoon. Myös termisellä käsittelyllä pyritään haitta-aineiden liukoisuuden pienentämiseen sekä tilavuuden pienentämiseen. Tuhka kuumennetaan korkeassa lämpötilassa, jolloin se sulaa tai sintraantuu ja muodostaa lasimaista ainetta. (Laine-Ylijoki et al. 2005)

Ekokemin Voimala 1 ja Voimala 2 tuottivat vuonna 2013 arinakuonaa yhteensä noin 50 000 tonnia (Ekokem 2014a). Kuona ikäännytetään termodynaamisen tasapainon saavuttamiseksi, jonka jälkeen kuonasta erotellaan kaikki kierrätettäväksi kelpaava jae. Kuona sisältää arviolta 10 % rautaa ja 1–2,5 % muita metalleja, kuten alumiinia ja kuparia (Ekokem 2014a). Ekokemin siirrettävä kuonankäsittelylaitos suorittaa kuonan seulonnan erikoisiksi jakeiksi, metallien magneettierotuksen, ei-magneettisten metallien pyörrevirtaerotuksen sekä induktioerotuksen. Pyörrevirtaerottimen toiminta perustuu kuljetinhihnaan, jonka sisällä pyörivä moninapainen magneetti saa aikaan hylkivän voiman ei-magneettisissa metalleissa ja poistaa näin ollen alumiinin, kuparin ja messingin kuonasta. Alumiinin voidaan kierrättää aina uudelleen ilman, että se menettää ominaisuuksiaan ja sen kierrättäminen on erittäin energiatehokasta. Lisäksi alumiini muodostaa hapettuessaan vetykaasua, joten sen erottelu kuonasta on kannattavaa siitähän syystä. Ekokemin toimesta alumiinia saadaan vuodassa talteen 700–800 tonnia ja kuparia muutama sata tonnia. Induktioerotin ottaa puolestaan karkeasta jakeesta talteen ruostumattoman teräksen sekä lyijyä ja grafiittia. Ekokem käsittelee omien voimaloidensa lisäksi useiden muiden jätöpohjaista polttoainetta polttavien voimaloiden kuonia siten, että kuonasta erotellaan pois metallit ja käsiteltyä kuonaa hyödynnetään ympäristörakentamisessa. (Österbacka 2014)

Kuonasta on tutkimusluontoisesti liuotettu pois metallisuoloja, kuten metalliklorideja, -oksiedeja, -sulfaatteja sekä -sulfideja, sienien ja bakteerien avulla kahden vuoden ajan. Tulokset ovat osoittautuneet lupaaviksi kuparin, nikkelin ja sinkin erotuksen suhteen. Tavoitteena on metallien talteenotto ja kuonan puhdistaminen raskasmetalleista. Kuonan ikään-

nyttämiskokeilla seurataan alumiinin hapettumisen lisäksi anionien ja metallien liukoisuusominaisuuksia. Vesijäähdytyksen yhteydessä menetetään kuonan metallista alumiinia ja siitä syystä Voimala 1:n jäähdytysvedeen on lisätty koetilanteissa inhibiittorina toimivia korroosionestoaineita alumiinin hapettumisen ehkäisemiseksi. (Österbacka 2014)

Kattilatuhkat sisältävät eniten rautaa, alumiinia ja piitä. Voimaloiden 1 ja 2 lentotuhkissa esiintyy alumiinia vain hapettuneessa muodossa. APC-jäte koostuu natrium-, kalium- ja kalsiumklorideista sekä vastaavista sulfaateista. Ekokem käsittelee kattila- ja lentotuhkan sekä APC-jätteen tällä hetkellä stabilointitekniikalla, mutta APC-jätteen käsittelyyn on suunnitteilla uutta pesutekniikkaa edustava käsittelylaitos. Stabiloinnissa tuhkat ja seosaineet ohjataan siiloon, joka sisältää vedensyöttöjärjestelmän. Siilon sisällä on lapasekoitin, joka sekoittaa ainesosat keskenään. Tuhka tulee siilosta ulos kosteana, stabiloituu 1–2 viikon mittaisen ajanjakson aikana ja viedään lopuksi vaarallisen jätteen kaatopaikalle. (Österbacka 2014)

Tuhkat aiheuttavat kuonaantumisoongelmia arinakattilassa mikäli lämpötila nousee yli tuhkan sulamislämpötilan. Savukaasun virtaus ohjataan lämpöpinnoille pääasiassa pituussuunnassa lämpötilan ollessa yli 650 °C. Käytäntö vähentää huomattavasti tuhkapartikkeleiden aiheuttamaa putkimateriaalin eroosiota ja pidentää näin ollen putkea suojaavan oksidikerroksen vaikutusaikaa sekä ehkäisee likaavien kerrostumien muodostumista. Sulamisriski on todennäköinen, kun savukaasujen lämpötila on suurempi kuin 1100–1200 °C (Babcock & Wilcox Vølund 2012). Tällöin tuhka on vaarassa sulaa arinan ja tulipesän seinämille sekä lämmönvaihtimien pinnoille. Konvektiivisten lämpöpintojen lämpötila on pidettävä alle 750 °C kuonaantumisen ehkäisemiseksi. (Tugov et al. 2002)

Sintraantuneet kerrostumat lämpöpinnoilla heikentävät lämmön siirtymistä ja aiheuttavat virtausvastuksia savukaasuille. Lisäksi kerrostumien poisto lämpöpinnoilta on työlästä. Ongelmia voidaan vähentää välttämällä polttoaineyhdistelmiä, jotka muodostavat matalassa lämpötilassa sulavia tuhkia tai valitsemalla runsaasti sulamattomia tuhkakomponentteja sisältävä polttoaine. Kattilan lämpöpintoja myös nuohotaan säännöllisesti likaisuuden vähentämiseksi. Savukaasujen nopeutta rajoitetaan siten, ettei se saavuta yli 5 m/s lämmönsiirtopintojen ympäristössä. Muulloin nopeuden kasvaessa savukaasujen sisältämällä tuhkillla on mekaanisesti kuluttava vaikutus kattilan pintoihin. (Raiko et al. 2002; Tugov et al. 2002)

### **3.2.5 Höyryn arvot ja korroosio**

Rakennusaste eli sähköntuotannon osuus suhteessa lämmöntuotantoon on jätteen energiahyödyntämislaitoksessa usein matala. Tämä parantaa laitoksen kannattavuutta kaukolämmön tuotannon kustannustehokkuuden vuoksi. Jätteen energiahyödyntämislaitoksissa tyypilliset höyryn arvot vaihtelevat välillä 300–450 °C ja 29–58 bar. Arvot ovat suhteellisen matalia konventionaalisiin voimalaitoksiin verrattuna, joissa arvot ovat normaalisti ylimmillään 550–580 °C ja 225–300 bar. Matalat höyryn arvot johtuvat korkealämpötilakor-

roosiosta, jossa tuhkerrostumien sisältämät kloori (Cl), rikki (S) ja bromi (Br), alkalimetallit kalium (K) ja natrium (Na) sekä raskasmetallit sinkki (Zn) ja lyijy (Pb) aiheuttavat korroosiota kuumilla pinnoilla, etenkin tulistinpinnoilla. Jätteen kloori- ja kevytmetallipitoisuudet ovat suhteellisen korkeat muihin polttoainesiin verrattuna. (Bankiewicz 2012; Lee et al. 2007; Raiko et al. 2002)

Korkealämpötilakorroosiota on ajateltu syntyvän pääasiassa kahdella mekanismilla. Aktiivinen hapettuminen kuvaa jatkuvaa mekanismia, jossa savukaasujen HCl tai kloori (Cl<sub>2</sub>), joka voi olla peräisin myös alkaliklorideista tai HCl:n hapettumisesta, tunkeutuu kattilaputkia suojaavan oksidikerroksen läpi muodostaen kiinteää metallikloridia teräsputken raudan (Fe), kromin (Cr) tai nikkelin (Ni) kanssa. Seuraavassa vaiheessa metallikloridi kaasuuntuu ja kulkeutuu pois putken pinnalta haurastuttaen sitä. Osa metallikloridista reagoi savukaasujen hapen kanssa muodostaen metallioksidia ja kloori vapautuu jälleen alkuperäiseen muotoonsa. Seuraava reaktiosarja (R1)-(R3) havainnollistaa yhdellä vaihtoehdoisella reaktiopolulla edellä kuvattua korroosion toteutumistapaa. Merkinnällä Me tarkoitetaan joko rautaa, kromia tai nikkeliä.



Näin huomataan, että pienikin määrä klooria voi aiheuttaa suuren korroosionopeuden. (Bankiewicz 2012; Lee et al. 2007; Raiko et al. 2002)

Toinen mekanismi on sulfidoituminen sulan tuhkan vaikutuksesta. Siinä kaasufaasin alkalikloridit tiivistyvät suliksi tai kiinteiksi kerrostumiksi putkien pinnoille ja reagoivat kaasumaisen rikin kanssa muodostaen putken oksidikerrosta hajottavia alkaalisulfaatteja esimerkkireaktion (R4) tavoin. Samassa reaktiossa vapautuu lisää korrosoivaa klooria.



Yleensä höyrystinputkia pidetään alle 300 °C:n ja tulistinputkia alle 450 °C:n lämpötilassa. Myös alemmissa lämpötiloissa voi tapahtua korroosiota erityisesti ali-ilmaisissa olosuhteissa, joissa CO heikentää putkia tyypillisesti suojaavaa metallioksidikerrosta. (Bankiewicz 2012; Lee et al. 2007; Raiko et al. 2002)

Edellä mainittujen mekanismien lisäksi myös sinkkiä ja lyijyä sisältävien kerrostumien on huomattu aiheuttavan korkealämpötilakorroosiota. Sinkki ja lyijy voivat reagoida kloorin ja rikin kanssa ja muodostaa klorideja sekä sulfaatteja savukaasuihin. Syntyvät raskasmetalliyhdisteet muodostavat matalissa lämpötiloissa sulavia suolaseoksia, minkä vuoksi ne ovat korroosion kannalta merkittäviä uhkatekijöitä. Lisäksi bromin on havaittu aiheuttavan aktiivista hapettumista korkeissa lämpötiloissa vastaavalla tavalla kuin aiemmin on kuivailtu

kloorin aiheuttavan. Tuloksena syntyy voimakkaasti haihtuvaa ja metallipintaa haurastuttavaa metallibromidia. (Bankiewicz 2012)

Savukaasujen korkea lämpötila vaikuttaa sekä kattilan pinnoille kertyvien kerrostumien määrään että koostumukseen ja siten kiihdyttää korkealämpötilakorroosiota. Lämmönvaihtimien metallipintojen ja savukaasujen välinen lämpötilaero edesauttaa haihtuvien aineiden, kuten alkalikloridien, kondensoitumista putkien pinnoille. Lisäksi lämpötilaerot voivat aiheuttaa lämpöjännitystä ja sitä kautta putkea suojaavan oksidikerroksen heikkenemistä. Jätteen lämpöarvon suuri vaihtelevuus aiheuttaa voimakasta vaihtelua myös palotilan savukaasujen lämpötiloissa ja kokeellisten tutkimuksien mukaan korroosio lisääntyy ilmiön myötä. Myös pinnoille sulaneiden kerrostumien ominaisuudet vaikuttavat korroosioon, esimerkiksi kerrosten paksuuden kasvaessa korroosion on havaittu kiihtyvän. Kerrostumien ominaisuuksiin vaikuttavat syötettävän jätteen koostumus sekä kaasun ja pintamateriaalin välinen lämpötilaero. (Lee et al. 2007)

Polttoaineen rikistä suurin osa palaa rikkidioksidiksi, mutta osa jatkaa hapettumista rikki-trioksidiksi. Savukaasujen rikkitrioksidin vaikutuksesta vesihöyry tiivistyy paljon vesikastepistettä korkeammassa lämpötilassa muodostaen yhdessä rikkihappoa ( $H_2SO_4$ ) reaktion (R5) mukaisesti sekä hapettavia kalvoja.



Mitä enemmän savukaasut sisältävät rikkitrioksidia tai vesihöyryä, sitä korkeammaksi happopisaroiden tiivistymislämpötilaa kuvaava happokastepiste kasvaa. Happojen aiheuttamaa matalalämpötilakorroosiota esiintyy kattilan loppupäässä ja otollisimpia ovat sellaiset pinnat, joiden lämpötila laskee alle 200 °C. Rikkihappohöyry muodostuu kyseisessä lämpötilassa, mutta korroosio alkaa vasta ensimmäisten happopisaroiden tiivistyessä lämpöpinnoille happokastepistelämpötilan alittuessa. Rikkitrioksidin määrä riippuu polttoaineen rikkipitoisuuden lisäksi ylimäärähapesta, savukaasujen viipymäajasta tulipesässä, tulipesän ja seinämien lämpötilasta ja katalyyttien, kuten vanadiini(V)oksidin ( $V_2O_5$ ) ja ferrioksidin ( $Fe_2O_3$ ), määrästä. (Huhtinen et al. 2004)

Arinakattilan rakenteen ja lämmöntalteenotto-prosessin suunnittelussa täytyy ottaa huomioon likaavimmat ja eniten korroosiota aiheuttavat jätteet laitoksen toimivuuden varmistamiseksi. Korroosion hallintakeinot voidaan jakaa primäärisiin ja sekundäärisiin toimenpiteisiin. Primäärisillä toimenpiteillä pyritään estämään korroosiota muuttamalla kattilan prosessiolosuhteita, kun taas sekundääriset menetelmät tähtäävät putkien eliniän kasvattamiseen erilaisilla putkipinnoituksilla tai syöttämällä lisämateriaalia tulipesän savukaasuihin. (Lee et al. 2007)

Kattilan korroosiota ja likaantumista voidaan merkittäväällä tavalla kontrolloida säätämällä tulipesän rikki-kloorisuhdetta mittauksien avulla. Tulistinalueella olevan savukaasun rikin

ja kloorin määrien suhteen ollessa  $S/Cl > 4$ , on likaantumisen ja korroosion huomattu vähenevän olennaisesti. Ilmiö perustuu alkalikloridien ja sulfaattien keskinäisiin reaktioihin, jolloin alkalikloridien muodostuminen vähenee ja kloori päätyy savukaasuun HCl:n muodossa. Klooripitoisten polttoaineiden kanssa pyritäänkin polttamaan rikkiä sisältäviä polttoaineita tai vaihtoehtoisesti lisätään polttoon alkuaainerikkiä. Myös ammoniumsulfaatin injektointia on kokeiltu Vattenfallin kehittämän ChlorOut -menetelmän muodossa. (Hiltunen et al. 2007)

Korkealämpötilakorroosiota vastaan on kehitetty tehokkaampia putkien nuohousmenetelmiä, kestävämpiä seospäällysteitä ja esikäsitellyille putkien pinnoille termisesti ruiskutettavia sulatettuja kiintosuojaa-aineita. Muita keinoja ovat muun muassa savukaasujen kierrätys takaisin tulipesään, kemikaalien, kuten kalsiumhydroksidin  $Ca(OH)_2$  tai magnesiumhydroksidin  $Mg(OH)_2$ , syöttö tulipesään, kattilan horisontaalinen mitoitus ja tyhjien vetojen integrointi sekä sekundääri-ilman syöttö lukuisia suuttimia sisältävästä putkimaisesta prismarakenteesta polttokammion keskeltä. Matalalämpötilakorroosiota voidaan torjua savukaasujen riittävän korkealla lämpötilalla, ilmamäärää vähentämällä, lisäämällä savukaasuihin ammoniakkia sekä neutraloimalla happamat rikkiyhdisteet magnesiumyhdisteiden avulla. Korroosion hallinta on monimutkaista ja omalta osaltaan sitä vaikeuttaa useiden korroosiota aiheuttavien reaktioiden päällekkäiset vaikutukset. (Lee et al. 2007; Huhtinen et al. 2004; Vesanto 2006)

## 4 HÖYRYKATTILAN HYÖTYSUHDE JA HÄVIÖT

Polttoaineen energiasisällön mahdollisimman korkea hyödyntämisaste on tärkeä tekijä laitoksen toiminnan tehokkuutta ja kannattavuutta arvioitaessa. Kattilan tehokkuutta kuvaava kattilan hyötysuhde voidaan määrittää joko suoralla tai epäsuoralla menetelmällä. Suorassa menetelmässä hyötysuhde saadaan laskemalla suoraan kattilasta saadun hyötylämpövirran ja kattilaan viedyn energiavirran suhde. Epäsuora menetelmä perustuu kattilassa hyödyksi saadun tehon sekä kattilan häviöiden määrittämiseen ja hyötysuhteen määrittämiseen niiden kautta.

Vesiputkikattiloiden hyötysuhde voidaan määrittää käyttämällä SFS-EN 12952-15 –standardia, joka on luotu Euroopassa yleisesti käytetyn saksalaisen DIN 1942 –standardin pohjalta. Standardit asettavat vaatimuksia mittausten aikaisille olosuhteille ja määrittävät käytettävät menetelmät sekä mitattavat parametrit. Kattilan taserajan ylittäviä energianvirtoja tulee analysoida riittävän tarkasti hyötysuhdelaskentaa varten. Käytännössä tämä tarkoittaa kattilalle tulevien polttoaine-, vesi- tai höyry- ja ilmavirtausten, sekä kattilalta lähtevien vesi-, höyry- ja savukaasuvirtausten tarkkaa määrittämistä. (European Standard 2003; Huhtinen 2004)

### 4.1 Suora menetelmä

Suora menetelmä on yksinkertaisempi keino laskea kattilan hyötysuhde kuin epäsuora menetelmä. Suorassa menetelmässä mitattavia suureita on vähän ja sitä voidaan käyttää tapauksissa, joissa polttoainevirrat ja polttoaineiden lämpöarvot pystytään määrittämään riittävän tarkasti. Laskentatapa soveltuu hyvin öljyä ja tasalaatuisia kiinteitä polttoaineita polttaville prosesseille. Kattilan hyötysuhde voidaan ilmaista lyhyesti kaavalla

$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_{hyöty}}{\dot{Q}_{tuotu}} \quad (4.1)$$

missä  $\dot{Q}_{hyöty}$  = kattilasta hyödyksi saatava lämpövirta

$\dot{Q}_{tuotu}$  = kattilaan tuotu energiavirta

Lämpövirta kerätään kattilassa talteen lämmönsiirtopinnoilla, joita höyrykattilassa ovat syöttöveden esilämmitin, keittoputket ja höyryntulistimet. Hyötytehoksi lasketaan savukaasuista kattilassa kiertävään höyryyn siirtynyt lämpöteho kaavan 4.2 avulla.

$$\dot{Q}_{hyöty} = \dot{m}_H \cdot (h_H - h_{SV}) \quad (4.2)$$

Kattilaan tuodulle lämpöteholle voidaan esittää yhtälö 4.3.

$$\dot{Q}_{tuotu} = \dot{m}_{PA} \cdot h_{PA} + \dot{m}_{PI} \cdot c_{p,PI} \cdot (T_{PI} - T_{ref}) + \dot{Q}_{muu} \quad (4.3)$$

Kattilaan tuotava energia voidaan jakaa polttoaineeseen ja palamisilmaan sitoutuneeseen energiaan sekä polttoainevirrasta riippumattomaan osaan. Riippumattomia eli muita kattilaan tuotavia energiavirtoja ovat höyryluvon lämmitykseen tarvittavat lämpövirrat, tulistuksen säätöön käytetty ruiskutusvesi sekä pumppujen ja puhaltimien sähkömoottoreiden käyttötehot. (European Standard 2003)

Jätteenpoltossa arinakattilan hyötysuhteen laskentaan suora menetelmä soveltuu huonosti normaalissa käyttötilanteessa, sillä polttoaineen laatu vaihtelee suuresti. Kun polttoainevirtoja on vaikea mitata tai häviöt halutaan määrittää tarkasti, käytetään hyötysuhteen laskennassa epäsuoraa menetelmää, joka antaa hyötysuhteelle noin 0,2–1,2 % pienemmän tulokset kuin suora menetelmä. (Huhtinen 2004; Lyytikäinen et al. 1991)

## 4.2 Epäsuora menetelmä

Laskettaessa kattilahyötysuhdetta epäsuoralla menetelmällä saadaan selville eri häviöiden suuruudet ja kattilan taserajan sisäpuolelle tuotu energia mitataan epäsuorasti. Kattilassa hyödyksi saatavaan energiavirtaan lisätään häviöt, jolloin saadaan kattilaan tuotu energiavirta. Hyötysuhde lasketaan tällöin kaavan 4.4 mukaisesti

$$\eta_K = 1 - \frac{\dot{Q}_{häviö}}{\dot{Q}_{tuotu}} = 1 - \Sigma q \quad (4.4)$$

Kaavassa  $\dot{Q}_{häviö}$  viittaa kattilan lämpöhäviöihin ja  $q$  yksittäisiin prosentuaalisiin häviöihin, jotka yhdessä muodostavat kattilan kokonaishäviön osuuden. (Huhtinen 2004; Lyytikäinen et al. 1991)

Edellinen kaava voidaan muotoilla myös seuraavalla tavalla

$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_{hyöty}}{\dot{Q}_{hyöty} + \dot{Q}_{häviö}} \quad (4.5)$$

Kattilan häviöt muodostuvat palamattoman kiintoaineen ja palamattomien kaasujen häviöistä, tuhkan ja savukaasujen termisistä lämpöhäviöistä, sekä säteily- ja johtumishäviöistä. Häviöihin lasketaan myös ulospuhallus- ja omakäyttöhäviöt sekä muut mahdolliset häviöt. (Huhtinen 2004; Lyytikäinen et al. 1991)

#### 4.2.1 Savukaasuhäviöt

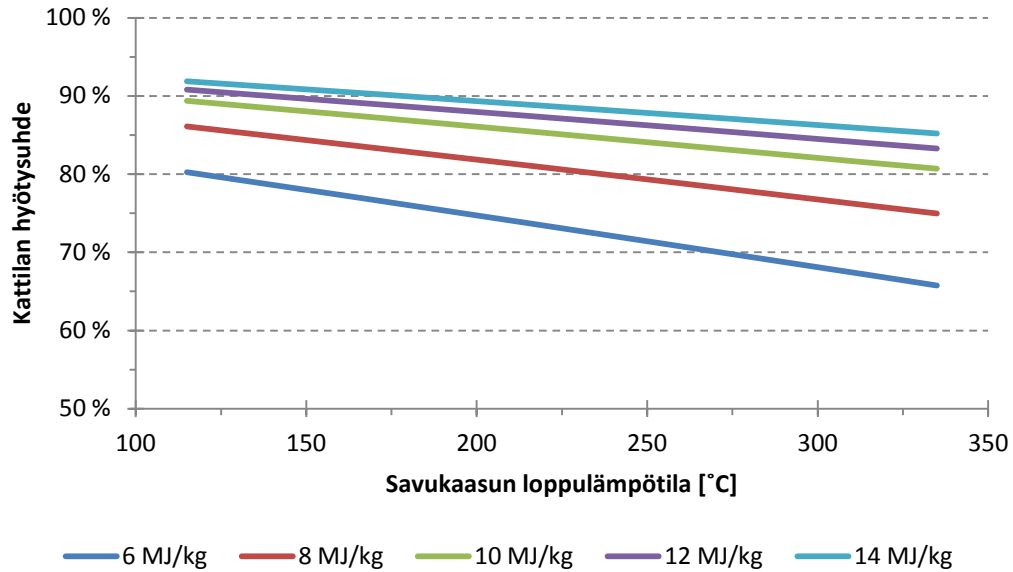
Savukaasuhäviöt edustavat suurinta osaa kattilan häviöistä, yhteensä noin 70–80 % kokonaisuudesta. Niitä syntyy, kun savukaasuihin palamisessa sitoutuneesta lämmöstä ei saada siirrettyä kaikkea energiaa kattilan vesi-höyry -piiriin. Savukaasuhäviöiden suuruus riippuu savukaasujen loppulämpötilasta ja tilavuusvirrasta sekä polttoaineen kosteuspitoisuudesta. Savukaasuhäviöitä saadaan minimoitua poistamalla savukaasut kattilasta mahdollisimman kylminä, mutta rajoittavana tekijänä loppulämpötilan laskemiselle toimii usein kuitenkin rikkiä sisältävien polttoaineiden savukaasujen happokastepiste. Savukaasuhäviöiden muodostumiseen vaikuttavat tekijät tulee mitata mahdollisimman tarkasti, sillä niillä on suhteellisen suuri merkitys kattilan hyötysuhdelaskennassa. (Huhtinen 2004; Lyytikäinen et al. 1991)

Savukaasujen lämpötila taserajalta poistuessaan vaihtelee tyypillisesti välillä 150–250 °C, jolloin niihin sitoutuneen energian määrä vaihtelee välillä 10–30 % (Saidur et al. 2010). Jätteenpolton vaatimusten mukaisesti savukaasujen loppulämpötilan on oltava matalalämpötilakorroosion vuoksi korkea, 190 °C tai enemmän (Tugov et al. 2002). Savukaasujen loppulämpötilaan vaikuttavia tekijöitä ovat

- palamisilman lämpötila
- kattilan likaisuus
- luvon vuoto
- syöttöveden lämpötila
- tehotaso

Loppulämpötila riippuu myös savukaasumäärästä, jotka molemmat kasvavat yliilmamäärän kasvaessa. Vertailupohjaa savukaasujen loppulämpötilan merkitykselle antaa arvio, jonka mukaan lämpötilan nousu 120 °C:sta 130 °C:een heikentää yleisesti ottaen koko höyryvoimalaitoksen hyötysuhdetta 0,5–1,0 %. Kattilan hyötysuhteen nostaminen yhden prosenttiyksikön verran vaatii savukaasujen loppulämpötilan alentamisen noin 15 °C:lla. (Lyytikäinen et al. 1991) Savukaasun loppulämpötilan ja polttoaineen lämpöarvon merkitys kattilan hyötysuhteen muodostumisessa on esitetty seuraavan sivun kuvassa 4.1. Kuvasta voidaan havaita kattilan hyötysuhteen laskevan selvästi savukaasun loppulämpötilan kasvun ja polttoaineen lämpöarvon laskun myötä. Kuvan kattilan hyötysuhteen laskennassa on otettu huomioon kaikki häviöt, joista savukaasuhäviö on kuitenkin kaikkein merkityksellisin. Savukaasujen loppulämpötilan jäätyessä kohti ympäristön lämpötilaa, pienee savukaasuhäviö lähelle nollaa.





**Kuva 4.1.** Savukaasun loppulämpötilan ja polttoaineen lämpöarvon vaikutus kattila-hyötysuhteeseen. (Vilenius, 2014)

Poltettavan jätteen kosteuspitoisuus on usein huomattavan korkea, minkä seurauksena savukaasujen vesipitoisuus ja massavirta kasvavat. Massavirran kasvuun ja sen myötä savukaasuhäviön suurenemiseen vaikuttavat myös ilmaylimäärän osuuden kasvu ja luvon vuotaminen. Toisaalta ilmaylimäärän kasvu vaikuttaa savukaasuihin muuttaen niitä laihemmaksi, jolloin savukaasujen ominaislämpö pienenee ja savukaasuhäviön osuus laskee. Ilmaylimäärän savukaasuhäviötä pienentävät vaikutukset ovat kuitenkin heikkoja, kun taas savukaasuhäviötä suurentavat vaikutukset ovat paljon huomattavampia. Veden määrän merkitys savukaasuissa on suuri, sillä vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti on suuri muihin osakaasuihin verrattuna. Koska veden ja kaasujen sisältämä lämpöenergia on riippuvainen lämpötilasta, on energiatasetta määrittäessä tärkeää asettaa peruslämpötila, jonka mukaan sisään meneviä ja ulos tulevia lämpömääriä lasketaan (Lyytikäinen et al. 1991).

Savukaasun entalpiian polynomisovitteella 4.6 voidaan laskea yksitellen savukaasun eri komponenttien entalpiat tietyssä lämpötilassa.

$$h_T = \sum_{k=1}^{12} H_k T_R^{k-5} + H_{13} \log_e T_R \quad (4.6)$$

Sovitteen kertoimet  $H_k$  ja  $H_{13}$  ovat taulukkoarvoja, joiden yksiköt ovat [kJ/kg]. Referenssitilana sovitteessa on käytetty standardipistettä  $T_{ref} = 25$  °C ja  $p_{ref} = 1$  bar. Merkintä  $T_R$  tarkoittaa dimensiotonta lämpötilaa

$$T_R = \frac{T}{1000 [K]}, \quad (4.7)$$

jossa  $T$  merkitsee lämpötilaa Kelvin-asteina. Savukaasun entalpiian polynomisovite on voimassa lämpötila-alueella  $200 [K] \leq T \leq 2500 [K]$ . (Raiko 2011)

Savukaasuhäviö voidaan laskea tätä työtä varten kehitetyllä kattilalahyötysuhteen laskentaohjelmalla seuraavalla tavalla

$$\dot{Q}_{SK} = \dot{V}_{SK} \cdot (\sum h_{T,k} \cdot \rho_{SK,k} \cdot x_{SK,k}), \quad (4.8)$$

jossa  $h_{T,k}$  on savukaasun entalpien polynomisovituksen avulla laskettu kunkin savukaasukomponentin entalpia savukaasun lämpötilassa,  $\rho_{SK,k}$  vastaavan komponentin tiheys ja  $x_{SK,k}$  vastaava tilavuusosuus. Toisin sanoen savukaasun komponenttien entalpiat saadaan muunnettua yksikköön  $\text{kJ/m}^3$  komponenttien tiheyksien avulla. Todelliset entalpiat savukaasussa saadaan laskettua komponenttien tilavuusosuuksien avulla, jonka jälkeen savukaasun kokonaisentalpia saadaan selville komponenttien entalpioiden summana. Käytännössä savukaasuhäviön osuus asettuu välille 5–10 % polttoainetehosta. (Lyytikäinen et al. 1991).

Savukaasun tilavuusvirran määrittämiseen ei voida käyttää jätteen elementaarianalyysiin perustuvaa savukaasuanalyysiä, sillä jätteen koostumus on hyvin epästabiili. Tästä syystä on mielekäästä käyttää Voimala 2:lla käytössä olevan Metso DNA-prosessinohjausjärjestelmän omaa savukaasun virtauslaskentaa kattilalahyötysuhteen laskentaohjelmassa.

#### 4.2.2 Palamattoman polttoaineen häviöt

Kaikki tulipesään syötetystä polttoaineesta ei pala täydellisesti ja palamaton polttoaine poistuu kattilasta joko kiinteässä muodossa kuonan ja tuhkan mukana tai savukaasujen mukana palamattomina kaasuina. Osatekijöitä polttoaineen palamatta jäämiseen ovat

- polttoaineen suuri palakoko
- riittämätön palamisilmamäärä
- normaalia kosteampi polttoaine
- huono polttolaittekonstruktio
- kattilan käyttö yli- tai minimikuormilla

Epätäydellisen palamisen seurauksena häviöiden lisäksi kattila likaantuu nopeasti aiheuttaen lämmönsiirron heikkenemistä ja savukaasujen mukana leviää ympäristölle haitallisia kaasuja. (Lyytikäinen et al. 1991)

#### Palamattomien kiintoaineiden häviöt

Jätteen palamisen astetta voidaan arvioida tuhkiin jäävän hiilen ja orgaanisten aineiden määrien perusteella, joita ilmennetään TOC- ja LOI-arvoilla (Vesanto 2006). Palamatta jääneen kiintoaineen massaosuus kuonassa saadaan määrittämällä sen LOI-arvo eli hehkutushäviö, joka saadaan mittaamalla laboratoriossa poltettavan tuhkan hiiltojäännös. (Huhti-

nen et al. 2004) Kuonan hehkutushäviön voidaan arvioida olevan keskimäärin 2 m-%. Ekokemin laboratorioissa tutkitaan kuitenkin säännöllisin väliajoin kuonan hehkutushäviötä ja tulosten perusteella laskettua keskiarvoa voidaan käyttää laskennoissa häviöiden määrittämisessä. Savukaasujen tuhkien palamatonta osuutta ilmennetään TOC-arvolla, joka tarkoittaa orgaanisen hiilen kokonaismäärä tuhkassa. Palamattoman kiintoaineen osuuden voidaan arvioida olevan 4 m-% tuhkista. Ekokemin voimaloiden savukaasujen tuhkista on myös tutkittu palamattoman kiintoaineen osuutta, samoin kuin kuonasta. (Babcock & Wilcox Vølund 2013).

Kuonan ja savukaasujen tuhkan mukana menetettävä energia saadaan seuraavasti

$$\dot{Q}_{p,KU} = x_{p(KU)} \cdot \dot{m}_{KU} \cdot q_{i,C} \quad (4.9)$$

$$\dot{Q}_{p,LT} = x_{p(LT)} \cdot \dot{m}_{LT} \cdot q_{i,C} \quad (4.10)$$

Kaavassa 4.9 merkinnällä  $x_{p(KU)}$  tarkoitetaan siis kuonan hehkutushäviötä ja kaavassa 4.10 merkinnällä  $x_{p(LT)}$  palamattoman kiintoaineen massaosuutta lentotuhkassa. Kuonan massavirta saadaan laskettua polttoaineen massavirrasta, kun tiedetään jätteen pohjatuhkan prosentuaalinen massaosuus, jolle voidaan tässä tapauksessa käyttää arvoa 13 m-%. Tuhkan massapitoisuus savukaasuissa on keskimäärin 0,002 kg/Nm<sup>3</sup>, jonka avulla savukaasujen tilavuusvirrasta saadaan selville tuhkan massavirta. Palamattoman polttoaineen lämpöarvona voidaan käyttää kivihiilen polton kaksin lämpöarvoa, joka on 33 MJ/kg. (Babcock & Wilcox Vølund 2013; Huhtinen et al. 2004)

### **Palamattomien kaasujen häviöt**

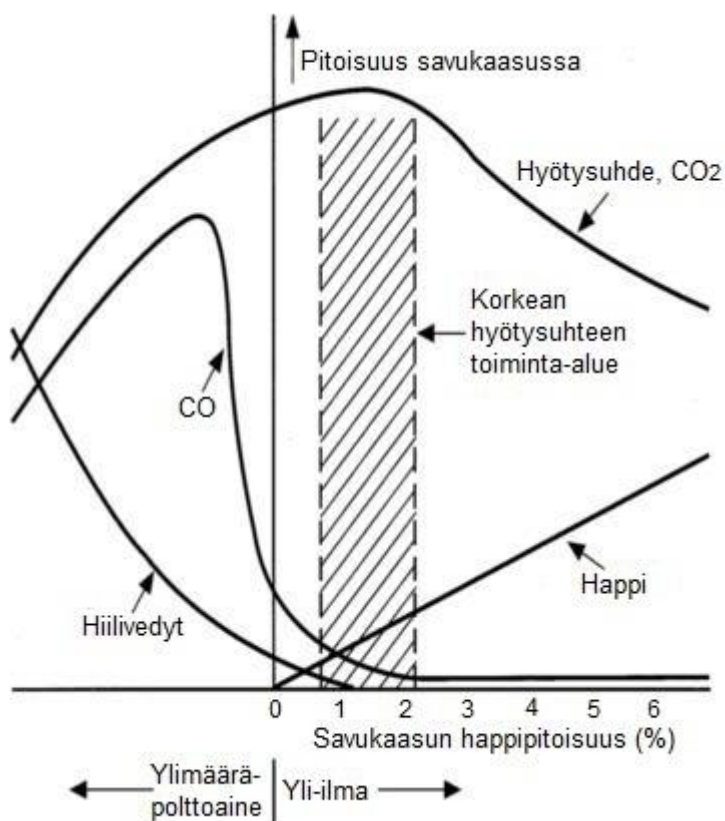
Savukaasujen palamattomat kaasut koostuvat hiilimonoksidista (CO), vedystä (H<sub>2</sub>) ja hiilivedyistä, kuten metaanista (CH<sub>4</sub>), joista huomattavimman häviön aiheuttaa CO eli häkä. Hiilimonoksidi palaa palavista kaasuista hitaimmin, minkä vuoksi sitä on savukaasuissa yleensä eniten, sillä muut palavat kaasut ehtivät hävitä polton aikana. Käytännössä vain hiilimonoksidin aiheuttama häviö huomioidaan, vaikka sekin aiheuttaa vain pienen osahäviön. (Lyytikäinen et al. 1991) Hiilimonoksidia esiintyy merkittävästi vain käynnistys-, alasajo- ja häiriötilanteissa, joissa palamislämpötila ei ole tarpeeksi korkea tai ilmakerroin on liian pieni. Savukaasuissa esiintyy hiilimonoksidia kuitenkin myös yli-ilmaa käytettäessä, sillä palamisilman happea ja polttoaineen hiiltä ei pystytä sekoittamaan täydellisesti.

Mikäli savukaasujen CO-pitoisuus on 0,5 vol-%, vastaa se 2–4 % heikennystä kattilahiötysuhteessa (Lyytikäinen et al. 1991). Palamattoman hiilimonoksidin mukana menetettävä lämpöteho voidaan laskea kaavalla 4.11.

$$\dot{Q}_{CO} = (y_{CO} \cdot 10^6 - 6) \cdot q_{i,CO} \cdot \dot{V}_{SK,kuiva} \quad (4.11)$$

Edellisessä yhtälössä  $y_{CO}$  on palamattoman CO:n massapitoisuus kuivissa savukaasuissa yksikössä  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  ja  $\dot{V}_{SK}$  kuiva savukaasuvirta. Hiilimonoksidin lämpöarvo on  $10,7 \text{ MJ}/\text{kg}$ . (Huhtinen et al. 2004)

Poltossa pyritään siihen, että savukaasujen hapen osuus olisi mahdollisimman pieni, eikä palamattomia kaasuja olisi lainkaan. Polttoaineen palamista voidaan optimoida tarkkailemalla savukaasujen CO-pitoisuutta, jonka määrää mitataan jatkuvatoimisesti. CO-pitoisuuden muutoksiin voidaan puuttua säätämällä palamisilman syöttöä. Kattilan suotuisinta toimintapistettä savukaasun happipitoisuuden funktiona voidaan havainnollistaa kuvan 4.1. esittämällä tavalla.



**Kuva 4.1.** Palamisen hyötysuhteen optimointi (Forbes Marshall 2014).

Kuvasta nähdään, että hiilidioksidin määrään verrannollinen palamisen hyötysuhde laskee polttoaine-ilmasuhteen kasvaessa. Samalla hiilivety- ja CO-päästöt kasvavat. Toisessa ääripäässä yli-ilmamäärää kasvatettaessa liikaa laskee hyötysuhde jälleen. Täydellisessä palamisessa savukaasun hiilidioksidin osuuden tulisi olla mahdollisimman suuri ja happipitoisuuden lähellä nollaa. Käytännössä tämä ei ole kuitenkaan mahdollista polttoaineen ja ilman epätäydellisen sekoittumisen johdosta, jolloin palamisprosessiin täytyy tuoda ylimäärä happea. CO-pitoisuudelle ja polton ilmakertoimelle etsitään optimisuhte, jolloin CO-pitoisuus ja savukaasuhäviö ovat mahdollisimman pieniä. (Forbes Marshall 2014)

### 4.2.3 Säteilähäviöt

Säteilähäviöillä tarkoitetaan kattilan seinämien kautta säteilemällä, johtumalla ja konvektiolla menetettävää lämpötehoa. Hyvin eristetyn kattilan seinämän lämpötila on alle 55 °C ja lämpöhäviöt 200–300 W/m<sup>2</sup>K. Suurempien kattiloiden lämpöhäviöt ovat kokoon suhteutettuna vähäisemmät kuin pienemmillä kattiloilla, sillä kattilan ulkoseinän pinta-ala ei kasva samassa suhteessa kattilan tehon kanssa. Kattilanosien lämpötilat pysyvät eri kuormitusasteilla kutakuinkin vakiona, eikä kuormitus vaikuta juurikaan tästä syystä säteilähäviön absoluuttiseen arvoon. Toisin sanoen kattilan säteilähäviöiden suhteellinen osuus kasvaa osakuormilla ajettaessa. (Huhtinen et al. 2004; Lyytikäinen et al. 1991)

Säteilähäviö voidaan laskea lausekkeella

$$\dot{Q}_r = C \cdot \dot{Q}_K^{0,7} , \quad (4.12)$$

jossa  $C$  viittaa polttoaineesta riippuvaan kertoimeen ja  $\dot{Q}_K$  kattilatehoon. Tässä työssä lausekkeen kertoimelle  $C$  voidaan käyttää arvoa 0,0315 poltettavalle jätteelle. Kattilatehona on mielekästä käyttää korkeinta jatkuvaan käyttöön ja pitkälle ajanjaksolle soveltuvaa tehoa (MCR). Laskentaosuudessa Voimala 2:lle voidaan käyttää 32,101 MW suuruista MCR-tehoa. (Babcock & Wilcox Vølund 2013)

Kattilan säteilähäviö voidaan määrittää myös kaavan 4.13 avulla.

$$\dot{Q}_r = (\alpha_k + \alpha_r) \cdot A \cdot (T_{seinä} - T_{ref}) \quad (4.13)$$

Tällöin on kuitenkin tunnettava tarvittavat lämmönsiirtokertoimet, lämmönsiirtopinta-ala sekä lämpötilat. (Huhtinen et al. 2004)

Säteilähäviöiden osuus voidaan myös esittää kattilan nettohöyrytehon funktiona eri polttoaineille (Lyytikäinen et al. 1991). Voimalaitoskattiloiden säteilähäviöt vaihtelevat välillä 0,2–1,0 % kattilan polttoainetehosta (Huhtinen et al. 2004). Osa kattilarakennukseen siirtyvästä lämmöstä saadaan kuitenkin talteen, sillä kattilan palamisilma otetaan ensisijaisesti kattilahuoneesta. Hyödyntämällä kattilahuoneen esilämmennyt ilma palamisilmana voidaan kattilasta poistuneesta säteilähäviöstä saada jopa 70 % talteen. Todellista häviötä aiheuttaa siis ainoastaan se osa lämmöstä, joka siirtyy kattilahuoneesta ulkoilmaan. Kattilan säteilähäviöihin vaikuttavat kattilarakennuksen vuodot, palamisilman ottopaikka, ulkoilman lämpötila sekä kattilan ja kattilarakennuksen eristeiden kunto. Käytännössä mahdollisuudet vaikuttaa säteilähäviöiden suuruuteen rajoittuvat lähinnä eristysten kunnossapitoon. (Lyytikäinen et al. 1991)

#### 4.2.4 Ulospuhallushäviöt

Kattilan lieriöstä puhalletaan vettä jatkuvasti ulos, jotta kattilavedestä poistuisi suoloja ja epäpuhtauksia. Ulospuhallusveden mukana viemä entalpiavirta kulkeutuu kattilan taserajojen ulkopuolelle aiheuttaen ulospuhallushäviön, joka on suuruudeltaan 1–2 % luokkaa höyryntuotannosta (Kalske 2008; Saidur et al. 2010). Veden höyrystyessä siihen liuenneet kiintoaineet voivat kerääntyä lieriön pohjalle ja muodostaa haitallista kattilakiveä, mutta kerrostumien syntymistä voidaan ehkäistä laskemalla kattilavettä lieriön pohjaventtiilin kautta ulos säännöllisesti. Suuri kiintoainekonsentraatio voi aiheuttaa myös veden vaahtoamista ja vahingoittaa siten putkistoa ja prosessilaitteistoa. Kattilaveden ulospuhallus lähellä lieriön pintaa poistaa kiintoaineita ja on lähes poikkeuksetta jatkuvaa. Ulospuhallettavan veden määrä riippuu kattilan paineesta, syöttöveden määrästä ja sen puhtaudesta sekä kattilan toleranssista kiintoaineita kohtaan. (National Renewable Energy Laboratory 2014)

Lieriöstä puhallettava vesi on likimain samassa lämpötilassa kuin kattilan tuottama kylläinen höyry. Ulospuhallusveden sisältämästä energiasta voidaan ottaa osa talteen muualla, kuten ohjaamalla ulospuhallusvesi lämmönvaihtimien läpi ja siirtämällä lämpöä kattilan syöttöveeten. (Lyytikäinen et al. 1991) Ekokemin tapauksessa jätevoimaloiden kattiloiden ulospuhallusvesi johdetaan kuitenkin suoraan viemäriin. Käytännössä ulospuhallusveden lämmön talteenotosta voisi olla hyötyä talviolosuhteissa, mutta tällä hetkellä kyseistä toimintaa ei ole koettu tarpeelliseksi toteuttaa. Lieriön ulospuhallusveden massavirralle ei ole mittausta, mutta arvo on laskettavissa syöttöveden ja tuorehöyryn massavirtauksien erotuksesta.

Ulospuhallusveden mukana kattilasta poistuva häviölämpöteho on

$$\dot{Q}_{UP} = \dot{m}_{UP} \cdot (h_{KV} - h_{SV}) \quad (4.14)$$

ja näin ollen ulospuhallushäviön osuus voidaan laskea kaavaa 4.15 käyttäen.

$$q_{UP} = \frac{\dot{m}_{UP} \cdot (h_{KV} - h_{SV}) \cdot \eta_K}{\dot{m}_H \cdot (h_H - h_{SV})}, \quad (4.15)$$

missä  $h_{KV}$ ,  $h_{SV}$  ja  $h_H$  viittaavat kattilaveden, syöttöveden ja höyryn entalpioihin kattilan taserajalla ja  $\eta_K$  kattilahyötysuhteen tyypilliseen arvoon. (Lyytikäinen et al. 1991)

#### 4.2.5 Omakäyttöhäviöt

Omakäyttöhäviöillä tarkoitetaan kaikkia kattilan tarpeellisten apuhöyrymäärien sisältämistä lämpömääristä aiheutuvia häviöitä (Lyytikäinen et al. 1991). Voimala 2:n tapauksessa apuhöyryä käytetään primääri-ilman esilämmitykseen sekä syöttövesisäiliön paineen säätöön. Höyryn virtaus ilman esilämmittimeen asettuu välille 0–1,40 kg/s ja määräytyy primääri-ilman lämpötila-asetuksen ja primääri-ilman virtauksen perusteella (Babcock & Wilcox

Vølund 2013). Tarvittava korkeapainehöyrymäärä otetaan suoraan kattilan lieriöstä. Primääri-ilman tilavuusvirta ja lämpötila vaikuttavat siis suoraan syöttöveden energiasisältöön, mikäli höyryn tuotto halutaan pitää vakiona. Tässä työssä höyryluvo on asetettu kattilan energiataserajojen ulkopuolelle. Omakäyttöhäviön suuruus saadaan selville laskemalla lämpöhäviö seuraavalla kaavalla

$$\dot{Q}_{OK} = \dot{m}_{OK,H} \cdot h_{H,KP} \quad (4.16)$$

Voimalaitoksien höyryjakelujärjestelmässä on kaksi päätasoa, jotka koostuvat matalapainehöyrystä (5 bar) sekä korkeapainehöyrystä (25 bar). Voimalaitosalueen matalapainehöyryverkon tehtävänä on toimittaa höyryä Voimala 2:n syöttövesisäiliölle ja työhöyrypisteisiin. (Vanhatalo 2012)

#### 4.2.6 Tuhkan termiset häviöt

Kattilasta poistuu kuuman tuhkan mukana termistä lämpöenergiaa. Lämpöhäviön suuruus on usein käytännössä melko merkityksetön, sillä sen osuus häviöistä on tavallisesti 0,05–0,1 % (Lyytikäinen et al. 1991). Lämpöhäviön suuruus riippuu kuitenkin polttoaineen tuhkapitoisuudesta, jonka kasvaessa myös menetettävä energia kasvaa. Ekokemin jätevoimaloilla savukaasujen tuhkien mukana menetettävä lämpöteho onkin vähäistä, mutta kuonan mukana viemällä lämpöteholla on enemmän merkitystä johtuen kuonan suhteellisen suuresta massavirrasta. (Babcock & Wilcox Vølund 2013).

Kuonan ja tuhkan lämpötila-arvona taserajalla voidaan käyttää 300 °C. Kuonan ja tuhkan aiheuttamat termiset häviöt on laskettavissa kaavoilla 4.17 ja 4.18.

$$\dot{Q}_{KU} = \dot{m}_{KU} \cdot c_{p(KU)} \cdot (T_{KU} - T_{ref}) \quad (4.17)$$

$$\dot{Q}_{LT} = \dot{m}_{LT} \cdot c_{p(LT)} \cdot (T_{LT} - T_{ref}) \quad (4.18)$$

Ominaislämpökapasiteetti  $c_p$  kuonalle on 1,00 kJ/kgK ja lentotuhkalle 0,84 kJ/kgK. (Babcock & Wilcox Vølund 2013; Huhtinen et al. 2004)

#### 4.2.7 Arinan jäähdytyksestä johtuvat häviöt

Vesijäähdytetyillä arinapaloilla varustetulla arinalla voidaan polttaa korkeamman lämpöarvon omaavaa jätettä, kuin pelkästään ilmajäähdytetyillä arinalla. Voimala 2:lla ensimmäisen ja toisen arinalohkon jäähdytysjärjestelmänä on suljettu jäähdytysvesikierto. Arinan jäähdytysveteen siirtynyt lämpöteho siirretään primääri-ilmaan johtamalla vesi ilman esilämmittimen, luvon, läpi. (Babcock & Wilcox Vølund 2012) Jäähdytysveteen arinalta siirtynyt energia saadaan lausekkeesta 4.19.

$$\dot{Q}_{JV} = \dot{m}_{JV} \cdot c_{p(V)} \cdot (T_{JV,2} - T_{JV,1}), \quad (4.19)$$

jossa lämpöteho vaihtelee jäähdytysveden meno- ja paluulämpötilojen sekä massavirran mukaisesti. Tilanteissa, joissa primääri-ilmavirtaus ei riitä jäähdyttämään arinan jäähdytysvettä, ohjautuu osa vedestä hätäjäähdyttimelle, jossa vesi jäähdytetään sammutusjärjestelmän vedellä (Babcock & Wilcox Vølund 2012). Tällaisia tilanteita ovat muun muassa kattilan ylös- ja alasajot.

Arinan jäähdytyshäviönä voidaan käyttää hyötysuhdelaskennassa vakio-arvoa, joka määritetään pidemmän aikavälin keskiarvona prosessin datahistoriasta. Vaikka jäähdytyshäviö vaihtelee joidenkin prosessimuutosten, kuten jätteen lämpöarvon mukaisesti, sen huomioon ottamisen ei arvioida olevan tämän työn kannalta erityisen oleellista. Jäähdytyshäviön voidaan kuitenkin todeta olevan suoraan verrannollinen jätteen lämpöarvoon ja kääntäen verrannollinen jätteen massavirtaan.

#### 4.2.8 Muut häviöt

Muita häviöitä kattilan hyötysuhteeseen aiheuttavat esimerkiksi vuotohäviöt sekä vesinuohous. Kattilaan vuotaa pieniä määriä ilmaa ulkopuolelta kattilan eristyksistä riippuen. Kattilan vesipesu lisää savukaasun tilavuusvirtaa ja veden höyrystyminen sitoo energiaa kattilassa. Nuohous on kuitenkin vain hetkellinen tapahtuma, eikä sillä ole kovin suurta merkitystä kattilan hyötysuhteeseen. Pieniä määriä lämpöenergiaa kulkeutuu pois kattilasta myös vesijäähdytteisen jätteen syöttösuppilon kautta.

Typen oksidien poistoon kattilaan syötetään vedellä laimennettua ammoniakkiliuosta, jolloin ammoniakki-injektio sitoo kattilan lämpöä ja kasvattaa savukaasuvirtaa. Lisäksi kattilan hyötysuhdetta pitkällä aikavälillä huonontavat epäjatkuva käytöstä aiheutuvat häviöt, jotka voivat muodostua käynnistys- ja pysäytyshäviöistä sekä läpivirtaushäviöistä (Huhtinen et al. 2004). Mittaus- ja säätötekniikan on oltava niin ikään tarkkaa ja luotettavaa sekä ajotapojen oltava toimivia optimaalista prosessitilaa tavoitellessa (Lyytikäinen et al. 1991). Kattilan hyötysuhde laskee ajettaessa kattilaa pienellä teholla, koska kuormasta riippumattomat häviöt pysyvät muuttumattomina ja näin ollen häviöt kasvavat suhteessa kattilasta hyödyksi saatavaan energiaan. Muiden häviöiden vaikutus huomioidaan yleensä vakiotekijänä.



## 5 CASE: VOIMALA 2

Tässä diplomityössä case- eli tapaustutkimuskohteena on Ekokemin Voimala 2. Tutkimustulosten rakentamiseksi ja niiden analysoinnin helpottamiseksi on toiminnan taustojen selvittäminen ja palamisen säädön tavoitteiden hahmottaminen tärkeää. Eri prosessiparametrien vaikutuksien hahmottaminen auttaa ymmärtämään paremmin koko palamisprosessin syy-seuraussuhteita.

Luvussa 5.1 selvennetään Voimala 2:n palamisprosessin hallintaa. Tarkoituksena on kuvata prosessin säätöjä pääpiirteittäin. Seuraavassa luvussa käydään läpi kattilan taserajojen yli kulkevat energiavirtaukset ja niiden suuruudet, mikä luo pohjaa kattilan energiataseen muodostamiselle ja laskemiselle.

### 5.1 Polton hallinta

Tärkein palamistehon säätötapa on jätevirran säätäminen. Polttoaineen syöttöjärjestelmän ensisijainen tehtävä on syöttää jäte arinalle tasaisena kerroksena koko arinan leveydelle. Jätteen tasainen levittyminen estää primääri-ilman karkaamisen alueilta, missä polttoainekerroksen ja arinan vastus on pieni. Syöttöjärjestelmän oikeanlainen konstruktio estää hallitsemattoman ilman pääsyn tulipesään ja epästabiileiden tilanteiden aiheuttaman niin sanotun takatulen karkaamisen syöttöjärjestelmää pitkin. Jätteen syöttökuilun tarkoitus on lisäksi toimia polttoaineen puskurivarastona (Babcock & Wilcox Vølund 2012). Muita tärkeitä tapoja vaikuttaa polttoprosessiin ovat prosessin hapentuonnin ja lämpötilan säädöt. (Raiko et al. 2002)

Jätteen laadun tulisi olla mahdollisimman tasalaatuista, sillä laadun vaihdellessa tulipesään voi muodostua kohtia, joissa kosteus on korkea ja lämpöarvo alhainen tai palamisilman määrä liian vähäinen. Seurauksena osa jätteestä voi palaa vain osittain ja palamislämpötila on vaarassa jäädä aiottua alhaisemmaksi, mikä omalta osaltaan vaikuttaa lisääntyvässä määrin päästöjen muodostumiseen. Osittaisen palamisen alueilla saattaa esiintyä pelkistävien ja hapettavien olosuhteiden vaihtelua ja voimakasta korroosiota, kun taas voimakkaan palamisen alueilla saattaa esiintyä NO<sub>x</sub>-päästöjen kasvua, tuhkan sulamista ja korroosiota. Liian vähäinen ilmamäärä lisää päästöjä, aiheuttaa prosessin toimintahäiriöitä ja huonontaa tuhkien laatua. Liian runsas ilmamäärä taas lisää savukaasujen määrää, nostaa laitoksen kokonaiskustannuksia ja pienentää energiatehokkuutta. (Vesanto 2006)

Palamisen vaiheiden eli polttovyöhykkeiden sijaintiin arinalla voidaan vaikuttaa seuraavilla tekijöillä

- polttoainepedin paksuus
- primääri-ilman jakautuminen arinalohkoille
- primääri- ja sekundääri-ilman jakosuhte
- ilman esilämmitys

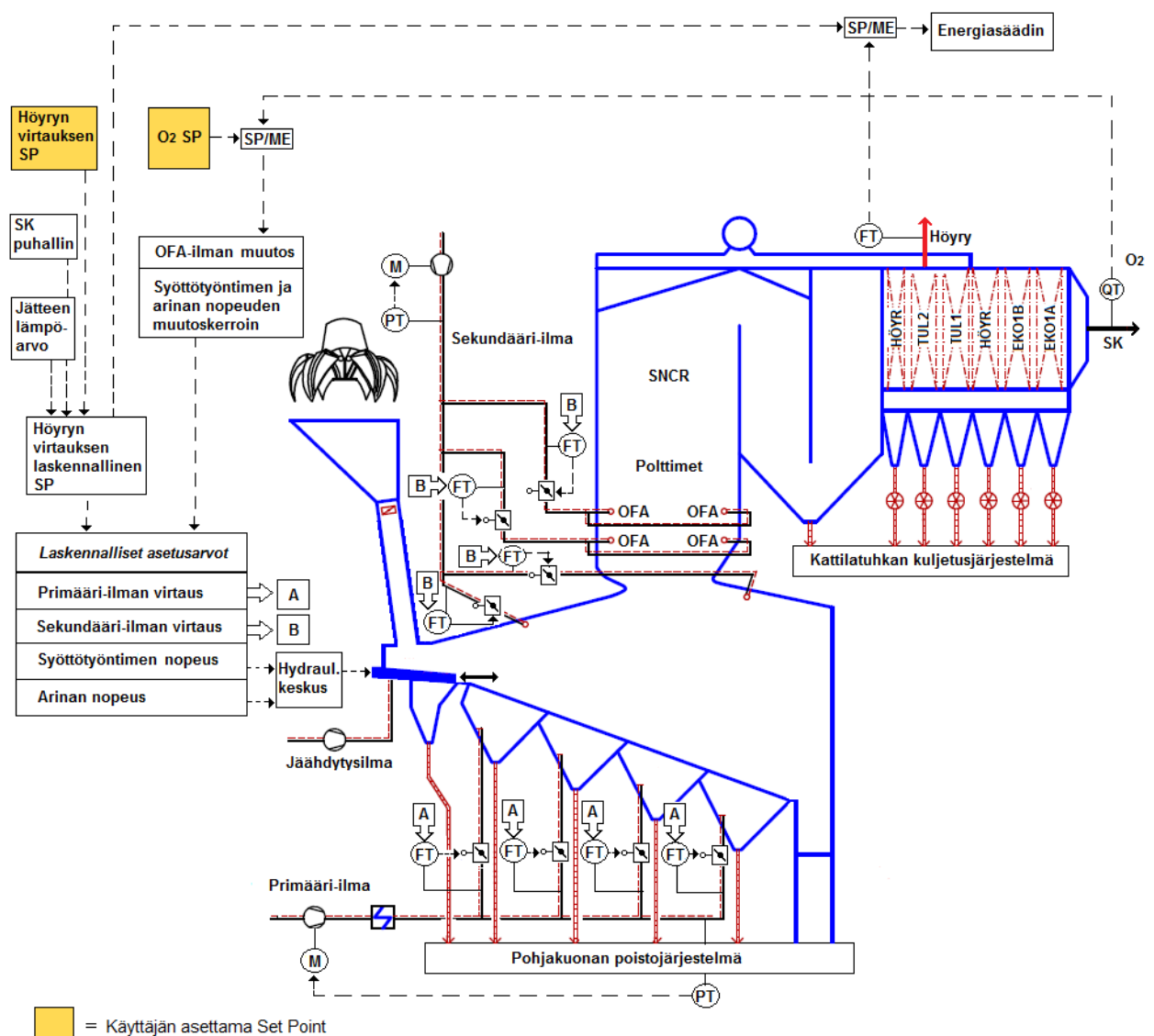
Polttoainepedin optimaalinen paksuus elää polttoaineen koostumuksen vaihteluiden mukaisesti ja on ohjattavissa muuttamalla arinalohkojen ja jätteen syötön nopeussuhteita. Polttoaineen lämpöarvon huonontuminen vaikuttaa syötettävän polttoaineen massavirran vähenemiseen, mikä aiheuttaa arinan polttoainepedin ohenemisen tai muussa tapauksessa pohjatuhkan laadun heikkenemisen tuhkan palamattoman osuuden kasvun myötä (Tugov et al. 2002). Liian paksun jätepedin aiheuttama riski on siis pohjatuhkan palamattoman aineksen määrän kasvu, kun taas liian ohut peti on herkkä polttoaineen laadun vaihtelulle ja voi näin ollen aiheuttaa muutoksia energiantuotantoon. Primääri- ja sekundääri-ilmaprofiilit riippuvat polttoaineen reaktioherkkyydestä. Mitä huonompi reaktioherkkyys polttoaineella on, sitä aikaisemmassa vaiheessa primääri-ilma on syötettävä ja sitä enemmän sen määrä on suhteessa sekundääri-ilmamäärään. Ilman jakautumisen muutoksilla sekä ilman esilämmityksellä pyritään kasvattamaan polttoaineen reaktioherkkyttä. (Babcock & Wilcox Vølund 2012)

Voimala 2:n arina on neljävaiheinen mekaaninen viistoarina eli arina on jaettu neljään arinalohkoon, jotka kuljettavat jätettä arinaa pitkin. Arinalohkojen nopeudella säädetään liekkirintaman sijaintia arinalla, ylläpidetään tarvittavaa jätepatjan paksuutta arinan lämpörasitusten välttämiseksi sekä mahdollistetaan jätteen loppuun palamiseen tarvittava viipymäaika arinalla. (Babcock & Wilcox Vølund 2012)

Primääri-ilma tuodaan kattilaan tulipesän alaosan kautta ja sekundääri-ilma arinan yläpuolelle jälkipalotilaan (Vanhatalo 2012). Sekundääri-ilman tarkoitus on taata tarpeellinen yliilmamäärä kaasujen palamisvyöhykkeelle sekä luoda turbulenssia savukaasuihin, jotta ne sekoittuisivat ilman kanssa mahdollisimman hyvin. Turbulenssia saadaan luotua tulipesän ja jälkipalotilan virtauspoikkipinnan muutoksella. Tulipesän ja jälkipalotilan välinen ”kurkku” muodostaa savukaasuihin sekoittavia pyörteitä, jotka edesauttavat hyvää palamista. (Ekokem 2009)

Sekundääri-ilma syötetään arinan yläpuolelle kattilapesään etu- ja takailmana sekä kaasujen palotilaan OFA-ilmana. Primääri-ilma imetään osittain jätebunkkerista ja vastaanottohallista ja osittain kattilahallista ja sekundääri-ilma kattilahallista (Babcock & Wilcox Vølund 2012). Jätebunkkerin ja vastaanottohallin poistoilman johtaminen palotilaan on kannattavaa, sillä tällä tavoin toimimalla saadaan jätteen käsittely- ja varastointitilat pidettyä alipaineisina ja näin vältetään bunkkerista ympäristöön kulkeutuvilta haihtuvilta aineilta, pölyltä ja haitallisilta aineilta sekä vähennetään hajuhaittoja. (Ekokem 2009)

Prosessinohjausjärjestelmä mahdollistaa tasaisen höyryn tuotannon sekä ylläpitää kiintoaineen ja kaasun tehokasta loppuun palamista polttoaineen laadun vaihteluista riippumatta. Kuvassa 5.1 on havainnollistettu palamisen säätöä pääpiirteittäin. Kuvasta huomataan, että savukaasujen jäännöshapella ja höyryn massavirralla on suuri rooli palamisen hallinnassa. Savukaasujen jäännöshappi ja höyryn massavirta ovat käyttäjän asettamia arvoja ja keskeisiä prosessin mitattavia suureita. Höyryn massavirran todelliseen eli laskennalliseen asetusravoon vaikuttavat käyttäjän asettaman arvon lisäksi savukaasupuhaltimen teho sekä jätteen lämpöarvo. Asetusarvojen sekä mittaussuureiden pohjalta prosessinohjausjärjestelmä laskee arvot primääri- ja sekundääri-ilmamäärille sekä syöttötyöntimen ja arinan nopeuksille. (Babcock & Wilcox Vølund 2012; Karhu 2014)



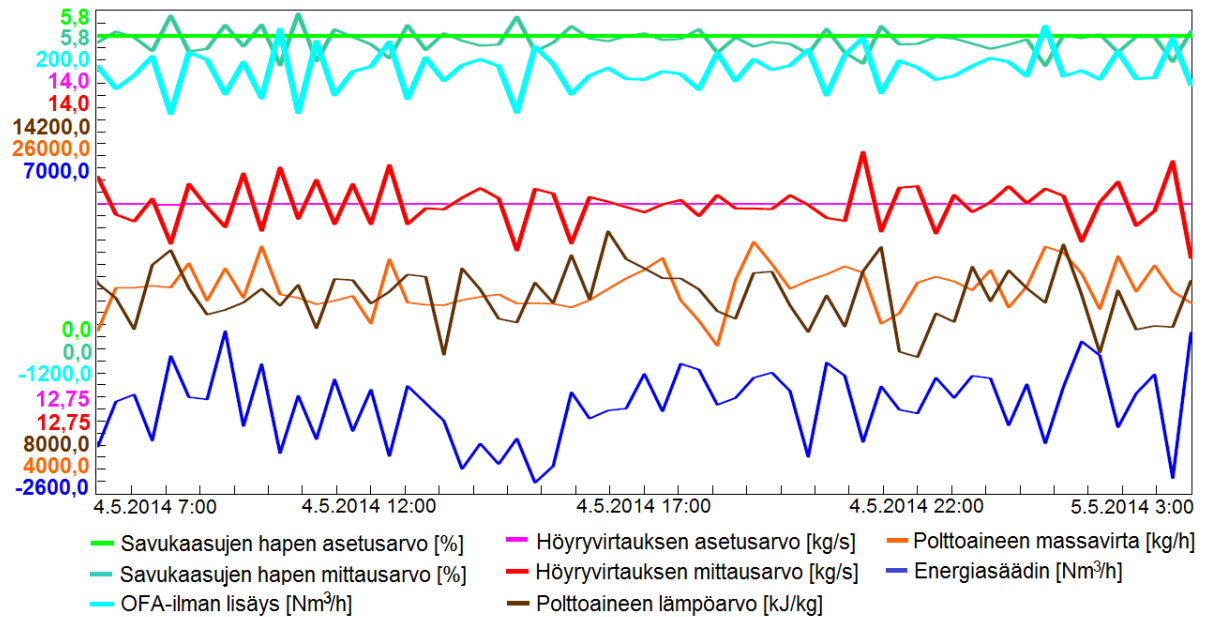
**Kuva 5.1.** Palamisen säädön pääperiaatteet.

Käyttäjän asettamaa höyryn asetusravoa voivat rajoittaa savukaasupuhaltimen rajoitukset sekä jätteen lämpöarvo. Mikäli savukaasupuhallin käy liian suurilla kierroksilla, alkaa se

rajoittaa höyryn tuotantoa vähitellen. Tällöin myös kokonaisilmamäärä ja sitä kautta savukaasujen määrä pienenee. Näin ollen saadaan lisää säätövaraa savukaasupuhaltimelle. Jätteen lämpöarvo puolestaan antaa höyryn virtaukselle tietyn maksimiarvon prosessinohjausjärjestelmään syötetyn funktion mukaisesti. (Babcock & Wilcox Vølund 2012; Karhu 2014)

Höyryn virtauksen laskennallinen asetusarvo määrittää prosessiin syötettävän kokonaisilmamäärän perusosan. Todellinen kokonaisilma määräytyy kuitenkin manuaalisesti asetettavan kokonaisilmakertoimen perusteella. Kokonaisilmakerroin on käyttäjän asettama vakio, jolla kerrotaan höyryn virtauksen laskennallisen asetusarvon mukainen kokonaisilmamäärä. Kokonaisilmamäärä jakaantuu primääri- ja sekundääri-ilmaan. Primääri-ilmasuhde määrittää primääri-ilmamäärän prosentuaalisen osuuden kokonaisilmamäärästä ja jäljelle jäävä osuus ohjataan sekundääri-ilmaksi. Savukaasujen happi ohjaa sekundääri-ilmaa OFA-ilman kautta. Savukaasujen jäännöshapen ollessa alle asetusarvonsa sekundääri-ilmamäärää lisätään ja päinvastoin hapen ollessa yli asetusarvonsa. Polton kokonaisilmamäärää kasvatetaan lisäksi jäähdytysilma, jolla jäähdytetään polttoaineen syöttötyönnintä ja polttoarainoiden sivuseiniä. Polttimien kautta tulipesään syötettävä ilma vähennetään samassa suhteessa sekundääri-ilmasta. (Babcock & Wilcox Vølund 2012; Karhu 2014)

Höyryn virtauksen laskennallisen asetusarvon ja virtausmittauksen mukaisen todellisen kertymän suhde ohjaa primääri-ilman kokonaismäärään vaikuttavaa energiasäädintä. Energiasäädin lisää tai vähentää primääri-ilmaa lohko-kohtaisten korjausilmakertoimien mukaisesti. (Babcock & Wilcox Vølund 2012; Karhu 2014) Seuraavan sivun kuvasta 5.2 nähdään energiasäätimen kääntäen verrannollinen riippuvuussuhde höyryn todelliseen kertymään. Kuvassa energiasäädin tarkoittaa primääri-ilman muutosta ja sen yksikkö on  $\text{Nm}^3/\text{h}$ . Kuva ilmentää myös savukaasujen happipitoisuuden vaikutusta OFA-ilmaan. Kuvassa vasemmalla on nähtävissä jokaisen prosessinsuureen minimi- ja maksimi-arvot kuvan jakson 20 h:n ajalta.



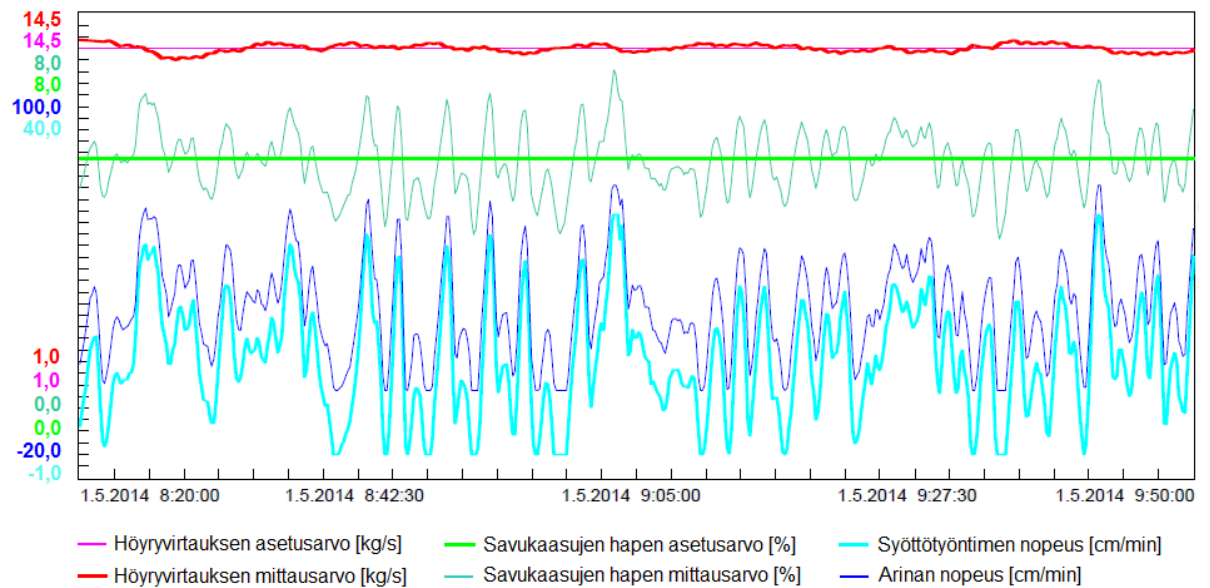
**Kuva 5.2.** Polton parametrien riippuvuussuhteita.

Kuva 5.2 osoittaa savukaasujen happipitoisuuden vaikuttavan päinvastaisesti sekundääri-ilmaan kuuluvan OFA-ilman suuruuteen, kuten aiemmin tekstissä kuvailtiin. Kuva osoittaa myös höyryn todellisen virtauksen vaikutuksen energiasäättimeen eli primääri-ilman muutokseen. Nähdään lisäksi, kuinka polttoaineen lämpöarvon ja massavirran vaihtelut aiheuttavat muutoksia höyryntuotannossa.

Primääri-ilma ohjataan arinalohkoille lohkokohtaisten kertoimien avulla siten, että suurin osa ilmasta ohjataan toiselle ja kolmannelle lohkolle. Primääri-ilmaa ohjataan arinalohkoille säätöpeltien kautta, joiden asento määräytyy peltejä edeltävien virtausmittausten perusteella. Myös sekundääri-ilman ohjaus toimii samalla tavalla ilmalinjojen virtausmittausten avulla. Primääri- ja sekundääri-ilmapuhaltimien tehoja ohjaavat puhaltimien jälkeiset primääri- ja sekundääri-ilmalinjojen painemittaukset. (Babcock & Wilcox Vølund 2012)

Arinan liikettä ja polttoaineen etenemisnopeutta voidaan säätää muuttamalla hydraulisesti toimivien työntötkojen iskupituutta ja nopeutta. Höyryn virtauksen laskennallinen asetusarvo yhdessä savukaasun happipitoisuuden kanssa ohjaa kuusimäntäisen jätetyöntimen nopeutta. Savukaasujen jäännöshapetta mitataan jatkuvatoimisesti kattilan jälkeisellä happimittauksella. Happi ”heiluu” jatkuvasti asetusarvonsa ympärillä; hapen pudotessa alle asetusarvonsa, alkaa se rajoittaa tietyllä kertoimella jätetyöntimen nopeutta, kun taas hapen noustessa asetusarvonsa yli, työntimen työntönopeus kasvaa. Samat tekijät, jotka ohjaavat jätetyöntimen nopeutta, ohjaavat myös kaikkien neljän arinalohkon nopeutta. (Babcock & Wilcox Vølund 2012; Karhu 2014)

Kuva 5.3 osoittaa savukaasujen jäännöshapen mittausravon muutosten vaikutukset jätteen syöttötyöntimen ja arinan nopeuteen. Kuvassa vasemmalla on nähtävissä jokaisen prosessinsuureen minimi- ja maksimiarvot kuvan jakson 1,5 h:n ajalta.



**Kuva 5.3.** Savukaasujen hapen vaikutus jätteen syöttötyöntimen ja arinan liikkeeseen.

Kuva 5.3 konkretisoi savukaasujen hapen mittausravon vaihteluiden suoraa verrannollisuutta jätteen syöttötyöntimen ja arinan nopeuksiin. Arinan nopeus johdetaan syöttötyöntimen nopeudesta, jolloin syöttötyöntimen ja arinan nopeudet vaihtelevat samassa suhteessa. Höyryn laskennallinen asetusravon pysyy jakson ajan vakiona, jolloin se ei vaikuta polttoaineen massavirran muutoksiin. Höyryn laskennallinen asetusravon määrittelee kuitenkin jätetyöntimen ja arinan nopeuden perustason ja on sitä kautta tärkein vaikuttava tekijä jätteen massavirran suuruudelle. Huomattavaa kuvassa 5.3 on se, kuinka paljon syöttötyöntimen ja arinan nopeudet elävät niin sanotun höyryn ohjaaman laskennallisen asetusravonsa ympärillä lyhyellä ajanjaksolla.

Lisäksi jätetyöntimen ja ensimmäisen arinalohkon nopeutta ohjaa omalta osaltaan toisen arinalohkon jätepatjan paksuus, jota ohjelma laskee kyseiselle arinalohkolle syötettävän primääri-ilman resistanssin avulla. Säättöä kutsuaan jätepatjan rajoittimeksi, joka toimii eräänlaisena ”jarruna” liian paksun polttoainepedin muodostumiselle. Tapauksessa, jossa savukaasujen happipitoisuus jää jostain syystä pidemmäksi aikaa yli asetusravonsa, syöttäisi jätetyöntimen arinalle toistuvasti jätettä suurella nopeudella. Riskinä on silloin liian paksu jätepatja arinalla ja sitä seuraava pohjatuhkan palamattoman aineksen määrän kasvu. Jätepatjan rajoitin estää kuitenkin kyseisten tilanteiden syntymisen. Jätepatjan paksuuden laskenta perustuu primääri-ilman painemittaukseen arinalohkon alla, tulipesän savukaasun painemittaukseen, primääri-ilman virtaukseen arinalle sekä primääri-ilman lämpötilaan. Jätepatjarajoittimen kerroin voidaan asettaa välille 0–3.00. (Babcock & Wilcox Vølund 2012; Karhu 2014)

Jokaisen arinalohkon nopeutta on mahdollista säätää erikseen käyttäjän asettamien kertoimien kautta. Myös muiden arinalohkojen jätepatjojen paksuudet määritetään samoin kuin toisen arinalohkon jätepatjan paksuus ja tietojen avulla laitoksen operaattori voi asettaa sopivat kertoimet eri arinalohkojen nopeuksille. Viimeisen arinalohkon nopeus on tärkeää määrittellä sellaiseksi, että jäännöshiilellä on tarpeeksi aikaa palaa loppuun asti. Toiminnalla pyritään estämään myös mahdollinen rejektin syntyminen. Kuonan hehkutushäviön on oltava vähemmän kuin 5 % aineksen kuivapainosta, muulloin se luokitellaan rejektiksi. (Babcock & Wilcox Vølund 2012; Karhu 2014)

Jätteen massavirta määräytyy jätetyöntimen eteenpäin suuntautuvan liikkeen nopeuden perusteella, mikä mahdollistaa halutun energian tuotannon ylläpidon. Työntimen takaisinpäin suuntautuva liike on nopea, jotta voidaan minimoida vaikutukset jätteen syötön säätöön. Jätteen syöttötyöntimen, arinan, syöttösuppilon sulkupellin sekä kuokan liike tuotetaan hydraulisella voimalla. Hydrauliikkayksiköllä on oma jäähdytys- ja suodatusyksikkö, jonka avulla hydrauliöljyn lämpötilaa säädetään. (Babcock & Wilcox Vølund 2012)

Höyryn lämpötilaa säädetään ruiskuttamalla ensimmäisen tulistinpaketin jälkeen höyryyn vettä, jolloin höyryn lämpötila laskee ennen toista tulistinpakettia (Babcock & Wilcox Vølund 2012). Näin pystytään tarvittaessa myös nostamaan höyryn lämpötilaa. Voimalan kattilassa on yhteensä neljä vetoa, joista kaksi on tyhjiä. Tyhjä veto voidaan käsittää jäähdytyskanavana, jonka seinät toimivat lämmönsiirtiminä. Savukaasuja jäähdytetään alle 650 °C lämpötilaan, jotta mahdollisimman suuri osa kondensoituvista yhdisteistä ehtisi kiinteytyä ja erottua savukaasuista. Toinen syy on savukaasun tuhkan tahmeuden vähentäminen. Tyhjiä vetoja ansioista lämpöpintojen kuonaantuminen, likaantuminen ja korrosio rajoittuvat eivätkä ne aiheuta merkittäviä ongelmia kattilan toiminnalle. (Vesanto 2006)

Polton savukaasujen lämpötilan nousua pyritään estämään nuohous- ja kolistustekniikoilla lämmönsiirron tehokkuuden takaamiseksi. Kattilan vesinuohouksen tarkoitus on puhdistaa toisen ja kolmannen vedon savukaasupuolta. Höyrystin- ja tulistinosaa sekä ekopatteria puhdistetaan kattilan molemmiin puoliin sijoitetuilla pneumaattisilla mekaanisilla kolistimilla, joiden tehtävä on irrottaa tuhka- ja kiintoainekertymät kattilan lämmönsiirtopinnoilta. (Babcock & Wilcox Vølund 2012)

Kattilan ylös- ja alasajotilanteita sekä häiriötilanteita on tukemassa kaksi kevytöljykäyttöistä poltinta. Polttimia käytetään alasajotilanteissa ylläpitämään lämpötilaa tarpeeksi korkealla kunnes arinalta loppuu polttoaine sekä ylösajotilanteissa kunnes lämpötila on noussut jätesyötölle sopivaksi. Mikäli polton lämpötila putoaa alle jätteenpolttoasetuksen määrittämän 850 °C:n minimilämpötilan, kytkeytyvät polttimet automaattisesti päälle. Myös jätetyöntimet pysähtyvät automaattisesti ja lukitsevat näin jätteen polton, kunnes savukaasun lämpötila on saavuttanut 850 °C ja työntimet kytkeytyvät takaisin päälle. Polttoprosessia valvovat mittalaitteet ja automaattiset hälytykset saattavat laitoksen tarvittaessa automaatti-

seen hallittuun alasajoon. Mikäli sähköenergian saanti laitokselle katkeaa, on prosessia turvaamassa laitosalueella sijaitseva diesel-käyttöinen varavoimajärjestelmä.

Typen oksidien hallintaan käytetään selektiivistä ei-katalyyttistä typen oksidien pelkistystä eli SNCR-prosessia, jossa palamisalueen loppupään savukaasuihin ruiskutetaan 25 % ammoniakkivesiliuosta. Ammoniikki reagoi tulipesässä kuumien savukaasujen typpioksidin kanssa, jolloin reaktion seurauksena saavutetaan korkea  $\text{NO}_x$ -reduktio. Reaktion tuloksena syntyy vettä ja typpeä. SNCR-säätöohjelma riippuu useista polton parametreista; kattilan kuormasta sekä savukaasun lämpötilasta, hapestasta, häkäpitoisuudesta ja typpioksidipitoisuudesta. Lisäksi prosessin hyötysuhde riippuu oleellisesti ammoniakin ja savukaasujen sekoittumisen tehokkuudesta. Optimaalinen reaktiolämpötila asettuu välille 950–1100 °C. Järjestelmä voi syöttää ammoniakkivettä polttoprosessiin kahdeksan ammoniakkilanssin avulla kolmelta eri tasolta. Useiden eri ohjelmavaihtoehtojen avulla voidaan varmistaa ammoniakin syöttö oikeaan lämpötilaikkunaan sopivalla massavirralla. Liiallinen ammoniakkipitoisuus aiheuttaa ammoniakin kulkeutumisen prosessin läpi sellaisenaan, kun taas liian vähäinen määrä ei riitä poistamaan tarvittavaa määrää typen oksideja. (Babcock & Wilcox Vølund 2013; Ekokem 2009)

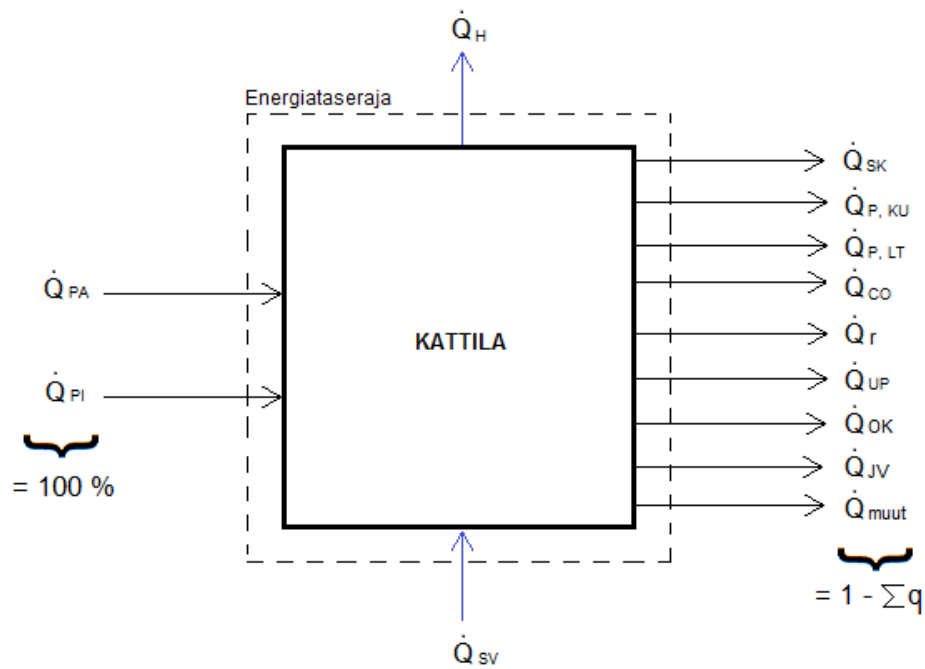
## 5.2 Kattilan energiatase

Kattilan energiatase kuvaa kattilan energiataserajan sisään ja ulos siirtyviä energiavirtoja. Kattilan sisään menevien virtausten mukana kulkeutuvan energiamäärän on vastattava kattilasta poistuvaa kokonaisenergiämäärää energiataseanalyysissä. Myös taserajojen sisään menevien massavirtojen summa on oltava samansuuruinen kuin rajojen ulkopuolelle poistuvien massavirtausten summa. (Saidur et al. 2010) Energiataseen laadinnassa tarkastellaan ainoastaan kontrollipinnan ylittäviä energiavirtoja, sillä taserajojen sisäpuolella tapahtuvala työn tai lämmön siirtymisellä ei ole merkitystä taseen kannalta. Energiataseessa otetaan huomioon energian säilyvyysperiaate, jolloin kattilan energiatase voidaan määrittää yhtälön 5.1 avulla.

$$\dot{Q}_{PA} + \dot{Q}_{PI} = \dot{Q}_V + \dot{Q}_{\text{häviöt}} \quad (5.1)$$

Kaavassa  $\dot{Q}_V$  tarkoittaa lämmönsiirtoa veteen. Voimala 2:n energiatasetta on havainnollistettu seuraavalla sivulla kuvassa 5.4.





**Kuva 5.4.** Voimala 2:n kattilan energiataase.

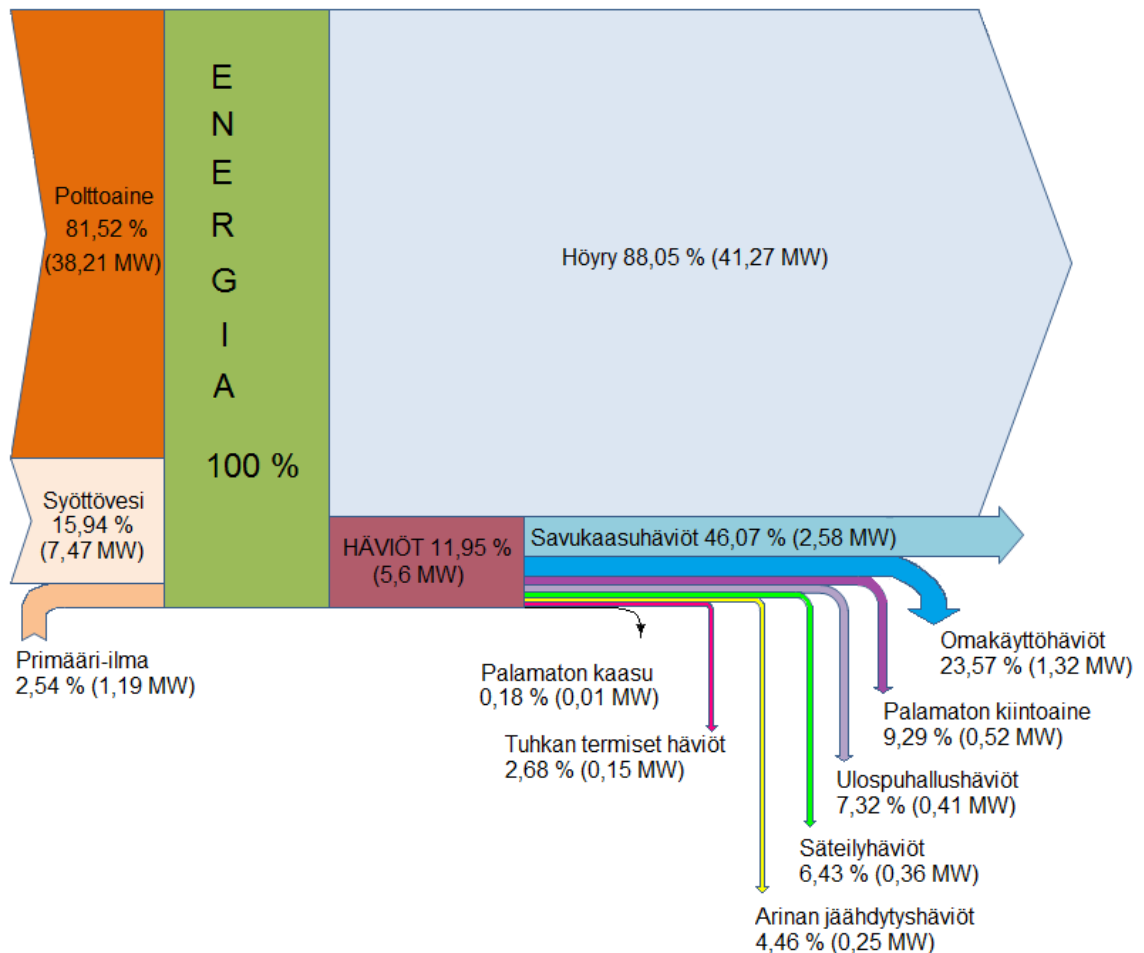
Koska lämpö määrät vedellä ja kaasuilla ovat riippuvaisia lämpötilasta, on lämpöasetta laadittaessa sovittava myös referenssilämpötilasta. Kattilaan menevät lämpö määrät laske taan referenssilämpötilasta lähtien ja poistuvat lämpö määrät referenssilämpötilaan asti. Usein käytetty referenssilämpötila on 25 °C, kuten myös tässä työssä.

Höyryluvo ja arinan jäähdytysvettä käyttävä luvo voidaan sisällyttää kattilan taserajan sisäl le, koska palamisilman esilämmitykseen käytettävät energiavirratt otetaan taserajan sisäl tää. Tässä työssä luvot jätetään kuitenkin taserajan ulkopuolelle laskennan selkeyttämiseksi. Näin ollen esilämmitetyn primääri-ilman mukana taserajan sisäpuolelle virtaa polttoaineen sisältämään energiaan verrattavissa olevaa energiaa.

Tuorehöyryn lämpötilaa säädetään ruiskuttamalla syöttövettä tuorehöyryn joukkoon. Läm pötilan säätö on tärkeää kattilan käytettävyyden turvaamiseksi ja materiaalivalinnoista joh tuvien ylimääräisten kustannusten välttämiseksi. Tulistuksen säätö ei kuitenkaan ole tämän työn puitteissa erityinen mielenkiinnon kohde, eikä sitä tarvitse tutkia tarkemmin. Ruisku tusprosessi sisällytetään tästä syystä kattilan energiataserajojen sisäpuolelle, jolloin sitä ei tarvitse huomioida erikseen laskennoissa.

Osa häviöihin vaikuttavista tekijöistä voivat vaikuttaa kaksisuuntaisesti, kuten esimerkiksi höyryluvon käyttö. Se kasvattaa omakäyttöhäviötä, mutta samalla höyryluvon teho siirtyy kattilaan sen lämmittämän palamisilman mukana ja se on kokonaisuudessaan polttoainete hon arvoista. Myös arinajäähdytys käsitellään tämän työn puitteissa häviönä, vaikka jääh dytysveden teho siirtyy samalla tavalla kattilaan palamisilman mukana kuin höyryluvossa.

Sankey-diagrammilla voidaan kuvata prosessin energiavirtoja. Kuvassa 5.5 on esitetty Voimala 2:n Sankey-diagrammi, joka ilmentää kutakin energian kokonaisvirran komponenttia ja niiden suuruuksia. Diagrammi on luotu Liitteessä 1 nähtävillä olevien arvojen pohjalta.



**Kuva 5.5.** Voimala 2:n kattilan energiavirtojen Sankey-diagrammi. (Vilenius 2014)

Kattilan syötöt koostuvat polttoaineen, primääri-ilman sekä syöttöveden energiasisällöistä, joista polttoaineen osuus on luonnollisesti suurin. Häviöiden osalta savukaasuhäviö on selkeästi suurin käsittäen miltei puolet kokonaishäviöstä. Toinen kokonaishäviön keskeinen tekijä on omakäyttöhäviö, mikä johtuu suoraan lieriöstä otettavan höyryn käytöstä primääri-ilman esilämmityksessä.

Voimalaitos käyttää osan tuottamastaan sähköstä polttoprosessin ylläpitoon. Apulaitteet, kuten syöttövesipumppu, palamisilmapuhaltimet, savukaasupuhallin ja muut prosessin kannalta oleelliset laitteet kuluttavat huomattavan määrän energiaa toimiakseen (Saidur et al. 2010). Omakäyttösähkö tulee määrittellä valitun energiataserajan sisäpuolella. Tässä työssä sähkölaitteet jätetään kuitenkin taserajan ulkopuolelle, eikä niiden kuluttamia tehoja oteta kattilan hyötysuhdelaskennassa huomioon.

Taserajojen asettelusta on olemassa perusvaihtoehtoja, mutta ei pakollisia normeja (Huhtinen et al. 2004). Jokainen laitos voi valita itselleen sopivan taserajan, minkä vuoksi hyötysuhteiden vertailu ei ole täysin suoraviivaista jos taserajat on valittu eri kriteerein. Myös yksilölliset lähtökohdat voivat tehdä erilaisten prosessien kattiloiden energiataseiden vertailun vaikeaksi.

## 6 KOEAJOT VOIMALA 2:LLA

Työn empiirinen osuus toteutettiin suorittamalla koeajoja Ekokemin Voimala 2:lla kesällä 2014. Koeajojen tarkoituksena oli selvittää ennalta valittujen tekijöiden vaikutuksia kattilan hyötysuhteeseen sekä muihin kiinnostuksen kohteena oleviin arvoihin, kuten polttoaineen massavirtaan. Koearvot pyrittiin valitsemaan mahdollisimman poikkeaviksi alkuperäisistä asetusarvoistaan siten, ettei prosessi kuitenkaan häiriinny. Koearvojen muutokset onnistuivat kahden ensimmäisen koeajon aikana siltä osin, ettei niitä tarvinnut muuttaa takaisin alkuperäiseen asetusarvoonsa koeajojaksojen aikana.

Kattilan säätöjä muutettiin vaiheittain, jotta nähtiin yksittäisten parametrien muutosten vaikutukset prosessiin. Jokaisen vaiheen jälkeen tarkkailtava arvo palautettiin lähtöarvoonsa ennen seuraavaa parametrimuutosta. Ensimmäisessä vaiheessa savukaasujen happipitoisuuden asetusarvo nostettiin lähtötilannetta korkeammaksi, seuraavassa vaiheessa kattilan syöttöveden lämpötilaa kasvatettiin syöttövesisäiliön paineasetuksen muutoksen kautta ja viimeiseksi primääri-ilman lämpötilan asetusarvoa laskettiin. Kaikki koeajot suunniteltiin toteutettavaksi noin yhden viikon mittaisilla jaksoilla, sillä kattilan säätöjä muutettaessa prosessit muuttuvat vakaiksi vasta jonkin ajan kuluttua säätämisestä.

### 6.1 Koeajojärjestelyt

Voimalaitoksella suoritettiin perusparametrien muutoksia ja näiden muutosten vaikutuksia tarkasteltiin suhteessa kattilan hyötysuhteeseen ja jätteen läpimenoaikaan arinalla. Koeajojen tavoitteena oli saada tasaisia ajanjaksoja, jolloin prosessiparametrit ja polton olosuhteet vakioituisivat. Hyötysuhteen parantamiseksi ei voida tehdä kovin nopeita muutoksia prosessissa, sillä prosessin pitää antaa tasaantua ja saavuttaa stationäärinen tila, jotta hyötysuhteen määrittäminen olisi luotettavaa. Voimalalla on käytössä Metso DNA-prosessinohjausjärjestelmä, joka mahdollistaa tehokkaan kerätyn mittausdatan analysoinnin.

Koeajot eivät vaatineet monimutkaisia koeajojärjestelyjä, ja tarvittavien parametrimuutoksien tekeminen onnistui muuttamalla kutakin asetusarvoa Metso DNA-prosessinsäätöjärjestelmään. Koeajojaksojen aikana prosessin ajo sekä perustoimenpiteet, kuten kattilan nuohous, suoritettiin normaalisti. Käyttöhenkilökuntaa ohjeistettiin palauttamaan koearvo takaisin alkuperäiseen asetusarvoonsa mahdollisten muutokseen liittyvien ongelmien ilmetessä, mutta tällaiselle toiminnalle oli tarvetta ainoastaan primääri-ilman lämpötilan muutosjakson aikana.

Höyryn haluttu virtaus laitoksen normaaliajossa on 13,5 kg/s. Likaisten vesien syöttö polttoprosessiin oli lähes keskeytymätöntä kaikilla koejaksoilla. Koeajojen aikana laitoksen perusolosuhteet pyrittiin pitämään vakioina ja minimoimaan polttoon vaikuttavien säätöjen tarpeet, mikä ei ollut kuitenkaan aina mahdollista johtuen ulkoisista tekijöistä, kuten ajoittaisesta jätteen lämpöarvon huomattavasta heikkenemisestä.

## 6.2 Koeajojen suoritus ja tehdyt mittaukset

Koeajot suoritettiin kesällä 2014 muutaman vuorokauden mittaisina testijaksoina. Taulukoon 6.1 on koottu koeajot suoritusjärjestyksessä.

*Taulukko 6.1. Suoritetut koeajot.*

| Koeajon muutoskohde           | Suoritus aika (pvm & kellonaika)         | Alkuperäinen asetusarvo | Asetusarvo koeajon aikana |
|-------------------------------|--|-------------------------|---------------------------|
| Savukaasujen jäännöshappi (%) | 12.5.2014 (9.00) –<br>19.5.2014 (9.00)   | 5,5                     | 6                         |
| Syöttöveden lämpötila (°C)    | 19.5.2014 (9.00) –<br>23.5.2014 (21.00)  | 126                     | 132                       |
| Primääri-ilman lämpötila (°C) | 10.8.2014 (13.30) –<br>12.8.2014 (19.00) | 140                     | 80                        |

Liitteeseen 2 on koottu kaikkien koeajojen aikaista prosessidataa skaalattuna sopiville väleille.

### Savukaasujen jäännöshappi

Savukaasujen jäännöshapen muutoksen koeajo suoritettiin 12.-19.5.2014 välisenä ajankohdana, jolloin hapen asetusarvo nostettiin 6 %:iin. Savukaasujen happipitoisuuden mittaus toimii yhtenä voimalaitoksen pääsääntönä, jolloin suurempi muutos olisi kasvattanut negatiivisten muutosten riskiä koko palamisprosessiin. Happipitoisuuden laskiessa alle 5 %:n riskinä on liian suuri CO-pitoisuus savukaasuissa, kun taas happipitoisuuden noustessa yli 6 %:n alkaa savukaasupuhallin rajoittaa höyryn tuotantoa savukaasujen tilavuusvirran kasvun johdosta.

Kokonaisuudessaan koeajo sujui hyvin, eikä prosessiin tarvinnut tehdä sen aikana juurikaan muutoksia. Koeajojakson toisena päivänä höyryn virtauksen asetusarvoa laskettiin hetkellisesti arvoon 10 kg/s savukaasujen puhdistusprosessissa tehtyjen korjaustoimenpiteiden vuoksi. Koejakson aikana asetusarvoa laskettiin käyttäjän toimesta myös savukaasujen rikkipitoisuuden, arinan lämpötilan nousun sekä turbiini- ja palamisongelmien vuoksi yhteensä muutamien tuntien ajaksi. Myös nuohouksien ajaksi höyryvirtauksen asetusarvoa laskettiin säännöllisesti kaikissa koeajotilanteissa.

### **Syöttöveden lämpötila**

Syöttöveden lämpötilaa nostettiin 132 °C:een 19.-23.5.2014 välisen koejakson aikana. Syöttöveden lämpötilaa muutettiin syöttövesisäiliön paineasetuksen muutoksen kautta vaiheittain, kunnes saavutettiin haluttu lämpötila. Syöttövesisäiliön paine nostettiin 1,8 bar:iin, alkuperäisen paineen ollessa 1,3 bar. Syöttöveden lämpötilan lasku ei koemielessä olisi ollut mahdollista rikkihapon kastepisteen alittamisen vuoksi. Syöttövesisäiliön nimelliseksi vähimmäislämpötilaksi on laitetakuussa suositeltu 130 °C, jolloin syöttöveden lämpötilan nosto 132 °C:een oli turvallista toteuttaa käytännössä.

Koejakso sujui melko tasaisesti pois lukien 22.5. klo. 15.00 ja 22.5. klo 23.00 välinen ajanjakso, jolloin Voimala 2:lla suoritettiin kattilan tulipesän räjähdysnuohous, jonka tarkoituksena on puhdistaa kattilaa ja parantaa näin ollen sen lämmönsiirto-ominaisuuksia. Nuohouksen vuoksi tehtyjen säätömuutosten vaikutusten minimoimiseksi laskennoissa huomioitavista arvoista jätettiin pois ennen klo. 23:00 kirjatut arvot. Koejakso päättyi laitoksen alasajoon vuosihuoltoa varten. Alasajo suoritettiin suunniteltua aikaisemmin polttoaineen huomattavasti heikentyneen lämpöarvon johdosta, jolloin myös koeajo jäi alle viikon mittaiseksi.

### **Primääri-ilman lämpötila**

Koeajon tarkoitus oli selvittää, miten huomattavasti normaalia alhaisempi primääri-ilman lämpötila vaikuttaa prosessiin. Primääri-ilman lämpötilan alkuperäinen asetusarvo ennen koeajon aloitusta oli 140 °C, josta se laskettiin 80 °C:n lämpötilaan. Koeajo suoritettiin 10.-12.8.2014 välisenä ajankohtana. Primääri-ilman lämpötilan nostoa rajoittavat arinapalojen takuuehdot, jotka edellyttävät ettei primääri-ilman lämpötila nouse yli 150 °C silloin, kun polttoaineen lämpöarvo on yli 12 MJ/kg. Lämpöarvon ollessa sallitulla tasolla saa primääri-ilman lämpötila olla välillä 150–200 °C enintään 1500 h/a. (Babcock & Wilcox Vølund 2012) Primääri-ilman lämpötilan laskua taas rajoittaa polttoaineen liian vähäinen reaktioherkkyys arinalla.

Koeajon alkaessa höyryvirtauksen asetusarvo jouduttiin laskemaan turbiiniongelmien vuoksi lähes välittömästi arvoon 10,05 kg/s, jota ei enää muutettu koeajon aikana polttoaineen heikon lämpöarvon vuoksi. Koejaksosta jätettiin huomioimatta 11.8. klo. 7.00 ja 11.8. klo 19.00 välinen ajanjakso, jolloin Voimala 2:lla suoritettiin kattilan tulipesän räjähdysnuohous. Primääri-ilman lämpötila jouduttiin nostamaan takaisin alkuperäiseen asetusarvoonsa 12.8. klo. 21.05 polttoaineen lämpöarvon huomattavan laskun ja sitä seuranneiden palamisongelmien vuoksi. Koejakso kesti yhteensä 36 tuntia.

## 7 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tuloksien tarkastelu sisältää teoreettisen laskentaosuuden sekä koeajojen tulosten käsittelyn. Laskennoissa ja kokeissa saavutetut tulokset analysoidaan kaikille tapauksille erikseen siten, että ainoastaan yhtä prosessiarvoa muutetaan muiden prosessiarvojen pysyessä vakiona. Höyryn oletettu virtaus kaikissa tapauksissa on 13,5 kg/s. Perusarvot tarkasteltaville tekijöille ovat seuraavat; savukaasujen jäännöshappi 5,5 %, jätteen lämpöarvo 10 MJ/kg, syöttöveden lämpötila 126 °C sekä primääri-ilman lämpötila 140 °C. Jätteen energiahyödyntämisessä osaintressinä on myös polttoaineen prosessin läpimenoajan tutkiminen käsitelykapasiteetin kehittämiseksi. Jätteen porttihinnaksi voidaan kustannuslaskelmissa olettaa 80 €/t (Riikinvoima 2013). Arinakattilan käyttöasteeksi on arvioitu 8000 h/a (Ekokem 2009).

Aluksi luvussa käydään läpi työn pääasialliset tulokset ja luodaan vertailupohjaa teoreettisten ja kokeellisten tulosten välille. Virhetarkastelun avulla pyritään selvittämään saatujen tulosten epätarkkuutta. Luvun lopussa perehdytään tuloksien epävarmuuden arvioimiseen teoreettisten ja kokeellisten tulosten vertailun muodossa.

### 7.1 Kattilan hyötysuhdelaskennan tulokset

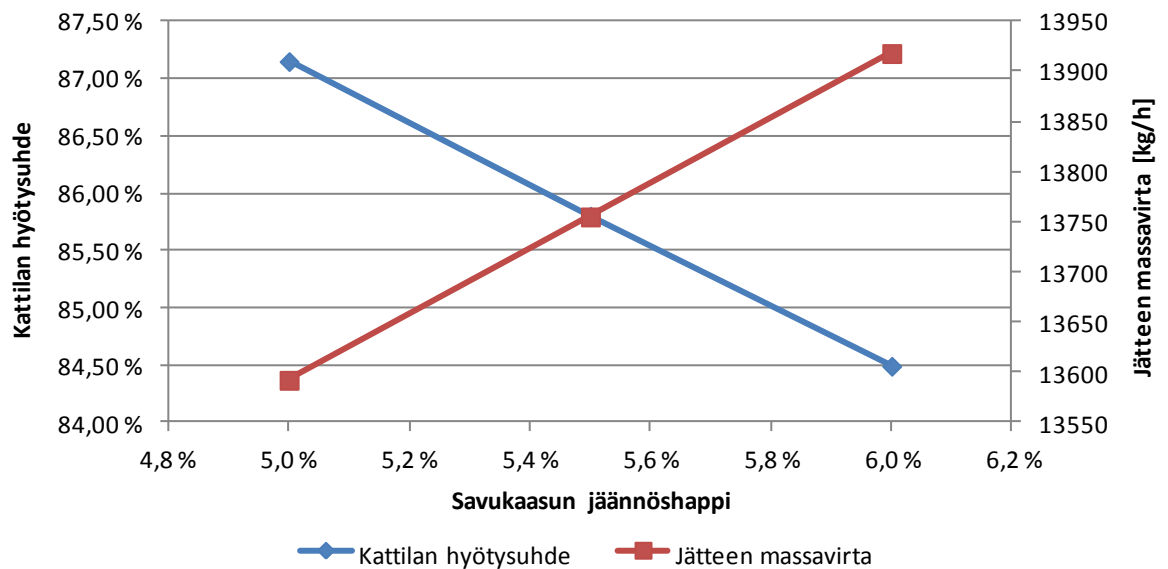
Kattilan teoreettista hyötysuhdelaskentaa varten luotiin Excel-pohjainen laskentaohjelma, joka on sovellettavissa Ekokemin Voimala 2:lle. Jätteen massavirta on haastava selvittää täsmällisesti sen vaihtelevan koostumuksen vuoksi, joten laskentaohjelman lähtökohtaisten perusarvojen mukainen polttoaineen massavirta selvitettiin kattilan energiataseeseen perustuvan iteroinnin avulla. Massavirta vaihtelee perusparametrien arvoja muutettaessa osittain energiavirtausten kompensointien ja osittain kokemusperäisen tiedon mukaisesti. Ohjelmaan syötetään käyttäjän valitsemat alkuarvot, joiden perusteella ohjelma laskee kattilan hyötysuhteen ja polttoaineen massavirran. Tulossivu ilmentää päätulosten ohessa myös kattilan taserajan ylittäviä energia- ja massavirtoja. Liitteessä 1 on nähtävillä laskentaohjelman alkuarvojen syöttö- ja tulossivu. Alkuarvoiksi on asetettu tässä työssä käytössä olevat perusasetusarvot.

Kattilan hyötysuhdelaskennan avulla selvitetään savukaasujen jäännöshapen, syöttöveden ja primääri-ilman lämpötilan sekä polttoaineen lämpöarvon teoreettisia vaikutuksia tutkittaviin arvoihin. Polttoaineen lämpöarvon muutoksia on laskettu ainoastaan laskentaohjelman avulla, sillä käytännössä polttoaineena käytettävän jätteen lämpöarvon vakioiminen ei ole mahdollista. Lämpöarvon voi kuitenkin stabiloida tietyille vaihteluvälille sekoittamalla tarvittaessa eri jätelaatuja oikeanlaisen polttoaineseoksen aikaansaamiseksi.

### 7.1.1 Savukaasujen jäännöshappi

Savukaasujen happipitoisuuden muuttaminen vaikuttaa kattilan hyötysuhteeseen polttoaineen massavirran, primääri-ilman tilavuusvirran sekä savukaasujen komponenttien yhteenlasketun entalpian muutoksien myötä. Hapen osuuden laskiessa savukaasuissa, laskee myös savukaasun entalpia typen osuuden kasvun johdosta. Primääri-ilman tilavuusvirran vaihdetut puolestaan heijastuvat suoraan omakäyttöhöyryn kulutukseen. Jäännöshapen arvon kasvaessa lisääntyy polttoon arinalle syötettävän palamisilman tarve. Teoriassa täydellistä palamista tavoiteltaessa savukaasujen jäännöshapen tulisi olla mahdollisimman lähellä nollaa, mutta se ei ole palamisen optimoinnin kannalta mahdollista.

Kuvassa 7.1 on esitetty kattilan hyötysuhteen ja jätteen massavirran teoreettinen riippuvuus savukaasujen jäännöshapesta.



**Kuva 7.1.** Savukaasujen jäännöshapen vaikutus kattilahiötysuhteeseen sekä polttoaineen massavirtaan. (Vilenius 2014)

Laskentaohjelman avulla on testattu vaikutuksia 5,0 %, 5,5 % ja 6,0 % happipitoisuuksilla. Happipitoisuuden perusarvoksi on valittu 5,5 %, jolloin jätteen massavirta on 13 755 kg/h. Kuvasta 7.1 nähdään, kuinka happipitoisuuden nousu savukaasuissa vaikuttaa kattilan hyötysuhteeseen negatiivisesti ja jätteen massavirtaan positiivisesti. Toisin sanoen jokaista happipitoisuuden 0,5 %:n korotusta kohti jätteen massavirta kasvaa 163 kg/h. Vastaavasti vuositasolla polttoaineen massavirta kasvaa 1304 t/a. Taloudellisena indikaattorina ilmaistuna luku vastaa 104 320 €/a oletetulla jätteen porttihinnalla. Jäännöshapen arvolla 5,0 % saadaan kattilan hyötysuhteeksi 87,15 %. Hyötysuhde laskee kuitenkin 1,35 % hapen ensimmäisen ja 1,31 % hapen toisen 0,5 %:n korotuksen myötä.

Savukaasujen jäännöshapen asetusarvon nostaminen lisää joitain prosessin kustannuksiin liittyviä riskejä. Happipitoisuuden kasvaessa myös savukaasujen tilavuusvirta kasvaa ja savukaasupuhaltimen tehon tarve voi kohota prosessisäätöjen kannalta liian suureksi. Tämä

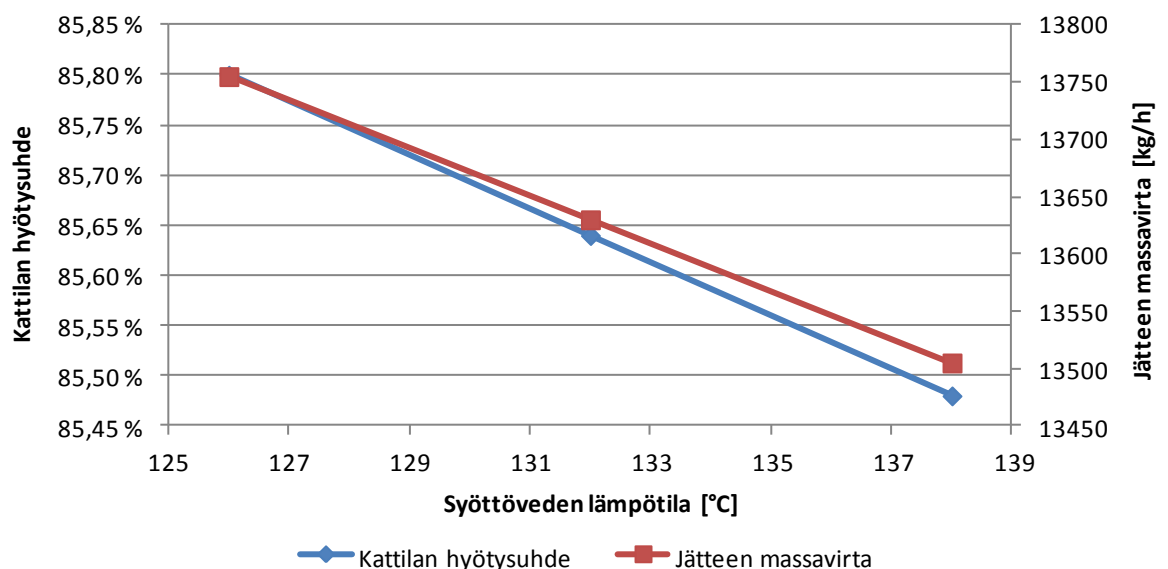


voi rajoittaa puolestaan höyryn tuotantoa höyryn laskennallisen asetusarvon mahdollisen laskun johdosta. Primääri-ilman tilavuusvirta prosessiin kasvaa palamisilman määrän lisääntyessä. Primääri-ilma imetään luvon kautta arinalle suoraan jätebunkerista. Ainakin teoriassa primääri-ilman lisääntyminen aiheuttaa luvon nopeamman likaantumisen, mikä johtaa luvon pesutiheyden kasvuun. Todellisuudessa on kuitenkin vaikea arvioida hapen asetusarvon noston vaikutuksia luvon likaantumisnopeuteen. Kaikissa tapauksissa, joissa polttoaineen massavirta kasvaa, kasvaa luonnollisesti myös kuonan ja muiden tuhkien massavirrat, mikä tarkoittaa niiden suurempia käsittelykustannuksia.

### 7.1.2 Syöttöveden lämpötila

Syöttöveden teho kasvaa syöttöveden lämpötilan noustessa alentaen kuitenkin samalla kattilan tehoa, joka saadaan kattilan höyrytehon ja syöttöveden tehon erotuksesta. Kun syöttöveden mukana kattilaan menevän energian määrä kasvaa, voidaan polttoaineen mukana prosessiin menevää energiaa vähentää saman energiamäärän tuottamiseksi. Jätteen massavirran laskun myötä myös kuonan sekä tuhkan massavirrat laskevat ja sitä kautta niiden mukana viemät palamattoman kiintoaineen häviöt sekä termiset häviöt pienenevät. Savukaasuhäviöön jätteen massavirran suuruus vaikuttaa jätteen kosteuspitoisuuden kautta, sillä polttoaineeseen sitoutunut vesi höyrystyy suoraan savukaasuihin. Kokonaishäviössä ei ole otettu huomioon syöttövesisäiliön paineensäätöön ohjattavaa höyryvirtaa.

Kuvassa 7.2 on esitetty kattilan hyötysuhteen ja jätteen massavirran teoreettinen riippuvuus syöttöveden lämpötilasta.



**Kuva 7.2.** Syöttöveden lämpötilan vaikutus kattilahyötysuhteeseen sekä polttoaineen massavirtaan. (Vilenius 2014)

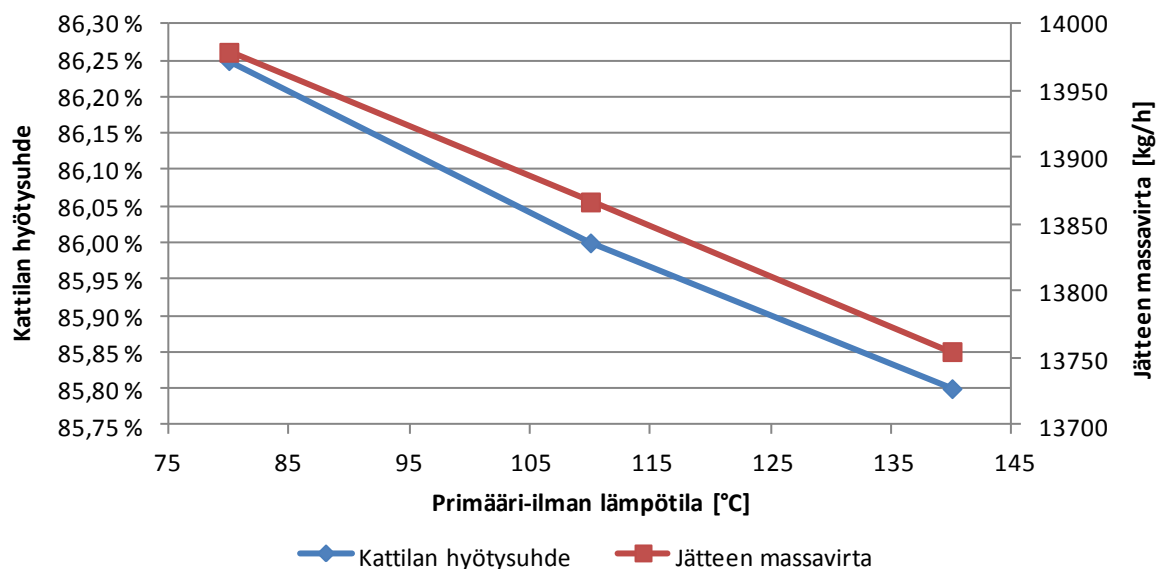
Syöttöveden lämpötilana normaalissa ajotilanteessa on pidetty 126 °C, jolloin kattilan hyötysuhde on 85,80 %. Tämän peruslämpötilan lisäksi työn mielenkiinnon kohteena olevia arvoja on laskettu syöttöveden lämpötilan asetusarvoilla 132 °C ja 138 °C. Yllä oleva

kuva 7.2 havainnollistaa kattilan hyötysuhteen ja jätteen massavirran laskua syöttöveden lämpötilan nousun johdosta. Ensimmäistä 6 °C:n korotusta kohti jätteen massavirta laskee 125 kg/h ja toista vastaavaa korotusta kohti 250 kg/h perusarvoon verrattuna. Edelliset jätteen massavirran vähennykset tuottavat negatiivista tulosta 80 000 €/a ja 160 000 €/a. Muilta osin syöttöveden lämpötilan muuttamisella ei ole kustannusvaikutuksia. Kattilan hyötysuhde laskee lämpötilaväleillä 0,16 %, yhteensä ainoastaan 0,32 %. Vähäinen muutos johtuu polttoaineen tehon ja kattilan tehon samanaikaisesta heikkenemisestä sekä kokonaisuuden pysymisestä lähes muuttumattomana.

### 7.1.3 Primääri-ilman lämpötila

Primääri-ilman lämpötilaa laskettaessa polttoaineen teho kasvaa polttoaineen massavirran kasvun johdosta. Prosessiin kulkeutuvien energiavirtojen kokonaismäärä pysyy kuitenkin miltei muuttumattomana, sillä primääri-ilman energiasisältö pienenee. Omakäyttöhöyryn kulutuksen tarve pienenee sitä voimakkaammin, mitä enemmän primääri-ilman lämpötila-asetusta lasketaan. Sen myötä kattilan teho kasvaa, sillä suuret omakäyttöhöyryn kulutuksen vaihtelut heijastuvat näkyvästi myös syöttöveden massavirtaan ja sen tehoon. Kokonaisuuden laskee hieman, sillä omakäyttöhäviön osuus pienenee huomattavasti. Joidenkin häviöiden, kuten savukaasuhäviön ja palamattomat polttoaineen häviön osuudet taas kasvavat jonkin verran polttoaineen massavirran kasvun vuoksi. Laskentaohjelman avulla on testattu vaikutuksia primääri-ilman lämpötila-arvoille 80 °C, 110 °C ja 140 °C.

Kuvassa 7.3 on esitetty kattilan hyötysuhteen ja jätteen massavirran teoreettinen riippuvuus primääri-ilman lämpötilasta.



**Kuva 7.3.** Primääri-ilman lämpötilan vaikutus kattilahyötysuhteeseen sekä polttoaineen massavirtaan. (Vilenius 2014)

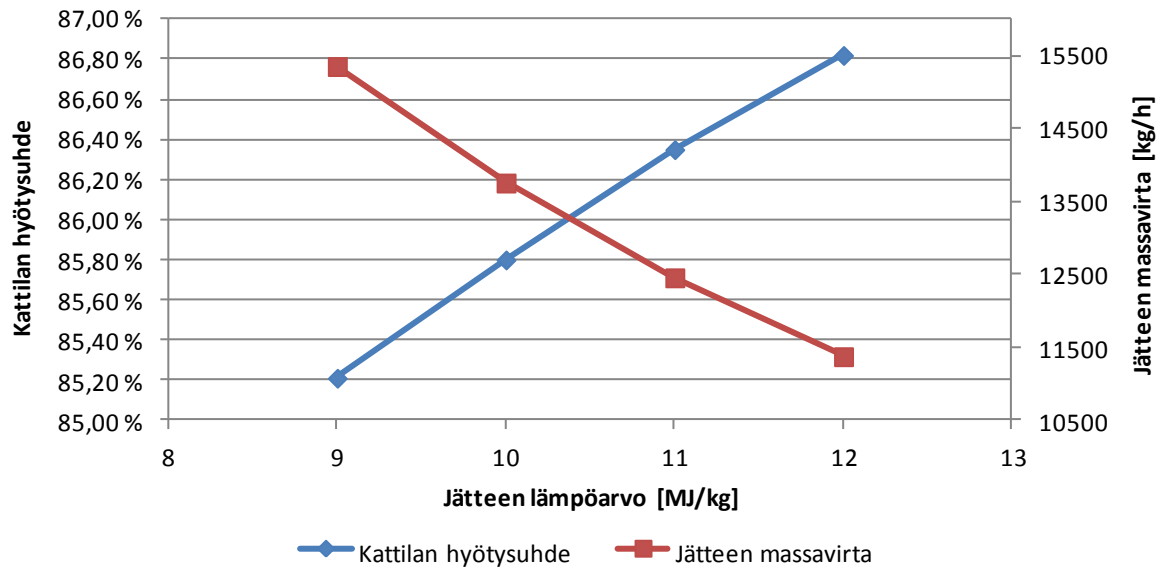
Edellisen sivun kuvasta 7.3 huomataan, että primääri-ilman lämpötilan laskeminen nostaa sekä kattilan hyötysuhdetta että jätteen massavirtaa. Primääri-ilman lämpötilan perusarvoksi normaalissa ajotilanteessa on valittu 140 °C, jolloin jätteen massavirta on 13 755 kg/h. Jätteen massavirta kasvaa lineaarisesti ja saavuttaa muutoksen 224 kg/h eli 1792 t/a, mikäli lämpötila lasketaan arvoon 80 °C. Lämpötilan lasku on taloudellisessa mielessä kannattavaa, sillä se tuottaa tuloja teoreettisten laskelmien mukaan 143 360 €/a. Primääri-ilman lämpötilan ollessa 80 °C saadaan kattilan hyötysuhteeksi 86,25 %. Hyötysuhde laskee järjestyksessään 0,25 % ja 0,20 % valittujen lämpötila-arvojen nostojen myötä, yhteensä 0,45 %.

Primääri-ilman merkittävä laskeminen aiheuttaa prosessin suuremman häiriöalttiuden jätteen lämpöarvon ja kosteuspitoisuuden vaihteluille. Toisin sanoen riski polttoaineen epätäydelliselle palamiselle on suuri. Kuonan palamattoman aineksen osuus voi kasvaa liian suureksi ja kuona joudutaan luokittelemaan rejektiksi. Rejektiksi luokiteltu kuona varastoidaan ja poltetaan lopulta uudelleen arinalla. Saman aineksen vieminen palamisprosessin läpi kahteen kertaan vaikuttaa negatiivisesti uusista jäte-eristä kertyviin tuloihin.

#### **7.1.4 Jätteen lämpöarvo**

Polttoaineen palamisteknisiä ominaisuuksia kuvaava lämpöarvo vaikuttaa palamisprosessin luonteeseen merkittävästi. Tästä syystä jätteen lämpöarvon vaikutuksia on haluttu tutkia tarkemmin laskennallisesti käsittelemällä lämpöarvoa teoreettisena vakioarvona. Jätteen lämpöarvon täytyy olla vähintään 9 MJ/kg, mikäli höyryn tuotantoa ei haluta rajoittaa. Jos lämpöarvo tippuu alle 9 MJ/kg, laskee höyryn massavirta alle 13,5 kg/s. Täsmällinen höyryn virtauksen arvo saadaan interpoloimalla se prosessiautomaatiojärjestelmän höyryntuotantofunktiosta jätteen lämpöarvoon perustuen.

Laskentaohjelmaan syötetyt koearvot jätteen lämpöarvolle olivat 9 MJ/kg, 10 MJ/kg, 11 MJ/kg ja 12 MJ/kg. Seuraavalla sivulla kuvassa 7.4 on esitetty edellisten arvojen avulla lasketut tulokset kattilan hyötysuhteelle ja jätteen massavirralle.



**Kuva 7.4.** Jätteen lämpöarvon vaikutus kattilahiötysuhteeseen sekä polttoaineen massavirtaan. (Vilenius 2014)

Jätteen lämpöarvon kasvaessa kattilan hyötysuhde kasvaa lähes lineaarisesti. Lämpöarvon testiarvolla 9 MJ/kg kattilan hyötysuhteeksi saadaan 85,21 %. Muut kattilan hyötysuhdelaskennan tulokset kasvavassa järjestyksessä ovat 85,80 %, 86,35 % ja 86,82 %. Hyötysuhdetta parantaa kokonaishäviön mukana menetettävän energian pieneneminen savukaasu-, kiintoaine- ja omakäyttöhäviön sekä termisten häviöiden muodossa.

Jätteen lämpöarvo vaikuttaa prosessiin siten, että lämpöarvon kasvaessa primääri-ilman virtauksen ja jätteen massavirran arvot laskevat. Jätteen massavirran muutokset ovat merkittäviä, sillä 1 MJ:n muutos kilogrammassa polttoainetta on huomattava polttoaineeseen sitoutuneen energian kannalta. Lämpöarvoja 9 MJ/kg, 10 MJ/kg, 11 MJ/kg, ja 12 MJ/kg vastaavat jätteen massavirran arvot ovat 15,35 t/h, 13,76 t/h, 12,46 t/h ja 11,37 t/h.

Osaintressinä työssä oli selvittää niin sanotun matalalämpöarvoisen jätteen polttokäsittelyn tehostuspotentiaalia vuositasolla. Erittäin matalan energiasisällön omaavan jätteen lämpöarvo voi olla lähes 0 MJ/kg. Lähtökohtaisesti oletetaan, että bunkkerin sekoitusalueen kokonaislämpöarvo vaihtelee välillä 9,94–10,52 MJ/kg. Arvot perustuvat Metso DNA:n laskemiin keskimääräisiin lämpöarvoihin viikon mittaisissa jaksoissa vuosien 2013 ja 2014 aikana silloin, kun höyryn tuotanto ja likaisten vesien syöttö prosessiin on ollut normaalilla tasolla. Lämpöarvon voidaan todeta olevan kesällä lähempänä vaihteluvälin suurempia arvoja ja talvella päinvastoin. Kesäkuukausiin voidaan tässä tapauksessa laskea huhti-, touko-, kesä-, heinä-, elo- ja syyskuu ja loput katsotaan kuuluvaksi talvikuukausiin. Voimailoksen käyttöaste on 8000 h/a.

Polttoaineseokseen on halutun höyryntuotannon puitteissa mahdollisuus lisätä matalan lämpöarvon omaavaa jätettä lähtöoletusten mukaan sekä kesä- että talviolosuhteissa. Polt-

toaineseoksen kokonaislämpöarvon vaihteluvälin perusteella voidaan 0-lämpöarvoista jätettä lisätä 9,46–14,45 %, jotta jäteseoksen kokonaislämpöarvo saavuttaisi 9 MJ/kg. Prosentuaalinen vaihteluväli vastaa arvoja 1,45–2,22 t/h ja 11 619–17 748 t/a jätteen massavirrassa. Tuloja tämä kerryttäisi yhteensä 929 530–1 419 850 €/a.

Oletetaan, että kaikki vastaanottobunkkeriin syötetty jäte sekoitetaan heti koko bunkkerin sekoituspuolen tilavuuteen, jolloin saadaan niin sanottua täydellisesti sekoittunutta jätettä. Bunkkerin sekoituspinta-alan mitat ovat 21,92 m x 16,45 m. Sekoitussyvyyden voidaan arvioida olevan noin kaksi metriä sekoituskahmarin mittojen perusteella. Sekoitustilavuus on näin ollen arviolta 721 m<sup>3</sup>. Matalalämpöarvoisen jätteen tiheys on lähellä 1 t/m<sup>3</sup>. Kerrallaan sekoitusbunkkeriin voidaan siis lisätä 0-lämpöarvoista jätettä 68,2–104,2 m<sup>3</sup> noin 46,4 tunnin aikana.

Matalalämpöarvoisen jätteen lisäämiseen liittyy kuitenkin myös taloudellisia riskejä. Mikäli jätteen sekoittuminen bunkkerissa on jostain syystä riittämätöntä, voi arinalle päätyvän polttoaineseoksen kokonaislämpöarvo alittaa 9 MJ/kg. Tämä aiheuttaa ensinnäkin höyryn tuotantotappioita, sillä höyryn massavirta laskee lämpöarvorajoitusten vuoksi alle 13,5 kg/s. Etenkin talvella kaukolämmön kysynnän huippukautena höyryn tuotantomenetyksien merkitys kasvaa, ellei kaukolämpöä pystytä toimittamaan riittävästi. Toisekseen, mikäli polttoaineseoksen lämpöarvo laskee merkittävästi, on rejektin syntyminen mahdollista. Normaalia kosteampi polttoaine voi johtaa myös palamattomien kaasujen määrän kasvuun savukaasuissa ja kattilan likaantumiseen, mikä puolestaan heikentää kattilan lämmönsiirto-ominaisuuksia.

## 7.2 Koeajojen tulokset

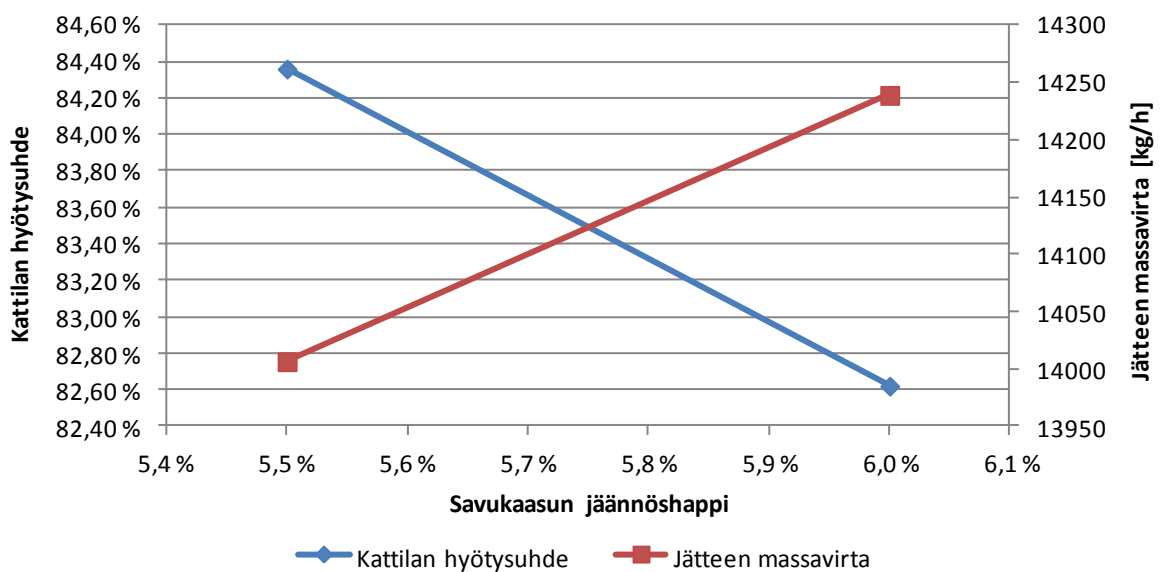
Koeajoista kerätyn prosessidatan perusteella suoritettiin mittauspisteiden vertailua kattilan hyötysuhdemuutosten ja polttoaineen läpimenoajan perusteella. Koeajoista saatujen tulosten perusteella arvioitiin myös mahdollisia kustannusvaikutuksia eri asetuservoilla. Prosessidata kerättiin koeajojakson ajalta tunnin keskiarvoina vähintään neljän tunnin viiveellä prosessiparametrin muutoksesta, jotta arvot ehtisivät tasaantua. Polttoaineen lämpöarvo ja höyrymäärä suhteutettiin vakioiksi polttoaineen massavirran avulla. Kokonaisilmakerroin ja primääri-ilmakerroin vakioitiin ja höyryn virtauksen muutoksen vaikutus primääri-ilmavirtaukseen otettiin huomioon. Primääri-ilman lämpötila kompensoitiin jätteen massavirran avulla vakioiksi kaikilla muilla ajanjaksoilla, paitsi ajanjaksolla, jossa primääri-ilman lämpötilaa laskettiin koemielessä. Kaikki vakioidut perusarvot ovat nähtävissä Liitteessä 1.

Vertailupisteenä koeajojen tuloksille käytettiin viikon mittaista ajanjaksoa, joka ajoittui aikavälille 5.5–12.5.2014. Kyseisen vertailujakson tulokset käsiteltiin laskennallisesti samoin kuin koeajojen tulokset. Tarkoituksena oli saada selville teoreettisten laskentojen mukaisia perusarvoja vastaavat olosuhteet käytännössä, jolloin savukaasujen jäännöshappi on 5,5 %, syöttöveden lämpötila 126 °C ja primääri-ilman lämpötila 140 °C.

## 7.2.1 Savukaasujen jäännöshappi

Käytännössä savukaasujen happipitoisuus vaihtelee jatkuvasti asetusarvonsa molemmin puolin, mutta yrittää keskiarvollisesti pysyä asetusarvossaan. Happipitoisuuden asetusarvon muuttaminen vaikutti saatuihin tuloksiin ennako-oletusten mukaisesti. Suuremmalla hapen asetusarvolla polttoaineen massavirta ja palamisilman tarve lisääntyivät sekä omakäyttöhöyryn kulutus kasvoi. Myös savukaasujen yhteenlaskettu entalpia kasvoi. Lisääntyneiden palamisilmojen johdosta savukaasupuhaltimen teho kasvoi hieman hapen asetusarvoa nostettaessa, mutta pysyi silti keskimäärin sallituissa rajoissa.

Kuvassa 7.5 on esitetty kattilan hyötysuhteen ja jätteen massavirran riippuvuus savukaasujen jäännöshapesta koeajotilanteessa.



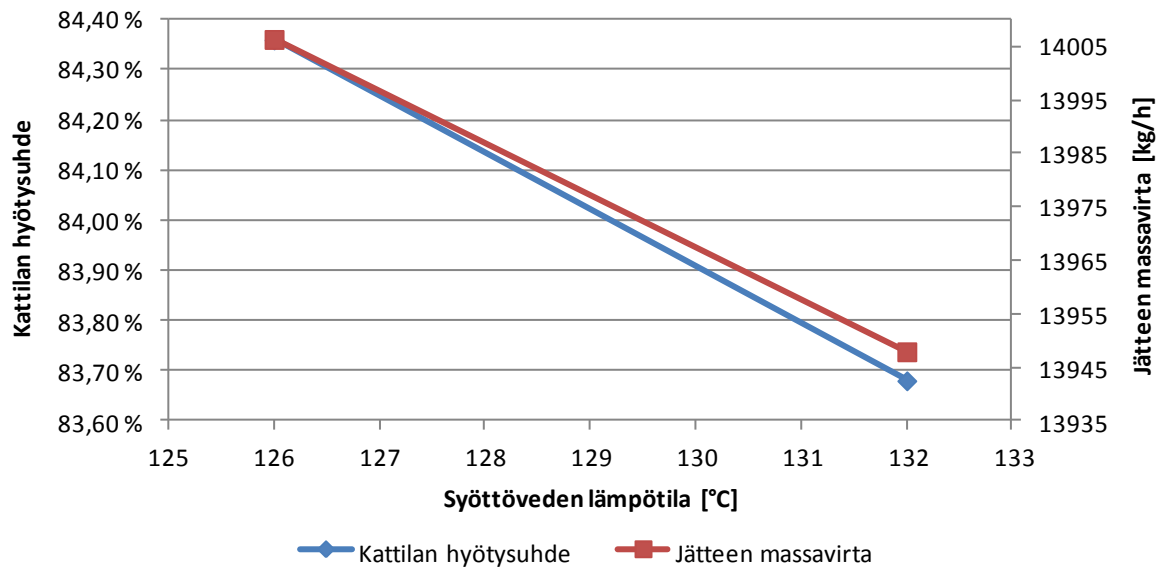
**Kuva 7.5.** Savukaasujen jäännöshapen vaikutus kattilahiötysuhteeseen sekä polttoaineen massavirtaan. (Vilenius, 2014).

Käytännössä jäännöshapen vaikutuksia on selvitetty 5,5 %:n ja 6,0 %:n happipitoisuuksilla. Kuva 7.5 nähdään, kuinka happipitoisuuden nousu savukaasuissa vaikuttaa kattilan hyötysuhteeseen ja jätteen massavirtaan samoin kuin kuvassa 7.1. Jäännöshapen ollessa 5,5 %, saadaan jätteen massavirralla vertailuajanjaksoon perustuva arvo 14 006 kg/h. Jätteen massavirta kasvaa 233 kg/h ja vastaavasti vuositasolla polttoaineen massavirta kasvaa 1864 t/a, kun happipitoisuus nostetaan 6,0 %:iin. Koeajon perusteella savukaasujen jäännöshapen asetusarvon nostaminen tuottaa suuremmat tulot kuin teoreettisen laskentaohjelman perusteella laskettuna; yhteensä 149 120 €/a oletetulla jätteen porttihinnalla. Jäännöshapen arvolla 5,5 % saadaan kattilan hyötysuhteeksi 84,36 %. Hyötysuhde laskee 1,74 % hapen asetusarvon korotuksen myötä.

## 7.2.2 Syöttöveden lämpötila

Syöttöveden lämpötilan muutoksen vaikutukset olivat linjassa teoriaosuudessa arvioitujen vaikutusten kanssa. Tulokseksi saatujen arvojen suuruudet vaihtelivat silti jonkin verran. Muun muassa polttoainetehon muutos oli käytännössä pienempi ja kokonaishäviön muutos suurempi. Syöttöveden tehon ja kattilan höyrytehon muutokset olivat kuitenkin samanarvoiset.

Kuvassa 7.6 on esitetty kattilan hyötysuhteen ja jätteen massavirran riippuvuus syöttöveden lämpötilasta koeajotilanteessa.



**Kuva 7.6.** Syöttöveden lämpötilan vaikutus kattilahyötysuhteeseen sekä polttoaineen massavirtaan. (Vilenius, 2014)

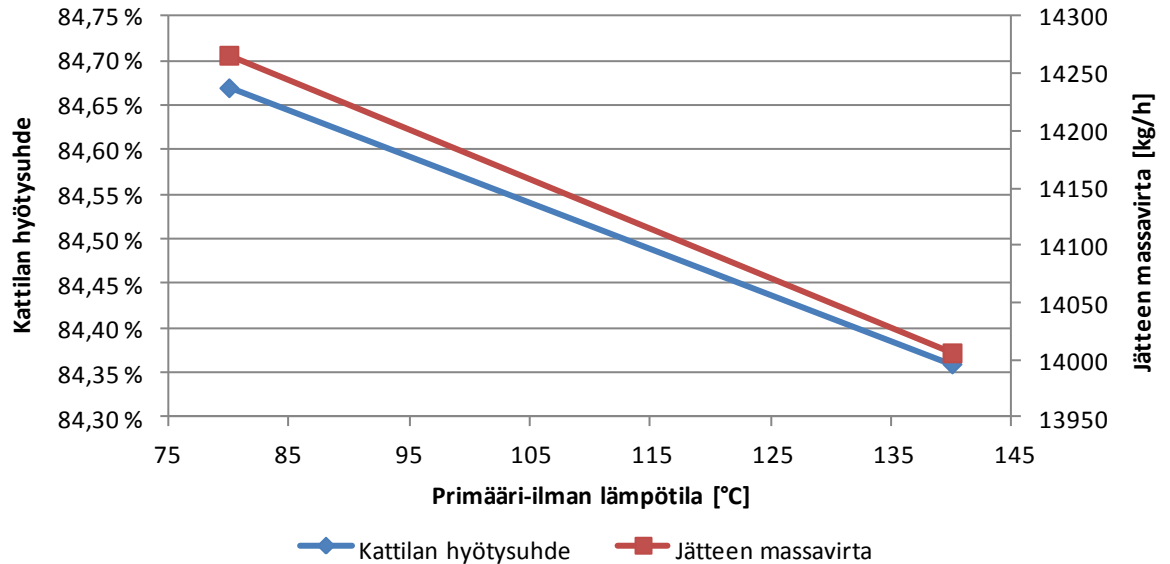
Syöttöveden lämpötilan muutoksen vaikutuksia vertailtiin arvoilla 126 °C ja 132 °C. Kuvasta 7.6 nähdään syöttöveden lämpötilan muutoksen vaikutukset kattilan hyötysuhteeseen ja jätteen massavirtaan. Laitoksen perusolosuhteissa syöttöveden lämpötila on 126 °C, jolloin vertailuajanjakson mukainen jätteen massavirta on 14 006 kg/h ja kattilan hyötysuhde 84,36 %. Tutkittavalla lämpötilavälillä kattilan hyötysuhde laskee 0,68 % perusarvoon verrattuna. Jätteen massavirta laskee lämpötilavälillä 58 kg/h, minkä seurauksena tuloja kertyy vuodessa 37 120 € normaalia vähemmän. Teoreettista laskelmaa suurempi muutos kattilan hyötysuhteessa johtuu häviöiden osuuden suuremmasta vaihtelusta eri syöttöveden lämpötila-arvoilla.

## 7.2.3 Primääri-ilman lämpötila

Primääri-ilman lämpötilamuutoksen koeajotilanne poikkesi muista koeajoista sekä jakson pituuden että höyryn tuotannon perusteella huomattavasti. Tuntuvia prosessiparametrien kompensointeja jouduttiin suorittamaan melko suoraviivaisesti tulosten analysointivaiheessa. Koeajon voidaan kuitenkin arvioida onnistuneen siltä osin, että tulokset ovat saman-

suuntaisia alkuperäisellä laskentaohjelmalla saatujen teoreettisten arvojen kanssa. Primääri-ilman lämpötilan laskun myötä polttoaineen massavirta ja kattilan hyötysuhde kasvoivat sekä kokonaishäviön arvo laski.

Kuvassa 7.7 on esitetty kattilan hyötysuhteen ja jätteen massavirran riippuvuus primääri-ilman lämpötilasta koeajotilanteessa.



**Kuva 7.7.** Primääri-ilman lämpötilan vaikutus kattilahyötysuhteeseen sekä polttoaineen massavirtaan. (Vilenius 2014)

Primääri-ilman lämpötilan vaikutuksia selvitettiin 80 °C:n ja 140 °C:n lämpötila-arvoilla. Kuva 7.7 noudattelee samoja linjoja kuvan 7.3 kanssa. Primääri-ilman lämpötilan varsinaisella koeajoarvolla, 80 °C, jätteen massavirraksi saadaan 14 266 kg/h. Jätteen massavirta kasvaa täten 260 kg/h eli 2080 t/a vertailuajanjaksoon nähden. Koeajon perusteella primääri-ilman lämpötilan laskun tuottopotentiaali on edellisten arvojen perusteella 166 400 €/a. Primääri-ilman lämpötilan ollessa 80 °C saadaan kattilan hyötysuhteeksi 84,67 %. Hyötysuhde laskee 0,31 % lämpötilan noustessa 140 °C:een, jolloin kattilan hyötysuhde on 84,36 %.

### 7.3 Virhetarkastelu

Virhetarkastelun avulla pyritään arvioimaan tuloksen epävarmuutta. Kattilan hyötysuhteen laskentaohjelman tulokset ovat hyvin teoreettisia, vaikka todellisuudessa prosessin tila vaihtelee suuresti. Koeajot puolestaan ovat satunnaisotantoja ja yksittäisten asetusarvojen muutosten tarkempi analysointi vaatisi lisää kokeita. Yksittäisillä koeajojaksoilla tuloksiin vaikuttavat muun muassa polttoaineen laadun vaihtelevuus sekä prosessinohjausjärjestelmän toiminta. Koeajojaksojen vertailukelpoisten tulosten saamisen vuoksi tehty prosessiarvojen vakiointi aiheuttaa omalta osaltaan epävarmuutta prosessiparametrien muutosten seurauksiin. Koeajojen luotettavuutta pyrittiin lisäämään jättämällä tarkasteltavan ajanjakson



ulkopuolelle vähintään ensimmäiset neljä tuntia, jotta prosessi ehtisi varmasti tasaantua muutoksen jäljiltä.

Seuraaviin taulukoihin 7.1, 7.2 ja 7.3 on koottu teoreettisten laskelmien ja koeajojen pääasialliset tulokset. Taulukot ilmentävät tulosten vaihtelevuutta eli osittain tulosten tarkkuutta. Ensimmäiseen taulukkoon 7.1 on tehty yhteenveto savukaasujen happipitoisuuden muutoksen vaikutuksista.

**Taulukko 7.1.** Savukaasujen jäännöshapen muutoksen teoreettisten ja kokeellisten vaikutusten vertailutaulukko.

|                              |        |        |           |
|------------------------------|--------|--------|-----------|
|                              | 5,5 %  | 6,0 %  | muutos    |
| $\dot{m}_{PA,teoria}$ [kg/h] | 13 755 | 13 918 | 163       |
| $\dot{m}_{PA,koe}$ [kg/h]    | 14 006 | 14 239 | 233       |
|                              |        |        | 70 [kg/h] |
|                              | 5,5 %  | 6,0 %  | muutos    |
| $\eta_{K,teoria}$ [%]        | 85,80  | 84,49  | -1,31     |
| $\eta_{K,koe}$ [%]           | 84,36  | 82,62  | -1,74     |
|                              |        |        | 0,43 [%]  |

Yllä olevat vertailukelpoiset tulokset ovat samansuuntaisia keskenään, mutta niiden suuruudet vaihtelevat melko paljon. Teoreettisen ja kokeellisen polttoaineen massavirran muutoksen erotus on 70 kg/h. Koeajon perusteella jätteen massavirta kasvaa ja kattilan hyötysuhde laskee enemmän kuin teoriassa. Hyötysuhteiden muutosten erotus on 0,43 %. Ideaalitapauksessa teoreettiset ja kokeelliset muutokset olisivat yhtä suuria.

Taulukkoon 7.2 on koottu syöttöveden lämpötilan muutoksen tulokset. Teoreettisen ja kokeellisen polttoaineen massavirran muutoksen erotus on suhteellisen korkea; 66 kg/h. Myös kattilan hyötysuhde puolestaan laskee koeajon perusteella 0,52 % enemmän kuin teoriassa. Muutosarvojen erotukset ovat suuria, kun niitä vertaava pelkkiin muutosarvoihin.

**Taulukko 7.2.** Syöttöveden lämpötilan muutoksen teoreettisten ja kokeellisten vaikutusten vertailutaulukko.

|                              |        |        |           |
|------------------------------|--------|--------|-----------|
|                              | 126 °C | 132 °C | muutos    |
| $\dot{m}_{PA,teoria}$ [kg/h] | 13 755 | 13 630 | -125      |
| $\dot{m}_{PA,koe}$ [kg/h]    | 14 006 | 13 948 | -58       |
|                              |        |        | 66 [kg/h] |
|                              | 126 °C | 132 °C | muutos    |
| $\eta_{K,teoria}$ [%]        | 85,80  | 85,64  | -0,16     |
| $\eta_{K,koe}$ [%]           | 84,36  | 83,68  | -0,68     |
|                              |        |        | 0,52 [%]  |

Primääri-ilman lämpötilamuutoksen tulostaulukko 7.3 osoittaa teoreettisten ja kokeellisten tulosten vaihtelevan suurin piirtein samassa suhteessa. Muutoksien erotukset massavirrassa ja kattilan hyötysuhteessa ovat 36 kg/h ja 0,14 %. Tuloksissa esiintyy siis jonkin verran epävarmuutta.

**Taulukko 7.3.** Primääri-ilman lämpötilan muutoksen teoreettisten ja kokeellisten vaikutusten vertailutaulukko.

|                              |        |        |           |
|------------------------------|--------|--------|-----------|
|                              | 80 °C  | 140 °C | muutos    |
| $\dot{m}_{PA,teoria}$ [kg/h] | 13 979 | 13755  | 224       |
| $\dot{m}_{PA,koe}$ [kg/h]    | 14 266 | 14 006 | 260       |
|                              |        |        | 36 [kg/h] |
|                              | 80 °C  | 140 °C | muutos    |
| $\eta_{K,teoria}$ [%]        | 86,25  | 85,80  | 0,45      |
| $\eta_{K,koe}$ [%]           | 84,67  | 84,36  | 0,31      |
|                              |        |        | 0,14 [%]  |

Kaikissa tutkimustapauksissa jätteen teoreettinen massavirta on pienempi ja kattilan teoreettinen hyötysuhde suurempi kuin vastaava kokeellinen arvo. Lisäksi tutkittavien prosessiparametrien muutosten vaikutuksien suuruudet vaihtelevat teoreettisissa ja kokeellisissa tuloksissa. Tulosten variaatio kertoo tulosten jonkin asteisesta epätarkkuudesta, mikä oli tämän tutkimuksen puitteissa kuitenkin odotettavissa.

## 8 YHTEENVETO

Jätteen hyödyntämislaitos mahdollistaa syntypaikkalajitellun yhdyskuntajätteen hyödyntämisen energiana. Energiantuotannon ja sen tehostamisen keskeisiä elementtejä ovat kattilan taserajojen yli kulkevat energiavirtaukset ja niiden suuruudet, joiden avulla voidaan laskea kattilan hyötysuhde. Prosessin energiavirtoja säädetään prosessinohjausjärjestelmän avulla, jonka toiminta perustuu käyttäjän asettamiin ja laskennallisiin asetusarvoihin sekä mittaus-suureisiin.

Tässä työssä perehdyttiin ensiksi Ekokem Oyj:n toimintaan yrityksenä ja sen Riihimäellä toimiviin Voimaloihin 1 ja 2. Tämän jälkeen tarkasteltiin arinapolttoa ja siihen liittyvää tekniikkaa, kun käytössä oleva polttoaine on jätepohjaista. Työssä käytiin läpi höyrykattilan hyötysuhteen määrittämisen laskentamenetelmät ja eriteltiin kattilan häviöt. Tapaustutkimuskohteena olevan Voimala 2:n palamisprosessin hallinta kuvattiin eri prosessiparametrien vaikutuksien selkiyttämiseksi, jonka jälkeen kattilalle määriteltiin energiatase. Lopuksi kuvailtiin työn empiirinen osuus ja koeajojen suoritukset sekä esiteltiin tulokset ja niiden tarkastelu.

Voimala 2:lla suoritettiin kolme koeajoa kesällä 2014, joiden tarkoituksena oli selvittää eri prosessiparametriarvojen muutosten vaikutuksia kattilan hyötysuhteeseen ja jätteen massavirtaan. Tarkasteltavia arvoja olivat savukaasujen jäännöshapen pitoisuus, syöttöveden lämpötila sekä primääri-ilman lämpötila. Koeajojen tulokset muutettiin vertailukelpoiksi teoreettisten tulosten kanssa, jotka saatiin tätä työtä varten tehdyn Excel-pohjaisen laskentaohjelman avulla. Lisäksi laskentaohjelman avulla testattiin jätteen lämpöarvon muutoksia tutkittaviin suureisiin. Laskentaohjelman ja koeajojen perusteella voidaan täsmällisten tulosten laskemisen todeta olevan haastavaa polttoaineen vaihtelevan koostumuksen vuoksi. Keskenään vertailukelpoiset tulokset olivat kaikissa tapauksissa samansuuntaisia, mutta niiden suuruuksissa oli jonkin verran vaihtelevuutta.

Savukaasujen jäännöshapen asetusarvon nostaminen 5,5 %:sta 6,0 %:iin laski kattilan hyötysuhdetta teoriassa 1,31 % ja koetilanteessa 1,74 %. Toisaalta jätteen massavirta kasvoi laskentojen mukaan 163 kg/h ja koeajon perusteella 233 kg/h, mikä tällä hetkellä puoltaa muutosta sen taloudellisen kannattavuuden perusteella. Syöttöveden lämpötilan nostaminen puolestaan laski kattilan hyötysuhdetta ja vähensi jätteen massavirtaa, joten syöttöveden lämpötilaa voidaan tulosten perusteella suositella pidettävän alkuperäisessä 126 °C:n arvossa.

Primääri-ilman lämpötilan muutos 80 °C:een näyttäisi koeajon puitteissa olevan kohtuullisen riskialtis vaihtoehto polttoaineseoksen laadun vaihdellessa. Koeajo jouduttiin keskeyttämään jätteen liian alhaisen lämpöarvon ja sitä seuranneiden palamisongelmien vuoksi. Lyhyen koeajojakson perusteella kattilan hyötysuhde nousi 0,31 % ja jätteen massavirta lisääntyi 260 kg/h. Vastaavat teoreettiset arvot ovat 0,45 % ja 224 kg/h. Negatiivisen muutoksen kattilan hyötysuhteeseen voidaan todeta olevan vähäisempi kuin positiivisen taloudellisen muutoksen jätteen massavirran kasvun myötä. Primääri-ilman lämpötila-asetuksen maltillisempi lasku olisi suositeltavaa, mikäli sen vaikutuksia halutaan tutkia lisää jatkossa. Muutos edellyttää kuitenkin polttoaineen tasaista sekoittumista ja lämpöarvon mahdollisimman hyvää stabilointia.

Jätteen lämpöarvon 1 MJ:n muutos polttoainekilogrammaa kohti on huomattava jätteen massavirran muutoksen vaikutustekijä. Laskentaohjelman testiarvoilla 9 MJ/kg, 10 MJ/kg, 11 MJ/kg ja 12 MJ/kg saatiin arvoja vastaaviksi kattilan hyötysuhteiksi 85,21 %, 85,80 %, 86,35 % ja 86,82 % ja polttoaineen massavirroiksi 15,35 t/h, 13,76 t/h, 12,46 t/h ja 11,37 t/h. Polttoaineseoksen lämpöarvon arvioitiin todellisuudessa vaihtelevan välillä 9,94–10,52 MJ/kg, jolloin hyvin matalan lämpöarvon omaavan jätteen polttokäsittelyn lisäämispotentiaali vaihtelee välillä 1,45–2,22 t/h, mikäli kokonaislämpöarvon halutaan saavuttavan 9 MJ/kg.

Työn tavoitteena oli tutkia yksittäisten prosessiarvojen muutosten vaikutuksia arinakattilan hyötysuhteeseen ja jätteen massavirtaan teoreettisesti ja kokeellisesti. Paremmuuden mittana käytettiin kattilan hyötysuhteen tehostamista sekä taloudellista näkökulmaa. Ratkaisut, jotka lisäsivät polttoaineen massavirtaa, kasvattivat myös tuloja. Tutkimuksissa löytyi myös keinoja nostaa kattilan hyötysuhdetta. Hyötysuhteen muutokset olivat ajoittain vähäisiä, sillä höyryn tuotanto haluttiin pitää vakiona. Saaduissa tuloksissa esiintyy jonkin verran epävarmuutta, sillä niihin vaikuttaa paljolti polttoaineen laadun vaihtelu. Tämän vuoksi jatkossa voisi suorittaa laajempia tutkimuksia eri jäte-erien ja polttoainetyyppien lämpöarvoista sekä niiden osuuksista, joiden pohjalta polttoaineseoksen laadun vaihtelua pystyttäisiin tasaamaan paremmin.

## LÄHTEET

Babcock & Wilcox Vølund. Voimala 2: Functional description. Riihimäki 2013. Toimintakuvaus.

Babcock & Wilcox Vølund. Voimala 2: Käyttötoiminta. Riihimäki 2012. Koulutusmateriaali.

Bankiewicz, D. Corrosion behaviour of boiler tube materials during combustion of fuels containing Zn and Pb. Doctoral theses. Turku 2012. Åbo Akademi University, Department of Chemical Engineering. 53 p.

Ekokem Oyj. 2014a. Ekokemin yhteiskuntavastuuraportti 2013. 40 s.

Ekokem Oyj. 2014b. Ekokem-konsernin tilinpäätös 2013. 40 s.

Ekokem Oyj. 2010. Voimala 2:n ympäristölupahakemus. [WWW]. [Viitattu 15.7.2014]. Saatavissa: [http://www.sll.fi/uusimaa/kannanotot/EKOKEM2-ymp-lupa-esavi\\_paatos-251110.pdf](http://www.sll.fi/uusimaa/kannanotot/EKOKEM2-ymp-lupa-esavi_paatos-251110.pdf)

Ekokem Oyj. 2009. Jätteen energiakäytön laajennuksen ympäristövaikutusten arviointiselostus. [WWW]. [Viitattu 15.5.2014]. Saatavissa: [http://projektit.ramboll.fi/yva/ekokem/voimala2/82122611\\_Ekokem\\_YVA-selostus\\_2009\\_3Mt.pdf?node=1499&lan=fi](http://projektit.ramboll.fi/yva/ekokem/voimala2/82122611_Ekokem_YVA-selostus_2009_3Mt.pdf?node=1499&lan=fi)

Ekokem Oyj. 2014c. Jätteiden käsittelyprosessit. [WWW]. [Viitattu 3.3.2014]. Saatavissa: <http://www.ekokem.fi/fi/tietopankki/kasittelyprosessit/jatteiden-kasittelyprosessit>

European Standard. 2003. SFS-EN 12952-15 Water-tube boilers and auxiliary installations - Part 15: Acceptance tests. Bryssel: CEN.

Fisia Babcock Environment GmbH. Polttoarinnan käyttöohje, jätteenpolttolaitos. Riihimäki 2007. 16 s.

Forbes Marshall. 2014. Process Instrumentation Ideas. [WWW]. [Viitattu 15.4.2014]. Saatavissa: <http://www.forbesmarshall.com/ProcessInstrumentationIdeas.aspx?id=26>

Gasmet Technologies. FTIR-savukaasuanalysointilaitteen toimintakuvaus, käyttöohje. Riihimäki 2007.

Hakulinen, T. 2014. Tiedonantoja. Ekokem Oyj.

Heikkilä, P. 2014. Tiedonantoja. Ekokem Oyj.

Hiltunen, M., Vesanto, P., Moilanen, A., Kaartinen, T., Laine-Ylijoki, J., Sipilä, K., Wilén, C. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuudet ja käyttö. Espoo 2007. VTT Tiedotteita – Research Notes 2416. 55 s. + liitt. 4 s.

Horttanainen, M., Teirasvuori, N., Kapustina, V., Hupponen, M., Luoranen, M. 2013. The composition, heating value and renewable share of the energy content of mixed municipal solid waste in Finland. *Waste Management* 33, pp. 2680–2686.

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P., Pakkanen, H. 2004. Höyrykattilatekniikka. 6., muuttumaton painos. Helsinki. Edita Prima Oy. 379 s.

Kaila, M. 2014. Tiedonantoja. Ekokem Oyj.

Kalske, M. Voimalaitoksen käyttäjän koulutus 1. Helsinki 2008. AEL:n koulutusmateriaali.

Karhu, J. 2014. Tiedonantoja. Ekokem Oyj.

Laine-Ylijoki, J., Mroueh, U.-M., Vahanne, P., Wahlström, M., Vestola, E., Salonen, S., Havukainen, J. Yhdyskuntajätteen termisen käsittelyn kuonista ja tuhista hyötykäytettäviä ja loppusijoitettavia tuotteita. Kansainvälinen esiselvitys. Espoo 2005. VTT Tiedotteita – Research Notes 2291. 83 s. + liitt. 4 s.

Lee, S.-H., Themelis, N. J., Castaldi, M.J. 2007. High-Temperature Corrosion in Waste-to-Energy Boilers. *Journal of Thermal Spray Technology* 16, 1, pp. 104–110.

Lyytikäinen, R., Mielonen, P., Raiko M., Vessonen, K. 1991. Voimalaitoksen hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät. Helsinki, Imatran Voima Oy, T&K – tiedotteita, IVO-B-11/91. 50 s. + liitt. 16 s.

National Renewable Energy Laboratory. Boiler Blowdown Heat Recovery Project Reduces Steam System Energy Losses at Augusta Newsprint. [WWW]. [Viitattu 1.3.2014]. Saatavissa: <http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31697.pdf>

Pitkänen, A. 2009. ENER-6010 Polttotekniikan harjoitukset. Energia- ja prosessitekniikan laitos. Tampereen Teknillinen Yliopisto.

Raiko, R. 2011. Voimalaitostekniikka luentomoniste. Energia- ja prosessitekniikan laitos. Tampereen Teknillinen Yliopisto.

Raiko, R., Kirvelä, K. 2006. Energiatekniikan perusteet luentomoniste. Energia- ja prosessitekniikan laitos. Tampereen Teknillinen Yliopisto.

Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M., Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä, Teknillistieteelliset akatemit ry. & International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. 750 s.

Riikinvoima Oy. 2013. Riikinnevan Ekovoimalaitoksen ympäristölupa ja toiminnanaloittamislupa. [WWW]. [Viitattu 1.7.2014]. Saatavissa: [http://www.avi.fi/documents/10191/56910/isavi\\_paatos\\_106\\_2013\\_1-2013-11-29.pdf/e06307a4-abf2-417e-8e81-9c9e84d951d2](http://www.avi.fi/documents/10191/56910/isavi_paatos_106_2013_1-2013-11-29.pdf/e06307a4-abf2-417e-8e81-9c9e84d951d2)

Saidur, R., Ahamed, J. U., Masjuki, H. H. 2010. Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers. *Energy Policy* 38, pp. 2188–2197.

Suomen virallinen tilasto (SVT). Jätetilasto. [WWW]. [Viitattu 5.2.2014]. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/jate/2012/jate\\_2012\\_2013-11-26\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/jate/2012/jate_2012_2013-11-26_tie_001_fi.html)

Tugov, A. I., Izyumov, M. A., Supranov, V. M. 2002. Design and Thermal Balance of Boilers for Processing Municipal Refuse. *Power Technology and Engineering* 36, 5, pp. 21–25.

Tähtinen, J. Kaasunkäsittelykoulutus I. Riihimäki 2011a. Koulutusmateriaali. 84 s.

Tähtinen, J. Kaasunkäsittelykoulutus III. Riihimäki 2011b. Koulutusmateriaali. 71 s.

Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta (151/2013). Annettu Helsingissä 14.2.2013.

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (331/2013). Annettu Helsingissä 2.5.2013.

Vanhatalo, J. V2 yleiskuvaus, prosessijärjestelmät. Riihimäki 2012. Koulutusmateriaali.

Vesanto, P. Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä. Helsinki 2006, Suomen ympäristökeskus. 101 s.

Vilenius, S. 2014. Kattilahyötysuhteen laskentaohjelma.

Ympäristöministeriö. Jätteet. [WWW]. [Viitattu 5.5.2014]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/FI/Ymparisto/Jatteet>

Zainal, Z. 2007. Case study as a research method. *Jurnal Kemanusiaan* 9, pp. 1–6.

Österbacka, J. 2014. Tiedonantoja. Ekokem Oyj.

# LIITE 1: KATTILAN HYÖTYSUHTEN LASKENTAOHJELMA

## Kattilan hyötysuhde

Syötä seuraavat arvot:

|  |       |
|--|-------|
| Jätteen tehollinen lämpöarvo (kJ/kg)     | 10000 |
| Syöttöveden lämpötila (°C)               | 126   |
| Syöttöveden paine (bar)                  | 1,3   |
| Primääri-ilman lämpötila (°C)            | 140   |
| Primääri-ilman osuus                     | 0,73  |
| Palamisilmakerroin                       | 0,85  |
| Ympäristön lämpötila (°C)                | 25    |
| O2 tilavuusosuus savukaasuissa           | 0,055 |
| CO2 tilavuusosuus savukaasuissa          | 0,074 |
| CO pitoisuus savukaasuissa (mg/Nm3)      | 38    |
| Höyryn lämpötila (°C)                    | 320   |
| Höyryn paine (bar)                       | 25    |
| Savukaasujen lämpötila ekon jälkeen (°C) | 215   |

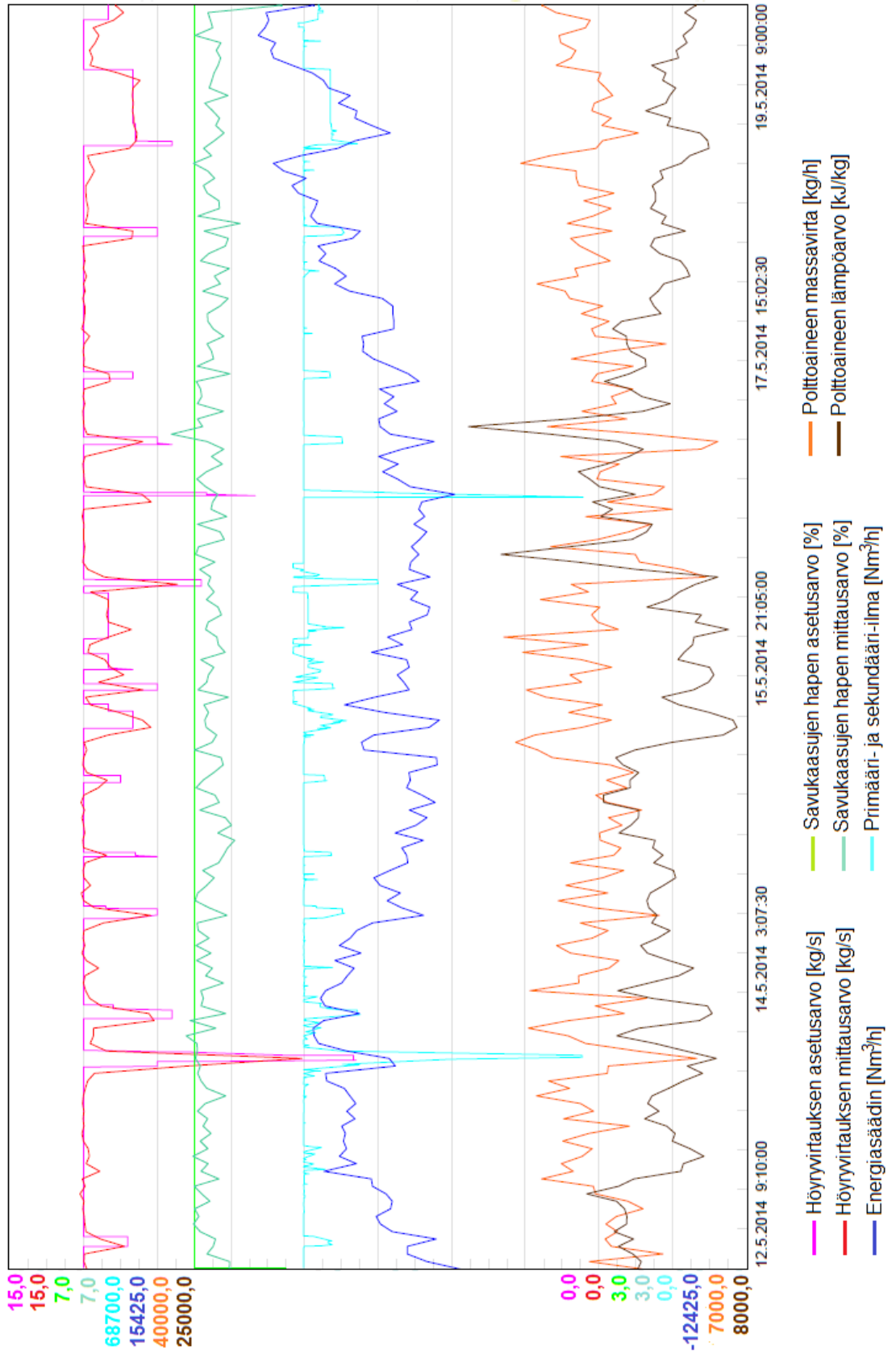


## Kattilan hyötysuhdelaskennan tulokset

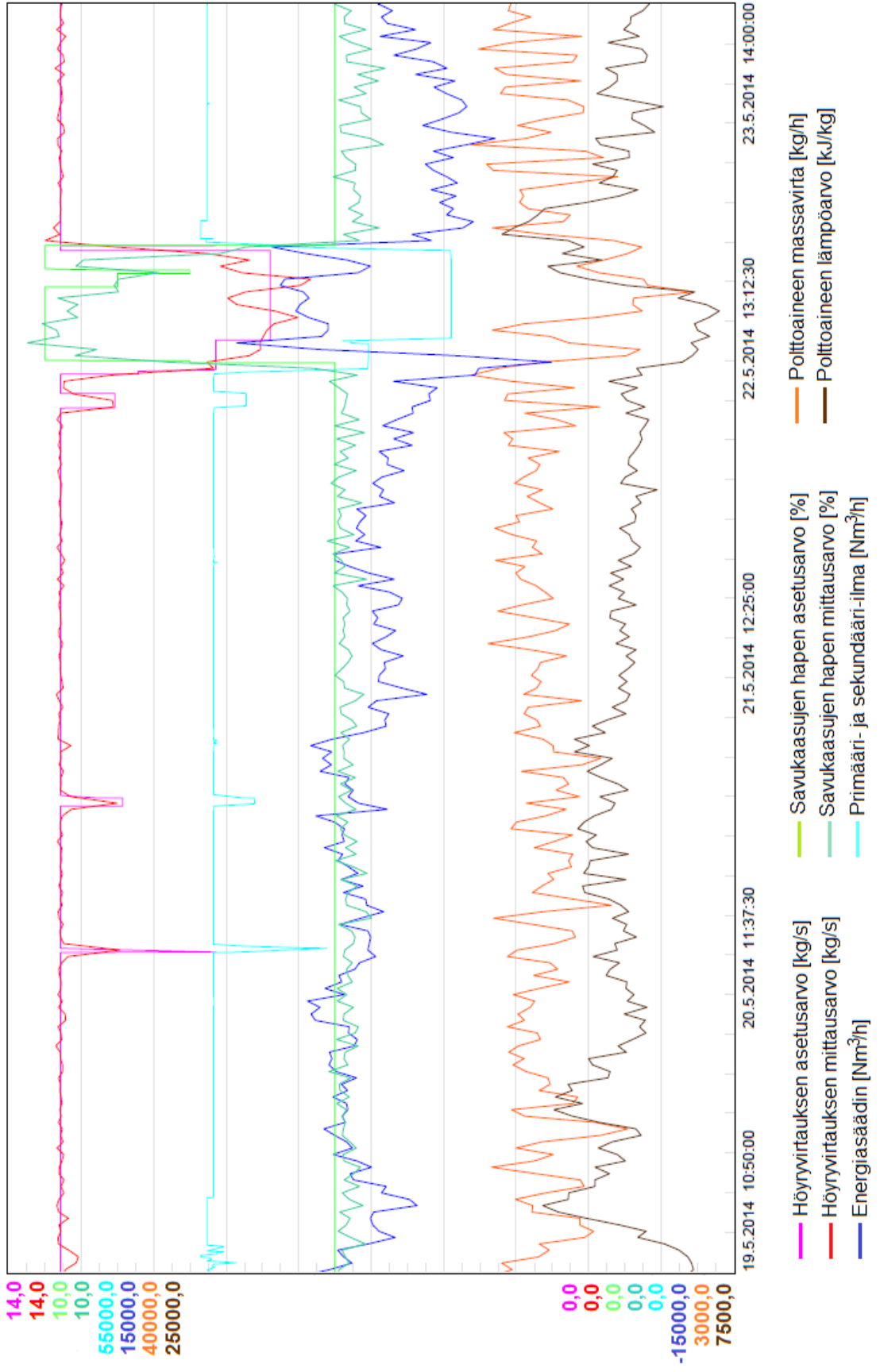
|   |                    |          |
|---|--------------------|----------|
| Polttoaineen teho (ei ilma)                     | MW                 | 38,21    |
| Primääri-ilman teho                             | MW                 | 1,19     |
| Kattilan höyryteho                              | MW                 | 41,27    |
| Syöttöveden teho                                | MW                 | 7,47     |
| Kattilan teho                                   | MW                 | 33,81    |
| <b>Taserajan ylittäviä virtauksia</b>           |                    |          |
| Polttoaineen massavirta                         | kg/h               | 13755,00 |
| Kuonan massavirta                               | kg/h               | 1788,15  |
| Lento- ja kattilatuhkan massavirta              | kg/h               | 126,74   |
| Primääri-ilman virtaus                          | Nm <sup>3</sup> /h | 28580,85 |
| Sekundääri-ilman virtaus                        | Nm <sup>3</sup> /h | 11154,85 |
| Palamisilman virtaus                            | Nm <sup>3</sup> /h | 49715,70 |
| Savukaasun virtaus                              | Nm <sup>3</sup> /h | 63372,21 |
| Savukaasun entalpia                             | kJ/m <sup>3</sup>  | 146,59   |
| Omakäyttö höyryn virtaus                        | kg/s               | 0,47     |
| <b>Häviöt</b>                                   |                    |          |
| Savukaasuhäviöt                                 | MW                 | 2,58     |
| Palamaton polttoaine:                           |                    |          |
| –kiintoaine                                     | MW                 | 0,52     |
| –kaasut   | MW                 | 0,01     |
| Säteilyhäviöt                                   | MW                 | 0,36     |
| Ulospuhallushäviöt                              | MW                 | 0,41     |
| Tuhkan termiset häviöt                          | MW                 | 0,15     |
| Omakäyttöhäviöt                                 | MW                 | 1,32     |
| Arinan jäähdytys                                | MW                 | 0,25     |
| YHTEENSÄ  | MW                 | 5,60     |
| <b>Kattilan hyötysuhde</b>                      |                    |          |
| –kattilaan tuotuihin energiavirtoihin perustuen | %                  | 85,80    |

## LIITE 2: KOEAJOJAKSOJEN PROSESSIDATA

1. Koeajo 12.5.-19.5.2014 (Savukaasujen jäännöshappi 6 %)



2. Koeajo 19.5.-23.5.2014 (Syöttöveden lämpötila 132 °C)



3. Koeajo 10.8.-12.8.2014 (Primääri-ilman lämpötilä 80 °C)

