

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma
Diplomityö

Sami Hiltunen

LIHALUUJAUHON POLTTAMINEN OLEMASSA OLE- VASSA KUPLAPETIKATILASSA

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
DI Kari Luostarinen

Ohjaaja: DI Matti Lehtinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan Koulutusohjelma

Sami Hiltunen

Lihaluujauhon polttaminen olemassa olevassa kuplapetikattilassa

Diplomityö 2021

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen, DI Kari Luostarinen

Ohjaaja: DI Matti Lehtinen

83 sivua, 18 kuvaa, 9 taulukkoa ja 6 liitettä

Hakusanat: Lihaluujauho, kuplapetikattila, kattilan likaantuminen, korroosio

Tässä diplomityössä tutkittiin mahdollisuutta polttaa luokan 1 lihaluujauhoa Honkajoen kattilalaitoksella. Tähän asti lihaluujauho on täytynyt hävittää polttamalla se jätteenä, mutta tulevaisuudessa myös polttoainekäyttö sallitaan kesällä 2020 annetun lainsäädäntömuutoksen johdosta. Lihaluujauhon hyödyntäminen energiantuotannossa parantaisi alueen kiertotaloutta, korvaisi turpeen käyttöä ja alentaisi energian tuotantokustannusta.

Työn kirjallisuusosassa käsiteltiin lihaluujauhoa ja sen valmistusta, vertailtiin soveltuvia polttotekniikoita ja esitettiin savukaasupäästöjen muodostumismekanismit. Työosuudessa arviotiin lihaluujauhon poltossa muodostuvia yhdisteitä kemiallisen tasapainolaskennan avulla. Likaantumisen ja korroosion kannalta kriittisimpiä yhdisteitä analysoitiin kirjallisuuden avulla ja arvioitiin, kuinka ne käyttäytyisivät Honkajoen kattilassa. Poltossa muodostuvia savukaasupäästöjä tutkittiin työn aikana suoritettujen koepolttojen avulla sekä teoreettiseen laskentaan perustuen. Työn lopussa käsiteltiin tarvittavia laitosmuutoksia, joiden avulla lihaluujauhoa pystyttäisiin polttamaan Honkajoen kattilassa sekä määritettiin niiden vaikutukset kattilan toimintaan työn aikana rakennetun laskentamallin avulla.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Degree Program in Energy Technology

Sami Hiltunen

Combustion of meat and bone meal in existing bubbling fluidized bed boiler

Master's Thesis 2021

Examiners: Professor Ph.D. (Tech) Esa Vakkilainen, M.Sc. (Tech) Kari Luostarinen

Supervisor: M.Sc. (Tech.) Matti Lehtinen

83 pages, 18 figures, 9 tables, and 6 appendixes

Keywords: Meat and bone meal, bubbling fluidized bed boiler, boiler fouling, corrosion

The aim of this thesis was to examine the possibility of meat and bone meal combustion at the bubbling fluidized bed boiler in Honkajoki. Until now the meat and bone meal has only been incinerated as waste, but in the future, the use as fuel will be allowed as a result of a legislative change. The utilization of meat and bone meal in energy production would improve the circular economy, replace peat use and reduce the cost of energy production.

The literature review of this thesis described the properties and production of the meat and bone meal, compared the possible combustion technologies, and presented the formation method of the flue gas emissions. Compounds formed in the combustion of the meat and bone meal were studied by chemical equilibrium calculation in the experimental part of the thesis. Most critical compounds in terms of fouling and corrosion were analyzed based on the literature. Based on the information found in the literature, the behavior of the compounds in the Honkajoki boiler was described. The flue gas emissions formed during the combustion were studied by test combustion and based on theoretical calculations. Possible plant changes, which are needed for the meat and bone meal combustion, were discussed at the end of the thesis. The effects of the changes on the boiler operation were determined using a boiler calculation model built during the thesis.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	7
2	LAINSÄÄDÄNTÖ	9
2.1	Lihaluujauhon polttoainekäyttö	10
2.2	Päästörajat lihaluujauhon seospoltossa.....	11
3	LIHALUUJAUHON VALMISTUS JA OMINAISUUDET	13
4	POLTTOTEKNIIKAT JA NIIDEN SOVELTUVUUS LIHALUUJAUHON POLTTAMISEEN	16
4.1	Leijukerros poltto	16
4.2	Arinapoltto.....	19
4.3	Poltinpoltto	22
5	SAVUKAASUPÄÄSTÖJEN MUODOSTUMINEN JA PUHDISTUSMENETELMÄT 25	
5.1	Typen oksidit	25
5.1.1	Typen oksidien muodostuminen	26
5.1.2	Typen oksidien vähentämismenetelmät	29
5.2	Rikin oksidit	31
5.2.1	Rikin oksidien muodostuminen	31
5.2.2	Rikin oksidien vähentämismenetelmät	32
5.3	Hiukkaset	34
5.3.1	Hiukkasten muodostuminen.....	34
5.3.2	Hiukkasten vähentämismenetelmät.....	35
6	HONKAJOEN HÖYRYKATTILAITOS	38
6.1	Kattila	38
6.2	Polttoaineensyöttöjärjestelmä.....	40
6.3	Ilma- ja savukaasujärjestelmät	40
6.4	Kattilalaitoksen mallinnus	41
7	HAASTEET LIHALUUJAUHON POLTTAMISESSA	43
7.1	Tuhkan käyttäytyminen palamisprosessissa.....	43
7.1.1	Tuhkaa muodostavat komponentit	43
7.1.2	Tuhkan sulamiskäyttäytyminen	47
7.1.3	Kuonaantuminen ja likaantuminen	48
7.1.4	Korroosio	50

7.2	Kemiallinen tasapaino	52
7.3	Savukaasupäästöt.....	55
8	LIHALUUJAUHON POLTTAMINEN HONKAJOEN KATTILALAITOKSELLA...	58
8.1	Likaantuminen ja korroosio.....	60
8.2	Savukaasupäästöt.....	64
9	KOEPOLTOT	67
10	TARVITTAVAT LAITOSMUUTOKSET.....	72
11	YHTEENVETO	75
	LÄHTEET	79

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

P	teho	W
p	paine	bar, Pa
T	lämpötila	°C, K

Alaindeksit

Pa	polttoaine
th	lämpö

Lyhenteet

HHV	kalorimetrinen lämpöarvo
LHV	tehollinen lämpöarvo
PAH	polysykliset aromaattiset hiilivedyt
PPSD	Power Plant Simulator & Designer
SCR	selektiivinen katalyyttinen pelkistysmenetelmä
SNCR	selektiivinen ei-katalyyttinen pelkistysmenetelmä
VOC	haihtuvat orgaaniset yhdisteet

1 JOHDANTO

Honkajoki Oy on Suomen johtava eläinperäisten sivutuotteiden käsittelijä, joka tuottaa erilaisia eläinproteiineja ja -rasvoja eri teollisuudenalojen käyttöön. Käsittelyprosessissa syntyvä lihaluujauho on proteiinijae, joka syntyy, kun proteiini, rasva ja kosteus erotetaan toisistaan. Lihaluujauhon sivutuoteluokka määräytyy raaka-aineen aiheuttaman terveysriskin mukaisesti ja se määrittelee, minkälaisessa käyttötarkoituksessa sitä voidaan hyödyntää. Eläinperäisten sivutuotteiden käsittelyä ja hävitystä käsitellään Euroopan parlamentin ja neuvoston sivutuoteasetuksessa, jonka mukaan luokan 1 lihaluujauho on tähän saakka täytynyt hävittää polttamalla se jätteenä. Kesäkuussa 2020 annettu Euroopan komission asetus ehdottaa sivutuoteasetuksen muuttamista siten, että tästä eteenpäin luokan 1 lihaluujauhoa voitaisiin käyttää polttolaitoksissa polttoaineena. Yksinkertaistettuna tämä tarkoittaa sitä, että polttolaitoksen ei tarvitsisi enää olla rekisteröity jätteenpolto- tai rinnakkaispolttolaitokseksi.

Honkajoki Oy:n Kirkkokallion tuotantolaitoksella käytettävä lämpöenergia tuotetaan vieressä sijaitsevalla Vatajankosken Sähkö Oy:n omistamalla kattilalaitoksella, jossa käytetään polttoaineena turvetta ja haketta. Turpeen kasvavien energiaverojen tai saatavuuden vaikeutumisen vuoksi Honkajoen kattilalaitoksella käytettävä turve tullaan lopulta todennäköisesti korvaamaan puuperäisillä polttoaineilla. Tämä järjestely tulee nostamaan energian tuotantokustannusta sekä myyntihintaa, koska puuperäiset polttoaineet ovat turvetta kalliimpia polttoaineita. Turpeen energiakäytön vähenemisen vuoksi turvetta polttavat polttolaitokset Suomessa lisäävät samanaikaisesti hakkeen osuutta polttoaineena ja tällä on edelleen hakkeen hintaa nostava vaikutus.

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia mahdollisuutta hyödyntää lihaluujauhoa polttoaineena Vatajankosken Sähkö Oy:n kattilalaitoksella. Lihaluujauhon polttoainekäytöllä saavutettaisiin paljon hyötyjä ja parannettaisiin kirkkokallion teollisuusalueen kiertotaloutta entisestään. Honkajoki Oy:n ei enää tarvitsi toimittaa lihaluujauhoa hävitettäväksi jätteenpolttolaitoksille, joka alentaisi jätteenpoltosta aiheutuvia hävitys- ja rahtikustannuksia. Vatajankosken Sähkö Oy:n kannalta lihaluujauhon käyttö helpottaisi turpeesta luopumista ja alentaisi energian tuotantokustannusta. Lainsäädäntömuutoksen mahdollistamasta lihaluujauhon

polttoainekäytöstä ei ole juurikaan kokemuksia. Tähän mennessä polttaminen on tapahtunut jätteenpolttolaitoksissa, jotka suunnitellaan huonolaatuisemmille polttoaineille esimerkiksi prosessiarvojen ja materiaalivalintojen suhteen. Polttoaineet voivat aiheuttaa kattilalle erilaisia käytettävyysongelmia, joista merkittävimpiä ovat likaantuminen ja korrosio.

Tämä diplomityö toimii esiselvityksenä, jonka tarkoitus on tukea investointipäätöksen tekoa. Samanaikaisesti suoritettussa esisuunnittelussa määritetään muutoskonsepti, budjettihinnat ja aikataulu muutosprojektille. Tämän työn alussa käsitellään lihaluujauhon polttoon liittyvää lainsäädäntöä ja sen aiheuttamia vaatimuksia. Tärkeimpinä vaatimuksina ovat polttoprosessin lämpötila ja viipymäaika, jotka vaikuttavat polttotekniikan valintaan merkittävästi. Tämän jälkeen työssä esitetään lihaluujauhon valmistusprosessi ja ominaispiirteet, vertaillaan mahdollisia polttotekniikoita sekä esitetään savukaasujen muodostumismekanismit. Lihaluujauhon polttamiseksi tarvitaan uusi, erillinen polttokammio viipymääjan ja lämpötilan saavuttamiseksi, jonka vuoksi polttotekniikoiden vertailu on merkittävässä roolissa teknisen toteutuksen ja investointikustannusten suhteen. Valittu polttotekniikka ja lihaluujauhon koostumus muuttavat kattilassa syntyviä päästötasoja. Lisäksi lihaluujauhon käyttö muuttaa nykyisiä päästörajoja, jonka vuoksi myös savukaasun käsittelyyn tulee kiinnittää huomiota investointia suunniteltaessa.

Diplomityön työosuudessa käsitellään lihaluujauhon poltosta aiheutuvaa likaantumista, korrosiota ja savukaasupäästöjä. Likaantumisen ja korroosion arvioimisessa hyödynnetään kemiallista tasapainolaskentaa, joka toteutetaan HSC Chemistry -ohjelmalla. Tasapainolaskuista saatuja, likaantumisen ja korroosion kannalta kriittisimpiä yhdisteitä ja niiden käyttäytymistä analysoidaan kirjallisuuden avulla. Lopuksi yhdisteiden käyttäytymisen perusteella arvioidaan kuinka likaantuminen Honkajoen kattilalaitoksella tapahtuisi ja miten sen aiheuttamilta ongelmilta voitaisiin välttyä. Lihaluujauhon poltosta aiheutuvia savukaasupäästöjä arvioidaan teorian ja diplomityön aikana suoritettujen koepolttojen perusteella. Työn lopussa esitetään mahdollisia, esiselvityksen mukaisia laitosmuutoksia, joiden avulla lihaluujauhon polttaminen olisi mahdollista Honkajoen kattilalaitoksella. Muutosehdotuksissa hyödynnetään työn aikana rakennettua kattilan laskentamallia, jonka avulla erilaisten järjestelmien ja menetelmien vaikutuksia kattilan toimintaan voidaan arvioida.

2 LAINSÄÄDÄNTÖ

Ihmisravinnoksi tarkoitamattomien eläinperäisten sivutuotteiden käsittelyä ja hyödyntämistä säännellään Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksessa 1069/2009/EY. Asetuksen tarkoituksena on minimoida ja torjua ihmisille ja eläimille aiheutuvia terveysriskejä sekä turvata elintarvike ja rehuketju. Asetuksen mukaan eläimistä saatavat sivutuotteet ja niistä johdetut tuotteet voidaan jakaa kolmeen luokkaan. Luokittelu tapahtuu niiden ihmisiin ja eläimiin kohdistuvan terveysriskin vakavuuden mukaan niin, että luokka 1 omaa korkeimman riskin. (Asetus 1069/2009/EY.) Edellä mainitun asetuksen täytäntöönpanoa käsitellään asetuksessa 142/2011/EU.

Luokkaan 1 luokiteltava aines on määritelty asetuksen 1069/2009/EY kahdeksannessa artiklassa ja siihen sisältyy esimerkiksi TSE-tautiepäilyn tai todetun taudin omaavat eläinten ruhot, TSE:n hävittämistoimenpiteiden yhteydessä lopetetut eläimet, muut eläimet kuin tuotantoeläimet ja luonnonvaraiset eläimet sekä asetuksen 999/2001/EY mukainen erikseen määritelty riskiaine. (Asetus 1069/2009/EY, 8–9.) Luokan 1 lihaluujauhon hävittäminen on toteutettu aikaisemmin polttamalla tai rinnakkaispolttamalla se jätteenä (Asetus 2020/735/EU, 1). Tällöin lihaluujauhon polttamisessa on jouduttu noudattamaan Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviä 2010/75/EU teollisuuden päästöistä sekä siihen pohjautuvan valtioneuvoston asetusta 151/2013. Kyseisessä asetuksessa on määritetty jätteenpolttolaitosten ja jätettä käyttävien rinnakkaispolttolaitoksien vaatimukset ja esimerkiksi ilmaan joutuvien päästöjen raja-arvot, tarvittavat lisäjärjestelmät sekä vaadittavat toimintaolosuhteet.

Verrattuna esimerkiksi biomassan polttoon, jätettä polttaessa lisävaatimuksia ilmaan johdettaville savukaasuille aiheuttavat raskasmetallien ja niiden yhdisteiden, fluorivedyn (HF), suolahapon (HCl) sekä dioksiinien ja furaanien raja-arvot. Poltto-olosuhteet tulee olla sellaiset, että saavutetaan savukaasujen kahden sekunnin viipymäaika 850 °C:ssa, ja se tulee varmistaa kattilaan sijoitetulla lisäpolttimella. Lisäksi polttoaineen syöttö tulee varustaa automaattisella järjestelmällä, joka estää syötön kattilan lämpötilan ollessa alle 850 °C tai savukaasupäästöjen raja-arvojen ylittyessä. (VNa 151/2013, 9–14 §.)

2.1 Lihaluujauhon polttoainekäyttö

Kesäkuun 2. päivänä 2020 annettu Euroopan komission asetus 2020/735 käsittelee lainsäädännön muuttamista siten, että lihaluujauhon käyttö polttoaineena polttolaitoksissa mahdollistettaisiin. Asetuksen mukaan lihaluujauhon poltossa kokonaislämpöteholtaan alle 50 MW:n laitoksissa tulee käyttää samoja päästöjen raja-arvoja, kun polttaessa siipikarjan lantaa polttoaineena. Lisäksi asetuksen mukaan lihaluujauhon seospoltossa voidaan käyttää asetuksen 2015/2193/EU päästörajoiden laskentasääntöjä kokonaispolttoteholtaan alle 50 MW:n polttolaitoksiin. Kokonaislämpöteholtaan yli 50 MW:n polttolaitokset, joissa poltetaan lihaluujauhoa, noudattavat direktiivin 2010/75/EU päästöjen raja-arvoja. (Asetus 2020/735/EU, 2.) Edellä mainitut muutokset tulee saattaa osaksi kansallista lainsäädäntöä, ennen kuin lihaluujauhon polttoainekäyttö Suomessa voidaan aloittaa.

Asetuksen 142/2011/EU liitteen kolme V-luvussa ja sen D-jaksossa esitetään lihaluujauhoa polttoaineena käyttävien kokonaislämpöteholtaan alle 50 MW polttolaitosten erityisvaatimuksia. Lihaluujauhon varastoinnissa tulee käyttää suljettua varastointilaa, johon eläimillä ei ole pääsyä. Laitoksessa on oltava automaattinen tai jatkuva polttoaineen hallintajärjestelmä ja polttoaine on syötettävä polttokammioon ilman polttoaineen muuta käsittelyä. Lämpötilavaatimuksen täyttämiseksi, tulee laitoksella olla käynnistyksen ja pysäytyksen aikana käytettävä lisäpoltin. Päästöt eivät saa ylittää taulukossa 1 esitettyjä päästöjen raja-arvoja ja ne on dokumentoitava siten, että viranomainen voi todentaa niiden noudattamisen. Mikäli päästöjen raja-arvot eivät täyty, on niistä tehtävä ilmoitus viranomaiselle ja varmistettava toiminnan säännösten mukaisuus. (Asetus 142/2011/EU, 40.)

Taulukko 1. Lihaluujauhon polttamista koskevat päästöjen raja-arvot 11 prosentin happipitoisuudessa ja kuivassa savukaasussa (Asetus 142/2011/EU, 39).

	Päästön raja-arvo mg/Nm ³
Rikkidioksidi	50
Typen oksidit (ilmaistuna NO ₂)	200
Hiukkaset	10

Erityisvaatimuksien lisäksi lihaluujauhoa polttavien laitosten on täytettävä asetuksen 142/2011/EU liitteen IV yleiset vaatimukset. Liitteessä on lueteltu polttolaitosten

toimintaolosuhteet, palamisjätettä koskevat vaatimukset, häiriö tai poikkeuksellisten toimintaolosuhteiden vaatimukset sekä muita yleisiä vaatimuksia. Yleisten vaatimusten perusteella vaadituista toimintaolosuhteista polton kannalta keskeisimmät ovat vaatimukset, joiden mukaan savukaasun lämpötila tulee nostaa joko kahdeksi sekunniksi 850 °C:seen tai 0,2 sekunniksi 1100 °C:seen ja orgaanisen hiilen määrä tuhkassa tulee olla alle kolme prosenttia tai niiden hehkutushäviö alle viisi prosenttia. Lämpötilavaatimuksen täyttymistä tulee seurata mittauksin ja näiden mittausten tulokset tulee tallentaa. Lisäksi esimerkiksi säiliöiden ja ajoneuvojen puhdistuksen on tapahduttava polttolaitoksen tiloissa sellaisella alueella, josta puhdistuksessa syntyvä jätevesi pystytään keräämään ja käsittelemään lainsäädännön mukaisesti. Polttolaitoksella on oltava dokumentein osoitettu tuholaisten torjuntaohjelma, puhdistus ja desinfiointimenettely sekä laitteiden ja ympäristön säännöllinen tarkastus hygieniavalvonnan mukaisesti. Hygieniavalvonnan tulokset ja aikataulut tulee dokumentoida ja niitä tulee säilyttää kaksi vuotta. (Asetus 142/2011/EU, 34.)

Polttolaitoksessa syntyvä palamisjäte täytyy varastoida kannellisiin ja tiiviisiin säiliöihin tai sille tarkoitettu suljetulle alueelle. Lisäksi palamisjätteen kuljetuksessa on estettävä sen joutuminen ympäristöön. (Asetus 142/2011/EU, 35–36.) Tällä hetkellä lihaluujauhon poltossa syntyvä tuhka ei sovellu lannoitteeksi tyyppinimen puuttumisen vuoksi. Mikäli lihaluujauhon poltossa syntyvä tuhka ja sen koostumus täyttäisi lannoitteille asetetut kriteerit, tulisi selvittää mahdollisuus hakea uusi tyyppinimi. Tämä mahdollistaisi lihaluujauhon poltossa syntyvän tuhkan käytön lannoitteena.

2.2 Päästörajat lihaluujauhon seospoltossa

Kuten kappaleessa 2 mainitaan, jäsenvaltiolla on oikeus soveltaa direktiivin 2015/2193/EU ja siihen pohjautuvan valtioneuvoston asetuksen 1065/2017 laskentasääntöjä päästöjen raja-arvoille alle 50 MW:n polttolaitoksissa, joissa poltetaan lihaluujauhoa seospolttona.

$$raja - arvo = \frac{raja-arvo_A \cdot P_A + raja-arvo_B \cdot P_B}{P_A + P_B} \quad (1)$$

jossa $raja-arvo_A$ on päästön raja-arvo polttoaineelle A [mg/Nm^3], $raja-arvo_B$ on päästön raja-arvo polttoaineelle B [mg/Nm^3], P_A on polttoaineen A polttoaineteho [MW] ja P_B on polttoaineen B polttoaineteho [MW].

Yhtälössä 1 on esitetty valtioneuvoston asetuksen mukainen päästörajojen laskentasääntö, jota voidaan soveltaa esimerkiksi lihaluujauhon ja turpeen tai hakkeen seospolton päästörajoja määrittäessä. Tässä diplomityössä käsitellään keskisuurta polttoaineteholtaan yli 5 MW kiinteän polttoaineen kattilalaitosta, jolloin on syytä huomioida myös taulukossa 2 esitetyt valtioneuvoston asetuksen 1065/2017 mukaiset päästörajat, joita kyseinen laitos ei saa ylittää 1.1.2025 alkaen.

Taulukko 2. Valtioneuvoston asetuksen 1065/2017 mukaiset päästörajat 1.1.2025 alkaen. (VNa 1065/2017, liite 1A).

	Hiukkaset mg/Nm ³	NO _x (laskettuna NO ₂) mg/Nm ³	SO ₂ mg/Nm ³
Kiinteä biomassa O ₂ =6 %	50 (5 < P ≤ 20 MW) 30 (P > 20 MW)	450	200
Muut kiinteä polttoaineet O ₂ =6 %	50 (5 < P ≤ 20 MW) 30 (P > 20 MW)	600 (turve) 420 (hiili) 650 (muut polttoaineet)	500 (5 < P ≤ 20 MW, turve) 1100 (5 < P ≤ 20 MW, hiili ja muut polttoaineet) 400 (P > 20 MW)

3 LIHALUUJAUHON VALMISTUS JA OMINAISUUDET

Lihaluujauhoa syntyy eläinperäisten sivutuotteiden käsittelyprosessista, jota kutsutaan renderöinniksi. Renderöintiprosessin tarkoituksena on steriloida sivutuotemassa ja poistaa siitä kosteus sekä erotella hyödynnettävät jakeet toisistaan. Prosessista saatava eroteltu rasva ja proteiinijakeet voidaan hyödyntää erilaisissa käyttötarkoituksissa riippuen aineksen sivutuoteluokasta. EU:n sivutuoteasetuksessa määritellään, millä käsittelymenetelmällä eri luokkiin kuuluvat sivutuotteet tulee käsitellä. Suomessa ainoa luokan 1 sivutuotteita käsittelevä yritys on Honkajoki Oy, jossa luokan 1 sivutuotteet käsitellään painesterilointimenetelmällä. Painesterilointimenetelmässä sivutuotteet tulee murskata alle 50 mm partikkelikokoon, jonka jälkeen ne steriloidaan. Sterilointi tapahtuu siten, että sivutuotemassan lämpötila nostetaan kolmen baarin paineessa yli 133 °C:seen vähintään 20 minuutiksi käyttäen höyryä väliaineena. (Asetus 142/2011/EU, 35–36.)

Honkajoki Oy:n käsittelemistä luokan 1 sivutuotteista lopputuotteina syntyy lihaluujauhoa ja rasvaa. Murskattu sivutuotemassa käsitellään lainsäädännön mukaisesti, jonka jälkeen rasva ja lihaluujauho erotellaan toisistaan. Erotettu rasva voidaan hyödyntää esimerkiksi biodieselin tuotannossa, kun taas luokan 1 lihaluujauho tulee hävittää polttamalla.

Polttoaineen ominaisuudet määrittävät mitkä polttotekniikat soveltuvat parhaiten kyseisen polttoaineen polttoon ja mitä asioita tulee ottaa laitoksen suunnittelussa huomioon. Polttolaitoksen käytettävyyden ja laitevaatimusten kannalta polttoaineiden tärkeimpiä selvitettäviä ominaisuuksia ovat kemiallinen koostumus, lämpöarvo, partikkelikoko, käsittelyominaisuudet, palamisominaisuudet sekä tuhkan ja savukaasujen koostumukset. Näiden ominaisuuksien perusteella pystytään määrittelemään esimerkiksi parhaiten soveltuva polttotekniikka, tuhka- ja savukaasujärjestelmät, polttoaineen syöttö- ja käsittelyjärjestelmät sekä arvioimaan mitä mahdollisia ongelmia poltossa voi esiintyä. Tyypillisiä polttoaineen aiheuttamia ongelmia ovat esimerkiksi kattilan likaantuminen, tuhkan sulaminen, korroosio, eroosio sekä päästöt. Lihaluujauhon koostumus on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Lihaluujauhon koostumus (Honkajoki Oy 2020).

Kosteus	2,2	%
Haihtuvat aineet	61,2	%
LHV, saapumistilassa	16,25	MJ/kg
Hiili, C	39,8	m-%, ka
Vety, H	5,7	m-%, ka
Happi, O	14,4	m-%, ka
Typpi, N	7,9	m-%, ka
Rikki, S	0,27	m-%, ka
Kloori, Cl	0,33	m-%, ka
Tuhkapitoisuus	31,6	m-%, ka

Lihaluujauho omaa korkean lämpöarvon ja alhaisen kosteuspitoisuuden, mitkä puoltavat sen käyttöä polttoaineena energiantuotannossa. Toisaalta lihaluujauhon tuhka-, typpi-, rikki- ja klooripitoisuudet ovat korkeat, joten kattilan suunnittelussa niihin tulee kiinnittää erityis- huomiota. Honkajoki Oy:n tuottama lihaluujauho on rouhemaista ja sen keskimääräinen partikkelikoko on alle 2 millimetriä.

Lihaluujauho sisältää myös paljon mineraaleja, kuten natriumia, kaliumia, kalsiumia, magnesiumia, fosforia ja piitä. Mineraalit vaikuttavat tuhkan koostumukseen ja käyttäytymiseen eri lämpötiloissa. Tyypillisesti tuhkan koostumus esitetään taulukossa 4 esitettyjen mineraalien oksideina ja tuhkan määrä ei tällöin vastaa mineraalien määrää, koska ne voivat hajota tai hapettua polton aikana. (Alakangas ym. 2016, 19). Mineraalien määrä kuiva-aineessa on esitetty taulukossa 4 ja niiden vaikutuksia lihaluujauhon polttamiseen käsitellään tarkemmin kappaleessa 7.

Taulukko 4. Lihaluujauhon mineraalipitoisuudet (Honkajoki Oy 2020).

Natrium, Na, vesiliukoinen	4700	mg/kg, ka
Kalium, K, vesiliukoinen	4500	mg/kg, ka
Kalsium, Ca	107000	mg/kg, ka
Magnesium, Mg	2100	mg/kg, ka
Fosfori, P	54500	mg/kg, ka
Pii, Si	1800	mg/kg, ka
Rauta, Fe	720	mg/kg, ka
Alumiini, Al	270	mg/kg, ka
Sinkki, Zn	86	mg/kg, ka

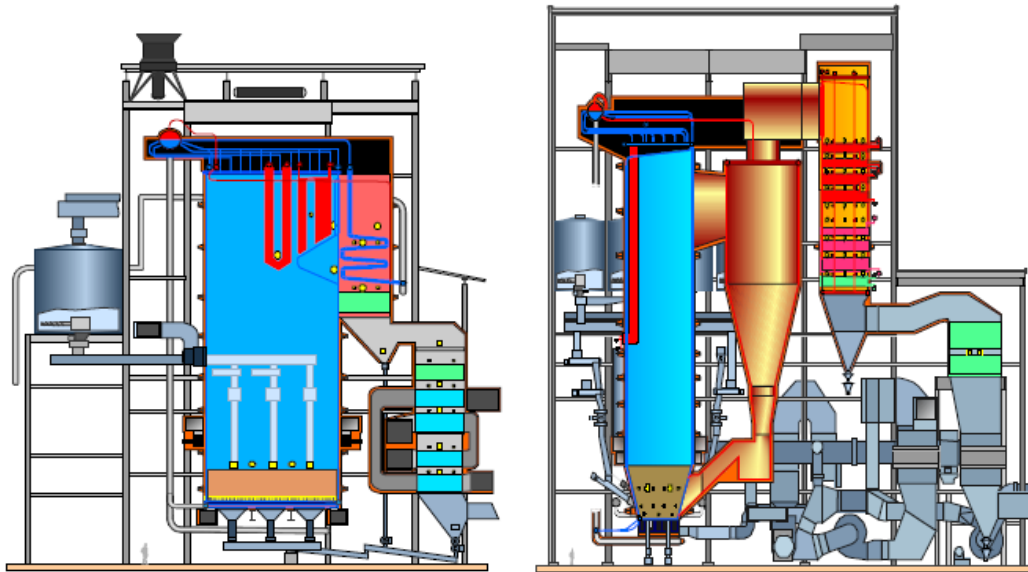
Polttoaineen käsittely- ja siirtojärjestelmien suunnittelussa tulee huomioida lihaluujauhon virtausominaisuudet. Vuonna 2006 Garcia ym. tekemän tutkimuksen mukaan lihaluujauhon ominaisuudet korreloivat hyvin rasvapitoisuuden ja polttoaineen lämpötilan kanssa. Tutkimuksen mukaan korkean rasvapitoisuuden omaavalla lihaluujauholla on taipumusta tarttua laitteiden pinnoille ja sitä kautta tukkia niitä. Alhaisemmassa lämpötilassa rasva on kiinteää ja täten omaa paremmat virtausominaisuudet. Lämpötilan noustessa rasva alkaa sulamaan ja lopulta noin 55 °C:een lämpötilassa on kokonaan nestettä, jolloin virtausominaisuudet huononevat. Toisaalta tutkimuksessa myös huomattiin, että lihaluujauholla on suurempi taipumus paakkuuntua alhaisessa lämpötilassa. (Garcia ym. 2006, 4.) Lämpötilan vaikutuksen ollessa merkittävä, tulee siihen kiinnittää erityishuomiota siirtojärjestelmien suunnittelussa, jotta ongelmilta vältytään. Poltinpoltossa lihaluujauho tulisi syöttää polttimelle pneumaattisesti, jolloin esimerkiksi kuljetusilman tulisi olla riittävän alhaisessa lämpötilassa. Ongelmien välttämiseksi olisi myös mahdollista tarkastella vaihtoehtoa, jossa lihaluujauhon sekaan lisättäisiin virtausominaisuuksia parantavaa ainetta.

4 POLTTOTEKNIIKAT JA NIIDEN SOVELTUVUUS LIHALUU- JAUHON POLTTAMISEEN

Höyrykattilan toimintaperiaate on yksinkertaisuudessaan siirtää polttoaineen palamisessa vapautuva lämpöenergia kattilaan pumpattuun syöttöveteen. Polttoaineen palaminen tapahtuu kattilan tulipesässä, jossa polttoainetta voidaan polttaa erilaisilla polttotekniikoilla. Kiinteän polttoaineen palaminen voidaan jakaa eri vaiheisiin, joita ovat polttoaineen kuivuminen, haihtuvien vapautuminen, hiiltojäännöksen palaminen sekä tuhkarreaktiot. Polttoainepartikkelin lämmitessä, siitä poistuu ensimmäiseksi kosteus ja haihtuvat aineet. Haihtuvien aineiden palaminen kestää noin 0,2–0,5 s ja mikäli polttoaine sisältää riittävästi haihtuvia aineita, ne kykenevät sytyttämään hiiltojäännöksen (Huhtinen ym. 2000, 83). Hiiltojäännöksen sisältämän hiilen palaessa, jää jäljelle tuhka eli polttoaineen epäorgaaninen aines. Kiinteille polttoaineille soveltuvia polttotekniikoita ovat arina-, leijukerros-, ja poltinpoltto. Kappaleissa 4.1–4.3 esitellään näiden polttotekniikoiden ominaispiirteitä ja niiden soveltuvuutta lihaluujauhon polttamiseen.

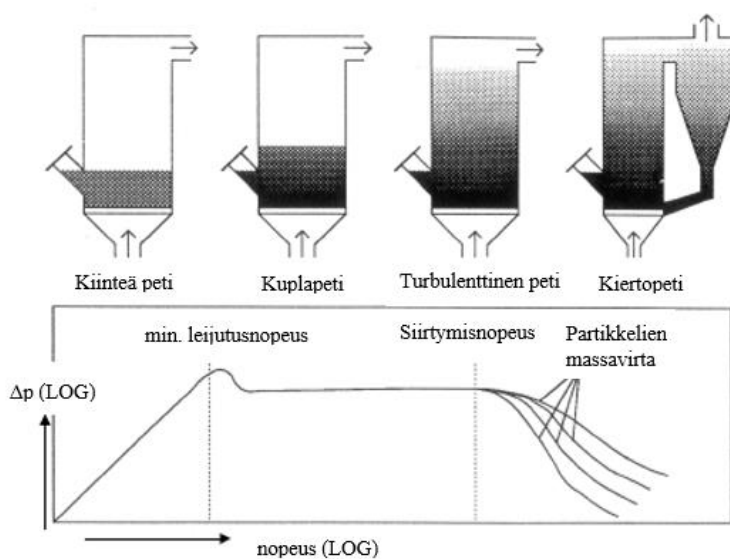
4.1 Leijukerrospoltto

Leijukerrospoltto on yleinen polttotekniikka etenkin suuremmissa kokoluokissa, koska se soveltuu hyvin huonolaatuisille polttoaineille sekä mahdollistaa helpon seospolton. Lisäksi leijukerrospolton etuina voidaan pitää alhaisia typenoksidipäästöjä sekä mahdollisuutta helppoon ja edulliseen rikinpoistoon, jossa syötetään kalkkia suoraan tulipesään (Huhtinen ym. 2000, 153). Leijukerrospoltoissa kattilan pohjassa sijaitsevan arinan suuttimista puhalletaan primääri-ilmaa, jolloin petimateriaali alkaa leijumaan. Petimateriaali koostuu leijutus- hiekasta, tuhkasta sekä petiin syötettävästä polttoaineesta. Leijukerroskattilat voidaan jakaa niiden toimintaperiaatteen mukaan kuplapetikattiloihin ja kiertoleijukattiloihin, jotka ovat esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Kuplapetikkattila (vas.) ja kiertoleijukattila (oik.) (Vakkilainen, 2010).

Leijutusilman nopeuden kasvaessa, myös pedin painehäviö kasvaa. Nopeuden saavuttaessa minimileijutusnopeuden, painehäviö on petimateriaalikerroksen hydrostaattisen paineen suuruinen (Huhtinen ym. 2000, 154). Tällöin leijutusilman kohdistama voima petiin on yhtä suuri kuin maan vetovoima ja peti alkaa leijua. Hiekkamainen petimateriaali alkaa kuplia minimileijutusnopeudessa ja nopeuden kasvaessa riittävästi saavutetaan siirtymänopeus, jolloin peti alkaa muuttua turbulenttiseksi. Turbulenttisessa pedissä hiekkapartikkelit alkavat kulkeutua savukaasujen mukana. Leijukerroksen painehäviön ja leijutusnopeuden vaikutukset leijutustapaan on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Leijukerroksen painehäviön ja nopeuden vaikutus leijutustapaan (muokattu lähteestä. Teir 2003, 37).

Kuplapetikattilassa leijutusnopeus on minimileijutusnopeuden ja siirtymänopeuden välissä, jolloin petimateriaali muodostaa tarkkarajaisen ja kuplivan pedin. Vastaavasti kiertoleijukattilassa nopeus on siirtymänopeutta suurempi, jolloin petimateriaali kulkeutuu savukaasujen mukana pois tulipesästä eikä peti muodosta selkeitä rajoja. Kiertoleijukattiloissa savukaasujen mukaan tempautuva petimateriaali erotetaan savukaasuista syklonilla, josta se palaute-taan takaisin tulipesään. Tyypillisesti petilämpötilat vaihtelevat 700–1000 °C:een välillä kuplapetikattiloissa ja 800–950 °C:een välillä kiertoleijukattiloissa. Leijutuskaasun nopeudet vaihtelevat kuplapetikattilassa 0,7–2 m/s välillä ja kiertoleijukattilassa 3–10 m/s välillä. (Huhtinen ym. 2000, 159–161). Tarvittavaan leijutuskaasun nopeuteen vaikuttavat petima-teriaalin partikkelikoko sekä tiheys ja siksi kiertoleijukattiloissa käytetään tyypillisesti hie-nojakoisempaa petimateriaalia. Kuplapetikattilassa pienet partikkelit voivat tempautua pri-määri-ilman mukaan kovilla ilman nopeuksilla, jolloin ne palavat tulipesän yläosassa petin sijaan. Kattilan suunnittelulla ja ilmajaolla voidaan varmistaa, että primääri-ilmaa on riittä-västä leijutukseen ja toisaalta ettei sitä ole liikaa, jolloin savukaasujen viipymäaika tuli-pesässä pienenee ja palamattomien osuus tuhkassa kasvaa. Ilmajaolla tarkoitetaan sitä, että kattilaan syötetään palamisilmaa primääri-ilman lisäksi myös sekundääri-ilmana. Sekun-dääri-ilmatasot sijaitsevat pedin yläpuolella yhdessä tai useammassa tasossa. Ilmajaolla on tarkoitus tasata tulipesän lämpötilaprofiilia ja varmistaa palamisen kannalta riittävä ilma-määrä.

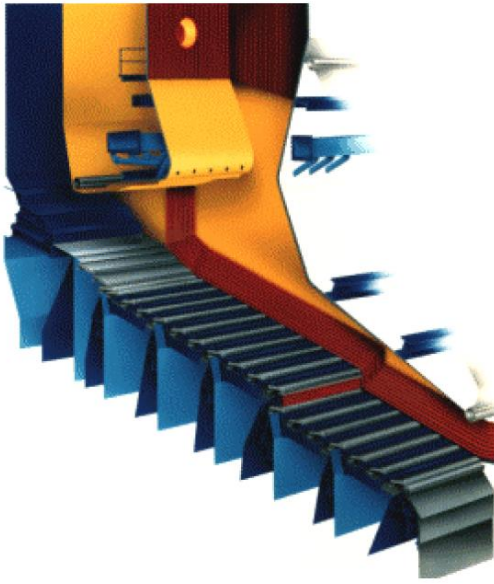
Leijukerroskattiloissa voidaan tyypillisesti polttaa eri lämpöarvon ja kosteuspitoisuuden omaavia polttoaineita. Lihaluujauhon kosteuspitoisuus on matala ja lämpöarvo saapumisti-lassa täten korkea, joten nämä ominaisuudet eivät aiheuta poltossa ongelmia. Leijukerros-poltto soveltuu suhteellisen korkeille tuhkapitoisuuksille, mikäli tuhka omaa korkean sula-mislämpötilan (Strömberg 2006, 16). Tuhkan alhainen sulamislämpötila ja korkea alkalipi-toisuus voi aiheuttaa leijukerros-poltossa likaantumisongelmien lisäksi pedin sintraantumista eli petihiekan yhteen liimatumista. Lihaluujauhon poltossa muodostuva tuhka omaa alhaisen sulamislämpötilan ja petimateriaalin kanssa reagoivia yhdisteitä, joita on esitetty tarkemmin kappaleessa 7. Nämä komponentit voivat aiheuttaa ongelmia, mikäli palamislämpötila nou-see riittävän korkeaksi. Sintraantumista voidaan kuitenkin hallita vaihtamalla petimateriaalia riittävästi tai käyttämällä sellaista petimateriaalia, joka ei reagoi alkaleiden kanssa. Tuhkan ominaisuuksien kannalta lihaluujauhon polttaminen leijukerros-polttona olisi suositeltavaa

tehdä seospolttona. Seospoltossa osa lihaluujauhosta korvattaisiin ominaisuuksiltaan paremmalla polttoaineella, jotta ongelmilta vältyttäisiin. Yleinen seospolttoaine esimerkiksi alkali- lipitoisten puupolttoaineiden kanssa on turve, joka sisältää kattilaa alkaleilta suojaavaa rikkiä ja alumiinisilikaatteja (Alakangas ym. 2016, 200). Seospoltossa tulee varmistaa polttoaineiden riittävä sekoittuminen, jotta saavutetaan tasainen palaminen ja vältytään paikallisilta lämpötilan nousuilta.

4.2 Arinapoltto

Arinapoltto on yleisin kiinteiden biomassapolttoaineiden polttoon käytetty polttotekniikka alle 10 MW_{th} kokoluokissa (Vakkilainen 2017, 284). Arinapoltossa polttoaine palaa kattilan pohjalla olevan arinan päällä joko paikallaan pysyvänä tai liikkuvana kerroksena riippuen arinan rakenteesta. Arinarakenteita on useita erilaisia ja erilaisille polttoaineille soveltuvia. Paikallaan pysyviä arinoita kutsutaan kiinteiksi arinoiksi ja liikkuvia arinoita mekaanisiksi arinoiksi. Arinakattiloissa ilman syöttö on vaiheistettu, samalla tavalla kuin leijukerroskattiloissakin. Primääri-ilma puhalletaan polttoaineen sekaan arinalla sijaitsevien aukkojen kautta arinan alapuolelta. Palamisen kannalta olisi optimaalista, jos ilmaa säädettäisiin erikseen palamisen eri vaiheisiin (Raiko ym. 2002, 474). Toimintaperiaatteen mukaisesti arinat voidaan jakaa lisäksi vesijäähdytteisiin ja ilmajäähdytteisiin arinoihin. Vesijäähdytteiset arinat ovat yhdistetty kattilan vesikiertoon ja ilmajäähdytteiset arinat jäähdytetään pelkällä primääri-ilmalla (Raiko ym. 2002, 474).

Kiinteitä arinoita ovat esimerkiksi taso- ja viistoarinat. Tasoarinoita käytetään vain pienissä kattiloissa, joihin polttoaine syötetään käsin (Huhtinen ym. 2000, 147). Viistoarinoissa arina asetetaan 30–50° kulmaan polttoaineesta riippuen. (Teir 2003, 90). Viistoarinan kaltevuus ja polttoaineeseen kohdistuva gravitaatiovoima saa polttoaineen liikkumaan arinalla. Tyypillisesti viistoarinan alapuolella sijaitsee tasoarina, jossa palamaton polttoaine palaa loppuun (Huhtinen ym. 2000, 147). Viistoarinan rakenne on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Viistoarinan rakenne (Teir 2003, 90).

Mekaanisia arinoita ovat esimerkiksi mekaaninen viistoarina ja ketjuarinat. Mekaanisessa viistoarinassa polttoaine liikkuu arinalla liikkuvien tai tärisevien arinarautojen avulla, jonka takia ne ovat tyypillisesti vähemmän kaltevia. Ketjuarina vastaavasti on tyypillisesti tasoarina, jossa arinaraudat ovat kiinnitettynä ketjuun, joka liikuttaa rautoja ja sitä kautta myös polttoainetta. (Huhtinen ym. 2000, 149–151.) Lisäksi esimerkki uudemmasta arinarakenteesta on niin kutsuttu kekoarina. Kekoarinalla polttoaine tuodaan kattilaan arinan alapuolelta, josta se valuu alaspäin arinan vaakasuuntaisen pyörimisliikkeen ansiosta. (Kpa Unicon 2020.) Kekoarina on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Kekoarina (Kpa Unicon 2020).

Merkittävimpiä ominaisuuksia arinan mitoituksessa on polttoaineen kosteus, palakoko, haihtuvien määrä ja tuhkan sulamiskäyttäytyminen. Korkean kosteuden omaavilla polttoaineilla luonnollisesti palamislämpötila on alhaisempi ja arinan kokoa joudutaan kasvattamaan, jotta arinalla on riittävästi tilaa polttoaineen kuivumisvaiheeseen. Polttoaineen partikkelikoon ollessa liian hienojakoista, voi polttoaineen ja ilman sekoittuminen estyä. Haihtuvien osuus polttoaineesta vaikuttaa tulipesän-, arinan ja ilmajärjestelmien mitoitukseen. Tuhkan sulaminen taas vaikuttaa muurattujen rakenteiden syöpyymiseen ja arinarakenteiden tukkeutumiseen. (Raiko ym. 2002, 469–471.) Lisäksi sulanut tuhka voi luonnollisesti aiheuttaa likaantumisongelmia myös muiden lämmönsiirtimien pinnoilla.

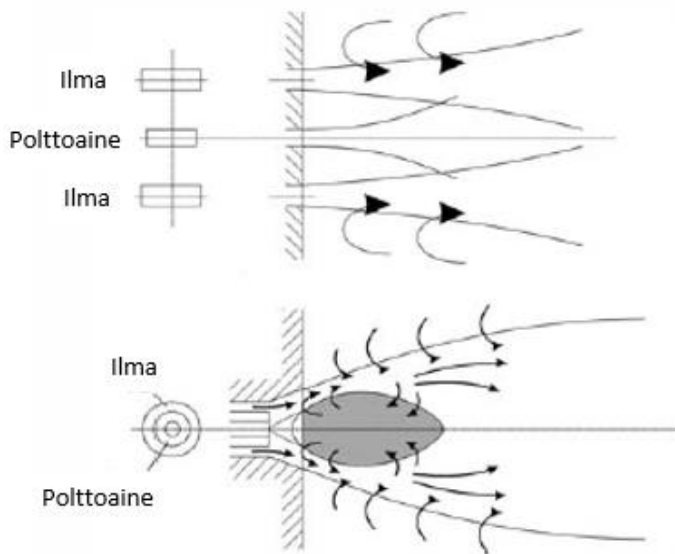
Lihaluujauhon arinapoltossa erityishuomiota tulisi kiinnittää tuhkapitoisuuteen, partikkelikokoon ja palamattomien määrään. Korkean tuhkapitoisuuden takia arinan tulisi olla mekaaninen arina, jolloin tuhka ei kasaantuisi arinalle. Partikkelikoon puolesta lihaluujauho on liian hienojakoista, jolloin polttoaineen ja ilman sekoittuminen voisi estyä tai lihaluujauho voisi kulkeutua pois arinalta primääri-ilman mukana. Esimerkkinä voidaan pitää jrsinturvetta, joka estää ilman ja polttoaineen sekoittumisen arinapoltossa liian pienen partikkelikoon vuoksi, ja täten ei sovellu arinapolttoon ilman seospolttoa (Raiko ym. 2002, 469). Lisäksi liian hienojakoinen partikkelikoko voi aiheuttaa polttoaineen putoamisen arinan läpi, jolloin palamattomien määrä kasvaa (Strömberg 2006, 16). Toisaalta etuna hienojakoisessa polttoaineessa on se, että pieni partikkelikoko nopeuttaa jäännöshiilen palamista, jolloin myös palamattomien määrä olisi alhaisempi (Raiko ym. 2002, 468). Arinapolttoa varten lihaluujauho voitaisiin esimerkiksi pelletöidä, jolloin partikkelikoko ei aiheuttaisi ongelmia. Pelletöinti kuitenkin nostaa polttoaineen käsittelyn vaatimaa energiankulutusta, jonka vuoksi sitä ei tule pitää ensisijaisena vaihtoehtona. Toinen vaihtoehto olisi polttaa lihaluujauhoa arinalla seospolttona jonkin toisen polttoaineen kanssa.

Lihaluujauhon poltossa orgaanisen hiilen määrä tuhkassa tulee olla alle kolme prosenttia tai niiden hehkutushäviö alle viisi prosenttia, kuten kappaleessa 2 mainittiin. Arinapoltossa tuhka putoaa arinan läpi tai poistetaan vaihtoehtoisesti jäännöshiilen palamiseen tarkoitetun tasoarinan kautta. Tyypillisesti arinapoltossa tuhkan hehkutushäviö on esimerkiksi leijukerospolttoa huomattavasti suurempi (Raiko ym. 2002, 475). Tästä syystä arina tulisi suunnitella siten, että palamattomien määrä saataisiin minimoitua. Tällöin jäännöshiilen

palamiseen tulisi varata riittävästi tilaa ja mitoittaa arina siten, että jäännöshiilellä on riittävästi aikaa palaa.

4.3 Poltinpoltto

Polttinpoltoissa hienojakoinen kiinteä polttoaine syötetään palamisilman mukana polttimelle, jonka tarkoitus on sekoittaa ilma ja polttoaine. Polttimet on tyypillisesti varustettu sytyttimellä sekä tarvittaessa tukipolttimella riittävän tasaisen palamisen varmistamiseksi. Kattilan poltinjärjestelmä voi koostua yhdestä tai useammasta polttimesta ja ne voidaan sijoittaa kattilaan usealla eri tavalla. Suurissa kattiloissa polttimet ovat tyypillisesti useammalla tasolla ja vastakkaisilla seinillä. Hiilen pölypoltossa polttimet usein sijoitetaan etuseinälle useammalle tasolle tai tulipesän nurkkiin, jolloin pesän keskelle muodostuu pyörre. Etupesäjärjestelmässä poltin voidaan sijoittaa polttokammion kattoon. Pölypoltinrakenteet voidaan jakaa suihku- ja sekoituspolttimiin, joiden toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Suihkupoltin (yläpuolella) ja sekoituspoltin (alapuolella) (muokattu lähteestä Spliethoff 2010, 254).

Suihkupolttimessa palamisilma tuodaan erillisinä suihkuina polttoainevirtauksen ylä- ja alapuolelta. Polttoaineen ja kantokaasuvirtauksen nopeus vaihtelee tavallisesti 20–30 m/s välillä ja palamisilma tuodaan tulipesään noin kaksinkertaisella nopeudella (Huhtinen ym. 2000, 142). Suihkupolttimessa tukipoltin on tavallisesti suutinryhmän alimmaisena tai ylimmäisenä. Sekoituspolttimessa vastaavasti palamisilma johdetaan tulipesään siivistön läpi, joka aiheuttaa virtaukseen pyörteen. Pyörteen vaikutuksesta kuumat savukaasut virtaavat

takaisin polttimen suuaukkoa kohden, jonka ansiosta polttoaine saadaan syttymään helposti. Tästä syystä sekoituspolttimet soveltuvat paremmin polttoaineille, jotka sisältävät vain vähän haihtuvia aineita. Sekoituspolttimessa ilmavirtauksen nopeuden ja siivistön rakenteen määrittelee polttoaineen ominaisuudet (Raiko ym. 2002, 458). Ilman nopeutta muuttamalla myös pyörteen voimakkuus muuttuu, joka puolestaan vaikuttaa liekin muotoon. Sekoituspolttimessa tukipoltin sijoitetaan tyypillisesti polttimen keskelle. Poltinpoltossa syntyviä NO_x-päästöjä voidaan hallita ns. low-NO_x polttimella, jossa ilman syöttö on vaiheistettu eri vaiheisiin.

Kiinteän polttoaineen poltinpoltossa yleisin käytetty polttoaine on kivihiili, mutta lisäksi pölypolttimessa on poltettu esimerkiksi puuta ja turvetta. Polttoaineen laatuvaatimusten osalta rajana voidaan pitää kosteuden osalta noin 60 % ja lämpöarvon osalta 5–7 MJ/kg (Raiko ym. 2002, 455). Haihtuvien osuus polttoaineesta tulee olla riittävän korkea, jotta varmistetaan polttoaineen syttyminen ja palaminen. Esimerkkinä haihtuvien vaikutuksesta voidaan pitää jyrshinturpeen ja kivihiilen syttymislämpötilan eroa. Jyrshinturpe sisältää noin 60–70 % haihtuvia aineita ja sen syttymislämpötila on 200–250 °C:tta, kun taas kivihiili vastaavasti sisältää haihtuvia aineita vain 28–37 % ja sen syttymislämpötila on 300 °C:tta (Huhtinen ym. 2000, 141).

Polttinpolto voidaan toteuttaa siten, että tuhka poistetaan kattilasta kuivana tai vaihtoehtoisesti sulana. Tuhkan poistomenetelmän valintaan vaikuttavat lähinnä polttoaineiden ominaisuudet. Sulapesäpoltto soveltuu vähän haihtuvia aineita ja korkean lämpöarvon omaaville polttoaineille (Raiko ym. 2002, 455). Tuhkan poisto sulana voidaan toteuttaa niin kutsutulla ”slag tap”-tulipesärakenteella tai syklonipolttimella. Nykyään kattilat, joista tuhka poistetaan sulana, ovat harvinaisia johtuen korkeammista huolto- ja investointikustannuksista. (Spliethoff 2010, 246.) Sulapesäpoltossa palamislämpötila pidetään niin kuumana, että tuhka sulaa. Tällöin haittana on se, että termisen NO_x:n osuus kasvaa ja tulipesän ja tuhkanpoistojärjestelmien pinnat kuluvat johtuen sulan tuhkan kuluttavasta vaikutuksesta. Sulapesäpoltton etuna on se, että likaavaa tuhkaa ei kulkeudu lentotuhkana kuin noin 15–35 %. Vastavasti, jos tuhka poistetaan kuivana, sitä kulkeutuu lentotuhkana noin 85–90 %. Lisäksi sulapesäpoltossa korkean palamislämpötilan ansiosta palamishyötysuhde on hyvä. (Huhtinen ym. 2000, 146.)

Lämpöarvon, kosteuden ja haihtuvien aineiden määrän suhteen lihaluujauho soveltuu poltinpoltoon hyvin. Lihaluujauhon kosteus on vain 2–3 %:n luokkaa, jonka ansiosta lihaluujauho syttyy nopeasti, eikä prosessiin tarvitse lisätä kuivausta ennen syöttöä polttimelle. Haihtuvia aineita lihaluujauhossa on 61,2 %, jonka ansiosta myös lihaluujauhon syttymislämpötila on matala verrattuna esimerkiksi kivihiileen. Poltinpoltoissa vaadittavan partikkelikoon määrittelee polttoaineen ominaisuudet sekä polttimen rakenne. Tyypillisesti kuitenkin vaadittu taso partikkelikoolle on alle 1 mm ja noin 20 % partikkeleista alle 0,1 mm (Strömberg 2006, 16). Honkajoki Oy:n lihaluujauhon partikkelikoon ollessa keskimäärin alle 2 mm, jouduttaisiin prosessiin lisäämään jauhin ja seula, millä saavutettaisiin tarvittava partikkelikoko. Lihaluujauhon poltinpoltoissa huomioitavaa on korkea tuhkapitoisuus ja suuri lentotuhkan osuus. Lisäksi korkea palamislämpötila voi aiheuttaa ongelmia tuhkan sulamisen takia, jolloin tuhkan likaavuus korostuu. Haasteena voidaan myös pitää lihaluujauhon pneumaattista syöttöä polttimelle, sillä rasvapitoisuuden vuoksi lihaluujauho omaa huonot virtausominaisuudet.

5 SAVUKAASUPÄÄSTÖJEN MUODOSTUMINEN JA PUHDISTUSMENETELMÄT

Polttoprosessissa syntyy paljon erilaisia yhdisteitä, jotka voivat olla haitallisia ihmisten terveydellä ja ympäristölle. Poltossa syntyviä suurimpia päästölähteitä ovat hiilidioksidi (CO_2), hiilimonoksidi (CO), typen oksidit (NO_x), rikin oksidit (SO_2) sekä hiukkaspäästöt. Lainsäädäntö asettaa päästörajat, joita energiantuotannossa ei saa ylittää. Tässä diplomityössä käsitellään polttoteholtaan alle 50 MW:n energiantuotantolaitosta, jonka päästörajojen muodostumisperusteet on esitetty kappaleessa 2.1. Polttoprosessissa syntyy myös edellä mainittujen lisäksi muita pienempiä päästölähteitä, kuten haihtuvia orgaanisia hiilivetyjä (VOC), polykyklisiä aromaattisia hiilivetyjä (PAH), halogeeneja, dioksiineja/furaaneja ja metalleja. Näitä ei kuitenkaan säädelä polttoteholtaan alle 50 MW energiantuotantolaitoksissa, jonka vuoksi niitä ei käsitellä tässä diplomityössä.

Lihaluujauho sisältää huomattavan paljon typpeä ja tuhkaa, jonka takia typen oksidien ja hiukkaspäästöjen määrään tulee kiinnittää erityishuomiota. Lisäksi lihaluujauhon rikkipitoisuus on korkea ja verrattavissa turpeen rikkipitoisuuteen. Korkean kalsium- ja alkalipitoisuuden takia lihaluujauholla voi olla itsessään rikin oksideja pelkistävä vaikutus.

5.1 Typen oksidit

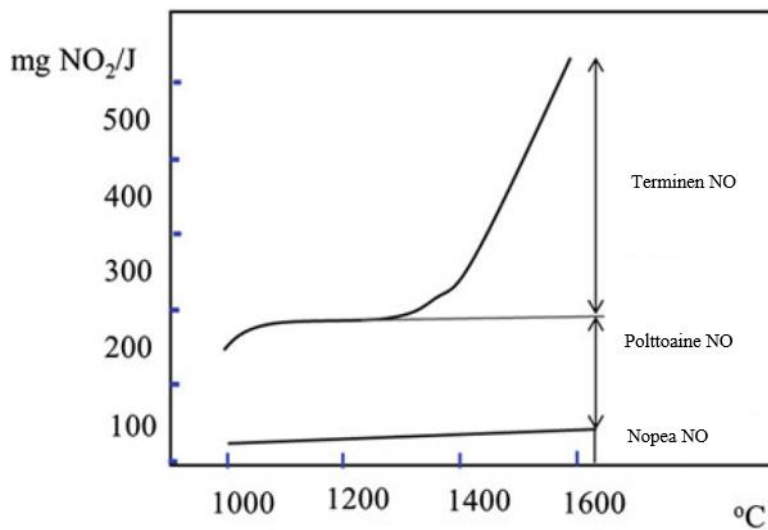
Polttoprosessissa syntyy aina typen oksidipäästöjä, sillä jokaisessa polttoaineessa on sitoutuneena typpeä. Lisäksi kattilaan tuodun palamisilman mukana on jokaista happimoolia kohden noin 3,77 moolia typpeä. Polttoprosessi syntyvistä typen oksideista merkittävimmät ovat typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO_2), joista käytetään yhteisnimitystä NO_x . Lisäksi etenkin leijukerrospoltoissa alhaisessa lämpötilassa ($< 900 \text{ }^\circ\text{C}$) voi muodostua dityppioksidia (N_2O) (Zevenhoven & Kilpinen 2004, 79). Tyypillisesti polttoprosessissa syntyvistä NO_x -päästöistä yli 95 % on typpimonoksidia ja vain alle 5 % typpidioksidia (Raiko ym. 2002, 300). Typpimonoksidi ja typpidioksidi eivät kuitenkaan eroa ympäristövaikutuksiltaan juurikaan, sillä suurin osa typpimonoksidista hapettuu typpidioksidiksi myöhemmin ilmakehässä (Zevenhoven & Kilpinen 2004, 63).

Eri polttoaineiden sisältämät typpipitoisuudet vaihtelevat suuresti ja vaikka kahdella eri polttoaineella olisi sama typpipitoisuus, ei muodostuvien typen oksidien määrä välttämättä olisi sama. Tutkimuksien mukaan esimerkiksi hiili vapauttaa suuren osan sen sisältämästä tyypestä vetysyanidina (HCN), kun taas vastaavasti turpeen ja puun typpi vapautuu ammoniakkinä (NH₃). Lisäksi polttoainekohtaisesti on eroja siinä, kuinka suuri osa polttoaineen sisältämästä tyypestä vapautuu haihtuvina. Edellä mainituilla asioilla on vaikutusta siihen, kuinka suuri osa polttoaineen tyypestä poistuu prosessista typen oksideina. (Zevenhoven & Kilpinen 2004, 68.)

5.1.1 Typen oksidien muodostuminen

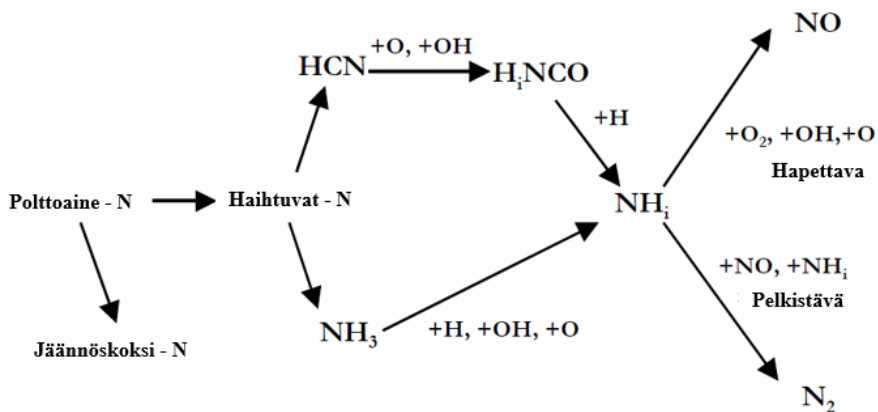
Polttoprosessissa typen oksideja muodostuu polttoaineeseen sitoutuneesta tyypestä ja ilman sisältämästä tyypestä erilaisten muodostumismekanismien kautta. Päämekanismeina voidaan pitää polttoaineen typen hapettumista, termisen NO:n muodostumista, nopean NO:n muodostumista, ja NO:n muodostumista N₂O-väliuotteen kautta. Suurin osa tyypestä reagoi typimonoksidista, mutta osa voi jatkaa reagoimista myös typpidioksidiksi.

Polttoaineeseen sitoutunut typpimäärä on pieni verrattuna palamisilman mukana kattilaan tulevaan typen määrään. Polttoaineen sisältämä typpi on kuitenkin huomattavasti reaktiivisempaa, jonka takia siitä muodostuvan NO_x:n osuus on suuri. Kuvassa 6 on esitetty tyypilliset polttoaineen tyypestä, termisestä NO:sta ja nopeasta NO:sta muodostuvien NO_x-päästöjen suhteet. Kuvasta 6 nähdään, että alle 1350–1400 °C lämpötiloissa termisen NO:n muodostuminen on lähes olematonta ja polttoaineen sisältämä typpi on suurin NO_x-päästöjen aiheuttaja, mutta tätä korkeammassa lämpötiloissa termisen NO:n muodostuminen kasvaa voimakkaasti.



Kuva 6. Lämpötilan vaikutus nopean NO:n, termisen NO:n ja polttoaineen tyypestä muodostuvan NO:n muodostumiseen (muokattu lähteestä. Tan 2014, 215).

Polttoaineen typen hapettuminen NO:ksi tapahtuu yksinkertaistettuna kuvan 7 reaktioiden mukaisesti. Lisäksi, kuten aiemmin mainittiin, leijukerros-poltossa HCN voi reagoida muodostaen N_2O :ta. Jäännöskoksin sisältämä tyyppi ei juurikaan reagoi muodostaen typen oksideja pelkistävissä olosuhteissa, mutta yli-ilmaisessa eli hapettavissa olosuhteissa myös jäännöskoksin sisältämä tyyppi hapettuu (Zevehoven & Kilpinen 2004, 70).

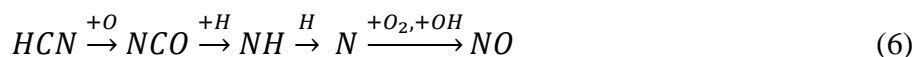


Kuva 7. Polttoaineen typen hapettuminen yksinkertaistettuna (muokattu lähteestä Zevehoven & Kilpinen 2004, 79.)

Ilman sisältämästä molekyylytypestä (N_2) muodostuneita NO_x -päästöjä kutsutaan termiseksi NO:ksi, nopeaksi NO:ksi, ja N_2O välituotteen kautta muodostuneeksi NO:ksi. Molekyylytyn ja happimolekyylin välinen reaktio on niin hidas, ettei se ehdi tapahtumaan polttoolosuhteissa. Sen sijaan molekyylytppi muodostaa typpimonoksidia laajennetun Zeldovichin reaktiomekanismin mukaisesti (Raiko ym. 2002, 300).



Laajennettu Zeldovichin reaktiomekanismi koostuu yhtälöistä 2–4. Yhtälö 4 kuvaa ali-ilmaista olosuhdetta, jolloin typpimonoksidi muodostuu happimolekyylin sijaan hydroksyyli-radikaalin avulla. Yhtälö 2 omaa korkean aktivaatioenergian ja lisäksi siinä tarvittavien O-atomien pitoisuus kasvaa lämpötilan noustessa, jonka takia Zeldovichin mekanismin mukainen reaktioketju tapahtuu vain korkeissa lämpötiloissa. Tästä syystä siitä käytetään nimitystä terminen NO. (Raiko ym. 2002, 300.)



Zelkovichin mekanismin lisäksi typpimolekyylit voivat reagoida hiilivetyjen kanssa yhtälön 5 mukaisesti, etenkin ali-ilmaisissa olosuhteissa. Hapen ollessa läsnä prosessissa, reaktiossa 5 muodostunut HCN ja typpi jatkaa reagoimista typpimonoksidiksi, yleensä yhtälön 6 mukaisesti. Kyseinen reaktiomekanismi tapahtuu palamisliekin alueella, jossa hiilivetyjä on läsnä. Reaktioketju tapahtuu hyvin nopeasti, jonka takia muodostunutta typpimonoksidia kutsutaan nopeaksi NO:ksi. (Zevenhoven & Kilpinen 2004, 76.)

Kolmannen mekanismin mukaisesti ilman typpimolekyylit muodostavat ensin dityppioksidia, jonka jälkeen happiatomin ja dityppioksidin välisessä reaktiossa typpimonoksidia.



Yhtälössä 7 esiintyvä M voi olla mikä tahansa kaasukomponentti. Toisin kuin yhtälössä 8 esitetään, voi dityppioksidi reagoida takaisin myös typpimolekyyliksi. Typpimonoksidin muodostuminen kuitenkin lisääntyy lämpötilan ja yli-ilmamäärän kasvaessa. (Raiko ym. 2002, 307.)

Leijukerrospoltoissa typen oksideja muodostavat reaktiot voivat tapahtua myös heterogeenisesti eli kaasumaisten komponenttien ja kiinteiden partikkeleiden välillä. Heterogeeniset reaktiot voivat tapahtua myös katalyyttisesti, kun katalyyttisiä kaasuja on prosessissa läsnä. Alhaisen lämpötilan takia 10–50 % polttoainetyypen haihtuvista syanidiyhdisteistä, eli esimerkiksi HCN:stä hapettuu dityppioksidiksi (Raiko ym. 2002, 320).



Yhtälöt 9 ja 10 kuvaavat dityppioksidin muodostumisreaktioita. Näiden reaktioiden lisäksi HCN voi hapettua katalyyttisesti CaO:n ja jäännöskoksin pinnalla. Lämpötilan ollessa yli 950 °C:sta, yhtälössä 9 muodostuva NCO reagoi dityppioksidin sijaan typpimonoksidiksi. Leijukerrospoltoissa myös 1–20 % koksijäännöksestä voi muodostaa dityppioksidia erilaisten reaktioiden kautta. Lisäksi koksijäännöksen sisältämä typpi voi muodostaa dityppioksidin sijaan typpimonoksidia. (Raiko ym. 2002, 320.) dityppioksidin muodostumisen lisäksi se voi hajota takaisin molekyylylitypeksi erilaisten heterogeenisten ja homogeenisten reaktioiden kautta.



Typpimonoksiin muodostuminen leijukerrospoltoissa voi tapahtua pääasiallisesti ammoniakin homogeenisen reaktion kautta tai hapettumalla kalsiumoksidin kanssa heterogeenisesti. Yhtälöt 11 ja 12 kuvaavat typpimonoksidin tärkeimpiä muodostumismekanismeja leijukerrospoltoissa. Yhtälössä 12 esiintyvä kalsiumoksidi on yleinen lisäaine, jota syötetään tulipesään rikinpoistomenetelmänä.

5.1.2 Typen oksidien vähentämismenetelmät

Typen oksidien muodostumista voidaan vähentää niin sanotuilla primäärisillä- ja sekundäärisillä menetelmillä. Primäärisiä menetelmiä ovat ilmanvaiheistus, polttoainevaiheistus ja kiertokaasun eli jäähtyneen savukaasun kierrätys takaisin tulipesään. Sekundäärisiä

vähennysmenetelmiä ovat selektiivinen ei-katalyyttinen pelkistys (SNCR) ja selektiivinen katalyyttinen pelkistys (SCR).

Polttoaineet voivat itsessään aikaansaada hajoamisreaktioita, jolloin jo muodostuneet typen oksidit pelkistyvät typpimolekyyleiksi. Tämän takia polttoainevaiheistusta voidaan käyttää typen oksidien vähentämismenetelmänä. Polttoainevaiheistuksessa primääripolttoaine poltetaan pääpalamisvaiheessa yli-ilmaisissa olosuhteissa. Tämän jälkeen noin 10–20 % primääripolttoaineen energiamäärästä lisätään sekundääripolttoaineena ilman lisäilmaa (Raiko ym. 2002, 312). Sekundääripolttoaineen lisäys muodostaa ali-ilmaisen tilan, jonka vuoksi muodostuneet typen oksidit pelkistyvät typpimolekyyleiksi hiilivetyradikaalien (CH_i) käynnistämän reaktion kautta (Raiko ym. 2002, 312). Loppupalamisvaiheessa prosessiin lisätään ilmaa sekundääripolttoaineen loppuun palamisen vuoksi, jolloin osa typpiyhdisteistä reagoivat typpimonoksidiksi tai molekyylylitypeksi. Loppupalamisvaiheessa alhaisella lämpötilalla ($<1000\text{ °C}$) voidaan edesauttaa, että typpiyhdisteet reagoivat molekyylylitypeksi. (Raiko ym. 2002, 313).

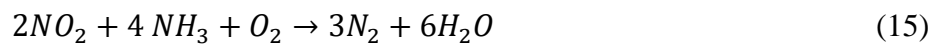
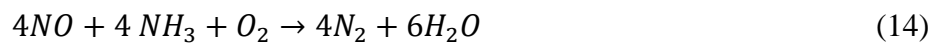
Ilmanvaiheistuksella typen oksideja voidaan vähentää 10–50 %, riippuen haihtuvien osuudesta polttoaineessa (Tan 2014, 268). Ilmanvaiheistus perustuu siihen, että pääpalamisvaiheessa palaminen tapahtuu ali-ilmaisesti, jolloin suurin osa HCN:stä ja NH_3 :sta reagoivat molekyylylitypeksi. Myöhemmin sekundääri-ilmana syötettävä lisäilma varmistaa polttoaineen loppuun palamisen, mutta ei muodosta typen oksideja vähäisten HCN- ja NH_3 - pitoisuuksien vuoksi. Ilman vaiheistuksella saavutetaan myös alhaisempi palamislämpötila, jolloin myöskään termistä NO:ta ei pääse syntymään. Palamislämpötilaa ja primääri-ilman happipitoisuutta voidaan myös laskea kierrättämällä jäähtynyttä savukaasua takaisin kattilaan primääri-ilman mukana.

SNCR-järjestelmässä ammoniakkia tai ureaa ruiskutetaan tulipesään noin 850–1000 °C:een lämpötilaikkunaan. SNCR järjestelmä on herkkä lämpötilalle, sillä liian alhaisessa lämpötilassa reagenssi jää reagoimatta ja kulkeutuu savukaasujen mukana ilmakehään ja toisaalta liian kovissa lämpötiloissa NH_3 voi reagoida typen oksideiksi. Leijukerroskattiloissa SNCR-järjestelmällä voidaan saavuttaa 30–50 % erotusaste (Vakkilainen 2012, 5).



Yhtälössä 13 esitettyssä SNCR-reaktiossa ammoniakki reagoi aminoradikaaleiksi, jotka puolestaan pelkistävät typen oksidit typpimolekyyleiksi.

SCR-järjestelmässä ammoniakki tai urea syötetään savukaasuihin, jonka jälkeen typen oksidit pelkistyvät katalyyttireaktorissa noin 300–400 °C:ssa. SCR-järjestelmällä voidaan saavuttaa 80–90 % erotusaste (Vakkilainen 2012, 5). Haittapuolena katalyyttireaktorissa on se, että tuhkan likaantuminen ja rikki voivat aiheuttaa katalyyttien deaktivoitumisen.



SCR-reaktio tapahtuu yksinkertaistettujen yhtälöiden 14 ja 15 mukaisesti, joissa typen oksidit reagoivat ammoniakin kanssa muodostaen lopputuotteena typpimolekyylejä ja vettä.

5.2 Rikin oksidit

Energiantuotannossa käytetyistä polttoaineista suurin osa sisältää jonkin verran rikkiä, joka muodostaa reagoimalla rikin oksideja (SO_x). Polttoaineen rikki voi olla polttoaineesta riippuen orgaanisesti sitoutunutta tai koostua epäorgaanisista yhdisteistä. Rikin vapautumiseen vaikuttaa se, minkälaisena yhdisteenä rikki esiintyy polttoaineessa.

5.2.1 Rikin oksidien muodostuminen

Polttoprosessissa osa polttoaineen rikistä muodostaa rikin oksideja ja osa voi sitoutua polttoaineen sisältämiin alkali- ja maa-alkalimetalleihin. Rikin ja alkalien välistä reagointia käsitellään tarkemmin kappaleessa 7. Tavallisesti rikin oksideista yli 98 % on rikkidioksidia (SO_2) ja loput rikkitrioksidia (SO_3) (Raiko ym. 2002, 345).

Osa rikkiyhdisteistä reagoivat palamisen pyrolyysivaiheessa esimerkiksi rikkivedyksi (H_2S) ja karbonyylisulfidiksi (COS). Karbonyylisulfidi jatkaa reagoimista muodostaen muun muassa lisää rikkivetyä ja rikkivety puolestaan hapettuu rikkidioksidiksi.



Tärkeimpinä reaktioina rikkidioksidin muodostumisessa voidaan pitää yhtälöitä 16 ja 17. Rikkitrioksidia puolestaan muodostuu, jos palamislämpötila kohoaa yli 1100 °C tai katalyyttisesti jo 500 °C:ssa. Katalyyttinen reaktio tarvitsee katalyyttejä kuten vanadiini-, nikkeli-, ja rautaoksideja. (Zevenhoven & Kilpinen 2004, 19.)



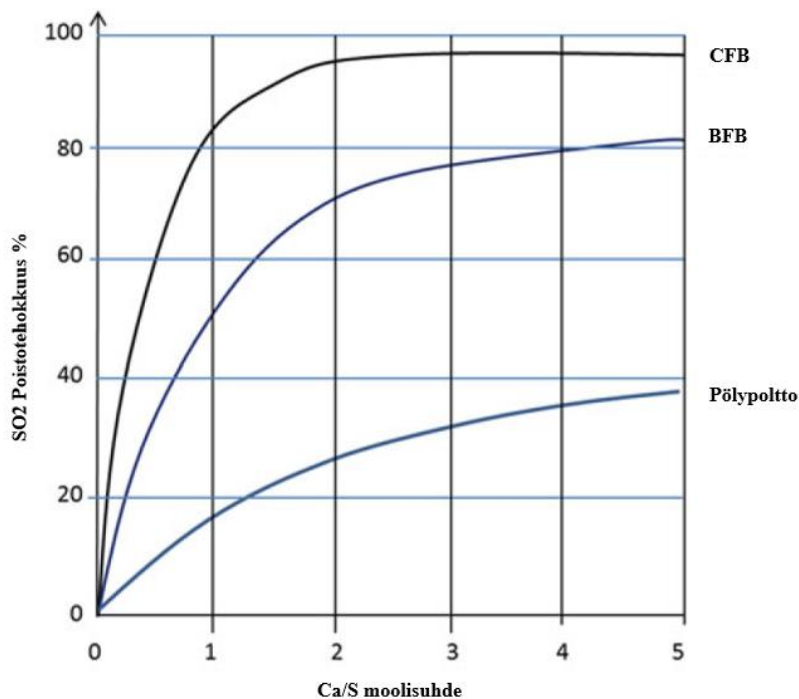
Rikkitrioksidin ja rikkihapon (H₂SO₄) muodostumisreaktiot on esitetty yhtälöissä 18 ja 19. Suurin osa rikkitrioksidista muodostuu tyypillisesti korkean lämpötilan aiheuttamana, mutta jos esimerkiksi tulistimien lämpöpinnoilla on katalyyttejä sisältävää kerrostumaa, voi rikkitrioksidia muodostua myös katalyyttisesti (Raiko ym. 2002, 348). Yhtälön 19 mukaisesti muodostuva rikkihappo aiheuttaa lämpöpintojen korroosiota, mikäli lämpötila alittaa kastepistelämpötilan. Tästä syystä kattilan viimeisten lämpöpintojen lämpötilat tulee mitoittaa riittävän korkeiksi.

5.2.2 Rikin oksidien vähentämismenetelmät

Rikin oksideja ei voida vähentää polttoteknisin menetelmin vaan vähentämällä polttoaineen rikkipitoisuutta tai sekundäärisillä menetelmillä. Sekundäärisiä menetelmiä ovat kuiva-, puolikuiva-, ja märkämenetelmä. Yksinkertaisin menetelmä polttoaineen rikkipitoisuuden vähentämiseksi, on korvata osa korkearikkisestä polttoaineesta vähemmän rikkisellä polttoaineella. Lihaluujauhon sisältäessä paljon alkaleja, korkeampi rikkipitoisuus voi olla kuitenkin alkalireaktioiden kannalta eduksi. Tästä syystä tässä diplomityössä käsitellään rikin oksidien vähentämistä savukaasuista, eikä niinkään polttoaineseoksesta. Lisäksi lihaluujauho sisältää huomattavan paljon kalsiumia, joka voi itsessään sitoa osan lihaluujauhon rikistä.

Rikin oksidien sitomiseen voidaan käyttää kalsiumyhdisteitä kuten kalkkikiveä, kalsiumoksidia tai dolomiittia. Tavallisten menetelmien lisäksi on olemassa myös ns. regeneroivia menetelmiä, joissa käytetään muita yhdisteitä, esimerkiksi natriumpohjaista yhdistettä.

Regeneroivien prosessien tarkoitus on mahdollistaa prosessissa käytetyn yhdisteen regeneroiminen prosessin jälkeen ja näin ollen vähentää rikinpoistossa käytetyn yhdisteen sekä jätteen määrä huomattavasti. Regeneroivia prosesseja ei kuitenkaan käsitellä tässä diplomityössä korkeampien investointikustannusten ja ominaiskulutuksen vuoksi. Kuivassa rikinpoistomenetelmässä jauhettua kalsiumyhdistettä voidaan puhalttaa tulipesän yläosaan tai kuumaan savukaasukanavaan. Vaihtoehtoisesti kalsiumyhdisteet voidaan lisätä savukaasuihin 150–400 °C:n lämpötiloissa. Leijukerrospoltoissa kalsiumyhdisteet on mahdollista lisätä suoraan petiin. Rikinpoiston tehokkuus riippuu lämpötila-alueesta, johon kalsiumyhdiste syötetään. Pölypoltoissa kuivalla menetelmällä voidaan saavuttaa 60–75 % rikin oksidien vähenemys, kun kalsiumin ja rikin suhde on noin 2–4 moolia (Tan 2014, 264). Kalsiumin ja rikin reaktioetju vaihtelee riippuen kalsiumyhdisteestä, mutta yksinkertaistettuna kalsiumyhdiste reagoi aluksi muodostaen kalsiumoksidia (CaO), jonka jälkeen kalsiumoksidi reagoi hapen ja rikkidioksidin kanssa muodostaen kalsiumsulfaattia (CaSO₄). Kuvassa 8 on esitetty Tulipesäinjektiolla saavutettavat reduktiot BFB, CFB ja hiilen pölypolttokattiloissa.



Kuva 8. Tulipesäinjektiön tehokkuus eri polttotekniikoilla (Muokattu lähteestä Tan 2014, 268).

Kuten kuvasta 8 nähdään, kuivalla rikinpoistomenetelmällä saavutetaan huomattavasti parempi poistotehokkuus leijukerrospoltoissa kuin pölypoltoissa. Injektiomenetelmän lisäksi

kuivaksi rikinpoistomenetelmäksi kutsutaan myös ns. kuivapesuri tekniikkaa, jossa pesurissa rakeina tai pellettinä olevat kalsiumyhdisteet reagoivat rikin oksidien kanssa tavallisesti hieman yli 350 °C:ssa (Tan 2014, 294).

Puolikuivassa rikinpoistomenetelmässä veden ja kalsiumyhdisteen seos sumutetaan pieninä pisaroina savukaasupesuriin. Sumutettu kalsiumyhdiste ja rikin oksidit reagoivat pesurissa, jonka seurauksena muodostuu kuivaa kalsiumsulfaattia. Puolikuiva menetelmä on yksinkertaisempi kuin märkä menetelmä, mutta sillä ei saavuteta yhtä hyvää erotustehokkuutta. Toisaalta siitä saatava kalsiumsulfaatti on kuivaa, jonka vuoksi sitä on helpompi käsitellä ja hyödyntää. Märässä rikinpoistomenetelmässä kalsiumpohjainen liete ja jäähtyneet savukaasut syötetään pesuriin, jossa reaktiotuotteena muodostuu kalsiumsulfiittia (CaSO_3). Erotustehokkuus märkäpesurissa voi olla yli 95 % (Raiko ym. 2002, 350). Vaikkakin lopputuote on lietteenä, se voidaan hyödyntää erottamalla kalsiumsulfiitti vedestä ja hapettamalla kalsiumsulfiitti kalsiumsulfaatiksi eli kipsiksi, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi rakennusmateriaalina (Raiko ym. 2002, 350).

5.3 Hiukkaset

Typen ja rikin oksidien lisäksi myös hiukkaspäästöille on asetettu päästörajat alle 50 MW:n energiantuotantolaitoksissa. Energiantuotantolaitosten lisäksi hiukkaspäästöjä syntyy muun muassa liikenteestä ja kotitalouksien puun poltosta. Hiukkaspäästöt aiheuttavat erilaisia terveyshaittoja ihmisille kulkeutumalla elimistöön hengityselimistön kautta sekä huonontavat kaupunkien ilmanlaatua. Polton aikana hiukkaspäästöjä syntyy pääasiassa polttoaineen tuhka, mutta myös esimerkiksi palamattomasta polttoaineesta.

5.3.1 Hiukkasten muodostuminen

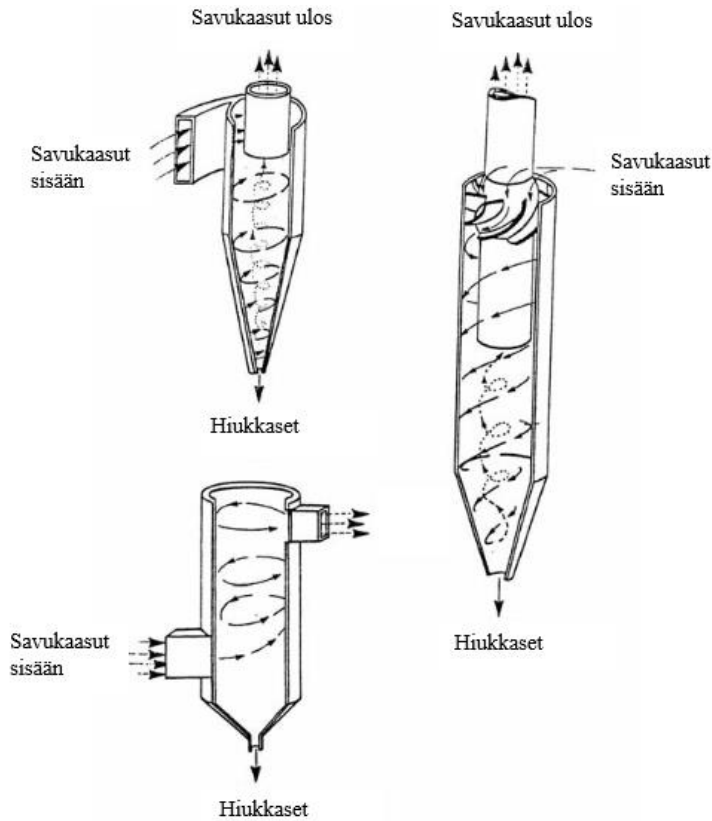
Polttoprosessissa polttoaineen sisältämät epäorgaaniset mineraalit muuntuvat joko kiinteiksi, nestemäisiksi tai kaasumaisiksi yhdisteiksi. Tuhkaa muodostavien epäorgaanisten aineiden määrä ja koostumus riippuu käytetystä polttoaineesta. Epäorgaanisten yhdisteiden lopullinen faasi riippuu monista asioista kuten lämpötilasta, paineesta, viipymääjasta ja partikkelikoosta (Tan 2014, 218). Lihaluujauho sisältää runsaasti tuhkaa muodostavia komponentteja, joiden käyttäytymistä käsitellään kappaleessa 7.

Leijukerrospoltoissa on tyypillisesti huomattavasti alhaisempi lämpötila ja suurempi polttoaineen partikkelikoko kuin pölypoltoissa. Alhaisen lämpötilan vaikutuksesta pienempi osa epäorgaanisesta materiaalista sulaa tai höyrystyy. Lisäksi suuremman partikkelikoon vuoksi suurempi osuus tuhkasta voidaan poistaa kattilasta pohjatuhkana. Pohjatuhkan lisäksi poltossa muodostuu myös hienojakoisempaa, savukaasujen mukaan tempautuvaa lentotuhkaa, jonka osuus myös leijukerrospoltoissa on huomattavasti pohjatuhkaa suurempi. Lentotuhkan eri komponentit voivat käyttäytyä eri tavalla kattilan läpi kulkiessaan, mutta lopulta suurin osa kulkeutuu savukaasujen mukana ulos kattilasta ja tällöin aiheuttavat hiukkaspäästöjä. Pölypoltoissa korkeamman lämpötilan seurauksena muodostuu enemmän kaasuuntuneita ja sulia yhdisteitä. Lisäksi hyvin pienen partikkelikoon vuoksi suurin osa tuhkasta tempautuu savukaasujen mukaan ja täten poistuu kattilasta hiukkasina. Arinapoltoissa polttoaine on tyypillisesti partikkelikooltaan suurempaa ja suurempi osuus tuhkasta poistetaan pohjatuhkana.

5.3.2 Hiukkasten vähentämismenetelmät

Hiukkaspäästöjä voidaan vähentää erilaisin menetelmin, joista yleisimpiä ovat sähkö- ja kuitusuodattimet. Lisäksi hiukkasia voidaan erottaa savukaasuvirrasta pesureilla, sykloneilla ja painovoimaan perustuvilla kammioilla. Erotusmenetelmän valintaan vaikuttaa poistettavien partikkelien koko, ominaisuudet ja pitoisuus savukaasuissa sekä savukaasujen tilavuusvirta, lämpötila, paine ja koostumus. Taloudellisesta näkökulmasta myös laitoksen koko vaikuttaa luonnollisesti erotusmenetelmän valintaa ja kannattavuuteen.

Painovoimaan perustuvassa erotuksessa savukaasu johdetaan kammioon, jossa kaasun nopeus putoaa ja hiukkaset putoavat gravitaatiovoiman vaikutuksesta tuhkan poistosuppiloon. Tällä menetelmällä osa hiukkasista saadaan erotettua hyvin yksinkertaisesti, mutta erotustehokkuus on huono etenkin pienemmillä partikkeleilla. Erotustehokkuus rajoittuu lähinnä 40–60 µm hiukkasiin, jonka vuoksi tätä menetelmää voidaan käyttää lähinnä esierottimena (Theodore 2008, 315). Painovoimaan perustuvia erottimia parempi erotustehokkuus saavutetaan sykloneilla, joskin nekin soveltuvat vain esierottimiksi liian alhaisen erotustehokkuuden takia (Theodore 2008, 361). Syklonissa savukaasut saatetaan pyörimisliikkeeseen, jolloin partikkelit osuvat syklonin seiniin ja valuvat alas tuhkan poistoaukkoon. Periaatekuva ylä-, aksiaalis-, ja pohjasyöttöiselle syklonille on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Ylä-, aksiaalis-, ja pohjasyöttöinen sykkloni (Muokattu lähteestä Theodore 2008, 363).

Yleisin voimalaitoksissa käytetty sykkloni on yläsyöttöinen sykkloni, mutta aksiaaliset sykklonit ovat yleisiä multisykloneissa, joilla saavutetaan parempi erotustehokkuus (Theodore 2008, 362). Syklonien erotustehokkuuteen vaikuttaa syklonin halkaisija ja suhteelliset mitasuhteet. Pidempi sykkloni kasvattaa savukaasun pyörimien kierrosten määrää, jolloin erotustehokkuus paranee. Sisääntulon poikkileikkaus vastaavasti kasvattaa kaasun nopeutta, jolloin erotustehokkuus paranee, mutta painehäviö kasvaa (Theodore 2008, 363).

Edelle mainittujen lisäksi savukaasujen hiukkaset voidaan erottaa erilaisilla savukaasupesureilla, jolloin samanaikaisesti voidaan poistaa myös kaasumaisia päästöjä kuten rikin oksideja. Savukaasupesurin hiukkasten erotus perustuu siihen, että savukaasut sekä vesi tai rikin poistoon soveltuva nestemäinen alkaliyhdiste sekoittuvat ja muodostavat yhdessä kasvavia pisaroita, jotka poistetaan savukaasuista pisaranerotimella. Tavallisen märkäpesurin haittana on 0–5 μm :n hiukkasten huono erotustehokkuus, mutta esimerkiksi venturirakenteisella pesurilla myös pienet hiukkaset saadaan erottua tehokkaasti (Theodore 2008, 453).

Etuna savukaasupesureilla on tehokas lämmöntalteenotto, jossa savukaasut jäädytetään alle kastepisteen ja täten vesihöyryn lauhtumislämpö saadaan talteen.

Yleisimmät ja tehokkaimmat hiukkasten erotusmenetelmät ovat sähkö-, ja kuitusuodattimet. Sähkösuodatin koostuu emissioelektrodista ja erotuselektrodista. Elektrodiin välinen jännite (30–70 kV) aiheuttaa voimakkaan sähkökentän, jonka seurauksena emissioelektrodit synnyttävät koronapurkauksen. Koronapurkauksen seurauksena syntyy ioneja, joista negatiivisesti varautuneet siirtyvät kohti erotuselektrodia ja samalla varaa savukaasuissa olevat hiukkaset. Negatiivisesti varautuneet hiukkaset kulkeutuvat kohti erotuselektrodia ja jäävät siihen kiinni. Erotuselektrodiin kiinnittyneet hiukkaset voidaan poistaa esimerkiksi täristemellä. (Huhtinen 2000, 253.) Yleisimmässä sähkösuodattimessa erotuselektrodeina käytetään levyjä ja emissioelektrodeina lankoja (Theodore 2008, 400). Sähkösuodattimessa ongelmia voivat aiheuttaa hiukkaset, jotka omaavat korkean resistiivisyyden, jolloin hiukkasten varaaminen voi aiheuttaa ongelmia. Etuina sähkösuodattimessa on pitkä käyttöikä, soveltuvuus suurille kaasumäärille, vähäinen tehonkulutus, alhainen painehäviö sekä soveltuvuus pienille hiukkasilla (Huhtinen 2000, 253).

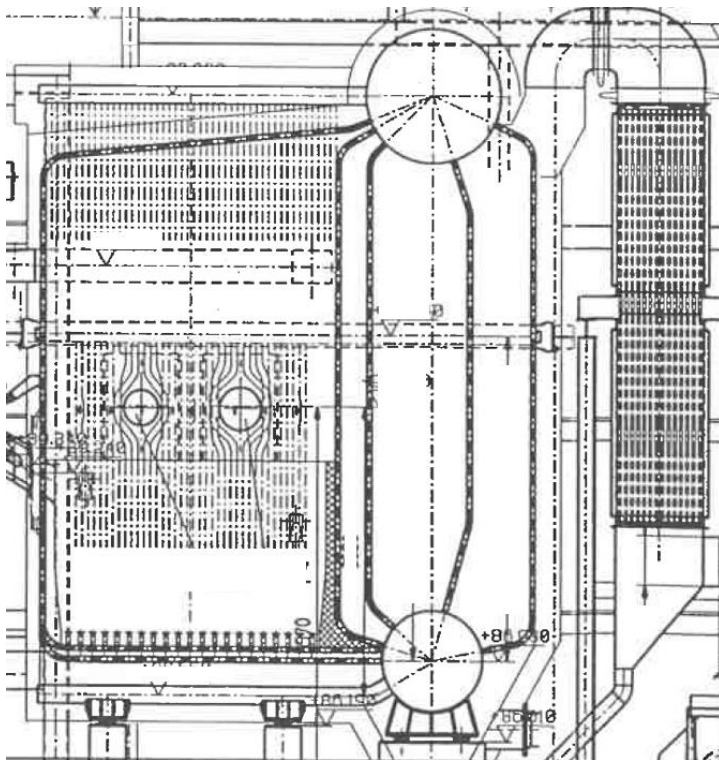
Kuitusuodattimessa savukaasut johdetaan kuitumaisen materiaalin läpi, jolloin hiukkaset erottuvat savukaasuista. Kuitusuodattimissa voidaan käyttää erilaisia materiaaleja ja suodatimen puhdistusmenetelmiä. Suodatinkankaat voivat olla luonnonkuitua, mineraalikuitua tai synteettistä kuitua. Teollisuudessa käytetyt kuitusuodattimet ovat tavallisesti pussisuodattimia, jotka ovat sijoitettu vierekkäin suodatinyksikköön. Savukaasut johdetaan toisesta päästä avoinna olevaan kangaspussiin, jolloin hiukkaset jäävät suodatinmateriaalin pinnalle savukaasun poistuessa suodattimesta. Suodattimet voidaan puhdistaa kerääntyneistä hiukkasista esimerkiksi paineilmalla tai täristemällä. Kuitusuodattimella voidaan erottaa tehokkaasti myös resistiiviset hiukkaset, mutta sähkösuodattimeen verrattuna painehäviö kasvaa kuitusuodattimessa suuremmaksi. (Huhtinen 2000, 253.)

6 HONKAJOEN HÖYRYKATTILALAITOS

Vatajankosken Sähkö Oy:n omistama Honkajoen höyrykattilalaitos on alun perin rakennettu Anjalankosken kartonkitehtaalle vuonna 1983, josta se sittemmin siirrettiin Kuopioon ja edelleen Honkajoelle vuonna 2008. Höyrykattila tuottaa kylläistä höyryä noin 28 baarin paineessa pääasiassa Honkajoki Oy:n käyttöön. Alun perin kattila on suunniteltu yli 100 baarin paineelle, mutta sittemmin muutosten yhteydessä mitoituspaine on laskettu 40 baariin. Polttoaineena laitoksella käytetään pääasiassa jrsinturvetta ja satunnaisesti haketta. Kattila on varustettu öljypolttimella, jota käytetään käynnistyspolttimena sekä tarvittaessa kuormapolttimena.

6.1 Kattila

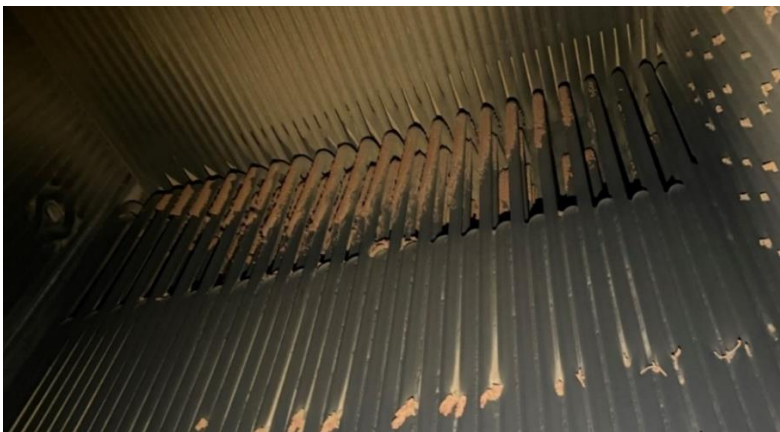
Laitoksen kattila on Tampellan valmistama kuplapetikkattila, jonka maksimi polttoaineteho on nykyään noin 14,9 MW. Kattilan höyryntuotto on noin 5,5 kg/s ja höyryn arvot 28 baaria ja 230 °C:ta. Kattilan lämmönsiirtopinnat koostuvat tulipesän höyrystimestä, 2-vedon kattilaputkista sekä ripaputkiekonomaiserista. Kattilan poikkileikkaus on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Honkajoen höyrykattilalaitoksen poikkileikkaus (Vatajankosken Sähkö Oy, 2020).

Kattilan vesi-höyryjärjestelmä toimii luonnonkiertoperiaatteella ja kattilassa on uudempiin kuplapetikattiloihin verrattuna erikoisuutena kaksilieriöinen rakenne. Syöttövesi tuodaan ekonomaiserilta kattilan ylälieriöön, josta se virtaa lieriöiden välisiä kattilaputkia pitkin alalieriöön. Alalieriöstä vesi johdetaan edelleen kuumempiin kattilaseinäputkiin, josta höyrystynyt vesi virtaa tiheyseroon perustuen takaisin ylälieriöön. Lieriössä vesi ja höyry erottuu toisistaan ja vesi palautuu takaisin laskuputkiin.

Kattilan tulipesän poikkipinta-ala on noin 13 m^2 ja korkeutta tulipesällä on noin 6 m. Kattilamuutosten yhteydessä leijuarinaa on pienennetty muurauksilla $6,7 \text{ m}^2$:iin. Tulipesästä poistuvat savukaasut johdetaan kattilan 2-vetoon takaseinän yläosasta, joka on esitetty kuvassa 11. Kattilan 2-veto on erotettu 3-vedosta eväputkiseinällä. Tulipesästä 2-vetoon johdetut savukaasut virtaavat alaspäin ja 3-vedossa ylöspäin kohti ekonomaiserikanavan sisäänmeno. 2- ja 3-vetoon sijoitettujen kattilaputkien poikittainen ja pitkittäinen putkijako on 130 mm. Kattilan 4-vedossa sijaitsevan ripaputkiekonomaiserin poikittainen ja pitkittäinen putkijako on 75 mm ja ripojen välinen etäisyys 25 mm. Kattilan nuohousjärjestelmä koostuu seitsemästä höyrynuohoimesta, joista neljä täysin ulosvedettävää nuohointia on sijoitettu lieriöiden välisten kattilaputkien nuohoukseen ja kolme osittain ulosvedettävää nuohointia ekonomaiseripakettien väliin. Pohjatuhkan poisto kattilasta tapahtuu arinalla sijaitsevien poistotorvien kautta ja lentotuhka poistetaan 2-vedosta, ekonomaiserin jälkeen sekä sähkösuodattimelta.



Kuva 11. Takaseinän yläosa

6.2 Polttoaineensyöttöjärjestelmä

Kattilalaitoksen polttoaine vastaanotetaan polttoainekentällä sijaitsevaan vastaanottorakennukseen. Vastaanottorakennuksesta polttoaine siirretään kolapurkaimella kolakuljettimelle, joka kuljettaa polttoaineen kattilarakennuksen polttoainesiiloon. Polttoainesiilo on varustettu polttotehoa säätävillä annosteluruuveilla, josta polttoaine siirretään edelleen vasemmalla sivuseinillä sijaitsevien polttoainetorvien kautta tulipesään. Polttoainetorvet on varustettu sulkusyöttimillä, jonka tarkoituksena on tasata polttoainevirtaa ja toimia takatulisuojana. Lisäksi polttoainetorveen johdetaan primääri-ilmakanavasta heittoilmaa, jolla varmistetaan polttoaineen tasainen jakautuminen tulipesään ja samanaikaisesti jäähdytetään torvea. Heittoilman ja syöttötorvien rakenteen on huomattu aiheuttavan ongelmia poltossa, sillä kevyt ja hienojakoinen turve ei virtaa kunnolla petiin vaan palaa osittain jo syöttötorven suulla ja tempautuu savukaasun mukana pois pediltä. Heittoilmapellin sulkemisella saavutetaan korkeammat tulipesän lämpötilat sekä huomattavasti pienempi palamattomien määrä lentotuhkassa. Syöttötorvien nykyisen rakenteen vuoksi heittoilmaa ei voi kuitenkaan pienentää syöttötorvien tukkeutumisen vuoksi. Polttoaineen syöttötorvet ja heittoilmaliitäntä on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Polttoaineen syöttötorvet ja heittoilmaliitäntä

6.3 Ilma- ja savukaasujärjestelmät

Palamisilma syötetään kattilaan primääri-, sekundääri-, poltin- ja heittoilmana. Palamisilma otetaan kattilarakennuksen sisä- ja ulkopuolelta sekä lämmitetään glykolilämmittimellä tarvittaessa 0 °C:seen, jonka jälkeen se jaetaan primääri-, sekundääri-, ja poltinilmakanaviin,

jotka ovat varustettuna omilla puhaltimillaan. Lisäksi kattilaan tuodaan pieniä määriä ($<0,15 \text{ m}^3/\text{s}$) lauhtumattomia hajukaasuja Honkajoki Oy:n prosesseista. Primääri-ilma johdetaan arinan alla sijaitsevaan ilmakaappiin, josta se jakautuu leijuilmasuuttimille. Pedin lämpötilan säätämiseksi noin $850 \text{ }^\circ\text{C}$:seen, voidaan osa primääri-ilmasta korvata kiertokaasulla, jolloin leijukaasun happipitoisuus vähenee pedillä ja sekundääri-ilman tarve lisääntyy. Sekundääri-ilma syötetään kattilaan oikealta ja vasemmalta sivuseinältä arinalta mitattuna noin kolmen metrin korkeudesta. Sekundääri-ilma suuttimista neljä sijaitsee oikealla ja kolme vasemmalla sivuseinällä.

Kattila on varustettu kaksikenttäisellä sähkösuodattimella, joka sijaitsee savukaasun virtaus-suunnassa ennen savukaasupuhallinta. Savukaasupuhaltimelta savukaasut johdetaan 40 m korkeaan teräspiippuun. Sähkösuodatin, savukaasupuhallin ja savupiippu ovat esitetty kuvassa 13. Savukaasujärjestelmä on varustettu jatkuvatoimisilla hiilimonoksidin, jäännöshapen ja hiukkaspitoisuusmittauksilla. Savukaasujen lämpötilaa mitataan ekonomaiserin jälkeisestä kanavasta ennen sähkösuodatinta.



Kuva 13. Sähkösuodatin, savukaasupuhallin ja savupiippu

6.4 Kattilalaitoksen mallinnus

Lihaluujauhon polttoa varten Honkajoen kattilalaitoksella joudutaan tekemään polttoteknisiä muutoksia, koska lainasettamien vaatimusten mukaisesti lihaluujauhon poltossa tulee

saavuttaa kahden sekunnin viipymäaika 850 °C:ssa. Matalan tulipesän ja alhaisen lämpötilan vuoksi tätä ei nykyisillä järjestelmillä saavuteta. Muutosten vaikutusta kattilan käyttäytymiseen voidaan arvioida simuloinnilla, jonka vuoksi kattilalaitos mallinnetaan PPSD-ohjelmistolla yhteistyössä Rantotek Oy:n kanssa. Kattilan malli suunnitellaan vastaamaan nykyistä huippukuormatilannetta ja validoidaan lopulta olemassa olevan prosessidatan avulla.

Valmiin kattilamallin savukaasu- ja vesipuoli on esitetty Liitteessä 1. Polttoaineena laskennassa on käytetty turvetta, jonka koostumus on esitetty taulukossa 5. Savukaasupuolella tulipesää mallinnetaan säteilykammoiden avulla, joiden sisälle on sijoitettu tulipesän seinäputket. Vesipuolella lieriö kattaa koko luonnonkieron eli sen sisälle on sijoitettu tulipesän seinät, alalieriö sekä lieriöiden välisen kattilaputket. Syöttöveden määrää ja painetta säädetään lieriön pinnan ja höyryn paineen mukaisesti. Primääri-ilman määrää säädetään siten, että saavutetaan ali-ilmainen vyöhyke ja toisaalta optimaalinen leijutusnopeus. Sekundääri-ilman syötöllä säädetään savukaasun happipitoisuudeksi noin 4 %. Mallin mukaan savukaasun lämpötila on tulipesän yläosassa noin 866 °C:tta, hilan jälkeen noin 360 °C:tta ja ekonomaiseripakettien jälkeen noin 131 °C:tta. Hilan ja ekonomaiseripakettien jälkeiset lämpötilat vastaavat hyvin todellista tilannetta, mutta tulipesän lämpötila on todellisuudessa alhaisempi nykyisellä ajotavalla. Tämän voi selittää aiemmin mainittu polttoaineen syötön heittoilma, jonka vuoksi polttoaine ei pala pedillä. Tätä väitettä tukee myös se, että palamattomien määrä savukaasuissa on korkea heittoilman ollessa päällä. Tulipesän lämpötila nousee 850–900 °C:een ja palamattoman polttoaineen määrä savukaasuissa vähenee huomattavasti, mikäli heittoilma kytketään pois päältä. Polttoaineensyöttötorvilla on kuitenkin taipumusta tukkiutua rakenteensa vuoksi ja tämän vuoksi ne tulisi uusia ongelman korjaamiseksi. Vesipuolen taseessa alkuarvoina on syötetty syöttöveden lämpötila sekä haluttu höyryn paine ja massavirta. Syöttöveden lämpötila ekonomaiseripakettien jälkeen sekä kylläisen höyryn arvot vastaavat todellista tilannetta.

7 HAASTEET LIHALUUJAUHON POLTTAMISESSA

Kaikki polttoaineet eroavat toisistaan koostumukseltaan ja ominaisuuksiltaan, jonka vuoksi ne aiheuttavat erilaisia vaatimuksia ja haasteita polttolaitokselle esimerkiksi päästöjen ja käytettävyyden kannalta. Lihaluujauhon osalta pääasialliset päästöt aiheuttavat komponentit ovat rikki-, typpi- ja epäorgaaninen aines. Polttoaineen koostumuksen vaikutus käytettävyyteen riippuu kuonaantumista, likaantumista, korroosiota, sintraantumista ja muita tuhkaongelmia aiheuttavista komponenteista. Lihaluujauhon osalta tärkeimmät huomioon otettavat aineet, niiden ominaisuuksien ja korkeiden pitoisuuksien vuoksi ovat natrium, kalium, kloori, rikki, kalsium ja fosfori. Tuhkaongelmien riskiä voidaan vähentää laitoksen huolellisella suunnittelulla. Päästöjen näkökulmasta ongelmat ovat yleensä helposti ratkaistavissa savukaasujen puhdistusjärjestelmillä, joskin tällöin huomiota tulee kiinnittää järjestelmän kustannuksiin. Tuhkaongelmat ovat tyypillisesti hankalampia, varsinkin jos kyseessä on olemassa oleva laitos. Esimerkiksi kattilan rakenteella ja lämpöpintojen lämpötiloilla on merkittävä vaikutus tuhkan likaavuuden ja korroosion kannalta. Tässä kappaleessa käsitellään lihaluujauhon poltossa huomioon otettavia asioita sekä arvioidaan lihaluujauhoa polttoaineena.

7.1 Tuhkan käyttäytyminen palamisprosessissa

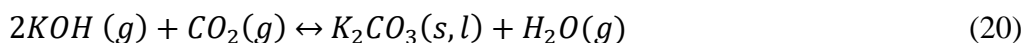
Tuhkan käyttäytymiseen vaikuttaa sen sisältämät alkuaineet, niiden muodostamat yhdisteet ja kuinka ne ovat sitoutuneena polttoaineeseen. Tässä kappaleessa käsitellään tuhkaa muodostavien komponenttien käyttäytymistä poltossa, ongelmien syntymekanismia ja arvioidaan lihaluujauhoa polttoaineena tuhkaongelmien näkökulmasta. Kuonaantumisen, likaantumisen ja korroosion arvioimisessa on tärkeää ymmärtää mekanismit, joilla kyseisiä ongelmia muodostuu. Tällä tavoin kattilan suunnittelulla voidaan vaikuttaa tuhkaongelmien syntyyn ja ehkäisyyn.

7.1.1 Tuhkaa muodostavat komponentit

Tulipesässä polttoaineen lämmitessä se kuivuu nopeasti, jonka jälkeen haihtuvat aineet vapautuvat polttoaineesta. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden lisäksi myös osa epäorgaanisesta aineksesta vapautuu polttoaineesta orgaanisten yhdisteiden mukana kaasumaisena. Hiiltojäännöksen palaessa epäorgaaninen aines muodostaa tuhkaa, jonka partikkelikokoon

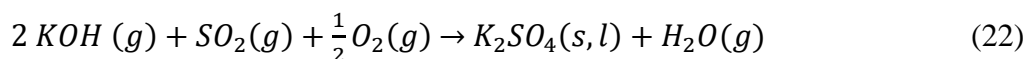
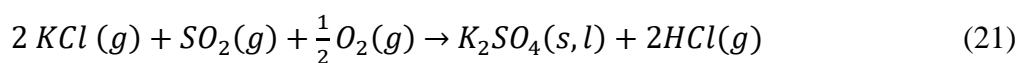
vaikuttaa esimerkiksi polttoaineen partikkelikoko ja koostumus. Polttoprosessin kannalta hankalammiksi komponenteiksi polttoaineessa mielletään alkalit ja kloori, jotka aiheuttavat kattilan likaantumista ja korroosiota.

Poltto-olosuhteista eli esimerkiksi lämpötilasta riippuen, merkittävä osuus kaliumista voi muodostaa kaasumaisia yhdisteitä, jotka ovat erittäin hankalia kattilan käytettävyyden kannalta. Reaktiivinen kalium muodostaa korkeissa lämpötiloissa kaasumaisia komponentteja, kuten kaliumhydroksidia (KOH) ja kaliumkloridia (KCl), jos klooria on esimerkiksi vetykloridina (HCl) läsnä prosessissa. Mikäli polttoaine ei sisällä klooria, kalium voi kaasuuntua esimerkiksi kaliumatomina (K), pelkistyvissä olosuhteissa karbonaattina (K_2CO_3) tai hapettavissa olosuhteissa hydroksidina. (Zevenhoven ym. 2012, 16.) Muodostuvien kaasumaisten yhdisteiden käyttäytyminen kattilassa riippuu vahvasti polttoaineen rikkipitoisuudesta. Mikäli rikkiä ei ole prosessissa saatavilla, kaliumatomit ja hydroksidit voivat muodostaa karbonaatteja.



Reaktioyhtälön 20 mukaisesti muodostuva karbonaatti on aerosoli, joka sulaa noin 890 °C:een lämpötilassa (Zevenhoven ym. 2012, 16). Aerosolilla tarkoitetaan seosta, joka koostuu kiinteistä ja nestemäisistä yhdisteistä, jotka ovat sekoittuneena kaasuun. Rikin puuttuessa prosessista, kaliumkloridi kondensoituu noin 600 °C:ssa aerosolina tai kiinnittyneenä lentotuhkaan ja sulaa noin 770 °C:een lämpötilassa (Zevenhoven ym. 2012, 16). Alhainen sulamislämpötila tekee kaliumkloridista komponentin, joka tekee tuhkasta tahmean ja näin ollen aiheuttaa likaantumista ja aiheuttaa korkean lämpötilan lämpöpinnoilla voimakasta korroosiota.

Mikäli polttoprosessi sisältää riittävästi rikkiä, muodostaa kaliumyhdisteet sulfaatteja (K_2SO_4), jotka aiheuttavat vähemmän korroosiota ja likaantumista.



Reaktioyhtälöiden 21 ja 22 kautta muodostuva kaliumsulfaatti sulaa noin 1070 °C:een lämpötilassa. Kaliumin lisäksi lihaluujauho sisältää runsaasti natriumia, joka käyttäytyy poltto-prosessissa samalla tavalla kuin kalium, joten yllä esitetyt reaktioyhtälöt pätevät myös natriumille (Zevenhoven ym. 2012, 17). Natriumkloridi sulaa jo noin 800 °C:ssa, kun taas natriumsulfaatti sulaa noin 884 °C:een lämpötilassa. Natriumkloridin ja kaliumkloridin seos huonontaa tilannetta edelleen, sillä sen sulamispiste on vain 657 °C (Bale & Bélisle 2016). Tyypillisesti kattilan valmistajat määrittelevät 3000 mg/kg:n rajan vesiliukoisten eli reaktiivisten natriumin ja kaliumin pitoisuudelle kuiva-aineessa. Tätä ylemmät pitoisuudet aiheuttavat ongelmia esimerkiksi kattilan likaantumisenä ja korroosiona, mikäli tätä ei huomioida kattilan suunnittelussa (Alakangas ym. 2016, 198–202). Lihaluujauholla vesiliukoisten alkali-yhteenlaskettu arvo on 9200 mg/kg kuiva-aineessa (Honkajoki Oy 2020).

$$\text{Alkali} - \text{indeksi} \left[\frac{\text{g}}{\text{MJ}} \right] = \frac{(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) [\%] * \text{tuhkan määrä} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg.pa}} \right]}{\text{HHV} [\text{MJ/kg}]} \quad (23)$$

jossa *HHV* [MJ/kg] on polttoaineen kalorimetrinen lämpöarvo

Yhtälössä 23 esitetyllä alkali-indeksillä voidaan arvioida alkali-määrää ja sitä kautta todennäköisyyttä ongelmien syntyyn. Likaantuminen on todennäköistä, jos indeksin arvo 0,17–0,34 g/MJ. Mikäli arvo on yli 0,34, likaantuminen on indeksin mukaisesti varmaa. (Vega-Nieva 2015, 3.) Lihaluujauhon osalta alkali-indeksi saa arvon 0,64 g/MJ, joka viittaa varmaan likaantumiseen korkean alkalipitoisuuden vuoksi.

Kalsium ja magnesium käyttäytyy reaktioyhtälöiden osalta samalla tavalla, mutta magnesiumin reaktiot tapahtuvat tyypillisesti hyvin alhaisissa lämpötiloissa. Tämän vuoksi magnesium voidaan tavallisesti olettaa reagoimattomaksi. Myös kalsiumin käyttäytymiseen vaikuttaa, miten se on sitoutunut polttoaineeseen. Orgaanisesti sitoutunut kalsium muodostaa tyypillisesti kalsiumoksidia ja täten vaikuttaa tuhkakemiaan (Zevenhoven ym. 2012, 17). Polttoaineesta vapautunut kalsiumoksidi voi reagoida savukaasuissa olevan rikkidioksidin kanssa muodostaen kalsiumsulfaatteja, jolloin alkalisulfaattien muodostumiseen tarvittava vapaana oleva rikkidioksidin määrä vähenee savukaasuista. Kalsiumoksidi voi myös reagoida hiilidioksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia (CaCO₃), joka voi aiheuttaa likaantumista 600–800 °C:een lämpötiloissa (Zevenhoven ym. 2012, 17). Lihaluujauho

sisältää huomattavan paljon kalsiumia ja fosforia, johtuen luun koostumuksesta. Luun sisältämä kalsium ja fosfori on pääasiassa kalsiumhydroksiapatiittina ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) (Boskey 2007). Deydier ym. tekemän tutkimuksen mukaan lihaluujauhon poltossa syntyvästä tuhkasta suurin osa on korkean sulamislämpötilan omaavaa kalsiumhydroksiapatiittia ja kalsiumfosfaattia ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) (Deydier ym. 2005, 147). Mikäli kuitenkin osa fosforista pystyy reagoimaan alkalien kanssa, voivat ne muodostaa alkalifosfaatteja. Vastaavasti kalsium voi reagoida oksidiksi ja täten sitoa rikkidioksidia.

Yllä mainitut reaktiot kloorin osalta alkaliklorideiksi ovat tärkeimmät likaantumisen ja korroosion kannalta. Mikäli polttoaine ei sisällä alkaleita riittävästi reagoimaan kloorin kanssa, muodostaa kloori pääasiassa vetykloridia (Zevenhoven ym. 2012, 17). Myös kloorin määrällä voidaan arvioida taipumusta alkalikloridien aiheuttamaan likaantumiseen ja päästöihin. Mikäli klooria on polttoaineessa yli 0,1 % kuiva-aineesta, on polttoaineella riski aiheuttaa likaantumista ja korkeita vetykloridipäästöjä. (Vega-Nieva 2015, 3.) Lihaluujauhon klooripitoisuudesta voidaan arvioida, että likaantuminen on voimakasta, mikäli alkaleita on riittävästi reagoimaan kloorin kanssa. Polttoaineeseen sitoutunut rikki puolestaan muodostaa lähes kokonaan rikin oksideja. Rikin oksidit voivat reagoida edelleen etenkin alkali- ja maaalkaliyhdisteiden kanssa kuten yllä on esitetty. Rikin ja kloorin moolisuhteella voidaan arvioida, onko rikkiä riittävästi sitomaan alkaleita suhteessa klooriin. Moolisuhteen tulisi olla vähintään kaksi ja mielellään yli neljä (Strömberg 2006, 42). Lihaluujauhon S/Cl moolisuhte on 0,9, jolloin rikkiä ei ole riittävästi sitomaan alkaliklorideja.

Biomassan sisältämä pii (Si) muodostaa tavallisesti korkean sulamislämpötilan omaavaa tuhkaa. Tästä poiketen, etenkin jotkin peltobiomassat voivat sisältää piitä ja kaliumia lähes yhtä paljon, jolloin on havaittu muodostuvat likaavia ja sintraavia kaliumsilikaatteja. Polttoaineen lisäksi alkalit voivat reagoida leijupetihiekan kanssa, joka sisältää kvartsia (SiO_2). Lihaluujauho sisältää myös rautaa ja alumiinia, joskin suhteellisen vähäisesti. Polttoaineen rauta (Fe) voidaan tyypillisesti ajatella inerttinä, mutta pölypoltossa se voi aiheuttaa tulipesän likaantumista, mikäli poltto-olosuhteet ovat vahvasti pelkistävät. Alumiinia voidaan tavallisesti pitää inerttinä biomassan palamisprosessissa, sillä sen muodostama oksidi ei reagoi muiden yhdisteiden kanssa, joskin jossain polttoaineissa alumiini voi olla sitoutuneena silikaatteihin ja täten reagoida alkaleiden kanssa. (Zevenhoven ym. 2012, 16.) Lisäksi

esimerkiksi bromi (Br), lyijy (Pb) ja sinkki (Zn) voivat aiheuttaa ongelmia, kuten korroosiota, mutta lihaluujauhon tapauksessa niiden pitoisuudet ovat hyvin alhaiset.

7.1.2 Tuhkan sulamiskäyttäytyminen

Polttoaineen koostumus määrittelee tuhkan sulamiskäyttäytymisen ja sen perusteella voidaan arvioida tuhka partikkelien tarttumista lämpöpinnoille. Sulamiskäyttäytymistä voidaan arvioida polttoaineanalyysin yhteydessä tuhkaamalla näyte ja määrittelemällä muodonmuutoslämpötila, pehmenemislämpötila, puolipallolämpötila ja sulalämpötila. Tämä menetelmä on alun perin kehitetty hiilelle ja on huomattu, että biomassatuhkan likaavuuden arvioiminen tällä menetelmällä saaduilla tuloksilla on epätarkkaa (Zevenhoven ym. 2012, 1).

Tuhkan tarttuvuutta voidaan arvioida sulan osuudella tuhkasta. Tyypillisesti ajatellaan, että kriittiset pisteet ovat T15 ja T70. T15 tarkoittaa lämpötilaa, jossa 15 % tuhkasta on sulana ja T70 vastaavasti lämpötilaa, jossa 70 % tuhkasta on sulana. Mikäli sulan osuus on alle 15 %, ei tuhka tartu vaan kimpoaa lämpöpinnoilta pois. Jos osuus on yli 70 %, on havaittu, että tuhka omaa hyvät virtausominaisuudet ja ei täten tartu lämpöpinnoille (Yongtie ym. 2018, 1484). Tuhkan sulamispisteen arvioimista vaikeuttaa yksittäisten komponenttien ja seoksien erot. Esimerkkinä tästä voidaan käyttää aiemmin mainittua kalium- ja natriumkloridin seosta, joka sulaa seoksena alhaisemmassa lämpötilassa, kun kumpikaan kyseisistä yhdisteistä erikseen. Tuhkan sulamista voidaan kuitenkin arvioida kemiallisten tasapainolaskelmien sekä erilaisten korrelaatioiden avulla. Biomassalle kehitettyjä korrelaatioita tuhkan sulamisen arvioimiseen on kehitetty vain muutamia, ja ne soveltuvat lihaluujauholla huonosti korkean fosfori ja kalsiumpitoisuuden takia.

Likaantumisen ja kuonaantumisen lisäksi sulanut tuhka voi aiheuttaa leijukerrospoltossa ongelmia petimateriaalin kanssa. Ongelmat ilmenevät sintraantumisenä eli petimateriaalin yhteen liimautumisena. Yhteen liimautuminen voi johtua pelkästään tuhkan muodostamasta sulasta tai vaihtoehtoisesti tuhkan sekä petimateriaalin sisältämän kvartsin välisestä reaktiosta. Esimerkiksi alkalit voivat muodostaa kvartsin kanssa matalan sulamislämpötilan omaavia alkalisilikaatteja (Raiko ym. 2002, 287). Sintraukseen auttaa petimateriaalin riittävä vaihto, mutta pahimmassa tapauksessa kattila joudutaan ajamaan alas. Lihaluujauho sisältää

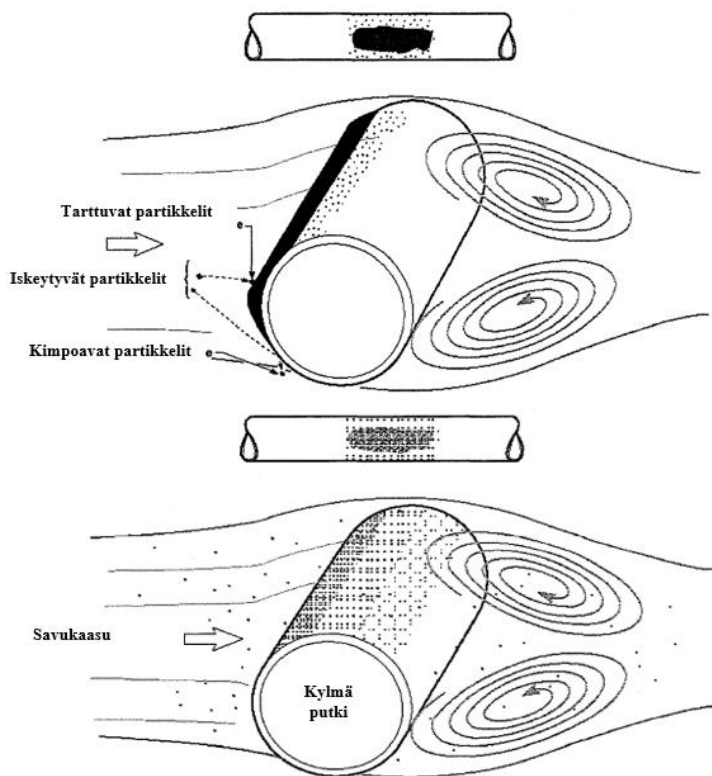
runsaasti alkaleita verrattuna rikkiin ja klooriin, jonka vuoksi vapaat alkalit voivat leijukerros-poltossa reagoida petihiekan kanssa ja täten sintraantumisen riski on suuri.

7.1.3 Kuonaantuminen ja likaantuminen

Kattilan säteilyalueella tapahtuvaa likaantumista kutsutaan kuonaantumiseksi (engl. slagging) ja konvektio-osan likaantumista kutsutaan likaantumiseksi (engl. fouling). Kattilan säteilyalueella eli tulipesässä lämpötilat ovat yleensä korkeat, jonka vuoksi sulan osuus tuh-kasta on suurempi kuin konvektio-osassa eli esimerkiksi ekonomaiserilla. Tuhkan muodostama kerrostuma voi kulkeutua lämpöpinnoille hitausvoimien aiheuttaman iskeytymisen, termoforeesin, kondensaation tai kemiallisten reaktioiden kautta. Tuhkapartikkelin osuessa lämmönsiirtopinnalle se voi joko tarttua tai kimmota pois, riippuen olosuhteista ja partikkelin ominaisuuksista. Tarttumiseen vaikuttaa oleellisesti tuhkan sulan osuuden määrä, mutta lisäksi myös esimerkiksi tuhkan viskositeetti, pintaenergia, partikkelin koko sekä iskeytymisnopeus ja kulma.

Hitausvoimien aiheuttamalla iskeytymisellä tarkoitetaan tilannetta, jossa savukaasut virtaavat kohti lämmönsiirtopintaa eli esimerkiksi tulistinputkea ja kääntyvät juuri ennen osumista putkeen, mutta savukaasuissa olevat hiukkaset eivät hitausvoimien vaikutuksesta kerkeä kääntymään vaan osuvat putkeen virtauksen tulosuunnan puolelta. Hitausvoimien aiheuttama iskeytyminen on merkittäväntä suurille, noin 10–15 μm :n kokoisille partikkeleille ja täten sen vaikutuksesta muodostunut kerrostuma on karkeajakoista (Baxter 2000, 63). Hitausvoimien vaikutus hiukkaskerroksen sijaintiin esitetty kuvassa 14.

Termoforeesilla tarkoitetaan partikkelien tarttumista pinnalle lämpötilagradienttien takia. Tällöin partikkelit liikkuvat kuumasta savukaasusta kylmempiin lämmönsiirtoputkiin. Tämä perustuu siihen, että korkeamman lämpötilan molekyylit törmäävät hiukkasiin suuremmalla nopeudella kuin kylmemmän lämpötilan molekyylit. (Baxter 2000, 65). Termoforeesi on merkittävä vain pienillä hiukkasilla ja sen aiheutuma kerrostuma on tasaisempi eikä kohdistu niin pienelle alueelle verrattuna hitausvoimien aiheutumaan kerrostumaan. Termoforeesin vaikutus hiukkaskerroksen sijaintiin esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Yläpuolella hitausvoimien aiheuttama iskeytyminen ja alapuolella termoforeesi (Baxter 2000, 62, 65).

Likaantumista voi tapahtua myös kondensaatiolla, jolloin kaasumaiset epäorgaaniset yhdisteet kuten esimerkiksi alkalikloridit, -sulfaatit, -karbonaatit ja -hydroksidit tiivistyvät alhaisemman lämpötilan seurauksena. Kondensaatio on merkittävä likaantumista aiheuttava mekanismi biomassan poltossa johtuen kaasuuntuvien epäorgaanisten aineiden suuresta määrästä. Kondensaatio voi tapahtua suoraan lämmönsiirtopinnalle, muiden hiukkasten pinnalle tai muodostaen aluksi aerosoleja ja sitten kiinnittyen lämmönsiirtopinnoille esimerkiksi termoforeesin vaikutuksesta. (Baxter 2000, 67). Kondensaation vaikutuksesta muodostunut pinta on tahmea ja näin ollen aiheuttaa myös isompien tuhkapartikkelien tarttumista lämmönsiirtopinnoille.

Edellä mainittujen lisäksi heterogeenisten reaktioiden kautta tapahtuva partikkelien kulkeutuminen lämpöpinnoille on merkittävässä roolissa. Kaasumaiset aineet reagoivat muodostuneissa kerrostumassa olevien yhdisteiden kanssa täten muuttaen sen koostumusta. Tyypillisiä reagoivia aineita ovat rikki, alkalit ja pii ja ne muodostavat sulfaatteja, silikaatteja ja karbonaatteja. Likaantumiskerroksen ominaisuudet ovat merkittävät kattilan käytettävyyden

kannalta. Voimakkaan likaantumisen seurauksena kattila voi tukkiutua osittain, jolloin kattilan alasaajoja on lisättävä. Kerrostuman muodostuessa myös lämmönsiirto heikkenee huomattavasti ja näin ollen hyötysuhde alenee. Kerrostuman koostumus ja lämpötila vaikuttavat sen lujuuteen ja nuohouksen toimivuuteen. Lisäksi kattilan rakenne vaikuttaa merkittävästi, kuinka helposti lämmönsiirtopinnat likaantuvat ja kuinka tehokkaasti nuohous voidaan toteuttaa.

Kirjallisuudesta löytyviä tutkimuksia biomassatuhkan aiheuttaman kerrostuman lujuudesta on löydettävissä rajallisesti. Tehdyistä tutkimuksista voidaan kuitenkin päätellä, että tuhkan lujuutta nostaa korkeampi savukaasun lämpötila etenkin, jos sulan osuus nousee merkittävästi. Jensen ym. tekemässä tutkimuksessa tarkasteltiin oljen polttamisesta aiheutuvaa tulisimien likaantumista likaantumissondeilla 835 °C:een ja 650 °C:een lämpötiloissa. Tutkimuksessa havaittiin, että kaasuuntunut kaliumkloridi oli suurin likaantumisen aiheuttaja liimaten muita tuhkapartikkeleja lämpöpinnoille. Lisäksi havaittiin, että korkeammissa lämpötiloissa muodostuva likakerros on vaikeampi puhdistaa ja lujuutta vahvistaa kerrostuman korkea rikkipitoisuus. (Jensen ym. 1997, 1055.) Laxminarayanin tekemässä tutkimuksessa käsiteltiin kaliumkloridista, kaliumsulfaatista, kalsiumoksidista, kalsiumsulfaatista ja kaliumsilikaateista koostuvaa tuhkaa ja lämpötilojen vaikutusta tuhkerrostuman sitkeyteen. Tutkimuksessa havaittiin, että savukaasun lämpötilan muutokset 500–650 °C:een välillä ei vaikuttanut kerroksen lujuuteen, mutta lämpötilan noustessa 700 °C:een lujuus kasvoi voimakkaasti, johtuen kerrostumassa olleiden partikkelien sulamisesta. (Laxminarayan 2018, 117.)

7.1.4 Korroosio

Korroosio on yksi haitallisimmista ja huoltotoimenpiteiden näkökulmasta kalleimmista ongelmista minkä polttoaineen koostumus voi aiheuttaa. Korroosion syntyyn vaikuttavat polttoaineen koostumuksen ja epäorgaanisen aineksen käyttäytymisen lisäksi vahvasti myös höyryn lämpötila. Korroosion kannalta biomass- ja jätepolttoaineissa merkittävimmät aineet ovat alkalit, kloori ja raskasmetallit, joista etenkin lyijy (Pb) ja sinkki (Zn) (Alakangas ym. 2016, 198). Korroosiota voi tapahtua korkealämpötilakorroosiona ja matalalämpötilakorroosiona.

Korkealämpötilakorroosio mekanismi perustuu metallia suojaavien aineiden hapettumiseen korroosiota aiheuttavien yhdisteiden vaikutuksesta. Lämmönsiirtoputken pinnassa olevat rauta ja kromi reagoivat klooriyhdisteiden kanssa, muodostaen kaasuuntuvia rauta- ja kromiklorideja. Kaasuuntuneet kloridit reagoivat savukaasujen hapen kanssa kondensoituen takaisin putken pinnalle. Kondensoituminen tapahtuu eri kohtaan putkea kuin mistä rauta ja kromi ovat kaasuuntuneet, joka mahdollistaa korroosioreaktion jatkumisen. Lisäksi rauta- ja kromikloridien hapettuessa vapautuu klooria, joka voi edelleen reagoida putken pinnalla olevien raudan ja kromin kanssa. (Hupa ym. 2015, 12.) Alkalikloridien aiheuttama korroosiota tapahtuu erityisesti, kun lämpöpintojen lämpötila on yli 450–480 °C:tta, mutta sinkki- ja lyijy-yhdisteet voivat aiheuttaa korroosiota jo 350 °C:een lämpötiloissa (Alakangas ym. 2016, 199). Korkealämpötilakorroosiota voidaan ehkäistä esimerkiksi laskemalla höyryn lämpötilaa, käyttämällä korroosion muodostumista estäviä materiaaleja, lisäaineen syöttämisellä sekä estämällä likakerrostuman muodostuminen nuohouksella.

Matalalämpötilakorroosion aiheuttaja on tyypillisesti rikkihapon tiivistyminen lämpöpinnoille. Savukaasujen rikkiatrioksidi ja vesihöyry alkaa muodostamaan rikkihappoa savukaasujen alittaessa 500 °C:tta ja lopulta kaikki rikkiatrioksidi on muodostanut rikkihappoa 200 °C:ssa (Vainio ym. 2016, 958). Rikkihapon tiivistyminen tapahtuu savukaasun virtaussuunnassa viimeisissä lämmönvaihtimissa, joissa lämpöpintojen lämpötila on alle rikkihapon kastepisteen.

$$T_{kastepiste} = \frac{1000}{2,276 - 0,0294 \cdot \ln(p_{H_2O}) - 0,0858 \cdot \ln(p_{H_2SO_4}) + 0,0062 \cdot \ln(p_{H_2O}) \cdot \ln(p_{H_2SO_4})} \quad (24)$$

jossa p_{H_2O} on veden osapaine ja $p_{H_2SO_4}$ on rikkihapon osapaine savukaasuissa

Rikkihapon kastepiste riippuu rikkihapon ja veden osapaineista savukaasuissa ja se voidaan arvioida yhtälössä 24 esitetyn empiirisen korrelaation avulla (Verhoff & Banchemo, 1974). Tyypillisesti kastepiste on 110–150 °C:een välillä. Rikkihapon lisäksi vetykloridi voi kondensoitua veden kanssa lämpöpinnoilla aiheuttaen voimakasta korroosiota, joskin sen kastepiste on alhainen, lähellä veden kastepistettä (Vainio ym. 2016, 958).

Myös hygroskooppiset eli vettä absorboivat suolat, kuten alkalisulfaatit, karbonaatit ja kloridit voivat aiheuttaa matalalämpötilakorroosiota. Hygroskooppiset suolat muodostavat

korrosoivan liuoksen veden kanssa, mikäli savukaasujen suhteellinen kosteus saavuttaa kriittisen pisteen. (Vainio ym. 2016, 958.) Pienissä biomassaa polttavissa kattiloissa on havaittu hygroskooppisten suolojen ($ZnCl_2$ ja $CaCl_2$) aiheuttamaa korroosiota, mikäli viimeisten lämpöpintojen lämpötilat ovat olleet matalat. Tutkimuksen mukaan korroosioriskin on huomattu olevan suuri, mikäli syöttöveden lämpötila on 85–100 °C. Syöttöveden lämpötilan ollessa yli 100 °C:tta on havaittu, että korroosioriski poistuu tai vähenee huomattavasti (Lindau & Goldschmidt 2008, 12). Matalalämpötilakorroosiota voidaan ehkäistä käyttämällä korroosion muodostumista estäviä materiaaleja, nostamalla viimeisten lämmönvaihtimien lämpötilaa yli rikkihapon ja hygroskooppisten suolojen kastepisteen, sekä vähentämällä rikkihapon muodostumista esimerkiksi lisäaineiden syötöllä.

Lihaluujauhon osalta merkittävimmät yhdisteet korroosionkannalta ovat alkalikloridit. Lihaluujauhon alkali- ja klooripitoisuudet ovat korkeat, jonka vuoksi korroosio-ongelmien synty on varmaa, mikäli niitä ei oteta suunnittelussa huomioon esimerkiksi höyryn lämpötilatasoissa ja materiaalivalinnoissa. Matalalämpötilakorroosion osalta voidaan olettaa, että rikkihapon muodostuminen on vähäistä johtuen rikin sitoutumisesta lihaluujauhon epäorgaanisiin aineisiin kuten alkaleihin ja mahdollisesti kalsiumiin. Toisaalta hygroskooppisten suolojen aiheuttama korroosio on lihaluujauhon tapauksessa mahdollista esimerkiksi ekonomaiserin alueella, joskin siltä voidaan suojautua varmistamalla riittävän korkea materiaalin pintalämpötila nostamalla syöttöveden lämpötilaa.

7.2 Kemiallinen tasapaino

Tässä kappaleessa käsitellään lihaluujauhon tuhkaa muodostavien komponenttien käyttäytymistä kemiallisten tasapainolaskujen avulla. Kemiallinen tasapaino lasketaan HSC Chemistry 10 -ohjelmalla. Kemiallisen tasapainon laskenta perustuu Gibbsin vapaan energian minimointiin, jonka mukaan systeemi on tasapainossa, kun Gibbsin funktio saa minimiarvonsa. Ympäristöstä eristetyn systeemin tasapaino tarkoittaa sitä, että systeemin kemiallisessa koostumuksessa ei tapahdu muutoksia. Kemiallisen tasapainon avulla voidaan arvioida likaantumisen- ja korroosiotaipumusta muodostuvien komponenttien avulla ja vertailla esimerkiksi lämpötilan vaikutusta muodostuviin komponentteihin. Palamisprosessiin ja polttoaineen käyttäytymiseen vaikuttaa monet eri asiat, jonka vuoksi kemiallisen tasapainon laskemiseen ja siitä saatuihin tuloksiin liittyy myös rajoitteita.

Kemiallista tasapainoa laskettaessa systeemin määrittely ja mahdollisten lopputuotteiden valitseminen on kriittinen vaihe, joka vaikuttaa tulosten luotettavuuteen. Tämän takia laskennassa tulee käyttää tietokantaa, joka omaa kaikki mahdolliset lopputuotteet. Polttoaineen koostumuksesta tulee huomioida reaktiiviset aineet ja yhdisteet ja määrittellä ne yhdisteet, jotka eivät reagoi palamisen aikana. Kemiallinen tasapainolaskenta ei myöskään ota huomioon reaktiokinetiikkaa. Todellisessa palamisprosessissa ei välttämättä saavuteta tasapainotilaa johtuen esimerkiksi lyhyestä viipymäajasta, jonka vuoksi tulokset voivat erota todellisesta tilanteesta.

Kemiallisen tasapainon laskentaa varten ohjelmaan syötetään aineet, joita lihaluujauho sisältää merkittävästi. Syötetyt aineet ovat C, H, O, N, S, Cl, vesiliukoinen Na, vesiliukoinen K, Ca, Mg, P, ja Si. Laskennassa hyödynnetään HSC Chemistry -ohjelman tietokantaa, josta valitaan kaikki komponentit, joita on mahdollista syntyä. Hapen määrä savukaasuissa asetetaan noin 3,5 %:iin ja laskenta suoritetaan yhden baarin paineessa sekä 800–1400 °C:een lämpötiloissa.

Laskennan tulokset on esitetty liitteessä 2 neljässä eri lämpötilassa. Tulokset on esitetty mooliosuuksina, siten että prosenttiosuus kertoo kuinka paljon alkuaineen ainemäärästä muodostaa kyseistä reaktiotuotetta. Alkuainekoostumuksen, laskentatulosten ja kappaleessa 7.1.1 käsiteltyjen yhdisteiden käyttäytymisen perusteella voidaan päätellä, että hankalimpia komponentteja kattilan käytettävyyden kannalta lihaluujauhon poltossa ovat alkalien muodostamat yhdisteet. Liitteessä 3 esitetyissä kuvaajissa on niiden alkaliyhdisteiden massat, joita lihaluujauhon poltosta syntyy merkittäviä määriä.

Kaliumin osalta huomataan, että tasapainotilassa kaliumfosfaattia (K_3PO_4) syntyy eniten ja sen määrä kasvaa, kunnes saavutetaan 1200 °C:een lämpötila. Kalsiumfosfaatin lisäksi myös natrium muodostaa natriumfosfaattia (Na_3PO_4 , $Na_6P_2O_8$), jonka muodostumisen lämpötilariippuvuus on samanlainen kuin kaliumfosfaatilla. Kalsiumfosfaatin sulamislämpötila on yli 1340 °C:tta ja natriumfosfaatin noin 1585 °C:tta. Korkeasta sulamislämpötilasta huolimatta molemmat yhdisteet voivat tutkimuksen mukaan aiheuttaa leijupedin sintraantumista. Sevonius ym. tekemässä tutkimuksessa natriumfosfaatti aiheutti sintraantumista jo 750 °C:een lämpötilassa, kun taas kaliumfosfaatti vasta 900 °C:ssa. (Sevonius ym. 2020, 9).

Kuvaajista huomataan, että alkalit muodostavat huomattavan määrän alkaliklorideja, jotka aiheuttavat kattilan likaantumista. Alhaisissa lämpötiloissa alkalikloridit ovat kiinteässä, sulaneessa ja kaasumaisessa muodossa, mutta lämpötilan noustessa yli 900 °C:een, kasvaa kaasumaisten alkalikloridien osuus voimakkaasti. Kaasumaiset alkalikloridit kondensoituvat lämpöpinnoille noin 600 °C:ssa ja täten mahdollistaa myös muiden tuhkapartikkelien liimautumisen lämpöpinnoille. Lisäksi kiinteiden kaliumkloridien sulamislämpötila on noin 770 °C:tta ja natriumkloridien 800 °C:tta, jonka vuoksi ne lisäävät sulan tuhkan osuutta ja likaantumista korkeissa lämpötiloissa. Lämpötilan noustessa myös alkalihydroksidien määrä kasvaa, vaikkakin tasapainon mukaan niitä ei juurikaan muodostu ollenkaan alle 1100 °C:een lämpötiloissa. Palamisprosessi muodostuneet alkalihydroksidit reagoivat tyypillisesti edelleen karbonaateiksi, klorideiksi ja sulfaateiksi. Kaliumkarbonaatin muodostumisprosessi on esitetty kappaleessa 7.1.1 ja kuten aiemmin mainittiin, se omaa noin 890 °C:een sulamislämpötilan. Vastaavasti muodostunut natriumkarbonaatti omaa puolestaan matalamman, noin 858 °C:een sulamislämpötilan (Bale & Bélisle, 2016).

Blomberg ym. käsittelevät artikkelissaan alkalihydroksidien käyttäytymistä todellisuudessa ja asioita, mitä kemiallinen tasapainolaskenta ei ota huomioon. Todellisuudessa alkalihydroksidit eivät välttämättä reagoi yli 700 °C:een lämpötiloissa karbonaateiksi, johtuen hiilidioksidin epästabiilisuudesta. Artikkelissa mainitaan myös mahdollisesta kineettisestä rajoituksesta hydroksidien ja sulfaattien reagoimiseksi. Hydroksidit kondensoituvat lämpöpinnoille noin 850 °C:ssa ja voivat aiheuttaa täten voimakasta korroosiota. Natriumhydroksidin (NaOH) sulamislämpötila vastaa noin 323 °C:tta ja kaliumhydroksidin 406 °C:tta. Jätteenpolttokattiloiden tulipesäkorroosiota arvioidaan yleensä tapahtuvan putkimateriaalin lämpötilan ollessa yli 325 °C:tta ja vastaava raja tulistinkorroosiolle on 406 °C:tta. Lämpötiloista huomataan, että korroosiota tyypillisesti tapahtuu lämpötiloissa, jotka vastaavat lähes täysin hydroksidien sulamislämpötiloja. (Blomberg ym. 2004, 10.)

Alkalikloridien aiheuttama korroosio ja likaantuminen vähenee, mikäli prosessissa on tarpeeksi rikkiä reagoimaan alkalien kanssa. Rikin ja alkalien välisessä reaktioissa muodostuneet kaliumsulfaatit omaavat 1070 °C:een ja natriumsulfaatit 884 °C:een sulamislämpötilan. Liitteessä 2 esitetyistä tasapainolaskelman tuloksista huomataan, että suurin osa lihaluujauhon natriumista reagoi rikin kanssa muodostaen natriumsulfaattia 1000 °C:een saakka. Yli

1000 °C:ssa natriumsulfaatin muodostuminen vähenee tasaisesti lämpötilan kasvaessa, kunnes sitä ei muodostu enää lähes ollenkaan 1400 °C:ssa. Kaliumin kohdalla tilanne on huonompi, sillä vain alle 20 % polttoaineen kaliumin ainemäärästä reagoi sulfaateiksi 800 °C:ssa ja lämpötilan kasvaessa määrä pienenee edelleen, kunnes 1200 °C:ssa enää muutama prosentti kaliumista reagoi sulfaateiksi.

Tasapainon mukaan iso osa lihaluujauhon kaliumista reagoi myös magnesiumin ja piin kanssa muodostaen $K_2MgSi_3O_8$:ta etenkin, kun palamislämpötila on matala. Lämpötilan noustessa yhdisteen määrä vähenee ja yli 1100 °C:een lämpötiloissa sitä ei muodostu juuri ollenkaan. Kyseisen yhdisteen käyttäytymisestä löytyy kirjallisuudesta todella vähän tutkimuksia, joskin Zhu ym. tekemän tutkimuksen mukaan sitä on havaittu muodostuvan oljen ja sahanpurun poltossa ja se omaa noin 927 °C:een sulamislämpötilan (Zhu 2017, 527).

Kalsiumin ja fosforin osalta tulokset viittaavat siihen, että näistä fraktioista muodostunut tuhka on pääosin kalsiumhydroksiapatiittia ja kalsiumfosfaattia. Magnesium voidaan olettaa käyttäytyvän palamisprosessissa kuten kalsium, joskin sen reaktiot tapahtuvat tyypillisesti hyvin alhaisessa lämpötilassa. Liitteessä 2 esitetyissä tuloksista voidaan huomata, että magnesium poistuu pääasiassa oksideina, joskin myös magnesiumfosfaattia ja silikaatteja on läsnä etenkin matalammissa lämpötiloissa. Magnesiumfosfaatti sulaa vasta noin 1348 °C:ssa, joten voidaan olettaa, ettei se aiheuta lihaluujauhon poltossa ongelmia (Bale & Bélisle, 2016). Lihaluujauhon pii muodostaa aikaisemmin käsitellyn $K_2MgSi_3O_8$:n lisäksi lähinnä kalsium- ja magnesiumsilikaatteja, jotka omaavat korkeat sulamislämpötilat.

7.3 Savukaasupäästöt

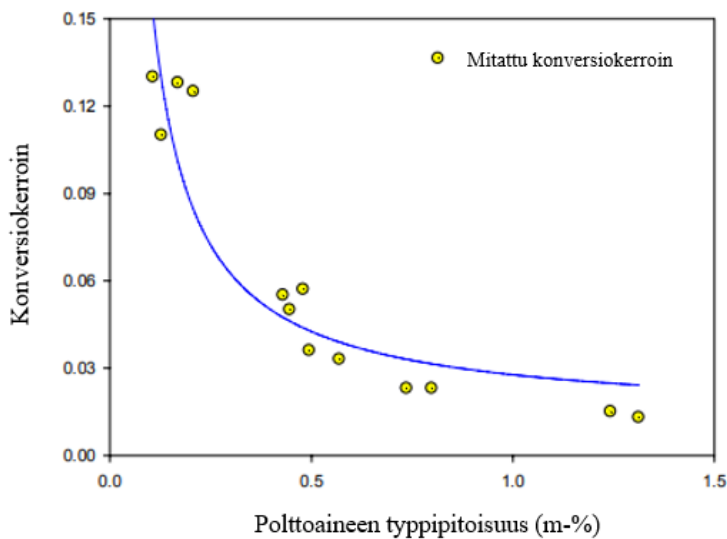
Lihaluujauho sisältää erittäin paljon tuhkaa muodostavaa epäorgaanista aineista verrattuna tyypilliseen biomassapolttoaineeseen. Lihaluujauhon poltosta syntyvä pölykuorma voidaan laskea, kun tiedetään tuhkan massa ja kuiva savukaasuvirta. Kuiva savukaasuvirta voidaan laskea palamislaskujen avulla summaamalla CO_2 , SO_2 , O_2 ja N_2 . Oletuksessa laskennassa on se, että hiili ja rikki reagoivat täydellisesti hiilidioksidiksi ja rikkidioksidiksi, eikä typpi reagoi mitenkään. Lihaluujauhoa poltettaessa teoreettiseksi kuivaksi savukaasuvirraksi saadaan laskennasta 6,76 Nm³/kg, lihaluujauhoa. Näillä tiedoilla sekä oletuksella, että 90 % tuhkasta poistuu kattilasta lentotuhkana, saadaan pölykuormaksi kuivissa savukaasuissa ja 6

%:n hapessa noin 45900 mg/Nm^3 . Lihaluujauhoa koskevien vaatimusten mukaan hiukkaspäästöt saavat olla enintään 15 mg/Nm^3 6 %:n hapessa, jolloin vaadittu reduktio on noin 99,97 %. Pelkkää lihaluujauhoa polttaessa siis pölykuorma on erittäin suuri, jonka vuoksi savukaasujärjestelmien kapasiteettiin ja erotuskykyyn tulee kiinnittää erityishuomiota. Kattilan suunnittelun kannalta tulee huomioida myös korkeat pölykuormat esimerkiksi tuhkanpoistosuppiloiden ja -laitteistojen suunnittelussa.

Lihaluujauho sisältää myös rikkiä, joka voi muodostaa paljon rikin oksideja, mikäli rikkiä sitovia yhdisteitä ei oteta huomioon. Lihaluujauho sisältää kuitenkin paljon alkaleita ja kalsiumia, joilla on kyky sitoa rikkiä. Rikkidioksidin määrä savukaasuissa olisi noin 870 mg/Nm^3 kuivissa savukaasuissa ja 6 %:n hapessa, mikäli kaikki lihaluujauhon rikki hapettuisi täydellisesti rikkidioksidiksi. Sivutuoteasetuksen mukaisesti rikkidioksidipäästöjen raja-arvo on 6 %:n hapessa $75,3 \text{ mg/Nm}^3$ mikäli poltetaan pelkkää lihaluujauhoa. Tällöin vaadittu reduktio olisi noin 91,4 %. Liitteessä 2 esitettyjen tasapainolaskujen mukaan lämpötilan ollessa $800 \text{ °C} - 900 \text{ °C}$ vain 0–5 % rikistä reagoisi rikkidioksidiksi ja loppuosa reagoisi alkaleiden kanssa. Lämpötilan noustessa myös rikkidioksidin määrä nousee, kunnes 1400 °C :ssa 97 % rikistä muodostaisi rikkidioksideja. Reaktionopeus huomioiden voidaan olettaa, että todellisuudessa rikin ja alkalien reaktiot eivät saavuta tasapainotilaa vaan rikin oksidien määrä on suurempi kuin mitä tasapainolaskut osoittavat. Pelkkää lihaluujauhoa poltettaessa saisi vain noin 9 % rikistä reagoida rikkidioksidiksi, jotta päästörajat saavutettaisiin ilman savukaasujen puhdistusta.

Lihaluujauho sisältää noin 7,9 % typpeä, jolloin myös typen oksidien päästöt voivat olla korkeat. Polttoaineille on tyypillistä, että polttoaineen sisältämän typen konversiokerroin typen oksideiksi pienenee typpipitoisuuden kasvaessa. Palamislämpötilan ollessa alle 1400 °C :tta, suurin osa muodostuneista typen oksideista on peräisin polttoaineeseen sitoutuneesta tyypestä. Eri polttoaineiden sisältämä typpi käyttäytyy palamisprosessissa eri tavoin, kuten kappaleessa 5.1 on esitetty. Tämän takia polttoaineilla on huomattavia eroja siinä, kuinka suuri osa polttoaineeseen sitoutuneesta tyypestä muodostaa typen oksideja. Lihaluujauhon poltosta syntyvien NO_x -päästöjen arvioimisesta haastavaa, sillä tutkimustietoa lihaluujauhon sisältämän typen konversioasteesta typen oksideiksi ei ole juurikaan saatavilla. Lisäksi kattilassa mahdollisesti käytetyt polttotekniset primääriset typen oksidien vähennysmenetelmät

vaikuttavat merkittävästi typen oksidien syntyyn, jonka vuoksi kattilakohtaisia erot voivat olla suuria. Mikäli lihaluujauhon sisältämä typpi reagoisi tehokkaasti typen oksideiksi, olisi sekundääriset vähennysmenetelmät välttämättömiä päästörajojen alittamiseksi. Houshfar ym. tekemässä tutkimuksessa vertailtiin erilaisten biomassapolttoaineiden sisältämän typen konversiokerrointa typen oksideiksi. Käytettyjä polttoaineita olivat olki, turve, jätevesiliete, metsäteollisuuden sivutuotteet ja puupelletit. Kuvassa 15 on esitetty tutkimuksessa havaitut konversiokertoimet polttoaineen sisältämän typpipitoisuuden funktiona. (Houshfar ym. 2012, 284.)



Kuva 15. Polttoaineen typen konversio typen oksideiksi (Muokattu lähteestä Houshfar ym. 2012, 284).

Kuvasta havaitaan, että biomassapolttoaineiden typpipitoisuuden kasvaessa konversiokerroin typen oksideiksi pienenee eksponentiaalisesti. Tutkimuksessa havaittiin, että korkeilla typpipitoisuuksilla vain 2 % tpestä muodostaa typen oksideja (Houshfar ym. 2012, 284). Lihaluujauho sisältää kuitenkin enemmän typpeä kuin edellä mainitussa tutkimuksessa käsitellyt polttoaineet, jonka vuoksi typen konversiokerroin voi olla jopa matalampi. Lihaluujauhon konversiokertoimen ollessa 2 %, olisi NO_x -päästö noin 420 mg/Nm^3 ilmaistuna NO_2 :na. Mikäli konversionkerroin olisi 1 %, olisi päästö noin 210 mg/Nm^3 .

8 LIHALUUJAUHON POLTTAMINEN HONKAJOEN KATTILALAITOKSELLA

Tällä hetkellä Honkajoki Oy:n tuottama 1 luokan lihaluujauho hävitetään ulkopuolisten polttolaitosten toimesta ja hävityksestä syntyy Honkajoki Oy:lle hävitys- ja kuljetuskustannuksia. Honkajoki Oy:n prosesseissa käytettävä prosessihöyry tuotetaan pääasiassa turpeella viereisellä Vatajankosken Sähkö Oy:n kattilalaitoksella. Turpeen käytön kustannusten noustessa lihaluujauhon hyödyntäminen Honkajoen kattilalaitoksella on houkuttelevaa niin taloudellisuuden että kiertotalouden näkökulmista. Lihaluujauhon ominaisuudet tekevät siitä kuitenkin haastavan polttoaineen, jonka vuoksi seospoltto on tässä tapauksessa käyttökelpoisin ratkaisu investointikustannusten vuoksi. Mikäli lihaluujauhoa päätettäisiin käyttää pääpolttoaineena, tulisi kattilaan tehdä niin paljon muutoksia, että olisi järkevämpi investoida kokonaan uuteen polttolaitokseen.

Tavoitteena olisi polttaa lihaluujauhoa siten, että sen osuus vastaisi noin 25 % kokonaispolttohosta. Pääpolttoaineen käytettäisiin aluksi turvetta, mutta jatkossa turpeen energiakäytön vähentämisen vuoksi pääpolttoaineena toimisi hake. Lihaluujauhon alkali- ja klooripitoisuuksien ollessa korkeat, voidaan ongelmia vähentää seospoltolla turpeen kanssa. Turve sisältää rikkiä ja alumiinisilikaatteja, jotka reagoivat alkalikloridien kanssa muodostaen alkalisulfaatteja ja alkalialumiinisilikaatteja täten vähentäen alkalikloridien aiheuttamia ongelmia (Alakangas ym. 2016, 201). Hake ei omaa samankaltaisia kattilaa suojaavia ominaisuuksia ja toisaalta sisältää kaliumia. Turpeen ja metsätähdehakkeen koostumukset on määritetty kirjallisuudesta löytyvien koostumuksien pohjalta ja esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Turpeen ja hakkeen koostumukset (Strömberg 2006, 42), (Alakangas ym. 2016, 56, 59, 122).

	Turve	Hake	
Kosteus	45,9	45,0	%
LHV, saapumistilassa	9,9	10,5	MJ/kg
Hiili, C	53,7	51,3	m-%, ka
Vety, H	5,6	6,1	m-%, ka
Happi, O	32,4	40,9	m-%, ka
Typpi, N	1,7	0,4	m-%, ka
Rikki, S	0,2	0,02	m-%, ka
Kloori, Cl	0,05	0,0076	m-%, ka
Tuhkapitoisuus	6,3	1,33	m-%, ka
Natrium, Na, vesiliukoinen	138,7	34,3	mg/kg, ka
Kalium, K, vesiliukoinen	371,7	3183,6	mg/kg, ka
Kalsium, Ca	5723,3	4891,2	mg/kg, ka
Magnesium, Mg	445,6	683,1	mg/kg, ka
Fosfori, P	499,2	870,0	mg/kg, ka
Pii, Si	9871,0	354,7	mg/kg, ka
Rauta, Fe	4655,5	117,9	mg/kg, ka
Alumiini, Al	2641,9	300,7	mg/kg, ka
Sinkki, Zn	61,4	50,0	mg/kg, ka

Honkajoen kattilalaitos toimii leijukerrostekniikalla, jonka vuoksi taloudellisin vaihtoehto olisi polttaa lihaluujauhoa suoraan pedissä turpeen tai hakkeen seassa. Tämä ei kuitenkaan ole mahdollista ilman muutoksia nykyiseen tulipesään, sillä kattilan mitat, savukaasun nopeus ja tulipesän lämpötilat johtavat siihen, ettei vaadittua viipymäaika ja lämpötilaa saavuteta. Lisäksi lihaluujauhoa poltettaessa on suuri riski, että peti sintraantuu, jonka vuoksi pedin lämpötila sekä lihaluujauhon osuus tulisi pitää matalana. Viipymäajan vuoksi polttotekniikaksi soveltuisi erillinen polttokammio, josta lihaluujauhon palamisessa syntyvät kuumat savukaasut johdettaisiin pääkattilaan. Polttotekniikkana voitaisiin soveltaa joko poltin- tai arinapolttua. Arinapoltoissa erityishuomiota tulisi kiinnittää palamattomien määrään, korkeaan tuhkapitoisuuteen ja pieneen partikkelikokoon. Tuhkapitoisuuden vuoksi arina tulisi olla liikkuva, jotta tuhka ei kasaantuisi arinalle. Tuhkan kasaantumisen lisäksi tuhkan sulaminen voisi aiheuttaa arinan ilma-aukkojen tukkiutumista. Pienen partikkelikoon vuoksi lihaluujauho voi tempaantua palamisilman mukaan tai pudota arinan ilma-aukkojen läpi, täten lisäten palamattomien määrää. Edellä mainituista syistä lihaluujauhon polttoon parhaiten soveltuva polttotekniikka tässä tapauksessa on poltinpoltto. Honkajoen prosessista saatava 1 luokan lihaluujauho on partikkelikooltaan noin 2 mm, jonka vuoksi se tulee jauhaa ennen

syöttöä polttimelle. Poltinpoltossa lihaluujauho tulee jauhaa siten, että 100 % jauhosta on alle 1 mm, 65 % alle 0,5 mm ja 30 % alle 0,3 mm.

8.1 Likaantuminen ja korroosio

Turvetta polttaessa Honkajoen kattilalla ei esiinny tällä hetkellä likaantumista juuri ollenkaan, joka ilmenee esimerkiksi vähäisenä nuohouksen tarpeena. Tässä kappaleessa tarkastellaan, kuinka tilanne muuttuu, mikäli lihaluujauhoa poltettaisiin noin neljännes polttoainetehosta. Lihaluujauhoa polttaessa turpeen rikki edesauttaisi alkalisulfaattien muodostumista ja täten vähentäisi likaantumista, mikäli viipymäaika olisi riittävä ja savukaasujen sekoittuminen olisi tehokasta. Hakkeella puolestaan ei ole kattilaa suojaavia vaikutuksia esimerkiksi alhaisesta rikkipitoisuudesta ja verrattain korkeasta alkalipitoisuudesta johtuen. Hakkeen sisältämät alkalit reagoisivat pääkattilassa muodostaen esimerkiksi alkalisulfaatteja, -karbonaatteja, hydroksideja. Mikäli hakkeen poltossa muodostuvissa savukaasuissa olisi läsnä vapaita alkaleita, ne voisivat reagoida lihaluujauhon poltossa muodostuneen vetykloridin kanssa, muodostaen lisää alkaliklorideja. Toisin sanoen lihaluujauhon poltossa likaantumisen kannalta turve olisi suotuisa valinta pääpolttoaineksi kattilaa suojaavien yhdisteiden takia ja koska turpeen poltto ei itsessään aiheuta juurikaan kattilan likaantumista. Turpeen kustannusten noustessa kuitenkin hake on tulevaisuudessa todennäköinen valinta pääpolttoaineksi ja tällöin likaantumisen voidaan olettaa olevan voimakkaampaa suojaavien yhdisteiden puuttumisen takia. Hakkeen ja lihaluujauhon koostumuksia vertailtaessa huomataan kuitenkin, että alkalipitoisuudesta huolimatta hake helpottaa lihaluujauhon polttoa vähentäen alkalien ja kloorin kokonaismäärää huomattavasti verrattaessa pelkkään lihaluujauhon polttoon.

Lämpöpinnoille tarttuva sulanut ja kondensoitunut tuhka liimaa myös ei likaavia tuhkakomponentteja lämpöpinnoille, jonka takia myös tuhkan kokonaismäärällä on merkitystä. Honkajoen kattilan 2-veto koostuu kokonaisuudessaan lieriöiden välisistä kattilaputkista, jonka alueelle kaasumaiset alkaliyhdisteet kondensoituvat. Tämän vuoksi tuhkan määrä tulisi pitää mahdollisimman matalana. Taulukossa 6 on vertailtu eri polttoaineseosten lämpöarvoa, kosteuspitoisuutta sekä tuhkapitoisuutta siten, että prosenttiosuus kuvaa osuutta polttoainetehosta.

Taulukko 6. Polttoaineseosten ominaisuudet

	Turve 90 % MBM 10 %	Turve 75 % MBM 25 %	Hake 90 % MBM 10 %	Hake 75 % MBM 25 %	
LHV, saapumistilassa	10,3	11,0	10,9	11,5	[MJ/kg]
Kosteus	43,13	38,52	42,13	37,42	[%]
Tuhkapitoisuus	9,06	13,09	4,76	9,71	[%-m, ka]

$$\text{Tuhkan määrä} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] = \frac{P_{pa} [\text{MW}]}{LHV [\text{MJ/kg}]} \cdot (1 - \text{kosteus}) \cdot \text{tuhkapitoisuus} \cdot 3600 \text{ s} \quad (25)$$

Oletetaan, että kattilan polttoaineteho on 15,9 MW ja määritetään syntyvän tuhkan määrä täydellä teholla, jotta saadaan käsitys määrän kokoluokasta. Tuhkan määrä voidaan laskea yhtälöllä 25, jossa P_{pa} tarkoittaa polttoainetehoa ja LHV alemmaa lämpöarvoa saapumistilassa. Turpeen ja lihaluujauhon seospoltossa tuhkan määrä olisi 286,2 kg/h, kun turpeen osuus vastaa 90 % polttotehosta ja vastaavasti 419,9 kg/h kun turpeen osuus vastaa 75 %. Hakkeen ja lihaluujauhon seospoltossa tuhkan määrä olisi 144,8 kg/h kun hakkeen osuus vastaa 90 % ja 302,1 kg/h kun hakkeen osuus vastaa 75 %. Vertailun vuoksi, pelkän turpeen poltossa vastaava luku olisi 197,1 kg/h ja pelkän lihaluujauhon poltossa tuhakuorma olisi 1088,6 kg/s. Tuloksista nähdään, että lihaluujauhon osuuden ollessa 25 %, tuhkan määrä kaksinkertaistuu seospoltossa turpeen kanssa ja 1,5-kertaistuu seospoltossa hakkeen kanssa.

Tuhkan kokonaismäärää tärkeämpää ovat tuhkan ominaisuudet ja käyttäytyminen. Polttoaineseoksien ominaisuuksia likaantumisen ja korroosion kannalta voidaan vertailla kokemusperäisten tunnuslukujen avulla, joita ovat S/Cl-suhde, alkali-indeksi, ja kloorin määrä. S/Cl suhteen tulisi olla vähintään kaksi, mutta mielellään yli 4, jotta rikkiä olisi riittävästi sulfa-toimaan alkalit ja estämään alkalikloridien muodostuminen. Alkali-indeksin ollessa yli 0,17 likaantuminen on todennäköistä ja arvon ollessa yli 0,34, likaantuminen on varmaa. Kloorin määrän raja-arvoksi on puolestaan ehdotettu 0,1 jota suuremmat arvot muodostavat todennäköisesti ongelmia. Taulukossa 7 on vertailtu eri polttoaineseosten tunnuslukujen arvoja.

Taulukko 7. Polttoaineseosten tunnusluvut

	Turve 90 % MBM 10 %	Turve 75 % MBM 25 %	Hake 90 % MBM 10 %	Hake 75 % MBM 25 %	
S/Cl	2,9	1,9	1,2	1,0	[mol/mol]
Alkali-indeksi	0,05	0,11	0,13	0,18	[g/MJ]
Cl	0,08	0,13	0,04	0,10	[%-m, ka]

S/Cl-suhdeluvun mukaan rikin määrä on epävarmalla alueella, kun turpeen osuus on 90 % ja muilla seoksilla sitä on selvästi liian vähän estämään alkalikloridien muodostumista. Alkali-indeksin mukaan likaantuminen olisi todennäköistä vain hakkeen ja lihaluujauhon seospoltossa, kun hakkeen osuus olisi 75 %. Vertailun vuoksi pelkän lihaluujauhon poltossa alkali-indeksi saa arvon 0,64, kuten aiemmin mainittiin. Klooripitoisuuden perusteella ongelmat ovat epätodennäköisiä hakkeen ja lihaluujauhon seoksella, mikäli hakkeen osuus on 90 %, mutta kaikilla muilla seoksilla kloorin aiheuttamat ongelmat ovat todennäköisiä. Seospoltton arvioimista hankaloittaa kuitenkin etupesä ja sieltä johdettavien savukaasujen sekoittuminen pääkattilassa muodostuvien savukaasujen kanssa. Savukaasujen keskinäiseen reagoimiseen vaikuttaa sekoittumisen lisäksi myös viipymäaika ja savukaasujen nopea jäähtyminen tulipesän jälkeen.

Kattilan polttoteho vaihtelee noin 30–100 %:n välillä täydestä polttotehosta. Tällöin lihaluujauhon polttoteho vastaavasti vaihtelisi 1,25 MW–3,98 MW:n välillä, joka massavirtana vastaisi noin 0,077–0,245 kg/s. Pölypoltossa liekin lämpötila voi nousta korkeaksi riippuen esimerkiksi polttoaineesta ja polttimesta, mutta oletetaan sen tässä tapauksessa olevan noin 1100 °C. Tässä lämpötilassa muodostuvien ja likaantumista aiheuttavien alkalien massavirrat tasapainotilassa ja 1-5 MW polttoteholla on esitetty liitteessä 4. Tasapaino viittaa siihen, että tässä lämpötilassa rikki onnistuu sulfatoimaan etenkin natriumia tehokkaasti ja vähentää näin natriumkloridin muodostumista, joskin tästä huolimatta kaasumaisia alkaliklorideja muodostuu paljon. Todellisuudessa savukaasuissa on läsnä myös jonkin verran alkalihydroksideja, jotka reagoivat osittain muodostaen esimerkiksi alkalikarbonaatteja, vaikkakin tasapainon mukaan kyseisiä yhdisteitä ei juurikaan muodostu. Edellä mainittujen lisäksi korkean sulamislämpötilan omaavia alkalifosfaatteja muodostuu runsaasti. Korkean sulamislämpötilan vuoksi alkalifosfaatit eivät ole haastavia likaantumisen kannalta, mutta niiden on havaittu aiheuttavan sintraantumista leijupedissä.

Lihaluujauhon poltosta muodostuvat kaasumaiset ja osittain sulaneet alkalikloridit kulkeutuvat lämpöpinnoille tehokkaasti korkean tuhkamäärän ja kappaleessa 7.1.3 esitettyjen mekanismien vuoksi. Lämpöpintojen ja savukaasujen välillä on suuri lämpötilaero, jonka vuoksi partikkelit pyrkivät kulkeutumaan kylmemmille lämpöpinnoille. Etupesässä poltettava lihaluujauho muodostaa huomattavan määrän kaasumaisia alkaleita liitteen 4 mukaisesti ja tämän vuoksi kondensaation voidaan olettaa olevan merkittävä likaantumisen aiheuttaja. Osittain sulanut ja alkaliklorideja sisältävä tuhka tarttuu lämpöpinnoihin niihin osuessaan tulipesän ja hilan alueella ja aiheuttaa täten myös muiden partikkelien liimaantumisen. Kaasumaisten alkaliyhdisteiden voidaan olettaa kondensoituvat hilan alueelle noin 600 °C:ssa ja täten aiheuttavan voimakasta likaantumista kattilan 2- ja 3-vedossa. Likaantuminen tulipesän alueella on todennäköistä, mikäli tulipesän lämpötila mahdollistaa kriittisen sulan määrän tuhkassa. Tulipesän likaantuminen painottuu alueille, joihin etupesästä tulevien savukaasujen mukana kulkeutuva sula tuhka osuu. Ekonomaiseripakettien alueella tuhkakakuorma on korkea ja tämän vuoksi ekonomaiserit täytyy uusida ja korvata sileäputkiekonomaiserilla ja riittävällä putkijaolla.

Lihaluujauhon poltosta vapautuu paljon myös korroosioita aiheuttavia yhdisteitä, kuten alkaliklorideja, mutta tässä tapauksessa kattilan lämpöpintojen pintalämpötilat ovat 230–250 °C:een välillä, minkä vuoksi kuumakorroosioita ei pääse tapahtumaan. Mikäli kattilan paine nostettaisiin 40 baariin modernisaation yhteydessä, olisivat pintalämpötilat rakennetun mallin mukaan 250–260 °C:ta, jolloin kuumakorroosioita ei esiinny. Lisäksi mainittakoon, että tulistikorroosio olisi todennäköistä, mikäli lihaluujauhoa poltettaisiin tulistuskattilassa. Hygrooskooppien suolien aiheuttamaa matalalämpötilakorroosioita on kokemusten mukaan esiintynyt alle 100 °C:een syöttöveden lämpötiloissa, jolloin se on myös helposti estettävissä pitämällä syöttöveden lämpötila nykyisellä tasolla. Rikkihapon aiheuttama korroosio voidaan samoin estää pitämällä savukaasujen lämpötila yli kastepisteen, kuten tälläkin hetkellä.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että lihaluujauhon poltosta aiheutuva kattilan likaantuminen on voimakasta ja nopeaa, johtuen korkeasta tuhkan ja alkaleiden määrästä. Etuna Honkajoen kattilalla on kuitenkin matalat pintalämpötilat, jonka vuoksi pinnoille kerääntyvän kuonan voidaan olettaa olevan hauraampaa ja helpommin nuohottavissa kuin, jos lämpötilat olisivat korkeammat. Kattilan käytettävyyden kannalta ratkaisevassa roolissa on nuohouksen

tehokkuus ja toimintavarmuus, sillä likaantuminen itsessään on varmaa. Nuohouksen onnistumisen kannalta merkittävässä roolissa ovat nuohointoimittajien arviot ja käyttökokemukset. Tämän diplomityön aikana on käyty keskustelua nuohointoimittajan kanssa, jolla on kokemusta lihaluujauhon poltosta muodostuvan tuhkan nuohoamisesta kattilassa, jossa lämpötilat ovat korkeammat kuin Honkajoen kattilassa.

8.2 Savukaasupäästöt

Ympäristöluvan muutoshakemuksessa ehdotettavat savukaasujen päästörajat tulee laskea yhtälöllä 1 käyttäen taulukon 1 ja 2 päästörajoja lihaluujauholla, turpeelle ja hakkeelle. Turpeen polton typen oksidien päästöraja on taulukon mukaisesti 600 mg/nm^3 , mutta laskennassa on käytetty nykyisen päästörajan mukaista 500 mg/nm^3 arvoa.

$$Raja - arvo_{O_2,uusi} = \frac{20,9\% - O_{2,uusi} [\%]}{20,9\% - O_{2,vanha} [\%]} \cdot raja - arvo_{O_2,vanha} \quad (25)$$

Taulukossa 8 esitetty lihaluujauhon päästöraja on muutettu vastaamaan savukaasun 6 %:n happipitoisuutta yhtälöllä 25. Seospolttoaineiden päästörajat on laskettu olettaen lihaluujauhon osuudeksi polttotehosta 25 % molemmissa tapauksissa. Päästörajat on esitetty kuivassa savukaasussa.

Taulukko 8. Seospolton päästörajat

	SO ₂ [mg/nm ³]	NO _x [mg/nm ³]	Hiukkaset [mg/nm ³]
Lihaluujauho 100 %	75,3	301,0	15,1
Lihaluujauho 25 % Turve 75 %	393,8	450,3	41,3
Lihaluujauho 25 % Hake 75 %	168,8	412,8	41,3

Pelkkää lihaluujauhoa polttaessa päästörajat ovat todella tiukat ja haastavat alittaa ilman sekundääristä päästöjenhallintaa, kun taas seospoltoissa päästörajat ovat huomattavasti korkeammat johtuen turpeen ja hakkeen päästörajoista. Tällä hetkellä hiukkaspäästöjen raja-arvo on 50 mg/nm^3 ja lihaluujauhon seospoltoissa päästörajaksi muodostuisi laskennallisesti noin 41 mg/nm^3 . Turvetta polttaessa pölykuorma 6 %:n happipitoisuudessa ja kuivissa

savukaasuissa on tällä hetkellä noin 7900 mg/nm^3 , mikäli turpeen tuhkapitoisuus kuiva-aineessa on 6,3 % ja 90 % tuhkasta poistuu lentotuhkana. Turpeen ja lihaluujauhon seospoltossa kuorma on noin 17000 mg/nm^3 ja vastaavasti hakkeen ja lihaluujauhon poltossa noin 13400 mg/nm^3 . Pölykuorma siis luonnollisesti kasvaa, mikäli osa polttoaineesta korvataan lihaluujauholla. Hiukkaspäästörajoiden saavuttamiseksi etupesä tulee varustaa tuhkanpoistolla, jotta mahdollisimman suuri osa lihaluujauhon muodostamasta tuhkasta saadaan erotettua jo ennen pääkattilaa. Lisäksi sähkösuodattimen toimintaan tulee kiinnittää huomiota ja varmistaa sen toimivuus myös korkeammilla pölykuormilla.

Typhen oksidien päästöarvoksi muodostuisi laskennallisesti turpeen ja lihaluujauhon seospoltossa $450,3 \text{ mg/nm}^3$ ja vastaavasti hakkeen sekä lihaluujauhon seospoltossa 413 mg/nm^3 . Tällä hetkellä päästöarvo on 500 mg/nm^3 ja typhen oksidien määrä päästömittauksen perusteella on noin 400 mg/nm^3 , kun poltetaan turvetta ja haketta 50 %-50 %-seoksella. Typhen oksidien määrään kuitenkin vaikuttaa kokemusten perusteella suuresti kattilan ilma-jaot, savukaasun happipitoisuus sekä polttoaineensyötön heitotilmat. Lihaluujauhon poltosta aiheutuvien typhen oksidien määrään vaikuttaa esimerkiksi polttimen rakenne, lihaluujauhon palamislämpötila, polttoainetyphen konversiokerroin ja etupesästä tuotavien savukaasujen käyttäytyminen pääkattilassa. Tämän vuoksi typhen oksidien arvioiminen on haastavaa ja siksi etupesäjärjestelmän suunnittelussa ja kustannuslaskennassa tulee varautua SNCR-järjestelmän hankintaan.

Rikkidioksidipäästön raja-arvo on tällä hetkellä 500 mg/nm^3 ja lihaluujauhon seospoltossa raja olisi laskennallisesti noin 394 mg/nm^3 turpeen kanssa ja 169 mg/nm^3 hakkeen kanssa poltettaessa. Tasapainolaskelmien perusteella voidaan olettaa, että osa lihaluujauhon rikistä reagoi muodostaen alkalisulfaatteja ja näin vähentää muodostuvan rikkidioksidin määrää. Turpeen poltossa oletetaan, että lähes kaikki sen sisältämästä rikistä muodostaa rikkidioksidia, vaikkakin pieni osa rikistä voi todellisuudessa reagoida alkalien ja maa-alkalien kanssa. Vastaavasti hakkeen poltossa rikki voi reagoida etenkin kaliumin ja maa-alkalien kanssa. Oletetaan tässä tapauksessa, että turpeen ja hakkeen rikki reagoi täydellisesti rikkidioksidiksi ja vastaavasti lihaluujauhon rikistä 50 % reagoi rikkidioksidiksi. Turpeen ja lihaluujauhon seospoltossa rikkidioksidipäästö olisi laskennallisesti tällöin noin 530 mg/nm^3 . Mikäli myös 10 % turpeen rikistä reagoisi alkalien ja maa-alkalien kanssa, olisi rikkidioksidi päästö

noin 490 mg/nm^3 . Vastaavasti hakkeen ja lihaluujauhon poltossa rikkidioksidia muodostuisi 158 mg/nm^3 , mikäli vain 50 % lihaluujauhon rikistä reagoisi rikkidioksideiksi. Arvoista voidaan päätellä, että turpeen ja lihaluujauhon seospoltolla ei täytetä päästörajoja rikkidioksidin kohdalla. Hakkeen ja lihaluujauhon kohdalla rikkidioksidipäästöjen raja-arvo alitetaan, mikäli etupesän savukaasut ovat riittävän lähellä tasapainotilaa. Turvetta ja lihaluujauhoa polttaessa voidaan syöttää kalkkia esimerkiksi pääkattilan petiin, jolloin osa turpeen sisältämästä rikistä saadaan sidottua. Tässä tulee kuitenkin huomioida, että rikin sitominen voi lisätä kattilan likaantumista estämällä alkalisulfaattien muodostumista ja täten lisäämällä alkalikloridien määrää.

9 KOEPOLTOT

Tässä kappaleessa käsitellään lihaluujauhon koepolttoa, jonka tavoitteena oli tutkia lihaluujauhon ominaisuuksia polttoaineena pölypoltossa. Koepoltoissa pyrittiin varmistamaan lihaluujauhon tehokas syttyminen ja tasainen palaminen, kun polttotekniikkana käytettäisiin poltinpoltto. Lisäksi polttokokeissa mitattiin lihaluujauhon polton aiheuttamat vaikutukset kattilan savukaasupäästöihin. Koepolttojen tavoitteelliseksi kestoksi määritettiin 10 tunnin yhtäjaksoinen poltto.

Koepoltoissa käytettiin seulottua luokan 2 lihaluujauhoa, joka on koostumukseltaan vastaavaa kuin luokan 1 jauho. Lihaluujauho syötettiin kattilaan syöttölanssin avulla sekundääri-ilmasuuttimen kautta. Syöttölanssiin lihaluujauho syötettiin ejektorin avulla käyttäen kuljetusilmana kattilalaitoksen kuivattua paineilmaa. Ejektorin primäärivirtauksena toimiva paineilma luo sekundäärivirtaukselle eli tässä tapauksessa lihaluujauholle alipaineen. Alipaineen ansioista paineilma imee lihaluujauhoa ejektorin suppilosta ja estää näin suppilon tukkiutumisen. Paineilmamäärää säädettiin rotametrin avulla, jonka säätöalue oli 0–5000 NI/min. Lihaluujauhoa syötettiin suppiloon mekaanisesti spiraalikuljettimella, jonka pyörimisnopeutta säädettiin taajuusmuuttajan avulla. Ennen varsinaista koepolttoa tehtiin mitaukset, jonka avulla spiraalikuljettimen ja taajuuden arvon välille muodostettiin korrelaatio syöttönopeuden laskemiseksi.

Kokeissa havaittiin, että lihaluujauhon pneumaattinen syöttö on erittäin haastavaa sen virtausominaisuuksista johtuen. Aluksi kuljetinjärjestelmä asennettiin kattilarakennuksen pihalle ja kuljetuslinjan materiaalina käytettiin materiaalin siirtoon tarkoitettua ja hyvin kulu- tusta kestävä letkua, jonka sisäpinnan materiaali oli synteettistä kumia. Lyhyiden koeajojen jälkeen havaittiin, että kyseinen kuljetuslinja tukkiutui nopeasti, jonka vuoksi koepolttoja ei voitu suorittaa tällä järjestelmällä. Mekaaninen lihaluujauhon siirto onnistui ongelmitta, jos- kin havaittiin, että lihaluujauholla on taipumusta holvaantua voimakkaasti spiraalikuljetti- men syöttösuppilon.

Kuljetuslinjan tukkiutumisen vuoksi syöttölaitteisto siirrettiin sekundääri-ilmasuuttimien ta- salla sijaitsevalle huoltotasolle, jotta kuljetuslinjan pituus ja mutkat saataisiin minimoitua.

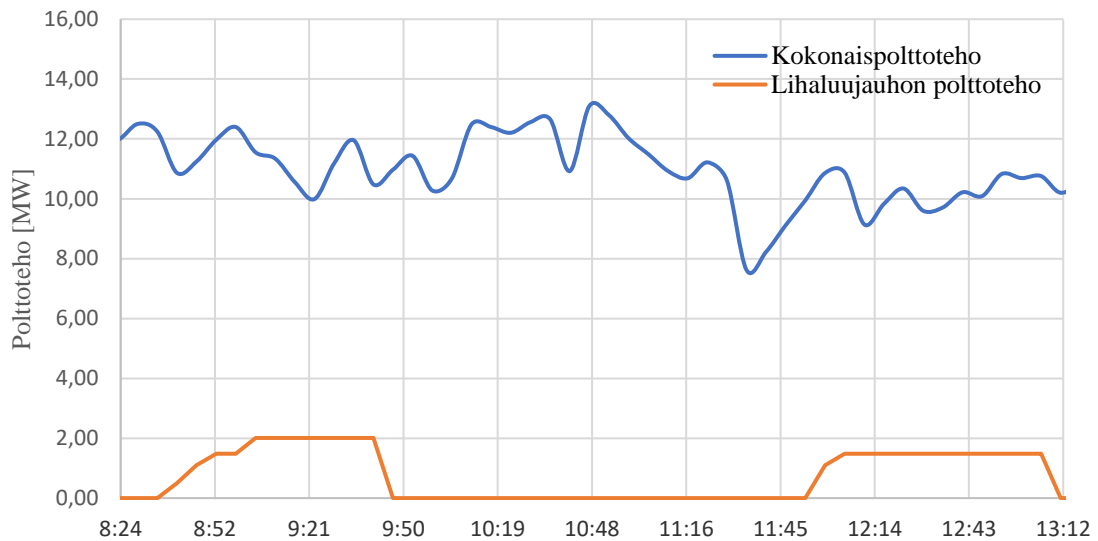
Ensimmäisissä koeajossa havaittiin, ettei teräsputkesta valmistettu, sekundääri-ilmasuuttimeen asennettu syöttölanssi kerännyt seinämille lihaluujauhoa juuri ollenkaan. Tämän vuoksi koko kuljetuslinjan materiaalina päätettiin käyttää samaista teräsputkea, kuin mistä syöttölanssi oli valmistettu. Teräsputkesta valmistetulla kuljetuslinjalla pystyttiin syöttämään lihaluujauhoa kaksi noin tunnin mittaista jaksoa, jonka jälkeen myös tämä kuljetuslinja tukkiutui. Tunnin mittaisilla polttojaksoilla ei päästy koepolton tavoitekeston, mutta saatiin varmuus lihaluujauhon palamisominaisuuksista sekä vaikutuksista savukaasupäästöihin.

Ensimmäinen polttojakso aloitettiin kello 8:40 ja tässä jaksossa polttoteho nostettiin porrastetusti vastaamaan noin 2 MW. Tunnin mittaisen polttojakson jälkeen syöttölinja vaikutti tukkeutuvan, jonka vuoksi syöttö pysäytettiin ja laitteisto puhdistettiin. Tämän jälkeen syöttö aloitettiin uudestaan kello 12:00 ja tässä polttojaksossa polttoteho nostettiin nopeasti vastaamaan noin 1,5 MW. Taulukossa 9 yläpuolella on esitetty ensimmäisen jakson lihaluujauhon polttotehot ja alapuolella toisen jakson polttotehot. Toisen polttojakson lopussa syöttölinja tukkiutui jälleen, jonka vuoksi koepoltot lopetettiin.

Taulukko 9. Lihaluujauhon polttotehot koepolton aikana.

Kesto [min]	Teho [MW]
2	0,50
10	1,10
10	1,48
38	2,01

Kesto [min]	Teho [MW]
1	1,10
66	1,48

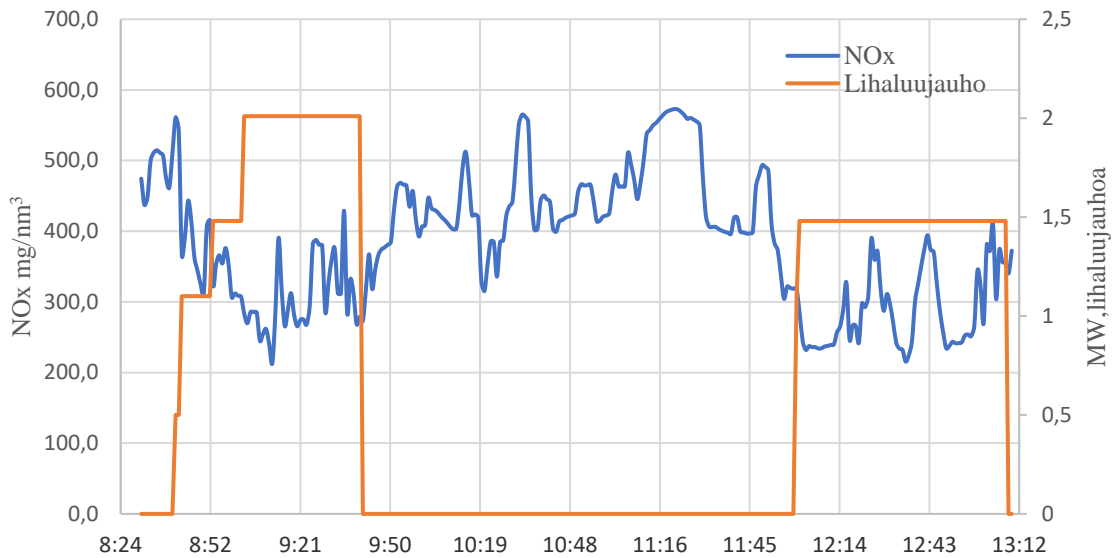


Kuva 16. Kattilan polttoteho koepolton aikana

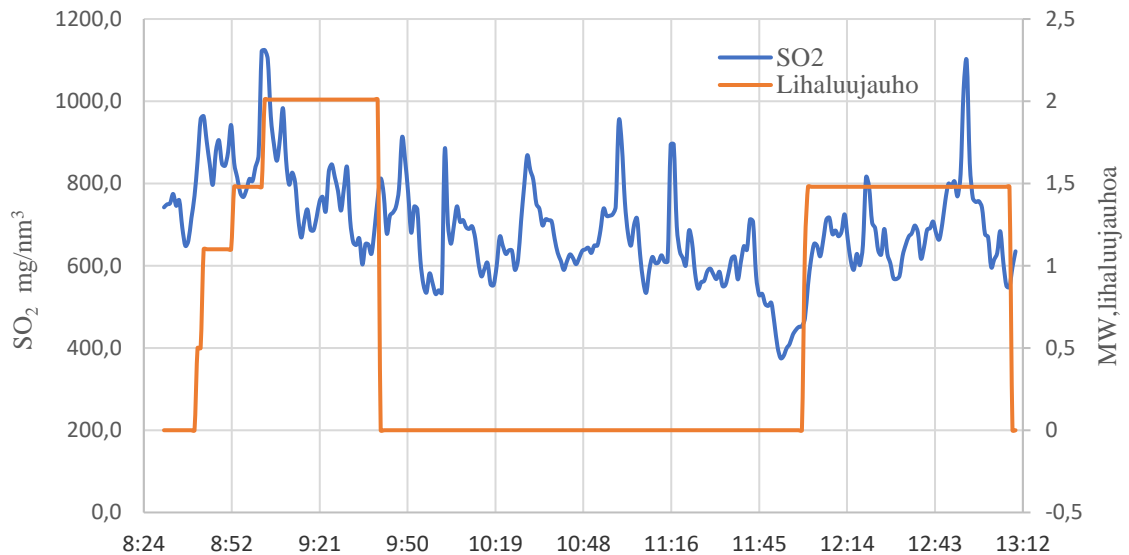
Kattilan kokonaispolttoteho sekä lihaluujauhon polttoteho ajan funktiona on esitetty kuvassa 16. Koepolttajien aikana kattilan pääpolttoaineena käytettiin turpeen ja hakkeen seosta 50 %–50 % polttoainesuhteella. Ensimmäisen koepolttajien aikana kokonaispolttoteho vaihteli 10–12 MW:n välillä ja toisen koepolttajien aikana 9–11 MW:n välillä. Koepolton aikana kattilan toiminnassa tai prosessiarvoissa ei havaittu muutoksia, jotka voitaisiin yhdistää lihaluujauhon polttoon. Kattilan tehon- ja ilmamäärän säätö toimivat hyvin, eikä esimerkiksi lihaluujauhon syötön aloitus laskenut tulipesän ylijäämähapen määrää. Lihaluujauhon syötön ei myöskään havaittu vaikuttavat tulipesän lämpötilatasoihin vaan ne vaihtelivat normaalilla vaihteluvälillä.

Lihaluujauhon syttymistä ja palamista tarkkailtiin näkölasista, joka sijaitsi vastapäisellä sivuseinällä. Lihaluujauhon syttyminen tapahtui välittömästi syötön alettua ja palaminen oli tasaista. Savukaasupäästöjä mitattiin ulkopuolisen päästömittaajan toimesta. Mitattavia savukaasupäästöjä olivat hiukkaspäästöt, typen oksidit ja rikkidioksidi. Hiukkaspäästöjen varmistamiseksi tehtiin kolme mittausta aikaväleillä 9:09-9:41, 12:15-12:47 ja 12:52-13:14, joista viimeisessä mittauksessa kuitenkin lihaluujauhon syöttö lopetettiin kesken mittauksen. Ensimmäisen mittauksen hiukkaspitoisuus oli 25 mg/nm^3 kuivassa savukaasussa ja 6 %:n happipitoisuudessa. Tällöin lihaluujauhon polttoteho oli noin 2 MW ja osuus kokonaispolttotehosta keskimääräisesti noin 18,5 %. Toisessa mittauksessa hiukkaspäästön arvoksi saatiin 15 mg/nm^3 , kun lihaluujauhon polttoteho oli noin 1,5 MW ja osuus keskimääräisesti

noin 15 % kokonaispolttotehosta. Vertailun vuoksi mainittakoon, että pelkän turpeen ja hakkeen poltossa hiukkaspäästön arvoksi saatiin koepoltoa edeltävänä päivänä 7–12 mg/nm³ kuudessa eri mittauksessa. Typen oksidien ja rikkidioksidin määrä koepolton aikana on esitetty kuvissa 17 ja 18.



Kuva 14. Typen oksidien määrä koepolton aikana



Kuva 18. Rikkidioksidin määrä koepolton aikana

Typen oksidien osalta on havaittavissa, että lihaluujauhon syötön alettua myös typen oksidien määrä alkoi laskemaan. Lihaluujauhon syötön pysähdyttyä klo. 9:40 huomataan, että

typen oksidien määrä savukaasuissa alkoi nousemaan. Lihaluujauhon vaikutus oli siis typen oksideja vähentävä, joka indikoi sitä, että lihaluujauhon sisältämä typpi ei muodosta typen oksideja tehokkaasti. Toisaalta lihaluujauhon syöttö muodostaa kattilaan paikallisesti ali-ilmaisen tilan, joka voi pelkistää jo muodostuneita typen oksideja typpimolekyyleiksi. Kyseinen ilmiö perustuu polttoaineenvaiheistukseen, jota käsiteltiin kappaleessa 5.1.2.

Kuvasta 18 huomataan, että rikkidioksidipitoisuus oli koko koepolttojen ajan korkealla tasolla. Lihaluujauhon polton vaikutuksia rikkidioksidipitoisuuteen on vaikea arvioida, johtuen lyhyestä koepolton kestosta sekä mahdollisesta vaihtelusta turpeen ja hakkeen seossuhteessa. Lihaluujauhon syötön alettua kuitenkin havaittiin, että rikkidioksidipitoisuus alkoi nousemaan, mikä oli odotettavissa korkean rikkipitoisuuden vuoksi. Koepoltto-olosuhteista johtuen voidaan kuitenkin päätellä, ettei tässä tapauksessa alkaleiden pelkistävät reaktiot kerkeä tapahtumaan. Etupesäpoltossa voidaankin olettaa, että lihaluujauhon rikkipitoisuudella ei ole näin voimakasta lisäävää vaikutusta rikkidioksidipäästöön.

Koepolttojen avulla varmistuttiin lihaluujauhon syttymis- ja palamisominaisuuksista pölypoltossa. Lisäksi päästömittausten avulla saimme arvion lihaluujauhon vaikutuksista savukaasupäästöihin. Savukaasupäästöjen osalta tilanne voi muuttua etupesässä esimerkiksi lämpötilan ja viipymäajan takia, mutta vaikutuksen suunnan voidaan olettaa joka tapauksessa vastaavan koepolttoja. Koepoltoista saatiin arvokasta käytännön kokemusta lihaluujauhon kuljettamisesta ja siihen liittyvistä haasteista. Erityishuomioita tulee kiinnittää siilon ja mahdollisten syöttösuppiloiden holvaantumiseen sekä pneumaattisessa siirrosta kuljetuslinjan tukkeutumiseen.

10 TARVITTAVAT LAITOSMUUTOKSET

Tässä kappaleessa käsitellään lihaluujauhon polttamiseksi tarvittavia muutoksia Honkajoen kattilalaitoksella. Muutosehdotusten ei ole tarkoitus olla yksityiskohtaisia suunnitelmia, vaan toimia pohjana varsinaisen suunnittelun aloittamiselle ja saattaa tämä esiselvityksenä toimiva diplomityö päätökseen. Samanaikaisesti tämän diplomityön kanssa suoritetun esisuunnittelun aikana on käyty keskustelua mahdollisten laiteoimittajien kanssa ja muutosehdotuksissa on huomioitu myös heidän näkemyksiään. Lihaluujauhon polttamiseksi vaadittavien muutosten lisäksi kattilan lämpötehoa nostettaisiin Honkajoki Oy:n lisääntyvän höyryn tarpeen vuoksi. Polttoteho nostettaisiin noin 18 MW:iin ja tästä lihaluujauhon osuus vastaisi noin 25 %. Tehon noston yhteydessä kattilan paine nostettaisiin 40 baariin. Kattilan tehoa nostettaessa pedin poikkipinta-alaa tulee kasvattaa poistamalla nykyisiä muurauksia, jotta mahdollistetaan riittävä primääri-ilmansyöttö ja toisaalta optimaalinen leijutusnopeus.

Savukaasujärjestelmiin tarvittavat muutokset riippuvat polttimessa muodostuvista päästöistä, käytetyistä pääpolttoaineista ja sähkösuodattimen toiminnasta. Typen oksidien määrään vaikuttaa esimerkiksi polttimen rakenne ja savukaasun happipitoisuus. Mikäli polttimella saavutetaan alhainen typen oksidien määrä, ei SNCR-järjestelmää tarvita. Koepolttojen perusteella lihaluujauhon poltolla ei ole typen oksidien määrää nostavaa vaikutusta. Tämän vuoksi poltintoimittajan tulisi määritellä muodostuvien päästöjen määrät ja antaa niille takuut. Rikkidioksidin määrä riippuu siitä, poltetaanko lihaluujauhon kanssa turvetta vai haketta. Hakkeen poltossa päästön raja-arvo alitetaan, mikäli etupesän savukaasut ovat riittävän lähellä kemiallista tasapainotilaa. Vastaavasti turpeen poltossa rikkidioksidien määrä ylittää raja-arvon, jolloin esimerkiksi kalkinsyöttö voisi olla toimiva ratkaisu. Hiukkaspäästöjen määrä riippuu sähkösuodattimen toiminnasta. Koepolttojen perusteella nykyisen sähkösuodattimen erotuskyky riittää nykyisellä polttoteholla ja lihaluujauhon osuuden ollessa 15–18,5 %. Sähkösuodattimen toimintaa voidaan parantaa rakenteellisilla muutoksilla, mikäli erotuskyky ei riitä suuremmilla lihaluujauhon osuuksilla. Toinen vaihtoehto hiukkaspäästöjen vähentämiseksi olisi lisätä esimerkiksi sykloni ennen sähkösuodatinta.

Likaantumisen aiheuttamien ongelmien ehkäisemisessä merkittävässä roolissa on kattilan nuohous ja sen tehokkuus. Pääkattilan tuhakuorman vähentämiseksi etupesä varustettaisiin

tuhkan poistolla ja kuumakaasukanava syklonilla, jotta likaantuminen olisi paremmin hallittavissa. Nuohousjärjestelmien määrittelyssä ratkaisevassa roolissa ovat laitetoimittajat ja heidän kokemuksensa. Käytyjen keskustelujen mukaan lihaluujauhon nuohoamisesta on kokemusta ja sen onnistumisesta on referenssejä. Alustavien suunnitelmien mukaan vanhat nuohoimet korvattaisiin nykyaikaisilla ja tehokkaammilla höyrynuohoimilla, jotka sijoitettaisiin lieriöiden välisten kattilaputkien ja ekonomaiserin alueelle. Savukaasun virtaussuunnassa ensimmäinen nuohoin sijoitettaisiin kuvassa 11 näkyvälle paikalle. Tämän lisäksi kattilan 2- ja 3-vetoon sijoitettaisiin molempiin vähintään kaksi nuohointa laitetoimittajan määrittelyjen mukaisesti. Ekonomaiserin alueen nuohoustarpeeseen ja nuohointen sijoitteluun vaikuttaa uuden ekonomaiserin rakenne, joka täsmentyy suunnittelun edetessä. Edellä mainittujen lisäksi myös kattilan pohjatuhkajärjestelmä uusittaisiin ja varustettaisiin seulonnalla ja hiekan palautuksella. Pääkattilan tuhkanpoistoa tulisi lisätä, mikäli etupesästä syntyvää lihaluujauhon tuhkaa kertyisi myös pääkattilan petiin. Petimateriaalin seulonnalla ja hiekan palautuksella vähennettäisiin hiekan kulutusta, tuhkan määrää ja mahdollistettaisiin petimateriaalin riittävä vaihto. Riittävällä petimateriaalin vaihtamisella pystyttäisiin estämään pedin sintraantuminen, mikäli alkaleita kerääntyisi petiin.

Lihaluujauhon polton vaatimuksena on aiemmin mainittu kahden sekuntin viipymäaika 850 °C:ssa, jonka vuoksi poltto tulee tapahtua erillisessä polttokammiossa. Esisuunnittelujen mukaisesti polttokammiota varten rakennettaisiin erillinen laajennusosa, johon kammio sijoitettaisiin pystyyn. Kammion yläpuolelle sijoitettaisiin polttoainesilo lihaluujauholle, johon siirto tapahtuisi mekaanisella kuljettimella laitoksen pihalle rakennettavasta polttoaineen vastaanottotaskusta. Siilosta polttoaine annosteltaisiin ruuvikuljettimilla tasaustaskuun, josta polttoaine tulisi syöttää polttimelle pneumaattisesti. Koepolttokokemuksiin perustuen huomiota tulisi kiinnittää erityisesti lihaluujauhon holvaantumiseen siilossa ja tasaustaskussa sekä pneumaattiseen siirtoon. Pneumaattista siirtoa varten poltintoimittajan tulisi määrittellä tarvittava syöttölaitteisto tasaustaskulta polttimelle ja varmentaa mahdollisuuksien mukaan syötön onnistuminen esimerkiksi koepoltoin. Laajennusosan ja lihaluujauhon vastaanottotaskun sijainnit ovat esitettyinä liitteen 6 asemapiirroksessa ja julkisivukuvassa.

Etupesän koko määräytyy pääasiassa poltintoimittajan määrittämän tilavuuden mukaan. Etupesässä muodostuvien savukaasujen lämpötila tulisi jäähdyttää, jotta mahdollisimman vähän

kaasumaisia ja sulia tuhkayhdisteitä kulkeutuisi pääkattilaan. Teoriassa vaihtoehtoina olisi jäähdyttää etupesä vesikierrolla, kiertokaasulla tai yli-ilmalla. Tässä rajoittavana tekijänä ovat polttimen läpi tuotavan kaasun määrän vaikutus liekin ominaisuuksiin ja palamiseen sekä vaaditun lämpötilan saavuttaminen kaikilla kuormilla. Kaikkia edellä mainittuja vaihtoehtoja on tarkasteltu aikaisemmin rakennetulla PPSD-mallilla, johon on lisätty etupesä ja poltin lihaluujauholle. Yli-ilmalla jäähdytetty etupesä nostaisi pääkattilan happitasoa siten, että optimaalista savukaasujen happipitoisuutta tulipesässä ei saavutettaisi, vaikka sekundaari-ilman syöttö lopetettaisiin kokonaan. Tämän vuoksi tätä vaihtoehtoa ei voida käyttää. Vesijäähdytteisellä etupesällä savukaasuja voitaisiin jäähdyttää johtamalla vesi etupesään joko ekonomaiserialta tai yhdistämällä etupesä kattilan luonnonkiertoon. Honkajoen kattilan vesikierron erikoisuuden vuoksi tulisi vesijäähdytteisen etupesän vaikutus kattilan luonnonkiertoon arvioida tarkasti. Toisaalta haasteeksi muodostuisi lämpötila kattilan osakuormilla. Täydellä teholla ajettaessa etupesän lämpötila nousisi liian korkeaksi, mikäli etupesä muurattaisiin siten, että lämpötila myös pienillä kuormilla ylittäisi 850 °C:tta. Tämän vuoksi muuraus ei saa olla liian paksu, jolloin pienemmillä kuormilla lihaluujauhon poltto tulisi pysäyttää. Kiertokaasulla jäähdytetyllä etupesällä lämpötiloja voitaisiin säätää kiertokaasun ja palamisilman suhteella, jolloin myös minikuormilla lämpötila saataisiin pysymään yli 850 °C:tta. Vastaavasti täydellä teholla kiertokaasun määrä voitaisiin lisätä, jolloin lämpötila ei nousisi liian korkealle. Mallin mukaan täyden tehon tilanteessa lämmönsiirto painottuu normaalia enemmän ekonomaiserialle. Tämän vuoksi kattilan paineen nostaminen vähintään 40 baarin olisi suotavaa, jottei ekonomaiseriali höyrystäisi syöttövertä. Vertailun perusteella kiertokaasun käyttö etupesän jäähdytyksessä on soveltuvin ratkaisu.

Kiertokaasulla jäähdytetty etupesä lisättynä kattilan laskentamalliin on esitetty liitteessä 5. Kokonaispolttotehona laskennassa on käytetty noin 18 MW, josta lihaluujauhon osuus on noin 25 %. Pääpolttoaineena mallissa on käytetty turvetta. Kattilan paine on nostettu 40 baariin ja tällöin ekonomaiserialin jälkeinen veden lämpötila on 230 °C:tta. Savukaasujen lämpötilat nousevat tulipesän yläosassa sekä hilan ja ekonomaiserialin jälkeen etupesän ja tehonoston vuoksi. Savukaasun loppulämpötilan pitäminen 140 °C:ssa erittäin kosteilla polttoaineilla ja nykyisellä kattilarakenteella on haastavaa. Laskenta on suoritettu nykyisellä ripaputkiekonomaiserialilla, mutta muutosten yhteydessä myös ekonomaiseriali olisi uusittava ja mitoitettava vastaamaan uutta lämpötehoa.

11 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia mahdollisuutta hyödyntää Honkajoki Oy:n tuottamaa luokan 1 lihaluujauhoa polttoaineena Honkajoen kattilalaitoksella. Työn alussa käytiin läpi lainsäädännössä määritettyjä vaatimuksia, joista polttotekniikan kannalta merkittävin on lihaluujauhon poltossa vaadittu 850 °C:een lämpötila kahden sekunnin ajan. Tämän vaatimuksen ja Honkajoen kattilan rakenteen vuoksi lihaluujauhoa ei voida polttaa kattilassa ilman polttoteknisiä muutoksia. Tämän vuoksi tässä diplomityössä pyrittiin kehittämään toimiva ratkaisu ja tarvittavat laitosmuutokset, joilla lihaluujauhon polttaminen onnistuu. Vähäisten käyttökokemusten vuoksi lihaluujauhon vaikutukset kattilan käytettävyyden kannalta ovat merkittävässä roolissa muutosinvestoinnin kannattavuuden ja riskien arvioinnissa. Tästä syystä tässä diplomityössä pyrittiin määrittelemään lihaluujauhon polttamisen vaikutukset kattilan likaantumiseen ja korroosioon.

Kattilan likaantumista ja korroosiota tutkittiin kemiallisen tasapainolaskennan avulla, jossa lähtötietoina käytettiin lihaluujauhon koostumusta. Laskennan tuloksina saatiin lihaluujauhon poltossa muodostuvat kemialliset yhdisteet ja niiden määrät. Näistä yhdisteistä määritettiin likaantumisen ja korroosion kannalta kriittisimmät sekä arvioitiin niiden käyttäytymistä kirjallisuuden avulla. Kriittisten yhdisteiden ominaispiirteiden ja kattilan lämpötilatasojen perusteella arvioitiin yhdisteiden käyttäytymistä Honkajoen kattilassa. Suurin osa lihaluujauhon tuhkasta poistuu kattilasta kalsiumfosfaattina ja kalsiumhydroksiapatiittina, jotka omaavat korkean sulamislämpötilan. Etupesässä muodostuvista yhdisteistä haastavimpia likaantumisen ja korroosion kannalta ovat kaasumaiset ja osittain sulaneet kiinteät alkalikloridit. Tasapainon mukaan lihaluujauhon sisältämä rikki onnistuu sitomaan etenkin natriumia tehokkaasti samalla vähentäen natriumkloridien muodostumista, joskin tästä huolimatta alkaliklorideja muodostuu paljon. Edellä mainittujen lisäksi alkalit muodostavat runsaasti korkean sulamislämpötilan omaavia alkalifosfaatteja. Korkean sulamislämpötilan vuoksi alkalifosfaatit eivät ole haastavia likaantumisen kannalta, mutta niiden on havaittu aiheuttavan sintraantumista leijupedissä.

Lämpötilatasojen perusteella arvioitiin, että likaantuminen painottuu kattilan 2- ja 3-vedon alueella, johtuen alkaliyhdisteiden kondensoitumisesta ja sulien yhdisteiden tarttumisesta

lieriöiden välisiin kattilaputkiin. Tulipesän likaantuminen on mahdollista, mikäli lämpötila mahdollistaa yli 15 % sulan tuhkan osuuden. Lämpöpinnoille tarttuneet kondensoituneet ja sulat yhdisteet liimaavat myös muita tuhkapartikkeleja pinnoille, jonka vuoksi likaantuminen on voimakasta. Lihaluujauhon sisältää paljon epäorgaanista ainesta, jonka vuoksi kattilan tuhkakuorma kasvaa huomattavasti lihaluujauhon osuuden kasvaessa polttoaineseoksessa. Mikäli lihaluujauhon polttoteho vastaisi 25 % kokonaispolttotehosta turpeen kanssa poltettaessa, olisi tuhkakuorma yli kaksinkertainen verrattuna pelkän turpeen polttoon. Toimintavarmuuden arvioimisessa merkittävässä roolissa on likakerroksen nuohouksen onnistuminen. Työn aikana käytyjen keskustelujen perusteella lihaluujauhon tuhkan nuohouksesta on kokemusta laitetoimittajilla ja sen oletetaan onnistuvan. Lisäksi matalasta veden ja höyryn lämpötilasta johtuen lämpöpinnojen pintalämpötilat ovat alhaiset, jonka ansiosta likakerroksen voidaan olettaa olevan tulistuskattilassa muodostuvaa likakerrosta hauraampaa ja helpommin nuohottavissa.

Seospolton vaikutuksia kattilan likaantumiseen on haastava arvioida etupesäpoltossa, sillä savukaasujen ja epäorgaanisen aineksen keskinäiseen reagoimiseen vaikuttaa savukaasujen sekoittuminen, viipymäaika ja nopea jäähtyminen. Koostumusten perusteella voidaan kuitenkin olettaa, että turpeen poltto helpottaa lihaluujauhon polttamista suojaavien rikki ja alumiinisilikaattien vuoksi. Hake puolestaan ei omaa kattilaa suojaavia yhdisteistä, jonka vuoksi likaantumisen voidaan olettaa olevan voimakkaampaa. Mikäli lihaluujauhoa haluttaisiin polttaa muiden polttoaineiden kanssa suoraan leijukerroskattilan pedissä, tulisi seosuhde ja tuhkan käyttäytyminen määritellä tarkasti. Lihaluujauhon polttaminen suoraan pedissä seospolttona aiheuttaa riskin pedin sintraantumiseksi ja tämän vuoksi aiheesta tarvittaisiin jatkotutkimuksia sopivan seosuhteen määrittämiseksi.

Työn aikana korroosiota ja sen muodostumismekanismia tutkittiin kirjallisuuden avulla. Lihaluujauhon poltossa muodostuu paljon alkaliklorideja, jotka aiheuttava kuumakorroosiota noin 450–480 °C:ssa. Honkajoen kattilassa kuumakorroosiosta ei pääse tapahtumaan, sillä pintalämpötilat ovat matalat. Paineen ollessa 40 baaria ovat pintalämpötilat noin 260 °C:ttä. Mikäli poltto tapahtuisi tulistuskattilassa, olisi lihaluujauhon aiheuttaman korroosion riski suuri. Rikkihapon ja hygroskooppisten suolojen aiheuttama matalalämpötilakorrosio on mahdollista, mutta siltä voidaan välttyä pitämällä syöttöveden ja savukaasujen

loppulämpötila nykyisellä tasolla. Hygroskooppisten suolojen aiheuttamalta korroosiota on havaittu tapahtuvan ekonomaiserin alueella, jos syöttöveden lämpötila on alle 100 °C:ta.

Lihaluujauhon poltossa muodostuvia savukaasupäästöjä tutkittiin koepolttojen, laskennan sekä muodostumismekanismien avulla. Koepolttojen perusteella lihaluujauhon poltto laskee typen oksidien määrää, joskin typen oksidien määrä koepoltto-olosuhteissa voi kuitenkin erota erillisessä polttokammiossa muodostuvista päästötasosta. Laskennan perusteella voidaan arvioida, että turpeen ja lihaluujauhon seospoltolla ei täytetä päästörajoja rikkidioksidin kohdalla. Hakkeen ja lihaluujauhon kohdalla rikkidioksidipäästöjen raja-arvo alitetaan, mikäli etupesän savukaasut ovat riittävän lähellä tasapainotilaa. Hiukkasten määrä savukaasuissa on korkea, mutta hiukkaspäästöjen määrä riippuu sähkösuodattimen toiminnasta. Koepolttojen perusteella lihaluujauhon polttaminen nostaa kattilan hiukkaspäästöjen määrää, mutta ei silti ylitä sallittua raja-arvoa. Lihaluujauhon osuuden ollessa 15–18,5 % hiukkaspäästöt olivat 15–25 mg/nm³.

Vaaditun viipymääajan vuoksi lihaluujauhon polttaminen tulisi tapahtua erillisessä polttokammiossa, josta kuumat savukaasut johdettaisiin pääkattilaan. Polttotekniikoita vertailemalla määritettiin soveltuvaksi polttotekniikaksi poltinpoltto. Etupesän ja polttimen erilaisia toteutustapoja ja niiden vaikutusta pääkattilan toimintaan vertailtiin työn aikana rakennetun laskentamallin avulla. Vertailtuja toteutustapoja olivat yli-ilmalla, vesikierrolla ja kiertokaasulla jäähdytetyt etupesät. Vertailun perusteella määritettiin parhaaksi ratkaisuksi kiertokaasulla jäähdytetty etupesä, jonka avulla poltossa vaadittava lämpötila on helppo ylläpitää kaikilla kuormilla. Yli-ilmalla jäähdytetyssä etupesässä haasteeksi muodostuu liian korkea savukaasujen happipitoisuus. Vesikiertoisella etupesällä puolestaan ongelmia muodostaa vaaditun lämpötilan ylläpitäminen. Korkeilla kuormilla ja muuratulla etupesällä savukaasujen lämpötila nousisi todella korkeaksi ja tällöin sulien ja kaasumaisten yhdisteiden osuus tuhassa ja savukaasuissa lisääntyisi. Tämän vuoksi muuraus ei saisi olla liian paksu, jolloin pienemmillä kuormilla lihaluujauhon poltto tulisi pysäyttää, sillä vaadittua lämpötilaa ei saavutettaisi.

Lihaluujauhon pneumaattinen syöttö havaittiin työn aikana suoritetuissa koepoltoissa erittäin haasteelliseksi, jonka vuoksi toimivan syöttöjärjestelmän suunnitteluun tarvitaan

jatkotutkimuksia. Mahdollisia tutkimuskohteita voisivat olla lihaluujauholla soveltuvat materiaalivalinnat sekä syöttötapa. Toimivalla syöttöjärjestelmällä olisi mahdollista suorittaa pidempiaikaiset koepoltot ja täten varmentaa lihaluujauhon poltossa muodostuvat päästötasot tarkemmin sekä tutkia likaantumista. Likaantumista voitaisiin tutkia polttamalla lihaluujauhoa ennen vuosittaista huoltoseisokkia, jolloin seisokin aikana voitaisiin tarkastaa likaantuneet lämpöpinnat. Tämän avulla nuohoustarpeen määrittely ja kohdentaminen oikeisiin paikkoihin olisi helpompaa. Koepolttojen päästömittaustulokset voivat erota etupesä- ja poltinpoltosta, jonka vuoksi myös koepoltto etupesää vastaavissa olosuhteissa olisi mahdollinen jatkotutkimuskohde.

LÄHTEET

Alakangas ym. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 8.10.2020]. ISSN 2242-122X. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8419-2>

Asetus 1069/2009/EY. Muiden kuin ihmisravinnoksi tarkoitettujen eläimistä saatavien sivutuotteiden ja niistä johdettujen tuotteiden terveystähtäimistä sekä asetuksen (EY) N:o 1774/2002 kumoamisesta (sivutuoteasetus).

Asetus 142/2011/EU, muiden kuin ihmisravinnoksi tarkoitettujen eläimistä saatavien sivutuotteiden ja niistä johdettujen tuotteiden terveystähtäimistä sekä asetuksen (EY) N:o 1774/2002 kumoamisesta annetun Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EY) N:o 1069/2009 täytäntöönpanosta sekä neuvoston direktiivin 97/78/EY täytäntöönpanosta tietyjen näytteiden ja tuotteiden osalta, jotka vapautetaan kyseisen direktiivin mukaisista eläinlääkärintarkastuksista rajatarkastusasemilla.

Asetus 2020/735/EU. Asetuksen (EU) N:o 142/2011 muuttamisesta siltä osin kuin on kyse liha-luujauhon käyttämisestä polttolaitoksissa polttoaineena.

Bale, C. W. & Bélisle, E. FACT-Web Database. Saatavilla: www.factsage.com

Baxter Larry. 2000. Ash Deposit Formation and Deposit Properties. A Comprehensive Summary of Research Conducted at Sandia's Combustion Research Facility. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 27.1.2021]. Saatavilla: <https://www.osti.gov/biblio/760515-JPNxej/webviewable/>

Blomberg, Tom ym. 2004. Role of Alkali Hydroxides in the Fireside Corrosion of Heat Transfer Surfaces, a Practical Approach. Materials Science Forum Vols. 461-464. 2004. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 18.2.2021]. Saatavilla: <https://www.scientific.net/MSF.461-464.883>

Boskey, Adele L. 2007. Mineralization of bones and teeth. Elements 2007. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 19.1.2021]. Saatavilla: <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/elements/article-abstract/3/6/385/137751/Mineralization-of-Bones-and-Teeth?redirectedFrom=fulltext>

Deydier Eric, ym. 2005. Physical and chemical characterisation of crude meat and bone meal combustion residue: “waste or raw material?”. Journal of Hazardous Materials B121 (2005) 141–148. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389405000555>

Garcia R.A ym. 2006. Factors contributing to the poor bulk behavior of meat and bonemeal and methods for improving these behaviors. ScienceDirect. 2006. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 13.11.2020]. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852406005219>

Honkajoki Oy. 2020. Lihaluujauhon koostumus.

Houshfar Ehsan ym. 2012. Experimental Investigation on NO_x Reduction by Primary Measures in Biomass Combustion: Straw, Peat, Sewage Sludge, Forest Residues and Wood Pellets. Energies 2012, 5(2), 270-290. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 19.2.2021]. Saatavilla: <https://www.mdpi.com/1996-1073/5/2/270>

Huhtinen, Markku ym. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5.painos. Helsinki. Oy Edita Ab. 2000. 379 s. ISBN 951-37-3360-2

Hupa, Mikko ym. 2015. Biomass combustion technology development –It is all about chemical details. Abo Akademi University. Turku. 2015. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1540748916302103>

Jensen P.A. ym. 1997. Deposition Investigation in Straw-Fired Boilers. Energy & Fuels 1997, 11, 1048–1055. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 27.1.2021]. Saatavilla: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef960154t>

Kpa Unicon. 2020. Unicon biograte. [Verkkosivu]. [Viitattu 2.11.2020]. Saatavilla: <https://www.kpaunicon.com/create/biowaste/biograte/>

Laxminarayan Y. 2018. Formation, Sintering and Removal of Biomass Ash Deposits. Technical University of Denmark. [Väitöskirja]. [Viitattu 27.1.2021]. Saatavilla: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/formation-sintering-and-removal-of-biomass-ash-deposits>

Lindau Leif & Goldschmidt Barbara. 2008. Low temperature corrosion in bark fuelled, small boilers. Värmeforsk Service AB. 2008. 31 sivua. ISSN: 1653–1248

Raiko, Risto ym. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Helsinki. International Flame Research Foundation. 750s. ISBN 951-666-604-3

Sevonius Cristoffer ym. 2020. Agglomeration tendency of a fluidized bed during addition of different phosphate compounds. Fuel, Volume 268. 2020. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 17.2.2021]. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120302957>

Spliethoff Hartmut. 2010. Power Generation from Solid Fuels. Germany. Springer Heidelberg Dordrecht London New York. 2010. ISBN: 978-3-642-02856-4 (sähköinen).

Strömberg, Birgitta. 2006. Fuel handbook. Tukholma. Värmeforsk Service AB. 104 sivua. ISSN: 0282-3772

Tan Zhongchao. 2014. Air Pollution and Greenhouse Gases. From Basic Concepts to Engineering Applications for Air Emission Control. 1.painos. Springer Science + Business Media Singapore. 2014. ISBN: 978-981-287-212-8

Teir Sebastian. 2003. Steam Boiler Technology. 2.painos. Espoo. Helsinki University of Technology. 2003. 215s. ISBN 951-22-6759-4

Theodore Louis. 2008. Air Pollution Control Equipment Calculations. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2008. 574 sivua. ISBN: 978-0-470-20967-7

Vainio Emil ym. 2016. Low-temperature corrosion in co-combustion of biomass and solid recovered fuels. Elsevier. 2016. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 1.2.2021]. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236116301387?via%3Dihub>

Vakkilainen Esa. 2010. Höyrykattilatekniikka. Leijukerroskattilat. Opintomateriaali. LUT-yliopisto.

Vakkilainen Esa. 2012. Höyrykattilatekniikka. Emissiot. Opintomateriaali. LUT-yliopisto.

Vakkilainen Esa. 2016. Steam generation from biomass. Construction and Design of Large Boilers. Elsevier. ISBN: 978-0-12-804407-0. (Sähköinen).

Vatajankosken Sähkö Oy. 2020. Honkajoen höyrykattilalaitoksen poikkileikkaus.

Vega-Nieva Daniel ym. 2015. Slagging and Fouling Risks Derived from the Combustion of Solid Biofuels. WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, 2015. ISSN: 1755-8336 (sähköinen)

Verhoff FH & Banchemo J.T. 1974. Predicting dew points of flue gases. Chem Eng Prog, 70 (1974), sivut. 71-72. Saatavilla: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-2742525024&origin=inward&txGid=0e593e371a3f5422d085edae34f44b81>

VNa 151/2013. Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta.

VNa 1065/2017. Valtioneuvoston asetus keskisuurten energiantuotantoyksiköiden ja -laitosten ympäristönsuojeluvaatimuksista.

Yongtie Cai ym. 2018. Modeling of ash formation and deposition processes in coal and biomass fired boilers: A comprehensive review. *Applied Energy* 2018. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 22.1.2021]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.084>

Zevenhoven Maria ym. 2012. Characterization of Ash-Forming Matter in Various Solid Fuels by Selective Leaching and Its Implications for Fluidized-Bed Combustion. *Energy fuels* 2012. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 19.1.2021]. Saatavilla: <https://pubs-acsc-org.ezproxy.cc.lut.fi/doi/abs/10.1021/ef30062>

Zevenhoven Ron & Kilpinen Pia. 2004. Control of pollutants in flue gases and fuel gases. 3. PAINOS. Espoo. 2004. 268s. ISBN 951 - 22 - 5527 – 8.

Zhu Yiming ym. 2017. Experiment Study on Ash Fusion Characteristics of Cofiring Straw and Sawdust. *Energy Fuels*. 2018. 525-531. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 17.2.2021]. Saatavilla: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.7b03104>