

**Riku Niva**

**MAA-ALKALIAINEKSEN HYÖDYNTÄMINEN  
BIOVOIMALAITOKSEN LEIJUPETIPROSESSISSA**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma  
Toukokuu 2018**

**TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ**

<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Toukokuu 2018	<b>Tekijä/tekijät</b> Riku Niva
<b>Koulutusohjelma</b> Sähkö- ja automaatiotekniikka		
<b>Työn nimi</b> MAA-ALKALIAINEKSEN HYÖDYNTÄMINEN BIOVOIMALAITOKSEN LEIJUPETIPROSESSISSA		
<b>Työn ohjaaja</b> Aki Suokko	<b>Sivumäärä</b> 81 + 5	
<b>Työelämäohjaaja</b> -		
<p>Tämä työ on tehty Centria-ammattikorkeakoulun tutkimus ja kehitys -yksikölle ja se käsitteli maa-alkaliaineksen (dolomiitti) syöttöä lämpölaitoksen leijupetiprosessiin. Dolomiitin syötöllä oli tarkoitus vähentää poltossa muodostuvien savukaasujen rikki- ja klooripitoisuuksia, jotka aiheuttavat kattilaosien kulumista/korroosiota.</p> <p>Työn tavoitteena oli myös saada poltossa muodostuneesta tuhkasta hyväksyttävä peltolannoitekäyttöön. Kotimaisten polttoaineiden poltossa muodostuvaa tuhkaa hyödynnetään yleisesti metsälannoitteena, mutta peltolannoitekäytössä tuhkan raskasmetallipitoisuudet, varsinkin kadmium, ovat yleensä rajoitettava tekijä. Työssä tutkittiin, miten dolomiitin syöttö leijupetiprosessiin vaikuttaa tuhkan raskasmetallipitoisuuksiin.</p> <p>Työssä tehtiin neljä dolomiitin syöttökoeajoja Laihian Nuuka Lämpö Oy:n leijupetikattilaan. Koeajojen aikana savukaasuanalysoitsija keräsi dataa savukaasuissa tapahtuvista muutoksista, ja tuhkanäytteitä kerättiin myöhempää analyysia varten. Koeajoissa polttoaineena olivat turve sekä kokopuu- että metsätähdehake.</p> <p>Työn teoriaosuudessa on käsitelty leijukerros polttoa, savukaasujen mittausta ja kattilaosien korroosiota. Lyhyesti on käsitelty polttoaineiden, savukaasujen ja tuhkan ominaisuuksia. Teoriaosuuden jälkeen työssä käsitellään koeajot ja niistä saadut tulokset. Työ sisältää myös alustavan selvityksen dolomiitin annostelun kannattavuudesta.</p>		

<b>Asiasanat</b> Dolomiitti, FTIR, kloori, korroosio, leijukerros poltto, leijupetikattila, tuhka, rikki, savukaasut.
--

## ABSTRACT

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> May 2018	<b>Author</b> Riku Niva
<b>Degree programme</b> Electrical and Automation Engineering		
<b>Name of thesis</b> UTILIZING ALKALINE ELEMENTS IN THE FLUIDIZED BED PROCESS OF A BIOMASS PLANT		
<b>Instructor</b> Aki Suokko	<b>Pages</b> 81 + 5	
<b>Supervisor</b> -		
<p>This work was done for the R&amp;D department of Centria University of Applied Sciences and it handled alkaline element (dolomite) input to the fluidized bed process in a heating plant. The reason for feeding the dolomite is decrease the sulfur and chlorine levels of flue gases, because they cause corrosion in boiler parts.</p> <p>The aim of the thesis was also to change the contents of the ash resulting from the combustion so that it would be acceptable to be used as a fertilizer. Domestic ash that comes from combustion is usually used as forest fertilizer, but using as a field fertilizer is problematic, because it contains heavy metals like cadmium, which is usually the restrictive factor. In this assignment it was researched, how dolomite feeding in to a fluidized bed process affects the heavy metal content of ashes.</p> <p>In this assignment four dolomite feeding test were done for Laihia's Nuuka Lämpö Oy fluidized bed. During the test runs, the flue gas analyzer collected data on changes in flue gases and ashes samples were collected for later analysis. In the test run peat, whole wood and logging residue chips were used as fuel.</p> <p>In theory part reviewed fluidized bed combustion, flue gases measurement and boiler parts corrosion. In short fuel, flue gases and properties of ash were analyzed. After theory part test runs and results were analyzed. Study includes preliminary report how profitability feeding the dolomite is.</p>		

### Key words

Dolomite, FTIR, chlorine, corrosion, fluidized bed combustion, fluidized bed boiler, ash, sulfur, flue gases.

## KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

AAS	Atomic Absorption Spectroscopy, atomiabsorptiospektrofotometri
BFB	Bubbling Fluidized Bed, kupliva leijupeti
CFB	Circulating Fluidized Bed, kiertopeti
CH <sub>4</sub>	Metaani
CO	Hiilimonoksidi, häkä
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
FID	Flame Ionization Detector, liekki-ionisaatiodetektori
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectrometer, fourier-muunnosinfrapunaspektroskopia
HCl	Suolahappo
HF	Vetyfluoridi, fluorivety
H <sub>2</sub> O	Vesi
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, induktiivisesti kytketty plasma - massaspektrometri
kPa	Kilopascal, yleinen paineen yksikkö
mg/Nm <sup>3</sup>	Milligrammaa kuutiometriä kohti NTP-olosuhteissa
NDIR	Non-Dispersive Infrared Spectrometry, ei-dispersiivinen infrapunaspektrometria
NH <sub>3</sub>	Ammoniakki
NO	Typpimonoksidi
NO <sub>2</sub>	Typpidioksidi
NO <sub>x</sub>	Yhteisnimi typen oksideille
N <sub>2</sub> O	Ilokaasu, dityppioksidi
NTP	Normal Temperature and Pressure, normaalilämpötila ja -paine
O <sub>2</sub>	Happi
POR	Raskas polttoöljy
ppm	Parts per million, yksi miljoonasosa
ppb	Parts per billion, yksi miljardisosa
SO <sub>2</sub>	Rikkidioksidi
TOC	Total Organic Carbon, orgaaninen kokonaishiili

**TIIVISTELMÄ**  
**ABSTRACT**  
**KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**  
**SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 LEIJUKERROSPOLTTO .....</b>	<b>3</b>
2.1 Leijukerros polttojärjestelmän rakenne .....	5
2.2 Leijupetikattilat (kerrosleijukattilat) .....	7
2.3 Kiertopetikattilat .....	10
2.4 Korroosio.....	13
2.5 Korkean lämpötilan korroosio .....	15
2.6 Dolomiitti.....	16
2.7 Laihian Nuuka Lämpö Oy .....	17
<b>3 POLTTOAINEIDEN OMINAISUUKSIA.....</b>	<b>19</b>
3.1 Puu polttoaineena .....	19
3.2 Turve polttoaineena .....	22
<b>4 TUHKAN MUODOSTUMINEN .....</b>	<b>26</b>
4.1 Tuhkan aiheuttamat ongelmat leijukerros poltossa.....	26
4.2 Tuhkan hyötykäyttö ja lainsäädäntö .....	27
<b>5 SAVUKAASUT .....</b>	<b>31</b>
5.1 Rikin oksidit .....	31
5.2 Vetyhalogeenit .....	32
5.3 Typen oksidit.....	33
5.4 Hiilidioksidi ja hiilimonoksidi .....	34
5.5 Hiilivedyt .....	34
<b>6 SAVUKAASUJEN MITTAAMINEN .....</b>	<b>36</b>
6.1 FTIR-kaasuanalysaattorin rakenne ja toimintaperiaate .....	36
6.2 Gasmet DX4000 .....	37
6.2.1 Mittaus Gasmet DX4000:lla .....	38
6.2.2 Gasmet DX4000:n kalibrointi .....	40
<b>7 SAVUKAASUMITTAUKSET .....</b>	<b>41</b>
7.1 Ensimmäinen dolomiittikoeajo .....	41
7.2 Toinen dolomiittikoeajo .....	49
7.3 Kolmas dolomiittikoeajo.....	55
7.4 Neljäs dolomiittikoeajo .....	62
<b>8 TEKNISTALOUDELLINEN SELVITYS .....</b>	<b>68</b>
8.1 Investointi annostelujärjestelmään.....	69
8.2 Dolomiitista aiheutuvat kustannukset.....	73
<b>9 JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>77</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>78</b>

## LIITTEET

### KUVIOT

KUVIO 1. FTIR-analysointiperiaate.....	37
KUVIO 2. Trendikäyrät ensimmäisessä koeajossa.....	44
KUVIO 3. Rikkidioksidin pitoisuus savukaasuissa (neljän mittauksen liukuva keskiarvo).....	46
KUVIO 4. Savukaasuarvojen vertailu turpeella (petimateriaalista puolet dolomiittia).....	47
KUVIO 5. Turvetuhkan haitta-aineiden vertailu (petimateriaalista puolet dolomiittia).....	48
KUVIO 6. Savukaasuarvojen vertailu kokopuuhaakeella (dolomiittia syötetty 4 x 30 kg).....	53
KUVIO 7. Kokopuuhaaketuhkan haitta-aineiden vertailu (dolomiittia syötetty 4 x 30 kg).....	55
KUVIO 8. Trendikäyrät kolmannessa koeajossa.....	57
KUVIO 9. Savukaasuarvojen vertailu turpeella (dolomiittia syötetty 5 x 45 kg).....	58
KUVIO 10. HCl-pitoisuus savukaasuissa (neljän mittauksen liukuva keskiarvo).....	59
KUVIO 11. Turpeen pohjatuhkan haitta-aineiden vertailu (dolomiittia syötetty 5 x 45 kg).....	61
KUVIO 12. Turpeen lentotuhkan haitta-aineiden vertailu (dolomiittia syötetty 5 x 45 kg).....	61
KUVIO 13. Trendikäyrät neljännessä koeajossa.....	64
KUVIO 14. Savukaasuarvojen vertailu metsätähteellä (dolomiittia syötetty 5 x 30 kg).....	65
KUVIO 15. SO <sub>2</sub> - ja HCl-pitoisuus savukaasuissa.....	65
KUVIO 16. Metsätähteen pohjatuhkan haitta-aineiden vertailu (dolomiittia syötetty 5 x 30 kg).....	66
KUVIO 17. Metsätähteen lentotuhkan haitta-aineiden vertailu (dolomiittia syötetty 5 x 30 kg).....	67
KUVIO 18. Tasoitettu tuotantokustannus eri pitoajoilla.....	71
KUVIO 19. Tasoitettu tuotantokustannus eri korkoprosentilla.....	72
KUVIO 20. Tasoitettu tuotantokustannus eri laitteiston hinnalla.....	73
KUVIO 21. Muuttuvat kustannukset.....	74
KUVIO 22. Tasoitettu tuotantokustannus eri syöttömäärällä.....	75
KUVIO 23. Tasoitettu tuotantokustannus eri dolomiitin hinnalla.....	76

### KUVAT

KUVA 1. Leijukerroksen painehäviön ja leijumistavan riippuvuus leijutusnopeudesta.....	4
KUVA 2. Tulipesän alaosan muuraus.....	6
KUVA 3. Leijupeti kattila.....	8
KUVA 4. Kiertopeti kattilan leikkauskuva.....	11
KUVA 5. Korroosiota tuliputkiseinässä.....	14
KUVA 6. Dolomiitti.....	16
KUVA 7. Laihian Nuuka Lämpö Oy.....	18
KUVA 8. Puun koostumus.....	20
KUVA 9. Turpeen koostumus.....	23
KUVA 10. Gasmet-laitteisto.....	38
KUVA 11. Calmet-ohjelmisto.....	39
KUVA 12. Gasmet-laitteisto.....	41
KUVA 13. Näytteenottosondi savukaasupuhaltimen painepuolen kanaalissa.....	42
KUVA 14. Dolomiitin lisääminen ruuvikuljettimelle.....	43
KUVA 15. Pohjatuhkanäyte dolomiitin lisäyksen jälkeen.....	45
KUVA 16. Kokopuuhaake.....	50
KUVA 17. Tuhkanäyte ennen dolomiitin lisäämistä.....	51
KUVA 18. Dolomiitin määrän mittaaminen.....	52
KUVA 19. Tuhkanäyte dolomiitin lisäämisen jälkeen.....	54
KUVA 20. Turve.....	56
KUVA 21. Vasemmalla pohjatuhka- ja oikealla lentotuhkanäyte.....	60
KUVA 22. Metsätähdehake.....	63

## **TAULUKOT**

TAULUKKO 1. Leijupetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja.....	10
TAULUKKO 2. Kiertopetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja.....	13
TAULUKKO 3. Havu- ja lehtipuiden eri osien mineraalipitoisuuksia kuiva-aineessa .....	20
TAULUKKO 4. Puupolttoaineiden ja puun osien raskasmetallipitoisuuksia .....	21
TAULUKKO 5. Puupolttoaineiden alkalimetalli- ja halogeenipitoisuuksia kuiva-aineessa (mg/kg) ....	21
TAULUKKO 6. Puun poltossa syntyneiden tuhkien raskasmetallipitoisuudet .....	22
TAULUKKO 7. Turpeen kemiallisia ominaisuuksia kuiva-aineessa .....	24
TAULUKKO 8. Polttoturpeen raskasmetallipitoisuudet kuiva-aineessa (mg/kg).....	24
TAULUKKO 9. Polttoturpeen alkali metalli- ja halogeenipitoisuudet kuiva-aineessa .....	25
TAULUKKO 10. Turpeen ja puun lentotuhkan raskasmetallipitoisuuksia (mg/kg) .....	29
TAULUKKO 11. Lannoitteissa haitallisten aineiden sallittu enimmäispitoisuus. ....	30

## 1 JOHDANTO

Voimalaitoksissa poltetaan kasvavissa määrin bio- ja jäteperäisiä polttoaineita, jotka aiheuttavat mekaanisen eroosion ohella myös kattilaputkistojen kulumista ja korroosiota. Jos kattilan savukaasuissa esiintyy rikki- tai klooriyhdisteitä, ne voivat reagoida metallin kanssa muodostaen reaktiotuotteita (sulfidit, kloridit), jotka eivät anna metallille korroosiosuojaa. Poltossa muodostuvat rikkidioksidipäästöt aiheuttavat myös maan ja vesistöjen happamoitumista, jolloin kasvit ja eliöstö kärsivät vaurioita tai jopa osin tuhoutuvat. Suurimpia rikkipäästöjen lähteitä ovat laitokset, jotka tuottavat energiaa fossiilisista polttoaineista.

Käytettävä polttoaine voi myös sisältää haitallisen määrän raskasmetalleja ja muita haitta-aineita, jotka vaikuttavat poltossa syntyvään tuhkaan. Palamisprosessissa muodostuva tuhka tulisi hyötykäyttää ennistä runsaammin, mutta tällä hetkellä sen käytön rajoitteena ovat tuhkan sisältämät raskasmetallit, erityisesti kadmium.

Edellä mainittujen syiden vuoksi työssä tutkittiin maa-alkaliaineksen (dolomiitti) syöttöä leijupeti-prosessiin ja sen vaikutuksia savukaasuihin ja poltossa syntyvään tuhkaan. Maa-alkalimetallien syöttö voimalaitospolttoaineen mukana vähentää korroosiota aiheuttavia kloori- ja rikkipäästöjä savukaasuissa ja lisäksi raskasmetallipitoisuuksia muodostuneessa tuhkassa.

Haitta-aineiden sitoutuessa dolomiittiin tulee myös pohtia dolomiitin annostelun kannattavuutta, kuten dolomiitin annostelun kustannustekijöitä ja dolomiitista saatavia hyötyjä. Varsinkin puutuhka sisältää puille ja kasvillisuudelle tärkeitä ravinteita, kuten fosforia ja kaliumia, joita ne tarvitsevat kasvaakseen. Jos tuhkan käytön rajoitteena eivät olisi sen raskasmetallipitoisuudet, voisiko tuhkan kaupallistaa keinolannoitteiden eli kemianteollisuuden valmistamien lannoitteiden sijaan?

Työssä tehtiin neljä dolomiittikoeajoa Laihian Nuuka Lämpö Oy:n leijupetikattilaan. Koeajot tehtiin turpeella sekä kokopuu- että metsätähdehakkeella. Jokaisen koeajon ajan FTIR-savukaasuanalysointikeräsi dataa savukaasuissa tapahtuvista muutoksista. Koeajon aikana kerättiin myös tuhkanäytteet, jotka vietiin laboratorioon analysoitaviksi. Työ käsittää myös alustavan selvityksen maa-alkaliaineksen (dolomiitti) syötön tasoitetusta tuotantokustannuksesta.



Työn teoriaosuudessa käsitellään leijukerrospolton tekniikkaa, savukaasuanalysoijan toimintaperiaatetta, polttoaineen ja tuhkan ominaisuuksia ja lisäksi korroosiota aiheuttavia tekijöitä. Merkittävimpinä lähteinä teoriaosuudessa olivat voimalaitostekniikan ja polton ja palamisen kirjallinen aineisto. Työssä käsitellään koeajot ja lopussa on alustava teknistaloudellinen selvitys dolomiitin annostelun kannattavuudesta.

Opinnäytetyö tehtiin osana Centria-ammattikorkeakoulun MAA-hanketta, jossa tutkitaan maa-alkaliaktiivisuuden hyödyntämistä biovoimalaitoksen leijupetiprosessissa. Hankkeessa edistetään myös tuotettavan tuhkan käyttöä lannoitteena.

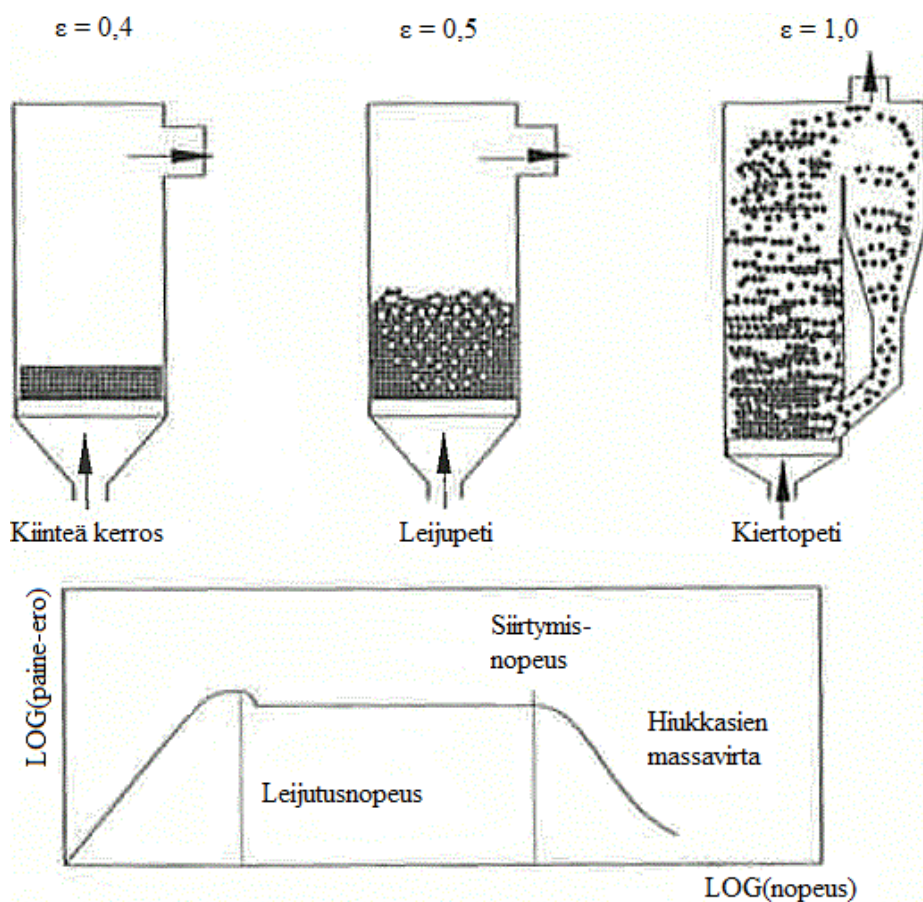
## 2 LEIJUKERROSPOLTTO

Leijukerros polttoa ryhdyttiin hyödyntämään energiantuotannossa vasta 1970-luvulla öljykriisin jälkeen. Sitä ennen sitä oli kuitenkin käytetty monissa teollisuuden sovelluksissa. Leijukerros polton etu on kyky polttaa mahdollisimman puhtaasti ja pienillä typpioksidi- ja rikkidioksidipäästöillä monia teollisuuden puupohjaisia jätteitä ja muita vaativia polttoaineita (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 153).

Nykyään leijukerros poltto on hyvin yleinen polttotapa, sillä se mahdollistaa eri ja huonolaatuisten polttoaineiden polton samassa kattilassa hyvällä palamishyötysuhteella. Lisäksi leijukerros poltossa käytetään alhaista palamislämpötilaa, mikä pitää typenoksidipäästöt vähäisinä ja ehkäisee tuhkan sulamistai-pumista. Leijukerros poltossa on myös mahdollista pitää rikkidioksidipäästöt vähäisinä syöttämällä kalkkia suoraan tulipesään. (Huhtinen ym. 2000, 153.)

Leijukerros poltossa polttoaine poltetaan leijutettavan hiekan seassa. Hiekka leijutetaan alaspäin puhallettavalla ilmalla. Leijukerroskattilat jaetaan kerrosleijukattiloihin (BFB, Bubbling fluidized bed) ja kiertoleiju- eli kiertopetikattiloihin (CFB, Circulating fluidized bed), joiden teoreettinen ero on käytetyssä leijutusnopeudessa. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2011, 36.) Leijupetikattiloiden leijutusnopeus on 0,7...2m/s, kun kiertopetikattiloilla se on 3...10m/s (Huhtinen ym. 2000, 159 & 161).

Leijukerros toimintaperiaatteen ymmärtää, kun tarkastellaan hiekkakerros käyttäytymistä ilman virratessa sen läpi eri nopeuksilla. Kuvasta 1 nähdään, että kun ilmavirran vauhti on hidas, nopeuden kasvaessa kasvaa ilmavirtauksen painehäviö suoraan verrannollisena nopeuteen. Kiinteän ilmavirtauksen vaikutuksesta hiekkakerros muodostaa liikkumattoman kerros. (Huhtinen ym. 2000, 154.)



KUVA 1. Leijukerroksen painehäviön ja leijumistavan riippuvuus leijutusnopeudesta (Huhtinen ym. 2000, 154)

Painehäviö kasvaa ilmavirtauksen nopeutuessa, ja tietyssä nopeudessa se on kasvanut hiekkakerroksen hydrostaattisen paineen suuruiseksi. Hiekkakerros alkaa ilmavirtauksen vaikutuksesta leijua, kun ilmavirtauksen hiekkapartikkeleihin kohdistama voima on yhtä suuri kuin maan vetovoima. (Huhtinen ym. 2000, 154.)

Kerrosleijukattilassa leijupedillä eli hiekan muodostamalla 0,4...0,8 metrin paksulla kerroksella on selkeä raja (pedin pinta), jossa se loppuu ja sen yläpuolinen kaasutila alkaa. Tämän vuoksi tällaisella leijupedillä varustettuja kattiloita nimitetään kerrosleiju- tai leijupetikattiloiksi. Yleensä kuulee kerrosleijukattilaa nimitettävän myös kuplivaksi leijukerrokseksi. Nimitys tulee leijupedin käyttäytymisestä leijutusnopeuden saavuttaessa minimileijutusnopeuden. Kun leijutusnopeus on minimileijutusnopeutta suurempi, leijukerros alkaa kuplia kuten kiehuva vesi. Kuplinnan aiheuttaa ilmamäärän liikkuminen leijukerroksen läpi ilmakuplina. (Huhtinen ym. 2000, 155.)

Kerrosleijukattilat sopivat hyvin kosteille polttoaineille, sillä kattilan tulipesään syötetty kostea polttoaine hautautuu kuumaan hiekkaan ja kuivuu siinä syttyen lopulta palamaan (Huhtinen ym. 2011, 36). Näistä kattilatyypeistä leijukerroskattiloita on saatavissa monessa eri teholuokassa, mutta kiertoleijukattiloita on pääasiassa saatavissa vain keski- tai suuritehoisina niiden monimutkaisemman rakenteen ja kalliimman hinnan takia.

Kiertopetikattilalle on ominaista hienojakoisempi hiekka ja suurempi leijutusnopeus, jolloin hiekka poistuu tulipesästä kaasuvirran mukana. Hiekka palautetaan tulipesään takaisin syklonin avulla, jonka toimintaperiaate perustuu savukaasujen ja hiekan erottamiseen toisistaan. (Huhtinen ym. 2011, 36.)

Kiertopetikattilassa petimateriaali kiertää leijutuskaasun mukana. Tämä on mahdollista leijutusnopeuden ollessa suurempi kuin hiekkapartikkelien lentoonlähtönopeus, mikä saa hiukkaset kulkemaan leijutusväliaineen mukana. Savukaasujen mukana kulkevat hiukkaset ja mahdollinen polttoaine erotetaan syklonissa savukaasuista ja palautetaan takaisin tulipesään. (Huhtinen ym. 2011, 36.)

Kiertoleijukattilat sopivat kosteiden polttoaineiden ohella myös hiilen polttoon. Tulipesästä sykloniin kulkeutuvat palamattomat hiilipartikkelit palautuvat takaisin tulipesään, mikä pitää palamattoman polttoaineen määrän vähäisenä. Hiilen poltossa leijukerrospolton etuna on myös se, että pienellä lisäinvestoinnilla voidaan rikin oksidien päästöt pitää pieninä. Kuten aiemmin todettiin, leijupoltossa käytettävä alhainen palamislämpötila pitää typen oksidien määrät vähäisinä. Rikkipäästöt voidaan pitää vähäisinä käyttämällä savukaasujen rikinpuhdistusta, joka voidaan toteuttaa syöttämällä kalkkia suoraan tulipesään. (Huhtinen ym. 2011, 36.)

Suomessa kiertoleijukattiloita käytetään kaukolämpövoimalaitoksissa, joissa on haluttu varautua myös hiilenpolttoon. Maailmalla kiertoleijukattiloita käytetään pääasiassa suurten, hiiltä polttoaineena käytettävien lauhdevoimalaitosten kattiloina. (Huhtinen ym. 2011, 36.)

## **2.1 Leijukerrospoltojärjestelmän rakenne**

Leijukerrospoltojärjestelmän polttila omaa korkean lämpökapasiteetin. Polttila muodostuu leijusuutinarinasta, petihiekkakerroksesta ja muurauksista. Pienen kokoluokan kattiloissa kiinteää polttoainetta syötetään pedin päälle yhtä pudotusputkea pitkin. Suuremman kokoluokan kattiloissa syöttö tapah-

tuu useampaa pudotusputkea pitkin, jotta polttoaineen jakautuminen tulipesään olisi tasaista. Pienet partikkelit palavat nopeasti pedin yläpuolella, ja suuremmat partikkelit kulkeutuvat petiin, missä ne kuivuvat ja kaasuuntuvat. Haihtuvat ainesosat palavat sekä pedissä että sen yläpuolella, kun taas jäännöshiili palaa pääasiallisesti leijupedissä. Polttoaineen kosteuden vaihtelulla ei ole epäsuotuisaa vaikutusta palamiseen. (Huhtinen ym. 2011, 36.)

Tulipesän alaosa on suojattu muurauksella (KUVA 2), jotta eroosio-ongelmia ei syntyisi. Muuraus edesauttaa kostean polttoaineen palamista korkeassa lämpötilassa ja samalla suojaa seinäputkia eroosiolta. (Huhtinen ym. 2011, 37.)



KUVA 2. Tulipesän alaosan muuraus

Leijupedin ylösajoa varten kattila varustetaan joko maakaasu- tai kevytöljykäyttöisillä käynnistyspolttimilla. Huonolaatuista polttoainetta poltettaessa riittävän kattilatehon saavuttamiseksi kattilassa voi olla maakaasu- tai öljykäyttöisiä kuormapolttimia. (Huhtinen ym. 2011, 37.)

Savukaasut puhdistetaan lentotuhkasta sähkösuodattimilla ja lentotuhkaa kerätään savukaasukanavan vedoista. Sähkösuodattimien ja savukaasuvetojen tuhkasuppiloista tuhka kuljetetaan yleensä pneumaattisesti lentotuhkasiilon. Leijupetiin kertynyttä karkeaa petimateriaalia ja pohjatuhkaa poistetaan pohjatuhkasuppiloiden avulla. (Huhtinen ym. 2011, 36-37.)

Leijupoltto onnistuu, jos seuraavat tekijät toteutuvat:

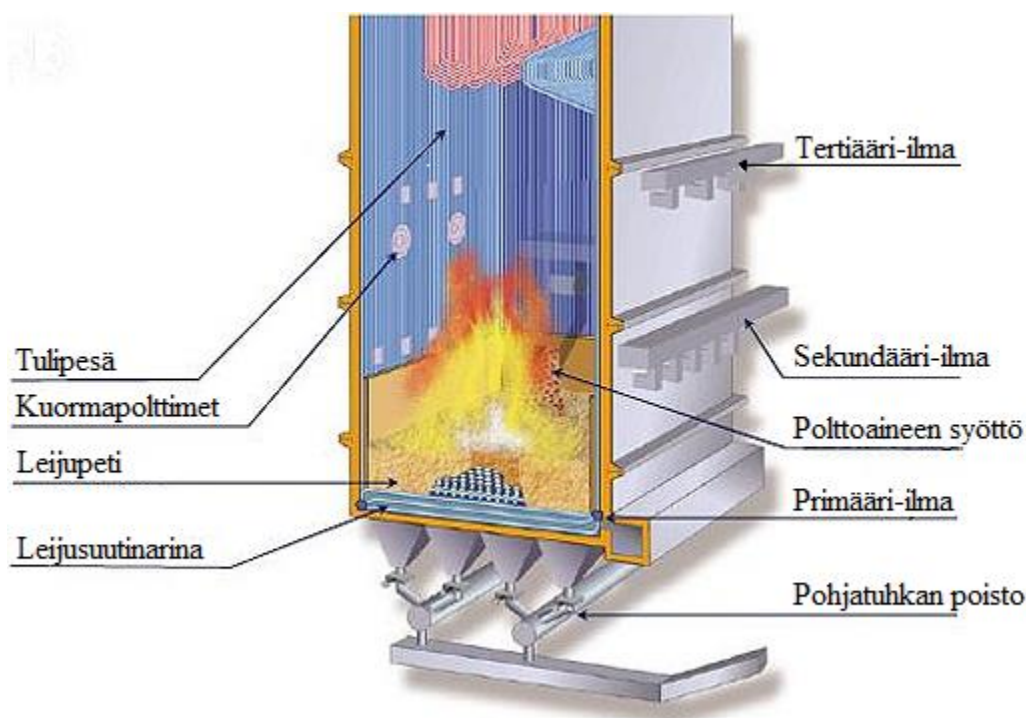
- Leijutuskaasu jakautuu arinan läpi tasaisesti
- Polttoaineen syöttö ja laatu on tasaista
- Pedin lämpötila on oikealla alueella (700-900°C, riippuen polttoaineen laadusta), jolloin tuhka ei sula
- Palamisnopeus pidetään suurena, jottei synny polttoainevarastoa petiin
- Polttoaine sekoittuu ja jauhautuu tehokkaasti
- Suurin osa tuhkasta poistuu lentotuhkana
- Petimateriaalin raekoko on sopiva leijutusta varten – isot kappaleet, kuten kivet ja rautaesineet, poistetaan pohjatuhkan mukana
- Pedin korkeus on riittävä (0,4-0,8 m) mutta ei liian suuri
- Polttoaineen ja ilman suhde on oikea. (Huhtinen ym. 2011, 37.)

## 2.2 Leijupetikattilat (kerrosleijukattilat)

Kuten luvussa 2 mainittiin, leijupetikattiloiden toiminta perustuu leijumateriaalin pysymiseen leijutustilassa. Tämä saadaan aikaan käyttämällä primääri-ilman nopeutta, joka on leijumateriaalin minimileijutusnopeuden ja lento-ohjauksen nopeuden välissä. Leijupetikattilassa leijutettavan hiekan keskiraekoko on 1...3 mm, ja hiekkakerroksen korkeus on 0,4...0,8 m. (Huhtinen ym. 2000, 159.) Leijupetikattilan toiminta-arvoja on esitelty tarkemmin sivulla 10 olevassa taulukossa.

Leijupetikattiloissa käytetään mekaanista syöttöjärjestelmää. Mekaanisessa syöttöjärjestelmässä selvittää vähäisemmällä polttoaineen esikäsitteilyllä ja järjestelmät sallivat laajemman kokojakauman kuin esim. pneumaattiset järjestelmät. Järjestelmässä polttoainesiilon alapuolinen kuljetin syöttää polttoaineen sulkusyöttimen kautta pudotusputkeen, josta se putoaa pedin päälle. Polttoaineen jakautuminen tasaisesti koko pedin alueelle voidaan toteuttaa käyttämällä useita syöttöputkia. (Huhtinen ym. 2000, 157.)

Kuvassa 3 on leijupetikattilan rakenne. Kuvasta nähdään, kuinka primääri-, sekundääri- ja tertiääri-ilma johdetaan kattilaan eri tasoille.



KUVA 3. Leijupetikattila (Huhtinen ym. 2011, 37)

Pedin suuren lämpökapasiteetin ansiosta polttomenetelmä sopii hyvin kosteiden polttoaineiden polttoon ilman kuivauksen tarvetta. Kun kostea polttoaine sekoittuu kuumaan hiekkakerrokseen, se kuivuu nopeasti ja lämpenee syttymislämpötilaan. Tästä johtuen leijukerrospoltto sietää polttoaineen laatuvariaatioita melko hyvin. (Huhtinen ym. 2000, 157.)

Ennen kuin kostea polttoaine voidaan syöttää kattilaan, on pedin lämpötilatason oltava 500-600°C. Tällä estetään kaasuräjähdyksen riski, mikäli kattilassa on palamattomia kaasuja. Alkulämmitys voidaan toteuttaa joko öljy- tai kaasulämmitteisillä sytytyspolttimilla (Huhtinen ym. 2000, 158). Pedin päälle tulevasta sekundääri- ja tertiääri-ilmasta ja osittain leijutusilmasta saadaan palamiseen tarvittava happi.

Tulipesän alaosan putket ja pohjan ilmanjakoarina vuorataan tulenkestävällä massalla, jotta putkien kulumiselta ja ylikuumenemiselta vältyttäisiin. Tulipesän ilmanjakoarina koostuu joko teräslevyyn tai jäädytysputkistoon hitsatuista suuttimista. Ilmanjakoarinasta primääri-ilma siirtyy hiekkapedin paksuuden määrittämällä paineella ilmasuutinten läpi tulipesän puolelle. (Huhtinen ym. 2000, 158.) Primääri-ilman

tavoitteena on saada hiekkapeti leijumaan ja toimia hapenlähteenä palamiselle. Suuttimilla aikaansaadaan primääri-ilman tasainen jakaantuminen koko tulipesän alalle. Sekundääri-ilmapuhaltimella tuodaan palamisilmaa kattilan ylätasolle, millä tehostetaan polttoaineen palamista ja vähennetään palamattoman polttoaineen päästöjä. Eräät kattilat varustetaan myös tertiääri-ilmapuhaltimilla, joita käytetään palamisen loppuun saattamiseen ja savukaasun happipitoisuuden säätämiseen.

Leijupetiin muodostuva tuhka poistetaan päästämällä hiekkaa arinan aukosta. Karkea kuona voidaan erotella karkeakuonaerottimilla tai hiekasta seulomalla. Puhdistettu hiekka voidaan palauttaa kattilaan. Hienojakoinen tuhka jauhautuu leijupedissä ja poistuu savukaasujen mukana tulipesästä. Myös hiekka jauhautuu leijutuksen vaikutuksesta vähitellen ja poistuu savukaasujen mukana. Mikäli poltetaan vähä-  
tuhkaista polttoainetta, on kattilaan lisättävä hiekkaa jauhautuneen määrän korvaamiseksi. (Huhtinen ym. 2000, 158.)

Pedin lämpötila on oltava niin alhainen, ettei polttoaineen tuhka pääse sulamaan eikä pehmenemään. Tämä tarkoittaa kotimaisilla polttoaineilla n. 900 °C:n lämpöä, mikä on 100 °C tuhkan pehmenemispisteen alapuolella. Tuhkan sulaminen tai pehmeneminen voi aiheuttaa hiekan sintraantumisen, mikä voi taas aiheuttaa kattilan alasajon. Ilman kattilan alasajoa sintraantumaan päässyt hiekka on vaikea poistaa kattilasta. Jos kotimainen polttoaine on suunniteltua kuivempaa, voidaan petiä jäähdyttää esim. vesiruis-  
kutuksella tai savukaasujen kierrätyksellä. (Huhtinen ym. 2000, 158)

Leijupetikattilan tulipesässä pystytään polttamaan useita polttoaineita, kuten teollisuusjätteitä (myös lietteitä) ja kosteita kotimaisia polttoaineita, jotka sisältävät runsaasti haihtuvia aineita ja syttyvät alhaisissa lämpötiloissa ja joiden jäännöskoksin palamisaika on lyhyt. Hiilenpolto on sen sijaan hankalampaa, koska hiili sisältää vain 20-30% haihtuvia aineita ja jäljelle jäävä koksi vaatii alhaisissa polttolämpötiloissa useiden sekuntien palamisajan täydellisen palamistuloksen saavuttamiseksi. Leijupetikattiloissa tämä ei onnistu, joten palamattomien määrän saaminen alle 5%:n on ollut hankalaa. (Huhtinen ym. 2000, 159.)

Taulukossa 1 on esitelty leijupetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja, kuten leijutusnopeus, pedin korkeus jne.



TAULUKKO 1. Leijupetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja (Huhtinen ym. 2000, 159)

Tilavuusrasitus	0,1-0,5 MW/m <sup>3</sup>
Poikkipintarasitus	0,7-3 MW/m <sup>2</sup>
Pedin painehäviö	6,0-12 kPa
Leijutusnopeus	0,7-2 m/s
Pedin korkeus	0,4-0,8 m
Primääri-ilman lämpötila	20-400 °C
Sekundääri-ilman lämpötila	20-400 °C
Pedin lämpötila	700-1000 °C
Kaasutilan lämpötila	700-1200 °C
Sekundääri-ilman osuus	30-70 %
Ilmakerroin	1,1-1,4
Pedin tiheys	1000-1500 kg/m <sup>3</sup>

Leijupetikattiloiden etuina voidaan pitää vähäisiä typenoksidipäästöjä ja mahdollisuus käyttää polttoaineita, joiden kosteuspitoisuus on korkea. Lisäksi poltossa ylimääräisen hapen määrä on alhainen, mikä nostaa kattilan tehokkuutta. Kattilassa on myös vähän liikkuvia osia, mikä vähentää huollon tarvetta.

Haittoja taas voivat olla korkeat käyttökustannukset ja pienempi joustavuus partikkelikoon suhteen (partikkelikoon oltava alle 80 mm). Kun poltetaan korkea-alkalista biomassapolttoainetta, pedillä on korkea agglomeroitumisen riski ilman erityisiä toimenpiteitä.

### 2.3 Kiertopetikattilat

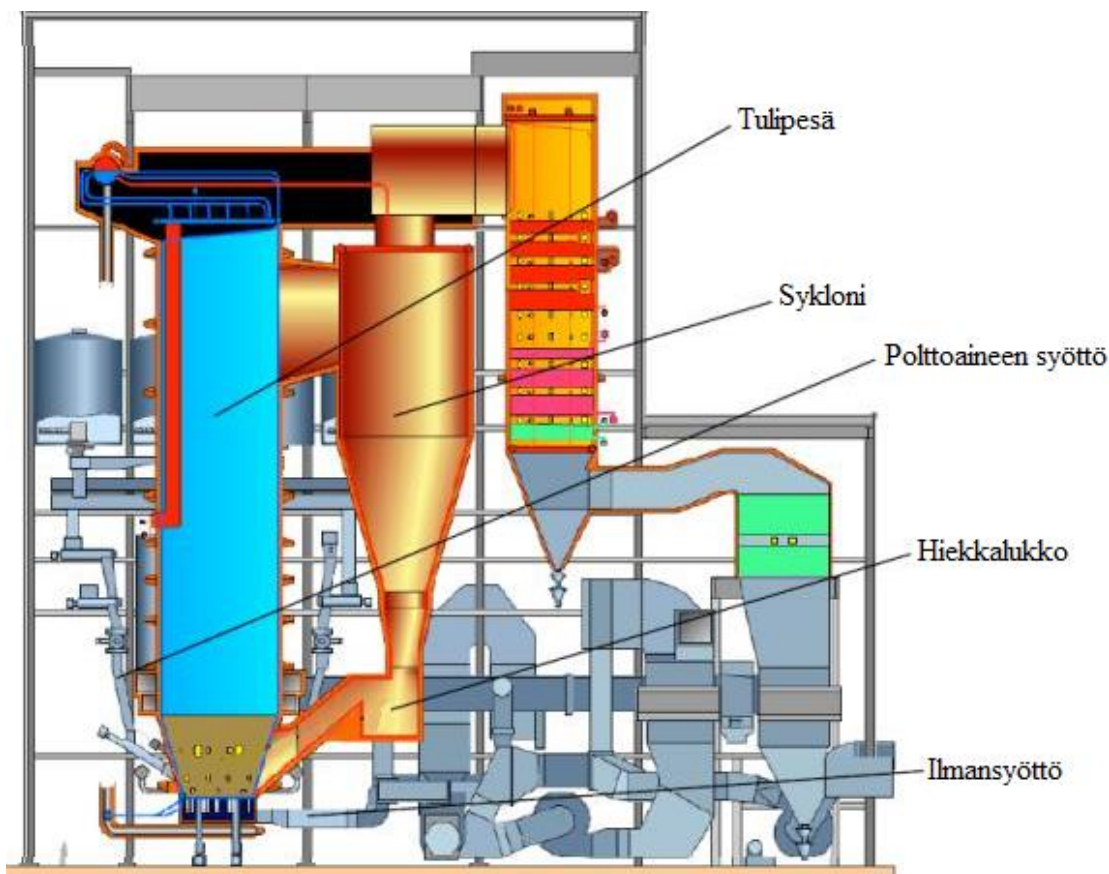
Kiertopetikattiloissa käytetään suurempia leijutusnopeuksia ja hienojakoisempaa petimateriaalia kuin leijupetikattiloissa. Kiertopetikattiloissa tyypillinen leijutusnopeus on 3...10 m/s ja hiekan raekoko on 0,1...0,5 mm. Korkeammasta leijutusnopeudesta ja pienestä hiekan raekoosta johtuen kiertopetikattila toimii leijutusalueella, jolle on ominaista voimakas pyörteisyys ja hiukkasten hyvä sekoittuminen. Kiertopedistä ei erotu selvää pintaa, vaan pedin tiheys pienenee korkeuden funktiona osan hiekasta tarttuessa savukaasujen mukaan. (Huhtinen ym. 2000, 159.)

Kattilan pääosat ovat tulipesä, hiekkalukko ja siihen liitetty erillinen sykloni, joka palauttaa kiertävän petimateriaalin ja palamattomat hiukkaset tulipesän pohjalle. Syklonin jälkeen savukaasukanavassa sijaitsevat pääosa tulistimista sekä veden- ja ilmanesilämmittimet. Kattilat valmistetaan tapauskohtaisesti, joten eri päälämmönsiirtimien sijainti voi vaihdella. (Huhtinen ym. 2000, 159.)

Hiekkalukon tehtävä on palauttaa syklonissa erotellut kiinteät hiukkaset takaisin tulipesän alaosaan. Samalla se toimii myös kaasulukkuna ja estää savukaasujen virtaamisen tulipesän alaosasta suoraan sykloniin.

Syklonin erotusaste saadaan hyväksi, kun varmistetaan, että savukaasu virtaa sykloniin riittävän nopeasti, n. 20m/s. Syklonin erotuskyky huononee halkaisijan kasvaessa, joten yleensä syklonit pyritään rakentamaan halkaisijaltaan alle 8 metrisiksi. Tarvittaessa voidaan rakentaa useita rinnakkaisia sykloneja. (Huhtinen ym. 2000, 160.)

Kuvassa 4 on kiertopetikattilan leikkauskuva. Kuvasta nähdään kattilan toimintaperiaate ja lisäksi syklonin sijainti sen rakenteessa.



KUVA 4. Kiertopetikattilan leikkauskuva (Anttila & Rönkkönen 2017, 20)

Polttoaine syötetään kiertopetikattilaan joko etuseinän kautta tai sekoittamalla se syklonista palaavan hiekan joukkoon. Jälkimmäinen tapa on yleisimmin käytössä. Mikäli sillä ei saada riittävän tasaista syöttöä, voidaan osa polttoaineesta syöttää tulipesään myös etuseinän kautta. (Huhtinen ym. 2000, 160.)

Polttoaineen mukana tulevat suuret kivet ja tuhka-agglomeraatit poistetaan arinan läpi kuonakuljettimelle, jotta kiertopetikattilan petimateriaali säilyisi riittävän hienojakoisena. Poistetusta ja seulotusta materiaalista käyttökelpoinen jae voidaan palauttaa kattilaan. Kun hienojakoinen tuhka ei enää erotu palautussyklonissa savukaasuista, se poistuu kattilasta savukaasujen mukana. Savukaasujen mukana kulkeva lentotuhka erotetaan niistä normaaliin tapaan. (Huhtinen ym. 2000, 161.)

Palamisilma tuodaan kattilaan primääri- ja sekundääri-ilmana. Primääri-ilma eli leijutusilma tuodaan pohjasuuttimien kautta, ja tarvittava puhallinpaine on n. 15...20 kPa. Primääri-ilman osuus koko ilmämäärästä on polttoaineesta riippuen 40...60 %, ja toisilla, vähän haihtuvia komponentteja sisältävillä polttoaineilla primääri-ilman osuus on oltava jopa 75 %. Sekundääri-ilma johdetaan kattilaan kahdelle eri tasolle muutaman metrin arinan yläpuolelle. (Huhtinen ym. 2000, 161-162.)

Kiertopetikattilan etuna on mahdollisuus polttaa hyvällä hyötysuhteella hiiltä, vaikka se olisi huonolaatuista ja sisältäisi vähän haihtuvia komponentteja. Leijupeti- tai pölypoltossa hiilen poltolla ei saada riittävän hyvää palamistulosta. Kiertopetikattilassa savukaasujen mukaan tarttuvat palamatta jääneet polttoainepartikkelit erottuvat savukaasuista syklonissa ja palautuvat takaisin tulipesään, jolloin saadaan aikaan riittävän pitkä palamisaika ja sen ansiosta hyvä palamishyötysuhde. Lisäksi kiertopetitekniikan etuna ovat pienet typenoksidipäästöt ja mahdollisuus edulliseen savukaasujen rikinpoistoon. Koska palamislämpötila on alhainen (800-950 °C), jää typen oksidien muodostuminen vähäiseksi. Mikäli edelleen halutaan vähentää typpioksidipäästöjä, voidaan petiin syöttää ammoniakkia. (Huhtinen ym. 2000, 162.)

Rikin puhdistaminen savukaasuista voidaan tehdä samalla tavalla kiertopetikattiloissa kuin leijupetikattiloissa eli syöttämällä kalkkia tulipesään. Kalkki reagoi polttoaineessa olevan rikin kanssa muodostaen kipsiä, ja se poistetaan kattilasta tuhkan mukana (Huhtinen ym. 2000, 162). Taulukossa 2 on kiertopetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja.

TAULUKKO 2. Kiertopetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja (Huhtinen ym. 2000, 161).

Tilavuusrasitus	0,1-0,3 MW/m <sup>3</sup>
Poikkipintarasitus	0,7-5 MW/m <sup>3</sup>
Kokonaispainehäviö	10-15 kPa
Leijutusnopeus	3-10 m/s
Primääri-ilman lämpötila	20-400 °C
Sekundääri-ilman lämpötila	20-400 °C
Pedin lämpötila	800-950 °C
Loppulämpötila	850-950 °C
Sekundääri-ilman osuus	25-65 %
Ilmakerroin	1,1-1,3
Pedin tiheys	10-100 kg/m <sup>3</sup>

Taulukosta nähdään mm. leijutusnopeuden olevan kiertopetikattiloissa leijupetikattiloita suurempi, mikä onkin näiden kattiloiden periaatteellinen ero.

## 2.4 Korroosio

Nykyään voimalaitoksissa poltetaan nousevissa määrin polttoaineita, jotka aiheuttavat kattilaputkistojen kulumista. Leijupeti- ja kiertopetikattiloissa poltettava jäte ja jäteperäiset polttoaineet sisältävät aineita, jotka mekaanisen eroosion ohella aiheuttavat myös korroosiota. Tässä työssä oli tavoitteena tutkia kloorin ja rikkidioksidin sitoutumista dolomiittiin, mitkä ovat pahimmat korroosiota aiheuttavat yhdisteet.

Korroosiosuoja korkeissa lämpötiloissa pohjautuu usein metalliseospinnalle muodostuneen tiiviin metallioksidikerroksen suojaavaan ominaisuuteen. Esimerkiksi kromi, molybdeeni, alumiini ja pii ovat lisäaineita, jotka parantavat metalliseoksen oksidipinnan korroosiokestävyyttä. Tällainen oksidikerros ei kuitenkaan pysty estämään metallin syöpymistä, vaan se toimii vain hidastavana tekijänä. Ratkaisevat tekijät metallinsyöpymisnopeuden kannalta ovat ympäristö, jossa metallia käytetään, ja oksidikerroksen ominaisuudet. (Skrifvars & Hupa 2002, 284.)

Tulipesässä ja savukaasukanavassa havaittava korroosio on usein seurausta pinnoille muodostuneista tuhkerrostumista. Kerrostuma saattaa aiheuttaa metallipintaan korroosiolle otollisen ympäristön. Paikalliset pelkistävät olosuhteet kattilassa voivat aiheuttaa metallipintaa suojaavan oksidikerroksen vaurioitumisen ja täten heikentää korroosiosuojaa. Jos pelkistävien olosuhteiden yhteydessä esiintyy korroo-

siota edistäviä rikki- tai klooriyhdisteitä, kuten sulfideja tai klorideja, tilanne voi olla hankala. Jos metallin korroosiosuoja on heikentynyt pelkistävien olosuhteiden seurauksena, kloori ja rikki pääsevät reagoimaan metallin kanssa muodostaen reaktiotuotteita (sulfidit, kloridit), jotka eivät anna metallille korroosiosuojaa. (Skrifvars & Hupa 2002, 284.) Kuvassa 5 on tyypillinen rikkiyhdisteiden aiheuttama korrosio leijupetikattilan tuliputkiseinässä.



KUVA 5. Korroosiota tuliputkiseinässä

Kuonaantuminen tulipesässä ja lämpöpinnoissa aiheuttaa korroosiota erittäin nopeasti, jos muodostunut kerrostuma on sulana metallipinnan pintalämpötiloissa. Varsinkin alkalisulfaatti-kloridiseokset ovat ongelmallisia, sillä niiden alin ensisulamispiste voi olla tulistimien pintalämpötilojen tasolla.

(Skrifvars & Hupa 2002, 284-285.)

Yhteenveto korroosiota aiheuttavista tekijöistä polttolaitoksissa:

- Metallin lämpötilan ollessa yli 500-550 °C korroosioriski kasvaa voimakkaasti
- Metallisulfidia muodostuu metallin pinnalla varsinkin pelkistävässä olosuhteissa, mikä lisää korroosioriskiä
- Sulan muodostuminen metallin pinnalle lisää korroosiota
- Alemmassa lämpötilassa (alle 200 – 250 °C) rikkiatrioksidi (SO<sub>3</sub>) voi muodostaa sulaa hapanta alkalisulfaattia, mikä lisää korroosiota
- Rikkiatrioksidi syntyy pääasiassa tulipesässä, missä korkea happiosapaine lisää sen syntymistä
- Kloori aiheuttaa korroosiota varsinkin pelkistävässä olosuhteissa. (Kunnossapitoyhdistys 2006, 158.)

## 2.5 Korkean lämpötilan korrosio

Korkean lämpötilan korroosiolla eli kuumakorroosiolla tarkoitetaan yleensä metallin tai metalliseosten syöymistä ”kuivassa” kaasussa korkeassa lämpötilassa, eli toisin sanoen ympäristössä, jossa metallin pinnalle ei muodostu vettä. Korkeissa lämpötiloissa tapahtuva korrosio on yleensä tasaista syöymistä ja se on usein helposti ennakoitavissa.

Voimalaitoksissa kuumakorrosio höyrystimen putkissa on lisääntynyt ongelma. Nykyään poltetaan enemmän jätteitä ja biomassaa, mikä lisää klorideja ja sulfaatteja, jotka aiheuttavat korrosio-ongelmia jo matalissa lämpötiloissa kattilan tulipesän höyrystinputkissa. Varsinkin höyrystinputkien 300-400 °C:n lämpötila-alueella raskasmetallit sinkki ja lyijy voivat aiheuttaa ongelmia, sillä reagoiessaan kloorin ja rikin kanssa ne muodostavat sulavia suolaseoksia. (Aaltonen 2014.)

Kuumakorroosion aiheuttaa edellä mainittujen yhdisteiden lisäksi rikki-, natrium- tai vanadiinipitoiset polttotuotteet. Kuumakorrosio on siitä ongelmallinen, sillä se etenee hyvin nopeasti. Se tuhoaa etenkin rauta-, nikkeli- ja kobolttivaltaisia korkean lämpötilan seoksia pistesyövyttämällä. (Kunnossapitoyhdistys ry 2006, 154.) Pistesyöymisessä metallin syöpyminen keskittyy pienille alueille metallin pinnalla synnyttäen paikallisia kuoppamaisia syvänteitä.



## 2.6 Dolomiitti

Dolomiitti ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) on karbonaattikivi, joka koostuu kalsiummagnesiumkarbonaatista. Se on läheistä sukua kalkkikivelle. Kuten kalkkikiveä, myös dolomiittia esiintyy sekä sedimentteinä että kiteinä. Dolomiitti louhitaan, murskataan ja jauhetaan sopivaan koostumukseen ja jalostetaan sen jälkeen poltetuksi dolomiitiksi. (Sma Mineral 2017.)

Suomessa dolomiitti on tavallisesti harmaata tai kellertävää, harvoin valkoista ja yleensä hienorakeista. Dolomiitti voi olla myös muun väristä, mikä johtunee epäpuhtauksista. Suomessa sitä voi löytää onkaloista kidemuotoisena mm. Vampulasta, Virtasalmelta, Joroisista, Siikaisista, Paltamosta ja Juuasta (Geologia 2018). Kuvassa 6 on esitelty työssä käytettyä Juuan Dolomiittikalkki Oy:n PA-SY-KA dolomiittia.



KUVA 6. Dolomiitti

Dolomiitti on hyvin monipuolinen mineraali. Sitä käytetään savukaasujen puhdistuksessa, maataloudessa, maanparannusaineena, veden puhdistuksessa, rakennusteollisuudessa, rakennustuoteollisuudessa, maa- ja vesirakentamisessa, vedenkäsittelyssä, rehuvalmistuksessa, rakennusmateriaalien valmistuksessa (lasitteen raaka-aineena), asfaltin, betonin ja laastinvalmistuksessa (Sma Mineral 2017). Varsinkin maanparannusaineena dolomiittia käytetään yleisesti, sillä se vähentää maan happamuutta ja lisää maahan kalsiumia ja magnesiumia (Muilu 2018).

## 2.7 Laihian Nuuka Lämpö Oy

Laihian Nuuka Lämpö Oy on kaukolämmön tuotanto- ja jakeluyhtiö. Nuuka Lämpö on perustettu vuonna 1998, ja kaukolämmön tuotanto on aloitettu vuonna 1999. Vuosittainen lämpöenergian tuotanto on n. 18 GWh:a. Yhtiön käyttämä polttoaine on 95 prosenttisesti kotimaista ja loput n. 5 prosenttia on öljyä. Kaukolämmöntuotannossa Laihialla on 3 MW:n leijupeti- ja arinakattila, ja molemmissa kattiloissa poltetaan sekä turvetta että puuhaketta. Leijupetikattilan puhdistimina on karkeakuonaerotin, kalkkivuorattu pussisuodatin ja viimeisenä on savukaasupesuri. Mekaanisen häiriön sattuessa heillä on varvoimana POR-kattila.

Leijupetikattilan polttoaine syötetään kahdelta polttoainelinjalta, ja seossuhdetta voidaan muunnella halutussa suhteessa. Poltossa syntyvä tuhka johdetaan tuhkalavalle, ja paikallinen urakoitsija levittää tuhkan metsään lannoitteeksi maksua vastaan. Lannoitteeksi menevästä tuhkasta Evira ottaa vuosittain näytteitä.

Leijupetikattila käsittää vain konvektio-osan. Kattilassa muutetaan polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia lämmöksi seuraavien vaiheiden kautta:

- Kattilassa polttoaineen palaessa polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia muuttuu savukaasujen lämpöenergiaksi.
- Kattilan putkilämmönsiirtimellä savukaasujen lämpöenergia pyritään siirtämään mahdollisimman tehokkaasti kattilaan syötettävän veden lämmitykseen. Putkilämmönsiirtimellä maksimilämmönkeräyskyky on 1 MW/m<sup>2</sup>.
- Kattilaa ympäröivät myös tuliputket (tuliputkiseinät), joissa kiertävä vesi lämpenee pedin/kattilan lämmöstä riippuen.
- Lämpö siirtyy sitä nopeammin, mitä suurempi on lämpötilaero savukaasun ja konvektiopinnan välillä.
- Savukaasut kulkevat kattilan läpi tulipesästä konvektio-osan kautta savukanavaan, siitä savukaasupesurille ja viimeisenä savupiippuun.

Kuvassa 7 on lämpölaitos kuvattuna ulkoa päin. Vasemmalla ovat kattila- ja toimistotilat ja oikealla polttoainesiihot. Toisen polttoainesiihon polttoaine johdetaan laitoksen arinakattilalle, joka on kuvassa polttoainesiihojen takana.





KUVA 7. Laihian Nuuka Lämpö Oy

### 3 POLTTOAINEIDEN OMINAISUUKSIA

Tässä osiossa käsitellään polttoaineiden puun ja turpeen ominaisuuksia. Polttoaineiden tärkeimpiä ominaisuuksia ovat mm. lämpöarvo, polttoaineen kemiallinen koostumus (mm. alkalit ja metallit, epämetallit, raskasmetallit), kosteus, tuhkapitoisuus ja tuhkan koostumus. Osiossa on käsitelty vain turpeen ja puun ominaisuuksia, sillä koeajoissa ei käytetty muuta polttoainetta. Tämän osion tarkoituksena on hahmottaa lukijalle, mistä alkuaineista ja yhdisteistä poltetun materiaalin savukaasut ja tuhkanäytteet koostuvat.

#### 3.1 Puu polttoaineena

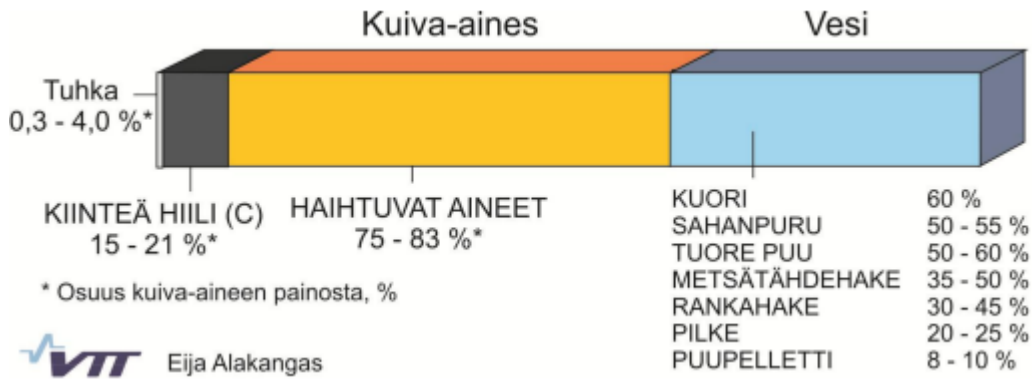
Puupolttoaine on polttoaineena käytettävää biomassaa, joka voi olla peräisin puun rungosta, kuoresta oksista, kannoista, lehdistä (neulasista) tai juurista. Puun biomassan jakautuminen vaihtelee suuresti puulajin ja puun iän mukaan. Kuten kuvassa 8 nähdään, puussa on paljon haihtuvia aineita (75-83 %), joten se on pitkäliekkinen polttoaine ja vaatii suuren palotilan.

Puupolttoaineet ovat Suomen merkittävin uusiutuva energialähde. Sen käytön polttoaineena ei katsota lisäävän hiilidioksidipäästöjä, sillä puun poltossa syntyvän hiilidioksidin katsotaan sitoutuvan kasvavaan puustoon. Puun osuus uusiutuvien energialähteiden kokonaiskulutuksesta on noin 80 prosenttia ja energian kokonaiskulutuksesta 27 prosenttia (Suomen virallinen tilasto 2018).

Lämpö- ja voimalaitosten käyttämällä kiinteillä puupolttoaineilla tarkoitetaan metsähaketta, metsäteollisuuden sivutuote- ja jätepuuta, puupellettejä ja -brikettejä sekä kierrätyspuuta, ja kaikki nämä voivat olla kotimaista tai tuontipuuta. Voimalaitoksissa puupolttoaine poltetaan tyypillisesti seospolttona esimerkiksi turpeen kanssa. Poltossa syntyvä tuhka ja sen ravinteet voidaan hyödyntää lannoitteena.

Puuaineksen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 18,3–20,0 MJ/kg. Puun eri osien lämpöarvo vaihtelee, esim. latvojen, oksien ja pienikokoisten puiden lämpöarvo on hieman suurempi kuin kokopuun. Puun lämpöarvo on muihin kiinteisiin polttoaineisiin verrattuna pieni, mikä asettaa omat vaatimuksensa puun käsittely- ja polttolaitteille.

Tuoreessa puussa on keskimäärin 50 % vettä ja loput kuiva-ainetta (KUVA 8). Kuiva-aineesta on 48 – 52 % hiiltä, 6,0 – 6,5 % vetyä ja happea 38 – 42 %. Loput 0,3–4,0 % on tuhkaa, typpeä ja muita ravinteita. Hiili ja vety ovat biopolttoaineiden keskeiset energiaa tuottavat alkuaineet.



KUVA 8. Puun koostumus (Alakangas 2000)

Taulukossa 3 on havu- ja lehtipuiden eri osien mineraalipitoisuuksia kuiva-aineessa. Taulukosta nähdään puun neulasten ja lehtien sisältävän lannoitukseen tärkeitä mineraaleja, kuten fosforia (P) ja kaliumia (K).

TAULUKKO 3. Havu- ja lehtipuiden eri osien mineraalipitoisuuksia kuiva-aineessa (VTT 2016)

Puulaji/osa	Päämineraali, p-%				Hivenainepitoisuus, mg/kg				
	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	B	Cu
<b>HAVUPUU</b>									
Runkopuu	0,01	0,06	0,12	0,02	147	41	13	3	2
Runkopuun kuori	0,08	0,29	0,85	0,08	507	60	75	12	4
Oksat	0,04	0,18	0,34	0,05	251	101	44	7	4
Neulaset	0,16	0,6	0,5	0,09	748	94	75	9	6
KOKO PUU	0,03	0,15	0,28	0,05	296	85	30	6	4
<b>LEHTIPUU</b>									
Runkopuu	0,02	0,08	0,08	0,02	34	20	16	2	2
Runkopuun kuori	0,09	0,37	0,85	0,07	190	191	131	17	13
Oksat	0,06	0,21	0,41	0,05	120	47	52	7	4
Lehdet	0,21	1,17	1,1	0,19	867	135	269	21	10
KOKO PUU	0,05	0,21	0,25	0,04	83	27	39	6	5

Taulukossa 4 on listattu puupolttoaineiden raskasmetallipitoisuuksia. Taulukosta nähdään pajujen ja oksien raskasmetallipitoisuuksien olevan korkeampi kuin muissa puunosissa.

TAULUKKO 4. Puupolttoaineiden ja puun osien raskasmetallipitoisuuksia (VTT 2000)

Puuaine	Raskasmetallipitoisuudet kuiva-aineessa, mg/kg								
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	V	Zn	Ni
Puupolttoaine	0,04-0,4	0,1-0,4	1-2	0,6-6	0,01-0,02	0,6-14	0,3-5,0	5-40	-
Oksa, kuusi	-	0,23	0,15	6,68	-	9,25	-	71,2	3,34
Kuori	-	-	-	4,6	-	-	-	90	-
Neulainen, kuusi	-	0,09	0,06	2,38	-	0,30	-	14	1,62
Neulainen, mänty	-	0,3	0,08	3,76	-	1,25	-	65	1,45
Koivunlehti	-	0,3	0,08	3,76	-	1,25	-	65	1,45
Pajut	0,1-0,4	0,8-1,7	3	2-4	< 0,03	0,4-2,0	0,2-0,6	40-105	0,2-78

Alla olevassa taulukossa (TAULUKKO 5) on puupolttoaineiden kloori-, kalium-, ja natriumpitoisuuksia. Varsinkin kloorin pitoisuus on mielenkiintoinen, sillä yksi tämän tutkimuksen tavoitteesta oli tutkia kloorin sitoutumista dolomiittiin. Taulukosta nähdään klooria olevan paljon versoissa ja neulasissa, joten tästä johtuen koeajo haluttiin suorittaa metsätähdehakkella, joka sisältäisi juuri näitä osia.

TAULUKKO 5. Puupolttoaineiden alkalimetalli- ja halogeenipitoisuuksia kuiva-aineessa (mg/kg) (mukaiillen VTT 2016)

Alkuaine/puulaji	Puuaines	Kuori	Oksat	Neulaset	Versot	Lehdet	
<b>Cl</b>	kuusi	51	260	317	504	1090	-
	mänty	85	147	200	407	538	-
	koivu	40	149	120	-	-	181
	haapa	35	40	87	-	-	511
<b>K</b>	kuusi	215	2 030	3 560	4 270	14 600	-
	mänty	407	3 180	3 040	4 770	8 790	-
	koivu	315	1 710	3 020	-	-	9 420
	haapa	1 370	4 730	5 870	-	-	24 000
<b>Na</b>	kuusi	6	26	97	48	13	-
	mänty	15	22	40	28	36	-
	koivu	4	14	43	-	-	32
	haapa	15	12	19	-	-	9

Taulukossa 6 on puun poltossa syntyneen tuhkan raskasmetallipitoisuuksia. Taulukosta nähdään suurimman osan raskasmetallipitoisuuksista olevan lentotuhkassa korkeammat kuin arinatuhkassa. Leijupetikattiloissa arinatuhka koostuu suurimmalta osin petimateriaalista, mikä selittää sen alhaiset raskasmetallipitoisuudet.

TAULUKKO 6. Puun poltossa syntyneiden tuhkien raskasmetallipitoisuudet (VTT 2016)

Alkuaine	Puun polton tuhkassa, mg/kg	
	Arinatuhka	Lentotuhka
As, arseeni	0,2-3,0	1-60
Cd, kadmium	0,4-0,7	6-40
Co, koboltti	0-7	3-200
Cr, kromi	60	40-250
Cu, kupari	15-300	200
Hg, elohopea	0-0,4	0-1
Mn, mangaani	2500-5500	6000-9000
Ni, nikkeli	40-250	20-100
Pb, lyijy	15-60	40-1000
Se, seleeni	-	5-15
V, vanadiini	10-120	20-30
Zn, sinkki	15-1000	40-700

Leijupetikattiloissa arinatuhka koostuu pääosin petimateriaalista, joten siinä raskasmetallipitoisuudet ovat lentotuhkaa alhaisemmat. Lentotuhka sisältää enemmän raskasmetalleja mutta myös ravinneaineita, jolloin siitä voi saada merkittävän lannoitteen peltokäyttöön, kunhan haitta-ainepitoisuudet ovat riittävän alhaiset.

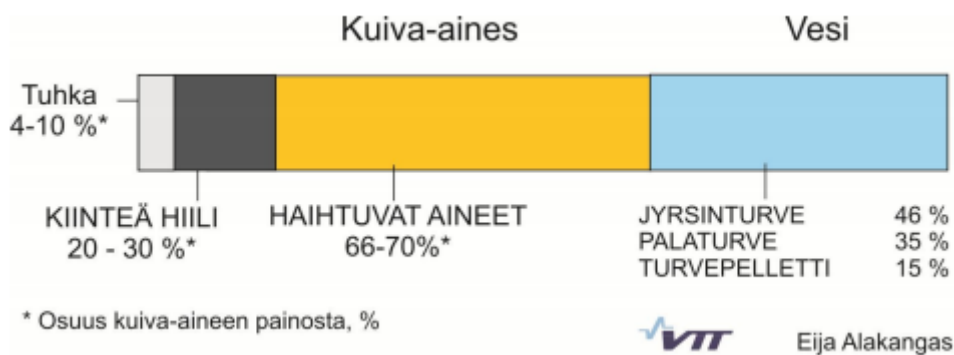
### 3.2 Turve polttoaineena

Turve on suokasvien maatumisesta syntynyt eloperäinen maalaji. Turvetta käytetään yleensä sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa ja sitä on ruvettu hyödyntämään energiantuotannossa vasta 1970-luvun öljykriisin jälkeen. Energiaturpeesta tuotetaan jyrsin- ja palaturvetta, joista jyrsinurpeen osuus on n. 90 %. Lisäksi turpeesta valmistetaan jonkin verran pellettejä.

Suomen pinta-alasta kolmannes, eli yli 9 miljoonaa hehtaaria on turvemaita, joista vain yksi prosentti on varattu energiantuotantoon. Suomen lisäksi energiaturpeen käyttö on merkittävää lähinnä Irlannissa, Ruotsissa ja Venäjällä. Maailmanlaajuisesti turvetta käytetään lähinnä kasvualustana, maanparannusaineena ja maataloudessa eläinten kuivikkeena. Turpeen keräämiseen ja polttoon on Suomessa kehitetty moderneja tekniikoita, joiden ansiosta se on kannattava polttoaine sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. (Energiamailma 2018.)

Turvetta ei katsota uusiutuvaksi energialähteeksi, sillä turvekerros vaatii syntyäkseen jopa tuhansia vuosia. Tästä johtuen Suomi ja IPCC eli hallitustenvälinen ilmastopaneeli määrittelevät turpeen omaksi luokakseen fossiilisten ja uusiutuvan biomassan väliin (Energiamailma 2018). EU:n uusiutuvan energian direktiivi ei luokittele turvetta uusiutuvaksi mutta ei myöskään fossiiliseksi. Eräät lähteet pitävät turvetta hitaasti uusiutuvana biomassapolttoaineena.

Turpeen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (19,0–22,6 MJ/kg) on suurempi kuin puun. Kuiva-aineen teholliseen lämpöarvoon vaikuttavat haihtuvien aineiden määrä, maatumisaste, turvelaji sekä hiili- ja tuhkapitoisuus. Haihtuvia aineita turpeessa on vähemmän kuin puussa eli 66-70 %, mutta tuhkan osuus on suurempi (4-10 %) (KUVA 9). Maatuneisuuden kasvaessa lämpöarvo paranee. Samalla tuhkapitoisuus kuitenkin yleensä lisääntyy, mikä ainakin teoriassa alentaa lämpöarvoa. (VTT 2016.)



KUVA 9. Turpeen koostumus (Alakangas 2000)

Taulukossa 7 on turpeen kemiallisia ominaisuuksia kuiva-aineessa esitelty tarkemmin. Taulukosta nähdään turpeen alhainen ravinneainepitoisuus. Se ei sisällä merkittäviä määriä lannoitukseen tärkeitä aineita kuten kaliumia ja fosforia. Tästä johtuen sen tuhkasta ei saada sellaista arvoa kuin esim. puutuhkasta. Tosin korkeammat haitta-ainepitoisuudet auttavat todentamaan haitta-aineiden sitoutumisen dolomiittiin.

Samasta taulukosta nähdään myös turpeen rikkipitoisuus, joka on yleensä 0,1...0,2 %. Rikkipitoisuus voi kuitenkin joillakin alueilla olla runsaasti yli 0,3 %. Tällaisia alueita on mm. Pohjois-Karjalassa ja Länsi-Lapissa. Turpeella on myös suuri hiilipitoisuus (53,84 %), minkä takia turve palaa hitaammin kuin puu. (VTT 2016.)

TAULUKKO 7. Turpeen kemiallisia ominaisuuksia kuiva-aineessa (mukaiillen VTT 2016; Pekkala 2012)

Turpeen kemiallisia ominaisuuksia, p-%		
Alkuaine	Keskiarvo	Vaihtelu
Hilli, C	53,84	46,3-59,4
Vety, H	5,64	4,90-6,20
Typpi, N	1,63	0,19-3,25
Rikki, S	0,213	0,01-3,01
Kloori, Cl	0,03	0,01-0,1
Fluori, F	0,003	0,001-0,01
Kalsium, Ca	0,4	0,04-2
Kalium, K (kok.)	0,07	0,002-0,34
Kalium, K	0,012	0,002-0,10
Fosfori, P	0,05	0,005-0,28
Magnesium, Mg	0,09	0,01-0,95
Rauta, Fe	0,7	0,01-5,5
Pii, Si	0,02	0,01-0,33
Natrium, Na	0,06	0,002-0,31
Alumiini, Al	0,2	0,01-2,2

Taulukossa 8 on polttoturpeen raskasmetallipitoisuuksia kuiva-aineessa. Taulukosta havaitaan turpeen huomattavasti korkeampi arseenipitoisuus verrattuna puupolttoaineisiin.

TAULUKKO 8. Polttoturpeen raskasmetallipitoisuudet kuiva-aineessa (mg/kg)

Ominaisuus	Keskiarvo	Mediaani	Keskihajonta	Minimi	Maksimi
Arseeni, As	3,3	3,1	1,4	0,5	6,9
Kadmium, Cd	0,13	0,12	0,04	0,06	0,2
Koboltti, Co	1,29	1,1	0,74	0,3	8,8
Kromi, Cr	6,14	5,5	3,18	0,82	15
Kupari, Cu	7,7	6,95	3,4	2,1	18
Nikkeli, Ni	4,37	4	2,1	0,94	13
Lyijy, Pb	3,74	3,4	2,11	0,5	11
Sinkki, Zn	7,5	7,23	2,7	2,1	16
Elohopea, Hg	0,056	0,05	0,019	0,05	0,2
Vanadiini, V	8,7	8,3	4,1	1,2	20
Molybdeeni, Mo	1,07	1	0,52	0,5	3,4

Taulukossa 8 keskiarvo kuvaa ominaisuuksien keskimääräistä suuruutta, joka saadaan jakamalla mitattujen ominaisuuksien summa niiden lukumäärällä tai toimituserän kuiva-ainepainolla (painotettu keskiarvo). Keskihajonta kuvaa ominaisuusarvojen vaihtelua keskiarvon ympärillä. Mitä suurempi on keskihajonta, sitä enemmän arvoissa on vaihtelua. Mediaani on arvo, jota pienempiä (ja suurempia) on puolet arvoista. Mediaani on suuruusjärjestykseen järjestetyn aineiston keskimäinen arvo tai kahden keskimäisen keskiarvo, jos havaintoja on parillinen määrä.

Taulukossa 9 on polttoturpeen alkalimetalli- ja halogeenipitoisuuksia. Taulukosta voidaan huomata klooripitoisuuden olevan hyvin vähäinen verrattuna puupolttoaineisiin. Näin ollen turvetta poltettaessa klooriin sitoutumista dolomiittiin on hankala todentaa.

TAULUKKO 9. Polttoturpeen alkalimetalli- ja halogeenipitoisuudet kuiva-aineessa (VTT 2016)

Yksikkö	Kloori, Cl	Fluori, F	Bromi, Br	Natrium, Na	Kalium, K
	p-%			mg/kg	
Keskiarvo	0,023	0,0028	0,0015	607	734
Mediaani	0,024	0,002	0,001	575	730
Keskihajonta	0,004	0,0018	0,0006	457	484
Minimi	0,011	0,001	0,001	33	89
Maksimi	0,035	0,01	0,003	2600	2700

Yllä olevasta taulukosta nähdään myös tärkeän ravinneaineen kaliumin pitoisuus turpeessa, joka on keskiarvoltaan 734 mg/kg.



## 4 TUHKAN MUODOSTUMINEN

Kiinteän polttoaineen tuhalla tarkoitetaan polttoaineen palamatonta epäorgaanista jäännöstä. Sen muodostavat ainesosat vaihtelevat suuresti eri polttoaineissa niin koostumukseltaan kuin määrältäänkin. Tuhka ilmoitetaan tavallisesti painoprosenteina kuiva-aineen painosta. Tuhkan määrä ei vastaa suoraan epäorgaanisen aineen määrää, sillä suurin osa polttoaineen mineraaleista voivat hajota tai hapettua polton aikana polttoaineen alkuperäisestä tilasta. (VTT 2000, 15.)

Tuhkan alkuainekoostumuksen avulla voidaan arvioida tuhkan sulamis- tai kuonaamistaipumuksia. Jos tuhkassa on suuri määrä alkalimetalleja ja klooripitoisuus on korkea, haittoja yleensä esiintyy. Tuhkan koostumuksen ohella on tunnettava myös käytettävä polttotekniikka, jolloin vasta voidaan tehdä mahdollisia johtopäätöksiä erilaisten polttoaineiden sulamis- tai kuonaamistaipumuksista.

Tuhkan aiheuttamat ongelmat polton yhteydessä ovat suurin yksittäinen syy kattiloiden ennakoimattomiin alasajoihin. Ongelmat johtuvat yleensä monen tekijän summasta. Kun tuhkasta aiheutuvia ongelmia tarkastellaan, on otettava huomioon tuhkan koko muodostumisketju: polttoaineen syöttö, tuhkaa muodostavien ainesosien vapautuminen ja muuntuminen sekä lentotuhkan erottaminen savukaasuista. (Skrifvars & Hupa 2002, 269.)

### 4.1 Tuhkan aiheuttamat ongelmat leijukerrospoltoissa

Leijukerroskattiloissa tuhkan aiheuttamat ongelmat ovat vähäisempiä kuin muissa kattilatyypeissä, sillä leijukerrospoltoissa käytetään matalaa lämpötilaa, mikä ehkäisee muodostuneen tuhkan sulamistaipumista. Lisäksi leijukerrospoltoissa höyrystyneiden, tuhkaa muodostavien aineosien määrä on pienempi kuin vastaavalla polttoaineella esim. pölypolttokattilassa. Leijukerroskattiloissa tuhkan aiheuttamat ongelmat liittyvät usein leijutusmateriaalin ja tuhkan välisiin agglomeraatteihin, sillä leijuva materiaali voi sintraantua täysin ja aiheuttaa kattilan alasajon. (Skrifvars & Hupa 2002, 287.)

Tekijät, jotka johtavat leijukerroskattiloiden agglomeroitumiseen, ovat pitkälti saman tyyppisiä kuin ne, jotka johtavat kerrostumien muodostumiseen lämmönvaihtopinnoille. Yksi yleisimmistä agglomeroitumiseen johtavista tekijöistä on sulan faasin muodostuminen leijutusmateriaaliin. Sula voi olla peräisin pelkäs-

tään tuhkasta tai leijutusmateriaalin ja tuhkan seoksesta. Esimerkkinä tällainen tilanne voisi olla leijuterroskattila, jossa poltetaan biomassaa, esim. haketta tai turvetta, ja leijutusmateriaalina käytetään kvartsihiekkää. Tässä tapauksessa kvartsihiekkä voi reagoida polttoaineen alkaliyhdisteiden kanssa ja muodostaa jo matalassa lämpötilassa sulavia alkalisilikaatteja. Tässä tilanteessa agglomeroituminen on estettävissä pitämällä tuhkan pitoisuus leijutusmateriaaliin verrattuna alhaisena, sekä vaihtamalla leijutusmateriaalia riittävän usein. Toinen agglomeroitumisen estävä keino on käyttää leijutusmateriaalina kalkkia kvartsihiekan sijaan. (Skrifvars & Hupa 2002, 287.)

Kerrosleiju- ja kiertoleijukattiloiden välillä tuhkerrostumien muodostumisessa on selvä ero. Kiertoleijukattilassa suuri osa leijutusmateriaalista sekä palamattomasta kiinteästä aineesta palautuu tulipesään syklonin kautta. Syklonin jälkeisessä savukaasukanavassa ei juuri ole yli 10 µm:n kokoisia tuhkahiuksia. (Skrifvars & Hupa 2002, 287.)

Skrifvarsin ja Hupan (2002, 287) mukaan mahdolliset kerrostumaongelmat kiertoleijukattiloissa liittyvätkin usein sykloniin sekä syklonista lähtevään palautusputkeen. Likaantumismekanismit ovat yleensä saman tyyppiset kuin pölykattiloissa, eli sulan muodostukset, kemialliset reaktiot ja sintraantuminen.

Kerrosleijukattilassa osa kiinteästä jäännöksestä poistetaan suoraan tulipesästä ja osa sähkösuodattimien kautta. Näin kerrostumia voi muodostua savukaasukanavan lämpöpinnoille herkemmin kuin kiertoleijukattilassa. Riittävän usein kiinteän jäännöksen poistamisella voidaan kerrostumien aiheuttamia ongelmia välttää. (Skrifvars & Hupa 2002, 287).

## 4.2 Tuhkan hyötykäyttö ja lainsäädäntö

Suomessa arvioidaan vuosittain syntyvän noin 1,5 miljoonaa tonnia tuhkaa. Lämpö- ja voimalaitoksissa arvioidaan syntyvän vuosittain yhteensä noin 300 000 - 600 000 tonnia puu-, turve- ja sekatumhkaa. (Jouensuu 2017, 3.) Eri voimalaitoksissa syntyvät tuhkat vaihtelevat alkuainekoostumukseltaan mm. käytetystä polttoaineesta, prosessista ja lämpötilasta sekä savukaasujen puhdistustekniikasta riippuen.

EU:n kannustuksesta johtuen uusiutuvien energianlähteiden käyttö on lisääntynyt. Tämä on lisännyt voimakkaasti mm. puupohjaisten polttoaineiden käyttöä. Biomassan energiakäytöstä syntyy suuria määriä erilaista tuhkaa, kuten puutuhkaa, jota voidaan hyödyntää metsien lannoituksessa ja muussa hyötykäytössä, kuten maanrakentamisessa. Puutuhka sisältää myös puille ja kasvillisuudelle tärkeitä ravinteita,

joita ne tarvitsevat kasvaakseen. Varsinkin fosforin ja kaliumin lähteenä puutuhkaa tulisi hyödyntää nykyistä paljon enemmän keinolannoitteiden sijaan, eikä loppusijoittaa jätteenä kaatopaikalle. (Joensuu 2017, 3.)

Puutuhkassa on mm. puulajista ja poltettavasta puunosasta riippuen keskimäärin 0,2–3 % fosforia, 0,5–10 % kaliumia, 5–40 % kalsiumia ja alle 0,1 % booria. Puhdas puutuhka soveltuu sellaisenaan metsälannoitteeksi, sillä se sisältää tavallisesti typpä lukuun ottamatta kaikki puiden tarvitsemat ravinteet oikeissa suhteissa. Lannoituksessa tärkeä ravinneaine typpi poistuu poltossa savukaasujen mukana. Puhdasta puutuhkaa muodostuu kuitenkin Suomen energia- ja lämpölaitoksissa nykyisin suhteellisen vähän ja valtaosa syntyvästä tuhkasta on yleensä vähintään turpeen, hakkeen ja puun kuoren poltosta syntynyttä sekoitusta. Turvetuhkassa taas erityisesti kalsiumin, kaliumin ja boorin pitoisuudet ovat matalampia kuin puutuhkassa. Turvetuhkassa on ravinneaineita keskimäärin 0,5–2 % fosforia, 0,2–0,4 % kaliumia, 5–10 % kalsiumia ja alle 0,01 % booria. (Huotari 2012, 6.)

Polttoainekoostumus, polttotekniikka ja savukaasujen puhdistustekniikka ovat merkittävimmät tuhkan laatuun ja sen raskasmetallisisältöön vaikuttavat tekijät. Ravinteiden lisäksi tuhkaan rikastuu myös jonkin verran puun ja turpeen sekä muiden poltettavien biomassojen sisältämiä raskasmetalleja, kuten kadmiumia, arseenia, kromia ja nikkeliä. Raskasmetallipitoisuudet ovat tavallisesti puutuhkassa suuremmat kuin turvetuhkassa, lukuun ottamatta arseenia, jota on usein enemmän turvetuhkassa kuin puutuhkassa. Kuitenkin useat raskasmetallit, kuten mangaani, kupari ja sinkki, ovat kasveille tarpeellisia hivenaineita. Osa raskasmetalleista on kuitenkin jo pieninä pitoisuuksina kasveille ja muille eliöille haitallista tai jopa myrkyllistä, kuten kadmium ja lyijy. Tärkeää tuhkan raskasmetallisisältöä arvioitaessa on myös se, puhutaanko lentotuhkasta vai pohjatuhkasta. Esim. leijukerros-poltossa merkittävä osa raskasmetalleista päätyy lentotuhkaan, jota leijukerros-poltossa on noin 80 % tuhkan kokonaismäärästä. (Joensuu 2017, 3-4.)

Tuhkan hyötykäyttöä rajoittavat kuitenkin Elintarviketurvallisuusviraston Eviran laatimat raja-arvot tuhkien raskasmetallisisältöön, joita esitellään taulukossa 11 sivulla 30. Taulukossa 10 on turpeen ja puun lentotuhkan tyypillisiä raskasmetallipitoisuuksia. Arvojen vaihteluväli on korkea, joten arvot ovat vain suuntaa antavia.

TAULUKKO 10. Turpeen ja puun lentotuhkan raskasmetallipitoisuuksia (mg/kg) (VTT 2016)

Alkuaine	Turvetuhka	Puutuhka
As, arseeni	37-116	1-60
Cd, kadmium	0,5-5	6-40
Co, koboltti	10-50	3-200
Cr, kromi	43-130	40-250
Cu, kupari	60-160	200
Hg, elohopea	0,3-2	0,02-1
molybdeeni	14-40	15
Ni, nikkeli	30-700	20-100
Pb, lyijy	160-970	40-1000
Se, seleeni	10-26	-
V, vanadiini	18-590	20-30
Zn, sinkki	48-540	40-700

Taulukosta nähdään, että erityisesti arseeni voi olla turvetuhkan haittatekijä. Puutuhkassa taas kadmium on yleensä rajoittava tekijä. Molemmissa tuhkissa myös lyijypitoisuudet ovat korkeat.

Eviran mukaan peltolannoitteena käytetyn tuotteen laatuvaatimukset ovat tiukemmat kuin metsälannoitteiden. Varsinkin arseenin, kadmiumin ja sinkin osalta sallitut enimmäispitoisuudet ovat matalammat, mikä rajoittaa energiantuotannossa syntyvien tuhkien käyttöä maataloudessa. Toisaalta myös yleinen suhtautuminen raskasmetalleja sisältävän lannoitteen käyttöön peltolannoituksessa aiheuttaa hyötykäyttöön nähden esteitä. Taulukossa 11 on Eviran asettamat raja-arvot tuhkien haitallisiin raskasmetallipitoisuuksiin lannoitekäytössä. Vertailun vuoksi kuvassa on sekä metsälannoituksessa että peltolannoituksessa sallitut haitallisten metallien enimmäispitoisuudet.

TAULUKKO 11. Lannoitteissa haitallisten aineiden sallittu enimmäispitoisuus (Evira 2016)

	<b>Metsälannoitus</b>	<b>Peltolannoitus</b>
<b>Alkuaine</b>	<b>Enimmäispitoisuus (mg/kg)</b>	<b>Enimmäispitoisuus (mg/kg)</b>
Arseeni (As)	40	25
Elohopea (Hg)	1	1
Kadmium (Cd)	25	2,5
Kromi (Cr)	300	300
Kupari (Cu)	700	600
Lyijy (Pb)	150	100
Nikkeli (Ni)	150	100*
Sinkki (Zn)	4 500*	1 500*

Taulukosta nähdään, että sallitut enimmäispitoisuudet peltolannoituksessa ovat pienemmät kuin metsälannoituksessa. Varsinkin kadmiumin kohdalla ero on selvä. Huomattavat erot ovat myös sinkillä ja arseenilla.

## 5 SAVUKAASUT

Palamisprosessista poistuvaa kaasuseosta kutsutaan savukaasuiksi. Savukaasun koostumukseen vaikuttaa huomattavasti käytettävä polttoaine. Palamisreaktiossa normaalipäästöinä pidetään vesihöyryä ja hiilidioksidia. Haitallisia päästöjä ovat typen oksidit, rikin oksidit, epätäydellisessä palamisessa ja haihtumisessa vapautuvat hiilivedyt, hiilimonoksidi sekä hiukkaspäästöt. Tekniikat edellä mainittujen haitallisten päästöjen vähentämiseksi ovat kehittyneet parin vuosikymmenen aikana. Nykyään suurimpana ongelmana pidetään pienihiukkasia, jotka on todettu terveydelle haitallisiksi.

### 5.1 Rikin oksidit

Polttoprosessissa vapautuvat rikin oksidit ovat peräisin polttoaineen rikistä. Useimmat polttoaineet sisältävät rikkiä n. 0...5 %. Rikki voi olla polttoaineessa sekä orgaanisesti sidottuna, että epäorgaanisina yhdisteinä. (Iisa, Yrjas & Kilpinen 2002, 344.) Orgaanisilla yhdisteillä tarkoitetaan hiilen yhdisteitä, joilla yleensä viitataan eloperäisiin yhdisteisiin. Epäorgaanisilla yhdisteillä viitataan taas ei-eloperäisiin yhdisteisiin, jotka eivät useimmiten sisällä hiiltä vaan muita alkuaineita. Esim. biopolttoaineissa (puu, puru, olki, jne.) rikki esiintyy orgaanisessa muodossa kasvien ravintoaineissa.

Suurin osa polttoaineen rikistä vapautuu poltossa polttotilaan. Pieniä määriä voi sitoutua tuhkan alkali- ja maa-alkalimetalleihin – loput muodostavat rikin oksideita ja päätyvät ilmakehään, ellei laitoksessa ole erillisiä rikinpoistolaitteita. Rikin oksideista valtaosa on rikkidioksidia ( $\text{SO}_2$ ) ja tavallisesti alle muutama prosentti rikkitrioksidia ( $\text{SO}_3$ ). (Iisa ym. 2002, 345.)

Rikkidioksidipäästöjen vähentäminen ei onnistu pelkin polttoteknisin keinoin, esim. vaiheistamalla polttoa. Rikkidioksidipäästöjä voidaan vähentää polttoaineen rikkipitoisuutta vähentämällä, poistamalla rikkiä tulipesästä tai poistamalla rikkiä savukaasuista tulipesän jälkeen. (Iisa ym. 2002, 348.)

Jäähtyneistä savukaasuista rikkidioksidi poistetaan yleisimmin märkä- tai puolikuivapesurilla, jotka perustuvat kalsiumyhdisteiden käyttöön. Muut keinot rikkidioksidin poistoon savukaasuista ovat regeneroivat menetelmät tai yhdistetyt  $\text{SO}_x/\text{NO}_x$ -poistomenetelmät. (Iisa ym. 2002, 350.)

Rikkioksidgeja voidaan poistaa jo tulipesässä, jolloin puhutaan kuivasta rikinpoistomenetelmästä. Se perustuu kalsiumyhdisteiden käyttöön, joilla on kyky sitoa rikkioksidgeja. Kiinteiden polttoaineiden pölypoltossa kalkkikiveä tai muuta kalsiumyhdistettä syötetään tulipesään hienojakoisina hiukkasina, jotka reagoivat rikkioksidien kanssa. Leijukerros-poltossa kalsiumyhdisteet on mahdollista lisätä suoraan leijukerrokseen, jolloin sidonta-aineen syöttö ja poisto on yksinkertaista. Tulipesässä tapahtuvan rikinpoiston etuna on sen edullisuus verrattuna rikinpoistoon jäähtyneistä savukaasuista. Erillistä reaktoria (savukaasupesuria) ei tarvita, jolloin kustannukset jäävät alhaisiksi. Kuivalla rikinpoistomenetelmällä voidaan leijukerros-poltossa saavuttaa korkeitakin rikinpoistoasteita, mutta pölypoltossa se ei ole kovin tehokas rikinpoistomenetelmä. (Iisa ym. 2002, 352.)

## 5.2 Vetyhalogeenit

Halogeeneihin kuuluvat fluori (F), kloori (Cl), bromi (Br), jodi (I) ja astatiini (At). Tällä hetkellä poltto-prosessissa suuren huomion ovat saaneet klooriyhdisteet. Kloori on halogeeneista ainoa, jota esiintyy polttoaineissa sen verran, että se vaikuttaa polttoprosessiin. Bromia ja jodia ei juurikaan ole polttoaineissa, joten ne eivät vaikuta muodostuviin savukaasuihin. Fluoripäästöjä voi syntyä mm. jätteenpoltossa esim. teflonista ja freoneista. (Iisa ym. 2002, 365.)

Kloorin määrä voi olla korkea muovipitoisen jätteen poltossa, sillä PVC-muovi sisältää huomattavan määrän klooria – yli 50 paino-%:a. Biopolttoaineet ja hiilet eivät yleensä sisällä paljoa klooria, mutta määrät vaihtelevat merkittävästi polttoaineesta riippuen – tyypillisesti klooripitoisuus on luokkaa 0...0,5 paino-%. Kun poltetaan polttoainetta, joka sisältää klooria, vapautuu kloori kaasufaasiin joko vety- tai alkalikloridina. Kloorin esiintyessä alkalikloridina se voi kondensoitua lämmönsiirtopinnoille ja aiheuttaa näin korroosio-aurioita liian korkeissa lämpötiloissa. Korroosioriskin vähentämiseksi jäte- ja biomassapolttolaitteissa höyrynlämpötila pidetään alle 400-450°C. Jos taas kloori esiintyy vetykloridina (HCl), korroosionopeus on pienempi. Silloinkin savukaasujen lämpötilan tulisi olla kastepistettä korkeampi eli yli 100°C, jolloin suolahappoa ei pääse muodostumaan. (Iisa ym. 2002, 365-366.)

Leijukerros-poltossa kloorinsidontareaktion lämpötila on oltava n. 850°C, jolloin kalsiumkloridia ei juurikaan muodostu. Muussa poltossa optimilämpötila on 500-600°C. Vaikka olosuhteiden ansiosta kalsiumyhdisteet voisivat reagoida HCl:n kanssa, se tuskin auttaa korroosio-ongelman suhteen, jos kloori on jo muodostanut alkaliklorideja. (Iisa ym. 2002, 366.)

Vaikka kloorista ei olisi ongelmia korroosion suhteen, niin varsinkin jätteenpoltossa HCl on pyrittävä poistamaan savukaasuista, koska muodostuvat HCl-määrät voivat olla liian korkeita ja niistä voi aiheutua terveyshaittoja hengityselimille. Vetykloridia voidaan vähentää kalsiumyhdisteiden avulla. (Iisa ym. 2002, 366.)

### 5.3 Typen oksidit

Polton yhteydessä muodostuvista haitallisista typpiyhdisteistä tärkeimmät ovat yleensä typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO<sub>2</sub>). Niitä kutsutaan yhteisnimityksellä NO<sub>x</sub>. NO<sub>x</sub>-päästöistä yleensä noin 95 % tai enemmän koostuu NO:sta ja NO<sub>2</sub>:ta on vain alle 5 %. Ilmakehään päästyyään suuri osa typpimonoksidista hapettuu suhteellisen nopeasti typpidioksidiksi, minkä vuoksi ne ovat ympäristövaikutuksiltaan hyvin samanlaisia. Typenoksideja syntyy poltossa kahdella tavalla – polttoaineen sisältämästä tyyppistä ja korkeissa lämpötiloissa palamisilman tyyppistä. Tunnetuimpia haittavaikutuksia ympäristössä ovat mm. happamat laskeumat sekä fotokemiallisen saastesumun ja otsonin muodostaminen. (Kilpinen 2002, 300.)

Typen oksideihin kuuluu myös dityppioksidi (N<sub>2</sub>O), josta käytetään myös nimeä ilokaasu. Dityppioksidia syntyy yleisesti alle prosentin verran kaikista syntyneistä typen oksideista. Dityppioksidi on aikaisemmin luultu ihmiselle vaarattomaksi, mutta nykyään sen tiedetään olevan merkittävä tekijä ylempään ilmakehän otsonituhon freonien ohella. Muihin päästökomponentteihin verrattuna dityppioksidi on hyvin pitkäikäinen yhdiste ilmakehässä, sillä sen eliniän ilmakehässä on arvioitu olevan jopa 150 vuotta. (Kilpinen 2002, 301.)

Typen oksidien päästöihin vaikuttavat eniten polttotekniikka, polttoaineen ominaisuudet ja kattilan palamisolosuhteet, kuten lämpötila, ilman määrä ja syöttö kattilaan. Suomessa biovoimalaitoksissa käytettävä leijupolttotekniikka on itsessään jo typen oksideja vähentävä menetelmä muun muassa sen alhaisen lämpötilan takia. Biopolttotekniikan käyttö yhdistettynä leijupolttotekniikkaan on osalle Suomen voimalaitoksista jo riittävä keino pysyä nykyisten päästöraja-arvojen alapuolella. Tämän takia noin kolmasosassa Suomen biovoimalaitoksista ei ole käytössä erillisiä NO<sub>x</sub>-päästöjen vähennysmenetelmiä. Eniten käytössä olevat typen oksidien vähennysmenetelmät ovat SNCR-menetelmä sekä ilman vaiheistus. (Salhoja 2017, 28.)

SNCR-menetelmä (engl. selective non-catalytic NO<sub>x</sub> reduction) perustuu selektiiviseen ei-katalyyttiseen NO-pelkistykseen eli typpimonoksidin pelkistämiseen molekyylitypeksi lisäämällä ammoniakkia



savukaasuihin noin 900 °C:n lämpötilassa. Ilman vaiheistuksessa pyritään pelkistämään polttoaineen sitoutuneista typpiyhdisteistä haihtuvat typpiyhdisteet ennen kuin ne ehtivät hapettua typpimonoksidiksi. Pelkistys onnistuu syöttämällä palamisilma tulipesään esimerkiksi kahdessa tai kolmessa vaiheessa. (Kilpinen 2002, 314.)

#### 5.4 Hiilidioksidi ja hiilimonoksidi

Hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>) on kasvihuonekaasu, jota syntyy aina poltettaessa hiiltä sisältäviä polttoaineita. Hiilidioksidipäästöjen katsotaan aiheutuvan fossiilisten polttoaineiden poltosta, joten syntyviin hiilidioksidipäästöihin voidaan vaikuttaa käytettävän polttoaineen valinnalla. Biomassat sitovat hiilidioksidia kasvaessaan, ja niiden poltosta vapautuva hiilidioksidin määrä on saman suuruinen kuin mitä se olisi biomassan hajotessa luonnossa. Tämän vuoksi biopolttoaineita pidetään päästöjen suhteen hiilidioksidineutraaleina polttoaineina. (Kuuppo 2016, 28.)

Hiilimonoksidia (CO) syntyy, kun hiilen täydelliseen palamiseen hiilidioksidiksi ei ole riittävästi happea. Hiili reagoi hapen kanssa muodostaen hiilidioksidin sijaan hiilimonoksidia eli häkää. Hiilen epätäydellinen palaminen tuottaa vain neljänneksen täydellisessä palamisreaktiossa vapautuvasta energiasta (Huhtinen ym. 2000, 91). Hiilimonoksidipäästöjen muodostumista voidaan hillitä lisäämällä polttoprosessissa käytettävää palamisilman määrää. Palamisilmaa ei kuitenkaan tule lisätä liikaa, sillä liiallinen ilmamäärä lisää palamisprosessiin osallistumatonta ilmaa. Osallistumaton ilma palamisprosessissa virtaa kattilan läpi jäähdyttäen lämpöpintoja ja lisäten savukaasujen määrää, mistä seuraa kattilan savukaasuhäviöitä ja hyötysuhteen heikkenemistä. Palamisessa muodostuu yleensä aina jonkin verran hiilimonoksidia, sillä kiinteiden polttoaineiden poltossa ilman ja polttoaineen sekoittuminen ei ole koskaan täydellistä. (Kuuppo 2016, 28.)

#### 5.5 Hiilivedyt

Hiilivedyillä tarkoitetaan yhdisteitä, jotka sisältävät vain hiiltä ja vetyä. Yksinkertaisin hiilivety on metaani (CH<sub>4</sub>), mutta muita ovat mm. ovat etaani (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), propani (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) ja butaani (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>). Näitä edellä mainittuja yhdisteitä kutsutaan myös alkaaneiksi, jolla tarkoitetaan tyydyttyneitä hiilivetyjä.

Savukaasujen hiilivedyt ovat palamatta jäänyttä polttoainetta. Tästä johtuen hiilivetypäästöjä esiintyy yleensä häkäpäästön ja palamattomien kiintoainepäästöjen yhteydessä. Samoin kuin hiilimonoksidipäästöissä, hiilivetypäästöjä esiintyy yleensä polttoaineen ja palamisilman huonosta sekoittumisesta. Tällöin hiilivetypäästöt voidaan pitää alhaisina samoin keinoin kuin hiilimonoksidipäästötkin eli huolehtimalla palamisprosessissa oikeasta polttoaineen ja hapen suhteesta. (Huhtinen ym. 2000, 92.)

Tulipesän alhainen lämpötila edistää myös hiilivetypäästöjen muodostumista, jolloin hiilivetypäästöjä aiheuttavat eniten pienet kotimaisen polttoaineen kattilat. Hiilivetypäästöistä haitallisimpia ovat polyaromaattiset hiilivedyt eli PAH-yhdisteet. Näistä PAH-yhdisteistä osa on karsinogeenisia. Tutkimusten mukaan kattilalaitosten PAH-yhdistepäästöt riippuvat kattilan tehosta ja palamisoloista. (Huhtinen ym. 2000, 92.)

## 6 SAVUKAASUJEN MITTAAMINEN

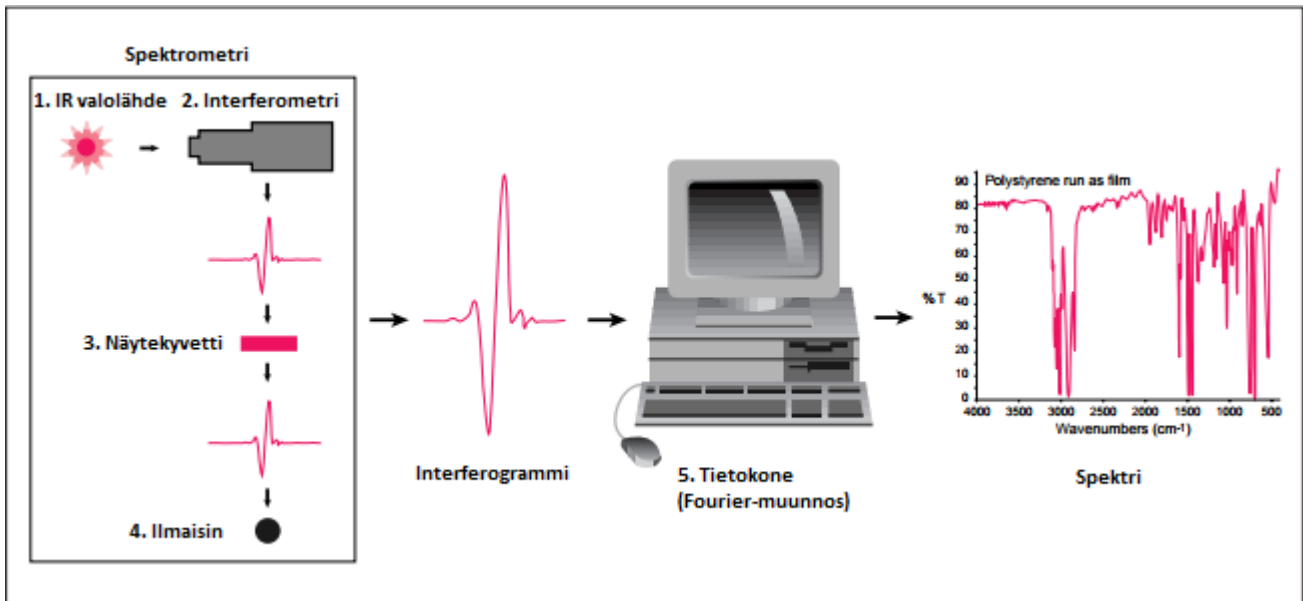
Tiukentuneet päästövaatimukset ja halu tarkkailla voimalaitoksen päästöjä ovat lisänneet savukaasumittauksien tarvetta. Savukaasuanalyysilla voidaan siis reagoida haitallisiin päästöihin mutta myös optimoida prosessikontrollia ja lisätä laitoksen hyötysuhdetta. Savukaasumittaukset ovatkin muodostuneet erääksi keskeisimmistä voimalaitosmittauksista.

Savukaasujen mittauksissa on käytettävissä monia eri menetelmiä laitteistosta riippuen. Niitä ovat mm. kaasukromatografia, NDIR-, FID- ja FTIR-menetelmät. Tässä työssä savukaasumittauksissa käytettiin Gasmet DX4000:ta, jonka toimintaperiaate perustuu FTIR-menetelmään.

### 6.1 FTIR-kaasuanalysaattorin rakenne ja toimintaperiaate

Fourier-muunnosinfrapunaspektrometri (FTIR) on analysointimenetelmä, jonka avulla voidaan tunnistaa useita erilaisia molekyyliyhdisteitä. Erilaisten molekyylien tunnistaminen perustuu molekyylin sidosten värähtelyyn, joka on ainutlaatuinen kaikilla molekyyliyhdisteillä (molekyyliisormenjälki). Yhdisteet tunnistetaan funktionaalisten ryhmien perusteella. FTIR-analysaattori mittaa kaikki IR-aallonpituudet samanaikaisesti ja FTIR:n avulla voidaan siten mitata useita komponentteja samanaikaisesti. (Thermo Nicolet, 2001.) IR-tekniikan avulla voidaan tunnistaa melkein kaikki yhdisteet, sillä vain kaksiatomisilla samaytimisillä molekyyliyleillä ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $Cl_2$ ,  $H_2$ ) ja jalokaasuilla ei ole IR-spektriä (VTT 2004, 15).

FTIR-kaasuanalysaattori (KUVIO 1) koostuu viidestä pääkomponentista: infrapunavalolähde, interferometri, näytekammio eli kyvetti, infrapunailmaisin, signaalinkäsittelyelektroniikka ja tietokone, jossa on analysointiohjelma (VTT 2004, 15).



KUVIO 1. FTIR-analysaattorin toimintaperiaate (mukaiillen Thermo Nicolet 2001)

1. Ensimmäisenä on valolähde, joka lähettää infrapunavaloa interferometriin.
2. Interferometrissä tapahtuu valon modulointi, eli valon muokkaaminen suurella taajuudella tiedonvälitystä varten.
3. Interferometrin jälkeen valo absorboituu näytekaasuun kulkeutuessaan näytekyvetin läpi. Näytekaasun molekyylit absorboivat niille ominaisilla aallonpituuksilla ja absorboimaton valo kulkeutuu kyvetin läpi infrapunailmaisimelle.
4. Infrapunailmaisimessa saadaan sähköinen signaali, interferogrammi, joka digitoidaan signaalinkäsittelyelektronikassa.
5. Digitoitava signaali kulkeutuu tietokoneelle, jossa Fourier-muunnoksen avulla signaali luetaan absorptiospektriiksi. (Nikula 2016.)

## 6.2 Gasmät DX4000

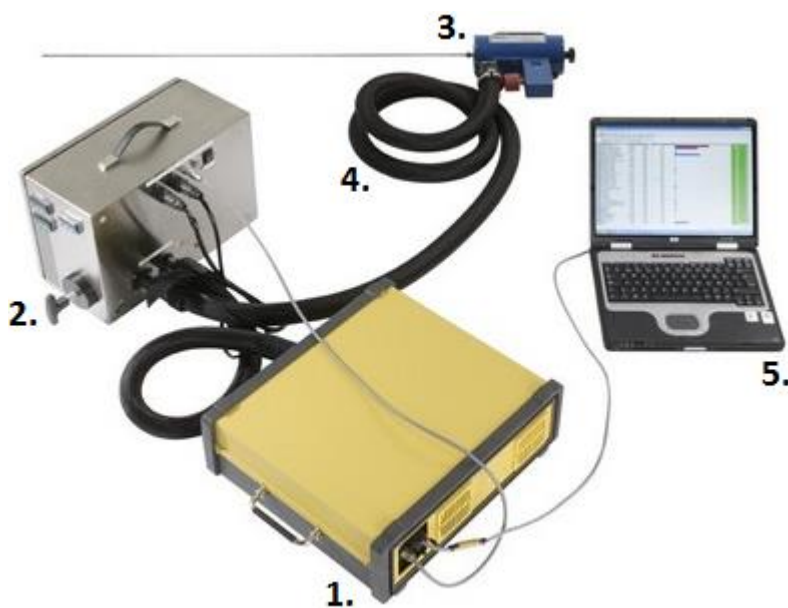
Gasmät DX4000 on kannettava FTIR-kaasuanalysaattori, jota käytetään savukaasujen eri molekyyliyhdisteiden tunnistamiseen, vertailumittauksiin, katalyyttiseen prosessin ohjaukseen ja muihin sovelluksiin, joissa halutaan tarkkailla kaasujen molekyyliyhdisteitä (Gasmät Technologies Oy, 2018).

Gasmät DX4000 on varustettu helppokäyttöisellä Calcmet-ohjelmistolla, joka näyttää eri molekyylien pitoisuudet joko ppm-, mg/Nm<sup>3</sup> tai tilavuus-%-muodossa. Perinteisten päästömittauskomponenttien

(CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>) lisäksi FTIR:llä on mahdollista mitata mm. H<sub>2</sub>O, HCl, HF, NH<sub>3</sub>, eri hiilivetyjä jne. Muita kaasuja voidaan lisätä helposti. DX4000 on myös varustettu hapen mittaamiseen tarvittavalla lambda-anturilla. Mittausalueet voidaan valita alle miljoonasosasta (< ppm) tilavuusprosentitasoon asti (til-%). (Gaset Technologies Oy 2018.)

Laitteiston osat (KUVA 10):

1. Gaset DX4000 (analysaattori)
2. Kannettava näytteenottojärjestelmä (pumppuyksikkö)
3. Kannettava näytteenottoanturi (näytteenottosondi)
4. Lämmitetyt näytelinjat. Linjat pidetään lämmitettyinä, jotta estetään kaasun sisältämän veden kertyminen (kondensoituminen) analysaattorin herkkiin komponentteihin.
5. Kannettava tietokone Calcmet-ohjelmistolla.



KUVA 10. Gaset-laitteisto (mukaiillen Gaset Technologies Oy 2018)

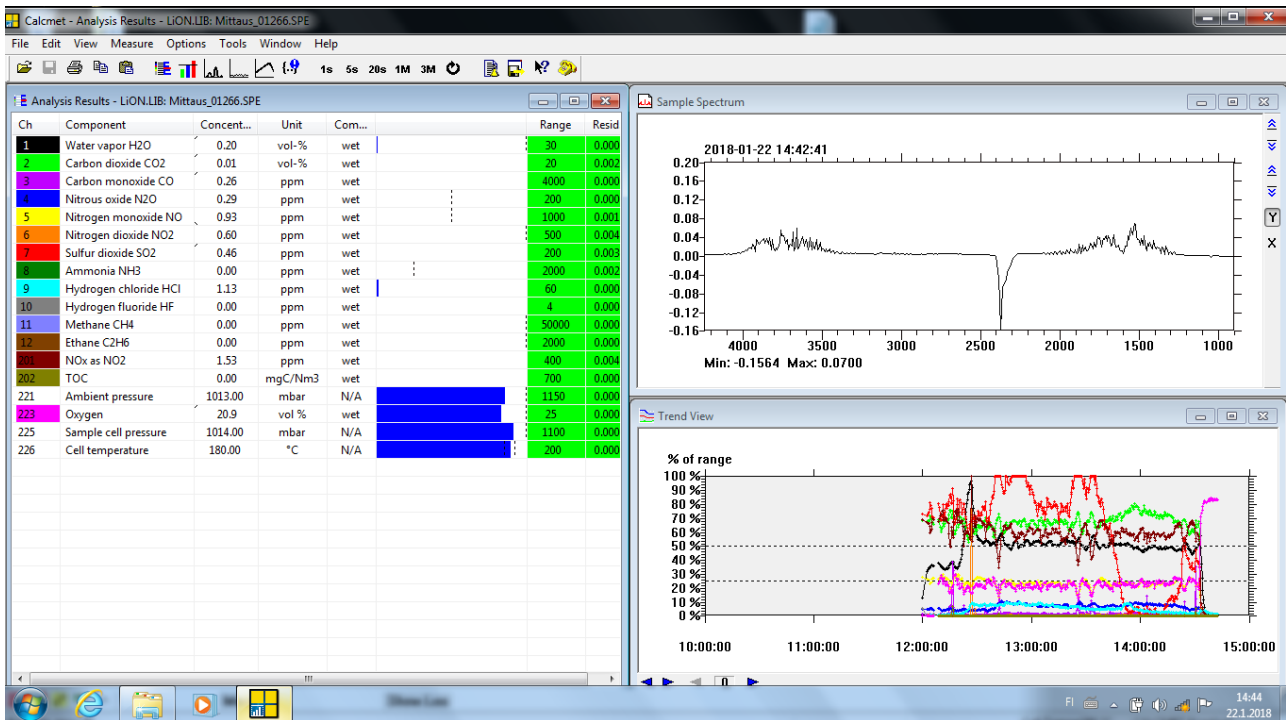
### 6.2.1 Mittaus Gaset DX4000:lla

Kun laitteisto on kytketty, voidaan analysaattori ja pumppuyksikkö käynnistää. Tämän jälkeen on odotettava, että laitteisto lämpenee 180 °C:een, jotta estetään kaasun sisältämän veden kertyminen (kondensoituminen) analysaattorin herkkiin komponentteihin.

Calcmets analyysikirjastosta pitää lisätä kaikki komponentit, joita mittauskohteessa esiintyy. Jos jokin aine jää valitsematta ja mittauskohteessa on sitä merkittäviä määriä, tulokset vääristyvät. (Pieniniemi 2018.) Calcmets pystyy samanaikaisesti tunnistamaan ja analysoimaan 50 erilaista kaasukomponenttia.

Kun laitteisto on lämmennyt, voidaan mittaus aloittaa. Näytteenottosondi asetetaan mitattavaan kohteeseen (pakoputki, savukaasupuhaltimen kanaali, ym.) ja Calcmets-ohjelmistosta valitaan joko kertamittaus tai jatkuva mittaus. Mittausaika on säädettävissä yhdestä sekunnista kolmeen minuuttiin. Mitä pienempiä pitoisuuksia mitataan, sitä pidempi mittausjakson tulisi olla. (Pieniniemi 2018.) Jatkuva mittaus tallentaa tulokset aina valitun mittausajan välein ja jatkaa mittausa niin kauan, kunnes se erikseen keskeytetään.

Näytelinjat siirtävät näytteen sondilta pumppuyksikköön ja pumpulta analysaattorille pitäen sen 180 °C:n lämpötilassa. Pumppuyksikkö pumppaa näytekäasua 4 litraa minuutissa. Mittauksen jälkeen laitteisto ”huuhdellaan” imemällä sillä nollakaasua tai puhdasta ilmaa. Nollakaasulla huuhdellaessa huuhtelua voidaan pitää riittävänä, kun kaasukomponenttien pitoisuudet ovat 0 ppm-, mg/Nm<sup>3</sup>- tai %-yksikköä. Kuvassa 11 on näyttökuva Calcmets-ohjelmistosta mittauksen päättymisen jälkeen. Vasemmalla näkyvät kaasukomponenttien pitoisuudet, joista voi havaita mm. HCl-pitoisuuden (Hydrogen chloride, HCl) olevan 1,13 ppm. Oikealla ylhäällä on näytteen spektri ja oikealla alhaalla ovat kaasukomponenttien trendikäyrät.



KUVA 11. Calmet-ohjelmisto

## 6.2.2 Gaset DX4000:n kalibrointi

Tärkeää luotettavien tulosten saamiseksi on taustan mittaaminen eli nollakaasulla kalibrointi.

Tausta mitataan nollakaasulla, jonka pitää olla inerttikaasu, joka ei absorboi IR-säteilyä mittausalueella. Näitä kaasuja ovat kaksiatomiset molekyylit ja jalokaasut. Yleensä nollakaasuna käytetään typpeä, mutta myös happi ja helium ovat puhtaina tällaisia yhdisteitä. (Nikula 2016.)

Letkut ja laitteet kytetään normaalisti ja laitteisto käynnistetään. Lämpötilojen pitää olla 180 °C. Tyypivirtaus (4 l/min) johdetaan pumppuyksikössä olevaan Zero gas -liittimeen ja Calmet-ohjelmasta valitaan Mittaa-valikosta Tausta.

## 7 SAVUKAASUMITTAUKSET

Dolomiittikoeajot tehtiin turpeella ja sekä kokopuu- että metsätähdehakeella. Ensimmäisessä koeajossa puolet petimateriaalista korvattiin dolomiitilla. Kahdessa seuraavassa koeajossa dolomiittia syötettiin tuhkapitoisuuden mukainen määrä, ja viimeisessä koeajossa tuhkapitoisuuden mukainen määrä tuplattiin. Mittausten aikana kerättiin tuhkanäytteitä ja Gasmnet-laitteisto keräsi dataa savukaasuissa tapahtuvissa muutoksissa.

### 7.1 Ensimmäinen dolomiittikoeajo

Ensimmäinen dolomiitinsyöttökoeajo Laihian Nuuka Lämmössä tehtiin hyvälaatuisella turpeella, joka oli lämpöarvoltaan 22,05 MJ/kg ja kosteudeltaan 42,1 %. Savukaasunäyte mitattiin pussisuodattimien ja savukaasupesurin välistä, savukaasupuhaltimen painepuolen kanaalista. Näytesondia varten kanaaliin porattiin 12 mm:n reikä. Tämän jälkeen kytkettiin ja käynnistettiin Gasmnet-laitteisto (KUVA 12), ja odotettiin, että laitteisto lämpeni 180 °C:een. Näytteenottosondin kiinnitimme narulla oviaukon yläpuolella olevaan kaiteeseen kiinni (KUVA 13).



KUVA 12. Gasmnet-laitteisto





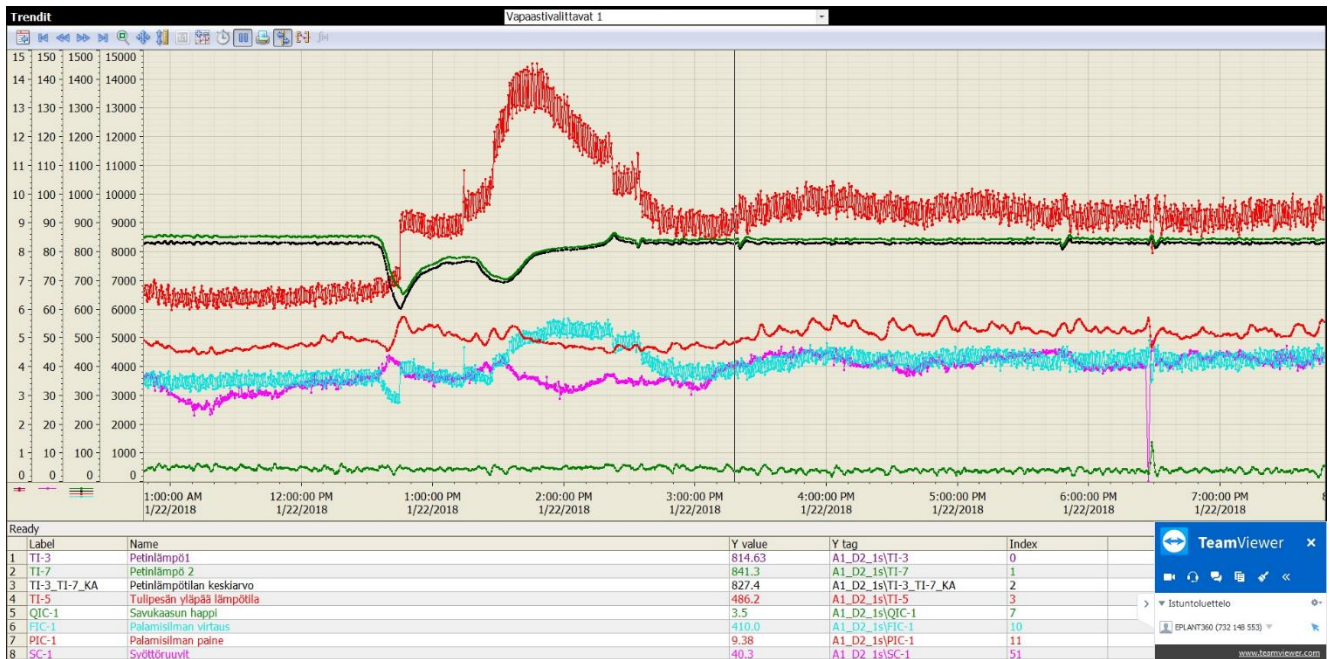
KUVA 13. Näytteenottosondi savukaasupuhaltimen painepuolen kanaalissa

Mittauksia aloitettaessa leijupetimateriaalina oli 800 litraa kvartsihiekkää. Tunnin referenssimittauksen jälkeen aloitettiin dolomiitin syöttö. Ennen dolomiitin lisäämistä ja sen syötön aikana poistettiin petihiekkaa, joka korvautui n. 3 mm:n raekokoisella dolomiitilla. Syöttöä jatkettiin, kunnes petihiekasta noin puolet oli dolomiittia. Dolomiittia lisättiin polttoaineen mukana polttosäiliöön. Gasmet-mittauksia otettiin koko ajan, joten syötön vaikutus ja petilämpötilan stabiloituminen tallentuivat myös Gasmet-mittauksiin. Laitoksen oma tiedonkeruujärjestelmä tallensi kaikki mitattavat parametrit (trendikäyrät) myöhemmää tarkastelua varten. Dolomiitti valutettiin suursäkiästä pelletin syöttämistä varten rakennettuun, lattiatasolla olevaan kaukaloon, josta se purettiin ruuvin avulla polttoainekuljettimelle ja siitä edelleen petimateriaaliksi (KUVA 14). Vielä tässä vaiheessa, kun putkikuljetin kävi koko ajan, voitiin sitä pitää toimivana annostelulaitteena dolomiitin syöttöön.



KUVA 14. Dolomiitin lisääminen ruuvikuljettimelle

Kylmän ja kostean dolomiitin lisääminen aiheutti petilämmön laskemisen asetusravosta ( $850^{\circ}\text{C}$ )  $730^{\circ}\text{C}$ :een. Lämpötila kohosi asetusravoonsa takaisin noin tunnin kuluttua. Primääri-ilman paine jouduttiin nostamaan  $14\text{ kPa}$ :iin, mikä johtui todennäköisesti dolomiitin suuremmasta tiheydestä ( $2800\text{ kg/m}^3$ ) kvartsihiekkään ( $2600\text{ kg/m}^3$ ) verrattuna. Paine laski varsin nopeasti, mikä selittyy sillä, että dolomiitti jauhautui pedissä ja poistui hyvin hienojakoisena tuhkana. Paineen muutos ja samalla pedin kuluminen tallentuivat valvomon trendikäyriin (KUVIO 2).



KUVIO 2. Trendikäyrät ensimmäisessä koeajossa

Trendikäyrissä punainen käyrä kuvaa primääri-ilman painetta, turkoosi primääri-ilman virtausta, tummanvihreä ja musta petilämpötiloja ja violetti polttoaineen syöttöruuvin nopeutta. Trendeistä voi havaita selvästi paineen muutoksen dolomiittia lisättäessä.

Kun petimateriaalista puolet oli korvattu dolomiitilla, tuhasta otettiin n. 10 litran näyte jatkotutkimuksia varten (KUVA 15). Näytettä otettaessa pohjatuhkan havaittiin olevan lähes puhdasta dolomiittia. Tähän todennäköisesti vaikutti materiaalien välinen tiheysero. Kvartsihiekkä kellui keveämpänä dolomiittimateriaalin päällä ja poistuva materiaali oli näin ollen lähes puhdasta dolomiittia. Koeajon aikana dolomiitin kulutus oli varsin suurta, n. 1 m<sup>3</sup>/h.





KUVA 15. Pohjatuhkanäyte dolomiitin lisäyksen jälkeen

Kattilan konvektio-osan päällä on ääninuohoin, jonka värähtelytaajuus (ääni) on viritetty siten, että se vastaa lentotuhkan ominaisvärähtelytaajuutta (Muilu 2018). Kokeen aikana ääninuohoimen käyntitiheys kasvoi, mikä saattoi johtua siitä, että dolomiitti tarttui konvektio-osan lämmönsiirtoputkiin eikä varissut alas matalamman ominaistaajuutensa vuoksi. Tämän todentamista ei pystytty tekemään, koska konvektio-osa on täysin umpinainen kattilan osa.

Puhdasta lentotuhkanäytettä ei voitu kattilan rakenteellisista syistä ottaa, vaan pohjatuhka- ja lentotuhkanäytteen sekoitteesta kerättiin kymmenen litran näyte. Puhtaan pohjatuhkanäytteen ja sekoitenäytteen eroista voi päätellä lentotuhkan koostumuksen.

Tulosten analysoinnin jälkeen todettiin, että dolomiittikoe osoitti rikin sitoutuvan hyvin dolomiittiin. Etuna oli myös se, että laimennuslipeää (natriumhydroksidi) ei tarvinnut syöttää. Lipeää käytetään

savukaasujen pH:n alentamiseen. Kloorin sitoutumista ei voitu suoranaisesti todentaa, sillä turpeen klooripitoisuus oli hyvin alhainen.

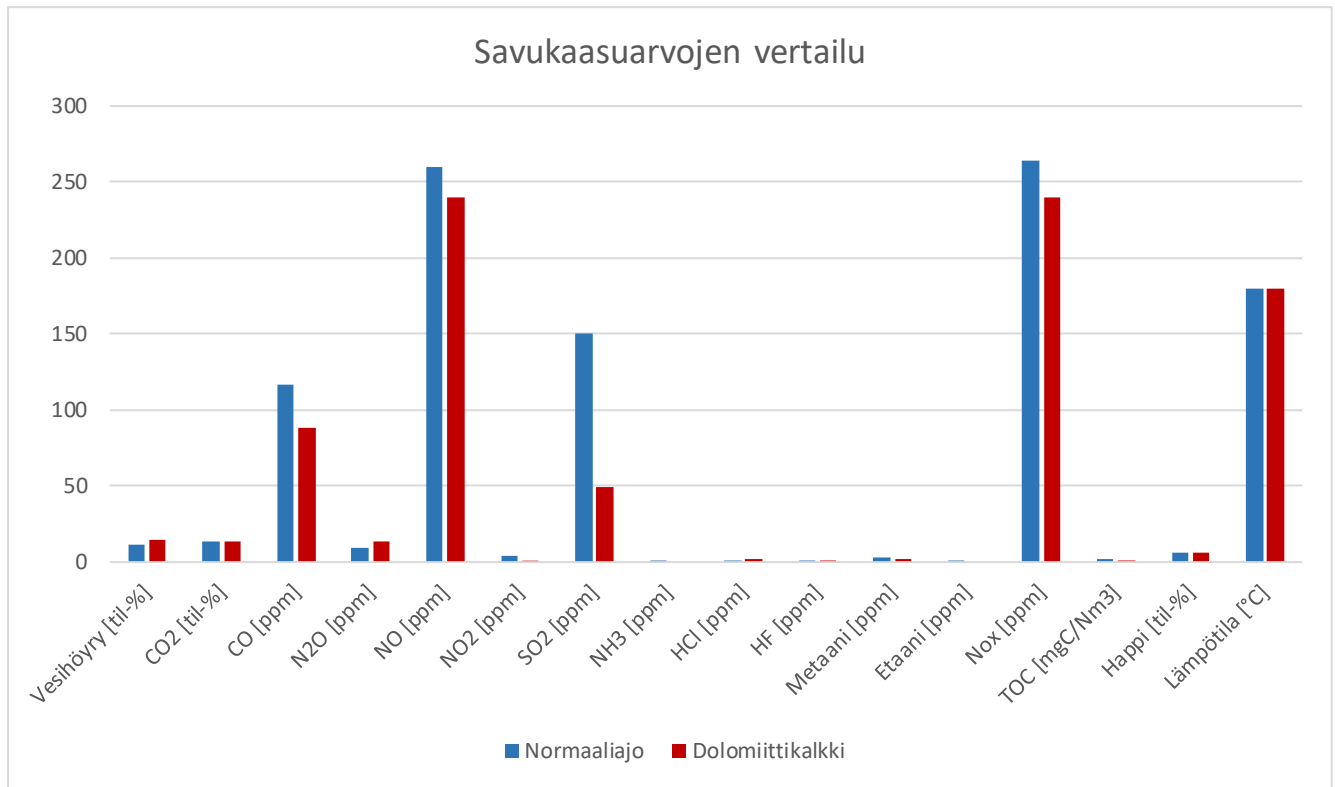
Alla olevassa kuvaajassa (KUVIO 3) rikin sitoutuminen dolomiittiin on hyvin havaittavissa. Kun dolomiittiin syöttämisestä on kulunut n. 1 h, rikkidioksidin pitoisuus alkaa laskea 250 ppm:stä 2...3 ppm:ään.



KUVIO 3. Rikkidioksidin pitoisuus savukaasuissa (neljän mittauksen liukuva keskiarvo)

Pohja- ja lentotuhkanäytteiden ottamisen jälkeen mittaussondi otettiin pois savukaasupuhaltimen kanaalista ja laitteisto huuhdeltiin.

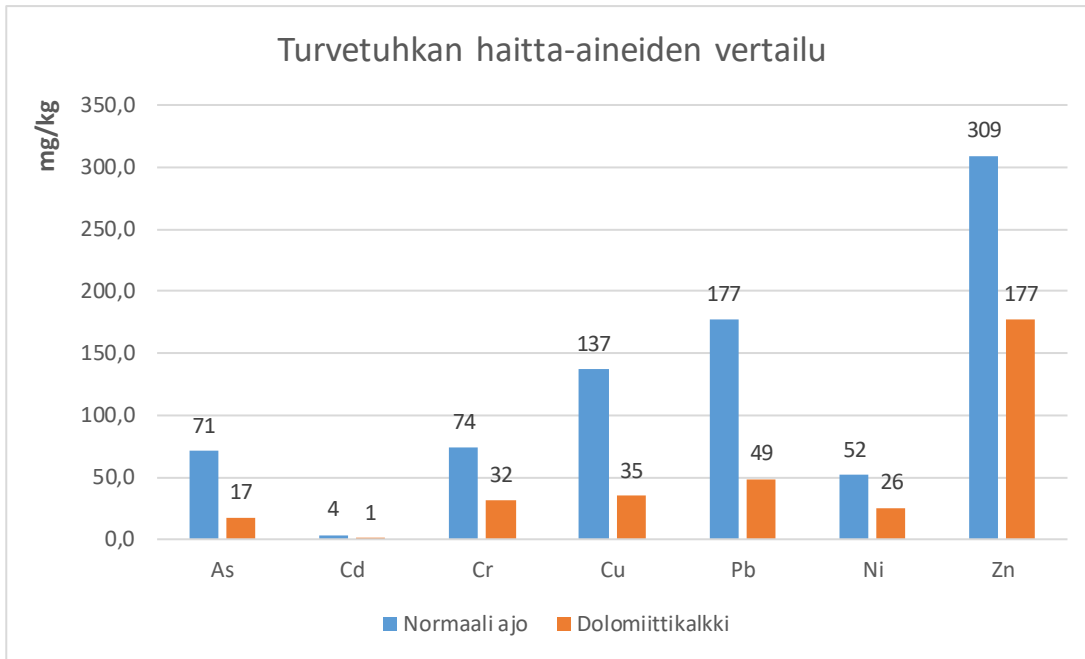
Alla olevassa kuvaajassa (KUVIO 4) on nähtävissä koeajon savukaasujen vertailutulokset.



KUVIO 4. Savukaasuarvojen vertailu turpeella (petimateriaalista puolet dolomiittia)

Savukaasujen vertailutuloksista on nähtävissä rikin sitoutuminen dolomiittiin. Turpeen HCl-pitoisuuden ollessa alhainen muutos ei ollut todennettavissa.

Pohjatuhkanäytteen kerättiin ennen dolomiitin lisäämistä ja dolomiitin lisäämisen jälkeen. Tuhkanäytteet vietiin laboratorioon analysoitavaksi käyttäen ICP-MS- ja AAS-analyysimenetelmää. Seuraavalla sivulla olevassa kuvaajassa (KUVIO 5) on nähtävissä turvetuhkan haitta-aineiden vertailu normaaliajolla ja dolomiittiajolla. Niin kuin aiemmin todettiin, lentotuhkanäytteen erikseen ottaminen ei onnistunut, joten kuvaaja on muodostettu pohja- ja lentotuhkan sekoituksesta.



KUVIO 5. Turvetuhkan haitta-aineiden vertailu (petimateriaalista puolet dolomiittia)

Kuvaajasta nähdään kaikkien raskasmetallipitoisuuksien pienentyneen, kun pedistä on puolet korvattu dolomiitilla. Normaaliajolla kadmiumin pitoisuus oli 3,6 mg/kg, kun se dolomiittiajolla laski 0,99 mg/kg:aan. Näin sen pitoisuus olisi hyväksyttävä peltolannoitteena (raja 2,5 mg/kg). Elohopean pitoisuutta ei pystytty todentamaan, sillä sitä oli mitatussa näytteessä alle mittalaitteen määrittämissä (< 0,1 ppb). Tarkemmat alkuaineanalyysitulokset ovat nähtävissä liitteessä 2.

## 7.2 Toinen dolomiittikoeajo

Toinen dolomiitinsyöttökoeajo tehtiin kokopuuhakkeella. Nyt ideana oli syöttää dolomiittia suoraan polttoainevirtaan polttoaineen tuhkapitoisuuden mukainen määrä.

Polttoaineen tuhkapitoisuuden mukainen dolomiitin syötön määrä laskettiin alla olevasta kaavasta:

$$\text{Dolomiitin massavirta} = \left( \frac{P_k}{Q_{\text{net,ar}}} \right) * A_d * L_k * K_k * V_k \quad (1)$$

jossa  $P_k$  on kattilateho,  $Q_{\text{net,ar}}$  on polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa,  $A_d$  on polttoaineen tuhkapitoisuus kuiva-aineessa,  $L_k$  on laimennuskerroin,  $K_k$  on kalsinoitumiskerroin ja  $V_k$  on varmuuskerroin.

Koska koeajossa oli tarkoitus polttaa kokopuuhaketta (KUVA 16), oletettiin puuhaketuhkan kadmiumpitoisuudeksi 4 ppm. Teoriaosuudessa todettiin, että kadmium on yleensä rajoittavin alkuaine tuhkalannoituksessa (pitoisuusraja tuhkalannoitteille 2,5 ppm), joten laimennuskertoimeksi saadaan:

$$L_k = \frac{4 \text{ ppm}}{2,5 \text{ ppm}} = 1,6 \quad (2)$$

Käytetylle Juuan Dolomiittikalkin PASYKA-dolomiitille maksimikalsinoituminen on n. 40% (LIITE 1), jolloinkalsinoitumiskertoimenä olisi 1,6 (kerroin vastaa 100%:n suhteellista kalsinoitumista). Aiempien kalsinoitumiskokeiden perusteella havaittiin kuitenkin kalsinoitumisen tapahtuvan vain osittain, joten kalsinoitumiseksi voidaan olettaa 33%, jolloin kaavaan tuleva kerroin on 1,3 (kerroin vastaa 81,25% suhteellista kalsinoitumista). (Ruotanen 2018.)

Polttoaineanalyysiä ei saatu etukäteen, joten polttoaineen teholliseksi lämpöarvoksi saapumistilassa oletettiin 10 MJ/kg. Kokopuuhake oli tehty 2-3 vuotta sitten kaadetusta puusta ja asianmukaisesti varastoitu, joten puun kuiva-aineen tuhkapitoisuuden voitiin olettaa olevan 1%. Kokopuuhakkeen kosteuden ollessa 50 %:a, tuhkapitoisuus olisi n. 0,5 %.

Ottaen huomioon epävarmuustekijät, lisättiin kaavaan vielä varmuuskertoimeksi 1,3. Kattilatehona käytettiin 3 MW. Tällöin dolomiitin massavirraksi saatiin:

$$\text{Dolomiitti (m)} = \left( \frac{3 \text{ MW}}{10 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} \right) * 0,01 * 1,3 * 1,6 * 1,3 = 0,0081 \text{ kg/s} \quad 0,0081 \text{ kg/s} * 60 \text{ s} * 60 \text{ min} =$$



29,2 kg/h.  $\approx$  30 kg/h.

Dolomiittia syötettiin tällöin 30 kg/h:ssa.



KUVA 16. Kokopuuhake

Gasmet-laitteiston kytkemisen ja lämpenemisen jälkeen tehtiin tunnin referenssimittaus ennen dolomiittin lisäämistä. Pohjatuhkasta sekä pohjatuhkan ja lentotuhkan sekoituksesta kerättiin pienet tuhkanäytteet.

Jo referenssimittauksen aikana havaittiin polttoaineen  $\text{SO}_2$ - ja  $\text{HCl}$ - pitoisuuksien olevan hyvin alhaisia. Rikkidioksidin vähäinen pitoisuus oli jo ennalta tiedossa, sillä puu sisältää massaprosenttina 0,01...0,05 % rikkiä ja esim. turve sisältää rikkiä 0,18...0,22 %. Kokopuuhakkeen  $\text{HCl}$ -pitoisuus oli alhainen, koska siihen ei kuulunut ”vihreitä ainesosia”, kuten lehtiä ja neulasia.

Polttoaineen ollessa kokopuuhaketta, oli tuhkan muodostuminen hyvin hidasta verrattuna esim. edellisellä kerralla polttoaineena olleeseen turpeeseen. Pohjatuhkanäyte saatiin kytkemällä ääninuohoin hetkeksi päälle, mikä varisutti tuhkaa riittävän määrän. Tosin ääninuohointa käyttäessä se pudottaa tuhkan sekaan lämpöpinnoille agglomeroitunutta tuhkaa, kuten alla olevassa kuvassa on nähtävissä (KUVA 17).



KUVA 17. Tuhkanäyte ennen dolomiitin lisäämistä

Referenssimittauksen jälkeen lisättiin ensimmäinen 30 kg:n dolomiittierä. Dolomiitin syöttö oli tarkoitus automatisoida pelletinsyöttöön tarkoitetulla ruuvikuljettimella, mutta syöttö ei onnistunut. Ruuvikuljettimen lakattua käymästä dolomiitti valui putkikuljettimen pohjaan, eikä se enää käynnistyttyään jaksanut siirtää dolomiittia ylöspäin. Momentti oli liian suuri hiekkamaisen materiaalin siirtoon. Tästä johtuen syöttö tapahtui manuaalisesti. Ämpäreihin mitattiin 30 kg:a dolomiittia koukkuvaa'an avulla (KUVA 18), ja dolomiitti syötettiin suoraan sulkusyöttimelle. Sulkusyöttimestä se ohjautui polttoaineen mukana suoraan tulipesään.



KUVA 18. Dolomiitin määrän mittaaminen

Tarkoituksena oli lisätä dolomiittia tunnin välein. Syöttöön tuli pieni keskeytys, sillä leijupetikattilan primääri-ilmapellin ohjausrele hajosi, mikä aiheutti sen, että palamisilman määrää ei pystytty ohjaamaan.

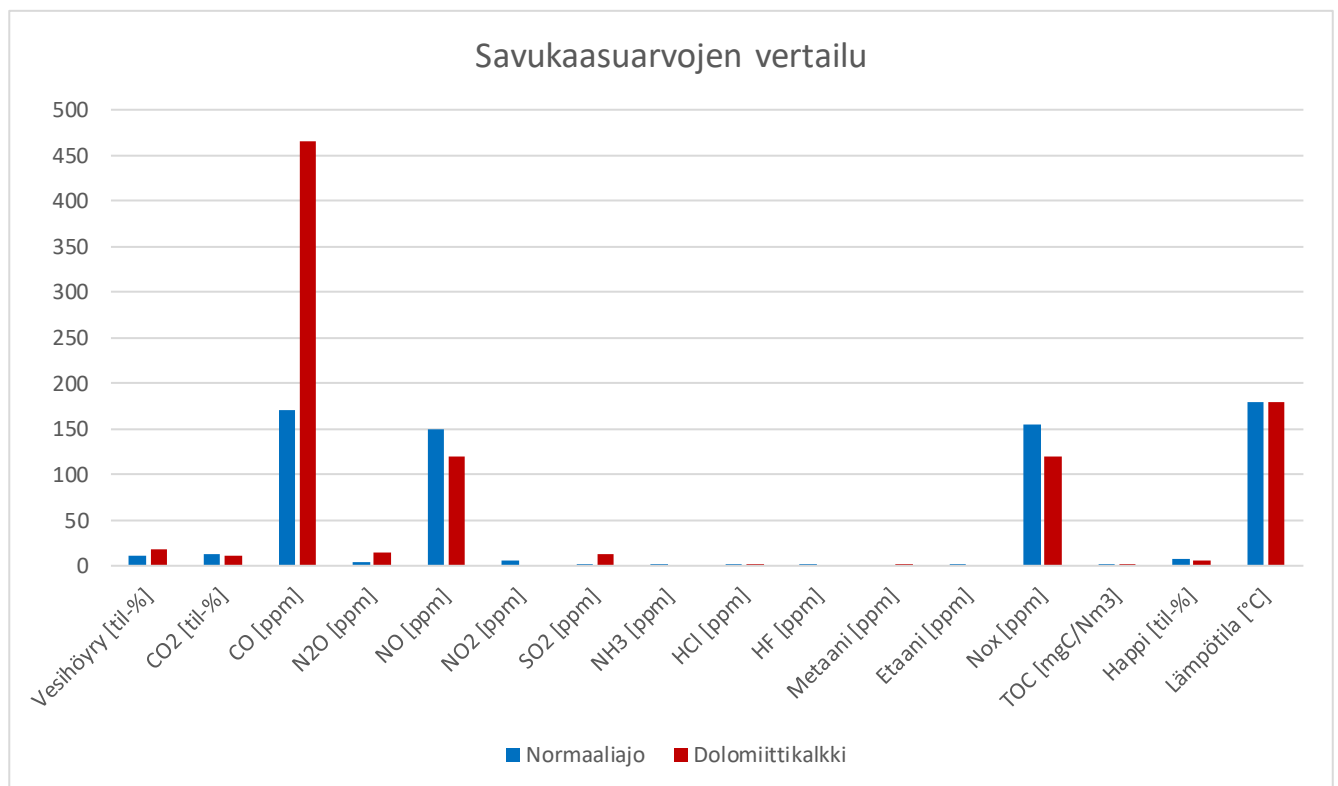
Ohjausreleen hajoamisen seurauksena pedin lämpötila nousi yli  $1000^{\circ}\text{C}$ :n. Tämä todennäköisesti johtui lämmönvirtauksen pienenemisestä, sillä tulipesässä ei enää käynyt samanlainen virtaus, kun kattilaan tulevaa primääri-ilman määrää ei pystytty ohjaamaan. Lopulta ohjausreleen hajoaminen aiheutti palamisreaktion katkeamisen, jolloin polttoaine kaasuuntui, mikä saattoi myös nostaa pedin lämpötilaa. Kaikki nämä tallentuivat Gasmets-analysaattoriin, mikä todennäköisesti vaikutti mittaustuloksiin.

Ongelman jälkeen dolomiitin syöttöä jatkettiin normaalisti. Syöttö toistettiin neljä kertaa, ja aina kun syötöstä oli kulunut puolituntia, otettiin pohja- ja sekoitustuhkanäytteet.



Kun dolomiittia oli syötetty yhteensä 120 kg, päätettiin syötön määrää lisätä. Vähäinen dolomiitin määrä ei juuri näkynyt savukaasupitoisuuden muutoksissa. Syötön määrän lisäämisellä haluttiin nähdä vaikutuksia myös savukaasumittauksissa. Alkuperäinen idea oli jatkaa vähäisen syötön ja mittauksen aikaa pidempään, mutta koska syöttö oli manuaalista, ei pidempiaikainen syötöstä huolehtiminen ollut mahdollista.

Alla olevassa kuvaajassa (KUVIO 6) näkyvät toisen koeajon tulokset. Niin kuin tuloksista nähdään, vähäinen dolomiitin määrä ja pieni mittausjakso ei vaikuttanut  $\text{SO}_2$ :n ja  $\text{HCl}$ :n pitoisuuksiin. Lisäksi  $\text{SO}_2$ - ja  $\text{HCl}$ -pitoisuuksien ollessa alhainen jo referenssimittauksen aikana muutos on hankala todentaa. Ainoa huomattava ero on hiilimonoksidin ( $\text{CO}$ ) pitoisuudessa, sillä se on lähes kolminkertaistunut. Hiilimonoksidin korkea nousu selittynee ilmanohjausreleen hajoamisella ja tästä johtuneella polttoaineen epävakaalla palamisella.



KUVIO 6. Savukaasuarvojen vertailu kokopuuhakkeella (dolomiittia syötetty 4 x 30 kg)

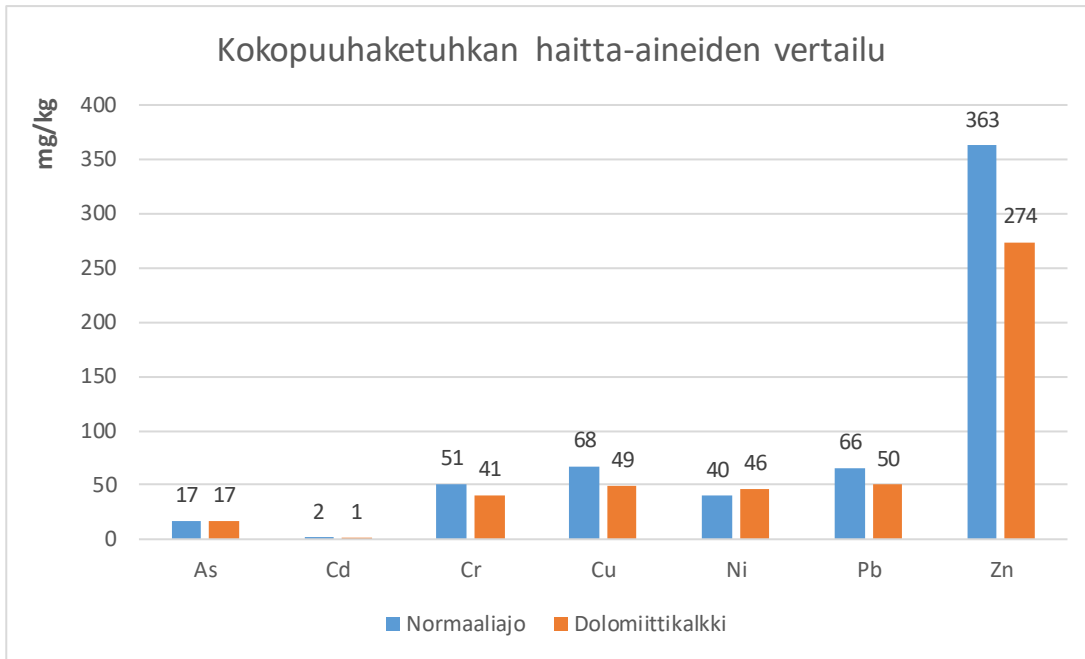
Suuremman dolomiittimäärän lisääminen mittauksen lopussa vaikutti viimeiseen tuhkanäytteeseen. Ääninuhointa ei tarvinnut käyttää, sillä pohjatuuhkaa muodostui nopeammin dolomiitin vaikutuksesta. Tämä johtui jo edellisessä mittauksessa mainitusta kvartsihiekan ja dolomiitin välisestä tiheuserosta.

Pohjatuhka näytti hyvin dolomiittipitoiselta (KUVA 19), mutta sen koostumuksen varmistavat analysoitavaksi viedyt tuhkanäytteet.



KUVA 19. Tuhkanäyte dolomiitin lisäämisen jälkeen

Tuhkanäytteet vietiin laboratorioon analysoitavaksi. Tuloksista laadittiin pylväskuvaaja (KUVIO 7), missä ovat kokonaistuhkanäytteet ennen dolomiitin lisäämistä (normaaliajo) ja tuhkanäytteet, kun dolomiittia on lisätty 4 x 30 kg (dolomiittikalkki). Kuvaajassa ei ole huomioitu viimeisiä isompien dolomiittierien lisäämistä. Tarkemmat alkuaineanalyysitulokset ovat nähtävissä liitteessä 3.



KUVIO 7. Kokopuuhaketuhkan haitta-aineiden vertailu (dolomiittia syötetty 4 x 30 kg)

Vertailukuvasta nähdään kokopuuhakkeen polttamisen hyvä puoli. Jo normaaliajolla sen haitta-aineiden pitoisuudet tuhkassa ovat olleet alle raja-arvojen niin metsä- kuin peltolannoituksessa. Dolomiitin syötön määrällä saadaan kuitenkin haitta-aineiden pitoisuutta vieläkin vähemmäksi, lukuun ottamatta arseenia ja nikkeliä. On vaikea arvioida, olisivatko haitta-ainepitoisuudet laskeneet koeajon ollessa pidempi. Valitettavasti syöttöä ei voitu automatisoida pidemmäksi aikaa, jolloin tämä olisi ollut todennettavissa. Liitteessä 3 on nähtävissä, kuinka pitoisuudet muuttuvat, kun dolomiittia lisättiin mittauksen lopussa enemmän. Esimerkiksi nikkelpitoisuus on puolittunut yllä olevasta kuvaajasta.

### 7.3 Kolmas dolomiittikoeajo

Kolmas dolomiittikoeajo tehtiin turpeella (KUVA 20). Turve on edullisempaa ja lämpöarvoltaan parempaa kuin puuhake, mistä johtuen sitä poltetaan koeajolaitoksessa enemmän. Edellisen kerran, kun koeajossa polttoaineena oli turve, pedistä puolet korvattiin dolomiitilla. Nyt dolomiittia syötettiin tuhkapitoisuuden mukainen määrä.



KUVA 20. Turve

Dolomiitin määrän laskemiseen tarvittiin tiedot polttoaineen laadusta ja kattilatehosta. Polttoaineen kosteus oli n. 50 % ja tehollinen lämpöarvo saapumistilassa 9,28 MJ/kg. Ilman lämpötilan ollessa alhainen kattilaa käytettiin vain 1,7 MW:n teholla. Tuhkapitoisuudeksi arvioitiin turpeelle 5 %. Aikaisemmin otettujen turpeen tuhkanäytteiden perusteella laimennuskerrointa ei muutettu, sillä kadmiumin pitoisuus turpeen tuhkassa ennen dolomiittia oli n. 4 ppm. Laimennuskerroin on tällöin sama kuin puuhakkeella, eli 1,6.

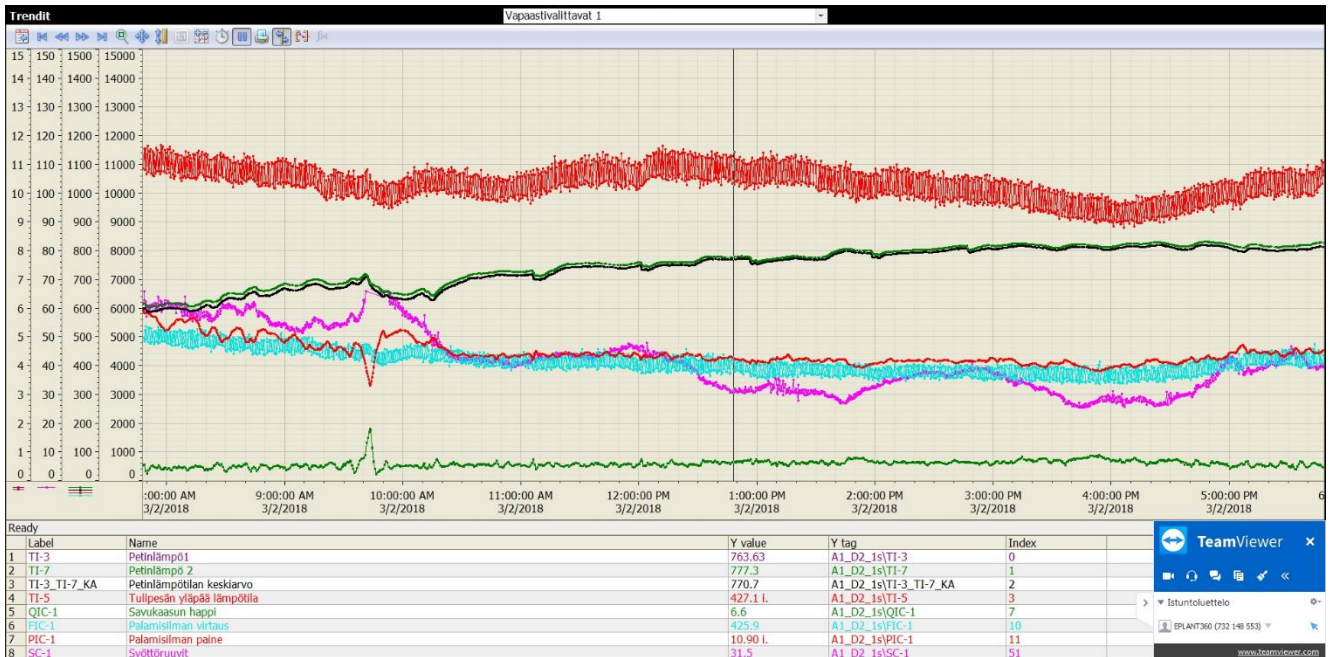
Dolomiitin massavirta laskettiin vastaavasti kuin edellisessä koeajossa:

$$\text{Dolomiitin massavirta} = \left( \frac{P_k}{Q_t} \right) * A_d * L_k * K_k * V_k$$

$$\text{Dolomiitti (m)} = \left( \frac{1,7 \text{ MW}}{9,28 \text{ MJ/kg}} \right) * (0,05 * 0,50) * 1,3 * 1,6 * 1,3 = 0,0124 \text{ kg/s} = 44,58 \text{ kg/h.}$$



Näin syöttömääräksi saatiin 45 kg/h. Referenssimittauksen jälkeen aloitettiin koeajo 45 kg/h mukaisella määrällä. Syöttö tehtiin käsin ämpäreillä suoraan sulkusyöttöille, ja jokainen syöttö näkyi kattilan trendikäyrissä (KUVIO 8).

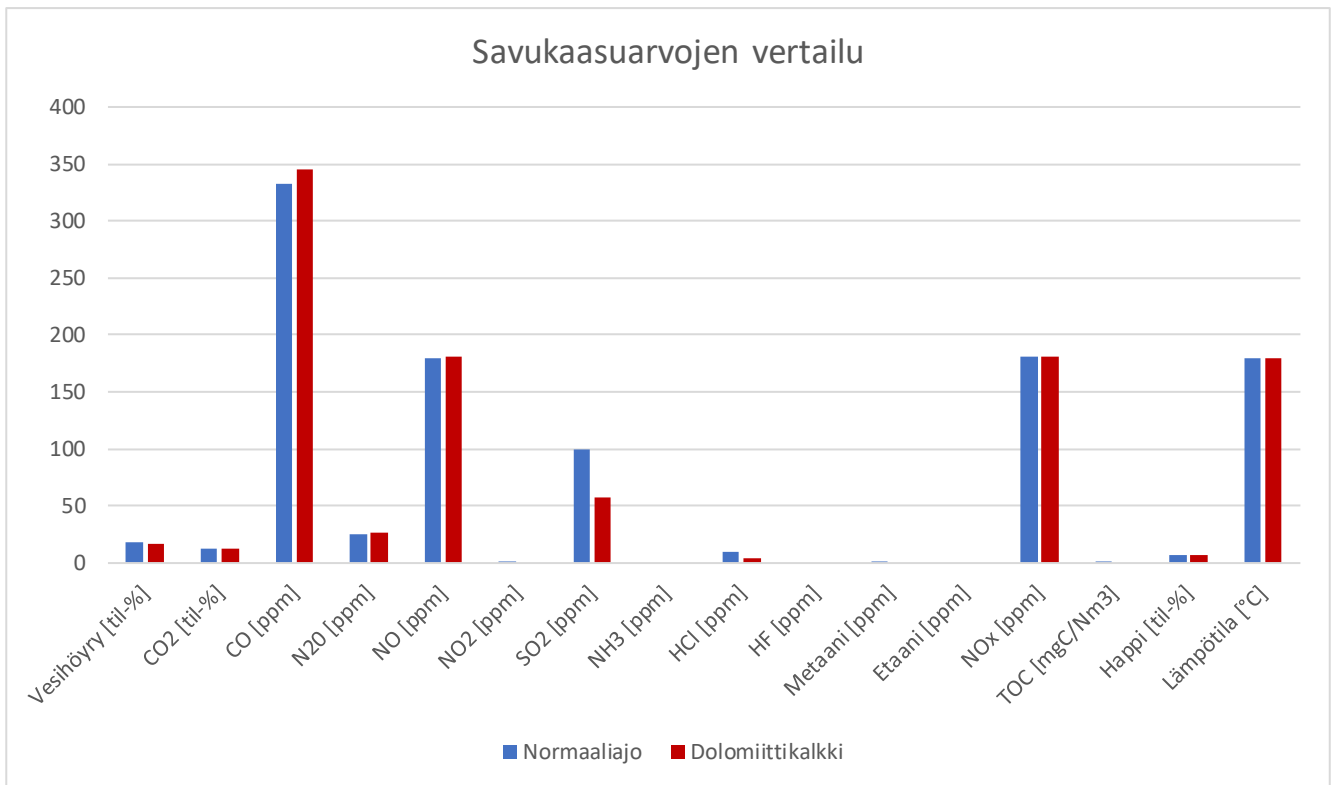


KUVIO 8. Trendikäyrät kolmannessa koeajossa

Pedin lämpötilan trendikäyristä nähdään dolomiitin lisäyshetket. Ensimmäinen syöttö tapahtui n. klo. 11:00. Lämpötilat laskivat hieman joka lisäyksen yhteydessä, mutta palautuivat kuitenkin lisäämisen jälkeen normaalille tasolle. Pedin lämpötilaa kuvaavat musta ja tummanvihreä käyrä. Myös palamisilman paineessa havaitaan pieni nousu joka lisäämisen yhteydessä.

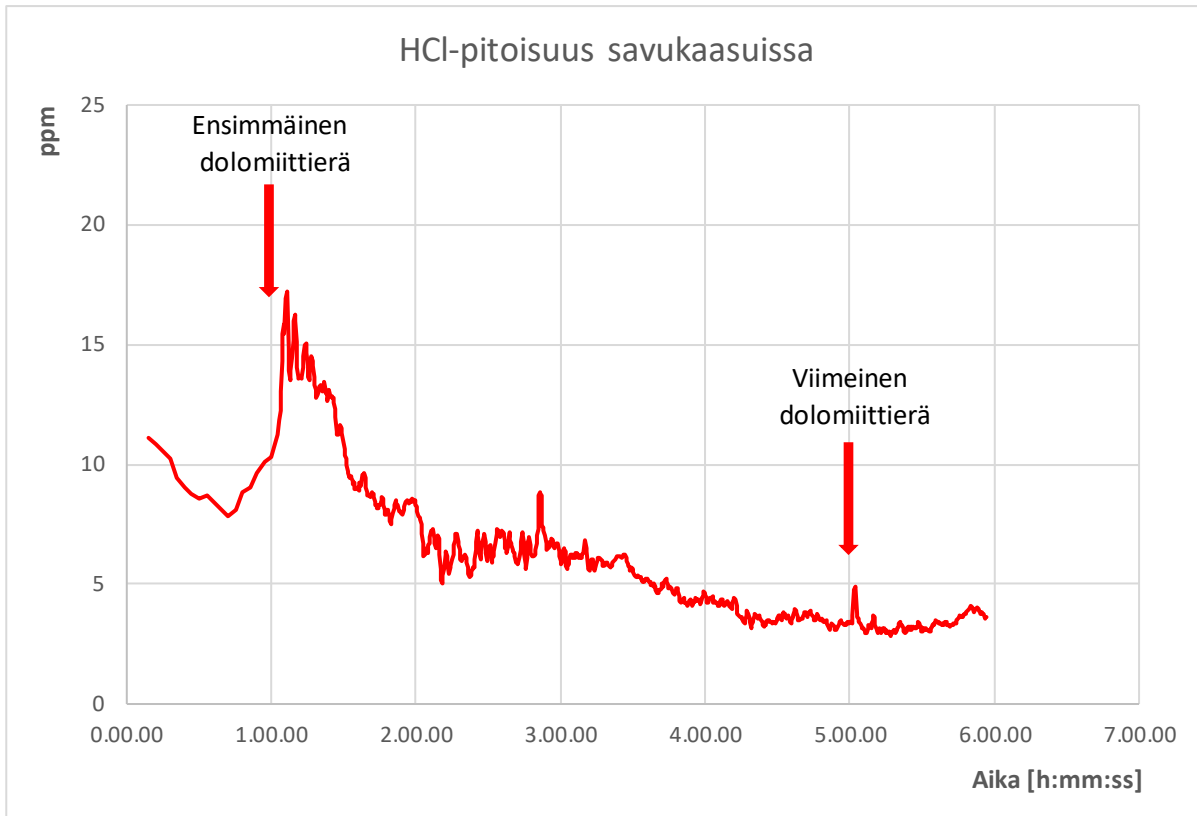
Gasmet-laitteisto keräsi koko mittausjaksolta dataa, ja savukaasujen pitoisuuksista nähdään SO<sub>2</sub>:n ja HCl:n sitoutuvan hyvin dolomiittiin (KUVIO 9). Rikin sitoutuminen dolomiittiin todennettiin jo aikaisemmalla koeajolla, mutta nyt myös HCl:n sitoutuminen dolomiittiin oli todennettavissa. SO<sub>2</sub>:n pitoisuus on laskenut 100 ppm:stä 56 ppm:ään ja HCl:n pitoisuus on laskenut n. 10 ppm:stä alle 4 ppm:ään. Näin ollen dolomiitin syötöllä voidaan ehkäistä kattilaosien korroosiota, sillä korroosiota aiheuttavat SO<sub>2</sub> ja HCl sitoutuvat hyvin dolomiittiin.





KUVIO 9. Savukaasuarvojen vertailu turpeella (dolomiittia syötetty 5 x 45 kg)

HCl:n sitoutumisesta dolomiittiin laadittiin oma kuvaaja (KUVIO 10). HCl-pitoisuus savukaasuissa on normaaliajolla yllättävän korkea, mutta ensimmäisen dolomiittierän jälkeen HCl-pitoisuus alkoi laskea. Viidettä dolomiittierää lisättäessä pitoisuus oli jo alle 4 ppm:ää, kun se koeajon alussa oli yli 15 ppm:ää.



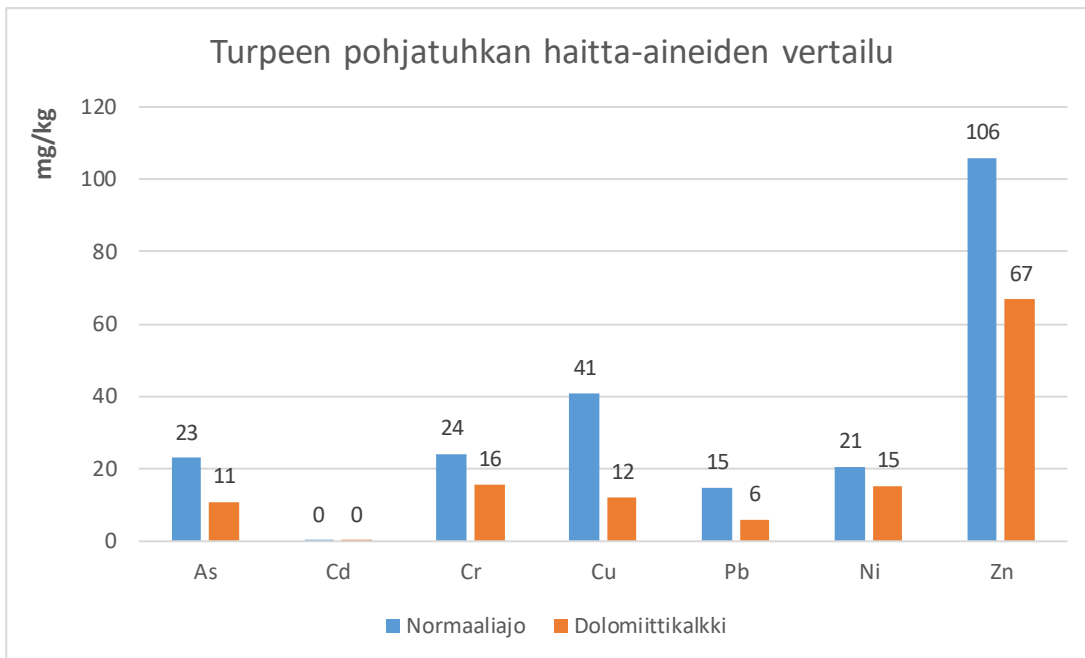
KUVIO 10. HCl-pitoisuus savukaasuissa (neljän mittauksen liukuva keskiarvo)

Tuhkanäytteet kerättiin ennen dolomiittiajoa ja dolomiittiajon jälkeen. Lentotuhkanäytteen ottaminen erikseen ei ollut aikaisemmin onnistunut, mutta nyt pohjatuhka kerättiin erikseen sivuun ennen koeajon aloittamista ja koeajon aikana. Näin ollen lavalle putoava tuhka koostui vain lentotuhkasta. Lentotuhka on tärkeä analysoinnin kannalta, sillä leijupetiprosessissa muodostunut tuhka koostuu suurimmalta osin lentotuhkasta. Lentotuhkassa ravinneainepitoisuudet ovat pohjatuhkaa korkeammat, jolloin siitä saatava arvo on pohjatuhkaa korkeampi. Kuvassa 21 on erikseen otettu pohja- ja lentotuhkanäyte.



KUVA 21. Vasemmalla pohjatuhka- ja oikealla lentotuhkanäyte

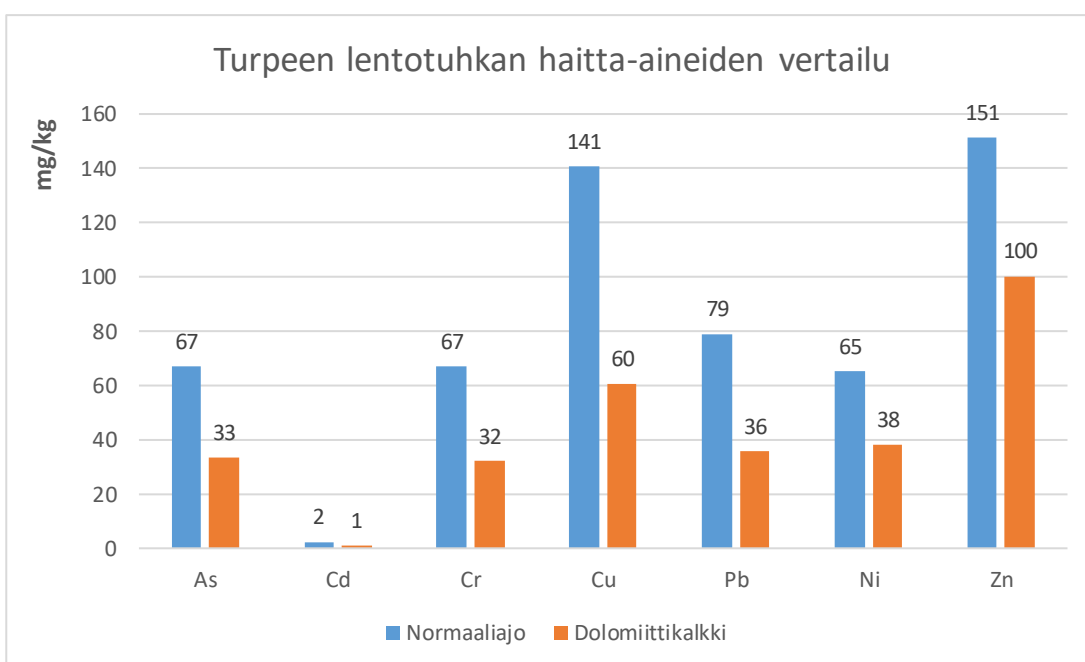
Lento- ja arinatuhkanäytteet kerättiin ennen ja jälkeen koeajon, jolloin nähtiin tuhkan muuttunut koostumus (KUVIO 11).



KUVIO 11. Turpeen pohjatuhkan haitta-aineiden vertailu (dolomiittia syötetty 5 x 45 kg)

Kuvasta nähdään pohjatuhkan vähäiset haitta-ainepitoisuudet jo normaaliajolla. Kuten jo teoriaosuu-  
dessa todettiin, pohjatukka sisältää vähäisen määrän ravinne- ja haitta-aineita, joten alhaiset pitoisuudet  
eivät ole yllättäviä. Pitoisuuksia saadaan kuitenkin entistäkin pienemmäksi dolomiittiajolla.

Kuviossa 12 on lentotuhkan muuttunut koostumus normaali- ja dolomiittiajolla.



KUVIO 12. Turpeen lentotuhkan haitta-aineiden vertailu (dolomiittia syötetty 5 x 45 kg)

Lentotuhkan haitta-ainevertailussa ainoastaan arseeni ylittää normaaliajolla raja-arvon, joka on arseenilla peltolannoituksessa 25 mg/kg. Metsälannoituksessa raja-arvo on 40 mg/kg, joten siihen käyttöön tuhkasta saadaan sallittu. Arseeni on tosin koeajon aikana laskenut puolet alkuperäisestä, joten voidaan olettaa pitoisuuden laskevan myös alle peltolannoituksen raja-arvon koeajon ollessa pidempi. Kadmiumin tarkka pitoisuus normaaliajolla oli 2,3 mg/kg ja dolomiittiajolla 1,1 mg/kg. Raja-arvo peltolannoituksessa kadmiumilla on 2,5 mg/kg. Tarkemmat alkuaineanalyysitulokset ovat nähtävissä liitteessä 4.

#### 7.4 Neljäs dolomiittikoeajo

Neljäs dolomiittikoeajo tehtiin metsätähdehakkeella (KUVA 22). Metsätähdehakkeen kosteus oli 51,59 % ja tehollinen lämpöarvo saapumistilassa 8,12 MJ/kg. Kosteuden ollessa korkea ja lämpöarvo alhainen kattilan teho oli rajoittunut 1,5 MW:iin. Metsätähdehakkeen tuhkapitoisuudeksi arvioitiin 1,5 %. Tällöin tuhkapitoisuuden mukaiseksi syöttömääräksi saatiin:

$$\text{Dolomiitin massavirta} = \left(\frac{P_k}{Q_t}\right) * A_d * L_k * K_k * V_k$$

$$\text{Dolomiitti (m)} = \left(\frac{1,5 \text{ MW}}{8,12 \text{ MJ/kg}}\right) * (0,015 * 0,5159) * 1,3 * 1,6 * 1,3 = 0,0026 \text{ kg/s} = 13,92 \text{ kg/h}$$

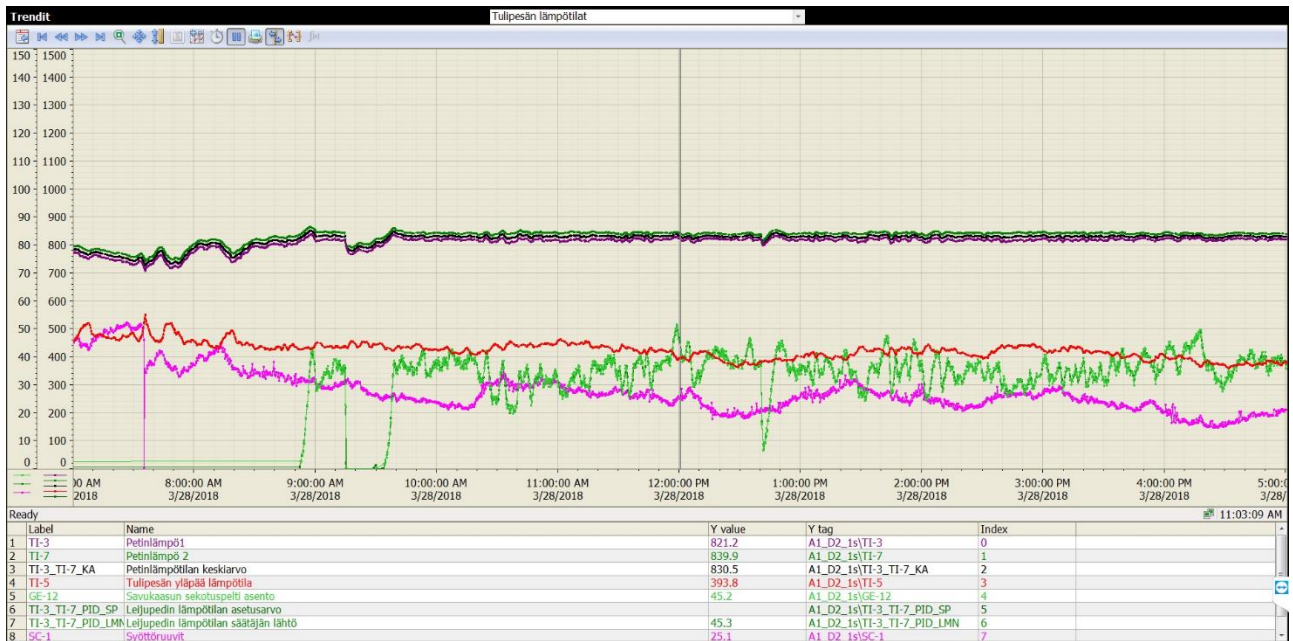
Tuhkapitoisuuden mukaiseksi syöttömääräksi saatiin 13,92 kg/h. Näin vähäinen syöttömäärä vaatisi pitkää mittausjaksoa, jotta mahdolliset muutokset olisivat todennettavissa. Metsätähdehakkeen kosteuden ollessa korkea ja lämpöarvo alhainen, kattilan teho oli rajoittunut 1,5 MW:iin, jolloin ei ole laitoksen kannalta kannattavaa polttaa sitä pitkään ilman muuta polttoainetta. Näin ollen metsätähdehakkeella ei voitu tehdä kuin päivän mittainen koeajo, jolloin vähäinen syöttömäärä ei näkyisi savukaasujen muutoksissa. Tästä johtuen päätettiin tuplata syötön määrä, jolloin dolomiittia syötettiin 30 kg/h:ssa.



KUVA 22. Metsätähdehake

Ennen dolomiitinsyöttöä tehtiin tunnin referenssimittaus ja kerättiin tuhkanäytteet. Dolomiitti a lisättiin viisi kertaa 30 kg:n erissä. Tuhkanäytteet kerättiin puolessa välissä koeajoa ja koeajon lopussa. Vaikka metsätähdehakkeen lämpöarvo oli alhainen, se paloi koeajon aikana ongelmitta, mikä on nähtävissä koeajon aikana tallennetuista trendeistä (KUVIO 13). Petilämpötilat pysyivät vakioina koko koeajon ajan.

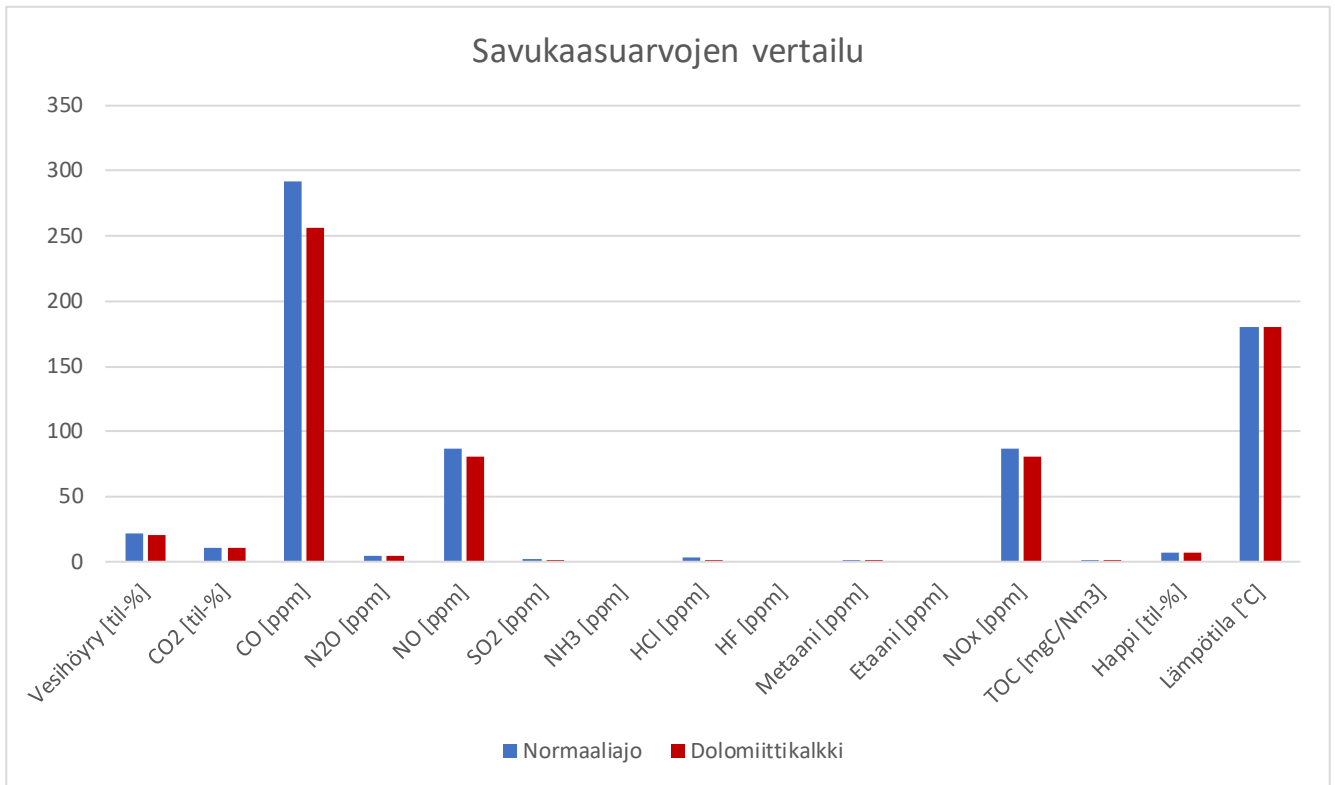




KUVIO 13. Trendikäyrät neljännessä koeajossa

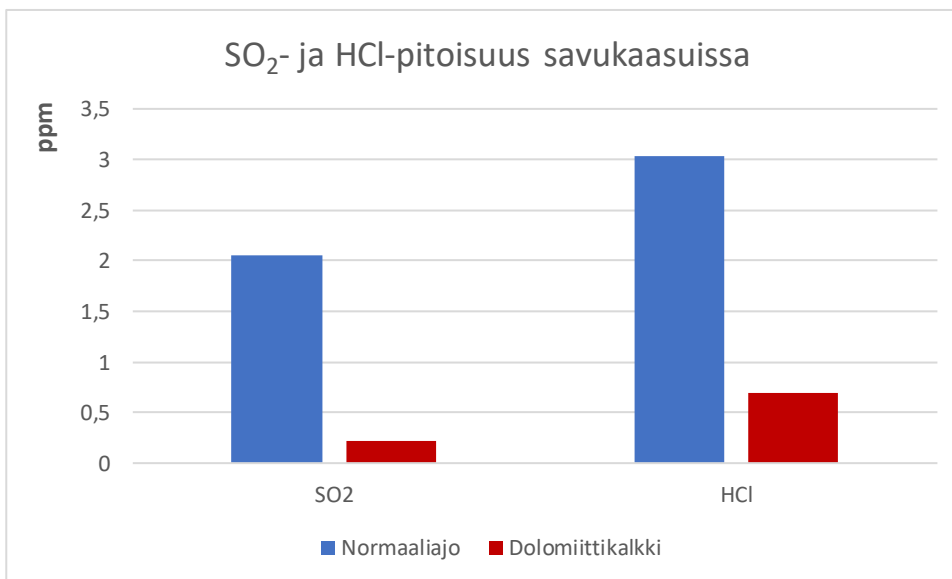
Kuvassa petinlämpötiloja kuvaavat ylimmät violetti, vihreä ja musta käyrä. Koeajo aloitettiin 10:30 ja koeajo päättyi 16:00.

Koeajon aikana Gasmät-analysaattori keräsi dataa savukaasuissa tapahtuvista muutoksista, josta laadittiin kuvaajat normaali- ja dolomiittiajolla (KUVIO 14).



KUVIO 14. Savukaasuarvojen vertailu metsätähdehakeella (dolomiittia syötetty 5 x 30 kg)

Koeajon aikana savukaasujen vertailussa ei havaittu merkittäviä muutoksia. SO<sub>2</sub>:n ja HCl:n pitoisuuksien savukaasuissa ollessa alhaisia jo normaaliajolla laadittiin kuvaaja erikseen näiden pitoisuuksien muutoksista (KUVIO 15).

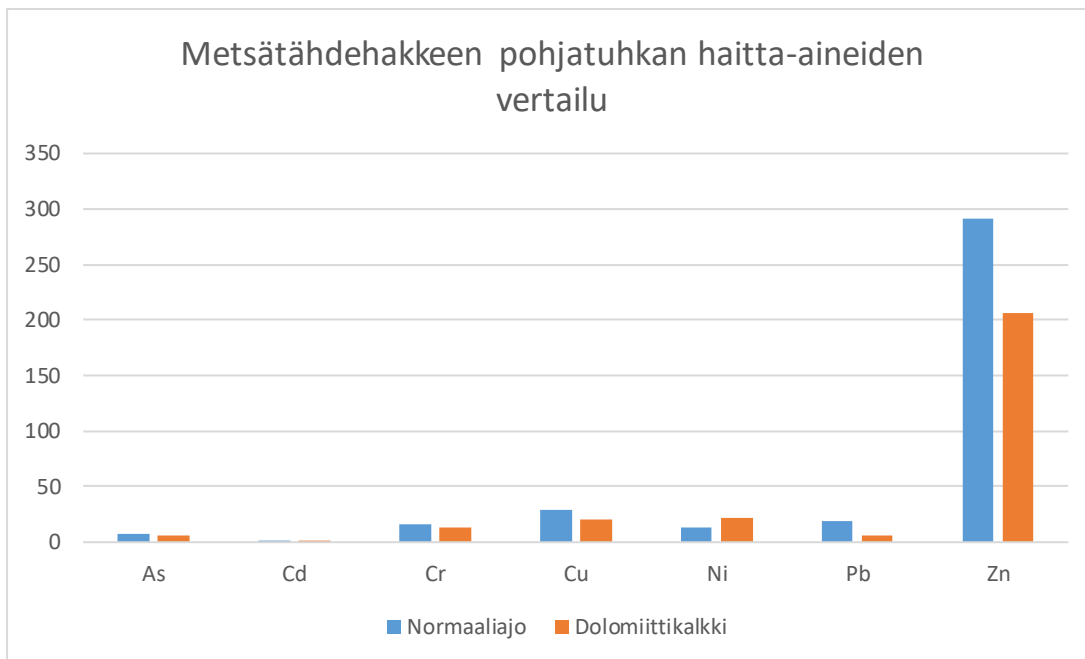


KUVIO 15. SO<sub>2</sub>- ja HCl-pitoisuus savukaasuissa



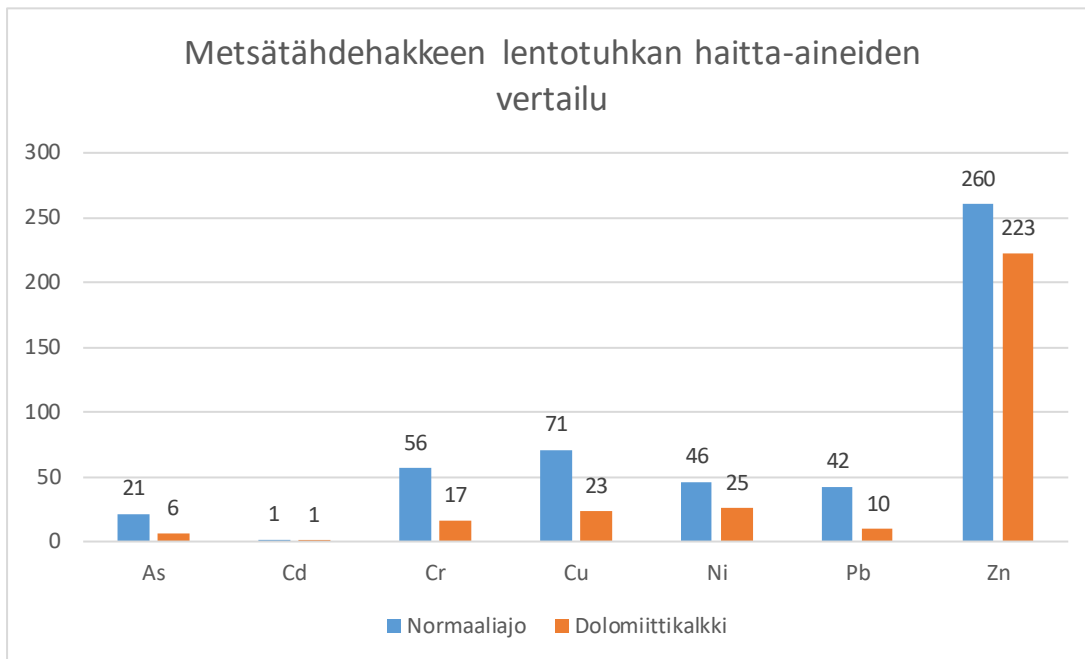
Kuvasta nähdään rikkidioksidin ja kloorin sitoutuvan hyvin dolomiittiin, mikä todennettiin jo aikaisemmillä koeajoilla. Nyt sama voitiin todeta myös metsätähdehakkeella.

Tuhkanäytteet vietiin viime koeajojen tapaan laboratorioon analysoitavaksi, ja kuviosta 16 ja 17 nähdään metsätähdehakkeen pohja- ja lentotuhkan haitta-aineiden vertailu normaali- ja dolomiittiajolla.



KUVIO 16. Metsätähdehakkeen pohjatuhkan haitta-aineiden vertailu (Dolomiittia syötetty 5 x 30 kg)

Yllä olevasta kuvasta nähdään, että pohjatuhka koostuu suurimmalta osiltaan petimateriaalista eli kvartsihiekkasta. Haitta-ainepitoisuudet ovat normaaliajolla pienet, eivätkä muutu merkittävästi dolomiittiajolla.



KUVIO 17. Metsätähdehakkeen lentotuhkan haitta-aineiden vertailu (Dolomiittia syötetty 5 x 30 kg)

Lentotuhkan haitta-aineiden vertailussa nähdään korkeammat haitta-ainepitoisuudet normaaliajolla ja niiden pienentyminen dolomiitin lisäämisen vaikutuksesta. Tosin yksikään haitta-ainepitoisuus ei ylitä Eviran laatimaa raja-arvoa, mutta on hyvä muistaa, että metsätähdehakkeen laatu vaihtelee. Tarkemmat pohja- ja lentotuhkan analyysitulokset ovat nähtävissä liitteessä 5.

## 8 TEKNISTALOUDELLINEN SELVITYS

Osa insinööriyötä oli tehdä teknistaloudellinen selvitys dolomiitin annostelun kannattavuudesta. Taloudelliseen selvitykseen kuuluu dolomiitin hinta kuljetuksineen ja mahdollinen investointi annostelulaitteistoon.

Voimalaitoksilla voi olla käytössään jonkinlainen syöttöruuvi, josta dolomiittia voitaisiin syöttää. Myös kalkin annostelu leijupetiprosessiin on voitu joissakin laitoksissa toteuttaa, joten dolomiitin syöttö voisi onnistua samaa kanavaa pitkin. Täytyy kuitenkin tiedostaa, että dolomiitti on hiekkamaista materiaalia, jolloin sen syöttöön käytettävällä kuljettimella tulee olla riittävät ominaisuudet. Koeajojen aikana dolomiittia yritettiin syöttää pelletinsyöttöön tarkoitetulla ruuvikuljettimella, mutta syöttö ei onnistunut dolomiitin ollessa liian raskasta. Putkityyppinen ruuvikuljetin oli suunniteltu viljan ja pelletin siirtoon, ei hiekkamaisen materiaalin siirtoon.

Pohdinnan jälkeen tultiin siihen tulokseen, että toimivin ratkaisu syöttöön olisi avoruuvikuljetin. Avoruuvikuljettimella siirron tukkeutuminen olisi epätodennäköisempää, se on vähän tilaa vievä ja laitteistoon investointi ei olisi merkittävä. Avoruuvikuljettimen materiaali, moottori ja muut osat tulisi suunnitella hiekkamaisen materiaalin siirtoon.

Dolomiitin syöttö onnistuisi myös vastaavalla tavalla kuin petimateriaalin eli hiekan syöttö on toteutettu. Petimateriaalin syöttö on toteutettu kattilan yläpuolella olevalla hiekkasiilolla, josta hiekka kulkeutuu omaa syöttöputkea pitkin petiin. Hiekkasiilo täytetään puhaltamalla hiekka säiliöautosta riittävällä paineella täyttöputkea pitkin. Tällainen ratkaisu dolomiitin siirtoon vaatisi kuitenkin avoruuvikuljetinta suuremmat investoinnit, ja lisäksi sen rakentaminen jälkikäteen voi olla hankalaa.

Investointitarkastelussa hintatiedot on saatu suoraan yrityksiltä joko puhelimitse tai sähköpostitse. Hintatietoja pyytäessä luvattiin, että tarjoukset eivät pääse julkiseen tietoon. Tarjouksen antaneiden yritysten nimiä ei mainita työssä.

## 8.1 Investointi annostelujärjestelmään

Eri yrityksiltä pyydettiin tarjouksia avoruuvikuljettimesta dolomiitin siirtoon. Erään yrityksen tarjous avoruuvikuljettimesta oli 11 600 €. Tavallista ruuvikuljetinta korkeampaan hintaan vaikutti se, että tällaiseen siirtoon tarkoitettuja kuljettimia valmistetaan harvemmin, ja lisäksi kuljettimella täytyi olla riittävät ominaisuudet hiekkamaisen materiaalin siirtoon.

Jos kyseinen laitteisto tarvitsisi investoida, olisi investointi hyvä jakaa pitoajalle, eli investointikustannus voidaan laskea annuiteettimenetelmällä. Annuiteettimenetelmässä investointikustannus jaetaan pitoajalle vuosikustannuksiksi. Hiekkamainen materiaali voi kuluttaa liikkuvia osia, joten perustilanteessa laitteiston pitoaikana on käytetty 10 vuotta. Korkoprosenttina on yleisesti kustannusarvioissa käytetty 5 prosenttia. Annuiteettitekijä voidaan tällöin laskea alla olevasta kaavasta:

$$c = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (3)$$

jossa  $c$  on annuiteettitekijä,  $i$  on korko desimaalilukuna ja  $n$  on maksuerien lukumäärä.

$$\text{Tällöin annuiteettikertoimeksi saadaan: } c = \frac{(1+0,05)^{10} \cdot 0,05}{(1+0,05)^{10} - 1} = 0,1295$$

Tällöin vuosittainen poisto on  $11\,600 \text{ €} \cdot 0,1295 = 1502,2 \text{ €}$ . Tästä saadaan tasoitettu tuotantokustannus kattilateholla ja käyttötuntien määrällä:

$$\frac{V_p}{(t \cdot K_p)} \quad (4)$$

jossa  $V_p$  on vuosittainen poisto,  $t$  on käyttötuntien määrä ja  $K_p$  on kattilateho. Tasoitettu tuotantokustannus laskettiin 3 MW:n kattilateholla ja käyttötunneilla 1000-8000 h.

$$\text{Esim. Käyttötunnit } 1000 \text{ h: } \frac{1502,2 \text{ €}}{(1000 \text{ h} \cdot 3 \text{ MW})} = 0,5007 \text{ €/MWh}$$

Vertailun vuoksi tasoitettua tuotantokustannusta arvioitiin eri pitoajoilla. Pitoaikoina käytettiin 5, 10, 15 ja 20 vuotta ja jokaiselle pitoajalle laskettiin annuiteettitekijä. Laskuissa korkoprosenttina käytettiin 5 %.

Annuiteettitekijä, kun pitoaika 5 vuotta:

$$c = \frac{(1+0,05)^5 * 0,05}{(1+0,05)^5 - 1} = 0,2309$$

Vuosittainen poisto:  $0,2309 * 11\,600 \text{ €} = 2678,44 \text{ €}$

$$\text{Tasoitettu tuotantokustannus: } \frac{2678,44 \text{ €}}{(1000 \text{ h} * 3 \text{ MW})} = 0,8928 \text{ €/MWh}$$

Annuiteettitekijä, kun pitoaika 15 vuotta:

$$c = \frac{(1+0,05)^{15} * 0,05}{(1+0,05)^{15} - 1} = 0,0963$$

Vuosittainen poisto:  $0,0963 * 11\,600 \text{ €} = 1117,08 \text{ €}$

$$\text{Tasoitettu tuotantokustannus: } \frac{1117,08 \text{ €}}{(1000 \text{ h} * 3 \text{ MW})} = 0,3723 \text{ €/MWh}$$

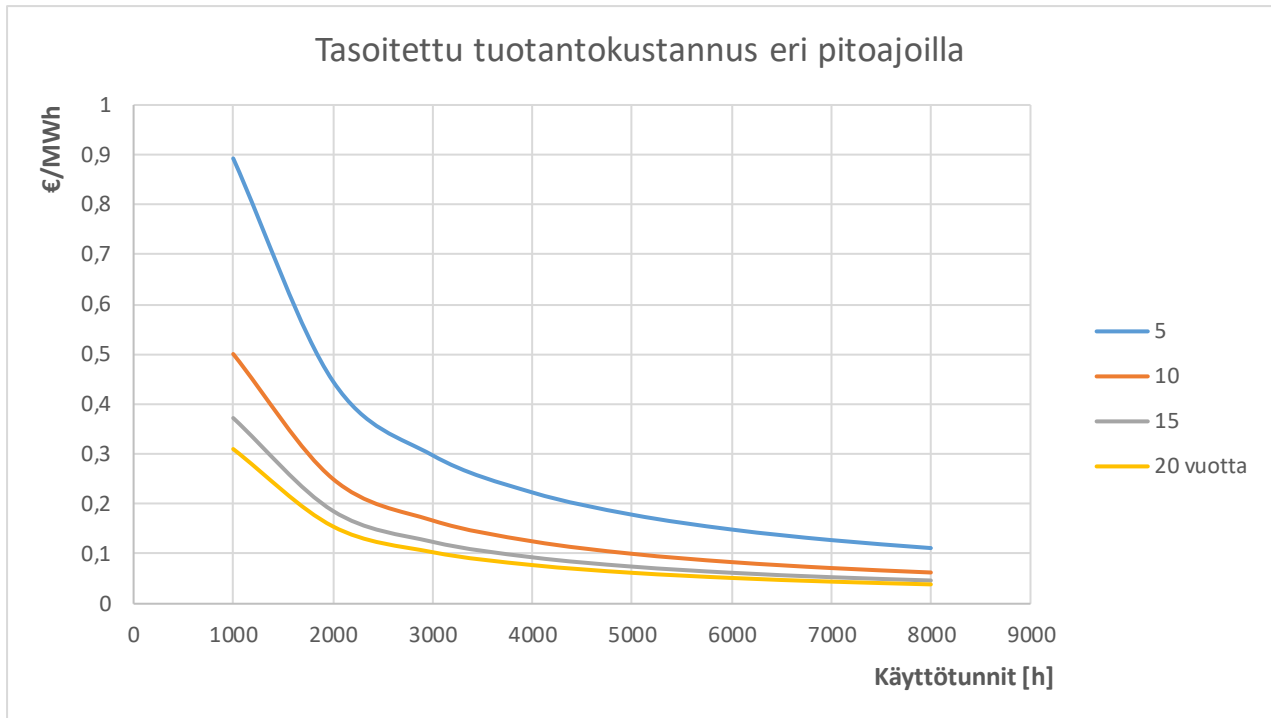
Annuiteettitekijä, kun pitoaika 20 vuotta:

$$c = \frac{(1+0,05)^{20} * 0,05}{(1+0,05)^{20} - 1} = 0,0802$$

Vuosittainen poisto:  $0,0802 * 11\,600 \text{ €} = 930,32 \text{ €}$

$$\text{Tasoitettu tuotantokustannus: } \frac{930,32 \text{ €}}{(1000 \text{ h} * 3 \text{ MW})} = 0,3101 \text{ €/MWh}$$

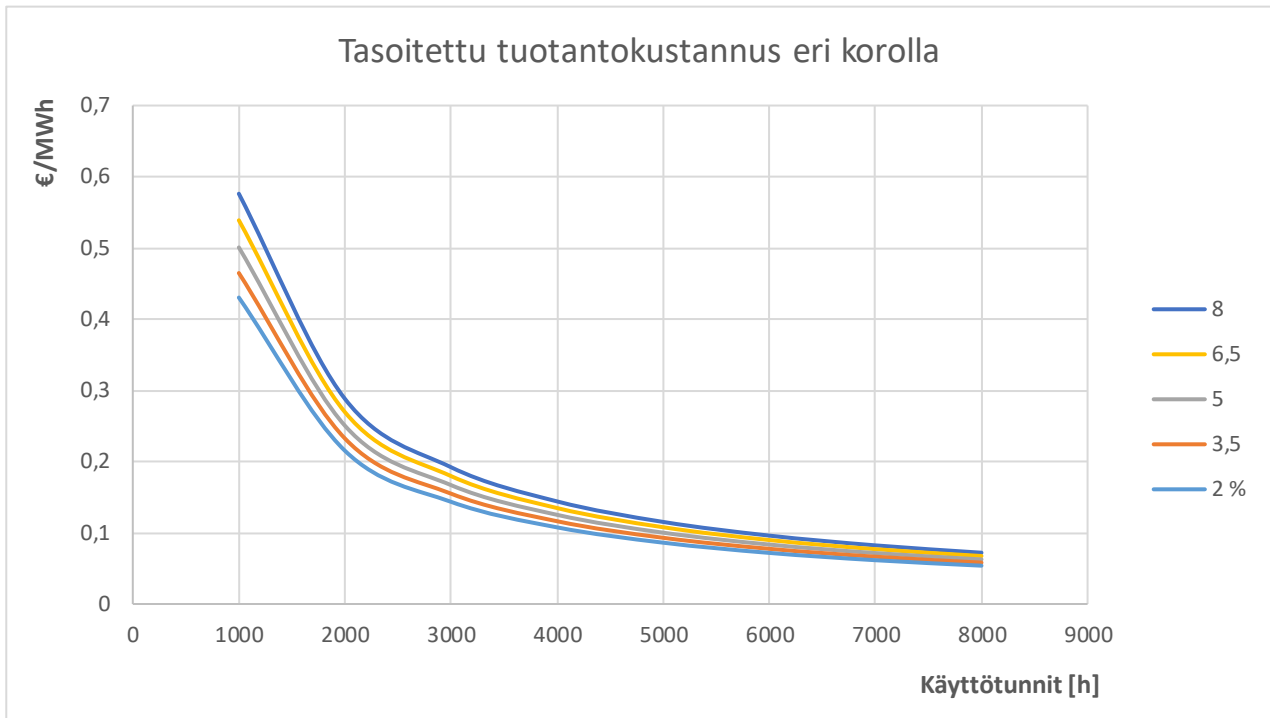
Seuraavalla sivulla olevassa kuvaajassa (KUVIO 18) havaitaan eri pitoajan vaikutus tasoitettuun tuotantokustannukseen.



KUVIO 18. Tasoitettu tuotantokustannus eri pitoajoilla

Mitä enemmän laitoksella on käyttötunteja, sen pienemmäksi investointi muuttuu per energiayksikkö. 15 ja 20 vuoden pitoaikojen erot tasoitetussa tuotantokustannuksessa ovat pienet, varsinkin jos käyttötunteja tulee paljon.

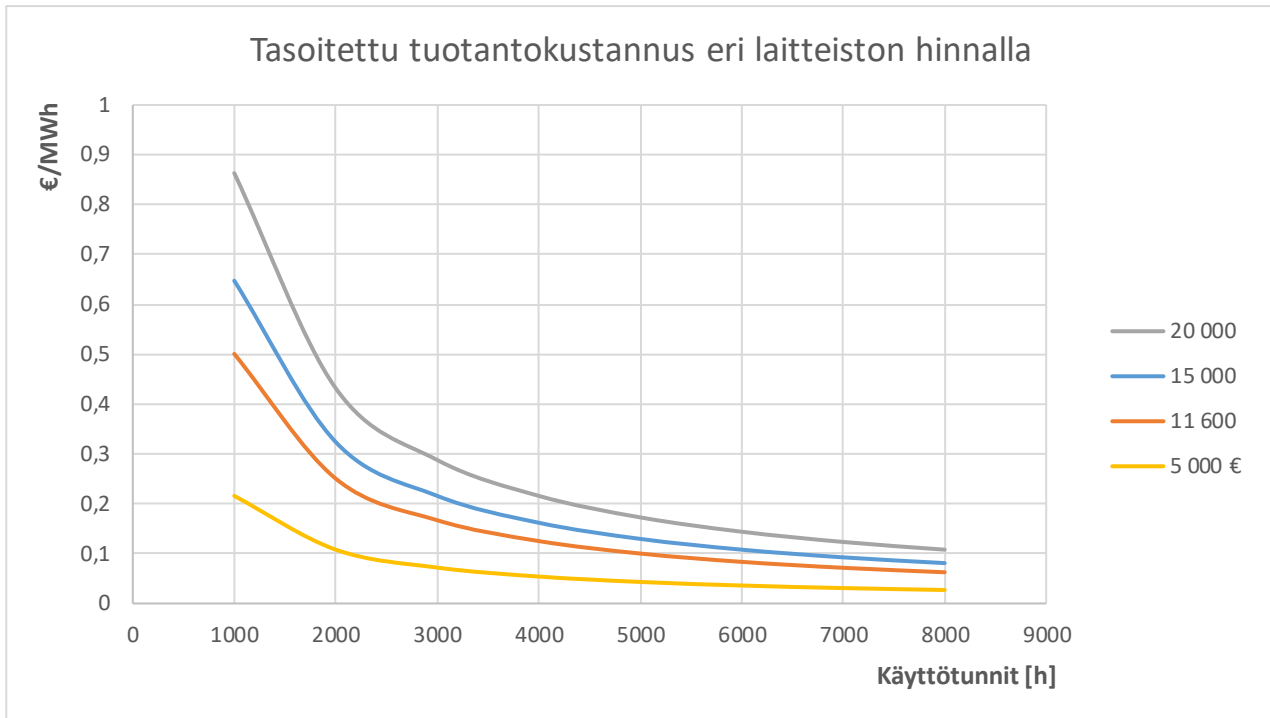
Investointikustannusta tutkittiin myös eri korkoprosentilla. Korkoprosenttia korotettiin 5 %:sta 30 %:a ja 60 %:a, jolloin vertailuksi saatiin 6,5 ja 8 prosenttia. Korkoprosenttia myös laskettiin 5 %:sta 30 %:a ja 60 %:a, mistä saatiin vertailuun vielä 2 ja 3,5 prosenttia. Seuraavan sivun kuvaajasta (KUVIO 19) nähdään eri koron vaikutus investointiin. Laitteiston hintana käytettiin 11 600 € ja pitoaikana 10 vuotta.



KUVIO 19. Tasoitettu tuotantokustannus eri korkoprosentilla

Kuvaajasta nähdään, että eri korkoprosentti ei merkittävästi laske eikä nosta tasoitettua tuotantokustannusta. Tasoitettu tuotantokustannus vaihtelee merkittävästi käyttötuntien mukaan.

Tasoitettua tuotantokustannusta tutkittiin myös eri laitteiston hinnalla (KUVIO 20). Alkuperäinen hinta 11 600 € perustui vain yhteen tarjoukseen, joten hintojen vaikutusta tuotantokustannukseen tutkittiin 5000, 11 600, 15 000 ja 20 000 euron hinnalla. Pitoaikana pidettiin 10 vuotta ja korkoprosenttina 5 %. Tällöin annuiteettitekijä oli 0,1295, ja kuvaaja muodostettiin laskemalla kustannus eri käyttötunneilla vastaavasti kuin edellisessä kohdassa.



KUVIO 20. Tasoitettu tuotantokustannus eri laitteiston hinnalla

Kuvaajasta nähdään tasoitettujen tuotantokustannusten olevan luonnollisesti pienempi pienemmällä laitteiston hinnalla. Jo 5000 käyttötuntimäärällä investointi 11 600 €:n laitteistoon laskee tasoitettujen tuotantokustannusten alle 0,1 €/MWh.

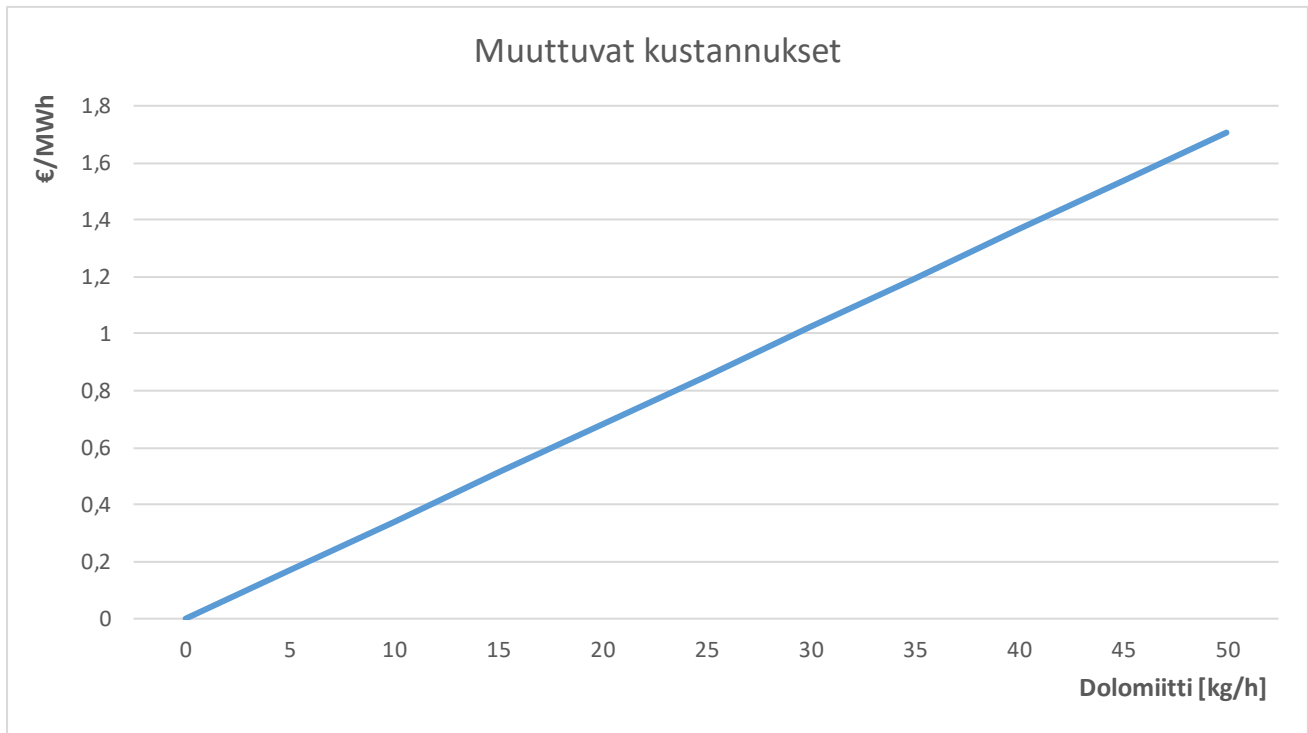
## 8.2 Dolomiitista aiheutuvat kustannukset

Laskettaessa dolomiitin käytön kustannuksia perustilanteessa määriteltiin dolomiitin hinnaksi 115 €/tonni, mikä kattaa kuljetusauton täytön, kuljetuksen paikan päälle ja kuorman tyhjennyksen. Hinta on suuntaa antava, sillä kuljetuksesta muodostuvaa hintaa on hankala arvioida. Esimerkiksi suuremmalle markkina-alueelle (Etelä-Suomi) ja lähietäisyydelle kuljettaessa hinta voi muodostua edullisemmaksi. Kauemmaksi ja pienemmälle markkina-alueelle kuljetuksen hinta muodostuu taas kalliimmaksi.

Dolomiittiyrietykset arvioivat kuljetuksen muodostavan kokonaishinnasta noin neljänneksen, jolloin dolomiitin hinta ilman kuljetusta on n. 70-90 €/tonni. Dolomiittia kuljetetaan puoliperävaunuyhdistelmällä, johon mahtuu n. 40-50 tonnia dolomiittia. Tällöin täyden dolomiittikuljetuksen hinta on n. 40-50 tonnia \* 115 €/tonni = 4600 €-5750 €. Nämä hinta-arviot perustuvat dolomiittiyrietyksien tiedusteluihin.



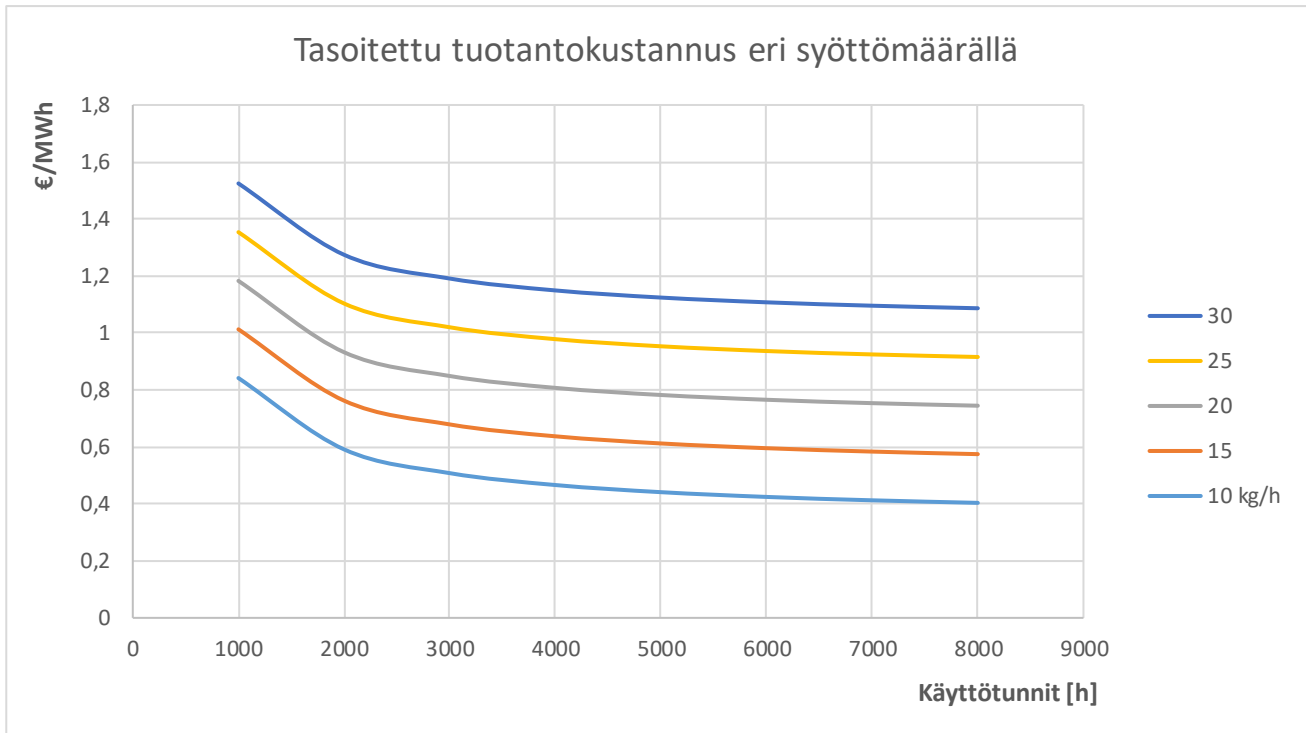
Dolomiitista aiheutuvaan kustannukseen vaikuttaa luonnollisesti sen kulutus. Kuviosta 21 nähdään, että syöttömäärä on suoraan verrannollinen siitä aiheutuvaan lisäkustannukseen. Kuvassa on huomioitu vain dolomiitista aiheutuva kustannus ja dolomiitin hintana on käytetty 0,115 €/kg.



KUVIO 21. Muuttuvat kustannukset

Koska koeajot olivat vain päivän mittaisia, dolomiitin tarvittavaa syöttömäärää on hankala arvioida. Päivän mittaisissa koeajoissa hyötyjä saatiin syötön ollessa  $> 30$  kg/h, jolloin muuttuva kustannus olisi n. 1 €/MWh. Todennäköisesti pidempiaikaisella mittausjaksolla hyötyjä saavutetaan vähäisemmällä syötön määrällä, jolloin muuttuva kustannus on alhaisempi.

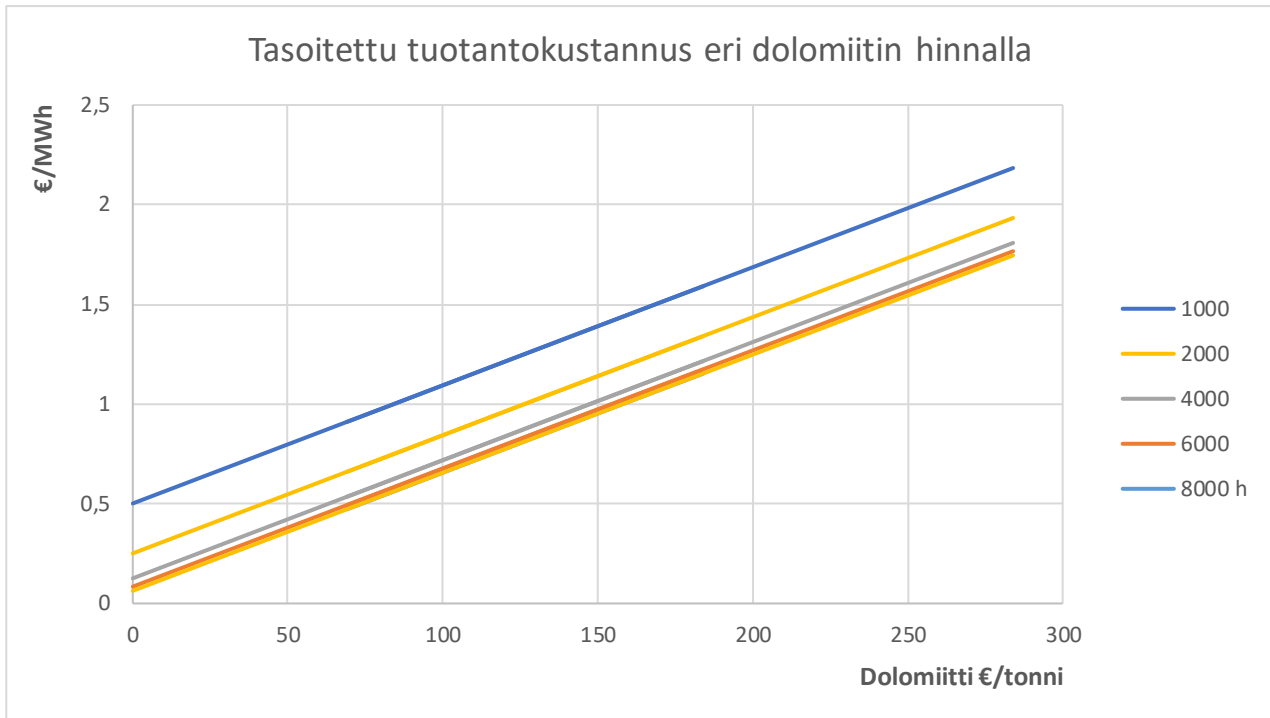
Kuviossa 22 on vertailtu dolomiitin syötöstä aiheutuvaa kustannusta eri syötön määrällä. Jotta muuttuvaa kustannusta pystyttiin vertailemaan käyttötuntien mukaan, kustannuksessa on mukana investointi 11 600 €:n laitteistoon 10 vuoden pitoajalla ja 5 %:n korolla. Kuvaajasta nähdään lisäkustannuksen vähenen käyttötuntien kasvaessa.



KUVIO 22. Tasoitettu tuotantokustannus eri syöttömäärällä

Leijupetikattilan käyttötuntien määrän ollessa 3000 h ja syöttö 30 kg/h, on kustannus investointeineen 1,2 €/MWh. Niin kuin aiemmin todettiin, todennäköisesti syötön määrä voidaan pitää alhaisempana, mikä laskee tasoitettua tuotantokustannusta.

Tasoitettua tuotantokustannusta arvioitiin myös eri dolomiitin hinnalla (KUVIO 23). Kuvaajassa on mukana investointi 11 600 €:n laitteistoon 10 vuoden pitoajalla ja 5 %:n korkoprosentilla.



KUVIO 23. Tasoitettu tuotantokustannus eri dolomiitin hinnalla

Käyttötuntien kasvaessa, tasoitettu tuotantokustannus laskee. Toisaalta kuvaaja muistuttaa myös siitä, että käyttötuntien jäädessä alhaisiksi, on dolomiitin syötöstä aiheutuva tasoitettu tuotantokustannus suurempi. Kuvaajan suorita 8000 h ja 4000 h on vaikea erottaa toisistaan, kun taas käyttötuntien puolitus 2000 tunnista 1000 tuntiin aiheuttaa tasoitettun tuotantokustannussuoran merkittävän siirtymisen ylöspäin kuvaajassa.

Edellä olevista taulukoista nähdään, että laitoksen käyttötunneilla on suuri merkitys dolomiitin annostelusta aiheutuviin muuttuviin tai tasoitettuihin tuotantokustannuksiin. Tyypillisesti käyttötuntien ollessa yli 4000 h, kustannus ei enää merkittävästi laske.

## 9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Koeajot osoittivat rikin ja kloorin sitoutuvan hyvin dolomiittiin. Varsinkin koeajot, jotka tehtiin turpeella, savukaasujen rikki- ja klooriyhdisteiden lasku oli selvästi todennettavissa. Turpeen tuhkanäytteissä havaittiin myös haitta-ainepitoisuuksien laskevan raja-arvojen alapuolelle, jolloin tuhka olisi käytökelpoista myös peltotuhkalannoitteena.

Turvetuhka ei tosin ole lannoitteena niin arvokasta kuin puutuhka, sillä turvetuhka sisältää vähemmän kasvillisuudelle tärkeitä ravinneaineita. Tästä johtuen on hankala arvioida, saadaanko turvetuhkan hyödyntämisestä lannoitteena taloudellisesti kannattavaa. Taloudellisessa selvityksessä osoitettiin, että dolomiitin syöttö ja mahdollinen investointi syöttölaitteistoon aiheuttavat tässä työssä esitettyjen arviointien perusteella 0,1...2,2 €/MWh. Tosin koeajolaitos hyödyntää turvetuhkaa metsälannoitteena, joten dolomiitin syötöllä voidaan varmistaa sen kelpaavuus metsälannoitteeksi. Lisäksi turpeen poltossa korkeat rikki- ja klooripitoisuudet laskivat, joten dolomiittia voidaan käyttää kattilaosien korroosion ennaltaehkäisyssä. Ensimmäisessä koeajossa turpeella myös todettiin, että laimennuslipeää ei tarvinnut syöttää savukaasujen pH:n alentamiseen. Tällöin kuitenkin dolomiitin syöttö oli suurta, kun pedistä puolet korvattiin dolomiitilla.

Kokopuuhakkeella selviä eroja ei saatu näkyviin jo alhaisen haitta-ainepitoisuuden vuoksi. Kokopuuhake oli laadultaan hyvin ”puhdasta”, jolloin sen poltossa muodostuvan tuhkan haitta-ainepitoisuudet olivat jo normaaliajolla alle raja-arvojen. Dolomiitin syötöllä haitta-ainepitoisuudet tuhkassa laskivat kuitenkin entisestään.

Metsätähdehakkeella tehdyssä koeajossa pystyttiin todentamaan sama kuin muillakin koeajoilla, eli rikin ja kloorin sitoutuminen dolomiittiin. Metsätähdehake sisältää paljon neulasia ja muuta tähdettä, joten sillä oli hieman kokopuuhaketta korkeampi rikki- ja klooripitoisuus savukaasuissa. Dolomiitin syötöllä pitoisuudet laskivat yli neljänneksen. Tuhka-analyysissä haitta-ainepitoisuudet olivat alhaiset, mutta dolomiitin vaikutus tuhkanäytteisiin oli selvästi todennettavissa. Ja on muistettava, että myös metsätähdehakkeen laatu vaihtelee.

Yksi havainto koeajoissa oli dolomiitin nopea poistuminen pohjatuhkana, jonka vuoksi sen kulutuskin oli suurta. Tästä johtuen dolomiittikoeajot olisi mielenkiintoista suorittaa kiertopetikattilassa. Kiertopetikattilassa sykloni palauttaisi suuren osan dolomiitista takaisin kattilaan. Tällöin dolomiitinsyötössä riittäisi vähäisempi dolomiitin kulutus.

Dolomiitin syötön kustannusten merkitystä voi arvioida vasta, kun on arvio niistä taloudellisista eduista, joita sen syötöstä voisi olla. Tässä työssä keskityttiin arvioimaan dolomiitin syötön tasoitettua tuotantokustannusta. Dolomiitin syötön taloudellinen arvo jää tulevan tutkimuksen kohteeksi. Dolomiitin syötön tasoitetun tuotantokustannusten kannalta olennaista on tietää tuhkaa tuottavan lämpölaitoksen tai muun laitoksen käyttötunnit, sekä kuljetusetäisyys. Tasoitettu tuotantokustannus oli herkkä myös mahdollisen laiteinvestoinnin ja dolomiitin hinnan muutoksille.

Työssä dolomiittikoeajot olivat vain yhden päivän mittaisia, johtuen automaatiolaitteiston puutteesta. Toimivaa automaatiolaitteistoa ei ollut, eikä henkilöstöä enää työpäivän jälkeen, jotka olisivat huolehtineet dolomiitinsyötöstä. Seuraava askel tutkimuksessa olisi pidempiaikainen koeajo, jolloin tarvittava dolomiitin määrä olisi määritettävissä. Näin dolomiitin annostelusta aiheutuvia kustannuksia pystyttäisiin pohtimaan tarkemmin.

## LÄHTEET

- Aaltonen, A. 2014. Korroosiotutkimussondin kehittäminen. Metropolia Ammattikorkeakoulu, energia- ja ympäristötekniikka. Insinööriyö. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/81310/Korroosiotutkimussondin%20kehittaminen.pdf?sequence=1>. Viitattu 26.4.2018.
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita. Espoo: Otamedia Oy. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>. Viitattu 26.4.2018.
- Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n julkaisu. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>. Viitattu 26.4.2018.
- Anttila, P. & Rönkkönen, M. 2017. Voimalaitoksen polttoaineen syötön optimointi. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, sähkövoimatekniikka. Opinnäytetyö. Saatavissa: [http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/133337/Anttila\\_Petri%20Ronkkonen\\_Mika.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/133337/Anttila_Petri%20Ronkkonen_Mika.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Viitattu 26.4.2018.
- Energiamailma. 2018. Turve. Saatavissa: <http://energiamaailma.fi/mista-virtaa/turve/>. Viitattu 26.4.2018.
- Evira. 2017. Haitalliset aineet lannoitevalmisteissa. Saatavissa: <https://www.evira.fi/kasvit/viljely-ja-tuotanto/lannoitevalmisteet/valmistus-ja-markkinoille-saattaminen/haitalliset-aineet/>. Viitattu 26.4.2018.
- Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5., uudistettu painos. Helsinki: Oy Edita Ab.
- Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2011. Voimalaitostekniikka. 1-1. painos. Tampere: Opetushallitus.
- Huotari, N. 2012. Tuhkan käyttö metsälannoitteena. Vammala: Vammalan kirjapaino Oy. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/isbn/978-951-40-2371-2/tuhkan-kaytto-metsalannoitteena.pdf>. Viitattu 26.4.2018.
- Iisa, K., Yrjas, P. & Kilpinen, P. 2002. Rikin oksidien muodostuminen ja poistaminen. Teoksessa R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa, & I. Kurki-Suonio (toim.) Poltto ja palaminen. 2. täydennetty painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Ilmansuojeluyhdistys ry & VTT. 2004. Päästömittausten käsikirja osa 3. Laitetoimittajien näkemys päästömittalaitteiden laadunvarmistuksesta, 14-18. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download/name/%7BD3D11083-3950-429F-A6AF-8BD275964E26%7D/74203>. Viitattu 26.4.2018.
- Isännäinen, S., Rinne, S., Järvelä, E. & Lindh, T. 2006. Tuhkan käyttö metsälannoitevalmisteena. Saatavissa: [https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/pictures/tuhka\\_metsalannoitteena\\_vtt.pdf](https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/pictures/tuhka_metsalannoitteena_vtt.pdf). Viitattu 26.4.2018.

- Jutila, T. 2012. Tuhkan rakeistaminen Pohjois-Pohjanmaalla. Oulu: Ramboll. Saatavissa: [http://www.metla.fi/hanke/7464/pdf/Tuhkan-rakeistaminen-P-Pohjanmaalla-15082012\\_Valmis.pdf](http://www.metla.fi/hanke/7464/pdf/Tuhkan-rakeistaminen-P-Pohjanmaalla-15082012_Valmis.pdf). Viitattu 26.4.2018.
- Kilpinen, P. 2002. Typen oksidien muodostuminen ja hajoaminen. Teoksessa R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa, & I. Kurki-Suonio (toim.) Poltto ja palaminen. 2. täydennetty painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Kuuppo, M. 2016. Leijukerroskattila K3:n minimikuorma. Ilmajako ja kiertokaasun käytön vaikutukset NO<sub>x</sub>-päästöihin. Oulun ammattikorkeakoulu, energiatekniikka. Opinnäytetyö. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/105512/Kuuppo\\_Mika.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/105512/Kuuppo_Mika.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Viitattu 26.4.2018.
- Kunnossapitoyhdistys ry. 2006. Korroosiokäsikirja. 3. uudistettu painos. Helsinki: KP-Media Oy.
- Laine-Ylijoki, J., Wahlström, M., Peltola, K., Pihlajaniemi, M. & Mäkelä, E. 2002. Seospolton tuhkien koostumus ja ympäristölaadunvarmistusjärjestelmä. Espoo: VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2141.pdf>. Viitattu 26.4.2018.
- Muilu, Y. 2018. Henkilökohtainen tiedonanto, keskustelu. 22.1.2018.
- Nikula, M. 2016. Päästömittaus Gasmet FTIR kaasuanalysaattorilla. Centria-ammattikorkeakoulu, sähkötekniikka. Opinnäytetyö. Saatavissa: [http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/120395/Nikula\\_Miia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/120395/Nikula_Miia.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Viitattu 26.4.2018.
- Pekkala, S. 2012. Puun ja turpeen seospolton vaikutus tuhkan hyötykäyttökohteisiin. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, ympäristötekniikka. Diplomityö. Saatavissa: [http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/78720/20120522\\_Diplomity%C3%B6%202012%20Satu%20Pekkala.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/78720/20120522_Diplomity%C3%B6%202012%20Satu%20Pekkala.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Viitattu 26.4.2018.
- Pieniniemi, K. 2018. Gasmet-analysaattorin käyttöohje.
- Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. täydennetty painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Ruotanen, K. 2018. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköpostikeskustelu. 7.2.2018.
- Salhoja, P. 2017. NO<sub>x</sub>-päästöjen vähennystekniikat Suomen biovoimalaitoksissa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energiatekniikka. Kandinaatintyö. Saatavissa: [https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/147804/Salhoja\\_Pinja\\_NOx-p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6jen%20v%C3%A4hennys.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/147804/Salhoja_Pinja_NOx-p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6jen%20v%C3%A4hennys.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Viitattu 26.4.2018.
- Skrifvars, B-J. & Hupa, M. 2002. Tuhka, kuonaantuminen, likaantuminen ja korroosio. Teoksessa R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa, & I. Kurki-Suonio (toim.) Poltto ja palaminen. 2. täydennetty painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Sma Mineral. 2018. Dolomiitti. Saatavissa: <http://smamaterial.se/fi/product/dolomiitti/>. Viitattu 26.4.2018.

Suomen virallinen tilasto (SVT). 2018. Energian hankinta ja kulutus. 4. Vuosineljännes 2017, Liitekuvio 7. Polttoaineiden osuus energian kokonaiskulutuksesta 2016 ja 2017. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/ehk/2017/04/ehk\\_2017\\_04\\_2018-03-28\\_kuv\\_007\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehk/2017/04/ehk_2017_04_2018-03-28_kuv_007_fi.html). Viitattu 26.4.2018.

Suopajarvi, H., Iljana, M. & Haapakangas, J. 2013. Biomateriapohjaisten ja vaihtoehtoisten raaka-ainneiden ja tuotteiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. Oulu: Oulun Yliopisto. Saatavissa: [http://www oulu.fi/sites/default/files/content/WP2%201-Fysikaaliset%20ja%20kemialliset%20ominaisuudet\\_net.pdf](http://www oulu.fi/sites/default/files/content/WP2%201-Fysikaaliset%20ja%20kemialliset%20ominaisuudet_net.pdf). Viitattu 26.4.2018.

Thermo Nicolet. 2001. Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry. Saatavissa: [https://niu.edu/chembio/research/analytical-lab/\\_pdf/ftir/FTIR-intro.pdf](https://niu.edu/chembio/research/analytical-lab/_pdf/ftir/FTIR-intro.pdf). Viitattu 26.1.2018.

Turunen, M. 2018. Dolomiitin ominaisuudet. Saatavissa: <http://www.geologia.fi/index.php/2011-12-21-12-30-30/2011-12-21-12-40-07/mineraalit-a-oe/109-dolomiitti>. Viitattu 8.3.2018.

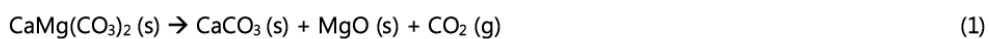


Tero Luukkonen  
Kajaanin Ammattikorkeakoulu Oy

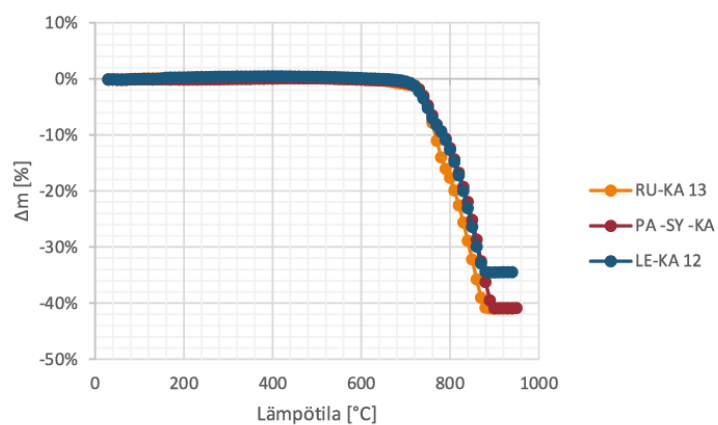
22.1.2014

## 4 TGA-TULOKSET

Termogravimetrisessä analyysissä (TGA, Linseis STA-PT-1000) noin 100 mg näyte-erä kuumennettiin 950 °C lämpötilaan 10 °C/min nopeudella. Kuvassa 5 on esitetty näytteiden suhteellinen massan muutos (%) lämpötilan funktiona. Noin 700 °C lämpötilassa näytteiden massa alkaa pudota ja alenee noin 40 % (näytteet RU-KA 13 ja PA-SY-KA) tai noin 35 % (näyte LE-KA 12). Dolomiitin hajoaminen voidaan esittää seuraavien reaktioyhtälöiden mukaan:



Kirjallisuuden (Sasaki, Qiu et al. 2013) mukaan reaktioyhtälön 1 mukainen hajoaminen tapahtuu välillä 600 – 700 °C ja reaktioyhtälön 2 mukainen hajoaminen välillä 700 – 900 °C. Täydellinen kalsinointi saadaan aikaan siis 900 °C:ssa.



Kuva 3. TGA-analyysien tulokset.

**Dolomiitin alkuaineanalyysi ja ensimmäisen koeajon tuhka-analyysitulokset.****(Polttoaineena turve.)**

Dolomiitti		
alkuaine	mg/kg	%
Al	14038,6	1,40
As		
Ba	1055,1	0,11
Be		
Bi	16,1	0,00
Ca	77874,4	7,79
Cd	0,8	0,00
Co	14,8	0,00
Cr	53,3	0,01
Cu	102,8	0,01
Fe	12674,7	1,27
Ga	34,6	0,00
K	4927,5	0,49
Li	16,1	0,00
Mg	24053,1	2,41
Mn	1373,6	0,14
Mo	16,1	0,00
Na	2438,0	0,24
Ni	70,4	0,01
Pb	9,3	0,00
Rb	19,6	0,00
Sb	80,5	0,01
Se	80,5	0,01
Sn	16,1	0,00
Sr	92,4	0,01
V	58,2	0,01
Zn	127,1	0,01
Si	40309,2	13,93

Pohja- ja lentotuhka 22.1. klo. 11:00. Nollanäyte.		
alkuaine	mg/kg	%
Al	72755,9	7,28
As	70,8	0,01
Ba	1579,5	0,16
Be	19,7	0,00
Bi	0,0	0,00
Ca	46082,7	4,61
Cd	3,6	0,00
Co	29,7	0,00
Cr	73,6	0,01
Cu	136,6	0,01
Fe	126496,1	12,65
Ga	61,4	0,01
K	9100,4	0,91
Li	19,7	0,00
Mg	10364,2	1,04
Mn	2287,4	0,23
Mo	19,7	0,00
Na	5759,8	0,58
Ni	51,9	0,01
Pb	177,4	0,02
Rb	43,0	0,00
Sb	98,4	0,01
Se	98,4	0,01
Sn	19,7	0,00
Sr	775,6	0,08
V	180,4	0,02
Zn	309,3	0,03
Si	119350,4	27,66

Pohja- ja lentotuhka 22.1. klo. 15:00. Petimateriaalista puolet dolomiittia.		
alkuaine	mg/kg	%
Al	21774,9	2,18
As	17,5	0,00
Ba	838,2	0,08
Be	0,0	0,00
Bi	0,0	0,00
Ca	130052,4	13,01
Cd	1,0	0,00
Co	11,8	0,00
Cr	31,6	0,00
Cu	34,9	0,00
Fe	34020,9	3,40
Ga	30,2	0,00
K	4895,3	0,49
Li	17,5	0,00
Mg	47272,3	4,73
Mn	1517,6	0,15
Mo	17,5	0,00
Na	3930,2	0,39
Ni	25,6	0,00
Pb	48,8	0,00
Rb	17,5	0,00
Sb	87,3	0,01
Se	87,3	0,01
Sn	17,5	0,00
Sr	255,5	0,03
V	61,5	0,01
Zn	177,5	0,02
Si		24,53

**Toisen koeajon pohjatuhkan analyysitulokset. (Polttoaineena kokopuuhake.)**

Pohjatuhka 31.1. klo. 10:45. Nollanäyte.			Pohjatuhka 31.1. klo. 11-16. Dolomiittia syötetty 30 kg/h.			Pohjatuhka 31.1. klo. 16-18. Dolomiittia syötetty 100 kg/h.		
alkuaine	mg/kg	%	alkuaine	mg/kg	%	alkuaine	mg/kg	%
Al	34106,3	3,4	Al	12374,2	1,24	Al	10955,5	1,10
As	17,2	0,0	As	20,8	0,00	As	16,5	0,00
Ba	540,5	0,1	Ba	761,5	0,08	Ba	880,1	0,09
Be	0,0	0,0	Be	0,0	0,00	Be	0,0	0,00
Bi	0,0	0,0	Bi	0,0	0,00	Bi	0,0	0,00
Ca	9502,6	1,0	Ca	138586,3	13,86	Ca	107743,0	10,77
Cd	0,9	0,0	Cd	0,0	0,00	Cd	0,0	0,00
Co	14,8	0,0	Co	11,9	0,00	Co	13,2	0,00
Cr	56,2	0,0	Cr	20,8	0,00	Cr	19,2	0,00
Cu	34,3	0,0	Cu	41,6	0,00	Cu	32,9	0,00
Fe	68181,8	6,8	Fe	10669,4	1,07	Fe	12543,7	1,25
Ga	17,2	0,0	Ga	27,7	0,00	Ga	30,8	0,00
K	17403,1	1,7	K	11087,3	1,11	K	9879,7	0,99
Li	17,2	0,0	Li	20,8	0,00	Li	16,5	0,00
Mg	1807,9	0,2	Mg	22981,3	2,30	Mg	15986,8	1,60
Mn	930,4	0,1	Mn	1607,3	0,16	Mn	1654,0	0,17
Mo	17,2	0,0	Mo	0,0	0,00	Mo	0,0	0,00
Na	12543,7	1,3	Na	6948,0	0,69	Na	5843,5	0,58
Ni	49,6	0,0	Ni	20,8	0,00	Ni	19,8	0,00
Pb	25,2	0,0	Pb	10,4	0,00	Pb	9,0	0,00
Rb	26,9	0,0	Rb	36,8	0,00	Rb	31,2	0,00
Sb	0,0	0,0	Sb	0,0	0,00	Sb	0,0	0,00
Se	85,8	0,0	Se	0,0	0,00	Se	0,0	0,00
Sn	17,2	0,0	Sn	20,8	0,00	Sn	16,5	0,00
Sr	175,3	0,0	Sr	156,3	0,02	Sr	143,0	0,01
V	48,5	0,0	V	39,3	0,00	V	39,2	0,00
Zn	264,5	0,0	Zn	210,8	0,02	Zn	179,6	0,02
Si	244168,1	24,4	Si	88004,2	8,80	Si	90197,7	9,02

**Toisen koeajon pohja- ja lentotuhkan analyysitulokset.**

Pohja- ja lentotuhka 31.1. klo 10:45. Nollanäyte			Pohja- ja lentotuhka 31.1. klo. 11- 16. Dolomiittia syötetty 30 kg/h.			Pohja- ja lentotuhka 31.1. klo. 16-18 Dolomiittia syötetty 100 kg/h.		
alkuaine	mg/kg	%	alkuaine	mg/kg	%	alkuaine	mg/kg	%
Al	46840,7	4,68	Al	26148,0	2,61	Al	22027,6	2,20
As	16,9	0,00	As	17,0	0,00	As	18,4	0,00
Ba	890,8	0,09	Ba	767,0	0,08	Ba	882,1	0,09
Be	0,0	0,00	Be	0,0	0,00	Be	0,0	0,00
Bi	0,0	0,00	Bi	0,0	0,00	Bi	0,0	0,00
Ca	22932,2	2,29	Ca	137449,0	13,74	Ca	132099,4	13,21
Cd	1,9	0,00	Cd	1,5	0,00	Cd	1,6	0,00
Co	15,0	0,00	Co	14,5	0,00	Co	12,8	0,00
Cr	51,1	0,01	Cr	41,1	0,00	Cr	38,1	0,00
Cu	67,6	0,01	Cu	49,2	0,00	Cu	42,4	0,00
Fe	45986,4	4,60	Fe	43025,5	4,30	Fe	33044,2	3,30
Ga	37,2	0,00	Ga	28,8	0,00	Ga	32,9	0,00
K	20496,6	2,05	K	10613,9	1,06	K	14099,4	1,41
Li	16,9	0,00	Li	17,0	0,00	Li	18,4	0,00
Mg	3772,9	0,38	Mg	47836,7	4,78	Mg	28861,9	2,89
Mn	1335,1	0,13	Mn	1846,9	0,18	Mn	1646,8	0,16
Mo	16,9	0,00	Mo	17,0	0,00	Mo	18,4	0,00
Na	11472,9	1,15	Na	5795,9	0,58	Na	8559,9	0,86
Ni	40,5	0,00	Ni	46,4	0,00	Ni	21,6	0,00
Pb	66,0	0,01	Pb	50,5	0,01	Pb	47,9	0,00
Rb	54,1	0,01	Rb	44,9	0,00	Rb	49,5	0,00
Sb	84,7	0,01	Sb	85,0	0,01	Sb	92,1	0,01
Se	84,7	0,01	Se	85,0	0,01	Se	92,1	0,01
Sn	16,9	0,00	Sn	17,0	0,00	Sn	18,4	0,00
Sr	352,2	0,04	Sr	258,8	0,03	Sr	264,5	0,03
V	68,9	0,01	V	61,8	0,01	V	57,7	0,01
Zn	362,9	0,04	Zn	273,8	0,03	Zn	356,2	0,04
Si	254186,4	25,42	Si	70204,1	7,02	Si	147071,8	14,71

**Kolmannen koeajon pohjatuuhkan analyysitulokset. (Polttoaineena turve.)**

Pohjatuukka 2.3. klo. 09:45. Nollanäyte.		
alkuaine	mg/kg	%
Al	30211,1	3,02
As	23,0	0,00
Ba	604,7	0,06
Be	5,9	0,00
Bi	5,9	0,00
Ca	44023,5	4,40
Cd	0,3	0,00
Co	8,8	0,00
Cr	24,2	0,00
Cu	40,8	0,00
Fe	18299,1	1,83
Ga	30,5	0,00
K	12387,1	1,24
Li	5,9	0,00
Mg	468,3	0,05
Mn	476,7	0,05
Mo	5,9	0,00
Na	347,9	0,03
Ni	20,6	0,00
Pb	14,9	0,00
Rb	33,3	0,00
Sb	29,3	0,00
Se	29,3	0,00
Sn	5,9	0,00
Sr	161,2	0,02
V	31,6	0,00
Zn	106,0	0,01

Pohjatuukka 2.3. klo. 14:45. Dolomiittia syötetty 45 kg/h.		
alkuaine	mg/kg	%
Al	8805,8	0,88
As	10,9	0,00
Ba	683,7	0,07
Be	6,2	0,00
Bi	6,2	0,00
Ca	386189,9	38,62
Cd	0,3	0,00
Co	8,1	0,00
Cr	15,6	0,00
Cu	12,2	0,00
Fe	9029,6	0,90
Ga	6,2	0,00
K	4006,2	0,40
Li	6,2	0,00
Mg	580,2	0,06
Mn	2133,8	0,21
Mo	6,2	0,00
Na	2087,5	0,21
Ni	15,4	0,00
Pb	6,1	0,00
Rb	16,0	0,00
Sb	30,8	0,00
Se	30,8	0,00
Sn	6,2	0,00
Sr	190,7	0,02
V	29,8	0,00
Zn	66,9	0,01

**Kolmannen koeajon lentotuhkan analyysitulokset.**

Lentotuhka 2.3. 09:45. Nollanäyte.		
alkuaine	mg/kg	%
Al	53732,3	5,37
As	66,8	0,01
Ba	930,6	0,09
Be	7,1	0,00
Bi	7,1	0,00
Ca	33116,1	3,31
Cd	2,3	0,00
Co	25,5	0,00
Cr	66,8	0,01
Cu	140,6	0,01
Fe	100963,2	10,10
Ga	49,2	0,00
K	6256,4	0,63
Li	7,1	0,00
Mg	6161,5	0,62
Mn	899,4	0,09
Mo	10,9	0,00
Na	2975,9	0,30
Ni	65,1	0,01
Pb	79,0	0,01
Rb	12,7	0,00
Sb	35,4	0,00
Se	35,4	0,00
Sn	7,1	0,00
Sr	387,9	0,04
V	115,4	0,01
Zn	151,3	0,02

Lentotuhka 2.3. klo. 14:45. Dolomiittia syötetty 45 kg/h.		
alkuaine	mg/kg	%
Al	24733,0	2,47
As	33,4	0,00
Ba	852,7	0,09
Be	6,1	0,00
Bi	6,1	0,00
Ca	202578,3	20,26
Cd	1,1	0,00
Co	16,2	0,00
Cr	32,1	0,00
Cu	60,5	0,01
Fe	46500,9	4,65
Ga	39,4	0,00
K	4074,3	0,41
Li	6,1	0,00
Mg	57826,9	5,78
Mn	1743,4	0,17
Mo	6,1	0,00
Na	2119,7	0,21
Ni	38,2	0,00
Pb	35,6	0,00
Rb	14,1	0,00
Sb	30,7	0,00
Se	30,7	0,00
Sn	6,1	0,00
Sr	256,8	0,03
V	65,1	0,01
Zn	100,2	0,01

**Neljännän koeajon pohjatuhan analyysitulokset. (Polttoaineena metsätähdehake.)**

Pohjatuha 28.3. klo. 10:00. Nollanäyte.		
alkuaine	mg/kg	%
Al	21524,8	2,15
As	6,8	0,00
Ba	604,1	0,06
Be	6,8	0,00
Bi	6,8	0,00
Ca	52321,3	5,23
Cd	0,3	0,00
Co	5,3	0,00
Cr	16,2	0,00
Cu	28,7	0,00
Fe	10944,2	1,09
Ga	26,4	0,00
K	20932,6	2,09
Li	6,8	0,00
Mg	7637,8	0,76
Mn	639,2	0,06
Mo	6,8	0,00
Na	12722,9	1,27
Ni	13,8	0,00
Pb	13,0	0,00
Rb	41,5	0,00
Sb	34,0	0,00
Se	34,0	0,00
Sn	6,8	0,00
Sr	175,0	0,02
V	21,2	0,00
Zn	198,4	0,02
Si	289176,3	28,92

Pohjatuha 28.3. klo. 13:00. Dolomiittia syötetty 30 kg/h.		
alkuaine	mg/kg	%
Al	10397,6	1,04
As	7,1	0,00
Ba	462,5	0,05
Be	7,1	0,00
Bi	7,1	0,00
Ca	87197,7	8,72
Cd	0,7	0,00
Co	9,0	0,00
Cr	13,8	0,00
Cu	20,0	0,00
Fe	9640,1	0,96
Ga	19,3	0,00
K	13613,1	1,36
Li	7,1	0,00
Mg	8509,2	0,85
Mn	1631,6	0,16
Mo	7,1	0,00
Na	6928,2	0,69
Ni	19,4	0,00
Pb	6,9	0,00
Rb	28,7	0,00
Sb	35,6	0,00
Se	35,6	0,00
Sn	7,1	0,00
Sr	136,7	0,01
V	22,3	0,00
Zn	181,2	0,02
Si	144217,6	14,42

Pohjatuha 28.3. klo. 16:00. Dolomiittia syötetty 30kg/h.		
alkuaine	mg/kg	%
Al	7253,6	0,73
As	6,5	0,001
Ba	430,8	0,04
Be	6,5	0,001
Bi	6,5	0,001
Ca	77209,9	7,72
Cd	0,9	0,0001
Co	10,1	0,001
Cr	12,9	0,001
Cu	20,9	0,002
Fe	9007,8	0,90
Ga	17,8	0,002
K	382,6	0,04
Li	6,5	0,00
Mg	10445,2	1,045
Mn	1873,5	0,19
Mo	6,5	0,00
Na	5616,7	0,562
Ni	22,3	0,00
Pb	6,2	0,001
Rb	24,5	0,002
Sb	32,6	0,003
Se	32,6	0,003
Sn	6,5	0,001
Sr	130,8	0,013
V	26,5	0,00
Zn	206,3	0,021
Si	100717,1	10,07

## Neljännen koeajon lentotuhkan analyysitulokset.

Lentotuhka 28.3. klo. 10:00. Nollanäyte.		
alkuaine	mg/kg	%
Al	26305,2	2,63
As	21,4	0,00
Ba	806,6	0,08
Be	6,7	0,00
Bi	6,7	0,00
Ca	42516,7	4,25
Cd	1,3	0,00
Co	14,3	0,00
Cr	56,4	0,01
Cu	71,0	0,01
Fe	42510,0	4,25
Ga	35,5	0,00
K	18399,6	1,84
Li	6,7	0,00
Mg	6469,9	0,65
Mn	911,0	0,09
Mo	6,7	0,00
Na	9857,4	0,99
Ni	46,3	0,00
Pb	42,4	0,00
Rb	30,0	0,00
Sb	33,5	0,00
Se	33,5	0,00
Sn	6,7	0,00
Sr	257,5	0,03
V	74,9	0,01
Zn	260,174	0,03
Si	230321,3	23,03

Lentotuhka 28.3. klo. 13:00. Dolomiittia syötetty 30 kg/h.		
alkuaine	mg/kg	%
Al	14520,6	1,45
As	11,9	0,00
Ba	847,3	0,08
Be	7,1	0,00
Bi	7,1	0,00
Ca	79772,7	7,98
Cd	1,1	0,00
Co	11,6	0,00
Cr	35,0	0,00
Cu	44,9	0,00
Fe	20190,3	2,02
Ga	33,8	0,00
K	16676,8	1,67
Li	7,1	0,00
Mg	22926,1	2,29
Mn	1218,8	0,12
Mo	7,1	0,00
Na	7696,0	0,77
Ni	30,5	0,00
Pb	25,5	0,00
Rb	29,2	0,00
Sb	35,5	0,00
Se	35,5	0,00
Sn	7,1	0,00
Sr	216,6193	0,02
V	48,54403	0,00
Zn	257,3153	0,03
Si	193125	19,31

Lentotuhka 28.3. klo. 16:00. Dolomiittia syötetty 30 kg/h.		
alkuaine	mg/kg	%
Al	8209,8	0,82
As	6,5	0,00
Ba	506,4	0,05
Be	6,5	0,00
Bi	6,5	0,00
Ca	164854,7	16,49
Cd	1,1	0,00
Co	10,2	0,00
Cr	16,7	0,00
Cu	22,9	0,00
Fe	12999,4	1,30
Ga	20,8	0,00
K	10121,4	1,01
Li	6,5	0,00
Mg	14515,8	1,45
Mn	2013,6	0,20
Mo	6,5	0,00
Na	3059,4	0,31
Ni	25,4	0,00
Pb	9,6	0,00
Rb	25,7	0,00
Sb	32,3	0,00
Se	32,27889	0,00
Sn	6,455778	0,00
Sr	157,4564	0,02
V	27,55972	0,00
Zn	222,5952	0,02
Si	79212,4	7,92