



Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto
Euroopan sosiaalirahasto

MAAKIERTO KP

KOEAJOT SAVONIA AMK:N ENERGIATUTKIMUSKESKUKSESSA Maa-alkaliaineksen käyttö voimalaitoskokeissa

Maakierto KP-hanke
Centria tutkimus ja kehitys
30.9.2022
Riku Niva



TERMIT

Dolomiitti

Dolomiitti ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) on karbonaattikivilaji, joka on läheistä sukua kalkkikivelle. Kalkkikivestä poiketen dolomiitti sisältää runsaasti magnesiumia.

Kalsiitti

Kalsiitti (CaCO_3) eli kalkkisälpä on karbonaattikivilaji.

Leijupeti

Leijupedillä tarkoitetaan polttokattilassa olevaa kvartsihiekan muodostamaa kerrosta, joka saadaan liikkeeseen ja irti kattilan tulipesän pohjasta ilmavirralla. Kerroksen lämpötila on noin 700 °C.

Leijupetihiekka

Leijupetihiekalla tarkoitetaan leijukerroslaitoksen polttoprosessista poistettavaa hiekkapetimateriaalia tai poltossa hienontunutta hiekkapetimateriaalia, joka erottuu savukaasusta joko kattilassa tai savukaasujen puhdistuksessa.

Lentotuhka

Energiatuotantolaitosten savukaasuista erotettava tuhka- ja leijupetijää.

Lämpötilagradientti

Lämpötilagradientti ilmaisee lämpötilan asteittaisen vaihtelun etäisyyden mukaan.

Pohjatuhka

Kattilan pohjalle kerääntyvä ja/tai poistettavan leijupetimateriaalin mukana poistuva tuhka- ja leijupetijää.

Sisällysluettelo

TERMIT.....	2
1 JOHDANTO.....	1
2 KOEYMPÄRISTÖ	2
2.1 Leijupetikattila	2
3 ANALYYSIT.....	4
3.1 Savukaasuanalyysit.....	4
3.2 Tuhka-analyysit.....	7
3.3 Korroosiokokeet	9
4 KOEAJOT	14
4.1 Dolomiitin syöttömäärä.....	15
4.2 Koeajo 1	18
4.3 Koeajo 2	18
4.4 Koeajo 3.....	18
4.5 Koeajo 4.....	19
5 TULOKSET	20
5.1 Päästömittaukset.....	20
5.2 Tuhka-analyysit.....	21
5.3 Korroosioanalyysit.....	25
6 YHTEENVETO	29

1 JOHDANTO

Tämä raportti on tehty MAAKIERTO KP -hankkeelle ja se käsittelee voimalaitoskokeita, joissa tutkittiin leijupetikattilan palamisprosessissa muodostuvia savukaasuja ja tuhkaa sekä teräsnäytteiden korrodoitumista, kun polttoprosessiin lisättiin maa-alkaliainesta.

Kokeet haluttiin tehdä virallisessa tutkimusympäristössä, sillä normaalikäytössä olevalla lämpö- tai voimalaitoksella on omat rajoitteensa tutkimusten suhteen. Tutkimuskäytössä olevalla koelaitoksella pystytään vaikuttamaan paremmin poltossa oleviin parametreihin sekä saamaan enemmän tarpeellista mittausdataa.

Koelaitosten kartoitusten ja kilpailutusten jälkeen koeympäristöksi valittiin Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskus. Koeajot tehtiin 5.-15.10.2021 välisenä aikana. Maa-alkaliainesten eli dolomiittikalkin ja kalsiitin syötöllä leijupetikattilaan oli tarkoitus tutkia niiden vaikutuksia päästöihin, poltossa muodostuvaan tuhkaan ja teräskappaleiden korrodoitumiseen.

Koeympäristössä tehtiin neljä koeajoa, joista ensimmäinen oli referenssijajo ja kolmessa muussa leijupetihiekakerrosta korvattiin dolomiitilla tai kalsiitilla. Koeajon aikana kerättiin tuhkanäytteitä, mitattiin savukaasuja päästömittauslaitteistolla ja tutkittiin teräskappaleiden korrodoitumista asettelemalla eri teräsmateriaaleista valmistettuja holkkeja savukaasukanavaan.

Savonia-ammattikorkeakoulu vastasi koeajojen suorittamisesta Centrialta saadun suunnitelman mukaan. Centrialle kokeista toimitettiin raportti, käytettävän polttoaineen analyysit, päästömittauslaitteiston mittausdata ja tuhkanäytteet. Korroosiotestissä olleet teräskappaleet toimitettiin Eurofins Oy:lle analysoitavaksi.

Tässä raportissa on esitetty suoritettavat koeajot ja niihin liittyvät mittaus- ja analysointimenetelmät. Koeajoista saatuja tuloksia on esitetty sekä taulukossa että graafisesti.

2 KOEYMPÄRISTÖ

Koeympäristöksi valittiin Savonia ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskus, jossa voidaan tutkia, kehittää ja testata kierrätyspolttoaineiden, hakkeen, turpeen sekä pyrolyysiöljyn palamiseen liittyviä asioita niin arina- ja kuin leijupetikattilaympäristössäänkin. Palamiseen liittyvien asioiden lisäksi tutkittavia kohteita voivat olla materiaalien korroosikäyttäytyminen sekä poltossa muodostuvat päästöt ja niiden hallintaan liittyvät asiat. Tutkimusympäristöä käytetään myös energiatekniikan perus- ja täydennyskoulutukseen ja tarpeen mukaan se toimii oppimisympäristönä myös yrityksille räätälöidyissä koulutuksissa. [1].

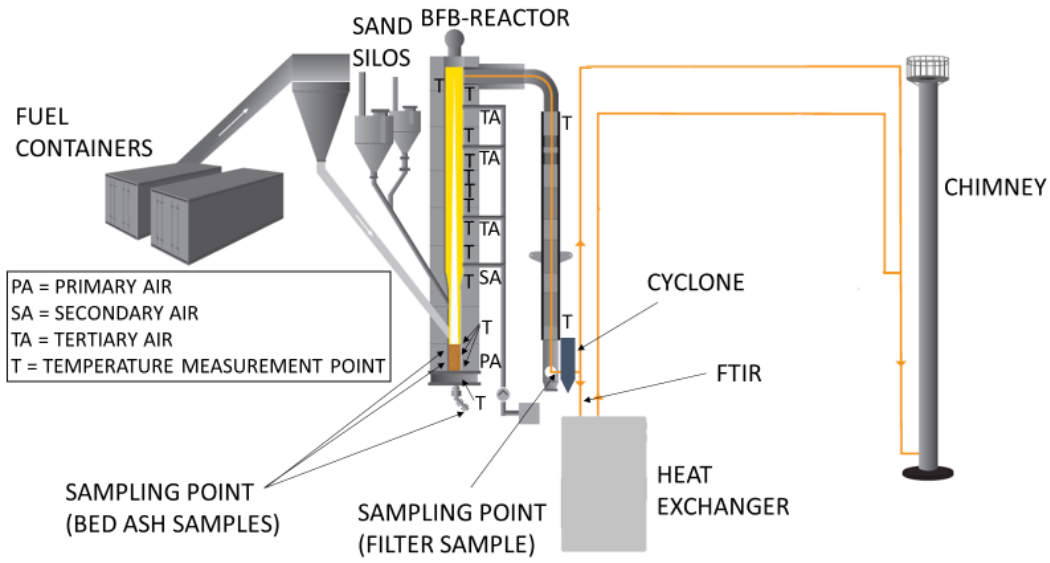
2.1 Leijupetikattila

Koulutus- ja tutkimuskäyttöön tarkoitettu leijupetikattila koostuu neljästä eri segmentistä ja takavedosta. Leijupetikattila on teholtaan korkeintaan 300 kW, sen korkeus on 8 150 mm ja savukaasumäärä on 600 nm³/h. Tulipesän halkaisija on 494 mm. [2].

Leijupedillä pystytään tutkimaan polttoaineen vaihtelun ja sekoitussuhteen vaikutuksia syntyviin savukaasuihin. Tutkimukset voidaan tehdä ilman syöttötasojen vaihtelun vaikutuksia palamiseen sekä kiertokaasun syötön vaikutuksia kattilaan. Kattila sisältää suuren määrän mittausyhteitä, joilla voidaan tutkia polton aikana tapahtuvaa lämpötilakäyttäytymistä kattilan eri vyöhykkeissä. [2].

Leijupetikattilasta poistuva savukaasu ohjataan suodattimen kautta piippuun tai korroosiotestauskammioon, jossa voidaan tutkia savukaasuista johtuvia korroosio-ominaisuuksia tai arvioida kuinka erilaiset polttoaineet vaikuttavat savukaasujen korroosio-ominaisuuksiin [2].

Kuvassa 1 on leijupetikattilan periaatekuva.



Kuva 1. Leijupetikattilan periaatekuva

3 ANALYYSIT

Koeajojen aikana tutkittiin poltossa muodostuvia savukaasuja ja tuhkaa. Samalla tutkittiin myös eri teräsmateriaaleista valmistettujen kappaleiden korrodoitumista. Seuraavissa osioissa on esitetty analyysimenetelmät näiden tulosten analysoimiseksi.

3.1 Savukaasuanalyysit

Koeajojen aikana savukaasuanalyysilaitteisto Gasmel FTIR keräsi dataa savukaasuissa tapahtuvista muutoksista. FTIR-analysaattorin toiminta perustuu näytteen infrapunaspektrin mittaukseen, josta se havaitsee kunkin kaasun absorptionspektrin ja laskee sen avulla kunkin kaasun pitoisuuden näytteessä Beerin ja Lambertin lain mukaisesti. Koska koko infrapunaspektri luetaan kerralla, kaikkia näytteen kaasuja voidaan mitata kerralla.

Gasmel DX4000 laitteistoon kuuluu analysaattori, pumppuyksikkö, näytteenottosondi, lämmitetyt näytelinjat sekä tietokone Calcmet-ohjelmistolla. Näiden lisäksi laitteistoon kuuluu nollakaasu eli inerttikaasu, joka ei absorboi IR-säteilyä mittausalueella. Tyypillisesti inerttikaasuna käytetään 5.0-laatuista typpeä, jonka avulla mitataan taustaspektri. Taustan mittaamisen jälkeen mitataan näytekäasusta näytespektri, jolloin näiden spektrien suhteen laskemisella voidaan määrittää kaasussa olevien yhdisteiden pitoisuudet. Taustan mittaaminen on siis tärkeä toimenpide tulosten luotettavuuden kannalta.

Mittauslaitteisto on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Gaset FTIR -laitteisto

Mittaussondi sijoitettiin syklonin ja lämmöntalteenottokattilan väliin. Sondin kohdalla savukaasujen lämpötila oli 400°C.



Kuva 3. Mittaussondi savukaasukanavassa

3.2 Tuhka-analysit

Koeajojen aikana kerättiin myös tuhkanäytteitä tarkempaa analyysia varten. Tuhkanäytteitä kerättiin sekä lento- että pohjatuhkasta. Lentotuhkanäytteitä kerättiin pussisuodattimelta ja syklonilta, ja pohjatuhkanäytteet kerättiin pohjatuhkanpoistotorven kautta (Kuva 4).



Kuva 4. Pohjatuhkanäytteiden otto

Näytteitä pyrittiin keräämään tunnin välein, mutta lentotuhkan osalta kerääminen ei onnistunut lentotuhkan vähäisen muodostumisen vuoksi. Kuvassa 5 on näytteenottopiste pussisuodattimen lentotuhkan osalta.



Kuva 5. Pussisuodattimen tuhka

Tuhkanäytteet toimitettiin Centrialle kemian tutkimuslaboratorioon tarkempaa analysointia varten. Tutkimuslaboratoriossa tuhkat analysoitiin ICP-MS eli induktiivisesti kytketty plasma – massaspektrometri -menetelmällä, jonka avulla voidaan määrittää näytteiden isotooppipitoisuuksia. Alkuaineiden ja niiden eri isotooppien avulla saadaan kokonaiskuva näytteen alkuainekoostumuksesta. ICP-MS perustuu plasman korkeaan lämpötilaan (>8000 K), jonka avulla plasmalla on kyky hajottaa sinne saapuvat molekyylit atomeiksi. Atomit ionisoidaan ioneiksi, jotka voidaan tämän jälkeen havaita massaspektrometrin avulla. [3, s. 1].

Toinen menetelmä tuhkan alkuainepitoisuuksien määrittämiseksi oli AAS eli atomiabsorptiospektrometri -menetelmä, joka soveltuu varsinkin pienten, jopa hivenaineluokkaa olevien pitoisuuksien määrittämiseen.

Analysimenetelmässä tutkitaan, että kuinka paljon tutkittavan alkuaineen atomit absorboivat tietyn väristä valoa. Tutkittavaa liuosta kuumennetaan liekissä 2000–3500 celsiusasteen lämpötilaan, jolloin yhdisteet hajoavat atomeiksi. Atomit saadaan virittymään kohdistamalla kaasufaasiin säteilyä. Absorboituneen energian määrä riippuu liuoksessa olevan aineen pitoisuudesta. Tulos lasketaan vertailuliuosten avulla ja tulos ilmoitetaan yleensä yksikössä mg/l tai ppm. [4, s. 12].

3.3 Korroosiokokeet

Kattilamateriaalien korroosiosonditestauksissa asetetaan korroosiosondi uhripaloiheen kattilapesän olosuhteisiin leijupetikattilan sisälle. Sondi voidaan asettaa leijupetikattilaan joko tulipesään tai takavetoon halutulle korkeustasolle. Tässä testissä korroosiosondi asetettiin takavedon yläosaan. Sondi on vesi- ja ilmajäähdytetty, jotta se saadaan pidettyä halutussa vakioämpötilassa.

Korroosiosondiin asetettiin eri materiaaleista valmistettuja holkkeja eli uhripaloja, joiden korrodoitumista haluttiin testata. Uhripalojen seokset ja näytenumerot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Uhripalojen testaustaulukko

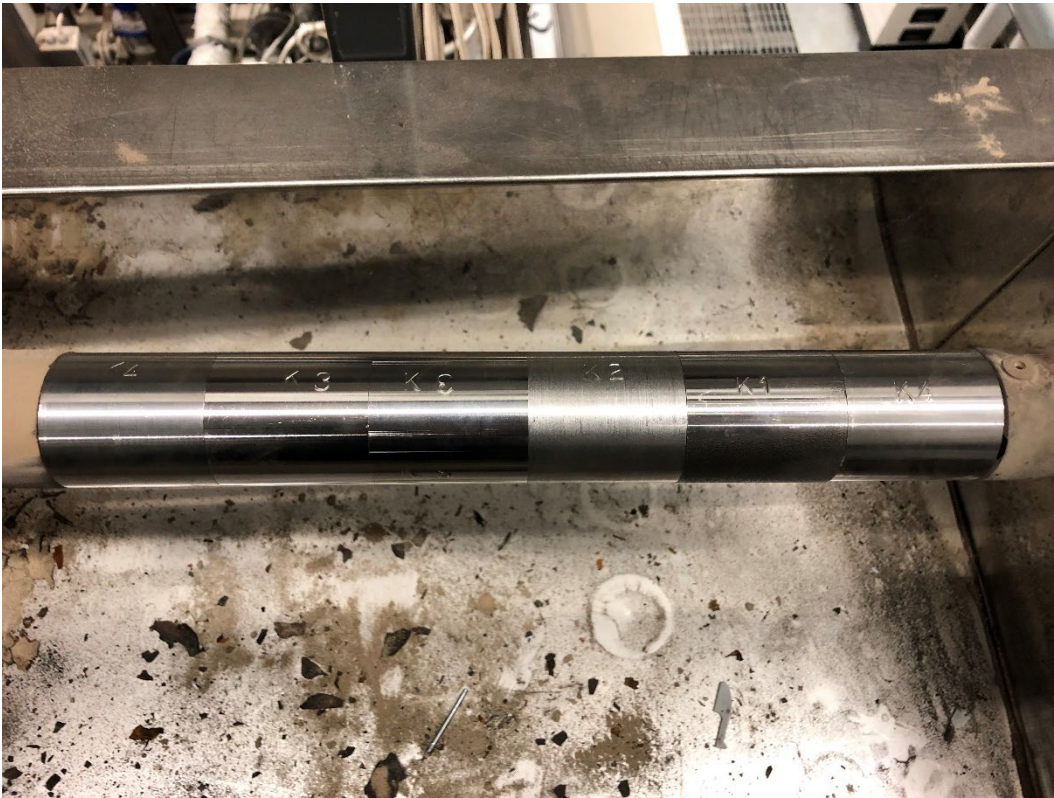
Näyte nro.	Seos	Käyttötarkoitus
K1	13CrMo45	Matalahiilinen teräs, jossa Cr 0,70 – 1,15 ja Mo 0,4-0,6
K2	16Mo3	Hiiliteräs, jossa Mo 0,25-0,35 ja Cr 0,030
K3	X10CrMoVNb91	Martensiittinen teräs, jossa Cr 8,0 – 9,5
K4	P265GH	Seostamaton hiiliteräs

Uhripalat K1-K4 olivat korroosiosondissa kaikkien koeajojen ajan. Uhripaloista K3 ja K4 oli myös toiset näytteet, jolloin uhripalojen kokonaismäärä oli kuusi per koeajo. Toisia näytteitä uhripaloista K3 ja K4 vaihdettiin joka koeajon jälkeen uusiin, jotta voitiin tutkia koeajokohtaista korrodoitumista. Uhripaloina haluttiin käyttää näytteitä K3 ja K4, sillä K3-näytettä voidaan pitää seoksista laadukkaimpana, kun taas näytettä K4 huonolaatuisimpana. Seuraavassa kuvassa on esitetty korroosiosondi uhripaloiheen.



Kuva 6. Korrosiosondi uhrilaloineen

Uhripalat merkittiin omalla näytenumerollaan.



Kuva 7. Uhripalojen näytenuumerot

Koeajojen jälkeen uhripalat valettiin muotteihin epoksilla, jotta niiden siirtämisessä tarkempaan analysointiin ei menetettäisi mitään.



Kuva 8. Uhripalat valettuna epoksilla testien jälkeen

Uhripalojen analysoinnissa käytettiin SEM- eli pyyhkäiselektronimikroskooppia ja siihen liitettyä alkuaineanalysointia (EDS). SEM-EDS analyysissä yhdistyy pyyhkäiselektronimikroskopia ja energiadiispersiivinen röntgenspektroskopia.

SEM eli pyyhkäiselektronimikroskopiolla voidaan tuottaa korkean resoluution (alle 1 nm) kuvia. Toimintaperiaate perustuu elektronisuihkuun, joka pyyhkii näytteen pintaa järjestelmällisesti. Elektronit kiihdytetään elektronilähteestä ja ne ohjataan useiden elektromagneettisten linssien ja apertuurien läpi ennen osumistaan näytteeseen. Elektronien vuorovaikutus näytteen pinnan kanssa tuottaa erilaisia signaaleja elektronien poikkeessaan alkuperäisestä suunnastaan. [5].

EDS-detektorin tehtävä on havaita röntgensäteet, joita materiaali tuottaa, kun elektronit vuorovaikuttavat sen pinnan kanssa SEM-kuvantamisen aikana. EDS analysoi röntgensäteet ja voi siten tunnistaa kaikki alkuaineet

näytteestä lukuun ottamatta vetyä, heliumia ja litiumia. Näytteen alkuaineet voidaan erottaa toisistaan, sillä jokaisella alkuaineella on omanlaisensa röntgenspektri, jota ne säteilevät vuorovaikutettuaan elektronien kanssa. [6].

4 KOEAJOT

Koeajoja tehtiin yhteensä neljä, joista ensimmäinen koeajo oli referenssiajo, toinen ja kolmas dolomiittiajo ja neljäs kalsiittiajo. Maa-alkaliaineksilla tehdyissä koeajoissa petihiekasta korvattiin 25 % tai 50 % dolomiitilla tai kalsiitilla. Kokeiden painopiste oli dolomiittikalkilla tehdyissä kokeissa, koska aiemmissa tutkimuksissa dolomiittikalkilla oli saatu hyviä tuloksia. Dolomiittikalkki-kokeiden lisäksi myös kalsiitin potentiaali haluttiin selvittää.

Taulukossa 2 on esitetty polttokokeissa tehdyt koeajot. Jokainen koeajo kesti n. 12 h ja kaikissa koeajoissa polttoaineena oli kuusipohjainen metsätähdehake. Polttoaineena haluttiin käyttää kuusipohjaista metsätähdehakea sen ravinnepitoisuuksien vuoksi. Petimateriaalia oli yhteensä 120 kg ja dolomiitin raekoko 0-4 mm. Taulukossa on esitetty myös pedin ja takavedon lämpötilat kokeiden aikana.

Taulukko 2. Koeajot

Testi:	1>>> 12h referenssi	2>>> 12 h DOL 25 %	3>>> 12h DOL 50 %	4>>> 12h KAL 25 %
Polttoaine	Tuore metsätähdehake, vihreä	Tuore metsätähdehake, vihreä	Tuore metsätähdehake, vihreä	Tuore metsätähdehake, vihreä
Petimateriaali	LH 0,5-1,2 Nollakoe yht. 120 kg	LH 0,5-1,2 Dolomiitti ¼ 0-4 mm yht. 120 kg	LH 0,5-1,2 Dolomiitti ½ 0-4 mm yht. 120 kg	LH 0,5-1,2 Kalsiitti ¼ 1-3 mm yht. 120 kg
Peti	850°C +-10°C	850°C +-10°C	850°C +-10°C	850°C +-10°C
Takaveto	720°C +-10°C	720°C +-10°C	720°C +-10°C	720°C +-10°C

Alkuperäisessä suunnitelmassa myös kalsiitilla oli tarkoitus tehdä ½-kalsiittiajo. Suunnitelma kuitenkin muutettiin ½-dolomiittikokeen jälkeen, sillä ½-dolomiittikoe oli kattilan toiminnan kannalta liikaa. Ongelmana oli pedin kuplimisen puute. Dolomiitti oli hiekkaan nähden sen verran karkeampaa, että ilma etsi arinalla helpoimman reitin ja karkasi sieltä rakeiden välistä. Dolomiitilla ja petihiekalla on myös eroa ominaispainon suhteen. Näin ollen peti oli vaikeaa saada kuplimaan kuten pitäisi ja tästä taas seurasi, ettei palaminen ollut niin hyvää kuin aiemmin ja vaarana oli vielä pedin (tuhkan) sulaminen.

4.1 Dolomiitin syöttömäärä

½-dolomiittikokeessa dolomiittia haluttiin syöttää aloituspanoksen lisäksi myös ennalta laskettu määrä. Tällä haluttiin tutkia todellista tilannetta voimalaitosympäristössä, jolloin dolomiittia olisi tarkoitus virrata tulipesään polttoaineen tuhkapitoisuuden mukainen määrä.

Dolomiitin syöttömäärän laskemiseen tarvittiin tieto käytettävästä polttoaineesta, kattilatehosta ja dolomiitista. Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskus arvioi kattilatehon olevan koeajon aikana n. 200 kW ja polttoaineena käytettiin kuusipohjaista metsätähdehakea.



Kuva 9. Kuusipohjainen metsätähdehake

Halusimme polttoaineena olevan metsätähdehakea, sillä sen tuhka sisältää lannoituskäyttöön tärkeitä ainesosia, kuten kalsiumia, fosforia ja kaliumia.

Käytettävä polttoaine tutkittiin Savonia-ammattikorkeakoulun laboratoriossa ja kuusipohjaiselle metsätähdehakkeelle saatiin taulukon 3 mukaiset lämpöarvo-, kosteus- ja tuhka-arvot. Tarkemmat tulokset yksittäisestä näytteestä ja kahdesta kokoomanäytteestä on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 3. Polttoainetiedot

Määrittäminen	Tulos	Yksikkö
Kalorimetrinen lämpöarvo	21,19	MJ/kg
Tehollinen lämpöarvo	18,88	MJ/kg
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	9,90	MJ/kg
Kokonaiskosteus	44,7	m-%
Kuiva-aineen tuhkapitoisuus	2,0	m-%

Käytettävälle polttoaineelle tehtiin myös alkuaineanalyysi. Analyysit teetettiin Eurofins Oy:lla. Tulokset raskasmetallien osalta ovat nähtävissä taulukossa 4 ja kaikkien alkuaineiden osalta tulokset ovat nähtävissä liitteessä 2.

Taulukko 4. Alkuaineanalyysit

Määrittäminen	Tulos	Yksikkö
Arseeni (As)	<0,2	mg/kg
Elohopea (Hg)	<0,08	mg/kg
Kadmium (Cd)	0,15	mg/kg
Kromi (Cr)	3,0	mg/kg
Kupari (Cu)	4,1	mg/kg
Lyijy (Pb)	0,30	mg/kg
Nikkeli (Ni)	2,2	mg/kg
Sinkki (Zn)	33	mg/kg

Alkuaineanalyysia tarvittiin dolomiitin syöttömäärän laskemiseen. Dolomiitin syöttömäärän laskukaavassa on laimennuskerroin, mikä tulee polttoaineen kadmium-pitoisuudesta. Kadmium on yleensä rajoittavin alkuaine tuhkalannoituksessa (pitoisuusraja tuhkalannoitteille 2,5 ppm). Kadmium-pitoisuuden ollessa kuitenkin hyvin pieni (0,15 mg/kg), ei laimennuskerrointa huomioitu laskukaavassa.

Dolomiitin syöttömäärän laskemiseen käytettiin kaavaa

$$\left(\frac{P_k}{Q_{net,ar}}\right) * Ad * Lk * Kk * Vk \quad (1)$$

jossa P_k on kattilateho, $Q_{net,ar}$ 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.

$$= \left(\frac{P_k}{Q_{net,ar}}\right) * Ad * Lk * Kk * Vk$$

$$= \left(\frac{0,2 \text{ MW}}{9,90 \text{ MJ/kg}}\right) * (0,02 * 0,447) * 1,6 * 1,3$$

$$= 0,000376 \text{ kg / s}$$

$$= 1,35 \text{ kg / h}$$

Dolomiitin massavirrassa huomioitiin myös koeajoissa käytetty dolomiitti. Dolomiitti ei ollut samaa, jonka perusteella edellä oleva laskukaava on laadittu. Kahden eri valmistajan dolomiitissa on eri suhteet magnesiumia ja kalsiumia. Halusimme huomioida tämän dolomiitin massavirrassa, jolloin massavirran skaalaustekijäksi lisätiin Ca/Mg välinen suhde, sillä kalsiumia ja magnesiumia pidettiin dolomiitin tärkeimpinä alkuaineina. Dolomiitin toimittajien ICP-analyseilla saimme dolomiitin CaO ja MgO -pitoisuudet (Taulukko 5).

Taulukko 5. Dolomiitin MgO ja CaO -pitoisuudet

	CaO [%]	MgO [%]
Edeltävien tutkimusten dolomiitti	75,5	15,9
Nyt käytetty dolomiitti	30,4	18,9

Tällöin skaalaustekijäksi saadaan:

$$\frac{(75,5+15,9)}{(30,4+18,9)} = 1,85$$

Skaalaustekijällä kerrottiin aiemmin saatu massavirta:

$$1,85 * 1,35 \text{ kg/h} = \underline{2,5 \text{ kg/h}}$$

4.2 Koeajo 1

Ensimmäinen koeajo oli ns. referenssiajo, josta saatiin referenssitulokset kuusipohjaisen metsätähdehakkeen poltosta ilman maa-alkaliainesten mukana oloa. Koeajon tuloksia käytettiin siis referenssinä ja koeajosta saatiin tieto metsätähdehakkeen palamisesta koeajokattilassa.

Savonia-ammattikorkeakoulu kommentoi koeajon olleen kaikin puolin hyvä testiajo, jossa pedin lämmöt kävivät vain vähän ylhäällä ja takavedon lämpötila pysyi testin aikana n. 700°C:ssa.

4.3 Koeajo 2

Toisessa koeajossa eli ¼ -dolomiittikokeessa petihiekasta 25 % korvattiin dolomiitilla. Petihiekan määrän ollessa 200 kg, alkupanos vastasi n. 50 kg:n määrää. Alkupanoksen lisäksi dolomiittia lisättiin koeajon ajan polttoaineen tuhkapitoisuuden mukainen määrä, jossa käytettiin laskukaavaa 1.

Savonia-ammattikorkeakoulu kommentoi koeajossa pedin käyttäytymisen olevan pääasiallisesti hyvää tai jopa erittäin hyvää. Testin lopussa lämmöt kävivät hieman ylhäällä ja toisinaan pedissä esiintyi lämpötilagradienttia, mutta ei mitään suurta tai pitkäaikaista. Takavedon lämpötila nousi testin aikana n. 800°C:een saakka. Lyhyesti sanottuna erittäin hyvä koeajo.

4.4 Koeajo 3

Kolmannessa koeajossa eli ½-dolomiittikokeessa petihiekasta puolet korvattiin dolomiitilla, eli alkupanos vastasi n. 100 kg:n dolomiitin määrää. Alkupanoksen lisäksi dolomiittia lisättiin koeajon ajan polttoaineen tuhkapitoisuuden mukainen määrä, jossa käytettiin laskukaavaa 1.

Savonia-ammattikorkeakoulu kommentoi koeajossa ilmenevän jonkin verran häiriöitä. Pedin lämmöt olivat koeajon alussa hieman ylhäällä, mutta häiriöiden aikaan alhaalla. Kun koeajossa ilmeni seuraavan kerran lämpöpiikkiä, petilämmöt olivat hieman ylhäällä pitempiaikaisesti. Lämpöpiikin jälkeen lämpötilagradienttia esiintyi kohtalaisesti. Koeajon lopussa lämpötilagradientti oli jo hyvin suurta (100°C), mikä tarkoittaa, että gradientti on huolestuttavan suuri ja yleensä kertoo, että peti voisi sintraantua tai muuten lopettaa toimintansa. Koekattila kestää maksimissaan 150°C:n lämpötilagradientin, jonka jälkeen peti hyytyy ja koeajot keskeytyvät. Takavedon lämpötila pysyi koeajon aikana n. 750-770°C:ssa ja hapen ka. oli n. 7,7 %.

Johtuen kattilan vaikeasta ajosta ja lämpötilojen seilaamisesta ylös alas, päätettiin neljännessä koeajossa petimateriaalia korvata kalsiitilla vain 25 %.

4.5 Koeajo 4

Neljännessä koeajossa eli ¼-kalsiittikokeessa dolomiitti vaihdettiin kalsiittiin. Kalsiitilla korvattiin petimateriaalista 25 %. Koeajossa kalsiittia lisättiin alkupanoksen lisäksi myös tuhkapitoisuuden mukainen määrä, mutta laskukaavaan ei tehty muutoksia, vaikka dolomiitti vaihdettiin kalsiittiin.

Savonia-ammattikorkeakoulu kommentoi koeajon alussa lämpöjen käyvän hieman korkealla ja alusta lähtien oli havaittavissa pedissä lämpötilagradienttia. Lämpötilagradienttia oli oikeastaan jatkuvasti, mutta koeajon lopussa gradientti tasoittui mittausten välillä, mikä tarkoittaa, että kattilan ajettavuus parani. Koeajossa havaittiin kuitenkin enemmän häiriöitä ja ongelmia ajettavuudessa kuin 1. ja 2. koeajoissa, mutta ei kuitenkaan enempää kuin 3. koeajossa.

Loppua kohden kattilan ajettavuus parani, mikä saattoi johtua kalsiitin jauhautuvuudesta. Kalsiitin suurehko raekoko saattoi vaikuttaa kattilan ajettavuuteen siten, että kalsiitti ei jauhautunut kovin nopeasti. Pedin raekoko saattoi olla hieman liian karkea jakaumaltaan jatkuvasti, ennen kuin lopussa kalsiitti oli jauhautunut riittävästi ja pedissä mahdollisesti alkoi lisääntymään hienojen jakeiden osuus karkean kalsiitin seassa.

Tämä on perusteltavissa aiemmista tutkimuksista, jossa kunnollista pedin kuplintaa varten tulee olla riittävästi hienoa jaetta, joka tukkii karkeiden rakeiden välejä ja tällöin ilma ei kanavoidu niin helposti pedin rakeiden läpi. Puhdas raekoko jakaumakaan ei välttämättä aina kerro tästä ominaisuudesta, vaan se riippuu useasta tekijästä, kuten rakeiden koosta, muodosta, massaosuuksien ja tilavuusosuuksien suhteesta.

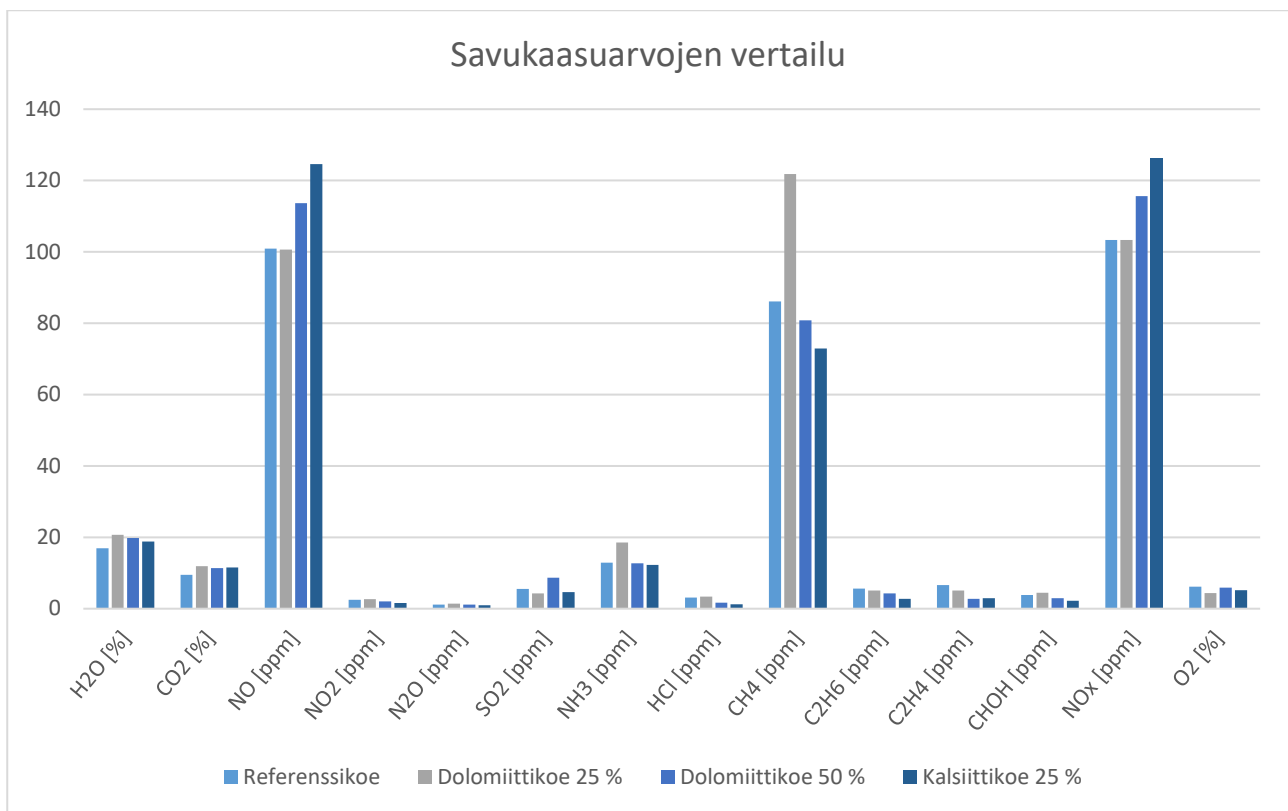
Takavedon lämpötila pysyi koeajon aikana 760-780°C:ssa ja hapen ka. oli n. 7,7 %.

5 TULOKSET

Mittausten ja analysoinnin jälkeen tuloksista luotiin graafiset esitykset ja osa tuloksista listattiin taulukkoon. Eri analyysien tulokset on esitetty seuraavissa osioissa.

5.1 Päästömittaukset

Savukaasumittausten tuloksista laadittiin kuvaaja, jossa näkyvät jokaisen koeajon kosteiden savukaasujen keskiarvoistettu tulos kahdeksan tunnin ajalta.

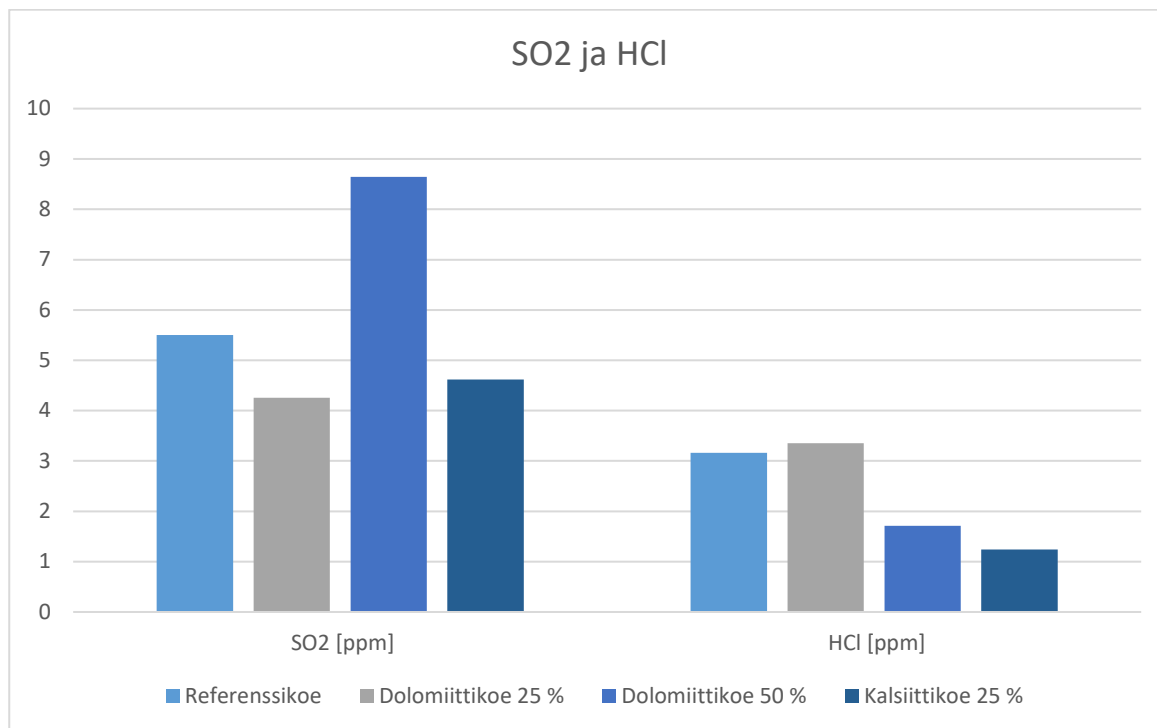


Kuva 10. Savukaasuarvojen vertailu

Savukaasupitoisuudet ovat pysyneet suhteellisen tasaisina eri koeajojen välillä. Suurin muutos on ollut metaanilla, joka on ¼-dolomiittikokeessa noussut n. 40 ppm verrattuna muihin koeajoihin. On vaikea arvioida, että onko dolomiitilla yhteyttä metaanipäästöihin, sillä ½-dolomiittikokeessa metaanipäästöt eivät kuitenkaan poikkea muista koeajoista. Metaanipäästöjen voidaan olettaa johtuvan tulipesän olosuhteista, sillä ne ovat niistä

voimakkaasti riippuvaisia kuten tulipesän lämpötilasta. Leijukerroskattiloilla lämpötila on alhaisempi kuin muilla polttotekniikoilla ja laskee yleensä kuorman laskiessa, mikä vaikuttaa päästöihin.

Kuvassa 11 on esitetty rikkidioksidin ja suolahapon pitoisuus savukaasuissa. Näiden pitoisuudet kiinnostivat, sillä niitä pidetään kattilaosien korroosiota edistävinä yhdisteinä.



Kuva 11. SO₂- ja HCl-pitoisuus savukaasuissa

Kuvaajasta huomataan, että SO₂-pitoisuus on ollut suurimmillaan ½-dolomiittikoeajossa. Tämä on voinut johtua dolomiitista ja sen reagoinnista palamisprosessissa, tai sitten huonosta palamisesta mikä johtui pedin kuplimisen vaikeudesta. Muissa kokeissa pitoisuus on ollut 4-5 ppm:n luokkaa.

HCl-pitoisuuden osalta kalsiitti näyttää toimivan parhaiten, kun savukaasujen suolahappopitoisuutta halutaan vähentää. ¼-kalsiittikokeella päästään jopa parempaan tulokseen kuin ½-dolomiittikokeella. Täytyy kuitenkin huomioida, että pitoisuuksien ollessa pieniä, voi polttoaineen laadun vaihtelu ja muutokset tulipesän olosuhteissa vaikuttaa tulokseen.

5.2 Tuhka-analysit

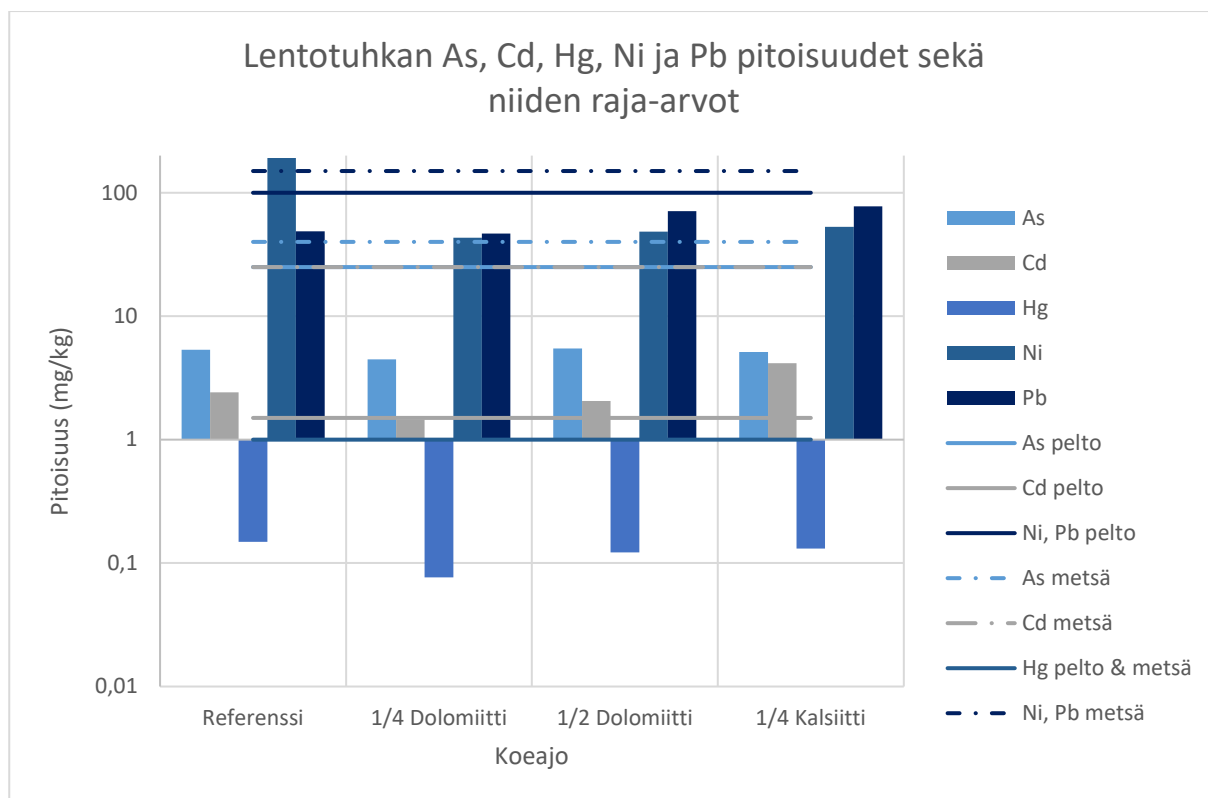
Tuhkanäytteiden analysoinnissa tutkittiin haitta-aineiden pitoisuuksia, joille määritetään raja-arvot ympäristölainsäädännössä ja siihen liittyvissä asetuksissa sekä lannoitelainsäädännössä. Tuhkalannoitteille asetetuilla

raskasmetallien raja-arvoilla estetään haitallisten raskasmetallien liiallinen kertyminen maaperään. Haitallisten pitoisuuksien raja-arvot on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Haitta-ainepitoisuuksien raja-arvot [7]

Alkuaine	Raja-arvo muussa kuin metsäkäytössä (mg/kg ka.)	Raja-arvo metsäkäytölle (mg/kg ka.)
Arseeni (As)	25	40
Elohopea (Hg)	1,0	1,0
Kadmium (Cd)	2,5	25
Kromi (Cr)	300	300
Kupari (Cu)	600	700
Lyijy (Pb)	100	150
Nikkeli (Ni)	100	150
Sinkki (Zn)	1500	4500

Koeajoissa tuhkanäytteitä kerättiin tunnin välein, mutta tulosten analysoinnissa käytettiin koeajon ensimmäistä ja viimeisenä kerättyä näytettä. Lentotuhkan osalta analysoitiin näytteet, jotka kerättiin syklonilta. Analysoinnin jälkeen tuloksista laadittiin kuvaaja, jossa on esitetty sekä pitoisuudet että raja-arvot samassa kuvaajassa (Kuva 12).



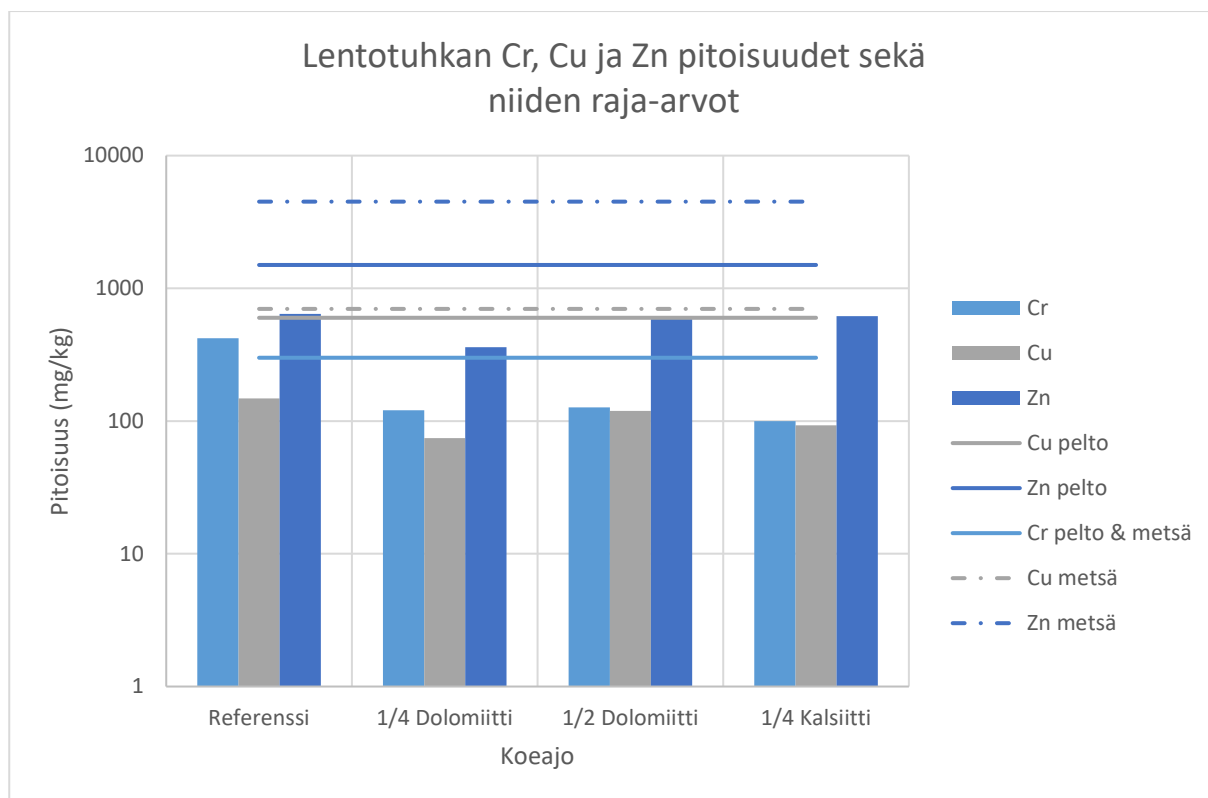
Kuva 12. Lentotuhkan As, Cd, Hg, Ni ja Pb -pitoisuudet (Emilia Niittyviita, Centria)

Kuvaajasta huomataan, että referenssiajon tuhkan Cd- ja Ni-pitoisuudet ovat olleet peltolannoituksen raja-arvojen yläpuolella ennen maa-alkaliaineksilla tehtyjä koeajoja. Muut raskasmetallipitoisuudet ovat olleet sallituissa rajoissa jo ennen koeajon alkua.

¼-dolomiittikokeessa kadmiumin pitoisuus on laskenut peltolannoituksen raja-arvon alapuolelle. Sama voidaan todeta myös nikkelin osalta. ½-dolomiittikokeessa ja ¼-kalsiittikokeessa kadmium pitoisuus nousee kuitenkin raja-arvon yläpuolelle, mutta nikkeli pysyy sallituissa rajoissa.

Yleisesti ottaen tulokset eivät paljon muutu koeajojen välillä. Ehkä huomionarvoista on nikkelpitoisuuden huomattava lasku jo ¼-dolomiittiajolla ja kadmium-pitoisuuden korkea nousu ¼-kalsiittikokeessa.

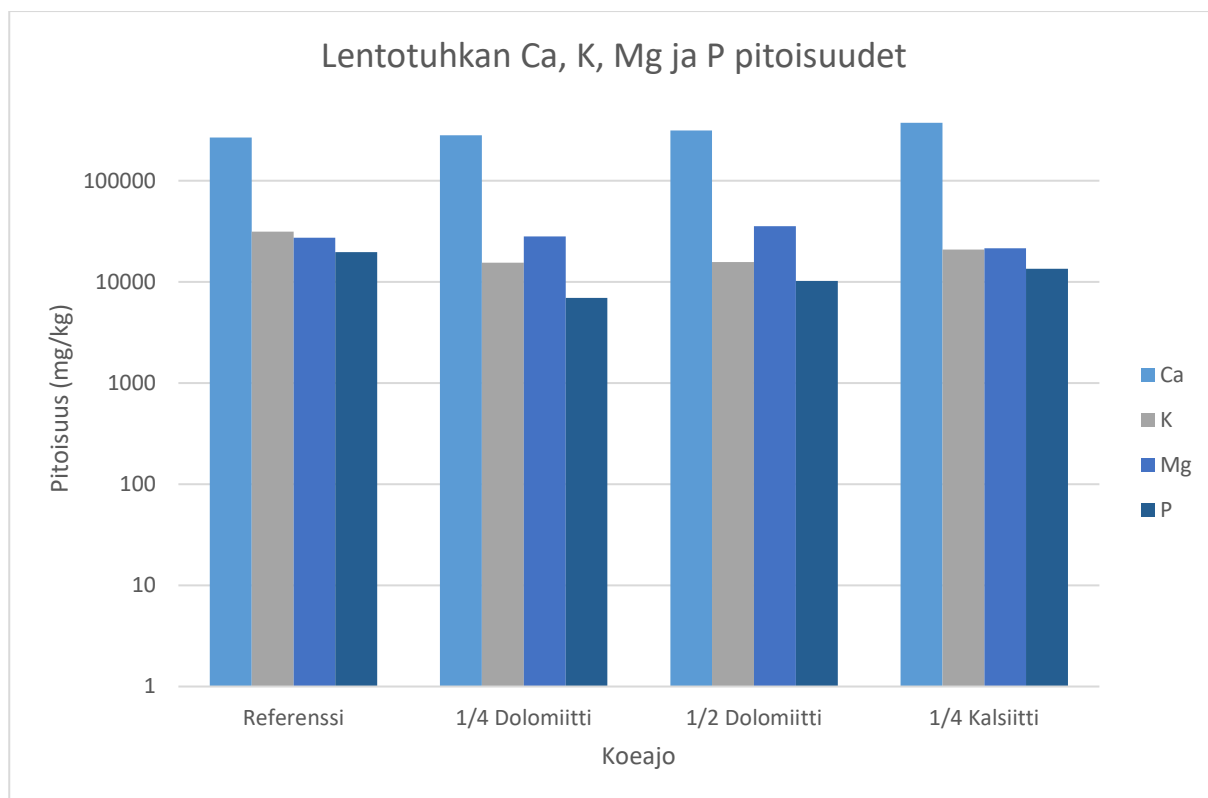
Raskasmetalleille Cr, Cu ja Zn laadittiin oma kuvaaja niiden suuremmista pitoisuuksista ja raja-arvoista johtuen (Kuva 13).



Kuva 13. Lentotuhkan Cr, Cu ja Zn -pitoisuudet (Emilia Niittyviita, Centria)

Referenssiajossa Cr-pitoisuus on ollut yli pelto- ja metsälannoituksen raja-arvon, mutta maa-alkalaineilla tehdyissä koeajoissa kromipitoisuus on pysynyt sallituissa rajoissa. Muut raskasmetallipitoisuudet ovat pysyneet sallituissa rajoissa jo referenssiajosta alkaen. Tulokset ovat myös pysyneet varsin tasaisina koeajojen välillä.

Peltolannoituksen kannalta tärkeistä ravinneaineista Ca, K, Mg ja P laadittiin oma kuvaaja. Kuvaajassa havainnollistetaan näiden alkuaineiden määrää lentotuhkassa.



Kuva 14. Lentotuhkan Ca, K, Mg ja P pitoisuudet

Kuvaajasta huomataan lentotuhkan sisältävän eniten kalsiumia, mutta myös huomattavan määrän kaliumia, magnesiumia ja fosforia.

Tuhka-analysien kattavammat tulokset on esitetty liitteessä 3.

5.3 Korroosioanalyysit

Korroosionäytteiden analysointi teetettiin Eurofins Oy:lla. Näytteet kuvattiin valomikroskoopilla minkä lisäksi syöpyneet pinnat analysoitiin pyyhkäiselektronimikroskoopilla (SEM) ja siihen liitetyllä alkuaineanalyysointilaitteella (EDS).

Näytteiden syöpymistä tarkasteltiin seuraavin kriteerein ja menetelmin:

- Näytteiden ulkopinnoille syntyneen oksidi/korroosiotuotekerroksen paksuus (Optinen mikroskoopi)
- Oksidikerroksen koostumus (EDS)
- Pintojen visuaalinen tarkastelu (SEM/EDS ja optinen mikroskoopi)

Haasteita analysoinnissa aiheutti epoksin kuivumisesta aiheutunut kutistuminen, jolloin epoksi on todennäköisesti irrottanut huomattavan suurelta alalta teräksen pinnalla olevaa oksidi/korroosiotuotekerrosta. Tätä tukee se, että epoksin pinnalla havaitaan olevan osittain kiinni oksidi- ja korroosiotuotteita. Korroosiokeston arvioinnissa pinnalle mahdollisesti muodostuvan suojaavan oksidikerroksen paksuus, rakenne ja koostumus ovat oleellisia tekijöitä, mutta nyt niiden tarkastelu oli huomattavasti vaikeampaa.

Taulukossa 6 ja 7 on esitetty terästen P265GH ja X10CrMoVNb91 oksidikerroksen paksuus ja koostumus sekä huomioita näytteiden ulkokerroksista.

Taulukko 7. Teräs P265GH

Näyte	Teräs	Oksidikerrosten ominaisuudet		
		Paksuus / µm	Koostumus	Huomiot
Referenssikoe	P265GH	5	Fe _x O _y	Ei juuri oksidia, irti, rako
¼-dolomiittikoe	P265GH	10-20	Fe _x O _y	Irti, osin ei oksidia
½-dolomiittikoe	P265GH	10	Fe _x O _y	Irti, osin ei oksidia
¼-kalsiittikoe	P265GH	10-20	Fe _x O _y	Irti, osin 2 kerrosta oksidia
Keskiarvo		11		

Taulukko 8. Teräs X10CrMoVNb91

Näyte	Teräs	Oksidikerrosten ominaisuudet		
		Paksuus / µm	Koostumus	Huomiot
Referenssikoe	X10CrMoVNb91	5	Fe _x O _y	Paikoin hieman ohut oksidi
¼-dolomiittikoe	X10CrMoVNb91	20	(Fe,Cr) _x O _y	Pääosin ei oksidia, osin irti
½-dolomiittikoe	X10CrMoVNb91	10 - 20	(Fe,Cr) _x O _y	Osin oksidi puuttuu, irti
¼-kalsiittikoe	X10CrMoVNb91	10 - 20	Fe _x O _y	Oksidia satunnaisesti
Keskiarvo		14		

Taulukossa 8 on esitetty tulokset kaikkien analysoitujen näytteiden osalta. Niin kuin aiemmin todettiin, teräksistä P265GH ja X10CrMoVNb91 oli koeajokohtaiset näytteet. Näiden lisäksi näytteitä oli 16Mo3:sta ja 13CrMo45:sta siten, että niiden annettiin olla jokaisen dolomiitilla tehdyn koeajon ajan paikallaan ja vaihdettiin vasta sitten uusiin, kun siirryttiin kalsiitilla tehtyyn koeajoon. Näillä kokeilla oli tarkoitus tutkia dolomiitin ja kalsiitin vaikutusta terästen korrodoitumiseen, sekä yleisesti teräsmateriaalia, mikä korrodoituu kokeiden aikana vähiten.

Taulukossa on ilmoitettu kunkin materiaalin oksidikerroksen paksuuden keskiarvot siten, että sekä pienin että suurin arvo on jätetty huomioimatta (Näytteet ja P265GH ja X10CrMoVNb91) ja laskettu keskiarvot. Terästen P265GH ja X10CrMoVNb91 oksidikerroksen paksuus on samaa luokkaa (15 ja 16 μm), teräksen 13CrMo45 noin 23 μm ja teräksen 16Mo3 noin 30 μm .

Taulukko 9. Tulokset

Näyte	Teräs	Oksidikerrosten ominaisuudet		
		Paksuus / μm	Koostumus	Huomiot
1/Referenssikoe	P265GH	5	Fe_xO_y	Ei juuri oksidia, irti, rako
1/¼-dolomiittikoe	P265GH	10-20	Fe_xO_y	Irti, osin ei oksidia
1/½-dolomiittikoe	P265GH	10	Fe_xO_y	Irti, osin ei oksidia
6/½-dolomiittikoe	P265GH	30-50	Fe_xO_y	Pääosin kiinni, ehjä
6/¼-kalsiittikoe	P265GH	10-30	Fe_xO_y	Irti, pääosin on oksidia
1/¼-kalsiittikoe	P265GH	10-20	Fe_xO_y	Irti, osin 2 kerrosta oksidia
Keskiarvo		16		
2/Referenssikoe	X10CrMoVNb91	5	Fe_xO_y	Paikoin hieman ohut oksidi
2/¼-dolomiittikoe	X10CrMoVNb91	20	$(\text{Fe,Cr})_x\text{O}_y$	Pääosin ei oksidia, osin irti
2/½-dolomiittikoe	X10CrMoVNb91	10 - 20	$(\text{Fe,Cr})_x\text{O}_y$	Osin oksidi puuttuu, irti
3/½-dolomiittikoe	X10CrMoVNb91	10 - 30	$(\text{Fe,Cr})_x\text{O}_y$	Osin irti, osin oksidi puuttuu
2/¼-kalsiittikoe	X10CrMoVNb91	10 - 20	Fe_xO_y	Oksidia satunnaisesti
3/¼-kalsiittikoe	X10CrMoVNb91	10	$(\text{Fe,Cr})_x\text{O}_y$	Oksidia vain paikoin, irti
Keskiarvo		15		

4/Dolomiittikokeet	16Mo3	40 - 50	(Fe,Cr) _x O _y	Osin oksidi puuttuu, osin irti, osin 2-kerrosta
4/¼-kalsiittikoe	16Mo3	10 - 20	FexOy	Pääosin irti, osin puuttuu, rako lähes koko pinnalla
Keskiarvo		30		
5/Dolomiittikokeet	13CrMo45	20 - 40	(Fe,Cr) _x O _y	Irti, osin oksidi puuttuu
5/¼-kalsiittikoe	13CrMo45	20 - 30	(Fe,Cr) _x O _y	Pääosin kiinni, osin ei oksidia
Keskiarvo		23		

Kaikkien näytteiden teräksen pinta oli syöpynyt tasaisesti ilman paikallisia syöpymiä. Oksidikerrosten paksuudet vaihtelivat runsaasti sekä kunkin näytteen pinnalla, että rinnakkaisnäytteiden kesken.

Tulosten perusteella voidaan arvioida terästen suojautumista korroosiolta. Tulosten perusteella parhaiten näytti kestävä teräs 13CrMo45. Huonoiten näytti kestävä teräs P265GH, jonka oksidikerros on pääosin irti. Teräksen 16Mo3:lla havaittiin paksuin oksidikerros, mutta oksidikerroksen on osin pysynyt kiinni teräksen pinnassa, jonka perusteella se on kestänyt toiseksi parhaiten.

6 YHTEENVETO

Koeajoista ajettavuudeltaan ja tuloksiltaan paras oli koeajo 2, jossa petihiekasta neljäsosa korvattiin dolomiitilla. Koeajo oli kattilan ajettavuudeltaan varsin normaalia ja koeajo oli myös ainoa, jossa tuhkan kadmium-pitoisuus saatiin raja-arvojen alapuolelle.

Koeajossa 3 nähtiin selvästi, että dolomiittia oli liikaa. Kattilan ajettavuus oli haasteellista, lämpötilagradientti nousi korkeaksi eikä tulokset tuhkassa ja savukaasuissakaan ollut hyviä. Koeajon perusteella dolomiitin liiallisella lisäämisellä saadaan enemmän haittaa kuin hyötyä.

Koeajon 4 osalta voidaan todeta, että kalsiitin suurehko raekoko ei soveltunut kattilaan. Tuhkan ja päästömitausten osalta tulokset olivat lupaavia, mutta vaikka kalsiittia korvattiin petihiekasta vain 25 % oli sen ajettavuus jo osittain haastavaa. Koeajot olisi syytä suorittaa kalsiitin pienemmällä raekoolla, jotta nähtäisiin kalsiitin todellinen potentiaali.

Päästömittausten tulosten osalta todettiin jo aiemmin, että kalsiitilla päästiin pienimpiin HCl-päästöihin ja ¼-dolomiittikokeella pienimpiin SO₂-päästöihin. Näistä tuloksista ei voida kuitenkaan ottaa suuria johtopäätöksiä, sillä erot eri kokeiden välillä olivat pieniä. Tuloksien avulla nähdäänkin enemmän vain pitoisuuksien taso, kun polttoaineena käytetään kuusipohjaista metsätähdehaketta.

Tuhka-analyysien osalta parhaat tulokset saatiin ¼-dolomiittikokeessa. Koeajossa saatiin nikkelin ja kadmiumin pitoisuus tuhkassa laskemaan raja-arvojen alapuolelle. Huomioitavaa kuitenkin on, että ½-dolomiittikokeessa kadmium-pitoisuus oli tuplasti korkeampi mitä ¼-dolomiittikokeessa. Tämän voidaan olettaa liittyvän kattilan haasteelliseen ajettavuuteen ja huonoon palamiseen koeajon aikana. Jos kalsiittikokeessa saatiin hyviä tuloksia päästömittausten kannalta, niin tuhka-analyysien osalta tulokset olivat heikoimpia.

Korroosiokokeissa terästen tulkinta oli haasteellista epoksin kutistumisen vuoksi, jolloin tuloksia pitää tulkita suuntaa antavina. Martensiittinen teräs X10CrMoVNb91, matalahiilinen teräs 13CrMo45 ja hiiliteräs 16Mo3 ovat kaikki laadukkaita teräksiä, mutta tulosten perusteella näistä parhaiten näytti kestävän teräs 13CrMo45. Seostamaton hiiliteräs P265GH näytti kestävän kokeissa huonoiten, mikä oli odotettu tulos. Kun katsotaan koeajokohtaisesti vaihdettuja teräksiä X10CrMoVNb91 ja P265GH, niin niiden osalta vertailua ei pysty tekemään oikeastaan kuin oksidikerroksen paksuutta tutkimalla. Oksidikerroksen muodostuminen perustuu uhripalan pinnan hapettumiseen. Paksuimmat oksidikerrokset muodostuivat ¼-dolomiittikokeessa ja ohuimmat ½-dolomiittikokeessa. Tämän perusteella voidaan sanoa, että runsas dolomiitin määrä ehkäisee teräspinnan hapettumista, mutta vähäisempi määrä ei riitä vähentämään oksidikerroksen muodostumista.

Muuta huomioitavaa koeajojen tuloksissa oli se, että kattilan käyttäytymisellä on vaikutusta poltossa muodostuvaan tuhkaan. Kun kattilan ajettavuudessa oli haasteita, tuhka-analyysien tulokset huononivat.

Koeajoissa painoarvo oli kaikilla kokeilla ja kattilan ajettavuudella. Kokeiden jälkeen maa-alkaliaineksen käyttöä voidaan tutkia myös kannattavuuden kannalta. Koeajojen perusteella tutkimuksia kannattaa jatkaa dolomiitilla, josta tehdä teknistaloudellinen tarkastelu. Teknistaloudellisessa tarkastelussa arvioidaan, että saadanko dolomiitin syötöstä voima- tai lämpölaitoksen tulipesään kannattavaa, jos tuhka voidaan hyötykäyttää.

LÄHTEET

- [1] Savonia ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskus. Mittaus ja testaus. 2022. Saatavissa: <https://energiatutkimus.savonia.fi/fi/palvelut>. [Viitattu 30.9.2022].
- [2] Savonia ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskus. Leijupetikattilaympäristö. 2022. Saatavissa: <https://energiatutkimus.savonia.fi/fi/tilat-ja-laitteet/leijupetikattilaympaeristoe>. [Viitattu 30.9.2022].
- [3] Sulasalmi, J. Alkuaineiden isotooppisuhteiden määrittäminen: mittaus ICP-MS-tekniikalla ja tulosten hyödyntämismahdollisuudet. Oulun yliopisto. Kemian tutkinto-ohjelma. Diplomityö. 2019. Saatavissa: <http://jultika oulu.fi/files/nbnfioulu-201903241358.pdf>. [Viitattu 30.9.2022].
- [4] Myllyviita, A. 4. Aineen rakenteen analyysimenetelmät. PDF-dokumentti. 2020. Saatavissa: https://peda.net/p/myllyviita/spektroskopia/o3ko4aral/ara:file/download/efc4de90cc06693d2947af43d93721e1e8f2dcb0/Orbitaali3_2019_AineenRakenteenAnalyysimenetelmät.pdf. [Viitattu 30.9.2022].
- [5] Measurlabs. Pyyhkäisy-elektronimikroskopia. 2022. Saatavissa: <https://measurlabs.com/fi/menetelmät/pyyhkaisy-elektronimikroskopia-sem/>. [Viitattu 30.9.2022].
- [6] Measurlabs. SEM-EDS-analyysi. 2022. Saatavissa: <https://measurlabs.com/fi/menetelmät/pyyhkaisy-elektronimikroskopia-rontgenspektroskopia-sem-edx/>. [Viitattu 30.9.2022].
- [7] Evira. 2016. Tuhkalannoitteen tuoteselosteohje. Saatavissa: [Ohjeen otsikko \(Arial 16, lihavoitu\) \(ruokavirasto.fi\)](#). [Viitattu 30.9.2022].



Opiskelijankatu 3
78211 Varkaus

Janne Ylönen/Tutkimushalli
Opiskelijankatu 3
78211 Varkaus

Tutkimustodistus



Asiakas vastaa näytteenotosta, säilytyksestä sekä toimituksesta laboratorioon.

Asiakkaan näytetunnus: Centria AMK Kuusihake 14.9.2021
 Näyte saapui laboratorioon: 14.9.2021
 Näytteen analysointi pvm: 20 - 22.9.2021
 Tutkimusnumero: ENE21-Tutkimushalli-12
 Näytteen kuvaus: Kuusihake
 Näytteen massa, g: 2243

Määritys	Tulos	Yksikkö
Kalorimetrinen lämpöarvo	21,19	MJ/kg
Tehollinen lämpöarvo	19,88	MJ/kg
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	9,90	MJ/kg
Kokonaiskosteus	44,7	m- %
Kuiva-aineen tuhkapitoisuus	2,0	m- %

Määritys	Analysointi pvm	Menetelmä
Lämpöarvo	20 - 22.9.2021	SFS-EN 15400*
Kosteuspitoisuus	20 - 22.9.2021	SFS-EN ISO 18134-2
Tuhkapitoisuus	20 - 22.9.2021	SFS-EN ISO 18122**

*Tehollisen lämpöarvon laskemisessa näytteen vetypitoisuutena käytetty arvoa 6,00 %.

Jauhetun näytteen partikkelikoko < 1 mm.

** Tuhkamäärityksessä lämpötilat ISO 1171:n mukaiset.

Savonia-ammattikorkeakoulu Varkaus

Ari Mikkonen ari.mikkonen@savonia.fi

Matemaattisten aineiden lehtori

Puh. 044 785 6780

Opiskelijaryhmä

Sami Kemppainen WU21SP

Jussi Oittinen WU21SP

Vili Kauppi WU21SP

Tero Tuomainen WU21SP

Henri Karvonen WU21SP



SAVONIA

Tutkimustodistus

Opiskelijankatu 3
78211 Varkaus

Petteri Heino/Tutkimushalli
Opiskelijankatu 3
78211 Varkaus



Asiakas vastaa näytteenotosta, säilytyksestä sekä toimituksesta laboratorioon.

Asiakkaan näytetunnus: Centrian kokoomanäyte_1
 Näyte saapui laboratorioon: 25.10.2021
 Näytteen analysointi pvm: 25.10-26.10 ja 28.10-29.10.2021
 Tutkimusnumero: ENE21-Tutkimushalli-18
 Näytteen kuvaus: Kuusihake
 Näytteen massa, g: 1254

Määrittäminen	Tulos	Yksikkö
Kalorimetrinen lämpöarvo	20,98	MJ/kg
Tehollinen lämpöarvo	19,67	MJ/kg
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	9,84	MJ/kg
Kokonaiskosteus	44,4	m- %
Kuiva-aineen tuhkapitoisuus	1,2	m- %

Määrittäminen	Analysointi pvm	Menetelmä
Lämpöarvo	25.10-26.10 ja 28.10-29.10.2021	SFS-EN 15400*
Kosteuspitoisuus	25.10-26.10 ja 28.10-29.10.2021	SFS-EN ISO 18134-2
Tuhkapitoisuus	25.10-26.10 ja 28.10-29.10.2021	SFS-EN ISO 18122**

*Tehollisen lämpöarvon laskemisessa näytteen vetypitoisuutena käytetty arvoa 6,00 %.

Jauhetun näytteen partikkelikoko < 1 mm.

** Tuhkamäärityksessä lämpötilat ISO 1171:n mukaiset.

Savonia-ammattikorkeakoulu Varkaus

Ari Mikkonen ari.mikkonen@savonia.fi

Matemaattisten aineiden lehtori

Puh. 044 785 6780



SAVONIA

Tutkimustodistus

Opiskelijankatu 3
78211 Varkaus

Petteri Heino/Tutkimushalli
Opiskelijankatu 3
78211 Varkaus



Asiakas vastaa näytteenotosta, säilytyksestä sekä toimituksesta laboratorioon.

Asiakkaan näytetunnus: Centrian kokoomanäyte_2
 Näyte saapui laboratorioon: 25.10.2021
 Näytteen analysointi pvm: 26.10-27.10 ja 28.10-29.10.2021
 Tutkimusnumero: ENE21-Tutkimushalli-19
 Näytteen kuvaus: Kuusihake
 Näytteen massa, g: 1420

Määrittäminen	Tulos	Yksikkö
Kalorimetrinen lämpöarvo	20,96	MJ/kg
Tehollinen lämpöarvo	19,65	MJ/kg
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	9,63	MJ/kg
Kokonaiskosteus	45,4	m- %
Kuiva-aineen tuhkapitoisuus	1,4	m- %

Määrittäminen	Analysointi pvm	Menetelmä
Lämpöarvo	26.10-27.10 ja 28.10-29.10.2021	SFS-EN 15400*
Kosteuspitoisuus	26.10-27.10 ja 28.10-29.10.2021	SFS-EN ISO 18134-2
Tuhkapitoisuus	26.10-27.10 ja 28.10-29.10.2021	SFS-EN ISO 18122**

*Tehollisen lämpöarvon laskemisessa näytteen vetypitoisuutena käytetty arvoa 6,00 %.

Jauhetun näytteen partikkelikoko < 1 mm.

** Tuhkamäärityksessä lämpötilat ISO 1171:n mukaiset.

Savonia-ammattikorkeakoulu Varkaus

Ari Mikkonen ari.mikkonen@savonia.fi

Matemaattisten aineiden lehtori

Puh. 044 785 6780

Tutkimustodistus	AR-21-GQ-006741-01	Päivämäärä 29/09/2021	Sivu 1/2
-------------------------	---------------------------	------------------------------	-----------------

s-posti petteri.heino@savonia.fi

Savonia-ammattikorkeakoulu oy

Petteri Heino
PL 6 (Microkatu 1)
70201 KUOPIO
FINLAND

Näyte-erä EUAB30-00016211
Asiakkaan tilausnumero Petteri Heino/Varkaus

Näyttenumero	748-2021-00014533	Näytteen nimi	Rankahake + Kuori
Näytteen kuvaus	Kiinteä biopolttoaine	Asiakkaan näytetunniste	
Näytteenoton aloitus (polttoaine)	13.9.2021	Näytteenottopiste	

Analyysi	Menetelmä	Yksikkö	Tulos	(MU)	Raja-arvo
Alkuainemääritykset					
Hilti (C), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 16948	%	61,8	1.0
Vesif (H), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 16948	%	6,0	0.3
Typpi (N), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 16948	%	0,38	0.10
Happipommihajotus	GQ (a)	SFS-EN ISO 16994 mod.		Tehty	
Kloori (Cl), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 16994 mod.	%	0,009	0.002
Rikki (S), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 16994	%	0,022	0.008
Kokonaiset märkäpoltolla					
Mikroaaltohajotus	YB	SFS-EN ISO 16968:2016		tehty	
Arseeni (As)	YB (a)	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	<0,2	
Elohopea (Hg)	YB (a)	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	<0,08	
Kadmium (Cd)	YB (a)	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	0,16	0.040
Kromi (Cr)	YB (a)	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	3,0	0.84
Kupari (Cu)	YB (a)	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	4,1	1.0
Lyijy (Pb)	YB (a)	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	0,30	0.10
Nikkeli (Ni)	YB (a)	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	2,2	0.80
Sinkki (Zn)	YB (a)	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	33	6.2

Huomautukset

Asiakirjojen osittainen kopioiminen on kielletty. Testausulos koskee vain tutkittua näytettä. Akkreditoituidut menetelmät on arvioitu tutkimuksen suorittaneen laboratorion oman maan akkreditointilimen toimesta. Tämä tutkimustodistus on luotu sähköisesti ja se on tarkastettu ja hyväksytty. Mittausepävarmuuksien osalta lisätietoja saatavilla pyydettyäessä.

= tulos poltikeää viltearvosta

[] = Mahdolliset viltearvot ovat tuloksen perässä hakasuluissa.

GQ - Analysoiva laboratorio on Eurofins Environment Testing Finland (Jyväskylä).

(a) - Analyysit on tehty akkreditoitulla menetelmällä (SFS-EN ISO/IEC 17025:2017 FINAS T039).

YB - Analysoiva laboratorio on Eurofins Ahma - Oulu.

(a) - Analyysit on tehty akkreditoitulla menetelmällä (SFS-EN ISO/IEC 17025:2017 FINAS T131).

Eurofins Environment Testing Finland Oy
Kotivurannantie 1

VAT no: FI27522925

40400 Jyväskylä
FINLAND

www.eurofins.fi



FINAS
Finnish Accreditation Service
T039 (EN ISO/IEC 17025)

Tutkimustodistus	AR-21-GQ-007064-01	Päivämäärä 08/10/2021	Sivu 1/2
s-posti petteri.heino@savonia.fi		Savonia-ammattikorkeakoulu oy Petteri Heino PL 6 (Microkatu 1) 70201 KUOPIO FINLAND Näyte-erä EUAB30-00016658 Asiakkaan tilausnumero	

Näyttenumero	748-2021-00016830	Näytteen nimi	Rankahake + Kuori. Näyte sama kuin 748-2021-00014533.
Näytteen kuvaus	Kiinteä biopolttoaine	Asiakkaan näytetunniste	
Näytteenoton aloitus (polttoaine)	13.9.2021	Näytteenottopiste	

Analyysi	Menetelmä	Yksikkö	Tulos	(MU)	Raja-arvo
Kokonaiset märkäpoltolla					
Mikroalohajotus	YB	SFS-EN ISO 16968:2016		teht/	
Kalsium (Ca)	YB (a)	SFS-EN ISO 11886:2009; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	3600	360
Magnesium (Mg)	YB (a)	SFS-EN ISO 11886:2009; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	460	89
Natrium (Na)	YB (a)	SFS-EN ISO 11886:2009; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	<60	
Kalium (K)	YB (a)	SFS-EN ISO 11886:2009; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	1600	230
Fosfori (P)	YB (a)	SFS-EN ISO 11886:2009; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	390	39
Rikki (S)	YB	SFS-EN ISO 11886:2009; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	280	39
Rauta (Fe)	YB	SFS-EN ISO 11886:2009; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	240	
Alumiini (Al)	YB	SFS-EN ISO 11886:2009; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	120	
Pii (Si)	YB	SFS-EN ISO 11886:2009; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	1000	280
Titaani (Ti)	YB	SFS-EN ISO 11886:2009; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	<60	
Mangaani (Mn)	YB	SFS-EN ISO 11886:2009; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	300	
Barium (Ba)	YB	SFS-EN ISO 11886:2009; SFS-EN ISO 16968:2016	mg/kg ka	60	

Huomautukset

Asiakirjojen osittainen kopioiminen on kielletty. Testausulos koskee vain tutkittua näytettä. Akkreditoituidut menetelmät on arvioitu tutkimuksen suorittaneen laboratorion oman maan akkreditointilimen toimesta. Tämä tutkimustodistus on luotu sähköisesti ja se on tarkastettu ja hyväksytty. Mittausepävarmuuskien osalta lisätietoja saatavilla pyydettyäessä.

= tulos poikkeaa viitearvosta

[] = Mahdolliset viitearvot ovat tuloksen perässä hakasulussa.

YB = Analysoiva laboratorio on Eurofins Ahma - Oulu.

(a) = Analyysit on tehty akkreditoitulla menetelmällä (SFS-EN ISO/IEC 17025:2017 FINAS T131).

Eurofins Environment Testing Finland Oy
Kotivurannantie 1

VAT no: FI27522925

40400 Jyväskylä
FINLAND

www.eurofins.fi

Referenssiajon lentotuhkien alkuainepitoisuudet määritettynä ICP-MS:lla, * AAS:lla ja ** IC:lla.

	Lentotuhka 5.10. klo. 07:20 Referenssiajo		Lentotuhka 5.10. klo. 16:00 Referenssiajo	
	mg/kg	%	mg/kg	%
Al	17600,42	1,76	19716,89	1,97
As	5,29	0,00	5,36	0,00
Ba	1772,20	0,18	3092,76	0,31
Be	5,29	0,00	5,36	0,00
Bi	5,29	0,00	5,36	0,00
Ca*	214640,59	21,46	266595,17	26,66
Cd	2,10	0,00	2,41	0,00
Co	14,70	0,00	14,72	0,00
Cr	510,84	0,05	421,50	0,04
Cu	195,30	0,02	147,83	0,01
Fe	19006,34	1,90	13559,25	1,36
Ga	83,56	0,01	187,94	0,02
Hg	0,15	0,00	0,15	0,00
K	33424,95	3,34	31335,12	3,13
Li	13,17	0,00	8,43	0,00
Mg	25940,80	2,59	27388,74	2,74
Mn	347,30	0,03	19731,90	1,97
Mo	34,94	0,00	23,52	0,00
Na	225,74	0,02	7691,15	0,77
Ni	227,75	0,02	191,64	0,02
P	12820,30	1,28	19736,19	1,97
Pb	48,92	0,00	48,58	0,00
Rb	194,56	0,02	188,26	0,02
S	12716,70	1,27	13420,91	1,34
Sb	26,43	0,00	26,81	0,00
Se	26,43	0,00	26,81	0,00
Sn	11,95	0,00	7,72	0,00
Sr	1077,17	0,11	1472,39	0,15
Tl	0,00	0,00	5,36	0,00
U	5,29	0,00	5,36	0,00
V	87,63	0,01	55,39	0,01
Zn	674,95	0,07	642,90	0,06
Cl-**	2168,49		2756,10	

Referenssiajon pohjatuhkien alkuainepitoisuudet määritettynä ICP-MS:lla, * AAS:lla ja ** IC:lla.

	Pohjatuhka 5.10. klo. 06:30 Referenssiajo		Pohjatuhka 5.10. klo. 16:00 Referenssiajo	
	mg/kg	%	mg/kg	%
Al	19569,98	1,96	33230,04	3,32
As	5,32	0,00	3,97	0,00
Ba	527,62	0,05	760,83	0,08
Be	5,32	0,00	3,97	0,00
Bi	5,32	0,00	3,97	0,00
Ca *	11011,18	1,10	17846,64	1,78
Cd	0,27	0,00	0,20	0,00
Co	3,37	0,00	2,54	0,00
Cr	68,44	0,01	28,23	0,00
Cu	10,64	0,00	12,90	0,00
Fe	6863,23	0,69	6126,34	0,61
Ga	30,42	0,00	36,11	0,00
Hg	0,07	0,00	0,06	0,00
K	19067,59	1,91	25172,82	2,52
Li	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	1412,99	0,14	3292,81	0,33
Mn	486,00	0,05	1120,38	0,11
Mo	5,32	0,00	3,97	0,00
Na	15056,95	1,51	15377,04	1,54
Ni	32,99	0,00	13,41	0,00
P	759,45	0,08	1324,12	0,13
Pb	7,50	0,00	6,32	0,00
Rb	29,28	0,00	50,50	0,01
S	0,00	0,00	0,00	0,00
Sb	26,61	0,00	19,86	0,00
Se	26,61	0,00	19,86	0,00
Sn	5,32	0,00	3,97	0,00
Sr	161,89	0,02	215,81	0,02
Tl	5,32	0,00	3,97	0,00
U	5,32	0,00	3,97	0,00
V	17,28	0,00	15,90	0,00
Zn	78,66	0,01	137,82	0,01

¼-dolomiittikokeen lentotuhkien alkuainepitoisuudet määritettynä ICP-MS:lla, * AAS:lla ja ** IC:lla.

	Lentotuhka 8.10. klo. 07:07 1/4 Dolomiittikoe		Lentotuhka 8.10. klo. 18:32 1/4 Dolomiittikoe	
	mg/kg	%	mg/kg	%
Al	7457,99	0,75	6845,86	0,68
As	4,86	0,00	5,49	0,00
Ba	953,86	0,10	1294,57	0,13
Be	4,86	0,00	5,49	0,00
Bi	4,86	0,00	5,49	0,00
Ca*	293346,28	29,33	314755,90	31,48
Cd	1,94	0,00	2,05	0,00
Co	7,20	0,00	6,54	0,00
Cr	125,59	0,01	126,88	0,01
Cu	89,36	0,01	119,03	0,01
Fe	6814,96	0,68	5426,22	0,54
Ga	45,26	0,00	59,46	0,01
Hg	0,12	0,00	0,12	0,00
K	15310,34	1,53	15703,78	1,57
Li	4,86	0,00	5,49	0,00
Mg	39844,58	3,98	35523,86	3,55
Mn	6576,01	0,66	9239,71	0,92
Mo	20,42	0,00	20,31	0,00
Na	3912,58	0,39	3376,85	0,34
Ni	54,25	0,01	48,35	0,00
P	7290,92	0,73	10213,93	1,02
Pb	31,04	0,00	70,76	0,01
Rb	93,35	0,01	100,60	0,01
S	9553,18	0,96	11415,25	1,14
Sb	24,28	0,00	9,86	0,00
Se	24,28	0,00	27,43	0,00
Sn	5,60	0,00	8,30	0,00
Sr	529,87	0,05	706,53	0,07
Tl	0,00	0,00	5,49	0,00
U	4,86	0,00	5,49	0,00
V	48,17	0,00	51,59	0,01
Zn	337,11	0,03	589,14	0,06
Cl-**	1059,09		1163,05	

¼-dolomiittikokeen pohjatuhkien alkuainepitoisuudet määritettynä ICP-MS:lla, * AAS:lla ja ** IC:lla.

	Pohjatuhka 8.10. klo. 07:04 1/4 Dolomiittikoe		Pohjatuhka 8.10. klo. 18:43 1/4 Dolomiittikoe	
	mg/kg	%	mg/kg	%
Al	19536,23	1,95	26281,38	2,63
As	4,83	0,00	4,74	0,00
Ba	672,46	0,07	545,71	0,05
Be	4,83	0,00	4,74	0,00
Bi	4,83	0,00	4,74	0,00
Ca*	48,31	0,00	64045,48	6,40
Cd	0,24	0,00	0,24	0,00
Co	2,26	0,00	4,44	0,00
Cr	9,76	0,00	30,44	0,00
Cu	9,66	0,00	11,25	0,00
Fe	5762,32	0,58	7310,28	0,73
Ga	34,71	0,00	29,95	0,00
Hg	0,06	0,00	0,09	0,00
K	22801,93	2,28	19024,16	1,90
Li	0,00	0,00	4,74	0,00
Mg	1298,55	0,13	25296,07	2,53
Mn	720,77	0,07	10022,74	1,00
Mo	4,83	0,00	4,74	0,00
Na	14494,69	1,45	11507,34	1,15
Ni	4,83	0,00	7,72	0,00
P	871,98	0,09	1065,47	0,11
Pb	6,77	0,00	4,86	0,00
Rb	37,20	0,00	51,35	0,01
S	0,00	0,00	0,00	0,00
Sb	24,15	0,00	23,69	0,00
Se	24,15	0,00	23,69	0,00
Sn	4,83	0,00	4,74	0,00
Sr	159,03	0,02	230,27	0,02
Tl	4,83	0,00	4,74	0,00
U	4,83	0,00	4,74	0,00
V	13,20	0,00	20,15	0,00
Zn	106,47	0,01	127,33	0,01

½-dolomiittikokeen lentotuhkien alkuainepitoisuudet määritettynä ICP-MS:lla, * AAS:lla ja ** IC:lla.

	Lentotuhka 12.10. klo. 07:43 1/2-Dolomiittikoe		Lentotuhka 12.10. klo. 19:54 1/2-Dolomiittikoe	
	mg/kg	%	mg/kg	%
Al	14003,46	1,40	7721,80	0,77
As	5,77	0,00	4,46	0,00
Ba	152,68	0,02	872,05	0,09
Be	5,77	0,00	4,46	0,00
Bi	5,77	0,00	4,46	0,00
Ca*	279919,22	27,99	280338,83	28,03
Cd	2,16	0,00	1,46	0,00
Co	10,78	0,00	5,44	0,00
Cr	445,24	0,04	120,69	0,01
Cu	172,19	0,02	74,41	0,01
Fe	12957,88	1,30	4838,16	0,48
Ga	10,67	0,00	36,45	0,00
Hg	0,18	0,00	0,08	0,00
K	15958,45	1,60	15491,75	1,55
Li	6,40	0,00	0,00	0,00
Mg	48263,13	4,83	28176,55	2,82
Mn	4706,29	0,47	5695,94	0,57
Mo	36,81	0,00	12,25	0,00
Na	5347,95	0,53	2826,57	0,28
Ni	193,48	0,02	43,30	0,00
P	145,99	0,01	6958,54	0,70
Pb	49,85	0,00	46,81	0,00
Rb	87,42	0,01	99,51	0,01
S	12181,19	1,22	4462,77	0,45
Sb	28,85	0,00	22,29	0,00
Se	28,85	0,00	22,29	0,00
Sn	14,59	0,00	5,90	0,00
Sr	395,15	0,04	506,46	0,05
Tl	0,00	0,00	4,46	0,00
U	5,77	0,00	4,46	0,00
V	158,28	0,02	34,10	0,00
Zn	574,50	0,06	359,96	0,04
Cl-**	383,13		652,74	

½-dolomiittikokeen pohjatuhkien alkuainepitoisuudet määritettynä ICP-MS:lla, * AAS:lla ja ** IC:lla.

	Pohjatuhka 12.10. klo. 07:35 1/2-Dolomiittikoe		Pohjatuhka 12.10. klo. 20:13 1/2-Dolomiittikoe	
	mg/kg	%	mg/kg	%
Al	21292,98	2,13	22257,26	2,23
As	4,59	0,00	4,15	0,00
Ba	642,37	0,06	445,23	0,04
Be	4,59	0,00	4,15	0,00
Bi	4,59	0,00	4,15	0,00
Ca*	14846,40	1,48	90580,91	9,06
Cd	0,23	0,00	0,21	0,00
Co	2,06	0,00	3,52	0,00
Cr	10,50	0,00	37,92	0,00
Cu	10,94	0,00	11,71	0,00
Fe	5039,89	0,50	6605,81	0,66
Ga	30,72	0,00	23,53	0,00
Hg	0,07	0,00	0,07	0,00
K	23640,53	2,36	18207,47	1,82
Li	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	1493,35	0,15	29726,14	2,97
Mn	917,01	0,09	956,43	0,10
Mo	4,59	0,00	4,15	0,00
Na	14477,76	1,45	10902,90	1,09
Ni	6,67	0,00	21,17	0,00
P	8619,90	0,86	1117,84	0,11
Pb	1079,09	0,11	5,29	0,00
Rb	37,63	0,00	55,39	0,01
S	0,00	0,00	0,00	0,00
Sb	22,93	0,00	20,75	0,00
Se	22,93	0,00	20,75	0,00
Sn	4,59	0,00	4,15	0,00
Sr	167,13	0,02	210,00	0,02
Tl	0,00	0,00	0,00	0,00
U	4,59	0,00	4,15	0,00
V	10,26	0,00	21,52	0,00
Zn	122,28	0,01	114,90	0,01

¼-kalsiittikokeen lentotuhkien alkuainepitoisuudet määritettynä ICP-MS:lla, * AAS:lla ja ** IC:lla.

	Lentotuhka 15.10. klo. 03:59 1/4-Kalsiittikoe		Lentotuhka 15.10. klo. 16:05 1/4-Kalsiittikoe	
	mg/kg	%	mg/kg	%
Al	9091,40	0,91	6247,56	0,62
As	4,46	0,00	5,14	0,00
Ba	1479,27	0,15	1734,98	0,17
Be	4,46	0,00	5,14	0,00
Bi	4,46	0,00	5,14	0,00
Ca*	304948,73	30,49	374114,02	37,41
Cd	2,52	0,00	4,15	0,00
Co	10,24	0,00	11,34	0,00
Cr	141,24	0,01	100,00	0,01
Cu	82,84	0,01	93,07	0,01
Fe	9843,96	0,98	6685,16	0,67
Ga	69,10	0,01	81,72	0,01
Hg	0,12	0,00	0,13	0,00
K	18457,42	1,85	20832,05	2,08
Li	4,46	0,00	5,95	0,00
Mg	22683,91	2,27	21510,02	2,15
Mn	9086,05	0,91	13559,32	1,36
Mo	21,91	0,00	16,26	0,00
Na	4549,26	0,45	4725,22	0,47
Ni	67,99	0,01	53,06	0,01
P	13474,81	1,35	13452,49	1,35
Pb	33,38	0,00	77,76	0,01
Rb	116,14	0,01	121,88	0,01
S	6535,89	0,65	6995,38	0,70
Sb	22,29	0,00	25,68	0,00
Se	22,29	0,00	25,68	0,00
Sn	4,82	0,00	5,14	0,00
Sr	749,89	0,07	824,35	0,08
Tl	0,00	0,00	0,00	0,00
U	4,46	0,00	5,14	0,00
V	41,96	0,00	24,65	0,00
Zn	410,25	0,04	618,90	0,06
Cl-**	1144,62		1640,03	

¼-kalsiittikokeen pohjatuhkan alkuainepitoisuudet määritettynä ICP-MS:lla, * AAS:lla ja ** IC:lla.

	Pohjatuhka 15.10. klo. 03:52 1/4-Kalsiittikoe		Pohjatuhka 15.10. klo. 15:50 1/4-Kalsiittikoe	
	mg/kg	%	mg/kg	%
Al	22887,39	2,29	12194,93	1,22
As	4,81	0,00	4,97	0,00
Ba	563,52	0,06	197,12	0,02
Be	4,81	0,00	4,97	0,00
Bi	4,81	0,00	4,97	0,00
Ca*	12959,58	1,30	146966,68	14,70
Cd	0,24	0,00	0,25	0,00
Co	4,59	0,00	2,50	0,00
Cr	64,92	0,01	8,92	0,00
Cu	10,46	0,00	9,95	0,00
Fe	8352,26	0,84	3039,28	0,30
Ga	32,64	0,00	11,83	0,00
Hg	0,06	0,00	0,07	0,00
K	24485,08	2,45	8564,89	0,86
Li	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2365,74	0,24	5750,37	0,58
Mn	668,91	0,07	559,32	0,06
Mo	4,81	0,00	4,97	0,00
Na	15961,50	1,60	4409,75	0,44
Ni	50,14	0,01	4,97	0,00
P	914,34	0,09	26176,03	2,62
Pb	7,83	0,00	2,49	0,00
Rb	36,69	0,00	40,29	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00
Sb	24,06	0,00	24,86	0,00
Se	24,06	0,00	24,86	0,00
Sn	4,81	0,00	4,97	0,00
Sr	160,01	0,02	224,91	0,02
Tl	4,81	0,00	4,97	0,00
U	4,81	0,00	4,97	0,00
V	19,28	0,00	14,17	0,00
Zn	89,36	0,01	87,57	0,01