

Masuunikuonan soveltuvuus jätteen- polttolaitoksen petimateriaaliksi

Konsta Keijälä

Opinnäytetyö
Toukokuu 2020
Tekniikan ala
Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka

Tekijä(t) Keijälä, Konsta	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2020
	Sivumäärä 72	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Masuunikuonan soveltuvuus jätteenpolttolaitoksen petimateriaaliksi		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Kari Hytönen, Hannariina Honkanen		
Toimeksiantaja(t) Riikinvoima Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Riikinvoima Oy:n jätteenpolttolaitoksella petimateriaalin sintraantumisen aiheuttamat ongelmat käynnistivät pilot-jakson, jossa testattiin ilmajähdytetystä masuunikuonasta valmistettua petimateriaalia. Petimateriaalina käytettiin aikaisemmin luonnonhiekkaa, jolla oli taipumus muodostaa merkittäviä kerrostumia tulipesän kattoon sekä sykloniin. Kerrostumat johtivat pahimmillaan koko voimalaitoksen alasajoon, josta aiheutui merkittäviä kustannuksia.</p> <p>Tavoitteena oli tutkia, miten ilmajähdytetty masuunikuona soveltuu kiertopetiteknikkaan perustuvan jätteenpolttolaitoksen petimateriaaliksi. Tavoitteena oli tarkastella petimateriaalin vaihdon vaikutuksia sintraantumien suuruuteen ja koostumukseen, kattilan leijukerroslämmönsiirtimen toimintaan sekä tulipesään syötetyn petimateriaalin määrään. Lisäksi arvioitiin ilmajähdytetyn masuunikuonan käyttöä materiaalitehokkuuden näkökulmasta. Tutkimusaineiston muodostivat pääasiassa tulipesän ja syklonin alueelta tehdyt havainnot, prosessin mittaushistoria sekä petimateriaalista otetut näytteet.</p> <p>Ilmajähdytetyn masuunikuonan todettiin olevan potentiaalinen vaihtoehto petimateriaaliksi jätteenpolton yhteydessä. Tulipesän sekä syklonin alueen kerrostumat pienenevät merkittävästi pilot-jaksolla. Petimateriaalin kierto ja leijukerroslämmönsiirtimen toiminta parantivat myös luonnonhiekkapetiin verrattuna. Lisäksi prosessista löydettiin kehityskohteita petimateriaalin seulonnan sekä tukipolttoaineenkäytön osalta, joita toimeksiantaja pystyi pilot-jakson jälkeen kehittämään eteenpäin. Luonnonhiekan korvaaminen ilmajähdyteyllä masuunikuonalla oli myös kiertotaloutta edistävä ratkaisu.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Masuunikuona, kiertopetikattila, jätteenpolto		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Keijälä, Konsta	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2020 Language of publication: Finnish
	Number of pages 72	Permission for web publication: x
Title of publication Feasibility of blast furnace slag as bed material for a waste incineration plant		
Degree programme Bachelor's Degree Programme in Energy and Environmental Technology		
Supervisor(s) Hytönen Kari, Honkanen Hannariina		
Assigned by Riikinvoima Oy		
Abstract <p>The problems caused by the sintering of bed material at Riikinvoima Oy waste incineration plant started a pilot period, in which bed material made from air-cooled blast furnace slag was tested. Natural sand was used as the bed material earlier, which tended to form significant deposits on the top of the furnace as well as in the cyclone. At worst, the deposits caused a shut-down of the entire power plant, which resulted in significant costs.</p> <p>The aim was to investigate the feasibility of the air-cooled blast furnace slag as the bed material for a waste incineration plant based on the circulating fluidized bed technology. The target was to examine the effects of changing the bed material on the size and composition of the deposits, the operation of the fluidized bed heat exchanger in the boiler and the amount of the bed material fed into the furnace. In addition, the use of air-cooled blast furnace slag was evaluated from the point of view of material efficiency. The research data consisted mainly of observations made in the area of the furnace and the cyclone, the measurement data of the process and samples taken from the bed material.</p> <p>Air-cooled blast furnace slag was found to be a potential alternative bed material for waste incineration. Deposits in the furnace and cyclone area decreased significantly in the pilot period. The circulation of the bed material and the operation of the fluidized bed heat exchanger also improved compared to the natural sand bed. In addition, areas for development were found in the bed material screening and the use of auxiliary fuel, which the assignor was able to develop further. Replacing natural sand with air-cooled blast furnace slag was also found to be a solution that advances circular economy.</p>		
Keywords/tags (subjects) Blast furnace slag, circulating fluidized bed boiler, waste incineration		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

1	Johdanto	5
1.1	Opinnäytetyön tausta.....	5
1.2	Opinnäytetyön tavoitteet.....	6
1.3	Työn toteuttaminen	7
1.4	Toimeksiantajana Riikinvoima Oy	8
2	Jätteenpoltto Suomessa	10
2.1	Historia	10
2.2	Jätteenpolttolaitokset Suomessa	11
2.3	Polttokelpoiset jätteet Suomessa	11
2.3.1	Yhdyskuntajäte	11
2.3.2	Kierrätyspolttoaineet.....	13
3	CFB-kattilan prosessikuvaus.....	14
3.1	Kiertoleijukerrosjärjestelmä	15
3.2	CFB-kattilan vesi- ja höyrypiiri.....	18
3.3	Ilmajärjestelmä	21
3.4	Polttoaineensyöttöjärjestelmät	21
3.5	Petimateriaali- ja pohjatuhkajärjestelmät	23
4	Palaminen leijukerropoltossa	23
5	Lämmönsiirto leijukerrossessa.....	26
5.1	Suspensiotiheys	27
5.2	Partikkelikoko	28
5.3	Petimateriaalin ominaisuudet	29
6	Likaantumismekanismit leijukerrosoltossa.....	30
6.1	Agglomeraatio ja pedin sintraantuminen	30
6.2	Agglomeraation havaitseminen	32
6.3	Agglomeraation ennaltaehkäisy.....	33
6.4	Sintraantumisen erityispiirteet Riikinvoima Oy:n CFB-kattilassa	34

	2
7 Masuunikuona petimateriaalina	35
8 Pilot-koe ilmajäähdytetyllä masuunikuonalla.....	39
9 Tulokset	43
9.1 Petimateriaalin kierto.....	44
9.2 BMHE:n lämmönsiirto	45
9.3 Sintraantumet syklonissa ja tulipesässä.....	50
9.4 Petinvaihtotarpeen arviointi	55
9.5 Kiertotalousnäkökulma	57
9.6 Jatkotoimenpiteet	58
10 Pohdinta.....	59
10.1 Tuloksien arviointi	59
10.2 Jatkotutkimuskohteet	61
10.3 Lopuksi.....	62
Lähteet	63
Liitteet.....	65
Liite 1. Kattilan tehosäätö 15.5.2019 – 25.8.2019	65
Liite 2. Kattilan tehosäätö 15.5.2018 – 25.8.2018	66
Liite 3. Toimitetun masuunikuonan seulontatulokset	67
Liite 4. Sykloninäytteiden visuaaliset muutokset.....	68
Liite 5. Petin materiaalitase 12.5. – 18.5.2019	69
Liite 6. Sykloninäytteiden alkuainepitoisuudet.....	70
Liite 7. Tulipesän lämpötilamittaus +24,1m hiekkapetillä	71
Liite 8. Tulipesän lämpötilamittaus +24,1m masuunikuonapetillä.....	72

Kuviot

Kuvio 1. Ekovoimalaitoksen toiminta	8
Kuvio 2. Riikinvoima Oy:n omistajayhtiöt.....	9
Kuvio 3. Sekajätteen keskimääräinen koostumus	12
Kuvio 4. Periaatekuva Riikinvoiman CFB-kattilan kiertoleijukerrosjärjestelmän toiminnasta	16
Kuvio 5. Kiinteän polttoaineen palamisen vaiheet.....	24
Kuvio 6. Lämmönsiirtokertoimen ja leijutusnopeuden välinen funktio	27
Kuvio 7. Lämmönsiirtokertoimen ja partikkelikoon välinen funktio	29
Kuvio 8. Agglomeroitumismekanismit leijukerrospoltoissa	31
Kuvio 9. Syklonisintraantumien kerrostumat alkuaineittain	35
Kuvio 10. Masuunikuonan jäähtytys ja käsittely	36
Kuvio 11. Alkalipitoisuus syklonikierrossa	41
Kuvio 12. Magnesium- ja mangaanipitoisuus syklonikierrossa	42
Kuvio 13. Piipitoisuus syklonikierrossa	43
Kuvio 14. Polven painemittaus	45
Kuvio 15. Leijukerroslämmönsiirtimen paluulämpötila	47
Kuvio 16. BMHE:n lämpöteho.....	48
Kuvio 17. Kiertokaasun virtaussäätö	49
Kuvio 18. Syklonin sintraantuma hiekkapetillä 10 viikon ajojakson jälkeen	51
Kuvio 19. Syklonin sintraantuma masuunikuonapetillä 15 viikon ajojakson jälkeen.....	52
Kuvio 20. Sintraantumien rakenne masuunikuonapetillä	53
Kuvio 21. Tulipesän katto hiekkapetillä.....	54
Kuvio 22. Tulipesän katto masuunikuonapetillä	55
Kuvio 23. Uuden petimateriaalin syöttö.....	56

Taulukot

Taulukko 1. Omistajayhtiöiden omistusosuudet.....	9
Taulukko 2. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuuksia	14

Taulukko 3. Masuunikuonan kemiallinen koostumus	37
Taulukko 4. Masuunikuonan fysikaaliset ominaisuudet	38

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta

Leijukerrospolttoon perustuvissa voimalaitoskattiloissa petimateriaalina toimii yleensä luonnonkvartsihiekkä. Sen käyttöä leijutusmateriaalina puoltavat helppo saatavuus, edullinen hinta sekä soveltuvuus useille eri polttoainetyypeille. Luonnonkvartsihiekkalla on kuitenkin ominaisuuksia, jotka yhdessä suuren alkalipitoisuuden omaavien polttoaineiden kanssa aiheuttavat haasteita voimalaitoksen käytettävyydessä. Tällaisia polttoaineita ovat esimerkiksi puuperäiset polttoaineet, kuten kuori ja metsätähdehake, sekä biomassat, lietteet ja yhdyskuntajäte.

Petimateriaalin sintraantuminen on haasteista suurimpia. Peti sintraantuu, kun luonnonhiekan sisältämä kvartsi reagoi yhdessä alkalimetallien kanssa muodostaen alkalisulan. Alkalisula tarttuu hiekkapartikkeleiden pinnalle ja liimaa niitä tehokkaasti kiinni toisiinsa. Liimautuminen voi tapahtua myös tuhkan sulamisen seurauksena. Toisiinsa kiinni liimautuneita partikkeleita kutsutaan agglomeraateiksi. Agglomeraatit pyritään poistamaan kierrosta jatkuvatoimisen petituhkan seulonnan avulla. Uutta petimateriaalia myös lisätään jatkuvasti tulipesään, jotta petin partikkelikoko pysyy optimaalisena ja leijutus toimii normaalisti.

Riikinvoima Oy:n Ekovoimalaitoksella petimateriaalin sintraantuminen on aiheuttanut ongelmia laitoksen käyttöön otosta asti. Ekovoimalaitoksen kiertopetitekniikkaan perustuvassa kattilassa poltetaan yhdyskuntajätettä, joka on polttoaineena erittäin haasteellinen juuri sintraantumien kannalta. Sintraantumia on esiintynyt erityisesti syklonissa sekä tulipesän katossa. Sykloniin muodostuneet sintraantumet ovat johtaneet pahimmassa tapauksessa petimateriaalin normaalin kierron tukkeutumiseen, minkä seurauksena voimalaitos on jouduttu ajamaan alas. Kesken lämmityskauden tapahtuvat ennakoimattomat alasajot aiheuttavat merkittäviä kustannuksia tuotantotappioiden sekä puhdistustöiden takia.

Ekovoimalaitoksella ongelmaan lähdettiin etsimään ratkaisua uudesta petimateriaalista. Eurofins Expert Services Oy:n tekemän selvityksen pohjalta tähän tarkoitukseen valittiin Fescon Oy:n toimittama ilmajähdytetty masuunikuona, joka otettiin käyttöön toukokuussa 2019 voimalaitoksen huoltoseisokin jälkeen. Testijaksoa masuunikuonalla jatkettiin voimalaitoksen seuraavaan huoltoseisokkiin asti, elokuun 2019 loppuun saakka. Testijaksolta saatujen tulosten perusteella arvioitiin masuunikuonan soveltuvuutta leijukerrospoltoon jätekattilassa ja tehtiin päätös testauksen mahdollisesta jatkamisesta talven lämmityskauden yli. Lisäksi ilmajähdytetyn masuunikuonan valinta petimateriaaliksi mahdollisesti uusiutumattomana luonnonvarana pidettävän luonnonhiekan korvaamisen kiertotaloustuotteella.

1.2 Opinnäytetyön tavoitteet

Tässä opinnäytetyössä päätavoitteena oli selvittää, soveltuuko ilmajähdytetty masuunikuona kiertopetiteknikkaan perustuvan voimalaitoksen petimateriaaliksi, kun polttoaineena on erilliskerätty yhdyskuntajäte. Tarkastelun kohteena oli erityisesti tulipesän sekä syklonin alueella esiintyneet petimateriaalin sintraantumet. Työssä tutkittiin, voidaanko ilmajähdytetyn masuunikuonan avulla ehkäistä niiden syntymistä. Prosessista kerätyn datan sekä huoltoseisokkien yhteydessä tehtyjen havaintojen ja näytteenottojen perusteella verrattiin hiekka- ja masuunikuonapetejä ja selvitettiin eroja niiden välillä.

Sintraantumien tutkimisen lisäksi opinnäytetyössä selvitettiin, millaisia vaikutuksia ilmajähdytetyn masuunikuonan käyttöönotolla on petimateriaalin kierto, leijukerroslämmönsiirtimen toimintaan ja tulipesän lämpötilaprofiiliin yleisellä tasolla. Tavoitteena oli tutkia, mihin suuntaan lämmönsiirto kehittyy tulipesän ulkopuolisessa leijukerroslämmönsiirtimessä, kuinka kuumana sieltä palaava petimateriaali tulee tulipesään ja miten se puolestaan vaikuttaa tulipesän yläosaa jäähdyttävän kiertokaasun määrän. Lisäksi vertailtiin uuden petimateriaalin syöttömääriä tulipesään luonnonhiekan ja ilmajähdytetyn masuunikuonan välillä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli myös tuoda esille kiertotalousnäkökulma. Petimateriaalin vaihto luonnonkvartsihiekkasta terästeollisuuden sivutuotteena syntyvään masuunikuonaan vaikuttaa osaltaan voimalaitoksen materiaalitehokkuuteen, joten asiaa analysoitiin lyhyesti myös kiertotaloussektori huomioiden.

1.3 Työn toteuttaminen

Tämän opinnäytetyön lähtökohtana oli prosessissa havaittu ongelma, jonka keskiössä oli luonnonhiekan sintraantuminen. Tutkimusongelmaa lähdettiin ratkaisemaan vaihtamalla petimateriaali ilmajähdytettyyn masuunikuonaan. Selkeä ongelmanasettelu ja muutossyklin toteuttaminen tekevät tästä opinnäytetyöstä kehittämistutkimuksen. Tutkimusmenetelmät olivat pääasiassa kvalitatiivisia, eli laadullisia, sillä tutkimusaineistoa kerättiin useista eri lähteistä ja tavoitteena oli saavuttaa selkeä ymmärrys tutkittavasta ilmiöstä.

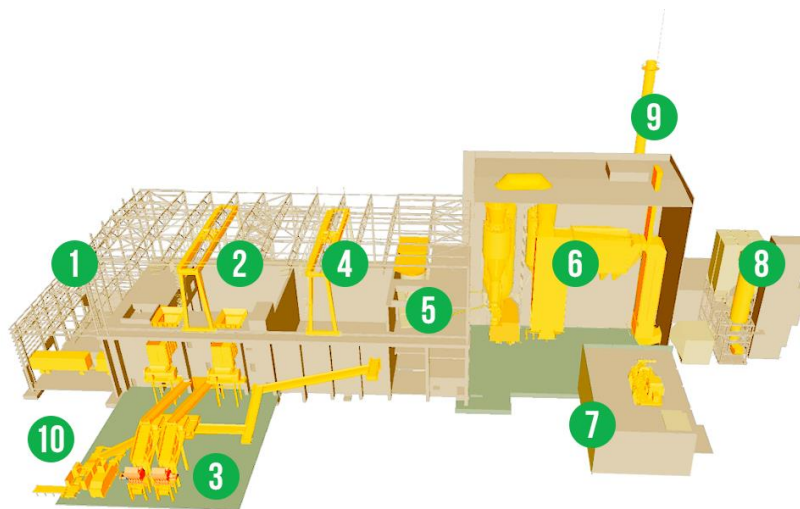
Opinnäytetyön tietoperusta kirjoitettiin jätteenpolttoa, kiertopetiteknikkaa (CFB, Circulating Fluidized Bed), lämmönsiirtymistä, palamista ja petin sintraantumista käsittelevien teosten sekä tutkimusten pohjalta. CFB-tekniikkaan perustuvan jätteenpolttolaitoksen erityispiirteiden havainnollistamiseksi sisällössä on hyödynnetty myös laitostoimittajan toimintakuvauksia Riikinvoima Oy:n Ekovoimalaitoksesta. Ilmajähdytetyn masuunikuonan ominaisuuksista ja petin sintraantumismekanismeista hankittiin tietoa erityisesti Eurofins Expert Services Oy:n tekemien tutkimusten ja heidän asiantuntijoidensa avulla.

Toukokuussa 2019 huoltoseisokin yhteydessä tehtiin havaintoja sekä kerättiin kerrostumanäytteitä tulipesän ja syklonin eri osista yhdessä Eurofins Expert Services Oy:n kanssa. Tarkoituksena oli kerätä aineistoa siltä ajalta, kun petimateriaalina on käytetty luonnonkvartsihiekkää. Huoltoseisokin päätyttyä aloitettiin pilot-jakso ilmajähdytetyllä masuunikuonalla ja sitä jatkettiin noin kolmen kuukauden ajan syksyn huoltoseisokkiin asti. Erityisesti alkuvaiheessa kierrossa olevasta petimateriaalista otettiin näytteitä tiiviillä tahdilla. Pilot-jakson ajalta prosessista saatiin kerättyä myös dataa, jota voitiin verrata vastaavaan ajankohtaan kesältä 2018. Näin pystyttiin analysoimaan eroja kahden eri petimateriaalin välillä. Syksyn huoltoseisokin yhteydessä

(syyskuu 2019) toistettiin keväällä tehdyt näytteenotot sekä havainnointit tulipesässä ja syklonissa. Näin saatiin vertailukelpoista ainestoa kriittisistä kohteista, kun petimateriaalina oli käytetty ilmajähdytettyä masuunikuonaa. Opinnäytetyön tulokset koottiin yhteen syksyn 2019 aikana.

1.4 Toimeksiantajana Riikinvoima Oy

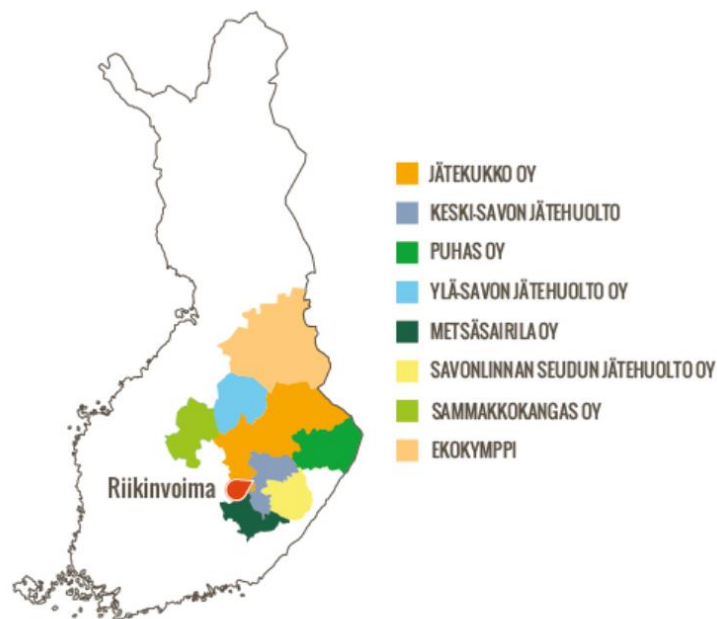
Riikinvoima Oy:n Ekovoimalaitos on Leppävirralla, Pohjois-Savossa toimiva jätteenpolttolaitos, joka on ollut tuotannollisessa käytössä vuodesta 2017 lähtien. Laitokselle toimitetaan vuositason 145 000 tonnia polttokelpoista jätettä Itä- ja Keski-Suomen sekä Kainuun alueelta. Toiminta-alue kattaa yhteensä 59 kuntaa. Ekovoimalaitoksen kiertopetitekniikkaan perustuva jätekattila on Suomessa ainoa tätä tekniikkaa hyödyntävä jätteenpolttolaitos (ks. kuvio 1). Polttoaineteholtaan 54 MW:n kattilalla saadaan tuotettua kaukolämpöä Varkauden kaupungille n. 180 GWh/v ja sähköä n. 90 GWh/v. (Ekovoimalaitos n.d.)



1. Jätteen vastaanotto
2. Saapuneen jätteen varasto
3. Jätteenkäsittelylaitteisto
4. Käsitellyn jätteen varasto
5. Polttoaineen syöttölaitteisto
6. Kiertopetikattila
7. Höyryturbiini ja kaukolämmönvaihtimet
8. Savukaasun puhdistuslaitteisto
9. Piippu
10. Käsitellyn jätteen paalaus

Kuvio 1. Ekovoimalaitoksen toiminta (Ekovoimalaitos n.d.)

Ekovoimalaitoksen omistuksesta ja ylläpidosta vastaa Riikinvoima Oy. Varkauden Aluelämpö Oy:n sekä kahdeksan kunnallisen jätehuoltoyhtiön (ks. kuvio 2) muodostama yhtiö toimii omakustannusperusteisesti (ns. Mankala-periaate). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että osakasyhtiöt huolehtivat voimalaitoksen rakentamiseen sekä tuotantoon liittyvistä kustannuksista omistusosuutensa mukaan ja saavat omistamaltaan voimalaitokselta energiaa omakustannushintaan. Riikinvoima Oy:n omistajaosuudet jakautuvat taulukon 1 mukaan. (Ekovoimalaitos n.d.)



Kuvio 2. Riikinvoima Oy:n omistajayhtiöt (Ekovoimalaitos n.d.)

Taulukko 1. Omistajayhtiöiden omistusosuudet

Riikinvoima Oy, omistajayhtiöt	Omistusosuus
Jätekukko Oy, Kuopio	15,80 %
Kainuun Jätehuollon kuntayhtymä Ekokymppi	3,16 %
Keski-Savon Jätehuolto, Varkaus	7,52 %
Metsäsairila Oy, Mikkeli	4,36 %
Puhas Oy, Joensuu	11,08 %
Sammakkokangas Oy, Saarijärvi	2,36 %
Savonlinnan Seudun Jätehuolto Oy	3,16 %
Ylä-Savon Jätehuolto Oy, Iisalmi	5,16 %
Varkauden Aluelämpö Oy	47,40 %

Riikinvoima Oy:n lisäksi pilot-jaksolla mukana olivat testausorganisaatio Eurofins Expert Services Oy sekä materiaalitoimittaja Fescon Oy. Eurofins Expert Services Oy selvitti petihiekan sintraantumisen juurisyytä sekä suoritti alkuainekohtaiset tarkastelut Ekovoimalaitokselta kerätyille petimateriaali-, tuhka- ja sintraantumänäytteille. Fescon Oy toimitti Ekovoimalaitokselle ilmajäähdytetystä masuunikuonasta valmistettua petimateriaalia, joka korvasi aikaisemmin petimateriaalina käytetyn luonnonhiekan.

2 Jätteenpolto Suomessa

2.1 Historia

Jätteenpolton ensiaskeleet otettiin 1800-luvun lopulla, kun Euroopan suurissa kaupungeissa havahduttiin jätteiden aiheuttamiin hygieniaongelmiin. Ensimmäinen jätettä polttava laitos aloitti toimintansa 1874 Nottinghamissa, Englannissa. Koska aluksi tarkoituksena oli helpottaa kaupunkien kärsimää jäteongelmaa, ei osattu kiinnittää huomiota poltosta aiheutuviin terveydelle haitallisiin savukaasuihin. Vasta 1980-luvun puolella jätteenpoltoista aiheutuvista päästöistä oli saatu riittävästi tutkittua tietoa ja sen myötä niihin osattiin reagoida tiukentamalla päästövaatimuksia. Suomessa tämä tarkoitti sitä, että vanhoja jätteenpolttolaitoksia poistettiin kokonaan käytöstä ja uusien rakentaminen lopetettiin. (Jätteen energiahyödyntäminen n.d.)

Myöhemmin 1980-luvulla tekniikka otti sekä polttoprosessin että savukaasujen puhdistusmenetelmien osalta suuria harppauksia, mikä johti voimalaitosten savukaasupäästöjen radikaaliin laskuun. EU-alueella käytäntöä yhtenäistettiin vuonna 2005 käyttöönotetulla jätteenpolttodirektiivillä, joka asetti uudet ja hyvin tiukat raja-arvot jätteen energiahyödyntämisestä aiheutuville päästöille EU-maissa. Heti seuraavana vuonna Suomessa aloitettiin rakennustyöt Kotkassa ja Riihimäellä, jonne nousivat ensimmäiset uuden direktiivin mukaiset jätteenpolttolaitokset. (Jätteen energiahyödyntäminen n.d.)

2.2 Jätteenpolttolaitokset Suomessa

Tällä hetkellä energiahyödynnettävää jätettä poltetaan Suomessa kahdeksalla eri paikkakunnalla. Nämä jätteenpolttolaitokset sijaitsevat Kotkassa, Lahdessa, Leppävirralla, Mustasaarella, Oulussa, Riihimäellä (kaksi voimalaitosta), Tampereella ja Vantaalla. Lisäksi Saloon on rakenteilla uusi jätettä pääpolttoaineena hyödyntävä voimalaitos, ja se on suunniteltu käyttöönotettavaksi loppuvuodesta 2020. Suomessa on myös lukuisia voimalaitoksia, joiden ympäristölupa sallii jätteen rinnakkaispolton tavallisten polttoaineiden ohella. Näissä voimalaitoksissa pystytään kuitenkin hyödyntämään laadultaan vain parhaita ja tasalaatuisimpia jätelaatuja, niin kutsuttuja kierrätyspolttoaineita. Kierrätyspolttoaineiden energiahyödyntämisen käänköpuolena on niiden kierrätysmahdollisuus, joka tulisi materiaalitehokkuuden näkökulmasta ottaa huomioon ennen kyseisten jätteiden polttoon ohjaamista. (Kivo n.d.)

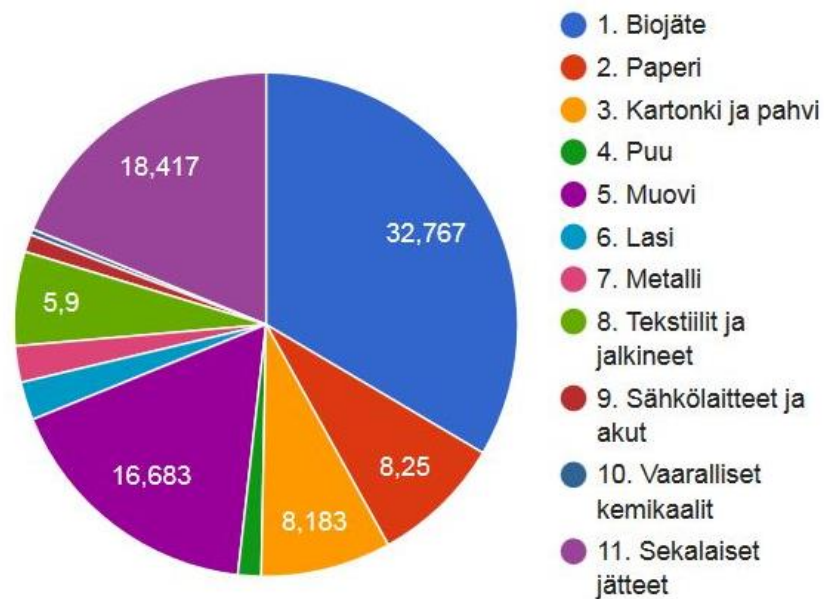
Suomen jätteenpolttolaitosten polttotekniikka perustuu pitkälti arinapoltoon, sillä Lahti Energia Oy:n kaasutuslaitosta ja Riikinvoima Oy:n kiertopetikattilaa lukuun ottamatta kaikki jätevoimalat ovat arinapolttolaitoksia. Käytetty tekniikka suomalaisissa jätteenpolttolaitoksissa on Euroopan mittakaavassa edistyksellistä, ja siksi niissä pystytään hyödyntämään jätteiden energiasisältö parhaimmillaan jopa 95 %:n tehokkuudella. Nykyisten jätteenpolttolaitosten yhteenlaskettu polttokapasiteetti oli vuonna 2017 yhteensä 1,7 miljoonaa tonnia jätettä. Tästä jätemäärästä tuotetaan jätteenpolttolaitoksissa kaukolämpöä n. 3 TWh/v (8 % kaukolämmön kokonaistuotannosta) sekä sähköä n. 1,2 TWh/v (2 % sähkön kokonaistuotannosta). (Kivo n.d.)

2.3 Polttokelpoiset jätteet Suomessa

2.3.1 Yhdyskuntajäte

Sekajätteen koostumuksesta on toteutettu Suomessa useita tutkimuksia eri paikkakunnilla paikallisten jätehuoltoyhtiöiden toimesta. Suomen Kiertovoima ry (Kivo) on koonnut kotisivuilleen näiden koostumustutkimusten tuloksia. Sekajätteen koostumus on jaettu luokittelua varten kolmeen eri tasoon, joista karkein jaottelu perustuu

11 eri materiaali- ja tuoteryhmään. Vuosina 2015-2017 tehtyjen kuuden eri koostumustutkimuksen pohjalta on selvitetty suomalaisen kotitalousjätteen keskimääräinen koostumus yksinkertaisimman luokittelun mukaan. Kuviossa 3 on esitetty Suomen Kiertovoima Ry:n näiden tutkimusten pohjalta tekemä laskelma eri jakeiden massaosuuksista sekajätteessä. (Kivo n.d.)



Kuvio 3. Sekajätteen keskimääräinen koostumus (Kivo n.d.)

Arinapolttolaitoksissa sekajäte voidaan syöttää tulipesään ilman erillistä käsittelyä. Riikinvoima Oy:n kiertopetikattila vaatii kuitenkin palakooltaan homogeenisen polttoaineen ja siksi laitokselle tuotava yhdyskuntajäte käsitellään erikseen. Laitteisto koostuu kaksivaiheisesta murskauksesta, repivästä esimurskauksesta sekä leikkaavasta jälkimurskauksesta. Esimurskauksen jälkeen hienojakoinen aines erotetaan täryseulalla ennen jälkimurskausta. Murskausten välissä jätteestä poistetaan myös magneettinen metalli, ja lisäksi jälkimurskauksen jälkeen on sijoitettu vielä toinen pienempi magneetti sekä pyörrevirtaerotin, jolla poistetaan ei-magneettinen metalli. Valmis polttoaine siirretään yhteisiä kuljettimia pitkin jätebunkkeriin. (Jätteenkäsittelyn toimintakuvaus 2015, 8.)

2.3.2 Kierrätyspolttoaineet

Jätteen energiahyödyntämisessä voidaan sekajätteen lisäksi käyttää laadultaan parempia kierrätyspolttoaineita. Niiden valmistukseen käytettävät jättejakeet ovat jo lähtökohtaisesti puhtaampia ja tasalaatuisempia kuin sekajäte, minkä lisäksi mekaanisen käsittelyn avulla niistä poistetaan palamisen kannalta ongelmalliset jakeet, kuten metallit, mineraalit sekä biojäte. Kierrätyspolttoaineet vaativat tasaisen partikkelikoon, ja siksi ne murskataan mekaanisen käsittelyn yhteydessä. Kierrätyspolttoaineilla on alkuainekoostumukseen perustuva laatuluokitus, jonka perusteella ne on jaoteltu neljään eri luokkaan, SRF I, II ja III sekä RDF-jäte. SRF I ja II -kierrätyspolttoaineiden valmistukseen käytettävät jättejakeet koostuvat pääasiassa puhtaista pakkausmateriaaleista sekä puujätteestä, joita syntyy lähinnä teollisuudessa ja kaupan alalla. Suomessa näitä parempilaatuisia kierrätyspolttoaineita hyödynnetään lähinnä Lahti Energia Oy:n kaasutuslaitoksella. SRF III ja RDF -luokkien kierrätyspolttoaineiden valmistus tapahtuu huomattavasti heikkolaatuisemmista jakeista, ja käytännössä ne ovat laadultaan verrattavissa sekajätteeseen. Riikinvoima Oy:n kiertopetikattilassa poltettava käsitelty sekajäte on käytännössä ominaisuuksiltaan RDF-jätettä (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama & Korhonen. 2016, 150; Jätteen energiahyödyntäminen n.d.). Kierrätyspolttoaineiden ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2.

Syntypaikalla ja materiaalikoostumuksella on suuri merkitys kierrätyspolttoaineiden laadun kannalta. Erilaisten materiaalien, kuten puun, muovin ja metallien, osuudet polttoaineessa on otettava huomioon, koska niillä on suuri vaikutus polttoprosessiin. PVC-muovi on esimerkki materiaalista, joka lisää polttoaineen klooripitoisuutta. Alakankaan ja muiden (2016) mukaan Juvonen (1998) ja Hiltunen (1998) kertovat suuren klooripitoisuuden lisäävän kuumakorroosioriskiä kattilan tulistinpinnoilla. Alkalimetallien määrän kasvu polttoaineessa saattaa puolestaan lisätä likaantumista kattilapinnoilla. (Alakangas ym. 2016, 150-151.)

Taulukko 2. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016, 151)

Ominaisuus	Kaikkien vaihteluväli	SRF I Keskiarvo eri analyyseistä	SRF III Keskiarvo eri analyyseistä
Kosteus, %	5–30	9,1 irtotavara 3,2 pelletit	28,5 irtotavara 3,2 pelletit
Irtotiheys saapumistilassa, kg/m ³		180 irtotavara 300 pelletit	210 irtotavara 300 pelletit
Tuhka, % kuiva-aineessa	1–16	5,9	9,5
Haihtuvat aineet, % kuiva-aineessa	70–86		
Lämpöarvot, MJ/kg			
Kalorimetrinen	20–40	24,7	22,9
Tehollinen kuiva-aineessa	17–37	23,1	21,5
Tehollinen saapumistilassa		20,8	14,6
Alkuainekoostumus, p-% k.a.			
Hiili, C	48–75	56,0	52,9
Vety, H	5–9	7,4	7,3
Typpi, N	0,2–0,9	0,63	0,71
Rikki, S	0,05–0,20	0,16	0,13
Kloori, Cl	0,03–0,7	0,19	0,71
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen		Hapettavat / pelkistävät olosuhteet	
Muodonmuutoslämpötila, DT		1 150–1 220 / 1 100–1 200 °C	
Puolipallolämpötila, HT		1 200–1 260 / 1 200–1 250 °C	
Juoksevuuslämpötila, FT		1 210–1 265 / 1 220–1 270 °C	

SRF I = syntypistelajiteltu pakkauksia ja puujätettä sisältävä seos

SRF III = syntypistelajiteltu kotitalouden jäte

3 CFB-kattilan prosessikuvaus

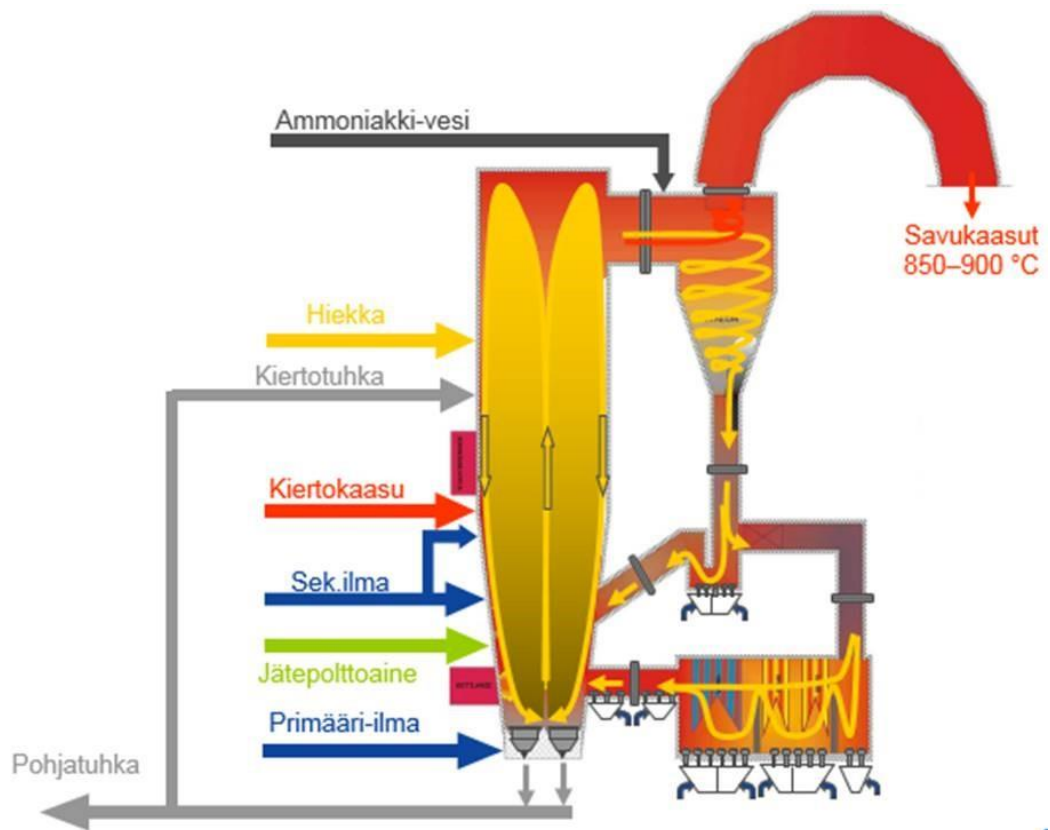
Leijukerrospolton tekniikka perustuu suureen määrään inerttiä petimateriaalia, jota leijutetaan tulipesässä. Petimateriaalina käytetään tyypillisesti luonnonkvartsihiekkää. Kiinteä polttoaine syötetään kuumen (750–950 °C) petimateriaalin joukkoon, jossa se palaa tasaisesti. Muihin polttotekniikoihin verrattuna leijukerrospoltto mahdollistaa useita erilaisia variaatioita käytetyn polttoaineen suhteen. Tekniikka soveltuu jopa kaikkein huonolaatuisimmille polttoaineille, eivätkä suuret laadunvaihtelut polttoaineen osalta aseta ylivoimaisia esteitä niiden poltolle. Leijukerrospoltoissa syntyvät typenoksidien (NO_x) päästöt ovat myös pienet. (Hyppänen & Raiko 2002, 490.)

Leijukerrospoltoon perustuvat kattilat jaotellaan tyypillisesti kahteen päätyyppiin, kerrosleijukattiloihin (BFB) sekä kiertopetikattiloihin (CFB). Suurimmat erot näiden

kahden kattilatyypin välillä ovat petimateriaalin partikkelikoossa sekä leijutusnopeudessa. BFB-kattiloissa petimateriaali muodostaa tulipesän pohjalle kerroksen, joka saatetaan arinasuuttimien läpi puhallettavalla leijutusilmalla kuplimaan. CFB-kattiloissa leijutusilman nopeutta kasvatetaan siten, että kuplivan petin muodostama rajapinta leijukerroksen ja tulipesän yläosan välillä häviää ja petimateriaali lähtee kiertämään kaasuvirran mukana. Petimateriaalin partikkelikoko on CFB-kattiloissa alle 0,5 mm ja leijutusnopeuden maksimiarvot liikkuvat tyypillisesti 8-10 m/s. BFB-kattiloissa käytetään suurempaa partikkelikokoja leijutusmateriaalin osalta (noin 1 mm) ja pienempää leijutusnopeutta (1-3 m/s). Petimateriaali kiertää CFB-kattiloissa niin sanottua ”kuumaa kiertoa”, eli tulipesästä leijutusilman mukana ylös nousevat partikkelit kulkeutuvat sykloniin, jossa kiinteät partikkelit erotetaan savukaasuista ja ne palautetaan takaisin tulipesään (Hyppänen & Raiko 2002, 490-491). Tässä luvussa esitellään edellä mainituista tarkemmin kiertopetikattilan tyypilliset komponentit ja niiden toiminta.

3.1 Kierto-leijukerrosjärjestelmä

Tulipesä, sykloni ja petimateriaalin palautusjärjestelmään kuuluvat kierrätys sulku (polvilukko) sekä leijukerroslämmösiirrin ovat kierto-leijukerrosjärjestelmän pääkomponentit. Palamisilmaa syötetään tulipesään arinasuutinten kautta nopeudella, joka saa leijukerroksessa olevat partikkelit leviämään koko tulipesän alueelle (Kattilan yleiskuvaus 2017, 7). Näiden partikkeleiden muodostaman kiintoainesuspension tiheys vaihtelee tulipesän korkeussuunnassa, alaosassa tiheys on suurin ja yläosaa kohti mentäessä se pienenee. Tulipesän alueen sisäinen kierto muodostuu, kun seinäpintojen lähelle kulkeutuvat partikkelit muodostavat tihentymiä, jotka lopulta riittävän massan saavutettuaan putoavat painovoimaisesti alas. Tulipesän keskiosassa, suuremman virtausnopeuden alueella, yksittäisten kiintoainehiukkasten kulkusuunta on ylöspäin. Tämä saa aikaan kierron, joka sekoittaa tehokkaasti petiin syötettävää polttoainetta leijutusmateriaalin joukkoon ja tasaa siten palamista sekä lämpötiloja. Kuviossa 4 on havainnollistettu petimateriaalin kiertoa tulipesän, syklonin sekä leijukerroslämmösiirtimen välillä. (Hyppänen & Raiko 2002, 505.)



Kuvio 4. Periaatekuva Riikinvoiman CFB-kattilan kierto-leijukerrosjärjestelmän toiminnasta (Esittelymateriaali n.d.)

Osa kiintoainepartikkeleista kulkeutuu tulipesästä savukaasuvirtauksen mukana sykroniin, joka toimii kiintoaine-erottimena. Syklonin avulla savukaasuvirran mukana lähtevät kiintoainepartikkelit saadaan palautettua takaisin tulipesään, jolloin leijukerros-materiaalin määrä pysyy optimaalisena ilman merkittävää petimateriaalin lisäämistä. Se myös osaltaan lisää palamattomien hiukkasten viipymäaika ja siten tehostaa palamista ja rikinsidontaa. Syklonierottimen toiminta perustuu keskipakoerotukseen. Syklonin erottelukyvystä puhuttaessa käytetään termiä leikkausraja. Se tarkoittaa kiintoainehiukkasten halkaisijaa, jolla 50 % sykroniin tulevasta materiaalista saadaan palautettua takaisin kiertoon. Tämä raja on tyypillisesti 10-30 μm , mutta normaaleissa olosuhteissa kierrossa olevien partikkeleiden halkaisijat ovat tätä suurempia ja sykloneilla päästään lähes 100 % erottelukyvyyneen. (Hyppänen & Raiko 2002, 516-517.)

Syklonierottimia voi olla CFB-kattiloissa yksi tai useampia. Lisäksi niiden sijainnissa ja rakenteessa voi eri valmistajien kattiloissa olla eroja. Yksinkertaisin ratkaisu on tulipesän ulkopuolelle rakennettu jäähdyttämätön sykloni. Tällöin tulipesän ja syklonin välille on rakennettu erillinen yhdyskanava, jonka kautta kiintoaine kulkeutuu syklooniin. Erilliset syklonit ovat tyypillisesti teräsrakenteisia ja sisäpuoli on muurattu kulu- tusta ja kuumuutta kestäväällä materiaalilla. Jäähdytetyssä syklonissa seinärakenne on vesi- tai höyrykiertoista putkistoa, joka toimii osana kattilan höyrystinpiiriä. Osassa kattiloita sykloni voi olla kokonaan integroitu tulipesän yhteyteen. Sykloneiden kokoa pienentämällä ja määrää lisäämällä saavutetaan parempi erottelukyky. (Vakkilainen 2017, 230.)

Syklonissa savukaasuvirrasta erotettu petimateriaali palautuu takaisin tulipesään kierrätys suluksi kutsutun järjestelmän kautta. Kierrätys sulkuun tuotu leijutusilma ja sinne tuleva petimateriaali saavat aikaan paineprofiilin, joka laskee tulipesää kohti mentäessä. Tällä estetään kaasuvirtauksen ohjautuminen syklonin suuntaan, jossa vallitseva painetaso on matalampi kuin tulipesässä. Kierrätys sulun toteutukseen on useita erilaisia ratkaisuja. Tyypillisin rakenne perustuu polvilukkoon. (Hyppänen & Raiko 2002, 518.)

CFB-kattiloiden kiertojärjestelmään voi kuulua myös ulkoinen leijukerros lämmönsiirrin, BMHE (Bed Material Heat Exchanger), jonka avulla voidaan suorittaa osa höyrystyksen ja tulistuksen vaiheista. Niiden rakenne vaihtelee hieman eri kattilavalmistajilla, mutta toimintaperiaate on pääpiirteittäin samanlainen. Syklonista palautuvaa kuumaa petimateriaalivirtaa leijutetaan leijukerros lämmönsiirtimen lohkojen läpi, jolloin sen sisältämä lämpöenergia saadaan siirrettyä lämmönsiirtopintojen kautta kattilan vesi- ja höyrypiiriin. Samalla petimateriaali jäähtyy ja se voidaan palauttaa tulipesään. Suoraan tulipesään palautettavan ja leijukerros lämmönsiirtimen läpi kulkevan materiaalivirran välistä suhdetta voidaan säätää mekaanisen säätöventtiilin avulla, millä on suuri merkitys kattilan säädettävyyden ja tulipesän lämpötilojen kannalta. Sijoittamalla tulistin- ja höyrystinpintoja leijukerrokseen voidaan myös estää putkipinnoilla tapahtuvaa korroosiota, joka saattaisi hankalilla polttoaineilla aiheut-

taa ongelmia lämmönsiirtopintojen sijaitessa savukaasukanavassa. Toisaalta leijutusnopeus leijukerroslämmönsiirtimessä on pidettävä optimaalisena, jotta vältetään peltimateriaalin eroosiovaikutus. (Kattilan yleiskuvaus 2017, 10.)

3.2 CFB-kattilan vesi- ja höyrypiiri

Syöttövesitankki

Syöttövesitankki toimii kattilan syöttöveden varastona. Se on sylinterin muotoinen säiliö, joka on sijoitettu yleensä kattilasalissa 10-30 m korkeuteen. Tällä sijoittelulla varmistetaan riittävä nostokorkeus syöttövesipumpuille ja samalla estetään syöttövesipumppuja vaurioittava kavitaatio. Syöttövesisäiliöön tuleva vesi koostuu prosessista palaavista lauhteista sekä vedenkäsittelylaitoksella valmistetusta lisävedestä. Syöttövesisäiliössä on vettä tyypillisesti 20-60 minuutiksi mahdollisia häiriötilanteita varten ja monesti riittävä syöttöveden määrä varmistetaan vielä erillisellä lisävesisäiliöllä. (Vakkilainen 2017, 95.)

Syöttövesitankissa poistetaan myös syöttöveteen liuenneita kaasuja, jotka muutoin aiheuttaisivat korroosiota kattilan vesi- ja höyrypiirissä. Tämä tapahtuu lämmittämällä syöttövesi matalapainehöyryllä. Veden lämpötila nostetaan vastaamaan syöttövesisäiliön höyrystymislämpötilaa, jolloin syöttövesi on kylläisessä tilassa ja kaasujen liukoisuus lähellä nollaa. Tämä saa aikaan kaasujen höyrystymisen syöttövedestä ja ne voidaan poistolinjaa pitkin ohjata pois säiliöstä. Kaasunpoistojärjestelmä voi sijaita syöttövesitankin päällä tai se voi olla integroitu säiliön sisälle (ns. Stork-säiliö). (Kattilan yleiskuvaus 2017, 23-24; Vakkilainen 2017, 95-96.)

Ekonomaiseri

Ekonomaiseri on savukaasukanavaan sijoitettu lämmönsiirtopinta, jolla suoritetaan syöttöveden esilämmitys lähelle kyllästymislämpötilaa. Ekonomaiseri on sijoitettu yleensä savukaasukanavan loppuosaan tulistimien jälkeen. Savukaasuissa on vielä tässä vaiheessa paljon lämpöenergiaa, joka voidaan hyödyntää syöttöveden esilämmityksessä. Syöttöveden esilämmityksellä parannetaan koko prosessin hyötysuhdetta. (Vakkilainen 2017, 64-65.)

Lieriö

Lieriö on kattilan vesi- ja höyrypiirin kuuluva säiliö, joka jakaa sinne tulevan syöttöveden laskuputkia pitkin kattilan eri höyrystinpinnoilla. Höyrystinpinnoilta kylläinen veden ja höyryn seos palaa nousuputkia pitkin takaisin lieriöön, jossa tapahtuu veden ja höyryn erottaminen. Ilmiötä, jossa höyrystymisen aikaansaama tiheysero saa veden ja höyryn seoksen palautumaan höyrystinpinnoilta lieriöön ilman apuenergiaa, kutsutaan luonnonkierroksi. Lieriössä on jakolevyjä tasaamassa sinne tulevan vesi-höyryseoksen virtausta, ja samalla ne tehostavat höyryn erotusta. Jakolevyjen lisäksi lieriössä on myös tyypillisesti pisara- ja syklonierottimia, jotka parantavat erotustehokkuutta vielä lisää. Vedestä erotettu kylläinen höyry syötetään lieriön yläosasta tulistimille. (Vakkilainen 2017, 98-102.)

Höyrystimet

Kylläisen veden faasimuutos kylläiseksi höyryksi suoritetaan höyrystimillä. CFB-kattiloissa höyrystys tapahtuu tyypillisesti tulipesän seinille sijoitetuilla putkipaneeleilla (Vakkilainen 2017, 63). Jätteenpolttolaitoksissa korrosio on tulipesän alueella voimakasta ja siksi näissä laitoksissa höyrystinpinnat sijoitetaan yleensä savukaasukanavaan sekä ulkoiseen leijukerroslämmösiirtimeen. Riikinvoima Oy:n CFB-kattilassa ensimmäiset höyrystinpinnat sijaitsevat säteilyvedoksi (vertical pass) kutsutussa pystysuorassa osuudessa, joka on jaettu väliseinällä kahteen osaan. Savukaasu kulkee ensiksi pystysuoraan alaspäin säteilyvedon ensimmäiseen osaan, kääntyy alhaalla ja nousee säteilyvedon toista osaa pystysuoraan ylöspäin. Molempien säteilyvedon osien seinäpinnat ovat membraaniseinää, jolla höyrystyminen tapahtuu. Lisäksi toiseen säteilyvetoon on sijoitettu pystysuoria höyrystinpaneeleita. Säteilyvedon toisen osan jälkeen savukaasukanavassa on vaakasuora osuus, vaakaveto (horizontal pass). Vaakavedon seinä- ja kattorakenne perustuu samaan membraaniseinään kuin säteilyvedossa. Sinne on myös sijoitettu osa tulistimista sekä konvektiohöyrystin. (Kattilan yleiskuvaus 2017, 21.)

Tulistimet

Lieriöstä tulevan kylläisen höyryn lämpötilan nosto suoritetaan tulistimilla. Tulistimien sijoittelu kattilaan voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Tulipesän alueelle sijoit-

tettavissa tulistimissa lämmönsiirto perustuu säteilyyn ja savukaasukanavassa konvektioon. Tämän jaottelun mukaan tulistintyypit on myös nimetty säteily- ja konvektiotulistimiksi. Lisäksi on olemassa verhotulistimia, jotka sijoitetaan heti tulipesän jälkeen savukaasukanavaan. Verhotulistin kestää hyvin likaantumista ja sen tehtävänä on suojata savukaasukanavassa sen jälkeen olevia konvektiotulistimia. Verhotulistimen putkijako on hyvin tiivis, jolloin savukaasut jäähtyvät nopeasti eivätkä likaantumista aiheuttavat tuhkakomponentit tartu enää savukaasukanavan loppupäässä oleviin tulistimiin. (Vakkilainen 2017, 126; 128.)

Sijoittamalla sopivassa suhteessa säteily- ja konvektiotulistimia tulistukselle saadaan laaja toiminta-alue kattilan eri kuormilla. Viimeisen tulistimen sijoittamisessa on huomioitava höyryn loppulämpötila, sillä viimeisellä tulistimella tehtävä lämpötilan nosto ei saa tapahtua liian suurella gradientilla. Höyryn loppulämpötilaa säädellään myös tulistinpakettien jälkeen sijoitetuilla syöttövesiruiskuilla, joiden tehtävänä on jäähdyttää höyryn lämpötilaa. (Vakkilainen 2017, 63-64; 126.)

Jätteenpolttolaitoksissa polttoaineen suuri klooripitoisuus aiheuttaa korroosiota tulistinputkilla, joka on otettava huomioon tulistimien sijoittelussa. Riikinvoima Oy:n CFB-kattilassa tämä on ratkaistu sijoittamalla viimeiset tulistimet leijukerroslämmönsiirtimeen, jossa suoritetaan höyryn tulistus haluttuun loppulämpötilaan. Ennen loppullista tulistusta leijukerroslämmönsiirtimessä höyryn lämpötilaa on nostettu vaakavedon konvektiotulistimilla. (Kattilan yleiskuvaus 2017, 26.)

Ulospuhallus

Voimalaitoksen kattilaveteen kertyy käytön aikana epäpuhtauksia. Kattilaveden riittävän puhtausasteen takaamiseksi lieriöstä poistetaan jatkuvan ulospuhalluksen avulla vettä ulospuhallussäiliöön. Ulospuhallussäiliössä korkeapaineinen vesi paisutetaan vastaamaan ilmanpainetta. (Vakkilainen 2017, 98.)

3.3 Ilmajärjestelmä

CFB-kattiloiden palamisilma syötetään eri ilmatasojen kautta tulipesään. Ilmatasot on nimetty primääri-, sekundääri- ja tertiääri-ilmaksi, riippuen siitä mihin kohtaan tulipesää ne syötetään. Lisäksi kiertopetikattiloissa ilmansyöttöä tarvitaan kierrätyslussa sekä leijukerroslämmösiirtimessä, millä varmistetaan kierrossa olevan petimateriaalin palautuminen tulipesään. Jos kiinteän polttoaineensyöttö on toteutettu pneumaattisesti, tarvitsee myös tämä järjestelmä oman ilmavirran. (Vakkilainen 2017, 152-153.)

Primääri-ilma tuodaan tulipesään sen pohjalla olevan suutinarinan kautta. CFB-kattiloissa primääri-ilman tehtävänä on palamiseen tarvittavan ilman lisäksi saada aikaan riittävä nopeus kiintoainepartikkeleille, jotta ne lähtevät kiertoon kaasuvirran mukana. Suutinarina jakaa primääri-ilman koko tulipesän leveydelle optimaalisen leijutuksen saavuttamiseksi. Loput tarvittavasta palamisilmasta syötetään tulipesään sekundääri- ja tertiääri-ilmatasojen kautta. Primääri- ja palamisilman paineistus suoritetaan siihen soveltuvilla ilmapuhaltimilla, jotka tyypillisesti ovat keskipakoispuhaltimia. Paineistuksen jälkeen primääri- ja palamisilma lämmitetään esilämmittimissä, eli luvoissa (luftvorwärmer), ennen tulipesään syöttöä. (Kattilan yleiskuvaus 2017, 11.)

Tulipesässä syntyvät savukaasut poistetaan sieltä savukaasupuhaltimen avulla ja samalla se luo tulipesän puolelle kevyen alipaineen. CFB-kattiloissa osa savukaasuista kierrätetään takaisin tulipesään erillisellä puhaltimella. Tästä käytetään nimitystä kiertokaasu. Kiertokaasun avulla voidaan säädellä tulipesän yläosan lämpötilaa sekä vaikuttaa palamisessa syntyviin typenoksidien päästöihin. (Vakkilainen 2017, 153.)

3.4 Polttoaineensyöttöjärjestelmät

Kiinteä polttoaine

Riikinoima Oy:n kiertopetikattilassa kiinteän polttoaineensyöttö tulipesään on toteutettu pneumaattisesti kahdella linjalla. Jätekahmari nostaa käsiteltyä polttoai-

netta pyöreisiin siiloihin (ns. päiväsiilot), joiden pohjalla on kaksi kappaletta purkuruuveja. Siiloissa olevan polttoaineen purkua on tehostettu pyörivällä sekoittimella, johon kiinnitetyt varret kaapivat polttoainetta siilon reunalta ja pohjalta kohti purkuruuveja. Ruuveilta polttoaine putoaa lamellikuljettimelle, jonka alkupäässä on polttoainevirtaa tasaava tasku. Kallistettua lamellikuljetinta pitkin polttoaine nousee ylöspäin, kunnes se putoaa sulkusyöttimelle. Lamellikuljettimen yläpäässä on patjantaustela, jonka tehtävänä on pitää sulkusyöttimelle tuleva jätevirta vakiona. Sulkusyötin annostelee polttoaineen varsinaiseen syöttölinjaan pneumaattista kuljetusta varten. (Kattilan yleiskuvaus 2017, 15.)

Kiinteät biomassapohjaiset polttoaineet syötetään tulipesään yleensä edellä esitetyn laitteiston kaltaisella järjestelmällä, johon kuuluu tyypillisesti purkuruuveja, kuljettimia sekä sulkusyöttimiä. Järjestelmät vaihtelevat hieman käytetyn polttoaineen ominaisuuksien mukaan. Pneumaattisen kuljetusjärjestelmän tilalla voi olla esimerkiksi tunkijaruuvi tai pudotuskuilu, jonka kautta sulkusyöttimeltä tuleva polttoaine putoaa painovoimaisesti tulipesään. Osassa CFB-kattiloita polttoaine syötetään syklonista palaavan petimateriaalin joukkoon. Syöttökohtia kattilassa on vähintään kaksi ja ne sijaitsevat yleensä tulipesän alaosassa. Kahdennetulla linjalla varmistetaan polttoaineensyöttö myös toisen linjan mennessä tukkoon. Useammilla syöttölinjoilla saadaan aikaan tasaisempi polttoainejakauma ympäri tulipesää, millä on positiivinen vaikutus esimerkiksi tulipesän lämpötila- ja painejakaumiin. (Vakkilainen 2017, 227.)

Polttimet

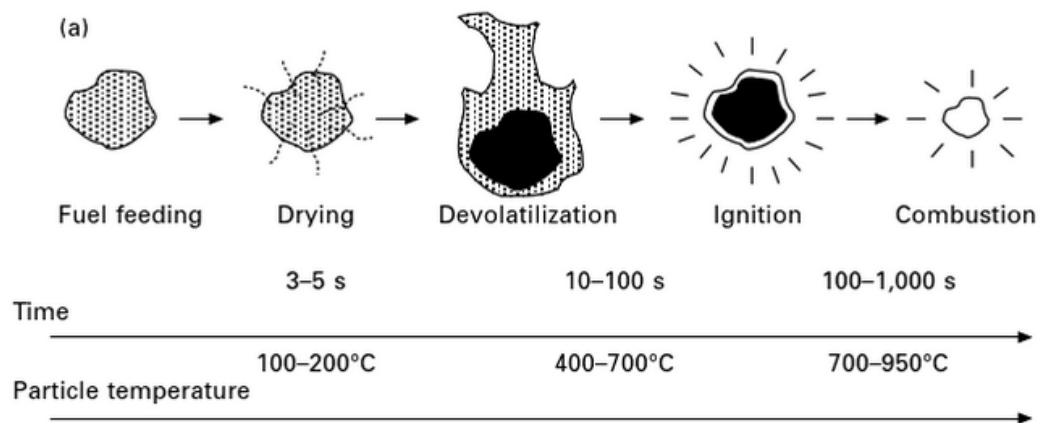
Kattilan ylösajoa varten tulipesään on sijoitettu starttipolttimia, joilla suoritetaan tulipesän lämmityksen alkuvaiheet. Starttipolttimien polttoaineena toimii kevyt polttoöljy ja niillä on oma liekinvalvonta sekä palamisilmansyöttö. Niiden lisäksi tulipesässä on petilansseiksi kutsuttuja kuormapolttimia (polttoaineena kevyt polttoöljy), joiden avulla saavutetaan kiinteän polttoaineen vapautuslämpötila ylösajon yhteydessä. Petilansseilla ei ole omaa liekinvalvontaa eikä palamisilmansyöttöä kuten starttipolttimilla, joten ne vaativat käynnistystä varten tarpeeksi korkean lämpötilan tulipesässä. Lisäksi petilansseja voidaan hyödyntää polttoaineensyötön häiriötilanteissa, jos lämpötila tulipesässä laskee jätteenpolton lakisääteisen minimiarvon tai kiinteän polttoaineen vapautusrajan alle. (Kattilan yleiskuvaus 2017, 13-14.)

3.5 Petimateriaali- ja pohjatuhkajärjestelmät

Kiertoleijukerroksen optimaalinen toiminta vaatii petin partikkelijakauman kontrollointia sekä siihen kertyvien epäpuhtauksien poistoa. Tämän takia tulipesän alaosan kautta poistetaan pohjatuhkaa, joka koostuu karkeista petimateriaalipartikkeleista ja polttoaineen palamattomasta osuudesta. Erityisesti jätettä poltettaessa petiin kertyy mm. metalleja ja kiviainesta, joita ei välttämättä saada jätteenkäsittelyssä poistettua. Tulipesän alaosassa suutinarinan alapuolella sijaitsevat tuhkasuppilot, joiden kautta poistettava pohjatuhka valuu pohjatuhkaruuveille. Kuuman materiaalin takia pohjatuhkaruuvit ovat vesijäähdytettyjä. Pohjatuhkaruuvit liikuttavat tuhkaa kohti pohjatuhkaseuloja, joiden avulla pohjatuhkasta erotetaan poistettava karkea osuus, sekä uudelleen käytettäväksi kelpaava hieno petimateriaali. Tyypillisin ratkaisu pohjatuhkan seulontaan on rumpu- tai tasoseula. Tuoreen hiekan ja uudelleen kierrätettävän petimateriaalin syöttöä varten on omat järjestelmänsä. Molemmat varastoidaan erillisiin siloihin, joista ne annostellaan sulkusyöttimillä tulipesään petimateriaalin vaihto- ja lisäystarpeen mukaan. (Kattilan yleiskuvaus 2017, 17.)

4 Palaminen leijukerropoltossa

Kiinteiden polttoaineiden palamisprosessista on tunnistettavissa eri vaiheita, kun tarkastellaan yksittäisten polttoainepartikkeleiden käyttäytymistä. Nämä vaiheet on esitetty kuviossa 5.



Kuvio 5. Kiinteän polttoaineen palamisen vaiheet (Scala & Solimene 2013, 326, muokattu)

Käytännön tasolla palamisen osaprosessit eivät välttämättä etene edellä esitettyssä systemaattisessa järjestyksessä, sillä palamiseen vaikuttavat niin käytetyn polttoaineen ominaisuudet kuin palamisen olosuhteet. Polttoaineen osalta näitä tekijöitä ovat esimerkiksi partikkelikoko, kosteus ja ominaislämpö. Voimalaitoksissa palamisprosessin säätely perustuu polttoaineensyötön kontrollointiin sekä hapen ja lämpötilan säätöön, joista ensimmäisenä mainittu on säätötapana tärkein. (Saastamoinen 2002, 186.)

Partikkelin lämpeneminen ja kuivuminen

Leijukerrospolton lämpötiloissa kiinteän polttoainepartikkelin lämpeneminen ja kuivuminen, eli prosessin ensimmäinen vaihe, tapahtuu hyvin nopeasti. Käytännössä tämä aika on muutamia millisekunteja siitä, kun polttoaine syötetään kuuman leijukerrosken sekaan. Korkeissa lämpötiloissa veden höyrystyminen on erittäin tehokasta ja ainoaksi rajoittavaksi tekijäksi muodostuu käytännössä lämmönsiirto. Biomassoja poltettaessa lämpeneminen on tehokkainta partikkelin pinnalla, josta veden höyrystyminen alkaa ensimmäisenä ja jatkuu kohti partikkelin keskustaa. Osa haihtuvista yhdisteistä saattaa vapautua partikkelin pinnalta sisäosien sisältäessä vielä kosteutta. (Saastamoinen 2002, 189; Vakkilainen 2017, 33.)

Palavien yhdisteiden haihtuminen

Syttymisen seurauksena polttoainepartikkeli alkaa hajoamaan ja siitä vapautuu kaasumaisia yhdisteitä, kuten hiilimonoksidia, hiilidioksidia, metaania ja vetyä. Palamisen tässä vaiheessa syntyy myös tervaa sekä jäännöshiiltä. Biomassapohjaisilla polttoaineilla prosessi on nopea ja kaasuja vapautuu paljon. Ympäristössä olevan hapen vaikutuksesta haihtuvat yhdisteet palavat, jonka seurauksena happi kuluu eikä se pääse vaikuttamaan partikkelin pintakerroksessa asti. Hapettomissa olosuhteissa polttoainepartikkelin kuumeneminen muistuttaa reaktiona pyrolyysiä. (Vakkilainen 2017, 35.) Polttoaineen ominaisuudet, palamisnopeus sekä lämpötila korreloivat syntyvien pyrolyysituotteiden kanssa. Pienemmällä partikkelikoolla ja lämmitysnopeuden nostolla pyrolysoitua osuus kasvaa, jolloin jäljelle jäävän jäännöshiilen määrä pienenee. (Saastamoinen 2002, 193.)

Syttyminen

Syttyminen voi saada alkunsa polttoaineeseen tuodun apuenergian avulla (liekki tms.), tai riittävän lämpötilan saavutettuaan partikkeli voi syttyä spontaanisti (ns. itsesyttymislämpötila). Syttymislämpötilassa lämpöhäviöiden osuus jää lämmönkehitystä pienemmäksi ja tämän kriittisen rajan jälkeen lämpötila asettuu uuteen tasapainotilaan. Syttymisaika vaihtelee polttoaineen ominaisuuksien sekä palamisolosuhteiden mukaan. Pienemmillä partikkeleilla kemiallisen kinetiikan vaikutus syttymislämpötilaan on suurempi kuin isoilla partikkeleilla, joilla puolestaan lämmönsiirto vaikuttaa siihen eniten. Kemiallinen kinetiikka sekä lämmönsiirto rajoittavat molemmat syttymisaikaa, joten partikkelikoon kasvu ei ole suoraan verrannollinen syttymisaikaan, vaikka hiukkaskoon kasvaessa se piteneekin. Hiukkaskoon lisäksi syttymisaikaan vaikuttavat mm. prosessin lämpötila, happipitoisuus sekä polttoaineen ominaisuudet. (Saastamoinen 2002, 192.)

Jäännöshiilen palaminen

Polttoainepartikkelista jää jäljelle haihtuvien yhdisteiden poistuttua jäännöshiiltä, jonka palaminen perustuu reaktioon ympäristössä olevan hapen kanssa. Jäännöshiilen ja hapen välisessä eksotermisessä reaktiossa muodostuu hiilimonoksidia (CO) sekä hiilidioksidia (CO_2), joista hiilimonoksidi voi vielä tämän jälkeen homogeenisesti

hapettua hiilidioksidiksi. Jäännöshiilen palamiseen vaikuttavien fysikaalisten ja kemiallisten tekijöiden määrä on suuri. Palamista nopeuttavia tekijöitä ovat mm. korkea lämpötila sekä partikkelin murskautuminen pienempiin osiin, jolloin partikkeleiden pinta-ala suhteessa niiden tilavuuteen kasvaa. Kun tarkastellaan koko palamisprosessin vaiheita, jäännöshiilen palaminen kestää muita vaiheita pidempään. Tämä vaihe voi tapahtua myös päällekkäin palavien yhdisteiden haihtumisen kanssa. (Scala & Solimene 2013, 327;335.)

Tuhkareaktiot

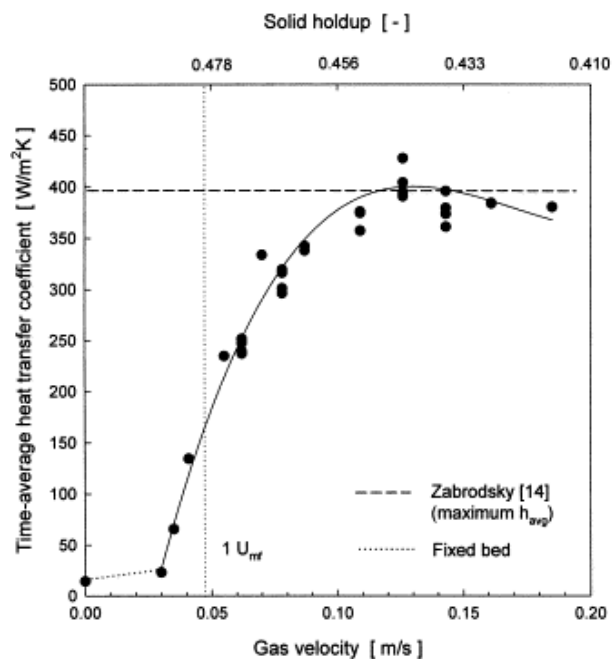
Polttoainepartikkelista jää palamisen jälkeen jäljelle tuhkaa, jonka määrä ja koostumus vaihtelee eri polttoaineilla. Monia biomassoja poltettaessa tulipesään kulkeutuu polttoaineen mukana mm. silikaatti- ja alkaliyhdisteitä. Näillä yhdisteillä on monia haitallisia vaikutuksia prosessiin, kuten taipumus muodostaa kerrostumia kattilapinoille tai aiheuttaa korroosiota. Siksi eri polttoaineiden taipumusta muodostaa kyseisiä tuhkeyhdisteitä pyritään analysoimaan esimerkiksi termodynaamisten tasapainoyhtälöiden avulla, sekä tutkimalla polttoaineen sisältämiä epäorgaanisia yhdisteitä. (Vakkilainen 2017, 36.)

5 Lämmönsiirto leijukerroksessa

Kiertopetikattiloiden ulkoisessa leijukerroslämmönsiirtimessä petimateriaaliin varastoitunutta lämpöä siirretään kattilan vesi- ja höyrypiiriin. Leijukerroslämmönsiirtimen leijutusolosuhteet vastaavat kuplivaa leijukerrosta, mutta petimateriaalin partikkelikoko on hienojakoisempi (100-300 μm). Kattilan muihin lämmönsiirtopintoihin verrattuna leijukerroslämmönsiirtimessä saavutetaan huomattavasti parempi lämmönsiirtokerroin, noin 300-500 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Lämmönsiirtokerroimeen vaikuttavia tekijöitä on monia, joista merkittävimmät ovat suspensiotiheys sekä petimateriaalin partikkelikoko. (Basu & Fraser 1991, 79-80.)

5.1 Suspensiotiheys

Leijukerroksen ja lämmönsiirtopintojen välistä lämmönsiirtokerrointa tutkittaessa avainasemassa on suspensiotiheys (ρ_b), johon vaikuttavat merkittävästi leijutusnopeus (U) sekä kiertävän kiintoaineen määrä (G_s). Lämmönsiirtokertoimessa tapahtuu merkittävä kasvu, kun leijutuksen miniminopeus ylittyy ja peti alkaa kuplimaan (ks. kuvio 6). Lämmönsiirtokertoimen nopea kasvu leijutusnopeuden noustessa selittyy petimateriaalin tehokkaalla sekoittumisella, jolloin petimateriaalipartikkeleiden liike lämmönsiirtopinnoilla kasvaa. Lämmönsiirtyminen tapahtuu leijukerroslämmönsiirtimessä pääsääntöisesti johtamalla suuren kiintoainetiheyden takia, mutta leijutusnopeuden kasvu lisää myös konvektiivista lämmönsiirtoa. (Di Natale & Nigro 2013, 182.)



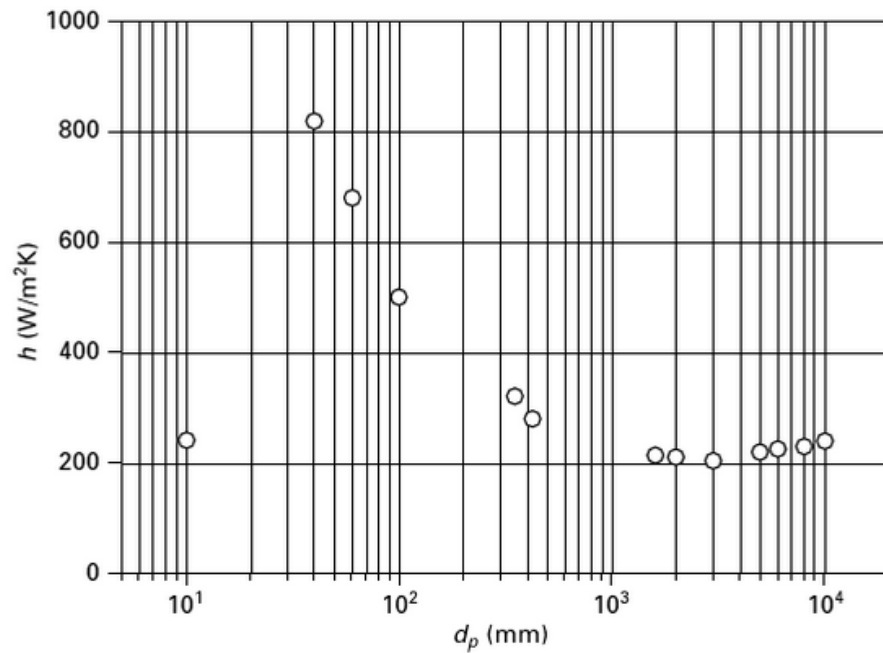
Kuvio 6. Lämmönsiirtokertoimen ja leijutusnopeuden välinen funktio (Kim, Ahn, Kim & Lee 2002)

Lämmönsiirtokertoimella on kuitenkin petimateriaalin ominaisuuksista ja leijukerroslämmönsiirtimen mitoituksesta riippuvainen maksimipiste (h_{max}), jonka jälkeen leijutusnopeuden edelleen kasvaessa lämmönsiirtokerroin alkaa laskemaan. Lisääntynyt kaasuvirtaus pienentää petin suspensiotiheyttä, jolloin kiintoainepartikkeleiden ja

lämmönsiirtopintojen välisten kontaktien vähentyessä myös lämmönsiirto heikenee. Leijutusnopeuden ohella leijukerroslämmösiirtimeen tulevan kiintoaineen määrällä on suuri vaikutus suspensiotiheyteen. Kun kiertävän kiintoaineen määrä lisääntyy, niin suspensiotiheys kasvaa. Tämä puolestaan parantaa lämmönsiirtokerrointa, kun kontaktit partikkeleiden ja lämmönsiirtopintojen kanssa lisääntyvät. (Di Natale & Nigro 2013, 182;184.)

5.2 Partikkelikoko

Petimateriaalin partikkelikoon vaikutusta lämmönsiirtokerrotimeen on tarkasteltava petin suspensiotiheyden kautta. Pienemmillä partikkeleilla petin suspensiotiheys on suurempi, jolloin partikkeleiden kontaktit lämmönsiirtopinta-alaa kohti kasvavat. Suuremmilla partikkeleilla lämmönsiirtokerroin laskee, koska nämä kontaktit vähenevät (Cho, Kim & Han 1996). Kuviossa 7 on esitetty lämmönsiirtokerroimen ja petimateriaalin partikkelikoon välinen korrelaatio. Aivan hienojakoisella materiaalilla lämmönsiirto on heikkoa, mutta se kasvaa nopeasti partikkelikoon suurentuessa ja saavuttaa maksimiarvonsa noin 50 µm:n kokoluokassa. Suurilla partikkeleilla lämmönsiirtokerroin pienenee merkittävästi, koska lämpö ei johdu niissä yhtä tehokkaasti kuin pienissä partikkeleissa. Leijukerroslämmönsiirtimen hyvä lämmönsiirtokerroin perustuukin suurelta osin syklonilla erotettavaan hienojakoiseen petimateriaaliin. (Di Natale & Nigro 2013, 192.)



Kuvio 7. Lämmönsiirtokertoimen ja partikkelikoon välinen funktio (Di Natale & Nigro 2013)

5.3 Petimateriaalin ominaisuudet

Eri materiaalien lämmönsiirtoon liittyvät ominaisuudet vaihtelevat ja siten ne vaikuttavat lämmönsiirtokertoimeen leijukerroksessa. Materiaaleilla, joilla on suurempi ominaislämpökapasiteetti (c_p), on myös parempi lämmönsiirtokerroin. Toinen materiaalin lämmönsiirtoa kuvaava suure on lämmönjohtavuus (k_p). Sen vaikutus lämmönsiirtokertoimeen ei kuitenkaan ole yhtä suoraviivainen, kuin edellä mainitun ominaislämpökapasiteetin. Di Natale ja Nigro (2013) mainitsevat, että kiintoaineen ja kaasun lämmönjohtavuuden välisen suhteen (k_p/k_g) ollessa välillä 30-1000, partikkelien lämmönjohtavuudella ei ole juurikaan merkitystä lämmönsiirtymisessä. Vasta tätä suuremmilla arvoilla materiaalin lämmönjohtavuuden merkitys kasvaa. (Di Natale & Nigro 2013, 190-191.)

6 Likaantumismekanismit leijukerrospoltoissa

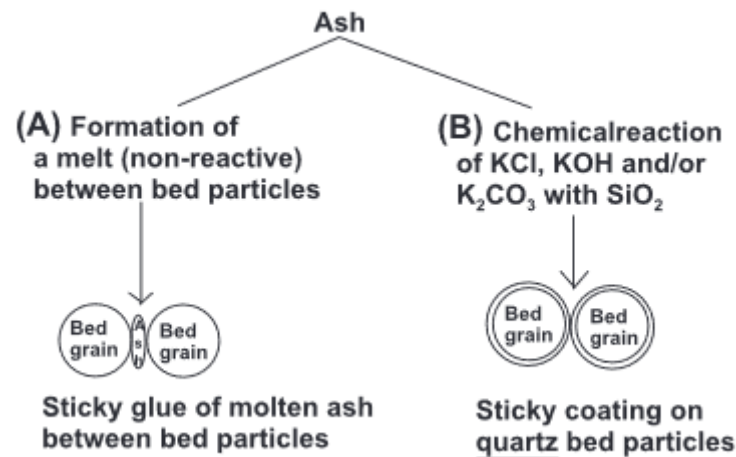
6.1 Agglomeraatio ja petin sintraantuminen

Haasteellisimpia leijukerrospoltoon liittyviä ilmiöitä on petimateriaalin agglomeraatio. Agglomeraatiolla tarkoitetaan reaktiota, jossa petissä olevat kiintoainepartikkelit liimautuvat toisiinsa tuhkan tai alkaliyhdisteiden sulamisen seurauksena syntyvän sulan faasin vaikutuksesta. Samasta ilmiöstä puhuttaessa käytetään usein myös termiä sintraantuminen. Toisiinsa liimautuneet partikkelit kasvattavat petimateriaalin kokojakaumaa, jolloin puhutaan petin karkenemisestä. CFB-kattiloissa petimateriaalin karkeneminen vaikuttaa haitallisesti leijutukseen, polttoaineen palamiseen, lämmönsiirtoon ja poltosta aiheutuviin päästöihin. Pahimmassa tapauksessa koko leijutus saattaa hävitä ja johtaa laitoksen alasajoon. (Skrifvars & Hupa 2002, 287; Vakkilainen 2017, 224.)

Agglomeraation aiheuttamat ongelmat korostuvat poltettaessa paljon alkaliyhdisteitä sisältäviä biomassapohjaisia polttoaineita. Näiden polttoaineiden sisältämistä alkalimetalleista kalium ja natrium ovat sulan faasin muodostumisessa merkittävimässä asemassa. Palamisprosessin aikana alkaleita vapautuu ja ne muodostavat kaasumaisia yhdisteitä tai sitoutuvat tuhkaan. Hydroksidit (OH^-), kloridit (Cl^-) ja sulfatit (SO_4^{2-}) ovat tyypillisimpiä alkaleiden kanssa kaasumaisia yhdisteitä muodostavista ioneista. Yhteistä näille yhdisteille ovat alhaiset sulamislämpötilat ja korkeat höyrynpaineet, jonka takia ne aiheuttavat kerrostumia sekä korroosiota kattilapinoille. (Elled, Åmand & Steenari 2013, 696-697.)

Elledin, Åmandin ja Steenarin (2013,) mukaan agglomeroitumismekanismit voidaan erotella karkeasti kahteen eri luokkaan. Ensimmäinen perustuu polttoaineen sisältämien tuhkakomponenttien sulamiseen. Näiden komponenttien muodostama sula liimaa kiintoainepartikkeleita yhteen ja muodostaa agglomeraatteja (ks. kuvio 8, reaktio A). Tällä mekanismilla tapahtuva agglomeraatio ei ole reaktiivinen käytetyn petimateriaalin kanssa, joten syntyvä tuhkasula liimaa partikkeleita riippumatta niiden

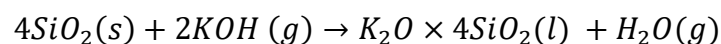
kemiallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista. Toinen agglomeroitumismekanismi perustuu petimateriaalina käytettävän luonnonhiekan sisältämän kvartsin ja alkaliyhdisteiden väliseen reaktioon, jolloin muodostuu matalan sulamispisteen omaavia alkali-silikaatteja (ks. kuvio 8, reaktio B). (Elled ym. 2013, 698.)



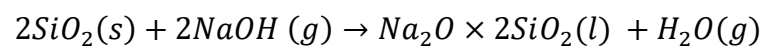
Kuvio 8. Agglomeroitumismekanismit leijukerros poltossa (Elled ym. 2013, 697, muokattu)

Esimerkki jälkimmäisestä mekanismista on luonnonhiekan sisältämän kvartsin (SiO_2) ja kaasumaisten kalium- sekä natriumhydroksidin (KOH ja $NaOH$) väliset reaktiot, joiden lopputuotteina syntyy alhaisen sulamislämpötilan omaavia kalium- ja natrium-silikaatteja. (Elled ym. 2013, 697.)

Kvartsin ja kaliumhydroksidin välinen reaktio on



Kvartsin ja natriumhydroksidin välinen reaktio on



Puhtaina yhdisteinä esiintyessä alkalisilikaateilla sekä alkaliklorideilla ja alkali- ja maa-alkalisulfaateilla on varsin korkea sulamispiste (yli 1000 °C), jota harvoin leijukerros-poltton normaaleissa olosuhteissa saavutetaan. Vastaavien aineiden seoksilla on puolestaan hyvin laaja lämpötila-alue, jolloin niiden sulamista tapahtuu. Seosta, jonka sulamislämpötila on matalampi kuin sen muodostavien puhtaiden yhdisteiden, kutsutaan eutektiseksi. Tällaisen seoksen sulaminen saattaa alkaa jopa 500 °C:n lämpötilassa ja koko sulamisen lämpötila-alue voi olla satoja asteita. Osittain sulilla alkali-seoksilla on voimakas taipumus tarttua kiinni kattilapinnoille ja aiheuttaa kerrostumia. (Skrifvars & Hupa 2002, 277.)

Scala (2017) mainitsee Chironen ja Scalan (2006) havainneen, että tuhka- ja hiekkapartikkeleiden välisillä törmäyksillä on suuri merkitys alkaleiden vuorovaikutuksessa kvartsin kanssa. Törmäysten seurauksena alkalit tarttuvat hiekkapartikkeleiden pinnalle, siirtyvät pinnalta diffuusion avulla tuhkakerroksen läpi ja reagoivat kvartsin kanssa. Ympäristön korkealla lämpötilalla on tätä mekanismia edistävä vaikutus. Paikallisesti korkeita lämpötiloja voi muodostua tulipesään esimerkiksi palavan hiilen tai öljyliekin lähelle, eikä näitä pienelle alueelle rajoittuvia korkeita lämpötiloja pystytä välttämättä havaitsemaan tulipesään sijoitetuilla lämpötilamittauksilla. Ne tarjoavat kuitenkin otolliset olosuhteet alkalisulan muodostukselle, joka puolestaan lisää hiekkapartikkeleiden agglomeraatiota. Täten koko petin lämpötilan ei tarvitse olla alkalisulan eutektista lämpötilaa korkeampi, sillä paikallisesti esiintyvät kuumat pisteet palavien partikkeleiden ympärillä voivat johtaa agglomeraattien muodostumiseen ja kerrostumien kasvuun. (Scala 2017, 33-34.)

6.2 Agglomeraation havaitseminen

Petimateriaalin agglomeroitumisen havaitsemiseksi on tutkittu eri menetelmiä, mutta luotettavaan tulokseen pääseminen on osoittautunut haastavaksi. Parhaisiin tuloksiin päästään analysoimalla tulipesän (CFB-kattiloissa myös syklonin ja leijukerros-lämmönsiirtimen) paine- ja lämpötilaprofiileja. Petimateriaalin karkeneminen tai leijukerrosjärjestelmän alueelle muodostuvat sintraantumukset muuttavat leijutusolosuhteita, jolloin viitteitä agglomeroitumisesta voi antaa paine- tai lämpötilamuutokset kahden eri mittauspisteen välillä. Petimateriaalin agglomeroitumisen havaitsemisella

on suuri merkitys, jotta korjaavia toimenpiteitä ehditään tekemään ennen leijutuksen lopullista tukkeutumista. (Scala 2017, 32.)

6.3 Agglomeraation ennaltaehkäisy

Petimateriaalin agglomeroitumisesta johtuvien ongelmien ennaltaehkäisyyn tärkeimmät keinot ovat petituhkan seulonta sekä uuden petimateriaalin syöttäminen tulipesään. Petituhkan seulonnalla oikeankokoiset partikkelit saadaan otettua talteen ja palautettua takaisin kiertoon. Agglomeraatit sekä muut polttoaineen mukana tulleet suuret kiintoainepartikkelit poistetaan seulan ylitteenä. Tällä on myös kokonaistalouden kannalta suuri merkitys, sillä käyttökelpoinen petimateriaali saadaan hyödynnettyä uudelleen. Petimateriaalin partikkelikokoa kontrolloidaan myös lisäämällä jatkuvasti uutta petimateriaalia tulipesään. Polttoaineen massavirtaan suhteutettuna syötetyn petimateriaalin määrä on biopolttoaineita käyttävissä laitoksissa tyypillisesti noin 0,3-1,0 %, kun petimateriaalina käytetään luonnonhiekkaa. (Vakkilainen 2017, 226.)

Koska tuhkan koostumus on avainasemassa sulan faasin muodostuksessa, voidaan agglomeraatiota ehkäistä myös vaikuttamalla tuhkassa esiintyviin komponentteihin. Varsinaisen pääpolttoaineen ohella voidaan esimerkiksi polttaa tukipolttoainetta, josta vapautuu vähemmän matalan sulamispisteen omaavia alkaliyhdisteitä. Petimateriaalin sulamislämpötilaa voidaan myös nostaa syöttämällä tulipesään tähän tarkoitukseen sopivaa kiinteää lisäainetta. Näiden lisäaineiden vaikutus perustuu alkaliyhdisteiden sitomiseen petistä, jolloin kyseisiä yhdisteitä kumuloituu vähemmän varsinaiseen petimateriaaliin (Scala 2017, 37). Elled ja muut (2013) mainitsevat, että petin alhaista sulamislämpötilaa voidaan nostaa tietyillä alkuaineilla, joista esimerkkejä ovat alumiini, rauta, kalsium ja magnesium. Näiden alkuaineiden yhdisteistä tehokkaaksi on osoittautunut mm. kaoliini ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), joka reagoi alkaleiden kanssa ja muodostaa korkean sulamispisteen yhdisteitä. (Elled ym. 2013, 698.)

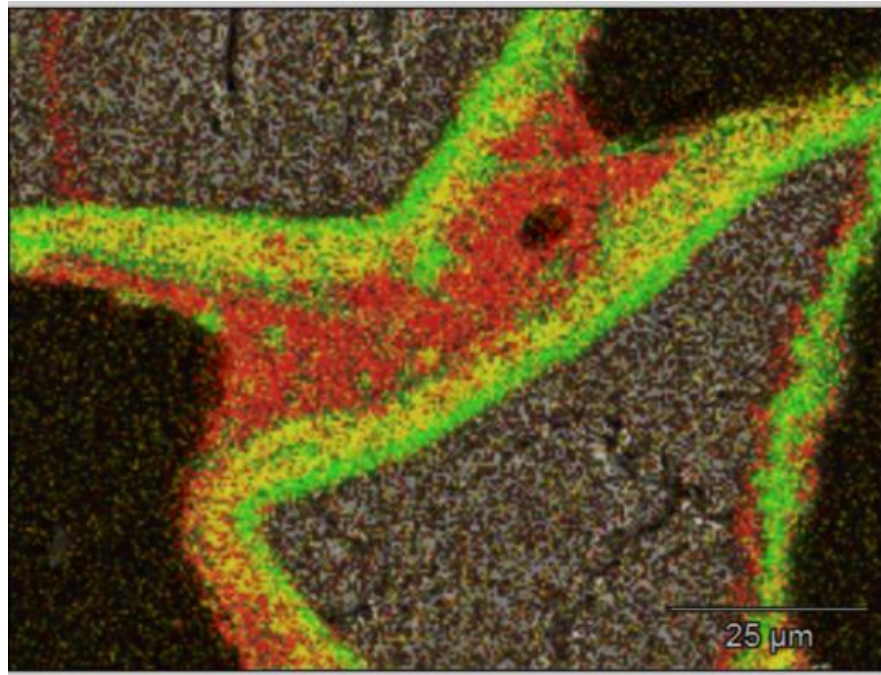
Joissain tapauksissa petimateriaalin vaihto luonnonhiekkasta kokonaan toiseen materiaaliin voi tulla kysymykseen. Menetelmän toimivuus perustuu luonnonhiekan sisältämän kvartsin poistamiseen prosessista, jolloin kvartsin ja alkaliyhdisteiden välistä

reaktiota ei pääse syntymään. Materiaalikustannukset, petimateriaalin syöttömäärä sekä tuhkan loppusijoitus ovat tekijöitä, jotka ovat ratkaisevassa asemassa petimateriaalin vaihtoa suunniteltaessa. (Scala 2017, 37.)

6.4 Sintraantumien erityispiirteet Riikinvoima Oy:n CFB-kattilassa

Riikinvoima Oy:n CFB-kattilassa havaitun syklonisintraantumien koostumusta tutkittiin Eurofins Expert Services Oy:n toimesta. Raportissaan Ilvonen ja Klasila (2019) toteavat sintraantumien alkuainekoostumuksen vastaavan luonnonkvartsihiekan sisältämiä alkuaineita, joihin lukeutuvat mm. pii, kalsium, alumiini, magnesium, kalium ja natrium. Näytteestä havaittu rauta oli todennäköisesti peräisin laitoksella käytetystä jätepoltoaineesta. Muiden alkuaineiden osuudet sintraantumassa olivat pieniä. Näytteessä esiintyneiden hiekkapartikkelien suuruusluokka oli noin 100 µm. (Ilvonen & Klasila 2019.)

Sintraantumien aiheuttaneen liima-aineksen havaittiin koostuvan eri faaseista (ks. kuvio 9). Hiekkapartikkeleita peittävä ensimmäinen kerros (ks. kuvio 9, vihreä kerros) koostui lähinnä kalsiumista sekä piistä. Tämän kerroksen päällä oleva kerros (ks. kuvio 9, keltainen kerros) sisälsi kalsiumia, magnesiumia, fosforia, titaania sekä piitä. Ilvonen ja Klasila (2019) toteavat, että kumpikaan edellä mainituista kerroksista ei tutkimusten mukaan aiheuttanut lopullista sintraantumaa. Hiekkapartikkeleiden pinnalle oli muodostunut vielä kolmas, edellisistä koostumukseltaan poikkeava kerros (ks. kuvio 9, punainen kerros). Tämä kerros oli ns. alkalirikas kerros, joka koostui natriumista, kaliumista, alumiinista, piistä, raudasta ja magnesiumista. Sintraantumien juurisyy löytyi tästä kerroksesta. Tutkitun sintraantumien todennäköisin syntymekanismi perustuu luonnonhiekan alkalisilikaattien sulamiseen. Liimaavan kerroksen alhainen kalsiumpitoisuus indikoi, että se ei ole syntynyt tuhkan sulamisen seurauksena. (Ilvonen & Klasila 2019.)



Kuvio 9. Syklonisintraantumien kerrostumat alkuaineittain (Ilvonen & Klasila. 2019)

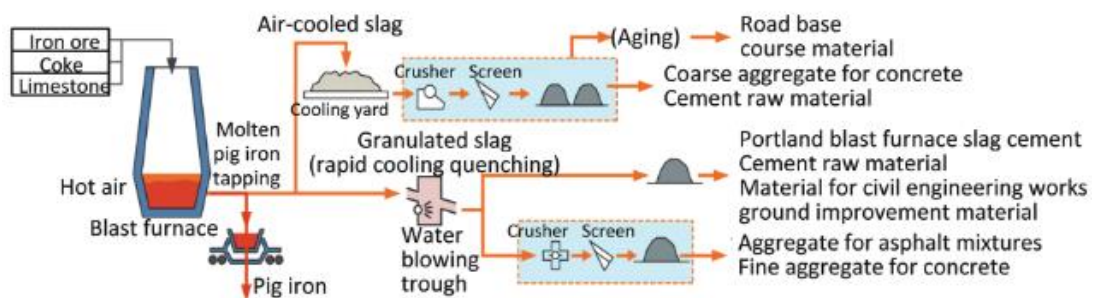
7 Masuunikuona petimateriaalina

Käytetyin petimateriaali leijukerrospoltoon perustuvissa voimalaitoskattiloissa on luonnonkvartsihiekkä. Luonnonhiekan käyttöä puoltavat helppo saatavuus sekä edullinen hinta muihin materiaaleihin nähden. Yhdessä alkalipitoisten polttoaineiden, kuten biomassojen kanssa, luonnonhiekan sisältämä kvartsi kuitenkin aiheuttaa petin sintraantumista. Tämä on synnyttänyt tarpeen kvartsivapaiden petimateriaalien tutkimiselle. Monesti näiden vaihtoehtoisten mineraalien valinnan esteeksi muodostuu kuitenkin korkea hinta, ongelmat saatavuudessa tai mineraalien sisältämät terveydelle haitalliset yhdisteet. (Ilvonen & Klasila 2018.)

Fescon Oy on kehittänyt terästeollisuuden sekundäärivirtana syntyvästä masuunikuonasta uudenlaisen leijupetimateriaalin voimalaitosten tarpeisiin. Luonnonkvartsihiekkään verrattuna kvartsivapaa masuunikuona reagoi huomattavasti vähemmän palamisessa vapautuvien alkaleiden kanssa, jolloin alkalireaktioihin perustuva petin sintraantuminen vähenee. Agglomeraation vähentyessä myös petin vaihtotarve on ma-

suunikuonalla pienempi. Lisäksi masuunikuonalla on todettu olevan parempi lämmönkesto ja pienempi kuluttavuus kattilapinnoilla luonnonkvartsihiekkään nähden. (Ilvonen & Klasila 2018.)

Masuunikuonaa ei varsinaisesti valmisteta, vaan sitä syntyy terästeollisuuden tarpeisiin tarvittavan raakaraudan valmistuksen sivutuotteena. Raakaraudan valmistus tapahtuu masuuneiksi kutsutuissa korkeissa kuilumallisissa uuneissa. Raudan lähteenä toimii tyypillisesti rautamalmi, jonka lisäksi masuuniin syötetään polttoaineena käytettävää koksia (hiiltä) sekä epäpuhtauksia poistavaa kalkkikiveä. Kyseiset lähtöaineet kasataan masuuniin kerroksittain ja kerrosten läpi puhalletaan kuumaa ilmaa, joka saa aikaan kaksin palamisen. Kuuma kaasu sai aikaan rautaoksideja pelkistävän reaktion, jolloin muodostuu sulaa raakarautaa sekä kalsiumsuoloista koostuvaa masuunikuonaa. Sula rauta sekä masuunikuona poistetaan masuunin pohjalta ja lähtöaineita syötetään poiston mukaan lisää prosessin ylläpitämiseksi (Nassaralla 2001.). Yhtä tuotettua raakarautatonna kohti syntyy noin 300 kg masuunikuonaa, joka jäähdytetään sekä esikäsitellään jatkokäyttöä varten (ks. kuvio 10). Tyypillisesti masuunikuonaa hyödynnetään rakennusteollisuudessa betonin täyttöaineena sekä maanrakennusaineena. (Akahane, Hayashiguchi, Miyamoto & Torii. 2015.)



Kuvio 10. Masuunikuonan jäähdytys ja käsittely (Akahane ym. 2015)

Masuunikuonaa voidaan jakaa jäähdytystekniikan perusteella kahteen eri tyyppiin, vesijäähdytettyyn sekä ilmajäähdytettyyn ($Ca_xMg_xAl_xSi_xO_x$). Vedellä jäähdytys on tekniikkana ilmajäähdytystä nopeampi, mutta merkittävin vaikutus jäähdytyksellä on masuunikuonan rakenteeseen. Vesijäähdytyksen jälkeen masuunikuona esiintyy

amorfisessa muodossa, ilmajähdytyksen jälkeen puolestaan kiteytyneessä muodossa. Amorfisen muodon kiteytymislämpötila on noin 850°C. Kyseisessä lämpötilassa tapahtuu hetkellinen eksoterminen reaktio, joka nostaa leijukerros-poltossa peitin lämpötilaa merkittävästi. Ilmiö toistuu vain kerran, mutta hallitsematon lämpötilan nousu voi aiheuttaa ongelmia kattilan operoinnissa. Ilmajähdytetty masuunikuona on valmiiksi kiteytyneessä muodossa, joten sitä käytettäessä vastaavaa reaktiota ei tapahdu. (Ilvonen & Klasila 2018.)

Kiteytymistä lukuun ottamatta ilmajähdytetty sekä vesijähdytetty masuunikuona vastaavat kemiallisilta ja fysikaalisilta ominaisuuksilta toisiaan. Taulukkoon 3 on koottu tietoja masuunikuonan alkuainekoostumuksesta. Masuunikuonan fysikaalisia ominaisuuksia on koottu taulukkoon 4.

Taulukko 3. Masuunikuonan kemiallinen koostumus (Ilvonen & Klasila 2018, muokattu)

Alkuaine (paino-%)	Vesijähdytetty masuunikuona	Ilmajähdytetty masuunikuona
Natrium	0,41	0,39
Magnesium	5,5	5,1
Alumiini	4,9	4,9
Pii	16	15
Rikki	1,2	1,5
Kloori	-	0,01
Kalium	0,56	0,46
Kalsium	30	30
Titaani	0,89	1,2
Vanadiini	0,05	0,08
Mangaani	0,21	0,32
Rauta	0,34	0,53
Strontium	0,06	0,05
Zirkonium	0,02	0,02
Barium	0,11	0,08

Taulukko 4. Masuunikuonan fysikaaliset ominaisuudet (Ilvonen & Klasila 2018, muokattu)

	Vesijähdytetty masuunikuona	Ilmajähdytetty masuunikuona
Irtotilavuuspaino	1,2 t/m ³	1,3 t/m ³
Sulamislämpötila	> 1300 °C	> 1300 °C
Kuluttavuus	15-25% pienempi kuin hiekalla	15-25% pienempi kuin hiekalla
Kvartsipitoisuus	< 10%	< 5%
Kiteytymislämpötila	850 °C	Kiteytyneessä muodossa

Masuunikuona kiertotaloustuotteena

Petimateriaalina tavallisesti käytettävä luonnonhiekkä louhitaan maaperästä, joten sen käyttäminen tarkoittaa uusiutumattomien luonnonvarojen kulutusta. YK:n ympäristöohjelma United Nations Environment Programme (2019) kirjoittaa raportissaan, että luonnonhiekkä on tällä hetkellä maailman toiseksi halutuin luonnonvara makean veden jälkeen ja sen kasvava kysyntä muodostaa vakavan uhan monille ekosysteemeille. Tämä voi näkyä esimerkiksi maaperän eroosiona tai puhtaiden vesivarantojen likaantumisenä. Luonnonhiekan kestäväää käyttöä edistävästä toimista UNEP mainitsee tärkeimmiksi luonnonhiekan käytön välttämisen, vaihtoehtoisten materiaalien hyödyntämisen sekä luonnonhiekan louhinnan vähentämisen. (UNEP 2019.)

Masuunikuona on kiertotaloustuote, jolla voidaan korvata uusiutumattoman luonnonhiekan käyttöä voimalaitosten petimateriaalina. Voimalaitoksissa tarvittavan petimateriaalin määrään suhteutettuna masuunikuonaa syntyy terästeollisuudessa käytännössä rajattomasti ja lisäksi sen laatu pysyy tasaisena. Tutkimuksissa sillä on todettu olevan sintraantumista ja kattilan kulumista vähentäviä ominaisuuksia, jotka tekevät siitä hyvin leijukerrospolttoon soveltuvan petimateriaalin. Se ei myöskään sisällä haitallisia yhdisteitä, jotka voisivat esimerkiksi vaikuttaa voimalaitoksissa syntyvien tuhkien käsittelyyn tai loppusijoitukseen. (Ilvonen & Klasila 2018.)

8 Pilot-koe ilmajäähdetyllä masuunikuonalla

Petimateriaalin vaihto luonnonkvartsihiekestä ilmajäähdetyyn masuunikuonaan suoritettiin kevään huoltoseisokin jälkeen. Huoltoseisokissa tulipesän ja syklonin alue sekä lämmönsiirtopinnat puhdistettiin. Lisäksi tehtiin tarvittavat kunnossapitotoimet niitä vaativille laitteille. Näiden toimenpiteiden jälkeen prosessissa oli lähtökohtaisesti parhaat mahdolliset olosuhteet lähteä testaamaan uutta petimateriaalia. Tällä parannettiin myös tulosten vertailukelpoisuutta, kun olosuhteet prosessissa olivat samanlaiset vertailujaksojen välillä. Tärkeä huomioitava asia pilot-kokeen ajankohdan valinnassa oli myös lämmityskauden päättyminen. Jos ilmajäähdetyyn masuunikuonan käytössä ilmeni ongelmia, olisi siitä mahdollisesti aiheutuva alasajo huomattavasti ongelmallisempi esimerkiksi syys- tai talvikuukausina, kun lämmitystarve on suurin.

Pilot-kokeen aikana ei tehty polttoaineanalyysyjä poltetusta jätteestä. Sekajäte on polttoaineena hyvin heterogeeninen, joten sen tarkka analysointi olisi vaatinut huomattavia lisäresursseja. Sen ei myöskään katsottu tuovan erityistä lisäarvoa tämän testin osalta, koska polttoaineen laatu vaihtelee joka tapauksessa paljon. Muista muuttujista huomioon oli otettava kesän 2019 aikana sattuneet ennakoimattomat alasaajat, jotka johtuivat automaatiojärjestelmässä sekä polttoaineensyötössä esiintyneistä häiriöistä. Niiden seurauksena kattilan tehoa jouduttiin pudottamaan väliaikaisesti useita kertoja (ks. liite 1) ja käyttämään tukipolttoaineena öljyä. Vertailujaksolla kesällä 2018 ei esiintynyt vastaavia häiriöitä, jotka olisivat aiheuttaneet merkittäviä muutoksia kattilan tehosäädössä (ks. liite 2). Häiriötilanteita lukuun ottamatta kattilaa ajettiin maksimiteholla (54 MW) pilot-kokeen ajan.

Voimalaitoksen ylösajo aloitettiin Riikinvoima Oy:n Ekovoimalaitoksella 12.5.2019. Leijukerrosjärjestelmään syötettiin vaiheittain noin 100 m³ ilmajäähdettyä masuunikuonaa. Masuunikuonan partikkelikoko pidettiin samana kuin luonnonhiekillä. Ekovoimalaitokselle 10.5.2019 toimitetun masuunikuonan seulontatulokset on esitetty liitteessä 3. Ensimmäisen kahden viikon aikana petimateriaalia ei ollut tarkoitus vaihtaa lainkaan. Pilot-jakson alettua ongelmaksi muodostui kuitenkin jätepolttoai-

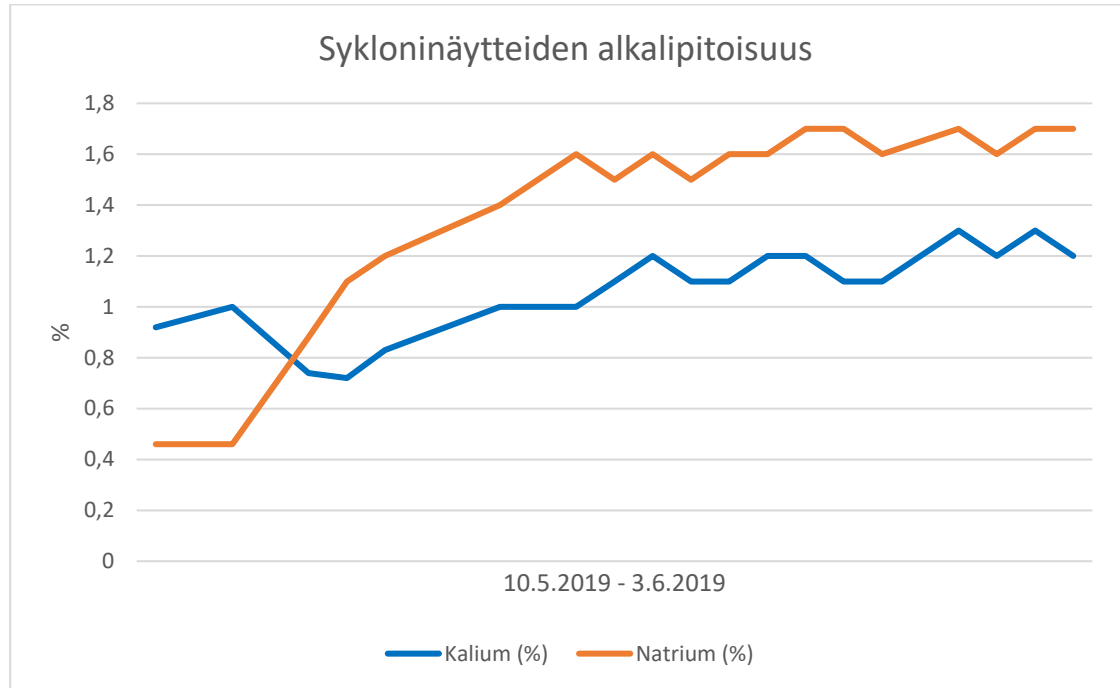
neen mukana tuleva hiekka. Kiinteälle polttoaineelle siirtymisen jälkeen oli hyvin lyhyessä ajassa havaittavissa visuaalisia muutoksia kierrosta otetuissa petimateriaalinäytteissä, joiden perusteella kierto oli alkanut kertymään hiekkaa (ks. liite 4). Myös Eurofins Expert Services Oy:n tekemät mikroskooppianalyysit poikkileikkausnäytteistä sekä alkuaineanalyysit todistivat havainnon oikeaksi. Tämän seurauksena alkuperäisestä suunnitelmasta luovuttiin ja uutta petimateriaalia alettiin lisäämään tulipesään noin 3 tonnia vuorokaudessa.

Polttoaineen mukana tulleen hiekan ja kiviaineksen myötä ilmeni myös pohjatuhkan seulontaan liittyvä ongelma. Käytössä olleilta tasoseuloilta palautui kiertoan partikkelikooltaan 1,5-2,0 mm materiaali, mikä tarkoitti petin karkenemistä. Jätepolttoaineen mukana tulleen hiekan ja muun palamattoman materiaalin määrästä saatiin karkea arvio, kun uutta petimateriaalia ei syötetty petiin ja kaikki materiaalin kierto tapahtui petimateriaalisiilon kautta. Petimateriaalisiilossa olevan materiaalin määrä kasvoi tasaisesti noin 15 tonnilla vuorokaudessa, vaikka sen kautta oli jatkuva syöttö tulipesään eikä uutta masuunikuonaa lisätty petiin lainkaan (ks. liite 5). Petimateriaalisiiloon menevä seulottu petituhka jouduttiin kääntämään pohjatuhkasiiloon petimateriaalisiilon tullessa täyteen. Laitoksen ylösajon aloittamisesta oli tässä vaiheessa kulunut vasta neljä päivää. Tämän jälkeen masuunikuonan syöttöä tulipesään jatkettiin ja palattiin petin materiaalitaseen osalta normaaliin ajomalliin.

Ensimmäisen kahden viikon aikana syklonikerrosta otettiin petimateriaalinäytteitä päivittäin. Näytteet toimitettiin Eurofins Expert Services Oy:lle, joka tutki alkalipitoisuuden kehittymistä syklonikerrossa. Alkaleiden lisäksi tutkimuksen kohteena olivat masuunikuonalle ominaisten alkuaineiden magnesiumin ja mangaanin, sekä hiekalle ominaisen piin pitoisuudet näytteissä. Näiden tulosten (ks. liite 6) pohjalta on havainnollistettu tiettyjen alkuainepitoisuuksien muutoksia seuraavaksi esitetyissä kuvioissa.

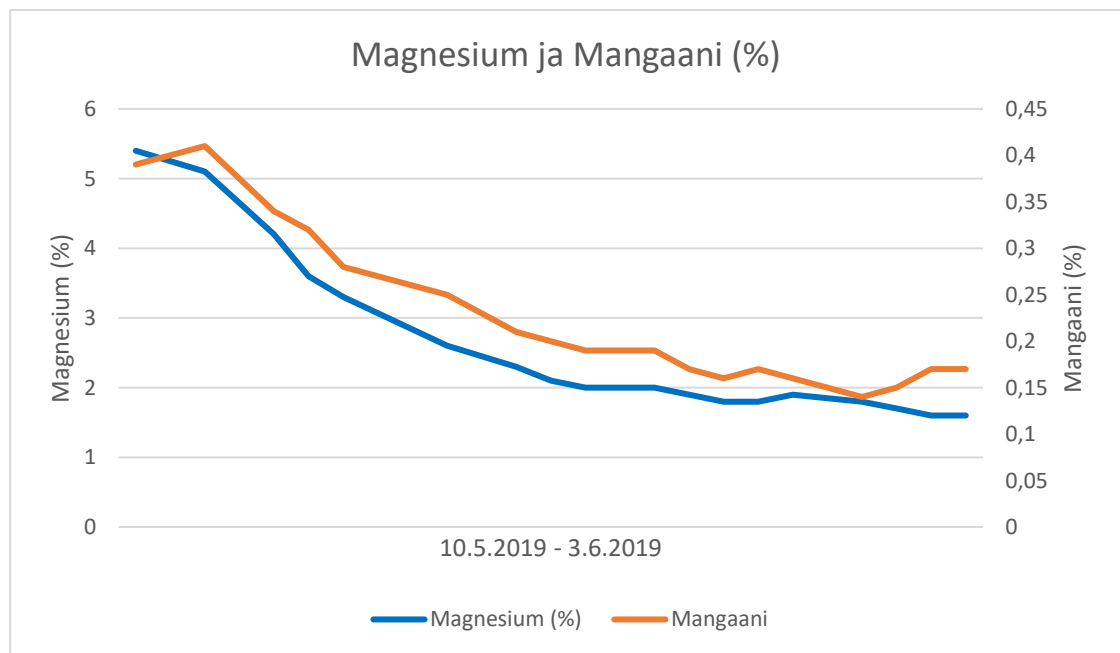
Kuviossa 11 on esitetty alkalipitoisuuden kehittyminen natriumin ja kaliumin osalta 10.5.2019 – 3.6.2019 väliseltä ajalta. 10.5.2019 ja 12.5.2019 otetut näytteet ovat vertailunäytteitä laitokselle toimitetusta ilmajäähdytetystä masuunikuonasta, joten ne edustavat puhtaan masuunikuonan alkuainepitoisuuksia. Erityisesti natriumin osalta

alkaleiden kertyminen petiin oli voimakasta ensimmäisten päivien aikana. Myös kaliumin osalta selvää nousua oli havaittavissa. Natrium- ja kaliumpitoisuuksien nousu selittyi polttoaineen mukana tulleella hiekalla, joka palautui pohjatuhkaseuloilta kiertoon ja reagoi alkaleiden kanssa.

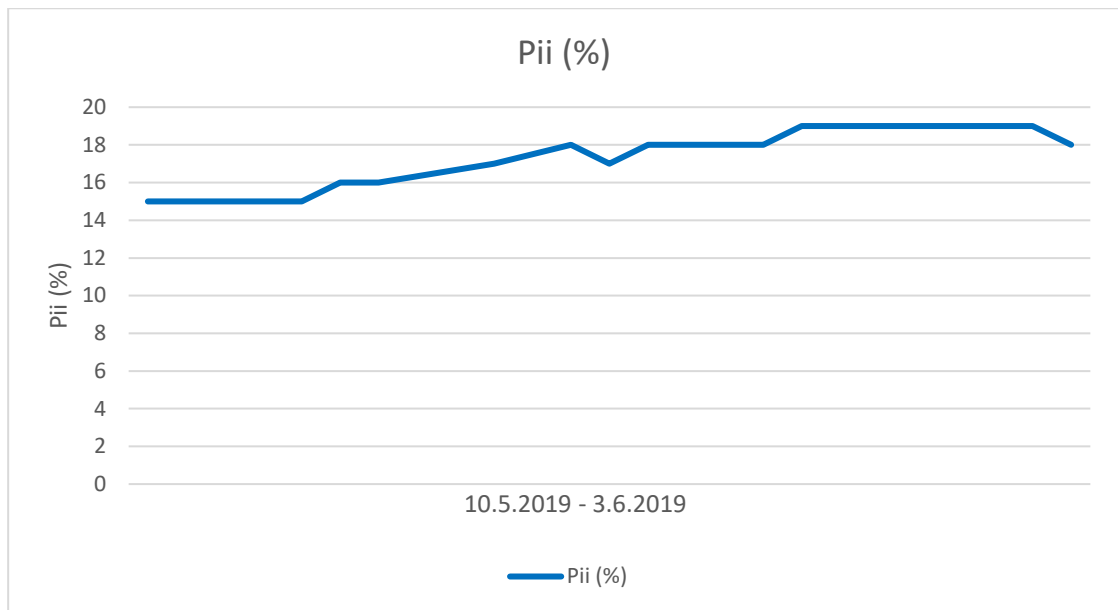


Kuvio 11. Alkalipitoisuus syklonikierrossa

Masuunikuonan ja luonnonhiekan välistä suhdetta syklonikierrossa arvioitiin näille materiaaleille ominaisten alkuaineiden perusteella (ks. kuviot 12 ja 13). Masuunikuonalle näitä olivat magnesium ja mangaani, luonnonhiekan pii. Magnesiumin ja mangaanin pitoisuudet putosivat ensimmäisten päivien aikana merkittävästi, piin puolestaan nousi. Toisin sanoen masuunikuonan osuus kierrossa olevasta materiaalista pieneni. Tämä vahvisti aikaisemmin visuaalisesti tehtyjä havaintoja luonnonhiekan lisääntymisestä syklonikierrossa. Klasilan (2019) arvion mukaan masuunikuonan osuus kierrossa olevasta materiaalista oli noin 80% kahden viikon ajojakson jälkeen, perustuen näytteen piipitoisuuteen. Tämän jälkeen masuunikuonan ja luonnonhiekan välinen suhde kierrossa pysyi jokseenkin vakiona. Koska alkaleita kuitenkin oli kertynyt petiin runsaasti ja hiekan osuus kierrossa lisääntyi ensimmäisten viikkojen aikana, tehtiin ratkaisu masuunikuonan syötön lisäämisestä 3.6.2019. Määrä nostettiin 3 tonnista 6 tonniin vuorokaudessa.



Kuvio 12. Magnesium- ja mangaanipitoisuus syklonikierrossa



Kuvio 13. Piipitoisuus syklonikerrossa

Yhdyskuntajätteen mukana tullut suuri hiekan ja muun palamattoman materiaalin määrä, joka kertyi petiin, hankaloitti pilot-jaksoa. Tämä oli lisäksi otettava huomioon testijakson tuloksia arvioidessa. Peti ei enää kiinteälle polttoaineelle siirtymisen jälkeen koostunut pelkästään masuunikuonasta, vaan siinä oli mukana myös hiekkaa. Oli siis mahdollista, että aikaisemmin hiekkapetillä esiintyneitä sintraantumisolmiötä sekä petin karkenemistä ilmeni polttoaineen mukana tulleen hiekan takia petimateriaalin vaihdosta huolimatta. Tästä ongelmasta huolimatta pilot-jaksoa jatkettiin suunnitellusti kesän yli. Kierrossa olevan petimateriaalin alkuainepitoisuutta seurattiin 14.6.2019 ja 9.7.2019 otetuilla seurantanäytteillä (ks. liite 6).

9 Tulokset

Työn tuloksia varten kerättiin aineistoa kahdella eri tavalla. Kesän yli kestäneeltä pilot-jaksolta saatiin kerättyä prosessidataa Riikinvoiman PHD:lta (Process History Database). Se koostui käytännössä paine-, lämpötila- ja virtausmittauksista eri puolilta tulipesää, sykloonia sekä leijukerroslämmönsiirintä. Tulososiossa esitetyt kuvat on tehty PHD:lta kerätyn Excel-pohjaisen mittausdatan pohjalta ja esitetty päivittäisenä

keskiarvona. Vertailukohtaksi valittiin vastaava ajankohta kesältä 2018. Tämä lisäsi vertailun luotettavuutta, sillä vuodenajan aiheuttama vaihtelu esimerkiksi polttoaineen laadun osalta saatiin rajattua pois. Lisäksi vertailtavat jaksot alkoivat heti kevään huoltoseisokin jälkeen, jolloin olosuhteet prosessissa olivat lähtökohtaisesti samanlaiset puhdistusten ja korjausten jälkeen.

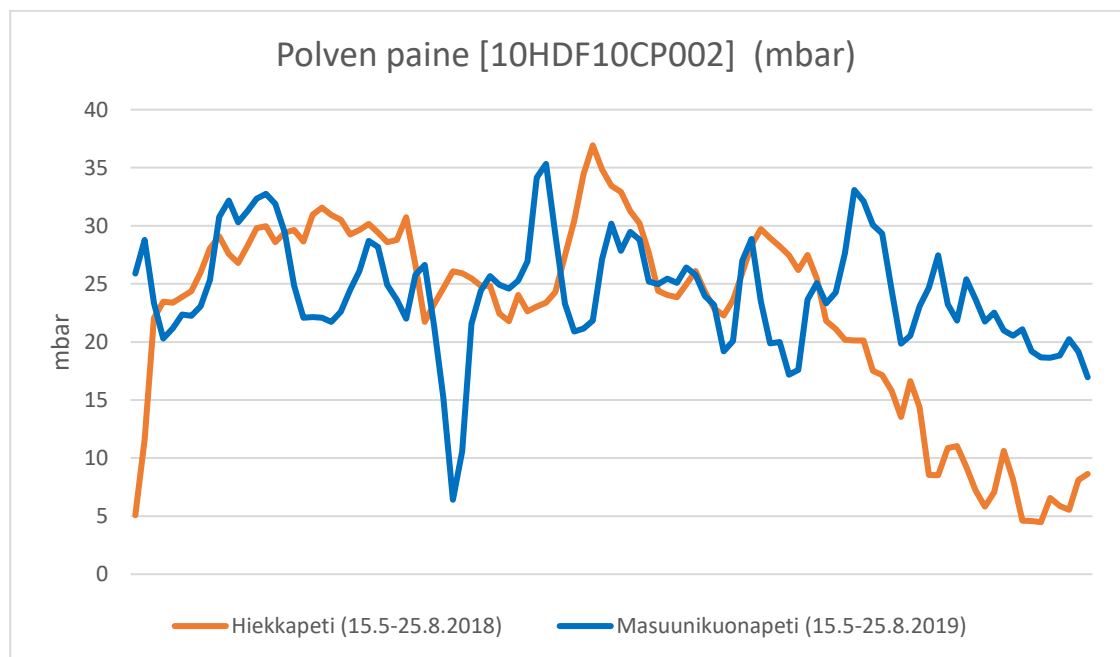
Aineistoa kerättiin myös sekä kevään että syksyn huoltoseisokeissa tarkastelemalla aikaisemmin todettuja ongelmakohtia tulipesän ja syklonin sisällä. Muodostuneista sintraantumista otettiin valokuvia ja kerättiin kerrostumanäytteitä. Näissä havainnoissa pyrittiin vertailemaan sintraantumien kokoluokkaa sekä koostumusta hiekka- ja masuunikuonapetin välillä.

9.1 Petimateriaalin kierto

Pilot-jaksolle lähdetessä tärkeimpiä tarkastelun kohteita oli petimateriaalin kierto tulipesän ja syklonin välillä. Tätä tarkoitusta varten tutkittiin syklonin polven painemittausta (10HDF10CP002). Kyseisen painemittauksen arvo kertoo syklonista polvilukkoon tulevasta petimateriaalin määrästä. Paineen laskiessa polven painemittauksessa voidaan päätellä, että sinne tulevan petimateriaalin määrä on vähentynyt. Kattilan väliaikainen tehon pudottaminen laskee myös polven painetta hetkellisesti, mutta jatkuva polven paineen pieneneminen kertoo petin karkenemisestä tai sykloniin muodostuneesta sintraantumasta, joka estää petimateriaalin normaalia kiertoa. Siten kyseistä painemittausta voidaan pitää hyvänä ensikäden tietona mahdollisesta sintraantumasta syklonissa.

Polven painemittausta tutkittiin 15.5.2019 – 25.8.2019 väliseltä ajalta. Kyseistä dataa verrattiin 15.5.2018 – 25.8.2018 kerättyyn dataan vastaavasta mittauksesta, jolloin petimateriaalina oli käytössä luonnonkvartsihiekkä. Kuviossa 14 on esitetty vertailu polven painemittauksen osalta hiekka- ja masuunikuonapetin välillä. Masuunikuonan osalta tuloksia väärästi ennakoimaton alasajo kesäkuun puolella välissä, mikä näkyi kuvaajassa jyrkkänä paineen laskuna 5 mbar:iin. Lisäksi pilot-jakson loppupuolella (elokuu 2019) kattilaa ajettiin vajaalla kuormalla (48 MW) polttoaineensyötön häiriöiden takia, mikä osaltaan heikensi petimateriaalin kiertoa.

Eroja tarkastelujaksojen välillä oli havaittavissa heinäkuun loppupuolelta alkaen. Tässä vaiheessa alkoi hiekkapetillä ajettaessa näkymään ensimmäisiä merkkejä kierron heikkenemisestä (ks. kuvio 14). Polven paine putosi hiekkapetillä merkittävästi tarkastelujakson loppupuolella viimeisen kuukauden aikana, ollen ennen syksyn huoltoseisokkia keskimäärin 5-10 mbar:n välillä. Masuunikuonapetillä vastaavia merkkejä kierron heikkenemisestä ei havaittu pilot-jakson aikana. Polven paine säilyi melko taseisena 20-30 mbar:n välillä, kun petimateriaalina käytettiin ilmajäähdytettyä masuunikuonaa (ks. kuvio 14). Polven painemittauksen perusteella petimateriaalin kierto masuunikuonalla toimi moitteettomasta. Merkkejä mahdollisen syklonisitraantum tai petin karkenemisen aiheuttamasta kierron heikkenemisestä ei ollut havaittavissa pilot-jakson aikana.



Kuvio 14. Polven painemittaus

9.2 BMHE:n lämmönsiirto

Lämmönsiirron kehittyminen kattilan leijukerroslämmönsiirtimessä oli sintraantumien ohella kiinnostava tutkimuksen kohde petimateriaalin vaihduttua. Kuten aikai-

semmin todettiin leijukerroslämmönsiirtimellä on tärkeä merkitys kattilan säädettävyyden sekä tulipesän lämpötilojen kannalta. Riikinvoima Oy:n CFB-kattilassa leijukerroslämmönsiirtimen tuottaman lämpötehon osuus kattilan kokonaistehosta on noin 15 %.

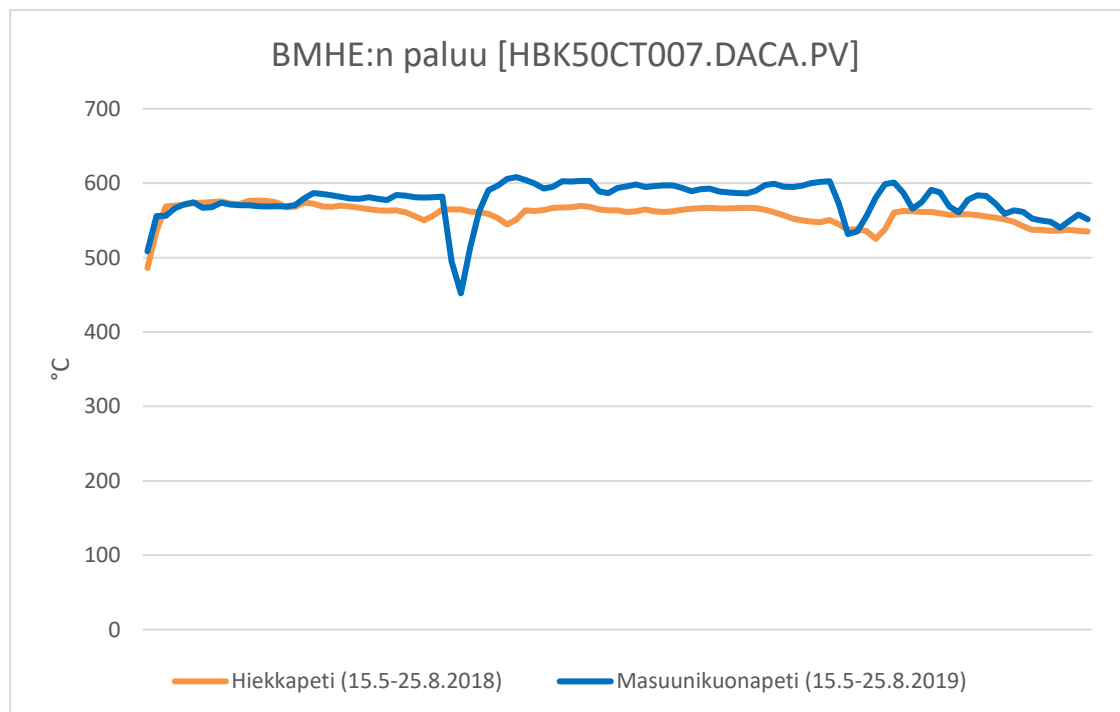
Leijukerroslämmönsiirtimelle tulevan petimateriaalin määrää säädetään säätökivellä, joka on käytännössä mekaaninen venttiili. Normaalisti säätökivi on CAS-tilassa (säädöllä). Säätökiven asento on laskennallinen ja siihen vaikuttavia tekijöitä ovat kattilan polttoaineteho, BMHE:n tehosäätö, polven paine sekä tulipesän yläosan lämpötila (+24,1 m). Näiden lisäksi korjattuun säätökiven asennon laskentaan operaattori voi vaikuttaa muuttamalla trim-arvoa välillä -10 % - 20 %. Trim-arvoa muuttamalla operaattori voi tarvittaessa korjata prosessissa äkillisesti tapahtuvia lämpötilamuutoksia. Säätökiven avaamisella petimateriaalia kulkeutuu enemmän BMHE:lle, jolloin lämmönsiirto siellä tehostuu ja tulipesään palautuu enemmän jäähtynyttä petimateriaalia. Säätökiven kiinniohjauksella kuumana tulipesään palautuvan petimateriaalin määrä puolestaan lisääntyy ja BMHE:n lämpöteho pienenee.

Leijutusilmaa syötetään leijukerroslämmönsiirtimessä petimateriaalin kulkusuunnasta katsottuna tulo-, tulistin- ja höyrystinkammioihin sekä viimeisenä BMHE:n paluukanavaan. BMHE:n leijutusilmoihin ei tehty vertailujaksoilla muutoksia. Mahdolliset muutokset lämmönsiirrossa johtuivat siis pelkästään kierrossa olevan petimateriaalin suspensiotiheydestä ja ominaisuuksista. Masuunikuonasta oli tiedossa sen irtotilavuus, noin 1300 kg/m^3 , ja partikkelikoko, 0,1-0,5 mm (ks. liite 3). Luonnonhiekalla irtotilavuus oli noin 1500 kg/m^3 ja partikkelikoko 0,1-0,5 mm. Ilmajäähdytetyn masuunikuonan ominaislämpökapasiteettia tai lämmönjohtavuutta ei tämän työn puitteissa tutkittu.

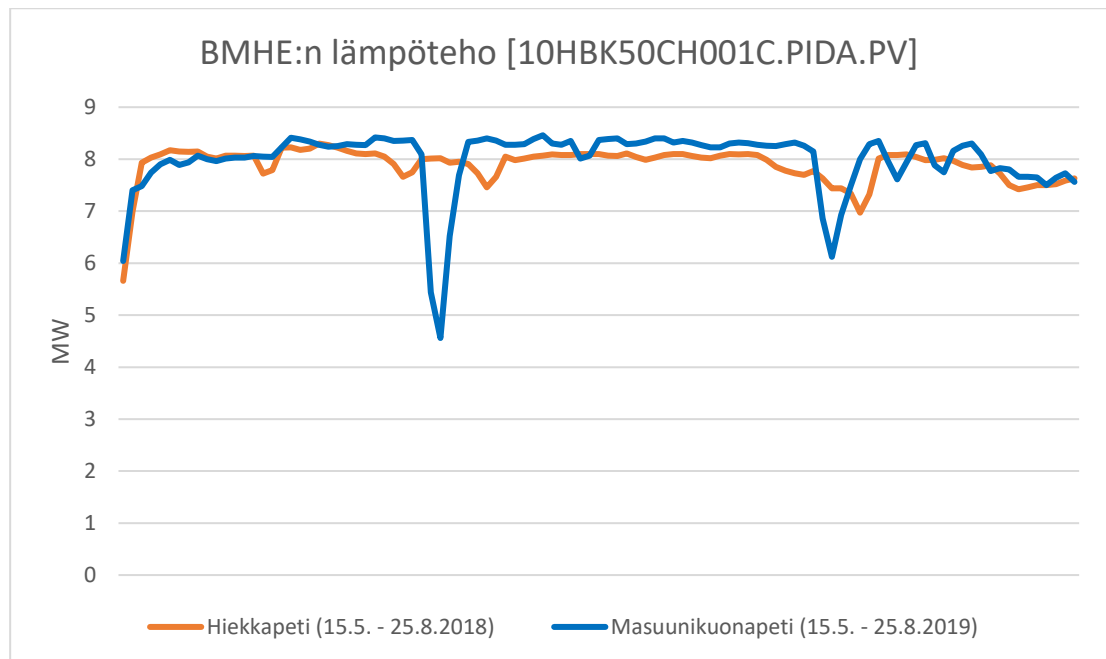
Polven kautta BMHE:lle tulevan petimateriaalin lämpötilassa ei havaittu merkittävää muutosta tarkastelujaksojen välillä. Tulipesään palaavan petimateriaalin lämpötilan osalta muutoksia oli havaittavissa, kun vertailtiin kuukauden mittaista häiriötöntä ajanjaksoa heinäkuulta (ks. kuvio 15). Hiekkapetillä palaavan materiaalin lämpötila oli jakson alussa keskimäärin noin $565 \text{ }^\circ\text{C}$ ja jakson loppupuolella noin $550 \text{ }^\circ\text{C}$. Samaan

aikaan säätökiven korjattu asento nousi 22 %:sta noin 27 %:iin ja säätökiven teho putosi 8,1 MW:sta 7 MW:iin (ks. kuvio 16). Nämä tekijät viittasivat petimateriaalin kierron heikentyneen, jonka seurauksena BMHE:n läpi leijutettavan petimateriaalin suspensiotiheys oli pienentynyt. Todennäköisin syy tälle oli joko petin karkeneminen, jolloin syklonille tulevan hienoaineksen osuus oli pienentynyt, tai mahdollinen sint-raantuma syklonissa.

Masuunikuonapetillä vastaavaa kierron heikkenemisestä johtuvaa muutosta leijukerroslämmönsiirtimen toiminnassa ei havaittu. Säätökiven asento pysyi samalla tarkastelujaksolla 20-22 % välillä ja teho 8,3 MW:ssa (ks. kuvio 16). Petimateriaalin paluulämpötila pysyi myös melko tasaisena 595-600 °C välillä (ks. kuvio 15). Elokuun 2019 aikana BMHE:n toimintaa ei voitu tarkastella enää luotettavasti polttoaineensyötössä esiintyneiden häiriöiden ja niistä johtuneen kattilan kuormamuutoksen takia. On kuitenkin huomioitava, ettei BMHE:n lämpötehossa tai petimateriaalin paluulämpötilassa tapahtunut systemaattista laskua tarkastelujakson aikana häiriötilanteita lukuun ottamatta.



Kuvio 15. Leijukerroslämmönsiirtimen paluulämpötila

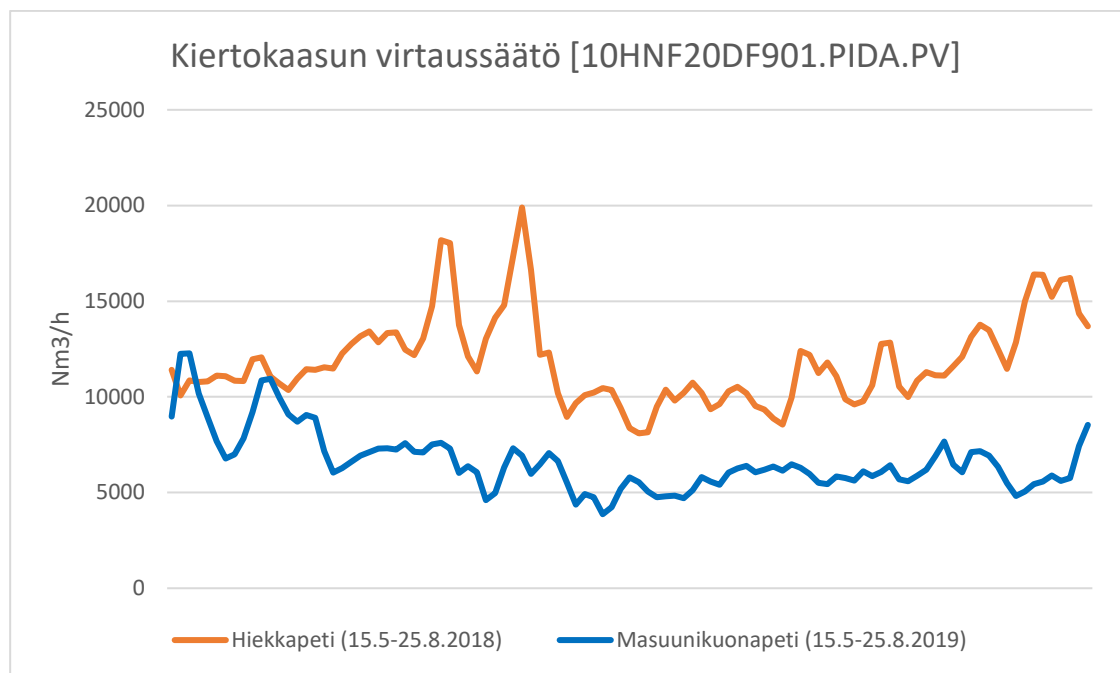


Kuvio 16. BMHE:n lämpöteho

Leijukerroslämmönsiirtimen kautta tulipesään palaavalla petimateriaalilla on myös suuri vaikutus tulipesän lämpötilaprofiiliin. Kierron heikentyessä BMHE:lta ei tule riittävästi jäähtynyttä ja hienojakoista petimateriaalia tulipesään, jolloin lämpötilaero tulipesän ala- ja yläosan välillä alkaa kasvamaan. Petin karkenemisen takia palaminen muuttuu alaosassa epätasaiseksi, jolloin lämpötilat siellä alkavat putoamaan. Tulipesän yläosan lämpötilat lähtevät samanaikaisesti nousemaan palamisen siirtyessä osittain sinne. Tämä on havaittavissa parhaiten tulipesän yläosaa jäähdyttävän kiertokaasun määrästä. Kiertokaasun virtaus pidetään pääsääntöisesti CAS-tilassa kierron toimiessa optimaalisesti. Yläosan lämpötilojen nousun myötä kiertokaasun määrä alkaa kasvamaan merkittävästi, mikä puolestaan johtaa savukaasuvirran kasvuun. Tällöin savukaasupuhaltimesta tulee rajoittava tekijä ja operaattorit joutuvat ottamaan kiertokaasun AUTO-tilaan (automaatille) ja ajamaan sitä käsin. Kun kiertokaasun määrää ajetaan käsin pienemmäksi, lähtevät yläosan lämpötilat uudelleen kohoamaan.

Hiekka- ja masuunikuonapetin vaikutusta kiertokaasun määrään tarkasteltiin kiertokaasun virtausmittauksen (10HNF20DF901.PIDA.PV) avulla (ks. kuvio 17). Hiekkape-

tillä kiertokaasun virtaussäätö oli tarkastelujaksolla keskimäärin 11871 Nm³/h, korkeimman päivittäisen keskiarvon ollessa 24275 Nm³/h. Masuunikuonapetillä kiertokaasu oli keskimäärin 6624 Nm³/h ja korkein päivittäinen keskiarvo 12279 Nm³/h. Erot näiden kahden petimateriaalin välillä olivat tältä osin merkittävät, sillä kiertokaasun virtaus oli masuunikuonapetillä keskimäärin noin 44% pienempi hiekkapetiin verrattuna. Koska kiertokaasua meni määrällisesti vähemmän masuunikuonapetillä, niin sekä kiertokaasupuhallin että savukaasupuhallin selvisivät pienemmällä kuormalla. Tämä tarkoitti puolestaan säästöä sähkön omakäytössä.



Kuvio 17. Kiertokaasun virtaussäätö

Edellä esitetty tarkastelu osoitti, että masuunikuonapetillä petimateriaalin kierto ja lämmönsiirto BMHE:n kautta toimi tarkastelujaksolla hiekkapetiä paremmin. Hiekkaa kevyempänä materiaalina ilmajäähdytettyä masuunikuonaa lähti todennäköisesti kiertoon enemmän, jolloin suspensiotiheys leijukerros­lämmönsiirtimellä oli suurempi ja pysyi tasaisena koko pilot-jakson ajan häiriötilanteita lukuun ottamatta. Ilmajäähdytettyllä masuunikuonalla saatiin aikaan myös parempi leijutus leijukerros­lämmönsiirtimen läpi, koska leijutusilmojen määriin ei tehty muutosta ja materiaalin tiheys

oli pienempi kuin luonnonhiekillä. Paremman leijutuksen ja suuremman suspensiotiheyden takia lämmönsiirto leijukerroslämmönsiirtimessä oli hiekkapetiin verrattuna hieman tehokkaampaa ilmajähdytetyllä masuunikuonalla (suurempi lämpöteho BMHE:lta).

BMHE:lta tulipesään palautuvan materiaalin lämpötila oli masuunikuonapetillä korkeampi hiekkapetiin verrattuna. Samaan aikaan tulipesän lämpötilat pysyivät kuitenkin tasaisempina ja kiertokaasun määrä merkittävästi pienempänä masuunikuonapetillä. Tämän perusteella edellä esitetty johtopäätös suuremmasta suspensiotiheydestä ja paremmasta leijutuksesta masuunikuonalla näkyi myös BMHE:lta tulipesään palaavan materiaalin määrässä, joka puolestaan heijastui lämpötilaprofiiliin ja kiertokaasun määrään. Hiekkapetillä BMHE:n lämpöteho alkoi tippumaan samaan aikaan, kun paluulämpötila alkoi laskemaan. Alhaisempi paluulämpötila ei siis indikoinut parempaa lämmönsiirtoa kattilan BMHE:ssä, vaan kertoi ennemmin tulipesään palaavan petimateriaalin määrän vähentymisestä. Tätä johtopäätöstä tukee myös havainto kierron heikkenemisestä hiekkapetillä, jonka seurauksena BMHE:lle tulisi vähemmän hienojakoista petimateriaalia. Petimateriaalin partikkelikoon vaikutusta lämmönsiirtoon ei voitu tutkia, koska sykloninäytteitä ei otettu luonnonhiekan ollessa petimateriaalina.

9.3 Sintraantumet syklonissa ja tulipesässä

Tutkimuksen päätavoitteena oli syklonin ja tulipesän alueen sintraantumien tutkiminen hiekka- ja masuunikuonapetin välillä. Sintraantumien kuvaaminen ja kerrostumanäytteiden ottaminen suoritettiin huoltoseisokkien yhteydessä, kun kriittisiä alueita päästiin tarkastelemaan kattilan sisäpuolelta. Merkittävimmät kerrostumat olivat muodostuneet aikaisemmin syklonin alaosaan sekä tulipesän ja syklonin välisen yhdyskanavan vastapäätä olevalla alueella tulipesän kattoon. Kevään 2019 huoltoseisokissa todettiin sintraantumet kyseisistä kohteista, kun petimateriaalina oli ollut luonnonhiekkä. Sintraantumien rakenne ja alkuainekoostumus oli identtinen jokaisessa kerrostumassa kuuman kierron alueella. Sykloni oli puhdistettu helmikuussa 2019, laitoksen alasajoon johtaneen syklonisintraantumien takia. Tämän jälkeen laitos oli ajossa n. 10 viikon ajan ennen kevään huoltoseisokkia. Tässä ajassa sykloniin oli

muodostunut merkittävä sintraantuma, joka ei kuitenkaan vielä tukkinut kiertoa (ks. kuvio 18). Yhdyskanavan päältä katsottuna sintraantuma muodosti spiraalimaisen harjanteen syklonin vasemmalle sivustalle ja sen oikeassa reunassa oli aukko, josta petimateriaali pääsi kiertämään polveen. Sykloni puhdistettiin ennen pilot-jakson alkua.

Syksyn huoltoseisokin yhteydessä päästiin tutkimaan sintraantumia sen jälkeen, kun petimateriaalina oli toiminut ilmajäähdytetty masuunikuona. Tarkastelun yhteydessä syklonissa havaittiin sintraantuma, jonka kokoluokka oli kuitenkin merkittävästi pienempi keväällä 2019 havaittuun sintraantumaan verrattuna (ks. kuvio 19). Sintraantumien koon arvioinnissa on otettava myös huomioon, että masuunikuonapetillä ajettiin n. 5 viikkoa pidempi ajojakso, eli yhteensä n. 15 viikkoa. Sintraantuma sijaitsi edelleen syklonin alaosan vasemmalla sivustalla, mutta alaosa oli suurelta osin edelleen auki, mikä mahdollisti petimateriaalin tasaisemman kierron syklonista polveen. Aikaisemmin tehty havainto petimateriaalin hyvästä kierrosta masuunikuonalla tuki myös tätä teoriaa.



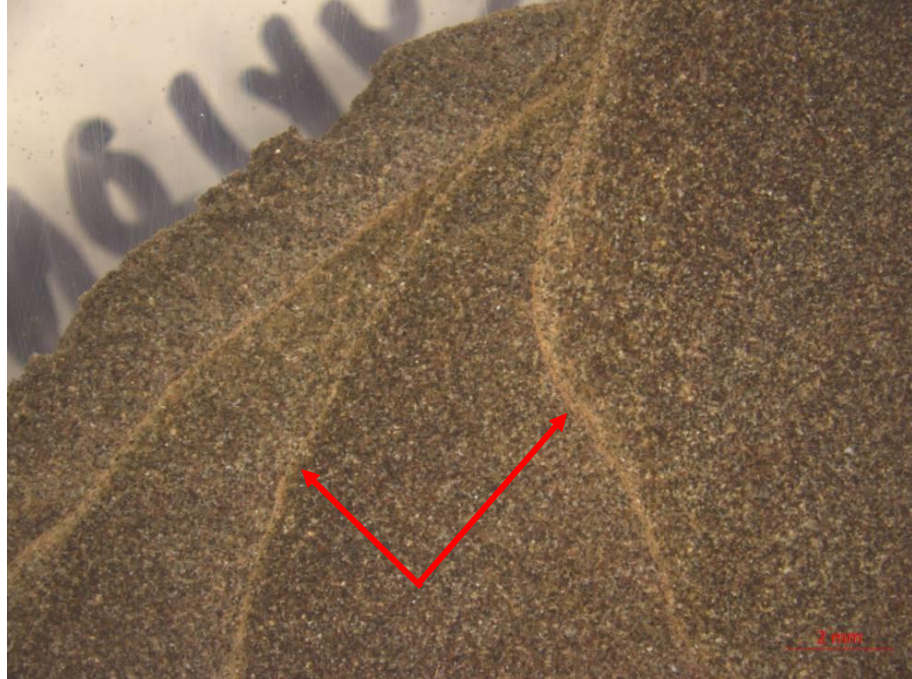
Kuvio 18. Syklonin sintraantuma hiekkapetillä (10 viikon ajojakson jälkeen)



Kuvio 19. Syklonin sintraantuma masuunikuonapetillä (15 viikon ajojakson jälkeen)

Kevään huoltoseisokissa sykloniin muodostunut kerrostuma oli tasaisesti yhteen liimautunutta ja sitä jouduttiin puhdistamaan mekaanisesti paineilman avulla. Pilot-jakson jälkeen myös kerrostuman rakenteessa havaittiin selkeä muutos. Puhdistuksen yhteydessä sintraantuma alkoi purkautumaan itsestään ilman mekaanista puhdistusta ja syklonista valunut irtonainen materiaali saatiin imuroitua pois polven miesluukun kautta. Irtonaisen materiaalin joukossa oli levymäisiä kovempia kerrostumia, joita kerättiin talteen ja analysoitiin tarkemmin Eurofins Expert Services Oy:n toimesta. Näiden kerrostumien lähempi tarkastelu vahvisti sintraantumien rakennemuutoksen hiekkapetiin verrattuna. Masuunikuonapetillä sykloniin muodostuneessa sintraantumassa oli havaittavissa kovia kerroksia, joiden välissä oli täysin irtonaista materiaalia (ks. kuvio 20, kovat kerrokset osoitettu nuolilla). Tällainen rakenne viittasi siihen, että palamisprosessissa on aika ajoin syntynyt normaalia korkeampia lämpötiloja, mikä on mahdollistanut sulan faasin muodostumisen. Pilot-jaksolla sattuneiden häiriötilanteiden aikana jouduttiin turvautumaan petilanssien käyttöön ja polttamaan öljyä, jolloin hiekan sulamiseen vaadittava lämpötila-alue on todennäköisesti ylitetty. Tätä ei kuitenkaan pystytty todistamaan lämpötilamittauksista saatavan da-

tan perusteella, koska korkeat lämpötilat kohdistuvat vain hyvin pienelle alueelle öljylikin ympärille. Oli kuitenkin epätodennäköistä, että kiinteän polttoaineen mukana olisi tullut suuria määriä materiaalia, joka olisi muodostanut palaessaan hiekan sulamiseen vaadittavia lämpötiloja ja aiheuttanut tämänkaltaisia kerrostumia.



Kuvio 20. Sintraantumien rakenne masuunikuonapetillä

Tulipesän katon sintraantumassa havaitut muutokset olivat vielä suuremmat, kuin syklonissa. Kevään 2019 huoltoseisokissa tulipesän katossa todettiin sintraantuma, joka muodosti paksuimmillaan yli 50 cm kerroksen sekä peitti laajan alueen tulipesän ja syklonin välisen yhdyskanavan vastapäätä olevalta seinältä. Kerrostuman puhdistaminen vaati telineiden rakentamisen sekä tulipesän katon piikkauksen. Kuviossa 21 on kuva tästä kerrostumasta, ja sen keskelle on merkattu alue, jolta kerrostumaa on osittain puhdistettu muuraukseen asti. Tulipesän kattoon muodostuneesta kerrostumasta saatiin viitteitä myös ennen kevään 2019 huoltoseisokkia tulipesän yläosan (+24,1 m) lämpötilamittausten perusteella. Kyseisessä mittapisteessä on kolme erillistä mittauspaikkaa, joista mittaus 1:n (10HBK10CT041.DACA.PV) lämpötila on alkanut putoamaan merkittävästi kahteen muuhun mittauspaikkaan nähden (ks. liite 7). Kyseisen

mittauksen mitta-anturi sijaitsee samassa kohdassa kattoon muodostuneen kerrostuman kanssa ja lämpötilan putoaminen johtui anturin ympärille muodostuneesta eristävästä kerroksesta. Operoinnin aikana mittausta jouduttiin puhdistamaan, josta ajoittaiset lämpötilan korjaantumiset johtuivat. Puhdistuksen vaikutukset jäivät kuitenkin hetkellisiksi ja lämpötila alkoi uudelleen laskemaan.

Pilot-kokeen jälkeen tulipesän kattoon ei ollut muodostunut kerrostumaa, joka olisi vaatinut puhdistusta. Muutamassa kohdassa todettiin noin 5 cm paksuisia yksittäisiä kerrostumia, mutta suurelta osin katto oli puhdas ja jopa edellisen kevään piikkausjäljet olivat erotettavissa muurauksen pinnalta (ks. kuvio 22). Tulipesän yläosan lämpötilamittauksissa ei myöskään ollut havaittavissa viitteitä antureiden eteen muodostuneesta kerrostumasta (ks. liite 8). Kaikkien kolmen mittapisteen lämpötilat pysyivät tasaisena koko pilot-jakson ajan, eikä niitä tarvinnut puhdistaa operoinnin aikana. Kyseessä oli ensimmäinen huoltoseisokki Ekovoimalaitoksella, kun tulipesän kattoon ei tarvinnut rakentaa telineitä ja piikata kattoa. Tältä osin kustannussäästöä tuli teline- ja puhdistustöiden osalta.



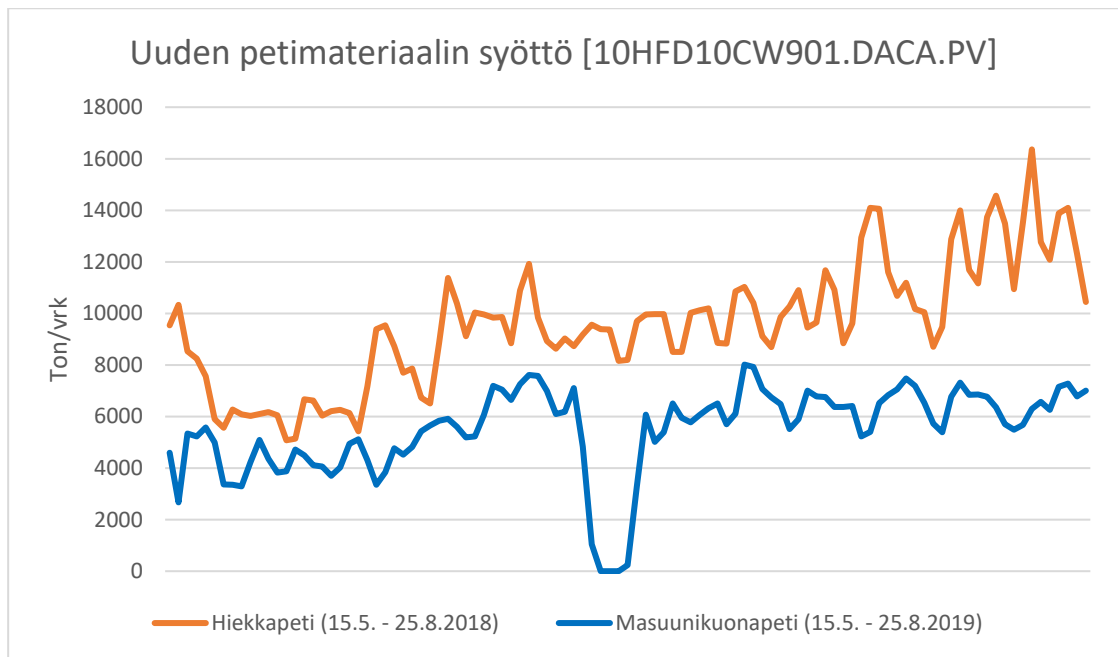
Kuvio 21. Tulipesän katto hiekkapetillä



Kuvio 22. Tulipesän katto masuunikuonapetillä

9.4 Petinvaihtotarpeen arviointi

Pilot-jakson aikana masuunikuonan vaihtotarvetta pyrittiin arvioimaan petin alkuaikainpitoisuuksien mukaan. Kuten aikaisemmin todettiin, testin alkuvaiheessa ilmajäähdytetyn masuunikuonan syöttö oli noin 3 tonnia/vrk ja alkalikertymän vuoksi se nostettiin 6 tonniin/vrk. Pohjatuhkan poiston määrä pidettiin koko pilot-jakson ajan vakiona, eli ainoastaan uuden petimateriaalin määrää kierrossa lisättiin. Petimateriaali-siilosta kiertoon syötettävän materiaalin määrää säädettiin tulipesän ilmakaapin paineen mukaan. Aloitusraja petimateriaalin syötölle oli pilot-jakson aikana 200 mbar ja pysäytysraja puolestaan 210 mbar. Uuden masuunikuonan syöttö pidettiin pilot-jakson loppuun asti 6-7 tonnissa/vrk (ks. kuvio 23), eikä leijutuksessa, palamisessa tai petimateriaalin kierrossa havaittu tällä syötöllä ongelmia. Samalla tarkastelujaksolla hiekkapetillä vaihtotarve nousi jakson loppupuolella 12-14 tonniin/vrk (ks. kuvio 23). Masuunikuonalla petiä vaihdettiin siis tarkastelujakson loppupuolella keskimäärin 6-7 tonnia/vrk vähemmän, kuin luonnonhiekalla.



Kuvio 23. Uuden petimateriaalin syöttö

Masuunikuonan osuutta kierrossa olevasta materiaalista ei pystytty enää arvioimaan sykloninäytteiden alkuainepitoisuuksien perusteella 9.7.2019 otetun seurantanäytteen perusteella (ks. liite 6). Masuunikuonan tunnusomaisten alkuaineiden muutokset aikaisempiin näytteisiin verrattuna eivät olleet muuttuneet merkittävästi, mutta ne olivat kuitenkin pieniä toimitettuun masuunikuonaan nähden. Uutta masuunikuonaa jouduttiin syöttämään tulipesään runsaasti, jotta petiin kertyneen hiekan ja seulalta palautuneen karkean materiaalin määrää saatiin kompensoitua. Tämän takia masuunikuonan todellista vaihtotarvetta ei pystytty siis realistisesti arvioimaan. Luonnonhiekkään nähden masuunikuonaa kuitenkin vaihdettiin merkittävästi vähemmän ja prosessin havaittiin toimivan silti hyvin. Tämän perusteella ilmajäähdytetyllä masuunikuonalla on mahdollista päästä huomattavasti pilot-jaksolla nähtyä pienempään petinvaihtoon, jos polttoaineen mukana tullut hiekka sekä pienet agglomeraatit saadaan poistettua pohjatuhkaseuloilla kierrosta.

9.5 Kiertotalousnäkökulma

Ilmajäähdetytyn masuunikuonan ominaisuuksien ja soveltuvuuden tutkimisen lisäksi esille haluttiin nostaa kiertotalousnäkökulma, koska kyseessä oli täysin uudenlainen materiaali tässä käyttötarkoituksessa. Luonnonhiekan korvaaminen masuunikuonalla oli ratkaisu, joka toi merkittävää lisäarvoa Ekovoimalaitokselle materiaalitehokkuuden osalta.

Vuonna 2018 Riikinvoima Oy:n Ekovoimalaitoksen kiertopetikattila käytti 3363 tonnia luonnonhiekkaa. Petimateriaalin vaihto ilmajäähdetytyn masuunikuonaan tarkoitti, että vuositasolla Ekovoimalaitos säästää kyseisen määrän uusiutumattomia luonnonvaroja. Lisäksi ilmajäähdetytyn masuunikuonaa tarvitsi vaihtaa luonnonhiekkaa vähemmän, joten myös petiin syötetyn materiaalin absoluuttinen määrä väheni. Tämä puolestaan vähentää polttoprosessissa syntyvän tuhkan määrää, jolloin tuhkan kiertäykseen liittyvät kustannukset pienenevät. Petimateriaalin vaihtoa luonnonhiekkasta ilmajäähdetytyn masuunikuonaan voidaan siten perustellusti pitää askelena kohti parempaa materiaalitehokkuutta. Se on myös linjassa aikaisemmin mainittujen UNEP:n ehdottamien toimien kanssa, jotka koskevat luonnonhiekan kestävää käyttöä.

Masuunikuonan kaltaiset kiertotaloutta edistävät ratkaisut tarjoavat teollisuudessa toimiville yrityksille mahdollisuuden pyrkiä ympäristön kannalta kestävämpiin tuotantomenetelmiin. Leijukerrospolttoon perustuvat voimalaitokset ovat hyvä esimerkki luonnonhiekan käyttökohteista, joissa uusiutumattoman luonnonvaran käyttöä voidaan korvata toisesta prosessista saatavalla sekundäärivirralla. Tämä voidaan joissain tapauksissa toteuttaa jopa siten, että prosessin toiminta paranee alkuperäiseen verrattuna, kuten tämä työ osoitti. Lisäksi materiaalitehokkuuteen ja kiertotalouteen liittyvät tekijät ovat nykypäivänä tärkeässä roolissa yrityksen imagon ja maineen kannalta, eikä energiayhtiöt muodosta tässä tapauksessa poikkeusta.

9.6 Jatkotoimenpiteet

Edellä esitettyjen tulosten perusteella tutkimuksen aikana nousi esiin kaksi merkittävää petimateriaalin sintraantumiseen ja kierron heikkenemiseen liittyvää ongelmaa, jotka on tulevaisuudessa huomioitava petimateriaalin vaihdon lisäksi. Pohjatuhkan seulonta on avainasemassa petimateriaalin optimaalisen partikkelikoon ylläpitämisessä ja pilot-jakson aikana sen toimivuudessa havaittiin puutteita. Kiertoön palautuvan materiaalin partikkelikoko mahdollisti polttoaineen mukana tulleen hiekan ja poltossa syntyneiden agglomeraattien palautumisen tulipesään. Tämän lisäksi myös osa käyttökelpoisesti masuunikuonasta poistui kierrosta hienon pohjatuhkan mukana. Pilot-jaksolla testattiin kahta uudenlaista seulalevyä pienemmällä silmäkoolla ja erilaisella reiän muodolla, mutta niiden ongelmaksi muodostui tukkeutuminen. Alkuperäisistä seulalevyistä ei ollut saatavilla vastaavaa rakennetta pienemmällä reikäkoolla. Saatujen tulosten perusteella seulonnassa nähtiin selvää kehittämistarvetta, joten Riikinvoima Oy:n Ekovoimalaitoksella lähdettiin suunnittelemaan uudenlaista konseptia petimateriaalin seulontaan.

Kevyen polttoöljyn käyttö tukipolttoaineena nousi myös vahvasti esille tutkimuksen aikana. Pilot-jakson jälkeen syklonissa todetun sintraantumisen kerroksittainen rakenne viittasi siihen, että tulipesään on muodostunut aika ajoin normaalista poikkeavia paikallisesti korkeita lämpötiloja, minkä seurauksena polttoaineen mukana tullut hiekka on alkanut sulamaan. Kevyen polttoöljyn käyttöä häiriötilanteiden yhteydessä pidettiin todennäköisimpänä vaihtoehtona tämän aiheuttajaksi. Tämän oletuksen pohjalta lähdettiin pohtimaan vaihtoehtoja kevyen polttoöljyn korvaamiselle. Esiin nousi esimerkiksi pelletin käyttö tukipolttoaineena polttoaineensyötön häiriötilanteiden aikana. Pilot-jakson jälkeisenä jatkotoimenpiteenä käynnistettiin selvitys uuden tukipolttoaineen hyödyntämisestä, jotta mahdollisesti petilanssien käytöstä johtuvasta petin sintraantumisesta päästäisiin eroon. Osaltaan tällainen ratkaisu vähentäisi myös fossiilisten polttoaineiden käyttöä.

10 Pohdinta

10.1 Tuloksien arviointi

Kyseessä oli ensimmäinen kerta, kun ilmajäähdytettyä masuunikuonaa testattiin laitosmittakaavassa kiertopetiteknikkaan perustuvassa jätteenpolttolaitoksessa. Testaukseen liittyi siis paljon avoimia kysymyksiä, joihin lähdettiin hakemaan vastauksia. Kolmen kuukauden testijakso oli verrattain lyhyt ja siksi ilmajäähdytetyn masuunikuonan käytöstä on kerättävä lisää dataa pidemmältä ajanjaksolta, jotta kyseisen petimateriaalin ominaisuuksista saadaan parempi ymmärrys ja voidaan tehdä pidemmälle meneviä johtopäätöksiä niiden kaikista vaikutuksista. Työn tuloksena saatiin kuitenkin arvokasta ensikäden tietoa masuunikuonan soveltuvuudesta jätteenpolttolaitoksen polttoprosessiin.

Pilot-jaksolla esiintyi polttoaineeseen sekä prosessiin liittyviä haasteita, jotka vaikuttivat alkuperäiseen suunnitelmaan ja täytyi ottaa huomioon myös tulosten analysoinnissa. Näistä merkittävin oli polttoaineen mukana tullut hiekka, jota kertyi petiin merkittäviä määriä. Tähän ongelmaan liittyi kiinteästi petituhkan seulonnan haasteet, sillä hiekkaa ja muuta palamatonta ainesta ei saatu tehokkaasti poistettua tulipesästä. Kun petiin kertyneen hiekan määrää jouduttiin kompensoimaan puhtaan masuunikuonan syötöllä, ei todellista petinvaihtotarvetta pystytty arvioimaan. Tämä oli huomioitava myös sintraantumien sekä BMHE:n toiminnan tarkastelussa, sillä kierrossa ollut petimateriaali sisälsi masuunikuonan lisäksi myös hiekkaa. Prosessissa ilmeni lisäksi petimateriaalin vaihdosta riippumattomia häiriöitä automaatiojärjestelmässä sekä polttoaineensyötössä, jotka osaltaan häiritsivät kesän aikana suoritettua pilot-jaksoa.

Riikinvoima Oy:n Ekovoimalaitoksella suurimpana muuttujana toimi jätepolttorakenteen heterogeisuus, jota ei palakokoa ja metallienpoistoa lukuun ottamatta pystytty kontrolloimaan. Kun polttoaineen koostumus ja alkuainepitoisuudet vaihtelevat niin myös palamisprosessissa vapautuvat yhdisteet muuttuvat niiden mukana. Tämä puo-

lestaan muuttaa jatkuvasti esimerkiksi tuhkan sulamiskäyttäytymistä sekä korroosioon vaikuttavia olosuhteita. Tärkein rooli jätepolttoaineen koostumuksen kannalta on jätteiden syntyapaikkalajittelulla, joten polton yhteydessä tätä muuttujaa ei voida enää hallita. Myös vuodenaika vaikuttaa merkittävästi esimerkiksi polttoaineen kosteuteen ja lämpöarvoon, mutta niiden aiheuttama vaikutus pystyttiin sulkemaan pois vertailemalla keskenään samankaltaisia ajojaksoja toukokuu-elokuu väliseltä ajalta.

Petimateriaalin vaihdolla tavoiteltiin ensisijaisesti ratkaisua syklonin ja tulipesän katon sintraantumaa. Vastauksia kyseiseen ongelmaan saatiin näiden alueiden tarkastelussa syksyn huoltoseisokin yhteydessä. Masuunikuonapetillä syklonin sintraantumaa havaittiin pienentyneen hiekkapetiin verrattuna. Tämän lisäksi sintraantumaa koostumus oli irtonaisempi, mikä oli myös parannus aikaisempaan. Tulipesän kattoon sintraantumaa ei ollut masuunikuonapetillä muodostunut juuri ollenkaan. Nämä olivat visuaalisesti todennettavissa olevia tuloksia ja siksi niitä voidaan pitää luotettavina. Lisäksi PHD:lta kerätty data paine- ja lämpötilamittauksista tuki tuloksia sintraantumien vähentymisestä. Kerrostuma- sekä sykloninäytteiden alkuainetarkastelun toteutti riippumaton testausorganisaatio Eurofins Expert Services Oy, joten tulokset niiden osalta olivat myös luotettavia ja vertailukelpoisia keskenään.

Ilmajäähdytetyn masuunikuonan käyttöön liittyi sintraantumaongelmien lisäksi muita prosessin kannalta mielenkiintoisia tutkimuskohteita, joista tähän työhön valittiin masuunikuonan leijutus ja lämmönsiirto leijukerroslämmönsiirtimessä, sekä sieltä palaavan materiaalin vaikutus tulipesän lämpötiloihin. Näitä tutkimuskohteita voitiin analysoida ja vertailla prosessin mittausdataan perustuvan aineiston pohjalta. Prosessiin ei tehty vertailujaksojen välillä oleellisia muutoksia, jotka olisivat voineet vääristää tuloksia. Petimateriaalin kierto tulipesän ja syklonin välillä parantui merkittävästi hiekkaan verrattuna, kuten syklonin polven painemittaus osoitti. Kun kierto toimi masuunikuonalla paremmin, niin myös BMHE:lle kulkeutui tasaisemmin petimateriaalia, mikä puolestaan paransi BMHE:n lämpötehoa. Jäähdyntä petimateriaalia palautui tulipesään paremmin, millä oli positiivinen vaikutus palamiseen ja lämpötiloihin. Tämä näkyi tulipesän yläosaa jäähdyttävän kiertokaasun määrässä, joka oli pilot-jaksolla merkittävästi pienempi.

Kokonaiskustannuksien osalta petimateriaalin vaihtoa luonnonhiekkasta masuunikuonaan ei vertailtu, koska petimateriaalin todellinen vaihtotarve jäi petiin kertyneen hiekan takia avoimeksi. Kustannusten arviointi tulee ajankohtaiseksi, kun pohjatuhkan seulonnan toiminta on optimaalisella tasolla. Joka tapauksessa selviä säästökohteita löytyi omakäyttösähkön sekä teline- ja puhdistustöiden osalta, kun käytössä oli ilmajäähdytetty masuunikuona. Lisäksi työn tuloksena prosessista löytyi seulonnan ja tukipolttoaineen osalta kehittämiskohteita. Merkittävin asia oli kuitenkin sintraantumien pienentyminen ja prosessin parempi toiminta. Nämä tekijät antoivat viitteitä siitä, että sintraantumasta johtuva ennakoimaton alasajo on vältettävissä uuden petimateriaalin turvin. Kokonaiskustannusten osalta sillä on ehdottomasti suurin painoarvo. Näiden tulosten perusteella voitiin tehdä päätös testauksen jatkamisesta seuraavan lämmityskauden yli.

10.2 Jatkotutkimuskohteet

Tässä työssä keskityttiin tulipesän sekä syklonin alueella tapahtuvia muutoksia. Aiheen ulkopuolelle rajattiin kokonaan esimerkiksi savukaasukanava ja siellä mahdollisesti tapahtuvat muutokset kattilan säteily- ja vaakavedossa sekä ekonomaisierissa. Kuonaantumisen tutkiminen näissä kohteissa voisi olla yksi ilmajäähdytetyn masuunikuonan jatkotutkimukseen liittyvistä aihealueista.

Masuunikuonan käyttöönoton vaikutukset savukaasukanavan korroosio-olosuhteisiin olisi myös mielenkiintoinen tutkimuskohde Ekovoimalaitoksella, sillä petimateriaalin vaihdon myötä esimerkiksi alkaleiden sitoutuminen petiin muuttuu.

Masuunikuonan petinvaihtotarpeen arviointi ja petimateriaalin vaihdon kokonaiskustannusten vertailu olisi hyvä selvittää, kun muutokset petituhkan seulontaan on toteutettu. Samalla olisi hyvä tutkia, miten petituhkan seulonnan muutokset ja masuunikuonan käyttö petimateriaalina vaikuttavat muodostuvien tuhkajakeiden määriin. Seulonnan lisäksi tässä työssä nousi esille kevyen polttoöljyn käyttö tukipolttoaineena ja sen korvaaminen, joten selvitystyö uuden tukipolttoaineen käyttöönotolle olisi ajankohtainen.

10.3 Lopuksi

Ilmajäähdytetyn masuunikuonan tutkiminen jätteenpolttolaitoksen petimateriaalina tarjosi haasteellisen, mutta samalla mielenkiintoisen opinnäytetyön aiheen. Jatkuvasti niukkenevien uusiutumattomien luonnonvarojen takia masuunikuonan kaltaiset kiertotaloustraukaiset tulevat tulevaisuudessa suurella todennäköisyydellä lisääntymään, joten aihe oli siinä suhteessa ajankohtainen. Siten ne tarjoavat myös uusia mahdollisuuksia energiayhtiöiden liiketoiminnan kannalta.

Kokonaisuutena tutkimusalue oli hyvin laaja ja aiheen rajaaminen osoittautui siksi melko haastavaksi. Tutkittavaksi valikoitui kuitenkin toimeksiantajan kannalta oleelliset kohteet prosessista, joista saatiin rakennettua kattava kokonaisuus opinnäytetyötä varten. Työn aikana kertyi lisää ymmärrystä leijukerrosolttoon liittyvistä agglomeraatio- ja likaantumismekanismeista sekä CFB-kattilan toiminnasta ja lämmönsiirrosta. Samalla pääsi konkreettisesti näkemään, kuinka kiertotaloustuotetta voidaan hyödyntää uudessa käyttötarkoituksessa. Huoltoseisokkien väliin ajoitettu pilot-jakso antoi paljon uutta tietoa ilmajäähdytetyn masuunikuonan ominaisuuksista petimateriaalina ja osoitti, että siinä on selvää potentiaalia luonnonhiekan korvaajaksi kyseisessä käyttötarkoituksessa. Toimeksiantaja sai arvokasta tietoa uuden petimateriaalin käyttäytymisestä prosessissa ja toteutti samalla materiaalitehokkuutta edistävää toimintaa.

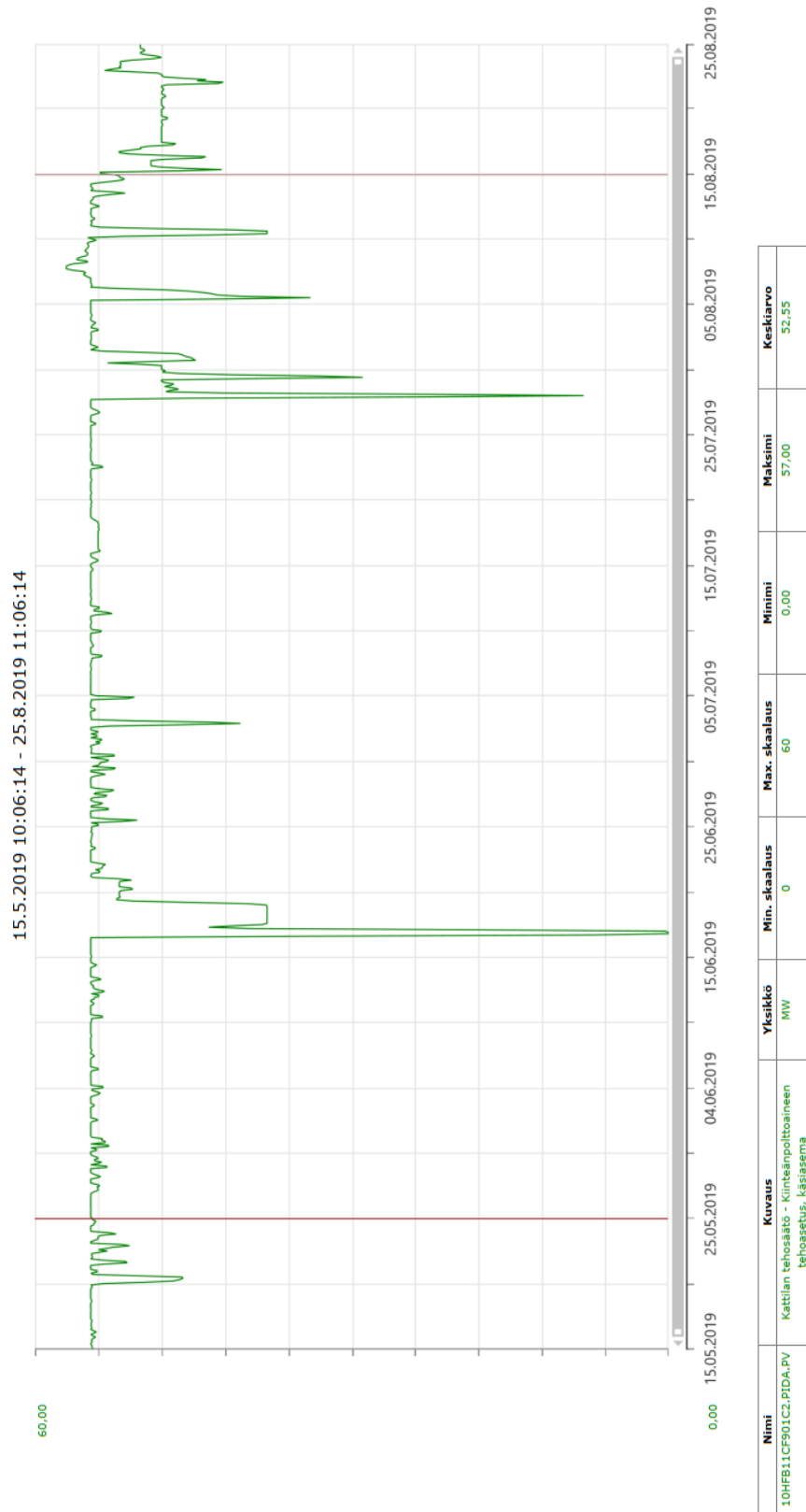
Lähteet

- Akahane, K. Hayashiguchi, S. Miyamoto, T. & Torii, K. 2015. Production and Use of Blast Furnace Slag Aggregate for Concrete. Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No. 109, 102-108. Viitattu 11.10.2019.
<https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/109-18.pdf>.
- Alakangas, E. Hurskainen, H. Laatikainen-Luntama, J & Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.
- Basu, P. & Fraser, S.A. 1991. Circulating Fluidized Bed Boilers: Design and Operations. Butterworth-Heinemann.
- Cho, Y.J. Kim, S.D. & Han, G.Y. 1996. Bed-to-wall heat transfer characteristics in a circulating fluidized bed. Korean Journal of Engineering 13, 6, 627-632. Viitattu 28.9.2019. https://www.researchgate.net/publication/225993711_Bed-to-wall_heat_transfer_characteristics_in_a_circulating_fluidized_bed.
- Di Natale, F. & Nigro, R. 2013. Heat and mass transfer in fluidized bed combustion and gasification systems. Julkaisussa Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification. Elsevier Science & Technology. Viitattu 27.9.2019. <https://janet.finna.fi/>, Ebook Central.
- Ekovoimalaitos. N.d. Riikinvoima Oy:n Ekovoimalaitoksen esittely yhtiön sivustolla. Viitattu 2.6.2019. <http://riikinvoima.fi/voimalaitos/>.
- Elled, A. Åmand, L. & Steenari, B. 2013. Composition of agglomerates in fluidized bed reactors for thermochemical conversion of biomass and waste fuels, Experimental data in comparison with predictions by a thermodynamic equilibrium model. Fuel, Elsevier, 111, 696–708. Viitattu 25.9.2019.
http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/180954/local_180954.pdf.
- Esittelymateriaali. N.d. Riikinvoiman vierailijaesittely. Riikinvoima Oy:n arkisto.
- GR-Granuli. N.d. Esite alkaleihin reagoimattomasta petimateriaalista. Fescon Oy. Viitattu 25.7.2019.
<https://www.fescon.fi/tuotteet/hiekat/voimalaitosmateriaalit/956/alkalin-kestava-petihiekka-gr-granuliT>.
- Hyppänen, T. & Raiko, R. 2002. Leijupoltto. Julkaisussa Poltto ja palaminen. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto.
- Ilvonen, S. & Klasila, T. 2018. Masuunikuona petimateriaalina. VTT Expert Services. Powerpoint-esitys masuunikuonan tutkimuksista. Riikinvoima Oy, sisäinen materiaali.
- Ilvonen, S. & Klasila, T. 2019. Syklonikamin tutkimukset. Eurofins Expert Services Oy:n raportti No EUFI29-190001253. Riikinvoima Oy, sisäinen materiaali.
- Ilvonen, S. & Klasila, T. 2019. Masuunikuonan käyttöönottotutkimus. Eurofins Expert Services Oy:n raportti No EUFI29-19002387. Riikinvoima Oy, sisäinen materiaali.

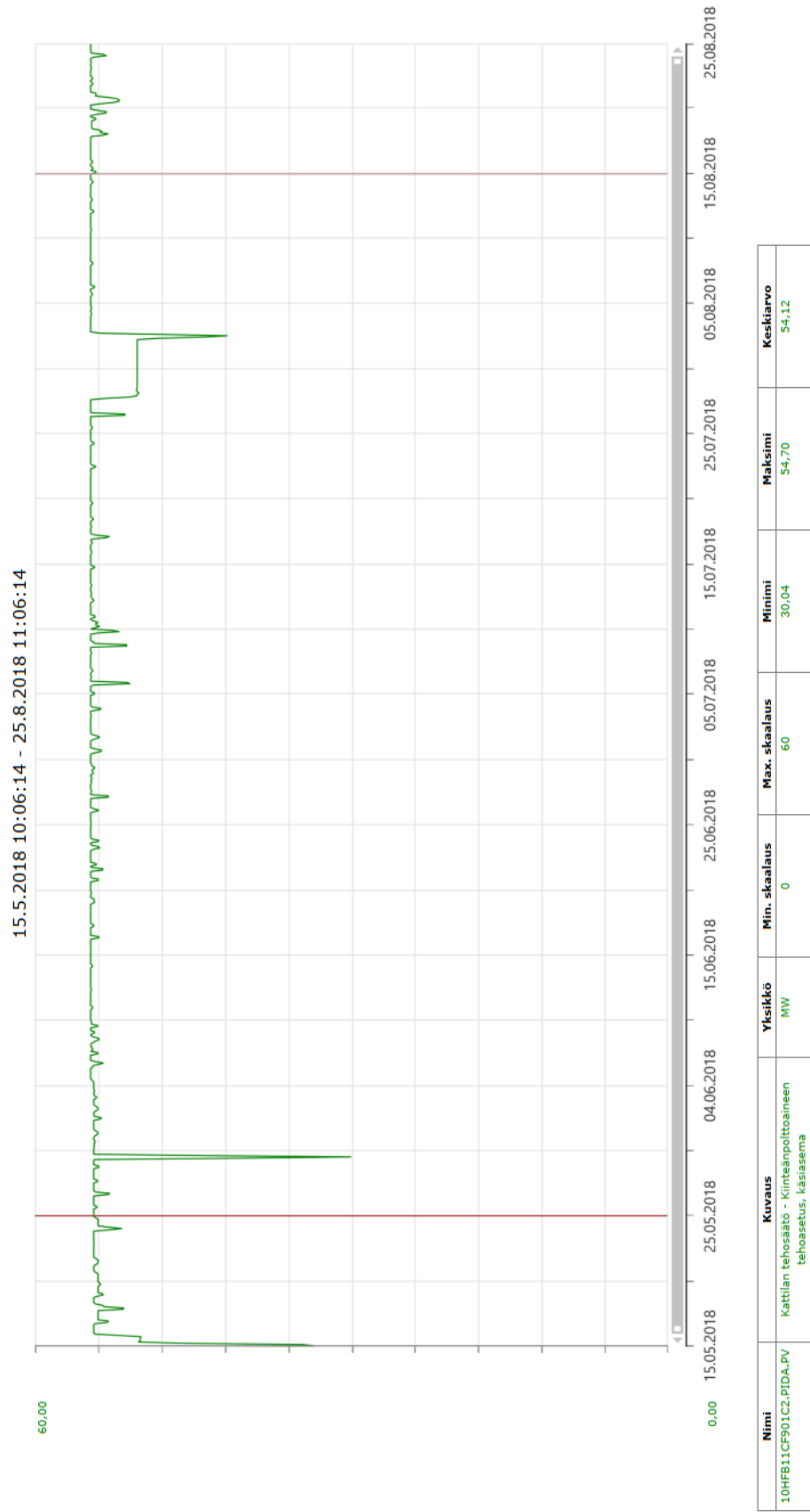
- Klasila, T. 2019. Sykloninäytteiden analyysi. Eurofins Expert Services Oy. Sähköpostiviesti 29.5.2019. Vastaanottaja K.Keijälä ja P.Holopainen. Väliaikatietao Riikinvoima Oy:n sykloninäytteistä.
- Jätteen energiahyödyntäminen. N.d. Jätelaitosyhdistys. Viitattu 10.6.2019. <http://vanha.jly.fi/energia1.php?treeviewid=tree3&nodeid=1>.
- Jätteenkäsittelyn toimintakuvaus. 2016. RV-E-3801 Jätteenkäsittelyn prosessikuvaus. Riikinvoima Oy, arkisto.
- Kattilan yleiskuvaus. 2017. RV-H-10000 General description of CFB-boiler. Riikinvoima Oy, arkisto.
- Kim, S.W. Ahn, J.Y. Kim, S.D. & Lee, D.H. 2002. Heat transfer and bubble characteristics in a fluidized bed with immersed horizontal tube bundle. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, 2003, 399-409.
- Kivo. N.d. Tilastoja jätehuollosta ja jätteen koostumuksesta. Suomen Kiertovoima Ry. Viitattu 13.6.2019. <https://kivo.fi/yymmarramme/>.
- Nassaralla, C.L. 2001. Iron Production. Julkaisussa *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* Second Edition. Viitattu 2.10.2019. <https://janet.finna.fi/>, Elsevier ScienceDirect.
- Saastamoinen, J. 2002. Kiinteän polttoaineen palaminen ja kaasutus. Julkaisussa *Poltto ja palaminen*. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto.
- Scala, F. 2017. Particle agglomeration during fluidized bed combustion: Mechanisms, early detection and possible countermeasures. *Fuel Processing Technology*, Elsevier, 171, 31–38. Viitattu 30.9.2019. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/9EC87D6ED67CE650F45804899B253FF06AE20F9D22C7FD1649E3E57D6AE786F50C09F3F0E600C0BA2680CC5C57E8D13F>.
- Scala, F. & Solimene, R. 2013. Conversion of solid fuels and sorbents in fluidized bed combustion and gasification. Julkaisussa *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification*. Elsevier Science & Technology. Viitattu 27.9.2019. <https://janet.finna.fi/>, Ebook Central.
- Skrifvars, B-J. & Hupa, M. 2002. Tuhka, kuonaantuminen, likaantuminen ja korroosio. Julkaisussa *Poltto ja palaminen*. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto.
- UNEP. 2019. Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland. Viitattu 5.12.2019. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28163/SandSust.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Vakkilainen, E. 2017. Steam generation from biomass. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.

Liitteet

Liite 1. Kattilan tehosäätö 15.5.2019 – 25.8.2019

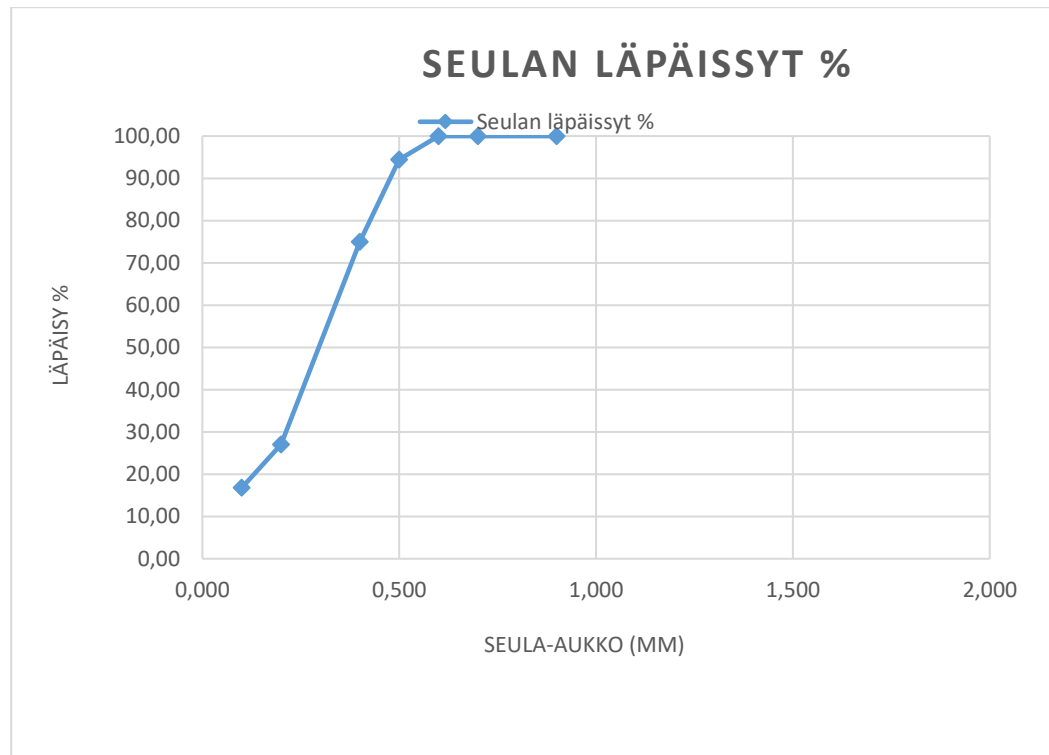


Liite 2. Kattilan tehosäätö 15.5.2018 – 25.8.2018

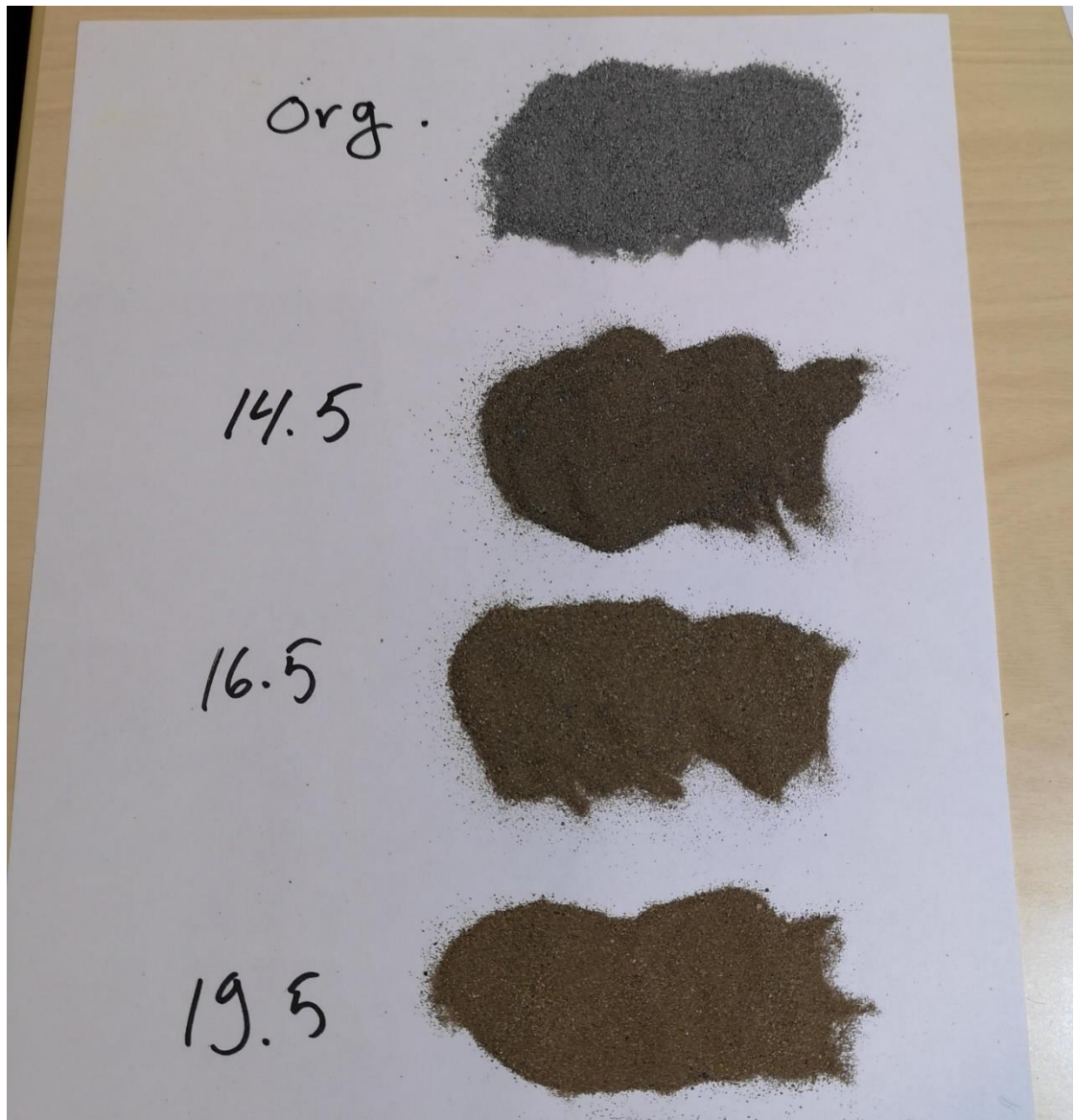


Liite 3. Toimitetun masuunikuonan seulontatulokset

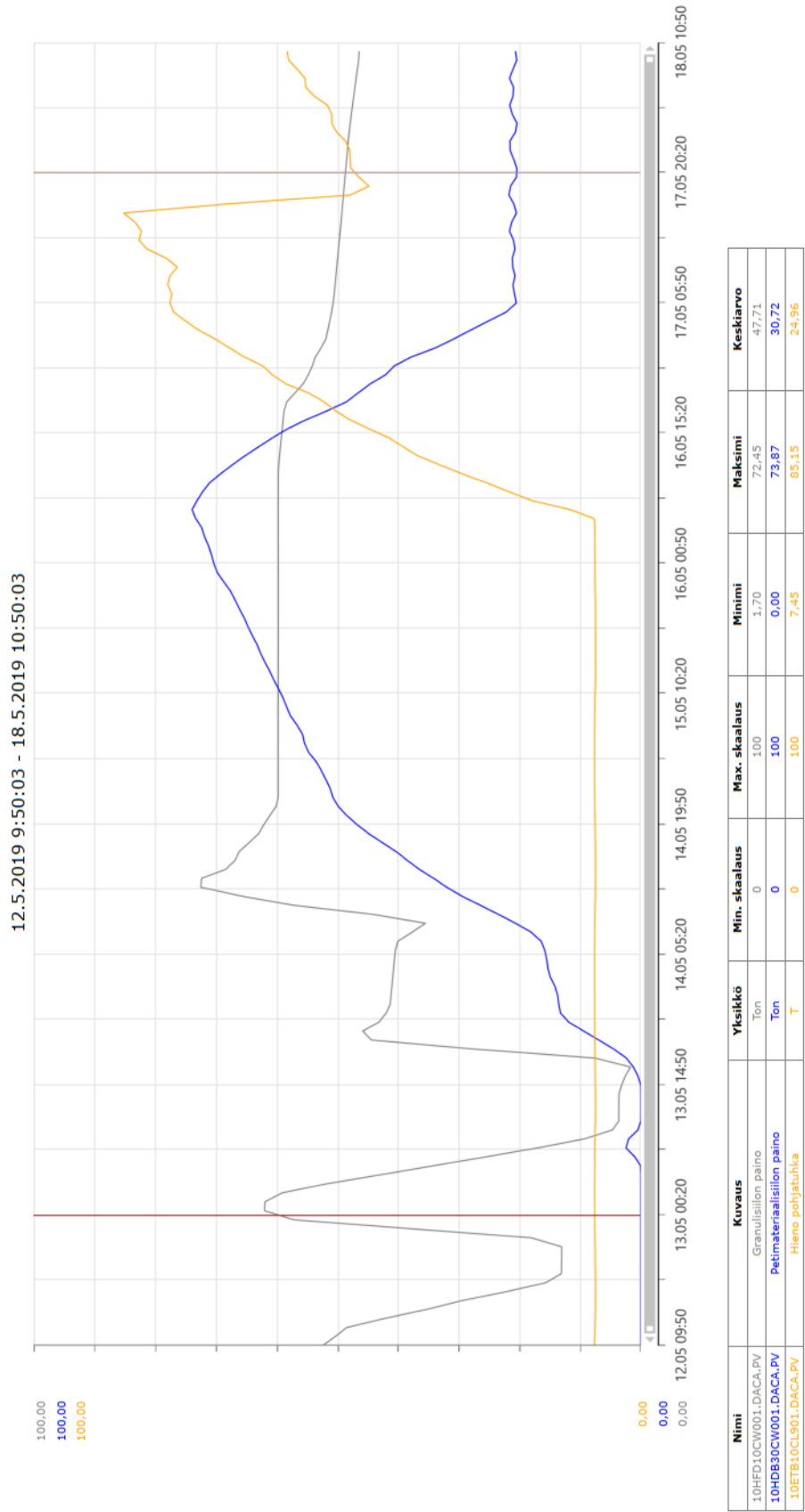
Seula-aukko mm	Seulalle jäänyt		Seulan läpäissyt
	g	%	%
0,900	0	0,00	100,00
0,700	0	0,00	100,00
0,600	0	0,00	100,00
0,500	23	5,60	94,40
0,400	80	19,46	74,94
0,200	197	47,93	27,01
0,100	42	10,22	16,79
Pohja	69		
Yhteensä (g)	411		



Liite 4. Sykloninäytteiden visuaaliset muutokset



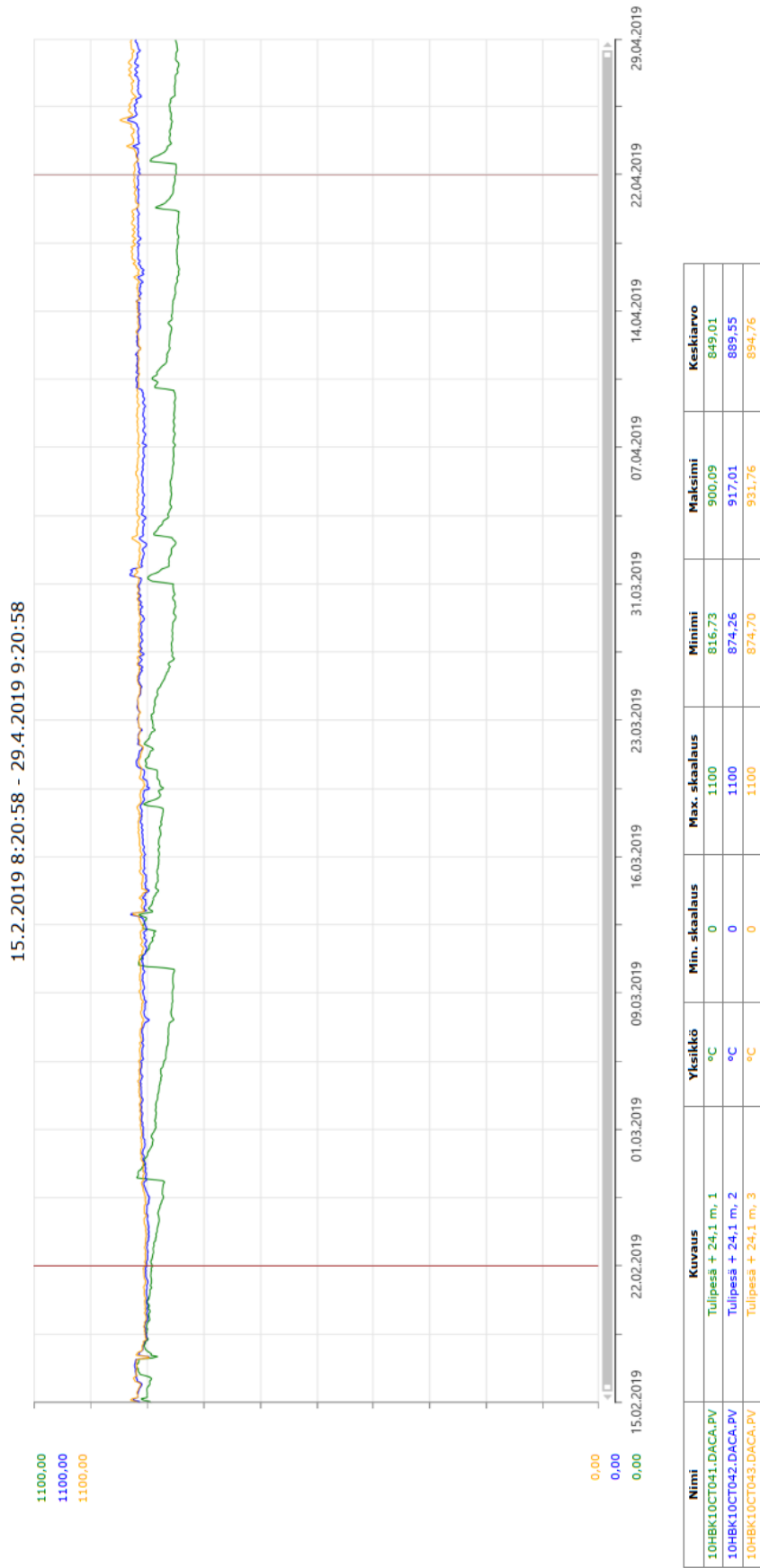
Liite 5. Petin materiaalitase 12.5. – 18.5.2019



Liite 6. Sykloninäytteiden alkuainepitoisuudet

	10.5.2019	12.5.2019	14.5.2019	15.5.2019	16.5.2019	19.5.2019	21.5.2019	22.5.2019	23.5.2019	24.5.2019	25.5.2019	26.5.2019	27.5.2019	28.5.2019	29.5.2019	31.5.2019	1.6.2019	1.6.2019	2.6.2019	3.6.2019	14.6.2019	9.7.2019	
Natrium	0,46	0,46	0,88	1,1	1,1	1,2	1,4	1,6	1,5	1,6	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,6	1,7	1,6	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5
Magnesium	5,4	5,1	4,2	3,6	3,3	3,3	2,6	2,3	2,1	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,8	1,9	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,8	1,8
Alumiini	4,8	4,6	5,1	5,1	5,2	4,9	4,9	5,3	4,9	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	4,9	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	4,9	5,2
Pii	15	15	15	16	16	17	17	18	17	18	18	18	18	19	19	19	19	19	19	19	19	18	17
Fosfori	0,013	0,015	0,34	0,51	0,58	0,71	0,73	0,73	0,75	0,69	0,72	0,68	0,71	0,69	0,6	0,64	0,65	0,75	0,72	0,79	0,79	0,63	0,63
Rikki	1,6	1,7	1,3	1,4	1,4	1,8	1,8	1,6	1,8	1,8	2	2,2	2,1	2	2,3	2,5	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,1	1,3
Kloori	0,014	0,017	0,19	0,26	0,36	0,41	0,35	0,35	0,45	0,38	0,45	0,37	0,46	0,51	0,47	0,43	0,34	0,33	0,31	0,32	0,32	0,32	0,28
Kalium	0,92	1	0,74	0,72	0,83	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,3	1,2	1,3	1,2	1,2	1,2	1
Kalsium	29	30	27	26	24	23	21	21	21	21	20	20	20	19	19	19	19	19	19	19	20	20	16
Titaani	0,84	0,9	1,1	1,2	1,3	1,5	1,4	1,4	1,5	1,6	1,5	1,4	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,3
Vanadini	0,1	0,066	0,061	0,039	0,023	0,013	0,007	0,007	0,025			0,008				0,002							
Kromi	0,014	0,037	0,040	0,044	0,067	0,074	0,074	0,074	0,085	0,089	0,089	0,080	0,079	0,085	0,085	0,080	0,084	0,089	0,091	0,090	0,082	0,082	0,087
Mangaani	0,39	0,41	0,34	0,32	0,28	0,25	0,21	0,21	0,2	0,19	0,19	0,19	0,17	0,16	0,17	0,16	0,14	0,15	0,17	0,17	0,16	0,16	0,22
Rauta	0,73	0,75	2,1	2,5	2,8	3,5	3,9	3,9	3,8	3,7	4,1	3,7	3,7	3,7	3,8	3,7	3,4	3,6	3,9	4,1	4,1	4,1	9,2
Koboltti				0,008	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009		0,011	0,005	0,007	0,01		0,008	0,006						0,021
Nikkeli			0,015	0,013	0,015	0,021	0,025	0,018	0,021	0,021	0,021	0,021	0,019	0,02	0,023	0,021	0,015	0,017	0,022	0,023	0,023	0,023	0,04
Kupari			0,16	0,19	0,20	0,21	0,30	0,28	0,26	0,26	0,30	0,26	0,27	0,23	0,23	0,23	0,25	0,23	0,25	0,25	0,25	0,22	0,47
Sinkki			0,25	0,36	0,41	0,49	0,58	0,61	0,62	0,62	0,62	0,58	0,58	0,55	0,56	0,54	0,54	0,58	0,63	0,70	0,67	1,10	
Rubidium	0,005	0,0056	0,0025	0,0019	0,0019	0,0032	0,0033	0,0033	0,003	0,0039	0,004	0,0034	0,0032	0,0038	0,0035	0,0028	0,0041	0,004	0,0039	0,0041	0,0031	0,0033	0,0033
Strontium	0,067	0,072	0,073	0,072	0,070	0,069	0,063	0,063	0,067	0,069	0,065	0,065	0,064	0,063	0,060	0,060	0,061	0,060	0,068	0,068	0,062	0,062	0,063
Yttrium	0		0,0044	0,0048	0,0044	0,0022	0,0025	0,0025	0,0029			0,0025	0,0019	0,0019	0,003	0,0019	0,004		0,044	0,019			0,007
Zirkonium	0,027	0,028	0,040	0,033	0,030	0,033	0,042	0,048	0,048	0,031	0,042	0,033	0,034	0,041	0,028	0,037	0,033	0,024		0,043	0,03	0,03	0,042
Niobium	0		0,0041	0,0029	0,0022	0,0023	0,0022	0,0028	0,0025	0,0019	0,0019	0,0018	0,0018	0,0019	0,16	0,0021	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003
Molybdeeni			0,0032	0,0015	0,0022	0,0022	0,003	0,036	0,0048	0,0021	0,0032			0,0039	0,003	0,0028	0,0024	0,0016	0,0016	0,0017	0,0038	0,0038	0,005
Tina			0,014	0,017	0,019	0,024	0,041	0,041	0,041	0,034	0,029	0,029	0,028	0,031	0,032	0,032	0,021	0,024	0,025	0,030	0,031	0,031	0,043
Antimoni			0,014	0,013	0,017	0,035	0,036	0,036	0,033	0,033	0,035	0,037	0,037	0,039	0,035	0,036	0,034	0,029	0,034	0,035	0,035	0,054	0,052
Barium	0,15	0,12	0,26	0,26	0,30	0,27	0,31	0,31	0,38	0,30	0,30	0,31	0,33	0,32	0,28	0,29	0,29	0,31	0,36	0,35	0,32	0,36	0,36
Volframi												0,014											
Cerium																							
Lyijy			0,033	0,050	0,059	0,070	0,087	0,10	0,10	0,093	0,09	0,087	0,087	0,085	0,084	0,084	0,10	0,10	0,12	0,11	0,11	0,11	0,14

Liite 7. Tulipesän lämpötilamittaus +24,1m hiekkapetillä



Liite 8. Tulipesän lämpötilamittaus +24,1m masuunikuonapetilä

