



samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

RASMUS VARTIAINEN

Kiertoleijupetikattilan agglomeraation havaitseminen ja ennaltaehkäisy

YMPÄRISTÖ- JA ENERGIA TEKNIIKAN TUTKINTO-
OHJELMA
2024

TIIVISTELMÄ

Vartiainen Rasmus: Kiertoleijupetikattilan agglomeraation havaitseminen ja ennaltaehkäisy

Opinnäytetyö, AMK

Energia ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Toukokuu 2024

Sivumäärä: 37

Kun voimalaitoksilla on siirrytty fossiilisista polttoaineista ympäristöystävällisempiin vaihtoehtoihin kuten biomassoihin tai kierrätysjätteisiin, ovat havainnot polttoprosessiin liittyvistä ongelmista lisääntyneet. Tässä työssä perehdytään erityisesti agglomeraation aiheuttamaan ongelmaan, jossa petipartikkelit liimaantuvat toisiinsa kiinni aiheuttaen pedin leijumattomuutta. Työ pitää sisällään tutkimustyötä ongelman havainnoinnista ja pohdintaa sekä ratkaisuja sen ennaltaehkäisemiseksi Kaanaan voimalaitoksella Porissa.

Työssä käydään läpi agglomeraation teoriaa ja sen kaksi yleisintä syntymekanismia. Huomataan, että biopolttoaineiden runsas alkalipitoisuus ja petihiekan kvartsi reagoivat keskenään tulipesässä, muodostaen agglomeraatiota. Nostetaan myös esille tuhkan ongelmallisuus polttoprosessissa.

Suoritetun tutkimuksen pohjalta voidaan todeta, ettei Kaanaan CFB-kattilan pedin kunto ole optimaalinen. Ongelman ratkaisemiseksi työssä käydään läpi parhaita ratkaisuja Kaanaan voimalaitoksen kannalta. Esille nousevat vaihtoehdot pedin runsaasta uusimisesta uutta petimateriaalia lisäämällä tai vaihtoehtoisesti petimateriaalin korvaamisesta kvartzivapaammalla materiaalilla. Lisäksi käydään läpi vaihtoehtoja toimenpiteistä, joita voidaan suorittaa agglomeraatiota havaittaessa. Tärkeintä on kuitenkin ongelman ennaltaehkäisy. Tätä varten pedille tulisi suorittaa jatkuvaa kunnonvalvontaa.

Avainsanat: agglomeraatio, CFB-kattila, leijupoltto, leijumattomuus

ABSTRACT

Vartiainen Rasmus: Detection and prevention of CFB boiler agglomeration

Bachelor's thesis

Energy and Environmental Engineering Degree Program

May 2024

Number of pages: 37

As power plants have moved away from fossil fuels towards more environmentally friendly alternatives such as biomass or recycled waste, there have been increasing reports of problems with the combustion process. In particular, this thesis addresses the problem of agglomeration, where bed particles are glued together, resulting bed defluidization. The thesis includes research work on the observation and reflection of the problem and solutions for its prevention at the Kaanaa power plant in Pori.

The thesis discusses the theory of agglomeration and its two most common mechanisms of occurrence. It is noted that the high alkaline content of biofuels and quartz in the bottom ash react with each other in the furnace, forming agglomeration. The problem of ash in the combustion process is also highlighted.

Based on the thesis, it can be concluded that the condition of the CFB boiler bed in Kaanaa is not optimal. In order to solve this problem, the best solutions for the Kaanaa power plant are discussed. The options to be considered are the extensive renewal of the bed by adding new bedding material or alternatively the replacement of the bedding material with a material free of quartz. In addition, options for measures that can be taken when agglomeration is detected are discussed. However, the most important thing is to prevent the problem. To this end, the bed should be subjected to continuous condition monitoring.

Keywords: agglomeration, CFB-boiler, fluidized bed combustion, defluidization

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	5
2 PORI ENERGIA	5
2.1 Voimalaitokset	6
2.1.1 Aittaluodon voimalaitos	6
2.1.2 Kaanaan voimalaitos	8
2.1.3 Kaanaan CFB-kattila.....	10
3 LEIJUPOLTTO.....	12
3.1 Kerrosleijukattila	14
3.2 Kiertoleijukattila	15
4 PALAMINEN JA TUHKAN SYNTY	16
4.1 Palaminen	16
4.2 Tuhka	18
4.3 Pohjatuhkan poistaminen	19
5 AGGLOMERAATIO	20
5.1 Mekanismit ja vaikutukset.....	21
5.2 Agglomeraation välttämisen keinoja	22
6 TUTKIMUSTYÖS VOIMALAITOKSELLA	23
6.1 Pohjatuhkalaitteisto	23
6.2 Seula-analyysi	24
6.3 Seulonta	24
6.4 Seula-analyysin tulokset.....	26
6.5 Alkuaineanalyysi.....	28
7 TOIMENPITEET	30
7.1 Ennakkohuoltotyö	30
7.1.1 Seulonnan ohjeet.....	31
7.1.2 Kemiallinen kunnonvalvonta	34
7.2 Konenäkökamera	34
7.3 Ratkaisun pohdintaa.....	35
8 YHTEENVETO.....	37
LÄHTEET.....	38

1 JOHDANTO

Kriisi ilmastonmuutoksen vaikutusten hillitsemiseksi on aiheuttanut sen, että vuosikymmenet energiatuotannossa käytetyt fossiiliset polttoaineet ovat saaneet siirtyä syrjään ympäristöystävällisempien vaihtoehtojen tieltä. Kaanaan voimalaitoksella Porissa biomassojen ja kierrätysjätteiden polton on havaittu vuosien varrella aiheuttavan polttoprosessissa yhä enemmän agglomeraatiota eli petipartikkelien liimaantumista toisiinsa, joita ei kivihiltä ja turvetta polttaessa vielä juurikaan esiintynyt. Tällä on vaikutusta pedin leijumattomuuteen ja sitä kautta kattilan käytettävyyteen. Tämän työn tarkoituksena on käydä läpi ongelman aiheuttajia ja selvittää, miten tätä tulisi havaita ja ennaltaehkäistä. Tämä työ on osana suurempaa tutkimusta Kaanaan voimalaitoksen käyttövarmuuden takaamiseksi ja parantamiseksi. Työssä keskitytään käymään läpi Kaanaan CFB-kattilan toimintaa polttoprosessin näkökulmasta.

2 PORI ENERGIA

Porin kaupungin omistama Pori Energia Oy on lähinnä Satakunnan alueella palvelujaan tarjoava energia-alan yritys. Pori Energia sai alkunsa vuonna 1897, kun Otto Wilhelm Backman teki sopimuksen Porin kaupungin kanssa katuvalaistuksesta. Ensimmäistä kertaa Porin kaduilla nähtiin sähkölamput päällä 15.8.1898. Kaukolämpötoiminta aloitettiin Porin alueella vuonna 1969. Tästä 120 vuotta myöhemmin reilu 50 % porilaisista asuu Pori Energian kaukolämmöllä lämmitetyissä kerros-, rivi- tai omakotitaloissa. Vuonna 2006 Pori Energia Oy muodostettiin nykyiseen muotoonsa yhdistämällä Porin Lämpövoima Oy ja Pori Energia -liikelaitos. Yrityksen täydessä omistuksessa ovat myös tytäryhtiöt Pori Energia Sähköverkot Oy sekä Tuulia Energia Oy. (Pori Energia Oy, 2024).

Pori Energia tarjoaa kaukolämmön lisäksi myös muita korkealuokkaisia energiapalveluja:

- Kaukoviilennystä taloyhtiöille ja yrityksille
- Teollisuuden energiapalveluja mm. prosessihöyryä ja etävalvontaa
- Sähkönjakelua ympärivuorokautisesti yli 53 000 sähköverkon käyttäjälle
- Tuulivoimapalveluita kuten hankesuunnittelua ja kunnossapitoa.

Vuoden 2023 aikana Pori Energian liikevaihto oli 135,5 miljoonaa euroa ja liikevoiton suuruus 26 miljoonaa euroa. Uusiin investointeihin käytettiin rahaa 37,2 miljoonaa euroa. Vuoden 2023 aikana henkilöstöön kuului 191 jäsentä ja Pori Energia tarjosi myös 24 henkilölle kesätyöpaikan. (Pori Energia Oy, 2024).

2.1 Voimalaitokset

Pori Energialla energiantuotanto tapahtuu pääasiassa sähkön ja lämmönteistutuotannolla kahdella voimalaitoksella, joista toinen on Porin keskustan läheisyydessä Aittaluodossa ja toinen Yyterin dyynien läheisyydessä Kaanaassa. Tämän lisäksi kaukolämpöä tuotetaan myös useammilla lämpökeskuksilla kaupungin alueella ja lähikunnissa. Pori Energian energiantuotanto on vuoden 2023 lopulla 90 prosenttisesti hiilidioksidivapaata (Pori Energia Oy, 2024).

2.1.1 Aittaluodon voimalaitos

Aittaluodon teollisuusalueella aivan Porin keskustan läheisyydessä sijaitsee Pori Energian Aittaluodon voimalaitos. Voimalaitos on yhteistuotantolaitos eli CHP-laitos, joka tuottaa kaukolämpöä, prosessihöyryä ja sähköä

asiakkailleen. Voimalaitoksella energiantuotanto tapahtuu tällä hetkellä pääasiassa vuonna 2020 valmistuneella uudella biokattilalaitoksella, joka oli 60 miljoonan euron panostus vihreään energiaan. Tämän lisäksi energiaa tuotetaan tarvittaessa vanhemmalla RT-kattilalla tai kevyttä polttoöljyä polttoaineenaan käyttävällä apukattilalla. Sekä uudessa biokattilassa että vanhassa RT-kattilassa käytetään kuplivaa leijukerrospolttoa. Polttoaineena voimalaitoksella käytetään biopolttoaineita mm. purua ja kuorta, josta valtaosa tuodaan kuljetinlinjaa pitkin voimalaitokselle viereiseltä sahalta. Sähkö tuotetaan verkkoon TG6-turbiinilla, joka toimitettiin laitokselle samassa yhteydessä kuin uusi biokattilalaitos. Tämän lisäksi energiaa kaukolämpöön tuotetaan uuden kattilalaitoksen yhteyteen toimitetulla savukaasulauhduttimella. (Pori Energia Oy, 2024).



Kuva 1. Aittaluodon voimalaitos (Pori Energia Oy, 2024).

Aittaluodon voimalaitoksen tunnuslukuja:

- A-kattila
 - Rakennettu 2020
 - Teho 88 MW
 - Höyry 28,7 kg/s
 - 115 bar, 525 °C

- RT-kattila
 - o Rakennettu 1981
 - o Saneerattu 1996
 - o Teho 95 MW
 - o Höyry 36 kg/s
 - o 115 bar, 525 °C
- Apukattila
 - o Rakennettu 2006
 - o Teho 46 MW
 - o Höyry 19,4 kg/s
 - o 17 bar, 250 °C
- Vastapaineturbiini TG6
 - o Hankittu 2020
 - o Teho 16 MW

(Pori Energia, 2023).

2.1.2 Kaanaan voimalaitos

Porin Prosessivoima Oy on Pohjolan Voima Oy:n tytäryhtiö, joka omistaa Porissa Venator P&A Finland Oy tehdasalueella sijaitsevan voimalaitoksen. Kaanaan biovoimalaitos valmistui vuonna 2008 lopussa. Voimalaitoksella tuotetaan energiaa Kaanaan ja Pihlavan alueen teollisuuden käyttöön sekä kaukolämpöä Porin kaukolämpöverkkoon. Polttoaineena voimalaitoksella voidaan käyttää puuta, turvetta, hiiltä, kierrätyspolttoainetta (REF), öljyä ja LNG-kaasua. Pori Energian osuus Kaanaan kattilakapasiteetista on 40,8 %. Suurin osa energian tuotannosta tapahtuu suurella 2008 valmistuneella kiertoleijukattilalla (CFB), CYMIC-kattilalla. (Pori Energia Oy, 2024).



Kuva 2. Kaanaan voimalaitos (Pori Energia Oy, 2024).

Kaanaan voimalaitoksen tunnuslukuja:

- CYMIC
 - Rakennettu 2008
 - Teho 177 MW
 - Höyry 67 kg/s
 - 84 bar, 522 °C
- Öljykattila, K4
 - Teho 41 MW
- Kaasukattila, K5
 - Teho 36 MW
- Turbiini 1, TG4
 - Hankittu 2008
 - Sähköteho 78 MW
- Turbiini 3, TG3
 - Sähköteho 8,5 MW

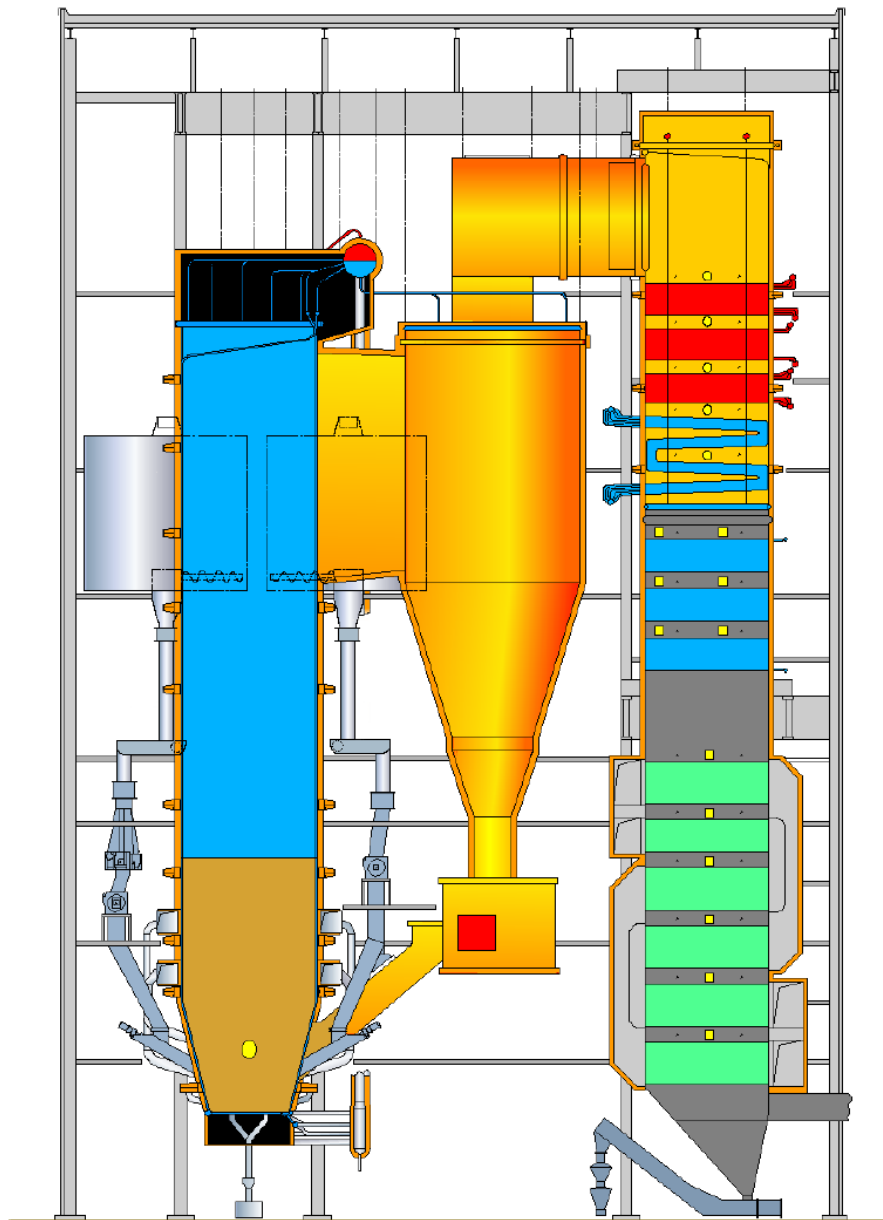
(Pori Energia, 2023).

2.1.3 Kaanaan CFB-kattila

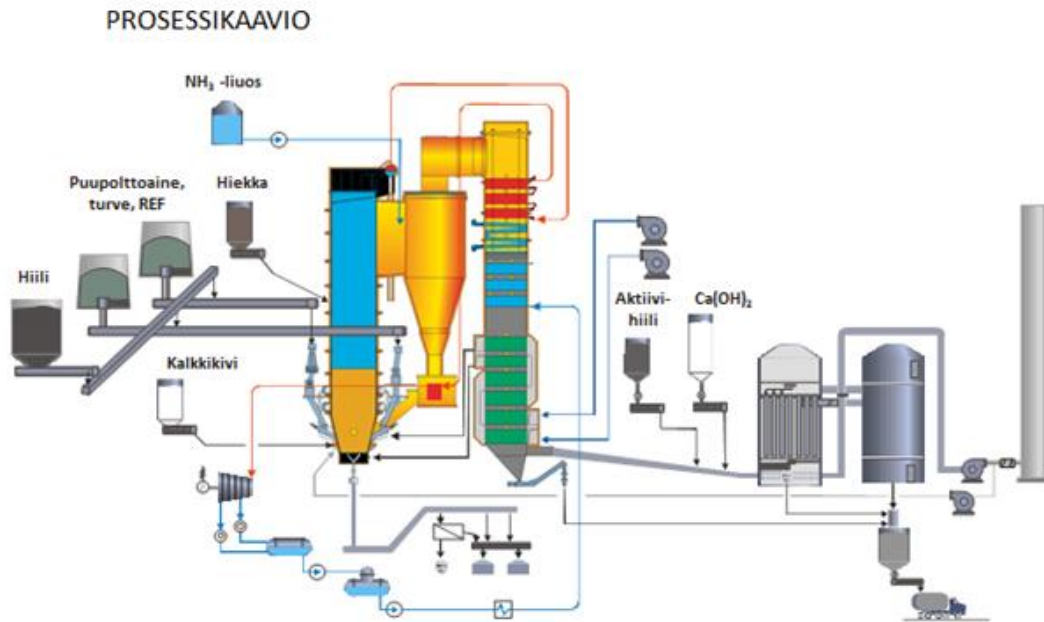
Vuonna 2008 valmistunut Metso Power Oy:n toimittama Cymic -kattila vastaa suurimmaksi osaksi Kaanaan voimalaitoksen energiantuotannosta. Kattila käyttää polttotekniikkanaan kiertoleijupolttoa. Kiertoleijukattilasta käytetään lyhennettä CFB-kattila, joka tulee englannin kielen sanoista *circulating fluidized bed*. Kattilan höyryteho on 177 MW, polttoaineteho 206 MW ja tuorehöyryn suunnitellut käyttöarvot ovat 522 °C ja 83 bar. Korkeapaineinen höyry madalletaan reductioventtiilein ja/tai turbiinin väliotoin paineluokkiin 7,5 bar ja 2,5 bar. Suunniteltu nimellinen maksimihöyryntuotanto on 67 kg/s ja pienin jatkuva höyryvirtaus on 28 kg/s. Kattilan minimiteho on kuitenkin onnistuttu pienentämään, vuonna 2023 tehdyn osapetimuutoksen ansiosta. Pääasiassa höyry ajetaan turbiinin TG4 läpi.

Savukaasujen puhdistus tapahtuu kattilan jälkeen asennetulla letkusuodattimella. Rikinpoistoa varten tulipesään syötetään kalkkia ja NO_x-päästöjen hallintaan käytetään ammoniakkin syöttöä SNCR-tekniikkaa käyttäen. Tämän lisäksi savukaasuihin voidaan sekoittaa aktiivihiltä ja kalsiumhydroksidia. Tulevaisuudessa savukaasuja puhdistaa myös rakenteilla oleva savukaasupesuri, josta saadaan runsaasti lämpöä talteen kaukolämpöverkkoon.

Polttoaineena kattila käyttää biopolttoaineita, turvetta, kivihiiltä ja kierrätyspolttoainetta REF I-II. Turpeen ja kivihiilen osuus on hyvin pieni. Tämän lisäksi ylösajon yhteydessä polttimet käyttävät kevyttä polttoöljyä polttoaineenaan. Polttoaine tulee hihnakuuljettimella varastosiiloilta kattilan syöttösiiloille. Syöttösiiloilta polttoaine puretaan purku- ja syöttöruuvien kautta kattilaa kohden, jolloin polttoaine sekoittuu homogeeniseksi. Syöttö kattilaan tapahtuu sulkusyöttimien ja tunkijaruuvien läpi kattilan etu- ja takaosaan. (Porin Prosessivoima Oy, 2024).



Kuva 3. Kaanaan CFB -kattila (Porin Prosessivoima Oy, 2024).



Kuva 4. Prosessikaavio Kaanaan CFB-kattila (Porin Prosessivoima Oy, 2024).

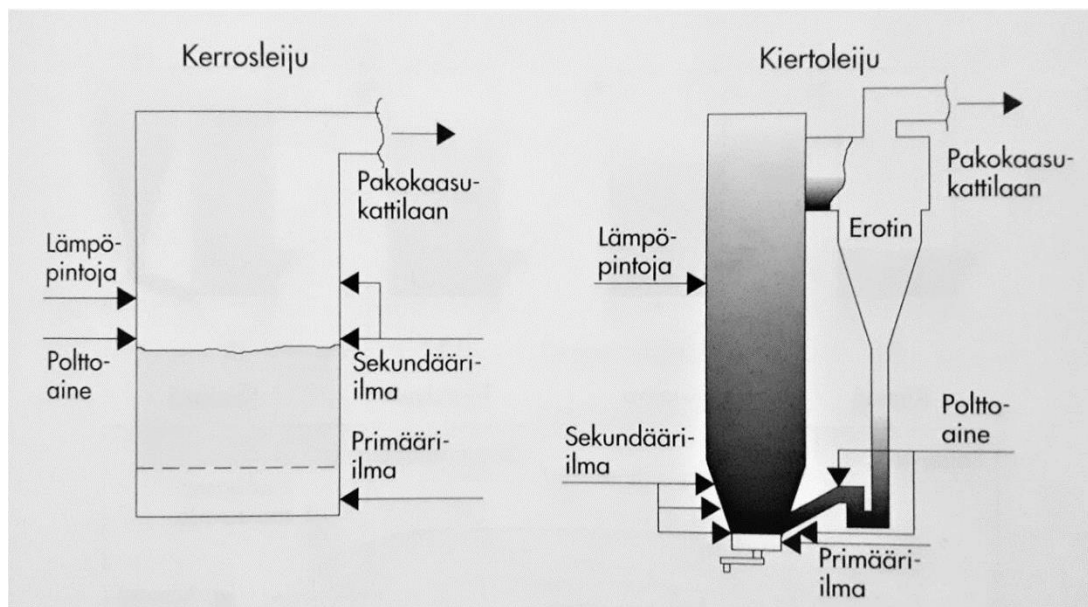
3 LEIJUPOLTTO

Leijupoltto on yksi tärkeimmistä keinoista polttaa ympäristöystävällisesti kiinteitä polttoaineita. Kaupalliseen käyttöön kyseinen polttotekniikka ja sen sovellukset kehittyivät 1970-luvulla. Leijupoltto soveltuu monenlaisille polttoaineille, myös huonolaatuisille polttoaineille, joiden polttaminen ei onnistu muilla polttotavoilla ilman monimutkaisia erikoisjärjestelyjä. Leijupolton etuna on vähäiset NO_x :n ja palamattomien päästöt sekä useiden eri polttoaineiden käytön mahdollistaminen. Lisäksi polttotekniikka sopeutuu hyvin polttoaineen nopeisiin ja suuriin laatuvihteluihin. (Hyppänen & Raiko, 2002, s. 490).

Leijupoltto on kemiallinen prosessi, jossa kiinteä polttoaine, kuten hiili tai biomassat, poltetaan ilmassa leijuvassa tilassa. Tulipesässä osa palamisilmasta syötetään pohjasuuttimien kautta hienojakoisen pedin läpi, joka koostuu petimateriaalista ja tuhkasta, ja saa pedin leijumaan. Petimateriaalina käytetään usein luonnonhiekkaa tai muuta inerttiä materiaalia. Eri ilman nopeuksilla peti on täysin suspensoitunut, mikä tarkoittaa, että hiekka ja ilma muodostavat yhden jatkuvan faasin, joka käyttäytyy nesteen tavoin. Polttoaine sekoitetaan

pedin sekaan painovoimaisesti ja pneumaattisesti useammasta eri kohdasta tulipesän seinää. Yleensä polttoainepartikkelien osuus pedin kokonaisuudesta on alle 5 %. Jotta palaminen olisi mahdollisimman täydellistä, syötetään tulipesään myös pohjasta syötettävän palamisilman (primääri-ilma) lisäksi sekundääri-ilmaa. Pedin suuren massan ja sen lämpökapasiteetin ansiosta polttoainepartikkelien kuivuminen polttotapahtumassa on nopeaa. (Vakkilainen 2017, s.212–215; Huhtinen ym., 2000, s.155).

Leijupoltto voidaan toteuttaa joko kuplivassa leijukerrossa tai kiertoleijukerrossa. Jatkuvuustilan aikaan saamiseksi pyritään siihen, että petimateriaalia poistuu mahdollisimman vähän tulipesästä. Kerrosleijutuksessa pedin hiukkaset pysyvät leijukerrossa, kun taas kiertoleijussa kiintoainehiukkaset kulkeutuvat kaasujen mukana pois tulipesästä, jonka jälkeen ne palautetaan sinne takaisin erottamalla kaasut ja hiukkaset toisistaan. Tuhkankäsittelyn tarkia kuitenkin osa petimateriaalista poistuu tulipesästä, jolloin sitä täytyy lisätä. Lämpötilan yläraja tulipesässä on oltava polttoaineen tuhkan pehmenemislämpötilan alapuolella. Tästä syystä leijupoltossa leijukerrosen lämpötila vaihtelee välillä 750...950 °C. (Hyppänen & Raiko, 2002, s.490).



Kuva 5. Kerrosleijukattila- ja kiertoleijukattilan toimintaperiaatteet (Hyppänen & Raiko, 2002, s.491).

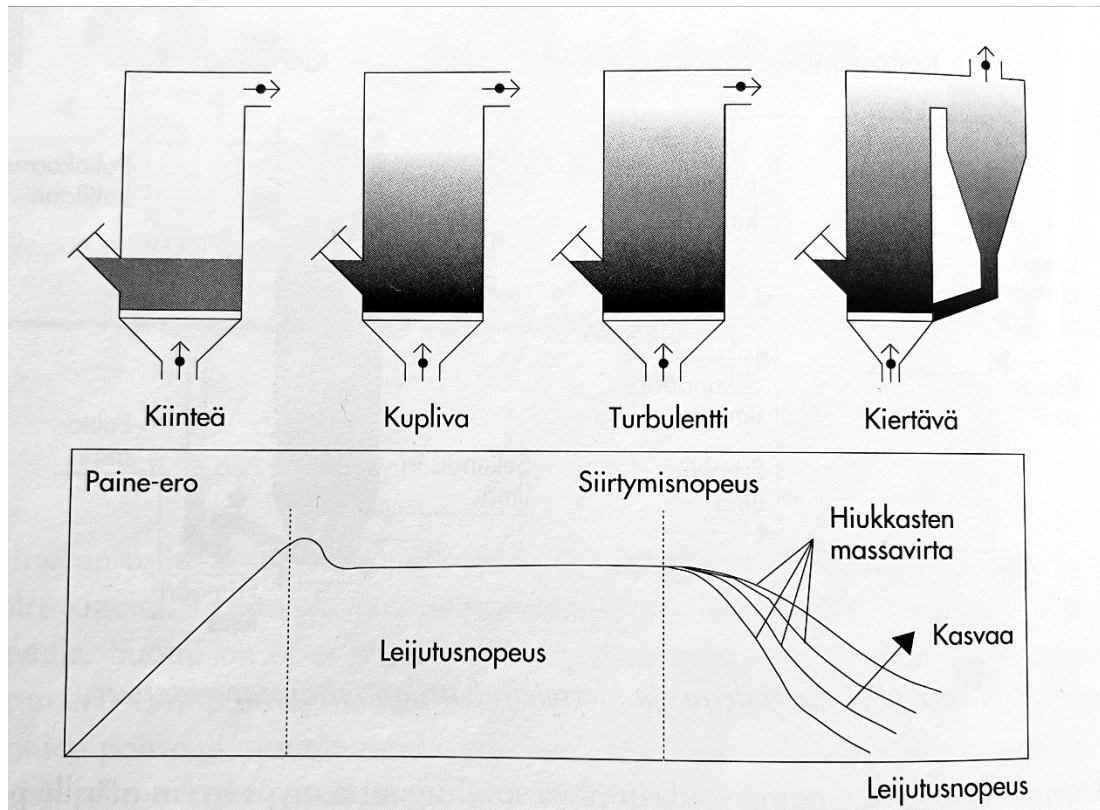
3.1 Kerrosleijukattila

Kerrosleijupoltossa petimateriaali, joka on yleensä luonnonhiekkää, leijuu il-
mavirran ansiosta. Jotta hiekka saadaan leijumaan, pitää selvittää minimileiju-
tusnopeus (U_{mf}). Tämä nopeus riippuu muun muassa hiekan hiukkaskoosta,
muodosta ja tiheydestä. Mitä pienempi on petimateriaalin hiukkaskoko, sitä hi-
taammassa nopeudessa peti saadaan leijumaan. Hiekka alkaa leijumaan, kun
ilmavirran muodostama painehäviö tietyssä nopeudessa kasvaa hiekkakerrok-
sen hydrostaattisen paineen suuruiseksi. Tällöin ilmavirran hiekkapartikkelei-
hin kohdistama voima on yhtä suuri kuin maan vetovoima. (Huhtinen ym.,
2000, s.154).

$$U_{mf} = \frac{\mu_g}{d_p \cdot \rho_g} \left| \sqrt{33,7^2 + 0,0408 \frac{d_p^3 \cdot \rho_p \cdot (\rho - \rho_g) g}{\mu_g^2}} - 33,7 \right|$$

missä	μ_g	kaasun dynaaminen viskositeetti [Pa·s tai N·s/m ²]
	d_p	partikkelin halkaisija [m]
	ρ_p	partikkelin tiheys [kg/m ³]
	ρ_g	kaasun tiheys [kg/m ³]

Kuplivassa leijukerroksessa petimateriaalin keskiraekoko on 1–3 mm ja leiju-
tusnopeus 0,7–2 m/s. Ilman ja petimateriaalin muodostama kupliava hiekkaker-
ros, joka yleensä on 0,4–0,8 m paksu, aiheuttaa 6–12 kPa painehäviön. (Huh-
tinen ym., 2000, s.157).



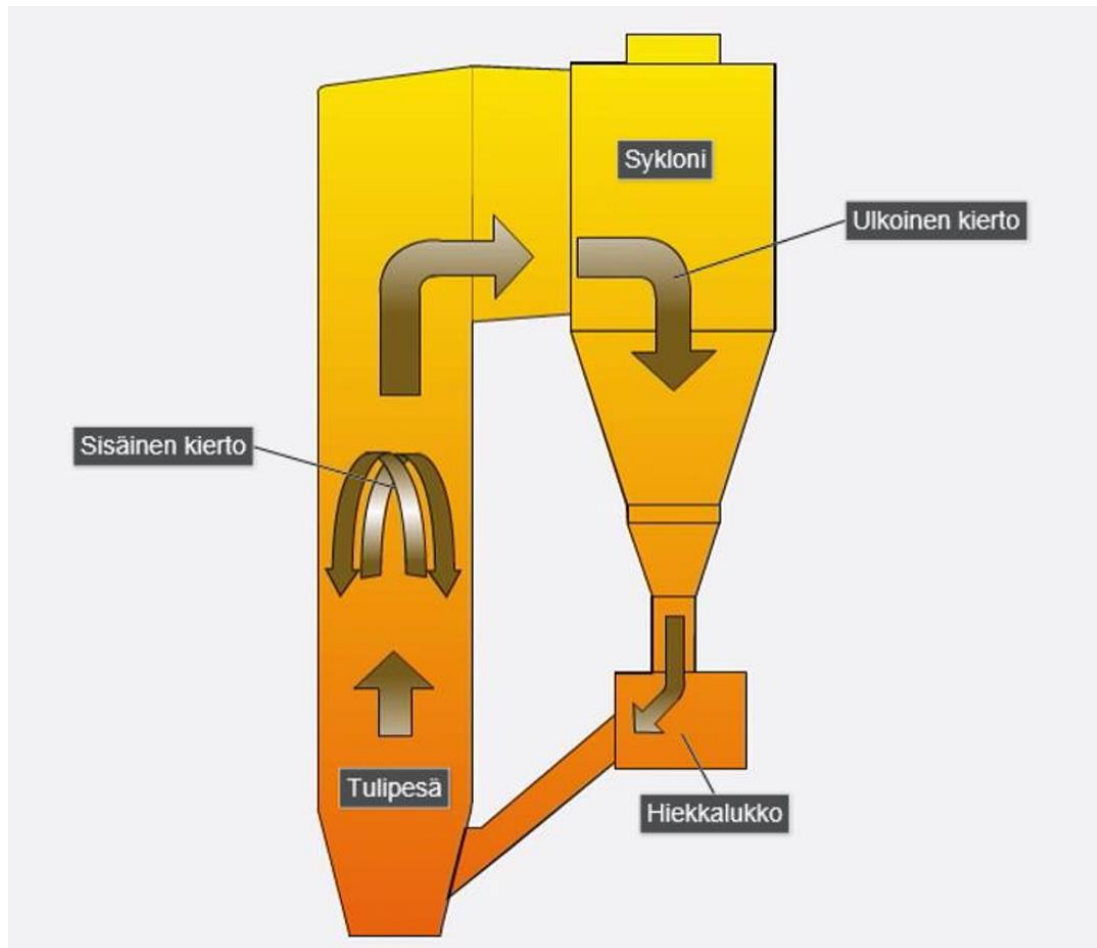
Kuva 6. Leijutusnopeuden kuvaus. (Hyppänen & Raiko, 2002, s.492).

3.2 Kiertoleijukattila

Kiertopetikattiloissa leijutusnopeudet ovat suurempia ja petimateriaali on hienojakoisempaa kuin leijukerroskattiloissa. Leijutusnopeus on 3–10 m/s ja petimateriaalin keskiraekoko on 0,1–0,5 mm. Juuri tämän kokoista tarkkuusseulottua petihiekkaa käytetään myös Kaanaan CFB-kattilassa. Kiertopetikattilassa ominaista on voimakas pyörteisyys ja hiukkasten hyvä sekoittuminen eikä peleistä erotu selvää pintaa. (Huhtinen ym., 2000, s.159).

Kiertoleijun kiintoainemateriaalin liike voidaan jakaa sisäiseen ja ulkoiseen kiertoon. Kun kaasun virtausnopeus nousee, kiintoainetiheys reaktorin yläosissa kasvaa. Osa kiintohiukkasista muodostaa ylöspäin noustessa tihentymiä, jotka virtaavat alaspäin tulipesän seiniä pitkin. Tämä petimateriaalin liike luokitellaan sisäiseksi kierroksi. Kattilan sisäinen kierto takaa poltossa hyvän päästötehokkuuden ja alhaiset palamattomien aineiden häviöt (Valmet, 2024). Syklonissa kaasuista eroteltu petimateriaali ja kiintoaineet palautetaan hiekkalukon kautta takaisin tulipesän alaosaan muodostaen kokonaisuudessaan

ulkoisen kierron. Tämä petimateriaalin runsas sekoittuminen parantaa palamisen hyötysuhdetta ja edesauttaa lämmönsiirtoa kattilan lämmönsiirtopinnoille. (Hyppänen & Raiko 2002, 505).



Kuva 7. Kiertoleijun kiintoainemateriaalin kattilakierto (Lavonen, 2019, s.13).

4 PALAMINEN JA TUHKAN SYNTY

4.1 Palaminen

Yksinkertaistetusti palaminen vaatii polttoaineen ja hapen läsnäolon sekä riittävän suuren lämpötilan tulipesässä. Nämä ovat palamisprosessin kolme perusolosuhdetta. Palaminen CFB-kattilassa pitää sisällään kolme tärkeää vaihetta, jotka ovat kuivaus, pyrolyysi ja puuhiilen poltto. Nämä kolme vaihetta

tapahtuvat koko ajan ja samanaikaisesti tulipesän eri osissa. Tulipesään saapuvan kiinteän polttoaineen palamisnopeus riippuu sen kemiallisista ominaisuuksista ja rakenneominaisuuksista. (Valmet, 2024).



Kuva 8. Palamisen vaiheet (Valmet, 2024).

Tarkastellaan palamista biopolttoaineiden näkökulmasta. Kuivauksessa polttoainehiukkanen kuivuu, eli sen sisältämä vesi höyrystyy. Tämä vaihe on välttämätön, jotta palaminen voi tapahtua. Vaiheen kestoon vaikuttavat polttoaineen kosteus, hiukkaskoko ja rakenne.

Kun polttoainehiukkanen on kuivunut, alkaa seuraava vaihe eli pyrolyysi. Tässä vaiheessa polttoainehiukkasesta vapautuu kaasuna haihtuva aines, joka palaa sen saavuttaessa kattilan hapekkaat olosuhteet. Vapautuvat kaasut koostuvat vedyistä ja lyhyistä hiilivedyistä. Kun happi reagoi kaasujen kanssa muodostuu hiilidioksidia, hiilimonoksidia ja vesihöyryä. Pyrolyysikaasujen palaminen saa aikaan näkyvän liekin tulipesässä polttoainehiukkasten ympärillä. Pyrolyysin alkamiselle riittää muutaman sadan celsiusasteen lämpötila, joka saavutetaan nopeasti tulipesässä. Tämän vaiheen jälkeen polttoainehiukkasesta on jäljellä enää huokoista puuhiilijäännöstä. (Valmet, 2024).

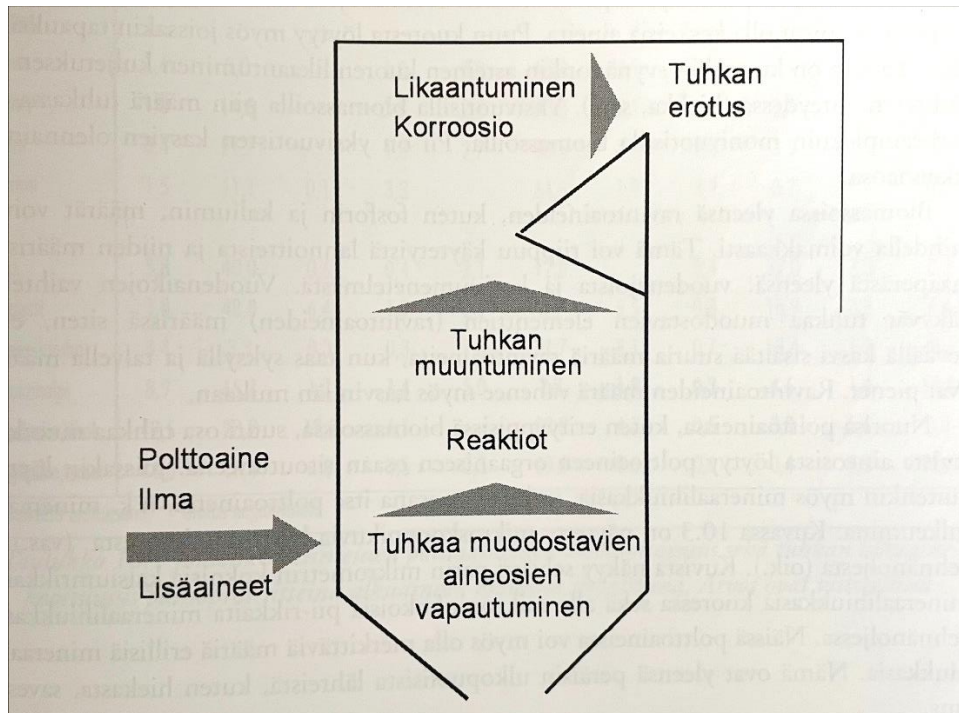
Palamisen viimeisessä vaiheessa eli puuhiilen poltossa jäännöshiilen loppupuunpalamisaika on pyrolyysikaasuihin verrattaessa huomattavasti pidempi. Tämä vaihe voi tapahtua joko pedissä tai kiintoainekierrossa muussa osassa kattilaa. Lopullista palamista tapahtuu nimittäin myös syklonissa ja se tehostuu

entisestäään kierrättämällä syklonin sieppaamia hiilihiukkasia takaisin hiekkalukon kautta tulipesän alaosaan. (Valmet, 2024).

4.2 Tuhka

CFB-kattilassa palamisreaktiossa muodostuu sivutuotteena palamatonta epä-organista ainetta eli tuhkaa. Tuhka voidaan jakaa sen erottelun perusteella kahteen ryhmään eli pohja- ja lentotuhkaan. Pohjatuhka nimensä mukaan poistetaan tulipesän pohjalta. Savukaasujen mukana kulkeutunut lentotuhka poistetaan suodatuksen avulla savukaasuista. Osa lentotuhkasta tarttuu kattilan konvektio-osien putkipinnoille. (Zevenhoven ym., 2010, s.500).

Tuhkan aiheuttamat ongelmat polton yhteydessä ovat ehkä suurin syy kattiloiden ennakoimattomiin alasajoihin. Ongelmat aiheutuvat yleensä monen osatekijän summasta. Tarkasteltaessa tuhkan aiheuttamia ongelmia on huomiotava tuhkan kaikki vaiheet kattilassa (Skrifvars & Hupa, 2002, s.269). Kuvassa 9 on tämä esitetty pelkistetyssä muodossa. Tuhka muun muassa vähentää polttoaineen lämpöarvoa, likaa kattilan pintoja, kuluttaa polttoaineen käsittelylaitteita ja saattaa muodostaa lämpöpinnoille syövyttäviä kerrostumia (Huhtinen ym., 2000, s.41).



Kuva 9. Tuhkan eri vaiheet kattilassa (Skrifvars & Hupa, 2002, s.269).

Tuhkan kemiallista koostumusta on tärkeää tarkastella, kun puhutaan tuhkan aiheuttamista ongelmista. Esimerkiksi biopolttoaineet ja jätteet sisältävät suuren määrän epäpuhtauksia kuten alkalimetalleja (K, Na), jotka palamisprosessissa voivat petimateriaalin kanssa reagoidessaan aiheuttaa petimateriaalin paakkuuntumista eli agglomeraatiota. Lisäksi savukaasujen mukana kulkeutuneen tuhkan mukana nämä epäpuhtaudet voivat aiheuttaa likaantumista tai korroosiota kattilan rakenteissa. Myös tuhkan sulamiskäyttäytyminen aiheuttaa ongelmia pedissä ja kattilan pinnoilla. (Alakangas ym., 2016, s.198).

4.3 Pohjatuhkan poistaminen

Kun poltetaan puuperäistä polttoainetta, siitä syntyvä tuhka on niin hienojakoista, että se poistuu suurimmaksi osaksi savukaasujen mukana lentotuhkana. Sen sijaan suuremmat partikkelit, kuten kivet ja muut leijumisen kannalta liian karkea materiaali jää arinan pohjalle. Pohjalle kertynyt pohjatuhka tulee poistaa jatkuvalla pohjatuhkanpoistolla sekvenssin ohjaamana. Pohjatuhkan poiston tarve riippuu polttoaineen seassa olevien epäpuhtauksien määrästä.

Jos pohjatuhkaa ei poisteta arinasta tarpeeksi, muuttuu petimateriaali ajan kuluessa karkeammaksi. Tämän takia leijutusilman kulutus kasvaa ja palamisreaktio saa liikaa ilmaa eli niin sanottua yli-ilmaa. Tämä ilmiö voidaan havaita epätäydellisenä palamisena ja esimerkiksi typenoksidien määrän lisääntymisenä savukaasuissa. Karkeuden lisääntyminen pedissä voidaan havaita lämpötilamittauksin eri puolilla petiä. Suuri lämpötilaero on yleensä merkki puutteellisesta leijumisesta.

Pohjatuhkan poistossa on huomioitava, että poisto on jatkuvaa ja suoritetaan pedin kunnan mukaan. Poistettavan tuhkan kuntoa tulee myös seurata, sillä sen laatu kertoo paljon pedin kunnosta. Tärkeää pohjatuhkanpoiston vähentämiseksi on poistaa ylimääräinen palamaton osa esimerkiksi kivet ja raudat polttoaineen seasta jo ennen sen syöttämistä kattilaan.

Kun pohjatuhkaa poistetaan, sen mukana poistuu samalla petimateriaalina käytettyä hiekkaa. Tästä syystä hiekkaa on myös jatkuvasti lisättävä arinaan. Hiekka on mahdollista erotella pohjatuhkasta rumpuseulalla, jonka jälkeen hiekka palautetaan takaisin kattilaan. Tämä vähentää ylimääräistä petihiekan kulutusta. (Pori Energia dokumentti, 2024).

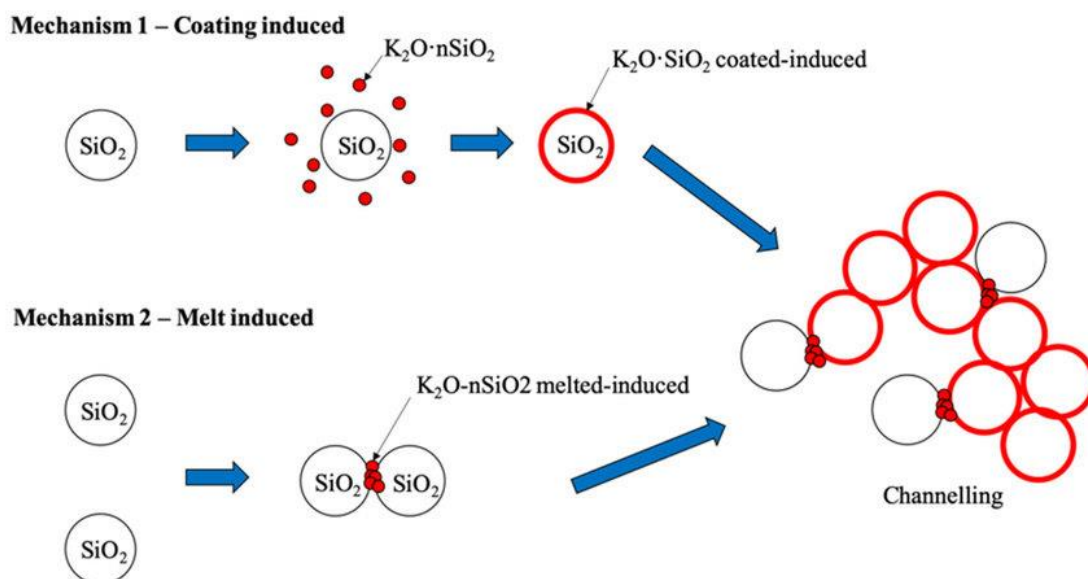
5 AGGLOMERAATIO

Agglomeraatio on prosessi, jossa pedin hiukkaset tarttuvat toisiinsa muodostaten suurempia kokkareita. Tämä ilmiö on yleinen biomassojen leijupoltossa energiantuotannossa ja se voi johtaa kattilan käytettävyyden laskuun ja laitteiston vaurioitumiseen. Kaanaan CFB-kattilassa biomassojen lisäksi poltetaan REF kierrätyspolttoainetta, joka valmistetaan jätteistä ja muista kierrätettävistä materiaaleista. Myös tämän epäillään vaikuttavan agglomeraation muodostumiseen.

5.1 Mekanismit ja vaikutukset

Yleensä biomassojen poltossa leijukerroksessa agglomeraatio johtuu vuoro-vaikutuksesta petimateriaalina käytetyn hiekan kvartsin ja biomassan tuhkan välillä, joka sisältää runsaasti alkaliyhdisteitä, esimerkiksi kaliumia ja natriumia. Näiden aineiden välinen reaktio voi alkaa jo noin 700 °C lämpötilassa ja reaktionopeus kasvaa lämpötilan noustessa. (Anicic ym., 2018, s. 182–190).

Tämä tuhkasulan aiheuttama agglomeraatio johtuu poltossa muodostuvan tuhkan eutektisen seoksen reagoimisesta petimateriaalina käytetyn hiekan kvartsin kanssa. Eutektinen seos on seos, jonka sulamislämpötila on alhaisempi kuin mitä se olisi erillisinä komponentteina. Normaalisti kvartsin sulamislämpötila on yli 1400 °C, mutta reagoidessaan tuhkan alkalien kanssa sulamislämpötila voi laskea alle 800 celsiusasteeseen. Englannin kielessä tämä ilmiö tunnetaan termillä ”melt-induced agglomeration”. (Morris ym., 2018).



Kuva 10. Agglomeraation mekanismit. (Kittivech & Fukuda, 2019).

Toinen kirjallisuudessa esitetty agglomeraation syntymekanismi on englannin kielellä ”coating-induced agglomeration”. Tässä tapauksessa kerrostuma syntyy kvartsipitoisen petipartikkelin ympärille, jolloin petimateriaalista tulee viskoosinen. Tämä sula kerros petimateriaalin pinnalla edistää petihiukkasten kiinnittymistä toisiinsa, mikä voi johtaa pedin leijumattomuuteen ja lämpötilaerojen muodostumiseen. (Morris ym., 2018).

5.2 Agglomeraation välttämisen keinoja

Agglomeraation syntymekanismiin vaikuttavat useat asiat, mukaan lukien petimateriaalin ominaisuudet, polttoaineen ominaisuudet ja käyttöolosuhteet eli lämpötila ja ilman määrä. Näitä tekijöitä muuttamalla voidaan agglomeraatiosta päästä eroon.

Kun polttoaineen poltossa syntyvä tuhka on hyvin alkalista, on kvartsia sisältävä petimateriaali huono vaihtoehto. Ongelma voidaan poistaa käyttämällä kvartsitonta petimateriaalia. J. Silvennoisen kirjoittamassa tieteellisessä julkaisussa vuodelta 2003 mainitaan tutkimuksesta, jossa neljää eri petimateriaalia testattiin laboratoriossa CFB-kattilan koelaitteistossa puisella kierrätyspolttoaineella, jonka tiedetään aiheuttavan ongelmia pedin fluidisaatiossa. Kaksi tutkimuksessa testatuista petimateriaaleista oli kvartsivapaita. Tutkimuksessa huomattiin, että kvartsittomia petimateriaaleja käyttäessä ei havaittu merkkejä pedin agglomeroitumisesta. Kaksi muuta kvartsia sisältävää petimateriaalia aiheutti kokeessa täydellisen leijumattomuuden noin 750 °C:n lämpötilassa noin puolen tunnin käytön jälkeen. Petimateriaalin vaihto kvartsivapaaseen mahdollistaa biomassojen ja kierrätyspolttoaineiden käytön pienentäen agglomeraation riskiä. (Silvennoinen, 2003, s.377–385).

Kvartsivapaita petimateriaaleja ovat esimerkiksi alumiinidioksidi, magnesiumkarbonaatti, dolomiitti, rauta (III)oksidi ja kalkkikivi sekä myöhemmin materiaalien tarkemman tutkimuksen myötä esille nousseet maasälpä ja erialiset kvartsivapaamat luonnonhiekat. (Morris ym., 2018, s.465; Mettantant ym., 2009, s.674–675).

Pedin olosuhteilla kuten, leijutusnopeudella ja lämpötilalla, on vaikutusta agglomeraation syntyyn. On havaittu, että suuremmalla ilman virtausmäärällä pedin leijutus on tehokkaampaa ja sekoitus parempaa, mikä voi vähentää leijumattomuutta. CFB-kattilan palamisprosessi on kuitenkin mitoitettu tietylle ilmamäärälle, joten leijutusnopeuden lisäämisellä voi olla kattilan toiminnan kannalta muita negatiivisia vaikutuksia. Myös korkea lämpötila, joka voi tehostaa agglomeraation muodostumista pedissä, on vaikeasti muokattava suure

polttoprosessissa. Lämpötilan laskua voi olla hankala tehdä tai mahdotonta minimilämpötilan takia. (Lin ym., 2003, s.176).

Pedin kunnonseurantaa Kaanaan CFB-kattilan agglomeraation ennaltaehkäisemiseksi tutkineen Fescon Oy:n esille nostamia muita tehokkaita keinoja olivat pedin riittävä vaihtuvuus ja laadukas kunnonseuranta (Klasila, 2023).

Lisäksi yhdeksi vaihtoehdoksi on esitetty lisäaineen lisäämistä polttoprosessiin. Lisäaine sitoo polttoaineen palamisessa vapautuvia alkaleita ennen niiden reagoitua petimateriaalin kanssa. Mahdollisella lisäaineella voidaan pienentää agglomeraation lisäksi korroosiota, likaantumista, kuonaantumista ja päästöjä. Esimerkiksi kaoliinia on tutkittu yhtenä lisäaineena ratkaisuksi agglomeraation aiheuttamaa ongelmaa vastaan. Se nostaa petimateriaalin agglomeroitumislämpötilaa, jolloin alkali poistuu tulipesästä ja puolestaan lentotuhkan alkalipitoisuus kasvaa. (Davidsson ym., 2017).

6 TUTKIMUSTYÖS VOIMALAITOKSELLA

6.1 Pohjatuhkalaitteisto

Kaanaan CFB-kattilassa pohjatuhkaa poistetaan pedistä seitsemän poistoaukon kautta. Sekä manuaalisilla että pneumaattisilla sulkuluukuilla varustetut poistotorvet purkavat tuhkan jatkuvasti käyville jäähdytysruuveille. Jäähdytysruuveilta jäähdytetty pohjatuhka jatkaa matkaa kolakuljetinta pitkin rumpuseulalle ja tuhkakonteille. Pohjatuhka voidaan ajaa rumpuseulan läpi, jolloin siitä erotellaan petimateriaali karkeammasta aineksesta. Seulalta tuleva petimateriaali ajetaan painelähettimen avulla takaisin kattilaan. Vaihtoehtoisesti rumpuseula voidaan ohittaa, jolloin kaikki pohjatuhka menee suoraan pohjatuhkakontteihin. Kaanaan CFB-kattilan laitteisto on hyvin havaittavissa prosessikaaviosta (Kuva 4). (Pori Energia dokumentti, 2024).

Pohjatuhkan poistamisen tarve arvioidaan pedin painehäviön ja lämpötilamittauksien avulla. Lämpötilaeron ollessa yli 50 celsiusastetta pedin eri mittauksien välillä indikoi se karkeammasta leijumattomasta materiaalista pedissä. Tällöin operaattori voi poistaa materiaalia tietyistä kohdasta petiä. Kun lämpötilamittaukset ovat tasaiset, mutta painehäviö kohoaa, on materiaalia poistettava tasaisesti. (Pori Energia dokumentti, 2024).

6.2 Seula-analyysi

Osana opinnäytetyötä suoritettiin kahden viikon näytteenottojakso Kaanaan CFB-kattilan pohjatuhkasta. Näytteenotto suoritettiin manuaalisesti seulalla. Seulonta tehtiin mukaillen SFS-EN 933-1 seula-analyysi-standardia. Näytteet kerättiin kattilan pohjatuhkasta ja kattilaan takaisin palaavasta petimateriaalista. Tarkoituksena oli selvittää pohjatuhkan laatu ja koostumus sekä arvioida pedin kuntoa. Seulonnan yhteydessä näytteille suoritettiin aistinvarainen tarkastelu ja lopuksi näytteet punnittiin ja taulukoitiin. Kattilaan palaavan petimateriaalin näytteelle suoritettiin XRF-analyysi Fesconin toimesta, jossa selvitettiin materiaalin alkuainejakauma. Näytteet kerättiin keväällä 2023.

6.3 Seulonta

Seulonta suoritettiin kolmella erikokoisella seulaverkolla, joiden läpäisevyydet olivat 0,3 mm, 0,5 mm ja 1,0 mm (Kuva 13). Seulontaa tehdessä suoritettiin aistinvarainen tarkastelu suurennuslasia käyttäen ja näytteestä poistettiin suuremmat kivet ja partikkelit. Näyte kerättiin pohjatuhkan kolakuljettimelta, joka oli pysäytettynä ja erotettuna näytteenottamisen ajan. Kattilaan palaavan materiaalin näyte kerättiin rumpuseulan jälkeen. CFB-kattila oli näytteenottojakson aikana 70–90 MW kuormassa. Jotta näytteet olivat verrattavissa, näytteitä ottaessa pyrittiin siihen, että pohjatuhkan poistamisen taajuus pysyi samana.

Seulaverkot asetettiin päällekkäin niin, että suurin läpäisevyys on päällimmäisenä ja pienin pohjalla. Seuloista läpi pääsevä materiaali eli alite jää

seulonnassa käytettyyn astiaan. Näytteet kerättiin päivittäin kahden tunnin ajalta 10 kertaa. Tämän manuaalisen seulonnan tuloksena saatiin näyte jaetua neljään osaan, eli fraktioon. Jokaisen näytteen fraktiot kerättiin omiin astioihinsa punnitusta varten. Päivittäiset punnitukset kerättiin ylös Excel -taulukoon. Taulukon pohjalta luotiin havainnollistava kuvaaja (kuvaaja 1) fraktioiden osuuksien jakaantumisesta (jääneen osuus). Exceliin kerättyjen tulosten pohjalta tarkasteltiin erityisesti pohjatuhkanäytteitä ennen rumpuseulaa, jolloin raekoko ja sen jakauma oli paremmin havaittavissa.

Taulukko 1. Pohjatuhkan seula-analyysin punnitukset viikko 1.

Päivämäärä	Seulakoko [mm]	Jäänyt massa [g]	Läpäisevä massa [g]	Jääneen osuus [%]	Kumulatiivinen [%]	Läpäisevä [%]
17.4.2023	alite	834,6	0,0	39 %	100 %	0 %
	0,3	923,6	834,6	43 %	61 %	39 %
	0,5	208,5	1758,2	10 %	19 %	81 %
	1,0	197,6	1966,7	9 %	9 %	91 %
18.4.2023		528,7	0,0	41 %	100 %	0 %
	0,3	553,2	528,7	43 %	59 %	41 %
	0,5	113,3	1081,9	9 %	16 %	84 %
	1,0	93,2	1195,2	7 %	7 %	93 %
19.4.2023		495,8	0,0	37 %	100 %	0 %
	0,3	597,7	495,8	45 %	63 %	37 %
	0,5	140,0	1093,5	10 %	19 %	81 %
	1,0	109,5	1233,5	8 %	8 %	92 %
20.4.2023		493,6	0,0	30 %	100 %	0 %
	0,3	645,0	493,6	40 %	70 %	30 %
	0,5	203,9	1138,6	13 %	30 %	70 %
	1,0	286,8	1342,4	18 %	18 %	82 %
21.4.2023		631,0	0,0	41 %	100 %	0 %
	0,3	545,8	631,0	36 %	59 %	41 %
	0,5	157,3	1176,9	10 %	23 %	77 %
	1,0	191,2	1334,2	13 %	13 %	87 %

Taulukko 2. Pohjatuhkan seula-analyysin punnitukset viikko 2.

Päivämäärä	Seulakoko [mm]	Jäänyt massa [g]	Läpäisevä massa [g]	Jääneen osuus [%]	Kumulatiivinen [%]	Läpäisevä [%]
24.4.2023	alite	757,5	0,0	45 %	100 %	0 %
	0,3	553,4	757,5	33 %	55 %	45 %
	0,5	174,2	1310,9	10 %	22 %	78 %
	1,0	187,3	1485,1	11 %	11 %	89 %
25.4.2023		750,3	0,0	43 %	100 %	0 %
	0,3	701,3	750,3	40 %	57 %	43 %
	0,5	173,8	1451,6	10 %	16 %	84 %
	1,0	108,7	1625,4	6 %	6 %	94 %
26.4.2023		940,8	0,0	56 %	100 %	0 %
	0,3	508,4	940,8	30 %	44 %	56 %
	0,5	127,3	1449,2	8 %	14 %	86 %
	1,0	106,1	1576,5	6 %	6 %	94 %
27.4.2023		644,0	0,0	39 %	100 %	0 %
	0,3	681,1	644,0	41 %	61 %	39 %
	0,5	193,9	1325,1	12 %	20 %	80 %
	1,0	133,1	1519,0	8 %	8 %	92 %
28.4.2023		480,6	0,0	29 %	100 %	0 %
	0,3	724,1	480,6	44 %	71 %	29 %
	0,5	253,0	1204,8	15 %	28 %	72 %
	1,0	205,3	1457,8	12 %	12 %	88 %

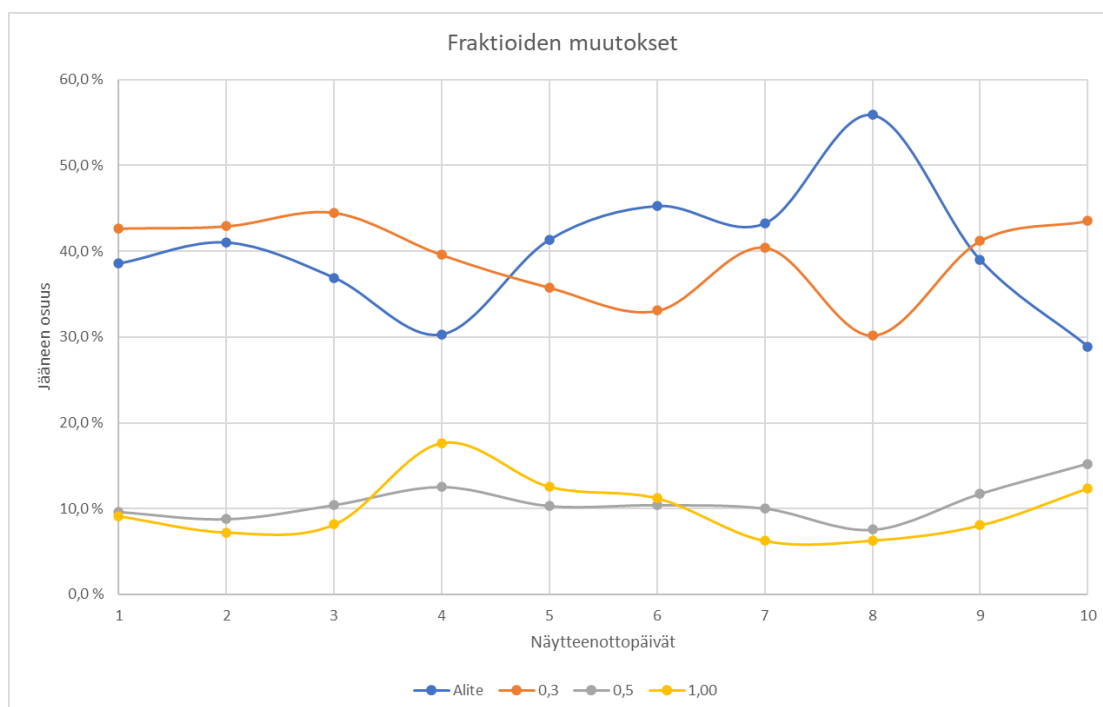
6.4 Seula-analyysin tulokset

Seula-analyysin aistinvaraisessa tarkastelussa, joka tehtiin manuaalista seulontaa suorittaessa tai fraktioiden punnituksen yhteydessä, havaittiin vähäistä vaihtelua. Tulipesän pohjalta poistetun tuhkan eli pohjatuhkan laadussa ei huomattu silmämääräisesti suurta vaihtelua, joten tarve tutkimuksen aistinvaraiseen osuuteen koettiin vähäiseksi. Mahdolliset suuremmat agglomeraation takia muodostaneet kokkareet olisi havaittu helposti kahden viikon aikana, jos niitä olisi esiintynyt. Pedin kunto tältä osalta näytti hyvältä.

Fraktioiden punnitusten tuloksista muodostettiin havainnollistava kuvaaja. Kuvaajasta 1 on havaittavissa fraktioiden selvä jakaantuminen. Pienin osuus näytteistä pääasiassa muodostui, kun raekoko on +1,0 mm. Tämä osuus on neljättä näytteenottopäivää lukuun ottamatta noin 10 % tai vähemmän. Lähes saman osuuden näytteistä muodostaa raekoko +0,5 mm. Suurempaa vaihtelua on havaittavissa, kun raekoko on +0,3 mm tai sitä pienempi eli astiaan kertynyt alite. Petimateriaalin raekoko ei tämän jakson aikana muuttunut, joten muutokset johtuvat jostain muusta syystä. Tähän voi vaikuttaa esimerkiksi polttoaineen koostumuksen muutokset, lämpöarvon vaihtelu tai

kosteuspitoisuus. Lisäksi ilman syötön määrällä voi olla vaikutusta. Tietenkin inhimillisen virheen mahdollisuus on myös huomioitava, kun näyte otetaan manuaalisesti.

Pedin kunnan kannalta tärkeää on kuitenkin tarkastella suurempien raekokojen jakaumaa. Näissä ei juurikaan muutosta näytteenoton aikana tapahdu neljättä näytteenottopäivää lukuun ottamatta, jolloin suurimman raekoon osuus on noin 18 %. Jos suuremman raekoon osuus petimateriaalissa kasvaa, voi se indikoida esimerkiksi agglomeraation tai defluidisaation tapahtumista (Liu, Z., Lin, C., & Chou, J. 2010).



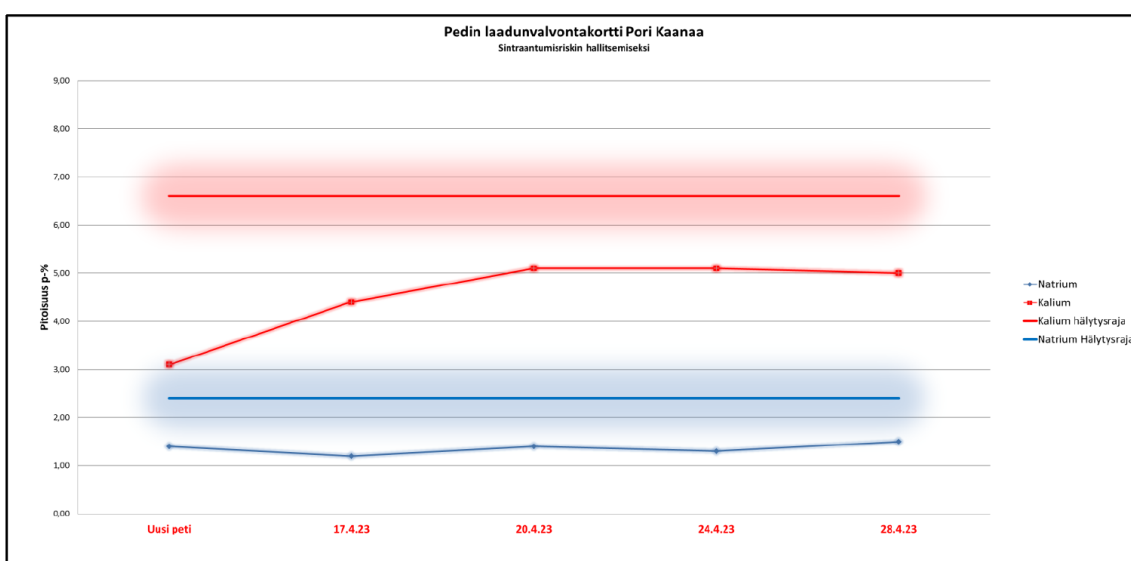
Kuvaaja 1. Fraktioiden muutokset seula-analyysin ajanjaksolta.

Analyysin tarkkuus riippuu suuresti seulontaprosessin käyttäjän taidoista ja huolellisuudesta. Oikein suoritettuna manuaalinen seula-analyysi voi olla melko tarkka, erityisesti pienemmille materiaalimäärille. Kuitenkin suurissa määrissä ja tarkkuutta vaativissa sovelluksissa automatisoidut menetelmät saattavat tarjota paremman tarkkuuden ja tehokkuuden. Syynä tutkimuksessa havaittavissa olevalle vaihtelulle voi olla inhimillinen.

6.5 Alkuaineanalyysi

Näytteistä, jotka kerättiin pohjatuhkasta seulan jälkeen, eli materiaalista, joka palaa takaisin kattilaan, koottiin neljältä päivältä kokoomanäytteet. Näiden lisäksi toinen näyte otettiin CFB-kattilan hiekkalukosta erikseen. Näytteille suoritettiin kokonaisalkuainekoostumus röntgenfluoresenssimenetelmällä (XRF). Tässä menetelmässä analysoidaan 79 alkuainetta fluorista uraaniin. Alkuaineanalyysin teki Fescon Technology laboratorioissaan yhteistyössä Eurofins Expert Services ja Suomen materiaalitutkimus Oy:n laboratorioiden kanssa.

Tutkimusraportissa analysoitiin pohjatuhkan ja hiekkalukkonäytteiden ominaisuuksia verrattuna puhtaaseen hiekkaan. Tulokset osoittivat, että kaliumpitoisuus oli kasvanut noin 2 % korkeammaksi näytteissä, vaikka ne olivat osin laimentuneet lentotuhkalla. Tämä kasvu voi aiheuttaa riskin pedin laajempaan sintraantumiseen, eli hiukkasten yhteenliittymiseen, sillä tyypillisesti alkalikasvun 3–4 % tasoa pidetään kriittisenä. Lisäksi havaittiin muiden tuhkakomponenttien, kuten natriumin, fosforin, mangaanin ja kalsiumin, kasvua verrattuna puhtaaseen hiekkaan. Näiden alkuaineiden kasvu viittaa tyypilliseen alkalireaktioon, jossa kalium ja natrium reagoivat petihiekan kvartsin kanssa, mikä aiheuttaa kvartsihiukkasten pinnan sulamisen. Tämä sulanut pinta tarttuu tyypillisesti tuhkasta, josta havaitut alkuaineiden kasvut ovat peräisin.



Kuva 11. Pedin kunnon seurantakortti tyypillisillä hälytysrajoilla. (Klasila, 2023).

Tutkimuksen perusteella havaittiin, että peti oli heikohkossa kunnossa ennen kattilarevisiota kerätyistä näytteistä. Kvartsi-partikkelit olivat reagoineet alkalien kanssa ja niihin oli tarttunut merkittävä määrä lentotuhkaa. Ulkoisen kierron tuhkamäärät suhteessa hiekan ja tuhkan kokonaismäärään, jotka kulkivat syk-loni-hiekkatulistimen kautta, olivat noin 30 %. Pohjatuhkan osuus vaihteli välillä 20–30 % ennen revisiota. Lisäksi havaittiin, että tuhka saattoi muodostaa osit-tain itsenäisiä tuhkapartikkeleita.

Tutkimusraportissa Fescon Oy suosittelee pedin agglomeroitumisen estä-miseksi paneutumaan juurisyyn osatekijöiden poistamiseen sekä huolehti-maan riittävästä pedin uusiutumisesta. Raportin mukaan kaliumin esiintyminen biomassapolttoaineissa on yleistä, eikä sitä todennäköisesti voida tulevaisuu-nessa välttää. Natriumin aiheuttama alkalireaktio on yleensä voimakkaampi ja laskee tuhkan sulamispistettä kaliumia voimakkaammin.

Kvartsin osalta luonnonhiekkaa on saatavilla eri koostumuksilla, ja erityisesti sen kvartsi-pitoisuuteen voidaan vaikuttaa. Fescon Oy:n mukaan voimalaitok-sella käytetty hiekka, jossa kvartsi-pitoisuus on noin 50 %, ei ole ihanteellista. Optimaalinen ratkaisu olisi valita luonnonhiekkaa, jossa on pienempi kvartsi-pitoisuus tai petimateriaali, jossa ei ole lainkaan kvartsia, kuten esimerkiksi Gr-Granuli. Esille tutkimusraportissa nostettiin myös vaihtoehto, jossa kvartsi-pitoisuutta voisi lisätä, jolloin alkalit jakautuvat laajemmalle alueelle pedissä, mikä mahdollistaa pedin kunnan hallitumman ylläpidon.

Fescon Oy painottaa, että kaikissa tapauksissa on suositeltavaa käyttää pedin kunnonseurantaa, jotta pedin vaihto voidaan tehdä tarpeen mukaan, mutta sa-malla huomioiden taloudelliset ja käytännölliset näkökohdat. Pedin kunnon-seuranta voi sisältää laitoksella tapahtuvan partikkelikoon tarkastelun sekä ke-miallisen laadun ja kunnanvalvonnan, jota esimerkiksi Fescon Technology tar-joaa asiakkailleen.

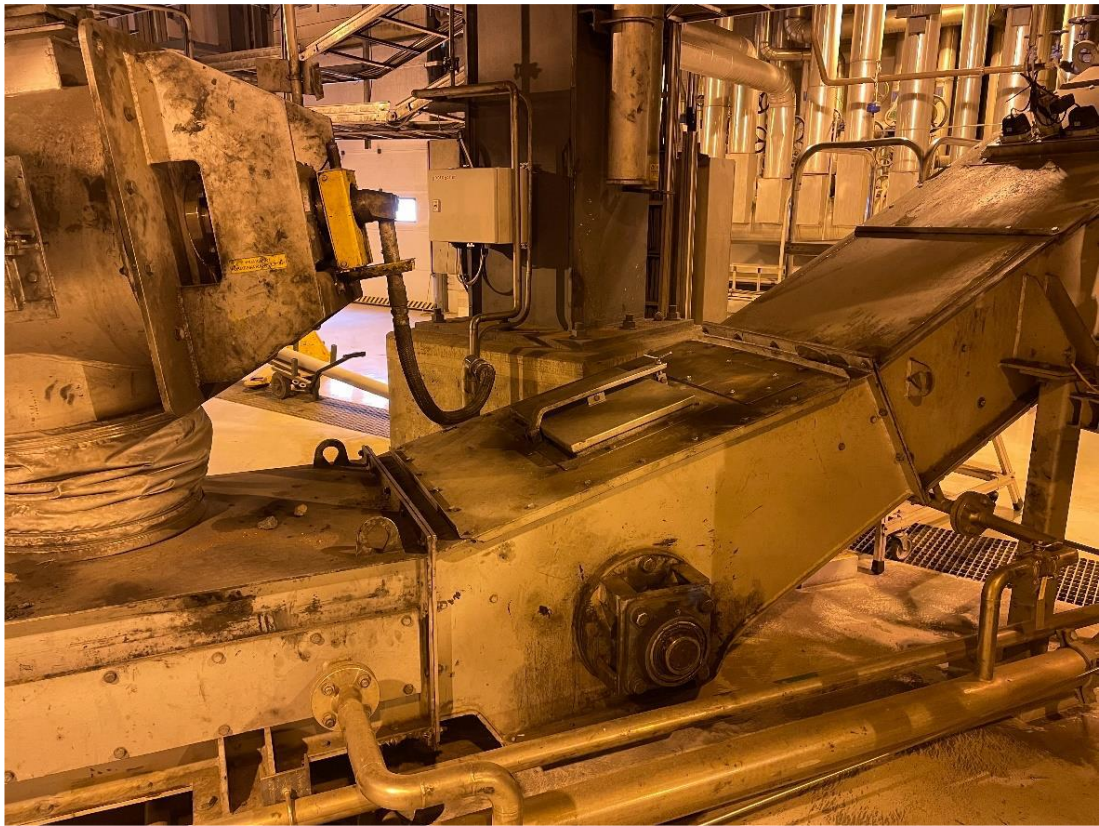
7 TOIMENPITEET

Kun tavoitteena on agglomeraation havainnointi ja ennaltaehkäisy, tärkeää on suorittaa jatkuvaa tarkastelua pedin kunnosta kattilan ollessa käytössä. Tätä kunnonseurantaa voidaan toteuttaa monella tavalla. Pedin kuntoa voidaan seurata esimerkiksi lämpötila- ja paine-eromittauksilla. Tämän lisäksi pedin kunnosta aikaisemman teoriaosuuden mukaan indikoi tuhkan rakenne ja koostumus. Kaanaassa reaaliaikaista tietoa pohjatuhkan laadusta saadaan kuvan sementtisellä segmentoinnilla konenäkökameran avulla. Lisäksi pohjatuhkan laatua voidaan tarkastella manuaalisesti seulomalla tai tarkempaa tietoa sen koostumuksesta kertovalla alkuaineanalyysillä.

7.1 Ennakkohuoltotyö

Opinnäytetyön yhtenä osa-alueena on luoda Kaanaan voimalaitokselle ennakkohuoltotyö. Työssä suoritetaan manuaalinen seula-analyysi pohjatuhkalle. Työ on samalla osana laajempaa tutkimusta pedin kunnosta. Syynä ennakkohuoltotyön luomiseen on lisääntynyt agglomeraattien syntyminen pedissä ja siitä johtuneet ongelmat kattilan käytettävyydessä. Tämän ennakkohuoltotyön avulla parannetaan agglomeraation havaitsemista ja ennaltaehkäisyä pedissä.

Seula-analyysin näytteet otetaan ennen rumpuseulaa pohjatuhkakuljettimelta. Näytettä ottaessa kuljetin pysäytetään ohjaamon toimesta ja kuljettimen turvakytin on 0-asennossa. Jotta näyte voidaan ottaa, kuljettimen tulee olla täysin pysähdyksissä. Näyte otetaan siihen tarkoitetulla työkalulla niin, että kädet eivät mene kuljettimen sisäpuolelle. Työtä tehdessä on tärkeää, että se tehdään turvallisesti.



Kuva 12. Pohjatuhkakuljettimen luukku.

7.1.1 Seulonnan ohjeet

Seulonta suoritetaan kolmella erikokoisella seulalla, joiden läpäisevyydet ovat 0,3 mm, 0,5 mm ja 1,0 mm.



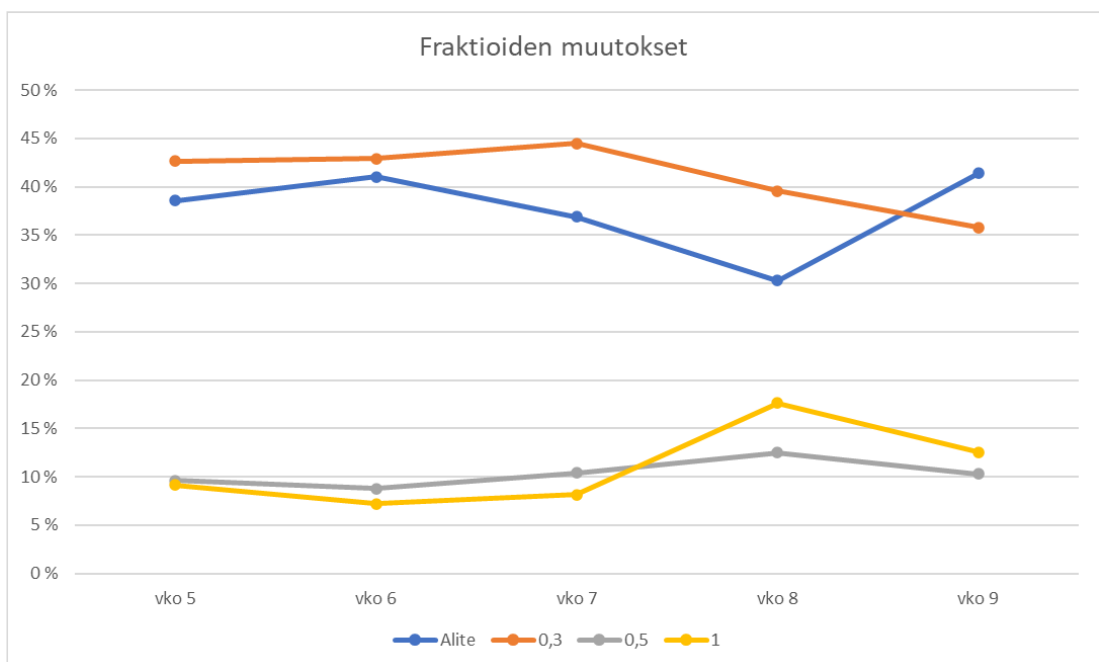
Kuva 13. Seulaverkot kokoa 0,3 mm, 0,5 mm ja 1,0 mm, astiaan jää alite.

Seulontaa tehdessä suoritetaan aistinvarainen tarkastelu esimerkiksi suurenuslasia apuna käyttäen. Isommat kivet ja partikkelit voidaan poistaa käsin seulaverkon päältä. Tarkkaillaan erityisesti useiden partikkelien ryppäitä ja isompia agglomeraatiosta indikoivia kokkareita. Seulot kootaan päällekkäin niin, että suurimman läpäisevyyden seula on ylimpänä ja alimmaksi jää astia. Kuljettimelta otettu tuhkanäyte laitetaan ylimmälle seulalle, jonka jälkeen näyte seulotaan manuaalisesti 1,0 mm, 0,5 mm ja 0,3 mm seulojen läpi. Seulojen päälle kertynyt näyte ja kulhoon jäävä alite kerätään astioihin kokoomanäytteiksi eli fraktioiksi. Jokaista seulaa ravistetaan käsin varmistaen, ettei mitään näytteestä häviä. Esimerkiksi viikon aikana kerätyt fraktiot kerätään omiin astioihinsa, neljään astiaan.

Taulukko 3. Täytetty esimerkkitaulukko.

Päivämäärä	Seulakoko [mm]	Jäänyt massa [g]	Läpäisevä massa [g]	Jääneen osuus [%]	Kumulatiivinen [%]	Läpäisevä [%]
maanantai	alite	834,6	0,0	39 %	100 %	0 %
	0,3	923,6	834,6	43 %	61 %	39 %
	0,5	208,5	1758,2	10 %	19 %	81 %
	1,0	197,6	1966,7	9 %	9 %	91 %
tiistai	alite	528,7	0,0	41 %	100 %	0 %
	0,3	553,2	528,7	43 %	59 %	41 %
	0,5	113,3	1081,9	9 %	16 %	84 %
	1,0	93,2	1195,2	7 %	7 %	93 %
keskiviikko	alite	495,8	0,0	37 %	100 %	0 %
	0,3	597,7	495,8	45 %	63 %	37 %
	0,5	140,0	1093,5	10 %	19 %	81 %
	1,0	109,5	1233,5	8 %	8 %	92 %
torstai	alite	493,6	0,0	30 %	100 %	0 %
	0,3	645,0	493,6	40 %	70 %	30 %
	0,5	203,9	1138,6	13 %	30 %	70 %
	1,0	286,8	1342,4	18 %	18 %	82 %
perjantai	alite	631,0	0,0	41 %	100 %	0 %
	0,3	545,8	631,0	36 %	59 %	41 %
	0,5	157,3	1176,9	10 %	23 %	77 %
	1,0	191,2	1334,2	13 %	13 %	87 %

Viikon päätteeksi suoritetaan näyteastioille punnitukset. Punnitustulokset kerätään Excel-taulukkoon, joka laskee fraktioiden osuudet ja luo havainnollistavan kuvaajan.

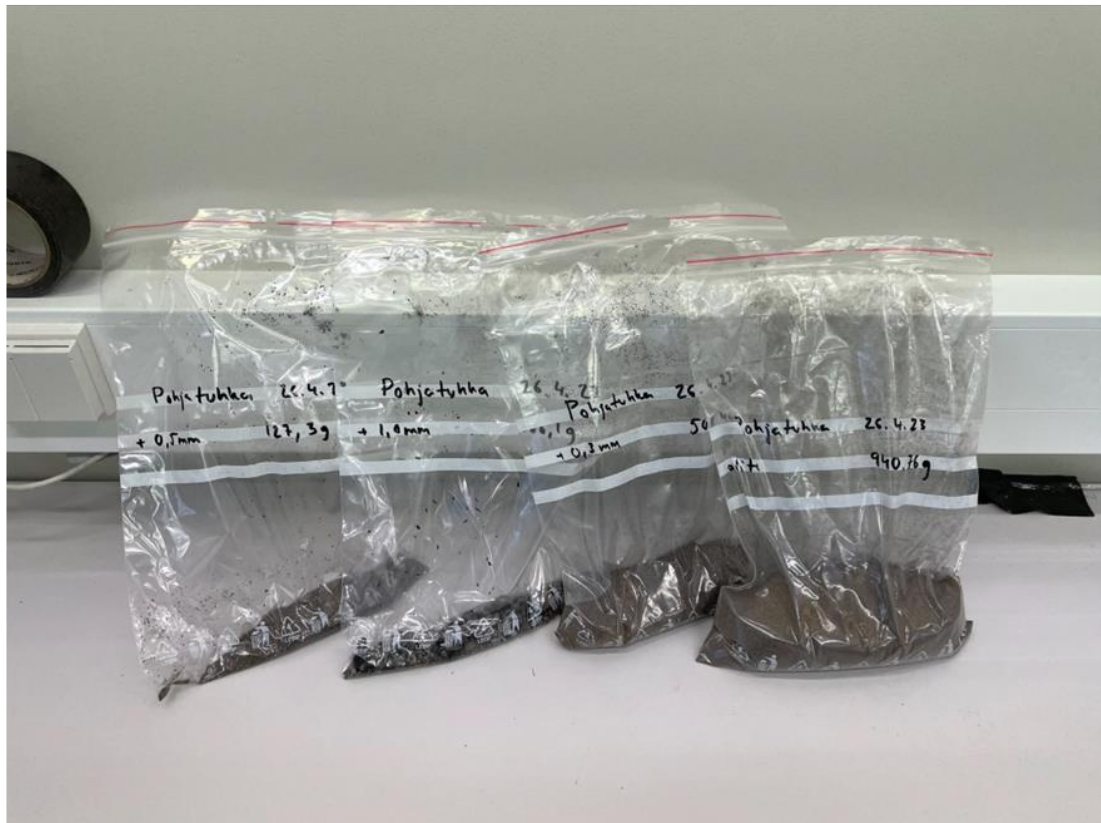
**Kuvaaja 2.** Esimerkki fraktioiden jakaumasta.

Seulojen ylikuormitusta tulee välttää. Seulontaa suorittaessa verkon päälle saa jäädä maksimissaan 200 g. Muuten seulaverkot ovat tukossa ja tulos on epävalidi.

Seulonta suoritetaan mukaillen SFS-EN 933-1 seula-analyysi-standardia. Suositeltavaa ennakko- ja huoltotyötä tehdessä on käyttää vähintään FFP2-luokan suodattimella varustettua hengityssuojainta standardin EN 149 mukaan.

7.1.2 Kemiallinen kunnonvalvonta

Viikon ajalta kerätyt näytteet punnitaan ja pussitetaan. Fescon Technology tarjoaa kemiallisen kunnonvalvonnan palvelua, jossa näytteille suoritetaan jo aikaisemmin mainittu kokonaisalkuainekoostumus röntgen-fluoresenssimenetelmällä (XRF). Tästä tutkimuksesta palvelun tarjoaja lähettää tilaajalle kattavan raportin pedin kunnosta.



Kuva 14. Pussitetut näytteet.

7.2 Konenäkökamera

Kaanaan CFB-kattilan pohjatuhkan kuljettimelle on asennettu kamera, joka tarkastelee jatkuvasti pohjatuhkan kuntoa. Kamera käyttää semanttiseen segmentointiin liittyvää kuva-analyysiä pohjatuhkasta poikkeavien materiaalien

tunnistamiseen esimerkiksi agglomeraation tai sintraantumana. Tämä on tietokonenäön prosessi, jossa jokaiselle kuvan pikselille annetaan leima siten, että pikseleillä, joilla on sama niin sanottu etiketti, on tiettyjä ominaisuuksia. Kameralla tallennettua kuvaa hyödynnetään tiedonvälityksessä pedin huonosta kunnosta käyttöorganisaatiolle. Mikäli pohjatuhkan joukosta havaitaan raja-arvoa ylittävä määrä sinne kuulumatonta materiaalia, automaatiojärjestelmä lähettää ilmoituksen, jonka avulla kattilan valvomo voi reagoida ongelmaan. (Photoboiler, 2024).



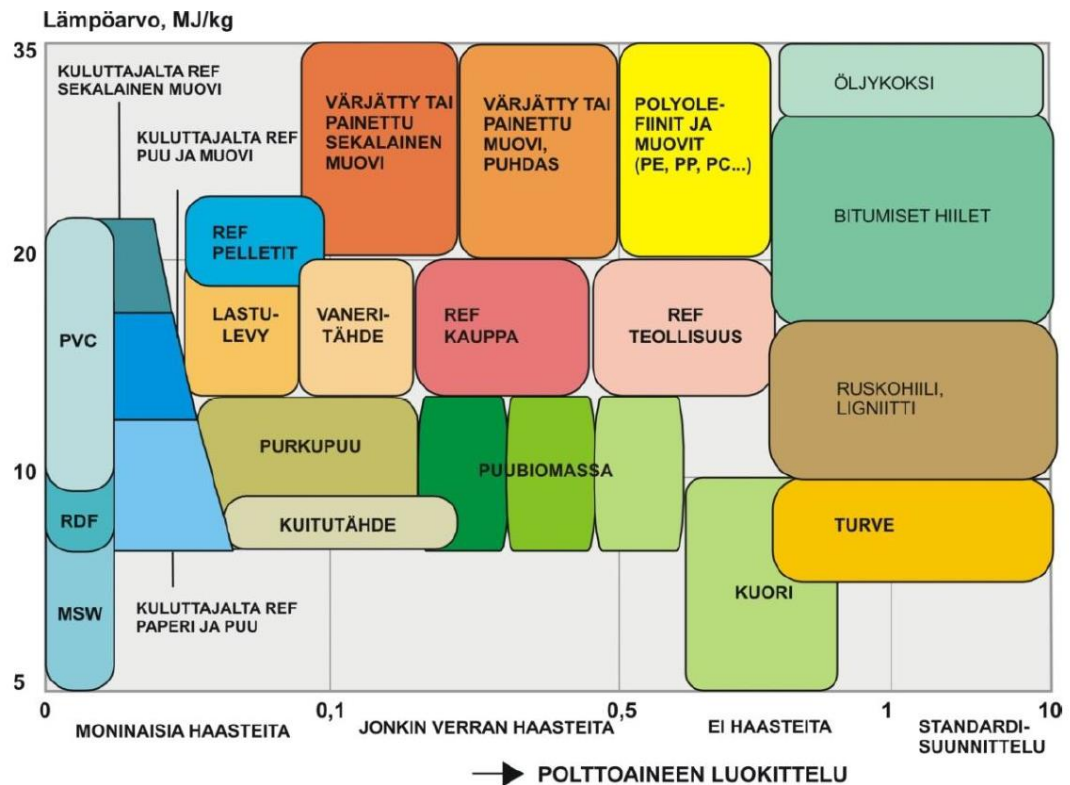
Kuva 15. Konenäkökamera pohjatuhkakuljettimella.

7.3 Ratkaisun pohdintaa

Jos pedin agglomeraatiota tai sintraantumista havaitaan, tulee pohtia, miten siihen reagoidaan. Tässä työssä esitettyjä ratkaisuja ovat muun muassa leijutusilman lisääminen, petilämpötilan muuttaminen ja pohjatuhkan runsaampi poistaminen. Nämä ratkaisut eivät kuitenkaan poista itse ongelmaa.

Jotta agglomeraation muodostumiselta pedissä vältyttäisiin, ennaltaehkäisyn merkitys on suuri. Ratkaisuina tähän Fescon esitti tutkimusraportissaan petimateriaalin vaihtamisen kvartsivapaaseen materiaaliin. Yksinkertaisena ratkaisuna ehdotettiin petimateriaalin runsasta vaihtoa kattilan ajon aikana, joka tosin nostaa petihiekan kulutusta ja näin ollen sen hankintakustannuksia.

Myös muilla tekijöillä on vaikutusta agglomeraation muodostumiseen Kaanaan CFB-kattilassa. On nimittäin havaittu, että kattilan kuorman suuruus on yhteydessä pedin karheuden lisääntymiseen. Mitä pienemmällä kuormalla kattilaa ajetaan, sen heikommaksi tulipesän sisäinen ja ulkoinen kierto muodostuu. Tällä on mahdollisesti vaikutusta agglomeraation ja sintraantumisen muodostumiseen.



Kuva 16. Polttoaineiden haastavuus polttoprosessin kannalta (Alakangas ym., 2016, s.199).

On myös huomioitava kattilassa poltettavan polttoaineen ominaisuudet. Kuvasta 16 on havaittavissa, että polttaessa biomassaa ja REF-jätettä, aiheuttaa se jonkin verran ongelmia polttoprosessissa. Optimaalisia polttoaineita olisi puolestaan esimerkiksi kuori ja turve. Tiedämme jo, että biopolttoaineita ja jätteitä kuten REF-jätettä polttaessa agglomeraatio muodostuu ongelmaksi. Tämän takia juuri oikean petimateriaalin valinta on tärkeää. Agglomeraation teoriaosuudessa käytiin myös läpi vaihtoehdoisen lisäaineen esimerkiksi kaoliinin syöttäminen tulipesään agglomeraation muodostumisen

ennaltaehkäisemiseksi. Tämä tarkkaan valittu lisäaine voi olla ratkaisu kyseisiä polttoaineita polttaessa.

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia ja selvittää ratkaisuja agglomeraation havaitsemiseksi ja ennaltaehkäisemiseksi Kaanaan CFB-kattilassa. Työssä myös pyrittiin kartoittamaan syitä agglomeraatiolle. Lisäksi suoritettiin tutkimustyötä pohjatuhkan rakenteesta ja koostumuksesta seula- ja alkuaineanalyysillä, jonka avulla selvitettiin pedin nykyinen kunto. Tutkimustyön pohjalta käytiin läpi mahdollisia ratkaisuja pedin kunnan parantamiseksi.

Työssä todettiin, että agglomeraatiota aiheuttaa biomassojen ja kierrätyspoltoaineiden alkalien ja petimateriaalin kvartsin väliset reaktiot, jotka kasvattavat petimateriaalin raekokoa aiheuttaen ongelmia pedin hallinnassa. Esiteltiin myös kaksi erilaista agglomeraation syntymekanismia. Tutkimuksen pohjalta, erityisesti Fesconin tutkimusraportin, oli pedissä havaittavissa varoittava alkalipitoisuus. Havaittiin, että pedin kaliumpitoisuus oli noussut. Näin voitiin todeta, että Kaanaan CFB-kattilan pedin kunto ei ollut optimaalinen.

Ratkaisuja agglomeraation havainnointiin ja ennaltaehkäisyyn pohditaan työssä. Ongelman ennaltaehkäisyn kannalta Fesconin tutkimusraporttiin viitaten parhaat vaihtoehdot ovat pedin uusiutumisen ja vaihdon tehostus tai petimateriaalin vaihto kvartsivapaaseen materiaaliin. Kuitenkaan muita läpikäytyjä vaihtoehtoja ei tule täysin sivuuttaa.

LÄHTEET

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. ja Korhonen, J. (2016). Suomessa Käytettävien Polttoaineiden Ominaisuuksia [pdf]. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. ISBN 978951-38-8419-2

Anicic, B., Lin, W., Dam-Johansen, K & Wu, H. (2018). Agglomeration mechanism in biomass fluidized bed combustion – Reaction between potassium carbonate and silica sand. *Fuel Processing Technology*, Volume 173, sivut 182–190. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2017.10.005>.

Davidsson, K., Steenari, B., & Eskilsson, D. (2007). Kaolin Addition during Biomass Combustion in a 35 MW Circulating Fluidized-Bed Boiler. *Energy & Fuels*, 21, 1959–1966. <https://doi.org/10.1021/EF070055N>.

Huhtinen, M., Kettunen A, Nurminen, P. ja Pakkanen, H. (2000). Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Edita. 5. painos. ISBN 951-37-3360-2

Hyppänen, T. & Raiko, R. (2002). Leijupolttu. Teoksessa R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio (toim.). *Poltto ja palaminen*. sivut 490, 491.

Kittivech, T. & Fukuda, S. (2018). Effect of Bed Material on Bed Agglomeration for Palm Empty Fruit Bunch (EFB) Gasification in a Bubbling Fluidised Bed System [pdf]. <http://dx.doi.org/10.3390/en12224336>

Klasila, T. (2023). Fescon Oy:n tutkimusraportti. Kaanaan voimalaitoksen pohjatuhkan, välikanavan kerrostuman ja ensimmäisen tulistimen kerrostumatutkimukset 15.6.2023. Pori Energia M-files dokumenttivarasto.

Lavonen L. (2019). Biopolttoaineiden laadun vaikutus polttoprosessiin [AMK-opinnäytetyö, Turku AMK], Theseus. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201905139389>

Lin, W., Dam-Johansen, K., Frandsen, F. (2003). Agglomeration in bio-fuel fired fluidized bed combustors. *Chemical Engineering Journal* 96(1-3): sivut 171-185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2003.08.008>.

Liu, Z., Lin, C., & Chou, J. (2010). Studies of Cd, Pb and Cr distribution characteristics in bottom ash following agglomeration/defluidization in a fluidized bed boiler incinerating artificial waste. *Fuel Processing Technology*, 91, 591–599. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378382010000081?via%3Dihub>

Mettanant, V., Basu, P., Butler, J. (2009). Agglomeration of biomass fired fluidized bed gasifier and combustor. *Canadian Journal of Chemical Engineering; can. J. Chem. Eng* 87(5): 656-684. <https://doi.org/10.1002/cjce.20211>

Morris, J., Daood, S., Chilton, S., & Nimmo, W. (2018). Mechanisms and mitigation of agglomeration during fluidized bed combustion of biomass: A review. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2018.04.098>.

PhotoBoiler. (2024). Yrityksen nettisivut. Viitattu 11.5.2024. <https://www.photoboiler.com/>

Pori Energia. (2023). Yritysesittely vuosi 2023. Pori Energia M-files dokumenttivarasto. Viitattu 19.3.2024

Pori Energia dokumentti. (2024). CFB pohjatuhkan käsittely. Pori Energia M-files dokumenttivarasto. Viitattu 10.4.2024.

Pori Energia Oy. (19.3.2024). Yrityksen kotisivut. <https://www.porienergia.fi/>

Porin Prosessivoima Oy (2024). PPV:n perehdytysaineistoa. Pori Energia M-files dokumenttivarasto. Viitattu 5.4.2024

Silvennoinen, J. (2003). A New Method to Inhibit Bed Agglomeration Problems in Fluidized Bed Boilers [pdf]. 377-385. <https://doi.org/10.1115/FBC2003-081>.

Skrifvars, B-J & Hupa, M. (2002). Tuhka, kuonaantuminen, likaantuminen ja korroosio. Teoksessa R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio (toim.). Poltto ja palaminen. sivu 269.

Vakkilainen, E. (2017). Steam Generation from Biomass: Construction and Design of Large Boilers. Amsterdam, Netherlands: Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-12-804389-9.

Valmet. (2024). Online learning -alusta. Viitattu 9.5.2024 <https://onlinelearning.valmet.com/>

Zevenhoven, M., Yrjas, P., Hupa, M. (2010). Ash-Forming Matter and Ash-Related Problem. Handbook of Combustion; Solid Fuels 4: s.493-531. DOI:10.1002/9783527628148.hoc068