

Lari Turunen

KUONAANTUMISEN JA LIKAANTUMISEN HALLINTA KIERTOILEIJUKATTILASSA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Helmikuu 2019

TIIVISTELMÄ

Lari Turunen : Kuonaantumisen ja likaantumisen hallinta kiertoleijukattilassa

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Konetekniikan kandidaatintutkinto

Helmikuu 2019

Kiertoleijukattiloissa savukaasujen pienet partikkelit voivat tarrautua kiinni lämmönsiirtopintoihin ja muodostaa kerrostumia ajan kuluessa. Nämä kerrostumat huonontavat lämmönsiirtymistä, samalla polttoainetta kuluu enemmän ja syntyy enemmän haitallisia päästöjä. Tässä työssä on etsitty kirjallisuudesta tietoa kiertoleijukattilan toiminnasta, kerrostumien syntyyn vaikuttavista tekijöistä ja kerrostumien puhdistustekniikoista.

Sulan tuhkan aiheuttamaa kuonaantumista ei varsinaisesti tapahdu kiertoleijukattiloissa, koska lämpötila on alhaisempi kuin tuhkan sulamislämpötila. Likaantuminen on suurempi ongelma varsinkin huonolaatuisia polttoaineita poltettaessa. Biomassa sisältää likaantumista ja kuonaantumista aiheuttavia komponentteja, joiden vuoksi täytyy kehittää puhdistustekniikoita. Jokaisella puhdistustekniikalla on omat etunsa ja haittansa, ja ne käyvät tietynlaisen deposition poistoon, joten niitä ei voi listata paremmuusjärjestykseen.

Avainsanat: likaantuminen, kuonaantuminen, leijupoltto, nuohous, depositio.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	KIERTOLEIJUKATTILAN TOIMINTA	2
2.1	Tulipesä ja sykloni	3
2.2	Vesihöyrypiiri ja savukaasujärjestelmä.....	4
2.2.1	Höyrystys	4
2.2.2	Tulistus.....	6
2.2.3	Syöttöveden esilämmitys	6
2.2.4	Savukaasujärjestelmä	7
2.3	Polttoaine vaihtoehdot.....	7
3.	KATTILAN LIKAANTUMINEN.....	9
3.1	Tuhkan muodostuminen.....	9
3.2	Korroosio.....	10
3.3	Likaantumismekanismit	12
3.3.1	Kuonaantuminen	12
3.3.2	Likaantuminen	13
3.3.3	Sintraantuminen	14
3.3.4	Eroosiokorroosio.....	15
3.4	Likaantumisen vaikutukset lämmönsiirtoon	16
4.	LIKAANTUMISEN JA KUONAANTUMISEN HALLINTA KIERTOLEIJUKATTILOISSA	18
4.1	Likaantumisen ja kuonaantumisen ennaltaehkäisy	18
4.1.1	Lämpötilan säätö	18
4.1.2	Putken pinnoitus ja sijoitus	18
4.1.3	Polttoilman määrä	19
4.1.4	Polttoaineiden vaikutus	19
4.2	Lämmönsiirtopintojen puhdistustekniikat.....	20
4.2.1	Höyry- ja ilmanuuhous.....	20
4.2.2	Kuulanuuhous	22
4.2.3	Ääniaaltopuhdistus.....	22
4.2.4	Ravistuslaitteet.....	23
4.2.5	Räjäytyspuhdistus	23
4.2.6	Vesipesu	24
4.2.7	Puhdistustekniikoiden edut ja haitat	24
5.	TULEVAISUUS	26
6.	YHTEENVETO	28
	LÄHTEET.....	29

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ASME	The American Society of Mechanical Engineers	
DIN	Deutsches Institut für Normung	
IIoT	Industrial Internet of Things	
Loop-seal	Hiekan ja kiinteiden partikkeleiden palautusjärjestelmä	
LUVO	Luftvorwärmer	
A	Lämmönsiirto pinta-ala	[m ²]
c_p	Ominaislämpökapasiteetti	[J/(kgK)]
\dot{m}	Massavirta	[kg/s]
U	Lämmönläpäisykerroin	[W/m ² K]
T	Lämpötila	[K]
ΔT_{lm}	Logaritminen keskilämpötila	[K]
\dot{Q}	Lämpövirta	[W]

1. JOHDANTO

Euroopan komissio päätti vuonna 2018, että Euroopassa tulisi olla nettonollapäästöt kasvihuonekaasujen osalta vuoteen 2050 mennessä. Yhtenä pääpilarina listattiin energiatehokkuuden maksimointi, johon liittyy myös biomassaan siirtyminen. Näistä molempien toteutus kattilatasolla tuottaa hankaluuksia biomassan poltto-ominaisuuksien vuoksi. Biomassa sisältää komponentteja, jotka aiheuttavat kattilan likaantumista, joka huonontaa lämmönsiirtoa. [1]

Kiertoleijukattilat ovat yleistyneet energiantuotannossa niiden monipuolisuuden vuoksi. Ne voidaan rakentaa moneen eri yksikkökokoon ominaisuuksiin vaikuttamatta ja niillä voidaan polttaa monipuolisesti eri polttoaineita hyvällä hyötysuhteella. Vaikka kiertoleijukattilat olisikin valmistettu hiilen polttoa varten, on mahdollista esimerkiksi korvata osa hiilestä biomassalla tai jätteellä. [2] [3]

Motivan tekemän tutkimuksen mukaan lämmönsiirtimille kertyvä lika voi aiheuttaa suomalaisessa teollisuudessa jopa puolen miljardin kulut vuodessa. Lämmönsiirtymisen huonontumisen lisäksi kuluja aiheuttaa myös putkien koon kasvu, joka lisää kattiloissa imupumppujen energiankulutusta. Näiden asioiden vuoksi likaantumisen ja kuonaantumisen tutkiminen on erityisen tärkeää. Kerrostumien syntymiseen liittyviä ilmiöitä ja tekijöitä on tutkittu jonkun verran, mutta kerrostumien poistoon liittyviä tutkimuksia on vielä verrattain vähän. [4] [5]

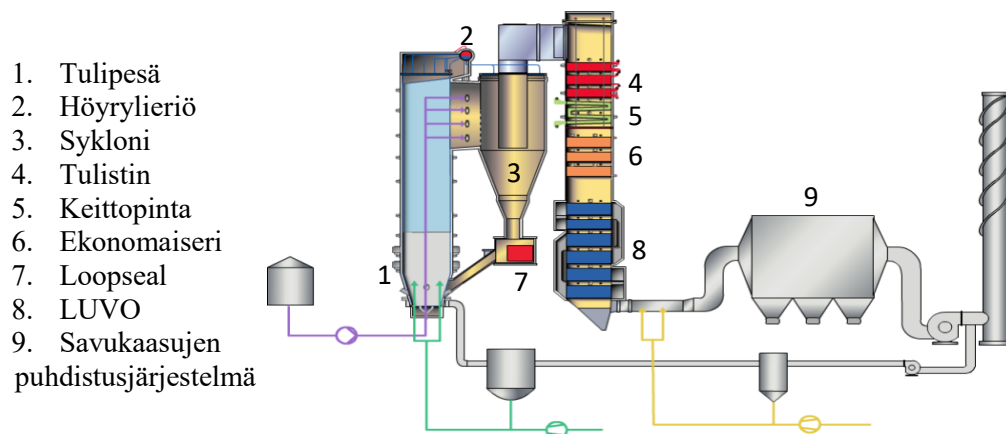
Kiertoleijukattiloissa suurimmat likaantumisongelmat ovat tulistinpinnoilla. Depositiot heikentävät huomattavasti lämmönsiirtoa ja samalla kattilan hyötysuhdetta. Ne myös kasvattavat putkien pinta-alaa, jonka vuoksi laitoksen omakäyttöteho nousee. Depositoiden poisto ja niiden ennaltaehkäisy ovat siis välttämättömiä kattilan tehokkaassa operoinnissa. [6]

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan kirjallisuudesta löytyviä tutkimuksia kiertoleijukattilan toiminnasta, depositoiden, eli kerrostumien syntymisestä, ja niiden poistamismenetelmistä sekä edellä mainittujen tulevaisuuden näkymistä. Tutkimuskysymyksinä ovat:

- Mitkä tekijät vaikuttavat kiertoleijukattilan likaantumiseen ja kuonaantumiseen?
- Miten depositoiden syntymistä ehkäistään ja miten niitä poistetaan?
- Mihin suuntaan tekniikat ovat kehittymässä ja miksi?

2. KIERTOLEIJUKATTILAN TOIMINTA

Tässä luvussa käyn läpi kierto-leijukattilan osia ja mahdollisia polttoaineita sekä leijupolton historiaa. Päätoimintaperiaate kierto-leijukattilassa on tuottaa höyryä polttamalla polttoainetta. Kattilan seinämien putkissa ja savukaasukanavan tulistimissa kulkeva vesi absorboi poltosta syntyvää lämpöä, jonka avulla se höyrystyy. Höyryllä voidaan tuottaa sähköä ja kaukolämpöä. [7]



Kuva 1 Kierto-leijukattilan periaatekuva [7]

Leijupolton ensimmäiset sovellukset esiteltiin 1970 -luvulla. Leijupolton etuina tiedettiin olevan huonolaatuisten polttoaineiden polton mahdollisuus, polttoaineiden laaja valikoima, päästötehokkuus, vaarattomien sivutuotteiden uusiokäyttö ja tekniikan mahdollistaminen jo olemassa olevaan voimalaitokseen. Ensimmäisenä tuli käyttöön kuplaleijukattila, jota käytettiin pienemmissä teollisuuden mittakaavoissa sekä jätteiden poltossa. Myöhemmin kehitettiin uusi leijupolttotapa, kierto-leijupoltto, joka oli parempi kuin kuplaleijupoltto rikin poistossa, palamishyötysuhteessa ja kokoluokassa. [8]

Suomalaiset yritykset, muun muassa Foster Wheeler ovat olleet mukana kehittämässä kierto-leijutekniikkaa. Maissa, joissa oli paljon huonolaatuista hiiltä, kuten Kiinassa, Yhdysvalloissa ja Saksassa, keskityttiin hiilen polton kehittämiseen. Suomessa olevat yritykset erottuivat joukosta jo melko varhaisessa vaiheessa tutkimalla biopolttoaineiden mahdollisuuksia energian tuotossa. Tähän suurena syynä oli sellu- ja paperiteollisuus. Sellun valmistuksessa syntyy sivutuotteita, joita polttamalla voidaan tuottaa energiaa suuren energiamäärän vaatimaan prosessiin. Tällä tavoin ei tarvitse käyttää kalliita polttoaineita esimerkiksi paperikoneessa käytettävän höyryn tuottoon. [8]

Sumitomo SHI FW on suurin kiertoleijukattilavalmistaja maailmassa. Sumitomo osti Amec Foster Wheelerin voimalaitosliiketoiminnan vuonna 2017, johon kuului myös Savossa sijaitseva Varkauden yksikkö, jossa on töissä noin 400 työntekijää. Sumitomo on toimittanut 50 prosenttia maailman kiertoleijukattiloista, pois lukien ne, jotka eivät ole vapailla markkinoilla, kuten esimerkiksi Kiinan markkinoilla. Kiertoleijukattiloilla tuotetaan noin 2 % koko maailman sähköstä ja niitä rakennetaan jatkuvasti lisää. [2] [9]

2.1 Tulipesä ja sykloni

Tulipesään, jonka lämpötila on 800–900 °C, syötetään hiekkaa, ilmaa ja polttoainetta, sekä lisäaineita päästöjen vähentämiseksi. Polttoaine syötetään tulipesän alaosaan, jossa se palaa ja tuottaa lämpöä. Tulipesän alaosa on muuta kattilaa pinta-alaltaan pienempi, mikä helpottaa pitämään hyvää leijutusta yllä. Sen seinämät ovat tehty lämmönsiirtopinnoista, joissa vesi kulkee absorboiden poltossa syntynyttä lämpöä. [3] [6]



Kuva 2 Tulipesä ja sykloni [49]

Tulipesässä on myös hiekkaa, jonka avulla saadaan korkea palamishyötysuhde. Hiekka kiertää savukaasujen mukana sykloniin, jossa se erotetaan savukaasuista ja palautetaan takaisin tulipesään. Syklonit pyritään rakentamaan mahdollisimman pieniksi, koska erotuskyky heikkenee mitä suurempi syklonin halkaisija on. Niitä voidaan rakentaa myös useampi yhdelle kattilalle. Hiekan mukana kulkeutuvat myös suurimmat palamattomat partikkelit, jotka palaavat hiekan mukana tulipesään palamaan palautusjärjestelmän (loop-seal) kautta. Hiekkaa voidaan seuloa ennen kuin se palaa kattilaan, mikä vähentää hiekan kulutusta. Pienimmät partikkelit kulkeutuvat savukaasun mukana savukaasun puhdistimille asti, mikä aiheuttaa tulistinpintojen kuormittumista ja likaantumista. [3] [6]

Kiertoleijukattilan tulipesään syötetään primääri-ilmaa kattilan pohjan läpi nopeudella 3–6 m/s ja sekundääri-ilmaa syötetään seinässä olevien suuttimien kautta hieman ylempää

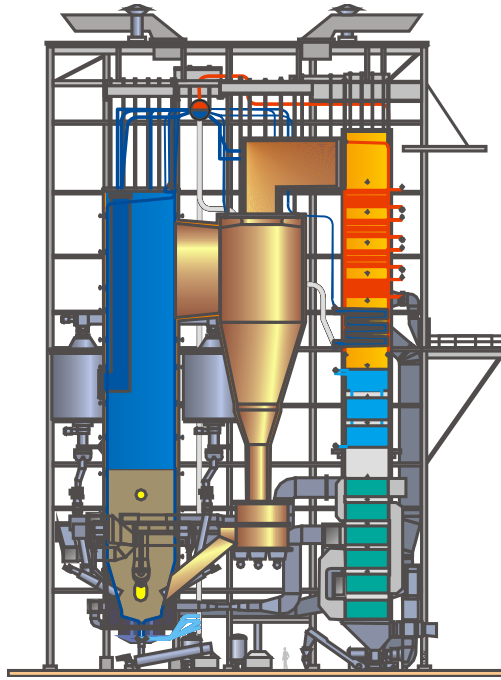
nopeudella 1–3 m/s. Primääri-ilman suuren nopeuden vuoksi petistä häviää selkeä pinta ja hiekka nousee myös ylemmäs kattilaan ja kiertoan savukaasujen kanssa. Ilma esilämmitetään luvossa, eli polttoilman esilämmittimessä, ennen kuin se syötetään tulipesään. Ilmaa syötetään tulipesään, jotta polttoaine palaisi mahdollisimman puhtaasti, sekä myös leijutuksen takia, jotta kiinteän aineen kierto toimii. Hiekan osuus kattilan tilavuudesta vähenee ylöspäin mentäessä. Petin korkeus on 10–30 metriä korkea kattilan koosta riippuen. Ilman syötön optimointi on tärkeää, koska ilman syöttö on suurin energian kuluttaja kiertoleijukattilassa. [3] [7] [6] [10]

2.2 Vesihöyrypiiri ja savukaasujärjestelmä

Korkeapaineisen ja korkealämpöisen höyryn tuotto on kiertoleijukattilan päätoiminto. Höyryn avulla tuotetaan sähköä ja kaukolämpöä. Vesihöyrypiirin tärkeimmät komponentit ovat höyrystimet, ekonomaiset ja tulistimet. Edellä mainituista etenkin tulistimet ovat alttiita likaantumiselle. Savukaasujärjestelmän tehtävänä on puhdistaa savukaasuja pienhiukkasista. Tässä työssä ei käsitellä savukaasujärjestelmiä tarkasti, koska ne eivät altistu kuonaantumiselle eikä likaantumiselle. [7]

2.2.1 Höyrystys

Kiertoleijukattilat ovat usein luonnonkiertokattiloita (kuva 3), mutta voivat olla myös pakkokierto- tai läpivirtauskattiloita. Luonnonkiertokattilassa vesi lähtee höyrylieriöstä alas laskuputkea pitkin kattilan alaosaan, jossa se höyrystyy ja nousee ylöspäin nousuputkia pitkin takaisin lieriöön. Kattilan nousuputket eli höyrystimet, jäähdyttävät tulipesää, koska vesi absorboi paljon lämpöä. Tällöin ei ole vaaraa materiaalin ylikuumentumiselle. [6]



Kuva 3 Kiertoleijukattilan vesihöyrypiiri [19]

Vesi on lieriössä kylläistä, joten hydrostaattisen paineen vuoksi vesi on alijäähtynyttä mennessään kattilaan. Lieriön tehtävänä on erottaa kattilaan tuleva vesi sieltä tulevasta höyrystä ja poistaa epäpuhtauksia vedestä, jotta ne eivät pääse vahingoittamaan höyrystinputkistoja. [6]

Pakkokierto-kattilassa on muuten sama toimintaperiaate kuin luonnonkierto-kattilassa, mutta lieriön alapuolella on syöttövesipumppu, joka pumpkaa vettä kattilaan. Tämä pienentää höyrystinputkien kokoa ja kustannuksia, mutta kuluttaa sähköä. Pumpun täytyy olla sijoitettuna selvästi lieriötä alemmaksi, jotta höyryä ei pääse yhtään syöttövesipumppuun asti. [6]

Läpivirtauskattilassa ei ole lieriötä, vaan nimensä mukaisesti vesi joko pumpataan tai tulee omalla paineellaan kattilan alaosaan ja nousee ylös höyrystyessään. Koska lieriötä ei ole, joka poistaisi epäpuhtauksia, kattila vaatii puhdasta vettä. Läpivirtauskattiloita käytetään usein suurissa mittakaavoissa, koska se soveltuu korkeapaineisen höyryn tuottoon. [6]

Yleisesti hyväksytyjä lämmönsiirtokorrelaatioita kierto-leijukattilalle ei ole käytettävissä, vaan yksittäisissä laitteissa tehtyjen kokeiden tuloksia tai yksittäisiä tutkijoiden tekemiä korrelaatioita. Kokonaislämmönsiirtokertoimet ovat tyypillisesti reaktorin seinäpinoilla $80\text{--}250\text{ W/m}^2\text{K}$, reaktorin sisäosissa $50\text{--}250\text{ W/m}^2\text{K}$ ja palautusjärjestelmässä $300\text{--}500\text{ W/m}^2\text{K}$. [11]

2.2.2 Tulistus

Tulipesässä höyrystynyt vesi tulistetaan tulistimissa, jotka ovat sijoitettu yleensä savukaasukanavaan syklonin jälkeen, tulipesän yläosaan tai kiinteiden partikkeleiden palautusjärjestelmään. Tulistimet voidaan jakaa säteily-, konvektio- ja yhdistelmätulistimiin. Säteilytulistimet ovat sijoitettuna tulipesän yläpuolelle, jossa se kerää suurimman osan lämpöenergiasta säteilystä. Koska säteilytulistimet ovat niin lähellä tulipesää, ne vastaanottavat paljon lämpöenergiaa. Höyryn nopeus pitää olla suuri, että jäähdystysteho on riittävä. [6] [12]

Konvektiotulistimet ovat yleensä sijoitettu syklonin jälkeen savukaasukanavaan, jossa niihin ei kohdistu hiekan ja suurien tuhkapartikkeleiden aiheuttamaa eroosiota. Ne keräävät suurimman osan lämpöenergiastaan konvektion avulla. Alkalimetallipitoisia polttoaineita, esimerkiksi biopolttoaineita, poltettaessa tulistimet altistuvat likaantumislle, koska lämpötila on sopiva sen tapahtumiselle. [6]

Tulistettavan höyryn lämpötilaa voidaan säätää suihkuttamalla syöttövettä sekaan. Tämä laskee höyryn entalpiaa ylikuumentumisen välttämiseksi. Joissain tapauksissa voidaan myös säätää leijutusilman nopeutta lämmön säätämiseksi. [7]

2.2.3 Syöttöveden esilämmitys

Syöttövettä lämmitetään ennen kattilaan syöttöä syöttöveden esilämmittimellä (ekonomaiseri), joka sijaitsee savukaasukanavassa tulistimien jälkeen tai turbiinin väliotossa. Ekonomaiseri laskee savukaasujen loppulämpötilaa, mikä parantaa hyötysuhdetta. Ekonomaisereita on höyrystäviä ja höyrystämättömiä, riippuen käyttökohteesta. Höyrystämättömiä käytetään esimerkiksi läpivirtauskattilassa, jossa on syöttövesipumppu. Pumppuun mennessä vedessä ei saa olla yhtään höyryä, koska se voi alkaa kavitoimaan. Höyrystävissä ekonomaisereissa osa vedestä höyrystyy ekonomaiserin loppuvaiheessa. Tällainen voi olla käytössä esimerkiksi läpivirtauskattilassa, jossa ei ole syöttövesipumppua. [6]

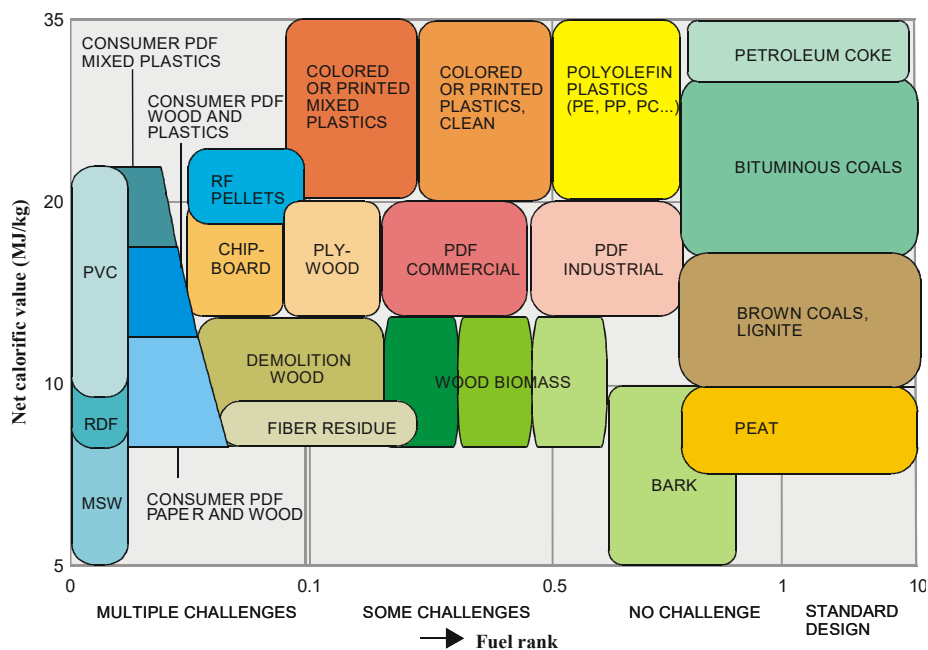
Ekonomaiserit voidaan jakaa myös raaka-aineen mukaan kahteen luokkaan: valurautaesi- lämmittimiin ja teräspuutkiesilämmittimiin. Valuraudasta tehdyt ekonomaiserit toimivat parhaiten, kun syöttövesi on kylmää. Valurauta kestää hyvin matalalämpötilan syöpmistä ja savukaasujen hiukkasten ja nuohomien aiheuttamaa kulutusta. Valurauta ei kestä suurta painetta, minkä vuoksi yleensä käytetäänkin teräspuutkiesilämmittimiä, jotka voidaan ympäröidä valurautaisella rivoituksella. Yleensä käytetään hiiliteräksiä St 35.8 ja 45.8. Huhtinen työryhmineen kertoo teoksessaan *Höyrykattilatekniikka* niillä olevan hyvä lämmönjohtokyky, hyvä muokattavuus, helppo hitsattavuus, edullinen hinta ja pieni lämpölaajenemiskerroin. [6]

2.2.4 Savukaasujärjestelmä

Savukaasuja voidaan puhdistaa monilla eri tavoilla. Menetelmiä on tullut useita päästörajoitusten koko ajan tiukentuessa. Päästöihin voidaan vaikuttaa polttoprosessissa lisäaineilla tai savukaasuista erottelemalla. Lisäaineena voidaan käyttää muun muassa kalkkia ja ammoniakkia. Yleisimmät puhdistusjärjestelmät ovat sähkösuodatin, kangassuodattimet, ja savukaasupesurit. [6] [11]

2.3 Polttoaine vaihtoehdot

Yksi suurimmista leijupolttotekniikan eduista on laaja polttoainevalikoima. Erilaisten polttoaineiden poltto ei vaikuta paljoo palamishyötysuhteeseen. Hämäläinen listasi kansainvälisessä biomassa foorumissa kierto-leijukattiloiden polttoaine mahdollisuudet. Kuvassa 4 olevassa kaaviossa, X-akselilla on polttoaineen haasteellisuus. Oikeassa reunassa olevat polttoaineet pystytään polttamaan normaalilla kattilamallilla. Mitä lähemmäs origoa mennään, sitä enemmän haasteita tulee. Joudutaan käyttämään seospolttoa ja muuntelemaan kattilan mallia polttoaineelle sopivaksi. Y-akseli kertoo polttoaineen lämpöarvon. Origoa lähimpänä on polttoaine, jolla pienin lämpöarvo. [3] [13]



Kuva 4 Kierto-leijukattilan polttoaineiden ominaisuudet [13]

Kaaviosta nähdään, että parhaat ominaisuudet ovat koksilla ja hiilellä. Suomessa käytettävät puubiomassat ovat hieman haastavia ja niiden lämpöarvo on vain noin kolmas osa koksen lämpöarvosta. Jos poltetaan kotitalousjätettä, voi polttoaineen seassa olla lähes mitä vain. Polttoaineen ominaisuuksien vaihtelevuus on todella suurta ja sitä on vaikea ennakoita.

Polttoaineet, jotka ovat lähempänä vasenta reunaa, sisältävät oikealla puolella olevia polttoaineita enemmän likaantumista ja kuonaantumista aiheuttavia komponentteja. Näitä ovat esimerkiksi alkali- ja maa-alkalimetallit (Na, K, Ca, Mg). Ne voivat reagoida polttoaineen rikin kanssa, jolloin syntyy sulfaattiseoksia, joiden sulamispiste voi olla noin 650 °C. [11]

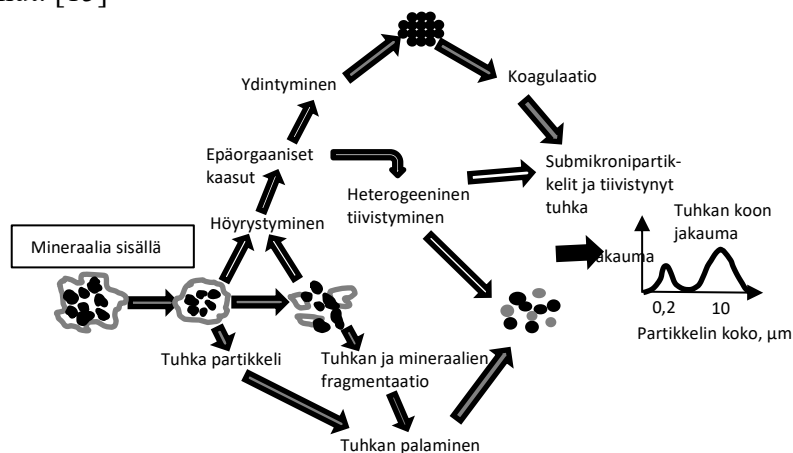
3. KATTILAN LIKAANTUMINEN

Likaantuminen on hyvin monimutkainen ilmiö, jossa tulee ottaa monia asioita huomioon. Likaantumiseen vaikuttaa muun muassa ilman jakauma kattilassa, tulipesän ulostulo- lämpö, absorptio ja rakenne, polttimien sijainti ja koko, yli-ilman määrä ja kattilan kuorma. Kattila ja lämmönsiirtimien pinnat keräävät tuhkaa ja muita palamisessa syntyviä partikkeleita, jotka saattavat pahimmillaan aiheuttaa yhtäkkisen kattilan alasajon. Tämän vuoksi likaantumisen tutkiminen on erittäin tärkeää. Ennen likaantumismekanismeihin perehtymistä, on kuitenkin hyvä ymmärtää teoriaa tuhkan muodostumisesta. [10] [14]

3.1 Tuhkan muodostuminen

Tamminen kirjoittaa diplomityössään [15], että leijupoltteknikassa suuriksi toiminnallisiksi ongelmiksi petin partikkelien kasaantumisen ja korroosion ohella, ovat kuonaantumisen ja likaantumisen. Näiden likaantumismekanismien tärkeyden olivat maininneet Raiko [11], Spliethoff [16], Basu [3] ja Bryers [14] töissään.

Kiertoleijukattilassa muodostuneet tuhkapartikkelit voidaan jakaa niiden sijainnin perusteella kolmeen eri luokkaan, petituhka, syklonituhka ja lentotuhka. Tulipesän lämpötila, 800-900°C, ei riitä sulattamaan tuhka partikkeleita, joten sulaa tuhkaa kiertoleijukattilassa ei yleensä esiinny. Kuva 5 havainnollistaa kuinka tuhkan muodostuminen on binäärijakautunut. [15]

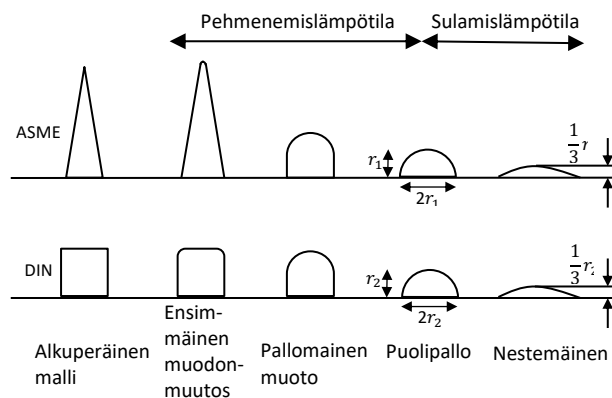


Kuva 5. Tuhkan muodostumisen reitit bimodaaliseen partikkelikokoon. Muokattu alkuperäisestä lähteestä. [24]

Kuvan ylemmässä osassa näytetään, miten pieniä tuhkapartikkeleita muodostuu kaasufaasin kautta. Yksi tapa muodostumiselle on epäorgaanisen kaasun tiivistyminen ja kerääntyminen hienoon tuhkaan. Toinen tapa alle mikrometrin kokoisten tuhkapartikkelin muodostumiseen, on kylläisen tuhkan ydintyminen. Ydintyneet hyvin pienet tuhkapartikkelit voivat vielä koaguloitua hieman suuremmiksi, 0,2 μm kokoisiksi, hiukkasiksi.

Kuvan alaosassa näytetään kuinka suuremmat, noin $10\mu\text{m}$, kokoiset tuhka partikkelit syntyvät jäännöstuotteena, kun tuhka palaa. Kovan tuhkakertymän muodostumisen voi jakaa neljään vaiheeseen, tuhkan partikkelin muodostuminen, tuhka partikkelin tai yhdisteen kulkeutuminen pinnalle, pinnalle kiinnittyminen ja kerrostuman vahvistuminen. [15] [17]

Tuhkan muodonmuutokset voidaan jakaa DIN:n ja ASME:n mukaan kuvan 6 tavalla. Ensin tuhkasta tehdään kuutio, sylinteri tai pyramidin muotoinen, jonka jälkeen sitä lämmitetään. Ensimmäisen muodonmuutoksen vaiheessa nähdään pieniä muutoksia kappaleen muodossa, kuten kulmien pyöristyminen. Seuraavassa vaiheessa kappale on saavuttanut pyöreän muodon, jolloin korkeus ja leveys ovat yhtä suuret. Tämän jälkeen kappale muuttuu puolipallomaiseksi, jolloin kappaleen korkeus on puolet sen leveydestä. Lopuksi tuhka saavuttaa nestemäisen olomuodon. Tämä piste on määritelty siihen, kun kappaleen korkeus on kolmasosa sen leveydestä. [14] [16]



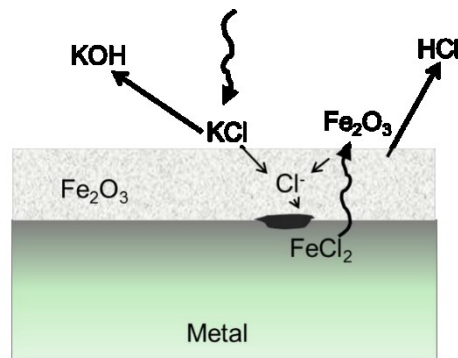
Kuva 6 Tuhkan sulamiseen liittyvät lämpötilat. Muokattu alkuperäisestä kuvasta. [16]

3.2 Korroosio

Polttolaitoksissa tapahtuvaa korroosiota kutsutaan kuumakorroosioksi. Korroosio on usein lämmönsiirtopinnoilla olevien tuhkakerrostumien seurausta. Tuhkakerrostumat edistävät korroosionopeutta varsinkin, jos tuhka on sulassa faasissa, koska ionit liikkuvat huomattavasti nopeammin nesteessä kuin kiinteässä faasissa. Mitä korkeampi lämmönsiirtopintojen lämpötila on, sitä enemmän korroosiota tapahtuu. [16] [18]

Polttoprosessissa syntyy korrosoivia klorideja. Muun muassa biomassan poltossa syntyy kaliumkloridia. Korrosoivat kloriitit kondensoituvat viileämmille lämmönsiirtopinnoille ja saattavat muodostaa kerrostumia. [19]

Kattilassa voi olla paikallisia pelkistäviä olosuhteita, jotka aiheuttavat ja edistävät korroosiota, koska pinnoille ei pääse syntymään suojaavaa oksidikerrosta ja korrosoivat aineet pääsevät metallipinnalle. Tätä tapahtuu etenkin tulipesässä, jossa lämmönsiirtimien lämpötila on alhaisempi kuin tulistinpinnoilla. Mikäli näissä paikoissa on lisäksi korroosiota edistäviä rikki- ja klooriyhdisteitä, ne voivat päästä reagoimaan metallin kanssa muodostaen reaktiotuotteita. Reaktiotuotteina syntyvät sulfidit ja kloridit eivät anna metallille enää korroosiosuojaa, eli pinnat alkavat korrosoitua. Erityisen paljon ongelmia aiheuttavat alkalisulfaatti-kloridi-seokset, joiden sulamispisteet voivat olla samalla tasolla kuin lämmönsiirtopintojen lämpötila. [11] [18] [20]



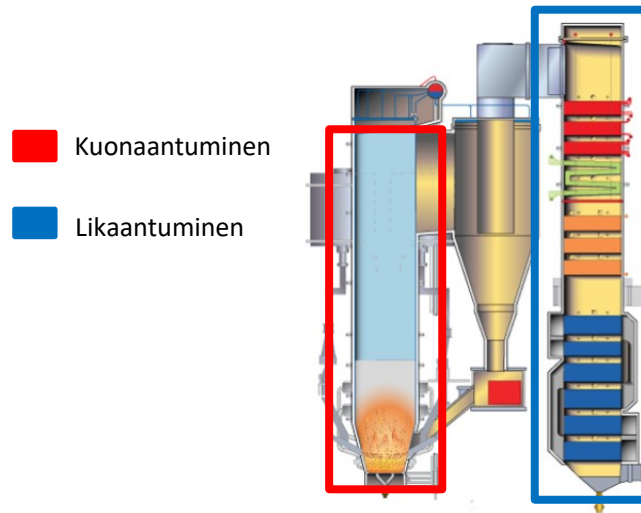
Kuva 7 Kloridin reagointi metallin kanssa [3]

Raskasmetallin aiheuttamaa korroosiota tapahtuu viileämmillä lämmönsiirtopinnoilla kuten primääritulistimella ja tulipesän seinillä olevissa höyrytimissä. Raskasmetalleihin kuuluvat muun muassa kalium, kloori ja natrium. Alkalikloridien aiheuttamaa korroosiota tapahtuu taas kuumemmilla tulistinpinnoilla. [11] [18] [20]

Mikäli ympäröivässä kaasussa on myös muita aktiivisia komponentteja kuten rikkioksidia, rikki voi läpäistä oksidikerroksen ja muodostaa metallisulfidia. Tämä voi tapahtua, jos hapen ja rikin osapaineet ovat oikeissa suhteissa. Syntyvä sulfidikerros ei anna yhtä hyvää suojaa korroosiota vastaan kuin oksidikerros. Sulfidikerros on huokoinen ja hilseilee helpommin. [6]

3.3 Likaantumismekanismit

Kuonaantuminen ja likaantuminen voidaan erottaa toisistaan niiden sijainnin perusteella. Kuonaantumisen tarkoitetaan tulipesän lämmönsiirtopinnoille ja sen yläpuolella oleville säteilytulistimille kertyvää kuonaa. Likaantumista tapahtuu syklonin jälkeen olevilla konvektiivisilla lämmönsiirtopinnoilla. [14]



Kuva 8 Kuonaantumisen ja likaantumisen sijainnit kattilassa. Muokattu alkuperäisestä lähteestä. [15]

Kuvassa 8 nähdään, kuinka kuonaantuminen ja likaantuminen eroavat sijainniltaan kiertoleijukattilassa. Punaisella merkatulla alueella tapahtuu kuonaantumista ja sinisellä merkatulla alueella likaantumista.

3.3.1 Kuonaantuminen

Kuonaantuminen (slagging), tarkoittaa lentotuhkan kasaantumista lämmönsiirto pinnoille tulipesässä. Puhtaissa putkissa kuonaantuminen on aluksi todella hidasta. Kun sulaneita tuhka hiukkasia jää putken pinnalle, ne jäätyvät nopeasti ja lähtevät usein ilmavirran mukana takaisin savukaasuvirtaukseen. Vähitellen putken pinnalle kehitty kerros erittäin pienistä hiukkasista. Tämä kerros voi reagoida kemiallisesti lentotuhkan kanssa, jolla on alhainen sulamispiste. Kun kerros paksuntuu, se lämpenee enemmän ja muuttuu plastiseksi. Tämä lisää edelleen partikkeleiden kiinnittymistä ja kerroksen lämpötila saattaa saavuttaa tuhkan sulamispisteen. Tällöin saavutetaan tasapainotila, jossa sula tuhka valuu pois ja uutta kerääntyy tilalle. Kuonaantumista ei tapahdu yleensä kiertoleijukattiloissa, koska polttolämpötila pysyy tuhkan sulamispisteen alapuolella. Kuonaantuminen on kuitenkin hyvä ymmärtää, koska usein kuonaantuminen ja likaantuminen esiintyvät usein yhdessä [14] [15] [16]

Kemikaalit, joita suihkutetaan tulipesään savukaasujen puhdistamiseksi ja low-NO_x polttotekniikat muuttavat korroosio- ja likaantumisongelmia. Likaantumiseen ja kuonaantumiseen vaikuttavat eniten ammoniakki, urea ja kalsiumpohjaiset kemikaalit. Kalsinoitu

injektiokalkki saattaa kovettua tulipesän tulistinpinnoille kovaksi kerrostumaksi hiilidioksidin tai rikkidioksidin kanssa reagoidessaan. Kiertoleijukattilan lämpötila on suotuisen muodostumiselle, koska kovettuminen on voimakkainta n. 800 °C asteen lämpötilassa. [6]

3.3.2 Likaantuminen

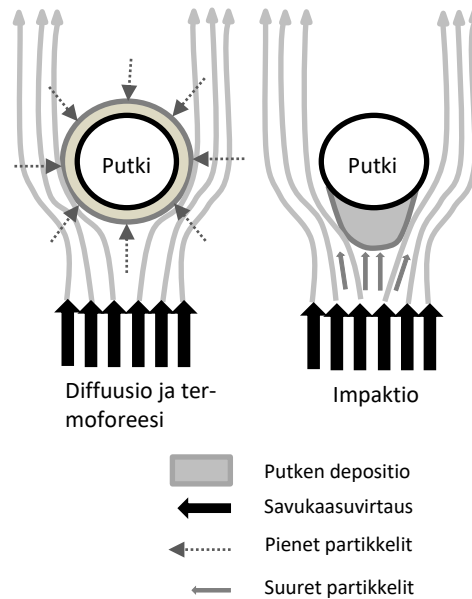
Likaantuminen (fouling), tapahtuu tulipesän jälkeisillä lämmönsiirtopinnoilla tai konvektiivisella lämmönsiirto alueella. Likaantumista aiheuttaa useimmiten polttoaineesta tulevat alkalimetallit, jotka reagoivat kemiallisesti lentotuhkan kanssa joko savukaasuvirtauksessa tai lämmönsiirtopinnoilla.

Likaantuminen alkaa yleensä sillä, että putken pinnalle syntyy ohut kalvo joko diffuusion avulla tai kaasusta kondensoitumalla. Ensimmäiset hiukkaset, jotka kiinnittyvät puhtaalle pinnalle ovat submikronipartikkelit, koska niiden nopeus on tarpeeksi pieni. Isommat partikkelit tarvitsevat kerrostuman, johon tarttua. Jos kerrostumaa ei ole, ne kimpoavat pois ja mahdollisesti irrottavat huonosti kiinnittyneitä partikkeleita. Kun putkien pinnoille syntyy kerrostuma, pinnalle voi alkaa kerääntymään sellaisiakin aineita, jotka eivät normaalisti puhtaalle pinnalle tarttuisi. Likaantumista tapahtuu alle 1000-1100°C lämpötiloissa ja se on huomattavasti hitaampi ilmiö kuin kuonaantuminen. Huomattavien tuhkakkerrostumien syntymiseen kuluu yleensä päiviä ja kertymät ovat yleensä kiinteässä muodossa. [11] [14] [21]

Savukaasujen lämpötila laskee kattilan konvektiolämmönsiirtimillä niin alas, etteivät tuhkakkerrostumat ole niin suuria, hyvin sidoksissa toisiinsa eivätkä vahvoja. Tämä on otettu huomioon kattiloita ja lämmönsiirtimiä suunnitellessa. Konvektiolämmönsiirtimiä on mahdollista suunnitella ja valmistaa siten, että putkien järjestystä ja etäisyyttä voidaan muuttaa tarpeen vaatiessa. [22]

Suurien hiukkasien ($> 5\mu\text{m}$ [11], $>10\mu\text{m}$ [17]) yleisin kiinnittymistapa on impaktio eli iskeytyminen. Hiukkaset kulkeutuvat savukaasuvirran mukana lämmönsiirtimen pinnalle ja kerääntyvät harjannemaiseksi kasaksi virran tulosuunnan puolelle (kuvan 9 oikea puoli). Impaktio johtuu kappaleen hitaudesta. Kun savukaasuvirtaus kiertää lämmönsiirtoputken, hiukkanen ei seuraa virtausta, vaan osuu putken pintaan. [11]

Pienet hiukkaset ($< 5\mu\text{m}$) kiinnittyvät melko tasaisesti putken ympäri. Ne eivät kiinnity impaktion avulla vaan kulkeutuvat savukaasuvirran pyörteiden mukana joka puolelle putkea ja kiinnittyvät diffuusion ja termoforeesin avulla (kuvan 9 vasen puoli). Merkittävin depositiomekanismi suurien depositioiden kerääntymisessä on monien eri lähteiden mukaan impaktio. [11] [17] [22] [23] [24]



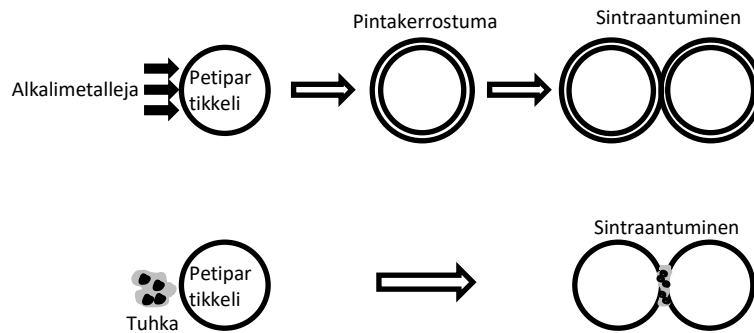
Kuva 9 *Depositiomekanismit* [5]

Termoforeesin laskeminen on haastavaa, koska kiinnittymisen aiheuttavan voima on niin pieni. Termoforeesista on tehty todella vähän tutkimuksia. Kleinhans et al. [21] kertoo työssään, että on tehty yksittäisen partikkelin käyttäytymiseen liittyviä tutkimuksia, joita voidaan soveltaa termoforeesin voiman laskemiseen. Laskemiseen tarvitaan partikkelin massa, jonka määrittämiseen tarvitaan partikkelin tarkka koko. [21]

Mikäli ammoniakkia syötetään savukaasujen puhdistamiseksi ylimäärin, osa ammoniakista ei reagoi typpioksidien kanssa, vaan kulkeutuu savukaasujen mukana. Niistä voi muodostua ammoniumsuoloja, joilla on suuri taipumus likaantumiseen ja korroosioon niiden matalan sulamislämpötilan takia. Erityisesti ammoniumvetysulfaatti, jolla on tahmea pinta, johon muut savukaasuhiukkaset tarttuvat helposti. [11]

3.3.3 Sintraantuminen

Partikkeleiden yhteen kiinnittymistä kutsutaan sintraantumiseksi. Leijupoltossa se ei ole niin suuri ongelma kuin esimerkiksi pölypoltossa vastaavalla polttoaineella, koska lämpötila ei nouse niin korkeaksi. Sintraantumista kuitenkin voi tapahtua leijupoltossa, koska biomassan poltossa vapautuu alkaleita ja tuhkaa. Leijutuspartikkeli voi reagoida kaasumaisten alkaleiden kanssa, jolloin partikkelin päälle syntyy pintakerros, joka voi kiinnittyä toisen partikkelin kanssa. Leijutuspartikkeli voi reagoida myös tuhkan kanssa, joka voi kiinnittää leijutuspartikkelit toisiinsa. [11] [22] [26]



Kuva 10 Sintraatumismekanismit [16]

Kiertoleijukattiloiden kerrostumaongelmat sijoittuvat lähinnä sykloniin ja syklonista lähtevään palautusputkeen. Likaantumismekanismeista pitää ottaa huomioon sulan muodostuminen, sintraantuminen sekä kemialliset reaktiot. Jos kuitenkin suuria kasautumia jää kattilan tulipesän puolelle, se voi aiheuttaa äkillisen alasajon ja pahimmillaan koko leijukerros voi agglomeroitua. Tällaista voi tapahtua joko pelkästään tuhkan aiheuttamana tai tuhkan ja leijutusmateriaalin reaktiona, esimerkiksi jos leijutusmateriaalina käytetään kvartsihiekkää ja poltetaan puuta ja biomassaa. Tällöin polttoaineen alkaliyhdisteet reagoivat kvartsihiekkan kanssa. [11]

3.3.4 Eroosiokorroosio

Eroosiokorroosio on nimensä mukaan yhdistelmä eroosiota ja korroosiota. Eroosiota tapahtuu kierto-leijukattiloissa etenkin leijutushiekan, mutta myös muiden hiukkasten vuoksi. Leijutushiekka voi tehdä lämmönsiirtopintojen pinnoitteisiin pieniä halkeamia, joista esimerkiksi kloridit pystyvät tunkeutumaan. Eroosiokorroosioon syntymiseen vaikuttaa lämpötila, koska metallien ominaisuudet muuttuvat lämpötilan muuttuessa. Lämpötilan noustessa tyypillisesti myös metallin eroosionkestävyys kasvaa, koska metallin sitkeys paranee. Maksimi eroosioresistanssi saavutetaan 400 °C tuntumassa, jota suuremmissa lämpötiloissa resistanssi heikkenee muiden ominaisuuksien tapaan. [27] [28]

Riippuen olosuhteista, eroosiokorroosio voi painottua joko eroosioon, korroosioon tai tasapainoisesti molempiin. Eroosioon painottunut ilmiö tapahtuu yleensä melko matalissa lämpötiloissa, jonka vuoksi korroosiota ei pääse tapahtumaan. Tasapainoisessa eroosiokorroosiossa eroosio ja korroosio kiihdyttää toisiaan. Materiaalia ei lähde suoraan eroosion vuoksi, vaan korroosion vuoksi. Korroosiopainotteisessa ilmiössä eroosio poistaa vain ulkokuoren korroosion aiheuttamasta metallikadosta, joka aiheuttaa odotettua nopeamman materiaalin kulumisen. Vallitsevien olosuhteiden pysyessä vakiona lämmönsiirtopinnoille voi kehittyä korroosiotuotteita, jota eroosio kuluttaa yhtä nopeasti kuin sitä syntyy, jolloin kerroksen paksuus ei muutu. Tämä voi kerroksen ominaisuudesta riippuen joko hidastaa tai nopeuttaa materiaalin kulumista. [27] [28]

Kattilassa on monenlaisia olosuhteista, jonka vuoksi siellä voi esiintyä kaikkia eroosio- ja korroosion muotoja. Etenkin kattilan seinäputket ja mahdolliset kattilan yläosassa olevat tulistinputket ovat suuren eroosio- ja korroosion vaikutuksen alla. [27] [28] [29]

3.4 Likaantumisen vaikutukset lämmönsiirtoon

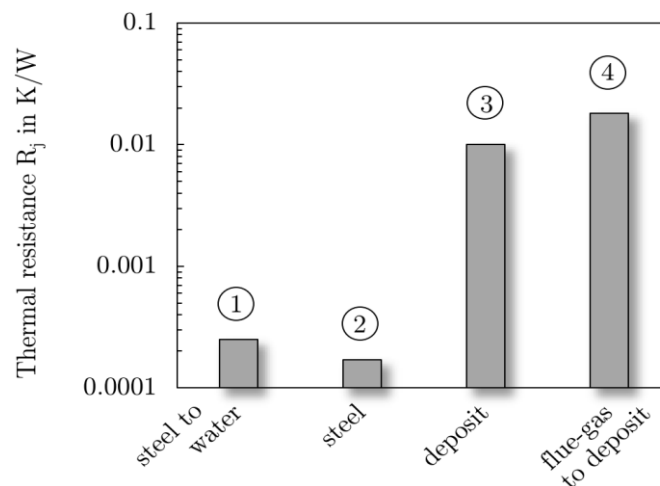
Lämmönsiirtopintoihin kertynyt lika huonontaa lämmönsiirtoa, jonka vuoksi myös kattilan teho ja hyötysuhde huononee. Lämmönsiirto voidaan laskea kaavalla

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{lm} = \dot{m}_{cold}c_{p,cold}(T_{out} - T_{in})_{cold}, \quad (1)$$

Lämmönsiirtimille kertyvä lika pienentää lämmönläpäisykerrointa U . Tällöin kokonaislämmönsiirto pienenee. Lämmönläpäisykerroin voidaan laskea kaavasta (1), mikäli tiedetään kylmän puolen massavirta ja kaikki sisään- ja ulosmeno lämpötilat. Tällöin voidaan laskea kaavalla 2, kuinka termien resistanssi r muuttuu kaavalla:

$$r = \frac{1}{U_{likaantunut}} - \frac{1}{U_{puhdas}}, \quad (2)$$

jossa U_{puhdas} on referenssi arvo lämmönläpäisykerroimelle. $U_{likaantunut}$ on laskettu arvo likaantuneesta lämmönsiirtimestä. Lian kertyminen kasvattaa myös putkien kokoa, jolloin niistä syntyy enemmän virtausvastusta, joka lisää alipainepumppujen energiankulutusta. [6] [30]



Kuva 11 Deposition vaikutus termiseen resistanssiin [21]

Kuva 11 näyttää, kuinka paljon depositio vaikuttaa termiseen resistanssiin. Pienin termien resistanssi on teräksestä veteen (kohta 1) ja teräksen läpi (kohta 2). Deposition läpi (kohta 3) ja savukaasusta deponitioon (kohta 4) resistanssi on lähes satakertainen aiemmin mainittuihin verrattuna. [21]

Nguyen et al. [31] keräsi teoksessaan useammasta tutkimuksesta tuloksia lämmönsiirtimen pinnalla olevan lian vaikutuksesta lämmönsiirtoon. Yhdessä tutkimuksessa 1–1,5mm kerros kasvatti polttoaineen kulutusta 3–8%. Toisessa tutkimuksessa 0,8mm kerros huononsi lämmönsiirtoa 9,5% ja 4,5 mm kerros vähensi jopa 69 % lämmönsiirtoa. [32] [33]

4. LIKAANTUMISEN JA KUONAANTUMISEN HALLINTA KIERTOLEIJUKATTILOISSA

Likaantumista ja kuonaantumista voidaan vähentää ennakoivasti, esimerkiksi putkien pinnoituksella. Varsinkin huonoja polttoaineita poltettaessa ei voida kuitenkaan estää kerrostumien muodostumista ja niitä joudutaan poistamaan erilaisilla tekniikoilla. Sopivan yhdistelmän löytäminen erittäin tärkeää mahdollisimman hyvän hyötysuhteen saavuttamiseksi.

4.1 Likaantumisen ja kuonaantumisen ennaltaehkäisy

Likaantumisen ja kuonaantumisen ennaltaehkäisyksi on kehitetty erilaisia tekniikoita, joiden avulla pystytään vähentämään kerrostumien syntyä. Seuraavaksi esittelen näistä yleisimmin käytettyjä.

4.1.1 Lämpötilan säätö

Leijupoltossa on huomattavasti matalampi lämpötila kuin esimerkiksi pölypoltossa. Tämä vähentää sulanfaasin muodostumista tuhkapartikkeleista, mikä on kiertoileijukattilan etu. Lämpötila vaikuttaa paljon muun muassa raskasmetallien aiheuttamaan korroosioon. Frandsen kertoo teoksessaan [34], että Tanskassa biopolttokattilassa 450 °C olevissa tulistinputkissa ei ollut havaittavissa kuin pientä korroosiota. Kun lämpötila nostettiin 520 °C, alkoi ilmaantua huomattavasti kloridin aiheuttamaa vahvasti lämpötilasta riippuvaa korroosiota. [11]

Lämpötilan laskemisessa on ongelmana se, että se vaikuttaa suoraan höyrynlämpötilaan ja siten kattilan hyötysuhteeseen ja tuotettuun energian määrään. Nykyään pyritään jatkuvasti parantamaan voimalaitoksien hyötysuhdetta, joka vaikeuttaa likaantumisen ja korroosion vähentämistä. [35]

4.1.2 Putken pinnoitus ja sijoitus

Putken pinnoitus ja sijoitus vaikuttavat likaantumistaipumukseen. Perinteinen tapa suojata metallia korroosiolta on tiivis metallioksidikerros metalliseoksen pinnalla. Tyypillisiä aineita korroosiokestävyyden parantamisessa ovat alumiini, pii, molybdeeni ja kromi. Se, että mitä seosta käytetään, riippuu lämpötiloista ja olosuhteista kattilassa. Kiertoleijukattilassa voidaan esimerkiksi käyttää kromin ja teräksen seosta, joka muodostaa putken pintaan kromioksidikerroksen, jonka ionijohtavuus on hyvin heikko. Kromi taas ei käy sellaisiin kattiloihin, joissa se altistuu yli 1000 °C lämpötilalle, koska kromi alkaa

höyrystyä. Sitä on yleensä käytettävä yli 20% pitoisuutena, jotta tarvittava suojaus saavutetaan. Piitä yksinään ei voida käyttää tarvittavan suojan saavuttamiseksi. [6] [19] [36]

Enestam kertoi pitämässään esityksessä Tampereen teknillisen yliopiston energiaseminaarissa [19], tulistinputkien suunnittelun vaikutuksen putkien elinikään. Kuvassa 12 vasemmassa reunassa olevalla *single tube design*-menetelmällä valmistetulla tulistinputkipaketilla on käyttöikä alle vuosi ja kuvan oikeassa reunassa olevalla *double tube design*-menetelmällä valmistetulla tulistinputkipaketilla on käyttöikä yli kolme vuotta. Jälkimmäisessä menetelmässä pyritään vähentämään korrosoivien kloridien osumista lämmönsiirtopinnoille. [19]



Kuva 12 *Single tube ja double tube design* [19]

Tulistinputkipaketit ovat erittäin kalliita investointeja. Enestam kertoi esityksessään, että vaikka putkien parempi materiaali voi maksaa kymmenkertaisesti enemmän kuin halvin vaihtoehto, on silti järkevämpää ottaa parempi, koska paremman materiaalin ominaisuudet tekevät siitä paljon pitkäikäisemmän. Pitkäikäisyyteen vaikuttaa muun muassa materiaalin pinnoitus, joka vaikuttaa paljon materiaalin korrosoituvuuteen. [19]

4.1.3 Polttoilman määrä

Teoreettisesti, kun ilmakerroin on 1, kaikki ilman happi kuluu reaktiossa, eikä sitä ei kulkeudu savukaasujen mukana pois. Käytännössä täydellistä palamista ei kuitenkaan voida saavuttaa teoreettisella ilmamäärällä vaan ilmaa lisätään sitä enemmän. Ilmakerroin pidetään yleensä siinä paikkeilla, jossa hapen osapaine on 1-10%, esimerkiksi 1,2. Jos ilmakerroin on alle yhden, hapen osapaine tippuu huomattavasti ja aiheuttaa pelkistäviä olosuhteita. [11]

4.1.4 Polttoaineiden vaikutus

Polttoaineen koostumus vaikuttaa sen likaantumis- ja kuonaantumistaipumukseen. Niin kuin edellä mainittiin, hiili on poltto-ominaisuuksiltaan hyvä ja helppo polttoaine. Siinä on vähän likaantumista ja kuonaantumista aiheuttavia komponentteja ja sillä on korkea

lämpöarvo, mutta sillä on korkea rikkipitoisuus, se on fossiilinen polttoaine ja sen käyttöä tulisi vähentää. [8] [37]

Hiilen osuutta voidaan pienentää seospolttamalla biomassaa, mutta sen polttaminen ei ole niin helppoa kuin hiilen. Biomassan poltto vaatii tarkempaa suunnittelua kattilalle, koska se sisältää likaa ja kuonaantumista aiheuttavia komponentteja. Vastaavasti, jos poltetaan jätettä tai huonolaatuista biomassaa, voidaan lisätä hiiltä sekaan, jotta likaantuminen vähentyisi. Lisää polttoaineiden ominaisuuksista luvussa 2.3. [8]

Tamminen [15] tutki diplomityössään muun muassa eri polttoaineiden vaikutusta depositioiden muodostumisnopeuteen. Tutkimuksessa huomattiin, että depositioiden muodostuminen seospoltossa ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteistä. Tutkimuksessa korvattiin huonolaatuinen polttoaine hiilellä, jonka ajateltiin hidastavan likaantumista, mutta toisin kuin ajateltiin, se nopeuttikin sitä.

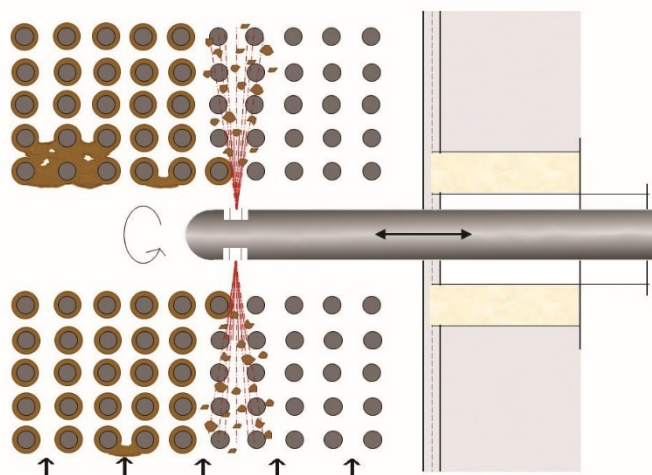
4.2 Lämmönsiirtopintojen puhdistustekniikat

Zbogar et al. kertoo työssään, että depositioiden syntymistä ja niihin liittyviä tekijöitä on tutkittu jo vuosia, mutta niiden poistoon liittyvät tiedot ovat vielä melko rajoittuneet. Useimmat avoimista tietolähteistä liittyvät soodakattilan lian poistoon, joka on hyvin erilaista kuin esimerkiksi biomassan poltossa syntyvien depositioiden poisto. Seuraavana käsittelem depositioiden poistotekniikoita. [5]

4.2.1 Höyry- ja ilmanuohous

Nuohouksessa poistetaan likaa tulistinputkien pinnoilta höyryn tai ilman avulla. Höyrynuohouksen toiminta perustuu mekaaniseen ja termiseen kuormitukseen, joka suunnataan suoraan putkien pintoihin. Kun mekaaninen ja terminen kuormitus ylittää deposition vahvuuden, depositio irtaana. Höyrynuohous poistaa paremmin juuri kiinnijäänyttä likaa kuin sintraantunutta ja jämähtänyttä likaa. Joissakin tapauksissa depositiot poistetaan välittömästi niiden kiinnijäämisen jälkeen, jolloin lika lähtee parhaiten ja putki jää puhtaaksi. Jos tulistinputkia ei puhdisteta heti, niihin voi jäädä pieni kerros, johon partikkelit tarttuvat huomattavasti helpommin. Se, että käytetäänkö ilmaa vai höyryä, riippuu siitä, minkälaista depositiota yritetään poistaa. [5] [15]

Käytettäessä kylläistä höyryä, höyrysuihkussa voi tiivistyä vesipisaroita. Vesipisarot osuvat deposition ja aiheuttavat eroosiota. Jos nuohouksessa käytettävän aineen ja deposition lämpötilaero on suuri, voi depositio myös pienentyä huomattavasti. [5]



Kuva 13 Höyrynuohoimen periaatekuva [50]

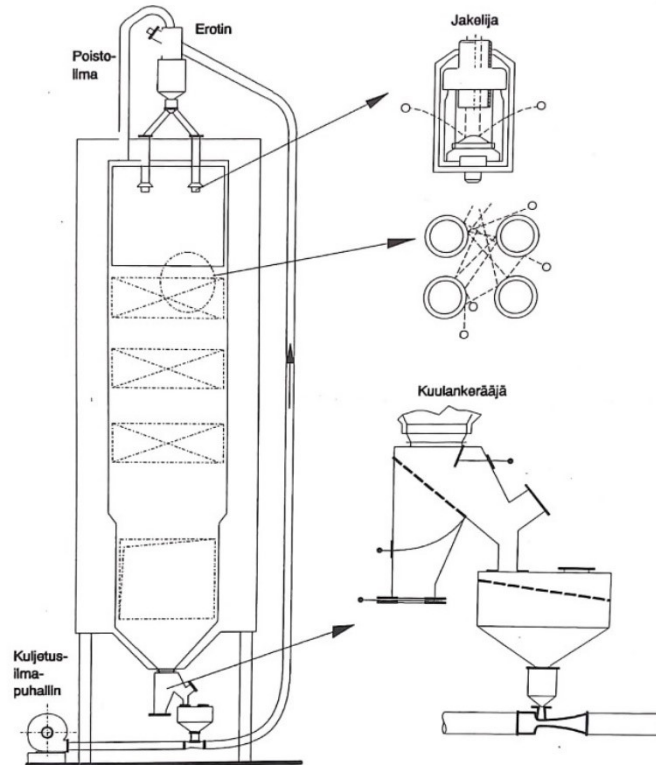
Nuohoimet voivat olla ulosvedettäviä tai koko ajan kattilan sisällä pidettäviä. Kuvassa 13 on ulosvedettävä höyrynuohoin, joka työnnetään tulistinpakettien väliin vain käytön ajaksi ja pyöritetään, jolloin suihku osuu laajalle alalle. Ulosvedettäviä käytetään silloin, kun lämpötila on niin korkea, että nuohoimen materiaali ei kestäisi, jos se olisi koko ajan sisällä. Pitkiä ulosvedettäviä nuohoimia suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon nuohoimen taipuminen. Höyrynuohoimia voidaan pitää kattilan sisällä koko ajan, mikäli savukaasun lämpötila pysyy alle 800°C. Ne ovat tällöin tuettuna esimerkiksi tulistinpaketteihin ja laakeroituna savusolaan. [6]

Ekonomaisereiden puhdistukseen voidaan käyttää haravanuohointa, joka soveltuu hyvin rivoitettuun lämmönsiirtimeen. Haravanuohoimessa on joitakin poikkisuuntaisia putkia, joissa on jokaisen ekonomaiserin putkiraon kohdalla suutin. Käytännössä on kuitenkin todettu, että normaali ulosvedettävä höyrynuohoin on toiminut paremmin ekonomaiserin puhdistuksessa kuin haravanuohoin. [6]

Ilmanuohoimessa käytetään ilmaa höyryn sijasta. Ilma ei ole niin tehokas irrottamaan likaa kuin höyry, joten se vaatii pitemmän puhallusjakson kuin höyry vastaavassa tilanteessa. Ilmanuohous ei aiheuta lämpösokkeja putkistöihin ja rakennettava putkilinja on edullinen, mutta paine ei ole muunneltavissa toisin kuin höyrynuohouksessa. [6]

4.2.2 Kuulanuohous

Kuulanuohouksessa puhdistetaan helposti irtoavaa likaa vaakasuorilta tulistinpinnoilta pienten kuulien avulla. Kuulat tiputetaan tulistimien päälle ja osuessaan ne irrottavat likaa mekaanisesti. [6]



Kuva 14 Kuulanuohouksen periaatekuva [6]

Kuva 13 havainnollistaa kuulanuohouksen periaatetta. Kun kuulat ovat tippuneet alas, ne menevät kuulankerääjään, josta ne palautetaan takaisin ylös putkea pitkin paineilmalla. Ylhäällä kuulat erotetaan ilmavirrasta erottimen avulla, josta ne valuvat putkia pitkin jakelijoihin. Siellä kuulat törmäävät jakelijan kuperaan kimmokekappaleeseen, josta ne leviävät tasaisesti ympäri kattilaa. Paineilman tilalla voidaan käyttää myös kola- tai magneettikuljettimia. [6]

Kuulat voivat olla valurautaa, terästä tai alumiinia. Materiaalin valinta riippuu lian määrästä ja laadusta. Ei kannata käyttää liian kovaa materiaalia, mikäli lika on helposti irtoavaa, koska kuulat kuluttavat tällöin tulistinpintoja. Edellä mainituista materiaaleista alumiini on kaikkein pehmeintä eli vähiten kuluttavaa. [6]

4.2.3 Ääniaaltopuhdistus

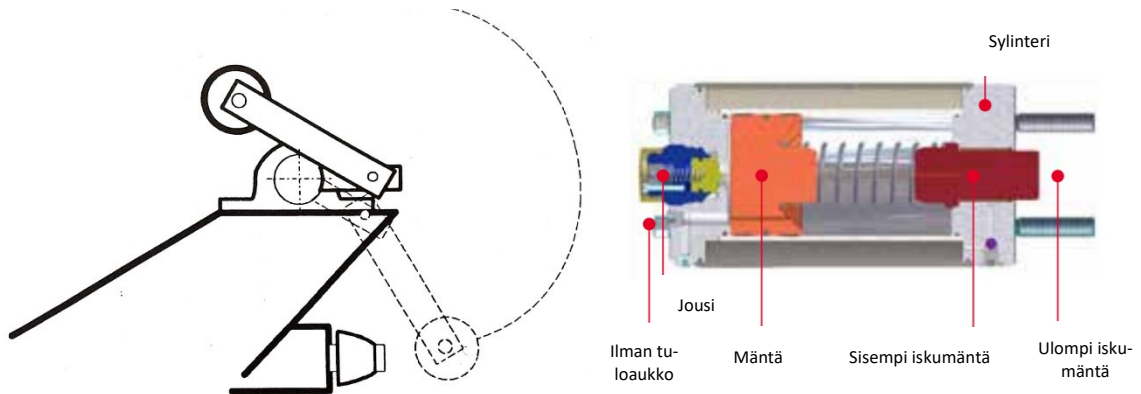
Ääniaaltopuhdistuksen periaatteena on puhdistaa lämmönsiirtopintoja korkeaintensiteetisellä ja matalataajuisella infraäänellä tai kuuluvalla äänellä. Ääniaallon energia saa de-

position irtoamaan ja lähtemään savukaasuvirran mukana ennen kuin se tarttuu ja jäähdyttää kiinni. Oikeiden ominaisuuksien löytyminen riippuu hyvin paljon siitä, millainen on deposition koostumus. Suunnitteluvaiheessa on lähes mahdotonta määrittää, kuinka puhdistus toimii. Useimmin tehokkuus pystytään määrittämään vasta mittaustuloksista, kun laitteet ovat asennettu. Melutaso voi olla kattilan sisällä 150 dB, jonka vuoksi äänilähde on äänieristettävä. [6] [38]

Ääniaaltopuhdistuksen etuina ovat halvat käyttö- huoltokustannukset sekä se, ettei puhdistuksessa synny haitallisia kaasuja prosessiin. Haittana se ettei, pystytä puhdistamaan vaikeasti irtoavaa likaa. [6]

4.2.4 Ravistuslaitteet

Ravistimia voi olla mekaanisia ja pneumaattisia. Mekaanisten ravistimien toimintaperiaatteena on aiheuttaa mahdollisimman suuri kiihtyvyys pienellä amplitudilla, tällöin putkiin ei kohdistu suuria mekaanisia rasituksia. Ravistin voi olla esimerkiksi iskuvasara, jonka liike-energia siirtyy puhdistettavaan lämmönsiirtoputkeen. Vasarat voivat olla esimerkiksi 6-14 kg. Kun ravistin heilauttaa putkea nopeasti, lika irtoaa hitaudensa vuoksi. Mekaanista ravistinta käytetään erittäin likaisissa olosuhteissa, sen investointi- ja käyttökustannukset ovat halpoja, mutta se on kovaääninen ja vaatii jatkuvaa huoltoa. [6] [39]



Kuva 15 Mekaaninen ja pneumaattinen ravistin [6] [40]

Pneumaattinen ravistin toimii paineilman avulla. Paineilmaa syötetään sisään ilman tuloaukosta, jolloin paine kasvaa ja jousi avaa venttiilin. Männän vauhti kiihtyy ja sen liike-energia muutetaan iskumäntien kautta värinäksi lämmönsiirtopintoihin. [40]

4.2.5 Räjätyspuhdistus

Räjätyspuhdistus eli ”bang & clean” -puhdistus on sveitsiläisen Bang and Clean Technologies AG:n kehittämä puhdistusmenetelmä, jossa käytetään etaanin ja hapen yhdistettä luomaan paineaalto räjähdysten avulla, joka irrottaa epäpuhtauksia. Se eroaa edellisistä

puhdistustekniikoista siten, että se ei ole kiinteästi asennettava laite vaan puhdistus tehdään erikseen käsin. [41]

Räjätyspuhdistuksessa työnnetään 110 tai 200 litran pussi puhdistettavan kohteen luo, jolloin se täytetään kaasuseoksella kaksiputkisen varren kautta, ja räjäytetään kipinän avulla. Ilmatiivis pussi on tehty muovista ja se on päällystetty kolmella kerroksella paperia. Varsi on enimmillään 10 metriä pitkä ja se on kattilan sisällä 10 – 15 sekuntia. Sitä jäähdytetään paineilman ja veden avulla ylikuumentumisen estämiseksi. [41]

Huolto ja puhdistusseisokit ovat kalliita. Niiden kestoja pyritään vähentämään ja välejä pidentämään. Räjätyspuhdistuksen etuna on se, että se voidaan tehdä käynnin aikana. Alle 100 MW kattiloihin tarvitaan noin 100-200 räjäytystä. Suurempiin kattiloihin kuten soodakattiloihin voi mennä 200-600 räjäytystä. Työ kestää kahdesta kuuteen päivään, jonka ajan kattilaa voidaan ajaa. Käynninaikainen puhdistus lyhentää myös luonnollisesti seisokissa tarvittavan puhdistamisen aikaa. Menetelmä on patentoitu vuonna 2000 ja ollut käytössä kaupallisesti vuodesta 2001. Pohjoismaissa Delete Group omistaa siihen yksinoikeuden. [41]

4.2.6 Vesipesu

Kattiloita pestään myös vedellä ruiskuttamalla. Etenkin seisokkien aikaan pyritään saamaan lämmönsiirtopinnat puhtaaksi, kun ne ovat vielä lämpimiä, jotta lika irtoaa paremmin. Pesun jälkeen lämmönsiirtopinnat kuivataan syöpymisen välttämiseksi. Vettä käytetään vaikeasti sintraantuneen deposition ja kuonan poistoon. Veden käytössä syntyy paineaalto, koska vesi höyrystyy ja laajenee voimakkaasti osuessaan kuumalle lämmönsiirtopinnalle. Veden ja lämmönsiirtopinnan suuren lämpötilaeron vuoksi vedellä pesu käynnin aikana voi aiheuttaa metallin oksidikerroksen halkeamisen, jolloin se altistuu korroosiolle. Käynnin aikana vesi voidaan syöttää höyrynuohoimien kautta. [5] [6]

4.2.7 Puhdistustekniikoiden edut ja haitat

Tässä luvussa olevassa taulukossa on yhteen kerättyinä aikaisemmin käsiteltyjen puhdistustekniikoiden edut ja haitat.

Taulukko 1 Puhdistustekniikoiden edut ja haitat [5] [6] [15] [38] [39] [41]

Höyrynuohous	
Edut	Haitat
Höyry omasta kattilasta Puhalluspaine säädettävissä Lyhyt puhallusjakso	Veden tarve kasvaa Rikkihapon mahdollisuus Vaatii paljon huoltoa Vaatii putkieristykseen Voi aiheuttaa paineenvaihtelua Voi aiheuttaa lämpösokkeja

Ilmanuohous	
Edut	Haitat
Halvat huoltokustannukset Putkilinja edullinen Lämpöliikkeitä ei tarvitse Johtojen vesityksiä ei tarvitse Ei lämpösokkeja	Vaatii kalliin kompressorilaitoksen Kompressorin omakäyttöteho Pitkä puhallusjakso Paine vakio Tuhkapitoisten pintojen tulipalovaara

Ääniaaltopuhdistus	
Edut	Haitat
Pienet käyttö- ja huoltokustannukset Ei synny haitallisia kaasuja prosessiin	Irrottaa vain helposti irtoavaa likaa Vaikea suunnitella toimivaksi Vaatii äänieristyksen

Kuulanuohous	
Edut	Haitat
Pienet investointi- ja käyttökustannukset Ei korroosiovaaraa kylmässä päässä	Kuulat tukkivat ahtaita välejä Lämpöpinnat kuluvat Vaatii laitetilan kattilahuoneessa Ei sovi ylipaine kattiloihin

Ravistuslaitteet	
Edut	Haitat
Voidaan säätää lian mukaan Pienet investointi- ja käyttökustannukset Ei korroosiovaaraa kylmässä päässä	Kovaääninen Jatkuva huollontarve

Räjätyspuhdistus	
Edut	Haitat
Lyhentää seisokissa tehtävää puhdistusta Ei tuotantokatkoksia Hyvä puhdistustulos	Puhdistus voi kestää useita päiviä

Vesipesu	
Edut	Haitat
Pystytään puhdistamaan kokonaan	Yleensä seisokissa tehtävä Käynnin aikana tehtynä korroosiovaara Täytyy kuivata pesun jälkeen Voi viedä paljon aikaa

5. TULEVAISUUS

Kiertoleijukattiloiden tulevaisuutta pohdittaessa voidaan kiinnittää huomio niin polttoaineisiin kuin puhdistusmenetelmiin. Peltier [2] toteaa artikkelissaan, että Pohjois-Amerikassa hiilen osuus energiantuotannossa on vähenemässä, mutta kansainvälisesti suunta on toinen. Maailmassa oli vuonna 2016 suunnitteilla 1200 uutta hiilivoimalaa. Kiinassa valmistui keskimäärin kaksi 600 MW hiilivoimalaa viikossa vuodesta 2005 vuoteen 2011, mutta nyt vauhti on hidastunut 1 GW viikossa. Nyt suunnitteilla olevista kattiloista kasvava osuus on kiertoleijukattiloita. [2]

Kiertoleijukattiloiden trendinä on nykyään yksikkökojojen kasvaminen ja seospolton mahdollisuus. Kiertoleijukattiloissa voidaan nykyään saavuttaa yhtä suuri hyötysuhde kuin pölypolttokattiloilla riippuen polttoaineesta, joten on tulevaisuutta ajatellen järkevämpää rakentaa kiertoleijukattiloita niiden monikäyttöisyyden vuoksi. Yli 150 hiilivoimalassa on korvattu osa hiilestä biopolttoaineilla tai jätteillä. [2] [37]

Tällä hetkellä suurin kiertoleijukattilalaitos on kooltaan 2200 MW ja se on Koreassa. Laitos on Sumitomo SHI FW:n suunnittelema ja se koostuu neljästä 550 MW yksiköstä. Laitoksessa voidaan polttaa 5 prosenttia biomassaa ja huonolaatuista hiiltä. Puolassa on maailman suurin biomassaa kiertoleijukattila. Tässä 205 MW voimalassa poltetaan puubiomassaa maaviljelyjätettä ja sivutuotteita. [2] [42]

Ilmastonmuutos ajaa fossiilisten polttoaineiden vähentämiseen. Maailmassa tuotetaan suurin osa energiasta tällä hetkellä öljyllä, hiilellä ja maakaasulla, joiden on arvioitu loppuvan 40-50 vuoden päästä. Suurimpana syynä fossiilisten polttoaineiden vähentämiseen on ilmaston kärsiminen. Kiertoleijukattiloiden tulevaisuuteen vaikuttaa se, että kuinka fossiilisten polttoaineiden markkinat muuttuvat ja minkälaisia poliittisia päätöksiä tullaan tekemään. Etenkin Pohjoismaissa on asetettu suuria tavoitteita biomassaa lisäämiselle. Ruotsissa on asetettu vuodelle 2020 tavoitteeksi tuottaa 40 prosenttia primäärienergiastaan biomassalla. Khan [10] pohtii työssään, että energian ja etenkin sähkön tuotto pelkästään biomassalla on vaikea kuvitella. [43]

Kattilalaitoksia tarvitaan vielä pitkään, vaikka uusiutuvat energianlähteet, kuten tuuli-voima, ovat lisääntyneet todella paljon. Vaikka tuuli-voimaa rakennettaisiin niin paljon, että se kattaisi Suomen sähkön kulutuksen, tulee päiviä, jolloin ei tuule ja tarvitaan energiaa. Uskon, että kiertoleijukattiloissa tullaan tulevaisuudessa polttamaan enemmän biopolttoaineita ja jätettä, koska on tarve vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä.

Tällä hetkellä keskustelua herättää metsien hiilinielujen kasvattaminen ilmastonmuutoksen hidastamiseksi. Äänekosken uusi biotuotetehdas kuluttaa 6,5 miljoonaa kuutiometriä

puuta vuodessa [44] ja Kuopioon on suunnitteilla maailman suurin havusellutehdas, jonka puun kulutus tulisi olemaan 6,7 miljoonaa kuutiometriä vuodessa[45]. Tutkimukset hiilinielujen tulevaisuudesta ovat paljon toisistaan poikkeavia. Suurimmillaan erot vastaavat lähes koko Suomen nykyisiä polttoaineiden päästöjä [46]. Biopolttoaineiden lisäys ja hiilinielujen kasvattaminen ovat ristiriidassa toistensa kanssa, etenkin varmojen tutkimustuloksien puuttuessa. Puun kulutus kestävästi on todella tärkeää, koska metsät eivät uusiudu nopeasti.

Polttoaineiden laatu ei pitäisi ainakaan parantua, koska jatkuvasti poltetaan huonomman laatuista polttoainetta kuten jätettä. Tämän vuoksi puhdistusmenetelmien on kehityttävä siinä missä polttoaineiden laatu huononee. Puhdistusmenetelmät menevät koko ajan älykkäämpään suuntaan, muun muassa älykkäät höyrynuohous järjestelmät puhdistavat tulitinpintoja vain silloin kun on tarpeen, mikä vähentää eroosiovaikutusta putkistoissa. Valmet on toimittanut älykkäitä soodakattiloihin sulaa lipeää puhdistavia robotteja vuodesta 2008. Robotit parantavat turvallisuutta, säästävät energiaa ja raaka-aineita ja tarjoavat optimaalisen puhdistuksen. [47]

Pienimmätkin parannukset hyötysuhteessa vaikuttavat pitkällä aikavälillä polttoaineen kulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin. Uusia paremmilla ominaisuuksilla olevia pinnoitteita tulee todennäköisesti vielä löytymään. Eräässä tutkimuksessa [31] huomattiin, että keraamiseen pinnoitteeseen tarttui huomattavasti vähemmän likaa ja sen lämmönsiirto-kerroin parani korkeissa lämpötiloissa.

Kattilat ja niiden komponentit ovat pitkän ajan investointeja. Jos ei ole varmaa tietoa esimerkiksi uudesta älykkäästä puhdistusjärjestelmästä, on helpompi ratkaisu usein ottaa tuttu ja turvallinen vaihtoehto, vaikka se olisikin huonompi. Tämä saattaa hidastaa uusien tekniikoiden kehittymistä ja leviämistä.

IIoT (teollinen internet) on tällä hetkellä kovassa nosteessa. IIoT:ssa on periaatteena se, että prosessista kerätty tieto kytketään internetiin. Internetin välityksellä tietoa voidaan analysoida älykkäästi ja laitteet voidaan ohjelmoida kommunikoimaan keskenään. Kun tätä teknologiaa käytetään puhdistustekniikoihin ja polttoteknisiin säätöihin, voidaan parantaa puhdistustekniikoiden tehokkuutta ja laitoksen kokonaishyötysuhdetta. Tiedon ollessa kytkettynä internetiin on kuitenkin aina olemassa tietoturvariski. Tuoreessa tutkimuksessa [48] tuli ilmi, että yrityksissä olevista IIoT laitteista 32% oli yhdistettynä suoraan internetiin ohittaen perinteiset turvallisuustasot. Samassa tutkimuksessa huomattiin myös, että yrityksissä yleensä tunnustetaan, mikä on haavoittuvaisin osa heidän verkoissaan, mutta on epäselvää mitä kaikkea tietoa sitä kautta kulkee. Energian tuotanto on välttämätön osa nyky-yhteiskuntaa, joten tietoturvan pitäisi olla tärkein asia, jos tiedot kulkevat internetin kautta.

6. YHTEENVETO

Kiertoleijukattiloita suunnitellaan ja rakennetaan lisää jatkuvasti. Ilmastomuutoksen vuoksi fossiilisia polttoaineita pyritään korvaamaan esimerkiksi biopolttoaineilla. Biopolttoaineet eivät ole poltto-ominaisuuksiltaan niin hyviä kuin hiili, minkä vuoksi niiden polttoon tarkoitettuja kattiloita täytyy suunnitella käytettävälle polttoaineelle sopivaksi.

Kuonaantumista ei tapahdu juurikaan kiertoleijukattilassa, koska lämpötila on sen verran matala, että tuhka ei pääse sulamaan. Likaantumista tapahtuu tulistinpinnoilla varsinkin, jos polttoaine sisältää likaantumista aiheuttavia komponentteja, esimerkiksi alkalimetalleja, joilla on matala sulamislämpötila. Lämmönsiirtimille kertyvä lika aiheuttaa ongelmia etenkin silloin, kun depositio on sulassa faasissa, jolloin korrosio kiihtyy huomattavasti kuluttaen metallipintaa. Tulipesässä olevat paikalliset pelkistävät olosuhteet voivat myös aiheuttaa suurissa määrin korrosiota varsinkin, jos niiden yhteydessä esiintyy korrosiota kiihdyttäviä komponentteja.

Depositoiden muodostumista voidaan ehkäistä jo ennen kuin ne syntyvät. Poltto-olosuhteiden muokkaamisella, lämmönsiirtimien materiaalilla ja sijoituksella sekä seospoltolla voidaan vaikuttaa depositoiden muodostumiseen. Parempi vaihtoehto on aina kalliimpi, mutta yleensä se maksaa itsensä myös takaisin saadun hyödyn vuoksi.

Depositioita voidaan poistaa monin eri tavoin. Yleisimmät ovat höyrynuohous, ääniaaltopuhdistus, räjäytyspuhdistus ja mekaaniset ravistimet. Kattiloissa on niin suuria eroja, että ei voida yksilöidä mikä on paras puhdistustapa. Kaikilla puhdistustekniikat soveltuvat johonkin parhaiten. Etuina voidaan katsoa, pienet investointi- ja käyttökustannukset, hyvä puhdistustulos, säädön mahdollisuus ja että puhdistus voidaan tehdä tuotannon ollessa käynnissä.

Biopolttoaineiden osuuden lisääminen ja poltto-olosuhteiden huononeminen vaatii kehitystyötä likaantumisen ja kuonaantumisen hallinnassa, jotta voidaan tuottaa sama määrä energiaa kuin fossiilisilla polttoaineilla ilman tuotantokatkoksia. Puhdistusjärjestelmät ovat menossa älykkäämpään ja tehokkaampaan suuntaan, koska pintoja ei tule puhdistaa turhaan eroosiovaikutuksen vuoksi.

LÄHTEET

- [1] M. Pantsar ja J. Peljo, ”Komissio perää ilmatoratkaisuja, jotka ovat Suomen vahvuuksia”. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/blogit/komissio-peraa-ilmatoratkaisuja-jotka-ovat-suomen-vahvuuksia/>. [Viitattu: 07-helmi-2019].
- [2] R. Peltier, ”Advanced CFB Technology Gains Global Market Share”, 2016. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.powermag.com/advanced-cfb-technology-gains-global-market-share/?pagenum=1>. [Viitattu: 21-tammi-2019].
- [3] P. Basu, *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*, 1. p. Baton Rouge: CRC Press, 2006.
- [4] S. Virtanen, ”Lika väärässä paikassa maksaa suomalaiselle teollisuudelle vuosittain jopa 500 miljoonaa”, 2015. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/2015-05-12/Lika-väärässä-paikassa-maksaa-suomalaiselle-teollisuudelle-vuosittain-jopa-500-miljoonaa-3260549.html>. [Viitattu: 14-tammi-2019].
- [5] A. Zbogor, F. Frandsen, P. A. Jensen, ja P. Glarborg, ”Shedding of ash deposits”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vsk. 35, nro 1. ss. 31–56, 2009.
- [6] M. Huhtinen, *Höyrykattilatekniikka*. Helsinki: Oy Edita Ab, 1994.
- [7] P. A. Rinkinen, ”Development and Implementation of Criticality Analysis Tool for Spare Parts of Fluidized Bed Boiler”, 2017.
- [8] J. Koornneef, M. Junginger, ja A. Faaij, ”Development of fluidized bed combustion—An overview of trends, performance and cost”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vsk. 33, nro 1, ss. 19–55, 2007.
- [9] M. Turunen, ”Sumitomo osti Amec Foster Wheelerin voimalatuotannon”, *Savon Sanomat*, Kuopio, 02-maalisku-2017.
- [10] A. A. Khan, W. de Jong, P. J. Jansens, ja H. Spliethoff, ”Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies”, *Fuel Process. Technol.*, vsk. 90, nro 1, ss. 21–50, 2009.
- [11] R. Raiko, *Poltto ja palaminen*. Helsinki: Teknillisten tieteiden akatemia, 1995.
- [12] E. B. Woodruff, H. B. Lammers, ja T. F. Lammers, *Steam plant operation*, 9th p. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [13] J. Hämäläinen, ”Fluidized bed combustion in praxis”, 2004.
- [14] R. W. Bryers, ”Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vsk. 22, nro 1, ss. 29–120, 1996.

- [15] J. Tamminen, "Heat Transfer Based Fouling Examination in Fluidized Bed Boilers", 2017.
- [16] H. Spliethoff, *Power Generation from Solid Fuels*, 1. Aufl.; Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [17] M. Zevenhoven-Onderwater, "Ash-forming matter in biomass fuels", 2001.
- [18] P. J. Tunturi ja P. J. Tunturi, *Korroosiokäsikirja*. Hki: Suomen korroosioyhdistys, 1988.
- [19] S. Enestam, "Biomass combustion and boiler corrosion: State of art knowledge and solutions". 2018.
- [20] K. Salmenoja, *Field and laboratory studies on chlorine-induced superheater corrosion in boilers fired with biofuels*. Åbo: Åbo Akademi, 2000.
- [21] U. Kleinhans, C. Wieland, F. J. Frandsen, ja H. Spliethoff, "Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vsk. 68, ss. 65–168, 2018.
- [22] A. F. Stam, W. R. Livingston, M. F. G. Cremers, ja G. Brem, *Review of models and tools for slagging and fouling prediction for biomass co-combustion*. University of Twente, Netherlands, 2009.
- [23] L. Baxter, *Ash Deposit Formation and Deposit Properties. A Comprehensive Summary of Research Conducted at Sandia's Combustion Research Facility*. 2000.
- [24] S. K. Kær, L. A. Rosendahl, ja L. L. Baxter, "Towards a CFD-based mechanistic deposit formation model for straw-fired boilers", *Fuel*, vsk. 85, nro 5. ss. 833–848, 2006.
- [25] C. Mueller *ym.*, "Deposition behaviour of molten alkali-rich fly ashes—development of a submodel for CFD applications", *Proceedings of the Combustion Institute*, vsk. 30, nro 2. ss. 2991–2998, 2005.
- [26] H. J. Visser, S. C. Van Lith, ja J. H. Kiel, "Biomass Ash-Bed Material Interactions Leading to Agglomeration in FBC", s. 6, 2008.
- [27] M. Uusitalo, "High temperature corrosion and erosion-corrosion of coatings in chlorine-containing environments", 2003.
- [28] A. V Levy, "The erosion-corrosion of tubing steels in combustion boiler environments", *Corros. Sci.*, vsk. 35, nro 5, ss. 1035–1043, 1993.
- [29] M. Uusitalo, P. Vuoristo, J. Knuutila, ja T. Mäntylä, *Pinnoitteet kattilalaitoksissa*, vsk. 18/1998; 1. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1998.
- [30] A. F. Mills, *Basic heat and mass transfer*, 2nd ed. Harlow: Pearson, 2014.
- [31] M. Nguyen *ym.*, "Anti-Fouling Ceramic Coating for Improving the Energy

- Efficiency of Steel Boiler Systems”, *Coatings*, vsk. 8, nro 10, s. 353, 2018.
- [32] ”ENERGY EFFICIENCY BENCHMARKING STUDY OF FOOD MANUFACTURING PLANTS IN SINGAPORE”, 2016. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.e2singapore.gov.sg/DATA/0/docs/Resources/Industry/FMBS_Final_Report_v1.1.pdf. [Viitattu: 11-helmi-2019].
- [33] A. Regueiro, D. Patiño, E. Granada, ja J. Porteiro, ”Experimental study on the fouling behaviour of an underfeed fixed-bed biomass combustor”, *Appl. Therm. Eng.*, vsk. 112, ss. 523–533, 2017.
- [34] F. J. Frandsen, ”Utilizing biomass and waste for power production—a decade of contributing to the understanding, interpretation and analysis of deposits and corrosion products”, *Fuel*, vsk. 84, nro 10, ss. 1277–1294, 2005.
- [35] R. Nieminen, *Korroosiomekanismit kattilalaitoksissa*. Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1996.
- [36] R. Nieminen, *Kattilaputkien metallisten suojapinnoitteiden valmistusmenetelmät*, vsk. 10/1996; 1. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1996.
- [37] J. (Jingxu) Zhu, ”Ash Deposition in Biomass Combustion or Co-Firing for Power/Heat Generation”, *Energies*, vsk. 5, ss. 5171–5189, 2012.
- [38] P. Mirek, ”Field Testing of Acoustic Cleaning System Working in 670Mwth CFB Boiler”, *Chem. Process Eng.*, vsk. 34, nro 2, ss. 283–291, kesä 2013.
- [39] Rosink-Werkstätten, ”Rapping Systems”. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.rosink-werkstaetten.de/products-and-services/boiler-cleaning-systems/rapping-systems/?L=1>. [Viitattu: 18-helmi-2019].
- [40] C. B. GmbH, ”PNEUMATIC SINGLE RAPPING SYSTEM”. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.cbpg.com/sites/default/files/2017-10/171017_EN_Rapping_Systems.pdf. [Viitattu: 18-helmi-2019].
- [41] M. Lind, ”Puhdasta räjäyttämällä - Delete-lehti”, 2015. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.delete.fi/deletelehti/videot/puhdasta-rajayttamalla>. [Viitattu: 22-marras-2018].
- [42] R. Giglio, ”Why fuel flexible CFBs are the future”, 2017. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.powerengineeringint.com/articles/print/volume-25/issue-9/features/why-fuel-flexible-cfbs-are-the-future.html>. [Viitattu: 03-helmi-2019].
- [43] R. Saidur, E. A. Abdelaziz, A. Demirbas, M. S. Hossain, ja S. Mekhilef, ”A review on biomass as a fuel for boilers”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vsk. 15, nro 5, ss. 2262–2289, kesä 2011.
- [44] M. Group, ”UUDEN SUKUPOLVEN BIOTUOTETEHIDAS ÄÄNEKOSKELLA”. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Biotuotetehdas/Documents/Biotuotetehtaan_esite_FIN.pdf. [Viitattu: 19-helmi-2019].

- [45] FinnPulp, ”Maailman ensimmäinen älykäs biotuotetehdas”. [Verkossa]. Saatavissa: <http://www.finnpulp.fi/havusellutehdas-finnpulp.html>. [Viitattu: 19-helmi-2019].
- [46] STT, ”Ilmastopaneeli: Ennusteet metsien hiilinielun kehittymisestä poikkeavat valtavasti toisistaan”, *YLE*, 18-helmi-2019.
- [47] J. Martino, ”Boiler Cleaning Methods & Techniques”, 2014. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.power-eng.com/articles/print/volume-118/issue-4/features/boiler-cleaning-methods-techniques.html>. [Viitattu: 04-helmi-2019].
- [48] ”Organisations underestimating, unclear on IIoT security challenges”, *ITP.net*. 2018.
- [49] ”Valmet kotisivu”. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.valmet.com/energyproduction/cfb-boilers/>. [Viitattu: 14-tammi-2019].
- [50] M. Yeager, ”Increase the IQ of Your Intelligent Sootblowing”, 2017. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.powermag.com/increase-the-iq-of-your-intelligent-sootblowing/?pagenum=2>. [Viitattu: 16-helmi-2017].