

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

## Kiertoleijukattilan dynamiikka ja säätö

### Dynamics and adjustment of the circulating fluidized bed boiler

Työn tarkastaja: Petteri Peltola

Työn ohjaaja: Petteri Peltola

Lappeenranta 19.9.2018

Toni Tuominen

# TIIVISTELMÄ

Toni Tuominen

Kiertoleijukattilan dynamiikka ja säätö

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Petteri Peltola

Kandidaatintyö 2018

41 sivua, 1 taulukko, 16 kuvaa

Hakusanat: kiertoleijukattila, dynamiikka, säätö

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tuottaa kirjallisuuskatsaus luonnonkiertoisen kiertoleijukattilan dynamiikasta ja siihen liittyvästä säätötekniikasta. Työ tehtiin teoreettisten kirjallisuuslähteiden, julkaisuiden, verkkosivujen sekä tieteellisten tutkimusten perusteella.

Kiertoleijukattilan tulipesän palamisprosessi on monimutkainen kokonaisuus, jossa polttoainetta poltetaan hiekasta ja tuhkasta koostuvassa pedissä. Leijukerrospolton erityiset palamisolosuhteet tarjoavan mahdollisuuden hyödyntää useata erilaista sekä kosteata polttoainetta. Harvoin kuitenkaan kattilan höyryn tuotanto on täysin muuttumatonta, sillä tuotannon tulee pystyä seuramaan höyryn tarvetta käyttökohteessa. Usein kattiloita käytetään tehtaan tai prosessiteollisuuden yhteydessä höyryn ja myös sähkön tuottamiseksi. Tehokkuuden saavuttamiseksi on tärkeää pystyä minimoimaan kaikki ylimääräinen, joten kattilan dynamiikan ja käsittelyn ymmärtäminen on tarpeellista.

Tavoitteena työssä on selvittää tulipesän ilmiöiden ja palamisprosessin lisäksi kiertoleijukattilan lämmönsiirtoon vaikuttavat tekijät ja minkälaista säätötekniikkaa kattilan hallitsemiseen käytetään. Parhaiten tulipesän olosuhteita pystytään hallitsemaan primääri-ilman avulla, jolloin voidaan vaikuttaa leijupedin tiheyteen. Virtauksen kasvaessa sekoittuminen vahvistuu, joka tehostaa palamisprosessia ja lämmönsiirtoa. Kuormanmuutosnopeuteen sekä kattilan hallintaan voidaan vaikuttaa polttoaineen ja ajotavan valinnoilla. Luonnollisesti kattilan koko ja rakenne myös vaikuttavat siihen, miten nopeasti kattilan kuormaa on mahdollista muuttaa. Oleellista kuormanmuutoksen kannalta on myös huomioida energiavarastot leijupedissä ja lieriössä.

Työn tuloksena saatiin kattava, kirjallinen kokonaisuus kiertoleijukattilan käyttäytymisestä ja kattilan ohjauksen kannalta tärkeimpien osaprosessien säätötavoista.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>Tiivistelmä</b>	<b>2</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>3</b>
<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>5</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2 Leijupetipoltto</b>	<b>8</b>
2.1 Pedin käyttäytyminen kiertoleijukattilassa.....	10
2.2 Palaminen kiertoleijukattilassa.....	13
2.2.1 Lämpeneminen ja kuivuminen.....	13
2.2.2 Syttyminen .....	14
2.2.3 Pyrolyysi .....	14
2.2.4 Hiiltojäännöksen palaminen.....	15
2.2.5 Partikkelien hajoaminen.....	16
2.3 Kattilan lämmönsiirtopinnat.....	16
2.3.1 Höyryputkisto.....	17
2.3.2 Tulistimet .....	18
2.3.3 Esilämmittimet.....	19
2.3.4 Ulkoinen lämmönsiirrin .....	19
2.4 Lämmönsiirtoon vaikuttavat tekijät.....	19
2.4.1 Kaasu-kiintoainesusension tiheys .....	19
2.4.2 Lämpötilan vaikutus.....	21
2.4.3 Partikkelikoon vaikutus.....	22
2.4.4 Kaasun virtausnopeus .....	23
2.4.5 Lämmönsiirtopintojen geometria.....	23
<b>3 Kattilan dynamiikka</b>	<b>24</b>
3.1 Polttoaineiden käyttäytyminen tulipesässä.....	24
3.2 Laitoksen ajotavat.....	25
3.3 Kiertoleijukattilan kuormanmuutos.....	28
3.4 Kuormanmuutosnopeus.....	30
3.5 Lämpöenergian hallinta tulipesässä.....	31
<b>4 Kiertoleijukattilan säätö</b>	<b>35</b>
4.1 Lieriökattilan syöttövesivirtauksen säätö .....	35
4.2 Polttoainekuorman hallinta.....	36
4.3 Palamisilman hallinta .....	37
4.4 Tulipesän paineen hallinta.....	38
4.5 Tulistetun höyryn lämpötilan säätö .....	38
<b>5 Yhteenveto</b>	<b>40</b>



## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$\mu$	dynaaminen viskositeetti	[Pa s]
$d$	halkaisija	[m]
$h$	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/m <sup>2</sup> °C]
$H$	korkeus	[m]
$P$	Lämpöteho	[W]
$t$	aika	[s]
$T$	lämpötila	[°C, K]
$U$	virtausnopeus	[m/s]
$y$	mooliosuus	
$\Delta p$	paine-ero	[Pa]
$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]

### Alaindeksit

b bed, leijupeti

g gas, kaasu

p	particle, partikkeli
r	radiation, säteily
s	solid, kiintoaine
T	terminal, lentoonlähtö
v	volatiles, haihtuva osuus

### **Lyhenteet**

BFB	Bubbling fluidized bed
CFB	Circulating fluidized bed
FBHE	Fluidized bed heat exchanger
MCR	Maximum continous rating
PC	Pulverized coal

## 1 JOHDANTO

Nopeasti kasvanut kiinnostus uusiutuvan energian tuotantotapoja kohtaan asettaa vaihtelevuutensa takia haasteita tasaisen energian tuottamiseksi. Tällaisia tuotantotapoja ovat esimerkiksi sähkön tuottaminen tuulen tai auringon avulla. Vakaa sähköntuotanto on kuitenkin välttämättömyys, jonka hallittavuutta monimutkaistaa jatkuva sähköverkon laajentuminen sekä uudet ja vaihtelevat tuotantotavat. 68 % maailman energiasta tuotetaan voimalaitoksissa ja valtaosassa fossiilisia polttoaineita käyttäen. Voimalaitosten tulee vastata sähköntuottamisen perustarpeesta, mutta yhä enemmän lisäksi tasapainottaa vaihtelevan kysynnän aiheuttamaa heilahtelua. (Gao et al., 2016)

Maailmalla kiertoleijukattiloissa (CFB) polttoaineena käytetään kivihiiltä energian tuottamiseen. Vaihtelevalaatuisen ja usean eri polttoaineen samanaikainen käyttö hyvällä hyötysuhteella on tässä kattilatyypissä mahdollista, jolloin käytettävyyden paraneminen tuo etua konventionaalisiin polttotapoihin verrattuna. Kiertoleijupoltto tarjoaa myös hyvät edellytykset edulliselle rikinpoistolle savukaasuista ja alhaisemman palamislämpötilan ansiosta myös typenoksidien muodostuminen on vähäistä verrattuna esimerkiksi hiilen pölypolttoon (PC). Tehokas palaminen, joustavuus polttoaineessa sekä edullinen päästöjen hallinta ovat ominaisuuksia, joiden ansiosta kiertoleijukattiloiden voidaan uskoa yleistyvän edelleen lämmön- ja sähköntuotannossa. Suomi on Pariisin ilmastopöytäkirjassa sitoutunut luopumaan kivihiilen energiakäytöstä ja Työ- ja elinkeinoministeriön mukaan luopuminen tapahtuisi vuonna 2029 (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2018). Kiertoleijupoltto tarjoaa vaihtoehdon tukemaan siirtymävaihetta pois kivihiilen käytöstä, sillä biopolttoaineen osuutta voidaan säädettävyyden ansiosta jatkuvasti lisätä.

Tämän työn tavoitteena on esitellä luonnonkiertoisen kiertoleijukattilan polttoprosessi ja kuvata kuinka kattilan dynamiikka toimii. Dynamiikan ohella työssä käydään lävitse kattilan hallinnan ja höyryntuotannon kannalta tärkeimpiä laitteita ja kuvataan, minkälaisia säätöjä laitteiden hallitsemiseen liittyy.

## 2 LEIJUKERROSPOLTTO

Leijukerros poltto on 1970-luvun jälkeen energiantuotannossa yleistynyt polttotapa, jossa polttoaine poltetaan pedissä, joka koostuu polttoainepartikkeleista, palaneen polttoaineen tuhkasta sekä pedin kiintoainepartikkeleista. Tulipesän petiä leijutetaan alhaaltapäin puhallettavan ilman avulla, jolloin polttoaine, leijutusilma ja petihiekka muodostavat kaasukiintoainesuspension. Leijutuskaasun virtaus saa pääasiassa kiinteistä partikkeleista muodostuvan pedin käyttäytymään fluidin tavoin. (Vakkilainen, 2017)

Pedin kiintoainepartikkelit aiheuttavat painehäviön leijutuskaasun virtaukseen, joka kasvaa virtausnopeuden kasvaessa. Kun painehäviö kasvaa pedin hiekkakerroksen hydrostaattisen paineen suuruiseksi alkaa peti leijua, jolloin puhutaan minimileijutusnopeudesta. Tällöin virtauksesta kohdistuva voima partikkeliin on yhtä suuri kuin partikkeliin vaikuttava maan vetovoima. Leijutusnopeutta lisättäessä peti alkaa myös laajentua, jolloin pedin kiintoainepartikkelit peittävät suuremman osuuden tulipesää ja suurilla virtausnopeuksilla ei selkeästi havaittavaa petiä enää muodostu. (Huhtinen et al., 2000)

Kuplapetikattila (BFB) toimii minimileijutusalueen yläpuolella, jolloin suspensiosta muodostuu selkeä kerros, joka kuplii kiehuvan veden tavoin. BFB-kattilassa kiinteä polttoaine syötetään pedin yläpuolelta syöttölaitteella, jolloin pienet polttoainepartikkelit palavat välittömästi suspension sekaan joutuessaan ja suuremmat hautautuvat petiin, jossa ensiksi kuivuvat ja palavat sitten loppuun. Polttoaineen kosteudella ei ole heikentävää vaikutusta palamisprosessiin, koska petihiekan ansiosta kattilalla on suuri lämpökapasiteetti. Pedin pohjalle kertynyt tuhka ja muu palamaton materiaali poistetaan pohjasuppiloiden kautta ja savukaasujen mukana kulkeutuva lentotuhka puhdistetaan savukaasuvirrasta esimerkiksi sähkösuodattimella. (Huhtinen et al., 2013)

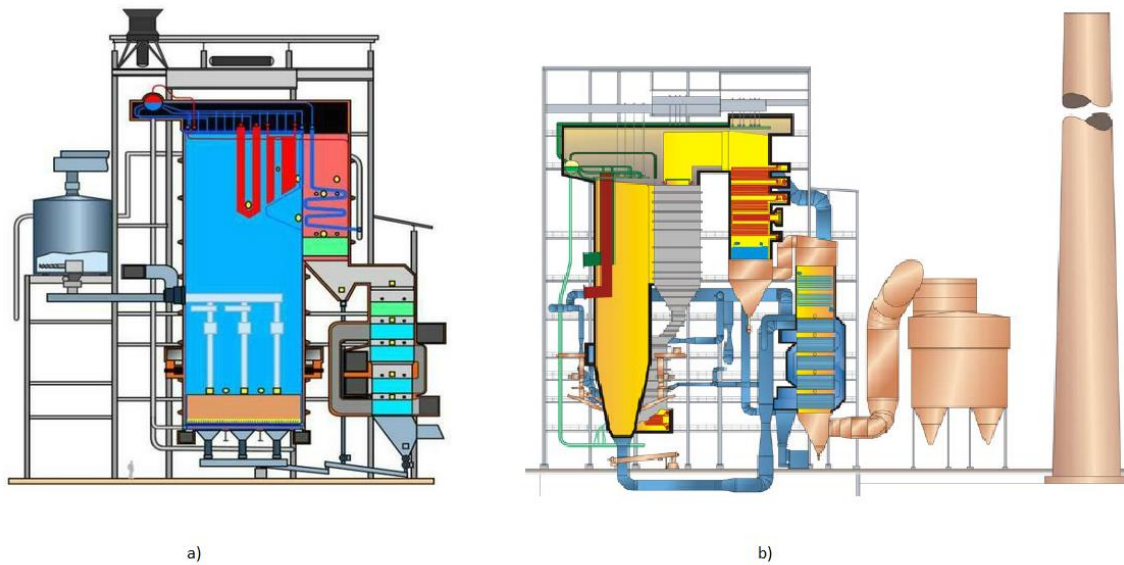
Kiertoleijupoltossa (CFB) käytetään kuplapetiä suurempaa kaasun virtausnopeutta leijutukseen, hienojakoisempaa petihiekkaa sekä erilaista kattilarakennetta. Suuremmalla leijutusnopeudella ylitetään hiekkapartikkelien lentoonlähtönopeus, jolloin partikkelit kulkeutuvat leijutuskaasun virtauksen mukana. Kattilan kiertosilmukka-rakenteen avulla



hiekkapartikkelit voidaan erottaa savukaasuvirrasta syklonissa ja palauttaa takaisin tulipesään. Kiertoleijutekniikan polttoprosessin ansiosta saavutetaan kuplapetiä tehokkaampi palaminen ja monipuolisempi säädettävyys (Joronen et al., 2007). Taulukossa 1 on esitetty vertailu BFB- ja CFB-kattilan tyypillisistä toiminta-arvoista. Kosteiden polttoainesten lisäksi kiertoleijukattilassa voidaan käyttää myös kivihiltä, jonka tehokas polttaminen on haasteellista BFB-kattilassa, sillä kivihillen täydellinen palaminen vaatii alhaisissa lämpötiloissa usean sekunnin palamisajan. (Huhtinen et al., 2000) Kuvassa 1 on havainnollistettu kuplapeti- ja kiertoleijukattilan rakenteellisia eroja.

**Taulukko 1.** Kuplapeti- ja kiertoleijukattiloiden tyypillisiä toiminta-arvoja. (Vakkilainen, 2017)

	BFB	CFB	yksikkö
Leijutusnopeus $U_g$	1-3	3-10	m/s
Petihiekan partikkelikoko $x_p$	0,5-1,5	0,1-0,5	mm
Pedin korkeus $h_b$	0,4-0,8	-	m
Pedin tiheys $\rho_b$	1000-1500	10-100	kg/m <sup>3</sup>
Poikkipinta-ala rasisus	0,7-3	0,7-5	MW/m <sup>2</sup>
Pedin lämpötila $T_b$	700-1000	850-950	°C
Minimikuorma	30-40	25-30	%



**Kuva 1.** Kuvassa a) on esitetty kuplapetikattila ja kuvassa b) kiertoleijukattila. (Vakkilainen, 2017; Parkkonen et al., 2014, pohjalta tehty.)

## 2.1 Pedin käyttäytyminen kiertoleijukattilassa

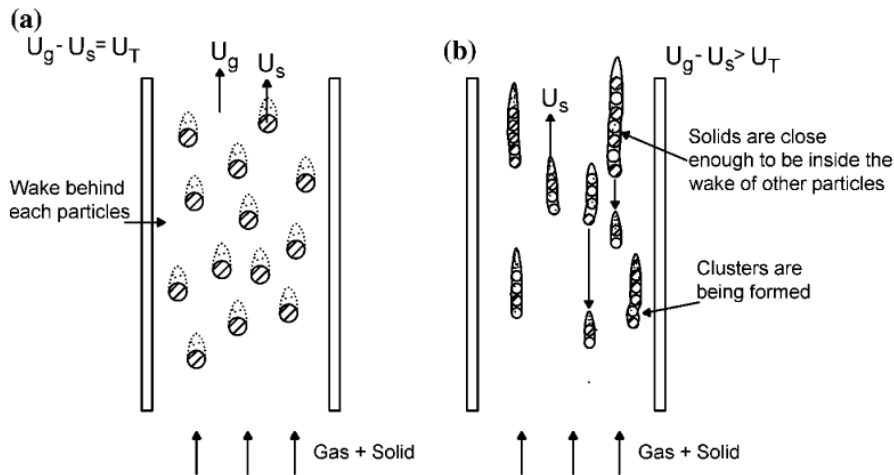
Leijutuskaasu syötetään kattilan pohjassa olevien suuttimien avulla ja vaadittu puhallinpaine on 15–20 kPa. Kattilaan syötettävästä ilmamäärästä noin 40–60 % syötetään primääri-ilmana riippuen polttoaineen haihtuvien komponenttien määrästä. Sekundääri-ilmalla varmistetaan riittävä hapen ( $O_2$ ) määrä täydellisen palamisen saavuttamiseksi ja syöttö tapahtuu tulipesän ylemmistä osista. (Huhtinen et al., 2000)

Tulipesästä kiintoainepartikkelit kulkeutuvat syklonierottimeen, jossa savukaasut erotetaan kiintoainepartikkeleista keskipakokentässä laskeutuksen avulla. Syklonierottimesta partikkelit johdetaan palauttimen kautta takaisin tulipesän pohjalle. Kiertovirtauksen käyttäytyminen riippuu leijutusnopeudesta sekä käytetyn petimateriaalin ominaisuuksista kuten partikkelien muodosta, tiheydestä ja kokojakaumasta. Lisäksi virtaukseen vaikuttavat leijutuskaasun viskositeetti, paine ja lämpötila. (Kirkinen, 2002)

Kiintoainepartikkelit jakautuvat korkeussuunnassa tulipesää siten, että alaosassa kiintoainepitoisuus on suuri ja pedin tiheys pienenee ylöspäin tulipesää noustessa. Kiintoai-

nepartikkelit aiheuttavat paine-eron kaasuvirtaukseen, joka vaihtelee eri osissa kiertosilmukkaa. Kuitenkin painehäviö on suurin alempana tulipesää, jossa on tihein kiintoainesuspensio ja pienempi yläosissa kattilaa. (Basu, 2015) Paineenvaihtelut kattilassa mahdollistavat kiintoainevirtauksen muodostumisen (Kirkinen, 2002).

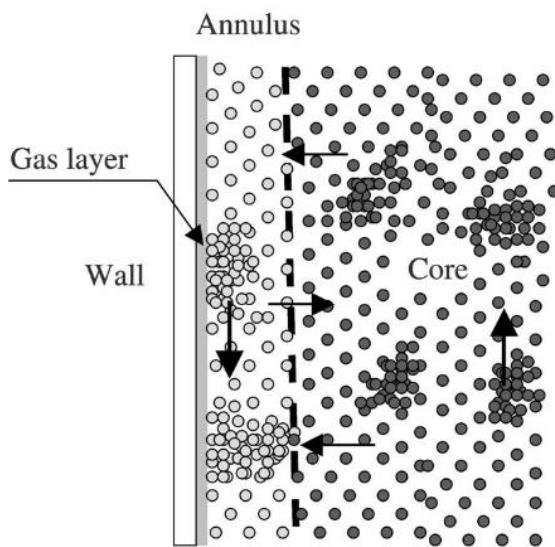
Nopeassa kaasun virtauksessa kiintoainepartikkelien taakse muodostuu aalto, jota on havainnollistettu kuvassa 2. Väljemmässä pedissä yksittäiset partikkelit kulkeutuvat toisiinsa erillään, mutta partikkelien määrän kasvaessa myös suspensiotiheys kasvaa, jolloin partikkelit vaikuttavat toistensa virtaukseen. Kasvanut kiintoainepitoisuus ja turbulenti virtaus saavat aikaan paikallisia partikkelien tihentymiä. Kaasun nopeus ei riitä leijuttamaan suurimpia tihentymiä, jolloin ne putoavat alemmas petiä, jossa ne hajoavat ja yhtyvät keskusvirtaukseen. (Basu, 2015)



**Kuva 2.** Kiintoainetihentymien muodostuminen. Kohdassa a) näkyy aallon muodostuminen yksittäisen kiintoainepartikkelin taakse. Kohdassa b) on kuvattu partikkelien agglomeroituminen eli tihentymän muodostuminen. Lento-ohitusnopeus on myös ylittynyt. (Basu, 2015)

Sisäiseksi kierroksi kutsutaan tulipesän reuna-alueilla muodostuvien tihentymien laskeutumista painovoimaisesti alas tulipesään, samalla kun yksittäiset partikkelit virtaavat tulipesän keskellä. Sisäinen kierron sekoittava vaikutus tasaa paikallisia lämpötilaeroja tulipesässä, joita palamisreaktiot ja lämmönsiirtopinnat aiheuttavat. (Raiko et al., 2002)

Kuvassa 3 on esitetty tihentymien käyttäytyminen tulipesän seinämän läheisyydessä. Kiintoainetihentymien muodostuminen saa aikaan sen, että pedin suspensiotiheys seinämän läheisyydessä on suurempi kuin aivan keskellä olevan päävirtauksen, kuitenkin yksittäisten partikkeleiden virtausnopeus on keskellä vielä suurempi. (Kirkinen, 2002) Tulipesän suspensio voidaan jakaa leveysuunnassa kahteen erilliseen alueeseen. Sisäinen alue (engl. core region), jossa on suurempi kaasun virtausnopeus kuin lähellä seinämää ulkoisella alueella (engl. annular zone). (Basu, 2015)



**Kuva 3.** Kiintoainetihentymien muodostuminen ja käyttäytyminen seinämän läheisyydessä. (Eriksson & Golriz, 2004)

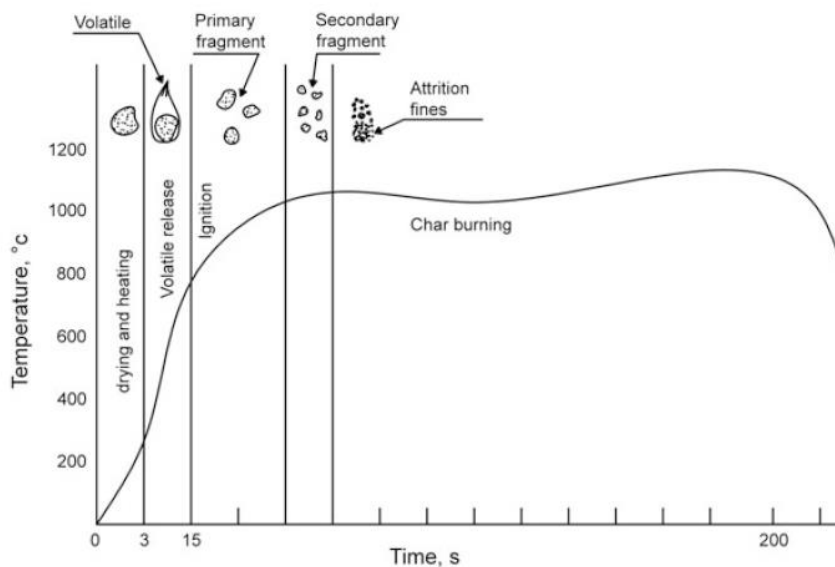
## 2.2 Palaminen kiertoileijukattilassa

Palamisen aikana yksittäinen, kiinteä polttoainepartikkeli käy läpi seuraavat vaiheet:

- Lämpeneminen ja kuivuminen
- Haihtuvien aineiden poistuminen ja palaminen eli pyrolyysi
- Hiiltojäännöksen palaminen

### 2.2.1 Lämpeneminen ja kuivuminen

Syötettäessä polttoainetta tulipesään joutuu partikkeli osaksi suspensiota, jolloin kiintoainehiukkaset lämmittävät tuoreen polttoainepartikkelin lämpötilan lähelle pedin lämpötilaa (Basu, 2015). Polttoainepartikkelin lämpötilan nousunopeus on 100–1000 °C/s ja lämpötilan muutosnopeus riippuu polttoainepartikkelien koosta, laadusta sekä syöttötavasta. Polttoaineen lämpeneminen ja kosteuden poistuminen voidaan karkeissa arvioissa olettaa tapahtuvan välittömästi tulipesään syötön jälkeen. (Raiko et al., 2002) Kivihiili-partikkelin palamisen eri vaiheita on havainnollistettu kuvassa 4.



**Kuva 4.** Kivihiilipartikkelin palamisen vaiheet. Partikkelin lämpötila on esitetty ajan funktiona (Basu, 2015)

Kuivumisen aikana polttoaineen sisältämä vesi höyrystyy ja poistuu partikkelista. Veden höyrystyminen edellyttää lämmön tuontia partikkeliin ja kosteuden poistuminen alkaa partikkelin ulkokuorelta, josta se etenee kohti keskustaa. (Vakkilainen, 2017) Palamisen olosuhteissa vesi höyrystyy kiehumislämpötilan läheisyydessä, sillä kaasun lämpötila on hyvin korkea. Tällöin aineensiirto on nopeaa, koska veden tilavuus kasvaa huomattavasti veden höyrystyessä ja polttoainepartikkelin kuivumista rajoittaa lähes ainoastaan vain lämmönsiirtyminen. (Raiko et al., 2002)

### 2.2.2 Syttyminen

Kiinteän aineen reagoidessa ympäristön hapen kanssa alkaa se synnyttämään lämpöä. Lämpötilan ylittäessä kriittisen pisteen lämmöntuotto ylittää häviöt ja lämpötila nousee nopeasti uuteen tasapainotilaan. Syttymisaikaan vaikuttavia tekijöitä ovat polttoaineen partikkelikoko, kaasun lämpötila ja happipitoisuus sekä polttoaineen ominaisuudet kuten tiheys, ominaislämpö, lämmönjohtavuus sekä reaktiivisuus. Pääsääntöisesti hiukkaskoon kasvaessa syttymisaika kasvaa, sillä säteilyn merkitys lämmönsiirrossa on suurempi isoilla partikkeleilla ja kemiallisen kinetiikan merkitys on toisaalta suurempi pienemmillä partikkeleilla. Polttoaineet, joilla haihtuvien aineiden määrä on suuri syttyvät yleensä matalammassa lämpötilassa. (Raiko et al., 2002)

### 2.2.3 Pyrolyysi

Pyrolyysissä polttoaine hajoaa ja siitä poistuu haihtuvia kaasuja kuten hiilimonoksidia (CO), hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>), vetyä (H<sub>2</sub>) sekä erilaisia hiilivetyjä (CH<sub>x</sub>). Haihtuvia kaasuja poistuu kahdessa vaiheessa 500–600 °C sekä 800–1000 °C alueilla (Basu, 2015). Poistuvat kaasut palavat ympäristön hapen ja poistuvien kaasujen rajapinnalla, jossa voidaan havaita näkyvä liekki. Partikkeli menettää massaa kaasujen poistuessa ja jäljelle jäävää kiinteää ainetta kutsutaan jäännöshiileksi. Biopolttoaineiden tapauksessa haihtuvien aineiden poistuttua jäljelle jää puuhiiltä ja lisäksi tervaa (Vakkilainen, 2017). Polttoaineesta kaasuna poistuva osuus riippuu polttoaineen tyypistä, loppulämpötilasta ja kuumennusnopeudesta. Kivihiilellä haihtuvien osuus on polttoaineen laadusta riippuen 10–40 %

massasta ja puulla taas vastaava arvo on noin 80 %. Polttoainepartikkeleiden ollessa suuria kemiallisen kinetiikan merkitys vähenee, sillä reaktiot tapahtuvat suhteellisen nopeasti verrattuna lämmönsiirtoon. (Raiko et al., 2002) Kirkinen kertoo diplomityössään haihtuvien kaasujen poistumisen vievän 1–15 % ajasta, joka kuuluu kokonaisuudessa partikkelin palamiseen kierto-leijukattilassa (Kirkinen, 2002). Haihtuvien kaasujen poistumiseen kuluva aikaa  $t_v$  voidaan arvioida Basun esittämän yhtälön 1 mukaisesti (Basu, 2015).

$$t_v = ad_v^p \quad (1)$$

, jossa

$a$  on empiirinen vakio, joka riippuu polttoaineesta

$d_v$  on partikkelin halkaisija (mm)

$p$  on vakioeksponentti, joka riippuu polttoaineesta 0,32 –1,8 välillä

#### 2.2.4 Jäännöshiilen palaminen

Jäännöshiilen palaminen on pitkäkestoinen osaprosessi partikkelin palamista, joka alkaa pyrolyysin jälkeen, haihtuvien kaasujen poistuttua polttoaineesta. Joskus jäännöshiilen palaminen ja haihtuvien kaasujen poistuminen ovat ainakin osittain samanaikaisia. Jäännöshiili on kaasujen poistuttua huokoista ja kaasuvirtauksen happi kulkeutuu ensiksi partikkelin pinnalle, josta se etenee huokosiin aiheuttaen hapettumisreaktion polttoaineen hiilen (C) kanssa. Partikkelin korkea lämpötila kasvattaa reaktion nopeutta (Raiko et al., 2002). Hapettumisreaktiosta tuotteena syntyy muun muassa hiilidioksidia ja hiilimonoksidia. Reaktiotuotteiden muodostuminen on kuitenkin riippuvainen partikkelin koosta sekä vallitsevasta lämpötilasta sekä paineesta. (Basu, 2015) Pienten partikkelien palamisnopeutta rajoittaa kemiallinen kinetiikka ja toisaalta suurempia hapen diffuusio rajakerroksen lävitse partikkelin pinnalle. Raiko et al. on esittänyt jäännöshiilen palamisajalle  $t$  leijukerrosolosuhteissa korrelaation, joka on esitetty yhtälössä 2.

$$t = \frac{[k_h d^n + b]}{y_{O_x}} \quad (2)$$

, jossa

$d$  on partikkelin halkaisija (mm)

$y_{O_x}$  on hapen moolisisuus kaasussa

$k_h$ ,  $n$  ja  $b$  ovat polttoaineesta ja lämpötilasta riippuvia vakiokerroimia

### 2.2.5 Partikkelien hajoaminen

Pyrolyysissä vapautuneet haihtuvat kaasut voivat saada aikaan paisumisen, koska partikkelin sisäinen paine kasvaa voimakkaasti. Paisumisesta voi seurata partikkelin hajoaminen pienempiin osiin. (Kirkinen, 2002) Partikkelin törmäily ja hioutuminen hajottavat myöskin pyrolyysissä heikentynyttä kappaletta, mikä on ominaista leijukerros-poltossa. Primääriksi hajoamiseksi kutsutaan pyrolyysin aikana aiheutuvaa partikkelin hajoamista ja sekundääriseksi hajoamiseksi pyrolyysin jälkeistä jäännöshiilen hajoamista. Partikkelien hajoaminen pienempiin osiin nopeuttaa pyrolyysiä ja jäännöshiilen palamista, sillä syntyvien kappaleiden pinta-ala tilavuutta kohden kasvaa partikkelikoon pienetessä. Tällöin myös aine- ja lämmönsiirto partikkelin ja ympäristön välillä tehostuu. (Raiko et al., 2002)

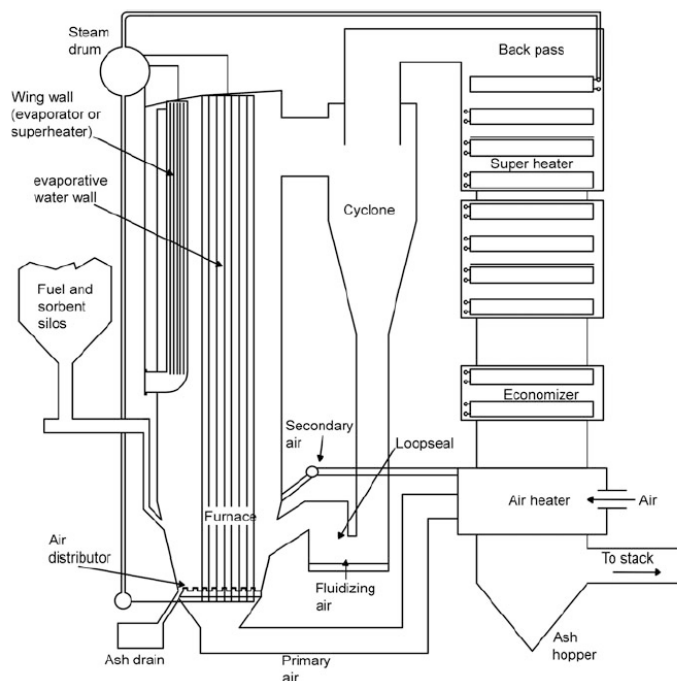
## 2.3 Kattilan lämmönsiirtopinnat

Kattilan lämmönsiirtopintojen tarkoituksena on siirtää tulipesässä polttoaineen palamisessa kehittyvä lämpö sekä savukaasujen mukana kulkeutuva lämpö kattilan vesi-höyrypiiriin. Tärkeimmät sijainnit kierto-leijukattilaan sijoitettavalle lämmönsiirtopinnalle ovat:



- Tulipesän seinämä
- Tulipesän sisäosat
- Kiintoainepartikkeleiden palautusjärjestelmä
- Savukaasukanava

Kuvassa 5 on esitetty edellä mainittuihin paikkoihin sijoitetut lämmönsiirtopinnat kattilassa.

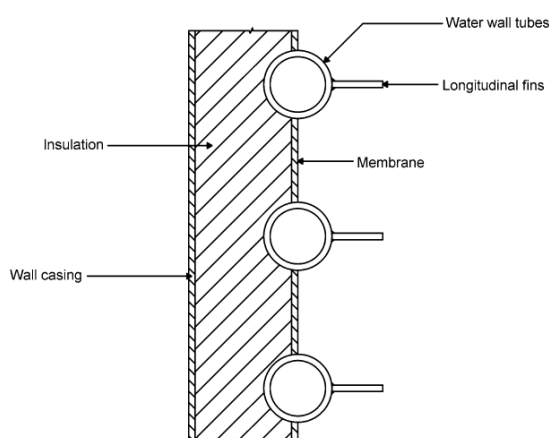


**Kuva 5.** Lämmönsiirtopintojen sijainnit eri osissa kierto-levijukattilaa. (Basu, 2015)

### 2.3.1 Höyryputkisto

Höyrystinputkiston tarkoituksena on höyrystää esilämmitetty syöttövesi ja höyrystin käsitteää yleensä tulipesää kiertävän putkiston osan. Höyrystinosassa vesihöyryn paine on suurempi kuin tulistetun höyryn, sillä putkistossa syntyy painehäviöitä. Höyrystin on sijoitettu kattilan kuumimpaan paikkaan, jotta saavutettaisiin mahdollisimman hyvä jääh-

dytys ja välttyttäisiin putkien ylikuumenemiselta. Höyrystimessä putkimateriaalin pintalämpötila pysyy yleensä hiukan yli höyrystymislämpötilan, mutta kuitenkin alle 450 °C:n. (Huhtinen et al., 2000) Kuvassa 6 on esitetty tulipesän seinämärakenne. Nykyaikaisten tulipesien seinämät ovat kehittyneet muuratuista rakenteista membraaniseiniin, jolloin saavutetaan kaasutiivis ja kevyempi rakenne tulipesän ympärille.



**Kuva 6.** Tulipesän seinämärakenne ylhäältäpäin. Höyrystinputket on varustettu lämmönsiirtoa edistävillä rivoilla. (Basu, 2015)

### 2.3.2 Tulistimet

Höyryn tulistuksessa on tarkoituksena poistaa höyrystä kosteus, jolloin puhutaan tulistetusta höyrystä. Höyryn lämpötilan kasvattamisella saadaan myös aikaan suurempi liikeenergia turbiinista. Tulistettu höyry on tyypillisesti 450–550 °C ja tulistuneena höyryn jäädyttävä vaikutus lämmönsiirtopinnassa on paljon huonompi kuin höyrystyvällä tai kylläisellä vedellä. Putkien ylikuumenemisen välttämiseksi tulistimet pyritään sijoittamaan savukaasukanavaan. (Huhtanen et al., 2000)

Välitulistuksella tarkoitetaan korkeapaineturbiinin lävitse jo kulkeutuneen höyryn uudelleen kierrätystä kattilaan. Korkeapaineturbiinissa paisunut höyry on matalapaineista, jolloin välitulistuksella saavutetaan korkeampi höyryn lämpötila matalapaineturbiinissa. Keskimääräinen lämmöntuontilämpötila kasvaa, jos välitulistus tehdään riittävän aikaisin

ja tämän etuna on se, että höyry on tulistunutta myös matalapaineturbiiniin tullessa. Höyry paisuu tällöin pitempään, mikä parantaa höyryturbiinin sähköntuottoa. (Kaikko & Saari, 2018)

### 2.3.3 Esilämmittimet

Savukaasut kuljettavat mukanaan paljon hyödynnettävää lämpöä ja kattilan hyötysuhdetta pystytään parantamaan esilämmittämällä syöttövettä ja palamisilmaa savukaasuilla. (Huhtinen et al., 2000) Syöttöveden esilämmitys tapahtuu ekonomaisierissa, joka sijaitsee tyypillisesti savukaasukanavassa tulistimien jälkeen. Ekonomaisierissa syöttövesi esilämmitetään lähelle kyllästymislämpötilaa (Basu, 2015).

### 2.3.4 Ulkoinen lämmönsiirrin

Uusimmat kierto-leijukattilat voidaan varustaa ulkoisella lämmönsiirtimellä, joka sijaitsee kiintoainepartikkelien palautuspiirissä. Leijukerroslämmönsiirrin (FBHE) sijoitetaan yleensä syklonin jälkeisen polvilukon perään. Ulkoiseen lämmönsiirtimeen voidaan sijoittaa höyryn tulistus, välitulistus tai höyrystyspiiri ja lämmönsiirtimen avulla parannetaan kattilan säädettävyyttä. (Basu, 2015)

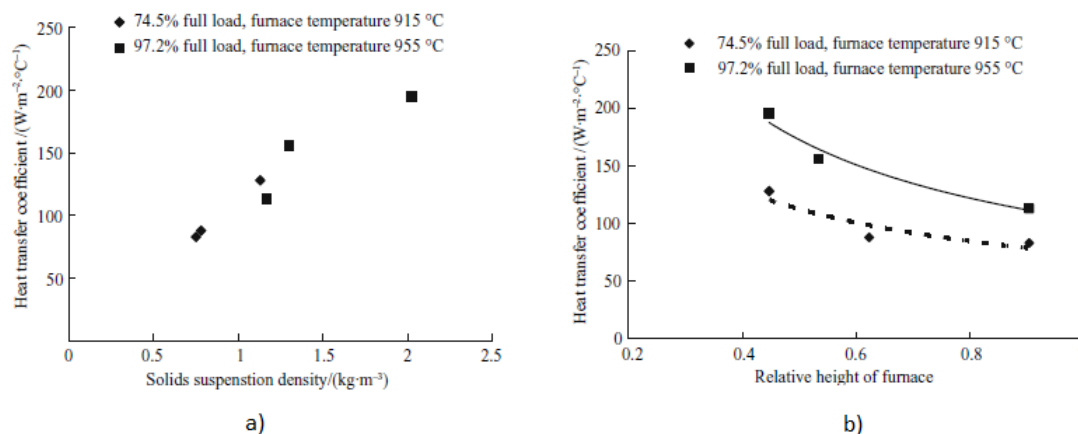
## 2.4 Lämmönsiirtoon vaikuttavat tekijät

Lämmönsiirtymisen mekanismit ja olosuhteet riippuvat oleellisesti virtauksen käyttäytymisestä. Tulipesässä olosuhteet vaihtelevat virtauksen takia ajallisesti ja paikallisesti, joten tästä syystä myös lämmönsiirron korrelaatiot perustuvat kokeellisiin tuloksiin eikä yleisesti hyväksytyjä malleja ole kehitetty. (Raiko et al., 2002) Tulipesässä lämmönsiirto seinämään koostuu kiintoainetihentymien ja yksittäisten partikkelien konvektiolla siirtämästä lämmöstä, kaasun konvektiosta sekä kaasu-kiintoainesuspension säteilystä. (Basu, 2015)

### 2.4.1 Kaasu-kiintoainesuspension tiheys

Tulipesän suspensiotiheys pienenee tulipesän korkeuden kasvaessa ja alaosassa suspension tiheys on luokkaa  $300 \text{ kg/m}^3$ , kun taas ylemmissä osissa enää vain  $0\text{--}20 \text{ kg/m}^3$  välillä

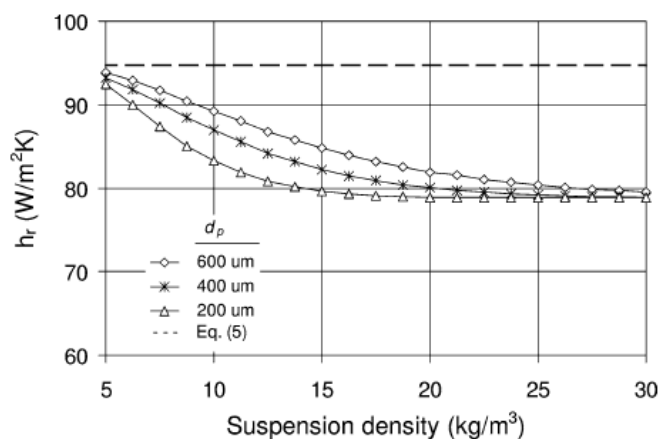
(Kirkinen, 2002). Suspension tiheydellä tarkoitetaan kiintoainepartikkeleiden painon suhdetta tilavuuteen leijupedissä. Suspensiotiheys on kaikkein tärkein tekijä kiertoleijukattilan normaalilla toiminta-alueella lämmönsiirtymisen kannalta. Cheng et al. on osoittanut kuvassa 7 lämmönsiirtokertoimen riippuvuuden kaasu-kiintoainesuspension tiheydestä. Samaan kuvaan on lisätty myös samasta tutkimuksesta peräisin oleva kuvaaja, josta voidaan nähdä myös lämmönsiirtokertoimen laskevan suhteellisesti tulipesän korkeuden kasvaessa. Suuremmilla kuorman arvoilla saavutetaan myös parempi lämmönsiirtyminen, mikä nähdään kuvasta 7.



**Kuva 7.** Kuvassa a) Suspensiotiheyden kasvun vaikutus lämmönsiirtokertoimeen ja b) lämmönsiirtokerroin tulipesän suhteellisilla korkeuden arvoilla. (Muokattu lähteestä Cheng et al., 2007)

Kiintoainetihentymien käyttäytymisellä tulipesän seinämän läheisyydessä on suuri merkitys lämmönsiirtokertoimeen, sillä tihentymät pääosin kulkeutuvat alaspäin luovuttaen lämpöä tulipesän seinämille, jolloin muodostuu terminen rajakerros lämmönsiirtopintaan. Rajakerroksen ansiosta lämpö johtuu tehokkaasti seinämän ja tihentymien välillä (Kirkinen, 2002). Lämpöä siirtyy lisäksi konvektiolla tulipesän keskellä virtaavien yksittäisten partikkeleiden ja leijutuskaasun välityksellä, mutta heikommin kuin tihentymien kautta. (Basu, 2015)

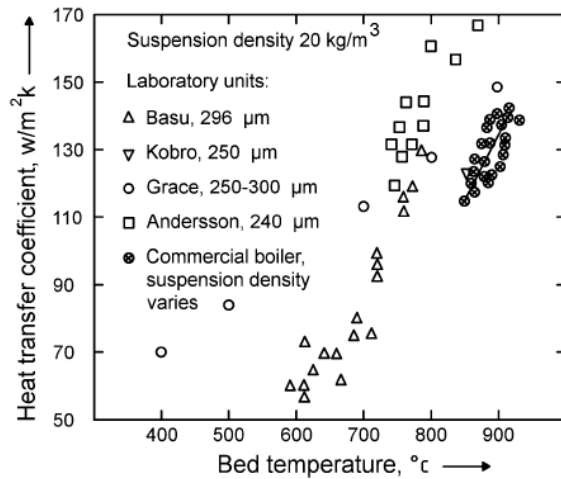
Säteilyn osuus lämmönsiirrossa vaihtelee voimakkaasti johtuen paikallisista lämpötilan ja suspensiotiheyden eroista. Alle 500–600 °C lämpötiloissa säteilyn voidaan olettaa olevan lähes merkityksetöntä (Raiko et al., 2002). Kuitenkin säteilylämmönsiirto on vallitseva lämmönsiirtymismekanismi yläosissa tulipesää, jossa suspensiotiheys on pienempi. Eriksson & Golriz ovat kuvassa 8 esittäneet suspensiotiheyden vaikutuksen säteilylämmönsiirtokertoimeen. Kuvassa 8 säteilylämmönsiirtokertoimen voidaan huomata pienenevän suspensiotiheyden kasvaessa, jolloin suurta osaa tulipesän seinämiä peittävät kiintoainetihentymät, heikentäen säteilyn tehokkuutta.



**Kuva 8.** Säteilylämmönsiirtokertoimen riippuvuus pedin suspension tiheydestä ja partikkelikoosta. (Eriksson & Golriz, 2003)

#### 2.4.2 Lämpötilan vaikutus

Korkeammalla pedin lämpötilalla voidaan kasvattaa lämmönsiirtokerrointa, sillä korkeampi lämpötila pienentää lämmönsiirron vastustusta seinämää lähimpänä olevien partikkeleiden kerroksessa. (Basu, 2015) Säteilyn merkitys kasvaa 800–900 °C lämpötiloissa, jossa se kattaa 25–50 % kokonaislämmönsiirtokertoimesta (Eriksson & Golriz, 2003). Basu on esittänyt kirjassaan kattavan kuvaajan kokonaislämmönsiirtokertoimen riippuvuudesta pedin lämpötilan kanssa, joka on esitetty kuvassa 9.



**Kuva 9.** Pedin lämpötilan vaikutus lämmönsiirtokertoimeen. Kuvaan on myös merkitty eri partikkelikoot. (Basu, 2015)

Pedin lämpötilaa ei voida kuitenkaan rajattomasti nostaa, sillä yli 900 °C lämpötiloissa tuhkan sulamisen riski kasvaa, joka saattaa aiheuttaa sintraantumisen. Sintraantuminen pahimmassa tapauksessa johtaa leijutusilman suuttimien tukkeutumiseen ja polttoprosessin häiriintymisen. Alhaisella palamislämpötilalla vältetään myös typenoksidipäästöjen (NO<sub>x</sub>) syntyminen. (Huhtinen et al., 2013)

### 2.4.3 Partikkelikoon vaikutus

Pienemmällä keskimääräisellä kiintoainepartikkelikoolta saavutetaan suhteessa suurempi kiintoainepitoisuus tulipesässä, josta on seurauksena parantunut lämmönsiirtokerroin pedistä seinämille (Andersson, 1995). Kiertoleijukattilassa kiertävien kiintoainepartikkelien koolta ei kuitenkaan ole vastaavaa vaikutusta lämmönsiirtokertoimeen kuin esimerkiksi kuplapetikattilassa. Suurempien lämmönsiirtopintojen takia ensimmäinen partikkelikerros viipyy riittävän ajan lämmön siirtymiseksi, joten kasvavalla konvektion osuudella ei saavuteta merkittävästi parantunutta lämmönsiirtoa höyrystinputkistoon. (Basu, 2015) Ylemmissä osissa tulipesää, jossa säteily on vallitseva lämmönsiirtomekanismi ei kiintoainepartikkeleiden koolta ole juurikaan vaikutusta lämmönsiirtymiseen (Andersson, 1995).

#### 2.4.4 Kaasun virtausnopeus

Kaasun virtausnopeutta muuttamalla voidaan vaikuttaa tulipesän kaasu-kiintoainesusension tiheyteen. Suurella kuormalla parantunut lämmönsiirto johtuu kuitenkin sekoittumisesta, suspensiotiheyden kasvusta yläosassa tulipesää sekä lämpötilan kasvusta kuin niinkään kaasun virtausnopeuden kasvamisesta. (Cheng et al., 2007) Kaasukonvektion merkitys kasvaa vain, kun kiintoainepitoisuus on pieni, joten kaasun virtausnopeus ei itsessään paranna merkittävästi lämmönsiirtoa tulipesässä, mutta virtausnopeuden kasvattamisella on epäsuoria, lämmönsiirtoa parantavia vaikutuksia (Raiko et al., 2002).

#### 2.4.5 Lämmönsiirtopintojen geometria

Lämmönsiirtokertoimeen vaikuttaa myös lämmönsiirtopinnan geometria. Optimaalisin muoto on putki levymäisen rakenteen sijasta, jolloin vältytään paksun rajakerroksen muodostuminen lämmönsiirtopintaan. (Raiko et al., 2002) Lämmönsiirtopintojen pituuden vaikutuksesta on puhuttu kiintoainepartikkeleiden koon vaikutuksen yhteydessä. Lämmönsiirtopintojen pituuteen voidaan vaikuttaa lisäämällä rivoitus lämmönsiirtopinnalle. Tällöin lämmönsiirtoa on mahdollista tehostaa kasvaneella lämmönsiirtopinta-alalla ja sopivalla rivoituksella voidaan myös säästyä lämmönsiirtopintojen paljoudelta tulipesässä. (Basu, 2015)

### **3 KATTILAN DYNAMIIKKA**

Höyrykattila voidaan ajatella dynaamisena systeeminä, johon tulevia suureita ovat polttoaine-, ilma- ja syöttövesivirtaukset. Kattilasta poistuvia virtoja ovat tuotetun höyryn sekä palamisessa syntyvän savukaasun virtaus. Kattilan ohjaaminen koostuu pääpiirteisään juuri näiden virtauksien hallitsemisesta suoraan ja epäsuorasti. Tuotettu höyryvirta vaihtelee ajotilanteen mukaisesti ja riippuu höyryn käyttökohteesta.

Kattilan kuormanmuutosnopeudeksi kutsutaan nopeutta, jolla kattilan höyryntuotantoa pystytään muuttamaan. Kuormanmuutosnopeus ja kattilan dynaaminen käyttäytyminen riippuvat sisäisistä prosesseista kuten palamisreaktiosta, lämmönsiirrosta ja veden höyrystymisestä. Sisäisten prosessien lisäksi ohjausjärjestelmä ja prosessia tukevat laitteet aiheuttavat viivettä prosessiin ja kattilan ohjattavuuteen. Laitoksen ajotapa vaikuttaa siihen, kuinka kattilan ohjaus on toteutettu. (Kirkinen, 2002)

#### **3.1 Polttoaineiden käyttäytyminen tulipesässä**

Biopolttoaineita käytettäessä kosteuden poistuminen ja vähäinen jäännöshiilen muodostuminen johtavat yleensä alhaisempaan petilämpötilaan kuin kivishiiltä poltettaessa. Tulipesän ylemmissä osissa tapahtuu haihtuvien kaasujen palaminen, jolloin lämpötila kasvaa selkeästi alaosaan verrattuna. Tiheämmät polttoaineet kuten kivishiili palavat yleensä tulipesän alaosissa toisin kuin biopolttoaineet. (Tourunen, 2010)

Polttoaineen tärkeimmät ominaisuudet kuorman vaihteluiden kannalta ovat haihtuvien aineiden osuus, tiheys, partikkelikoko ja jäännöshiilen kemiallinen reaktiivisuus. Polttoainepartikkeleiden koko ja tulipesän lämpötila vaikuttavat nopeuteen, jolla haihtuvat poistuvat. Haihtuvien aineiden pitoisuus polttoaineessa vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti polttoainepartikkeli lämpenee. Tämä johtaa siihen, että pienet partikkelit lämpenevät nopeammin kuin suuret ja muodostavat enemmän haihtuvia aineita sekä vähemmän jäännöshiiltä. Jäännöshiiltä ja tuhkaa muodostuuakin biopolttoaineiden poltossa vähän verrattuna kivishiilen polttoon. (Tourunen, 2010)



Kiertoleijukattilassa voidaan polttaa useaa eri polttoainetta samanaikaisesti. Kuitenkin biopolttoaineiden ja kivishiilen yhteiskäyttö vaikuttaa kattilan ohjattavuuteen sekä reagoitakykyyn. Biopolttoaineiden polttoprosessi on kivishiiltä vaihtelevampi heikomman lämpöarvon, erilaisen partikkelikoon ja runsaamman kosteuden takia. Laadunvaihtelu ja erilainen palamisprofiili vaikeuttaa prosessin hallintaan, jonka lisäksi biopolttoaineille on ominaista lyhyempi palamisaika ja pienempi jäännöshiilen muodostuminen kuin kivishiilillä. Tehokkaan palamisen saavuttamiseksi polttoaineiden palamisprofiilin ja optimaalisen partikkelikoon tunteminen on tärkeää, sillä lämpötilan sekä paineen vaihtelut tulipesässä muuttavat palamisolosuhteita. Heikentynyt palaminen heijastuu kasvaneina häviöitä ja epähaluttuja päästöjä. (Tourunen, 2010)

Tasainen polttoaineen syöttö ja laadun vaihtelut vaikuttavat myös kattilan hallinnan vaikeuteen. Savukaasujen päästöistä voidaan välittömästi huomata polttoaineen syötön ja laadun häiriöt. Sopiva polttoainemäärä pedissä tehostaa palamisnopeutta, jolloin pedin lämpötilaa voidaan muuttaa nopeasti. Palamisolosuhteisiin voidaan polttoaineen lisäksi vaikuttaa myös jäännöshiilen määrällä pedissä. Jäännöshiilen reaktiivisuus on tärkeää palamisen vakauden takia ja esimerkiksi biopolttoaineiden palamisessa muodostuvan jäännöshiilen määrän vähyys näkyy juuri palamisen epästabiilisuutena. Tourusen mukaan jäännöshiilen määrää pedissä voidaan arvioida savukaasujen happipitoisuuden ja pedin lämpötilan avulla. (Tourunen, 2010)

### **3.2 Laitoksen ajotavat**

Nykyaikaisen, teollisen voimalaitoksen ajotavat voidaan jakaa kolmeen erilaiseen:

1. Koordinoitu ajotapa
2. Kattila seuraa -ajo
3. Turbiini seuraa -ajo

Koordinoidussa ajotavassa sähköverkon tarpeeseen ja taajuusvaihteluun vastataan hallinnoimalla turbiinin sekä kattilan kuormitusta. Tietokonepohjaisen ohjausjärjestelmän tarkoituksena on hallita turbiinin ja kattilan ohjauksia tuottamalla optimaalinen vaatimus

jokaiselle osaprosessille, jotta haluttu tavoitetaso saavutetaan niin nopeasti kuin on mahdollista. Laskennassa ohjausjärjestelmä käyttää turbiinin ja kattilan säätöjen välisiä korrelaatioita sekä huomioi ohjauksen rajoitteet kuten syöttövesipumppujen, polttimien ja puhaltimien kapasiteetit, esilämmittimien toiminnan, turbiinin säätöventtiilin asennon sekä lämpörasitukset turbiinissa ja kattilassa (Joronen et al., 2007). Säätöjärjestelmän tarkoituksena estää turbiinin ja kattilan käsittelyn yhteensopimattomasti. Koordinoitua ajotapaa ei voida kuitenkaan käyttää ennen kuin turbiini sekä kattila ovat kykeneviä täyden kuorman ajoon ilman ongelmia. (Basu & Debnath, 2015) Koordinoitua ajotapaa käytetään yleensä lauhdevoimalaitoksissa, joiden avulla hallitaan sähköverkon taajuuden heilahtelua. Koordinoitu säätötapa vapauttaa operaattorin yksityiskohtaista valinnoista, mutta on rajoitteellinen käytössä. (Joronen et al., 2007) Koordinoitun ajotavan säätörakenne on esitetty kuvassa 10. Kuvasta voidaan huomata, että asetetulla kuormituksella ohjausjärjestelmä arvioi sopivan tuorehöyryn paineen ja säätää rinnakkain turbiinin säätöventtiiliä ja polttoaineen syöttöä.

Kiinteän paineen ajotavassa kattilaan syötetyn polttoaineen massavirralla pyritään pitämään tuorehöyryn paine vakiona. Mitatun höyrynpaineen laskiessa polttoaineen syöttöä aletaan kasvattamaan ja paineen kasvaessa yli asetusarvon, polttoaineen syöttöä vähennetään. Höyryntarpeen tai taajuusvaihtelun muutoksiin pystytään vastaamaan nopeasti tuorehöyryn massavirtaa muuttamalla. (Huhtinen et al., 2013) Tätä ajotapaa käytetään yleensä prosessikattiloissa, joiden höyryn tuotanto riippuu yhteydessä olevan prosessin höyryntarpeesta. Tällaisessa tapauksessa sähköntuotantoa ei ohjata vaan tuotettu sähkö on riippuvainen höyryn tuotannosta eikä turbiini osallistu säätöön. Tästä johtuen ajotapaa kutsutaan kattila seuraa -ajoksi. (Kirkinen, 2002) Kuvassa 10 on esitetty kattila seuraa -säätörakenne. Kuvasta voidaan huomata, että kattilan paineen mittausta ohjaa polttoainetehoa ja höyryn tarpeen kasvaessa pystytään turbiinin läpi menevää höyrymäärää kasvattamaan säätöventtiilin asentoa muuttamalla. Ajotapana kiinteän paineen -ajo on nopein vas-teessaan, sillä turbiinin säätöventtiilin säädöllä saadaan aikaan nopeasti muutos höyryvirtaan.

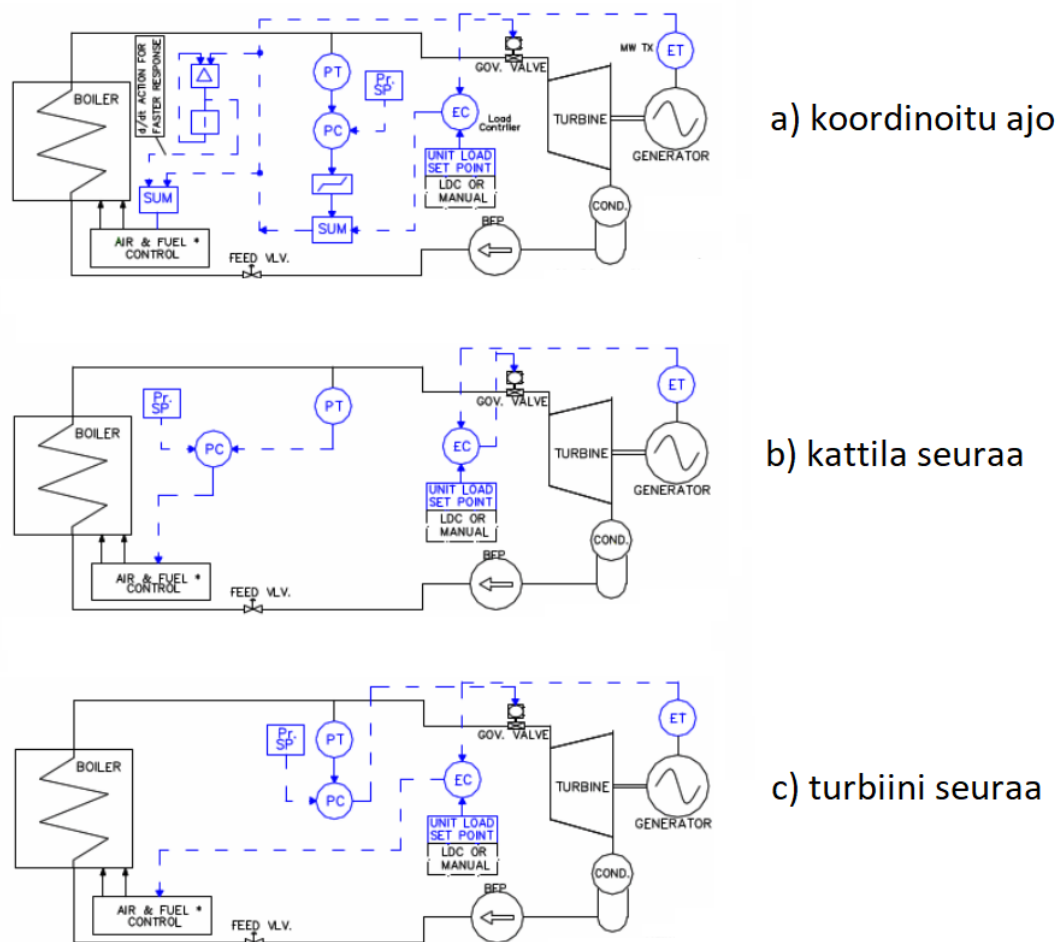
Turbiini seuraa -ajossa generaattorin sähkötehoa ohjataan suoraan kattilan polttoainete-hon mukaan. Turbiini seuraa -ajoa vastaavia säätötapoja on kolme erilaista. Kuvassa 10 on esitetty turbiini seuraa -säätörakenne. Kuvasta nähdään polttoaineen syötön kattilaan ohjautuvan sähköntarpeen mukaisesti. Paineen heilahtelua korjataan turbiinin säätövent-tiilin asentoa ohjaamalla.

Etupainesäädössä pidetään kattilan paine tai höyryturbiinille menevän tuorehöyryn paine vakiona. Painesäädön lisäksi kattilaan syötettävän polttoaineen määrää säädellään laitok-sen sähkötehon mukaan. Tässä säätötavassa höyryn paine pysyy hyvin vakiona, mutta muutokset kattilan paineessa näkyvät välittömästi generaattoritehossa ja säätötapa on hi-das tehon muutoksissa. (Huhtinen et al., 2000) Etupainesäätöä käytetään kiinteän paineen säädön tapaan prosessihöyryn tai kaukolämmön yhteistuotantolaitoksissa, joissa höyryn-tarve on sähköntuotantoa määräävämpi tekijä (Huhtinen et al., 2013).

Liukuvan paineen säädössä tuorehöyryn paine määräytyy lineaarisesti kattilan lämpöte-hon mukaan. Säätötavassa generaattorin sähkötehon perusteella säädetään kattilalle syö-tettävä polttoaine ja turbiinin säätöventtiili pidetään täysin auki. Liukuvan paineen säädön etuna on hyvä hyötysuhde osakuormalla ja virtausolosuhteiden stabiili muuttuminen höy-rystinessä. Osakuormaa ajettaessa vältetään syöttöveden turha pumppaaminen, koska paine seuraa lineaarisesti sähkötehoa. Tasaisesti muuttuvien olosuhteiden ansiosta myös turbiini rakennetta pystytään yksinkertaistamaan, sillä turbiinin kuoreen ja roottoriin ei kohdistu suurista lämpötilaeroista johtuvia lämpöjännityksiä. Lisäksi turbiinin käynnistä-minen jo pienellä kattilapaineella on mahdollista. (Huhtinen et al., 2000) Liukuvan pai-neen säätöä käytetään suurikokoisissa, sähköä tuottavissa voimalaitoksissa (Huhtinen et al., 2013).

Liukuvan paineen säätötavan yksi variaatio on ohjattu liukuvan paineen säätö, jossa tur-biinin säätöventtiiliä pidetään vakioasennossa, kuitenkin hieman kuristettuna. Venttiilin asentoa muuttamalla säädetään höyrynpainetta ja pystytään vastamaan nopeaan tehon tar-peen muutokseen, jolloin hyödynnetään kattilan höyryvarastoa. Höyrynpaineen minimi

ja maksimiarvoilla ajettaessa kattilan polttoaineensyötön säädintä ohjataan tuorehöyryn paineen arvolla ja säätötapa vastaa kiinteän paineen säätöä. (Huhtinen et al., 2000)



Kuva 10. Voimalaitoksen ajotapojen säätökytkentöjen erot. (Basu & Debnath, 2015)

### 3.3 Kiertoleijukattilan kuormanmuutos

Laitoksen tuottaman höyryn käyttökohde määrää vaatimukset sille, kuinka usein ja nopeasti höyryn tuotantoa on muutettava. Alun perin kiertoleijukattiloita käytettiin paperitehtaissa, joissa kuorman suuruus vaihtelee paperituotannon mukaan (Basu, 2015). Kuormanmuutoskyky on nykyisin tullut entistä tärkeämmäksi myös pelkässä sähköntuotannossa.

nossa. Nopealla reagoinnilla kuorman muuttumiseen saavutetaan säästöä polttoaineen kulutuksessa ja tuotantolaitteiden kuluttamassa energiassa, jolloin tuotetaan energiaa tehokkaammin.

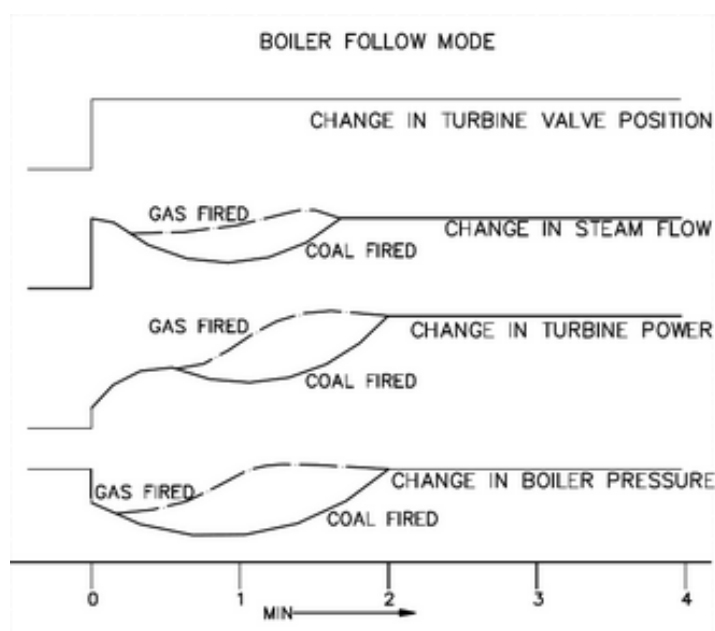
Höyrykattilan höyryntuotantoa muutetaan säätämällä kattilaan syötettävää polttoainetta, palamisilmaa ja syöttövettä. Tulipesässä tuotettu energia siirtyy lämpöenergiana kiertoleijukattilan tapauksessa kiertävään petimateriaaliin, rakenteisiin, lämmönsiirtopintoihin ja sitä kautta tulipesää jäähdyttävään vesi-höyrypiiriin. Lämpöenergiaa poistuu myös savukaasujen mukana savukaasukanavaan.

Kaikki polttoaine ei pala välittömästi vaan suuremmat polttoainepartikkelit sekoittuvat petihiekan sekaan. Tuoreen polttoaineen lisäksi reagoineen polttoaineen jäännöshiiltä ja tuhkaa on varastoituneena leijupetiin. Luonnonkiertokattiloiden suuret virtausputket ja lieriö varastoivat energiaa veden ja höyryn muodossa (Huhtinen et al., 2000). Nämä energiavarastot muodostavat kapasiteetin, joka hidastaa kuorman muuttamista. (Kirkinen, 2002)

Kattilaan varastoitunutta energiaa voidaan myös käyttää hyödyksi. Lieriökattiloissa suuri vesitilavuus toimii puskurina nopeissa kuormanmuutoksissa siten, että äkillisen höyryntarpeen lisääntyessä tuorehöyryn paine ja höyrystymislämpötila pyrkivät laskemaan, jolloin lämpötilan laskua vastaava energiamäärä alkaa höyrystämään vettä nopeammin ja kasvattamaan näin höyryntuotantoa. (Huhtinen et al., 2000)

Matalassa lämpötilassa kivihiilen palaminen tapahtuu viiveellä ja 1 mm halkaisijaltaan olevan polttoainepartikkelin loppuun palamisaika on noin 15 min, joten partikkeli voi kiertää useitakin kierroksia tulipesän ja syklonierottimen välillä. Biopolttoainetta poltettaessa palaminen tapahtuu nopeammin ja valtaosa palamisessa vapautuvasta lämpöenergiasta syntyy petimateriaalin varastoituneen polttoaineen palamisesta. Petiin sekoittuneen polttoaineen määrää reaaliaikaisesti valvomalla, voidaan palamisessa syntyvään hitauteen vastata polttoaineen syötöllä tehokkaammin. (Gao et al., 2016)

Höyryn paine on kaikkein tärkein parametri kattilan ohjauksen kannalta. Höyryn paineen arvo kertoo tasapainon tuotettavan höyryn ja halutun tuotantotason vaatiman lämmön- tuonnin ja polttoainemäärän välillä. Koko laitoksen ohjauksen kannalta kattila onkin yleensä rajoittavampi tekijä kuormanmuutoksissa, koska kattilan ohjattavuus on vahvasti riippuvainen osaprosesseista ja termisestä kapasiteetista. (Basu & Debnath, 2014) Kattilan sisältämien energiavarastojen takia, kuormaa kasvatettaessa on kattilaa yliajettava hetkellisesti, jotta energiavarastot täytyisivät (Kirkinen, 2002). Kuvassa 11 on esitetty kuormanmuutos, kun ajotapana on kattila seuraa. Höyryn tarpeen kasvamisen seurauksena turbiinin säätöventtiiliä ohjataan enemmän auki. Muutos venttiilin asennossa saa aikaan nopeasti höyryvirran kasvun, joka höyryvaraston tyhjenemisen jälkeen täytyy kompensoida apupoltinta käyttäen. Tasainen, haluttu höyryvirtaus saavutetaan vasta höyryvaraston täyttymisen jälkeen.



**Kuva 11.** Kuormanmuutos, jossa on esitetty korjaavat toimenpiteet halutun höyryntuotantotason saavuttamiseksi. (Basu & Debnath, 2015)

### 3.4 Kuormanmuutosnopeus

Kattilan höyryntuottoa on tarvetta säätää halutun höyryvirran kasvattamisen tai pienentämisen takia. Höyryn lämpötila ja paine eivät saisi kärsiä, vaikka höyryvirtaus pienenesi,

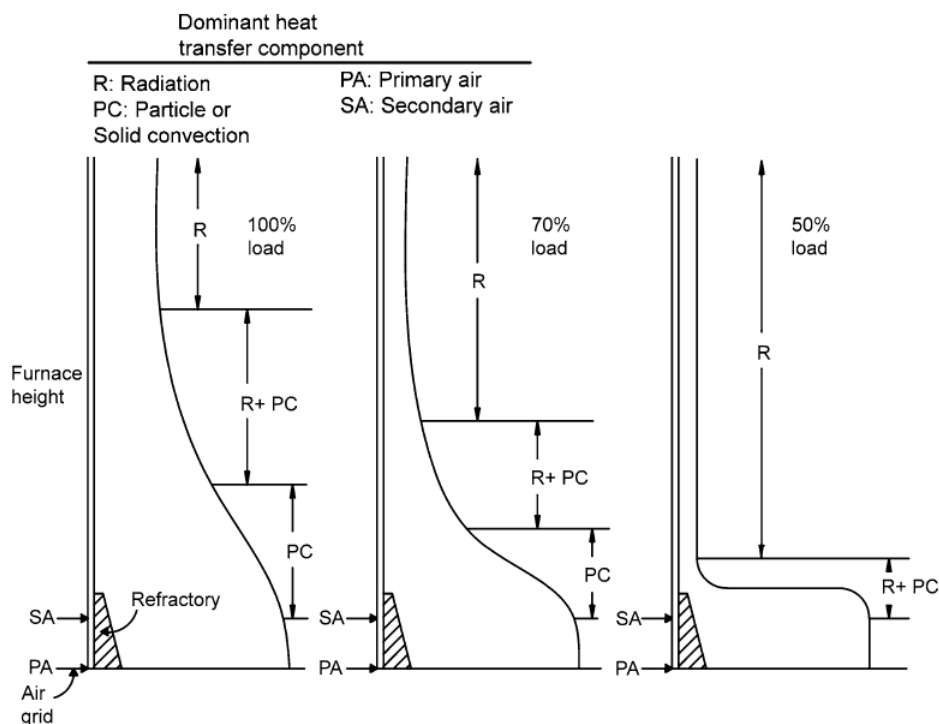
joten muutos on tehtävä tasaisesti ja hallitusti. Laitoksen kuormanmuutoskykyä kuvataan kuorman muutoksella jatkuvasta kuormasta (MCR) yksiköllä prosenttia minuutissa. Kuorman muutoksella tarkoitetaan höyryvirtauksen prosentuaalista muutosta suhteessa kuluneeseen aikaan (Kirkinen, 2002).

Höyryntuotannon muuttaminen kiertoleijukattilassa edellyttää kahdenlaisia toimia, polttoaineen syötön sääntelyä sekä lämmön absorboinnin hallintaa kattilassa. Kiertoleijukatilan kuorman muuttaminen tyypillisesti vie aikaa 10–20 minuuttia, johtuen lämpökapasiteetista (Vakkilainen, 2017). Kuormanmuutosnopeuteen vaikuttaa toki myös kattilan koko ja käytetty polttoaine. Sopivaa ajotapaa käyttäen on mahdollista päästään 2–4 %/min kuormanmuutokseen 100–50 % kuormituksella ja vielä 50–30 % kuormalla 1–2 %/min kuormanmuutosnopeuteen. Nopeaa kuorman muuttamista rajoittaa termisen hitauden lisäksi turbiinin osien sallittu lämpötilavaihtelu. (Basu, 2015)

Kirkisen tekemän vertailun mukaan polttoaine vaikuttaa suuresti kuormanmuutosnopeuteen ja toteaakin kuormanmuutosnopeuden riippuvan pitkälti polttoaineen palamisnopeudesta (Kirkinen, 2002). Palamisprosessiin liittyvää hitautta lisäävät palamattoman polttoaineen reaktiot, palamisen riippumattomuus polttoaineen syötöstä, syöttölaitteiden tuottama epätasainen syöttövirta ja biopolttoaineiden tapauksessa epähomogeenisuus (Vakkilainen, 2017). Lisäksi veden faasimuutoksella on oma aikavakionsa, joka vaikuttaa kuormanmuutosnopeuteen (Kirkinen, 2002).

### **3.5 Lämpöenergian hallinta tulipesässä**

Palamisessa syntyvää lämpöenergiaa pystytään absorboimaan tulipesässä sijaitsevien lämmönsiirtopintojen ja mahdollisen ulkoisen lämmönsiirtimen avulla. Tulipesässä vallitseva lämmönsiirtymismekanismi vaihtelee kattilan kuormituksen mukaan ja kuvassa 12 on esitetty lämmönsiirtomekanismien jakaantuminen, erilaisilla kuorman arvoilla.



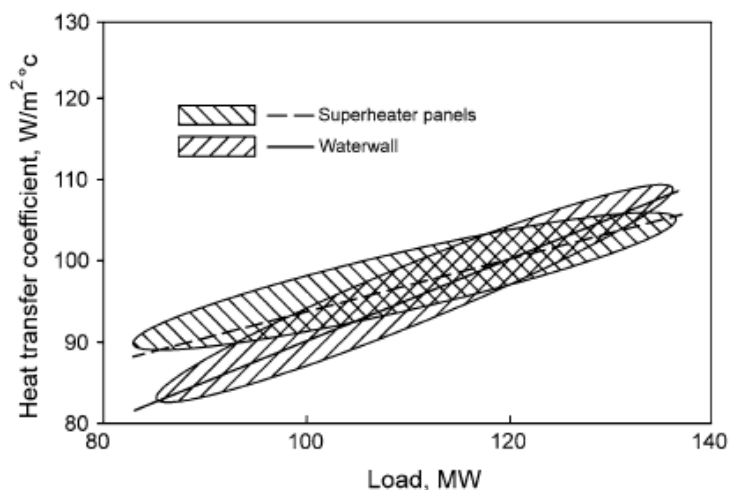
**Kuva 12.** Pedin kiintoaineiden pitoisuuden ja lämmönsiirtomekanismin jakautuminen eri kuormilla. (Basu, 2015)

Suuremmilla kuormilla leijutuskaasun syöttöä ja nopeutta on lisättävä, jolloin kiintoainetiheys tulipesän yläosassa kasvaa. Tällöin kiintoainepartikkelien sekoittuminen on voimakasta, mikä tasoittaa lämpötilaeroja tulipesässä ja tehostaa palamista. (Raiko et al., 2002) Täydellä kuormalla konvektiivisen lämmönsiirron osuus keskiosassa ja ylempanä tulipesää kasvaa suspensiotiheyden kasvun myötä. Kuitenkin aivan tulipesän yläosissa säteily on edelleen vallitseva lämmönsiirron muoto. Näin pedin kiintoainetiheyttä muuttamalla pystytään vaikuttamaan lämmönsiirtymiseen. (Basu, 2015)

Pienemillä kuormilla ilmansyöttöä muuttamalla, kiintoainevirtaus heikkenee ja säteilystä tulee yhä suuremmissa osaa tulipesää hallitseva lämmönsiirtomuoto. Kuorman suuruus itsessään vaikuttaa lämmönsiirtokykyyn tulipesässä ja kuvassa 13 on havainnollistettu lämmönsiirtokertoimen muuttuminen 135 MW kiertoileijukattilan lämmönsiirtopinnoilla. Kuvasta voidaan nähdä, miten suurimmat lämmönsiirtokertoimet höyrysti-

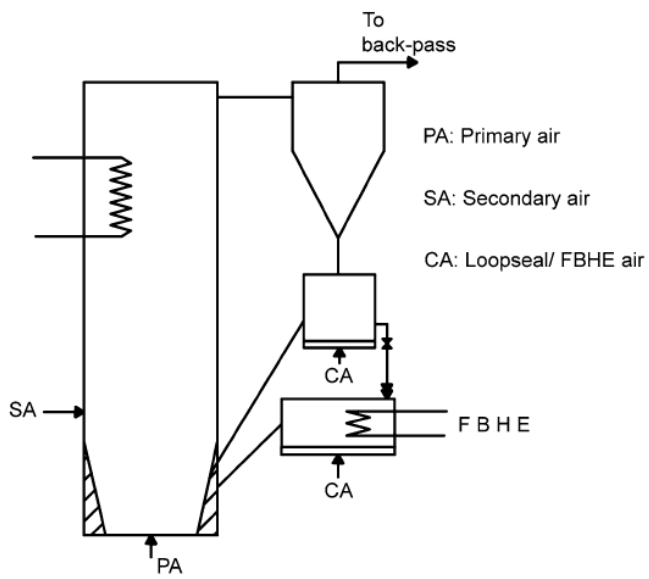


messä ja tulistinpinnoilla saavutetaan suurilla kuorman arvoilla. Alhaalta muurattu tulipesä ei absorboi hirveästi lämpöä vaan lämpö siirtyy pääosin, ylempänä sijaitsevien lämmönsiirtopintojen kautta. Tulipesän olosuhteita muuttamalla voidaan vaikuttaa lämmönsiirtymiseen, josta on puhuttu aiemmassa kappaleessa.



**Kuva 13.** 135 MW kiertoileijukattilan lämmönsiirtopintojen lämmönsiirtokertoimen riippuvuus kuormasta. (Basu, 2015)

Kattilan lämmönsiirtoa voidaan hallita myös ulkoisen lämmönsiirtimen avulla. Leijukerros­lämmönsiirtimessä (FBHE) voidaan ottaa talteen lävitse virtaavien kiintoainepartikkeleiden lämpöä ja hallita hiekan kierrätystä tulipesään. Erityisesti FBHE:llä parannetaan kattilan säädettävyyttä, jos on tarvetta vaihtaa polttoainetta kesken ajon, koska tällöin myös petilämpötilaa on muutettava. Polvilukkoon syötetään ilmaa, jolla varmistetaan kiintoainepartikkelien haluttu kierto. Näin voidaan ohjata kiintoainepartikkelien kulkua lämmönsiirtimeen tai sen ohitse suoraan tulipesään, jolloin on mahdollista hallita höyrypiiriin siirrettävää lämpöä. (Basu, 2015) FBHE:n rakenne ja sijainti on esitetty kuvassa 14.



**Kuva 14.** Leijukerroslämmönsiirrin ja kattilan palamisilman syöttöpisteet. (Basu, 2015)

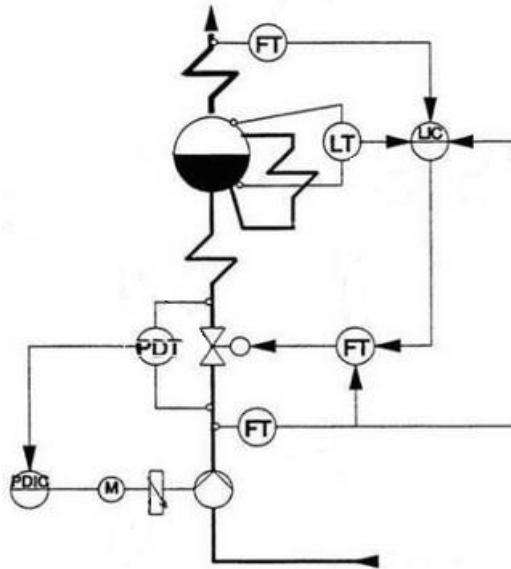
## 4 KIERTOLEIJUKATTILAN SÄÄTÖ

Tässä kappaleessa käsitellään höyrykattilan tuotannon kannalta tärkeimpien osaprosessien laitteiden säätöperiaatteita. Hallitun palamisen kannalta tärkeimpiä säätökohteita ovat polttoaineen syötön, palamisilman ja tulipesän paineen hallitseminen. Lisäksi kattilan tuotannon kannalta sopivan höyryn lämpötilan saavuttaminen ja luonnonkiertokattilassa lieriön pinnan korkeuden hallitseminen on tärkeää.

### 4.1 Lieriökattilan syöttövesivirtauksen säätö

Syöttöveden virtausta säätämällä pyritään pitämään lieriön pinta vakiona. Kuormanvaihteluista aiheutuu tiheydenmuutoksia kattilaveteen, jonka seurauksena myös lieriön pinnan korkeus vaihtelee. Pinnankorkeuden ailahtelevaisuuden takia ei säädön ohjausta voida toteuttaa pelkästään pinnankorkeuden lukeman perusteella, sillä tämän johdosta voitaisiin tehdä vääriä tulkintoja ohjauksen kannalta. Nopean höyryntuotannon kasvattamisen seurauksena höyryn paine alkaa laskea, jolloin lieriön vesi alkaa kuplia ja kuplien osuuden kasvaessa pinnan korkeus alkaa nousta. Jos syöttöveden virtaussäätö tapahtuisi ainoastaan pinnankorkeuden mukaan alettaisiin syöttöveden virtausta rajoittaa, mikä johtaisi ennen pitkään lieriön kuivumiseen. Ongelmaksi myös muodostuisi kylmemmän syöttöveden pumppaaminen lieriöön, joka alkaa jäähdyttämään vettä lieriössä. Lieriön veden pinta alkaisi laskea, sillä kylmän veden tiheys on lämmitä suurempi ja näin antaisi väärää tietoa tarvittavasta syöttövesimäärästä. (Huhtinen et al., 2000)

Syöttövesivirtauksen säätö on toteutettu kolmipistekaskadisäätönä, jolloin lieriön pinnan lukeman lisäksi otetaan huomioon myös tuorehöyryvirta sekä syöttövesivirta. Lieriön pinnan hallinta on vaikeimpia säätöä vaativia kokonaisuuksia johtuen useasta erillisestä säätökytkennästä. (Vakkilainen, 2017) Lieriön pinnan säätökytkentä on esitetty kuvassa 15.



**Kuva 15.** Lieriön pinnan ja syöttöveden pumppauksen säätökenttä. (Vakkilainen, 2017)

## 4.2 Polttoainekuorman hallinta

Tulipesään syötettävän polttoaineen määrää säädetään kattilan tehon asetusarvon mukaan. Kattilatehon asetusarvo puolestaan määräytyy tuorehöyryn paine-ero poikkeamasta, sähkötehon säätöpoikkeamasta tai turbiinin säätöventtiilin asentopoikkeamasta. (Huhtinen et al., 2000)

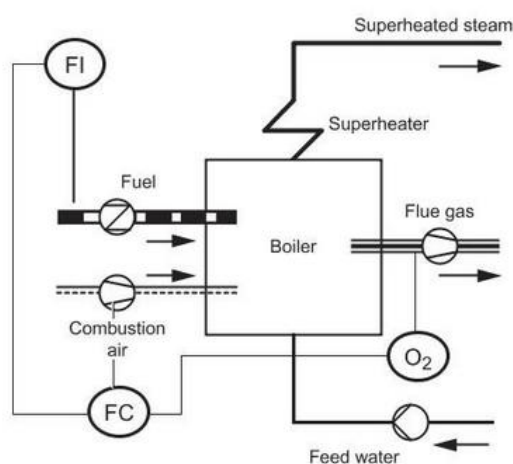
Kiertoleijupoltossa ulkoinen häiriötekijä polttoprosessissa on polttoaineen laadunvaihtelut, jotka näkyvät partikkelien lämpöarvossa. Tätä korjataan automaattisesti syötön määrää säätelemällä, mutta lisäksi peti itsessään tasoittaa näitä lämpötilaeroja.

Kiertoleijukattilaa voidaan ajaa parhaimmillaan jopa 30 % kuormalla maksimitehosta ilman apupoltinta. Apupolttimessa käytetään yleensä öljyä, joka on primääripolttoaineeseen verrattuna kallista. Vähäinen apupolttimen käytön tarve on selkeä etu verrattuna esimerkiksi hiilen pölypolttoon, jossa apupolttimia tarvitaan useammin kuorman muuttuessa. Kun kiertoleijukattilaa ajetaan pienillä kuormilla, voidaan polttotapana käyttää kuplivia petiä kiertoleijupolton sijasta. (Basu, 2015)

### 4.3 Palamisilman hallinta

Kattilaan syötettävää palamisilmaa säädetään syötetyn polttoainemäärän mukaisesti. Polttoaineen ja ilman suhde tulee olla oikea, sillä liian pienellä ilmamäärällä palaminen tapahtuu epätäydellisesti ja toisaalta liian suuri ilmamäärä kasvattaa savukaasuhäviöitä. Palamisilman syöttöä pääasiassa säädetään polttoaineen syötön ja savukaasun  $O_2$ -pitoisuuden mukaan. Usein palamisilman säätö tapahtuu kattilatehon kautta, rinnakkain polttoainesyötön kanssa, jolloin muutokset heijastuvat ilman syöttöön. Palamisilmaa säädetään puhaltimen siipikulmaa tai kierrosnopeutta säätämällä. Näin voidaan ennakoida heilahteluja ja häiriöitä polttoaineen syötössä. Kivihiiltä polttavassa kattilassa savukaasun  $O_2$ -pitoisuus on yleensä 2–4 % luokkaa. (Huhtinen et al., 2000) Palamisilman säätökytkennän periaate on esitetty kuvassa 16. Kuvasta voidaan nähdä palamisilman ohjaimen säätävän ilmamäärää savukaasun jäännöshapen ja polttoainemäärän mukaan.

Palamisilman syötöllä voidaan myös hallita pedin koostumusta tulipesässä. Primääri- ja sekundääri-ilmaa voidaan tarpeen tullen säätää esimerkiksi vastaamaan osakuormaa. Tällöin leijutuskaasun nopeutta pienennetään ja primääri-ilmansyötön osuutta voidaan kasvattaa. Tällöin peti saadaan käyttäytymään kuin kuplapeti, jolloin säteilylämmönsiirron osuus kasvaa. (Basu, 2015)



**Kuva 16.** Tulipesän palamisilman säätökytkentä (Vakkilainen, 2017)

#### **4.4 Tulipesän paineen hallinta**

Tulipesässä pyritään pitämään pientä alipainetta, jotta savukaasut eivät vuoda kattilahuoneeseen. Savukaasut imetään tulipesästä, savukaasukanavaa pitkin savukaasupuhaltimella. Matkalla puhaltimille savukaasut kulkevat sähkönsuodattimen lävitse, jossa savukaasuista erotetaan hienojakoinen lentotuhka. Savukaasupuhaltimia säädetään tyypillisesti kierroslukua tai siipikulmaa muuttamalla, niin kuin palamisilmapuhaltimiakin. Tulipesän painetta säädetään paineen mittauksella tulipesässä, josta mittaviestin välityksellä säädetään suoraan puhaltimen pyörimisnopeutta. Puhaltimen kierrosnopeutta kasvattamalla tulipesästä poistuva savukaasuvirta kasvaa ja paine tulipesässä pienenee. Jos halutaan tulipesässä paineen kasvavan, tulee kierrosnopeutta pienentää. (Huhtinen et al., 2000)

#### **4.5 Tulistetun höyryn lämpötilan säätö**

Kuorman suuruudesta riippuen usein täyttä kuormaa ajettaessa tulistetun höyryn lämpötila saattaa nousta liian korkeaksi tulistinpintoja ja turbiinia ajatellen. Tulistetun höyryn lämpötilaa on tarvetta säädellä myös tasaisen lämpötilan saamiseksi. Höyryn lämpötilaa voidaan säätää neljällä tavalla:

1. Höyrysäätö
2. Ruiskutussäätö
3. Lämmönsiirtimellä
4. Savukaasusäädöllä

Tulistetun höyryn lämpötilaa voidaan hallita ohjaamalla kolmitieventtiilin kautta höyryä tulistimen ohitse suoraan tulistimelle. Tulistetun höyryn lämpötilan mittauksesta lähetetään mittaviesti säätöventtiilille sopivan lämpötilan saamiseksi. Höyryllä jäähdyttäminen on melko hidasta ja siksi se soveltuu parhaiten pienemmän kokoluokan laitoksiin. (Huhtinen et al., 2000)

Ruiskutussäätö on varsin yleinen tapa säädellä tulistetun höyryn lämpötilaa. Syöttövettä ruiskutetaan syöttölinjaan pisaroina ja vesipisarot sekoittuessaan höyryvirtaan laskevat

höyryn lämpötilaa. Ruiskutussäädön etuna on sen yksinkertaisuus ja edullisuus. Syöttöveden laadun tarkkailuun tulee kuitenkin kiinnittää paljon huomiota, sillä epäpuhtaudet vedessä aiheuttavat vahinkoa tulistinpinnoilla ja turbiinin siivissä. (Vakkilainen, 2017)

Dolezal-säätömenetelmää käytetään, kun syöttöveden laadun hallinta on haastavaa tai kattila käyttää paljon prosessilauhdetta (Vakkilainen, 2017). Menetelmässä lieriöstä otettua kylläistä höyryä, joka lauhdutetaan kylmemmän syöttöveden avulla lämmönsiirtimessä. Lauhtunutta höyryä voidaan käyttää ruiskutukseen tulistetun höyryn joukkoon, tuorehöyryn lämpötilan säätelemiseksi. Menetelmän etuna saavutetaan puhdasta ruiskutusvettä. (Huhtinen et al., 2000)

Erillisellä lämmönsiirtimellä voidaan jäähdyttää savukaasuvirtaa tulistimien välissä siirtäen lämpöä esimerkiksi syöttövesivirtaan. Vastaavanlaista kytkentää voidaan myös käyttää esimerkiksi varsinaisen tulistimen ja välitulistimen välillä. Lämmönsiirtimiä käyttäessä voi kuitenkin haasteeksi muodostua järjestelmän monimutkainen rakenne ja kalleus. Välitulistushöyryn lämpötilaa jäähdyttäviä säätöratkaisuja tarvitaan lähinnä suurilla tehoilla, jolloin konvektiolämmönsiirron lisääntyminen kasvattaa välitulistuslämmönsiirrimen lämpötehoa. (Huhtinen et al., 2000)

Tulistuksen säätöön voidaan kiertoleijukattilassa käyttää savukaasuvirran kierrätystä tulipesään sopivan tulistuslämpötilan saamiseksi. Savukaasuvirran uudelleen kierrätyksellä voidaan pienentää tulipesän ulostulon lämpötilaa, pienentäen säteilylämmönsiirtoa ulostulossa, jossa säteilytulistimet usein sijaitsevat. Tällöin kuitenkin konvektiolämmönsiirto parantuu tulistinpinnoilla. Huhtinen kertoo savukaasujen kierrätyksen pienentävän tulipesän tehoa 10 % ja toisaalta kasvattaen välitulituksen tehoa 10 % (Huhtinen et al., 2000). Savukaasuvirran kierrätystä tulipesään voidaan käyttää myös typenoksidipäästöjen hillitsemiseksi. (Vakkilainen, 2017)

Välitulituksen ja esilämmityksen suuruutta voidaan säätää savukaasun ohjauksella. Savukaasukanava voidaan jakaa kahteen rinnakkaiseen linjaan, jolloin säätöpeltiä käyttäen voidaan säädellä tulistinpintojen lävitse tai ohitse kulkevaa savukaasuvirtaa. (Vakkilainen, 2017)

## 5 YHTEENVETO

Tässä työssä selvitettiin, kuinka luonnonkiertoisen kiertoleijukattilan dynamiikka käyttäytyy ja minkälaista säätötekniikkaa kattilan osaprosessien hallitsemiseen tarvitaan. Kattilan dynamiikka ja kuormanmuutos ovat vahvasti riippuvaisia polttoaineen palamisprosessista, lämmönsiirrosta vesi-höyrypiiriin, systeemiin varastoituneesta energiasta ja prosessin viiveistä. Kaikki osaprosessit hidastavat kattilan kuormanmuutosta, joten tuotannon tehokkuuden edelleen parantamiseksi on tehtävä tutkimusta, jotta kaikki osa-alueet saadaan toimimaan saumattomasti yhteen. Mahdollisia tutkimusalueita olisivat lämmönsiirron mallien kattavuuden kehittäminen ja edelleen osakuormalla kattilan käyttäytymisen analysoiminen.

Kiertoleijukattilassa pystytään tehokkaasti hyödyntämään polttoaineen energia ja kattilaa on mahdollista säätää hyvin, oikean kuorman saavuttamiseksi. Parhaiten tulipesän palamisolosuhteisiin vaikutetaan kuitenkin leijutuksella, jolloin voidaan pedin tiheyttä muuttaa. Polvilukkoon sijoitettavalla lämmönsiirtimellä voidaan edelleen parantaa kattilan säädettävyyttä, jolloin pystytään säätelemään petihiekan ja palavan polttoaineen kiertoa takaisin tulipesään. Pedin sitoma lämpöenergia on etu palamisprosessin kannalta, koska se mahdollistaa kostean polttoaineen käytön. Toisaalta hiekan suuri massa aiheuttaa juuri termistä hitautta, mikä osaltaan hidastaa kattilan käsittelyä.

Nykyaikaiset säätötekniikat ovat jo pitkälle kehittyneitä, mutta mittaustekniikoiden kehityksellä voidaan parantaa edelleen kattilan käytettävyyttä ja tehokkuutta. Sähkön tehokkaan varastoinnin edelleen puuttuessa tulee miettiä vaihtoehtoja kuinka ylimääräistä sähköenergiaa pystytäisiin käyttämään, jotta sähköä voitaisiin hyödyntää myöhemmin esimerkiksi toisessa muodossa. Lämmön osalta tilanne on parempi, sillä useat kaukolämpöä tuottavat laitokset käyttävät tuotannon säätelyyn kaukolämpöakkua.

Kirjallisuustyöstä tuli kattava kokonaisuus, jossa on koottu palamisen, lämmönsiirron ja käsittelyn kannalta kattilan keskeisiä ominaisuuksia, jotka vaikuttavat dynaamiseen käyt-



täytymiseen. Lisäksi työssä kuvattiin höyryntuotannon kannalta tärkeimpien osaprosessien säätötavat, jotka helpottavat ymmärtämään prosessin kokonaisuutta. Kirjallisuustyötä voidaan jatkossa käyttää esimerkiksi kattilatyypien vertailuun tai opetuskäyttöön.

## 6 LÄHDELUETTELO

Andersson B. -Å., 1995, Effect of bed particle size on heat transfer in circulating fluidized bed boilers, *Power Technology*, 239 –248.

Basu Prabir, 2015, Circulating fluidized bed boilers, Switzerland, Springer international publishing, s.370, ISBN: 978-3-319-06172-6

Basu Swapan, Ajay Kumar Debnath, 2015, Power plant instrumentation and control handbook, Academic press of Elsevier, s.920, ISBN: 978-0-12-800940-6

Cheng Leming, Wang Qinhuai, Shi Zenglun, Luo Zhongyang, Ni Mingjiang, Cen Kefa, 2007, Heat transfer in a large-scale circulating fluidized bed boiler, Higher Education Press and Springer-Verlag, *Energy Power*, 477 –482.

Eriksson Morgan, Golriz Mohammad R., 2004, Radiation heat transfer in circulating fluidized bed combustors, *International Journal of Thermal Sciences*, 399 –409.

Gao Mingming, Feng Hong, Jizhen Liu, 2016, Investigation on energy storage and quick load change control of subcritical circulating fluidized bed boiler units, The State key laboratory of alternate electric power system with renewable energy sources, North China electric power university, *Applied Energy*, 463 –471.

Huhtinen Markku, Kettunen Arto, Nurminen Pasi, Pakkanen Heikki, 2000, Höyrykattilatekniikka, opetushallitus, 5. painos, Helsinki, Oy Edita Ab, s.379, ISBN:951-37-3360-2

Huhtinen Markku, Korhonen Risto, Pimiä Tuomo, Urpalainen Samu, 2013, Voimalaitostekniikka, opetushallitus, 2. painos, Tampere, Juvenes Print – Suomen Yliopistopaino Oy, s.344, ISBN:978-952-13-5426-7

Kaikko Juha, Saari Jussi, 2018, Voimalaitosopin perusteet -kurssin luento, Höyryvoimalaitokset, Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Kirkinen Ari-Pekka, 2002, Kiertoleijukattilan dynamiikan mallipohjainen analysointi, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, s.160

Parkkonen Riku, Nuortimo Kalle, Jäntti Timo, 2014, Initial operating experiences of the 135 MWe Kladno Lignite Fired Power Plant, Foster Wheeler, *Power Gen Europe*, 1-18.

Raiko Risto, Saastamoinen Jaakko, Hupa Mikko, Kurki-Suonio Ilmari, 2002, Poltto ja palaminen, Helsinki, International flame research foundation -Suomen kansallinen osasto, s.750, ISBN: 951-666-604-3

Tourunen Antti, 2010, a study of combustion phenomena in circulating fluidized beds by developing and applying experimental and modelling methods for laboratory-scale reactors, väitöskirja, Lappeenrantaan teknillinen yliopisto, Digipaino, s.81, ISBN:978-952-265-029-0

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2018, Tiedote kivihiilen kiellosta 2029, [verkkajulkaisu], Julkaistu 10.4.2018, [viitattu 19.9.2018], Saatavissa: [https://tem.fi/artikkeli/-/asset\\_publisher/ministeri-tiilikainen-kivihiilen-kielto-2029-kannustepaketti-nopeille-luopujille](https://tem.fi/artikkeli/-/asset_publisher/ministeri-tiilikainen-kivihiilen-kielto-2029-kannustepaketti-nopeille-luopujille)

Vakkilainen Esa, 2017, Steam generation from biomass, Amsterdam, Butterworth-Heinemann, s.303, ISBN:978-0-12-804389-9