

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Leijukerroslämmönsiirtimen toiminta

The operation of fluidized bed heat exchanger

Työn tarkastaja: Jouni Ritvanen

Työn ohjaaja: Jouni Ritvanen

Lappeenranta 16.4.2015

Kalle Vuorenmaa

TIIVISTELMÄ

Kalle Vuorenmaa

Leijukerroslämmönsiirtimen toiminta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2015

37 sivua, 1 taulukko, 17 kuvaa

Hakusanat: leijukerroslämmönsiirrin, kierto-leijukattila

Tässä kandidaatin työssä esitellään ensin lyhyesti kierto-leijukattiloiden toimintaa ja kiintoainepiirin lämmönsiirtopintoja. Työssä perehdytään leijukerroslämmönsiirtimen toimintaan ja eri kattilavalmistajien rakenneratkaisuihin. Lisäksi esitellään lyhyesti happipoltoa ja leijukerroslämmönsiirtoon vaikuttavia tekijöitä.

Kierto-leijupoltto soveltuu biopolttoaineiden ja heikkolaatuisten fossiilisten polttoaineiden polttoon, jotka tulevat olemaan vielä pitkään energiantuotannon perustana. Kierto-leijukattiloiden skaalaus ongelmiin on kehitetty erilaisia ulkoisia leijukerroslämmönsiirtimiä.

Tämän työn tarkoituksena on antaa kuva leijukerroslämmönsiirtimen toiminnasta ja rakenteesta. Lisäksi työssä perehdytään leijukerroslämmönsiirtoon.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Kiertoleijukattila	6
2.1 Kiertoleijukattilan toimintaperiaate	7
2.2 Kiertoleijukattilan lämmönsiirtimet	8
2.2.1 Höyrystinputkisto	9
2.2.2 Tulistimet	11
3 Leijukerroslämmönsiirrin	12
3.1 Ulkoinen leijukerroslämmönsiirrin	13
3.2 Pneumaattisesti kontrolloitava leijukerroslämmönsiirrin	16
3.3 Integroitu leijukerroslämmönsiirrin	18
4 Materiaalivalinnat	22
4.1 Tulistin materiaalit	22
4.2 Massaukset	23
5 Leijukerroslämmönsiirrin happipoltto-olosuhteissa	24
6 Leijukerroslämmönsiirto	26
6.1 Leijukerroslämmönsiirtimen lämpöteho	26
6.2 Leijutusnopeus	27
6.3 Partikkelikoko	28
6.4 Partikkelitiheys	29
6.5 Leijukerroksen lämmönsiirtokerroin	30
7 Yhteenveto	33
Lähdeluettelo	35

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

c	ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]
d	halkaisija	[m]
F_a	kiintoainevirtaus	[kg/s]
h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
T	lämpötila	[°C/K]
t	aika	[s]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
λ	lämmönjohtavuus	[W/mK]
δ_b	kuplien tilavuusosuus	[-]
μ	kaasun dynaaminen viskositeetti	[Pa s]
ε	kiintoaineen tilavuusosuus	[-]
Nu	Nusseltin luku	[-]
Re	Reynoldsin luku	[-]
PC	Pulverized coal	
CFB	Circulating fluidized bed	
EHE	External heat exchanger	
FBHE	Fluidized bed heat exchanger	
IBHX	In bed heat exchanger	

1 JOHDANTO

Energiankulutus maailmalla kasvaa jatkuvasti ja helposti hyödynnettävissä olevien fossiilisten polttoaineiden varat tulevat vähenemään tulevaisuudessa. Myös energiantuotannon päästöjen vähentäminen on tulevaisuudessa tärkeää ympäristön saastumisen vähentämiseksi ja ilmastonmuutoksen torjumiseksi. Siksi onkin tarpeellista kehittää menetelmiä joilla heikkolaatuisia polttoaineita pystytään polttamaan mahdollisimman tehokkaasti ja puhtaasti. (Enerdata 2015)

Kiertoleijupolttolaitos on yksi tulevaisuuden ratkaisuisista puhtaampaan energiantuotantoon. Se mahdollistaa muiden huonolaatuisten polttoaineiden polton hyvällä hyötysuhteella, matalat typen oksidien päästöt ja edullisen rikin poiston. Kiertoleijukattilalla on myös mahdollista toteuttaa hiilidioksidin talteenotto taloudellisesti. (Suraniti, et al. 2009, 1) Vanhoja hiilen pölypolttolaitoksia (PC) onkin korvattu kierto- leijutekniikalla. (Goidich & Hyppänen 2001, 2) Kiertoleijukattiloiden yleinen koko onkin kasvanut 300 MW_e ja rakenteilla on jopa 550 MW_e kattiloita. (Amec Foster Wheeler. A, 17)

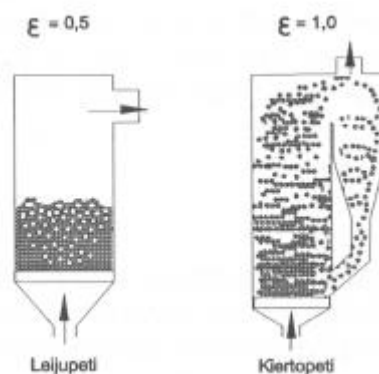
Kiertoleijukattiloiden (CFB) koon kasvattaminen aiheuttaa kuitenkin ongelmia tulipesän lämpötilan hallinnassa, koska tulipesän tehoa tuottava tilavuus kasvaa suhteessa nopeammin kuin ympäröivä lämmönsiirtopinta-ala. (Wang, et al. 2001, 1) Tulipesän lämpötilan rajoittaminen vaatii lämmönsiirtopintojen lisäämistä. Tulipesän haastavien korroosio- ja eroosio-olosuhteiden takia on järkevää sijoittaa lämmönsiirrin tulipesän ulkopuolelle. Yhtenä ratkaisuna on kehitetty erilaisia ulkoisia leijukerroslämmönsiirtimiä, jotka mahdollistavat tulipesän lämpötilan kontrolloinnin.

Tässä kandidaatintyön tavoitteena on kuvata ulkoisen leijukerroslämmönsiirtimen toiminta ja esitellä eri kattilavalmistajien rakenneratkaisuja. Toisena tavoitteena on perehtyä leijukerroslämmönsiirtoon. Lisäksi käydään lyhyesti läpi CFB- kattilan kiintoainekierto- piirin lämmönsiirtopinnat.

2 KIERTOLEIJUKATTILA

Leijukerrostekniikan kaupalliset voimalaitos sovellukset otettiin käyttöön 1970- luvulla ja kierto-leijutekniikka 1980- luvulla. (Basu 2006, 253) Sitä ennen leijukerrostekniikkaa oli jo yleisesti käytetty kemiantekniikassa. Leijukerros-polttoa käytetään erityisesti kosteiden, huonolaatuisten ja tuhkapitoisten polttoaineiden polttoon, koska leijukattilan petimateriaalin suuri lämpökapasiteetti tasaa tehokkaasti polttoaineen laatu-vaihteluja ja mahdollistaa nopean kuivumisen.

Leijukerros-poltto voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: kerrosleijukattila ja kierto-leijukattila. Kerrosleijukattiloissa käytetään alhaisia noin 0,7- 2 m/s leijutusnopeuksia ja pedillä on selkeä pinta. Kierto-leijukattiloissa leijutusnopeudet ovat 3- 10 m/s ja petimateriaali nousee savukaasujen mukana ja palautetaan takaisin tulipesään. (Huhtinen, et al. 2000, 159- 161) Kuvassa 1 on esitetty kerrosleijukattila ja kierto-leijukattilan leijutusperiaate ja kiintoaineen tilavuusosuudet. Kerrosleijukattiloita käytetään yleensä alle 100 MW sovelluksissa ja kierto-leijutekniikkaa taas käytetään yli 50 MW sovelluksissa. Sillä saavutetaan suurempi teho verrattuna samankokoiseen kerrosleijukattilaan. Lisäksi kierto-leijutekniikka soveltuu paremmin hiilen polttoon, koska ulkoinen kierto-piiri mahdollistaa pidemmän palamisajan. (Vakkilainen 2010, 2)



Kuva 1 Leijukerros-poltton päätyypit: vasemmalla kerrosleijukattila, oikealla kierto-leijukattila.

Yksi suurimmista kiertoleijupoltolla saavutettavista eduista on hiilenpolton alhaiset NO_x - päästöt. Alhaiset NO_x - päästöt johtuvat kiertoleijupolton matalasta palamislämpötilasta (850 – 900 °C). (Vakkilainen 2010, 27- 28) Muita kiertoleijupolton etuja verrattuna konventionaalisiin kattiloihin ovat halpa rikinpoisto, joka voidaan toteuttaa lisäämällä kalkkikiveä tai dolomiittia tulipesään. (Huhtinen 2000, 162)

Kuvassa 1 oikealla on CFB- kattilan kiintoainepiirin periaatekuva, johon kuuluvat tulipesä, erotusjärjestelmä ja kiintoaineen palautusjärjestelmä. Tässä kappaleessa esittelemme yleisesti CFB- kattilan toiminnan ja kiintoainepiirin lämpöpinnat.

2.1 Kiertoleijukattilan toimintaperiaate

Leijukerroskattiloissa primääripalamisilma puhalletaan kattilaan tulipesän pohjassa olevien suuttimien kautta. Ilmavirtauksen nopeuden ollessa riittävän suuri (yli minimileijutusnopeuden) alkavat petimateriaalin partikkelit lähteä virtauksen mukaan ja peti alkaa kuplia. Kun leijutusnopeutta kasvatetaan entisestään, yhä enemmän partikkeleja tempautuu virtauksen mukaan eikä petillä ole enää havaittavaa selkeää pintaa. Tällöin puhutaan kiertoleijukattilasta. (Huhtinen 2000, 155)

Kiertoleijupoltossa kiintoaine nousee virtauksen mukana kattilan yläosaan, josta osa kiintoaineesta kulkeutuu savukaasujen mukaan. Savukaasut johdetaan erottimiin, joissa kiintoaine poistetaan savukaasuista ja palautetaan kattilan alaosaan. Yleisimmin erottimina käytetään sykloneita, mutta myös erilaisia impulssierottimia on käytössä. (Basu 2006, 405) Kuvan 4 kattilassa on käytössä u-palkkierotin. Ulkoisella kierrolla tarkoitetaan syklonien kautta kulkevaa virtausta. (Nurminen 2001, 12)

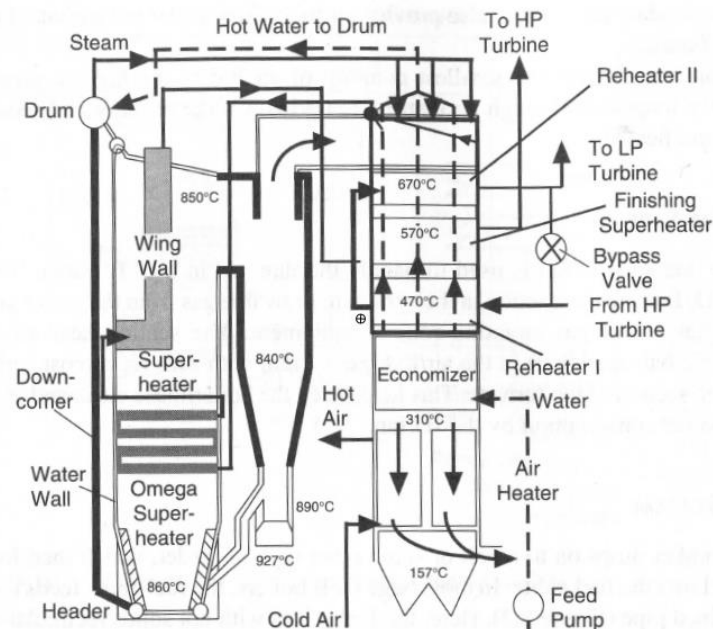
Kiintoaineesta muodostuu kattilan yläosaan tihentymiä, jolloin leijutusnopeus ei enää riitä kannattamaan niitä ja tihentymät vajoavat tulipesän pohjalle. Tämä on erityisen voimakasta tulipesän reunoilla jossa virtausnopeus on pienempi. Tätä kiintoaineiden kiertoa tulipesässä kutsutaan sisäiseksi kierroksi. (Nurminen 2001, 13) Molempien kiintoaineen palautuksen ja kattilan sisäisen kierron ansiosta CFB- kattiloissa

saavutetaan erinomainen sekoittuminen ja tasainen tulipesän lämpötila. (Raiko, et al., 505)

2.2 Kiertoleijukattilan lämmönsiirtimet

Lämmönsiirtimien tarkoitus on siirtää polttoaineesta vapautunut energia vesihöyrypiiriin mahdollisimman tehokkaasti. Tärkeä osa kattilan suunnittelua onkin optimoida lämmönsiirtopintojen alat ja niiden sijoittelu. (Teir 2003, 103)

Kiertopetikkattiloiden lämmönsiirtopinnoissa on muutamia eroja verrattuna muihin kattilatyyppeihin. Tulipesään voidaan sijoittaa eväseinälämmönsiirtimiä (wingwall) ja muita levymäisiä, kuten omega- paneelit ja höyrystinpaneelit (division wall). Lisäksi sykloneissa on lämpöpintoja, niiden jäädyttämiseksi. Uusimpana lämmönsiirtimenä CFB- kattiloihin ovat tulleet erilaiset syklonin paluuvirtaukseen sijoitettavat leijukerroslämmönsiirtimet. (Vakkilainen 2010, 25)



Kuva 2 CFB- kattilan vesihöyrypiiri (Basu 2006, 256)

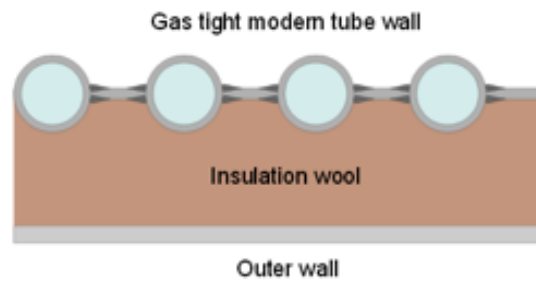
Voimalaitoskattiloissa suurin osa lämmönsiirrosta tapahtuu kuumista savukaasuista kattilan vesihöyrypiiriin. Vesihöyrypiiriin kuuluu kattilan lisäksi useita muita lämmönsiirtimiä ja komponentteja. Kuvassa 2 on erään CFB- kattilan vesihöyrypiiri. Tässä kappaleessa keskitymme vain CFB- kattilan kiintoainepiirin lämpöpintoihin.

2.2.1 Höyrystinputkisto

Höyrystinputkiston tarkoitus on höyrystää kattilaan tuleva syöttövesi. Voimalaitoskattiloissa höyrystinputkistoa ovat yleensä tulipesän seinät ja katto, sekä savukaasukanavien seinät. (Teir 2003, 105) Nykyään varsinkin kompakteissa CFB- kattiloissa myös syklonien seinät ovat osa höyrystinputkistoa. (Huhtinen 2000, 162) Ulkoisten leijukerros­lämmönsiirtimien seinät ovat myös vesijäähdytteisiä, jolloin ne voivat toimia joko höyrystiminä tai esilämmittiminä. (Goidich & Hyppänen 2001, 5)

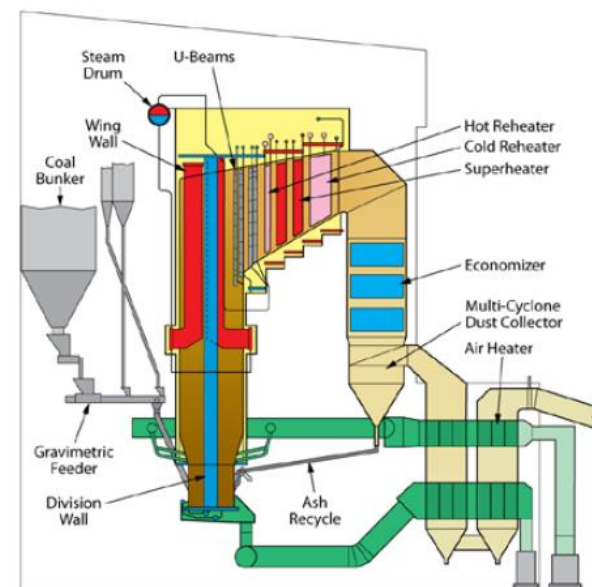
Asettamalla höyrystin kattilan kuumimpaan osaan, saadaan aikaan hyvä jäähdytys, joka suojaa lämpöpintoja ylikuumenemiselta. Höyrystinputkien lämpötila nousee yleensä vain vähän yli veden höyrystymislämpötilan, joka on paineesta riippuen välillä 179 °C-374 °C. Tämän takia höyrystimen materiaaliksi yleensä riittää normaalisti hiiliteräs. CFB- kattiloissa tulipesän alaosa joudutaan päällystämään tulenkestävällä massalla höyrystinputkien eroosion estämiseksi.

Nykyaikaisissa kattiloissa höyrystinputkisto muodostuu kaasutiiviistä membraaniseinästä. Nykyään membraaniseinä yleensä rakennetaan hitsaamalla putkien väliin kapeita teräsripoja. Näin saadaan aikaiseksi kaasutiivis rakenne. Lisäksi hitsatut rivit parantavat lämmönsiirtoa. Kuvassa 3 on hitsatun membraaniseinän rakenne. Kattilaputkiin on myös mahdollista valmistusvaiheessa vetää evät. Tosin nykyisillä hitsaustekniikoilla kokonaan hitsaamalla tehty rakenne on edullisempi. (Teir 2003, 106)



Kuva 3 Nykyaikainen membraaniseinä (Teir 2003, 106)

Joissakin CFB- kattiloissa tulipesään on sijoitettu levymäisiä höyrystintintoja (division wall). Nämä pinnat ovat koko tulipesän korkuisia ja sijoitettu tulipesän keskiosaan, kuvassa 4 siniset levymäiset lämpöpinnat tulipesässä.



Kuva 4 Babcock&Wilcox CFB- kattila (McCauley, et al. 2012, 6)

2.2.2 Tulistimet

Tulistimien tarkoituksena on nostaa kylläisen höyryn lämpötila mahdollisimman korkeaksi. Tuorehöyryn tulistamisella on monia hyötyjä. Laitoksen terminen hyötysuhde paranee, höyry ei kondensoidu tuorehöyrylinjoissa ja turbiinissa. Lisäksi samalta isobaarilta lähtevä turbiinin paisuntakäyrä ei päädy yhtä syvälle kostean höyryn alueelle kuin matalammasta lämpötilasta lähtenyt, mikä vähentää pisaroiden muodostumista ja turbiinin eroosiota. Tulistimien päätyypit ovat: konvektio- ja säteilytulistimet, sekä näiden yhdistelmät. (Huhtinen 2000, 188- 189)

CFB- kattiloissa tulipesän lämmönsiirto tapahtuu konvektion ja säteilyn kautta, sekä myös partikkeleista johtumalla. (Basu 2006, 178) CFB- kattilan tulipesässä olevat tulistimet ovat yleensä levymäisiä rakenteita, johtuen tulipesän säteilylämmönsiirrosta ja eroosio- olosuhteista. CFB- kattiloissa tulistimia voidaan sijoittaa tulipesän seinille (wingwall) tai tulipesän poikki (omega- paneelit) kuvan 2 mukaisesti. Omega-paneelit ovat leijupolton tarpeisiin suunniteltuja lämpöpintoja. Ne muodostuvat ulkopiiriltään nelikulmaisista putkista. Näin saadaan aikaiseksi paneeli jossa on vähän eroosiolle alttiita muotoja. (Basu 2003, 257)

3 LEIJUKERROSLÄMMÖNSIIRRIN

Leijukerros­lämmönsiirrin (FBHE) on CFB- kattiloissa käytettävä kiintoaineen palautusjärjestelmän osa. FBHE:n tehtävänä on savukaasuista erotettuja kiintoainepartikkeleja jäähdyttämällä siirtää osa lämpötehosta pois kiertoaineesta, pitää tulipesän lämpötila sopivana ja kontrolloida kiintoaine virtausta tulipesään. Lisäksi se tuo lisää joustavuutta kattilan tehon säätöön ja optimitilanteessa tuorehöyryn lämpötilan säätö voidaan toteuttaa ilman ruiskutusta. (Suraniti, et al. 2009, 4)

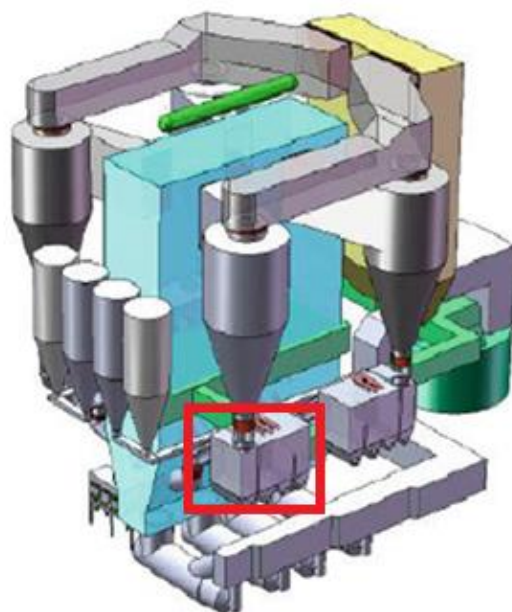
Kiertopetikattiloiden kokoa kasvatettaessa tulipesän tilavuus kasvaa nopeammin kuin ympäröivä lämmönsiirtoala. Yleensä, kun kattilan lämpöteho ylittää 125 MW tarvitaan ulkoinen leijukerros­lämmönsiirrin tai tulipesään sijoitettavia ylimääräisiä lämpöpintoja, jotta tulipesän lämpötila pysyisi hallinnassa. (Wang, et al. 2001, 1) Tulipesän lämpötilan hallinta on tärkeää, sillä lämpötilan kasvaessa termisten NO_x:n päästöt lisääntyvät. Lisäksi SO_x- kalkki reaktiolla on optimilämpötila, joka on noin 850 °C. (Liljedahl, et al. 2006)

Toinen pääsyy leijukerros­lämmönsiirrinten käytölle on niiden korkea lämmönsiirtokerroin. FBHE:tä käyttämällä kalleimmat tulistinputkimateriaalit voidaan sijoittaa kattilan parhaalle lämmönsiirtoalueelle ja minimoida näiden materiaalien tarve. Tämä on merkittävä etu suunniteltaessa suuria ylikriittisillä höyrynarvoilla toimivia kattiloita, joissa pyritään yhä korkeampiin tuorehöyryn lämpötiloihin.

Lisäksi on parempi sijoittaa lämmönsiirtopinnat ulkoiseen lämmönsiirtimeen, jossa virtausnopeudet ovat pieniä ja virtauksen eroosiovaikutus on pienempi kuin tulipesään sijoitetuilla lämpöpinnoilla. (Man, et al. 2011, 1)

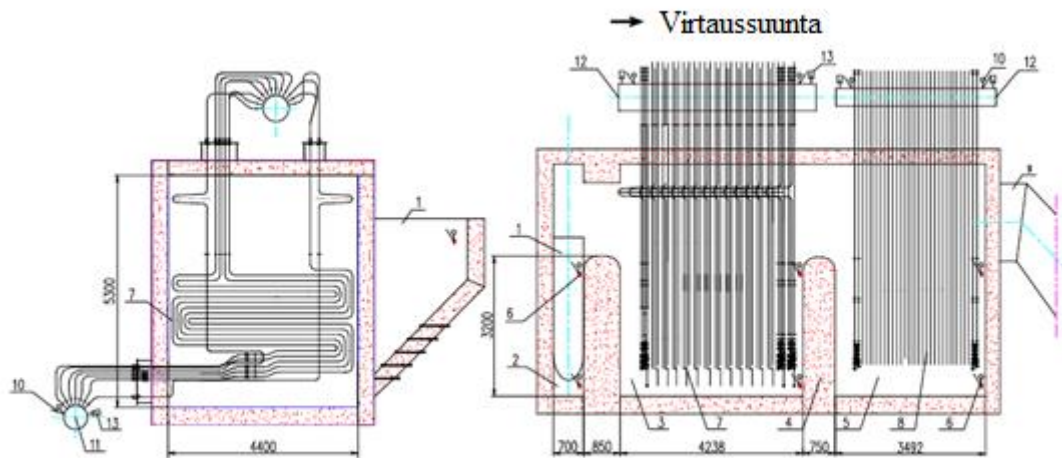
3.1 Ulkoinen leijukerroslämmönsiirrin

Ulkoista leijukerroslämmönsiirrintä External Heat Exchanger (EHE) käytetään kiertoleijukerroskattiloissa, joiden kiintoaineen erotus tapahtuu ulkoisella syklonilla. CFB- kattiloissa leijukerroslämmönsiirrin sijoitetaan syklonin paluuputken ja tulipesän väliin. Kuvassa 5 EHE on merkitty punaisella.



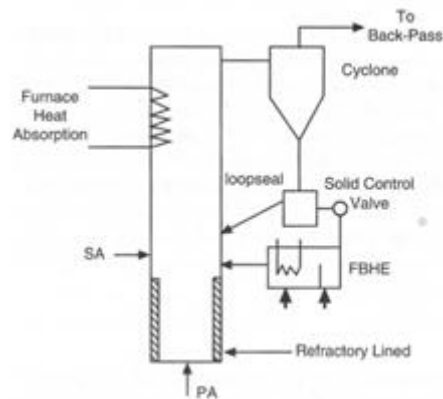
Kuva 5 CFB- kattila ulkoisilla leijukerroslämmönsiirtimillä (Xianbin, et.al. 2013, 1)

Leijukerroslämmönsiirtimet voidaan suunnitella modulaarisiksi, jolloin säästetään suunnittelu ja valmistuskustannuksissa. Jokaiselle syklonille on oma lämmönsiirtimensä, jolloin yksittäisen lämmönsiirtimen koko ei kasva liian suureksi. Tällöin leijupedin hallinta on helpompaa ja kiintoaine voidaan palauttaa kattilaan tasaisemmin. Kattilan koon kasvaessa voidaan lämpöpintojen määrää kasvattaa yksinkertaisesti lisäämällä EHE yksiköitä. EHE voi toimia joko tulistimena, välitulistimena tai höyrystimenä. Suuressa 600 MW kattilassa on jopa kuusi leijukerroslämmönsiirrintä. (Suraniti, et al. 2009, 4)



Kuva 6 EHE:n poikkileikkaus (Man, et al. 2011, 3)

Kuvassa 6 on yksi mahdollisuus FBHE:n rakenteeksi. Lämmönsiirrin koostuu ulkokuoresta joka on eristettyä metalliseinää. Lämmönsiirtimen sisäseinät ja jakolevyt on vuorattu tulenkestävällä massalla eroosion vähentämiseksi. Putkien eroosio ei ole suuri ongelma leijukerroslämmönsiirtimissä, sillä leijutusnopeudet ja kiintoaine partikkelien koot ovat huomattavasti pienempiä kuin itse kattilassa. (McCauley, et al. 2012, 9) Lämmönsiirtimen sisälle asennetaan tarvittavasta määrästä rinnakkain asetettuja putkielementtejä. Putkielementit yhdistyvät ylä- ja alapäistään jakotukkeihin. Kuvassa 6 on esimerkki mahdollisesta elementin rakenteesta. Leijukerroslämmönsiirrin voidaan jakaa useampaan lämmönsiirto-osaan. Kuvan 6 lämmönsiirtimessä on kolme kammiota, jotka on erotettu toisistaan väliseinin. Kiintoaine syötetään vasemmanpuoleiseen pieneen kammioon. Kahdessa muussa kammiossa sijaitsevat varsinaiset lämmönsiirtopinnat. Lämmönsiirtopinnat on jaettu kahteen osaan korkeassa ja matalassa lämpötilassa toimivaan. Kyseessä voisivat olla vaikkapa korkean lämpötilan välitulistin ja matalan lämpötilan tulistin. Kuvassa virtaus-suunta on vasemmalta oikealle. Lämmönsiirtopintojen läpi virrattuaan kiintoaine poistuu oikeasta reunasta ulos lämmönsiirtimestä. (Man, et al. 2011, 3)



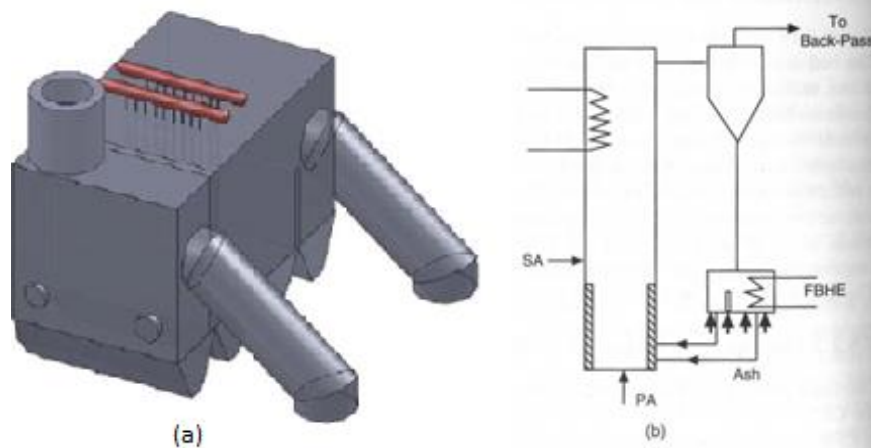
Kuva 7 Lurgi- tyyppinen FBHE (Basu 2006, 291)

Lämmönsiirtimessä olevaa kiintoainemassaa leijutetaan pohjassa olevien suuttimien kautta puhallettavalla ilmalla. Leijutusnopeutta ja lämmönsiirtimeen tulevan kiintoaineen määrää säätämällä voidaan kontrolloida lämmönsiirtimen tehoa. Leijutusnopeudella on suuri vaikutus lämmönsiirtokertoimeen. Perinteisesti FBHE:en syötettävän kiintoaineen määrää on säädetty kartioventtiilillä. Kuvassa 7 on esitetty perinteinen rakenneratkaisu. (Wang, et al. 2001, 1)

Vaikka ulkoisella leijukerroslämmönsiirtimellä on edellä kuvatut etunsa, on sillä myös omat rajoituksensa. Kattilaa osakuormilla ajettaessa, kiintoaine virtaus syklonilta heikkenee. Vastaavasti FBHE:n lämmönsiirtokyky heikkenee ja tuorehöyryn lämpötila putoaa, jolloin kattilan osakuorma hyötysuhde tippuu. Kiintoaineen virtauksen säätöön käytettävät venttiilit taas altistuvat voimakkaalle eroosiolle, mikä aiheuttaa merkittäviä huoltokustannuksia. (Wang, et al. 2001, 1)

3.2 Pneumaattisesti kontrolloitava leijukerroslämmönsiirrin

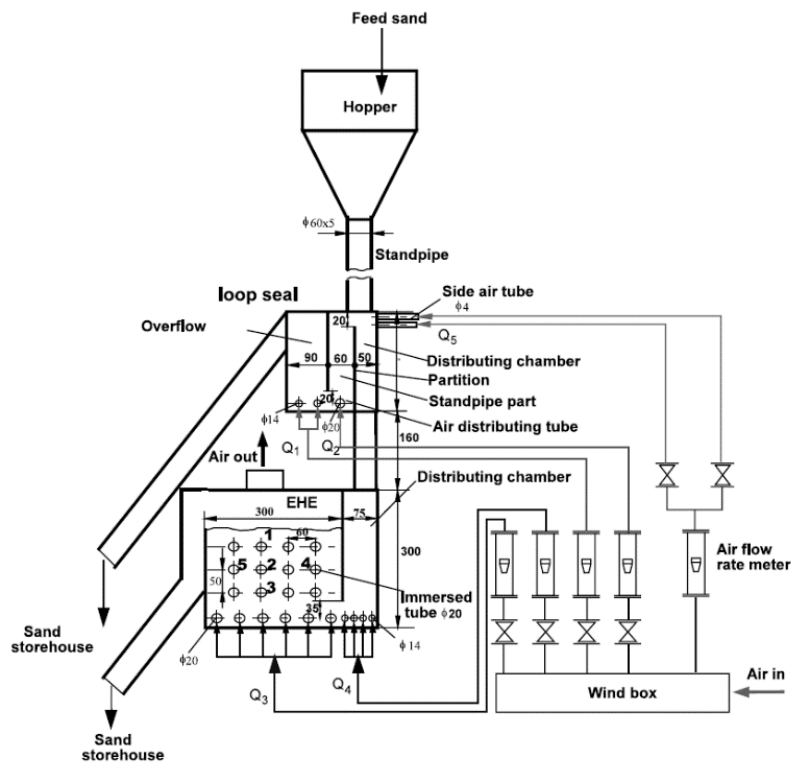
Leijukerroslämmönsiirtimen kiertoainevirtausta voidaan kontrolloida myös pneumaattisesti. Säädön toteutustapa riippuu kattilan kiintoainepalautusjärjestelmän rakenteesta. Käytännössä rakenteita on kaksi erilaista. Erotusjärjestelmän alapuolella sijaitsee polvilukko, joka toimii kiintoaineen jakajana tai kiintoaine voidaan syöttää kaikki suoraan leijukerroslämmönsiirtimeen. (Basu 2006, 290) Pneumaattisesti säädettävä leijukerroslämmönsiirrin on suunniteltu parantamaan kiintoainevirtauksen säädettävyyttä ja vähentämään eroosion aiheuttamia huoltokustannuksia. (Wang, et al. 2001, 8)



Kuva 8 a) Pneumaattisesti kontrolloitu FBHE (Xianbin, et al. 2013, 3) b) Pneumaattisesti kontrolloidun FBHE:n periaatekuva (Basu 2006, 291)

Kuvassa 8b on kuvattu rakenne, jossa leijukerroslämmönsiirrin toimii kiintoainevirtauksen säätöjärjestelmänä. Kaikki syklonilta tuleva kiintoaine syötetään lämmönsiirtimeen. Kuvan 8a lämmönsiirrin on jaettu kolmeen osaan, joista keskeisessä sijaitsevat lämpöpinnat ja muut kaksi toimivat kiintoaineen jakajina ja varastoina. Kaikkien kammioiden leijutusta voidaan säätää erikseen, jolloin kiintoainevirtaus lämmönsiirtimeen ja kattilaan riippuu näiden suhteesta. (Basu 2006, 291)

Kuten edellä mainittiin, myös perinteinen polvilukollinen lämmönsiirrin voidaan suunnitella pneumaattisesti kontrolloiduksi. Tämän Kiinalaisen Zhejiang yliopiston kehittämän lämmönsiirtimen kiintoainevirtausta voidaan kontrolloida täysin pneumaattisesti, jolloin suuria säätöventtiilejä ei tarvita. (Wang, et al. 2001, 2) Lämmönsiirtoa ja tulipesään palautuvaa kiintoainevirtausta voidaan säätää EHE:n leijutusvirtausta säätämällä ja polvilukon virtausta säätämällä voidaan kontrolloida kiintoainevirtausta EHE:n ohi suoraan tulipesään. Koelaitteisto on kuvan 9 mukainen.



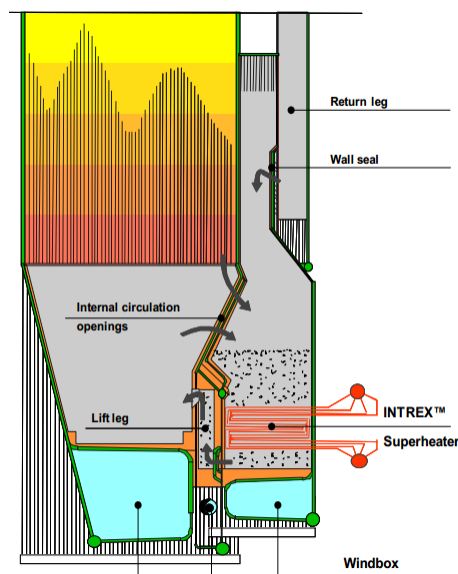
Kuva 9 Pneumaattisesti säädettävä polvilukko (Wang, et.al 2001, 3)

Tällä koelaitteistolla havaittiin, että säätämällä ilmavirtausta kohdissa Q1 ja Q5, voidaan kiintoainevirtausta säätää hyvin laajalla alueella. Syklonilta tulevaa kiintoainetta voidaan ohjata sivuttaisella ilmavirtauksella Q5 EHE:en johtavan pystykanavan ohi suoraan polvilukkoon. (Wang, et.al 2001, 4- 6)

3.3 Integroituleijukerroslämmönsiirrin

Integroitua leijukerroslämmönsiirrintä käyttämällä saavutetaan kompakti rakenne. Lämmönsiirrin sijoitetaan kiinni kattilan alaosan sivuseinille. Lämmönsiirrin on kuitenkin fyysisesti erotettu tulipesästä seinällä, jotta säilytetään lämmönsiirtimen säädettävyys ja matalammat eroosio-olosuhteet. Kompaktin rakenteen lisäksi tätä ratkaisua käytettäessä etuna on mahdollisuus ottaa kiintoainetta suoraan tulipesästä, jolloin kiintoaine saatavuus ei ole enää riippuvainen kattilan tehosta.

Kuvassa 10 on Amec Foster Wheelerin INTREX lämmönsiirrin. INTREX:n seinät ovat membraanilevyä ja ne ovat osa kattilan höyrystinpiiriä. Näin lämmönsiirtimen seinät ovat samassa lämpötilassa kattilan seinien kanssa ja lämpölaajenemisen vaatimia välyksiä ei tarvita. Lämpöpinnat on sijoitettu putkipaketteina leijukerrokseen kuvan 10 mukaisesti.



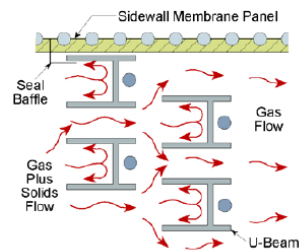
Kuva 10 INTREX- lämmönsiirrin ja kiintoaineen palautusjärjestelmä (Amec Foster Wheeler.B)

Intrex:n tehoa ja tulipesän lämpötilaa voidaan säätää säätämällä virtausta polvilukon (wall seal) yli kiintoaineen palautushaarassa (lift leg) kuvassa 10. Lisäksi tehoa voidaan säätää nopeasti säätämällä lämmönsiirtimen leijutusnopeutta, joka vaikuttaa lämmönsiirtokertoimeen. (Goidich & Hyppänen 2001, 5)

Kuten edellä on jo mainittu, matalilla tehoilla ajettaessa kiintoainevirtaus palautusjärjestelmän kautta heikkenee. Integroiduissa leijukerroslämmönsiirtimissä tämä ongelma on ollut mahdollista ratkaista lisäämällä tulipesän ja lämmönsiirtimen väliseen seinään yhteet, joiden kautta kiintoainetta pääsee virtaamaan suoraan tulipesästä. Yleensä tämä on toteutettu tekemällä aukot lämmönsiirtimen ja tulipesän välisiin kalteviin pintoihin, kuten kuvasta 10 voidaan nähdä. Näin seinämiä alaspäin valuva kiintoaine saadaan virtaamaan lämmönsiirtimeen. (Nurminen 2001, 36) Tällä tavalla saavutetaan suunnitellut tuorehöyryn arvot ajettaessa jopa 30 % teholla. (McCauley, et al., 7)

Kiintoaine palautetaan tulipesään palautusyhteen kautta (lift leg) kuvassa 10. Yhde sijoitetaan tulipesän tiheän kiintoainekerroksen yläpuolelle, joten se toimii polvilukon tavoin estäen kiintoainevirtauksen tulipesästä lämmönsiirtimeen päin. (Nurminen 2001, 36) Kiintoaine siirtyy tiheyseron johdosta tulipesään päin. Lisäksi sitä voidaan leijuttaa virtauksen varmistamiseksi.

Myös Babcock & Wilcox (B&W) käyttää kattiloissaan integroitua leijukerroslämmönsiirintä IBHX (in-bed heat exchanger). B&W:n kattila eroaa muista siten, että siinä käytetään erotinjärjestelmänä u- palkki erottimia. Kuvassa 11 on esitetty erotinjärjestelmä. Tulipesän ulostuloon ja osittain tulipesän puolelle on asennettu 4- 11 riviä u- palkkeja, riippuen kattilasta. U- palkit pakottavat virtauksen mutkittelemaan, jolloin kiintoainepartikkelit eivät pysty seuraamaan virtausta, vaan putoavat takaisin tulipesään.



Kuva 11 Impulssierotin (McCauley, et al., 4)

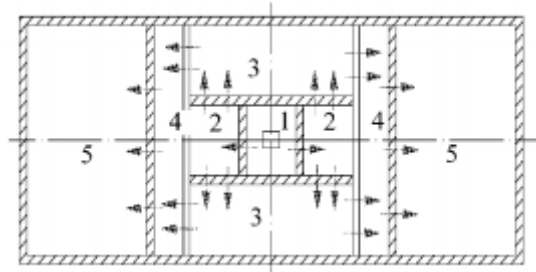
Eroinjärjestelmän valinnasta johtuen ulkoinen kiintoainevirtaus on pieni, joten integroitulämmönsiirrin on soveltuvin ratkaisu. U- palkkierottimien ansiosta kattilan ulosmenokanava on koko tulipesän levyinen, jolloin ulosvirtausprofiili on hyvin tasainen. Tämä vähentää varsinkin tulipesän yläosan eroosio- olosuhteita, joten tulipesään voidaan sijoittaa enemmän lämpöpintoja kuin muilla kattila valmistajilla. (McCauley, et al., 4)

Integroidun leijukerroslämmönsiirtimen ongelmana on se, että tulipesästä otetun kiintoainevirran mukana tulee suuria kiertoainepartikkeleja, polttoainepalasia ja mahdollisesti muita epäpuhtauksia. Suuret partikkelit vaativat suurempia leijutusnopeuksia, mikä aiheuttaa suuremman eroosiovaikutuksen. Karkeampi leijutusmateriaali vaatii myös riittävän suuret tyhjennysyhteet. (Nurminen 2001, 15)

Uusimpana kehityskohteena on ollut kehittää integroituleijukerroslämmönsiirrin kattiloihin joissa tulipesä on syklonin ympärillä. CFB- kattiloiden kokoa kasvatettaessa syklonien määrä kasvaa entisestään ja niiden sijoittelu kattilan ympärille alkaa olla ongelmallista. Lisäksi yhä suuremmilla tulipesillä voi olla ongelmia sekundääri- ilman tunkeutumisessa tulipesän keskiosiin. (Xiong, et.al. 2007, 4)

Yhdeksi mahdolliseksi ratkaisuksi on kehitetty kattilaa, jossa nelikulmainen sykloni on tulipesien keskellä. Tällainen rakenne vaatii EHE:n säädöltä paljon. Kuvan 12 pneumaattisesti kontrolloidulla EHE:llä voidaan kiintoainevirtauksen määrää eri lämmönsiirtokammioihin säätää erikseen. Lisäksi kiintoainevirtausta voidaan säätää erikseen eri tulipesälohkoihin. Kuvassa 12 on lämmönsiirtimen osiot numeroitu

seuraavasti: 1) kiintoaineen syöttö, 2) kiintoaineen jakolokero, 3) lämmönsiirtokammio, 4) kiintoaineen palautuskanava, 5) tulipesä. (Liu & Lu 2010, 3)



Kuva 12 Integroituleijukerroslämmönsiirrin (Liu & Lu 2010, 3)etsi mistä kuva

Perinteisiinkin leijukerroslämmönsiirtimiin on ollut mahdollista sijoittaa omiin kammioihinsa eri lämpötilatasoilla toimivia lämpöpintoja. Niiden säätäminen toisistaan riippumatta ei kuitenkaan ole ollut mahdollista. Kuvan 12 mukainen ratkaisu voisi sopia myös ulkoiseen käyttöön, jolloin perinteisten CFB- kattiloiden säädettävyyttä voitaisiin parantaa lisää.

4 MATERIAALIVALINNAT

4.1 Tulistin materiaalit

Kuumankestävät teräkset voidaan jakaa seuraaviin ryhmiin: seostamattomiin teräksiin (400- 450 °C), niukkaseosteisiin teräksiin (540- 580 °C), runsasseosteisiin martensiittisiin teräksiin (550- 600 °C) ja runsasseosteisiin austeniittisiin teräksiin (600- 720 °C). Suluissa maksimikäyttölämpötila. (Vakkilainen 2008, 26)

Lämpöpinnoista tulistimet joutuvat suurimmalle rasitukselle. Tulistetun höyryn lämpötila on 450- 550 °C (Huhtinen, et al. 2000, 185) Tämän takia tulistinputkien seinämän lämpötila nousee huomattavasti korkeammaksi, kuin esimerkiksi höyrystinputkien, joiden lämpötila on vain muutamia asteita yli höyrystävän veden lämpötilan 179- 374 °C. (Huhtinen, et al. 2000, 185) Tulistin materiaaleilta vaaditaankin hyvää virumiskestävyyttä ja kuumakorroosion kestoja. Tulistin- ja välitulistinputkien metallin mitoituslämpötilan arviointiin voidaan käyttää yhtälöä 3.1. (Basu 2006, 320)

$$T_{metalli} = T_{höyry} + 50^{\circ}\text{C} \quad (3.1)$$

Tulistinputkimateriaalit valitaan mitoituslämpötilan mukaisesti, siten että terästen virumiskestävyys on riittävä. Virumisluku riippuu lämpötilasta ja käyttöajasta. (Huhtinen 2001, 193) Koska tulistimet vaativat kalliiden erikoisterästen käyttöä, optimoidaan tarvittavat materiaalit tarkasti. Saman tulistimen eri osissa voidaan käyttää eri materiaaleja riippuen lämpötilajakaumasta. Seuraavaksi valitaan putkipaksuus, vallitsevien korroosio ja eroosio olosuhteiden mukaan. (Basu 2006, 319)

Teräksien lisäaineilla voidaan vaikuttaa niiden ominaisuuksiin. Seuraavassa on esitelty tulistinmateriaalien lisäaineita. Kromi parantaa yleisesti korroosion kestoja. Nikkeli lisää jännityskorroosion kestoja ja kestää hyvin kloorikorroosiota, mutta ei rikkikorroosiota. Pii parantaa kloorikorroosion kestoja, mutta voi reagoida alkalimetallien kanssa. (Basu 2006, 319) Molybdeenillä voidaan tehokkaasti parantaa kuumaalujuuksia. (Huhtinen 2000, 192)

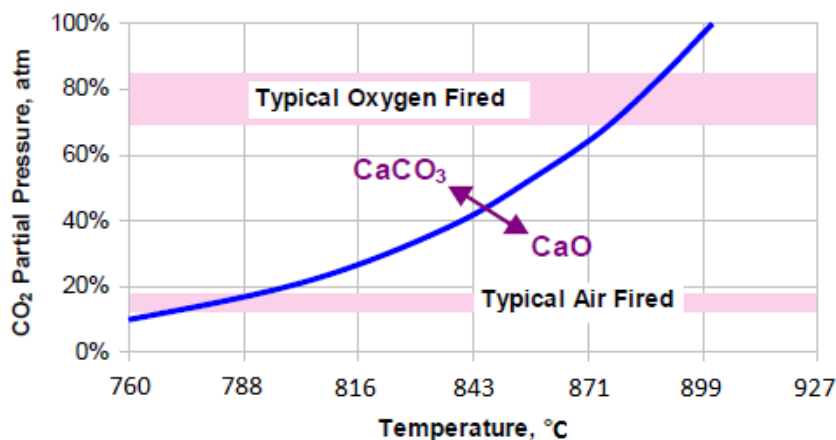
4.2 Massaukset

CFB- kattiloissa käytetään massauksia kohdissa, jotka joutuvat erityiselle kiintoainepartikkelien aiheuttamalle eroosiorasitukselle. Näitä kohtia ovat alueet joissa virtauksen suunta muuttuu ja partikkelit voivat törmätä pintoihin. Vaikka leijukerroslämmönsiirtimissä virtausnopeudet ovat pieniä, ovat lämmönsiirtimen seinämät, sisäänmenot ja ulostulot, sekä kammioiden väliset jakolevyt suojattava massauksilla, koska ne joutuvat alttiiksi suurille kiintoainepartikkelien massavirroille. Riittävän suojauksen aikaan saamiseksi voidaan käyttää monikerros massausta. Jakolevyjen massaukseen suositellaan kvartsi- pohjaisia massoja. (Basu 2006, 329)

5 LEIJUKERROSLÄMMÖNSIIRIN HAPPIPOLTTO- OLOSUHTEISSA

CFB- kattilan happipolttu sovellutus vaikuttaa lupaavalta CO₂- talteenottoon. Leijutus tapahtuu kierrätetyillä savukaasuilla, jolloin palaminen tapahtuu pääasiassa CO₂/O₂- ympäristössä. Happi pitoisuus voi olla jopa 20- 50 %.

CFB- kattiloissa rikin poisto tapahtuu kalkkikiven avulla. Ensin kalkkikivi kalsinoituu lämmön vaikutuksesta kalsiumoksidiksi, minkä jälkeen se voi reagoida rikin kanssa. Kuitenkin leijutuskaasun korkea CO₂- pitoisuus aiheuttaa kalsiumoksidin karbonoitumista takaisin kalkkikiveksi kattilan osissa, joissa lämpötila laskee kalsinoitumislämpötilan alle. Kuvassa 13 on kalsinoitumisreaktion tasapainokäyrä. Normaalisti ilmapoltossa kalsinoituminen tapahtuu jo 790 °C:ssa, mutta happipolttu- oloissa vaaditaan noin 870 °C lämpötila.

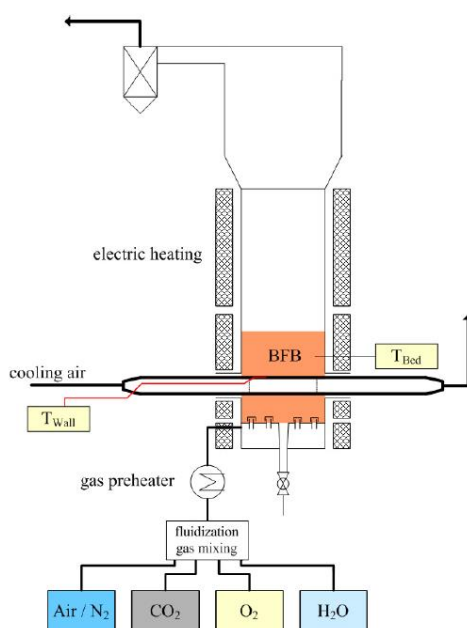


Kuva 13 Kalsinoitumisreaktion tasapainokäyrä (Liljendal, et al. 2006, 4)

Varsinkin leijukerros­lämmönsiirtimissä karbonoituminen on mahdollista. Kiintoainevirtauksen lämpötila laskee huomattavasti ja leijutuskaasun CO₂- pitoisuus on korkea, kun leijutukseen käytetään kierrätettyjä savukaasuja. Leijukerros­lämmönsiirtimessä happipolttu tapauksessa jopa 20 % kalsiumoksidista voi

karbonoitua takaisin kalkkikiveksi, kun vastaava luku ilmapoltolla on 4 %. (Liljendal, et al. 2006, 5)

Karbonoituminen aiheuttaa kalkkikiven kerrostumista FBHE:n lämpöpinnoille. Ilmiötä on tutkittu kuvan 14 mukaisella koelaitteistolla. Reaktorin halkaisija on 70 mm, korkeus 1000 mm ja sitä lämmitetään 11 kW sähkövastuksilla. (Beisheim, et al. 2013, 4) Syntyvien kerrostumien huomattiin kiinnittyvän lämmönsiirtopinnoille lujasti kun leijutukseen käytettiin savukaasuja. Ilmaleijutuksella syntyneet kalkkikivikerrostumat eivät kiinnittyneet yhtä lujasti, vaan ne irtosivat leijutettavien kiintoainepartikkelien johdosta helposti. Varsinkin pidempiaikaisessa käytössä kalkkikiven kerrostumisella voi olla vaikutusta lämmönsiirtimen toiminta- arvoihin, mutta siitä ei ole vielä varmuutta, koska käyttökokemusta on vielä vähän. Mahdollisia ratkaisuja karbonoitumisen vähentämiseen voivat olla hapen tai typen käyttö leijutuskaasuna tai lämmönsiirtimen lämpötilatasojen nosto. (Beisheim, et al. 2013, 6)



Kuva 14 Koelaitteisto karbonoitumisen tutkimiseen

6 LEIJUKERROSLÄMMÖNSIIRTO

Tässä kappaleessa käydään läpi leijukerroslämmönsiirtimen mitoittamiseen ja lämmönsiirtoon vaikuttavia tekijöitä.

6.1 Leijukerroslämmönsiirtimen lämpöteho

Taulukko 1 EHE:n osuus kiintoainepiirin lämmönsiirrosta (Basu 2006, 279)

Polttoaine	Voimalaitos	Kattilateho [MW]	FBHE- osuus [%]
Antrasiitti	Scott Paper	203	25
Bitumihiili	Duisberg	208	63
Bitumihiili	Bayer	98	70
Hiili (Ruhr)	Flensburg	108	63
Bitumihiili	Chatham	69	39
Ruskohiili	Ione	56	0

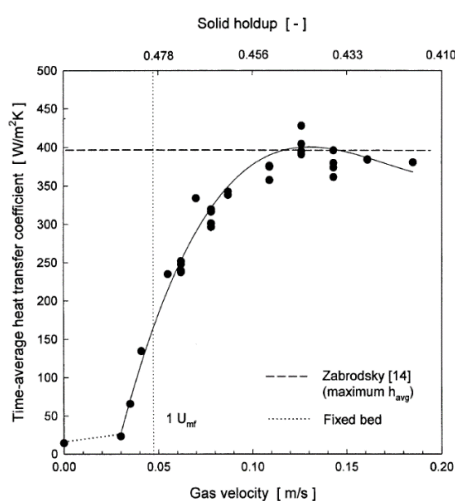
Leijukerroslämmönsiirtimen osuus kattilan ja kiintoainepiirin lämmönsiirrosta riippuu käytettävän polttoaineen ominaisuuksista, kattilan koosta ja suunnittelijan valinnoista. Taulukkoon 1 on listattu eräiden kattiloiden leijukerroslämmönsiirrinten osuuksia kiintoainepiirin lämpötehosta. Pienillä kattiloilla osuus on pieni tai EHE:ä ei tarvita ollenkaan, koska tulipesän lämpöpinnat ovat vielä riittäviä. Suuremmilla yli 100 MW kattiloilla tarvitaan ylimääräisiä lämpöpintoja.

Toinen erittäin tärkeä mitoitus tekijä on käytettävä polttoaine, vaikka CFB- kattilat ovatkin joustavia polttoaineen suhteen. Polttoaineen lämpöarvo ja kemiallinen koostumus vaikuttavat tarvittavaan polttoaineensyöttöön, savukaasukoostumukseen ja savukaasujen määrään. Savukaasujen ominaisentalpia vaikuttaa savukaasujen mukana

poistuvaan energiaan ja siten tulipesän ja konvektiivisen osan lämmönsiirto-osuuksiin. Joten myös kiintoainekierrosta poistettavan lämmön määrä riippuu polttoaineen ominaisuuksista. (Basu 2006, 278- 280)

6.2 Leijutusnopeus

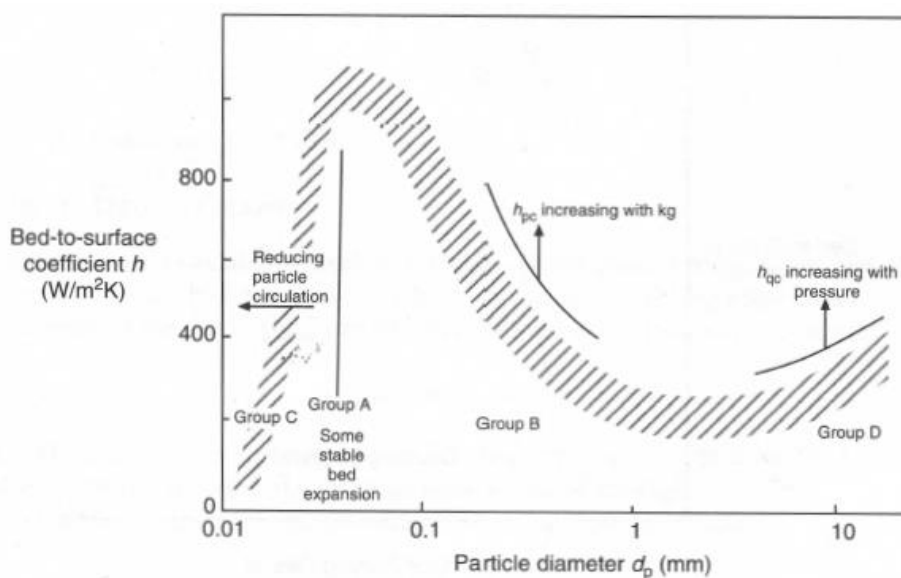
Leijutusnopeudella on hyvin suuri vaikutus lämmönsiirtimen lämmönsiirtokertoimeen, kuten kuvasta 15 voidaan havaita. Siksi se soveltuu hyvin lämmönsiirtimen tehon säätämiseen. FBHE:ssä leijutusnopeus voidaan pitää hyvin alhaisena, yleensä 3- 4 kertainen minimi leijutusnopeuteen. (Basu 2003, 196) Alhaisen leijutusnopeuden vuoksi eroosio on vähäistä. Kuten kuvassa 15 on esitetty alussa lämmönsiirtokerroin kasvaa huomattavasti leijutusnopeuden kasvaessa, koska partikkelien vuorovaikutus lämmönsiirtopintojen kanssa kasvaa ja kontaktaika lyhenee. Myös konvektiivinen lämmönsiirto kasvaa virtausnopeuden kasvaessa. Lämmönsiirtokerroin ei kuitenkaan kasva loputtomiin leijutusnopeutta kasvatettaessa. Leijutusnopeutta edelleen kasvatettaessa lämmönsiirtokerroin alkaa pienentyä. Partikkelien kontaktaika lämpöpinnoilla lyhenee edelleen, mikä parantaa lämmönsiirtoa, mutta suspensiotiheys laskee suuren leijutusnopeuden takia, joten kokonaislämmönsiirtokerroin pienenee. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että leijukerroksen kuplinta lisääntyy ja kuplien koko suurenee. (Basu 2006, 196)



Kuva 15 Leijutusnopeuden vaikutus lämmönsiirtokertoimeen (Kim, et al. 2002, 5)

6.3 Partikkelikoko

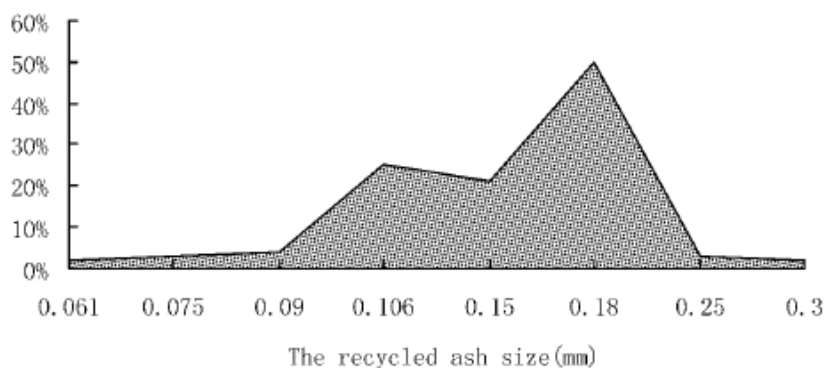
Partikkelikoolla on suuri vaikutus lämmönsiirtokerrotimeen. Lämmönsiirto kiintoainepartikkeleista lämpöpintoihin tapahtuu pääasiassa johtumalla ohuen rajakerroksen läpi. Filmin paksuus on noin kymmenesosa partikkelin halkaisijasta. Kuva 16 esittää partikkelikoon vaikutusta lämmönsiirtokerrotimeen. Ensin lämmönsiirtokerroin kasvaa partikkelikoon kasvaessa, koska pienten partikkelien liikkuvuus ja kierto lämmönsiirtimessä on heikkoa. Partikkelikoon kasvaessa edelleen lämmönsiirtokerroin alkaa pienentyä, sillä johtuminen heikkenee suuremmissa hiukkasissa. (Basu 2003, 195)



Kuva 16 Partikkelikoon vaikutus lämmönsiirtokerrotimeen (Basu 2003. s. 195)

Yleensä leijukerroslämmönsiirtimeen tulevan kiintoainevirtauksen partikkelikoko vaihtelee 100- 400 μm välillä. Keskimääräinen koko on 200- 250 μm . Syklonilta saatava kiintoainevirtaus on hienompaa ja tasalaatuisempaa kuin tulipesästä saatava, jonka keskimääräinen koko on 300- 400 μm . Tämä johtuu kattilan sisäisestä kierrosta, jolloin pienet partikkelit kulkeutuvat erottimeen ja suuremmat putoavat takaisin tulipesään. (Nurminen 2001, 14- 15)

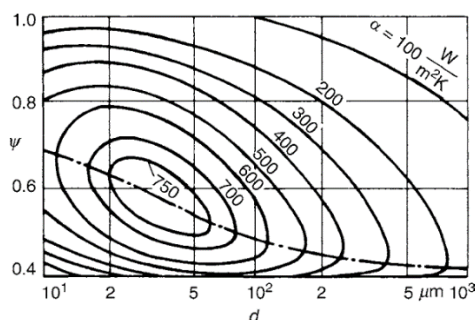
Kuvassa 17 on esitetty CFB- kattilan erotusjärjestelmältä kerätyn tuhkan partikkelikokojakauma. Kerätyn tuhkan tiheys oli 600 kg/m^3 . Partikkelikoko vaihteli 0 ja 0.3 mm välillä. Pieni partikkelikoko onkin yksi syy leijukerroslämmönsiirtimen hyvään lämmönsiirtokertoimeen.



Kuva 17 Kiintoainevirtauksen partikkelijakauma (Liu & Lu 2010, 3)

6.4 Partikkelitiheys

Leijukerroslämmönsiirrossa korkeilla partikkelitiheyksillä, yli 70 kg/m^3 johtuminen alkaa kasvaa merkittäväksi. (Basu 1995, 22) Leijukerroslämmönsiirtimissä merkittävin lämmönsiirtomekanismi onkin johtuminen partikkeleista lämpöpintoihin, koska pedin tiheys on hyvin suuri. Kuvassa 18 on lämmönsiirtokertoimen riippuvuus partikkelikoosta ja kiintoaineen tilavuusosuudesta.



Kuva 18 Tilavuusosuuden ja partikkelikoon vaikutus lämmönsiirtokertoimeen (Holger 2010, 1305)

6.5 Leijukerroksen lämmönsiirtokerroin

Leijukerroslämmönsiirtimissä on kattilan korkein lämmönsiirtokerroin. Yleensä noin 340- 510 W/m²K.(Basu 2003, 174) Lämmönsiirtoilmion monimutkaisuudesta johtuen joudutaan lämmönsiirtokertoimen laskemiseksi käyttämään kokeellisesti määriteltyjä korrelaatioita. Tässä kappaleessa esitellään muutamia nimenomaan leijukerroslämmönsiirtimen laskemiseen kehitettyjä korrelaatioita. Suurinta osaa kirjallisuudessa esitetystä leijukerroslämmönsiirron korrelaatioista ei voida suoraan soveltaa leijukerroslämmönsiirtimiin, koska niissä ei ole huomioitu leijukerroslämmönsiirtimissä tapahtuvaa vaakasuuntaista virtausta lämmönsiirtimen läpi. Eikä näin ollen lämpötilajakauman muutosta virtauksen suunnassa. (Ji, et al. 2010, 1)

Leijukerroksen nusseltin luvulle määritetty korrelaatio on esitetty yhtälössä 4.1. Se on kokeiden perusteella korjattu muoto Veedenderyn kokeellisesta korrelaatiosta. (Ji, et.al. 2010, 5) Koelaitteistona käytettiin 1:28 mallia 300 MW kattilan leijukerroslämmönsiirtimestä. Korrelaatio on voimassa kun $Re < 2500$. Tällä korrelaatiolla laskettujen nusseltin luvun arvoja verrattaessa kokeellisiin päästään alle 20 % virheeseen. (Ji, et.al. 2010,1, 5)

$$Nu = 0,3568 \left(\frac{c_{p,g}\mu}{h_g} \right)^{0,3} \left[Re \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right) \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) \right]^{0,44} \quad (4.1)$$

jossa	$c_{p,g}$ = ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]
	ρ_g = tiheys	[kg/m ³]
	h_g = kaasun lämmönjohtavuus	[W/mK]
	μ = kaasun dynaaminen viskositeetti	[Pa s]
	ε = kiintoaineen tilavuusosuus	[-]

Toinen korrelaatio leijukerroslämmönsiirrolle on yhtälön 4.3 mukainen. Korrelaatio on kokeellisesti määritetty tekemällä mittauksia 300 MW CFB- kattilan kahdesta eri leijukerroslämmönsiirtimestä. (Man, et al. 2011, 7)

$$h_1 = 0,81F_a + 0,12T_a^i - 38,1 \quad (4.3)$$

jossa F_a = kiintoainevirtaus [kg/s]

T_a^i = kiintoaineen lämpötila lämmönsiirtimen sisääntulossa [°C]

Kolmas leijukerroslämmönsiirtimelle kehitetty korrelaatio on hieman tarkempi. Sillä päästään noin 11- 14 % tarkkuuteen. Korrelaatio koostuu yhtälöistä 4.4, 4.5 ja 4.6. Korrelaatio huomioi lämmönsiirron vaihtelu leijukerroksen ylä- ja alaosan välillä. Lisäksi se vaatii huomattavasti enemmän tietoa leijukerroksen olosuhteista. (Kim, et al. 2002, 8- 10)

$$h_{avg} = \frac{5}{8}h_{bottom} + \frac{3}{8}h_{top} \quad (4.4)$$

Yhtälö 4.5 kuvaa lämmönsiirtoa leijukerroksen alaosassa.

$$h_{bottom} = (1 - \delta_b) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{k_e \rho_e c_e} \frac{1}{\sqrt{t_e}} + \delta_b h_g \quad (4.5)$$

Jossa δ_b kuplien tilavuusosuus [-]

k_e kiintoaineen lämmönjohtavuus [W/mK]

ρ_e kiintoaineen tiheys [kg/m³]

t_e kiintoaineen kontaktiaika [s]

Yhtälö 4.6 on korrelaatio leijukerroksen yläosan Nusseltin luvulle.

$$Nu_{top} = 47,56Re^{0,43}Pr^{0,33}(D/d_p)^{-0,74}(C_{ps}/C_{pg})^{-1,69} \quad (4.6)$$

Jossa	D	halkaisija	[m]
	d_p	partikkelien keskihalkaisija	[m]
	C_{ps}	kiintoaineen lämpökapasiteetti	[J/kgK]
	C_{pg}	kaasun lämpökapasiteetti	[J/kgK]

7 YHTEENVETO

Tässä työssä esiteltiin CFB- kattiloiden leijukerroslämmönsiirtimen toimintaa ja lämmönsiirtoon vaikuttavia tekijöitä. CFB- kattilat ovat tällä hetkellä puhtain tapa polttaa kiinteitä fossiilisia polttoaineita, koska niissä SO_x - ja NO_x - päästöjen hallinta on mahdollista toteuttaa yksinkertaisesti ja edullisesti. Lisäksi palamattomien määrät jäävät pieniksi kiintoaineen kierrätyksen ansiosta. Työssä esiteltiin myös CFB-happipolttosovellus, joka näyttää lupaavalta menetelmältä CO_2 :n talteenottoon. Varsinkin tulevaisuudessa kiertoleijupolttoto tulee olemaan yhä tärkeämmässä roolissa pyrittäessä vähentämään ilmansaasteita ja hiilidioksidipäästöjä, kun samalla joudutaan käyttämään heikompilaatuisia polttoaineita. Siksi onkin tärkeää panostaa CFB- polton kehittämiseen.

Kattiloiden koko on kasvanut jatkuvasti ja suurimmat suunnitteilla olevat kattilat ovatkin ylikriittisillä höyrynarvoilla toimivia ja teholtaan jopa 600 MWe. Suurien CFB-kattiloiden suunnittelussa ongelmana on ollut tulipesän tilavuuden kasvaminen nopeammin kuin ympäröivän lämmönsiirtoalan. Ratkaisuna asemansa ovat jo vakiinnuttaneet erilaiset leijukerroslämmönsiirtimet.

Työssä käytiin läpi erilaisten leijukerroslämmönsiirrinten rakenteita ja säätötapoja. Lämmönsiirtimen tehoa voidaan säätää leijutusvirtausta ja kiintoainevirtausta säätämällä. Leijukerroslämmönsiirtimellä saavutetaankin erinomainen säädettävyys, niin tuorehöyryn arvoille kuin tulipesän lämpötilallekin. Se tuo lisää joustavuutta kattilan suunnitteluun ja käyttöön. Muina tärkeinä FBHE:n etuina ovat hyvä lämmönsiirtokerroin ja alhainen lämpöpintojen eroosio.

Vaikka leijukerroslämmönsiirrin on jo todettu toimivaksi ratkaisuksi, pitää sen kehitystyöhön panostaa jatkossakin. Kattiloiden vielä kasvaessa lämmönsiirrinten optimoinnista tulee yhä tärkeämpää ja leijukerroslämmönsiirron ymmärtäminen on entistä keskeisemmässä roolissa. Nykyisissä malleissa lämmönsiirto voi vaihdella suurestikin lämmönsiirtimen eri osissa. Tässä työssä tutustuttiin leijukerroslämmönsiirtoon vaikuttaviin tekijöihin. Huomion arvoista on, että

lämmönsiirtoon vaikuttavia muuttujia on paljon, toisaalta tämä tuo joustavuutta lämmönsiirtimen toimintaan. Leijukerroslämmönsiirron laskenta taas perustuu vahvasti kokeellisiin tuloksiin, huomioitavaa on, että suurin osa leijukerroslämmönsiirron korrelaatioista ei ole suoraan soveltuvia leijukerroslämmönsiirtimien laskemiseen.

Tulevaisuudessa CFB- happipoltolla ja CO₂ talteen-otolla voi olla merkittävä rooli puhtaammassa energiantuotannossa. Täältä osalta tarvitaankin lisää tutkimusta leijukerroslämmönsiirtimen käyttäytymiseen happipolto-oloissa. Tällä hetkellä on tunnistettu mahdollisia ongelmia aiheuttavat mekanismit, mutta niiden merkittävydestä tai ratkaisukeinoista ei ole vielä varmuutta.

Leijukerrospolton lähitulevaisuus näyttää valoisalta ja todennäköisesti fossiiliset polttoaineet tulevat olemaan tärkeässä roolissa vielä pitkään. Leijukerroslämmönsiirrin onkin tärkeässä roolissa pyrittäessä suurempiin laitousyksiköihin ja puhtaampaan polttoon.

LÄHDELUETTELO

Amec Foster Wheeler. a Pioneering CFB technology. [viitattu 15.4.2015.] Saatavissa: http://www.fwc.com/getmedia/0a00989d-f16e-45e0-9cd1-6c8b4dbb2e8d/CFB_Brochure.pdf.aspx

Amec Foster Wheeler. b 460 MWe Supercritical OTU CFB Boiler Lagisza Power Plant Poland. [viitattu 15.4.2015.] Saatavissa: https://www.fwc.com/getmedia/03851acf-0d51-4582-8c26-6b295e6bf1f3/Brochure_Lagisza.pdf.aspx

Annaratone, D. 2008. Steam generators, Description and design. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 427. ISBN 978-3-540-77714-4.

Basu, Nag. 1995. Heat transfer to walls of a circulating fluidized-bed furnace. Chemical Engineering Science, Vol. 51. No. 1. 1996.

Basu. 2006. Combustion and gasification in fluidized beds. Boca Raton. CRC Press. Taylor & Francis Group. 473. ISBN 0-8493-3396-2

Beisheim, Zieba, Scheffknecht. 2013. Experimental investigations on deposit formation by recarbonation on external heat exchanger surfaces in oxyfuel CFB boilers. Energy Procedia 37. 2013. 1283- 1290.

Enerdata. Global Energy Statistical Yearbook 2014. [viitattu 15.4.2015] Saatavissa: <https://yearbook.enerdata.net/energy-consumption-data.html>

Goidich, Hyppänen. 2001. Foster Wheeler compact CFB boilers for utility scale. Proceedings of 16th International Conference on Fluidized Bed Combustion.

Holger, M. 2010. VDI Heat Atlas. M5 Heat Transfer in Fluidized Beds. Karlsruher Institute für Technologie. Karlsruhe. Saksa. ISBN 978-3-540-77876-9

Huhtinen, Kettunen, Nurminen, Pakkanen. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. painos. Helsinki. Oy Edita Ab. 379. ISBN 951-37-3360-2

Ji, Lu, Yang, Liu. 2010. The experimental study on heat transfer characteristics of the external heat exchanger. School of Power Engineering of Chongqing university. Chongqing. Kiina. Proceeding of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-02682-9.

Kim, Ahn, Kim, Lee. 2002. Heat transfer and bubble characteristics in a fluidized bed with immersed horizontal tube bundle. International Journal of Heat and Mass Transfer 46. 2003. 399- 409.

Liljendal, Fout, Turek, Nsakala, Mohn. 2006. Alstom's oxygen- fired CFB technology development status for CO₂ mitigation. 31st International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems. Toukkuu 21- 25. 2006. Clearwater. Florida. USA.

Liu, Lu. 2010. Experimental research on gas-solid flow in an external heat exchanger with double outlets. Gollege of Power Engineering of Chongqing University. Chongqing. Kiina. Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Springer Berlin Heidelberg. 367-372. ISBN 978-3-642-02682-9

Man, Haibo, Qinggang, Yunkai, Guolian. 2011. Heat transfer characteristics of fluidized bed heat exchanger in a 300 MW CFB boiler. Powder Technology. 222. 2012. 1- 7.

McCauley, Kraft, Maryamchik, Wietzke, Alexander. 2012 IR- CFB Boilers: Supercritical Once through Developments for Power Generation. Power-Gen Asia. Bangkok, Thaimaa. Lokakuu 3-5, 2012

Nurminen, R. 2001. Leijukerroslämmönsiirtimen leijutusjärjestelyjen säätö ja optimointi. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan osasto.

Raiko, Saastamoinen, Hupa, Kurki- Suonio. 2002. Poltto ja palaminen. Jyväskylä. Teknillistieteelliset akatemiati- De tekniskvetenskapliga akademierna r.y. 750. ISBN 951-666-604-3

Suraniti, Nsakala, Darling. 2009. Alstom Oxyfuel CFB boilers: a Promising option for CO₂ capture. Alstom. Energy Procedia 1. 2009. 543- 548.

Teir, S. 2003. Steam boiler technology. 2. Painos. Helsinki. Picaset Oy. 216. ISBN 951-22-6759-4

Vakkilainen. 2008. Boiler Mechanical Design and Manufacture. Luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. BH50A1400 Steam boilers.

Vakkilainen. 2010. Leijukerroskattilat. Luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. BH50A0800 Höyrykattilatekniikka.

Wang, Luo, Fang, Ni, Cen. 2001. Development of a new external heat exchanger for a circulating fluidized bed boiler. Chemical Engineering and Processing. 42. 2003. 327-335.

Xianbin, Minhua, Long, Yanjun, Zhenghai, Fengjun, Man, Zhong. 2013. Research and Design of 330 MW Circulating Fluidized Bed Boiler. Cleaner Combustion and Sustainable World. Springer Berlin Heidelberg. 623- 627. ISBN 978-3-642-30445-3

Xiong, Lu, Amano, Liu. 2009. Gas- solid flow in a integrated external heat exchanger for CFB boiler. Powder Technology. 202. 2010. 55- 61.

Xiong, Lu, Liu, Chen. 2007. Investigation on the Integrated External Heat Exchanger for a New Type CFB Boiler Arrangement. International Conference on Power Engineering 2007. Lokakuu 23- 27, 2007. Hangzhou. Kiina.