

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Ylikriittinen kiertoleijukattila

Supercritical CFB Boiler

Työn tarkastaja: Kari Myöhänen

Työn ohjaaja: Kari Myöhänen

Lappeenranta 18.3.2020

Jan-Henrik Romppainen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Jan-Henrik Romppainen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Kari Myöhänen

Kandidaatintyö 2020

28 sivua, 12 kuvaa ja 4 taulukkoa

Hakusanat: Ylikriittinen kiertoleijukattila, Supercritical CFB Boiler, CFB

Kandidaatintyön tavoitteena on perehtyä ylikriittisiin kiertoleijukattiloihin, niiden etuihin sekä historiaan.

Työn alussa esitellään lyhyesti, mitä ylikriittisellä kiertoleijukattilalla ja ylikriittisellä höyryllä tarkoitetaan. Lisäksi tutustutaan ylikriittisen kiertoleijukattilan rakenteeseen ja mitä materiaaleja sen rakentamisessa voidaan hyödyntää.

Hiilen tehokas ja mahdollisimman ympäristöystävällinen hyödyntäminen on muuttunut yhä tärkeämmäksi asiaksi vuosien kuluessa. Julkisen ja yksityisen sektorin tahot ovat kiinnostuneita kehittämään yhä tehokkaampia ja puhtaampia menetelmiä hiilen hyödyntämistä varten.

Yleinen maailmalla vallitseva hiilenpolttotapa on murskata hiili ja polttaa murske polttokattilassa. Hiilipölykattiloiden päästöjä on pyritty kontrolloimaan kalliilla päästöjen puhdistus ja kaappaus laitteilla, sekä laitoksen hyötysuhdetta kohottamalla.

Pääasiassa hyötysuhdetta on kohotettu siirtymällä yhä korkeampiin höyryn arvoihin. Kiertoleijukattilan soveltuvuutta ylikriittisen höyryn hyödyntämiseen alettiin tutkia vasta 1990 luvulla. Kiertoleijukattilan etuina on hiilipölykattiloita alhaisemmat päästöt ja laajempi polttoainevalikoima. Tekniikan heikkoutena on suhteellisen heikko hyötysuhde ja tästä syystä olikin luonnollista tutkia ylikriittisen höyryn sopivuutta kiertoleijukattiloissa ja näin nostaa aiemmin heikkoutena ollutta hyötysuhdetta.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
lyhenneluettelo	4
1 JOHDANTO	5
1.1 Työn tavoite	5
1.2 Työn rajaus	5
2 YLIKRIITTINEN KIERTOLEIJUKATTILA	6
2.1 Mitä ylikriittisellä kiertoleijukattilalla tarkoitetaan.....	6
2.2 Ylikriittinen höyry	7
3 RAKENNE	10
3.1 Höyryputkisto	11
3.2 Kattila	12
3.3 Rakentamisessa käytettäviä materiaaleja	13
4 YLIKRIITTISEN KIERTOLEIJUKATTILAN EDUT	15
5 YLIKRIITTISET KIERTOLEIJUKATTILAT MAAILMALLA	19
5.1 Łagisza.....	20
5.2 Baima.....	23
5.3 Samcheok	25
6 HISTORIA	27
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	28
Lähdeluettelo	29

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

- LHV: Alempi lämpöarvo
- CFB: Kiertoleijukattila
- SC: Supercritical eli ylikriittinen
- ASC: Advanced Supercritical
- USC: Ultra Supercritical
- SO_x : Yhteisnimitys rikkioksidoille
- NO_x : Yhteisnimitys typpioksidoille
- SCR: Selektiivinen katalyyttinen pelkistys
- FGD: Savukaasujen rikinpoisto

1 JOHDANTO

Ylikriittiset kiertoleijukattilat ovat energiantuotantoteknologiana suhteellisen tuore keksintö. Ylikriittistä höyryä sekä kiertoleijukattiloita on hyödynnetty energiantuotannossa jo vuosikymmenien ajan, mutta näiden yhdistämistä alettiin tutkimaan vasta 1990-luvulla.

1.1 Työn tavoite

Työn tavoitteena on esitellä ylikriittisiä kiertoleijukattiloita. Työn yhteydessä esitetään lyhyesti mitä ylikriittinen höyry on, ja mitä hyötyä siitä on energiantuotannossa. Ylikriittisten kiertoleijukattiloiden rakenteeseen perehdytään pintapuolisesti ja tarkastellaan laitoksen rakentamisessa käytettävien metallien etuja ja haittoja. Lisäksi työssä esitellään maailmalla olevia ylikriittisiä kiertoleijukattiloita ja perehdytään teknologian historiaan.

1.2 Työn rajaus

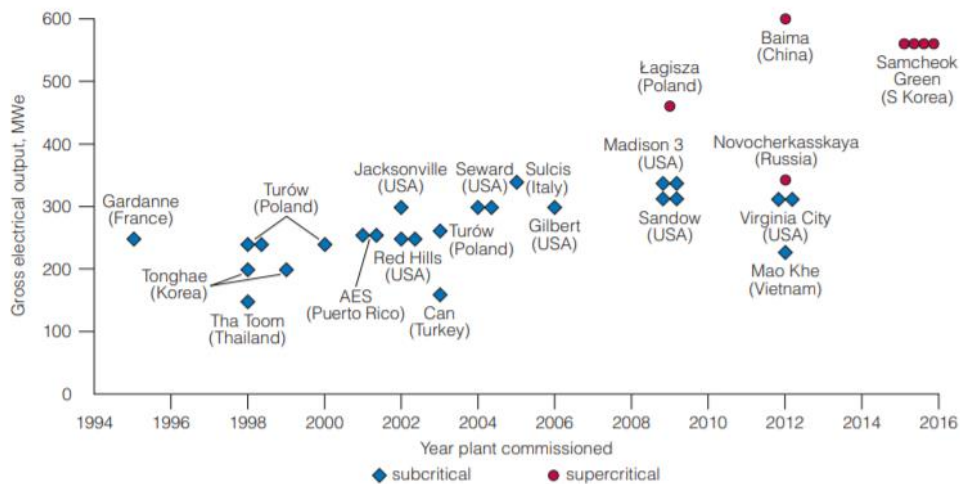
Ylikriittinen kiertoleijukattila, eli Supercritical CFB-Boiler on työn tutkimuksen kohteena. Kandidaatin työssä on tarkoitus esitellä lukijalleen perustietoja ylikriittisestä kiertoleijukattilasta.

2 YLIKRIITTINEN KIERTOLEIJUKATTILA

2.1 Mitä ylikriittisellä kiertoileijukattilalla tarkoitetaan

Ylikriittisellä kiertoileijukattilalla eli Supercritical CFB boilerilla, tarkoitetaan tavallista kiertoileijukattilaa, jota on muunnettu niin, että siinä kiertävä höyry toimii ylikriittisessä paineessa ja lämpötilassa.

Kiertoileijukattilan ominaisuuksia on laaja polttoainevalikoima ja alhaiset päästöt. Teknologian haittapuolena on suhteellisen heikko hyötysuhde, mikä rajoittaa teknologian leviämistä maailmalla. Tämän heikkouden poistamiseksi on tutkittu ylikriittisen höyryn käyttämistä kiertoileijukattiloissa, sillä tehokkain tapa kasvattaa hyötysuhdetta on nostaa höyryn arvoja. (Song 2019) Kuvassa (1) esitetään ylikriittisten kiertoileijukattiloiden sekä tavallisten kiertoileijukattiloiden sijaintia ja kokoluokkaa maailmalla.



Kuva 1. Viimevuosina rakennettujen kiertoileijukattiloiden sijainti ja kokoluokka. Ylikriittiset kiertoileijukattilat merkitty punaisella. (Qian Zhu 2013)

Ylikriittisellä höyryllä tarkoitetaan höyryä, minkä lämpötilaa ja painetta on nostettu yli veden kriittisen pisteen (374 °C ja 221 bar). Tyypillisesti ylikriittisen höyryn paine on nostettu 230-265 bar paineeseen ja lämpötila yli 560 °C asteeseen. (Wiatros-Motyka 2016) Ylikriittistä höyryä hyödyntämällä saadaan kohotettua laitoksen hyötysuhdetta ja alennettua tuotettuja savukaasupäästöjä suhteessa tuotettuun energiamäärään, sillä parempi hyötysuhde tarkoittaa pienempää polttoaineen kulutusta suhteessa tuotettuun sähköön ja lämpöön. (Korteila 2003)

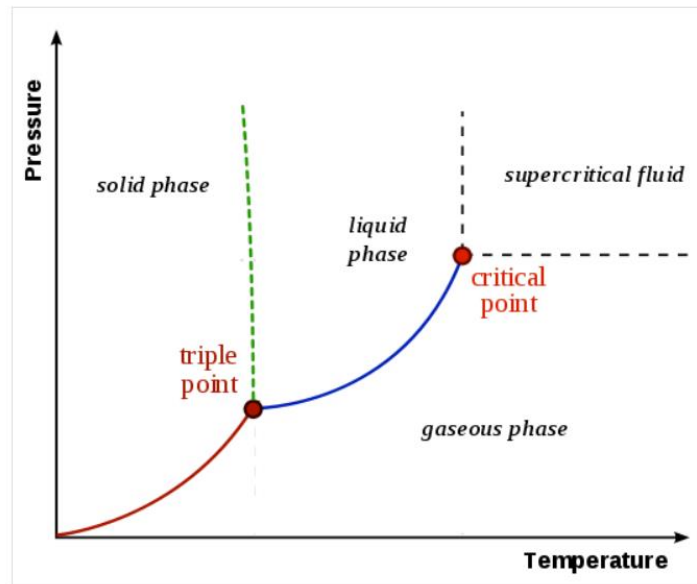
Kiertoleijukattila sopii rakenteensa puolesta erinomaisesti ylikriittisen höyryn hyödyntämiseen. Ylikriittisen höyryn avulla voidaan minimoida tavallisen kiertoleijukattilan heikkouksia ja kasvattaa sen etuja. Tyypillisesti ylikriittistä höyryä hyödyntävällä CFB laitoksella on korkea hyötysuhde (45-50% LHV) verrattuna alikriittistä höyryä hyödyntäviin voimalaitoksiin (38-40% LHV). (Basu 2015)

2.2 Ylikriittinen höyry

Ylikriittisestä höyrystä puhuttaessa tulee tyypillisesti useita eri termejä esille. Yleisimpiä termejä ovat, Subcritical, Supercritical, Ultra supercritical ja Advanced Ultra supercritical. On kuitenkin huomioitava, että ainoastaan alikriittisen (subcritical) ja ylikriittisen (supercritical) höyryn raja on määritetty. Ylikriittisen höyryn eteen lisätyt ultra tai advanced sanat eivät ole virallisia ja tarkasti määritettyjä nimityksiä, vaan pikemminkin suuntaa antavia nimityksiä kertomaan lukijalle, missä lämpötilassa tai paineessa liikutaan.

Veden kriittinen piste on 373.946 °C astetta ja 220.64 baaria. Tämän pisteen ylittyessä vesihöyryä ei kyetä enään tiivistämään nesteeksi painetta kohottamalla. Ylikriittisen höyryn neste ja kaasufaaseja ei voida erottaa toisistaan, ja fluidissa on havaittavissa niin kaasujen kuin nesteiden ominaisuuksia. Esimerkiksi ylikriittinen höyry on kaasujen lailla kokoonpuristettavissa ja se omaa nesteiden kaltaisen tiheyden. (Ricke, Pandey et al. 2019)

alla olevassa kuvassa (2) on esitetty faasidiagrammin avulla veden olonmuodot suhteessa lämpötilaan ja paineeseen.



Kuva 2. Veden faasidiagrammi.(Oldridge)

Perinteiset alikriittiset (Subcritical) voimalaitokset toimivat tyypillisesti 160-170 baarin paineessa ja alle 565 °C lämpötilassa. Tyypillisesti tämänkaltaisen laitoksen hyötysuhde liikkuu 35% paikkeilla.

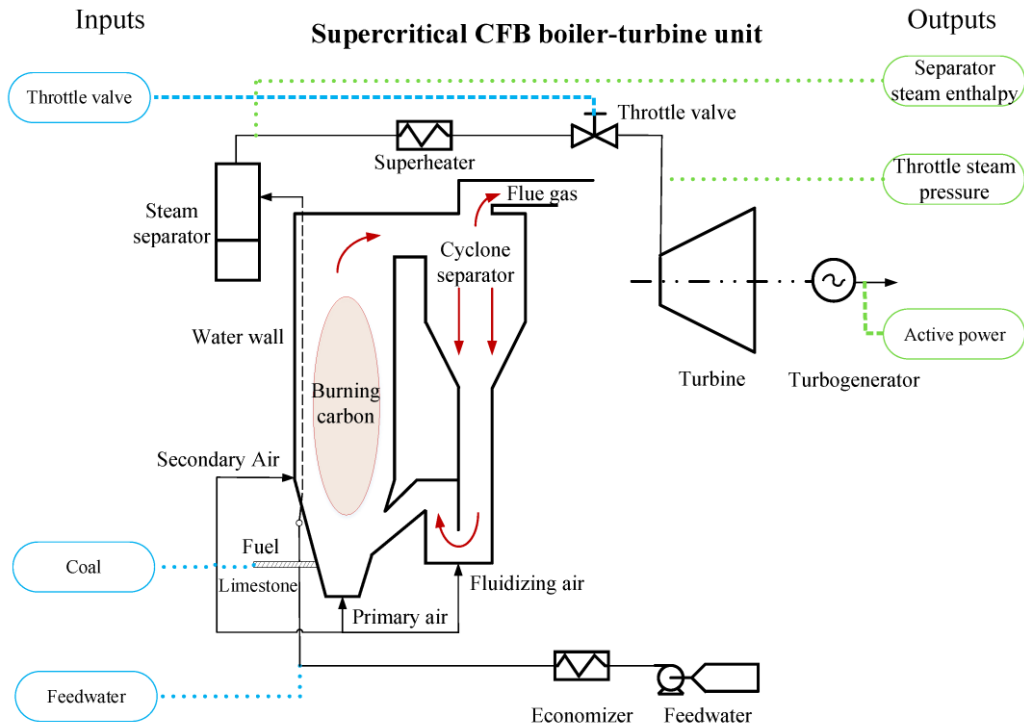
Lämpötilaa ja painetta kasvattamalla saadaan parannettua voimalaitoksen hyötysuhdetta. Hyötysuhteen kasvattaminen on tärkeää siksi, että korkeamman hyötysuhteen omaavat voimalaitokset tuottavat vähemmän päästöjä tuotettuun energiamäärään nähden. Lisäksi korkean hyötysuhteen omaavien voimalaitosten polttoainekustannukset ovat matalampia verrattuna heikomman hyötysuhteen omaaviin laitoksiin.

Yksi tapa hyötysuhteen kasvattamisessa on ylikriittisen höyryn hyödyntäminen. Ylikriittistä höyryä hyödyntävän laitoksen höyry liikkuu noin 220-240 baarin paineessa ja 565-580 °C asteen lämpötilassa. Tyypillisesti ylikriittistä höyryä hyödyntämällä laitoksen hyötysuhde saadaan nostettua 38% kohdille. (Nair, Kumanan 2015)

Seuraava askel ylikriittisestä höyrystä on niin kutsuttu Ultra Supercritical steam, eli Ultra ylikriittinen höyry. USC höyryn arvot liikkuvat 250-340 baarin paineessa ja 595 – 620 °C asteen lämpötilassa. Ultra ylikriittistä höyryä hyödyntämällä voidaan nostaa voimalaitoksen hyötysuhde 42% alueelle. (Nair, Kumanan 2015)

USC höyryn jälkeen siirrytään AUSC-höyryn alueelle eli kehittyneen ultra ylikriittisen höyryn käyttämiseen. AUSC-Höyryn lämpötila on yli 705 °C ja paine on yli 340 baaria. Hyötysuhde ylittää 45% riippuen käytetyn höyryn arvoista. (Nair, Kumanan 2015)

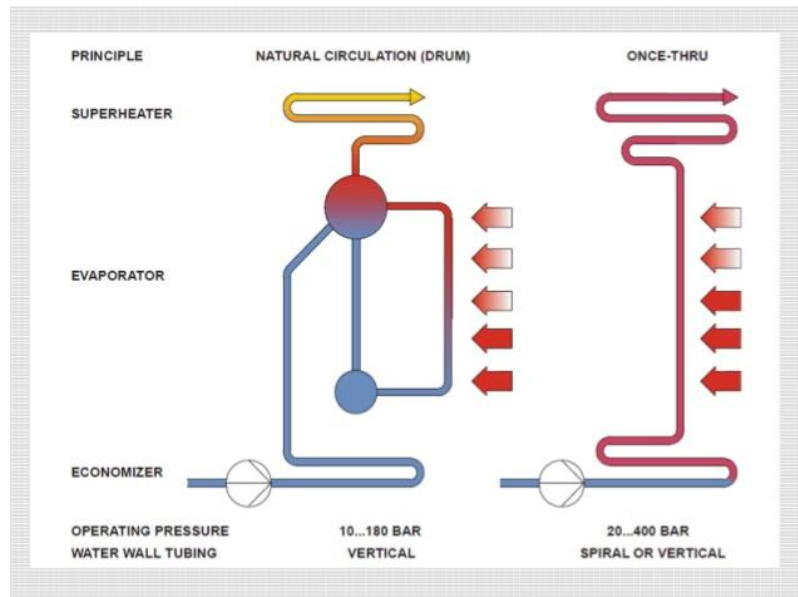
3 RAKENNE



Kuva 3. Tyypillisen ylikriittisen kiertoleijukattilan rakenne.(Zhang, Xue et al. 2019)

Ylikriittinen kiertoleijukattila eroaa rakenteeltaan perinteisestä alikriittisestä kiertoleijukattilasta tai ylikriittisestä hiilipölykattilasta. Huomattavin rakenteellinen ero alikriittisten ja ylikriittisten kiertoleijukattiloiden välillä on höyryrummun puuttuminen laitoksesta. Syy höyryrummun puuttumiseen löytyy hyödynnettävän höyryn eroavista arvoista. Ylikriittistä höyryä käyttäessä ei voida hyödyntää luonnollista kiertoa, sillä höyrystä ei voida enään erottaa nestettä, mihin luonnollinen kierto perustuu. Yllä olevassa kuvassa (3) on esitetty tyypillisen ylikriittisen kiertoleijukattilan rakenne.

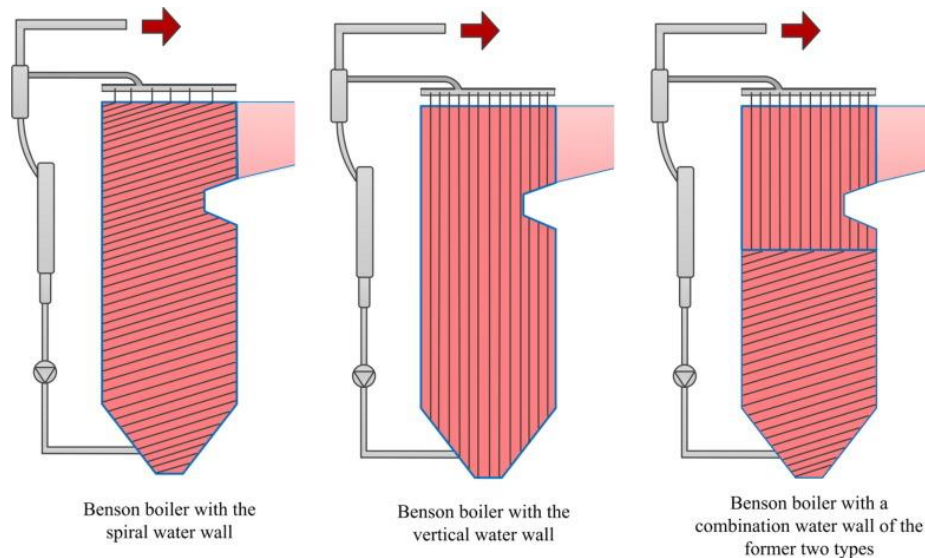
3.1 Höyryputkisto



Kuva 4. Kattiloissa käytettävien höyryputkien rakenteita. (Choudhury 2014)

Ylikriittisen höyryn paineessa toimittaessa hyödynnetään läpivirtaus mallista putkistoa. Alikriittisissä paineissa taas voidaan käyttää luonnollista kiertoa hyödyntävää höyryputkistoa. Yllä olevassa kuvassa (4) on esitetty nämä kaksi erilaista ratkaisua.

Läpivirtauskattilan putkisto on mahdollista valmistaa pystysuoraan tai spiraalin mallisesti. Tyypillisesti ylikriittisten kiertoileijukattiloiden putkisto rakennetaan pystysuoraan ja perinteisten hiilipölykattiloiden putkisto spiraalin mallisesti. Läpivirtauskattilan höyryputkille on ominaista, että sen eri kohdissa voi olla useita eri nesteen olomuotoja juoksevasta vedestä, höyryyn ja lopulta ylikriittiseen höyryyn. (Danesi March 2004) Alla olevassa kuvassa (5) on esitetty Benson mallisia läpivirtausputkistoja.



Kuva 5. Erilaisia läpivirtaus putkistoja. (Siyang, Dong et al. 2017)

3.2 Kattila

Kiertoleijukattilan pedin lämpötila on 800-900 °C asteen lämpötilassa. Petiä leijutetaan palamisilman varassa ja kattilassa poltettava aines syötetään petiin palamaan. Kattilan peti muodostuu tyypillisesti hiekasta, kalkkikivestä ja polton yhteydessä muodostuvasta tuhkasta. Pedistä karkaavat aineet kerätään talteen ja syötetään syklonien avulla takaisin petiin. (Basu 2015)

Hiekkaa käytetään vähätuhkaisia polttoaineita kuten haketta poltettaessa. Kalkkikiveä käytetään poltettaessa polttoaineita, jotka sisältävät suuria määriä rikkiä päästöjen kontrolloimiseksi. Poltossa syntyneitä tuhkaa käytetään petimateriaalina, kun kalkkikiveä ei tarvitse hyödyntää rikkipäästöjen kontrolloimiseksi, ja poltettavan polttoaineen oma tuhkapitoisuus on suuri. Tyypillisesti kiertoleijukattilassa poltettavan polttoaineen massa on vain 1-3% kattilan pedin massasta (Basu 2015)

Itse kattila muodostuu, tulipesästä, sykloneista, höyryputkistosta, kiinteiden aineiden kierrätysjärjestelmästä ja tarpeen mukaan ulkoisista lämmönsiirtimistä. Tulipesän seinämällä sijaitseva höyryputkisto ottaa talteen osan poltonyhteydessä syntyvästä lämmöstä. Loput syntyvästä lämmöstä otetaan talteen muualla kattilassa, missä tulistimet, ekonomiseri eli tuloveden esilämmitin ja luvo eli tuloilman esilämmitin sitovat savukaasuissa olevaa lämpöä. (Basu 2015)

3.3 Rakentamisessa käytettäviä materiaaleja

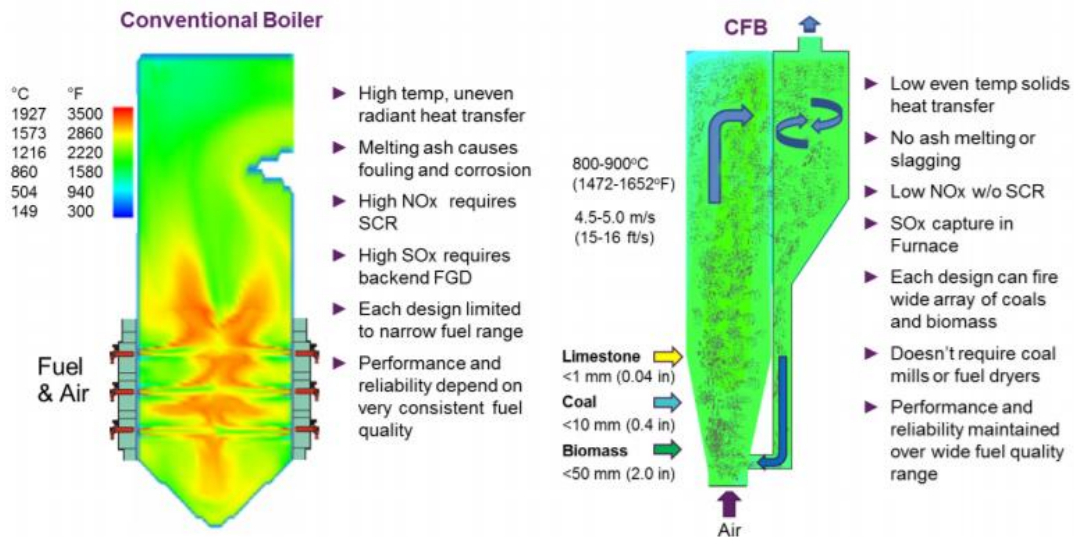
Voimalaitoksen kattilan suunnittelussa yksi suurimmista haasteista on oikeiden materiaalien valinta, koska materiaalikustannukset muodostavat suurimman osan voimalaitoksen peruskustannuksista. Tämän takia on tärkeää, että rakentamisessa käytettävät materiaalit valitaan huolella. Materiaalien valintaa vaikeuttaa erilaiset vaatimukset kuten rakenteiden kestävyys, kustannustehokkuus, helppohuoltoisuus ja itse kattilan toimintarvot. Materiaalien valinta on tärkeää myös siksi, että se vaikuttaa koko laitoksen toimintaan. Tärkeiden osien hajotessa kattila joudutaan ajamaan alas korjaustoimenpiteiden ajaksi ja tyypillinen kattilan alasajo ja takaisin käyttöönotto vie useita tunteja korjauksessa kuluneesta ajasta puhumattakaan. Odottamaton laitoksen alasajo voi aiheuttaa suuria rahallisia menetyksiä ja vaikuttaa suuresti laitoksen kannattavuuteen. (Basu 2015)

Voimalaitoksen hyötysuhde paranee käytettävän paineen ja lämpötilan mukana. Aikaisemmin rajoituksia on aiheuttanut metallien lämmönkestävyys hintaan nähden, mutta tekniikan kehittyessä uusia kustannustehokkaita materiaaleja ilmestyy markkinoille. Materiaalien valintoja tehdessä on huomioitava valittavan aineen soveltuvuus painekestävyyden, lämmönkestävyyden, lämmönsiirtokykynsä, sekä korroosio ja eroosio kestävyksiensä kannalta. Alla esitetyssä taulukossa (1) on esitetty mahdollisia vaihtoehtoja ylikriittisen kiertoileijukattilan osien materiaaleiksi. (Basu 2015)

Taulukko 1. Voimalaitoksissa käytettävien materiaalien edut ja haitat (Nair, Kumanan 2015)

Materiaali	Edut	Haitat
Niukkaseoksiset ferriitti teräkset	Helposti hitsattava	Metalli viruu helposti
	Kestäviä ja erinomainen kestävyys höyrypuolen hapettumista vastaan	Kestää vain 420 °C lämpöasteeseen asti
Virumista kestävät ferriittiset teräkset	Hyvä kestävyys höyrypuolen hapettumista vastaan	Pitkät valmistusajat
	Kestää 620 °C asteeseen asti	Heikosti hitsattavissa
Austeniittiset ruostumattomat teräkset	Kestää 680 °C asteeseen asti	Suuri lämpölaajeneminen
	Metalli ei viru herkästi	Herkkä korroosiolle
	Korkea kestävyys poltto- puolen korroosioita vastaan ja höyrypuolen hapettumista vastaan	Metalli murtuu helposti kosteilla alueilla stressin aiheuttaman korroosion takia
Nikkelipohjaiset metalliseokset	Kestää yli 680 °C lämpötiloja	Korkeat valmistus kustannukset

4 YLIKRIITTISEN KIERTOLEIJUKATTILAN EDUT



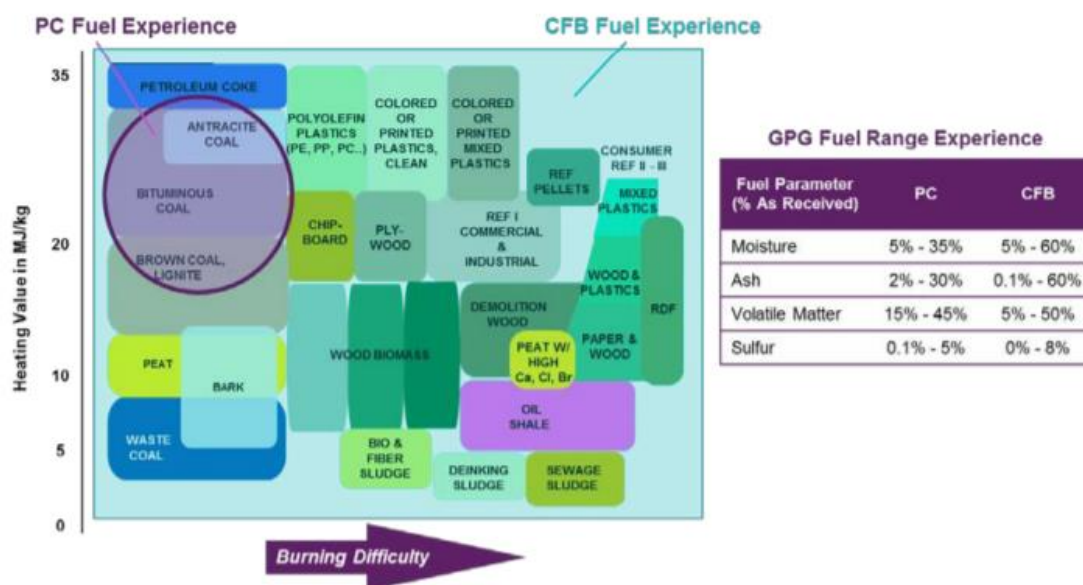
Kuva 6. Perinteisen kattilan ja kiertoleijukattilan eroja.(Giglio 2017)

Ylikriittisen höyryn yhdistäminen kiertoleijukattiloiden kanssa uskotaan olevan yksi tulevaisuudessa laajemmin hyödynnettävissä olevista energiantuotantoteknologioista. Kiertoleijukattila on osoittanut kykynsä hyödyntää tehokkaasti laajaa polttoainevalikoimaa. Syy tähän löytyy kiertoleijukattilan rakenteesta. Kiertoleijukattilan pedissä oleva aines 'karkaa' ja kiertää polton yhteydessä olevien palokaasujen kanssa eteenpäin kattilassa. Kiertävä aines sekä osittain palanut polttoaine kerätään myöhemmin talteen sykloonien avulla ja syötetään takaisin petiin. Tämä kuumien aineiden kiertäminen muodostaa kattilassa termisen vauhtipyörän ja takaa polttoaineen tehokkaan palamisen sekä tasaisen lämpövuon ympäri kattilaa. Termisen juoksupyörän muodostuminen antaa kiertoleijukattilalle kyvyn hyödyntää laajempaa polttoainevalikoimaa ja sietää polttoaineen laadunvaihtelua. (Utt, Giglio 2012) Yllä sijaitsevassa kuvassa (6) esitetään perinteisen kattilan ja kiertoleijukattilan eroja.

Isoissa voimalaitoksissa jopa 75-85% operointikuluista muodostuu pelkästään polttoaineen vuoksi. Siksi ylikriittisen kiertoleijukattilan kyky hyödyntää useita erillaisia

polttoaineita on tärkeä esille tuotava asia. Vaikeasti poltettavat ja aiemmin huonosti hyödynnettävät polttoaineet ovat luonnollisesti halvempia kuin tavallisesti poltossa olevat hiilet. Myös hiilipölykattila voidaan suunnitella käyttämään heikkolaatuista polttoainetta, mutta perinteiset hiilipölykattilat ovat tiukemmin sidottuina suunniteltuun polttoaineeseen kierto- leijukattiloihin verrattuna. Hiilipölykattilassa käytettävän polttoaineen vaihdos voi heikentää laitoksen hyötysuhdetta, vaikeuttaa kunnossapitoa ja tehdä laitoksen toiminnasta epäluotettavaa. (Giglio 2017)

Alla olevassa kuvassa (7) on esitetty Sumitomo SHI FW yhtiön kokemuksia kierto- leijukattiloilla tehokkaasti hyödynnettävissä olevista polttoaineista verrattuna perinteisiin hiilipölykattiloihin.

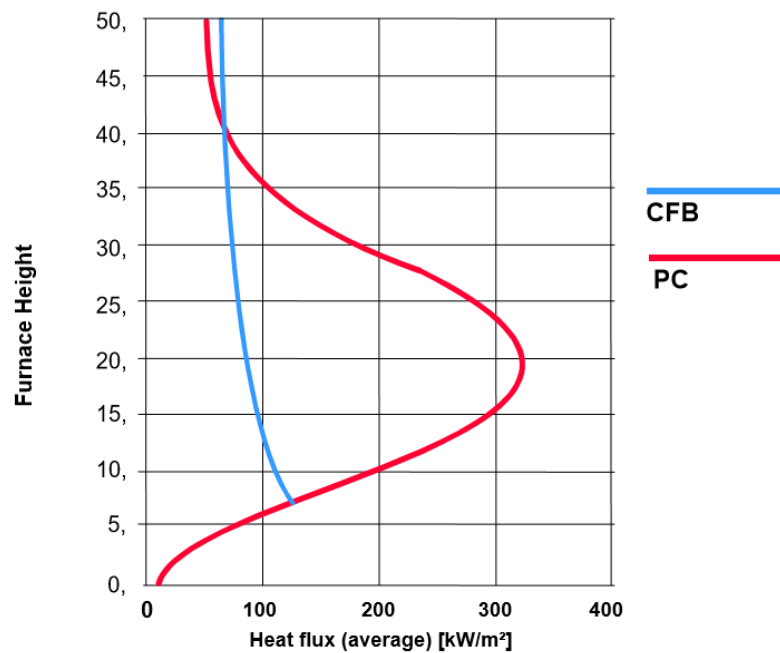


Kuva 7. Sumitomo SHI FW yhtiön kokemuksia, mitä kaikkea CFB kattiloilla voidaan polttaa.(Giglio 2017)

Ylikriittisillä kierto- leijukattiloilla on muitakin etuja hiilipölykattiloihin verrattuna. Kierto- leijukattila polttaa polttoaineensa alhaisemmassa lämpötilassa (800-900°C) kuin

hiilipölykattila (1300-1400°C). Alhaisemman polttolämpötilan ansiosta kiertoleijukattilan kuonaantuminen on erittäin epätodennäköistä. Hiilipölykattilassa taas polttoaineen palamisen yhteydessä syntyvä tuhka saattaa sulaa ja muodostaa kuonaa kattilan pinnoille. Lisäksi kiertoleijukattilan polttoaineen vaiheittainen palaminen ja matalampi lämpötila synnyttävät vähemmän typpioksidipäästöjä. Palamisen yhteydessä syntyvän rikkidioksidin kontrollointi on helppoa poltossa syötettävän kalkkikiven ansiosta. Kalkkikivi reagoi kuumuudessa ja muuttuu kalsiumoksidiksi eli sammuttamattomaksi kalkiksi. Kalsiumoksidi reagoi rikkidioksidin ja hapen kanssa ja muodostaa hiilidioksidia ja Kalsiumsulfaattia (Padhan, Kumar 2013). Hiilipölykattiloissa typpioksideiden kontrollointi vaatii SCR laitteistoa (Selektiivinen katalyyttinen pelkistys) ja savukaasuissa olevan rikin poistaminen vaatii savukaasujen rikinpoistojärjestelmää (FGD). (Utt, Giglio 2012)

Kiertoleijukattilan tasaisempi lämpövuoto suojaa kattilaa lämpöerojen aiheuttamilta rasitusvaurioilta. Kuten alhaalla esitetystä kuvasta (8) näkee, hiilipölykattilan lämpövuoto muuttuu suuresti korkeuden mukaan. Epäsäännöllisen lämpövuonon vuoksi ylikriittisen höyryn hyödyntäminen on hankalaa hiilipölykattiloissa. Suuret lämpötilanvaihtelut aiheuttavat kovaa rasitusta kattilan rakenteille.

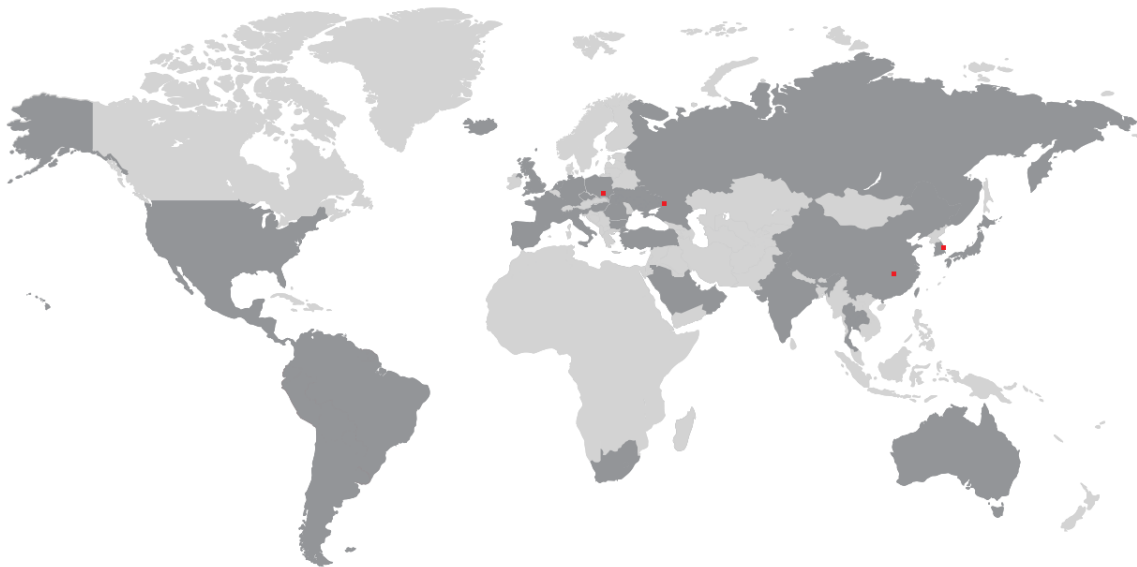


Kuva 8. Kiertoleijukattilan ja hiilipölykattilan keskimääräiset lämpövuot suhteessa kattilan korkeuteen. (Lundqvist, Schrief et al. 2003)

Uusiutuvan energiantuotannon yleistyessä säätövoiman tarve kohoaa. Ylikriittiset kiertoleijukattilat sopivat tähän rooliin. Koska laitos kykenee toimimaan hyvinkin alhaisilla kuormilla ongelmitta (30-100%) kun taas perinteisille hiilipölykattiloille voi tulla ongelmia alle 50% kuormalla. (Zhang, Xue et al. 2019).

Myös pääomakustannukset ovat hiilipölykattiloita matalammat. Esimerkiksi kiertoleijukattilat voidaan suunnitella kooltaan pienemmiksi kuin hiilipölykattilat. Laitos ei tarvitse kalliita SCR tai FGD järjestelmiä päästöjen hallintaan. (Giglio 2017)

5 YLIKRIITTISET KIERTOLEIJUKATTILAT MAAILMALLA



Kuva 9. Ylikriittisten kiertoleijukattiloiden sijainnit maailmalla (2017)

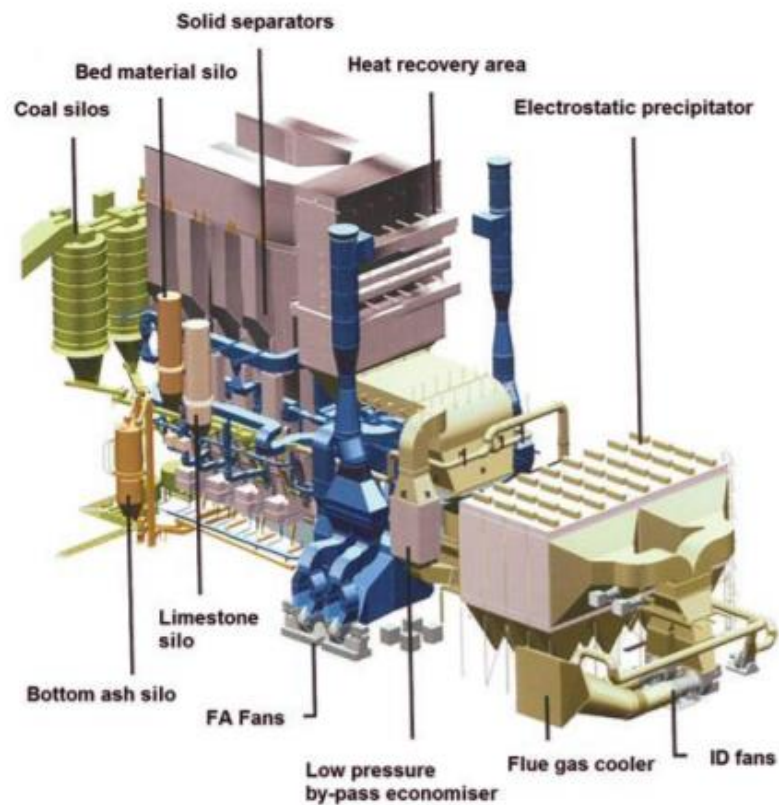
Ylikriittisiä kiertoleijukattiloita sijaitsee useissa paikoissa maailmalla. Tunnetuin laitos sijaitsee Puolassa, mutta käytössä olevia laitoksia sijaitsee myös Venäjällä, Etelä Koreassa ja Kiinassa. Erityisesti Kiina on noussut esille ylikriittisten kierto-leijukattiloiden tekniikan kehittämisessä ja hyödyntämisessä, sillä 2017 Kiinassa oli yli 82 Ylikriittistä kiertoleijukattilaa, joko rakennutteilla tai jo toiminnassa. (Zhang, Xue et al. 2019)

yllä olevassa kuvassa (9) esitellään ylikriittisten kiertoleijukattiloiden sijaintia maailmalla.

5.1 Łagisza

Maailman ensimmäinen ylikriittinen kiertoleijukattila rakennettiin Łagiszan voimalaitokselle, Będziniin, Puolaan. Voimalaitos on 460 megawatin kokoinen ja kiertoleijukattila aloitti täyspäiväisen toimintansa kesäkuussa 2009. Łagiszan ylikriittisen kiertoleijukattilan rakentamisen yhteydessä saatua kokemusta pidetään tärkeänä askelmana ylikriittisen CFB teknologian kehittämisessä ja hyödyntämisessä. (Wiatros-Motyka 2016)

Laitoksen suunnitteluun ja rakentamiseen osallistuivat Foster Wheeler Energy Polska, Foster Wheeler Energia OY (nykyään Sumitomo SHI FW), Alstom Power, Elektrobudowa S.A Katowice, Mostostal Krakow, Energo-Eko-System Katowice Consortium, Ciepło-Serwis Bedzin, PURE Jaworzno Consortium, Metso Automation Finland, Metso Automation Polska. Kaiken kaikkiaan ylikriittisen kiertoleijukattilan rakentamisen aloittamisesta 2006 sen valmistumiseen 2009 kesti 3 ja puoli vuotta (Wiatros-Motyka 2016)



Kuva 10. Łagiszan ylikriittisen kiertoleijukattilan rakenne. (Wiatros-Motyka 2016)

Łagiszan muotoilu perustuu Foster Wheelerin toisen sukupolven kierto-leijukattilatekniikkaan. Laitoksen merkittävimmät elementit ovat kattilan kompakti koko, INTREX™ lämmönsiirrin ja savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmä ja polttokammioon integroidut höyryjäähdytteiset syklonit. (Wiatros-Motyka 2016)

Kattilan seinille on sijoitettu 8 syklonia, jotka ovat asennettu 4 ryhminä kahdelle kattilan seinistä. Syklonien asentaminen näin takaa laitokselle suuren kiinteiden aineiden erotteluhyötysuhteen mahdollisimman pienellä savukaasujen paineenhäviöllä. (Wiatros-Motyka 2016)

Foster Wheelerin integroitu lämmönsiirrin INTREX™ yhdistää lämmönsiirtimien vesijärjestelmän, polttokammion vesihöyryjärjestelmän kanssa. Tämä mahdollistaa kiertävien aineiden jäädytyksen ja takaa, että järjestelmä toimii kaikilla kuormilla ongelmitta. Systemi on sijoitettu syklonien keräämän aineen palautusputken päähän, minkä ansiosta voidaan välttyä korroosiolta savukaasujen lämmön ja hapokkuuden vuoksi. (Wiatros-Motyka 2016)

Kattilan ulostuloon sijoitettu rekuperaattori jäähdyttää ulos kulkevan savukaasun 130 °C asteesta 85 °C asteeseen. Rekuperaattori nostaa laitoksen hyötysuhdetta noin 0.8 %

Kattilassa käytettävän pystysuuntaisen Bensonputkiston ja Siemensin ylikriittisen höyryvirtausteknologian ansiosta Łagiszan laitos kykenee toimimaan 40-100% kuormavälillä ongelmitta. (Wiatros-Motyka 2016)

Łagiszan ylikriittinen kierto-leijukattila on erittäin joustava polttoaineensa suhteen. Polttokammion lämpötila on kierto-leijukattiloille tyypillisesti suhteellisen matala (800-900°C). Matalan lämpötilan ansiosta vältetään kuonan muodostumista ja korkean lämpötilan aiheuttamaa korroosiota. (Wiatros-Motyka 2016)

Vaikka kierto-leijukattila kykenee hyödyntämään useita erilaisia polttoaineita, Łagiszan laitos on erityisesti suunniteltu paikallisesti tuotettua hiiltä ja kalkkikiveä varten. Vuonna 2015 laitoksessa poltetun hiilen keskimääräiset arvot olivat 20522 kJ/kg, 19.21% tuhkaa, 1.03% rikkiä ja 14.49% nestettä. (Wiatros-Motyka 2016)

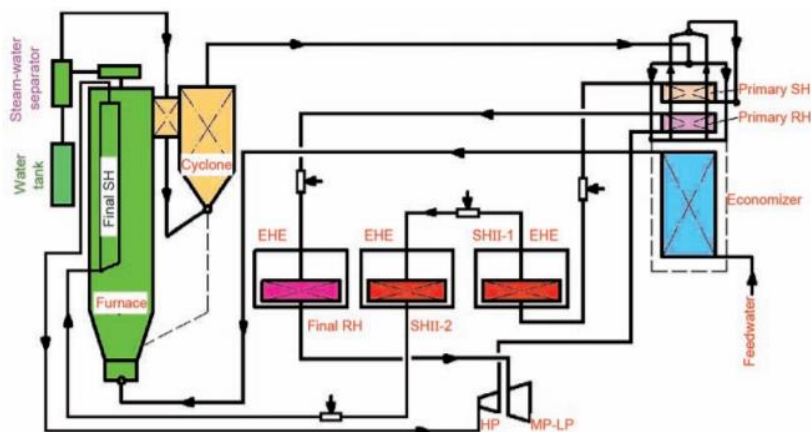
Alla olevassa taulukossa (2) on esitetty Łagiszan ylikriittisen kierto-
leijukattilan pääparametrit.

Taulukko 2. Łagiszan pääparametrit. (Wiatros-Motyka 2016, Kospo 2013)

Sähköntuotto	460 MW_e
Kokonaishyötysuhde 100% kuormalla	45% (LHV)
Höyryvirta	361 Kg/s
Höyrynpaine	27.5 MPa
Primäärihöyryn lämpötila	560 °C
Sekundaarihöyryn lämpötila	580 °C
Savukaasujen lämpötila höyrykattilan ulostulossa	130 °C
Savukaasujen lämpötila lämmön- talteenoton jälkeen	85 °C
Kalsiumin suhde rikkiin	2.04
Rikkioksidipäästöt	200 mg/Nm^3
Typpioksidipäästöt	199 mg/Nm^3
Hiukkaspäästöt	30 mg/Nm^3

5.2 Baima

Maailman ensimmäinen 600 megawatin kokoinen ylikriittinen kiertoileijukattila sijaitsee Baiman voimalaitoksella Kiinassa. Ylikriittisen kiertoileijukattilan rakennustyöt aloitettiin 2010 ja laitos aloitti toimintansa 2013.



Kuva 11. Baiman ylikriittisen kiertoileijukattilan rakenne (Shiyan Chang Jiankun Zhuo Shuo Meng Shiyue Qin Qiang Yao 2016)

Baiman laitos suunniteltiin hyödyntämään kivihiiltä, jonka tuhkapitoisuus on 43.82% ja rikkipitoisuus 3.3% (Lyu 2019).

Kattilan vesiseinä muodostuu pystysuorasta putkistosta ja polttokammion seinille on asennettu yhteensä 6 sykklonia samalla tyylillä kuin Łagiszan sykklonit. Sykklonien alle on asennettu ulkoiset lämmönsiirtimet ja laitoksessa syntyvän tuhkan kierto on suunniteltu niin, että puolet sykklonien keräämästä aineksesta kulkee suoraan kattilaan, kun toinen puoli kiertää lämmönsiirtimien kautta. Neljä lämmönsiirintä on osoitettu tulistimelle ja jäljellä olevat 2 lämmönsiirintä huolehtii välitulistimesta. (Lyu 2019)

Laitoksessa uudelleen lämmitetyn höyryn lämpötilaa ja kattilan pedin lämpötilaa säädetään muuntamalla tuhkan virtausta lämmönsiirtimissä. Kattilan pedin lämmön muuntaminen tapahtuu säätämällä tulistimesta vastaavien lämmönsiirtimien tuhkavirtaa,

ja välitulistetun höyryn lämpötilaa säädetään taas muuntamalla tuhkan virtausta kahdessa jälkimmäisessä lämmönsiirtimessä. (Lyu 2019)

Vaikka Baimassa käytettävä polttoaine on heikompi laatuista kuin Łagiszan polttama hiili, on Baiman ylikriittinen laitos päästöiltään puhtaampi, kuin Łagiszan laitos. Polton yhteydessä syntyvässä tuhkassa on matalampi hiilipitoisuus. Baiman typpidioksidipäästöt ovat 40% pienempiä verrattuna Łagiszaan. Molempien laitojen rikkidioksidipäästöt ovat samaa luokkaa, mutta Baiman laitoksen kalkkikiven kulutus on vain 80% Łagiszan kulutuksesta. (Lyu 2019)

alla esitettyssä taulukossa (3) on esitetty Baiman ylikriittisen kierto-oljykattilan pääparametreja.

Taulukko 3. Baiman laitoksen pääparametrit. (Cai, Ke et al. 2017)

Sähköntuotto	620 MW_e
Hyötysuhde	42.4% LHV
Höyryvirta	1900t/h
Höyrynpaine	24.64 MPa
Primäärihöyryn lämpötila	570 °C
Sekundäärihöyryn lämpötila	567 °C
Savukaasujen lämpötila	141.47 °C
Pedin lämpötila	890 °C
Kattilan hyötysuhde	91.52 %
Kalsiumin suhde rikkiin	2.07
Rikkidioksidi päästöt	192.04 mg/Nm^3
Typpidioksidi päästöt	111.94 mg/Nm^3
Hiukkaspäästöt	9.34 mg/Nm^3

5.3 Samcheok



Kuva 12. Samcheok Green Power. (Proctor 2018)

Samcheokin kaupungin lähellä Gangwon-do provinssissa, Etelä-Koreassa sijaitsee 2200 megawatin kokoinen voimalaitos. Laitos muodostuu neljästä 550 megawatin kokoisesta ylikriittisestä kiertoileijukattilasta.(Proctor 2018)

Laitoksen rakennustyöt aloitettiin 2011 ja laitoksen suunnittelusta ja tuotannosta vastasi Amec Foster Wheeler (Nykyään Sumitomo SHI FW). Samcheokin laitos aloitti täyspäiväisen tuotannon kesäkuussa 2017.(Proctor 2018)

Voimalaitoksen kiertoileijukattilan höyryputkisto on pystysuora Benson mallinen läpivirtausputkisto. Sykloneita on kahdeksan kappaletta per kattila sekä INTREX™ laitteisto. Kiertoileijukattila suunniteltiin hyödyntämään useita erilaisia hiiliä 14235- 25120 kJ/kg lämpöarvon väliltä ja laitos kykenee tarvittaessa polttamaan biomassaa muun polttoaineen seassa.(Proctor 2018, Kospo 2013)

Taulukossa (4) esitellään samcheokin voimalaitoksen arvoja.

Taulukko 4. Samcheokin laitoksen pääparametrit.(Li, Ke et al. 2019, Proctor 2018, Kospo 2013)

Nettohyötysuhde	42.4% LHV
Sähköntuotto	4x 550MW
Höyryn paine	25.6 Mpa
Primäärihöyryn lämpötila	603 °C
Sekundäärihöyryn lämpötila	603°C
Pedin lämpötila	860 °C
Rikkoksidipäästöt	102 mg/Nm^3
Typpioksidipäästöt	143 mg/Nm^3

6 HISTORIA

Ylikriittisten kierto-*leijukattilo*iden kehityksen syy löytyy tavallisten kierto-*leijukattilo*iden eduissa. Hiili tulee toimimaan vielä pitkään energiantuotannon kannalta tärkeässä roolissa. Hiilen prosessoinnin uskotaan olevan tärkeä asia puhtaamman energian tuotannossa, lisäksi hiilen louhinnan yhteydessä syntyy paljon lämpöarvoltaan alhaisia polttoaineita, joita olisi hyvä kyetä polttamaan ympäristöystävällisesti. Kierto-*leijukattilo*iden etuna on se, että tätä teknologiaa hyödyntäen voidaan polttaa aikaisemmin hankalasti hyödynnettävissä olevia polttoaineita tehokkaasti, kannattavasti ja ympäristöystävällisesti. Tavallisten kierto-*leijukattilo*iden ongelmana on aiemmin ollut suhteellisen heikko hyötysuhde. Heikkoa hyötysuhdetta on pyritty minimoimaan tutkimalla ylikriittisen höyryn hyödyntämistä kierto-*leijukattilo*issa. Yhdistämällä ylikriittinen höyry kierto-*leijukattilo*tekniikan kanssa laitosten hyötysuhdetta saadaan parannettua ja päästöjä vähennettyä.

Ylikriittisten kierto-*leijukattilo*iden kehitys alkoi 1990 luvulla, kun Foster Wheeler, Combustion Engineering ja Alstom Stein aloittivat kehitystyön. Myöhemmin Foster Wheeler voittikin kilpailutuksen maailman ensimmäisen ylikriittisen kierto-*leijukattilo*an, Łagiszan rakentamisesta Puolaan. (Lyu 2019)

Kiinassa aloitettiin muusta maailmasta riippumatta ylikriittisten kierto-*leijukattilo*iden kehitys vuonna 2002, kun ”Valtion korkean teknologian tutkimus ja kehitysohjelman” tutkijat aloittivan tutkimustyön. Tutkimuksen aloitusvaiheessa maailmalla ei ollut vielä kyseisestä teknologiasta aiempaa kokemusta, aiheesta oli julkaistu vasta 4 konferenssi-paperia. Tämä loikin paljon kysymyksiä ja ongelmia mekaanisesta näkökulmasta kiinalaisten tiedemiesten ratkaistavaksi. Kiinassa onnistuttiinkin kehitystyössä ja lopputuloksena oli Baiman 600MWe kokoinen ylikriittinen kierto-*leijukattilo*. (Lyu 2019)

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli perehtyä ylikriittisiin kiertoleijukattiloihin. Kandidaatintyössä esiteltiin mitä ylikriittisellä kiertoleijukattilalla tarkoitetaan, miten se eroaa alikriittisten laitosten kanssa ja mitä etuja sillä on verrattuna perinteisiin hiilipölykattiloihin.

Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksena. Työn lähteinä käytettiin erilaisia konferenssi-papereita, energia-alan lehtien julkaisuja ja uutisia. Kandidaatintyön tutkimusmateriaalia kerätessä huomiota herätti erityisesti Kiinassa tehtyjen julkaisujen suuri määrä.

Työssä esiteltiin eri puolille maailmaa rakennettuja ylikriittisiä kiertoleijukattiloita. Laitoksille oli tyypillistä pyrkiä hyödyntämään paikallisesti tuotettua hiiltä polttoaineenaan, mikäli sitä on tarjolla markkinoilla.

Ylikriittiset kiertoleijukattilat ovat vielä nykyään yksi ympäristöystävällisimmistä tekniikoista hyödyntää hiiltä tehokkaasti. Tulevaisuudessa ylikriittisiä kiertoleijukattiloita tullaan todennäköisesti hyödyntämään laajemmassa mittakaavassa maailmalla, sillä päästörajoitusten kiristyessä ja fossiilisten polttoaineiden hintojen kohotessa, ylikriittisten kiertoleijukattiloiden joustavuus käytettävän polttoaineen suhteen, sekä yksinkertainen ja kustannustehokas päästöjen kontrollointi ennustavat teknologialle valoisaa tulevaisuutta. Teknologiana ylikriittiset kiertoleijukattilat kilpailevat perinteisten hiilipölykattiloiden kanssa, mutta on mahdollista, että kiertoleijukattilat tulevat syrjäyttämään tämän poltto-tekniikan energiantuotannossa tekniikan kehittyessä ja siirryttäessä yhä korkeampiin ylikriittisen höyryn arvoihin.

LÄHDELUETTELO

BASU, P., 2015. *Circulating Fluidized Bed Boilers*. Springer.

CAI, R., KE, X., LYU, J., YANG, H., ZHANG, M., YUE, G. and LING, W., 2017. Progress of circulating fluidized bed combustion technology in China: a review. *Clean Energy*, **1**(1), pp. 36-49.

CHOUDHURY, S., 2014. *Super critical boiler*.

DANESI, S., March 2004 CFB Technology for Retrofitting Aged Supercritical Power Plants in Russia, March 2004.

GIGLIO, R., 2017 The Growing Experience of Fuel Flexible Circulating Fluidized Bed Technology in Large Scale Power Generation, *PowerGen Africa Conference*, July 18--20, 2017 2017.

KORTEILA, M., 2003. Ylikriittinen höyry puristaa lisätehoja voimaloista.

KOSPO, 2013-last update, The World's first 2:1 Supercritical CFB Boiler. Available: https://www.processeng.biz/iea-fbc.org/upload/67_5.%20K.%20Yoo.pdf [20.3., 2020].

LI, D., KE, X., YANG, H., AHN, S., LYU, J., JEON, C. and ZHANG, M., 2019. The ash formation and attrition characteristics of an Indonesia lignite coal ash for a 550 MWe ultra supercritical CFB boiler. *Chemical Engineering Research and Design*, **147**, pp. 579-586.

LUNDQVIST, R., SCHRIEF, A., KINNUNEN, P., MYÖHÄNEN, K. and SESHAMANI, M., 2003 A MAJOR STEP FORWARD---THE SUPERCRITICAL CFB BOILER, *PowerGen International*, 2003 2003.

LYU, J., 2019. Development of a supercritical and an ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler. *Frontiers in Energy*, **13**(1), pp. 114-119.

NAIR, A. and KUMANAN, S., 2015. Newer Materials for Supercritical Power Plant Components – A Manufacturability Study, 2015.

OLDRIDGE, N. Phase Diagrams. Available: <http://lessons.chemistnate.com/phase-diagrams.html>.

PADHAN, S. and KUMAR, R., 2013. SO_x Control during Combustion of Coal by Adding LimeStone. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, Issue 7,

PROCTOR, D., 2018. South Korean Plant Finds Flexibility with Advanced CFB Technology.

QIAN ZHU, 2013. *Developments in circulating fluidised bed combustion*.

RICKE, S., PANDEY, A., KHANAL, S.K., DUSSAP, C., LARROCHE, C. and GNANSOUNOU, E., 2019. *Biofuels: alternative feedstocks and conversion processes for the production of liquid and gaseous biofuels*. Academic Press.

SHIYAN CHANG JIANKUN ZHUO SHUO MENG SHIYUE QIN QIANG YAO, 2016. Clean Coal Technologies in China : Current Status and Future Perspectives. *中国工程科学 : 英文版*, **2**(4), pp. 447-459.

SIYANG, W., DONG, Y., YUNJIE, Z. and MOFENG, Q., 2017. *Heat transfer characteristics of spiral water wall tube in a 1000 MW ultra-supercritical boiler with wide operating load mode*. Elsevier.

SONG, G., 2019. Investigation on the operating characteristics of a 350 MWe supercritical CFB boiler with a polygonal furnace. *Applied Thermal Engineering*, **156**, pp. 178-188.

UTT and GIGLIO, 2012. Technology comparison of CFB versus pulverized fuel firing for utility power generation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, **112**(6), pp. 449-454.

WIATROS-MOTYKA, M., 2016. The Łagisza Power Plant: The World's First Supercritical CFB. pp. 57-60.

ZHANG, F., XUE, Y., LI, D., WU, Z. and HE, T., 2019. On the Flexible Operation of Supercritical Circulating Fluidized Bed: Burning Carbon Based Decentralized Active Disturbance Rejection Control. *Energies*, **12**(6), pp. 1132.