

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

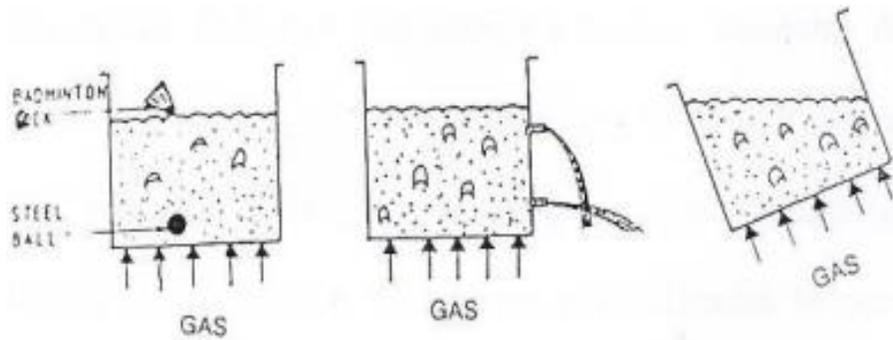
2.1 Fluidisasi

Fluidisasi adalah suatu operasi dimana hamparan zat padat diperlukan seperti fluida dengan mengkontakannya dengan fluida gas ataupun cairan (Basu, 2015). Dalam kondisi terfluidisasi, gaya gravitasi pada butiran-butiran zat padat diimbangi oleh gaya seret dari fluida yang bekerja padanya. Kejadian ini dapat menandai suatu proses dimulainya hal yang sangat penting di dalam teknologi *modern*. Winkler melihat partikel – partikel diangkat oleh tarikan gas, membuat partikel tampak seperti cairan yang mendidih. Pada proses pengkonversian energi dengan teknologi *Circulating fluidized bed* (CFB). Awalnya ruang bakar dipanasi secara eksternal sampai mendekati temperatur operasi. fluidisasi yang akan dipakai untuk mengabsorpsi panas adalah pasir silika. Pasir silika, batubara, dan bahan bakar bercampur dan mengalami turbulensi di dalam *furnace* sehingga keseragaman temperatur sistem menjadi terjaga, Kondisi ini mampu memberikan konversi energi yang baik.

2.2 Jenis Fluidisasi

Jenis fluidisasi dibedakan berdasarkan kontakannya dengan partikel padat, apabila zat cair atau gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel padat pada kecepatan rendah, maka partikel akan tetap dalam keadaan *fixed bed*. Jika kecepatan fluida berangsur-angsur dinaikkan, maka partikel padat itu akhirnya akan mulai bergerak dan melayang didalam fluida, serta berperilaku seperti fluida rapat.

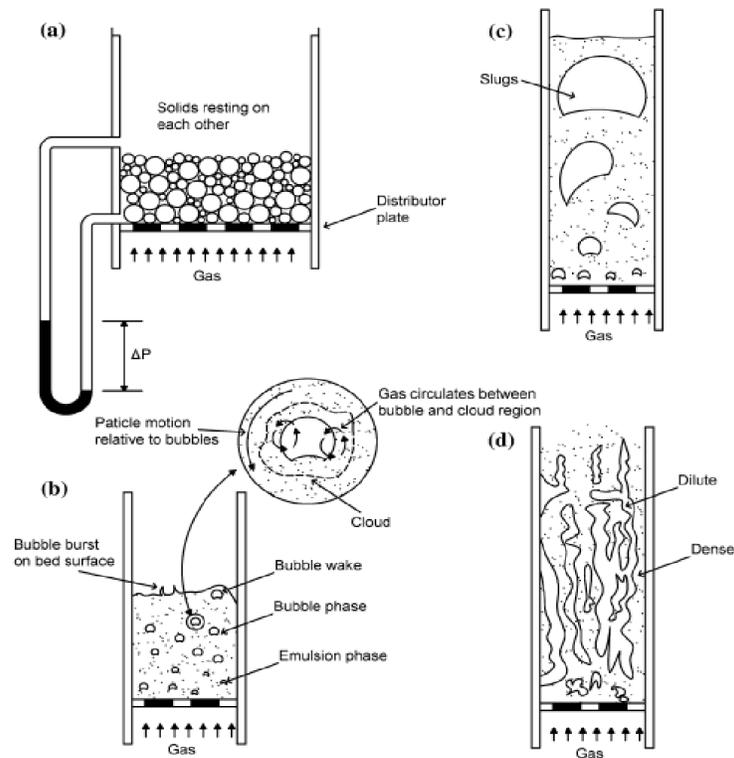
Jika hamparan itu dimiringkan, permukaan atas material *bed* akan tetap horizontal, dan benda-benda besar akan mengapung atau tenggelam didalam hamparan itu tergantung pada perbandingan densitas dari partikel tersebut.



Gambar 2.1 Jenis Jenis Fluidisasi

2.3 Tahapan Fluidisasi

Tahapan fluidisasi dapat dikelompokkan menjadi empat tahap, yaitu: hamparan tetap (*Fixed Bed*), hamparan fluidisasi gelembung (*Bubbling Fluidized Bed*), gelembung besar (*Slugging*) dan hamparan turbulen (*Turbulen Bed*) yang mana pada tiap tahapan akan menghasilkan fenomena-fenomena yang berbeda pada tiap tahapan seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.2 Fenomena Proses Fluidisasi (a) Unggun Tetap (b) Unggun Gelembung (c) Unggun

Slugging (d) Unggun Turbulen

a. Fixed Bed

Hamparan tetap udara dimasukkan di bawah plat *distributor* dengan laju lambat, dan naik melalui hamparan tanpa menyebabkan terjadinya suatu gerakan pada partikel. Jika kecepatan perlahan dinaikkan maka akan terjadi penurunan tekanan pada partikel. Jika kecepatan dinaikkan dan penurunan tekanan akan meningkat, tetapi partikel – partikel itu tidak bergerak dan tinggi hamparan tidak berubah. Kondisi ini dapat dikenal dengan (*fixed bed*)

b. Bubbling Fluidized Bed

Hamparan kecepatan aliran udara pada *fixed bed* akan meningkat sampai kecepatan udara mencapai kondisi titik kritis yang dikenal dengan kecepatan minimum fluidisasi (*Minimum Fluidization Velocity*) atau U_{mf} , besar nilai U_{mf} bisa didapatkan melalui eksperimen ataupun dengan persamaan yang didapatkan dari (Genehr et al., 2020), sebagai berikut :

$$\frac{d_m U_{mf} \rho_g}{\mu} = \left(33.7^2 + 0.0408 \frac{d_m^3 U_{mf} \rho_g (\rho_m - \rho_g)}{\mu^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 33.7 \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana d_m adalah diameter rata-rata material bed yang digunakan, U_{mf} adalah kecepatan minimum untuk terfluidisasi, ρ_g adalah densitas kecepatan fluida, μ adalah viskositas fluida, dan ρ_m adalah densitas partikel padat.

Penurunan tekanan akan melewati hamparan dan akan mengimbangi gaya gravitasi yang akan dialaminya, dengan kata lain mengimbangi gaya pada bobot hamparan. Partikel mulai akan bergerak dan gas yang mengalir melalui hamparan yang akan membentuk suatu gelembung dan hal ini disebut dengan (*Bubbling Fluidized Bed*)

c. Slugging

Bubbling besar jika kecepatan udara yang melalui hamparan pada zat meningkat maka gelembung – gelembung cenderung bersatu dan menjadi besar (*Slug*). Pada saat gelembung naik melalui hamparan fluidisasi sebagai *slug*, terjadi fenomena ini diistilahkan dengan slugging. Jika menggunakan kolom berdiameter kecil dengan hamparan zat padat yang tebal maka gelembung – gelembung yang beriringan akan bergerak ke puncak kolom dan dipisahkan oleh zat padat.

d. *Turbulen Bed*

Hamparan turbulen ketika kecepatan udara yang melewati *Bubbling Fluidized Bed* telah meningkat diatas kecepatan minimum gelembung maka hamparan partikel akan meluas. Peningkatan kecepatan tersebut mengakibatkan terjadinya perubahan pada susunan partikel. Dengan ditandai kecepatan udara yang tinggi yang mengakibatkan gelembung kehilangan identitasnya dan berubah bentuk perluasan hamparan. Partikel kemudian terlempar ke puncak kolom diatas hamparan sehingga mendapatkan permukaan hamparan yang tinggi. Hamparan tersebut disebut dengan *turbulent bed*. Tahapan ini dapat diaplikasikan pada *Circulating Fluidized Bed*.

Fenomena-fenomena yang terjadi pada proses fluidisasi seperti gambar 2.2 dipengaruhi oleh berbagai macam faktor, yaitu seperti jenis seperti kecepatan fluida, jenis fluida, ukuran partikel, bentuk partikel, jenis partikel, densitas partikel, porositas bed, distribusi aliran, distribusi bentuk ukuran fluida, diameter kolom, dan tinggi bed (Amal Kamala, 2018).

a. Kecepatan fluida

Pada fluidisasi terdapat kecepatan minimum untuk membuat partikel pada unggun bergerak, jika kecepatan fluida melebihi kecepatan minimum maka partikel-partikel akan terfluidisasi. Berdasarkan hal tersebut semakin besar kecepatan fluida maka akan membuat semakin mudahnya suatu partikel akan terfluidisasi.

b. Ukuran Partikel

Semakin besar suatu ukuran partikel maka membuat partikel tersebut memiliki gaya berat yang semakin besar pula, yang membuat kecepatan minimum untuk membuat partikel terfluidisasi akan semakin besar, oleh karena itu jika semakin besar suatu partikel maka akan membutuhkan energi yang lebih banyak atau semakin sulit untuk terfluidisasinya.

c. Distribusi Udara

Pada proses fluidisasi, untuk melakukan fluidisasi partikel maka diperlukan distribusi yang baik agar tiap-tiap partikel dapat berkontak dengan udara secara merata, semakin baik distribusi udara maka akan semakin baik juga proses fluidisasi, alat yang bertugas untuk mendistribusikan udara pada CFB *boiler* disebut *aircap*.

d. Tinggi Bed

Semakin tinggi bed pada kolom maka akan membuat semakin banyak partikel-partikel padat pada unggun bed, yang mana hal tersebut akan membuat semakin banyak partikel yang akan berkontak dengan udara.

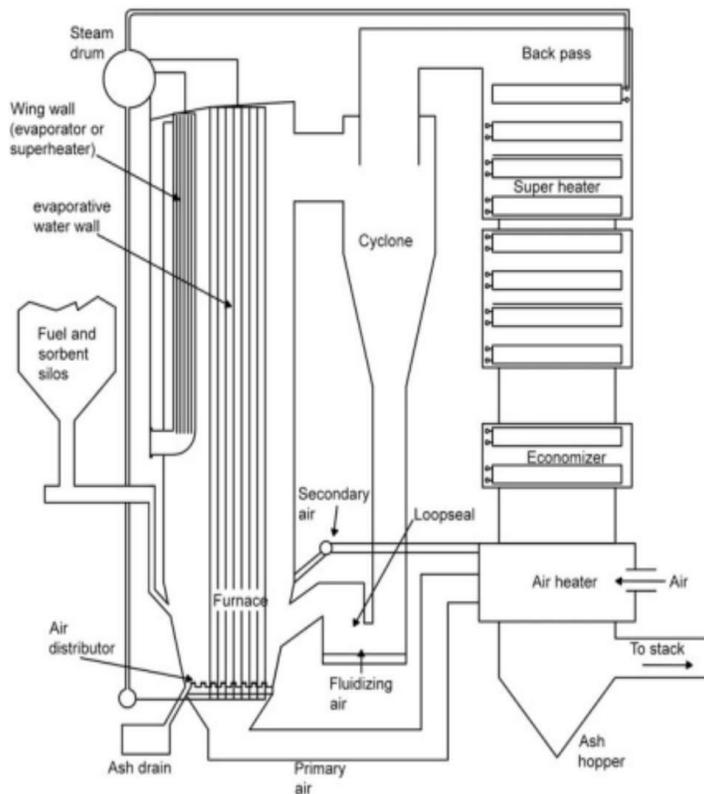
2.4 Circulation Fluidized Bed (CFB) Boiler

Circulating fluidized bed (CFB) boiler merupakan salah satu jenis pembakaran dari *fluidized bed combustion*. Pembakaran dengan *fluidized bed combustion* memiliki kelebihan seperti fleksibel terhadap bahan bakar, memiliki efisiensi pembakaran yang tinggi, pembakaran fluidized bed dapat berlangsung pada suhu yang lebih rendah, berkisar antara 850°C sehingga menghasilkan kadar NO_x yang lebih sedikit dan dapat menghindari masalah pembentukan kerak pada batubara tertentu dan memiliki pereduksian kadar sulfur dioksida (SO_x) yang biasanya terbentuk dari pembakaran kandungan belerang dalam batubara (Basu, 2015), karena itu teknologi ini sudah sangat dikenal dalam industri pembangkitan listrik baik dari segi ekonomis maupun emisi gas buang yang dihasilkan.

2.5 Bagian-Bagian dari CFB

CFB Boiler memiliki bagian utama yang dapat dibagi menjadi dua bagian, yang mana bagian pertama adalah loop CFB dan backpass. Pada bagian loop CFB terdapat *furnace*, *distributor plate*, *Cyclone*, *Loop-seal*, *Steam drum*, *fluidizing air system*, dan *fuel feeding system*. Sedangkan bagian *backpass* meliputi reheater, superheater, economizer, air-preheater

Adapun berikut merupakan gambar dari Circulating Fluidized Bed :



Gambar 2.3 Unit Circulating Fluidized Bed (Basu, 2015)

a. Furnace

Furnace merupakan ruang yang digunakan untuk melakukan pembakaran. Di dalam furnace juga terdapat nozzle yang berfungsi untuk menghembuskan *primary air*. Furnace dikelilingi oleh pipa-pipa (tube) air yang menempel pada dinding furnace yang akan menerima panas dari pembakaran yang terjadi di dalam furnace. Di dalam furnace sendiri memiliki beberapa bagian diantaranya *tube wall* merupakan susunan pipa-pipa yang berada pada sisi dinding sepanjang Furnace berfungsi sebagai alat untuk mengalirkan steam yang dipanaskan, rangkaian tube terbuat dari pipa lurus tanpa sambungan yang disusun paralel dan antara satu dengan yang lain. Selanjutnya terdapat *aircap* sebagai komponen penting dari *CFB boiler* yang ada di dalam *furnace* yang berfungsi untuk mendistribusikan udara primer. Selain itu *Tube support* berfungsi untuk menyangga tube agar tidak melengkung akibat adanya panas pembakaran pada saat furnace beroperasi. *Peephole* berfungsi untuk mengamati bentuk atau warna api (*flame pattern*) dari masing-masing burner. Selanjutnya terdapat evaporator panel yang terdiri

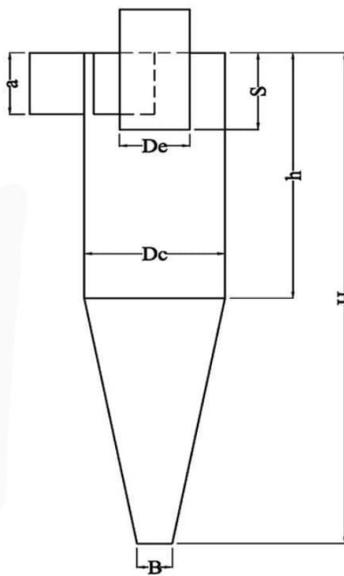
dari susunan pipa-pipa yang berada pada *furnace* dengan posisi menggantung, fungsinya hampir sama dengan *tubewall* yaitu mengubah air menjadi uap

Selain itu pada *furnace* menggunakan bed material yang merupakan campuran material pembakaran yang terdiri dari batubara, pasir silika dan limestone. Batubara sendiri berfungsi sebagai bahan bakar dalam boiler, sedangkan pasir silika (inner bed) merupakan media pemanfaatan penyebaran panas di dalam *furnace*, sedangkan Limestone berfungsi untuk mengikat kandungan SO_x (karbon) agar ramah lingkungan.

b. Cyclone

Menurut Karagoz, Irfan (2007) Cyclone adalah alat untuk memisahkan fase padat pada aliran yang memiliki dua fase, dengan bantuan gaya sentrifugal. Karena desainnya yang sederhana dan tidak memiliki bagian yang bergerak, *cyclone* memiliki biaya pembuatan dan perawatan yang lebih rendah, dan fleksibilitas untuk penggunaan pada kondisi operasi yang ekstrim.

Cyclone sendiri memiliki fitur dengan struktur yang sederhana, efisiensi pemisahan tinggi dan dapat beroperasi pada suhu tinggi. Cyclone telah banyak digunakan sebagai alat untuk pemisah gas-padat dalam industri kimia, minyak bumi, dan PLTU. PLTU yang menggunakan boiler tipe circulating fluidized bed (CFB) pada umumnya menggunakan cyclone berjumlah 2 buah untuk setiap boiler dan beroperasi pada temperatur 800 s/d 900 °C serta tekanan pada tekanan 20 s/d 60 bar. Parameter operasional utama cyclone memiliki pengaruh langsung pada kinerja sistem seperti pressure drop, adapun berikut gambar dari unit cyclone sebagai berikut :

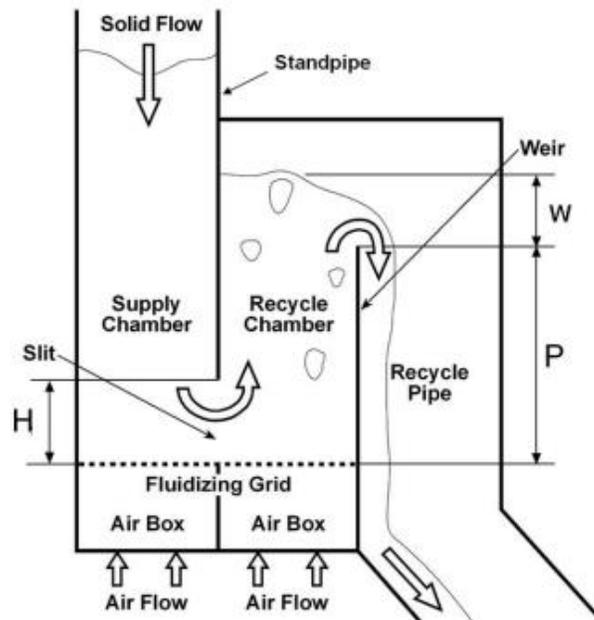


Gambar 2.4 Unit Cyclone Pada CFB (Lee et al., 2003)

c. Loop-Seal

Reaktor CFB memiliki banyak keuntungan, seperti sirkulasi partikel bed di antara *riser* dan *return leg* yang terus menerus bersirkulasi, hal ini menyebabkan pada boiler CFB memiliki laju reaksi yang lebih tinggi. Karena alasan ini CFB populer digunakan dalam reaktor kimia ataupun sebagai *furnace*. Partikel-partikel bed fluidisasi oleh *primary air* yang disuplai di dasar *riser*, dan reaksi sebagian besar terjadi pada *furnace*. Partikel yang keluar dari *furnace* ditangkap oleh *cyclone*. Partikel padat yang keluar dari *cyclone* akan dialirkan ke *return leg* kembali ke *solid particle control valve* yang mana setelah itu akan diumpukan ke riser. Untuk mengumpulkannya kembali ke riser menggunakan non-mechanical valve salah satunya adalah *Loop Seal*.

Loop Seal merupakan unit yang berfungsi untuk mensirkulasikan kembali partikel-partikel padat yang tidak bereaksi dan yang sebelumnya sudah dipisahkan pada unit cyclone untuk diumpukan kembali ke riser untuk disirkulasikan kembali, karena hal ini lah CFB sering digunakan pada industri kimia.



Gambar 2.5 *Loop Seal* Pada CFB (Basu & Butler, 2009)

2.5 Air Caps Type-bell

Aircap adalah komponen penting dari *boiler* CFB. Desain *aircap* yang tepat sangat penting untuk pengurangan dari konsumsi energi dan peningkatan keselamatan pada pengoperasian *boiler* CFB (Li, 2017). *Aircap* adalah cara yang efektif untuk memastikan keseragaman aliran udara dalam boiler *Circulating Fluidized Bed* (CFB). *Aircap type-bell* adalah alat berbentuk lonceng, pada dibagian tutup udara berbentuk seperti tabung. Air caps type bell (P. Mirek, 2011) digunakan untuk memastikan keseragaman aliran udara dalam *boiler circulating fluidized bed*. Karakteristik resistensi dari ketiga *aircap* tipikal yaitu *air caps type-arrow*, *type-bell*, dan *type-T*. *Aircap type Bell* memiliki resistansi tertinggi dan udara primer paling seragam (P. Mirek and M. Klajny, 2018). *Aircap type-bell* memiliki keseragaman distribusi di penampang pada ruang bakar. Karena keseragaman distribusi pada udara primer dapat menginduksi fluidisasi yang seragam dan stabil pada seluruh penampang ruang bakar. Abrasi pada *cover tube*, kerusakan *cover tube*, penyumbatan lubang dan pecahnya inner tube seperti pada gambar 2.5 sering terjadi pada *aircap type-bell* dengan diameter besar. Hal ini menyebabkan resistensi yang buruk. Fluidisasi pelat distribusi udara, kebocoran terak, kokas dan kecelakaan lainnya, sangat mempengaruhi proses operasi normal boiler. Langkah efektif untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menggunakan *air caps* baru. Tujuannya adalah untuk mendistribusikan udara *primer* secara merata ke dalam *fluidized bed* pada penurunan tekanan rendah, dan meningkatkan efisiensi pembakaran secara signifikan. Berikut adalah permasalahan *aircap type-bell* pada aplikasi yaitu sebagai berikut. Berikut adalah permasalahan *aircap type-bell* pada aplikasi yaitu sebagai berikut.



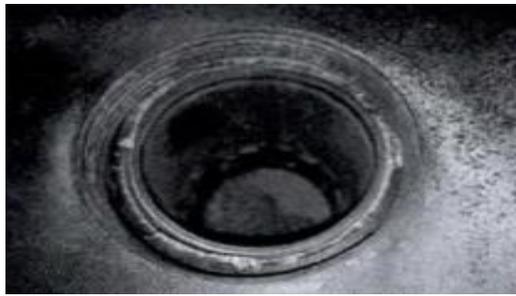
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 2.6 Permasalahan pada air caps type bell (a). Abrasi (b) penyumbatan lubang kecil (c). Menutupi kerusakan (d). Pecahnya tabung inti bagian dalam

2.6 State of the art

Berikut merupakan tabel dari studi literatur mengenai CFB boiler :

Tabel 2.1 State Of The Art

Pustaka	Variabel Percobaan	Hasil	Inovasi
Zhong Huang (2019),	2 nozel air tipe tabel yang berbeda yaitu nozzle air tradisional dan nozel air modern.	Simulasi untuk nozzle A (<i>nozel air tradisional</i>) dan nozzle B (<i>nozzle air modern</i>) pada beban 100% dan beban 30% dalam keadaan panas, hasilnya menunjukkan bahwa indeks kinerja <i>nozzle B</i> lebih baik daripada <i>nozzle A</i> , Hasil aplikasi boiler CFB 480 t h-1	Hasil yang didapatkan bahwa <i>nozzle B</i> memiliki hasil yang lebih baik yang menunjukkan bahwa CFB boiler dapat bekerja lebih optimum.
Pawel Mirek (2005)	Mengkonfigurasi susunan air cap pada	Pada percobaan menggunakan dua	Dengan adanya jarak antar <i>aircap</i>

	jarak tertentu	variasi konfigurasi <i>aircap</i> yang berbeda yang mana pada variasi 1 yang mana letak <i>aircaps</i> memiliki konfigurasi yang lebih berjauhan jarak antar <i>aircap</i> -nya yang mana dengan adanya jarak yang lebih berjauhan membuat tidak adanya <i>backflow</i> atau aliran balik, yang mana hal tersebut membuat <i>air cap</i> tidak tersumbat oleh partikel padat. Pada variasi ke-2 jarak antar <i>air cap</i> diperkecil yang mana menghasilkan aliran balik, sehingga padatan yang seharusnya terdistribusi ke furnace akan masuk ke dalam <i>aircap</i> , sehingga pada <i>aircap</i> di kemudian hari akan lebih cepat mengalami penyumbatan	dapat mencegah adanya aliran balik atau <i>backflow</i> sehingga dapat mencegah partikel-partikel pada tidak masuk ke <i>aircap</i> yang dapat menyebabkan penyumbatan.
--	----------------	--	---

<p>Pawel Mirek, Marcin Klajny. (2018)</p>	<p>Penurunan tekanan rendah pada nosel udara, erosi partikel pada lapisan boiler, abrasi.</p>	<p><i>Nozzle</i> mata panah dan nozel referensi dari data percobaan menunjukkan bahwa dibandingkan dengan nozel referensi kriteria energi kinetic telah memungkinkan desain <i>nozzle</i> udara alternatif dengan karakteristik penurunan tekanan yang sebanding dan peningkatan besaran gaya hambat aerodinamis dari pancaran udara keluar. Dari uji eksperimental diperoleh ketahanan yang tinggi dari desain <i>nozzle</i> baru terhadap aliran balik material dasar.</p>	<p>uji eksperimental telah mengkonfirmasi ketahanan yang tinggi dari desain nosel baru terhadap aliran balik material dasar dibandingkan dengan nozel mata panah dan nozel referensi.</p>
<p>Zhong Huang, Lei Deng, and Defu Che. 2019</p>	<p>Power consumption of primary and secondary air fans (kW), Bed pressure drop (kPa)</p>	<p>Mode baru dengan inventaris bed yang lebih rendah menghasilkan penurunan tekanan bed yang lebih signifikan dibandingkan dengan mode lama.</p>	<p>Mode baru mengoptimalkan tekanan bed untuk mengurangi konsumsi daya dan meningkatkan efisiensi pembakaran tanpa mengorbankan performa boiler.</p>

<p>Yang, Hairui, et al. 2009. Effect of Bed Pressure Drop on Perormance of a CFB Boiler</p>	<p>Laju alir fluidisasi, tekanan bed (kPa), Temperature bed (°C),</p>	<p>Efisiensi Pembakaran: Efisiensi pembakaran maksimal dicapai pada tekanan bed sekitar 5.7 kPa dengan rasio udara berlebih 1.06, Konsumsi Daya: Konsumsi daya kipas menurun saat tekanan bed diturunkan dari 7.3 kPa ke 3.2 kPa, Kandungan Karbon dalam Abu Terbang mencapai nilai minimal sekitar 17% pada tekanan bed 5.7 kPa.</p>	<p>Mengoperasikan boiler pada tekanan bed yang lebih rendah dengan mengurangi inventaris bed dan mengontrol kualitas bed, mengurangi konsumsi daya dan erosi permukaan pemanas.</p>
---	---	---	---