BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

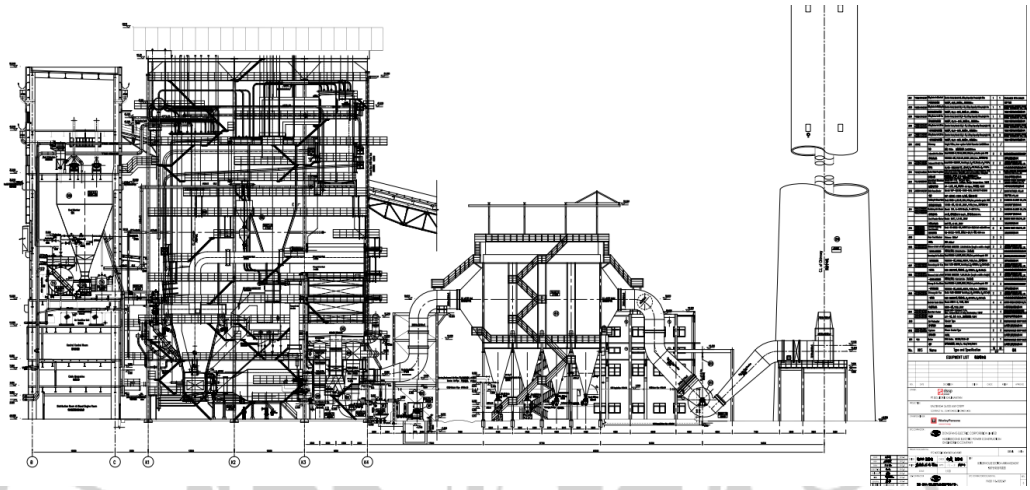
I.1 Boiler Circulating fluidized bed(CFB)

I.1.1 Definisi dan Prinsip Kerja Boiler CFB

Dalam dua dekade terakhir, generator uap dengan teknologi *Circulating fluidized bed Combustion (CFBC)* telah banyak digunakan untuk pembangkit listrik di seluruh dunia, Penggunaan teknologi CFBC (*Circulating fluidized bed*Combustion) pertama kali untuk pembangkit listrik dimulai pada tahun 1985 dengan beroperasional boiler CFB berkapasitas 90 MWe di Duisburg, Jerman. Sejak saat itu hingga penelitian di tahun 2012, telah terpasang hampir 600 unit pembangkit berbasis batubara menggunakan CFBC dengan total kapasitas lebih dari 46 GWe di seluruh dunia (Platts, 2012) . Gambar 2.1 menampilkan denah pembangkit listrik modern yang menggunakan CFBC. Bahan bakar dan batu kapur dimasukkan ke ruang pembakaran boiler, sementara udara (primer dan sekunder) dialirkan untuk memfluidaisasi campuran tersebut. Campuran yang terfluidisasi ini terbakar pada suhu relatif rendah, menghasilkan panas. Suhu pembakaran yang rendah membatasi pembentukan NOx, sementara batu kapur menyerap SO2 yang terbentuk selama pembakaran. Panas dari proses pembakaran digunakan untuk mendidihkan air dalam pipa, menghasilkan uap berenergi tinggi yang menggerakkan turbin uap guna menghasilkan listrik (Zhu, 2013).

Siklon digunakan untuk memisahkan abu dan partikel bahan bakar yang tidak terbakar dari gas buang dan mengembalikannya ke bagian bawah ruang bakar. Ini memungkinkan partikel-partikel tersebut tetap berada dalam sistem cukup lama untuk memastikan pembakaran karbon yang efektif dan penyerapan sulfur maksimal. Partikel-partikel yang sangat halus, bagaimanapun, tidak diresirkulasi dan lolos dari siklon. Gas buang panas yang keluar dari siklon masuk ke bagian konveksi yang meliputi *superheater*, ekonomiser, dan, dalam beberapa instalasi terbaru, reheater.

Pada bagian ini, sebagian besar sisa panas diekstraksi. Gas yang didinginkan melewati pemanas udara sebelum masuk ke baghouse atau electrostatic precipitators (ESP) untuk menghilangkan partikel halus dan kemudian dibuang ke cerobong(Zhu, 2013).



Gambar 2. 1 Denah Gambar Boiler CFB



Gambar 2. 2 Gambar Aktual dilapangan jalur air Boiler CFB

Berdasarkan gambar 2.2, alur siklus fluida dimulai dari air pengisi yang masuk melalui jalur FW to Eco menuju economizer. Meskipun komponen *steam drum* dan *water wall* tidak terlihat secara langsung di dalam bingkai foto, siklus secara kontinu berlanjut ke bagian *superheater* yang ditunjukkan oleh tahapan keluaran Primary SH Out, Platen SH Out, hingga mencapai suhu tertinggi di Final SH Out untuk dialirkan menggerakkan turbin. Setelah melewati turbin tingkat tinggi, uap kembali ke boiler sebagai uap panas ulang (reheat) yang masuk melalui jalur CRH to LTR (Cold Reheat), dipanaskan lebih lanjut melalui LTR Out dan Platen RH Out, lalu dikembalikan lagi ke turbin untuk melanjutkan siklus daya secara terus-menerus.

I.1.2 Keunggulan Teknologi CFB dibanding Boiler Konvensional

a) Efisiensi Pembakaran dan Boiler

Boiler CFBC dikenal memiliki kemampuan mencapai pembakaran karbon yang hampir sempurna serta efisiensi pembakaran yang tinggi, terutama karena waktu tinggal partikel batubara yang lama di dalam *furnace*.

Namun, pencapaian tersebut sangat bergantung pada sejumlah faktor, termasuk karakteristik batubara, durasi waktu tinggal, dan kadar udara berlebih. Berdasarkan penelitian, efisiensi mendekati 100% dapat diraih pada CFBC yang menggunakan lignite, berkat kandungan volatil yang tinggi dan reaktivitas bahan bakarnya.

Survei tahun 2007 mengenai abu dari boiler PCC 300 MW di Tiongkok menunjukkan tingkat residu karbon dalam abu bawah yang sebanding dengan CFBC. Masalah pembakaran yang tidak sempurna juga terjadi di unit Gardanne 250 MW saat menggunakan batubara bituminous impor. Namun, kinerja meningkat saat batubara tersebut dicampur dengan petcoke. Efek positif serupa juga ditemukan di pembangkit CFBC Northside , meskipun batubara bituminous saja masih dapat mencapai efisiensi pembakaran lebih dari 98%. Secara keseluruhan, CFBC mampu mencapai tingkat efisiensi pembakaran yang sebanding dengan boiler PC. Namun, fleksibilitas dalam pemakaian bahan bakar mungkin perlu dikurangi untuk memastikan kondisi optimal.

Efisiensi boiler yang tinggi (sekitar 90–93% LHV) juga berpotensi dicapai oleh CFBC. Hal ini disebabkan oleh konsentrasi gas SO3 yang lebih rendah pada gas buang dibandingkan PCC, memungkinkan penggunaan suhu udara keluar yang lebih rendah tanpa risiko korosi akibat kondensasi. Namun, perbedaan ini lebih signifikan pada bahan bakar dengan kandungan sulfur tinggi. Untuk sebagian besar jenis bahan bakar, kedua tipe boiler cenderung memiliki efisiensi yang setara.(Lockwood, 2013)

b) Stabilitas Pembakaran Boiler

Boiler CFB memiliki karakteristik pembakaran suhu rendah (850-950℃) dan sirkulasi material berkonsentrasi tinggi di dalam *furnace*, yang mengurangi risiko slagging tanpa memerlukan langkah khusus. Di dalam *furnace* terdapat sejumlah besar material yang bersirkulasi, sedangkan batubara hanya mencakup 1/40-1/30 dari material yang bersirkulasi. Lignite memiliki kandungan volatil yang tinggi sehingga mudah terbakar. Boiler CFB mudah mencapai pembakaran yang stabil dan efisien, dengan beban minimum pembakaran stabil tanpa minyak tidak melebihi 30% dari BMCR (Boiler Maximum Continuous Rating).

Pada boiler PC, beban panas volume *furnace* yang lebih rendah dan beban panas penampang harus dipilih untuk mengurangi kemungkinan slagging di *furnace*. Selain itu, karena titik leleh abu lignite yang rendah, suhu outlet *furnace* yang lebih rendah harus dipilih. Namun, beban panas volume dan penampang yang lebih rendah serta suhu outlet *furnace* yang lebih rendah berarti luas penampang *furnace* dan volume yang lebih besar.

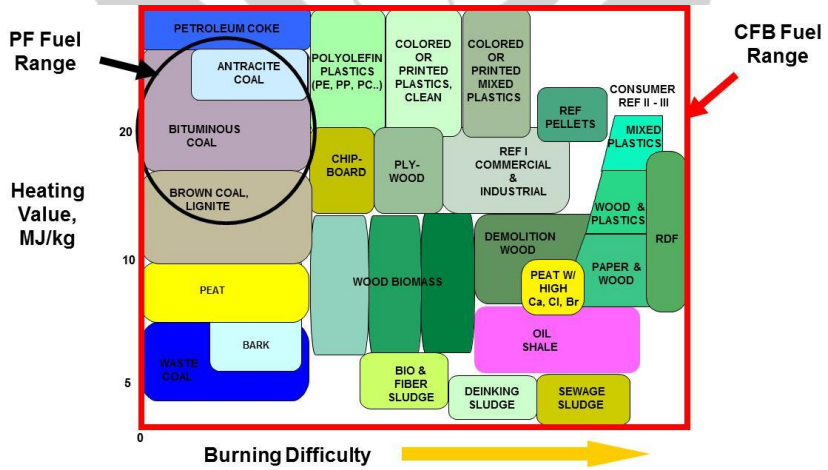
Dengan kata lain, untuk mengatasi masalah slagging pada lignite, boiler PC harus mengorbankan keunggulan suhu pembakaran tinggi, beban panas tinggi, luas penampang *furnace* yang kecil, dan volume kecil yang dimiliki oleh boiler CFB. Hal ini secara tidak langsung melemahkan keunggulan biaya rendah boiler PC.

Suhu *furnace* yang lebih rendah juga mengurangi karakteristik pembakaran stabil pada beban rendah pada boiler PC, sehingga beban pembakaran stabil tanpa minyak untuk lignite dengan kandungan air tinggi pada boiler PC mencapai 50~60% BMCR (Xin et al., 2021)

c) Emisi Rendah

Jika akses ke bahan bakar hanya terdapat bahan bakar berkualitas rendah dengan kandungan sulfur tinggi, nilai kalor lebih rendah, atau kadar abu lebih tinggi, maka CFB memilliki kelebihdan disbanding boiler PC. Hal ini karena CFB mampu membakar bahan bakar berkualitas rendah sambil tetap menjaga emisi yang rendah tanpa memerlukan sistem tambahan seperti SCR (*Selective Catalytic Reduction*) atau FGD (*Flue Gas Desulfurization*) yang diperlukan oleh boiler PC.

Untuk lebih memahami perbedaan kemampuan pembakaran bahan bakar pada kedua teknologi tersebut, silakan lihat Gambar 2.2, yang membandingkan rentang pembakaran bahan bakar berdasarkan nilai kalor dan tingkat kesulitan pembakaran sebagian besar bahan bakar saat ini. Perhatikan rentang bahan bakar untuk PC yang ditandai lingkaran hitam dibandingkan dengan rentang untuk CFB yang ditandai persegi panjang merah. Grafik ini dengan jelas menunjukkan fleksibilitas bahan bakar pada CFB. Ketika fleksibilitas ini digabungkan dengan kemampuan membakar atau mencampur bahan bakar berbiaya lebih rendah, secara ekonomi CFB jelas lebih unggul(Utt & Giglio, 2011).



Gambar 2. 3 Nilai kalor bahan bakar terhadap tingkat kesulitan pembakaran

I.1.3 Parameter Boiler CFB yang digunakan pada penelitian ini

Boiler yang menjadi fokus penelitian ini adalah unit DG-366/13.8-III, yang merupakan produk dari Dongfang Boiler Group Co., Ltd. Boiler ini diklasifikasikan sebagai boiler Circulating Fluidized Bed (CFB) dengan sistem sirkulasi alami (natural circulation), beroperasi pada tekanan ultra tinggi. Desain intinya ditandai oleh penggunaan single drum dan fitur pemanasan ulang tunggal yang terjadi secara langsung (once immediate reheat). Selain itu, konstruksinya menggunakan struktur baja penuh dan dirancang untuk instalasi luar ruangan (outdoor arrangement). Fitur penting dari desain CFB ini adalah integrasi komponen kunci seperti cooling cyclone separator untuk memisahkan padatan, U-type non-mechanical material returning device untuk mengembalikan material ke ruang bakar, dan water cooling plenum, yang memastikan efisiensi dan keandalan operasional sistem.

Struktur utama boiler terdiri dari tiga bagian, yaitu furnace yang menggunakan dinding membran air, dua set steam cooled type cyclone separators, dan one rear pass yang dikelilingi oleh steam cooled cage wall. Ruang bakar dirancang dengan perhatian khusus pada sistem masukan bahan bakar dan aditif. Boiler ini dilengkapi dengan enam set coal feeding devices dan empat set limestone feeding openings, yang semuanya ditempatkan pada bagian konstriksi bawah dinding depan boiler. Udara primer panas disuplai melalui saluran udara yang terletak di kedua sisi ruang bakar, yang juga dilengkapi dengan dua set igniting burners berenergi tinggi. Sementara itu, untuk pengendalian suhu, dua tahap spray desuperheater diatur dalam sistem superheater (SH system), dan desuperheater darurat serta desuperheater semprot kecil diatur dalam sistem pemanas ulang (RH system), di mana suhu uap panas ulang secara spesifik dikontrol menggunakan peredam gas buang (flue gas dampers).Pengaturan elemen pemanas dan aliran gas buang di bagian belakang boiler dirancang untuk memaksimalkan transfer panas dan efisiensi. Dua set cooling cyclone separators diposisikan di antara ruang bakar dan rear shaft. Rear shaft ini dibagi oleh penutup SH menjadi jalur gas buang ganda (double flue gas pass). Di jalur gas buang depan terdapat low temperature RH, sementara di jalur gas buang belakang terdapat high temperature

SH dan low temperature SH yang disusun dari atas ke bawah. Kedua jalur gas buang ini kemudian menyatu dan mengalir secara horizontal ke H fin-type economizer dan horizontal air preheater. Susunan keseluruhan boiler ini diatur secara simetris, didukung, dan digantung pada rangka baja boiler.

Boiler DG-366/13.8-III ini dioperasikan untuk menyuplai unit turbin-generator uap yang memiliki kapasitas besar. Unit pembangkit yang digunakan adalah tipe ultrahigh pressure, single shaft, tandem compound two cylinders, single flow exhausts, reheating type, condensing steam turbine generator unit, dengan turbin model N115-13.24/535/535 yang diproduksi oleh Dongfang Electric Corporation. Turbin ini memiliki keluaran daya sebesar 115 MW pada kondisi TMCR, dengan kecepatan putar 3000 r/min. Generatornya sendiri adalah tipe three-phase air cooling generator (QF-115-2-10.5) yang beroperasi pada tegangan stator 10.5 kV dan faktor daya 0.90. Integrasi antara desain CFB yang efisien dan unit turbin-generator berkapasitas tinggi menunjukkan konfigurasi pembangkit listrik modern yang berfokus pada efisiensi termal dan daya keluaran yang signifikan(PT SLK, 2016).

I.2 Parameter Operasional pada Boiler CFB

I.2.1 Tekanan Bed (Bed Pressure)

Di dalam *furnace*, penurunan tekanan mewakili inventaris bed. Pada beban tertentu, penurunan penurunan tekanan mencerminkan penurunan kepadatan suspensi padatan rata-rata dalam *furnace*, terutama di zona transisi(Liu et al., 2015). Karena kepadatan suspensi padatan adalah faktor paling penting untuk perpindahan panas dalam boiler CFB, koefisien perpindahan panas akan menurun sesuai dengan penurunan tekanan. Boiler CFB di operasikan dengan penurunan tekanan yang relatif rendah di seluruh *furnace* dengan mengontrol ukuran partikel batubara yang dimasukkan ke dalam boiler dan dengan mengurangi jumlah material yang tidak efektif dalam bed. Ketika penurunan tekanan berubah, pola aliran dalam boiler CFB juga akan berubah, yang mengakibatkan perubahan dalam profil pembakaran dan perpindahan panas. Perubahan dalam penurunan tekanan secara langsung memengaruhi profil kepadatan padatan dalam *furnace*.dan dengan demikian mempengaruhi koefisien perpindahan panas pada permukaan pemanas.

I.2.2 Suhu Bed (Bed Temperature)

Suhu bed biasanya mengacu pada suhu material di zona padat dan memiliki peran penting dalam keamanan dan Operasional boiler CFB. Suhu bed adalah variabel utama yang dikontrol dalam proses pembakaran. Secara khusus, tingkat devolatilisasi dan reaksi pada kokas akan meningkat jika suhu bed lebih tinggi, yang juga meningkatkan efisiensi pembakaran pada boiler. Namun, suhu bed bagian atas dibatasi oleh titik leleh abu serta dampak desulfurisasi dan emisi NOx(Hong et al., 2020).

Suhu bed dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti beban boiler, laju pemberian batu bara, sifat batu bara, laju udara primer, aliran udara sekunder, pembuangan abu dan slag, dan lainnya. Oleh karena itu, mempertahankan suhu bed pada titik tertentu menjadi sulit, terutama ketika beban berubah secara luas dan sering. Maka dari itu, menjaga suhu bed dalam rentang tertentu menjadi lebih memungkinkan.

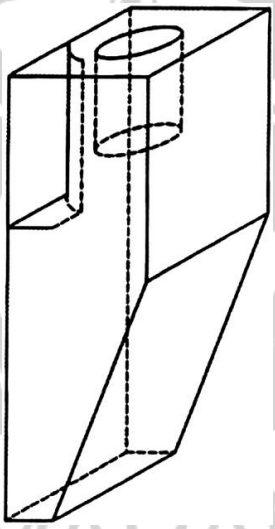
I.2.3 Primary Air Flow

Udara primer dalam boiler *Circulating fluidized bed*(CFB) memiliki peran penting dalam memastikan fluidisasi bed yang tepat dan mendorong pembakaran yang efisien. Udara primer disuntikkan ke dalam *furnace* melalui sistem nozzle atau distributor udara, yang membantu mempertahankan aliran campuran gas-padat yang merata. Fungsi utama udara primer adalah untuk memfluidisasi material bed, menjaga partikel tetap bergerak, dan memastikan bahwa bahan bakar tercampur cukup dengan udara untuk proses pembakaran.

Distribusi udara primer sangat penting bagi kinerja boiler CFB karena mempengaruhi keseragaman bed dan proses pembakaran. Ketidakteraturan dalam distribusi udara dapat menyebabkan masalah seperti zona mati atau fluidisasi yang tidak merata, yang dapat berdampak pada efisiensi dan stabilitas pembakaran. Untuk mengatasi masalah ini, beberapa desain boiler menerapkan fitur seperti baffle atau pra-distributor guna meningkatkan distribusi udara di bawah grid dan mengurangi turbulensi.

I.2.4 *Cyclone(loopseal)* Temp of CFB Boiler

Cyclone, yaitu pemisah gas-padat dalam boiler CFB, merupakan faktor kunci dalam peningkatan kapasitas yang menjadi salah satu tantangan utama dalam komersialisasi. Pada awal 1990-an, Ahlstrom Corporation dari Finlandia memperkenalkan *Cyclone* berbentuk persegi pertama, yang diberi nama Pyroflow COMPACT, untuk boiler CFB (Gamble, Hyppanen, & Kauranen, 1993). Dibandingkan dengan *Cyclone* bulat tradisional dengan kapasitas yang sama, *Cyclone* persegi ini memiliki ukuran lebih kecil, waktu start-up lebih singkat, konstruksi yang lebih sederhana dan murah, meskipun sedikit mengorbankan efisiensi pemisahan. Kemudian, dengan dukungan dari Komite Ekonomi dan Perdagangan Negara China (SETCC), Universitas Tsinghua di Beijing, China, mengembangkan dan mematenkan *Cyclone* persegi berpendingin air yang canggih, dengan inlet melengkung untuk mempercepat partikel sehingga meningkatkan efisiensi pemisahan (ditunjukkan pada Gambar 2).Teknologi ini berhasil diterapkan pada boiler dengan kapasitas 75 t/h dan 150 t/h (Junfu et al., 2007)



Gambar 2. 4 Skema siklon persegi muka dengan saluran masuk melengkung yang dipatenkan oleh Universitas Tsinghua.

Dalam sistem boiler berbasis *Circulating Fluidized Bed* (CFB), *loopseal* menempati posisi strategis sebagai katup non-mekanis yang berfungsi mengembalikan padatan, baik berupa sisa bahan bakar maupun material *bed*—yang tertangkap oleh siklon agar masuk kembali ke bagian bawah *riser* (*furnace*).

Komponen ini sekaligus bertindak sebagai sekat esensial untuk mencegah terjadinya *gas blow-by*, yakni aliran pintas gas bertekanan tinggi dari ruang bakar menuju area siklon yang bertekanan lebih rendah(Basu & Butler, 2009). Dalam operasional termal jangka panjang, temperatur yang terpantau pada zona *loopseal* (*loopseal temperature*) bukan sekadar instrumen pendukung, melainkan parameter termal vital yang mencerminkan dinamika sirkulasi padatan luar (*external solid circulation loop*). Fluktuasi pada temperatur ini memperlihatkan karakteristik perpindahan panas transien antara massa padatan terfluidisasi dan struktur dinding katup, yang secara langsung menentukan entalpi total material yang disirkulasikan ulang ke ruang bakar utama (Cheng & Basu, 1999; Kim et al., 2001).

Secara termodinamika, tingkat temperatur di dalam *loopseal* sangat dipengaruhi oleh interaksi antara laju sirkulasi padatan dan efektivitas fluidisasi udara sekunder yang diinjeksikan ke dalam sistem katup. Lonjakan temperatur pada zona ini mengindikasikan adanya intensifikasi transfer energi dari massa partikel bersuhu tinggi yang terkonsentrasi dari pemisah siklon. Kondisi tersebut memegang peranan penting dalam menjaga reaktivitas termal di zona bawah *riser* serta meredam potensi kejutan termal (*thermal shock*) pada material refraktori penahan panas(Lee et al., 2003).

Lebih jauh lagi, stabilitas *loopseal temperature* menjadi indikator penentu kelangsungan siklus hidrodinamika fluida di dalam boiler. Pengelolaan temperatur yang optimal memastikan bahwa proses sirkulasi partikel padatan berlangsung secara kontinu tanpa hambatan aglomerasi ataupun degradasi kualitas fluidisasi, sehingga efisiensi perpindahan panas konvektif dan kinerja pemanfaatan energi secara keseluruhan dapat dipertahankan secara konsisten di berbagai variasi beban operasi(Zhang et al., 2021b).

I.2.5 Secondary Air flow

Berdasarkan studi yang dilakukan sebelumnya pada boiler CFB skala besar, aliran udara sekunder (SA) terbukti menjadi faktor penting dalam memengaruhi distribusi pembakaran dan komposisi gas buang di dalam tungku.

Kedua studi tersebut mengkonfirmasi bahwa lintasan jet udara sekunder tidaklah lurus, melainkan berbentuk parabola, di mana ia pertama kali membengkok ke bawah sebelum kemudian melengkung ke atas. Fenomena ini menyebabkan konsentrasi oksigen di sepanjang jalur horizontal nosel SA menunjukkan profil menurun-meningkat-menurun. Studi lebih lanjut menunjukkan bahwa pada beban penuh (97% BMCR), jet SA dapat mencakup seluruh penampang tungku, sementara pada beban rendah (60% BMCR), aliran SA yang berkurang dapat menyebabkan kondisi hipoksia atau kekurangan oksigen di area tertentu. Keseragaman distribusi aliran SA sangat krusial untuk mencegah zona miskin oksigen yang dapat mengurangi efisiensi pembakaran(Nie et al., 2022; Yan et al., 2019b).

Kedua penelitian juga menyoroti pentingnya desain dan tata letak pipa udara sekunder untuk mencapai distribusi yang seragam. ditemukan bahwa pada boiler CFB 600 MW, area horizontal yang dijangkau oleh aliran SA tidak sepenuhnya mencakup seluruh lebar tungku, menciptakan zona kekurangan oksigen di antara nosel-nosel yang berdekatan. Beberapa penelitian melakukan simulasi numerik untuk boiler CFB ultra-superkritikal 660 MW dan menemukan bahwa, meskipun seragam pada area tertentu, tingkat deviasi kecepatan aliran pada pipa SA internal dan bawah bisa mencapai 17%. Hal ini menunjukkan bahwa masih ada ruang untuk optimasi, seperti penyesuaian diameter pipa dan penambahan katup, guna memastikan seragamnya aliran udara dan meningkatkan kinerja pembakaran secara keseluruhan. Temuan ini sangat relevan untuk desain dan pengoperasian boiler CFB kapasitas besar, di mana uniformitas pembakaran merupakan tantangan utama.(Nie et al., 2022; Yan et al., 2019b)

I.2.6 Coal Particle Size

Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa ukuran partikel memengaruhi karakteristik aliran gas-padat yang pada akhirnya berdampak pada perpindahan panas, efisiensi pembakaran, dan pembentukan polutan di boiler CFB. Berdasarkan penelitian Han dan juga Li menunjukkan bahwa mengurangi ukuran partikel dapat meningkatkan perpindahan panas dan mengubah karakteristik aliran gas-padat secara signifikan.

Ketika ukuran partikel rata-rata menurun dari sekitar 200 μm menjadi 100 μm, koefisien perpindahan panas unggun ke permukaan (hw) meningkat dan karakteristik aliran partikel berubah. Perubahan ini membuat bagian bawah unggun padat menjadi lebih tinggi, sementara zona encer di atas memiliki kepadatan padat yang lebih tinggi dan distribusi partikel yang lebih merata. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan material sirkulasi yang lebih halus, yang dapat dicapai dengan meningkatkan efisiensi siklon, dapat meningkatkan efisiensi perpindahan panas di penukar panas unggun terfluidisasi (FBHE)(C. Han et al., 2023; D. Li et al., 2021).

Lebih lanjut, ukuran partikel batubara merupakan faktor kunci dalam mengurangi emisi NOx dan meningkatkan efisiensi pembakaran. Beberapa penelitian menemukan bahwa mengurangi ukuran partikel batubara secara signifikan menurunkan emisi NOx dengan meningkatkan kepadatan padatan di zona *freeboard* dan memperkaya partikel di aliran ke bawah. Hal ini memperpendek kedalaman penetrasi udara sekunder (SA), menciptakan atmosfer pereduksi di area lokal yang efektif dalam menghambat pembentukan NOx. Peningkatan partikel arang halus juga mempercepat reduksi NOx. Selain itu, efisiensi pembakaran meningkat karena permukaan partikel yang lebih besar mempercepat pembakaran. Pengoptimalan ukuran partikel batubara sangat penting untuk meningkatkan kualitas unggun (*bed quality*), yang didefinisikan sebagai ukuran rata-rata material unggun. Kualitas unggun yang lebih baik, yang dicapai dengan mengurangi ukuran partikel dan meningkatkan efisiensi siklon, memungkinkan peningkatan sirkulasi padat, yang meningkatkan perpindahan panas dan memperpanjang waktu tinggal partikel untuk pembakaran dan desulfurisasi. Dengan demikian, pengoptimalan ini memberikan solusi hemat biaya untuk mengendalikan emisi dan meningkatkan efisiensi termal boiler secara keseluruhan (Ke et al., 2022; Lee et al., 2003).

I.2.7 *Excess Air* (udara berlebih)

Beberapa penelitian (Kouprianov & Tanetsakunvatana, 2003; Kuprianov, 2005; Wang et al., 2022)menunjukkan bahwa koefisien kelebihan udara (*excess air coefficient* atau α) adalah parameter operasional yang krusial, karena secara langsung memengaruhi efisiensi dan kinerja lingkungan boiler.

Koefisien ini menunjukkan rasio antara udara aktual yang disuplai untuk pembakaran dan udara teoretis yang dibutuhkan. Koefisien yang optimal sangat penting karena nilai α yang terlalu rendah dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna, meningkatkan emisi karbon monoksida (CO) dan karbon yang tidak terbakar, sehingga mengurangi efisiensi termal.

Sebaliknya, nilai α yang terlalu tinggi meningkatkan kerugian panas pada gas buang (*flue gas heat loss*) dan konsumsi daya *fan*, yang juga menurunkan efisiensi. ditemukan juga bahwa emisi NOx meningkat seiring dengan peningkatan rasio kelebihan udara(Kouprianov & Tanetsakunvatana, 2003), lebih lanjut penelitian lain menyajikan metode berbasis biaya untuk mengoptimalkan kelebihan udara, menunjukkan bahwa beralih ke nilai α yang optimal dapat secara signifikan mengurangi biaya operasional total yang terkait dengan konsumsi bahan bakar(Kuprianov, 2005). Lalu penelitian terbaru (Wang et al., 2022) mengembangkan model mekanistis untuk mengoptimalkan koefisien kelebihan udara pada boiler berbahan bakar batubara, mengkonfirmasi bahwa ada nilai optimal untuk α yang menyeimbangkan kerugian panas gas buang, kerugian panas pada bahan bakar yang tidak terbakar, dan konsumsi energi kipas.

I.2.8 Beban unit

Beban unit, yang diukur dalam megawatt (MW), memiliki dampak signifikan dan multifaset terhadap kinerja boiler, terutama pada efisiensi dan distribusi suhu. Menurut penelitian yang dilakukan pada tahun 2020 efisiensi boiler tidak selalu meningkat seiring dengan peningkatan beban; efisiensi tertinggi sering kali dicapai pada beban parsial, seperti 80%, karena kerugian gas buang (*stack loss*) cenderung meningkat pada beban penuh(Madejski & Żymełka, 2020). Sebaliknya penelitina yang dilakukan kishore mencatat bahwa efisiensi boiler secara keseluruhan meningkat seiring dengan peningkatan nilai kalor (*heating value*) batubara, yang secara tidak langsung terkait dengan kebutuhan beban untuk menjaga pasokan energi yang konstan. Temuan ini menyoroti bahwa hubungan antara beban dan efisiensi tidaklah linier dan dipengaruhi oleh faktor-faktor lain (Kishore & Rao, 2015).

Selain efisiensi, beban unit juga berperan penting dalam menentukan keseragaman kondisi operasional di dalam tungku. Penelitian sebelumnya menemukan bahwa pada beban boiler yang lebih tinggi (450-600 MW), distribusi suhu dan aliran gas-padat menjadi lebih seragam. Keseragaman ini sangat krusial untuk memastikan pembakaran yang efisien dan untuk menghindari masalah seperti *hotspot* dan keausan (*wear*) pada komponen internal(Song et al., 2018). Sebaliknya, beban yang lebih rendah dapat menyebabkan distribusi yang tidak seragam, seperti yang diamati oleh yang pada tahun 2019(Yan et al., 2019b), di mana zona defisit oksigen dapat muncul di antara nosel udara sekunder (*secondary air nozzles*), yang mengindikasikan pembakaran yang tidak merata.

I.3 **Kinerja Boiler**

I.3.1 Definisi Efisiensi *Thermal* pada Boiler metode langsung

Penghematan energi menjadi salah satu tema yang paling menarik dan menjadi salah satu topik penting dalam penggunaan boiler. Menurut biro efisiensi energy india, efisiensi *thermal* boiler didefinisikan sebagai persentase dari input panas yang efektif digunakan untuk menghasilkan uap. Efisiensi boiler juga didefinisikan sebagai rasio antara energi yang disuplai ke kapasitas boiler dan energi yang diterima dari boiler. Nilai ini dinyatakan dalam persentase. (Bureau of Energy Efficiency, 2015)

I.3.2 Perhitungan Efisiensi Boiler CFB

Metode langsung atau metode input-keluaran untuk perhitungan efisiensi boiler sangat sederhana dan banyak disukai oleh sebagian besar insinyur boiler. (Satyam Purseth & Desai, 2021)

$$\text{Efisiensi Boiler} = \text{Output Panas} / \text{Input Panas} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Efisiensi Boiler} = Q \times (hg - hf) / (q \times GCV) \times 100 \quad (2)$$

I.4 **Pemulihan Panas Boiler**

I.4.1 Definisi Pemulihan panas boiler

Secara mendasar, mekanisme pemulihan panas pada sistem boiler diarahkan untuk mengoptimalkan penyerapan sisa energi termal, atau yang biasa dikenal sebagai sensible heat, dari aliran gas buang (flue gas) agar dapat ditransfer kembali ke fluida kerja, baik berupa air umpan maupun uap. Pada instalasi pembangkit dengan teknologi *Circulating Fluidized Bed (CFB)*, efektivitas pemulihan panas di area backpass (yang mencakup komponen konvektif seperti economizer, superheater, dan air preheater) memegang peranan sentral. Upaya ini tidak sekedar ditujukan untuk menekan besarnya kerugian panas gas buang kering (*dry flue gas losses*) guna mendongkrak efisiensi termal total, melainkan juga merepresentasikan penerapan konsep peningkatan intensitas proses (process intensification).

Pendekatan tersebut berfokus pada bagaimana pemanfaatan gradien suhu tinggi dapat dieksploitasi secara maksimal guna memperbaiki kerapatan energi sistem secara keseluruhan (Alhashem et al., 2025; Y. Han & Zhu, 2022; Purseth et al., 2021). Jika ditinjau dari perspektif termodinamika, efisiensi penyerapan panas di zona konveksi hilir ini sangat ditentukan oleh hukum perpindahan panas konvektif. Laju perpindahan panas yang terjadi pada dasarnya berbanding lurus dengan luas permukaan efektif pipa, koefisien perpindahan panas menyeluruh, serta perbedaan temperatur antara gas buang panas dari siklon dan fluida di dalam pipa (Hu et al., 2024). Berbagai studi terdahulu menggarisbawahi bahwa konsistensi pemulihan panas sangat menuntut kontrol yang ketat terhadap laju alir massa gas buang serta kestabilan termal pada reaktor inti. Fluktuasi kecil pada temperatur di ruang bakar primer dipastikan akan merambat dan mengubah entalpi gas buang yang memasuki zona konveksi di bagian hilir(Zhang et al., 2021b).

Penelitian sebelumnya (Purseth et al., 2021) secara eksplisit menyatakan bahwa tujuan utama pemulihan panas adalah untuk meminimalkan kehilangan panas gas buang kering (*dry flue gas losses*). Untuk mencapai hal ini, komponen kunci yang berperan dalam proses ini meliputi *economizer*, *superheater*, dan *air pre-heater*.

Pemasangan komponen ini memungkinkan boiler untuk memanfaatkan kembali panas yang seharusnya terbuang. Selain efisiensi termal, proses pemulihan panas ini juga memiliki manfaat lingkungan dan secara sinergis menghilangkan polutan, seperti sulfur trioksida (SO3)(Y. Han & Zhu, 2022). Dengan demikian, pemulihan panas tidak hanya mengoptimalkan penggunaan energi tetapi juga membantu mengurangi dampak lingkungan.

I.4.2 Perhitungan pemulihan panas pada boiler CFB

Berdasarkan paper (Zhang et al., 2021a) rumus untuk efisiensi pemulihan termal (ζ) adalah perbandingan antara energi yang diserap dari gas buang dan total energi yang masuk. Rumus-rumus yang lebih relevan untuk perhitungan tersebut adalah sebagai berikut:

$$\zeta = mfg \cdot (hin - hout) / mfg \cdot hin \quad (3)$$

Pada tahun 2024 hu berserta rekannya juga melakukan penelitian yang memberikan wawasan tentang perhitungan perpindahan panas, terutama pada *waste heat boiler*. Penelitian tersebut mengidentifikasi bahwa koefisien perpindahan panas partikel mencapai puncaknya pada kecepatan gas buang tertentu. Peningkatan ukuran ruang radiasi dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi perpindahan panas gas buang(Hu et al., 2024).

I.5 **Normalisasi Z-Score**

Normalisasi Z-score, juga dikenal sebagai standardisasi, adalah teknik preprocessing data yang sangat penting untuk memastikan bahwa setiap variabel dalam dataset memiliki skala yang seragam. Ini mengubah data sehingga memiliki rata-rata 0 dan standar deviasi 1. Rumus untuk menghitung Z-score untuk suatu nilai x adalah:

$$Z = \sigma x - \mu \quad (4)$$

di mana μ adalah rata-rata dan σ adalah standar deviasi dari variabel tersebut. Proses ini sangat penting untuk algoritma yang menghitung jarak antar titik data, seperti K-Means Clustering dan PCA, karena mencegah variabel dengan rentang nilai yang lebih besar mendominasi perhitungan jarak. Beberapa studi sebelumnya secara eksplisit menyebutkan pentingnya normalisasi atau penskalaan data untuk mendapatkan hasil yang optimal dalam analisis multivariat (Abdul-Wahab et al., 2005; Ouyang et al., 2024)

Metode ini berbeda dengan metode penskalaan lainnya, seperti normalisasi Min-Max, yang menskalakan data ke dalam rentang tetap (misalnya, antara 0 dan 1). Salah satu keunggulan utama Z-score adalah ketahanannya terhadap outlier. Karena perhitungannya menggunakan rata-rata dan standar deviasi, yang kurang sensitif terhadap nilai-nilai ekstrem dibandingkan dengan nilai minimum dan maksimum, normalisasi Z-score cenderung tidak mengkompresi data non-outlier ke dalam rentang yang sangat sempit. Ini menjadikannya pilihan yang lebih baik ketika dataset memiliki nilai-nilai outlier yang signifikan (Zhou et al., 2025).

I.6 Persamaan Multivariate Regression

Regresi multivariat adalah metode statistik yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara satu atau lebih variabel dependen (respon) dengan beberapa variabel independen (prediktor)(Mehmet, 2011; Mustapha & Abdu, 2012). Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk memahami kontribusi setiap variabel independen terhadap variasi variabel dependen. Metode ini sangat berguna dalam bidang yang kompleks, seperti analisis kualitas air, peramalan curah hujan, atau evaluasi produk makanan, di mana banyak faktor saling terkait. Regresi multivariat juga membantu mengidentifikasi variabel-variabel kunci yang paling signifikan, seperti variabel operasional utama yang memengaruhi efisiensi termal pada boiler (Shieh et al., 2010). Proses ini sering kali melibatkan pemilihan variabel yang cermat, seperti melalui analisis regresi stepwise, untuk memastikan model yang dihasilkan akurat dan tidak terlalu kompleks, sehingga memberikan wawasan mendalam yang dapat digunakan untuk prediksi dan kontrol.

I.6.1 Persamaan Multivariate Regression Linear

Regresi Linear Multivariat (MLR) memodelkan hubungan linear antara satu variabel dependen dan dua atau lebih variabel independen. Asumsi utamanya adalah bahwa hubungan antarvariabel dapat direpresentasikan oleh garis lurus (Bera et al., 2021). Model ini sering digunakan untuk tujuan prediksi dan penentuan sumber, seperti dalam penilaian kualitas air permukaan di mana variabel kualitas air bergantung pada beberapa sumber polusi (Mustapha & Abdu, 2012). Fleksibilitas model ini memungkinkannya diterapkan dalam berbagai disiplin ilmu, mulai dari analisis ekonomi hingga pemodelan lingkungan.

MLR sangat penting untuk memodelkan sistem di mana perubahan pada variabel dependen diasumsikan proporsional terhadap perubahan variabel independen. Misalnya, dalam penelitian tentang kualitas air, konsentrasi suatu polutan (variabel dependen) dapat dimodelkan sebagai fungsi linear dari beberapa parameter fisikokimia (variabel independen) seperti pH, salinitas, atau suhu. Model ini memberikan cara yang lugas untuk mengukur dan memvisualisasikan pengaruh setiap faktor.

Persamaan umum untuk model ini dapat ditulis sebagai:

$$Y=\beta 0+\beta 1X1+\beta 2X2+...+\beta mXm+\epsilon \quad (5)$$

I.6.2 Persamaan Multivariate Regression Eksponensial

Regresi Eksponensial Multivariat adalah bentuk regresi non-linear yang mengasumsikan hubungan eksponensial antara variabel dependen dan independen. Model ini sangat relevan untuk fenomena yang menunjukkan laju pertumbuhan atau peluruhan yang terus-menerus, seperti pertumbuhan mikroba, kinetika kimia, atau peramalan penjualan (Dette et al., 2006). Model ini memberikan model yang lebih akurat daripada model linear ketika data tidak mengikuti pola linear dan sangat penting untuk proses yang perubahan lajunya tidak konstan.

Secara umum, hubungan ini dapat dituliskan sebagai:

$$Y=\beta 0+\beta 1e-X1+\beta 2e-X2+... \quad (6)$$

Model eksponensial secara khusus diterapkan ketika laju perubahan suatu variabel sebanding dengan nilai variabel itu sendiri. Contohnya termasuk pemodelan metabolisme glukosa, di mana aktivitas spesifiknya dapat meluruh secara eksponensial dari waktu ke waktu, dan estimasi sisa umur pakai komponen mekanis, di mana laju degradasi meningkat secara eksponensial saat komponen mendekati kegagalan (Di Maio et al., 2012).Fleksibilitas ini membuat regresi eksponensial menjadi alat yang sangat berharga dalam bidang prediktif.

Salah satu penerapan khusus adalah multivariate regression-cum-exponential estimator yang diusulkan oleh Asghar beserta timnya untuk mengestimasi vektor varians populasi menggunakan variabel multi-auxiliary dalam sampling dua fase(Asghar et al., 2018). Selain itu, penelitian lain membandingkan kinerja model regresi linear dan eksponensial untuk estimasi fluks gas di ekosistem, menunjukkan bahwa model eksponensial dapat menjadi representasi yang lebih sesuai untuk proses difusi (Forbrich et al., 2010). Pilihan antara model ini sering kali bergantung pada pemahaman teoritis tentang proses yang sedang dipelajari.

I.6.3 Persamaan Multivariate Regression Polinomial

Regresi Polinomial Multivariat digunakan untuk memodelkan hubungan non-linear yang dapat direpresentasikan oleh polinomial derajat n. Model ini dapat menangkap kurva dalam data yang tidak dapat dijelaskan oleh model linear sederhana, sehingga sering kali menghasilkan model yang memiliki kecocokan (fit) data yang lebih baik (Bera et al., 2021). Model polinomial sangat fleksibel dan dapat menyesuaikan diri dengan berbagai bentuk hubungan data, menjadikannya pilihan yang ideal ketika model linear terlalu membatasi.

Meskipun model polinomial menawarkan fleksibilitas yang lebih besar, ada risiko signifikan dari overfitting, terutama dengan derajat polinomial yang tinggi. Overfitting terjadi ketika model terlalu pas dengan data pelatihan dan tidak dapat digeneralisasi dengan baik ke data baru. Oleh karena itu, penelitian menekankan perlunya menyeimbangkan kompleksitas model dan akurasi, sering kali dengan membatasi derajat polinomial (misalnya, menjadi dua atau tiga) untuk mencegah model menjadi terlalu spesifik (Ajona et al., 2022).

Persamaan regresi polinomial derajat dua dapat ditulis sebagai:

$$E(Y)=\beta 0+\beta 1X+\beta 2X2+\epsilon \quad (7)$$

Model ini digunakan dalam berbagai studi, seperti untuk memprediksi dinamika pantai (Bruno et al., 2018) atau untuk menganalisis proses biodegradasi minyak mentah (Ajona et al., 2022).

Studi komparatif sering kali membandingkan kinerja model ini dengan model regresi linear dan model aditif umum (GAM) untuk menentukan model terbaik.

I.7 Principal Component Analysis

Principal Component Analysis (PCA) adalah teknik statistik multivariat yang kuat yang digunakan untuk mengurangi dimensi dari sekumpulan data yang memiliki banyak variabel yang saling berkorelasi. Tujuan utama PCA adalah mengubah sekumpulan variabel asli menjadi sekumpulan variabel baru yang tidak berkorelasi, yang disebut sebagai komponen utama (principal components, PC) (Abdul-Wahab et al., 2005; Mustapha & Abdu, 2012).

Komponen-komponen ini diurutkan sedemikian rupa sehingga PC pertama menjelaskan varians terbesar dalam data, dan setiap PC berikutnya menjelaskan variabilitas sisa yang belum dijelaskan. Dengan cara ini, PCA memungkinkan peneliti untuk memvisualisasikan data dimensi tinggi dalam ruang dimensi rendah.

PCA sangat penting dalam bidang-bidang seperti pemantauan lingkungan, di mana PCA dapat membantu dalam identifikasi sumber-sumber polusi yang tidak terdeteksi. Dengan menganalisis hubungan antarvariabel (seperti parameter kualitas air), PCA dapat mengungkap pola-pola yang berkaitan dengan sumber polusi spesifik, seperti limpasan pertanian atau limbah industri. PCA bertindak sebagai alat penemuan pola yang menyederhanakan struktur data yang kompleks menjadi faktor-faktor laten yang lebih bermakna.

Dalam praktiknya, PCA digunakan untuk mengidentifikasi pola atau sumber tersembunyi yang memengaruhi sekumpulan variabel. PCA juga efektif dalam mengatasi masalah multikolinearitas dalam analisis regresi dengan menggunakan skor PC sebagai variabel prediktor baru, yang menjamin bahwa prediktor baru ini tidak berkorelasi (Mehmet, 2011).

I.8 K-Means Clustering

K-Means Clustering adalah algoritma pengelompokan (clustering) yang tidak diawasi (unsupervised). Tujuannya adalah untuk mempartisi n pengamatan menjadi k kelompok, di mana setiap pengamatan termasuk dalam klaster yang memiliki rata-rata terdekat (centroid).

Algoritma ini bersifat efisien, cepat dalam konvergensi, dan sederhana, menjadikannya pilihan yang ideal untuk tugas-tugas seperti membagi klaster pembangkit listrik fotovoltaik (Ouyang et al., 2024) atau memetakan sumber-beban dalam perencanaan pemanasan distrik (Shahcheraghian et al., 2025).

Aplikasi lain adalah untuk diagnosis kesalahan (fault diagnosis) di pembangkit listrik tenaga nuklir, di mana K-means digunakan untuk mengelompokkan data kesalahan tanpa label secara otomatis (Zhou et al., 2025). Penggunaan K-means untuk mengidentifikasi dan mengelompokkan data kesalahan yang tidak diketahui secara otomatis sangat penting untuk sistem pembelajaran seumur hidup, karena memungkinkan pakar untuk memberi label pada klaster, bukan pada setiap titik data, yang mengurangi biaya dan kesulitan. Secara keseluruhan, K-means memainkan peran penting dalam analisis data yang kompleks, di mana data perlu diorganisasi ke dalam kelompok-kelompok yang bermakna untuk analisis lebih lanjut.

I.9 Model Validation

Validasi model adalah proses penting untuk mengevaluasi kinerja model prediksi dengan membandingkan nilai yang diprediksi dengan nilai yang diamati. Metrik yang umum digunakan dalam regresi dan peramalan meliputi Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), dan Root Mean Squared Error (RMSE). Masing-masing memiliki sensitivitas yang berbeda terhadap kesalahan. Metrik ini memberikan bobot yang lebih besar pada kesalahan yang besar dan sering digunakan untuk mengukur kinerja model secara keseluruhan, di mana nilai yang lebih rendah menunjukkan kecocokan yang lebih baik. MAE mengukur rata-rata perbedaan absolut antara nilai yang diprediksi dan yang diamati, sehingga kurang sensitif terhadap outlier dibandingkan RMSE.

MSE adalah metrik dasar yang menghitung rata-rata kuadrat kesalahan, dan RMSE adalah akar kuadratnya. Pilihan metrik yang tepat bergantung pada tujuan spesifik penelitian dan bagaimana sensitivitas terhadap berbagai jenis kesalahan harus ditangani.

Berikut adalah rumusnya:

RMSE: $\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(yi - y\hat{}i)^2}$ (Bera et al., 2021; Masteali et al., 2025) (8)

MAE: $\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|yi - y\hat{}i|^2$ (Taylor, 2007) (9)

MSE: $\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(yi - y\hat{}i)^2$ (Zhou et al., 2025) (10)

UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG