BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Coal fired power plant adalah salah satu power plant yang masih menjadi power plant dominan yang dipakai di Indonesia. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) tahun 2022, penggunaan batubara untuk pembangkit listrik merupakan salah satu yang terbesar, yaitu mencapai 446 juta BOE. Angka ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan energi lain seperti tenaga air yang sebesar 50 juta BOE dan energi panas bumi sebesar 30 juta BOE.(Ministry of energy and mineral resources Republic of indonesia, 2022)

Teknologi pembakaran batubara halus (*Pulverized Coal*/PC) adalah yang paling umum digunakan dalam pembangkit listrik, tetapi fleksibilitasnya dalam penggunaan bahan bakar terbatas (Giglio & Castilla, 2015). Hal ini membuat industri kesulitan beralih ke bahan bakar alternatif yang lebih ekonomis jika tersedia. Sementara itu, teknologi boiler berperforma tinggi, seperti ultra-supercritical, lebih mendukung penggunaan sistem CFB dibandingkan PC, tidak hanya karena fleksibilitas bahan bakarnya, tetapi juga berbagai alasan praktis lainnya(Giglio & Castilla, 2015) . Faktor ini mendorong banyak perusahaan energi beralih ke sistem pembakaran *circulating fluidized bed* (CFB). Dengan karakteristik fleksibilitas bahan bakar, emisi NOx yang lebih rendah, dan kemudahan dalam pengendalian SO2, teknologi CFB semakin diminati perusahaan listrik di seluruh dunia, dan instalasinya berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir.(Arjunwadkar et al., 2016)

Sejak awal 2003, Boiler CFB telah muncul sebagai alternatif yang layak untuk boiler PC dalam pembangkit listrik tenaga batubara, dengan penerapan luas pada boiler berkapasitas 300 MW dan demonstrasi sukses pada unit superkritis hingga 600 MW. Kemajuan terbaru dalam kapasitas unit boiler CFB dan kondisi uap telah meningkatkan efisiensi dan skala ekonomi, sehingga pembangkit boiler CFB kini lebih menguntungkan secara ekonomi (Lockwood, 2013).

Namun, beberapa tahun terakhir, banyak laporan menunjukkan bahwa efisiensi *thermal* boiler CFB lebih rendah dari yang diharapkan. Sebagai contoh, suhu gas buang dari boiler CFB berkapasitas 220 t/h bisa mencapai 168,5°C, dengan efisiensi *thermal* sebesar 86,4%, yang lebih rendah dari efisiensi desain yang diharapkan sebesar 88%(Liu et al., 2019). Hal ini menyebabkan hampir 5.000 ton batubara berkualitas rendah terbuang setiap tahun. Di China sendiri, terdapat hampir sepuluh ribu boiler CFB yang berOperasional. Oleh karena itu, terdapat kebutuhan mendesak untuk meningkatkan efisiensi *thermal* dan meminimalkan dampak lingkungan dari boiler CFB.(Liu et al., 2019)

Penelitian mengenai boiler CFB telah mengalami perkembangan signifikan dalam beberapa tahun terakhir, berfokus pada optimisasi pembakaran dan peningkatan efisiensi sistem. Penelitian awal mengeksplorasi pengaruh coal feed rate dan primary air rate terhadap suhu dalam bed boiler, di mana kedua parameter tersebut terbukti memengaruhi distribusi panas dan kestabilan pembakaran(Lv et al., 2017). Pada tahun yang sama, penelitian juga dilakukan terhadap efek bed pressure drop dan aliran udara sekunder terhadap efisiensi *thermal*, yang menyoroti pentingnya manajemen tekanan dan aliran udara dalam menjaga efisiensi optimal(Qi et al., 2017). Kemudian, pada 2018, penelitian dilanjutkan dengan kajian mengenai pengaruh ketinggian water wall terhadap suhu di sekitar dinding boiler untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan mencegah kerusakan akibat suhu ekstrem(Chen et al., 2018).

Penelitian lebih lanjut menyoroti pengaruh kualitas batubara terhadap proses pembakaran dan dampaknya terhadap emisi, menunjukkan bahwa kualitas bahan bakar memiliki efek signifikan terhadap emisi serta stabilitas proses(Engin et al., 2019). Pada 2022, studi tentang koefisien *Excess Air*yang optimal dilakukan untuk meningkatkan performa boiler(Wang et al., 2022), diikuti pada tahun 2023 dengan penelitian mengenai pengaruh ukuran *bed material* terhadap karakteristik aliran *gas-solid*(C. Han et al., 2023). Hasil penelitian ini tidak hanya mendukung optimalisasi desain boiler CFB, tetapi juga memberikan wawasan penting untuk pengaturan Operasional guna meningkatkan efisiensi dan menekan dampak lingkungan.

Selain hubungan parameter Operasional terhadap Efisiensi Boiler, pemulihan panas (heat recovery) dari gas buang boiler telah diakui sebagai strategi penting untuk meningkatkan efisiensi energi, penelitian yang komprehensif mengenai parameter-parameter kunci yang secara signifikan memengaruhi kinerja sistem ini masih terbatas. Analisis teknis-ekonomi terhadap empat skema pemulihan panas gas buang boiler, seperti yang dijelaskan oleh (Xu et al., 2013), secara komprehensif menunjukkan bahwa skema substitusi steam tingkat tinggi (high-stage steam substitute) menawarkan efisiensi penghematan energi yang secara signifikan lebih superior dibandingkan skema substitusi steam tingkat rendah.

Namun, studi ini juga menyoroti adanya trade-off penting: peningkatan efisiensi termal ini diimbangi oleh kebutuhan akan area perpindahan panas yang lebih besar serta peningkatan penurunan tekanan gas buang, yang pada akhirnya mengurangi kinerja keseluruhan sistem. Temuan ini menyiratkan bahwa pemulihan panas tidak selalu berkorelasi positif dengan peningkatan kuantitas panas yang dipulihkan, melainkan terdapat titik operasi optimal yang harus diidentifikasi melalui analisis teknis-ekonomi mendalam. Pendekatan ini diperkuat oleh studi lain (Zhang et al., 2021a) yang mengkaji pemulihan panas dan air dari gas buang melalui sistem pompa panas absorpsi terbuka (OAHP). Dengan mengoptimalkan sistem melalui penguapan kilat (flash evaporation) dalam konfigurasi dua tahap (TROAHP) dan sebagian (PROAHP), penelitian ini berhasil mencapai peningkatan koefisien kinerja (COP) hingga 17.3%, menunjukkan potensi besar untuk perbaikan efisiensi yang substansial. Secara kolektif, kedua penelitian ini menegaskan bahwa strategi pemulihan panas yang efektif membutuhkan pertimbangan menyeluruh.

Sebagian besar penelitian terdahulu mengenai kinerja boiler Circulating Fluidized Bed (CFB) cenderung mengevaluasi parameter operasional secara parsial dan terbatas pada data uji skala laboratorium atau simulasi, belum banyak kajian yang memanfaatkan data operasional industri CFB aktual yang bersifat multivariabel dan dinamis secara komprehensif. Penelitian sebelumnya juga belum banyak membandingkan secara sistematis keandalan pendekatan pemodelan hubungan (linear, eksponensial, dan polinomial), baik dengan maupun tanpa reduksi dimensi menggunakan Principal Component Analysis (PCA),

serta belum mempertimbangkan segmentasi mode operasi boiler. Dari segi keluaran, evaluasi terhadap efisiensi boiler dan pemulihan panas umumnya dilakukan secara terpisah. Oleh karena itu, penelitian tesis ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara parameter operasional terhadap efisiensi boiler dan pemulihan panas pada boiler CFB.

I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

a. Bagaimana pengaruh perubahan parameter operational boiler terhadap efisisensi boiler CFB ?
b. Bagaimana pengaruh perubahan parameter operational boiler terhadap pemulihan panas boiler CFB?

I.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini dirumuskan untuk menjawab permasalahan yaitu :

a. Menganalisis pengaruh perubahan parameter operational boiler terhadap efisiensi boiler CFB.
b. Menganalisis pengaruh perubahan parameter operational boiler terhadap pemulihan panas boiler CFB .

I.4 **M**anfaat Penelitian

Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh berbagai kalangan, di antaranya:

1. Bagi kalangan akademis, Penelitian ini memperluas pengetahuan mengenai Operasional boiler CFB dan pengaruhnya terhadap efisiensi dan pemulihan panas boiler, khususnya dalam pengelolaan parameter seperti tekanan wind box, temperatur bed, dan aliran udara untuk efisiensi yang optimal. Data empiris yang dihasilkan dapat menjadi referensi untuk penelitian lanjutan dalam bidang teknik mesin, energi, dan lingkungan, serta mendukung pengembangan model simulasi dan prediksi performa boiler CFB.

2. Bagi profesional, Penelitian ini membantu sektor pembangkit listrik dan manufaktur dalam mengoptimalkan proses pembakaran boiler CFB. Optimalisasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan biaya bahan bakar, tetapi juga membantu perusahaan memenuhi regulasi emisi.

I.5 **Orisinalitas Penelitian**

Upaya memetakan dinamika serta efisiensi pengoperasian boiler Circulating Fluidized Bed (CFB) sejatinya telah diinisiasi oleh beberapa studi terdahulu lewat fokus yang beragam, mulai dari pemodelan suhu bed berbasis algoritma least squares support vector machine (LS-SVM) oleh Lv (Lv et al., 2017), hingga optimasi pembakaran melalui reduksi tekanan windbox oleh Qi (Qi et al., 2017). Kendati demikian, pemodelan dinamis tersebut belum mengaitkan variabel-variabel tersebut secara historis dengan efisiensi boiler secara menyeluruh, serta belum mendefinisikan hubungan fungsional antara tekanan windbox, suhu cyclone, dan udara sekunder secara integratif. Keterbatasan serupa juga tampak pada aspek karakteristik bahan bakar; Engin menguji stabilitas pembakaran lignit kualitas rendah serta parameter emisi gas buang seperti CO, NOx, dan SO2, namun analisis yang disajikan cenderung parsial tanpa mengintegrasikannya dengan dinamika variabel operasional reaktor CFB(Engin et al., 2019). Sementara itu, meskipun Kishore dan Rao berhasil memetakan pengaruh kadar abu dan nilai kalor terhadap efisiensi termal pada sistem CFB berkapasitas 210 MW(Kishore & Rao, 2015), studi tersebut belum memformulasikan model matematis atau algoritma optimasi yang dapat mengekstrak titik operasi terbaik (optimum operating point) berdasarkan interaksi dinamis seluruh parameter operasional yang ada.

Di sisi lain, kajian mengenai aspek hidrodinamika, dimensi partikel, dan pola distribusi udara sekunder terus berkembang guna meminimalkan kerugian termal, namun masih menyisakan batasan metodologis yang cukup besar. Analisis eksperimental menggunakan model dingin CFB dua dimensi oleh Wang(Wang et al., 2022), menunjukkan bahwa ukuran partikel bed sangat memengaruhi profil tekanan aksial, meskipun korelasi langsungnya terhadap fenomena aliran fluida pada kondisi panas boiler skala industri belum divalidasi.

Masalah ketidakseragaman distribusi oksigen diinvestigasi oleh Yan pada unit CFB supercritical 600 MW dan Nie pada kapasitas ultra-supercritical 660 MW. Yan dkk. menemui akumulasi oksigen lokal hingga 20 di sekitar nosel udara sekunder, sedangkan Nie dkk. mencatat sebaran udara yang tidak merata berkisar antara 5-10 di area tengah hingga mencapai 17 di bagian bawah.

Kendati modifikasi geometri pipa diusulkan sebagai solusi, kedua studi ini belum mengkuantifikasi penalti efisiensi termal dan penurunan laju pemulihan panas (heat recovery) akibat maldistribusi tersebut(Nie et al., 2022; Yan et al., 2019a). Adapun pemodelan koefisien udara berlebih (excess air) optimal oleh Wang, yang terbukti meningkatkan efisiensi pembakaran, sayangnya masih terbatas pada sistem Pulverized Coal (PC) boiler dan berfokus pada variasi beban (load) ketimbang integrasi parameter operasional makro pada sistem CFB(Wang et al., 2022).

Sintesis mendalam terhadap literatur-literatur menyingkap adanya celah yang dapat di isi dan ditingkatkan, mayoritas kajian terdahulu menganalisis variabel operasional boiler CFB secara terpisah atau dalam subset yang sangat terbatas.. Akibat pengabaian korelasi simultan ini, pemahaman komprehensif mengenai bagaimana interaksi parameter mikro-makro memengaruhi stabilitas pembakaran dan efisiensi termal boiler CFB masih menyisakan ruang perdebatan yang lebar di kalangan peneliti. Berangkat dari celah metodologis tersebut, penelitian ini diarahkan untuk melakukan pendekatan pemodelan yang lebih komprehensif guna merumuskan kebaruan ilmiah. Berbeda dengan studi terdahulu yang mengandalkan pemodelan skala laboratorium atau simulasi numerik teoritis murni, penelitian ini menggunakan data lapangan aktual yang diperoleh langsung dari unit pembangkit listrik skala industri.

Investigasi difokuskan pada analisis simultan terhadap kombinasi dinamis delapan parameter operasional utama, yaitu *Bed Pressure, Bed Temperature, Cyclone Temperature, Oxygen Excess Air, Air Fuel Ratio, Medium Coal Size Percentage, Ratio Primary and Secondary Air*, serta Turbine Load. Keseluruhan parameter input ini dikorelasikan secara langsung terhadap dua indikator performa utama secara bersamaan, yakni Boiler Direct Efficiency dan Boiler Heat Recovery. Dengan mengurai pola ketergantungan non-linear antar-variabel ini pada kondisi operasi riil pembangkit, penelitian ini diharapkan dapat mengembangkan model empiris untuk mengidentifikasi kombinasi parameter yang berasosiasi dengan kinerja dan memetakan mode operasi.

UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG