SINERGI Polmed: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

PERUBAHAN DIMENSI RUANG BAKAR *CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER* BERDASARKAN KARAKTERISTIK BATU BARA AKTUAL

Diki Miftahudin[a], Teguh Sasono[a], Purwinda Iriani[a*]

[a]*Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Bandung 40012, Indonesia*

**Penulis korespondensi: purwinda.iriani@polban.ac.id; purwinda.iriani@gmail.com, (P. Iriani), Tel.: +62 811-2341-212*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 01 Agustus 2026
Direvisi pada 13 Oktober 2026
Disetujui pada 20 Oktober 2026
Tersedia daring pada 06 November 2026

Kata kunci:
Boiler Unggun Terfluidisasi Sirkulasi; ruang bakar; karakteristik batu bara; neraca energi; perancangan ulang.

Keywords:
Circulating Fluidized Bed boiler; furnace redesign; coal characteristics; energy balance; thermal efficiency.

ABSTRAK

Nilai efisiensi boiler *Circulating Fluidized Bed* (CFB) pada perusahaan gula rafinasi mengalami penurunan akibat ketidaksesuaian karakteristik batubara aktual dengan spesifikasi desain awal, sehingga proses pembakaran menjadi kurang optimal. Penelitian ini bertujuan mendesain ruang bakar *boiler* CFB berdasarkan karakteristik batubara aktual. Metode penelitian meliputi analisis stoikiometri pembakaran, neraca massa dan energi, perancangan dimensi ruang bakar, serta analisis hasil perancangan. Hasil menunjukkan penyesuaian dimensi ruang bakar menghasilkan kecepatan fluidisasi 4,04 m/s, temperatur ruang bakar 877,42 °C, dan temperatur gas buang 146,96 °C. Hasil perancangan menunjukkan potensi peningkatkan efisiensi boiler dari 70,76% menjadi 83,31%, dan menurunkan konsumsi batubara dari 3,31 menjadi 2,78 kg/s.

ABSTRACT

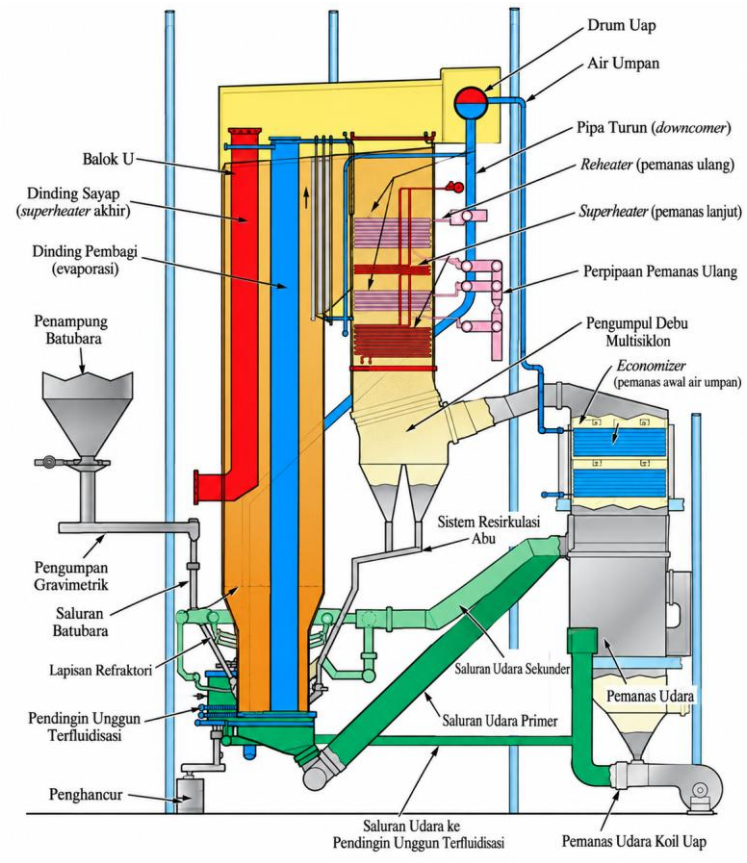
The thermal efficiency of the Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler employed in a sugar refinery plant has decreased due to the mismatch between the actual coal characteristics and the original design specifications, resulting in suboptimal combustion performance. This study aims to redesign the CFB boiler furnace based on the actual coal characteristics. The research methodology included combustion stoichiometric analysis, mass and energy balance calculations, furnace dimension design, and thermal performance evaluation of the redesigned furnace. The results indicate that the furnace dimension adjustment achieved a fluidization velocity of 4.04 m/s, a furnace temperature of 877.42 °C, and a flue gas temperature of 146.96 °C The design results indicate a potential increase in boiler efficiency from 70.76% to 83.31% and a potential reduction in coal consumption from 3.31 to 2.78 kg/s.

1. PENGANTAR

Industri gula rafinasi membutuhkan pasokan uap dan listrik yang andal untuk mendukung proses pemurnian, penguapan, kristalisasi, dan pengeringan. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah pembangkitan gabungan panas dan listrik (*combined heat and power*/CHP), yang memanfaatkan energi bahan bakar untuk menghasilkan kedua bentuk energi tersebut (International Energy Agency, 2008). Kinerja *boiler* menjadi penting karena gangguan pada penyediaan uap dapat memengaruhi keberlangsungan proses produksi.

PT Andalan Furnindo mengoperasikan sistem CHP dengan kapasitas pembangkitan listrik 6 MWe yang menggunakan boiler circulating fluidized bed (CFB) berbahan bakar batu bara. Sistem CFB memanfaatkan pencampuran partikel bahan bakar dan material unggun dalam aliran udara untuk meningkatkan kontak gas-padatan dan perpindahan panas (Basu, 2015; Leckner, 2022). Data operasi Juni 2025 menunjukkan efisiensi boiler sebesar 70,76 %. Angka ini menjadi kondisi pembanding bagi evaluasi rancangan, bukan bukti tunggal mengenai penyebab penurunan kinerja.

Perbedaan karakteristik batu bara antara basis desain dan bahan bakar yang digunakan perlu diperhatikan dalam evaluasi termal. Nilai kalor batu bara pada basis desain dilaporkan sebesar 3.500 kkal/kg, sedangkan batu bara aktual sebesar 4.234 kkal/kg (17.785,9 kJ/kg). Perubahan nilai kalor dapat memengaruhi kebutuhan laju bahan bakar, udara pembakaran, dan neraca panas. Namun, keterkaitan langsung antara perbedaan bahan bakar dan turunnya efisiensi tidak dapat dipastikan tanpa data komparatif mengenai komposisi batu bara, udara berlebih, rugi panas, serta kondisi operasi lainnya. Oleh karena itu, penelitian ini mengevaluasi kesesuaian dimensi ruang bakar terhadap parameter perhitungan berdasarkan kondisi bahan bakar aktual.



Gambar 1: Skema sistem *boiler* CFB
Sumber: (Babcock & Wilcox Company, 2005)

Gambar 1 memperlihatkan susunan utama boiler CFB, meliputi ruang bakar, siklon, pemanas lanjut, ekonomiser, pemanas udara, dan cerobong (Babcock & Wilcox Company, 2005). Batu bara dibakar dalam aliran udara, sedangkan partikel yang terbawa bersama gas dapat dipisahkan dalam siklon dan dikembalikan ke ruang bakar. Energi gas panas kemudian dimanfaatkan pada komponen perpindahan panas. Penelitian ini difokuskan pada evaluasi dimensi ruang bakar dengan pendekatan perhitungan stoikiometri, neraca massa, dan neraca energi; distribusi temperatur tiga dimensi maupun karakteristik sirkulasi partikel tidak disimulasikan secara langsung.

Penelitian terdahulu membahas pengaruh kualitas batu bara, udara pembakaran, dan geometri pada sistem CFB. Ramzan dkk. (2015) mengevaluasi gasifikasi CFB; Yuliyani dan Abdul (2019) merancang ruang bakar *boiler*; Mataufani dkk. (2023) mengkaji nilai kalor dan udara berlebih melalui CFD; sedangkan Nie dkk. (2022) menelaah distribusi udara sekunder. Ringkasannya disajikan pada Tabel 1. Perbedaan fokus dan skala tersebut perlu diperhatikan ketika membandingkan hasil dengan penelitian lainnya.

Tabel 1: Ringkasan Penelitian Terdahulu Terkait *Boiler Circulating Fluidized Bed* (CFB)

Penulis (Tahun)	Fokus Penelitian	Perbedaan dengan penelitian ini
(Ramzan dkk., 2015)	Simulasi gasifikasi CFB batu bara kalori rendah (*Aspen Plus*)	Fokus karakteristik gasifikasi, bukan perancangan ruang bakar *boiler*
(Yuliyani & Abdul, 2019)	Perancangan ruang bakar CFB pembangkit uap 8 MW (manual & simulasi)	Kapasitas dan basis bahan bakar desain berbeda; tidak membahas ketidaksesuaian bahan bakar aktual
(Mataufani dkk., 2023)	Pengaruh kalori batu bara dan *excess air* pada *boiler* CFB (*CFD Ansys*)	Pendekatan simulasi numerik, tidak mencakup redesain dimensi ruang bakar
(Nie dkk., 2022)	Distribusi udara sekunder *boiler* CFB 660 MW	Skala besar, fokus keseragaman aliran udara, bukan nilai kalor atau redesain
(Fadhila dkk., 2023)	Perancangan Ruang Bakar CFB sebagai upaya Perbaikan Kinerja Pembangkitan Uap di Pabrik Tekstil	Fokus aplikasi ruang bakar adalah pada pabrik tekstil dengan kapasitas 8 MW

Kajian terdahulu menunjukkan pentingnya hubungan antara karakteristik bahan bakar dan rancangan ruang bakar. Akan tetapi, data perhitungan yang secara langsung membandingkan geometri eksisting dengan rancangan berdasarkan batu bara yang digunakan pada kasus industri ini masih terbatas. Kesenjangan tersebut menjadi dasar evaluasi dimensi, kecepatan fluidisasi, dan potensi kinerja termal berdasarkan kondisi operasi yang tersedia.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi perancangan ulang ruang bakar boiler CFB pada industri gula rafinasi berdasarkan karakteristik batu bara aktual. Kontribusinya berupa perbandingan dimensi eksisting dan hasil rancangan melalui perhitungan stoikiometri, neraca massa, serta neraca energi dengan rujukan ASME PTC 4 dan literatur perancangan CFB (Basu, 2015). Hasilnya merupakan estimasi desain dan belum membuktikan peningkatan efisiensi melalui pengukuran setelah modifikasi fisik *boiler*. Informasi ini diharapkan dapat mendukung kajian rekayasa lanjutan sebelum keputusan implementasi di fasilitas industri.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk memperoleh data numerik terkait performa *boiler*, seperti efisiensi termal, laju alir bahan bakar, laju produksi uap, dan kebutuhan udara pembakaran. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang bersumber dari *distributed control system* (DCS), standar operasional prosedur (SOP) perusahaan, buku manual teknologi, serta studi

literatur, meliputi temperatur *furnace*, temperatur gas buang, laju alir udara, konsumsi bahan bakar, serta komposisi batubara (Ridho Rizky Amanda, 2025) dan material *bed*.

2.1. Kriteria dan tahapan perancangan

Kriteria desain pada Tabel 2 mencakup target efisiensi *boiler* di atas 80 %, kecepatan fluidisasi 3–5 m/s, dan temperatur gas buang 140–150 °C. Kriteria tersebut digunakan sebagai acuan rancangan berdasarkan sumber teknis yang dirujuk, bukan batas universal yang berlaku bagi setiap *boiler* CFB. Evaluasi efisiensi menggunakan metode tidak langsung yang merujuk ASME PTC 4 (ASME, 2014), sedangkan kecepatan fluidisasi mengikuti literatur desain CFB (Basu, 2015).

Tabel 2: Kriteria Perancangan Ruang Bakar *Boiler* CFB

Parameter	Nilai
Efisiensi *boiler*	> 80%
Kecepatan fluidisasi	3–5 m/s
Temperatur gas buang	140–150 °C

Tahapan penelitian secara umum meliputi: (1) penentuan kriteria perancangan; (2) perhitungan reaksi pembakaran secara stoikiometrik untuk memperoleh kebutuhan udara teoritis dan komposisi gas buang; (3) perhitungan neraca energi menggunakan metode tidak langsung (*indirect method*) sesuai ASME PTC 4 untuk memperoleh efisiensi *boiler* target; (4) perhitungan neraca massa untuk memperoleh laju alir bahan bakar, udara, dan gas buang aktual; (5) perancangan dimensi dasar ruang bakar (*furnace cross section*) dan pengecekan kecepatan fluidisasi; (6) penentuan tinggi ruang bakar (*furnace height*) dan ketebalan dinding; (7) evaluasi kesesuaian hasil rancangan terhadap kriteria desain, dengan iterasi apabila belum terpenuhi.

2.2. Metode perhitungan

Perancangan ruang bakar *boiler* CFB dilakukan berdasarkan parameter-parameter yang memengaruhi proses pembakaran dan perpindahan panas di dalam *boiler*. Metode perhitungan meliputi analisis stoikiometri pembakaran, neraca energi, neraca massa, serta penentuan dimensi ruang bakar. Tahapan perhitungan disusun secara berurutan sehingga setiap parameter hasil perhitungan menjadi dasar bagi tahapan perancangan berikutnya. Dalam perancangan ruang bakar, pertimbangan utama dalam penentuan ukuran dasar ruang bakar *boiler* CFB yaitu meliputi:

2.2.1. Perhitungan stoikiometri pembakaran

Kebutuhan oksigen teoritis pembakaran ditentukan dari reaksi stoikiometrik unsur karbon, hidrogen, dan sulfur dalam batubara dengan basis perhitungan 1 kg batubara, mengikuti reaksi umum pada Persamaan (1).

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad (1a)$$

$$H2 + ½O_2 \rightarrow H_2O \quad (1b)$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 \quad (1c)$$

Persamaan (2) menghasilkan kebutuhan udara teoritis dalam satuan kg udara/kg batubara. Nilai % C, % H, % O_2, dan % S menyatakan fraksi massa unsur pada analisis ultimat batubara (% massa), mengikuti metode perhitungan stoikiometri bahan bakar (Basu, 2015).

$$\text{Kebutuhan udara} = [11.53(\%C) + 34.34(\%H - \%O_2/8) + 4.32(\%S)]/100 \quad (2)$$

2.2.2. Perhitungan kesetimbangan energi

Perancangan menggunakan koefisien udara lebih 1,2 atau udara berlebih 20 %, serta rasio molar Ca/S sebesar 2,16. Kedua parameter digunakan sebagai asumsi desain yang merujuk kajian pembakaran CFB, bukan hasil optimasi yang telah diuji pada *boiler* ini (Gungor, 2008; Naga Kishore dkk., 2021). Kecepatan fluidisasi ditargetkan pada 3–5 m/s. Temperatur gas buang 140–150 °C dipilih sebagai sasaran evaluasi perpindahan panas, tetapi kesesuaiannya terhadap titik embun asam memerlukan data SO_3, uap air, dan komposisi gas aktual (Li dkk., 2016; Zuo dkk., 2020).

$$\eta id = 100\,\% - Ltotal \quad (3)$$

Nilai efisiensi boiler yang diperoleh dari Persamaan (3) selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam perhitungan neraca energi untuk menentukan kebutuhan energi pembakaran. Hasil perhitungan tersebut kemudian digunakan pada analisis neraca massa untuk menentukan kebutuhan bahan bakar, udara pembakaran, dan laju alir gas buang sebagai parameter perancangan dimensi ruang bakar boiler CFB.

2.2.3. Penentuan temperatur ruang bakar dan gas buang

Persamaan (4) digunakan untuk menghitung jumlah kalor yang ditransfer oleh gas buang saat suhunya berubah dari T_1 ke T_2, dengan mempertimbangkan perubahan kalor jenis Cp terhadap temperatur.

$$Q = \dot{m} \int_{T1}^{T2} Cp\,(T) dT \quad (4)$$

2.2.4. **Penentuan luas penampang ruang bakar**

Persamaan (5) digunakan untuk mendapatkan kinerja maksimum dari proses unggun terfluidisasi yang cepat, *bed* harus dioperasikan dalam batas-batas kecepatan dan sirkulasi tertentu. Selanjutnya, luas penampang *bed* ditentukan menggunakan Persamaan (6), sedangkan kecepatan fluidisasi dihitung menggunakan Persamaan (7). Dimensi ruang bakar meliputi lebar *furnace* yang dihitung menggunakan Persamaan (8) dan panjang *furnace* yang ditentukan menggunakan Persamaan (9), (Basu, 2006) seperti berikut.

- Kebutuhan panas

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_c \times HHV \quad (5)$$

- Luas penampang unggun

$$A_{bed} = \frac{Q_i}{Heat\ Release} \quad (6)$$

- Kecepatan fluidisasi

$$V_{fluidizing} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \times A_{bed}} \quad (7)$$

- Lebar ruang bakar

$$W = \left(\frac{A_{bed}}{2}\right)^{0,5} \quad (8)$$

- Panjang ruang bakar

$$B = \left(\frac{A_{bed}}{W}\right) \quad (9)$$

2.2.5. Penentuan tinggi ruang bakar

Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui dimensi-dimensi dan tinggi ruang bakar yang dibutuhkan dalam perancangan ruang bakar. Nilai *furnace height* diketahui menggunakan persamaan seperti berikut:

Temperatur dinding ruang bakar dihitung dengan Persamaan 10.

$$T_{wall} = T_{sat} + 25°C \quad (10)$$

Laju perpindahan panas *evaporator* ditentukan melalui Persamaan 11.

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_{steam} \times (h_3 - h_2) \quad (11)$$

Luas *evaporator* dihitung menggunakan Persamaan (12).

$$A_{eva} = \frac{\dot{Q}_{eva}}{(T_{RB} - T_{wall}) \cdot U_h} \quad (12)$$

Perancangan pipa *evaporator*

a. Tebal pipa pada tekanan desain dihitung menggunakan Persamaan 13.

$$t = \frac{P_s \times D}{2 \times (S \times E \times W) + P_s \times Y} \quad (13)$$

b. Tebal minimum pipa ditentukan melalui Persamaan 14.

$$tm = t + c \quad (14)$$

Rasio luas permukaan aktual terhadap dinding ruang bakar dihitung menggunakan Persamaan 15.

$$A_x = \frac{\pi . \frac{D}{2} + p - D}{p} \quad (15)$$

Kebutuhan luas dihitung melalui Persamaan (16).

$$A = \frac{A_{eva}}{A_x} \quad (16)$$

Luas bagian atap ruang bakar dihitung menggunakan Persamaan 17.

$$A_{roof} = A_{bed} \quad (17)$$

Luas dinding ruang bakar dihitung menggunakan Persamaan 18.

$$A_{wall} = A - A_{roof} \quad (18)$$

Luas bukaan dihitung melalui Persamaan (19).

$$A_{open\ area} = 0,3 \times A_{bed} \quad (19)$$

Luas dinding efektif ditentukan menggunakan Persamaan 20.

$$A_{wall(total)} = A_{wall} + A_{open\ area} \quad (20)$$

Tinggi ruang bakar dihitung melalui Persamaan (21).

$$L = \frac{A_{wall(total)}}{(W + B)} \quad (21)$$

2.2.6. Penentuan ketebalan dinding ruang bakar

Ketebalan dinding ruang bakar ini dibutuhkan untuk menjaga agar panas pembakaran di dalam ruang bakar tetap terjaga dan tidak keluar ke lingkungan, Persamaan (22) dan (23) merupakan perhitungan untuk menentukan ketebalan dinding *furnace*.

Tebal dinding luar

$$L_2 = \frac{K_2 \times (T_2 - T_3)}{h_0 \times (T_3 - T_4)} \quad (22)$$

Tebal dinding dalam

$$L_1 = \frac{K_1 \times (T_1 - T_2)}{K_2 \times (T_2 - T_3)} \times L_2 \quad (23)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil perancangan ruang bakar

Efisiensi *boiler* pada kondisi eksisting yang dilaporkan adalah 70,76 %, setara dengan total rugi panas 29,24 %. Perhitungan untuk rancangan menggunakan asumsi udara berlebih 20 % menghasilkan efisiensi target 83,31 % dan rugi panas terhitung 16,69 %. Pada kondisi rancangan, laju batu bara diperoleh sebesar 2,78 kg/s dan kebutuhan udara sebesar 19,34 kg/s. Nilai tersebut merupakan keluaran model perancangan dan belum diverifikasi dengan pengujian operasi setelah modifikasi ruang bakar. Ringkasan hasil disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3: Parameter Hasil Perancangan Ulang Ruang Bakar *Boiler* CFB

Parameter	Nilai	Satuan
Efisiensi *boiler*	83,31	%
Laju alir massa udara	19,34	kg/s
Laju alir massa batu bara	2,78	kg/s
Kecepatan fluidisasi	4,04	m/s
Tinggi ruang bakar	14,2	m
Panjang ruang bakar	5,42	m
Lebar ruang bakar	2,71	m
Luas *bed*	14,69	m^2
Bahan pipa *evaporator*	*Carbon Steel* ASTM A106 Gr. B	-
Diameter pipa *evaporator*	2	inch
Jumlah pipa *evaporator*	325	buah

Temperatur ruang bakar hasil perancangan sebesar 877,42°C menunjukkan bahwa proses pembakaran berlangsung pada rentang temperatur optimum boiler CFB. Teknologi CFB secara umum dioperasikan pada temperatur 800–900°C untuk mempertahankan efisiensi pembakaran yang tinggi sekaligus menekan pembentukan thermal NOx dan mencegah terjadinya slagging akibat pelelehan abu bahan bakar. Temperatur yang terlalu rendah (<800°C) dapat menyebabkan pembakaran karbon tidak berlangsung sempurna sehingga meningkatkan kandungan karbon tak terbakar dalam abu, sedangkan temperatur yang terlalu tinggi (>950°C) dapat meningkatkan pembentukan NOx serta memperbesar potensi aglomerasi material *bed*. Dengan demikian, temperatur hasil perancangan menunjukkan bahwa penyesuaian dimensi ruang bakar mampu menghasilkan distribusi panas yang lebih sesuai dengan karakteristik batubara aktual yang digunakan (Leckner, 2024).

Kecepatan fluidisasi sebesar 4,04 m/s juga menunjukkan bahwa kondisi operasi telah berada pada rezim *fast fluidization* yang umum digunakan pada boiler CFB komersial. Pada kondisi tersebut terjadi peningkatan intensitas pencampuran antara partikel batubara, udara pembakaran, dan *material bed* sehingga memperbesar perpindahan panas dan massa selama proses pembakaran. Distribusi temperatur yang lebih seragam menyebabkan pelepasan panas berlangsung lebih efektif dibandingkan kondisi ketika dimensi ruang bakar tidak sesuai dengan karakteristik bahan bakar. Kondisi ini berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi pembakaran dan penurunan rugi-rugi panas sistem (Zhang dkk., 2023). Temperatur gas buang sebesar 146,96°C berada di atas titik embun asam yang digunakan sebagai acuan dalam perancangan, sehingga secara desain potensi kondensasi asam dapat dikurangi. Namun, penelitian ini tidak melakukan pengukuran atau analisis korosi secara langsung; titik embun asam aktual bergantung pada konsentrasi SO_3/H_2SO_4 dan uap air dalam gas buang (Zuo dkk., 2020; Li dkk., 2016) . Efektivitas komponen penukar panas hasil perancangan tercatat sebesar 29% pada *superheater*, 24% pada *economizer*, dan 69% pada *air heater*, yang mengindikasikan distribusi beban panas telah sesuai kebutuhan proses, terutama pemanasan awal udara pembakaran sebelum masuk ruang bakar.

Perbandingan parameter terhadap sasaran desain ditampilkan pada Tabel 4. Pemenuhan kriteria ini menunjukkan konsistensi rancangan terhadap asumsi perhitungan, bukan konfirmasi kinerja lapangan.

Tabel 4: Perbandingan Parameter Rancangan dengan Kriteria Evaluasi

Kriteria Perancangan	Hasil Perancangan
Efisiensi *boiler* > 80%	83,31 %
Kecepatan fluidisasi 3–5 m/s	4,04 m/s
Temperatur gas buang 140–150 °C	146,96 °C

Hasil perancangan menunjukkan potensi peningkatan efisiensi boiler dari 70,76% menjadi 83,31%, atau sebesar 12,55 poin persentase. Perbedaan hasil tersebut mengindikasikan bahwa ketidaksesuaian antara karakteristik bahan bakar aktual dan spesifikasi desain awal perlu dipertimbangkan dalam evaluasi performa termal boiler CFB. Batubara aktual yang memiliki nilai kalor lebih tinggi dibandingkan basis desain menghasilkan laju pelepasan panas yang berbeda sehingga memerlukan penyesuaian terhadap dimensi ruang bakar untuk mempertahankan waktu tinggal (residence time) partikel bahan bakar dan karakteristik fluidisasi yang optimum. Penyesuaian dimensi ruang bakar pada penelitian ini menyebabkan total rugi-rugi energi berhasil ditekan dari 29,24% menjadi 16,69%, yang secara langsung meningkatkan efisiensi boiler.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Zhang dkk. (2023) yang menyatakan bahwa distribusi temperatur yang seragam dan pengendalian kondisi fluidisasi merupakan parameter penting dalam peningkatan efisiensi pembakaran boiler CFB modern. Selain itu, Leckner (2024) melaporkan bahwa teknologi CFB memiliki fleksibilitas bahan bakar yang tinggi, namun perubahan karakteristik bahan bakar tetap memerlukan penyesuaian parameter operasi maupun desain agar efisiensi pembakaran dapat dipertahankan pada kondisi optimum. Dengan demikian, peningkatan efisiensi pada penelitian ini menunjukkan bahwa penyesuaian dimensi ruang bakar merupakan salah satu pendekatan yang efektif dalam mengakomodasi perubahan karakteristik bahan bakar aktual.

Penurunan konsumsi batubara dari 3,31 kg/s menjadi 2,78 kg/s menunjukkan bahwa energi pembakaran yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara lebih efektif setelah dilakukan penyesuaian dimensi ruang bakar. Dengan laju produksi uap yang tetap sebesar 14,29 kg/s, penurunan konsumsi bahan bakar sebesar 0,53 kg/s menunjukkan terjadinya peningkatan efisiensi konversi energi pada boiler. Secara termodinamika, peningkatan efisiensi menyebabkan kebutuhan energi masukan untuk menghasilkan energi keluaran yang sama menjadi lebih kecil sehingga kebutuhan laju alir bahan bakar dapat dikurangi. Penurunan konsumsi bahan bakar tersebut juga mengindikasikan bahwa proses perpindahan panas pada komponen boiler berlangsung lebih efektif dibandingkan kondisi *eksisting*. Temperatur gas buang hasil perancangan sebesar 146,96°C berada pada rentang temperatur optimum boiler CFB komersial sehingga menunjukkan bahwa panas sensibel gas buang masih dapat dimanfaatkan secara optimal melalui komponen penukar panas tanpa meningkatkan risiko korosi akibat tercapainya titik embun asam sulfat. Pemanfaatan panas yang lebih efektif pada komponen *superheater, economizer*, dan *air heater*

menyebabkan kebutuhan energi pembakaran dapat ditekan sehingga konsumsi batubara menjadi lebih rendah. Ringkasan perbandingan ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5: Perbandingan Kondisi Operasi Eksisting Dan Hasil Perancangan

Parameter	*Eksisting*	Perancangan	Satuan
Efisiensi *boiler*	70,76 %	83,31 %	
Laju alir steam	14,29	14,29	kg/s
T steam	381	383,3	°C
P steam	59,8	61,25	bar
T water	87,87	96,27	°C
P water	64	71,2	bar
Laju alir bahan bakar	3,31	2,78	kg/s
HHV bahan bakar	17.785,9	17.785,9	kJ/kg
Tinggi ruang bakar	15	14,2	m
Panjang ruang bakar	7	5,42	m
Lebar ruang bakar	4	2,71	m

Perubahan dimensi ruang bakar menunjukkan hubungan yang langsung dengan karakteristik aliran dan pencampuran di dalam furnace. Luas *bed* berubah dari sekitar 28,00 m² pada kondisi *eksisting* (7 m × 4 m) menjadi 14,72 m² pada hasil perancangan, atau berkurang sekitar 47,4%. Dengan laju alir udara pembakaran hasil perancangan sebesar 19,34 kg/s, pengurangan luas penampang meningkatkan kecepatan superfisial hingga 4,04 m/s. Kecepatan ini berada dalam rentang desain 3–5 m/s dan mendukung pengangkutan serta sirkulasi partikel pada sistem CFB. Studi lain menunjukkan bahwa kecepatan operasi, tinggi *bed/furnace*, dan dimensi penampang memengaruhi pencampuran gas–padatan, waktu tinggal partikel, distribusi temperatur, dan efisiensi pembakaran (Gungor, 2008; Yue dkk., 2017).

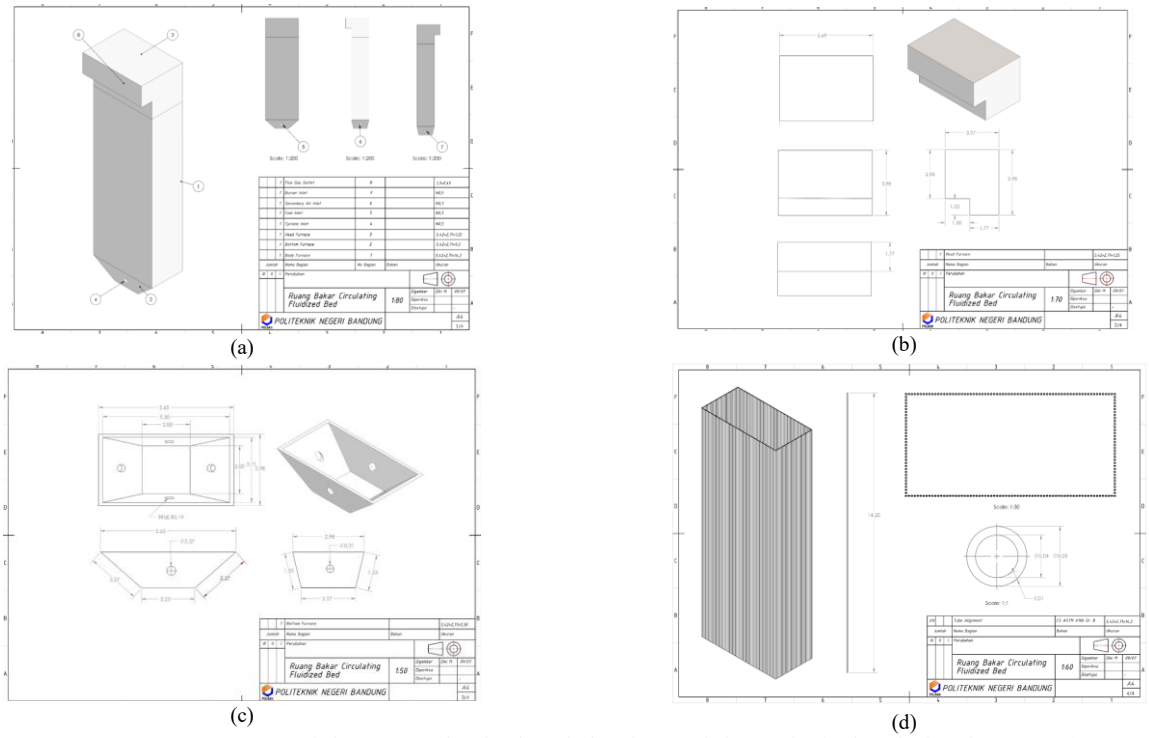
Panjang *furnace* berkurang dari 7 m menjadi 5,42 m dan lebar dari 4 m menjadi 2,71 m; perubahan tersebut memperkecil volume penampang tetapi sekaligus meningkatkan intensitas aliran per satuan luas. Sementara itu, tinggi *furnace* berubah dari 15 m menjadi 14,2 m. Pengurangan tinggi yang relatif kecil (sekitar 5,3%) masih mempertahankan tinggi *furnace* yang diperlukan untuk proses pembakaran dan sirkulasi partikel, sedangkan pengurangan panjang dan lebar lebih dominan dalam menyesuaikan beban panas dan kebutuhan fluidisasi dengan batubara aktual. Dengan demikian, peningkatan efisiensi desain dari 70,76% menjadi 83,31% dalam penelitian ini sebaiknya diinterpretasikan sebagai potensi peningkatan yang dihasilkan oleh kesesuaian kembali antara laju pelepasan panas, kecepatan fluidisasi, pencampuran udara–batubara, dan luas permukaan perpindahan panas, bukan sebagai peningkatan yang telah diverifikasi melalui pengujian eksperimen.

3.2. Visualisasi geometri hasil perancangan

Seluruh hasil perancangan dimensi ruang bakar boiler CFB yang diperoleh dari proses perhitungan kemudian divisualisasikan dalam bentuk model tiga dimensi (3D) dan gambar teknik dibuat menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*. Visualisasi ini bertujuan untuk memberikan representasi geometris dari setiap komponen ruang bakar sehingga mempermudah proses analisis, manufaktur, maupun perakitan. Hasil rancangan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.

Gambar 2(a) menampilkan rancangan keseluruhan ruang bakar boiler CFB yang terdiri atas body furnace, head furnace, bottom furnace, serta beberapa bukaan yang berfungsi sebagai jalur masuk dan keluar fluida, yaitu cyclone inlet, coal inlet, secondary air inlet, burner inlet, dan flue gas outlet, sehingga memberikan gambaran mengenai konfigurasi dan keterkaitan setiap komponen penyusun ruang bakar. Selanjutnya, Gambar 2(b) menunjukkan detail rancangan head furnace sebagai bagian atas ruang bakar yang menghubungkan ruang pembakaran dengan saluran keluaran gas hasil pembakaran menuju sistem pemisahan partikel (cyclone), dengan dimensi yang telah disesuaikan berdasarkan hasil perhitungan agar mampu mengakomodasi aliran gas buang secara optimal.

Gambar 2(c) memperlihatkan rancangan bottom furnace yang dirancang berbentuk hopper untuk memfasilitasi distribusi udara fluidisasi dari bagian bawah sekaligus mendukung sirkulasi material bed selama proses pembakaran berlangsung, serta dilengkapi dengan bukaan sebagai jalur masuk udara dan sistem pendukung lainnya. Sementara itu, Gambar 2(d) menampilkan rancangan *tube alignment*, yaitu susunan pipa-pipa pembentuk dinding ruang bakar (*water wall*) yang disusun berdasarkan dimensi hasil perancangan sehingga mampu berfungsi sebagai dinding pemanas yang efektif dalam menyerap panas hasil pembakaran sekaligus menjaga kekuatan struktur ruang bakar.



Gambar 2: Rancangan ruang bakar CFB: (a) keseluruhan, (b) kepala ruang bakar, (c) bagian bawah, dan (d) susunan pipa

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perancangan ulang ruang bakar *circulating fluidized bed* (CFB) *boiler* berdasarkan karakteristik batu bara aktual menghasilkan perubahan geometri dan potensi peningkatan kinerja termal berdasarkan perhitungan stoikiometri pembakaran serta neraca massa dan energi. Dimensi ruang bakar hasil rancangan adalah 5,42 × 2,71 × 14,2 m, dibandingkan dengan dimensi eksisting sebesar 7 × 4 × 15 m. Rancangan tersebut menghasilkan estimasi kecepatan fluidisasi sebesar 4,04 m/s, temperatur ruang bakar 877,42 °C, dan temperatur gas buang 146,96 °C, yang memenuhi kriteria perancangan yang digunakan. Berdasarkan asumsi model, efisiensi boiler diproyeksikan meningkat dari 70,76 % menjadi 83,31 %, atau sebesar 12,55 poin persentase, sedangkan kebutuhan batu bara diperkirakan menurun dari 3,31 menjadi 2,78 kg/s, setara dengan pengurangan sekitar 16,0 %. Hasil ini menunjukkan potensi perbaikan kinerja termal melalui penyesuaian rancangan ruang bakar terhadap kondisi bahan bakar yang digunakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Jurusan Teknik Konversi Energi dan Program Studi D4 Konservasi Energi Politeknik Negeri Bandung atas dukungan selama penelitian.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat dianggap memengaruhi hasil atau pembahasan dalam artikel ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

KONTRIBUSI PENULIS

Diki Miftahudin : Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Kurasi Data, Analisis Formal, Visualisasi, Penulisan - Draf Awal.
Teguh Sasono : Metodologi, Validasi, Analisis Formal, Supervisi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan.
Purwinda Iriani : Supervisi, Administrasi Proyek, Penyediaan Sumber Daya, Validasi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan.

Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan. Seluruh penulis juga bertanggung jawab atas integritas, keakuratan, dan keabsahan isi artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Babcock & Wilcox Company. (2005). Steam: Its Generation and Use (S. C. S. John B. Kitto, Ed.). Babcock & Wilcox.

Basu, P. (2006). Combustion and Gasification in Fluidized Beds (1st Edition). Taylor & Francis.

Basu, P. (2015). Circulating fluidized bed boilers: Design, operation and maintenance. In Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance. Springer International Publishing.

Fadhila, N. F., Suprianti, Y., & Muldiani, R. F. (2023). Perancangan Ruang Bakar Circulating Fluidized Bed Sebagai Upaya Perbaikan Kinerja Pembangkitan Uap Di Pabrik Tekstil. IRWNS, 14.

Gungor, A. (2008). Analysis of combustion efficiency in CFB coal combustors. Fuel, 87(7), 1083–1095.

International Energy Agency. (2008). Combined Heat and Power. IEA (2008), Combined Heat and Power, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/combined-heat-and-power, Licence: CC BY 4.0

Leckner, B. (2022). Fluid dynamic regimes in circulating fluidized bed boilers—A mini-review. Chemical Engineering Science, 247.

Leckner, B. (2024). From bubbling to circulating fluidized bed combustion—development and comparison. Heliyon, 10(13).

Li, X., Wu, Z., Zhang, L., Liu, X., Zhu, X., Hu, H., Luo, G., Hu, Z., Liu, W., & Yao, H. (2016). An updated acid dew point temperature estimation method for air-firing and oxy-fuel combustion processes. Fuel Processing Technology, 154, 204–209.

Mataufani, C. E., Sidiq, A., & Arifin, J. (2023). Analisis Pengaruh Kalori Batu bara dan Excess Air Pada Boiler CFB Dengan Metode CFD (Ansys). Jurnal Teknik Industri Terintegrasi, 6(1), 27–40.

Naga Kishore, S., Deva Kumar, M. L. S., & Venkateswara Rao, T. (2021). Selection of Ca/S ratio and bed temperature for Indian lignite based CFBC boiler using simplified sulphur capture model. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 3, 100094.

Nie, L., Lu, J., Deng, Q., Gong, L., Xue, D., Yang, Z., & Lu, X. (2022). Study on the Uniformity of Secondary Air of a 660 MW Ultra-Supercritical CFB Boiler. Energies, 15(10).

Ramzan, N., Athar, M., Begum, S., Ahmad, S. W., & Naveed, S. (2015). Simulation of circulating fluidized bed gasification for characteristic study of pakistani coal. Polish Journal of Chemical Technology, 17(1), 66–78.

The American Society of Mechanical Engineers. (2014). Fired Steam Generators - Performance Test Codes (Revision of ASME PTC 4-2008).

Yuliyani, I., & Abdul, M. M. (2019). Analisis Sistem Ruang Bakar Boiler Jenis Fluidized Bed Combustion untuk PLTU Kapasitas 8 MW.

Zhang, H., Lyu, J., & Yue, G. (2023). A review on research and development of CFB combustion technology in China. Powder Technology, 414, 118090.

Zuo, W., Zhang, X., & Li, Y. (2020). Review of flue gas acid dew-point and related low temperature corrosion. Journal of the Energy Institute, 93(4), 1666–1677.