

Pengaruh *Air Fuel Ratio* terhadap *Flame Temperature* pada *Water Tube Boiler* Penghasil *Superheated Steam*

Dini Rahayu Permata Rambe¹, Iqbal Maulana¹, Tahdid¹, Erlinawati¹

¹ Program Studi Teknik Energi, Fakultas Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya
Jl. Srijaya Negara, Palembang 30139, Indonesia

^{*}Correspondence Author: dinirambe26@gmail.com

 <https://doi.org/10.31851/87p8he81>

Received: 24 Juli 2026

Revised: 12 September 2026

Accepted: 14 September 2026

Abstrak

Boiler merupakan peralatan utama untuk menghasilkan uap dalam proses industri. Efisiensi pembakaran pada boiler sangat dipengaruhi oleh *Air Fuel Ratio* (AFR). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi AFR 16, 18, 20, 22, dan 24 terhadap efisiensi termal, Qloss, *flame temperature*, temperatur *superheated steam*, dan emisi CO pada *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* 35 pipa berbahan bakar solar. Pengujian dilakukan pada kondisi operasi konstan: laju alir *Boiler Feed Water* 1,33-1,34 kg/menit, laju alir bahan bakar solar 0,136 kg/menit, laju massa udara 2,176 - 3,264 kg/menit, water level 50% pada kaca penduga. Efisiensi termal dan Qloss dihitung dengan metode langsung melalui neraca energi. *Flame temperature* diukur menggunakan *thermogun* dan konsentrasi CO diukur menggunakan *gas analyzer*. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi termal tertinggi sebesar 72,16% dan Qloss terendah 27,84% diperoleh pada AFR 24 dengan *flame temperature* 688,5°C dan temperatur *superheated steam* 226°C. Konsentrasi CO terendah sebesar 1,92% diperoleh pada AFR 22 dan AFR 24. Kondisi optimum ditetapkan pada AFR 22 dengan efisiensi termal 72,14%, Qloss 27,86%, *flame temperature* 685,9°C, temperatur *superheated steam* 225°C, dan konsentrasi CO 1,92%. Penetapan ini didasarkan pada selisih efisiensi dan Qloss terhadap AFR 24 yang hanya 0,02% dengan nilai CO yang sama namun dengan kebutuhan udara yang lebih rendah sehingga lebih hemat energi.

Kata Kunci: *Air Fuel Ratio*, *water tube boiler*, efisiensi termal, *flame temperature*, *superheated steam*.



© 2026 Author ; Jurnal Redoks licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 Intern

PENDAHULUAN

Boiler merupakan komponen utama dalam sistem konversi energi di industri untuk menghasilkan uap sebagai media penggerak dan pemanas proses (Pratama, Danial, & Taufiqurrahman, 2021). Efisiensi termal boiler sangat dipengaruhi oleh kesempurnaan pembakaran yang salah satunya ditentukan oleh perbandingan udara dan bahan bakar atau *Air Fuel Ratio* (AFR). AFR yang tidak optimal dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna, peningkatan emisi karbon monoksida (CO), serta penurunan kualitas uap yang dihasilkan. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji pengaruh AFR terhadap kinerja boiler. Baringbing dan Sinaga (2023) meneliti hubungan variasi tekanan dan efisiensi pada boiler berbahan bakar biomassa, namun tekanan *superheated steam* yang dihasilkan belum stabil. Sahda, Sentosa, dan Adhani (2022) melaporkan efisiensi boiler berbahan bakar sampah di PLTSa hanya mencapai 38,8% - 56,5% akibat tingginya kadar air bahan bakar. Priyanto dan Wilastari (2022) juga mengidentifikasi bahwa penurunan kinerja *fire tube boiler* dipengaruhi oleh suplai feed water dan

kualitas bahan bakar yang rendah. Khusus untuk *water tube boiler* berbahan bakar solar, penelitian oleh Ningsih et al. (2021) telah menganalisis efisiensi termal berdasarkan variasi rasio udara-bahan bakar. Namun, penelitian tersebut belum mengukur parameter temperatur flame serta konsentrasi CO sebagai indikator kesempurnaan pembakaran. Selain itu, rentang AFR yang diuji dan karakteristik *superheated steam* seperti tekanan, temperatur, dan laju produksi belum dianalisis secara komprehensif.

Berdasarkan permasalahan pada penelitian terdahulu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi Air-Fuel Ratio (AFR) 16, 18, 20, 22, dan 24 pada *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* berbahan bakar solar terhadap produksi *superheated steam* dan efisiensi termal. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan konfigurasi double drum dan evaluasi 5 parameter terukur *superheated steam* secara kuantitatif. Pada penelitian ini, “kualitas *superheated steam* yang baik” didefinisikan melalui tekanan uap, temperatur jenuh pada tekanan tersebut, derajat superheat, kadar air atau kualitas uap, dan laju produksi steam. Parameter-parameter tersebut akan diukur pada setiap variasi AFR untuk menentukan kondisi operasi optimum yang menghasilkan efisiensi termal maksimum dan *superheated steam* sesuai kriteria.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Energi, Program Studi Teknik Energi, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, pada bulan Februari hingga Juli 2024.

Bahan dan Metode

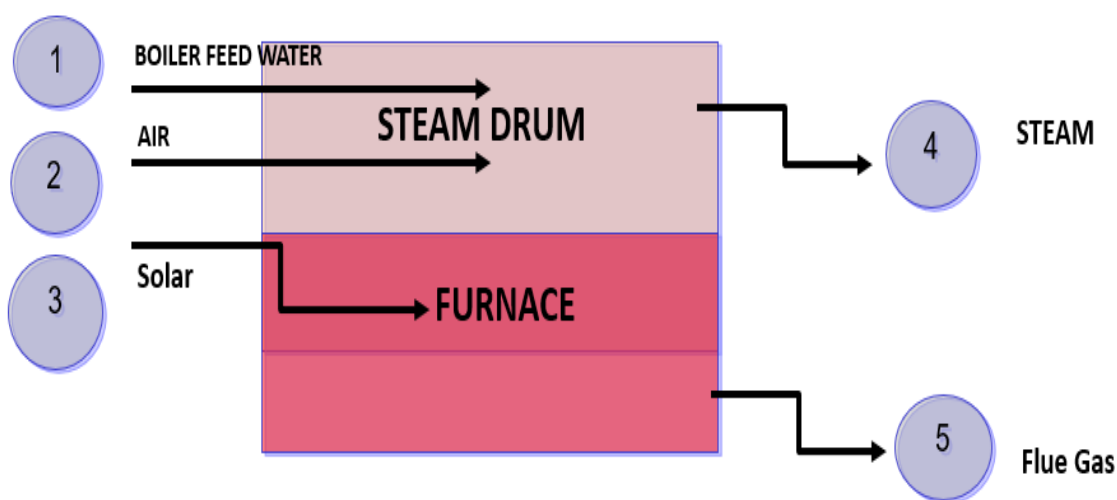
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Boiler Feed Water* (BFW) yang berasal dari PDAM, bahan bakar solar, dan udara. Peralatan yang digunakan terdiri atas *Cross Section Water Tube Boiler*, *Anemometer*, *Thermogun*, dan *Gas Analyzer*.

Bahan

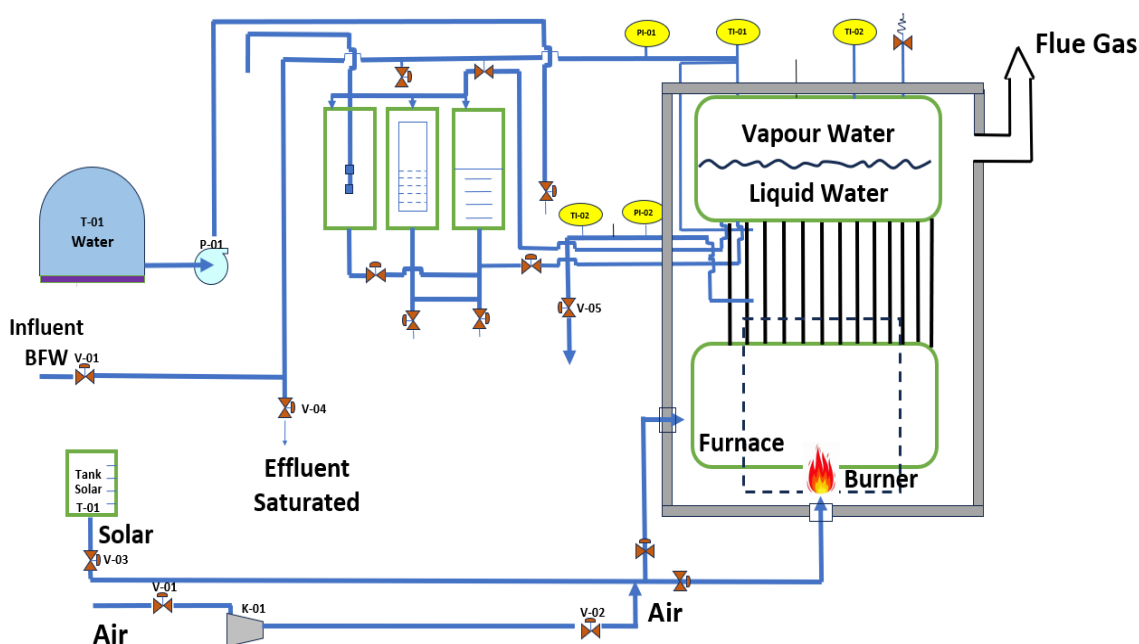
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Boiler Feed Water* (BFW) yang berasal dari PDAM dengan asumsi densitas 1 kg/L pada suhu 30°C, bahan bakar Solar dengan densitas 0,8 kg/L pada suhu 30°C, dan udara atmosfer sebagai udara pembakaran dengan asumsi densitas 1,164 kg/m³ pada suhu 30°C. Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* berbahan bakar solar dengan kapasitas 100 kg/jam dan tekanan kerja maksimum 15 bar. Konfigurasi boiler terdiri dari 2 *drum* yaitu 1 *steam drum* dan 1 *water drum*. Kedua *drum* dihubungkan oleh 35 buah pipa yang terdiri dari 25 *saturated tube* dan 10 *superheater tube*. *Burner* yang digunakan adalah *Atomizing Oil Burner* berbahan bakar solar sebanyak 2 buah. Kapasitas pembakaran setiap *burner* adalah 5-15 L/jam dengan sistem pengapian otomatis. *Burner* dipasang pada bagian bawah furnace. Spesifikasi detail burner mengikuti data pabrikan. Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari *flowmeter rotameter*, *anemometer digital*, *pressure gauge*, *thermogun*, dan *gas analyzer*. *Flowmeter rotameter* dengan rentang 0-5 L/min dan ketelitian $\pm 0,01$ L/min digunakan untuk mengukur debit bahan bakar solar dan dipasang setelah tangki solar sebelum masuk ke *burner*. *Flowmeter rotameter* lain dengan rentang 0-10 L/min dan ketelitian $\pm 0,1$ L/min digunakan untuk mengukur debit *Boiler Feed Water* dan dipasang pada pipa masuk *water drum*. *Anemometer digital* dengan rentang 0-50 m/s dan ketelitian $\pm 0,1$ m/s digunakan untuk mengukur kecepatan udara pada mulut *burner*. *Pressure gauge* dengan rentang 0-20 bar dan ketelitian $\pm 0,5$ bar digunakan untuk mengukur tekanan *superheated steam* pada pipa keluar *superheater*. *Thermogun/infrared thermometer* digunakan untuk mengukur *flame temperature* melalui lubang intip *burner*. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan *Thermocouple*. *Thermocouple* pertama dipasang pada outlet *steam drum* sebagai TI-1. *Thermocouple* kedua dipasang pada outlet *superheater* sebagai TI-2. *Gas analyzer* digunakan untuk mengukur konsentrasi CO pada gas buang. Semua alat ukur telah dikalibrasi sebelum pengujian.

Variabel penelitian merupakan parameter yang dapat diubah, diukur, atau dikendalikan dalam suatu penelitian untuk menguji hipotesis maupun menjawab tujuan penelitian. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas variabel tetap, variabel bebas, dan variabel terikat. Variabel tetap pada penelitian ini meliputi laju alir bahan bakar solar sebesar 0,136 kg/menit dan ketinggian air pada glass level sebesar 50%.

Variabel bebas yang digunakan adalah *Air Fuel Ratio* (AFR) bahan bakar solar yaitu 16, 18, 20, 22, dan 24. AFR diatur dengan mengubah laju aliran udara masuk *burner*. Kecepatan udara diukur menggunakan *anemometer digital* pada mulut *burner* berdiameter 40 mm. Luas penampang burner dihitung dengan persamaan $A=\pi r^2$ sehingga diperoleh $A=0,0013\text{m}^2$. Debit volumetrik udara dihitung dengan $Q=v\times A$. Debit massa udara dihitung dengan $m(\text{udara}) = \rho(\text{udara})\times Q$, dengan ρ udara pada $30^\circ\text{C} = 1,164 \text{ kg/m}^3$. Variabel terikat dalam penelitian ini meliputi tekanan, temperatur, entalpi, *flame temperature*, dan warna nyala. Tekanan *superheated steam* diperoleh langsung dari pembacaan *pressure gauge* pada pipa keluar superheater. Temperatur *steam drum* TI-1 dan *superheated steam* TI-2 diperoleh langsung dari pembacaan thermocouple tipe K. Flame temperature diperoleh dari pembacaan thermogun melalui lubang intip burner. Nilai entalpi *superheated steam* tidak diukur secara langsung, melainkan ditentukan dengan interpolasi data steam table berdasarkan tekanan dan temperatur hasil pengukuran. Warna nyala diamati secara visual selama proses pembakaran dan didokumentasikan menggunakan kamera. Diagram alir penelitian dan instalasi perpipaan ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Instalasi Perpipaan

Metode

Pada penelitian ini dilakukan analisis pengaruh *Air-Fuel Ratio* (AFR) terhadap efisiensi termal dan *flame temperature* pada *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* dalam produksi superheated steam secara kontinyu. Jenis boiler yang digunakan adalah *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* dengan kapasitas 100 kg/jam, tekanan kerja maksimum 15 bar, dan konfigurasi 2 *drum* yaitu *steam drum* dan *water drum* dengan 35 pipa pemanas. Sebelum penelitian dilakukan, terlebih dahulu dilakukan uji kebocoran pada peralatan menggunakan air dan udara. Setelah dipastikan tidak terdapat kebocoran, peralatan dinyatakan siap digunakan dan selanjutnya dilakukan running test untuk memastikan seluruh sistem beroperasi dengan baik. Setelah *running test* selesai, penelitian dilaksanakan dan dilakukan pengambilan data yang diperlukan untuk proses perhitungan.

Tahap awal penelitian diawali dengan persiapan bahan baku. Air sebagai *Boiler Feed Water* (BFW) dialirkan ke dalam boiler dengan laju alir rata-rata sebesar 1,34 L/menit atau setara 1,34 kg/menit dengan asumsi densitas air 1 kg/L pada suhu operasi melalui pembukaan katup V-01. Udara disuplai menggunakan kompresor (K-01), sedangkan bahan bakar yang digunakan adalah solar dengan laju alir rata-rata sebesar 0,17 L/menit atau setara dengan 0,136 kg/menit dengan asumsi densitas solar 0,800 kg/L pada suhu 30°C melalui *burner*. Laju alir bahan bakar dibuat tetap selama pengujian. Variasi laju udara pada setiap AFR yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Laju Udara pada Setiap AFR

AFR	Laju BB (kg/menit)	Laju Udara (kg/menit)
16	0.136	2.176
18	0.136	2.448
20	0.136	2.720
22	0.136	2.992
24	0.136	3.264

Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Air Fuel Ratio* (AFR) dengan variasi 16, 18, 20, 22, dan 24. AFR didefinisikan sebagai perbandingan massa udara terhadap massa bahan bakar dengan satuan kg udara/kg bahan bakar:

$$AFR = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahan\ bakar}} \dots\dots\dots(1)$$

Nilai AFR divariasikan dengan mengatur laju aliran udara masuk *burner*, sedangkan laju alir bahan bakar solar dipertahankan konstan. Debit udara diukur menggunakan anemometer digital pada mulut burner diameter 40 mm, kemudian dikonversi menjadi debit massa. Variasi laju udara pada setiap AFR yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1. Ketinggian air di dalam boiler dipertahankan sebesar 50% sebagai variabel tetap. Kondisi *steady state* dinyatakan tercapai ketika pembacaan *flame temperature*, tekanan dan temperatur *superheated steam* konstan dengan fluktuasi tidak lebih dari $\pm 2\%$ selama 10 menit berturut-turut. Setelah kondisi *steady state* tercapai, pengambilan data dilakukan selama 15 menit untuk setiap variasi AFR. Selama proses pembakaran berlangsung, terjadi perpindahan panas melalui mekanisme radiasi, konveksi, dan konduksi. Selanjutnya dilakukan pengambilan data yang meliputi *flame temperature* yang diukur menggunakan thermogun, tekanan *superheated steam* yang diukur menggunakan pressure gauge, temperatur *superheated steam*, temperatur BFW, debit BFW, debit bahan bakar, debit udara, dan konsentrasi CO gas buang.

Data yang diperoleh kemudian ditabulasikan dan digunakan untuk menghitung neraca massa, neraca panas, efisiensi termal, dan kehilangan panas boiler. Perhitungan didasarkan pada data dasar: laju produksi steam 1,34 kg/menit, tekanan *superheated steam* 10 bar, temperatur *superheated steam* 250°C, temperatur BFW 30°C, nilai kalor bawah solar 43000 kJ/kg, serta entalpi yang ditentukan melalui interpolasi data *steam table*. Komposisi dan properti bahan bakar solar pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi dan Properti Bahan Bakar Solar

No	Komponen	% mol	BM	mol	massa (kg)	BM
				(kmol)		Campuran
1	C ₉ H ₂₀	5.00	128	5.00	640	6.40
2	C ₁₁ H ₂₄	5.00	156	5.00	780	7.80
3	C ₁₂ H ₂₆	10.00	170	10.00	1700	17.00
4	C ₁₃ H ₂₈	10.00	184	10.00	1840	18.40
5	C ₁₄ H ₃₀	10.00	198	10.00	1980	19.80
6	C ₁₅ H ₃₂	10.00	212	10.00	2120	21.20
7	C ₁₆ H ₃₄	10.00	226	10.00	2260	22.60
8	C ₁₇ H ₃₆	10.00	240	10.00	2400	24.00
9	C ₁₈ H ₃₈	10.00	254	10.00	2540	25.40
10	C ₂₀ H ₄₂	20.00	282	20.00	5640	56.40
Total		100.00		100.00	21900	219.00

Catatan:

Sumber: Pertamina Refinery Unit III, 2024

Nilai Kalor Bawah, LHV = 43000 kJ/kg

Densitas Solar pada 30°C = 0.800 kg/L

Entalpi Solar pada 30°C, h(bb) = 2.19 kJ/kmol

Efisiensi termal dihitung dengan metode langsung. Rumus perhitungan pada penelitian ini dapat menggunakan persamaan berikut:

Neraca Massa:

$$\dot{m}_{steam} = \dot{m}_{BFW} \dots\dots\dots(2)$$

Neraca Panas Input:

$$Q_{in} = \dot{m}_{BB} \times LHV_{BB} \dots\dots\dots(3)$$

Neraca Panas Output yang Berguna:

$$Q_{out} = \dot{m}_{steam} \times (h_{steam} - h_{BFW}) \dots\dots\dots(4)$$

Efisiensi Termal:

$$\eta_{thermal} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(5)$$

Kehilangan Panas:

$$Q_{loss} = Q_{in} - Q_{out} \dots\dots\dots(6)$$

$$Q_{Loss}(\%) = \frac{Panas\ Input\ (kJ) - Panas\ Steam\ (Q_s)}{Panas\ Input\ (kJ)} \times 100\% \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan: $\dot{m}$ = laju alir massa (kg/menit), LHV = nilai kalor bawah (kJ/kg),
 h = entalpi spesifik (kJ/kg).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini telah dilakukan serangkaian percobaan menggunakan *Cross Section Water Tube Boiler*. Berdasarkan lima kali percobaan yang telah dilakukan, dilakukan analisis untuk mengetahui hubungan antara *Air Fuel Ratio* (AFR) dengan efisiensi termal, hubungan AFR dengan flame temperature, hubungan AFR dengan konsentrasi gas CO pada gas buang (*flue gas*), serta hubungan AFR dengan persentase kehilangan panas (% Qloss). Data hasil penelitian yang digunakan dalam analisis disajikan pada Tabel 3, data hasil operasi *steam drum* pada Tabel 4, data hasil *steam superheated* disajikan pada Tabel 5 dan perbandingan efisiensi termal dengan penelitian sebelumnya pada Tabel 6.

Tabel 3. Data Hasil Penelitian

AFR	Efficiency (%)	Flame temperature (°C)	CO Flue gas (%)	Qloss (%)
16	70.71	640.2	2.25	29.29
18	70.68	653.4	2.1	29.32
20	71.89	667.2	1.98	28.11
22	72.14	685.9	1.92	27.86
24	72.16	688.5	1.92	27.84

Sumber: Laboratorium Teknik Energi Palembang (2024)

Berdasarkan data pada Tabel 3, dapat dilihat bahwa variasi *Air Fuel Ratio* (AFR) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja boiler. Pada AFR 16, efisiensi termal yang diperoleh sebesar 70,71% dengan temperatur nyala 640,2°C, konsentrasi CO 2,25%, dan Qloss 29,29%. Seiring dengan peningkatan AFR menjadi 24, terjadi peningkatan efisiensi termal menjadi 72,16% dan temperatur nyala api meningkat menjadi 688,5°C. Sementara itu, konsentrasi CO dan persentase kehilangan panas mengalami penurunan masing-masing menjadi 1,92% dan 27,84%.

Peningkatan efisiensi termal seiring dengan meningkatnya AFR disebabkan oleh proses pembakaran yang menjadi lebih sempurna. Pada AFR yang lebih tinggi, jumlah udara pembakaran yang masuk lebih optimal sehingga bahan bakar solar dapat terbakar lebih sempurna. Hal ini ditunjukkan dengan menurunnya konsentrasi CO pada gas buang dari 2,25% menjadi 1,92%. Penurunan konsentrasi CO mengindikasikan berkurangnya pembakaran tidak sempurna sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan lebih maksimal untuk memanaskan air di dalam pipa-pipa boiler. Selain itu, peningkatan temperatur nyala api juga berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi karena laju perpindahan panas dari gas pembakaran ke air di dalam *water tube* menjadi lebih besar.

Tabel 4. Hasil Operasi *Steam Drum*

No	Level Ketinggian Air (% LD)	BFW (L/min)	BFW (kg/min)	TI-1 (°C)	PI-1 (Bar)
1	50	1.34	1.34	172.50	8.40
2		1.33	1.33	175.00	8.90
3		1.34	1.34	182.50	10.50
4		1.33	1.33	190.00	12.60
5		1.33	1.33	191.00	12.80

Sumber: Laboratorium Teknik Energi Palembang (2024)

Data hasil operasi steam drum yang disajikan pada Tabel 4 menunjukkan bahwa peningkatan AFR juga diikuti oleh peningkatan tekanan dan temperatur operasi. Tekanan pada *steam drum* meningkat dari 8,40 bar pada AFR 16 menjadi 12,80 bar pada AFR 24. Begitu pula dengan temperatur steam drum yang meningkat dari 172,50°C menjadi 191,00°C. Kenaikan tekanan dan temperatur ini menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan dari proses pembakaran berhasil dikonversi menjadi energi pada fluida kerja. Level ketinggian air dijaga konstan pada 50% pada kaca penduga dan laju aliran BFW relatif stabil pada rentang 1,33 - 1,34 kg/min, sehingga perubahan tekanan dan temperatur murni dipengaruhi oleh variasi AFR.

Tabel 5. Hasil *Steam Superheated*

No	TI-2 (°C)	PI-2 (Bar)	Flow Steam (kg/min)	Hg (kJ/kg)	Eff (%)	Q _{Loss} (%)
1	207.50	8.40	1.34	3043.65	70.71	29.29
2	210.00	8.90	1.33	3065.96	70.68	29.32
3	217.50	10.50	1.34	3096.28	71.89	28.11
4	225.00	12.60	1.33	3130.81	72.14	27.86
5	226.00	12.80	1.33	3132.25	72.16	27.84

Sumber: Laboratorium Teknik Energi Palembang (2024)

Hasil perhitungan pada steam superheated yang disajikan pada Tabel 5 memperkuat analisis sebelumnya. Temperatur steam superheated meningkat dari 207,50°C pada AFR 16 menjadi 226,00°C pada AFR 24. Sejalan dengan itu, entalpi steam superheated (Hg) juga meningkat dari 3043,65 kJ/kg menjadi 3132,25 kJ/kg. Peningkatan entalpi ini mengindikasikan bahwa kualitas steam yang dihasilkan semakin baik seiring dengan meningkatnya AFR. Nilai efisiensi dan Qloss pada Tabel 5 identik dengan Tabel 3 karena keduanya dihitung berdasarkan prinsip neraca energi yang sama. Hal ini menunjukkan konsistensi data hasil penelitian.

Tabel 6. Perbandingan Efisiensi Termal dengan Penelitian Sebelumnya

Penulis, Tahun	Jenis Boiler	Bahan Bakar	Variabel	Hasil Efisiensi (%)
Ningsih et al., 2021	Cross Section Water Tube Boiler	Solar	AFR 15 - 25	68 - 70.12
Putri et al., 2022	Water Tube Boiler Double Drum	Gas dan Solar	Level Air	69.5 - 71.35
Pratama et al., 2021	Water Tube Boiler	Solar	Metode Langsung	65 - 68.90
Penelitian ini., 2024	Cross Section WT Boiler, 35 pipa	Solar	AFR 16 - 24	70.68 - 72.16

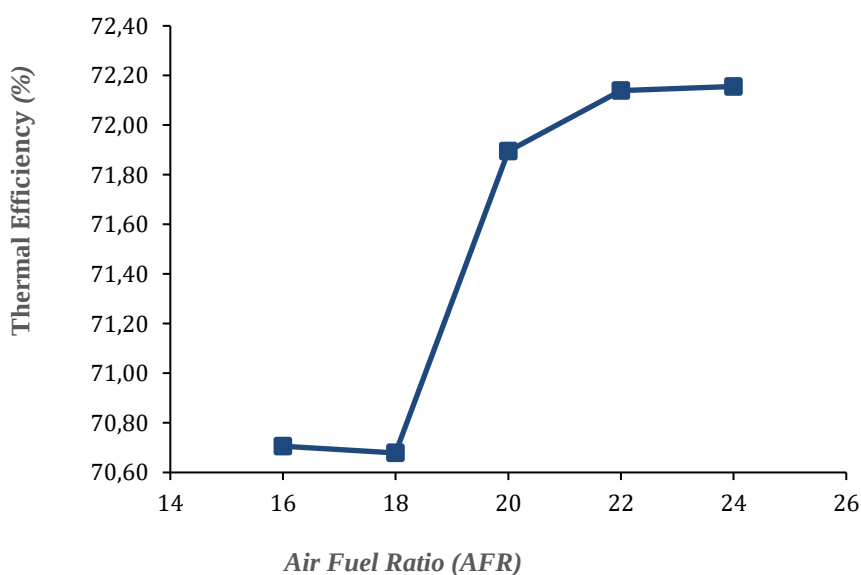
Sumber: Data diolah (2024)

Perbandingan hasil penelitian ini dengan studi sebelumnya disajikan pada Tabel 6. Hasil penelitian ini menunjukkan efisiensi termal berada pada rentang 70,68% - 72,16% pada variasi AFR 16-24. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan penelitian Ningsih et al. (2021) pada *Cross Section Water Tube Boiler* berbahan bakar solar dengan rentang AFR 15-25 yang melaporkan efisiensi 68% - 70,12%. Peningkatan ini diduga disebabkan oleh jumlah pipa sebanyak 35 buah dan kondisi operasi tekanan yang lebih tinggi pada penelitian ini yaitu 8,40 - 12,80 bar.

Dibandingkan dengan Putri et al. (2022) pada *water tube boiler double drum* berbahan bakar solar yang memperoleh efisiensi 69,5% - 71,35%, hasil penelitian ini juga menunjukkan kinerja yang lebih baik. Hal ini mengindikasikan bahwa selain konfigurasi drum, optimasi AFR memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan efisiensi termal. Sementara itu, jika dibandingkan dengan Pratama et al. (2021) pada *water tube boiler* berbahan bakar solar yang memperoleh efisiensi 65% - 68,90%, efisiensi pada penelitian ini juga lebih tinggi. Secara keseluruhan, efisiensi yang diperoleh pada penelitian ini berada dalam rentang yang wajar dan sejalan dengan studi sebelumnya pada water tube boiler berbahan bakar solar. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa peningkatan AFR pada *cross section water tube boiler* dapat meningkatkan efisiensi termal dan kualitas steam, serta menurunkan kehilangan panas dan emisi CO.

Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) terhadap Efisiensi Termal Boiler (%)

Berdasarkan Gambar 3 dan Tabel 3, dapat diketahui bahwa nilai efisiensi termal pada *Cross Section Water Tube Boiler* menunjukkan kecenderungan meningkat secara umum seiring dengan peningkatan *Air Fuel Ratio* (AFR) pada rentang 16 hingga 24. Efisiensi termal pada AFR 16 sebesar 70,71%, mengalami penurunan kecil menjadi 70,68% pada AFR 18. Selanjutnya efisiensi meningkat menjadi 71,89% pada AFR 20, 72,14% pada AFR 22, dan mencapai 72,16% pada AFR 24.



Gambar 3. Pengaruh *Air Fuel Ratio* (AFR) terhadap Efisiensi Termal (%)

Kecenderungan peningkatan efisiensi ini menunjukkan bahwa pada rentang AFR yang diuji, peningkatan jumlah udara pembakaran dapat memperbaiki proses pembakaran sehingga energi dari bahan bakar solar dapat dimanfaatkan lebih optimal. Penurunan efisiensi sebesar 0,03% dari AFR 16 ke AFR 18 dan selisih yang sangat kecil sebesar 0,02% antara AFR 22 dan AFR 24 mengindikasikan bahwa perubahan efisiensi pada rentang tersebut relatif kecil. Tanpa adanya data pengulangan dan analisis ketidakpastian, belum dapat disimpulkan secara pasti bahwa AFR 24 memberikan kinerja yang berbeda signifikan dibandingkan AFR 22. Efisiensi termal tertinggi pada penelitian ini diperoleh pada AFR 24 yaitu sebesar 72,16%, sedangkan pada AFR 22 diperoleh efisiensi sebesar 72,14%. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dapat dikatakan bahwa AFR 22 hingga AFR 24 merupakan rentang yang memberikan efisiensi termal paling tinggi. Bahan bakar boiler membutuhkan nilai kalor yang tinggi untuk mengubah air menjadi uap. Menurut Dewanatan et al. (2020), efisiensi energi secara keseluruhan dapat dipengaruhi oleh nilai konsumsi bahan bakar boiler.

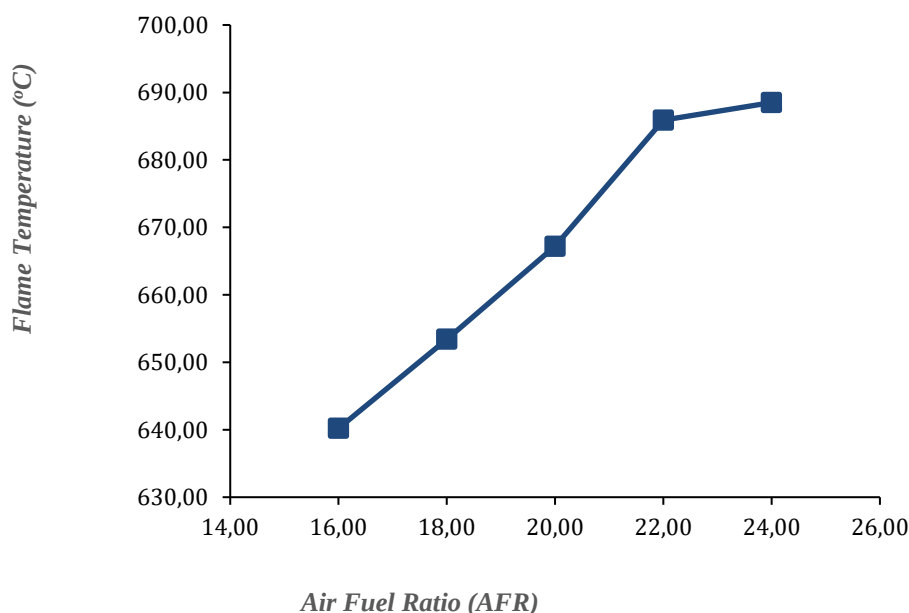
Pengaturan udara berlebih (*excess air*) merupakan salah satu cara penting untuk mengoptimalkan efisiensi termal boiler. Pengaturan ini dilakukan untuk memastikan bahwa bahan bakar dapat terbakar secara sempurna. Menurut Dewanatan et al. (2020), rasio antara total udara dan bahan bakar yang digunakan dapat memengaruhi proses pembakaran di dalam tungku (*furnace*). Jumlah aliran udara dan suplai bahan bakar perlu dikontrol untuk mencapai efisiensi yang diinginkan. Suplai bahan bakar yang terlalu banyak atau terlalu sedikit untuk jumlah udara pembakaran tertentu dapat berdampak pada penurunan efisiensi boiler dan meningkatkan persentase kehilangan panas (% *heat loss*).

Dalam aplikasi boiler atau sistem pemanas, pemilihan AFR yang tepat sangat penting untuk menghasilkan efisiensi perpindahan panas yang optimal. Hal ini dilakukan dengan menyesuaikan proses pembakaran agar sesuai dengan kebutuhan proses yang diinginkan, termasuk mempertimbangkan faktor efisiensi termal dan pengurangan emisi pada gas buang (*flue gas*). Menurut Ningsih dkk. (2021), rasio total udara dan bahan bakar yang digunakan dapat memengaruhi proses pembakaran di dalam tungku. Pada kondisi AFR teoritis, pembakaran sempurna sulit terjadi, sedangkan pada AFR yang terlalu besar, sebagian besar panas akan hilang terbawa oleh gas buang sehingga menyebabkan pemborosan bahan bakar (Juriwon, 2017).

Dengan mempertimbangkan faktor-faktor di atas, pengoperasian boiler dapat meningkatkan efisiensi perpindahan panas, yang berdampak positif terhadap kinerja boiler secara keseluruhan serta penggunaan energi yang lebih efisien. Menurut Nasution (2020), faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi boiler meliputi temperatur uap, jumlah produksi uap, jumlah konsumsi bahan bakar, kadar air (*moisture*), dan nilai kalor hasil pembakaran bahan bakar. Oleh karena itu, menurut Sahdah et al. (2021), analisis efisiensi boiler berbasis data sangat penting untuk meningkatkan kinerja boiler.

Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) terhadap Temperatur Nyala Api (°C)

Berdasarkan Gambar 4 dan Tabel 3, dapat diketahui bahwa nilai temperatur nyala api pada *Cross Section Water Tube Boiler* menunjukkan kecenderungan meningkat secara umum seiring dengan peningkatan Air Fuel Ratio (AFR) pada rentang 16 hingga 24. Temperatur nyala api pada AFR 16 sebesar 640,2°C, meningkat menjadi 653,4°C pada AFR 18, 667,2°C pada AFR 20, 685,9°C pada AFR 22, dan mencapai temperatur tertinggi 688,5°C pada AFR 24. Peningkatan terbesar terjadi pada transisi AFR 20 ke AFR 22 yaitu sebesar 18,7°C.



Gambar 4. Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) terhadap Temperatur Nyala Api (°C)

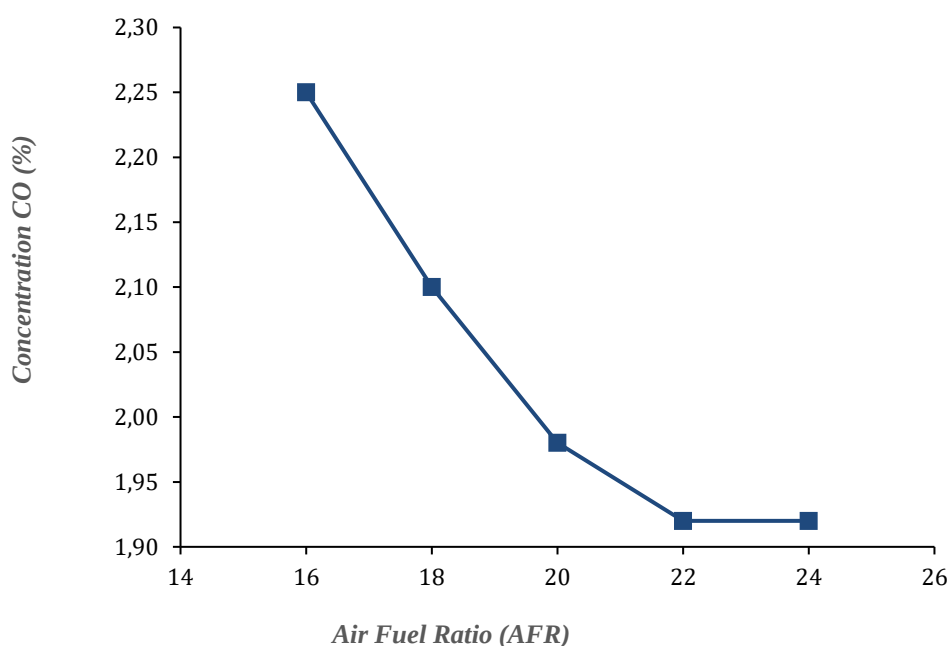
Kecenderungan peningkatan temperatur nyala api ini terjadi karena penambahan udara pembakaran pada rentang AFR yang diuji dapat memperbaiki pencampuran bahan bakar dan udara sehingga proses pembakaran menjadi lebih sempurna. Hal ini sejalan dengan peningkatan efisiensi termal yang telah dibahas sebelumnya. Namun demikian, tanpa adanya data pengulangan dan analisis ketidakpastian, belum dapat disimpulkan bahwa AFR 24 merupakan kondisi yang berbeda signifikan dari AFR 22 mengingat selisih temperaturnya hanya 2,6°C. Oleh karena itu, dalam penelitian ini AFR 22 hingga AFR 24 dapat dikatakan sebagai rentang yang menghasilkan temperatur nyala api paling tinggi. Temperatur nyala api merupakan salah satu variabel penting dalam menentukan perpindahan panas dari nyala api atau gas buang (*flue gas*) menuju pipa-pipa boiler. Menurut Santoso (2017), efisiensi pembakaran sering dikaitkan dengan temperatur di dalam ruang bakar boiler (*furnace*). Temperatur yang lebih tinggi dapat meningkatkan laju perpindahan panas secara radiasi dan konveksi ke fluida kerja.

Selain temperatur, karakteristik nyala api juga dapat diindikasikan melalui warna api. Warna nyala api tidak hanya dipengaruhi oleh temperatur dan panjang gelombang radiasi, tetapi juga oleh faktor lain seperti pembentukan jelaga (*soot*), kesempurnaan pencampuran bahan bakar–udara, dan karakteristik burner. Pada AFR rendah, pembakaran cenderung tidak sempurna sehingga dapat terbentuk jelaga yang menyebabkan nyala api berwarna kuning hingga merah. Sebaliknya, pada AFR yang lebih tinggi dengan pencampuran yang lebih baik, pembakaran cenderung lebih sempurna dan nyala api dapat tampak lebih terang dengan dominasi warna biru. Oleh karena itu, observasi warna api hanya dapat digunakan sebagai indikasi kualitatif dan tidak dapat dijadikan satu-satunya dasar untuk menentukan temperatur atau efisiensi pembakaran.

Pengukuran temperatur nyala api pada penelitian ini dilakukan menggunakan thermogun inframerah. Perlu disampaikan bahwa pengukuran dengan thermogun memiliki keterbatasan karena hanya mengukur temperatur permukaan luar nyala api dan dapat dipengaruhi oleh emisivitas material, jarak pengukuran, serta gangguan dari gas di sekitarnya. Dengan demikian, nilai temperatur yang diperoleh merupakan pendekatan dan lebih tepat digunakan untuk melihat tren perubahan temperatur antar variasi AFR, bukan sebagai nilai absolut temperatur nyala api di dalam furnace.

Pengaruh *Air Fuel Ratio* (AFR) terhadap Konsentrasi CO pada Gas Buang (%)

Berdasarkan Gambar 5 dan Tabel 3, dapat diketahui bahwa konsentrasi CO pada gas buang (*flue gas*) menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan peningkatan *Air Fuel Ratio* (AFR) pada rentang 16 hingga 24. Konsentrasi CO pada AFR 16 sebesar 2,25%, menurun menjadi 2,10% pada AFR 18, 1,98% pada AFR 20, dan mencapai nilai terendah 1,92% pada AFR 22 dan AFR 24.



Gambar 5. Pengaruh *Air Fuel Ratio* (AFR) terhadap Konsentrasi CO pada Gas Buang (%)

Perlu diklarifikasi bahwa satuan konsentrasi CO yang digunakan dalam penelitian ini adalah persen volume (% vol). Nilai 1,92–2,25% termasuk relatif tinggi untuk gas buang boiler berbahan bakar solar. Pengukuran dilakukan menggunakan *gas analyzer* dengan *probe* dimasukkan pada saluran gas buang. Alat memiliki rentang pengukuran sesuai spesifikasi pabrikan untuk parameter CO dengan pembacaan berbasis gas kering. Hasil pengukuran kemudian dikonversi ke dalam satuan % vol untuk

keperluan analisis. Mengingat nilai yang diperoleh cukup tinggi, disarankan untuk penelitian selanjutnya dilakukan kalibrasi ulang alat sebelum pengambilan data. Kecenderungan penurunan konsentrasi CO seiring meningkatnya AFR menunjukkan adanya perbaikan kualitas pembakaran. Namun, pernyataan bahwa pembakaran telah berlangsung sempurna pada AFR 22 dan 24 tidak tepat, karena konsentrasi CO masih terdeteksi dalam jumlah yang signifikan yaitu 1,92%. Keberadaan CO merupakan indikator utama terjadinya pembakaran tidak sempurna (incomplete combustion).

Pembentukan CO dalam gas buang dipengaruhi oleh beberapa faktor, tidak hanya oleh jumlah panas yang masuk. Faktor pertama adalah ketersediaan oksigen. Pada kondisi AFR rendah, jumlah oksigen terbatas sehingga reaksi oksidasi karbon menjadi CO₂ tidak berlangsung sempurna dan menghasilkan CO yang lebih banyak. Faktor kedua adalah pencampuran bahan bakar dan udara. Pencampuran yang tidak homogen dapat menyebabkan terbentuknya zona kaya bahan bakar di dalam ruang bakar sehingga proses pembakaran menjadi tidak sempurna. Faktor ketiga adalah atomisasi bahan bakar. Kualitas atomisasi solar oleh burner memengaruhi luas permukaan kontak antara bahan bakar dan oksigen. Atomisasi yang buruk menyebabkan terbentuknya droplet dengan ukuran besar yang sulit terbakar sempurna. Faktor keempat adalah temperatur ruang bakar. Temperatur yang terlalu rendah menyebabkan laju reaksi oksidasi CO menjadi CO₂ melambat sehingga CO tidak dapat teroksidasi secara sempurna. Faktor kelima adalah waktu tinggal (*residence time*). Waktu tinggal gas pembakaran yang terlalu singkat di dalam furnace menyebabkan reaksi pembakaran belum selesai sempurna sebelum gas keluar dari ruang bakar. Dengan demikian, dalam penelitian ini AFR 22 dan AFR 24 menghasilkan konsentrasi CO terendah yaitu 1,92%. Akan tetapi, karena tidak adanya data pengulangan dan analisis ketidakpastian, serta nilai CO yang masih relatif tinggi, belum dapat disimpulkan bahwa kedua kondisi tersebut memiliki kinerja emisi yang berbeda signifikan.

Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) terhadap Persentase Kehilangan Panas, Qloss (%)

Persentase kehilangan panas (Qloss) pada penelitian ini ditentukan menggunakan metode langsung berdasarkan prinsip neraca energi. Total energi masuk ke dalam boiler terdiri atas panas pembakaran bahan bakar (QLHV) dan panas sensibel dari bahan bakar, udara pembakaran, serta atomisasi (Q1, Q2, Q3). Energi berguna adalah panas yang diserap oleh fluida kerja untuk menghasilkan steam (Qs). Dengan demikian, persentase kehilangan panas dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_{Loss}(\%) = \frac{Panas\ Input\ (kJ) - Panas\ Steam\ (Qs)}{Panas\ Input\ (kJ)} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(8)$$

dengan Panas Input = Q1 + Q2 + Q3 + QLHV.

Keterangan:

Q1 = Panas sensibel bahan bakar solar, kJ

Q2 = Panas sensibel udara pembakaran, kJ

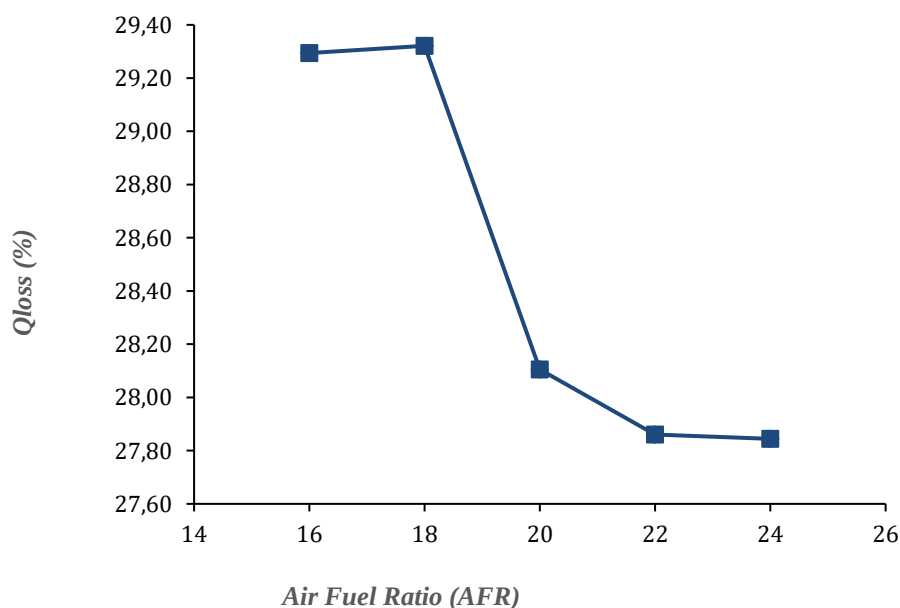
Q3 = Panas sensibel atomisasi, kJ

QLHV = Panas pembakaran bahan bakar = massa bahan bakar x LHV, kJ

Qs = Panas yang diserap untuk menghasilkan steam, kJ

LHV = Nilai kalor bawah bahan bakar solar, kJ/kg

Gambar 6 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa persentase kehilangan panas (Qloss) secara umum cenderung menurun dengan meningkatnya Air Fuel Ratio (AFR) pada rentang 16 hingga 24. Nilai Qloss pada AFR 16 sebesar 29,29%, sedikit meningkat menjadi 29,32% pada AFR 18, kemudian menurun menjadi 28,11% pada AFR 20, 27,86% pada AFR 22, dan mencapai nilai minimum sebesar 27,84% pada AFR 24. Nilai rata-rata kehilangan panas selama pengujian adalah 28,49%.



Gambar 6. Pengaruh *Air Fuel Ratio* (AFR) terhadap *Qloss* (%)

Secara umum, penurunan *Qloss* sejalan dengan peningkatan efisiensi termal boiler pada rentang AFR yang diuji. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan AFR dari 18 hingga 24 berkaitan dengan berkurangnya persentase energi yang tidak termanfaatkan dalam sistem. Perubahan tersebut dapat dipengaruhi oleh kondisi pembakaran dan perpindahan panas di dalam boiler. Namun, hubungan tersebut tidak sepenuhnya monoton karena terjadi sedikit peningkatan *Qloss* dari AFR 16 ke AFR 18.

Perlu dicatat bahwa secara teoritis, AFR yang terlalu tinggi dapat meningkatkan kehilangan panas melalui gas buang akibat bertambahnya massa gas buang dan perubahan temperatur pembakaran. Namun, pada rentang AFR 16–24 yang digunakan dalam penelitian ini, peningkatan *Qloss* akibat kondisi tersebut belum terlihat pada hasil pengujian. *Qloss* justru mencapai nilai terendah pada AFR 24. Kondisi ini menunjukkan bahwa rentang AFR yang diuji belum menunjukkan pengaruh negatif yang dominan terhadap kehilangan panas melalui gas buang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pengaruh variasi *Air Fuel Ratio* (AFR) 16–24 pada *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* berbahan bakar solar terhadap efisiensi termal, persentase kehilangan panas, flame temperature, dan konsentrasi emisi CO, dapat disimpulkan, Efisiensi termal tertinggi sebesar 72,16%, flame temperature tertinggi sebesar 688,5°C, dan persentase kehilangan panas terendah sebesar 27,84% diperoleh pada AFR 24. Konsentrasi CO terendah sebesar 1,92% diperoleh pada AFR 22 dan AFR 24. Kriteria kondisi optimum dalam penelitian ini didefinisikan sebagai kondisi dengan efisiensi termal yang tinggi dan *Qloss* yang rendah, dengan kebutuhan udara yang lebih rendah dibandingkan kondisi dengan kinerja yang hampir sama. Berdasarkan kriteria tersebut, AFR 22 ditetapkan sebagai kondisi operasi optimum dengan efisiensi termal 72,14%, *Qloss* 27,86%, flame temperature 685,9°C, dan konsentrasi CO 1,92%. Nilai tersebut hanya berbeda 0,02 percentage point dari AFR 24 untuk efisiensi termal dan *Qloss*, sedangkan konsentrasi CO pada kedua kondisi sama. Penelitian ini belum dilengkapi dengan data pengulangan dan analisis ketidakpastian. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan replikasi pengujian, analisis ketidakpastian, dan pengujian pada AFR >24 untuk mengevaluasi keberlanjutan tren efisiensi termal dan emisi CO.

DAFTAR PUSTAKA

- Baringbing, M. H., & Sinaga, I. N. (2023). Analisis efisiensi water tube boiler menggunakan metode langsung di PT. Toba Pulp Lestari, Tbk Porsea-Sumatera Utara. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, 11(2), 49–68.
- Dewanatan, W. W., Adiputra, M. K., Hakim, I. P., Zainuddin, A. P., Putro, I. K., & Cahyono, R. B. (2020). Peningkatan efisiensi energi melalui optimasi cycle steam boiler pada operasi boiler: Studi kasus di PT. Kaltim Methanol Industri (KMI). *Jurnal Rekayasa Proses*, 14(2), 182–188. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.59172>
- Juriwon. (2017). Energy analysis of water pipe boilers using solar fuel. *Journal of Research Results and Scientific Reviews*, 8(2), 7–13.
- Nasution, A. (2020). Analisa bahan bakar ketel uap dengan kapasitas 30 ton/jam pada PKS PTPN IV Kebun Adolina. *Piston*, 4(2), 86–88.
- Ningsih, A. S., Syakhdani, A., Rusnadi, I., Oktaviani, Y., Veronica, F., & Anisya, J. T. (2021). Efisiensi termal produksi steam ditinjau dari rasio udara bahan bakar solar pada cross section water tube boiler. *Jurnal Kinet*, 12(1), 18–22. <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/kimia/index>
- Pratama, N. M., Danial, & Taufiqurrahman, M. (2021). Analisa efisiensi water tube boiler dengan menggunakan metode langsung. *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin*, 2(2), 105–110. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jtm/article/view/48393>
- Priyanto, P., & Wilastari, S. (2022). Faktor-faktor penyebab menurunnya kinerja boiler di PT Papertech Indonesia. *Majalah Ilmiah Gema Maritim*, 24(1), 60–66. <https://doi.org/10.37612/gema-maritim.v24i1.281>
- Putri, D. N., Yuliani, A., Fatria, Amin, J. M., & Tahdid. (2022). Efisiensi termal water tube boiler berbahan bakar gas dan solar pada produksi saturated dan superheated steam berdasarkan level ketinggian air dalam steam drum. *Distilasi*, 7(1), 1–7.
- Sahda, N. T., Sentosa, J. M., & Adhani, L. (2022). Analisis efisiensi boiler menggunakan metode langsung di Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Bantargebang. *Journal of Engineering Environmental Energy and Science*, 1(1), 39–48. <https://doi.org/10.31599/joes.v1i1.979>
- Santoso, H., et al. (2017). Effect of air-fuel ratio on non-premixed combustion characteristics in boiler furnace using CFD, 92–98.