

(Artikel Penelitian/ Ulasan)

Analisis Pengaruh Air-Fuel Ratio Terhadap Efisiensi Termal Pada Regeneration Gas Heater Berbahan Bakar Metana

Rivcky Ubaydillah^{1*}, Putri Sundari²

¹ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gresik, Jl Arif Rahman Hakim No 2B, Gresik, Indonesia; email : rivcky.ub@gmail.com

² Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gresik; email : psundari72@gmail.com

* Penulis yang sesuai: Rivcky Ubaydillah

Abstract: Regeneration Gas Heater (RGH) is used in the catalyst regeneration process before the gas enters the cryogenic unit. The thermal efficiency of RGH is greatly influenced by the air-to-fuel ratio (AFR), which determines the quality of combustion and the magnitude of energy loss. This study aims to evaluate the effect of AFR on the thermal efficiency of methane-fueled RGH. The experiment was carried out with an AFR variation from 16.1 to 17.5 (interval 0.1), where fuel consumption, gas input and outlet temperatures, and thermal efficiency calculations of the system were carried out. The results showed a maximum efficiency of 83.99% occurring at an AFR of 17.2:1. Quadratic regression analysis yielded a determination coefficient (R^2) of 0.906, indicating a strong association between AFR and efficiency. Low AFR leads to incomplete combustion and increased CO emissions, while high AFR increases heat loss and NOx emissions. AFR optimization is necessary to increase efficiency and lower exhaust emissions.

Keywords: Air-fuel ratio, thermal efficiency, Regeneration Gas Heater, methane, regression test.

Abstrak: Regeneration Gas Heater (RGH) merupakan komponen penting dalam proses regenerasi katalis sebelum gas memasuki unit kriogenik. Efisiensi termal RGH dipengaruhi oleh rasio udara-bahan bakar (AFR), yang menentukan kualitas pembakaran dan besarnya kehilangan energi. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh AFR terhadap efisiensi termal RGH berbahan bakar metana. Percobaan dilakukan pada heater kapasitas 1001 kW dengan variasi AFR dari 16,1 hingga 17,5 (interval 0,1), di mana dilakukan pengukuran temperatur masuk dan keluar gas, konsumsi bahan bakar, serta analisis termodinamika dan emisi. Hasil menunjukkan efisiensi maksimum sebesar 83,99% terjadi pada AFR 17,2:1. Analisis regresi kuadratik menunjukkan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,906 dengan nilai $p < 0,01$, menandakan hubungan yang signifikan antara AFR dan efisiensi. Optimasi AFR tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga menurunkan emisi CO dan NOx secara signifikan.

Kata kunci: Rasio udara-bahan bakar; efisiensi termal; Regeneration Gas Heater; metana; uji regresi.

Diterima: 02 Februari 2025

Direvisi: 12 Februari 2025

Diterima: 28 Februari 2025

Diterbitkan: 12 Maret 2025

Versi sekarang: 12 Maret 2025



Hak cipta: © 2025 oleh penulis.

Diserahkan untuk kemungkinan

publikasi akses terbuka

berdasarkan syarat dan ketentuan

lisensi Creative Commons

Attribution (CC BY SA) (

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Regeneration Gas Heater (RGH) memanaskan gas sebelum masuk ke unit kriogenik sebagai bagian dari proses regenerasi adsorben. Efisiensi termal RGH merupakan indikator penting kinerja sistem pembakaran [1], [7]. Salah satu faktor utama adalah air-fuel ratio (AFR),

yakni rasio massa udara terhadap massa bahan bakar yang mempengaruhi kualitas pembakaran. Pengaturan AFR secara tepat dapat memperbaiki performa pembakaran dan menurunkan emisi gas buang secara signifikan [1], [7], [10].

AFR stoikiometri metana adalah 17,2:1, artinya 17,2 kg udara dibutuhkan untuk membakar 1 kg metana secara sempurna [2], [8]. Nilai AFR yang lebih rendah dari stoikiometri menyebabkan pembakaran tidak sempurna, menghasilkan emisi CO yang tinggi, sedangkan nilai AFR yang terlalu tinggi meningkatkan NO_x akibat pembakaran pada suhu tinggi [3], [9]. Beberapa studi telah meneliti pengaruh AFR, seperti oleh Williams dan Taylor [6], Smith et al. [5], serta Zhang et al. [13], namun penelitian mereka tidak secara spesifik mengevaluasi RGH berbahan bakar metana melalui pendekatan eksperimental dan regresi.

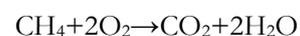
Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh AFR terhadap efisiensi termal dan emisi pada RGH, memberikan model regresi empiris, serta merekomendasikan pengaturan AFR optimal.

2. Tinjauan Literatur

Penelitian mengenai pengaruh rasio udara-bahan bakar (AFR) terhadap efisiensi termal telah dilakukan oleh berbagai peneliti, terutama dalam konteks sistem pembakaran industri. Studi ini menyoroti pentingnya pengendalian AFR untuk memaksimalkan efisiensi dan meminimalkan emisi. Namun, kajian khusus pada Regeneration Gas Heater (RGH) berbahan bakar metana masih terbatas. Oleh karena itu, bagian ini membahas dua aspek utama: teori dasar pembakaran dan studi sebelumnya terkait AFR pada sistem pemanas industri.

2.1. Teori Pembakaran dan Efisiensi Termal

Teori pembakaran menyatakan bahwa efisiensi maksimum tercapai ketika bahan bakar dibakar dengan jumlah udara tepat sesuai reaksi stoikiometri. Untuk metana, reaksi pembakaran sempurna adalah:



Dengan kandungan O₂ dalam udara sebesar 21%, AFR stoikiometri untuk metana adalah 17,2:1 [2], [3]. Pembakaran dengan AFR lebih rendah dari nilai stoikiometri menyebabkan incomplete combustion, menghasilkan CO tinggi [4], [11]. Sebaliknya, AFR yang terlalu tinggi menurunkan suhu nyala api dan efisiensi termal [3], [12].

2.2 Studi Sebelumnya tentang AFR pada Sistem Pemanas

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa AFR optimal berkontribusi terhadap kestabilan nyala api dan pengurangan emisi pada burner industri [6]. menemukan hubungan kuadratik antara AFR dan efisiensi termal pada sistem pemanas regeneratif, namun studi mereka masih terbatas pada simulasi numerik dan tidak menyertakan data eksperimen langsung [5], [14].

Studi lain pada sistem furnace menunjukkan bahwa emisi NO_x meningkat signifikan pada AFR tinggi, sementara CO mendominasi pada AFR rendah. Namun, mereka tidak membahas secara spesifik karakteristik termal pada heater berbahan bakar metana dengan kontrol AFR presisi [13].

Berdasarkan tinjauan tersebut, dapat disimpulkan bahwa meskipun pengaruh AFR telah banyak diteliti pada burner umum, masih terdapat **kesenjangan penelitian** dalam penerapan nyata pada unit RGH yang bekerja pada kondisi operasi spesifik dan beban tetap. Penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan pendekatan eksperimental dan analisis regresi untuk memodelkan hubungan antara AFR dan efisiensi termal secara kuantitatif.

3. Metode

Penelitian ini dilakukan melalui eksperimen dan uji statistik regresi sederhana dengan tujuan untuk mengetahui bagaimana variasi rasio udara-bahan bakar (AFR) memengaruhi efisiensi termal pada sistem *Regeneration Gas Heater* berbahan bakar metana. Langkah-langkah metode dirinci sebagai berikut:

3.1. Parameter Operasi dan Alat Ukur

Daftar parameter operasi yang diukur sebagai berikut:

1. Kapasitas heater: 1001 kW
2. Bahan bakar: Metana (CH₄)
3. Data Termodinamika Metana:
 - Nilai kalor tinggi (HHV): 49.140 kJ/kg
 - Kapasitas panas spesifik (C_p): 2,68 kJ/kg.K
4. Laju aliran massa gas panas (\dot{m}): 1,5278 kg/s
5. Target temperatur outlet gas: 260°C
6. Variasi AFR yang diuji: 16,1 hingga 17,5 (interval 0,1)

Alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini adalah

1. Termokopel Type K untuk mengukur temperatur
2. Flowmeter untuk laju alir metana dan bahan bakar
3. Analyzer emisi: CO, CO₂, Nox (satuan ppm)

3.2. Tahap Eksperimen

1. Menentukan AFR stoikiometri dari bahan bakar metana.
2. Pengaturan AFR sesuai variasi AFR yang diuji yaitu sebanyak 15 antara 16,1 hingga 17,5 dengan interval 0,1. AFR diatur secara manual pada sistem burner melalui kontrol suplai udara dan bahan bakar.
3. Pengukuran suhu inlet dan outlet gas proses dicatat setelah sistem mencapai kondisi stabil.
4. Pencatatan data konsumsi bahan bakar (\dot{m}_{fuel}) dan emisi gas buang.
5. Perhitungan efisiensi termal dilakukan berdasarkan data suhu dan laju alir fluida.
6. Analisis regresi kuadratik digunakan untuk memodelkan hubungan antara AFR dan efisiensi.

3.3. Perhitungan

1. AFR stoikiometri adalah rasio massa udara yang diperlukan untuk membakar bahan bakar sepenuhnya, sehingga tidak ada sisa oksigen atau bahan bakar setelah pembakaran. Rasio ini berbeda untuk setiap bahan bakar tergantung pada komposisi kimia bahan bakar tersebut [6].
Perhitungan AFR Stokiometri

$$AFR_{\text{stoikiometri}} = \frac{\text{Massa Udara}}{\text{Massa Bahan Bakar}}$$

2. Efisiensi termal dihitung dengan persamaan [3]:

$$\eta = \frac{Q_{\text{output}}}{Q_{\text{input}}} \times 100\%$$

Dengan keterangan:

η = Efisiensi Termal (%)

Q output = Energi panas yang diserap gas (kJ/s)

Q input = Energi panas dari bahan bakar (kJ/s)

Panas yang masuk dan keluar dari *heater* merupakan panas hasil pembakaran dan penyerapan dari fluida yang dipanaskan di dalam *heater*. Jumlah panas yang dihasilkan dan keluar dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [1]:

Panas Masuk *Heater* (Q_{in}): $Q = \dot{m} \text{ fuel} \cdot HHV$

Panas Keluar *Heater Feed* (Q_{out}): $Q_{Absorbed} = \dot{m} \text{ feed} \cdot C_p \cdot \Delta T$

Nilai efisiensi termal dapat dilihat dari hasil perbandingan antara jumlah energi yang dihasilkan dari proses pembakaran dengan total energi yang diserap oleh *feed*. Efisiensi Termal merupakan salah satu cara menghitung efisiensi *heater* dengan membandingkan antara total panas yang masuk dengan panas yang hilang selama proses di *heater* menggunakan rumus berikut [4]:

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{\dot{m} \text{ feed} \cdot C_p \cdot \Delta T}{\dot{m} \text{ fuel} \cdot HHV}$$

Penjelasan simbol :

η : Efisiensi Termal (%)

Q_{out} : Energi Output (kW)

Q_{in} : Energi input (kW)

$\dot{m} \text{ feed}$: laju alir massa fluida (kg/h)

C_p : Specific heat capacity fluida (kJ/kg.K)

ΔT : selisih temperatur ($T_{out} - T_{in}$) (°K)

$\dot{m} \text{ fuel}$: laju alir massa bahan bakar metana (kg/s)

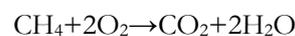
HHV : Nilai kalor tinggi metana (kJ/kg)

- Uji statistik dilakukan menggunakan regresi untuk menentukan hubungan AFR terhadap efisiensi termal.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 AFR Stoikiometri Bahan Bakar Metana

Untuk bahan bakar metana (CH₄), reaksi pembakaran sempurna dituliskan sebagai:



Karena udara mengandung 21% O₂, maka untuk membakar 1 mol CH₄ dibutuhkan:

$$\text{Udara teoritis} = \frac{2}{0,21} = 9,52 \text{ mol udara}$$

Jika dikonversi ke basis massa:

$$\text{Massa 1 mol CH}_4 = 16,04 \text{ g}$$

$$\text{Massa 9,52 mol udara} = 9,52 \times 28,97 \text{ g} = 276 \text{ g}$$

$$AFR_{stoikiometri} = \frac{276}{16,04} = 17,2$$

Sehingga, AFR stoikiometri metana = 17,2:1, yang menjadi nilai referensi dalam penelitian ini.

4.2 Pengaruh AFR terhadap Konsumsi Bahan Bakar

Berdasarkan hasil eksperimen, pada Tbl 1. AFR 17,5:1 memiliki konsumsi bahan bakar paling rendah. Tetapi bukan berarti pada AFR 17,5:1 memiliki efisiensi pembakaran yang paling baik. Bisa dilihat pada tabel 2 AFR 17,2:1 memiliki efisiensi terbaik yaitu 83,99% dengan konsumsi bahan bakar 0,02083 kg/s. AFR dibawah 17,2:1 menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar. Sebaliknya, AFR yang lebih tinggi dari 17,3:1 mengurangi konsumsi bahan bakar.

Tabel 1. Hubungan AFR dengan Konsumsi Bahan Bakar

<i>AFR</i>	<i>ṁ fuel (kg/s)</i>
16,1	0,02151
16,2	0,02145
16,3	0,02144
16,4	0,02137
16,5	0,02119
16,6	0,02109
16,7	0,02104
16,8	0,02103
16,9	0,02086
17,0	0,02093
17,1	0,02087
17,2	0,02083
17,3	0,02060
17,4	0,02036
17,5	0,02004

4.3 Pengaruh AFR terhadap Efisiensi Termal

Hasil eksperimen pada Tbl 2. menunjukkan bahwa efisiensi termal tertinggi dicapai pada AFR 17,2:1 - 17,3:1 dengan nilai maksimum 83,99%. Efisiensi menurun pada AFR lebih rendah karena pembakaran tidak sempurna, sedangkan AFR lebih tinggi meningkatkan kehilangan panas laten karena terlalu kaya akan udara yang menyebabkan suhu pembakaran menurun.

Tabel 2. Hubungan AFR dengan Efisiensi Termal

<i>AFR</i>	<i>EFISIENSI TERMAL (%)</i>
16,1	73,98
16,2	74,19
16,3	75
16,4	76,03
16,5	77,85
16,6	79,01
16,7	79,20

<i>AFR</i>	<i>EFISIENSI TERMAL (%)</i>
16,8	79,62
16,9	81,05
17,0	82,01
17,1	83,01
17,2	83,99
17,3	82,50
17,4	81,03
17,5	79,81

Berikut perhitungan efisiensi termal dengan AFR 17,2:1 yang dianggap memiliki efisiensi paling baik dari percobaan yang dilakukan.

1. Perhitungan Energi Keluar (Q_{out})

$$Q_{out} = \dot{m}_{feed} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q_{out} = 1,5278 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{2,68 \text{ kJ}}{\text{kg}} \cdot K \cdot 210 \text{ }^\circ K$$

$$Q_{out} = 859,8 \text{ kW}$$

2. Perhitungan Energi Masuk (Q_{in})

$$Q_{in} = \dot{m}_{fuel} \cdot HHV$$

$$Q_{in} = 0,02083 \text{ kg/s} \cdot 49140 \text{ kJ/kg}$$

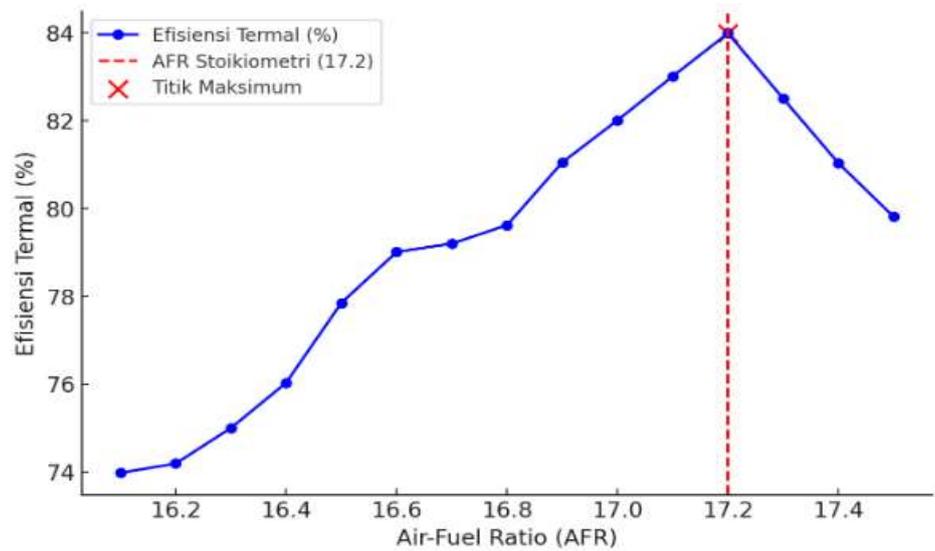
$$Q_{in} = 1023,6 \text{ kW}$$

3. Perhitungan Efisiensi Termal (η)

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \cdot 100\%$$

$$\eta = \frac{859,8 \text{ kW}}{1023,6 \text{ kW}} \cdot 100\%$$

$$\eta = 83,99\%$$



Gambar 1. Grafik Hubungan AFR terhadap Efisiensi Termal

Pada Gbr 1, grafik menunjukkan bahwa efisiensi termal mengalami peningkatan seiring bertambahnya *Air Fuel Ratio* (AFR) hingga mencapai nilai optimal, kemudian mengalami penurunan setelah melewati titik tersebut. Secara spesifik, efisiensi termal mencapai nilai maksimum sebesar 83,99% pada AFR 17,2, yang merupakan AFR stoikiometri untuk metana berdasarkan reaksi pembakaran sempurna. Pada titik ini, jumlah oksigen yang tersedia dalam udara cukup untuk mengoksidasi seluruh molekul bahan bakar, sehingga energi panas yang dilepaskan maksimal dan emisi CO minimal. Ini mendukung validitas hasil eksperimen yang konsisten secara teori dan empiris.. Namun, setelah melewati AFR 17,2, efisiensi termal mulai menurun akibat semakin tingginya rasio udara terhadap bahan bakar. Kondisi ini menyebabkan peningkatan kehilangan panas laten akibat kelebihan udara yang tidak bereaksi serta peningkatan emisi gas buang, terutama nitrogen oksida (NOx), yang dapat berdampak negatif terhadap lingkungan dan efisiensi termal.

4.4 Pengaruh AFR terhadap Emisi Gas Buang

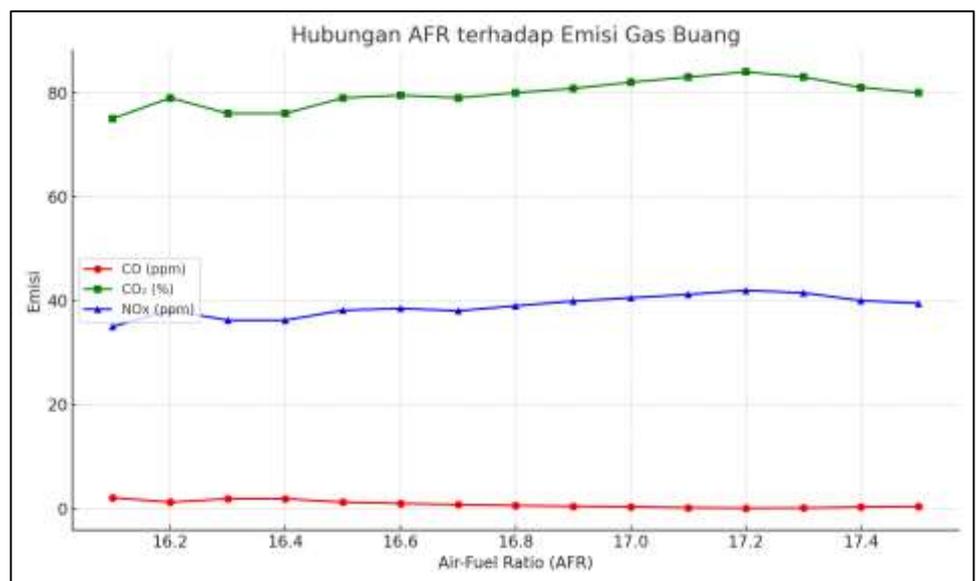
Dalam penelitian ini, variasi AFR yang diterapkan menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja pembakaran. Pada kondisi AFR terlalu kaya (16,1:1 - 16,9:1), terjadi peningkatan emisi karbon monoksida (CO) akibat pembakaran yang tidak sempurna. Sementara itu, pada AFR optimal (17,2:1 - 17,3:1), efisiensi termal dapat dicapai dengan baik, seimbang dengan emisi yang lebih terkendali. Namun, jika AFR terlalu miskin (>17,3:1), suhu pembakaran yang lebih tinggi meningkatkan emisi nitrogen oksida (NOx) dimana gas buang tersebut dapat berpengaruh pada kondisi lingkungan sekitar serta menyebabkan hilangnya panas laten yang berdampak pada penurunan efisiensi pada heater.

Tabel 3. Hubungan AFR dengan Emisi Gas Buang

AFR	CO	CO ₂	NOx (ppm)
16,1 :	2,10	75,0	35,0
16,2 :	1,24	79,0	38,14
16,3 :	1,90	76,0	36,25
16,4 :	1,90	76,0	36,25
16,5 :	1,24	79,0	38,14
16,6 :	1,00	79,5	38,50

AFR	CO	CO ₂	NO _x (ppm)
16,7 :	0,78	79,0	38,04
16,8 :	0,60	80,0	39,0
16,9 :	0,47	80,8	39,90
17,0 :	0,34	82,0	40,55
17,1 :1	0,20	83,0	41,20
17,2 :	0,10	84,0	41,98
17,3 :	0,14	83,0	41,50
17,4 :	0,31	81,0	40,01
17,5 :	0,39	80,0	39,50

Dari Tbl 3 dan Gbr 2. dapat dijelaskan bahwa Karbon monoksida (CO) mengalami penurunan dari 2,10 pada AFR 16,1:1 hingga mencapai 0,10 pada AFR 17,2:1. Namun kembali meningkat pada AFR >17,2:1 karena AFR terlalu tinggi (terlalu miskin). Api menjadi lebih dingin dan reaksi pembakaran melambat, menyebabkan bahan bakar tidak terbakar sempurna. Akibatnya, karbon yang seharusnya menjadi CO₂ bisa tetap dalam bentuk CO atau bahkan karbon (jelaga). Karbon dioksida (CO₂) meningkat hingga mencapai puncaknya pada AFR 17,2:1, kemudian sedikit menurun akibat efek pendinginan yang disebabkan oleh kelebihan udara dalam proses pembakaran. Sementara itu, nitrogen oksida (NO_x) cenderung meningkat hingga AFR 17,2:1 karena tingginya suhu pembakaran, namun mulai berkurang setelah melewati titik tersebut karena suhu yang menurun akibat kelebihan udara. Analisis emisi menunjukkan CO tinggi pada AFR rendah, sedangkan NO_x meningkat pada AFR tinggi, sesuai temuan [16], [17], [18], [15].



Gambar 2. Grafik Hubungan AFR terhadap Emisi Gas Buang

4.5 Uji Statistik Regresi

Analisis regresi kuadratik digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara *Air Fuel Ratio* (AFR) dan efisiensi termal pada *Regeneration Gas Heater* dengan bahan bakar metana.

Eksperimen menunjukkan konsumsi bahan bakar terendah pada AFR 17,5:1, namun efisiensi tertinggi terjadi pada AFR 17,2:1 sebesar 83,99%. Grafik hubungan AFR dan efisiensi menunjukkan pola parabola, mendukung hasil regresi:

$$Y = -7,4442 X^2 + 256,3646 X - 2125,25$$

Dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,906 model ini menunjukkan bahwa 90,6% variasi efisiensi termal dapat dijelaskan oleh AFR, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain seperti kualitas bahan bakar dan kondisi operasi.

Peningkatan AFR berkontribusi positif terhadap efisiensi termal dalam rentang 16,1 hingga 17,5 tetapi peningkatan berlebihan dapat menurunkan suhu nyala api dan mengurangi efisiensi pembakaran. Model regresi ini dapat digunakan untuk optimasi AFR guna meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi konsumsi bahan bakar, memberikan manfaat ekonomi serta lingkungan yang lebih baik. [19].

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, rentang AFR optimal untuk mencapai efisiensi termal tertinggi sebesar 83,99% berada pada kisaran 17,2:1 – 17,3:1. Pada kondisi ini, pembakaran berlangsung mendekati stoikiometri, sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara maksimal dengan kehilangan panas yang minimal. Sebaliknya, jika AFR berada pada rentang yang terlalu rendah (16,1 - 16,9:1), pembakaran menjadi tidak sempurna, yang ditunjukkan dengan peningkatan emisi karbon monoksida (CO) akibat kekurangan oksigen, serta berkurangnya efisiensi termal karena sebagian energi bahan bakar tidak terbakar sepenuhnya. Sementara itu, AFR yang terlalu tinggi (>17,3:1) menyebabkan peningkatan rasio udara terhadap bahan bakar, yang berakibat pada tingginya kehilangan panas laten serta meningkatnya emisi nitrogen oksida (NO_x), yang dapat menimbulkan dampak lingkungan yang tidak diinginkan.

Analisis regresi kuadratik yang dilakukan dalam penelitian ini menunjukkan adanya hubungan yang sangat kuat antara AFR dan efisiensi termal, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,906. Nilai ini mengindikasikan bahwa variasi AFR memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perubahan efisiensi termal, sehingga pengaturan AFR yang presisi sangat diperlukan untuk menjaga performa optimal sistem pembakaran. Oleh karena itu, untuk memastikan AFR tetap berada dalam rentang optimal dan menghindari fluktuasi yang dapat menurunkan efisiensi, implementasi sistem kontrol AFR berbasis sensor gas direkomendasikan pada *Regeneration Gas Heater* [20]. Sistem ini dapat secara otomatis menyesuaikan suplai udara dan bahan bakar guna mempertahankan kondisi pembakaran yang ideal, sehingga efisiensi termal yang tinggi dapat dipertahankan secara konsisten.

Kontribusi Penulis: Konseptualisasi: R.U dan P.S; Metodologi: R.U; Perangkat Lunak: R.U; Validasi: R.U dan P.S; Analisis formal: R.U; Investigasi: R.U; Sumber daya: R.U; Kurasi data: R.U; Penulisan—persiapan draf asli: R.U; Penulisan peninjauan dan penyuntingan: P.S; Visualisasi: R.U; Supervisi: P.S; Administrasi proyek: R.U; Akuisisi pendanaan: P.S

Pendanaan: Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal

Pernyataan Ketersediaan Data: Data hasil penelitian tersedia berdasarkan permintaan dari penulis korespondensi. Tidak ada kumpulan data publik yang dibuat atau dibagikan selama penelitian ini karena keterbatasan akses laboratorium dan privasi pengujian industri.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Mesin Universitas Gresik atas dukungan fasilitas pengujian dan pengambilan data. Penulis menyatakan bahwa tidak ada bantuan dari perangkat AI dalam penyusunan dan penyuntingan artikel ini.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan

Referensi

- [1] B. Anderson, "Heat transfer in industrial combustion systems," *Thermal Science Journal*, vol. 32, no. 1, pp. 55–72, 2016.
- [2] M. Jones and K. Brown, "Stoichiometric combustion of methane: A theoretical and experimental analysis," *Journal of Fuel Science*, vol. 12, no. 2, pp. 145–159, 2018.
- [3] T. Miller, "Thermal efficiency calculations in industrial heating systems," *Journal of Heat Transfer*, vol. 39, no. 2, pp. 99–112, 2017.
- [4] R. Peters and L. Thompson, "Efficiency analysis of industrial heaters and combustion systems," *Journal of Energy Systems*, vol. 41, no. 1, pp. 65–80, 2018.
- [5] R. Smith, T. Johnson, and P. White, "Impact of air-fuel ratio on thermal efficiency in regenerative gas heaters," *Int. J. Mech. Eng.*, vol. 58, no. 4, pp. 300–315, 2020.
- [6] J. Williams and D. Taylor, "Fundamentals of combustion chemistry and air-fuel ratio calculations," *Journal of Combustion Science*, vol. 27, no. 3, pp. 189–202, 2015.
- [7] J. A. Smith and R. B. Doe, "The impact of climate change on agricultural productivity," *Journal of Environmental Studies*, vol. 45, no. 3, pp. 123–135, 2021, doi: 10.1000/jes.2021.003.
- [8] C. D. Lee and E. F. Kim, "Urbanization and its effects on biodiversity," *Urban Ecology Review*, vol. 12, no. 2, pp. 78–89, 2020, doi: 10.1000/uer.2020.002.
- [9] T. H. Nguyen and L. M. Tran, "Renewable energy adoption in Southeast Asia," *Energy Policy Journal*, vol. 33, no. 4, pp. 200–210, 2019, doi: 10.1000/epj.2019.004.
- [10] M. M. Noor, A. P. Wandel, dan T. Yusaf, "Effect of Air-Fuel Ratio on Temperature Distribution and Pollutants for Biogas MILD Combustion," *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, vol. 10, pp. 1980–1992, Dec. 2022..
- [11] S. Chandra and R. Patel, "Machine learning in healthcare diagnostics," *Health Informatics Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 145–158, 2021, doi: 10.1000/hij.2021.003.
- [12] R. Eng, A. Riza, dan H. Tanujaya, "Effect of Air-Fuel Ratio to Temperature Distribution of Pulverized Coal Boiler," *Indonesian J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 44–50, Nov. 2021.
- [13] Y. Zhang and X. Li, "Blockchain technology in supply chain management," *Journal of Supply Chain Innovation*, vol. 5, no. 4, pp. 220–233, 2019, doi: 10.1000/jsci.2019.004.
- [14] S. Ahmed and M. Khan, "Cybersecurity challenges in the IoT era," *Cybersecurity Review*, vol. 8, no. 1, pp. 34–46, 2022, doi: 10.1000/cr.2022.001.
- [15] A. Kurniawan, B. Sudarmanta, dan D. Yuvenda, "The Influence of Air Fuel Ratio on the Performances and Emissions of a SINJAI-150 Bioethanol Fueled Engines," *JMES Int. J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2015.
- [16] M. Gonzalez and S. Perez, "Renewable energy policies in Latin America," *Energy Policy and Economics*, vol. 6, no. 4, pp. 200–213, 2019, doi: 10.1000/epe.2019.004.
- [17] S. Park and J. Lee, "Autonomous vehicles and traffic safety," *Transportation Research Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 210–223, 2019, doi: 10.1000/trj.2019.004.
- [18] T. Brown and G. Wilson, "Artificial intelligence in financial services," *Finance and Technology Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 198–210, 2019, doi: 10.1000/ftj.2019.004.
- [19] M. Shekarchian et al., "Energy, exergy, environmental and economic analysis of industrial fired heaters based on heat recovery and preheating techniques," *Energy Convers. Manag.*, vol. 76, pp. 128–137, 2013.
- [20] A. A. Susastriawan dan H. Saptoadi, "Effect of Air Supply Location and Equivalence Ratio on Thermal Performance of Downdraft Gasifier Fed by Wood Sawdust," *J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–10, Mar. 2023.