

Strategi Penyesuaian Draft Heater terhadap Konsumsi Fuel Oil dan Emisi Gas Buang pada Heater

Wendri Eko Nopri*, Ratni Dewi, Ridwan

Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Lhokseumawe, Jl. Medan-B.Aceh Km. 280 Buketrata Lhokseumawe Indonesia

*E-mail: wendriekonopri@gmail.com

Abstract

Article history:

Received: 02-04-2026

Accepted: 25-04-2026

Published: 30-04-2026

Keywords:

draft heater;

energy efficiency;

exhaust gas emissions;

fuel oil consumption;

hydrocracking.

Optimization of combustion systems in industrial heaters is essential to improve energy efficiency and reduce flue gas emissions. This study aims to analyze the effect of draft heater adjustment on fuel oil consumption and exhaust gas emissions in Heater. The method employed was a field experimental approach using a comparative analysis before and after optimization, through gradual reduction of damper opening and closure of air registers on inactive burners. Observed parameters included fuel oil consumption, excess O₂ levels, stack temperature, heater efficiency, and exhaust gas emissions. The results show that draft optimization significantly reduced fuel oil consumption from 1.1868 m³/h to 0.7345 m³/h, equivalent to a reduction of 38.1%. Heater efficiency increased from 67.35% to 72.26%, influenced by a decrease in excess air from 10.19% to 7.09% and a reduction in stack temperature from 253.5°C to 222.8°C. Furthermore, emissions of CO₂, NO_x, and SO_x were significantly reduced due to improved combustion quality and lower fuel consumption. This study concludes that draft heater adjustment through damper control and air register optimization is an effective strategy to simultaneously enhance energy efficiency and reduce emissions without requiring major equipment modifications. The findings are expected to serve as a practical reference for improving the performance and environmental sustainability of industrial heater operations.

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi dan tuntutan pengurangan emisi mendorong industri pengolahan minyak untuk mengoptimalkan efisiensi sistem pembakaran pada unit proses, khususnya pada heater di unit hydrocracking kilang pengolahan minyak bumi[1]. Heater berfungsi sebagai penyedia energi panas utama yang sangat menentukan kinerja proses konversi hidrokarbon berat menjadi produk bernilai tinggi[2]. Namun, sistem pembakaran pada heater seringkali menghadapi permasalahan berupa konsumsi bahan bakar (fuel oil) yang tinggi dan emisi gas buang yang signifikan, seperti NO_x, CO, dan CO₂[3]. Salah satu parameter kunci yang memengaruhi kedua aspek tersebut adalah draft heater, yaitu kondisi tekanan negatif yang mengatur aliran udara pembakaran dan gas buang di dalam furnace. Draft yang tidak optimal dapat menyebabkan ketidakseimbangan rasio udara-bahan bakar (excess air), yang berujung pada pembakaran tidak sempurna atau kehilangan panas melalui gas buang. Studi menunjukkan bahwa pengaturan excess air yang tidak tepat dapat meningkatkan emisi NO_x secara signifikan, bahkan setiap kenaikan 1%

oksigen berlebih dapat meningkatkan emisi NO_x hingga 6–9%. Selain itu, distribusi udara pembakaran dan pengaturan burner juga sangat memengaruhi efisiensi dan emisi sistem pembakaran. Oleh karena itu, optimasi draft heater menjadi aspek penting dalam meningkatkan efisiensi energi sekaligus menekan emisi lingkungan pada Heater.

Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah tingginya konsumsi fuel oil yang belum optimal dibandingkan dengan energi panas yang dihasilkan, serta emisi gas buang yang berpotensi melampaui batas baku mutu lingkungan. Kondisi ini diduga berkaitan dengan pengaturan draft heater yang belum optimal, khususnya dalam pengendalian excess air dan distribusi udara pembakaran. Berdasarkan hal tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini meliputi bagaimana pengaruh variasi draft terhadap konsumsi fuel oil pada Heater, bagaimana hubungan antara draft heater dengan karakteristik emisi gas buang, dan bagaimana strategi penyesuaian draft yang optimal untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan menurunkan emisi secara simultan.

Kajian terdahulu menunjukkan bahwa optimasi sistem pembakaran pada furnace

industri dapat dilakukan melalui pengendalian excess air, pengaturan distribusi udara, serta modifikasi *burner*[4-6]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pengurangan excess air dapat meningkatkan efisiensi furnace hingga 7,6% serta menurunkan konsumsi bahan bakar[7]. Selain itu, pemanfaatan teknologi seperti *exhaust gas recirculation (EGR)* dan pengaturan distribusi udara pembakaran terbukti efektif dalam menurunkan emisi NO_x dan meningkatkan efisiensi termal[8]. Studi lain juga menegaskan bahwa *draft heater* berperan dalam menjaga tekanan negatif furnace untuk memastikan aliran udara yang stabil dan pembakaran yang optimal[9]. Di sisi lain, inovasi teknologi pembakaran modern menunjukkan bahwa pengendalian parameter pembakaran secara presisi dapat menurunkan emisi sekaligus meningkatkan transfer panas. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada boiler atau furnace umum, dan belum secara spesifik mengkaji heater pada unit *hydrocracker* dengan kondisi operasional aktual[10].

Berdasarkan kajian tersebut, terdapat gap penelitian berupa belum adanya pendekatan komprehensif yang mengintegrasikan pengaruh *draft heater* terhadap konsumsi *fuel oil* dan emisi gas buang secara simultan pada unit *hydrocracking*, khususnya *Heater*. Selain itu, penelitian sebelumnya cenderung menggunakan pendekatan simulasi atau skala laboratorium[11, 12], sehingga kurang merepresentasikan kondisi nyata di lapangan. Oleh karena itu, *novelty* penelitian ini terletak pada pengembangan strategi penyesuaian draft heater berbasis data operasional aktual yang menghubungkan secara langsung parameter draft, konsumsi *fuel oil*, dan emisi gas buang dalam satu kerangka analisis terintegrasi.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh *draft heater* terhadap konsumsi *fuel oil* dan emisi gas buang pada *Heater*, menentukan kondisi *draft* yang optimal untuk mencapai efisiensi pembakaran maksimum, serta merumuskan strategi penyesuaian *draft* yang dapat menurunkan konsumsi bahan bakar dan emisi secara bersamaan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam pengoperasian *heater* industri yang lebih efisien dan ramah lingkungan, serta menjadi referensi dalam pengembangan sistem kontrol

pembakaran pada industri pengolahan minyak dan gas.

2. Metode

Penelitian ini dilaksanakan pada peralatan *Heater* yang merupakan jenis *natural draft heater*, dengan perhatian utama pada komponen damper (*dumper*) dan *air register* sebagai pengendali aliran udara pembakaran.

2.1 Rancangan Percobaan

Pengamatan dilakukan menggunakan instrumen operasional yang telah terpasang pada unit, meliputi *O₂ Analyzer (AR-222)* untuk mengukur kadar oksigen gas buang, *temperature indicator* TI-190 dan TI-191 untuk temperatur *stack*, *pressure controller* PC-207 dan PC-214 untuk kontrol aliran *fuel oil*, serta TI-181 untuk memantau temperatur *high pressure (HP) steam* sebagai parameter batas operasional.

Rancangan penelitian menggunakan pendekatan eksperimental lapangan (*field experiment*) dengan menetapkan variabel tetap, variabel bebas, dan variabel terikat. Variabel tetap meliputi kondisi operasi *heater*, yaitu total feed HCU sebesar 140 m³/jam, temperatur *coil outlet temperature (COT)* sebesar 395°C untuk fresh feed dan 375°C untuk *recycle feed*, jumlah *burner* aktif sebanyak 9 dari total 24 burner, serta batas minimum temperatur HP *steam* sebesar 320°C. Jenis bahan bakar yang digunakan adalah campuran gas oil dan reduced crude. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah tingkat bukaan damper (diturunkan secara bertahap dari 55° hingga 35°) serta tingkat pembukaan air register pada burner yang tidak aktif. Variabel terikat yang diamati meliputi konsumsi *fuel oil*, kadar *O₂ excess*, temperatur *stack* sebagai indikator kehilangan panas, serta temperatur HP *steam* untuk memastikan batas keamanan operasi tetap terpenuhi.

2.2 Prosedur Percobaan

Prosedur percobaan dilakukan secara bertahap dalam kondisi operasi normal unit dengan pendekatan time-series monitoring selama beberapa shift kerja. Pada tahap pertama, dilakukan pengurangan bukaan damper secara bertahap dari 55° ke 50°, kemudian dilanjutkan hingga 35° dengan interval pengamatan setiap jam selama satu shift (8 jam) dan dilanjutkan pemantauan hingga 24 jam untuk melihat kestabilan sistem. Parameter

yang diamati meliputi kadar O_2 , temperatur *stack*, konsumsi fuel oil, temperatur COT, dan temperatur HP steam. Pada tahap kedua, dilakukan optimasi distribusi udara dengan menutup *air register* pada *burner* yang tidak aktif secara bertahap, dengan tetap menjaga kestabilan nyala api dan memastikan kadar O_2 tidak kurang dari 5% untuk menghindari pembakaran tidak sempurna. Setiap perubahan kondisi diikuti dengan pencatatan parameter secara berkala untuk memperoleh data tren yang representatif.

Rancangan pengamatan data difokuskan pada analisis komparatif sebelum dan sesudah perlakuan optimasi *draft heater*. Data yang dikumpulkan meliputi konsumsi *fuel oil*, kadar O_2 *excess*, dan temperatur *stack*. Selain itu, dilakukan perhitungan rata-rata penurunan konsumsi bahan bakar serta estimasi pengurangan emisi berbasis konversi fuel oil terhadap emisi CO_2 ekuivalen.

Pelaksanaan percobaan dilakukan pada kondisi operasi normal pada periode Oktober 2025 dengan mempertimbangkan stabilitas proses dan keselamatan operasi. Seluruh kegiatan dilakukan berdasarkan persetujuan resmi dari pihak operasional melalui *standing order* dari *Senior Supervisor*. Analisis data dilakukan menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan perbandingan data aktual sebelum dan sesudah optimasi, serta analisis tren untuk mengevaluasi pengaruh penyesuaian *draft* terhadap efisiensi konsumsi energi dan penurunan emisi gas buang.

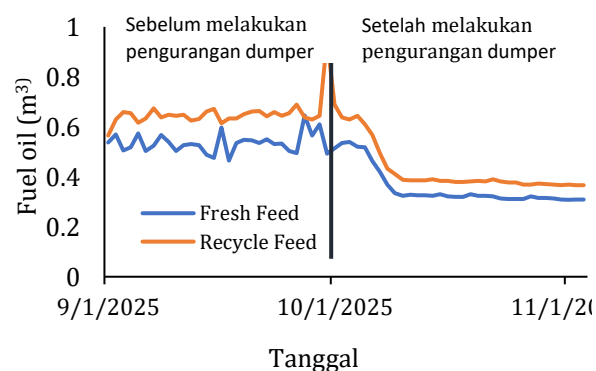
3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini dilaksanakan pada periode 5–8 Oktober 2025 untuk optimasi bukaan *dampers* serta 9–10 Oktober 2025 untuk penyesuaian *air register* pada *burner* yang tidak beroperasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa strategi penyesuaian *draft heater* memberikan dampak signifikan terhadap konsumsi *fuel oil*, efisiensi termal, dan emisi gas buang

3.1 Hasil Penelitian

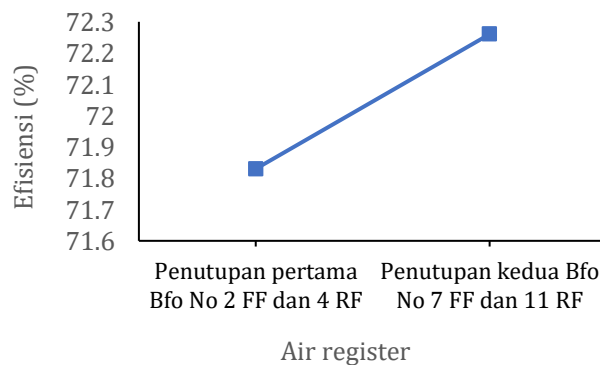
Penghematan konsumsi fuel oil merupakan indikator utama keberhasilan optimasi. Sebelum dilakukan optimasi (1 September–4 Oktober 2025), konsumsi bahan bakar relatif tinggi dan fluktuatif dengan rata-rata total sebesar $1,1868 \text{ m}^3/\text{jam}$ (gabungan *fresh feed* dan *recycle feed*) seperti ditunjukkan

pada Gambar 1. Setelah dilakukan pengurangan bukaan *dampers* secara bertahap hingga 35° dan penyesuaian air register (5 Oktober–3 November 2025), konsumsi *fuel oil* menurun signifikan menjadi $0,7345 \text{ m}^3/\text{jam}$. Penurunan sebesar $0,4523 \text{ m}^3/\text{jam}$ ($\approx 38,1\%$) ini menunjukkan peningkatan efisiensi pemanfaatan energi panas dalam *furnace*. Jika dikonversi, penghematan mencapai 68,28 barrel/hari atau sekitar 2.048 barrel/bulan, dengan potensi penghematan ekonomi sebesar $\pm 152.804 \text{ USD/bulan}$. Penurunan konsumsi bahan bakar ini sejalan dengan teori bahwa pengurangan *excess air* dan optimasi distribusi udara pembakaran mampu menurunkan *losses* akibat gas buang dan meningkatkan efisiensi pembakaran[13].



Gambar 1. Pemakaian *fuel oil* sebelum dan sesudah penelitian

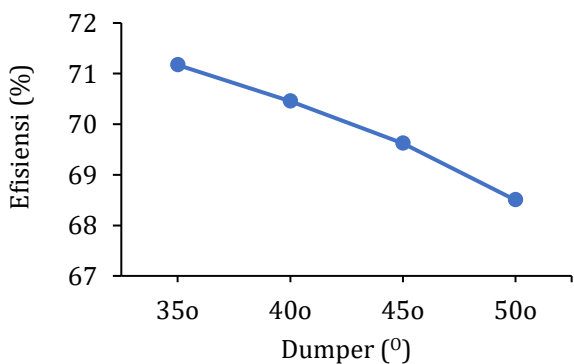
Dari sisi efisiensi termal, terjadi peningkatan dari 67,35% sebelum optimasi menjadi maksimum 72,26% setelah optimasi. Peningkatan ini dipengaruhi oleh pengurangan kehilangan panas melalui gas buang (*flue gas loss*) akibat penurunan temperatur *stack* dan *excess air* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Penutupan *air register* terhadap efisiensi

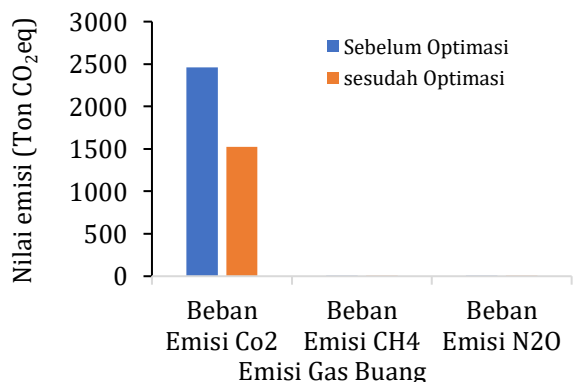
Pengaruh bukaan *dampers* terhadap efisiensi diperlihatkan pada Gambar 3. Efisiensi

tertinggi tercapai pada kombinasi bukaan damper 35° dan penutupan *air register* pada *burner* non-aktif. Hasil ini konsisten dengan penelitian yang menyatakan bahwa efisiensi furnace sangat dipengaruhi oleh kontrol udara pembakaran dan draft, di mana pengurangan *excess air* dapat meningkatkan efisiensi hingga 5-10%[14, 15].



Gambar 3. Pengaruh bukaan damper terhadap efisiensi

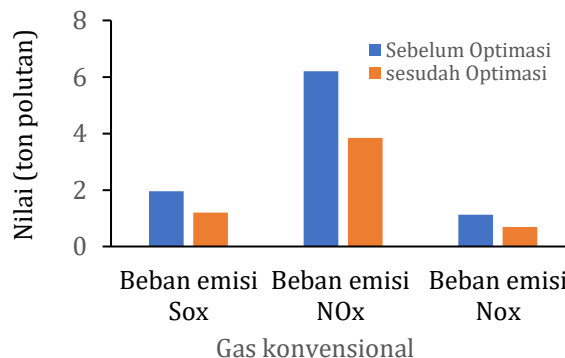
Dari aspek lingkungan, optimasi *draft heater* juga berdampak signifikan terhadap penurunan emisi gas buang. emisi CO₂ menurun secara dominan seiring dengan berkurangnya konsumsi *fuel oil*, sementara emisi CH₄ dan N₂O juga mengalami penurunan yang menunjukkan perbaikan kualitas pembakaran seperti diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Penurunan emisi gas buang

Selain itu, Gambar 5 juga mengindikasikan penurunan emisi konvensional, seperti SO_x dan NO_x mengalami penurunan konsisten. Penurunan NO_x berkaitan erat dengan berkurangnya *excess air* dan temperatur puncak nyala api, sedangkan penurunan SO_x dipengaruhi langsung oleh berkurangnya konsumsi bahan bakar berbasis sulfur[16, 17].

Hal ini menunjukkan bahwa optimasi draft tidak hanya berdampak pada efisiensi energi, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca dan polutan udara.

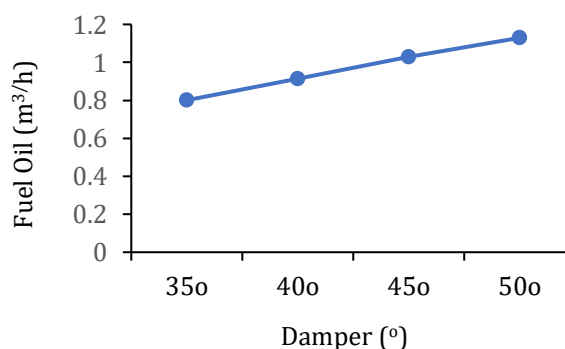


Gambar 4. Penurunan gas konvensional

3.2 Pembahasan

3.2.1 Pengaruh Bukaan Damper

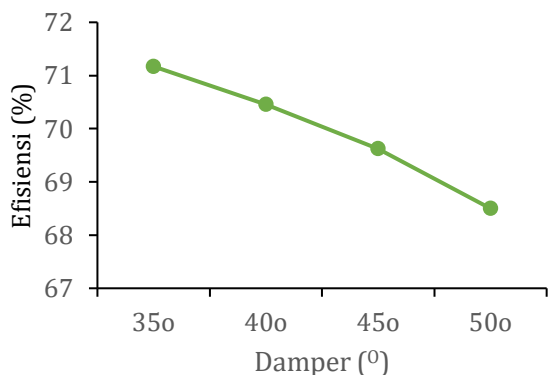
Pengaruh *damper* terhadap *fuel oil* diperlihatkan pada Gambar 6. Gambar 6 memperlihatkan bahwa penurunan bukaan damper terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap konsumsi *fuel oil* dan efisiensi heater. Pada kondisi awal damper 55° (diasumsikan sebagai rata-rata awal), konsumsi *fuel oil* gabungan FF dan RF adalah 1,19 m³/h. Setelah damper diturunkan ke bukaan 35°, konsumsi *fuel oil* gabungan turun menjadi 0,80 m³/h.



Gambar 5. Pengaruh damper terhadap fuel oil

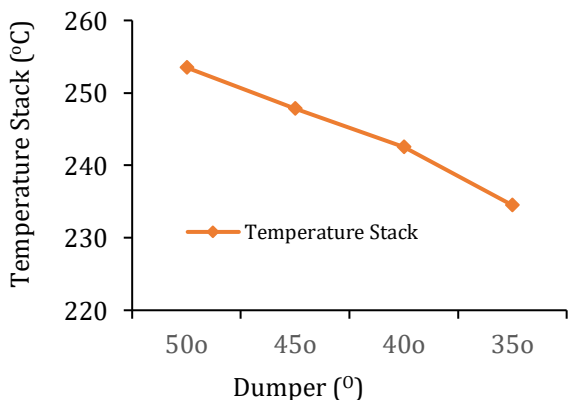
Secara mekanisme, pengurangan bukaan damper mengurangi laju aliran flue gas yang keluar melalui stack, sehingga meningkatkan waktu tinggal (*residence time*) gas panas di dalam *furnace*. Hal ini memungkinkan transfer panas yang lebih optimal ke fluida proses di dalam coil, sehingga kebutuhan bahan bakar untuk mencapai temperatur *outlet* yang diinginkan menjadi lebih rendah. Sistem kontrol otomatis pada *heater* akan merespons kenaikan

temperatur dengan menurunkan aliran *fuel oil*, yang pada akhirnya menghasilkan efisiensi energi yang lebih tinggi seperti diperlihatkan pada Gambar 7. Fenomena ini sesuai dengan prinsip dasar perpindahan panas pada *furnace* industri, di mana efisiensi meningkat ketika kehilangan panas melalui gas buang dapat diminimalkan[18, 19].



Gambar 6. Pengaruh damper terhadap efisiensi

Selain itu, penurunan bukaan damper juga berdampak langsung terhadap penurunan temperatur *stack* seperti diperlihatkan pada Gambar 8. Gambar 8 menunjukkan bahwa temperatur *stack* menurun dari sekitar 253,5°C menjadi 234,5°C seiring dengan penurunan bukaan damper. Penurunan ini mengindikasikan berkurangnya energi panas yang terbuang ke lingkungan. Dalam sistem pembakaran, temperatur *stack* yang lebih rendah (dalam batas aman) merupakan indikator peningkatan efisiensi termal karena lebih banyak energi yang diserap oleh fluida proses[20].



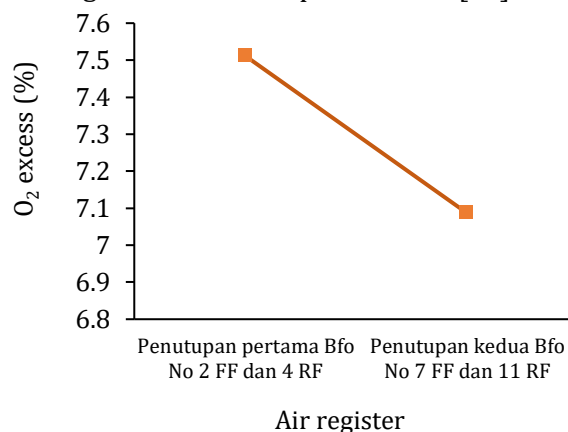
Gambar 7. Pengaruh bukaan *damper* terhadap *temperature stack*

3.2.2 Dampak Air Register

Penutupan *Air Register* terbukti menjadi langkah paling efektif dalam mengendalikan

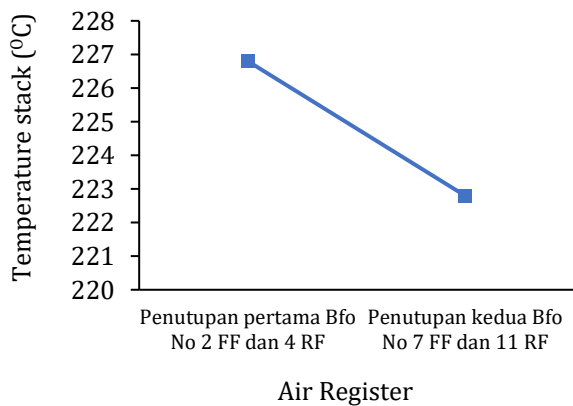
volume udara yang masuk ke *furnace*. Meskipun pengurangan *dumper* telah menekan O_2 excess hingga 7,98% (pada 35° damper), penutupan 4 *Air Register* (*AR Close 2*) berhasil menekan O_2 excess lebih lanjut hingga level terendah 7,09%.

Penyesuaian *air register* pada *burner* yang tidak beroperasi memberikan dampak yang lebih spesifik terhadap pengendalian *excess air*, seperti diperlihatkan pada Gambar 9. Penurunan ini menunjukkan berkurangnya udara berlebih (*excess air*) yang tidak berkontribusi pada proses pembakaran. Udara berlebih yang terlalu tinggi dapat meningkatkan kehilangan panas karena udara tersebut ikut dipanaskan dan dibuang melalui *stack* tanpa memberikan kontribusi energi. Oleh karena itu, pengurangan *excess air* merupakan strategi penting dalam meningkatkan efisiensi pembakaran[21].



Gambar 8. Pengaruh penutupan *air register* terhadap O_2 excess

Gambar 10 menunjukkan dampak lanjutan dari penurunan *excess air* yaitu peningkatan efisiensi termal dan penurunan temperatur *stack* hingga mencapai 222,8°C. Kondisi ini menunjukkan bahwa kombinasi antara pengaturan damper dan penutupan *air register* mampu menciptakan kondisi pembakaran yang lebih ideal. Selain itu, penurunan *excess air* juga berkontribusi pada penurunan emisi NO_x , karena pembentukan NO_x sangat dipengaruhi oleh konsentrasi oksigen dan temperatur nyala api. Semakin rendah *excess air*, semakin kecil peluang terbentuknya NO_x melalui mekanisme thermal NO_x [22].



Gambar 9. Pengaruh penutupan *air register* terhadap penurunan temperatur *stack*

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa strategi penyesuaian *draft heater* melalui pengurangan bukaan damper dan penutupan air register pada *burner* yang tidak beroperasi memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kinerja *Heater*. Pengurangan bukaan damper hingga 35° terbukti mampu menurunkan konsumsi fuel oil secara signifikan sebesar 0,4523 m³/jam atau sekitar 38,1%, yang setara dengan penghematan 68,28 barrel/hari. Selain itu, efisiensi *heater* meningkat dari 67,35% menjadi 72,26% akibat berkurangnya kehilangan panas melalui gas buang, yang ditunjukkan oleh penurunan temperatur *stack* dan kadar O₂ excess.

Penyesuaian *air register* memberikan kontribusi tambahan dalam mengoptimalkan pembakaran dengan menekan masuknya udara berlebih, sehingga kadar O₂ excess dapat diturunkan hingga 7,09%. Kondisi ini menghasilkan pembakaran yang lebih efisien dan stabil, serta menurunkan pembentukan emisi gas buang seperti CO₂, NO_x, dan SO_x. Secara keseluruhan, kombinasi kedua strategi tersebut terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi energi sekaligus mengurangi dampak lingkungan.

Penelitian ini menegaskan bahwa optimasi parameter operasional yang relatif sederhana, seperti pengaturan *draft heater*, dapat memberikan manfaat teknis dan ekonomis yang signifikan tanpa memerlukan investasi tambahan pada peralatan. Oleh karena itu, strategi ini direkomendasikan untuk diterapkan secara berkelanjutan pada operasi *heater*

industri, khususnya pada unit *hydrocracking* dengan karakteristik serupa.

Daftar Pustaka

- [1] Ramadhan, M. F., Prasetya, K. H., & Waskita, K. J., 2026. *Analisis dampak limbah hasil pengelolaan minyak dan gas terhadap lingkungan dan masyarakat sekitar industri minyak dan gas*. Journal of Industrial Engineering and Technology, Vol. 2, No. 1, pp. 131-138.
- [2] Kuznetsov, P., Dement'ev, K., Palankoev, T., & Maximov, A., 2024. *Direct electric heating in chemical processes (a review)*. Petroleum Chemistry, Vol. 64, No. 6, pp. 633-647.
- [3] Saputro, E. A., Annisa, N., Midayoga, D. N. F., & Wuryanto, D. H., 2025. *Evaluasi efisiensi kinerja furnace f-03 pada unit kilang di pusat pengembangan sumber daya manusia minyak dan gas bu*. Machine: Jurnal Teknik Mesin, Vol. 11, No. 2, pp. 99-105.
- [4] Parapat, R. Y., Adhystie Rizkya, N., Bayyanu, B. P., Khodarrohmah, N., Putri, S. R., & Della, S. A., 2026. *Pengendalian proses efisiensi energi: Strategi pengurangan konsumsi energi dan emisi*. Integrative Perspectives of Social and Science Journal, Vol. 3, No. 01 Januari, pp. 507-529.
- [5] Yang, W. et al., 2019. *Combustion optimization and nox reduction of a 600 mwe down-fired boiler by rearrangement of swirl burner and introduction of separated over-fire air*. Journal of Cleaner Production, Vol. 210, pp. 1120-1130.
- [6] Borate, M., Deshmukh, P., & Shetty, A., 2021. *Industrial furnace optimization by robust design for efficiency upgradation and adaptability to different loads*. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, Vol. 102, No. 2, pp. 477-483.
- [7] Liu, Z. et al., 2020. *Comprehensive technologies for iron ore sintering with a bed height of 1000 mm to improve sinter quality, enhance productivity and reduce fuel consumption*. ISIJ International, Vol. 60, No. 11, pp. 2400-2407.
- [8] Andriiovych Kuropyatnyk, O. & Victorovych Sagin, S., 2019. *Exhaust gas recirculation as a major technique designed to reduce nox emissions from marine diesel engines*. NAŠE MORE: znanstveni časopis

- za more i pomorstvo, Vol. 66, No. 1, pp. 1-9.
- [9] Yentumi, R., Dorneanu, B., & Arellano-Garcia, H., 2022. *Optimal operation of an industrial natural gas fired natural draft heater*. Chemical Engineering Journal Advances, Vol. 11, p. 100354.
- [10] Majka, M., Tomaszewicz, G., & Mianowski, A., 2018. *Experimental study on the coal tar hydrocracking process over different catalysts*. Journal of the Energy Institute, Vol. 91, No. 6, pp. 1164-1176.
- [11] Sadeghalvaad, M., Razavi, S. R., Sabbaghi, S., & Rasouli, K., 2023. *Heating performance of a large-scale line heater by adding synthesized carbon-nanodots to the heater bath fluid: Cfd simulation and experimental study*. Advanced Powder Technology, Vol. 34, No. 3, p. 103960.
- [12] Ahmad, A. & Ding, Y., 2021. *A thermochemical energy storage based cooling and heating system: Modelling, experimental validation and lab-scale demonstration*. Energy Conversion and Management, Vol. 247, p. 114748.
- [13] Mirzaei, M., Ahmadi, M. H., Mobin, M., Nazari, M. A., & Alayi, R., 2018. *Energy, exergy and economics analysis of an orc working with several fluids and utilizes smelting furnace gases as heat source*. Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 5, pp. 230-237.
- [14] Wang, S., Sun, Y., Yang, J., & Wang, H., 2024. *Effect of excess air ratio and ignition timing on the combustion and emission characteristics of the ammonia-hydrogen wankel rotary engine*. Energy, Vol. 302, p. 131779.
- [15] Lou, D., Liu, Y., & Zhang, Y., 2025. *Influence of compression ratio on combustion and emission characteristics of hydrogen internal combustion engines under different excess air coefficients*. Energies, Vol. 18, No. 7, p. 1656.
- [16] Fajri, H. R., Jafari, M. J., Shamekhi, A. H., & Jazayeri, S. A., 2017. *A numerical investigation of the effects of combustion parameters on the performance of a compression ignition engine toward nox emission reduction*. Journal of Cleaner Production, Vol. 167, pp. 140-153.
- [17] Koziół, M., 2020. *The effect of the ratio of excess air and the process time on co and nox emissions from the combustion of alternative fuel in a grate furnace*. in *E3S Web of Conferences*, Vol. 154: EDP Sciences.
- [18] Chunsheng, W., Yan, Z., Zejun, L., & Fuxiang, Y., 2019. *Heat transfer simulation and thermal efficiency analysis of new vertical heating furnace*. Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 13, p. 100414.
- [19] Kaya, D., Çanka Kılıç, F., & Öztürk, H. H., 2021. *Energy efficiency in furnaces, in Energy management and energy efficiency in industry: Practical examples*: Springer, pp. 307-327.
- [20] Dahham, R. Y., Wei, H., & Pan, J., 2022. *Improving thermal efficiency of internal combustion engines: Recent progress and remaining challenges*. Energies, Vol. 15, No. 17, p. 6222.
- [21] Shu, J. et al., 2019. *Influences of excess air coefficient on combustion and emission performance of diesel pilot ignition natural gas engine by coupling computational fluid dynamics with reduced chemical kinetic model*. Energy Conversion and Management, Vol. 187, pp. 283-296.
- [22] Li, X., Li, S., Li, Z., Chen, Z., & Qin, Y., 2024. *Studies on nox formation and reduction characteristics in high-ash, low-volatile coal combustion by mechanism experiments and industrial-scale trials*. Applied Thermal Engineering, Vol. 256, p. 124167.