

Effect of Air-Fuel Ratio to Non-premixed Burning Characteristics in Boiler Furnace Using CFD

Heri Santoso^{1,*}, Teguh Hady Ariwibowo² dan Arrad Ghani Safitra²

¹Prodi Sarjana Terapan Sistem Pembangkit Energi, Departemen Teknik Mekanika dan Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya - Surabaya

²Departemen Teknik Mekanika dan Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya - Surabaya

*Korespondensi: herisantos25@gmail.com

Abstract. The combustion process still dominated the energy generation process in the present and future of Indonesia. One of way to optimize the combustion process is adjusting the air-fuel ratio (AFR) appropriately. This study investigated the effect of AFR on the temperature and emissions of natural gas combustion in 85 MWe furnace based on computational fluid dynamics. The k- ϵ RNG turbulence model, non-premixed combustion model, and Discrete Ordinates radiation model are used to simulate the combustion process. The simulation run on six AFR variations. The simulation results show that the flame temperature tend to increase at AFR 16.7 - 17.2 kg air/kg fuel and tends to decrease at AFR 17.2 - 19.2 kg air/kg fuel. While the exhaust gas temperature at the furnace outlet tends to decrease in the arrangement of AFR 16.7 - 19.2 kg air/kg fuel. AFR variation give insignificant effect on CO₂ formation. The O₂ concentration on the furnace outlet increased from 1.96% to 3.59% mole fraction as AFR increased. Increased AFR values contributed in reducing CO emissions from 1.54% to 0.89% mole fraction, and CH₄ concentrations decreased from 1.16% to 0.38% mole fraction. AFR 18.7 kg air/kg fuel has the highest combustion efficiency with the production of CO and CH₄ of 1% and 0.59% mole fraction, and the remaining O₂ in the furnace outlet maximum of 2.89% mole fraction.

Abstrak. Proses pembakaran masih mendominasi proses pembangkitan energi di Indonesia kini dan masa mendatang. Salah satu upaya untuk mengoptimalkan proses pembakaran adalah mengatur *air-fuel ratio (AFR)* dengan tepat. Studi ini menginvestigasi pengaruh *AFR* terhadap temperatur dan emisi gas buang pembakaran gas alam pada *boiler furnace* 85 MWe berbasis *computational fluid dynamics*. Model turbulensi *k- ϵ RNG*, pembakaran *non-premixed*, dan perpindahan panas radiasi *Discrete Ordinates* digunakan untuk menyimulasikan proses pembakaran. Simulasi dijalankan pada enam variasi AFR. Hasil simulasi menunjukkan temperatur api cenderung meningkat pada AFR 16.7 - 17.2 kg air/kg fuel dan cenderung menurun pada AFR 17.2 - 19.2 kg air/kg fuel. Sedangkan temperatur gas buang pada *furnace outlet* cenderung menurun pada pengaturan AFR 16.7 – 19.2 kg air/kg fuel. Variasi AFR tidak berpengaruh signifikan terhadap pembentukan CO₂. Konsentrasi O₂ pada *furnace outlet* meningkat dari 1.96% menjadi 3.59% fraksi mol seiring meningkatnya AFR. Peningkatan nilai AFR berkontribusi dalam menurunkan emisi CO dari 1.54% menjadi 0.89% fraksi mol, serta konsentrasi CH₄ menurun dari 1.16% menjadi 0.38% fraksi mol. AFR 18.7 kg air/kg fuel memiliki efisiensi pembakaran tertinggi dengan produksi CO dan CH₄ sebesar 1% dan 0.59% fraksi mol, serta sisa O₂ pada *furnace outlet* maksimum sebesar 2.89% fraksi mol.

Kata kunci: air-fuel ratio, CFD, emisi gas buang, pembakaran non-premixed, temperatur

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Hingga tahun 2014, dari total kapasitas pembangkit nasional sebesar 52 GW, lebih dari 80% masih didominasi oleh pembangkit berbahan bakar energi fosil. Pembangkit berbahan bakar batubara mendominasi dengan pangsa 50% (26 MW), diikuti oleh gas alam 23% (12 GW) dan minyak 14% (7.5%) [1]. Sejalan dengan peningkatan target rasio elektrifikasi hingga 99.7% pada tahun 2025, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) masih akan mendominasi tambahan kapasitas pembangkit listrik yang dibutuhkan selama rentang waktu tersebut [2]. Hal ini mengindikasikan bahwa proses

pembakaran tetap diandalkan dalam proses pembangkitan energi di Indonesia.

Proses pembakaran pada *boiler PLTU* adalah jenis pembakaran *non-premixed*, dimana bahan bakar dan udara masuk ke dalam *furnace* melalui saluran yang berbeda [3]. Pada *boiler*, terdapat dua proses utama yang bekerja yaitu pembakaran dan perpindahan panas. Pembakaran bertujuan melepasan energi panas dari bahan bakar menggunakan *firing equipment*. Sedangkan perpindahan panas terjadi antara gas buang hasil pembakaran dengan air atau uap air di dalam *tube-tube heat exchanger boiler*. Salah satu metode untuk mengoptimalkan

proses pembakaran adalah dengan mengatur nilai *air-fuel ratio* (AFR) yang digunakan pada proses pembakaran [5-7]. Analisis berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) cukup handal dalam memprediksi karakteristik pembakaran di dalam ruang bakar mendekati kondisi aktualnya.

Oh, dkk melakukan studi eksperimen dan numerik pembakaran *non-premixed* gas alam sintetis dengan udara pada ruang bakar skala laboratorium dengan variasi komposisi bahan bakar untuk mengetahui stabilitas nyala api dan temperatur di dalam ruang bakar. [8]. Ziani, dkk melakukan simulasi CFD pembakaran *non-premixed* turbulen dengan menggunakan pendekatan *Probability Density Function* (PDF) untuk memprediksi pengaruh penambahan hidrogen terhadap temperatur pembakaran dan pembentukan NO_x [9]. Li, dkk menggunakan pendekatan CFD untuk mensimulasikan aliran, pembakaran, perpindahan panas, dan pembentukan NO_x pada sisi gas buang di dalam *refining vacuum furnace* dengan *burner non-premixed* terpasang pada lantai ruang bakar serta menggunakan bahan bakar metana [10].

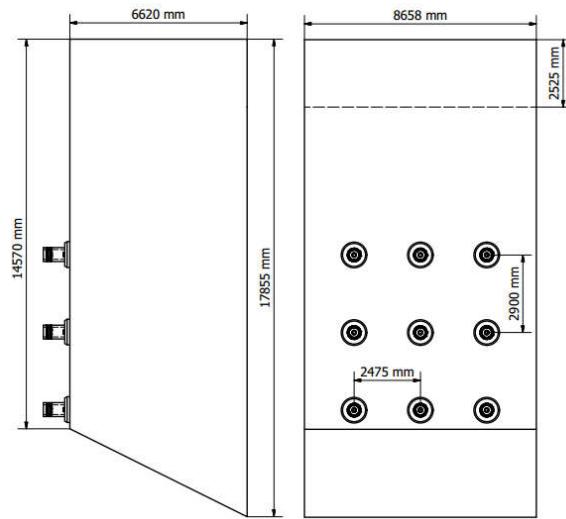
Pada penelitian ini metode CFD digunakan untuk memprediksi pengaruh AFR terhadap profil temperatur pembakaran dan emisi gas buang dari pembakaran gas alam yang meliputi CO₂, O₂, CO dan *unburned hydrocarbon* (CH₄) [11,12]. Simulasi dijalankan secara 3D, skala 1:1, pada bagian *boiler furnace* dan kondisi *steady*. Variasi nilai AFR dihitung berdasarkan pengaturan *excess air* pembakaran gas alam dengan laju aliran bahan bakar konstan. Data masukan dan geometri *boiler furnace* diambil dari data operasi PLTU unit 2 PT. XYZ periode *Performance Test* bulan Januari 2017. Melalui simulasi ini diharapkan didapatkan metode untuk mengoptimalkan proses pembakaran *non-premixed* gas alam di dalam ruang bakar *boiler* melalui pengaturan *air-fuel ratio* yang tepat dan rendah emisi.

Metode Simulasi Numerik

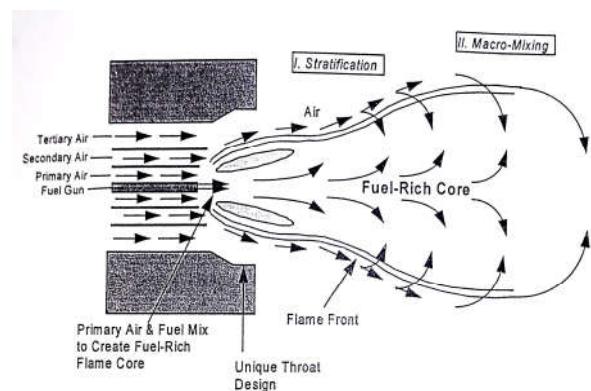
Pemodelan Boiler Furnace. Boiler yang dimodelkan pada simulasi ini adalah jenis *water-tube boiler*. Sedangkan metode pembakaran yang diterapkan adalah *wall firing* atau proses pembakaran dilakukan di salah satu dinding *boiler furnace* [4]. Desain 2D dan 3D *boiler furnace* beserta detil dimensi dan konfigurasi *burner* ditunjukkan pada gambar 1.

Burner yang digunakan pada boiler PT X adalah jenis *Radially Stratified Flame Core (RSFC) burners* [19]. Pada kondisi beban penuh, semua *burner* (9 buah) akan beroperasi. Desain RSFC burners terdiri atas *fuel nozzle* yang terletak pada pusat *burner*. Sedangkan udara pembakaran disu-

plai oleh 3 (tiga) laluan konsentris di sekeliling *fuel nozzle* yaitu zona udara primer, sekunder, dan tersier sebagaimana dideskripsikan pada gambar 2.

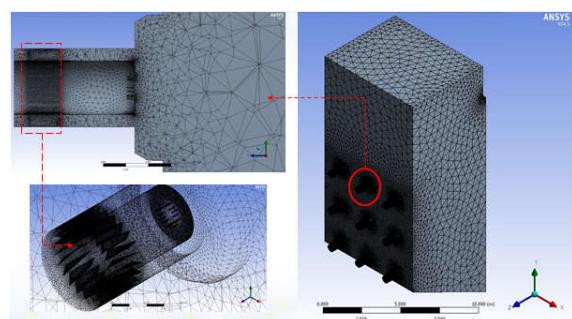


Gambar 1. Wall firing boiler 85 MWe



Gambar 2. Skema mixing RSFC burner

Tahap awal pemodelan CFD adalah tahap *pre-processing* yaitu penggambaran objek geometri simulasi secara 3D dan pembuatan *grid mesh*. Keakurasaan metode CFD sangat dipengaruhi oleh jumlah sel pada *grid* [17].



Gambar 3. Grid pada furnace dan burner

Kondisi Operasi. Pada simulasi ini kondisi operasi yang diterapkan adalah *steady* dengan beban

boiler 85 MWe. Nilai AFR teoritis dihitung dengan persamaan berikut :

$$AFR_{teori} = Mr_{udara} / Mr_{gas alam} \quad (1)$$

Pengaturan udara lebihan pada proses pembakaran gas alam yang optimal yaitu antara 3 – 15% dari jumlah udara teoritis [15]. Nilai AFR aktual adalah nilai AFR teoritis ditambah dengan udara lebihan. Sehingga nilai AFR aktual dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut :

$$AFR_{aktual} = AFR_{teori} \times (1 + \text{udara lebihan}) \quad (2)$$

Pemodelan Aliran. Model *Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)* memberikan pendekatan paling ekonomis untuk komputasi aliran turbulen kompleks. Model turbulensi $k-\epsilon$ RNG berasal dari persamaan *Navier Stokes* dengan menggunakan metode matematis yang dikenal dengan *renormalized group (RNG)*. Model *RNG* memiliki keunggulan akurat dalam memodelkan efek aliran berpusar (*swirling*) [17, 18].

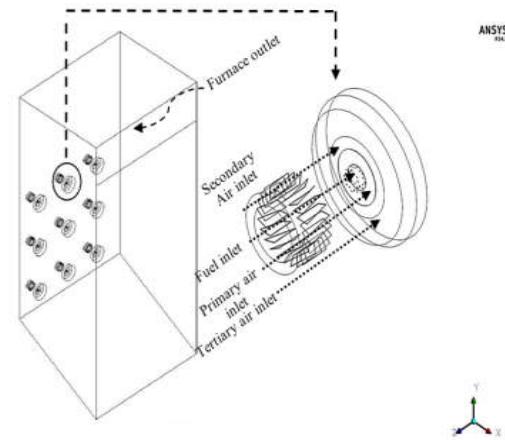
Pemodelan Pembakaran. Pada model pembakaran *non-premixed*, bahan bakar dan *oxydizer* memasuki zona reaksi dalam aliran yang berbeda. Pemodelan turbulensi dari nyala api model ini menggunakan pendekatan persamaan *transport* satu atau dua skalar (fraksi campuran) [18]. Pembakaran disederhanakan menjadi permasalahan pencampuran. Fraksi campuran dinotasikan sebagai f , dimana merupakan fraksi massa yang ditentukan dari aliran bahan bakar. Fraksi campuran dapat dirumuskan dalam ketentuan fraksi massa atom sebagai berikut:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (3)$$

Pemodelan Radiasi. Model *discrete ordinates* memungkinkan penyelesaian masalah radiasi dari api *non-premixed* terhadap permukaan dinding ruang bakar dalam kasus pembakaran dengan mempertimbangkan koefisien absorpsi gas buang [8]. Model *weighted-sum-of-gray-gases model (WSGGM)* digunakan untuk komputasi parameter koefisien absorpsi [18]. Pancaran radiasi didominasi oleh gas CO_2 dan H_2O pada gas buang.

Kondisi Batas. Pada simulasi ini *solver* yang dipilih adalah *pressure-based*. *Materials* yang digunakan yaitu fraksi campuran *PDF* yang terdiri atas spesies-spesies kimia bahan bakar gas alam dan udara, dan material *solid* dipilih *steel* sebagai material dinding *furnace*. Pada *inlet* bahan bakar, udara pembakaran primer, sekunder dan tersier menggunakan kondisi batas jenis *mass flow inlet*. Kondisi batas dinding *furnace* atau *waterwall tube* dipilih jenis *wall*. Sedangkan, kondisi batas *furnace*

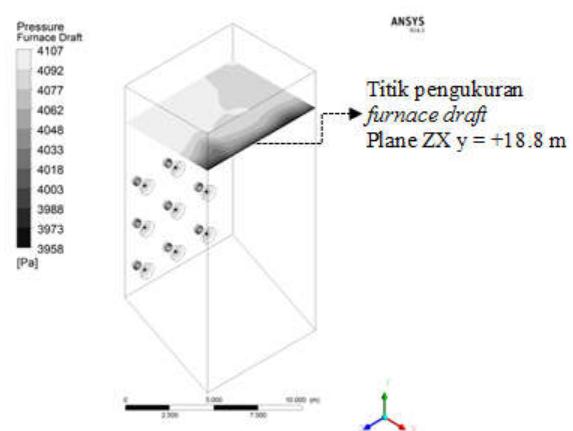
outlet dipilih *pressure outlet* dimana menghasilkan laju konvergensi lebih baik ketika terjadi *backflow*. Metode penyelesaian atau kalkulasi pada simulasi ini menerapkan skema *pressure-velocity coupling* dengan algoritma *SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations* [6, 8, 9, 11, 12]. Kalkulasi variabel *density*, *momentum*, *turbulent kinetic*, *turbulent dissipation*, *energy*, *mean mixture fraction*, *mixture fraction variance* menggunakan metode *first order upwind*.



Gambar 4. Domain *inlet* dan *outlet* simulasi

Hasil dan Pembahasan

Validasi. Simulasi ini dijalankan dengan iterasi hingga 10.000. *Monitoring* variabel aliran selama iterasi menunjukkan *residual* telah stagnan dan tidak menunjukkan perubahan dengan iterasi yang lebih banyak. Hal ini sudah bisa dipertimbangkan sebagai solusi yang konvergen. Pada pengujian *imbalance* kesetimbangan massa dengan menghitung *error* antara *results* dan *net results* menunjukkan rata-rata *error* tiap variasi yang memenuhi syarat konvergensi yaitu 0.045% atau kurang dari 0.2% [17]. Selain itu, dilakukan validasi hasil simulasi dengan data industri yaitu *furnace draft*. Didapatkan nilai *error* rata-rata tiap variasi adalah 3.5%.



Gambar 5. Pengambilan data *furnace draft*

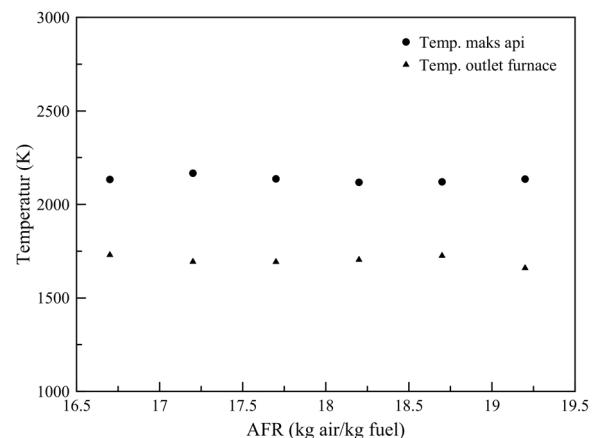
Pengaruh AFR terhadap Temperatur. Tujuan pembakaran pada *furnace* adalah untuk mengubah energi kimia di dalam bahan bakar menjadi panas untuk mengubah fase fluida kerja. Efisiensi pembakaran sering kali dikaitkan dengan temperatur di dalam *furnace* [11]. Temperatur api adalah variabel kritis dalam menentukan perpindahan panas dari api atau gas buang terhadap beban pemanasan (fluida kerja yang mengalir pada *tube waterwall*). Temperatur api adalah fungsi campuran bahan bakar dan udara. Pada gambar 9 menunjukkan kontur temperatur pada semua variasi menunjukkan temperatur yang tinggi antara 1800 – 2200 K di area ruang bakar yang ditandai warna terang. Kemudian berangsurg-angsur menurun hingga mendekati *furnace outlet*.

Berdasarkan gambar 9 diketahui bahwa temperatur pembakaran yang dihasilkan *burner* elevasi paling atas lebih tinggi daripada *burner* pada baris bawah. Hal ini terjadi karena *burner* elevasi atas menerima energi panas tambahan dari hasil pembakaran *burner* baris bawah dan tengah. Sehingga sisa-sisa *unburned hydrocarbon* hasil pembakaran *burner* baris bawah dan tengah bereaksi kembali dengan *oxydizer* yang disuplai dari *burner* pada baris atas. Temperatur tinggi pada bagian bawah ruang bakar disebabkan adanya pembakaran gas alam di tiap *burner*.

Variasi laju aliran udara pembakaran menyebabkan meningkatnya temperatur api oleh adanya *excess air* yang ditambahkan pada proses pembakaran. Sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 6, peningkatan AFR memberikan pengaruh signifikan terhadap distribusi temperatur. Temperatur maksimum api cenderung meningkat dari 2133.6 K hingga 2167.03 K pada nilai AFR 16.7 hingga 17.2 kg air/kg fuel. Di lain sisi, temperatur api cenderung menurun dari 2167.03 K menjadi 2135.46 K pada nilai AFR 17.2 – 19.2 kg air/kg fuel. Hal ini diketahui dari kontur yang semakin dipenuhi warna gelap, yang mengindikasikan temperatur gas buang yang lebih rendah. *Excess air* mampu mengompensasi kebutuhan udara untuk menyempurnakan pencampuran antara bahan bakar dan udara pembakaran. Sehingga, energi yang terkandung di dalam gas alam dapat sepenuhnya dikonversi menjadi panas. Namun, terlalu banyak suplai *excess air* pada proses pembakaran akan menyebabkan temperatur api menurun. Karena suplai *excess air* yang terlalu besar menyebabkan penyerapan panas yang lebih besar oleh gas N₂ di dalam udara pembakaran.

Temperatur gas buang pada *furnace outlet* merupakan variabel penting dalam pembakaran. Karena, akan mempengaruhi perpindahan panas antara gas buang dengan jajaran *heat exchanger*

yaitu *tube superheater* dan *economizer*. Sebelum masuk jajaran *heat exchanger*, temperatur diharapkan sudah mulai turun dan pembakaran tidak terjadi lagi. Penyerapan panas oleh *waterwall tube* di sekeliling ruang bakar menyebabkan temperatur *furnace outlet* menjadi lebih rendah. Sebagaimana gambar 6, hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan memvariasikan udara pembakaran, temperatur gas buang pada *furnace outlet* cenderung menurun pada pengaturan AFR 16.7 – 19.2 kg air/kg fuel, yaitu dari 1729.86 K menjadi 1659.64 K.

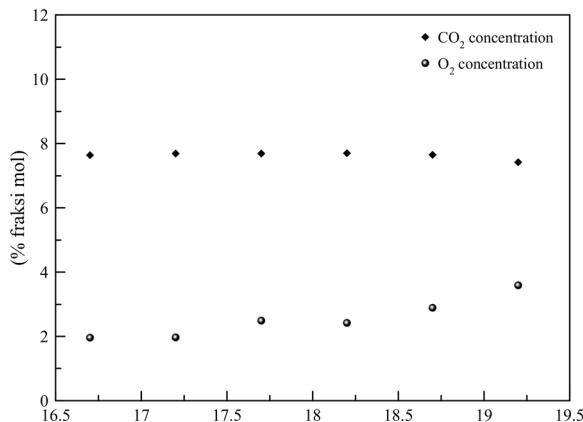


Gambar 6. Distribusi temperatur pada variasi AFR

Pengaruh AFR terhadap Emisi. Pengamatan terhadap pembentukan polutan dilakukan untuk mengetahui tingkat kesempurnaan pembakaran. CO₂ merupakan komponen utama produk pembakaran. Variasi laju aliran udara pembakaran diketahui tidak berpengaruh signifikan terhadap pembentukan CO₂. Diketahui bahwa konsentrasi CO₂ pada *furnace outlet* cenderung konstan pada 7.6% fraksi mol pada semua variasi AFR seperti ditunjukkan gambar 7. Pembentukan CO₂ sangat dipengaruhi oleh komponen bahan bakar. Karena pada kasus ini komponen gas alam tidak bervariasi, sehingga konsentrasi CO₂ pada *furnace outlet* cenderung konstan.

Konsentrasi O₂ pada *furnace outlet* digunakan untuk mengetahui proses reduksi oksidan selama pembakaran. Secara Kontur O₂ paling tinggi berada pada area tengah ruang bakar dimana *burner* terpasang. Hal ini dikarenakan pada sistem *non-premixed* udara pembakaran dan bahan bakar mengalir pada saluran terpisah. Sehingga pada area di depan mulut *burner* fraksi mol O₂ paling tinggi. Kemudian reduksi komponen O₂ selama proses pembakaran berlangsung lebih cepat dan sempurna dengan ditunjukkan dominasi warna gelap pada *outlet burner* seperti yang ditunjukkan gambar 11 dimana mengindikasikan fraksi mol O₂ mendekati 0. Hal ini sesuai dengan teori bahwa pada pusat ruang bakar terjadi pembakaran kondisi *fuel-rich*.

Hasil simulasi menunjukkan hubungan yang linier antara AFR dan konsentrasi sisa O₂ pada *furnace outlet*. Didapatkan bahwa dengan variasi laju aliran udara pembakaran, semakin besar AFR maka semakin besar pula sisa O₂ pada *furnace outlet*. Pada pengaturan AFR 16.7 kg air/kg fuel menghasilkan sisa O₂ sebesar 1.96% fraksi mol, dan meningkat menjadi 3.59% fraksi mol pada pengaturan AFR 19.2 kg air/kg fuel. Udara lebih dalam kadar yang kecil dibutuhkan untuk mengurangi emisi *unburned hydrocarbon* dan memaksimalkan efisiensi thermal.

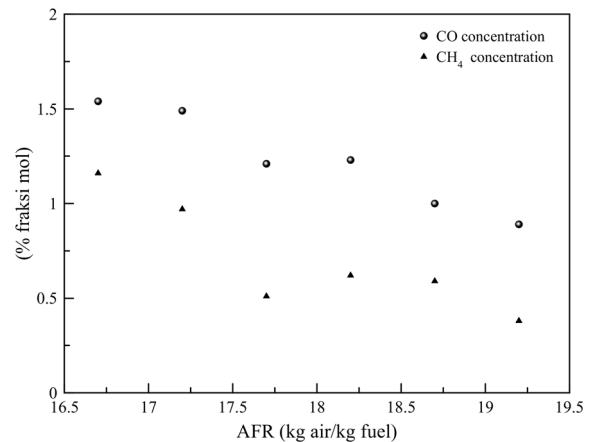


Gambar 7. Pembentukan CO₂ dan O₂ pada variasi AFR

Pembentukan *unburned hydrocarbon* berupa konsentrasi CO dan sisa CH₄ pada *furnace outlet* mengindikasikan bahan bakar tidak sepenuhnya terbakar dan menyebabkan energi panas yang terkandung pada bahan bakar tidak terlepas semua. gambar 8 menunjukkan bahwa dengan variasi laju aliran udara pembakaran, hasil simulasinya menunjukkan bahwa peningkatan *air-fuel ratio* dari 16.7 menjadi 19.2 kg air/kg fuel berdampak pada menurunnya emisi CO dari 1.54% menjadi 0.89% fraksi mol. Nilai emisi ini tergolong kecil dengan adanya pengaturan AFR yang bervariasi. Hal ini terkait dengan rasio resirkulasi massa CO yang lebih tinggi pada AFR yang meningkat seperti yang ditunjukkan gambar 12. Emisi CO yang rendah berpengaruh positif terhadap sisa CH₄ pada *furnace outlet* yang semakin menurun dari 1.16% menjadi 0.38% fraksi mol. Sedangkan pada variasi laju aliran bahan bakar menunjukkan pembentukan CO dan CH₄ yang lebih rendah pada *furnace outlet*.

Efisiensi pembakaran diukur berdasarkan kandungan CO, *unburned hydrocarbon* dan sisa O₂ pada gas buang [14,15]. Efisiensi pembakaran maksimal dicapai dengan meminimalkan *unburned hydrocarbon* dan CO pada gas buang. Tujuan pembakaran adalah untuk mencapai efisiensi pembakaran tertinggi dengan sisa O₂ seminimal mungkin. Sebagian besar sistem pembakaran pada *boiler* industri menjaga level O₂ sebesar 2-3% untuk keseimbangan terbaik efisiensi thermal dan efisiensi

pembakaran [14]. Dengan mempertimbangkan batas maksimum level O₂ pada *furnace outlet*, maka AFR 18.7 kg air/kg fuel merupakan konfigurasi AFR terbaik dalam kasus ini dengan produksi CO sebesar 1% fraksi mol, CH₄ sebesar 0.59% fraksi mol, dan sisa O₂ sebesar 2.89% fraksi mol.

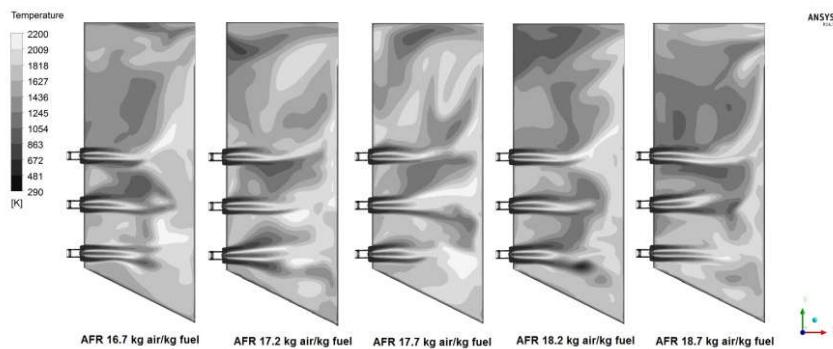


Gambar 8. Pembentukan CO dan CH₄ pada variasi AFR

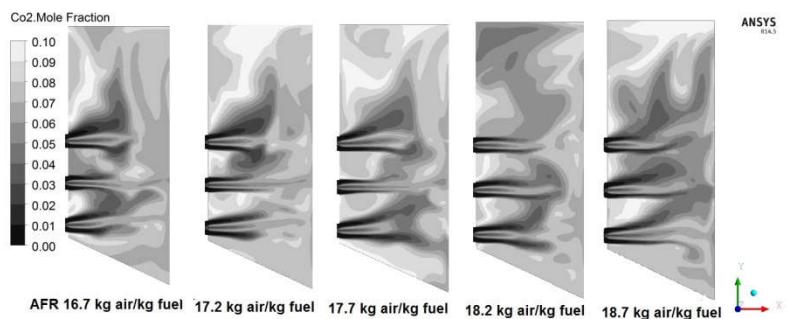
Kesimpulan

Hasil simulasasi CFD pembakaran *non-premixed* gas alam dengan variasi AFR secara ringkas dapat disimpulkan sebagai berikut :

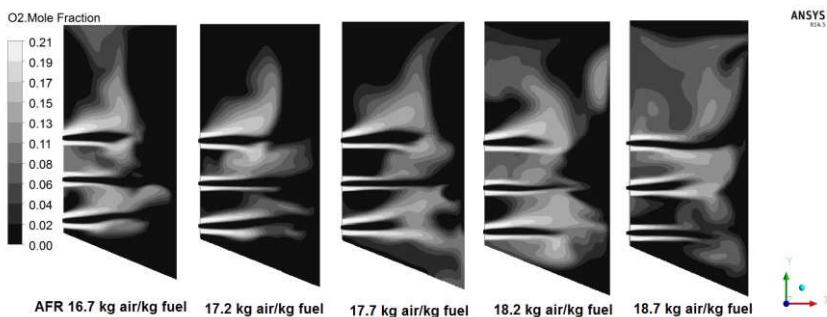
1. Temperatur api cenderung meningkat pada AFR 16.7 - 17.2 kg air/kg fuel yaitu dari 2133.6 K menjadi 2167.03 K, dan cenderung menurun dari 2167.03 K menjadi 2135.46 K pada nilai AFR 17.2 – 19.2 kg air/kg fuel. Sedangkan temperatur gas buang pada *furnace outlet* cenderung menurun pada pengaturan AFR 16.7 – 19.2 kg air/kg fuel, yaitu dari 1729.86 K menjadi 1659.64 K.
2. AFR tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pembentukan CO₂ dalam proses pembakaran dengan rata-rata konsentrasi 7.5% fraksi mol. Variasi AFR memberikan pengaruh yang linier terhadap konsentrasi O₂ pada *furnace outlet*, dimana O₂ meningkat dari 1.96% menjadi 3.59% fraksi mol seiring meningkatnya AFR. Sedangkan hubungan AFR dengan CO dan CH₄ adalah berkebalikan. Konsentrasi CO menurun dari 1.54% menjadi 0.89% fraksi mol, dan konsentrasi CH₄ menurun dari 1.16% menjadi 0.38% fraksi mol seiring meningkatnya AFR.
3. AFR 18.7 kg air/kg fuel adalah konfigurasi AFR terbaik dengan produksi CO sebesar 1% fraksi mol dan *unburned hydrocarbon* (CH₄) 0.59% fraksi mol, serta sisa O₂ yang maksimal (2-3%) pada gas buang yaitu 2.89% fraksi mol.



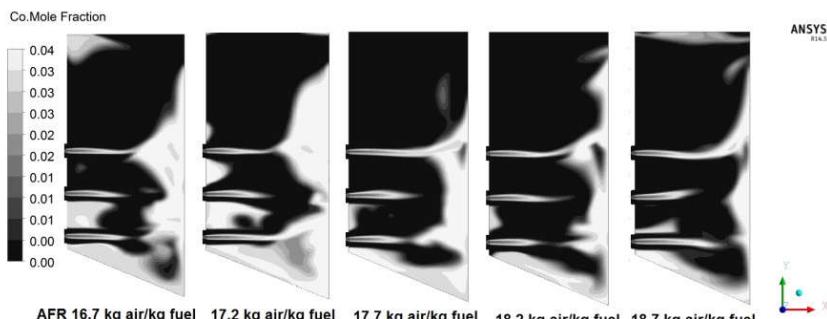
Gambar 9. Kontur distribusi temperatur pada variasi AFR



Gambar 10. Distribusi CO₂ pada variasi AFR



Gambar 11. Reduksi oksidan pada variasi AFR



Gambar 12. Laju pembentukan emisi *unburned hydrocarbon* pada variasi AFR

Tabel 1. Ringkasan Hasil Simulasi

Excess Air (%)	AFR (kg air / kg fuel)	Temperatur maksimum furnace (K)	Temperatur outlet furnace (K)	Emisi Gas Buang (% fraksi mol)			
				CO ₂	O ₂	CO	CH ₄
0	16.7 (<i>stoichiometri</i>)	2133.6	1729.86	7.64	1.96	1.54	1.16
3	17.2	2167.03	1693.61	7.69	1.97	1.49	0.97
6	17.7	2136.81	1692.73	7.69	2.49	1.21	0.51
9	18.2	2118.22	1704.05	7.70	2.42	1.23	0.62
12	18.7	2120.77	1725.45	7.65	2.89	1.00	0.59
15	19.2	2135.46	1659.64	7.42	3.59	0.89	0.38

Referensi

- [1] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, "Outlook Energi Indonesia 2016," Jakarta, 2016.
- [2] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral R.I, 2016. Rencana Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN Tahun 2016–2025. PT PLN (Persero), Jakarta.
- [3] Turns, S. R, 2000, *An Introduction to Combustion : Concepts and Applications*, 2nd Ed. Singapore: McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.
- [4] Setiyawan A. dan Septiawan, S., 2014, Simulasi Numerik Pengaruh Variasi Sudut Swirl Vanes pada Radially Stratified Flame Core Burners Terhadap Karakteristik Pembakaran, in *Seminar Nasional Teknik Mesin 9*, no. 1, pp. 9–14.
- [5] Boushaki, T., Merlo, N. C., Chauveau, dan I. Gökalp, 2017, Study of pollutant emissions and dynamics of non-premixed turbulent oxygen enriched flames from a swirl burner, *Proc. Combust. Inst.*, vol. 36, no. 3, pp. 3959–3968.
- [6] Habib, M. A., Elshafei, M. dan Dajani, M., 2008, Influence of combustion parameters on NO_x production in an industrial boiler, *Comput. Fluids*, vol. 37, no. 1, pp. 12–23.
- [7] Merlo, N. *et al.*, 2014, Combustion characteristics of methane-oxygen enhanced air turbulent non-premixed swirling flames, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 56, pp. 53–60.
- [8] Oh, J., Dong, S. dan Yang, J., 2014, The effect of fuel composition on the characteristics of a non-premixed synthetic natural gas-air flame, *Fuel Process. Technol.*, vol. 126, pp. 66–75.
- [9] Ziani, L., Chaker, A., Chetehouna, K., Malek, A. dan Mahmah, B. 2013, Numerical simulations of non-premixed turbulent combustion of CH₄-H₂ mixtures using the PDF approach, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 20, pp. 8597–8603.
- [10] Zhang, X. Li, Sun, L. Y. Jiang, B. X. Li, dan Wang, J. 2015, Numerical simulation of the flue gas side of refining vacuum furnace using CFD, *Chem. Eng. Sci.*, vol. 123, pp. 70–80.
- [11] Ariningtys, N. dan Sutardi, 2014, Studi Numerik Pengaruh Konfigurasi Pengumpunan Dua Jenis Batubara dengan Metode *In-Furnace Blending* Terhadap Proses Pembakaran pada Boiler Tangensial, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [12] Hidayat R. dan Setiyawan, A., 2015, Studi Numerik Karakteristik Aliran *Gas-Solid* dan Pembakaran *Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler* 315 MWe dengan Variasi Sudut *Tilting* dan Nilai Kalor Batubara, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [13] Mullinger P. dan Jenkins, B. 2008, *Industrial and Process Furnaces*, Linacre House, Jordan Hill, Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [14] Charles Em Baukal J., 2004, *Industrial Combustion Pollution and Control*, Madison Avenue, New York, NY: Marcel Dekker, Inc.
- [15] Kitto, J. B. dan Stultz, S. C., 2005, *Steam its generation and use*, 41st Ed. Barberton, Ohio, U.S.A: The Babcock & Wilcox Company.
- [16] Kale, M., Choudhary, R. dan Kumar, D. S., 2015, A Computational Evaluation of Emissions for Non-premixed Natural gas Combustion, *Int. J. Sci. Res. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 7, pp. 731–735.
- [17] ANSYS, 2013, Inc, *Anssys Fluent User's Guide*, 15.0., Canonsburg, PA, U.S.A: ANSYS, Inc.
- [18] ANSYS, 2009, Inc, *Anssys fluent Theory Guide*, 12.0., U.S.A: ANSYS, Inc.
- [19] Tokyo Electric Power Services, 2001, *Project Completion Report on the Project for Rehabilitation of Gresik Steam Power Plant units 1 and 2 The Republic of Indonesia*, Tokyo, Japan.