ANALISIS NUMERIK PEMBAKARAN PADA *CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER* DENGAN TIGA MODEL TURBULEN

Santoso[1]
[1]*Departemen Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada*
e-mail :[1]santoso@ugm.ac.id

ABSTRACT

In industry, Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler has a lot of advantage. One of them is high efficiency in combustion. Combustion system in CFB boiler has developed to be main technology. It has a complex combustion system based on the relationship between flow, heat and mass transfer, and the reaction. Computational Fluid Dynamics (CFD) can help to understand this process in boiler. CFD investigates turbulent flow and complex phenomena in the furnace. In addition, use of CFD optimizes geometry parameter in the operation to improve combustion reaction and boiler efficiency with low cost.

Boiler has dimensions 21,8 m in length, 16,7 m in width, and 41, 0 in height with total 733124 elements. Combustion simulation in boiler uses three turbulent k- ε models which are Standard, RNG and Realizable that help to know the temperature and pressure distribution. The result shows that combustion simulation in CFB boiler using turbulent k-ε Standard and Realizable models is more acceptable and more appropriate. It is proven by the distribution temperature values from Standard and Realizable models which are near the actual values compared to RNG model. The distribution pressure values from simulation are very different from the actual. it is due to many factors which are burner locations are not defined, bed material is negligible, and the simulation has simple geometry.

Keywords : *Boiler, Combustion, Fluidized Bed*

INTISARI

Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler di dalam industri memiliki banyak keuntungan. Salah satu keuntungannya adalah efisiensi pembakaran yang tinggi. Sistem pembakaran pada CFB boiler telah dikembangkan menjadi teknologi utama. Boiler tersebut memiliki sistem pembakaran yang kompleks yang disebabkan oleh hubungan antar aliran, perpindahan kalor dan massa serta reaksinya. Computational Fluid Dynamics (CFD) dapat membantu untuk memahami proses yang terjadi pada CFB boiler. CFD dapat menginvestigasi aliran turbulen dan fenomena kompleks di dalam ruang bakar. Selain itu, penggunaan CFD dapat mengoptimalkan parameter geometri pada kondisi operasi untuk meningkatkan reaksi pembakaran dan efisiensi boiler dengan biaya yang murah.

Boiler memiliki dimensi panjang 21,8 m, lebar 16,7 m dan tinggi 41,0 m dengan jumlah elemen 733124. Simulasi pembakaran pada boiler ini dilakukan dengan tiga model turbulen k-ε Standard, RNG dan Realizable untuk mengetahui distribusi temperatur dan tekanan. Hasil yang diperoleh bahwa untuk simulasi pembakaran pada CFB boiler dengan menggunakan model turbulen k-ε Standard dan Realizable lebih dapat diterima dan lebih sesuai. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai distribusi temperatur yang diperoleh dari simulasi model Standard dan Realizable lebih mendekati dengan hasil aktualnya dibanding dengan model RNG. Distribusi tekanan hasil simulasi mempunyai nilai yang jauh berbeda dengan nilai aktualnya dengan ketiga model turbulen tersebut. Hal ini dapat disebabkan oleh banyak faktor antara lain letak burner yang tidak didefinisikan, bed material yang tidak dilibatkan serta penyederhanaan dari geometri boiler.

Kata kunci : *Boiler, Fluidized Bed, Pembakaran*

1. PENDAHULUAN

Boiler merupakan salah satu perangkat yang berperan penting dalam penyediaan kalor pada pembangkit listrik. Secara umum *boiler* menjadi pilihan terbaik untuk mengubah energi panas atau kalor yang dihasilkan oleh pembakaran menjadi energi listrik (Barma dkk, 2017). Untuk memenuhi tuntutan sebagai alat penyedia kalor dengan emisi rendah dan efisiensi yang tinggi maka salah satu solusi dari permasalahan tersebut adalah menggunakan *boiler* jenis *circulating fluidized bed*.

Circulating Fluidized Bed (CFB) *boiler* di dalam industri memiliki banyak keuntungan antara lain efisiensi pembakaran tinggi, dapat menggunakan berbagai jenis bahan bakar, emisi NOx yang rendah dan efisiensi penangkapan sulfur yang tinggi (Gou dan Zhang, 2007). CFB *boiler* mulai tersedia secara luas karena memiliki

keunggulan-keunggulan tersebut (Kim dkk, 2016). *Boiler* tersebut menjadi salah satu alternatif dalam mengurangi polusi dan meningkatkan efisiensi dalam pembangkit listrik.

Simulasi kinerja CFB *boiler* menjadi topik yang sangat menarik (Kim dkk, 2016). Sistem pembakaran pada CFB *boiler* telah dikembangkan menjadi teknologi utama. Untuk mencapai keberhasilan desain sistem pembakaran CFB *boiler* dengan efisiensi tinggi dan emisi rendah maka dapat digunakan model dan simulasi secara matematis. Sistem pembakaran pada CFB *boiler* sangat kompleks, hal tersebut disebabkan oleh hubungan antar aliran, perpindahan kalor dan massa serta reaksinya. Dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) maka dapat membantu untuk memahami proses yang terjadi secara kompleks pada CFB *boiler* (Zhang dkk, 2013).

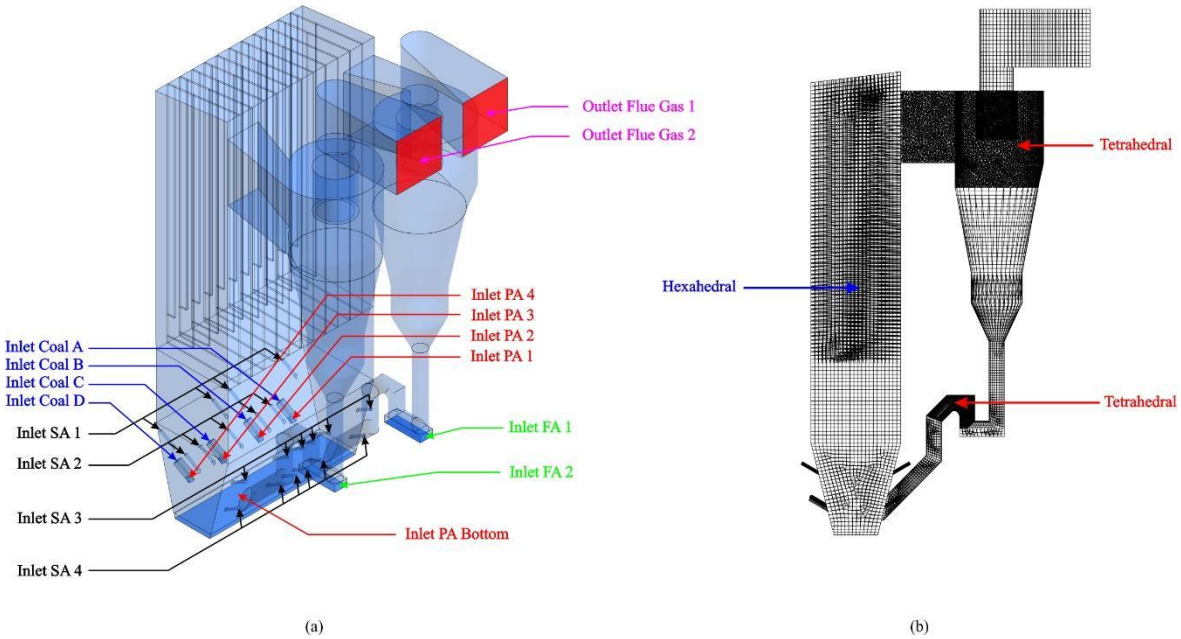
CFD dapat menginvestigasi aliran turbulen dan fenomena yang kompleks di dalam *boiler*. Selain itu penggunaan CFD dapat mengoptimalkan parameter geometri sebaik mungkin pada kondisi operasi untuk meningkatkan reaksi pembakaran dan efisiensi *boiler* dengan biaya yang murah (Echi dkk, 2019). CFD saat ini menjadi alat yang efisien untuk memprediksi kinerja *boiler*, mengevaluasi dan memodifikasi desain *boiler*, mengoptimalkan operasi *boiler* dan menyelidiki serta menyelesaikan masalah-masalah spesifik yang terjadi pada *boiler* (Wang dkk, 2020). Hal tersebut juga mendukung untuk menganalisis proses pembakaran dan pengembangan pada CFB *boiler* pada operasi yang fleksibel (Huttunen dkk, 2017).

Pada penelitian ini proses pembakaran pada CFB *boiler* dengan kapasitas 110 MW disimulasikan menggunakan *software* ANSYS FLUENT 2020 R2. Proses pembakaran tersebut diamati pada beban penuh (100%). Untuk memahami proses pembakaran pada CFB *boiler* tersebut maka diamati distribusi temperatur dan distribusi tekanan pada bagian-bagian *boiler* termasuk di dalam *cylone* dan *sealpot*. Hasil yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan data yang diukur selama *boiler* tersebut beroperasi.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Geometri dan *Mesh*

Boiler 110 MW yang diamati secara numerik memiliki dimensi panjang 21,8 m, lebar 16,7 m dan tinggi 41,0 m seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1a. *Boiler* tersebut terdiri dari dua bagian yaitu ruang bakar dan 2 *cyclone separator* dengan 4 saluran *inlet* saluran bahan bakar dan 4 saluran udara primer (PA), saluran udara primer untuk fluidisasi pada bagian bawah ruang bakar (PA *Bottom*), 21 saluran udara sekunder (SA) dan saluran udara fluidisasi (FA) pada bagian *sealpot*. Detail saluran input diperlihatkan pada Gambar 1a. Domain komputasi dibagi menjadi dua bentuk elemen *hexahedral* dan *tetrahedral* dengan jumlah elemen total 733124 dimana tingkat akurasi hasil perhitungan salah satunya dipengaruhi oleh bentuk elemen. Pembagian bentuk elemen dapat dilihat pada Gambar 1b. Pada bagian *cyclone separator* dan *return leg* bagian atas digunakan bentuk elemen *tetrahedral* karena memiliki bentuk yang kompleks sedangkan bagian lainnya digunakan bentuk elemen *hexahedral* untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.



Gambar 1. (a) Geometri *Boiler*, (b) *Mesh*

2.2 Model Pembakaran

Model pembakaran dianalisis secara numerik untuk mengetahui proses pembakaran yang terjadi di dalam *boiler*. Simulasi ini dilakukan pada beban penuh dengan model turbulen yang berbeda dan pada kondisi *steady*. Reaksi pembakaran terdiri dari proses devolatilisasi, oksidasi gas dan oksidasi *char* serta gasifikasi (Wu dkk, 2019). Reaksi pembakaran dihitung berdasarkan analisis *ultimate* dan *proximate* bahan bakar batubara yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Analisis Batubara *AR Basis* (%)

Proximate		***Ultimate***	
volatile	32,35	C	54,78
fixed carbon	31,72	H	7,42
ash	8,92	O	27,61
moisture	27,01	N	5,27
		S	4,92
HHV (MJ/kg)		**19,171**	

Jumlah kebutuhan batubara dihitung berdasarkan beban *boiler* (110 MW) dan *heating value* (19,171 MJ/kg) sedangkan oksidiser yang berupa udara diberikan pada proses pembakaran dihitung dengan memperhatikan konsumsi batubara dan *excess air* yang dibutuhkan. Proses pembakaran batubara dimodelkan dengan menggunakan dua tingkat reaksi homogen untuk fasa gas yang diberikan pada Persamaan kimia (1) dan (2) serta Persamaan (3) digunakan untuk pembakaran *char* (Adamczyk dkk, 2014).

$$C_iH_kO_jN_mS_n + \nu_{O_2}O_2 \rightarrow \nu_{CO}CO + \nu_{H_2O}H_2O + \nu_{SO_2}SO_2 + \nu_{N_2}N_2 \tag{1}$$

$$CO + 0{,}5O_2 \rightarrow CO_2 \tag{2}$$

$$C_{(s)} + O_2 \rightarrow CO_2 \tag{3}$$

Koefisien stoikiometrik ($\nu_{O_2}, \nu_{CO}, \nu_{H_2O}, \nu_{SO_2}, \nu_{N_2}$) pada persamaan (1) dapat dihitung dari kesetimbangan massa di setiap unsur *volatile* $C_iH_kO_jN_mS_n$.

2.3 Persamaan Atur

Standard *k-ε*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{5}$$

RNG *k-ε*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \mu_{eff}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{7}$$

Realizable *k-ε*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S\varepsilon - \rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b + S_\varepsilon \tag{9}$$

Fenomena pembakaran serta fluktuasi aliran partikel dan gas digambarkan pada model turbulen *k-ε* dimana *k* menyatakan *turbulence kinetic energy* dan *ε* menyatakan *turbulence dissipation rate*. Tiga model turbulen *Standard k-ε*, RNG (*Renormalization group*) *k-ε* dan *Realizable k-ε* digunakan untuk mengetahui distribusi tekanan dan temperatur pada proses pembakaran yang terjadi di *boiler*. *Transport equation* setiap model

ditunjukkan pada persamaan (4), (5) (6), (7), (8) dan (9).

2.4 Parameter Input dan *Set Up* Simulasi

Batubara diinjeksikan ke dalam ruang bakar melalui saluran bahan bakar. Ruang bakar mempunyai 4 saluran bahan bakar (detail pada Gambar 1a) yang masing-masing memiliki nilai laju aliran massa yang berbeda yang ditunjukkan pada Tabel 2. Selain nilai laju aliran massa batubara, pada Tabel 2 juga memperlihatkan ukuran partikel batubara yang diinjeksikan dalam ruang bakar.

Tabel 2. Parameter Input dan Ukuran Batubara

Combusting Particle	**ρ (kg/m^3)**	**ṁ (kg/s)**
Coal A	1400	5,264
Coal B	1400	5,389
Coal C	1400	5,389
Coal D	1400	5,264
Particle Size (mm)	Min	2,38
	Max	70
	Mean	38,595

Seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar 1a, selain saluran bahan bakar, ruang bakar juga memiliki banyak saluran udara termasuk di dalamnya saluran udara primer dan udara sekunder yang berfungsi sebagai udara pembakaran serta untuk mendorong partikel batubara yang belum terbakar pada ruang bakar agar dapat bersirkulasi dan dibakar hingga habis. Data input udara primer maupun sekunder serta udara untuk fluidisasi diberikan pada Tabel 3 yang juga memiliki nilai yang berbeda-beda pada setiap saluran.

Tabel 3. Parameter Input Udara Pembakaran

Primary Air	**ρ (kg/m^3)**	**ṁ (kg/s)**	**P (kPa)**	**T (°C)**
PA Bottom	1,225	57,480	18,45	222,1
PA 1	1,225	1,459	18,42	226,5
PA 2	1,225	1,467	18,42	226,5
PA 3	1,225	1,064	18,48	217,7
PA 4	1,225	1,370	18,48	217,7
Secondary Air	**ρ (kg/m^3)**	**ṁ (kg/s)**	**P (kPa)**	**T (°C)**
SA 1	1,225	11,902	6,9	223,1
SA 2	1,225	11,586	7,01	223,4
SA 3	1,225	11,298	7	223,1
SA 4	1,225	10,619	7,07	223,4
Fluidized Air	**ρ (kg/m^3)**	**ṁ (kg/s)**	**P (kPa)**	**T (°C)**
FA 1	1,225	1,413	1,052	62,97
FA 2	1,225	1,362	1,039	62,97

Pada simulasi ini digunakan *species model non-premixed combustion* untuk pembakaran dan *discrete phase model* pada partikel batubara dengan *SIMPLE solution method*. Detail dari *set up* simulasi diberikan pada Tabel 4. Iterasi dapat dikatakan "*convergence*" jika tidak terjadi perubahan hasil dengan iterasi lebih banyak atau Cui dkk (2019) mengatakan bahwa iterasi dikatakan "*convergence*" jika hasil simulasi memiliki eror tertentu dibanding dengan hasil untuk validasi.

Tabel 4. *Set Up* Simulasi

Turbulent k-ε Model	1. *Standard* 2. *RNG* 3. *Realizable*
Turbulent Kinetic Energy	*First Order Upwind*
Turbulent Dissipation Rate	*First Order Upwind*
Diameter Coal Distribution	*rosin-rammler*
Combustion Model	*diffusion-limited*
Discrete Phase Type	*reflect*
Turbulent Kinetic Energy Factor	0,8
Turbulent Dissipation Rate Factor	0,8
Turbulent Viscosity Factor	1

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

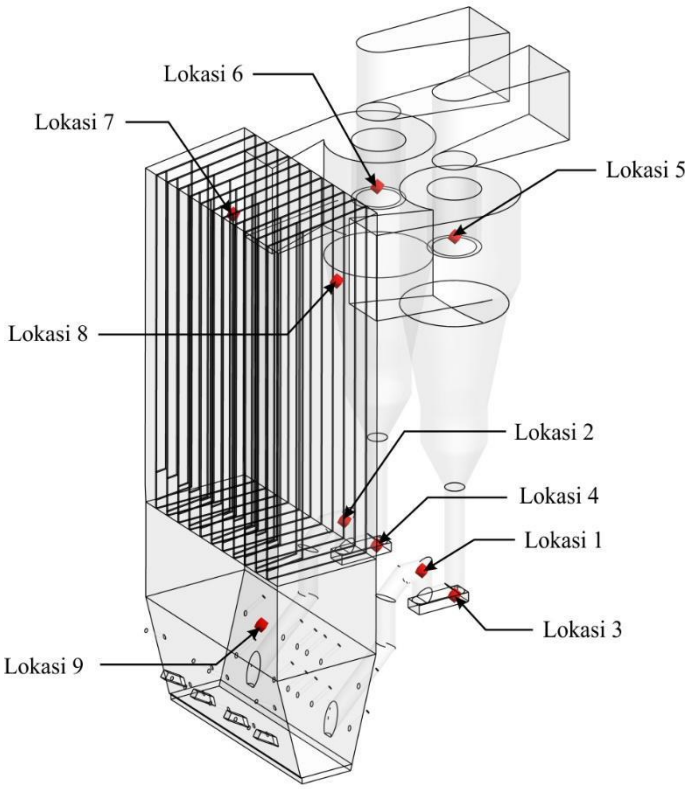
3.1 Validasi Model

Geometri *boiler* yang disimulasikan disederhanakan dengan tujuan untuk mempermudah komputasi dan menghemat biaya, akan tetapi bagian-bagian utama dibuat sebaik mungkin mendekati bentuk yang sesungguhnya. Dengan bentuk yang lebih sederhana maka akan mempermudah tercapainya konvergen. Konvergen tercapai kurang lebih pada iterasi ke-3000 dan untuk memastikan bahwa sudah tidak terjadi perubahan nilai hasil terhadap jumlah iterasi maka perhitungan dilakukan hingga 5000 iterasi.

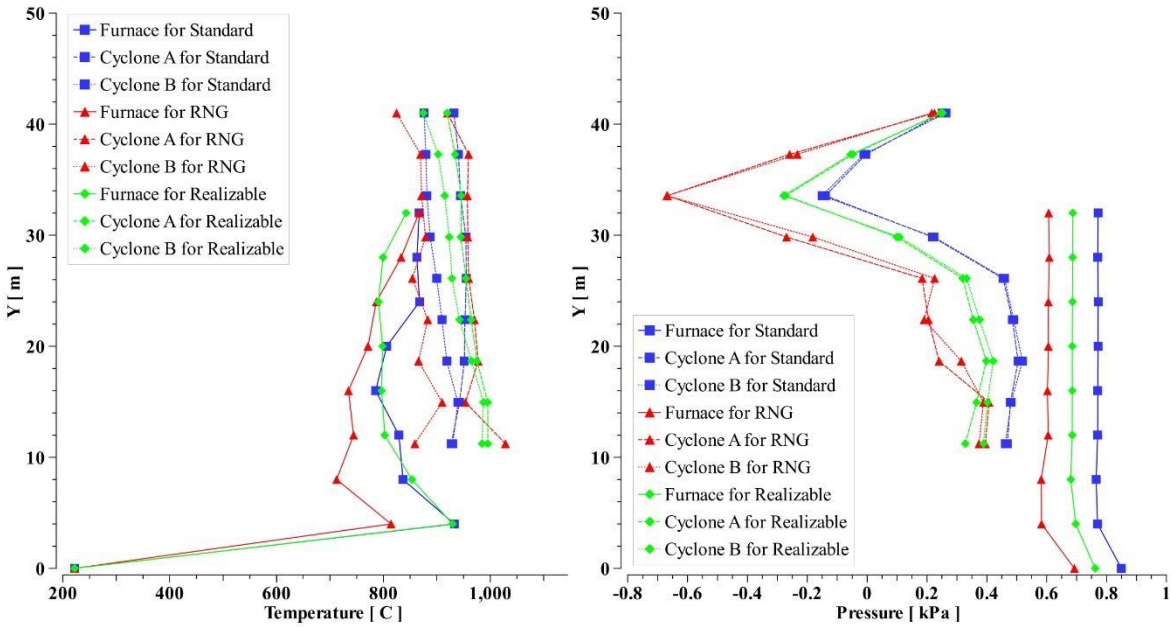
Hasil simulasi yang diperoleh dari ketiga jenis model turbulen kemudian dibandingkan satu sama lain dan setelah itu divalidasi dengan data yang diperoleh dari pengukuran yang sesungguhnya pada lokasi-lokasi tertentu. Letak pengukuran untuk validasi ditunjukkan pada Gambar 2 dan perbandingan data temperatur dan tekanan ditunjukkan pada Gambar 3 dan Tabel 5.

Tabel 5. Validasi Temperatur dan Tekanan

		Lokasi								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatur (°C)	*Standard*	966,5	999,1	810,3	800,1	883,6	948,7	864,3	865,2	799,9
	RNG	1014,4	1039,9	746,2	935,9	871,8	957,0	847,9	838,5	627,9
	Realizable	1052,8	1069,8	852,8	804,2	920,0	945,7	842,7	841,0	884,9
	Aktual	928,0	925,9	929,5	931,7	876,8	877,4	920,4	928,6	903,5
Tekanan (Pa)	*Standard*	828,5	828,6	611,1	624,0	-208,8	-193,3	768,1	770,4	764,5
	RNG	688,7	693,9	523,0	539,3	-810,2	-689,5	603,9	584,1	586,1
	Realizable	730,3	675,8	530,8	492,5	-358,0	-348,1	682,9	683,3	678,8
	Aktual	31360	30670	33460	32300	-1530	-1560	970	-	-



Gambar 2. Titik Validasi

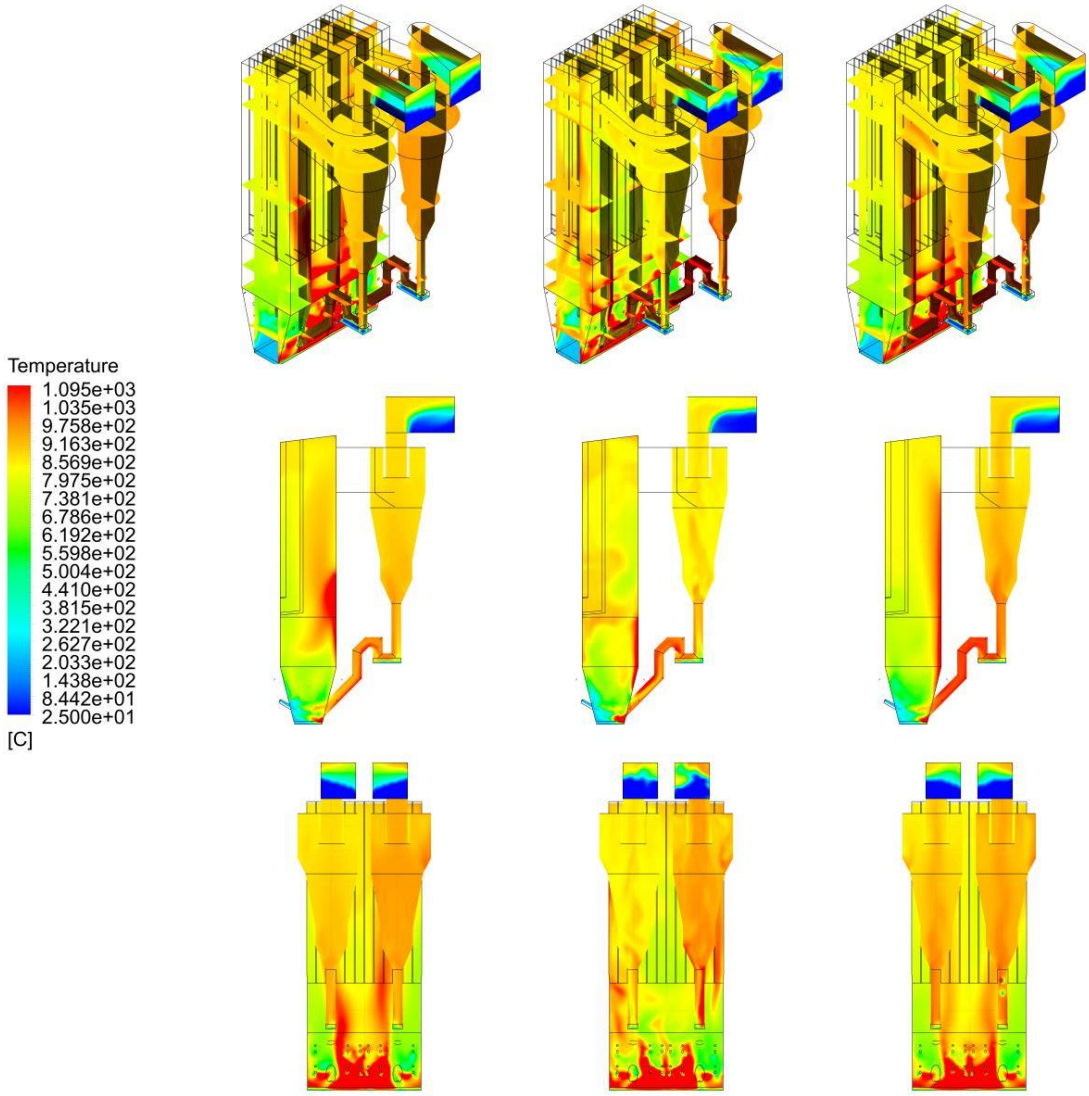


Gambar 3. Grafik (a) Temperatur dan (b) Tekanan

3.2 Distribusi Temperatur

Pada Tabel 5 ditunjukan bahwa secara rata-rata nilai temperatur hasil simulasi dengan model *Realizable* paling mendekati dengan nilai aktual tetapi pada bagian *sealpot* dan ruang bakar atas dengan model *Standard* paling mendekati dengan nilai aktualnya. Pada bagian *cyclone* nilai hasil dari model *Standard* dan *RNG* juga

mendekati nilai aktual sedangkan pada ruang bakar bagian bawah hasil model *Realizable* paling dekat dengan nilai aktual. Berdasarkan dari ketinggian *boiler*, nilai temperatur dengan model *Realizable* dan *Standard* pada ruang bakar dan *cyclone* saling berdekatan seperti yang terlihat pada Gambar 3a. Selanjutnya distribusi temperatur ditunjukkan pada Gambar 4 dimana model *Realizable* dan *Standard* memiliki kontur yang serupa.

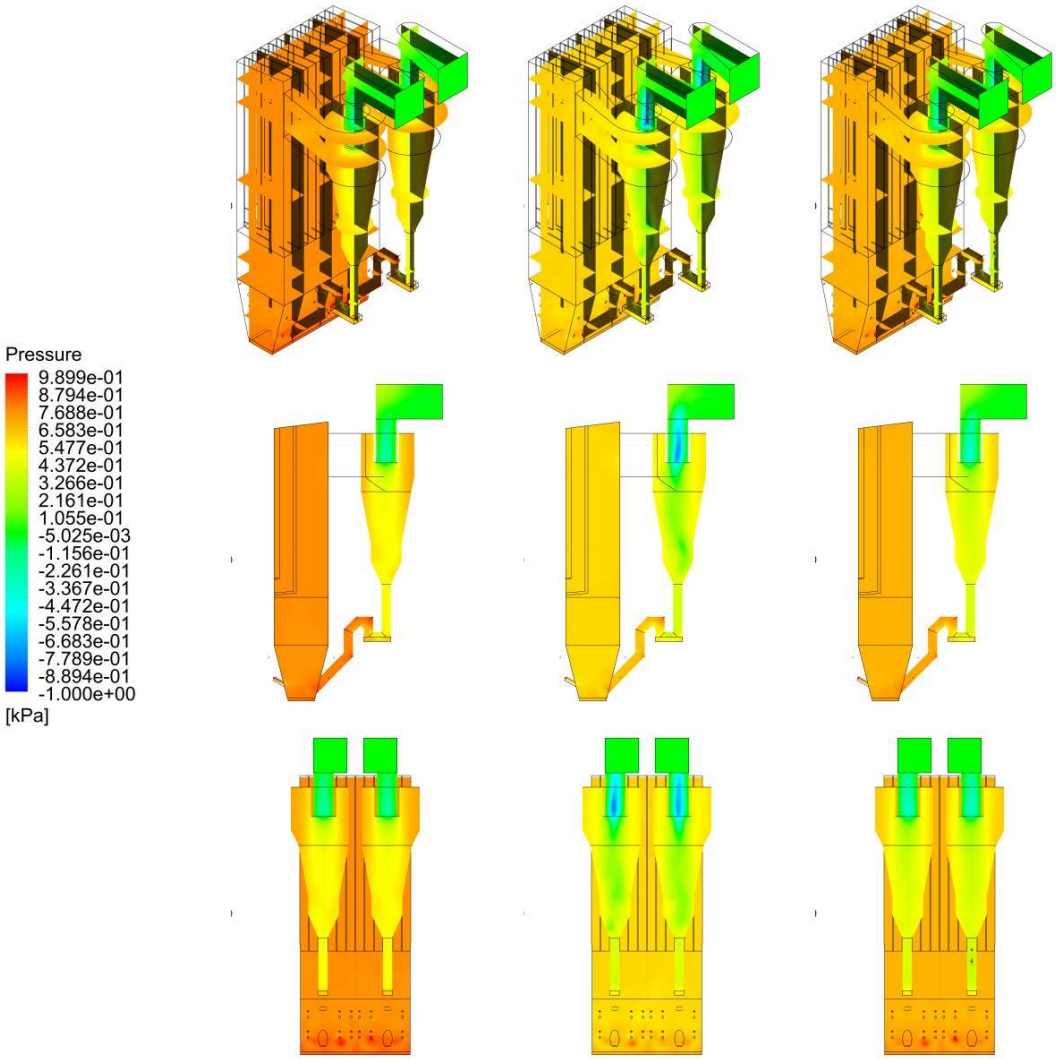


(a) (b) (c)

Gambar 4. Distribusi Temperatur (a) Model *Standard*, (b) Model *RNG* dan (c) Model *Realizable*

3.3 Distribusi Tekanan

Distribusi tekanan yang diperoleh dari simulasi berbeda jauh dengan nilai aktualnya kecuali pada ruang bakar bagian atas memiliki nilai yang mendekati. Diantara ketiga model tersebut, hasil dari model *Standard* mempunyai nilai yang paling dekat (lihat Tabel 5). Nilai tekanan pada ketiga model terhadap ketinggian *boiler* diruang bakar dan *cyclone* relatif sama. (lihat Gambar 3b). Tekanan dari model *RNG* memiliki nilai di bawah model *Standard* dan *Realizable*. Distribusi tekanan pada keseluruhan bagian *boiler* ditunjukkan pada Gambar 5.



(a) (b) (c)

Gambar 5. Distribusi Tekanan (a) Model *Standard*, (b) Model *RNG* dan (c) Model *Realizable*

4. KESIMPULAN

Model pembakaran pada CFB *boiler* dengan menggunakan FLUENT 2020 R2 dilakukan dengan tiga jenis model turbulen. Geometri *boiler* yang sederhana dibuat untuk mempermudah mencapai konvergen. Hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa untuk simulasi pembakaran pada CFB *boiler* dengan menggunakan model turbulen *k-ε Standard* dan *Realizable* lebih dapat diterima dan lebih sesuai. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai distribusi temperatur yang diperoleh dari simulasi model *Standard* dan *Realizable* lebih mendekati dengan hasil aktualnya dibanding dengan model *RNG*. Distribusi tekanan hasil simulasi mempunyai nilai yang jauh berbeda dengan nilai aktualnya dengan ketiga model turbulen tersebut. Hal ini dapat disebabkan oleh banyak faktor antara lain *bed material* yang tidak dilibatkan, letak *burner* yang tidak didefinisikan serta penyederhanaan dari geometri *boiler*. Untuk mendapatkan data yang lebih akurat maka dapat dilakukan perhitungan yang lebih kompleks dan *set up* data yang lebih sesuai dengan data aktual pada *boiler* dan sistemnya dengan cara melibatkan *bed material*, letak *burner* bahan bakar didefinisikan dan geometri yang sama dengan aktual serta dapat digunakan berbagai model lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

Adamczyk, W. P., Wecel, G., Klajny, M., Kozolub, P., Klimanek, A., & Bialecki, R. A. (2014). Modeling of particle transport and combustion phenomena in a large-scale circulating fluidized bed boiler using hybrid Euler-Lagrange approach. *Particuology*, 16, 29-40.

Barma, M. C., Saidur, R., Rahman, S. M. A., Allouhi, A., Akash, B. A., & Sait, M. (2017). A review on boilers energy use, energy saving, and emissions reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 970-983.

Cui, Y., Zhong, W., Xiang, J., & Liu, G. (2019). Simulation on coal-fired supercritical CO_2 circulating fluidized bed boiler: Coupled combustion with heat transfer. *Advanced Powder Technology*, 30, 3028-3039.

Echi, S., Bouabidi, A., Driss, Z., & Abid, M. S. (2019). CFD simulation and optimization of industrial boiler. *Energy*, 169, 105-114.

Fluent Inc. (2001). *FLUENT 6.0 User's Guide*. Lebanon.

Gou, X., & Zhang, Z. (2007). Real-time model and simulation of combustion system in a 440 t/h boiler. *International Conference on Power Engineering*, 226-230.

Huttunen, M., Peltola, J., Kallio, S., Karnoven, L., Niemi, T., & Yla-outinen, V. (2017). Analysis of the processes in fluidized bed boiler furnaces during load changes. *Energy Procedia*, 120, 580-587.

Kim, S., Chai, S., & Yang, J. (2016). Dynamic simulation of a circulating fluidized bed boiler system part I: Description of the dynamic system and transient behavior of sub-models. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30, 5781-5792.

Wang, H., Zhang, C., & Liu, X. (2020). Heat transfer calculation methods in three-dimensional CFD model for pulverized coal-fired boilers. *Applied Thermal Engineering*, 166, 114633.

Wu, Y., Liu, D., Zheng, D., Ma, J., Duan, L., & Chen, X. (2019). Numerical simulation of circulating fluidized bed oxy-fuel combustion with Dense Discrete Phase Model. *Fuel Processing Technology*, 195, 106129.

Zhang, N., Wang, W., & Li, J. (2013). CFD simulation of combustion in 150 MWe CFB boiler. *Cleaner Combustion and Sustainable World*, 65-67.