Analisis Numerik Proses *Co-Firing Pulverized Coal* dan *Biomass* Pada Boiler Kapasitas 300 MW

Achmad[1], Fauzun[2]
PT. PLN Nusantara Power UP Indramayu[1], Departemen Teknik Mesin dan Industri
Universitas Gadjah Mada[2]
e-mail: achmadfaisal@mail.ugm.ac.id[1], fauzun71@ugm.ac.id[2]

ABSTRACT

Numerical solutions to the combustion chamber process of a boiler require very complex and complicated calculations. Numerical solving techniques are developing very rapidly and can be relied upon as tools in the process of design, modification, and research. One method that is able to predict the phenomenon of combustion in the combustion chamber is the CFD method. This research was conducted by creating a 3D boiler model with a capacity of 300 MW using ANSYS Fluent. This study aims to study the combustion characteristics of pulverized coal and biomass that occur in the boiler.

Making a 300 MW boiler 3D model is done by creating the boiler geometry, building a mesh, and determining the governing equations used in the modeling. After the simulation is done, data is obtained that describes the temperature distribution, particle pathlines, temperature values in combustion.

From this simulation, it can be concluded that based on the simulation results, the fuel and air inlet temperature is 333 K, the highest average temperature is on the boiler symmetry axis (middle part), the simulated FEGT temperature reaches 1,326 K. The time of devolatilization and char burnout respectively the particles are not the same. The particle size factor greatly influences this. Smaller particle sizes will decompose faster in the devolatilization process and then immediately experience char burnout. For larger particles the time required will be longer.

Keywords: *Biomass, Boiler 300MW,* Co-Firing Pulverized Coal, *Numerical Analysis*

ABSTRAK

Solusi numerik untuk proses pembakaran dalam ruang bakar sebuah boiler memerlukan perhitungan yang sangat kompleks dan rumit. Teknik penyelesaian secara numeris berkembang sangat pesat dan dapat diandalkan sebagai peralatan (*tool*) dalam proses desain, modifikasi, maupun penelitian. Salah satu metode yang mampu memprediksi fenomena pembakaran dalam ruang bakar adalah metode CFD. Penelitian ini dilakukan dengan membuat model 3D boiler berkapasitas 300 MW dengan menggunakan ANSYS Fluent. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik pembakaran batubara serbuk (*pulverized coal*) dan biomasa yang terjadi pada boiler.

Pembuatan model 3D boiler 300 MW dilakukan dengan membuat geometri boiler, membangun mesh, dan menentukan persamaan-persamaan atur yang digunakan dalam permodelan. Setelah dilakukan simulasi, didapatkan data yang menggambarkan distribusi temperatur, *particle pathlines*, nilai temperatur pada pembakaran.

Dari simulasi ini dapat disimpulkan bahwa berdasarkan hasil simulasi temperatur inlet bahan bakar dan udara yaitu 333 K, temperatur rata-rata tertinggi berada pada sumbu simetri boiler (bagian tengah), Temperatur FEGT simulasi mencapai 1.326 K. Waktu terjadinya devolatilisasi dan *char burnout* masing-masing partikel tidak sama. Faktor ukuran partikel sangat mempengaruhi hal tersebut. Ukuran partikel yang lebih kecil akan lebih cepat terurai dalam proses devolatilisasi dan kemudian segera mengalami *char burnout.* Untuk partikel yang lebih besar waktu yang dibutuhkan akan lebih lama.

Kata kunci: Analisa Numerik, Biomassa, Boiler 300MW , Co-Firing Pulverized Coal

PENDAHULUAN

Co-firing adalah proses pembakaran dua material yang berbeda secara bersamaan, sering diaplikasikan pada batubara dan biomassa dengan cara substitusi sebagian batubara dengan biomassa ke dalam unit pembangkit. Keuntungan cofiring adalah terjadinya pengurangan gas NOx, CO2, dan SOx pada bahan bakar fosil yang dihasilkan, karena biomassa dikenal sebagai zero CO2 sehingga tidak menyebabkan akumulasi CO2 di atmosfer dan mengandung lebih sedikit sulfur jika dibanding batubara (Winaya dkk, 2010). Berdasarkan penelitian ERFO–European Recovered Fuel Organisation : "SRF Markets" Maret 2006, setiap 1 ton RDF (melalui produksinya dari MSW dan co-firing) bisa mengurangi emisi CO2 sebesar 1,75 ton/CO2 (Zotto dkk, 2015). Terdapat 3 potensi masalah dari co-firing Pellet sampah dan batubara, yaitu korosi pada tube perpindahan panas, kualitas ash, dan

ISSN 2775-5630

emisi yang dihasilkan (Pronobis, 2006). Co-firing dengan menggunakan 5% Pellet sampah berpotensi meningkatkan laju pembentukan deposit (Kupka dkk, 2008). Tujuan simulasi ini adalah untuk mendapatkan model pembakaran pada boiler kapasitas 300 MW dengan menggunakan bahan bakar batubara dan biomasa menggunakan *Ansys Fluent*.

TINJAUAN TEORITIS

Batubara merupakan bahan organik yang mudah terbakar dan terbentuk dari tumbuh-tumbuhan yang mengalami proses kimia dan geologi akibat pengaruh suhu, waktu, dan tekanan yang terjadi selama jutaan tahun. Batubara merupakan bahan bakar padat yang paling umum dimanfaatkan sebagai proses pembangkitan listrik akibat biaya yang lebih ekonomis dibandingkan sumber lainnya.

Tabel 1. Klasifikasi batubara berdasarkan jenis dan nilai nilai kalornya

Kelas	Grup	*Heating Value*	
		kJ/kg	*kcal/kg*
Antrachite	*Antrachite*	32.600-34.000	7.750-8.100
	Semi-antrachite	26.700-32.600	6.350-7.750
Bituminous	*High volatile A Bituminous*	≥32.600	≥7.750
	High volatile B Bituminous	30.200-32.600	7.200-7.750
	High volatile C Bituminous	26.700-30.200	6.350-7.200
Subbituminous	*Subbituminous A*	24.400-26.700	5.800-6.350
	Subbituminous B	22.100-24.400	5.250-5.800
	Subbituminous C	19.300-22.100	4.600-5.250
Lignite	*Lignite A*	14.700-19.300	3.500-4.600
	Lignite B	≤14.700	≤3.500

Sebelum dilakukan pemilihan batubara yang akan digunakan, dilakukan Analisis untuk mengetahui kadar unsur penyusun yang terkandung didalamnya. Analisis batubara terbagi menjadi dua (2) jenis diantaranya:

1. Proximate Analysis
   Pada Analisis proksimat, sifat kimia yang dapat diketahui berupa moisture, volatile matter, ash content, dan fixed carbon. Setelah data-data tersebut diketahui, dilakukan Analisis untuk mengevaluasi tingkat reaktivitas penyalaan dan pembakaran batubara, basis data dalam perancangan boiler, serta pengklasifikasian batubara.
2. Ultimate Analysis
   Pada Analisis ultimate, sifat kimia yang dapat diketahui diantaranya adalah kadar dari unsur-unsur karbon (C), oksigen (O), hidrogen (H), nitrogen (N), dan sulfur (S) yang terkandung dalam batubara yang digunakan sebagai dasar perhitungan kebutuhan udara minimum untuk dapat terbakar secara sempurna, perhitungan excess air, perhitungan konsentrasi gas buang seperti NOx dan SOx, serta rasio atom hidrogen dan oksigen.

Proses pembakaran merupakan suatu proses oksidasi yang mengubah ikatan kimia yang terikat dalam bahan bakar menjadi energi panas. Ketika bahan bakar batubara terbakar, produk yang dihasilkan berupa hidrokarbon, karbon dioksida, hidrogen, sulfur, karbon, dan nitrogen. Ketika sistem pembakaran batubara dijalankan terdapat beberapa subsistem yaitu persiapan, furnace, sistem transportasi dan distribusi bahan bakar, udara pembakaran, gas buang, abu, maupun panas (Spliethoff, 2010). Pembakaran dikatakan sempurna jika semua karbon habis terbakar menjadi karbon dioksida, semua hidrogen menjadi uap air seperti persamaan berikut:

$$2C_xH_y + \left(2x + \frac{y}{2}\right)(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow 2xCO_2 + yH_2O + 3{,}76\left(2x + \frac{y}{2}\right)N_2 \quad (1)$$

Tiga elemen bahan bakar yang reaksinya dapat terlihat secara signifikan pada pembakaran batubara yaitu karbon, hidrogen, dan sulfur. Persamaan dasar reaksi pembakaran unsur karbon, sulfur dan hidrogen antara lain sebagai berikut:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad (2)$$
$$S + O \rightarrow SO_2 \quad (3)$$

ISSN 2775-5630

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \quad (4)$$

Discrete Phase Model (DPM) mengikuti pendekatan Euler-Lagrange di mana fase fluida diperlakukan sebagai continuum yaitu dengan penyelesaian persamaan Navier-Stokes time-averaged di mana dispersi fase diselesaikan dengan menelusuri setiap partikel dalam jumlah banyak menggunakan perhitungan medan aliran. Persebaran fase tersebut dapat bertukar momentum, massa dan energi dengan fasa fluida. Asumsi dasar yang dibuat pada model tersebut adalah bahwa fase kedua yang terdispersi menempati fraksi volume rendah meskipun dapatditerapkan beban 24 massa yang tinggi ($\dot{m}p \geq \dot{m}f$). Lintasan partikel dihitung secara individu pada interval tertentu selama perhitungan fasa fluida. (Fluent, 2001).

Pendekatan Euler-Lagrange mengamati perilaku setiap individu partikel sehingga pergerakan partikel-partikel tersebut dapat diprediksi dengan persamaan gerak (sebagai contoh untuk arah x) pada Persamaan (5) berikut :

$$\frac{du_p}{dt} = F_d(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (5)$$

dengan Fd $(u - up$)merupakan gaya drag per satuan massa partikel dengan nilai Fd dapat dicari dengan Persamaan (6)

$$F_d = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2}\frac{C_D Re}{24} \quad (6)$$

Dalam mengamati partikel-partikel tersebut maka untuk dapat mengetahui posisi letak setiap partikel, diprediksi dengan Persamaan (7) :

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (7)$$

Pada proses pergerakannya, partikel-partikel tersebut akan mengalami erosi dan akresi. Laju erosi dan akresi pada partikel dapat diamati pada kondisi batas dinding. Laju erosi didefinisikan pada Persamaan (8) berikut :

$$R_{erosi} = \sum_{p=1}^{N_{partikel}} \frac{\dot{m}_p C(d_p)\, f(\alpha) v^{b(v)}}{A} \quad (8)$$

di mana $C(dp)$ merupakan fungsi dari diameter partikel, α sudut lintasan tumbukan partikel terhadap dinding, $f(\alpha)$ fungsi sudut lintasan tumbukan partikel, v dan $b(v)$ merupakan kecepatan relatif partikel dan fungsinya. Nilai C, f dan b didefinisikan sebagai kondisi batas pada dinding. Nilai standar C = 1, f = 1 dan b = 0. Laju akresi pada partikel didefinisikan pada Persamaan (9) berikut :

$$R_{akresi} = \sum_{p=1}^{N_{partikel}} \frac{\dot{m}_p}{A} \quad (9)$$

Proses perpindahan kalor terjadi pada inert particles dan combusting particles. Terdapat beberapa hukum yang dapat diterapkan pada pendekatan Euler-Lagrange. Hukum pemanasan inert particles diterapkan ketika temperatur partikel lebih rendah daripada temperatur penguapan $Tvap$ dan setelah fraksi partikel volatile fv,0 telah dikonsumsi. Kondisi tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

$$T_p < T_{vap} \quad (10)$$

$$m_p \leq (1 - f_{v,0})m_{p,0} \quad (11)$$

Hukum selanjutnya yang berlaku pada pendekatan Euler-Lagrange yaitu hukum devolatilisasi yang diterapkan pada combusting particles ketika temperatur partikel mencapai temperatur penguapan T_{vap} dan tetap berlaku ketika massa partikel mp lebih besar dari massa partikel non-volatile. Pernyataan tersebut dapat dimodelkan dalam bentuk matematis sebagai berikut :

$$T_p \geq T_{vap}\ dan\ T_p \geq T_{bp} \quad (12)$$

$$m_p > (1 - f_{v,0})\,(1 - f_{w,0})m_{p,0} \quad (13)$$

di mana $f_{w,0}$ adalah fraksi massa. Berlaku untuk Wet Combustion, selain itu nilai $f_{w,0}$ = 0. Setelah komponen volatile partikel sepenuhnya habis, reaksi permukaan mulai terjadi yang mengkonsumsi fraksi combusting particles f_{comb}. Hukum tersebut dinyatakan secara matematis pada Persamaan (14) dan Persamaan (15) sebagai berikut

$$m_p < (1 - f_{v,0})\,(1 - f_{w,0})m_{p,0} \quad (14)$$

$$m_p > [(1 - f_{v,0})\,(1 - f_{w,0})\ -\ f_{comb}]m_{p,0} \quad (15)$$

Formula stoikiometrik reaksi permukaan ditunjukkan pada Persamaan (3.39) berikut

$$char\ (s)\ + S_b ox(g)\ \rightarrow product\ (g) \quad (16)$$

ISSN 2775-5630

di mana Sb merupakan kandungan reaktif partikel yang dikonsumsi dan dinyatakan dalam massa oksidan per massa char.

Saat lintasan partikel dihitung, maka juga dilacak nilai kalor, massa dan momentum yang diterima atau dilepaskan oleh aliran partikel yang mengikuti lintasan tersebut dan jumlah tersebut dapat digabungkan dalam perhitungan fase kontinu berikutnya. Perubahan momentum dari fase kontinu ke fase diskret dihitung dengan Persamaan (17)

$$F = \sum(\frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24}(u_p - u) + F_{other})\dot{m}_p \Delta \boldsymbol{t} \quad (17)$$

Perpindahan kalor tersebut muncul sebagai source atau sink dari energi pada kesetimbangan energi fase kontinu dalam perhitungan selanjutnya dari medan aliran fase kontinu. Perpindahan massa dari fase diskret ke fase kontinu dihitung dengan Persamaan (18)

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \dot{m}_{p,0} \quad (18)$$

Perpindahan massa tersebut muncul sebagai source massa pada persamaan kontinuitas fase kontinu dan sebagai source spesies kimia. Source massa termasuk dalam perhitungan selanjutnya pada medan aliran fase kontinu.

Persamaan kekalan massa ini disebut juga sebagai persaman kontinuitas dan dapat dituliskan ke dalam persamaan (19) sebagai berikut:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

Persamaan kekekalan momentum berdasarkan dari persamaan Navier-Stokes's yang diturunkan dari hukum kedua Newton. Berikut persamaan kekekalan momentum ditunjukkan pada persamaan (20), (21), dan (22):

$$\frac{\partial(pu)}{\partial t} + \frac{\partial(pu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} + (\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}) \quad (20)$$

$$\frac{\partial(pv)}{\partial t} + \frac{\partial(puv)}{\partial x} + \frac{\partial(pv^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} + (\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}) \quad (21)$$

$$\frac{\partial(pw)}{\partial t} + \frac{\partial(puw)}{\partial x} + \frac{\partial(pvv)}{\partial y} + \frac{\partial(pw^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} + (\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}) \quad (22)$$

Persamaan kekekalan energi diturunkan dari persamaan hukum termodinamika pertama yang ditulis pada persamaan (23) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\rho\frac{\partial}{\partial t}\left(e + \frac{V^2}{2}\right) = \rho q &+ \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) - \frac{\partial(up)}{\partial x} \\ &- \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{xz})}{\partial z} \\ &+ \frac{\partial(V\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(V\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(V\tau_{yz})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho f.V\end{aligned} \quad (23)$$

Varian yang digunakan yaitu realizable k-epsilon dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan varian lainnya untuk kasus aliran swirl. Sehingga didapat persamaan atur turbulensi sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho k u_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \quad (24)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon})\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_1 \frac{\epsilon^2}{k+\sqrt{\nu\epsilon}} + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}C_{3\epsilon}G_b + S_e \quad (25)$$

Dalam penelitian ini, digunakan model Species Transport yang memodelkan proses pencampuran dan transport spesies kimia dari bahan bakar dengan persamaan atur sebagai berikut:

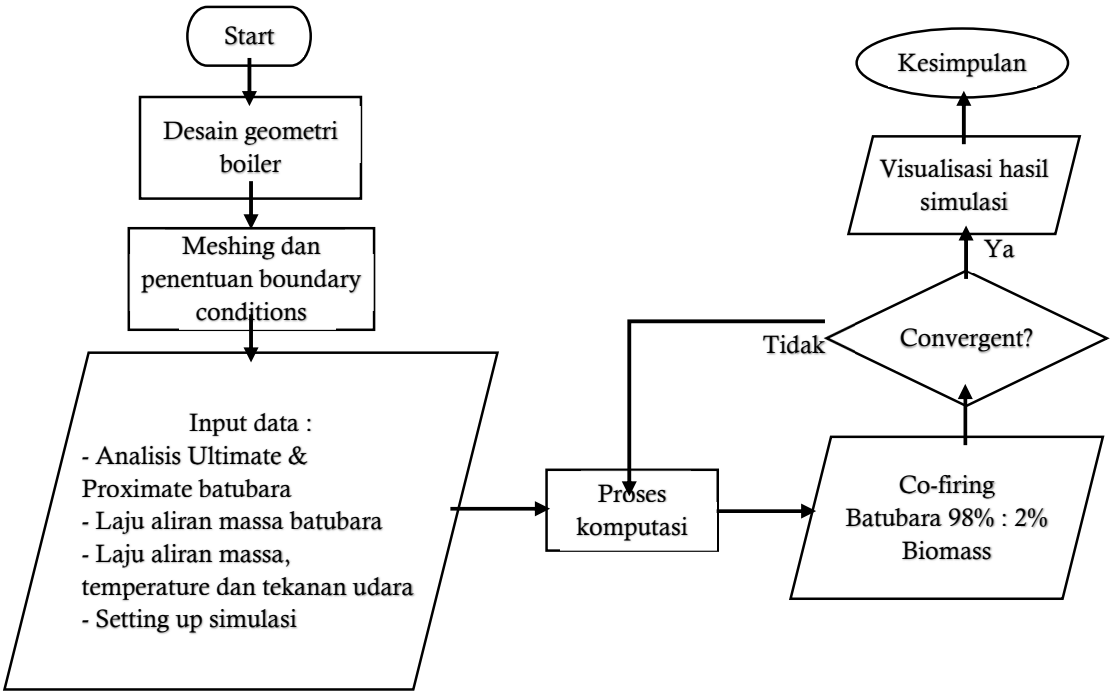
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho v Y_i) = -\nabla \cdot J_l + R_i + S_i \quad (26)$$

METODE PENELITIAN

Penelitian non-eksperimen yang dilakukan berupa perancangan boiler tipe *pulverized coal boiler* merujuk pada spesifikasi teknis PLTU Indramayu dengan dimensi panjang x lebar x tinggi (20,400 x 12,900 x 58,150) m^3.

Tabel 1. Data properties batubara

Parameter	Hasil Analisis			Satuan	Standart Acuan
	AR (As Received)	ADB (Air Dry Basis)	DB (Dry Basis)		
Total Moisture	33,21	-	-	%	ASTM D3302-15
Moisture In Analysis	-	7,53	-	%	ASTM D3173M-17a/ASTM D7582-15
Gross Calorific Value	4238	5868	6346	Cal/g	ASTM D5865-13
Total Sulfur	0,25	0,35	0,38	%	ASTM D4239-14A
Ash Content	4,19	5,8	6,27	%	ASTM D3174-12 / ASTM D7582-15
Volatile Matter	31,63	43,79	47,36	%	ASTM D3175-17 / ASTM D7582-15
Fixed Carbon	-	39,56	-	%	By Difference
Carbon	45,25	62,65	67,75	%	ASTM D5373-16
Hidrogen	3,14	5,2	4,71	%	ASTM D5373-16
Nitrogen	0,67	0,92	1	%	ASTM D5373-16
HGI		52		Point Index	ASTM D409 / D409-18
Ash Fusion Temperature (AFT)		Reducing	Oxiding		ASTM D1857-18
- Deformation Temperature	-	1230	-	degC	ASTM D1857-18
- Sperical Temperature	-	1246	-	degC	ASTM D1857-18
- Hemisphere Temperature	-	1260	-	degC	ASTM D1857-18
- Flow Temperature	-	1290	-	degC	ASTM D1857-18



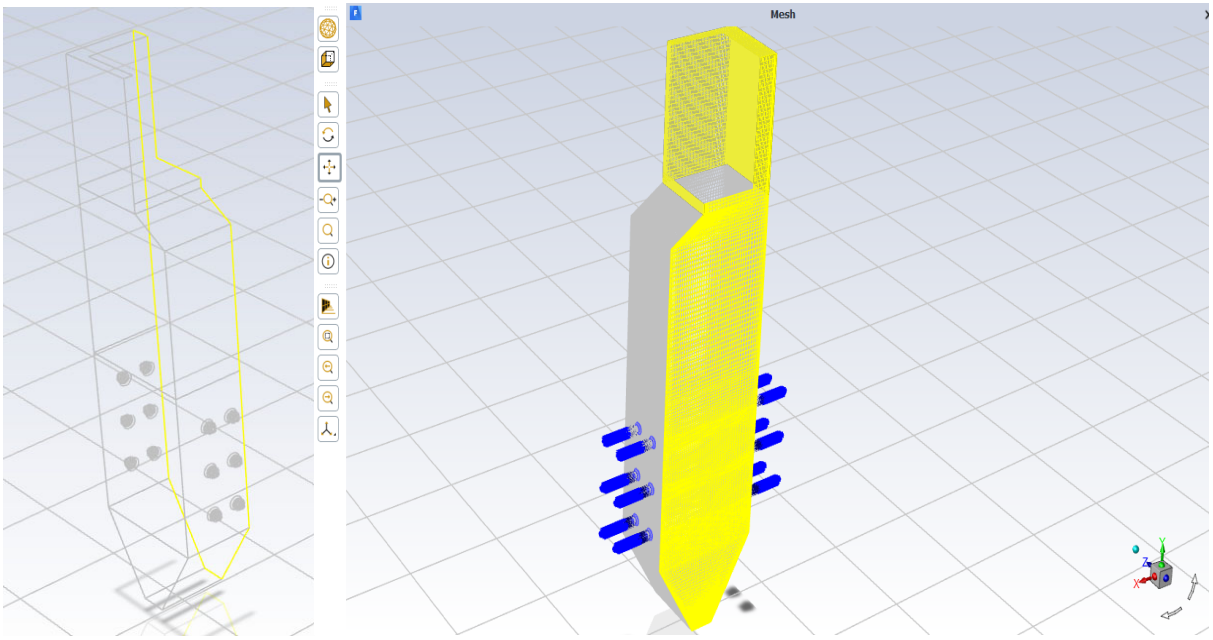
Gambar 1. Diagram alir simulasi co-firing

ISSN 2775-5630

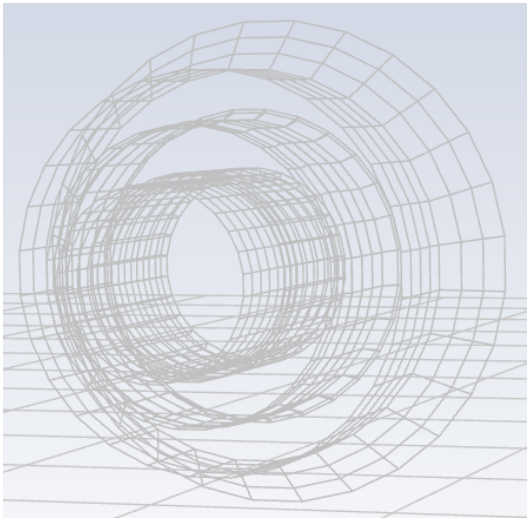
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam permodelan geometri boiler, perlu dilakukan beberapa penyederhanaan. Penyederhanaan dilakukan untuk memudahkan dalam permodelan, baik permodelan fisik (misalnya : membangun *mesh/grid*) maupun ketika proses kalkulasi (misalnya: mempercepat perhitungan). Batasan utama sehingga perlu dilakukan penyederhanaan pada model adalah kemampuan komputer yang digunakan.

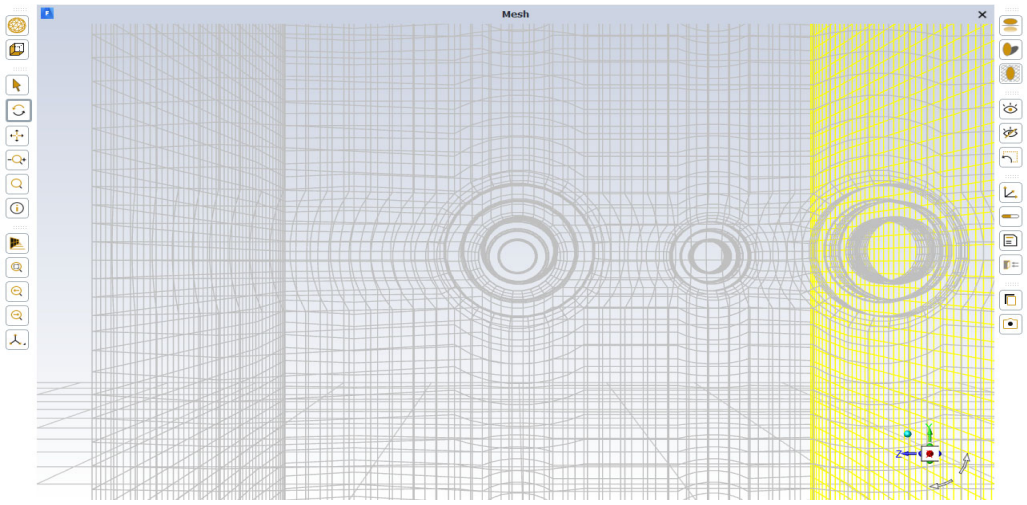
Hanya separuh domain komputasi saja yang dimodelkan. Permodelan seluruh domain komputasi akan memerlukan *mesh* dalam jumlah yang banyak, hal ini akan sangat memberatkan dalam proses kalkulasi yang dilakukan. Penggunaan berbagai ukuran *mesh* dengan ukuran yang ekstrim akan mempersulit proses membangun *mesh* dan kemungkinan gagal sangat besar. Permodelan separuh domain komputasi dilakukan berdasarkan asumsi bahwa aliran fluida di dalam ruang bakar akan mengalir sama antara separuh bagian yang dimodelkan dengan separuh bagian yang lain.



Gambar 2. Geometri dan meshing pada *furnace*



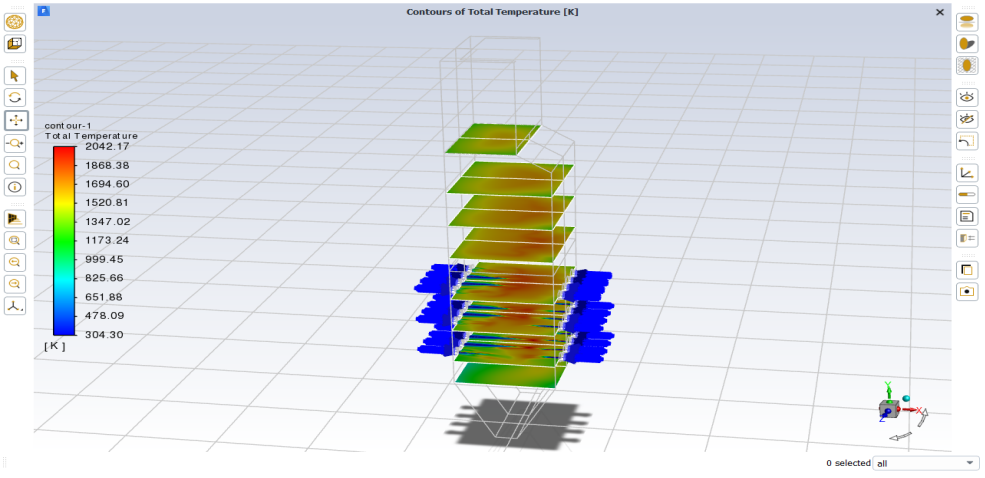
Gambar 3. Meshing pada *burner*



Gambar 4. Meshing pada *area burner*

Pembakaran dalam ruang bakar yang baik adalah pembakaran yang sedapat mungkin mampu menghasilkan distribusi temperatur yang *uniform.* Akan tetapi, distribusi temperatur di dalam ruang bakar akan sangat bervariasi. Bahan bakar dan udara disuplai memasuki ruang bakar pada temperatur yang relatif rendah, kemudian mencapai temperatur yang tinggi ketika proses pembakaran berlangsung. Setelah itu akan kembali menjadi dingin sebagai produk pembakaran. Banyak faktor yang mempengaruhi distribusi temperatur yang terjadi, antara lain : beban, *excess air,* konfigurasi burner, dan kondisi operasi lainnya (Riza 2009).

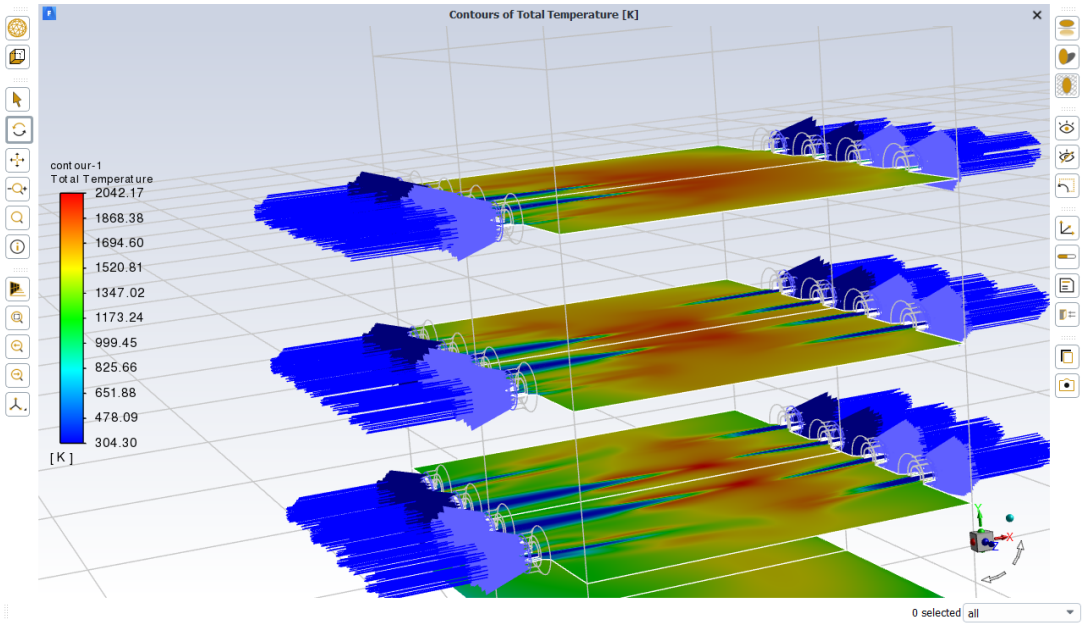
Hal yang perlu mendapatkan perhatian dalam simulasi pembakaran batubara serbuk (*pulverized coal*) adalah dimasukkannya pengaruh partikel batubara yang dimodelkan dalam fase diskrit dalam perhitungan perpindahan kalor secara radiasi. Dalam kasus ini, tidak bisa diterapkan asumsi bahwa perpindahan kalor yang terjadi secara dominan adalah konveksi. Dalam pembakaran batubara serbuk (*pulverized*), efek radiasi antar partikel memegang peranan yang penting dan tidak bisa diabaikan(Riza 2009).



Gambar 5. Kontur temperatur (K) pada *furnace*

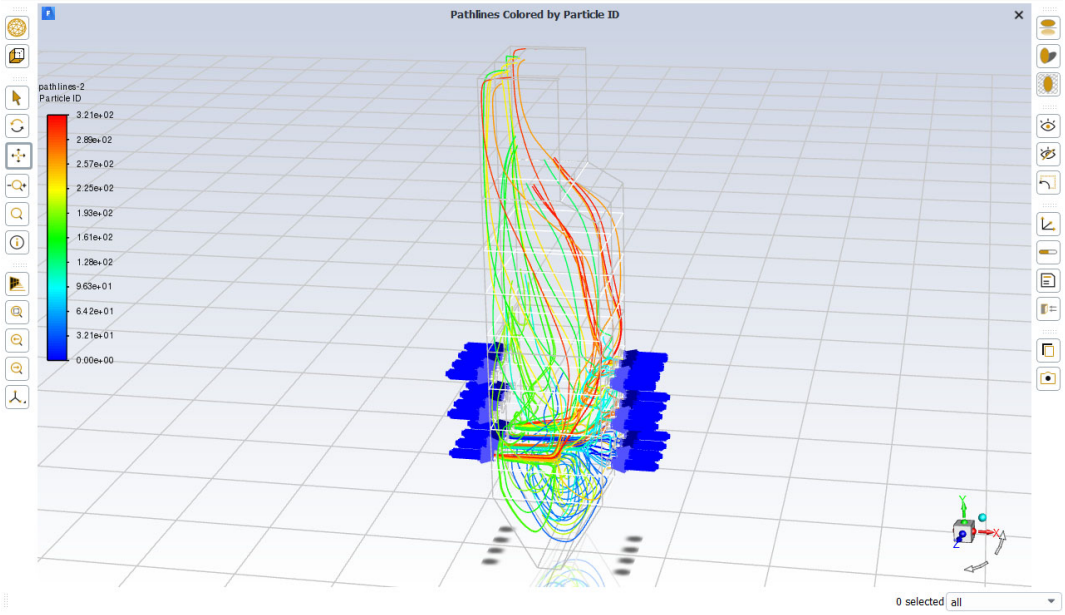
Kontur distribusi temperatur pada bidang XY dapat dilihat pada gambar 4.6, dimulai dari koordinat Z=0 sampai pada bidang *symmetry*. Dari gambar, tampak bahwa semakin ke bagian tengah boiler, temperatur yang dihasilkan semakin tinggi. Hal ini disebabkan semakin ke bagian tengah, proses pembakaran terjadi semakin intensif. Bentuk lidah api juga mengindikasikan hal yang sama. Bentuk lidah api yang paling besar terdapat pada bagian paling tengah, yaitu bidang *symmetry*. Semakin menuju kearah *front wal* dan bagian atas furnacel lidah api yang terbentuk semakin mengecil.

Daerah yang sangat dekat dengan bagian *inlet* batubara dan udara menghasilkan nilai temperatur yang minimum. Hal ini disebabkan gas di area ini secara kontinyu disuplai oleh *fluks* inputan udara dan batubara yang masih bertemperatur rendah. Campuran batubara dan udara ini memerlukan waktu untuk menaikkan temperaturnya sampai diatas titik nyala untuk terjadinya *ignition*.

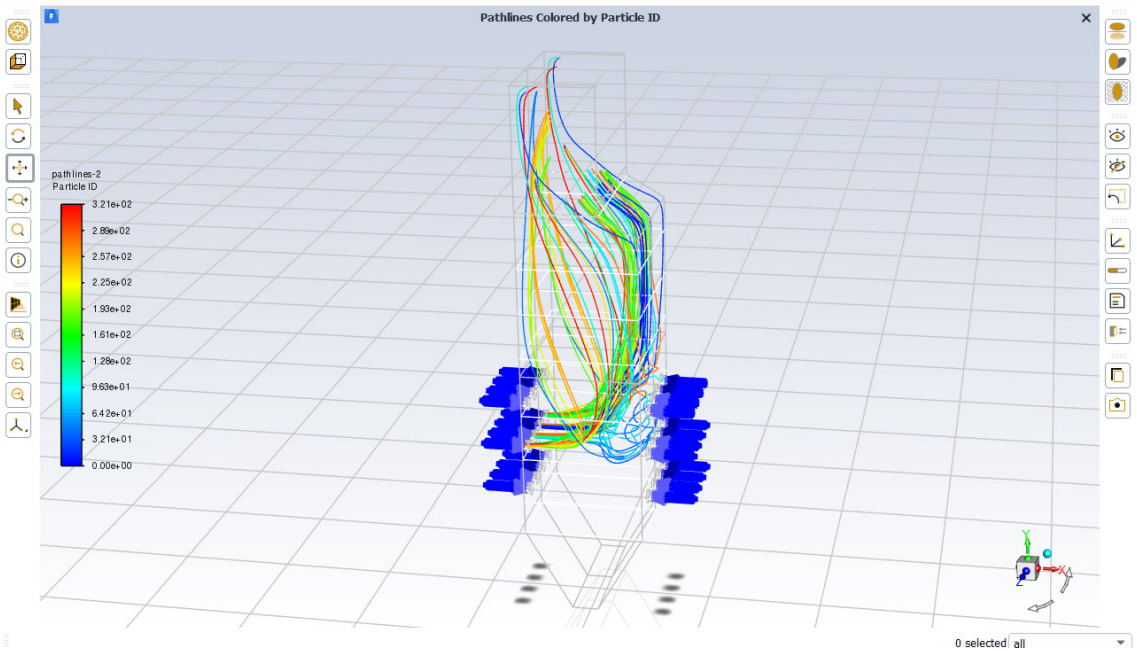


Gambar 6. Kontur temperatur (K) pada inlet batubara dan udara

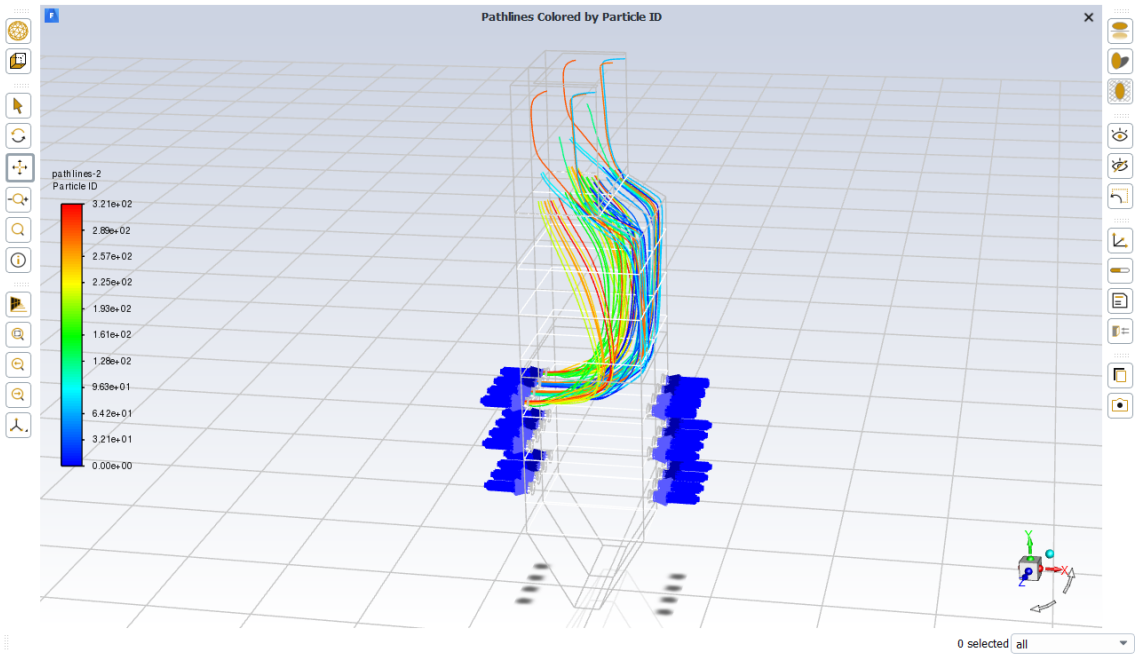
Simulasi pembakaran batubara serbuk melibatkan aliran partikel batubara yang terbawa oleh aliran udara dan gas pembakaran. Terjadi interaksi perpindahan massa, energi, dan momentum antara partikel dan aliran gas pembakaran. Tiap-tiap partikel batubara bergerak dalam ruang bakar mengikuti *trajectory*-nya masing-masing. *Trajectory* tiap-tiap partikel batubara membentuk lintasan yang bernama *pathlines.* Gambar 7. menunjukkan *pathlines* partikel batubara yang keluar dari masing-masing konfigurasi burner dalam boiler.



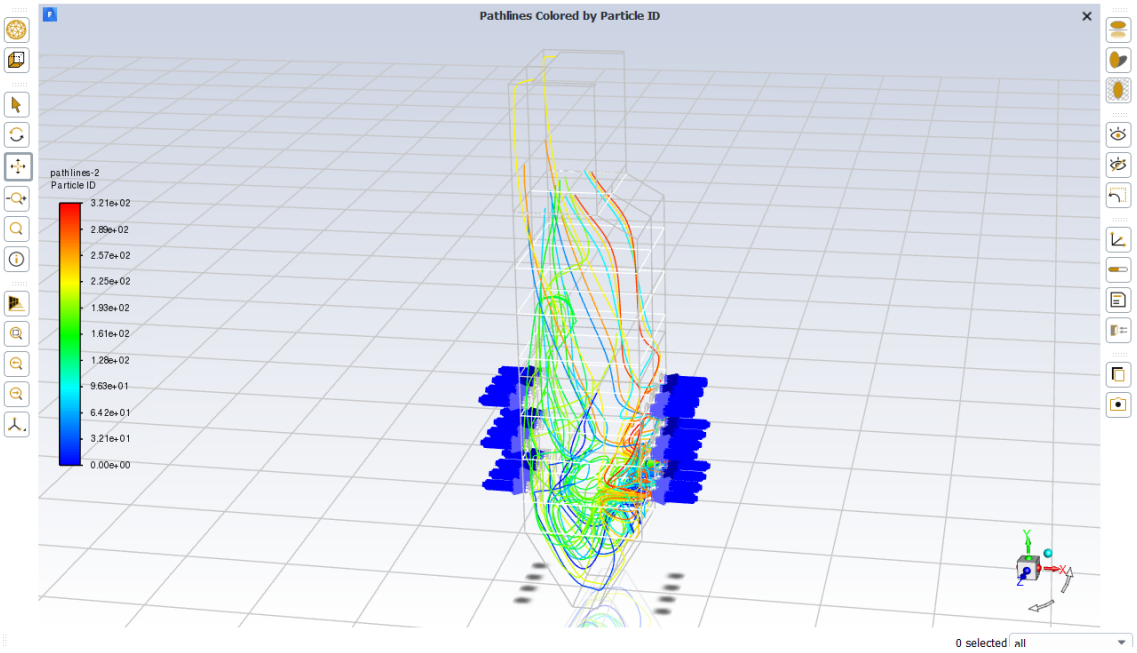
Gambar 7. Particle pathlines burner A



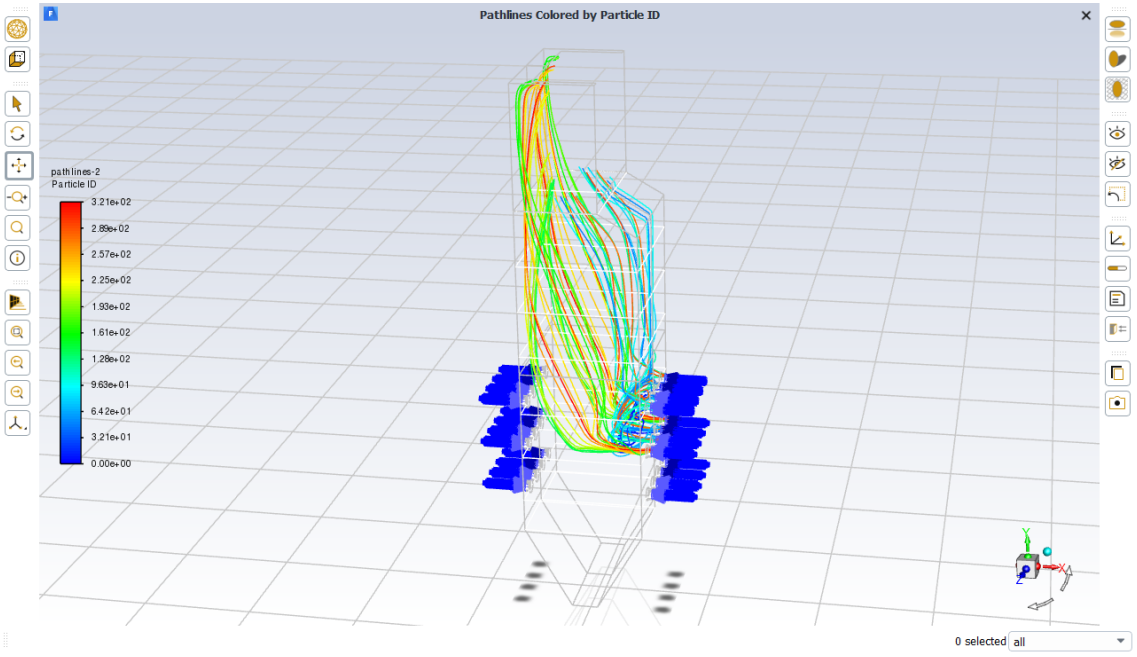
Gambar 8. Particle pathlines burner B



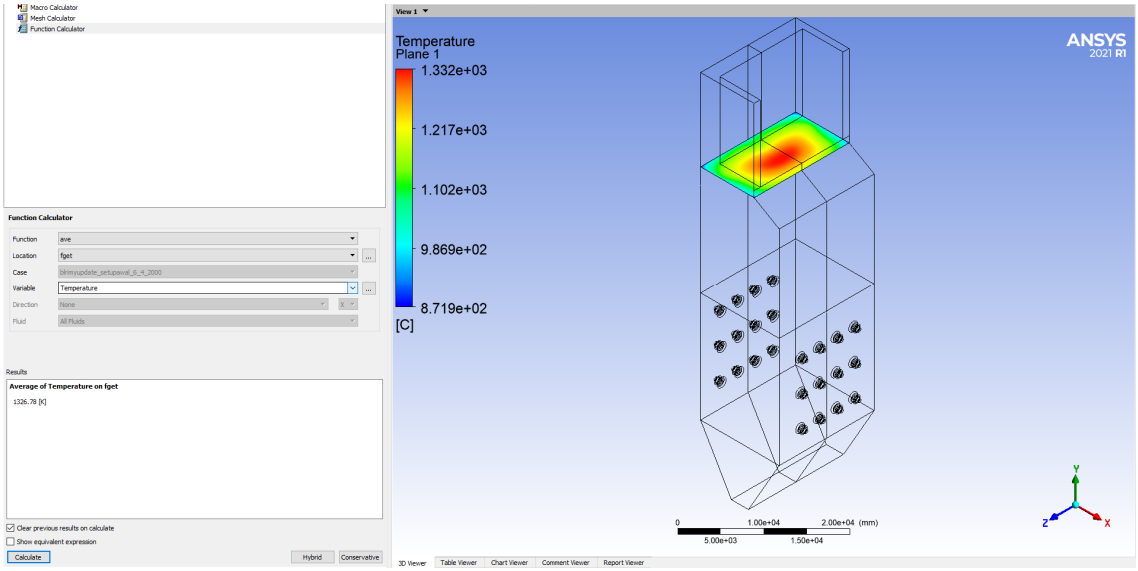
Gambar 9. Particle pathlines burner C



Gambar 10. Particle pathlines burner D



Gambar 11. Particle pathlines burner E



Gambar 12. Kontur pembakaran area FEGT

KESIMPULAN

Dari pembahasan yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa berdasarkan hasil simulasi temperatur inlet bahan bakar dan udara yaitu 333 K, temperatur rata-rata tertinggi berada pada sumbu simetri boiler (bagian tengah), Temperatur FEGT simulasi mencapai 1.326 K. Waktu terjadinya devolatilisasi dan *char burnout* masing-masing partikel tidak sama. Faktor ukuran partikel sangat mempengaruhi hal tersebut. Ukuran partikel yang lebih kecil akan lebih cepat terurai dalam proses devolatilisasi dan kemudian segera mengalami *char burnout.* Untuk partikel yang lebih besar waktu yang dibutuhkan akan lebih lama.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Anderson, J. D., 1995, Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications, McGraw-Hill, New York.
[2] ANSYS, Inc., 2020, ANSYS Fluent 2020 R1 Theory Guide, Southpointe, Canonsburg.
[3] ANSYS, Inc., 2013, ANSYS Fluent 15.0 User's Guide, Southpointe, Canonsburg.
[4] ANSYS, Inc., 2010, ANSYS Meshing 13.0 User's Guide, Southpointe, Canonsburg.
[5] Cengel, Y. dan Cimbala, J. M., 2006, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, McGraw-Hill, New York
[6] Ariningtyas, N. (2014). Studi Numerik Pengaruh Konfigurasi Pengumpanan Dua Jenis Batubara dengan Metode In-Furnace Blending terhadap Proses Pembakaran pada Boiler Tangensial.
[7] Riza, A. N. (2009). Simulasi Numerik Batubara Serbuk (Pulverized Coal) dalam Boiler Furnace 400 MW.
[8] Asotani, T., Yamashita, T., Tominaga, H., Uesugi, Y., Itaya, Y., & Mori, S. (2008). Prediction of ignition behavior in a tangentially fired pulverized coal boiler using CFD. Fuel, 87(4–5), 482–490
[9] Bilirgen, H. (2014). Slagging in PC boilers and developing mitigation strategies. Fuel, 115, 618–624
[10] Febyanasari, R. (2014). Pembakaran Pada Tangentially Fired Menggunakan OxyFuel Pada Kasus Coal Blending Antara Medium Rank Coal (Mrc) Dan Low Rank Coal (Lrc) Numerical Study of Flow and Combustion Characteristics in a Tangentially Fired Pulverized Coal Boiler Using Oxy-Fuel.
[11] Rousseau, P., & Laubscher, R. (2020). Analysis of the impact of coal quality on the heat transfer distribution in a high-ash pulverized coal boiler using cosimulation. Energy, 198.
[12] Zaid, M. Z. S. M., Wahid, M. A., Mailah, M., Mazlan, M. A., & Saat, A. (2019). Coal combustion analysis tool in coal fired power plant for slagging and fouling guidelines. AIP Conference Proceedings 2062 (January).
[13] Zhu, C., Tu, H., Bai, Y., Ma, D., & Zhao, Y. (2019). Evaluation of slagging and fouling characteristics during Zhundong coal co-firing with a Si/Al dominated low rank coal. Fuel, 254(March), 115730.

[14] Echi, S., Bouabidi, A., Driss, Z. dan Abid, M. S., 2019, CFD simulation and optimization of industrial boiler, Energy, 169, 105-114.
[15] Fu, W., Zhang, Y. dan Han, H., 1989, A general model of pulverized coal devolatilization, Fuel, 68, 505–10.
[16] Heikkinen, J. M., Venneker, B. C. H. dan di Nola, G., 2008, CFD-simulation and experimental validation of co-combustion of chicken litter and MBM with pulverized coal in a flow reactor, Fuel Process Technol, 89, 874–89.
[17] Sarkar, D. K., 2015, Thermal Power Plant Design and Operation, Radarweg, Amsterdam.
[18] Tu, J., Inthavong, K. dan Ahmadi, G., 2013, Computational Fluid and Particle Dynamics in the Human Respiratory System, Springer Dordrecht Heidelberg, London.
[19] Bhatt, B. I., dan Vora, S. M., 1979, *Stoichiometry,* Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi
[20] Bindar, Y. dan Irawan, A., 2009, *Training Industrial Combustion and Burner,* PT. Indonesia Power UBP Suralaya
[21] Borman, G. L., dan Ragland, K. W. , 1998, *Combustion Engineering*, Mc Graw-Hill, New York.
[22] Desain Manual Vol. BD06 Suralaya Power Plant
[23] Filkoski, R.V., Petrovski, I. J., Karas, P., 2006 , Optimisation of Pulverised Coal Combustion by Means of CFD/CTA Modelling, *Thermal Science,* vol. 10, No. 3, pp. 161-179.
[24] Fluent Inc., 2003.
[25] Indrusiak, M. L. S., Beskow A. B., Da Silva, C.V., 2009, *Thermal Power Plant Boiler Misoperation-Case Study Using CFD*, diambil dari http://www.combustion.org.uk/ECM_2009/P810081.pdf , diakses bulan September 2009.
[26] International Energy Agency (IEA), 2009, *Key World Energy Statistics.*
[27] International Energy Agency(IEA), 2002, *World Enenrgy Outlook.*
[28] Kitto, J. B., dan Stultz, S. C., 2005, *Steam Its Generation and Use,* Edisi 41*,* Babcock and Wilcox Company, Barberton, Ohio, U.S.A.
[29] Kyle, B. G., 1984, *Chemical and Process Thermodynamics,* Prentice Hall, Englewood Cliffs.
[30] Kurniawan, A. D., 2009, Simulasi Numerik Modifikasi Slot Furnace untuk Proses Post Weld Heat Treatment pada Header Harp HRSG di PT. Alstom Power Energy Systems Indonesia, *Skripsi,* Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
[31] Makhfud, 2008, Simulasi Numerik Karakteristik Burner Tipe Low-Nox Dengan Bahan Bakar Bertingkat, *Skripsi,* Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta