

ANALISIS HIDRODINAMIKA DI DALAM *CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER* BERDASARKAN PERUBAHAN WAKTU MENGGUNAKAN CFD

M.S.K Tony Suryo Utomo^a, Eflita Yohana^a, Rayhan Halim^b

^aDosen Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

^bMahasiswa Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: rayhanhalimz@gmail.com

Abstrak

Industri pembangkit listrik secara progresif telah meningkatkan desain pembangkit listrik untuk menanggulangi perubahan iklim global. Pembangkit listrik tenaga batu bara akan lebih bersih dan lebih efisien dengan adanya teknologi CFB (*Circulating Fluidized Bed*) boiler. CFB boiler memiliki keunggulan dimana emisi karbondioksida, SO_x dan NO_x yang dihasilkan berkurang secara signifikan, sehingga penelitian mengenai CFB boiler banyak dilakukan salah satunya menggunakan CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Penelitian kali ini bertujuan menentukan model turbulensi yang paling tepat dalam simulasi CFD pada CFB boiler untuk menganalisis hidrodinamika di dalamnya terhadap perubahan waktu yang meliputi distribusi fraksi volume solid, tekanan, kecepatan dan tegangan geser dinding. Simulasi dilakukan dengan menguji 3 model turbulensi, yaitu Standard *k-ε*, RNG *k-ε* dan RSM yang akan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Hasil yang paling mendekati dengan data eksperimen adalah model RNG *k-ε* di mana nilai error yang diperoleh sebesar 6.24%. Daerah yang terdapat fraksi volume solid semakin meluas pada bagian bawah furnace sampai pada ketinggian 15 m dengan nilai berkisar pada 0.05 - 0.1. Daerah yang bertekanan tinggi semakin meluas pada bagian bawah furnace sampai pada ketinggian 15 m dengan nilai berkisar pada 3 kPa - 10 kPa. Kecepatan mengalami kenaikan dari 43 m/s sampai 50 m/s pada saluran outlet. Tegangan geser dinding mengalami kenaikan dari 0.75 Pa sampai 1.1 Pa pada dinding saluran outlet.

Kata kunci: CFB boiler; CFD; data perubahan waktu; model turbulensi

Abstract

*The power generation industry has progressively improved the design of power plants to tackle global climate change. Coal-fired power plants will be cleaner and more efficient with the CFB (*Circulating Fluidized Bed*) technology in the boiler. CFB Boilers have the advantage where the resulting carbon dioxide, SO_x, and NO_x emissions are significantly reduced. This makes research on CFB boilers widely carried out, especially those using CFD (*Computational Fluid Dynamic*). This study aims to determine the most appropriate turbulence model using CFD simulations on CFB boilers to analyze the hydrodynamic elements in the boiler against time changes, including the distribution of solid volume fractions, pressure, velocity, and wall shear stress. The simulation was carried out by testing three turbulence models: Standard *k-ε*, RNG *k-ε*, and RSM, which would be compared with previous studies. The result closest to the experimental data is the RNG *k-ε* model, where the error value obtained is 6.24%. Solid volume fraction area is increasingly widespread at the bottom of the furnace to a height of 15 m with values ranging from 0.05 to 0.1. The high-pressure area further expands at the bottom of the furnace to a height of 15 m, with values ranging from 3 kPa to 10 kPa. The outlet line velocity has increased from 43 m/s to 50 m/s. The wall shear stress increases from 0.75 Pa to 1.1 Pa at the outlet wall.*

Keywords: CFB boiler; CFD; turbulence model; time change data

1. Pendahuluan

Saat ini, dunia mengalami perubahan iklim global yang berdampak kepada bencana global dan menjadi masalah lingkungan paling mendesak yang dihadapi umat manusia [1]. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) menyebutkan bahwa Indonesia berkomitmen dalam memberikan kontribusi terhadap solusi perubahan iklim global. Salah satu solusinya yaitu pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) yang merupakan penyebab terjadinya pemanasan global, akibat dari penggundulan dan pembakaran hutan serta emisi proses pembakaran bahan bakar fosil (minyak bumi dan batu bara) dalam sektor pembangkit listrik [2], sehingga perlu diperhitungkan pengelolaan emisi dengan diikuti tindakan mitigasi yang tepat [3]. Oleh karena itu, industri pembangkit listrik secara progresif telah meningkatkan desain pembangkit listrik untuk memenuhi batasan polusi udara yang semakin ketat.

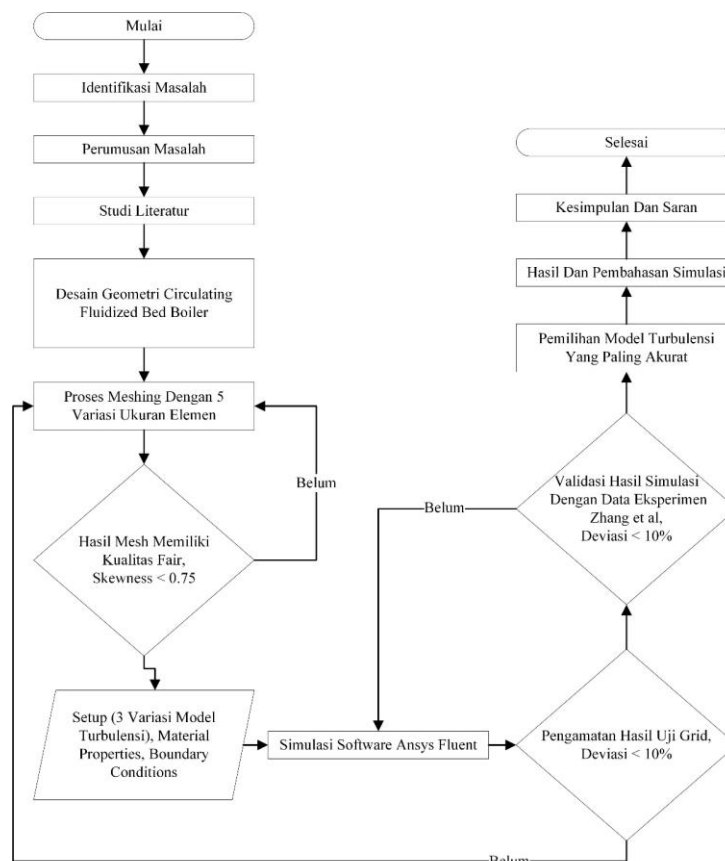
Boiler merupakan komponen utama dalam sistem pembangkit listrik yang salah satunya berbahan bakar batu bara. Dari beberapa jenis boiler, CFB boiler memiliki pembakaran yang lebih efisien dan gas buang yang lebih bersih dibandingkan boiler jenis lainnya [4]. Teknologi CFB Boiler memiliki keunggulan dimana emisi karbondioksida, SOx dan NOx yang dihasilkan berkurang secara signifikan sehingga emisinya lebih bersih terhadap lingkungan [5-8]. Pengurangan emisi ini dicapai tanpa burner kompleks atau fasilitas pengolahan gas buang tambahan [9]. Kondisi operasi dalam CFB boiler berbeda secara signifikan dari pulverized coal (PC) boiler. Pembakaran/gasifikasi CFB boiler lebih optimal dalam memanfaatkan batubara alkali tinggi [10]. Temperatur tungku pada CFB boiler (sekitar 800-900°C) yang lebih rendah dari PC boiler (sekitar 1300-1700°C) dapat menghambat pelepasan natrium dari partikel batubara dan mengurangi jumlah partikel abu cair, sehingga diperlukan lebih banyak penelitian untuk memahami CFB boiler lebih jauh agar teknologi ini dapat dimanfaatkan dengan baik [7].

Kerumitan pola hidrodinamika dan perilaku pembakaran CFB boiler sering kali menjadi masalah dalam kajian teoritis maupun eksperimental karena hanya sedikit yang mempertimbangkan penelitiannya [11]. Dengan adanya perkembangan teknologi mendorong para peneliti memanfaatkan simulasi dengan computational fluid dynamics (CFD), karena mampu menyediakan cara yang hemat biaya dalam memahami karakteristik aliran fluida untuk mensimulasikan proses CFB boiler, sehingga perancangan dan pengoperasiannya dapat dioptimalkan [12-13].

Secara umum, model CFB boiler terdiri dari struktur aliran multifase gas-padat di mana terdapat 2 jenis material yang digunakan, yaitu udara dan bed material. Bed material atau disebut material solid inilah yang berfungsi sebagai sorben yang menyerap emisi dan panas berlebih [14]. Penelitian CFB boiler menggunakan simulasi CFD saat ini sudah banyak dilakukan di mana model turbulensi yang digunakan oleh beberapa peneliti sebelumnya masih berbeda-beda, di antaranya yaitu model turbulensi Standard $k-\epsilon$ dan RNG $k-\epsilon$. Standard $k-\epsilon$ model sudah pernah digunakan pada simulasi CFB boiler oleh Amoo yang menjelaskan bahwa nilai error dari validasi hasil simulasi yang dilakukan terhadap data eksperimen sebesar 10% berdasarkan nilai temperatur di dalam furnace [18]. RNG $k-\epsilon$ model digunakan pada simulasi CFB boiler oleh Ji et al. yang menjelaskan bahwa nilai error dari validasi hasil simulasi yang dilakukan terhadap data eksperimen sebesar 8.9% berdasarkan nilai konsentrasi gas NO di dalam furnace [10].

Maka dari itu, perlu dilakukan penelitian untuk membandingkan 2 model turbulensi tersebut dan model turbulensi lainnya yaitu RSM yang secara teori dapat memberikan hasil yang lebih akurat dalam simulasi CFD pada CFB boiler. Penelitian kali ini bertujuan untuk menentukan model turbulensi dalam simulasi CFD pada CFB boiler agar dapat diketahui model mana yang paling tepat untuk digunakan. Selain itu, analisis hidrodinamika dilakukan terhadap perubahan waktu yang meliputi distribusi fraksi volume solid, tekanan, kecepatan dan tegangan geser dinding.

2. Metode Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.1 Persamaan Pembangun

2.1.1 Konservasi Massa

Model multifase Eulerian aliran granular digunakan untuk pemodelan aliran fluidized bed yang terdiri dari dua fase yaitu fase fluid dan fase solid. Persamaan konservasi massa atau kontinuitas untuk fase solid dalam model multifase Eulerian yang diselesaikan oleh ANSYS Fluent dapat ditulis pada persamaan 1 [21]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (1)$$

2.1.2 Konservasi Momentum

ANSYS Fluent menggunakan model granular multi-fluid untuk mendeskripsikan aliran campuran fluid-solid. Tegangan fase solid diperoleh dengan membuat persamaan antara gerakan acak partikel yang timbul dari tumbukan partikel-partikel dan gerakan termal molekul dalam gas dengan mempertimbangkan inelastisitas fase granular. Persamaan konservasi momentum untuk fase solid dalam model multifase Eulerian dapat ditulis pada persamaan 2 [21]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) \\ & + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}) \end{aligned} \quad (2)$$

2.1.3 Turbulence Model

ANSYS Fluent menyediakan tiga metode untuk memodelkan turbulensi dalam aliran multifase pada model $k-\epsilon$. Selain itu, ANSYS Fluent menyediakan dua opsi turbulensi pada Reynolds stress model (RSM) [21].

Opsi model turbulensi $k-\epsilon$ di antaranya:

- 1) turbulensi campuran
- 2) model turbulensi terdispersi
- 3) model turbulensi untuk setiap fase

Opsi model turbulensi RSM di antaranya:

- 1) model turbulensi campuran
- 2) model turbulensi terdispersi

Standard $k-\epsilon$ model adalah model yang didasarkan pada persamaan transportasi model untuk energi kinetik turbulensi (k) dan laju disipasinya (ϵ). Standard $k-\epsilon$ model digunakan untuk aliran fully turbulent dan dalam turunannya efek viskositas molekul dapat diabaikan. Energi kinetik turbulensi, k , dan laju disipasinya, ϵ , diperoleh dari persamaan 3 dan 4 [21]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + Gk + Gb - \rho \epsilon - Y_M + Sk \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} (Gk + C_{3\epsilon} + Gb) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - Y_M + S\epsilon \quad (4)$$

Kelebihan RNG $k-\epsilon$ model dibandingkan dengan standard $k-\epsilon$ model di antaranya [21]:

- 1) Model RNG memiliki istilah tambahan dalam persamaan ϵ -nya yang meningkatkan akurasi untuk aliran regangan cepat.
- 2) Efek pusaran pada turbulensi disertakan dalam model RNG yang meningkatkan akurasi untuk aliran berputar.
- 3) Teori RNG memberikan persamaan analitik untuk bilangan Prandtl turbulen, sedangkan standard $k-\epsilon$ model menggunakan nilai konstan yang ditentukan oleh pengguna.
- 4) Standard $k-\epsilon$ model adalah model bilangan Reynolds tinggi, sedangkan teori RNG memberikan persamaan yang diturunkan secara analitik untuk aliran viskos yang memperhitungkan pengaruh bilangan Reynolds rendah.

Bentuk RNG $k-\epsilon$ model ditulis pada persamaan 5 dan 6 [21]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + Gk + Gb - \rho \varepsilon - Y_M + Sk \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (Gk + C_{3\varepsilon} Gb) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R\varepsilon + S\varepsilon \quad (6)$$

Reynolds stress model (RSM) memperhitungkan efek kelengkungan streamline, pusaran, rotasi, dan perubahan cepat dalam laju regangan dengan cara yang lebih ketat daripada model satu persamaan dan dua persamaan, sehingga RSM memiliki potensi lebih besar untuk memberikan prediksi akurat untuk aliran kompleks. RSM digunakan ketika fitur aliran adalah hasil dari anisotropi dalam tegangan Reynolds. Di antara contohnya adalah aliran cyclone, aliran pusaran tinggi di ruang bakar, saluran aliran yang berputar, dan aliran sekunder yang diinduksi tegangan di saluran. Persamaan transport untuk RSM dapat ditulis pada persamaan 7 [21]:

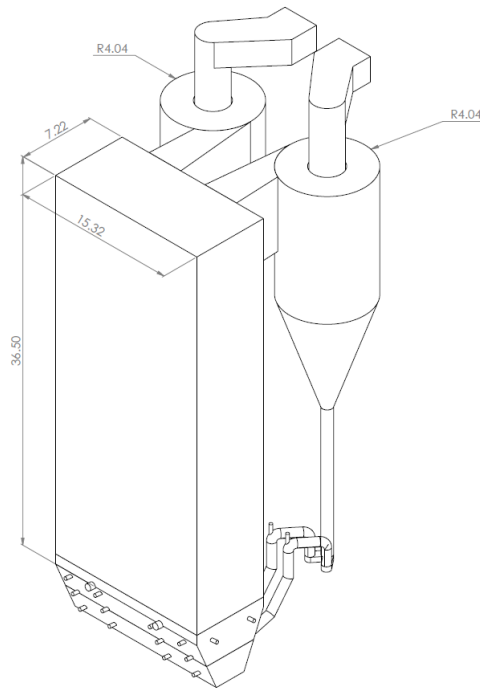
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u'_i u'_j) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k u'_i u'_j) = & -\frac{\partial}{\partial x_k} [\rho u'_i u'_j u'_k + p'(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (u'_i u'_j) \right] - \rho \left(u'_i u'_k \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} + u'_j u'_k \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \\ & - \rho \beta (g_i u'_j \theta + g_j u'_i \theta) + p' \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \\ & - 2\rho \Omega_k (u'_j u'_m \varepsilon_{ikm} + u'_i u'_m \varepsilon_{jkm}) + S_{user} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 Objek Penelitian

Penelitian ini dilakukan berdasarkan simulasi yang dilakukan sebelumnya oleh Zhang et al. CFB boiler pada penelitian tersebut didesain oleh Harbin Boiler Co. Ltd. yang berada di Guangdong, China [20]. Pada CFB boiler tersebut terdapat 2 jenis fase yang bekerja, yaitu fase gas berupa udara dan solid berupa bed material. Bed material berwujud pasir, berfungsi sebagai sorben yang menyerap polutan SO₂ dan panas yang berlebih, sehingga proses pembakaran menghasilkan temperatur yang lebih rendah. Temperatur pembakaran yang dihasilkan oleh CFB boiler sebesar 800-900°C, sedangkan temperatur pembakaran yang dihasilkan oleh PC boiler sebesar 1300-1700°C. Oleh karena itu, penurunan temperatur pada CFB boiler akan mengurangi pembentukan NO_x. Sorben inilah yang membedakan boiler tipe CFB dari boiler jenis lainnya [5]. Metode simulasi yang digunakan sesuai dengan simulasi pada penelitian Zhang et al. [20]. Simulasi CFD hidrodinamika pada CFB boiler ini bertujuan untuk menentukan model turbulensi yang paling tepat dan menganalisis distribusi fraksi volume solid, tekanan, kecepatan dan tegangan geser dinding. Hasil yang diamati pada simulasi ini diambil pada interval waktu 10 s, 20 s, 30 s, 40 s. Boiler mencapai keadaan stabil pada detik ke 40 [20].

2.3 Geometry dan Mesh

Desain geometri boiler dibuat berdasarkan desain CFB boiler yang tertera pada penelitian Zhang et al. [20]. Desain yang ditampilkan pada Gambar 1 terdiri dari 2 cyclone yang berfungsi untuk mengumpulkan partikel sorben dan bahan bakar yang belum terbakar sempurna untuk dikembalikan lagi ke dalam furnace yang merupakan ruang pembakaran [22]. Furnace memiliki dimensi 15.32 × 36.5 × 7.22 m dan setiap cyclone memiliki diameter 8.08 m.



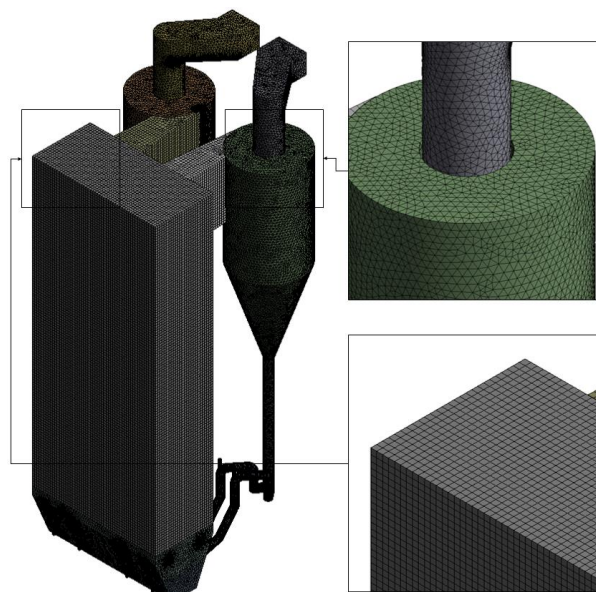
Gambar 2. Desain Geometri Boiler. [20]

Meshing yang digunakan sesuai dengan metode simulasi Zhang et al. [20], yaitu jenis polygonal dan hexahedral yang ditunjukkan pada Gambar 2. Cara membuat mesh polygonal adalah dengan membuat mesh tetrahedral pada Ansys Meshing terlebih dahulu, lalu dikonversi menjadi mesh polygonal pada Ansys Fluent [24]. Nilai skewness yang diizinkan di bawah 0.75 termasuk dalam kategori fair dan ditunjukkan pada Tabel 1 [23].

Tabel 1

Nilai Kualitas Meshing Pada Ansys [23]

Value of Skewness	Cell Quality
1	degenerate
0.9 - <1	bad (sliver)
0.75 - 0.9	poor
0.5 - 0.75	fair
0.25 - 0.5	good
>0 - 0.25	excellent
0	equilateral



Gambar 3. Meshing pada Boiler. [20]

2.4 Simulation Settings

Tabel 2 menampilkan pemodelan simulasi pada penelitian ini. Model multifase menggunakan Eulerian karena model ini untuk 2 fase terpisah namun saling berinteraksi. Model Viscous yang diuji adalah standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, dan RSM. Opsi Turbulence multiphase model menggunakan model turbulensi terdispersi karena model tersebut khusus aliran granular [21].

Tabel 2
Model simulasi Circulating Fluidized Bed Boiler [20,21]

Model	Information	Election Basis
Multiphase	Eulerian	Used for modeling separate phases, but interacting with each other
Viscous	Standard $k-\epsilon$	the assumption is that the flow is fully turbulent
	RNG $k-\epsilon$	enhancing accuracy for swirling flows
	RSM	enhancing accuracy for swirling flows
Turbulence multiphase model	Dispersed	Used when the model is granular flow

Nilai material properties ditampilkan pada Tabel 3. Nilai density material gas dan solid dan viscosity material gas diambil dari penelitian Zhang et al. [20]. Nilai viscosity material solid disamakan dengan material gas [24].

Tabel 3
Material Properties [20,24]

Properties	Material	
	Gas	Solid
Density (kg/m^3)	0.2928	2000
Viscosity (kg/ms)	4.71×10^{-5}	4.71×10^{-5}

Tabel 4 berisikan keterangan khusus mengenai properties dari material fase granular. Model dua fase aliran dengan teori kinetik aliran granular digunakan untuk memprediksi fenomena hidrodinamika [17].

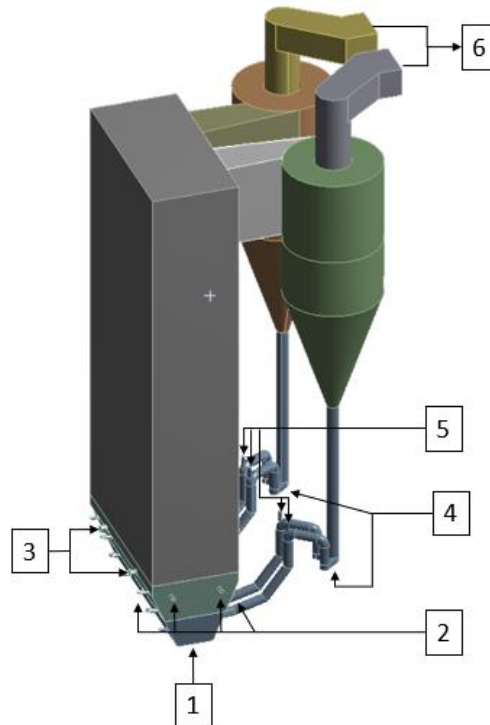
Tabel 4
Granular Properties [20]

Properties	Setting
Diameter	0.0002 m
Granular temperature	Phase property
Granular viscosity	Gidaspow
Granular bulk viscosity	Lun et al.
Frictional viscosity	Schaeffer

Untuk mendapatkan hasil yang mendekati data eksperimen, maka nilai kondisi batas disesuaikan dengan data simulasi Zhang et al. [20]. Kondisi batas ditunjukkan pada Tabel 5. Daerah boundary condition ditunjukkan pada Gambar 3 yang terdiri dari (1) Primary air inlet, (2) Secondary air inlet, (3) Slag-cooler inlet, (4) Loop-seal inlet, (5) Coal-feed inlet, (6) Cyclone outlet [20].

Tabel 5
Boundary Conditions [20]

boundary conditions	mass flow rate (kg/s)	
	air phase	solid phase
Primary air inlet	94.16	0
Secondary air inlet	53.2	0
Slag-cooler inlet	8	0
Loop-seal inlet	2.32	0
Coal-feed inlet	12.48	0
boundary conditions	air phase	solid phase
Cyclone outlet	pressure outlet (default)	
Wall	no slip	partial slip (0.6)



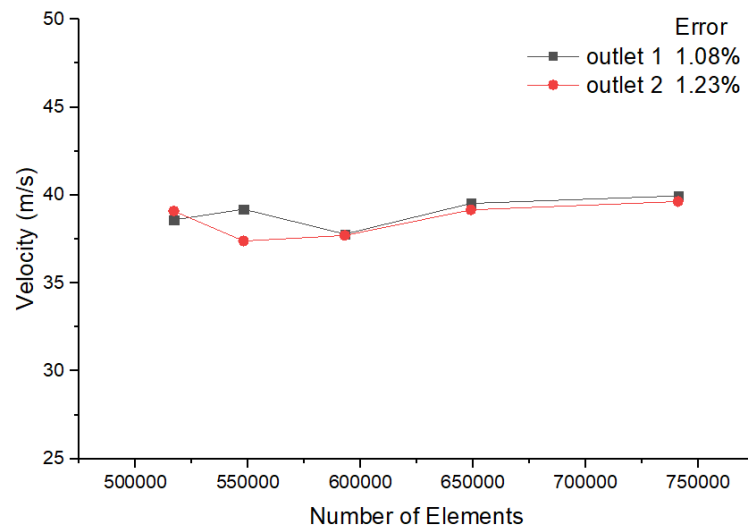
Gambar 4. Boundary Conditions.

2.5 Solution

Hybrid initialization digunakan pada simulasi ini. Pada keadaan awal, tumpukan solid dimasukkan dari ketinggian 0 - 2.5 m di dalam furnace dengan nilai solid volume fraction yaitu 0.4. Nilai ketinggian diinput pada menu region adaption, kemudian pilih menu patch untuk memasukkan nilai solid volume fraction [24]. Pressure-velocity coupling menggunakan metode phase coupled SIMPLE, spatial discretization pada momentum dan volume fraction menggunakan first order upwind [20]. Simulasi dijalankan dalam waktu 40 s dengan time step size sebesar 0.5 s.

2.6 Uji Grid Independen

Uji grid independen pada penelitian ini bertujuan memilih jumlah cell yang tepat agar hasil simulasi didapat secara akurat terhadap meshing, dilakukan dengan menguji 5 variasi jumlah cell, yaitu 517000, 548000, 593000, 649000, dan 741000. Gambar 4 menunjukkan kecepatan di kedua outlet menjadi stabil sekitar 39 m/s pada simulasi menggunakan jumlah cell 649000, dengan nilai error terhadap jumlah cell terbanyak adalah 1.08% dan 1.23% pada kedua outlet. Nilai tersebut sudah dibawah nilai error yang diizinkan sebesar 10% [18,25]. Oleh karena itu, simulasi dengan jumlah cell 649000 akan digunakan pada penelitian ini.

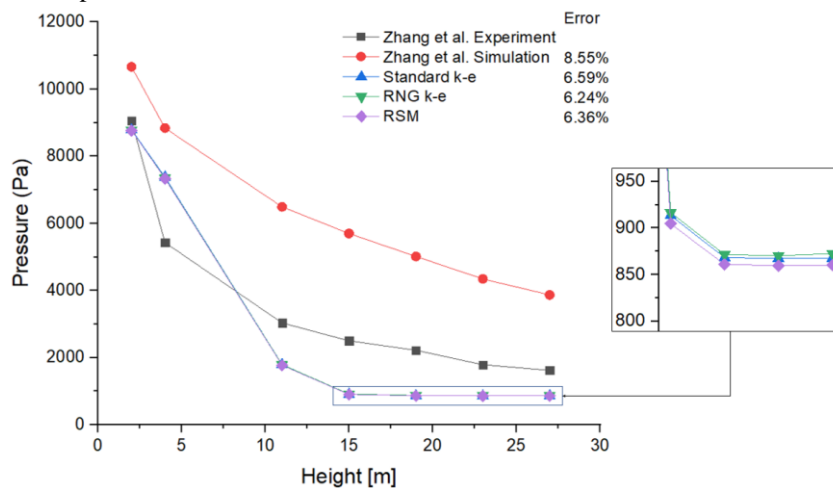


Gambar 5. Grafik Kecepatan pada Kedua Outlet dengan 5 Variasi Jumlah Cell.

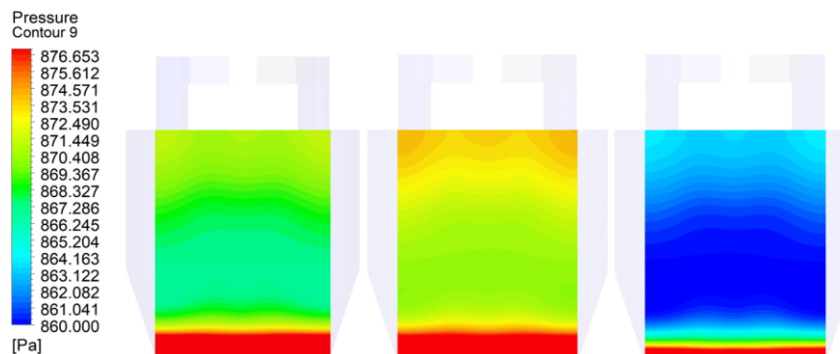
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Validasi Hasil

Hasil simulasi dibandingkan dengan data eksperimen dan simulasi pada penelitian Zhang et al. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa metode simulasi yang digunakan sudah benar serta untuk memilih model turbulensi yang hasilnya paling mendekati dengan data eksperimen. Sehingga, model tersebut dapat dipilih untuk digunakan pada penelitian CFB boiler selanjutnya. Proses validasi dilakukan dengan membandingkan nilai pressure drop di dalam furnace dari ketinggian 0 - 30 m. Gambar 5 menunjukkan perbandingan nilai distribusi tekanan antara hasil simulasi dengan 3 model turbulensi serta eksperimen dan simulasi oleh Zhang et al. Nilai error yang diperoleh berdasarkan pressure drop sebesar 6.59% dengan Standard k- ϵ model, 6.24% dengan model RNG k- ϵ , dan 6.36% dengan model RSM sehingga batas maksimum error yang diizinkan sebesar 10% telah terpenuhi [17]. Sebagai tambahan, nilai error dari simulasi Zhang et al. terhadap data eksperimen sebesar 8.55%. Model turbulensi RNG k- ϵ memiliki nilai error yang paling kecil pada penelitian ini. Gambar 6 juga menunjukkan bahwa simulasi dengan RNG k- ϵ model menghasilkan tekanan yang lebih tinggi di dalam furnace pada ketinggian 15 - 30 m dibandingkan dengan Standard k- ϵ model dan RSM sehingga nilainya lebih mendekati data eksperimen. Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa RNG k- ϵ adalah model turbulensi yang paling tepat untuk digunakan dalam simulasi CFD pada CFB boiler karena hasilnya yang paling mendekati dengan data eksperimen.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Tekanan Antara Hasil Simulasi dengan Penelitian Zhang et al.



Gambar 7. Perbandingan Tekanan di dalam Furnace dengan 3 Model Turbulensi.
 Standard k- ϵ RNG k- ϵ RSM

Untuk memastikan hasil simulasi yang didapat sudah mencapai keadaan stabil, perlu dilakukan pengecekan nilai mass imbalance. Persentase maksimum mass imbalance yang diizinkan adalah 0.5% terhadap mass flow rate yang masuk [24]. Tabel 6 menunjukkan mass flow rate yang masuk sebesar 170.16 kg/s dan mass flow rate yang keluar sebesar 170.155 kg/s sehingga mass imbalance yang didapat adalah 0.003%.

Tabel 6. Mass Imbalance

Name	Mass Flow Rate (kg/s)
Inlet	170.16
Outlet	170.155
Mass Imbalance	0.003 %

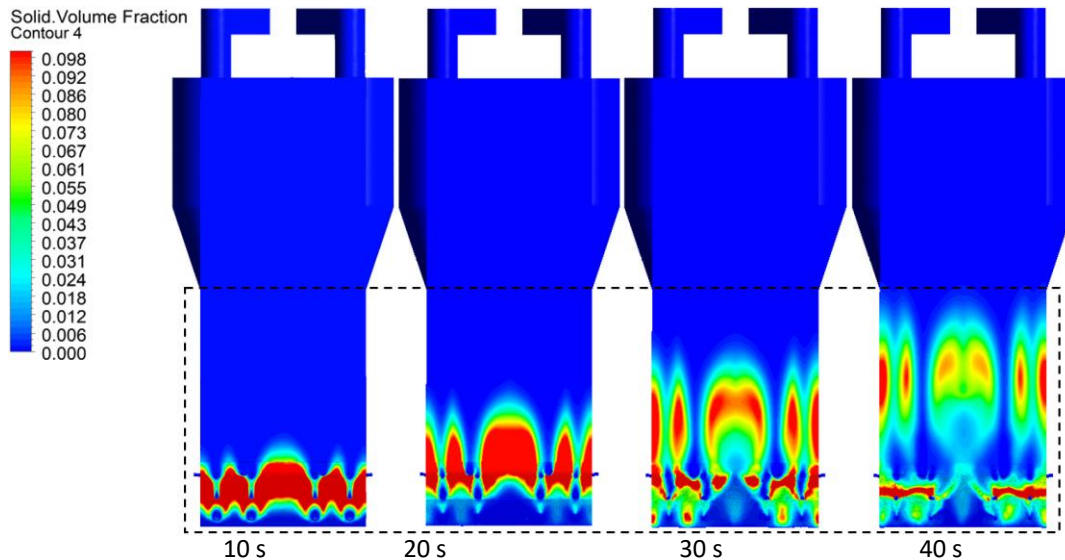
3.2 Analisis Hidrodinamika

3.2.1 Distribusi Fraksi Volume Solid

Dari Gambar 7, dapat diamati bahwa pada detik ke-10 hingga detik ke-40 fraksi volume solid semakin meluas hingga ketinggian 15 m dengan nilai sekitar 0.05 - 0.1 karena didorong oleh udara yang masuk ke dalam furnace. Hal ini akan mempengaruhi distribusi tekanan di daerah tersebut. Hubungan fraksi volume solid terhadap tekanan dijelaskan melalui persamaan solids pressure pada aliran granular berikut [21]:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (8)$$

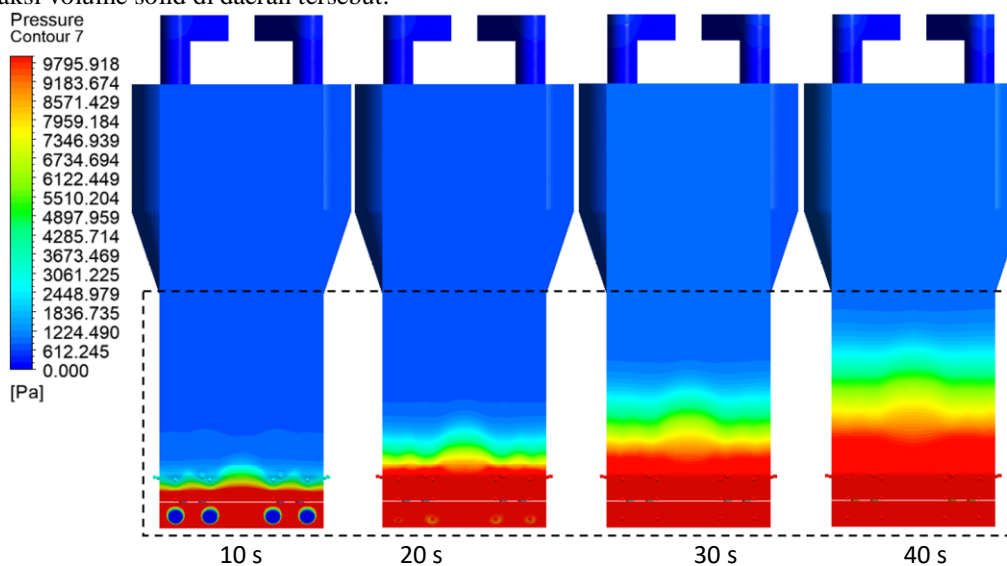
di mana solids pressure adalah tekanan yang dihasilkan oleh persebaran partikel solid, disimbolkan dengan p_s . Fraksi volume solid yang disimbolkan dengan α_s merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi nilai tekanan, hal ini juga dinyatakan pada penelitian Feng et al. [29].



Gambar 8. Distribusi Fraksi Volume Solid pada 4 Interval Waktu.

3.2.2 Distribusi Tekanan

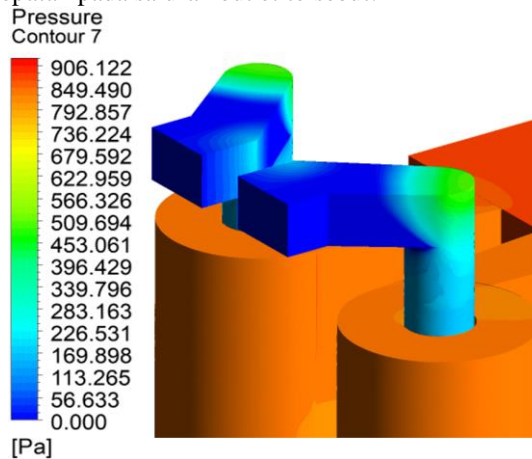
Pada Gambar 8 dapat diamati bahwa dari detik ke-10 hingga detik ke-40 daerah yang bertekanan tinggi semakin meluas pada bagian bawah furnace hingga ketinggian 15 m dengan nilai sekitar 3 kPa - 10 kPa yang disebabkan oleh distribusi fraksi volume solid di daerah tersebut.



Gambar 9. Distribusi Tekanan pada 4 Interval Waktu.

Nilai tekanan paling rendah terdapat pada saluran outlet. Gambar 9 menunjukkan tekanan di daerah tersebut jauh lebih rendah dibandingkan tekanan pada cyclone karena udara yang masuk ke dalam saluran outlet langsung keluar

melalui outlet. Tekanan pada saluran outlet sekitar 0.1 kPa sedangkan tekanan pada cyclone sekitar 0.9 kPa. Hal ini akan mempengaruhi distribusi kecepatan pada saluran outlet tersebut.



Gambar 10. Distribusi Tekanan pada Saluran Outlet dan Cyclone.

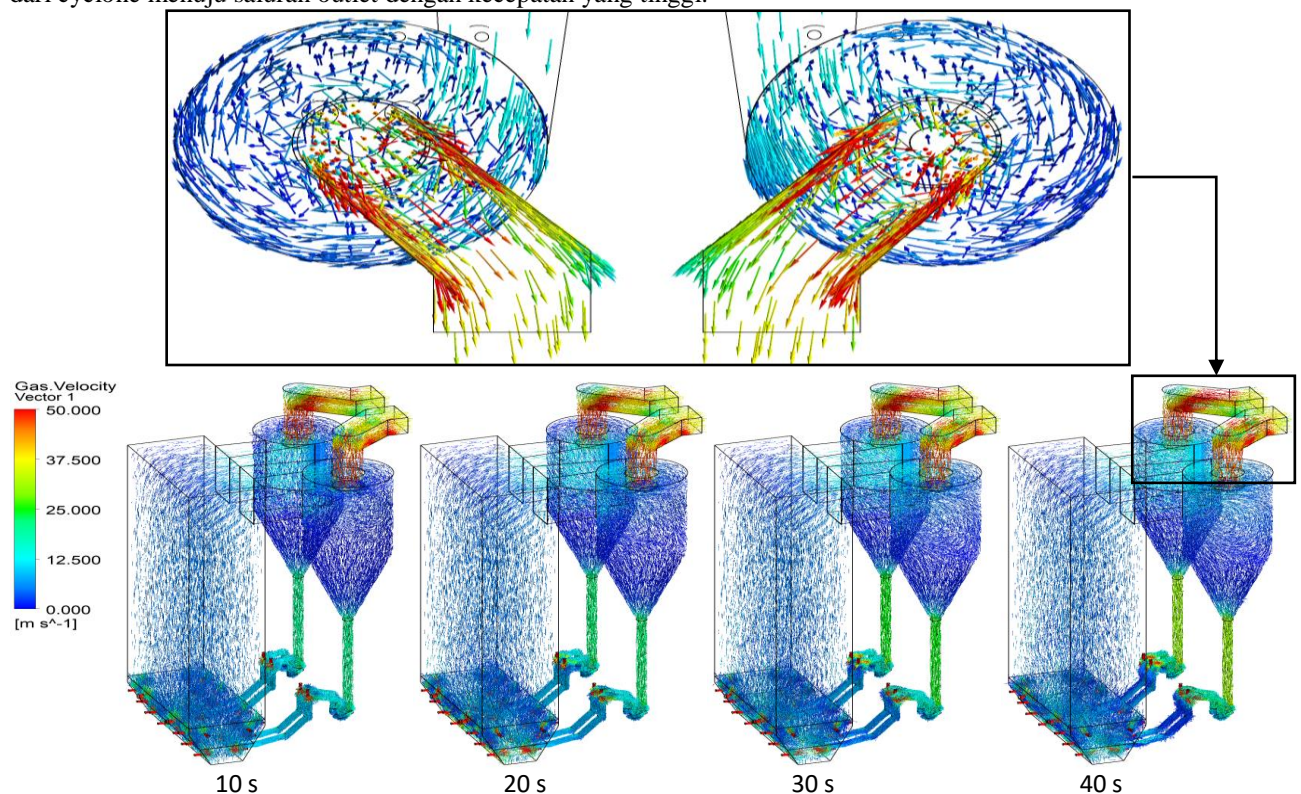
Fluida mengalir dari daerah yang bertekanan lebih tinggi menuju daerah yang bertekanan lebih rendah. Hal ini berdasarkan hukum Bernoulli yang dinyatakan pada persamaan berikut [26]:

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{1}{2}d(V^2) + gdz = 0 \quad (9)$$

di mana semakin rendah tekanan pada suatu daerah, maka kecepatan yang masuk juga akan semakin tinggi. Hal ini juga dinyatakan pada penelitian Guo et al. [28].

3.2.3 Distribusi Kecepatan

Gambar 10 menunjukkan vektor kecepatan udara pada CFB boiler dari detik ke-10 hingga detik ke-40. Kecepatan udara pada saluran outlet lebih tinggi dibandingkan di daerah lainnya dengan nilai di antara 30 m/s - 50 m/s. Hal ini dikarenakan tekanan pada cyclone yang tinggi dan tekanan pada saluran outlet yang rendah sehingga fluida mengalir dari cyclone menuju saluran outlet dengan kecepatan yang tinggi.



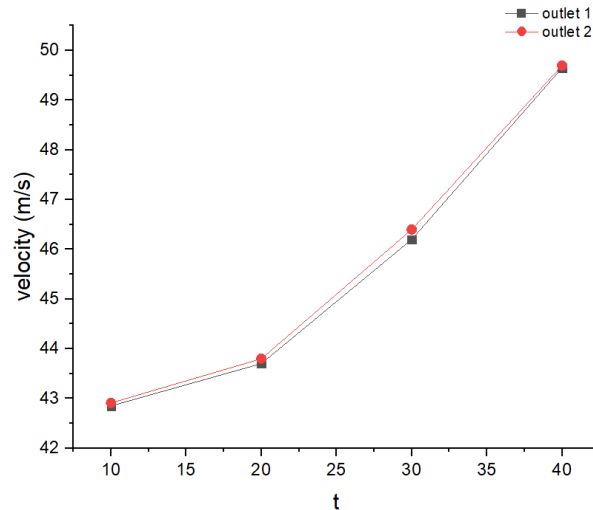
Gambar 11. Distribusi Kecepatan pada 4 Interval Waktu.

Kecepatan udara pada saluran outlet mengalami kenaikan terhadap perubahan waktu. Grafik pada Gambar 11 menunjukkan kecepatannya mengalami kenaikan dari 43 m/s sampai 50 m/s, hal ini dikarenakan udara yang masuk ke dalam furnace menumbuk tumpukan partikel solid, sehingga kecepatannya berkurang karena terhambat oleh tumpukan partikel solid tersebut. Setelah partikel solid tersebar, kecepatan udara meningkat kembali menuju keadaan stabil.

Dengan naiknya kecepatan pada saluran outlet terhadap perubahan waktu, menurut Kaya et al hal ini akan mempengaruhi distribusi tegangan geser dinding di daerah tersebut, hubungannya dapat dilihat pada persamaan 10 [26,27]:

$$\tau_w = \mu \frac{u}{y} = \rho \nu \frac{u}{y} \quad (10)$$

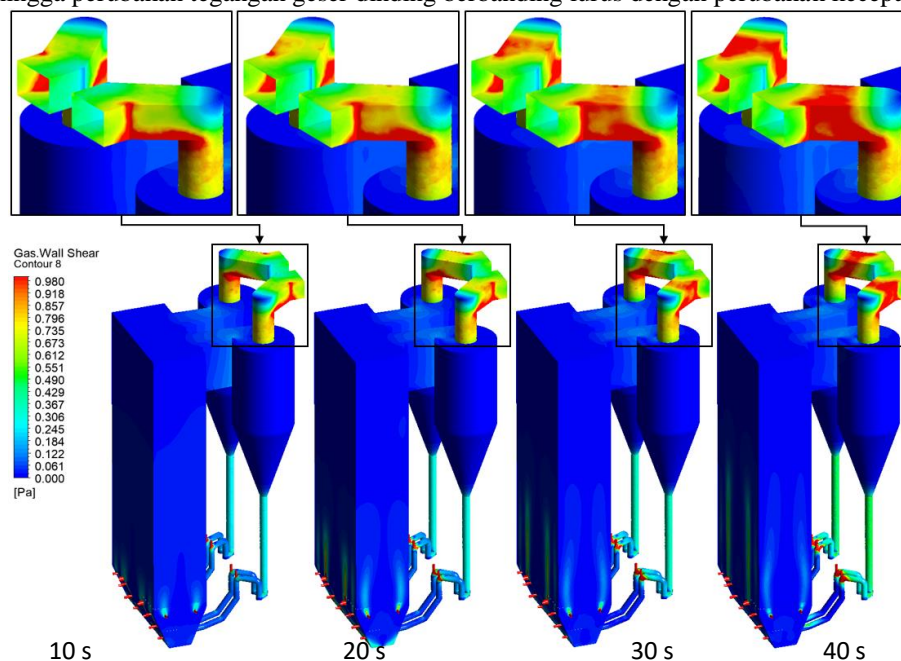
di mana kecepatan berbanding lurus dengan tegangan geser dinding. Sehingga, apabila nilai kecepatan udara tinggi maka nilai tegangan geser dinding juga akan tinggi.



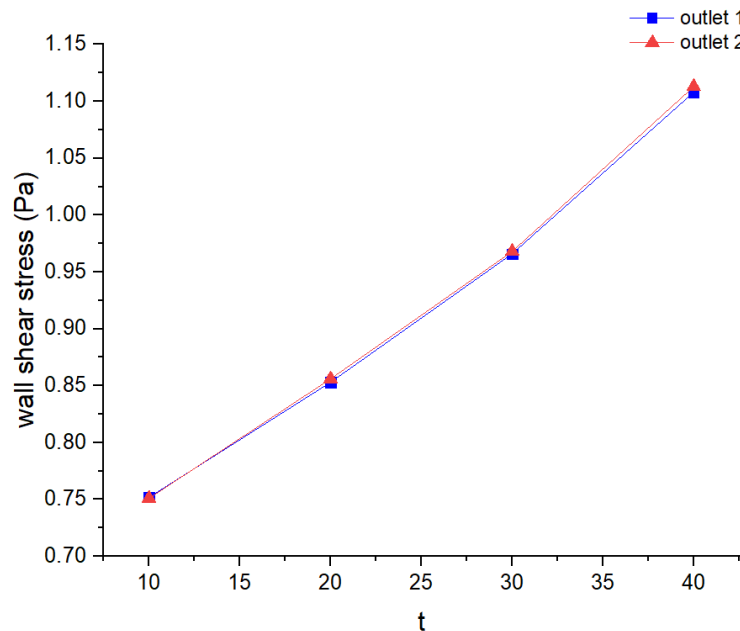
Gambar 12. Grafik Kecepatan pada Saluran Outlet.

3.2.4 Distribusi Tegangan Geser Dinding

Gambar 12 menunjukkan perubahan distribusi tegangan geser dinding dari detik ke-10 hingga detik ke-40. Tegangan geser dinding mengalami kenaikan pada dinding saluran outlet di mana nilai kenaikannya ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 13, yaitu dari 0.75 Pa sampai 1.1 Pa. Hal ini disebabkan oleh kenaikan kecepatan udara pada saluran outlet sehingga perubahan tegangan geser dinding berbanding lurus dengan perubahan kecepatan tersebut.



Gambar 13. Distribusi Tegangan Geser Dinding pada 4 Interval Waktu.



Gambar 14. Grafik Tegangan Geser Dinding pada Kedua Dinding Saluran Outlet.

4. Kesimpulan

Dari pengujian 3 model turbulensi pada simulasi CFB Boiler, nilai error terhadap data eksperimen yang didapat yaitu sebesar 6.59% menggunakan Standard k- ϵ model, 6.36% menggunakan RSM, dan yang paling kecil adalah 6.24% menggunakan RNG k- ϵ model. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa RNG k- ϵ model adalah model turbulensi yang paling tepat untuk digunakan pada simulasi CFB boiler karena hasilnya yang paling mendekati dengan data eksperimen.

Fraksi volume solid pada CFB boiler mengalami perubahan terhadap waktu dari detik ke-10 hingga detik ke-40 di mana fraksi volume solid semakin meluas pada bagian bawah furnace sampai pada ketinggian 15 m. Nilai fraksi volume solid di daerah tersebut berkisar pada 0.05 - 0.1.

Tekanan pada CFB boiler mengalami perubahan terhadap waktu dari detik ke-10 hingga detik ke-40 di mana pada daerah yang bertekanan tinggi semakin meluas pada bagian bawah furnace sampai pada ketinggian 15 m. Nilai tekanan di daerah tersebut berkisar pada 3 kPa - 10 kPa.

Kecepatan pada CFB boiler mengalami perubahan terhadap waktu dari detik ke-10 hingga detik ke-40 di mana kecepatan pada saluran outlet meningkat. Nilai kecepatan di daerah tersebut meningkat dari 43 m/s sampai 50 m/s.

Tegangan geser dinding pada CFB boiler mengalami perubahan terhadap waktu dari detik ke-10 hingga detik ke-40 di mana tegangan geser dinding pada dinding saluran outlet meningkat. Nilai tegangan geser dinding di daerah tersebut meningkat dari 0.75 Pa sampai 1.1 Pa.

Daftar Pustaka

- [1] Yacob, N. S., Mohamed, H., & Shamsuddin, A. H. (2021). Investigating the Palm Oil Mill Wastes Properties for Thermal Power Plants. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 88(2), 1–13. <https://doi.org/10.37934/arfmts.88.2.113>
- [2] Indonesia Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050. (2021). New York: United Nations Framework Convention on Climate Change
- [3] Zakaria, S., Ahmad, R. D. R., Abbas, A. R., & Batcha, M. F. M. (2021). Greenhouse Gas Emission Intensity Assessment for Power Plants in Peninsular Malaysia. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 88(2), 14–26. <https://doi.org/10.37934/arfmts.88.2.1426>
- [4] Xiao, Y., Song, G., Yang, Z., Yang, X., Wang, C., Ji, Z., Lyu, Q., & Zhang, X. (2022). Application of post-combustion ultra-low NO_x emissions technology on coal slime solid waste circulating fluidized bed boilers. *Waste Management*, 137, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.035>
- [5] Leckner, B., & Gómez-Barea, A. (2021). Change of existing circulating fluidized bed boilers to oxy-firing conditions for CO₂ capture. *Applications in Energy and Combustion Science*, 100042. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2021.100042>
- [6] Ludowski, P., Taler, D., & Taler, J. (2013). Identification of thermal boundary conditions in heat exchangers of fluidized bed boilers. *Applied Thermal Engineering*, 58(1–2), 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.064>

- [7] Qian Zhu. (2013). Developments in circulating fluidised bed combustion. IEA Clean Coal Center
- [8] Gu, J., Liu, Q., Zhong, W., & Yu, A. (2020). Study on scale-up characteristics of oxy-fuel combustion in circulating fluidized bed boiler by 3D CFD simulation. *Advanced Powder Technology*, 31(5), 2136–2151. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.03.007>
- [9] Adamczyk, W. P., Węcel, G., Klajny, M., Kozolub, P., Klimanek, A., & Białecki, R. A. (2014). Modeling of particle transport and combustion phenomena in a large-scale circulating fluidized bed boiler using a hybrid Euler-Lagrange approach. *Particuology*, 16, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.10.007>
- [10] Ji, J., & Cheng, L. (2020). CFD modeling of sodium transformation during high-alkali coal combustion in a large-scale circulating fluidized bed boiler. *Fuel*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118447>
- [11] Wu, Y., Liu, D., Duan, L., Ma, J., Xiong, J., & Chen, X. (2018). Three-dimensional CFD simulation of oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed with warm flue gas recycle. *Fuel*, 216, 596–611. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.042>
- [12] HK Versteeg, W Malalasekera. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Harlow: Pearson Education
- [13] Muhammad Nabil Farhan Kamal, Izuan Amin Ishak, Nofrizalidris Darlis, Daniel Syafiq Baharol Maji, Safra Liyana Sukiman, Razlin Abd Rashid, & Muhamad Asri Azizul. (2021). A Review of Aerodynamics Influence on Various Car Model Geometry through CFD Techniques. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 88(1), 109–125. <https://doi.org/10.37934/arfmts.88.1.109125>
- [14] Xu, L., Cheng, L., Ji, J., Wang, Q., & Fang, M. (2019). A comprehensive CFD combustion model for supercritical CFB boilers. *Particuology*, 43, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2017.11.012>
- [15] Amal Bahnasy, & A. M. Abdel-Wahab. (2021). Mathematical Model Represents the Effect of Flexible Endoscopy on Suspension Fluid Flow. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 89(1), 42–61. <https://doi.org/10.37934/arfmts.89.1.4261>
- [16] Huttunen, M., Peltola, J., Kallio, S., Karvonen, L., Niemi, T., & Ylä-Outinen, V. (2017). Analysis of the processes in fluidized bed boiler furnaces during load changes. *Energy Procedia*, 120, 580–587. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.175>
- [17] Wanchan, W., Khongprom, P., & Limtrakul, S. (2020). Study of wall-to-bed heat transfer in circulating fluidized bed riser based on CFD simulation. *Chemical Engineering Research and Design*, 156, 442–455. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.02.021>
- [18] Amoo LM. Computational fluid dynamics simulation of Lafia-Obi bituminous coal in a fluidized-bed chamber for air- and oxy-fuel combustion technologies. *Fuel* 2015;140:178–91.
- [19] Sirisomboon, K., & Arromdee, P. (2021). A computational fluid dynamics study of gas–solid distribution of Geldart Group B particles in a swirling fluidized bed. *Powder Technology*, 393, 734–750. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.020>
- [20] Zhang, N., Lu, B., Wang, W., & Li, J. (2010). 3D CFD simulation of hydrodynamics of a 150MWe circulating fluidized bed boiler. *Chemical Engineering Journal*, 162(2), 821–828. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.06.033>
- [21] ANSYS Fluent Theory Guide. (2013). Canonsburg: Pennsylvania
- [22] Mohammad Rasul. (2013). *Thermal Power Plants - Advanced Applications*. Rijeka: InTech
- [23] ANSYS Meshing User's Guide. (2010). Canonsburg: Pennsylvania
- [24] ANSYS Fluent Tutorial Guide. (2013). Canonsburg: Pennsylvania
- [25] Hegde, P., Shenoy, B. G., Khader, S. M. A., Pai, B. R., Rao, D. S., Tamagawa, M., Prabhu, R., Kumar, N., & Ahmad, K. A. (2021). CFD Analysis on Effect of Angulation in A Healthy Abdominal Aorta-Renal Artery Junction. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 88(1), 149–165. <https://doi.org/10.37934/arfmts.88.1.149165>
- [26] Yunus A. Cengel, John M. Cimbala. (2006). *Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications*. New York: McGraw-Hill
- [27] Kaya, R., Deveci, G., Turken, T., Sengur, R., Guclu, S., Koseoglu-Imer, D. Y., & Koyuncu, I. (2014). Analysis of tegangan geser dinding on the outside-in type hollow fiber membrane modules by CFD simulation. *Desalination*, 351, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.07.033>
- [28] Guo, T., Deng, Z. D., Liu, X., Song, D., & Yang, H. (2022). Development of a new hull adsorptive underwater climbing robot using the Bernoulli negative pressure effect. *Ocean Engineering*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110306>

- [29] Feng, X., Shen, L. and Wang, L. (2018). Effect of baffle on hydrodynamics in the air reactor of dual circulating fluidized bed for chemical looping process. *Powder Technology*, 340, pp.88-98.