

## SIMULASI NUMERIK EROSI PADA *CIRCULATION FLUIDIZED BED* (CFB) BOILER PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) KALIMANTAN BARAT MENGGUNAKAN ANSYS FLUENT

\*Ahmad Musawwir Azhim<sup>1</sup>, M.S.K Tony Suryo Utomo<sup>2</sup>, Eflita Yohana<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

\*E-mail: [ahmadmusawwirazhim@students.undip.ac.id](mailto:ahmadmusawwirazhim@students.undip.ac.id)

### Abstrak

*Computational Fluid Dynamic* (CFD) telah banyak digunakan untuk mempelajari *Circulation Fluidized Bed* (CFB) proses pembakaran. Analisa bahan bakar campuran antara batubara dan biomassa dari bahan PKS (*palm kernel shell*) pada proses pembakaran yang terjadi pada boiler PLTU Kalimantan Barat dilakukan dengan variasi pencampuran penambahan bahan bakar PKS sebanyak 20%, 40%, 60%, dan 80%. Simulasi yang digunakan menggunakan data *model set up*, *material properties*, dan *boundry condition* sesuai dengan data experiment PJB Ketapang. Kemudian dilakukan analisa dengan kecepatan aliran fluida 3.2 kg/s dan ukuran partikel 150  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , dan 500  $\mu\text{m}$  terhadap *erosion rate* yang terjadi pada dinding *furnace* akibat partikel pasir yang ada pada material proses pembakaran PLTU. Berdasarkan hasil simulasi pencampuran bahan bakar antara batubara dan PKS variasi 20% - 80% mengalami penurunan temperature dari 1180°C – 920.03°C akibat perbedaan kalor bahan bakar. Sedangkan untuk *erosion rate* pada simulasi mengalami kenaikan dari 0.000189 kg/s – 0.001886 kg/s dikarenakan adanya perbedaan ukuran partikel pasir dan kecepatan laju alir masa partikel.

**Kata kunci:** CFD; *circulation fluidized bed*; coal combustion; erosion rate; numerical simulation

### Abstract

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) has been widely used to study *Circulation Fluidized Bed* (CFB) combustion processes. Analysis of mixed fuel between coal and biomass from PKS (*palm kernel shell*) in the combustion process that occurs in PLTU West Kalimantan boilers is carried out by mixing the addition of PKS fuel by 20%, 40%, 60% and 80%. The simulation used uses data *model set up*, *material properties*, and *boundary conditions* according to PJB Ketapang's experimental data. Then an analysis was carried out with a fluid flow velocity of 3.2 kg/s and a particle size of 150  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , and 500  $\mu\text{m}$  for the *erosion rate* that occurs on the furnace due to sand particles present in the PLTU combustion process material. Based on the simulation results of mixing fuel between coal and PKS, variations of 20% - 80% experienced a decrease in temperature from 1180°C - 920.03°C due to differences in fuel heat. Whereas *erosion rate* in the simulation has increased from 0.000189 kg/s – 0.001886 kg/s due to differences in the size of the sand particles and the speed of the mass flow rate of the particles.

**Keywords:** CFD; *circulation fluidized bed*; coal combustion; erosion rate; numerical simulation.

### 1. Pendahuluan

Indonesia mempunyai cadangan terbukti batubara yang bisa diproduksi sampai tahun 2100 atau 80 tahun lagi seperti yang dikatakan Dirjen Minerba. Maka dari itu dilakukan pembatasan kuota produksi batubara di kisaran 500 ton/tahun. Bentuk langkah nyata Indonesia dalam pembatasan bahan bakar batubara adalah dengan membangun proyek energi terbarukan (EBT). Sehubungan dengan itu, pemerintah juga akan terus mendorong pembangunan sejumlah proyek pembangkit listrik berbasis energi terbarukan (EBT) seperti tenaga air (PLTA) dan biomassa (PLTBM). Bauran Energi Nasional mencatat, kontribusi EBT baru mencapai 12,52%. Dalam Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2019 – 2028, target Bauran Energi Nasional dalam pembangkitan tenaga listrik EBT naik mencapai 23% pada tahun 2025 [1].

Pada saat ini, dunia mengalami perubahan iklim global yang berdampak kepada bencana global. *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) menyebutkan bahwa Indonesia berkomitmen dalam memberikan kontribusi terhadap solusi perubahan iklim global. Berbagai solusi diberikan untuk menanggulangi perubahan isu iklim global ini. Salah satu solusi seperti pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) yang merupakan penyebab terjadinya

pemanasan global akibat proses emisi pembakaran bahan bakar fosil (minyak bumi dan batu bara) serta akibat penggundulan dan pembakaran hutan [5]. Biomassa dapat memainkan peranan penting sebagai sumber energi yang dapat diperbaharui, yang berfungsi sebagai penyedia sumber karbon untuk energi. Potensi biomassa dalam PLTBM yaitu menggunakan *Palm Kernel Shell* (PKS) yang berasal dari pengolahan cangkang kelapa sawit. Produksi cangkang kelapa sawit di Indonesia mencapai 9,2 juta ton dalam setahun. Namun pada saat ini terjadi kenaikan pajak dalam ekspor. Maka dari itu perlu ditingkatkan pemanfaatan cangkang sawit ini di dalam negeri []. PLTU Ketapang telah menerapkan dan meningkatkan pemanfaatan penggunaan biomassa PKS (*palm kernel shell*) ini dengan tujuan *diversifikasi* bahan bakar PLTU, Yang mana penggunaannya bisa mendorong penanggulangan penurunan efek gas rumah kaca. Penggunaan PKS (*palm kernel shell*) diharapkan tidak melebihi protokol *temperature* pada Boiler PLTU, nilai temperatur tidak melebihi 950°C sebelum memasuki boiler [3].

Secara umum *Fluidized-Bed Combustion* menurut Adamchy dkk [2] adalah alat pengembangan dari conventional stokers dan pulverized-fuel combustion. Pada umumnya digunakan untuk aplikasi furnace, seperti pada proses produksi gas panas untuk pengeringan. Dalam mengurangi suhu pengeringan gas, dilakukan penambahan udara berlebih atau resirkulasi *flue gas*. Mekanisme kerja Fluidized Bed Combustion menurut Rozzainee dkk. [4] adalah udara *primer* disebarkan oleh *blower* dari bawah ruang pembakaran, lalu udara *sekunder* membawa bahan bakar padat masuk ke dalam sisi samping ruang pembakaran, sementara *burner* terpasang di sisi samping berdekatan dengan udara *primer*. Selanjutnya bahan bakar padat terbakar oleh *burner*. Kelemahan dari sistem pembakaran dengan bahan bakar padat adalah memiliki densitas kecil, sehingga tidak semua terbakar oleh *burner*. Sedangkan bahan bakar padat memiliki densitas tidak sama, densitas kecil akan terbang keluar dari ruang pembakaran dan densitas besar akan jatuh. Dimana membentuk aglomerasi, sehingga terjadi pembakaran yang tidak sempurna. Fitur - fitur di dalam *Fluidized Bed Combustion* (FBC) menurut Oka [5] adalah terjadinya kontak langsung partikel dengan perubahan panas dan massa secara intensif. Suhu seragam di dalam *Fluidized Bed Combustion* memiliki kapasitas panas tinggi yang akan membakar *fuel* dengan kualitas rendah, yang mana pengaturan suhu *bed* oleh suplai bahan bakar, udara dan ekstraksi panas akan semakin efektif.

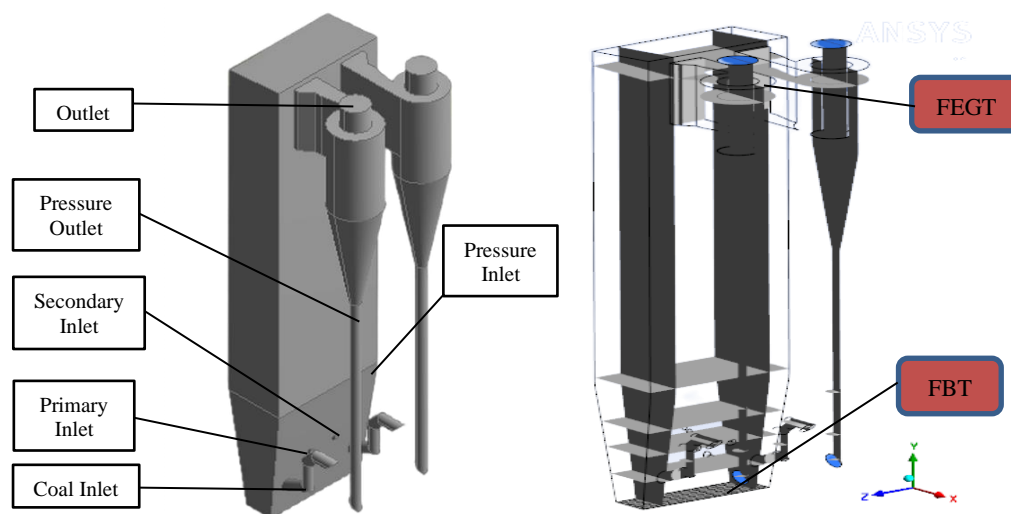
Dalam *Fluidized-Bed Combustion*, Hossain [6] menyebutkan parameter yang paling penting dalam FBC atau *packed* adalah kecepatan fluida dalam melewati bagian atas penahan *bed* partikel. Kemudian kedua unggun dipasang pada *vessel* yang akan menyalurkan fluida ke dalam *bed* yang disebut distributor. Selain itu juga terdapat kompresor sebagai alat untuk melakukan fluidisasi di dalam *fuel feeder*.

## 2. Metode Penelitian

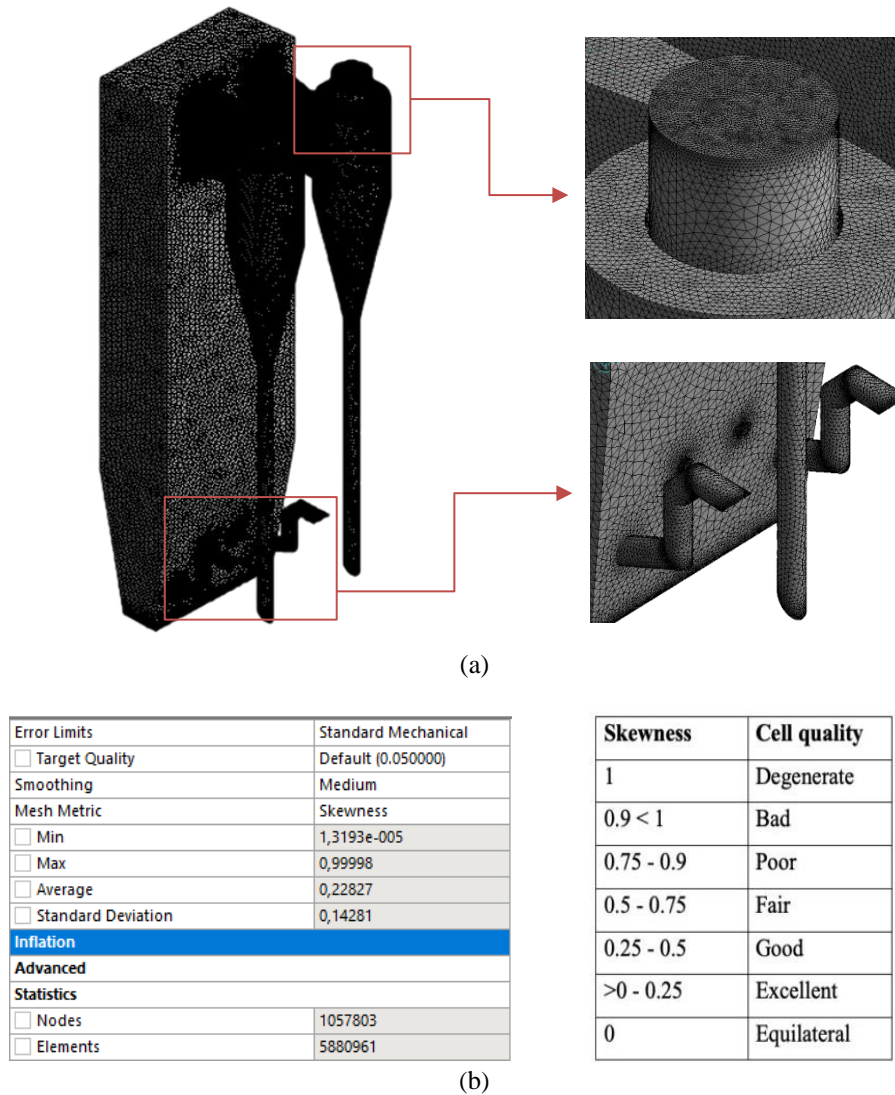
Studi numerik dalam penelitian ini menggunakan perangkat lunak SOLIDWORKS 2019 dan ANSYS Fluent 2019 R1. SOLIDWORKS 2019 digunakan untuk membentuk model *geometry* boiler. Sedangkan aplikasi ANSYS Fluent 2019 R1 digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida kompleks yang terbentuk dalam system ruang bakar pada *furnace* dan menganalisa hasil dari kontur distribusi temperature.

### 2.1 Geometry dan Meshing

Penelitian kali ini berdasarkan eksperimen yang dilakukan sebelumnya pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Kalimantan Barat. Boiler memiliki kapasitas 2 x 10 MW dengan bahan bakar batubara dan memiliki dimensi Panjang 21,8 m, lebar 16,7 m dan tinggi 41,0 m seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Boiler tersebut terdiri dari dua bagian yaitu ruang bakar dan 2 *cyclone separator* dengan 4 saluran *inlet*. Yang mana 2 saluran udara bahan bakar *primer* untuk *fluidisasi* pada bagian bawah ruang bakar dan 2 saluran udara bahan bakar *sekunder* untuk mendistribusikan udara yang cukup untuk pembakaran partikel batubara.



Gambar 1. Geometry Boiler



**Gambar 1.** (a). Hasil *Meshing Furnace*, (b). Nilai Kualitas *Meshing*

Pada Gambar 3 dapat dilihat *rule of thumb* yang digunakan secara umum untuk menilai kualitas mesh berdasarkan *skewness*. Yang mana pada proses mesh yang telah dilakukan memiliki nilai *skewness* rata-rata 0.22827 dan sudah memenuhi kualitas yang cukup baik. *Skewness* atau kemencengan digunakan untuk menunjukkan seberapa miring suatu mesh. Semakin siku sudut suatu element, maka transfer data dari element satu ke element lainnya akan semakin baik, sehingga Ketika bentuk element menceng akan membutuhkan cukup banyak koreksi saat proses komputasi yang menurunkan kualitas perhitungan dan memperlambat proses komputasi [7].

## 2.2 Variasi Data Pencampuran Batubara dan PKS (*Palm Kernel Shell*)

Pada simulasi penelitian kali ini, variasi data dilakukan terhadap nilai *coal calculator* pada tiap variasi simulasi. Nilai *coal calculator* mengacu pada nilai *Proximate & Ultimate Analysis* batubara dan *Palm Kernel Shell* (PKS). Persentase pencampuran batubara dan PKS dilakukan pada variasi 20%, 40%, 60%, dan 80%. Selain data *properties Proximate & Ultimate Analysis* tersebut semuanya tetap mengikuti data dari PLTU Kalimantan Barat. Adapun nilai variasi *Proximate & Ultimate* pada simulasi yang dilakukan dapat dilihat pada Table 1.

**Tabel 1.** Variasi Nilai *Proximate & Ultimate* Simulasi

Proximate Analysis	20% PKS	40% PKS	60% PKS	80% PKS
Tm	0.315006	0.2663	0.266298	0.168766
Ash	0.33392	0.02689	0.026894	0.013898
Vol	0.352	0.434	0.432	0.598
Fc	0.26798	0.24599	0.24597	0.201996
Ultimate Analysis	20% PKS	40% PKS	60% PKS	80% PKS
C	0.61806	0.58355	0.583548	0.514516
H	0.09427	0.08445	0.084454	0.064818
N	0.01074	0.0085	0.008502	0.004034
O	0.24746	0.2681	0.268098	0.309366
S	0.01176	0.02132	0.02132	0.04044
Total GCV	17538.7	17840.9	18142.4	18434.2

### 2.3 Model Set Up Simulasi

Pada proses *processing* diperlukan pengaturan *software* CFD untuk mensimulasikan pembakaran pada *Circulating Fluidized Bed Boiler*. Berikut merupakan pengaturan *software* CFD yang akan digunakan pada simulasi penelitian pada Table 2.

**Tabel 2.** Set Up Simulasi

Model	Keterangan	Dasar Pemilihan
Multiphase	Eularian	Dapat mendefinisikan propertis dari ketiga fase (Air, Pasir/Bed fluid, Coal)
Energy Equation	On	Diperlukan untuk hasil temperature dari pembakaran
Viscous	K- $\epsilon$ Standard	Dapat menyelesaikan permasalahan heating, buoyancy dan combustion
Radiation	Off	Panas
Heat Exchanger	Off	Heat Exchanger diabaikan
Species	Species Transport	Mendefinisikan material yang digunakan (coal)
Discreate Phase Mode	On	Mendefinisikan injeksi inlet batubara
Solidification	Off	Tidak diperlukan
Acoustic	Off	Tidak diperlukan
Eularian Wall Film	Off	Tidak diperlukan

### 2.4 Material Properties

Sebagian besar *properties* batubara yang digunakan dalam simulasi berdasarkan hasil reaksi *coal calculator*. *Coal calculator* merupakan fitur perhitungan reaksi pada *software ansys*, dimana data *proximate dan ultimate analysis* dari pihak PLTU diinput. Adapun *properties mixture material* dapat dilihat pada Table 3 dan untuk *properties bed fluid* pada Table 3

**Table 3.** Properties Material Mixture

Properties	Nilai	Sumber
Density (kg/m <sup>3</sup> )	Incompressible Ideal gas	FLUENT database
Cp (J/kg.k)	Mixing law	FLUENT database
Reaction	Eddy dissipation	FLUENT database
Mechanism	Reaction mechs	FLUENT database
Mass Diffusivity (m <sup>2</sup> )	2.88e-05	FLUENT database
Thermal Conduitivity (w/m-k)	0.0454	FLUENT database
Viscosity (kg/m-s)	1.772e-05	FLUENT database

**Table 4. Properties Bed Fluid**

Properties	Nilai	Sumber
Size Partikel	0.0005	PLTU Kalimantan Barat
Density	2650 kg/m <sup>3</sup>	PLTU Kalimantan Barat
Viscosity	0.00103	PLTU Kalimantan Barat
Ketinggian Dari Dasar Furnace	40 cm	PLTU Kalimantan Barat

## 2.5 Boundary Condition

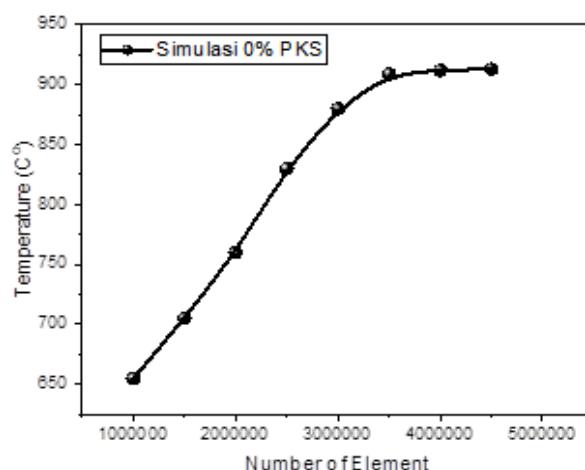
Untuk mendapati hasil yang mendekati dan sesuai dengan *circulation fluidized bed boiler* yang ada di PLTU Ketapang, maka diperlukan memasukan nilai kondisi batas yang sesuai dengan data eksperimen yang telah dilakukan perusahaan. Berdasarkan data dari PLTU kondisi *system* simulasi ini terjadi secara *steady state*. Adapun kondisi batas dapat dilihat pada Table 5.

**Table 5. Boundary Condition**

Properties	Tipe	Phase	Nilai Input	Sumber
Primary Air	Mass flow inlet	Udara Pasir	$\dot{m}$ : 10.5 kg/s T : 126 °c P <sub>gage</sub> : 10.1 kpa $\dot{m}$ : 3.2 kg/s	PLTU Kalimantan Barat
Secondary Air	Mass flow inlet udara	Udara Pasir	$\dot{m}$ : 7.4 kg/s T : 140 °c P <sub>gage</sub> : 2.3 kpa	PLTU Kalimantan Barat
Coal Inlet	Mass flow inlet coal	Coal Udara	$\dot{m}$ : 10.5 kg/s T : 126 °c $\dot{m}$ : 1 kg/s	PLTU Kalimantan Barat
Pressure Inlet	Pressure inlet	Mixture	P <sub>gage</sub> : 36 kpa	PLTU Kalimantan Barat
Pressure Outlet	Pressure outlet	Mixture	P <sub>gage</sub> : 0 kpa	PLTU Kalimantan Barat
Outlet	Pressure outlet	Mixture	P <sub>gage</sub> : -588 kpa	PLTU Kalimantan Barat

## 2.6 Validasi Data dan Uji Grid Independent

Pada Proses *meshing* digunakan metode *Cut Cell* yang mempunyai keunggulan sel domain yang lebih teratur dibandingkan dengan *Tetra-Mesh* dan *Hexahedral*. Pemenuhan nilai kualitas *grid* pada *meshing* dilakukan dengan metode *determinan* yang bertujuan untuk memastikan simulasi berjalan tanpa membebani computer dan didapatkan mesh yang optimal, sehingga perlu dilakukan uji *grid independent*. Jumlah level element pada pengujian mulai dari 1.000.000 sampai dengan 4.500.000 digunakan untuk mendapatkan hasil nilai *grid* terbaik. Gambar 2 menunjukkan grafik perbandingan jumlah element terhadap temperature. Berdasarkan setiap variasi jumlah element menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya jumlah element dan mulai stabil di variasi element 3.500.000 – 4.500.000. Berdasarkan hasil grafik untuk mendapatkan mesh yang optimal serta tidak tergantung pada jumlah dan jenis mesh maka dipilih jumlah element 4.000.000 *grid* yang akan digunakan pada proses simulasi.

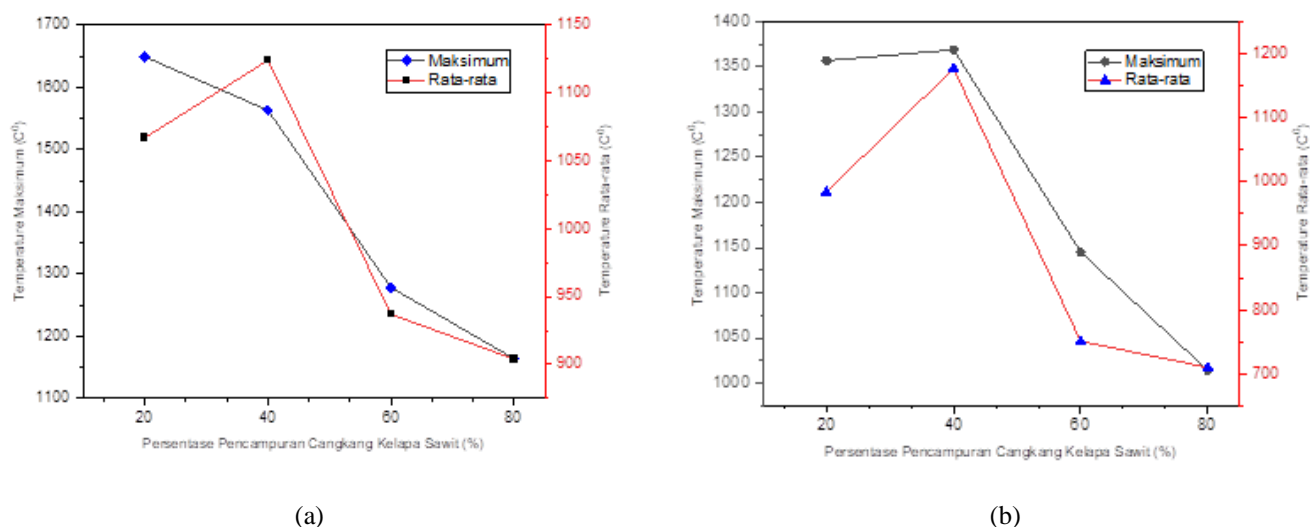


Gambar 2. Grid Independent

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Analisa Distribusi Temperature Pencampuran Bahan Bakar Batubara dan PKS

Pada bagian pembahasan ini akan membahas bagaimana karakteristik pembakaran pada setiap variasi persentase pencampuran massa PKS dan batubara. Karakteristik yang diteliti yaitu melihat evolusi naik-turunnya *temperature* di dalam *furnace*. Kontur *temperature* yang diperlihatkan pada posisi pengambilan yang sudah ditentukan sesuai dengan Gambar 1. Kontur variasi simulasi dimulai dari 20%, 40%, 60%, hingga 80%. Hasil pengambilan data kontur *temperature* dapat dilihat dari Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Maksimum dan Rata-rata Distribusi Temperature, (a). Posisi Pengukuran di FBT, (b). Posisi Pengukuran di FEGT

Berdasarkan Gambar 3 dapat disimpulkan bahwa distribusi temperature rata-rata variasi simulasi yang dilakukan pada daerah *Furnace Bed Temperature* terjadi penurunan temperature dari 1147°C menjadi 536.21 pada variasi 40% dan mengalami kenaikan temperature pada variasi 60%. Begitu pula pada distribusi *Furnace Exit Gas Temperature* yang menunjukkan *trend line* yang sama dimana mengalami penurunan dari variasi 20% sampai dengan variasi 80%. Hal tersebut disebabkan oleh adanya perbedaan nilai kalor yang berbeda diantara bahan bakar batubara dan PKS (*Palm Kernel Shell*). Dimana nilai kalor batubara lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai kalor PKS, Serta dapat juga disebabkan akibat kandungan *Proximate analysis* yang berbeda variasi diantara batubara dan PKS. Seperti yang dikutip pada Analisa yang dilakukan Adamczyk dkk [3], Semakin tinggi nilai *inherent moisture* maka semakin rendah nilai kalor. Adanya air yang terlalu berlebihan menyebabkan berkurangnya nilai kalor. Semakin tinggi nilai *volatile matter* maka semakin rendah nilai kalor. *Volatile matter* mengandung kandungan gas yang mudah terbakar, maka akan mempengaruhi nilai kalor. Semakin tinggi nilai abu maka semakin rendah nilai kalor yang terdapat batubara. Hal ini disebabkan komponen abu yang dapat

mengganggu pembakaran. Karbon tertambat ini menjadi komponen utama batubara yang mampu menghasilkan panas pada proses pembakaran. Semakin tinggi kandungan karbon tertambat maka nilai kalor batubara akan semakin meningkat. Semakin tinggi nilai total sulfur, maka semakin rendah nilai kalor [4]. Untuk nilai pencampuran biomassa yang optimal pada simulasi penelitian kali ini yaitu nilai temperatur yang sesuai dengan Protokol Temperatur pada Boiler (< 950).

### 3.2 Analisa Erosi CFD Bed Fluid

Adapun prediksi *erosion rate* CFD berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada setiap variasi pencampuran PKS dapat dihitung laju erosi pertahun. Berikut hasil perhitungan *erosion rate bed fluid* pada Table 6 dibawah ini.

**Tabel 6.** Data Nilai *Erosion Rate*

Mass Flow Partikel (kg/s)	Ukuran Partikel (µm)	Laju Erosi Pasir (kg/m <sup>2</sup> s)	Data Validasi	
			mm/kg	mm/tahun
5	150	0.000189	0.0073	0.0369
10	300	0.000229	0.0089	0.0896
15	400	0.000796	0.0311	0.4661
20	500	0.001886	0.0737	1.4752

Berdasarkan data *Erosion Rate Bed Fluid* pada setiap simulasi yang dilakukan, nilai laju erosi akan berubah seiring dengan bertambahnya *flow* partikel pasir. Semakin besar *flow* partikel pasir pada setiap simulasi maka akan semakin besar pula laju erosi yang terjadi [14]. Hal ini disebabkan karena tekanan yang didapatkan *orifice* untuk menahan laju partikel pasir semakin besar, sehingga laju erosi memiliki nilai yang berbanding lurus dengan laju fluida atau partikelnya. Selain itu, laju erosi memiliki hubungan yang berbanding terbalik dengan *lifetime* atau umur *orifice*.

## 4. Kesimpulan

Hasil *geometri set up* pada simulasi dilakukan dengan *multiphase* tiga *Phase*. Untuk properties setiap *Phase* sebagian berasal dari data perusahaan dan sebagiannya lagi dari *fluent* database. Tahap validasi dari simulasi yang menggunakan *geometry set up* dengan data eksperimen PLTU Kalimantan Barat. Hasil validasi simulasi pencampuran massa 0% PKS pada titik pengukuran di FBT (*furnace bed temperature*) dengan nilai error 3.57% dan pada FEGT (*Furnace Exit Gas Temperature*) dengan nilai error 6.49% yang bisa dilihat pada Gambar 3.

Analisa distribusi temperatur pada setiap variasi simulasi tersebut memperlihatkan distribusi temperatur rata-rata pada daerah FBT (*Furnace Bed Temperature*) meningkat dimulai dari persentase campuran 20% PKS dengan nilai temperatur rata-rata 1101.8°C, lalu untuk variasi 40% PKS dengan nilai temperatur 1120.9°C. Kemudian dari simulasi 40% mengalami penurunan sampai dengan simulasi 80%. Pada simulasi 60% dengan nilai temperatur 962.04°C, variasi 80% dengan nilai temperature 920.03°C.

Berdasarkan Table 6 dapat dilihat bahwa semakin besar laju aliran massa partikel dan ukuran partikel pasir, maka akan semakin besar juga nilai *erosion rate* yang terjadi pada dinding *furnace*. Pada aliran massa partikel 5 kg/s dan ukuran partikel 150 µm memiliki nilai *erosion rate* paling rendah yaitu 0.000189. Sedangkan pada aliran massa partikel 20 kg/s dengan ukuran partikel pasir 500 µm memiliki *erosion rate* paling tinggi yaitu 0.001886.

Hasil simulasi erosi dapat digunakan sebagai pertimbangan untuk penggantian *orifice* PLTU Kalimantan Barat. Selain itu hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan untuk penelitian yang lebih lanjut.

## 5. Daftar Pustaka

- [1] Santoso. (2021, 3 20). ANALISIS NUMERIK PEMBAKARAN PADA CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER. *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST) 2021* ISSN: 1979-911X, 173-180.
- [2] Adamczyk, W. P. (2016). Application of the Numerical Techniques for Modelling. *Arch Computat Methods Eng* (2017) 24:669–702, 669-699. <http://doi:10.1007/s11831-016-9186-z>
- [3] H. J. Atmaja, S. K. (2020). Simulasi Numerik Prediksi Erosi Aliran Fasa Cair-Gas. *Journal of Mechanical Design and Testing* 2(1), (2020), 47-65, 47-65. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.22146/jmdt.v2i1.53724>
- [4] Kari Myoh` anen, T. H. (2011). A Three-Dimensional Model Frame for. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CHEMICAL*, 9 [2011], Article A25. doi: 10.1515/1542-6580.2571
- [5] Souhir Echi, A. B. (2019). CFD simulation and optimization of industrial boiler. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.006>
- [6] Thanet Unchaisri, S. F. (2019). Experimental Study on Combustion Characteristics in a. *Unchaisri T., et al., / International Energy Journal* 19 (2019) 101 – 114, 19, 101-114. Retrieved from <http://www.relicjournal.ait.ac.th/>
- [7] Wojciech P. Adamczyka, \*. (2014). Modeling of particle transport and combustion phenomena in a. *G Model*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1674200113002265?via%3Dihub>
- [8] Wojciech P. Adamczyka, \*. A. (2013, june 1). Comparison of the standard Euler–Euler and hybrid Euler–Lagrange. *G Model*, 2-9. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.06.008>
- [9] Heyang Wang, C. Z. (2019, 11 3). Heat Transfer Calculation Methods in Three-Dimensional. *Applied Thermal Engineering* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114633>

- [10] Ying Wu, D. L. (2019, 6 25). Numerical simulation of circulating fluidized bed oxy-fuel combustion with. *Fuel Processing Technology*, 1-14.
- [11] Oka Y.I., K.Okamura, T.Yoshida, 2005, Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation, *Journal of Wear*, Vol. 259, Page 95-101.
- [12] Oka Y.I., K.Okamura, T.Yoshida, 2005, Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 2: Mechanical Properties of Materials Directly Associated with Erosion Damage, *Journal of Wear*, Vol. 259, Page 102-109.
- [13] Finnie I, 1960, Erosion of Surface by Solid Particles, *Journal of Wear*, Vol. 3, Page 87-103. *Fluent 6.0 User's Guide*, 2001.
- [14] Okita, R., Y. Zhang, B.S. McLaury, S.A. Shirazi, 2012, Experimental and Computational Investigation to Evaluate the Effect of Fluid Viscosity and Particle Size on Erosion Damage. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 134
- [15] Chu, J. and Luckring, J.M. (1996). *Experimental Surface Pressure Data Obtained on 65° Delta Wing across Reynolds Number and Mach number Ranges*. NASA Technical Memorandum 4645. (Sharp-edged report)
- [16] Mahidin, A. M. (2021). Simulasi co-combustion batubara dan biomassa tandan kosong. *TURBO Vol. 10 No. 1. 2021*, 53-59. Retrieved from <http://ojs.ummetro.ac.id/index.php/turbo>
- [17] Shaanxi O&M Power CO. (2016). *Ketapang Coal Fired Power Plant Boiler Operation Manual*.
- [18] Ansys. *Ansys Fluent Theory Guide*. ANSYS Inc, USA. 2020;15317:724–46.
- [19] Salman Zafar, 2019. *Co-firing of Biomass Bioenergy Consult Powering a GreenerFuture* December 21.
- [20] Ramli, U., 2009. *PEMANASAN GLOBAL: Dampak dan UpayaMeminimalisasinya*. Gorontalo: Universitas Negeri Gorontalo. Luca M , 2008 . *Multiphase Euler Lagrange CFD simulation applied to Wet Flue Gas Desulphurisation technology*, Politecnico di Milano
- [21] Robert J dkk, 2018. *Technical Aspects and Energy Effects of Waste Heat Recoveryfrom District Heating Boiler Slag*. *Energies*, 2011, 11, 796.