



## **Analisis Variasi Sudut *Tilting Burner* Terhadap Distribusi Temperatur pada *Boiler Furnace***

Abi Tonjo Buono<sup>1\*</sup>, Candra Damis Widiawaty<sup>1</sup>, dan Cecep Slamet Abadi<sup>1</sup>

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. Dr. G.A Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

### **Abstrak**

*Tangentially fired pulverized-coal boiler dilengkapi fasilitas tilting burner, dimana fasilitas ini memungkinkan burner untuk dapat diarahkan ke atas maupun ke bawah membentuk sudut tertentu terhadap garis horizontal. Sudut tilting burner berfungsi untuk mengontrol posisi vertikal pembakaran dan juga ukuran nyala api untuk menghasilkan distribusi temperatur yang seragam ke semua tube boiler. Sudut kemiringan yang tidak akurat dapat menyebabkan penyebaran panas tidak merata dan temperatur lokal yang tinggi pada salah satu sisi tube. Dalam penelitian ini, model numerik dikembangkan dan divalidasi dengan data eksperimental yang diperoleh dari pengukuran di tempat untuk menyelidiki efek sudut tilting burner terhadap pembakaran. Turbulensi, perpindahan panas dan reaksi kimia dalam ruang bakar direproduksi secara rinci oleh model. Pada penelitian ini, variasi sudut tilting yang dilakukan adalah +20°, +10°, 0°, -10°, dan -20° terhadap garis horizontal. Perubahan ini dibandingkan dengan sudut tilting 0°. Perubahan sudut tilting +10° akan menaikkan temperatur furnace 90°C serta temperatur flue gas pada outlet furnace 40°C.. Perubahan sudut tilting +20°, akan menaikkan temperatur furnace 170°C serta temperatur flue gas pada outlet furnace 90°C. Perubahan sudut tilting -10° akan menurunkan temperatur pada furnace 130°C, dan temperatur flue gas pada outlet furnace 20°C. Sementara perubahan sudut tilting -20°, akan menurunkan temperatur pada furnace 190°C, dan temperatur flue gas pada outlet furnace 90°C. Sudut tilting yang paling sedikit area yang terkena overheating yaitu sudut tilting 0°.*

*Kata-kata kunci: Tangentially fired pulverized-coal boiler; Tilting burner; Computational fluid dynamic*

### **Abstract**

*Tangentially fired pulverized-coal boilers are equipped with tilting burners, where this facility allows the burner to be directed upwards or downwards to form a certain angle to the horizontal. The burner tilt angle to control the vertical position and also ignites the flame to produce a uniform temperature distribution for all boiler tubes. Inaccurate tilt angles can cause uneven heat distribution and high local temperatures on one side of the tube. In this study, a numerical model was developed and validated with the experimental data obtained from on-site measurement to investigate the effect of the burner tilt angle on the combustion. The turbulence, heat transfer and chemical reactions in the furnace were reproduced in detail by the model. In this study conducted tilting angle variation is +20°, +10°, 0°, -10°, dan -20° to the horizontal. This change is compared with tilt angle 0°. Tilting changes to +10° will raise the furnace temperature 90°C and flue gas temperature at furnace outlet 50°C. Tilting changes to +20° will raise the furnace temperature 170°C and flue gas temperature at furnace outlet 90°C. Tilting changes to -10° will reduce the furnace temperature 130°C and flue gas temperature at furnace outlet 20°C. Tilting changes to -20° will reduce the furnace*

\* Corresponding author E-mail address: [abitonjobuono@gmail.com](mailto:abitonjobuono@gmail.com)

*temperature 190°C and flue gas temperature at furnace outlet 90°C. Tilt angle with the least area affected by overheating is tilt angle 0°.*

*Keywords: Tangentially fired pulverized-coal boiler; Tilting burner; Computational fluid dynamics*

## 1. PENDAHULUAN

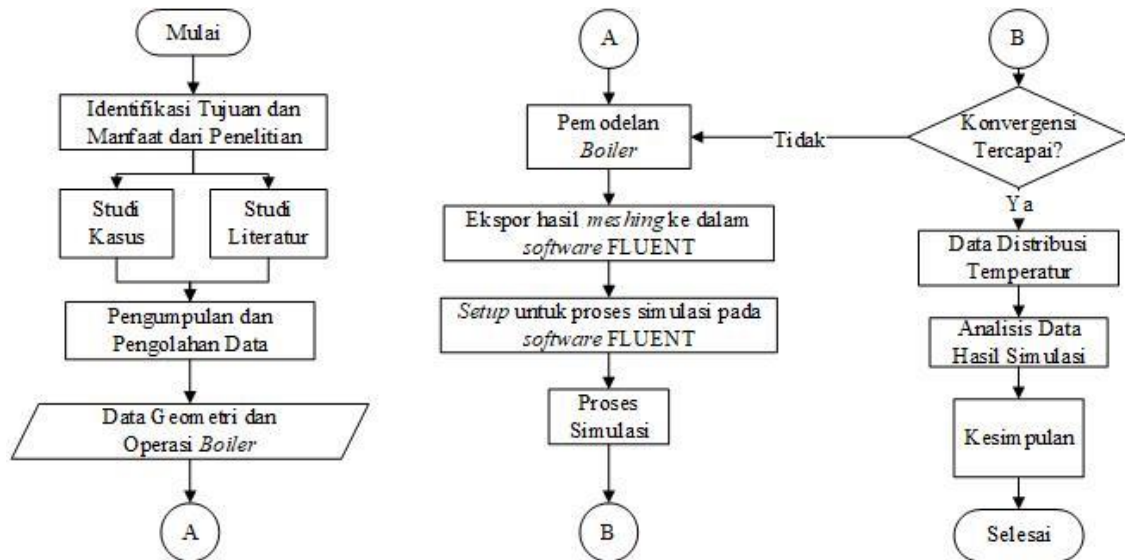
*Boiler* dengan tipe pembakaran tangensial paling banyak digunakan dalam industri pembangkit listrik tenaga uap. *Burner* pada *boiler* tangensial dipasang di empat sudut secara terpisah, dimana aliran masuk udara dan bahan bakar dari setiap sudut berinteraksi satu sama lain dan membentuk bola api. Metode pembakaran ini memastikan waktu pembakaran yang cukup dari partikel batu bara, efisiensi pembakaran yang tinggi, stabilitas nyala api yang baik, dan kemampuan pembakaran yang baik terhadap berbagai jenis batu bara.

Saat dilakukan operasi pembangkit listrik, teridentifikasi bahwa ada distribusi temperatur yang tidak merata di ruang bakar. Distribusi temperatur yang tidak merata ini dapat menyebabkan panas terkonsentrasi hanya pada daerah tertentu pada *tube boiler* yang menyebabkan perbedaan temperatur antar *tube*. Perbedaan temperatur di sepanjang *tube* menyebabkan retak pada *tube boiler* dan nantinya akan terjadi kebocoran pada *tube boiler*.

Sudut *tilting burner* dan pengaruhnya terhadap distribusi temperatur telah menjadi topik penelitian yang signifikan selama beberapa dekade, sehingga dapat dijadikan referensi. Munisamy, et al. [1] melakukan investigasi CFD pada 0° dan -30° dari sudut *burner*. Kondisi desain sudut *burner* 0° dibandingkan dengan sudut *burner off-design* -30° yang akan menjadi sudut *burner* untuk mengurangi temperatur bagian belakang yang tidak merata. Park, et al. [2] menjelaskan deviasi temperatur *main steam* dan pengurangannya dengan mengubah sudut injeksi *over fire air* dalam 800 MW *boiler* tangensial dengan simulasi CFD dari data lapangan yang relevan, dan tes lapangan dilakukan untuk mengurangi penyimpangan dengan mengubah sudut kemiringan *separated over fire air* (SOFA) dan *closed coupled over fire air* (CCOFA). Tang, et al. [3] menjelaskan tentang studi numerik dengan menggunakan CFD untuk menyimulasikan karakteristik aliran dan proses pembakaran di dalam *boiler* dan eksperimental yang komprehensif pada *boiler* tangensial kapasitas 200 MW, dalam hal ini juga terdapat masalah *waterwall tube overheating*, dan *hot spot* yang diidentifikasi berdasarkan berbagai tipe kondisi operasi. Thrangaraju, et al. [4] melakukan investigasi tentang sudut kemiringan *burner* yang tepat untuk menciptakan distribusi temperatur yang efisien dan pola aliran gas pembakaran terutama di bagian belakang *boiler* yang mampu meningkatkan efisiensi *boiler*. Tan, et al. [5] meneliti pengaruh sudut kemiringan *burner* yang signifikan terhadap karakteristik pembakaran dan emisi NO<sub>x</sub> dari 700 MWe *pulverized coal boiler*, dalam hal ini juga turbulensi, perpindahan panas, dan reaksi kimia dalam *furnace* dibuat secara rinci pada model CFD. Yan, et al. [6] dan Niu, et al. [7] mempelajari efek dari pengaturan *burner* pada kinerja pembakaran tungku dan menemukan bahwa *wall-center boiler* pembakaran tangensial adalah pengaturan *burner* tangensial terbaik, yang dapat memfasilitasi terbakarnya partikel batu bara, mengurangi kemungkinan *slagging* dan temperatur tinggi, serta mitigasi pemanasan tidak merata. Tian, et al. [8] mengurangi deviasi temperatur *flue gas* dan *reheat steam* dengan memiringkan *burner* utama ke atas dan mengatur sudut kemiringan untuk masukan udara tambahan. Yu, et al. [9] melakukan studi numerik yang komprehensif dari optimasi pembakaran pada *boiler* tangensial 660 MW di bawah kendala *steam tube overheating*, dengan mengatur sudut *tilting* SOFA yang dapat mengurangi pembentukan CO dan NO<sub>x</sub>, serta distribusi temperatur. Park, et al. [10] menjelaskan efek pengaturan *burner* dan SOFA, pola pembakaran, dan pencampuran batu bara terhadap efisiensi *boiler*. Sehingga dapat dilihat pada beberapa referensi, sudut *tilting burner* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap pembakaran dan distribusi temperatur pada ruang bakar.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menemukan sudut *tilting burner* yang tepat secara vertikal untuk menciptakan distribusi temperatur yang seragam di ruang bakar *boiler* khususnya di area sebelum *outlet furnace* sehingga dapat mencegah terjadinya temperatur lokal tinggi yang dapat mengakibatkan *tube* mengalami kerusakan. Penelitian ini menggunakan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) yang dapat melihat distribusi temperatur yang akan terjadi, dengan tujuan memperoleh pedoman yang berguna untuk menyesuaikan sudut *tilting burner* dalam *boiler* tersebut. Model numerik dikembangkan dan divalidasi terhadap pengukuran eksperimental. Berdasarkan model yang telah dibuat, distribusi temperatur dalam berbagai kondisi *tilting burner* diselidiki dan dibahas.

## 2. METODE

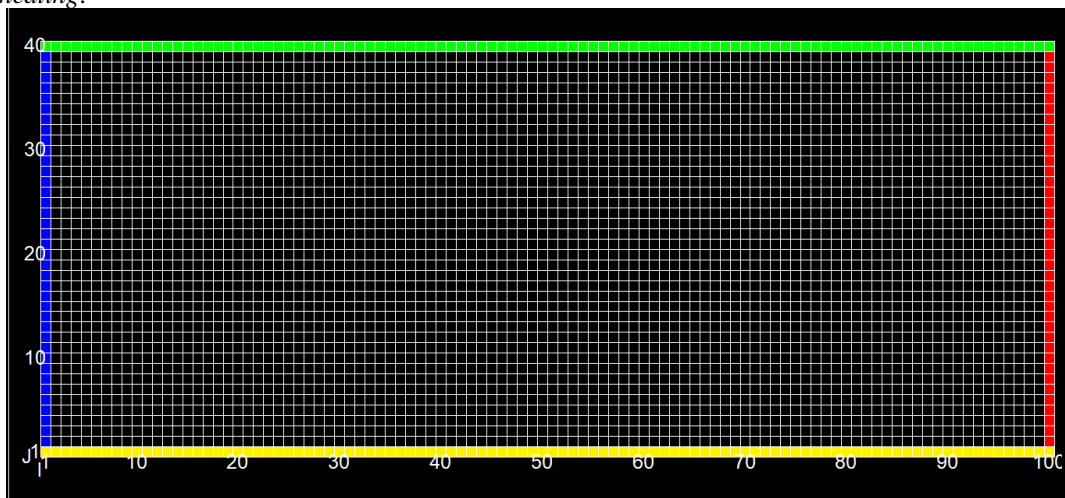


Gambar 1. Diagram alir metode penelitian.

Berdasarkan Gambar 1, maka berikut adalah metode yang digunakan. Pertama melakukan identifikasi tujuan serta manfaat dari penelitian. Berdasarkan studi kasus dan studi literatur yang telah dilakukan, maka identifikasi masalah pada penelitian ini adalah adanya *local overheating* pada ruang bakar boiler. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data. Pengumpulan data didapat berupa data operasi boiler saat *performance test*, serta data analisis batu bara dan analisis *flue gas*.

Penelitian ini dilakukan dengan melihat spesifikasi *pulverized coal boiler* berkapasitas 625 MW. Dimana ruang bakar pada boiler ini mempunyai tujuh nozel pengapian, dua nozel CCOFA (*Close-Coupled Over Fire Air*), dan satu nozel SOFA (*Separate Over Fire Air*) yang terletak di setiap sudut. Kedua fitur tersebut digunakan untuk menambahkan udara ke dalam ruang bakar untuk menyempurnakan pembakaran. Konfigurasi nozel batu bara dan nozel udara pembakaran pada arah vertikal dapat diatur sebesar dari  $-20$  hingga  $+20$ .

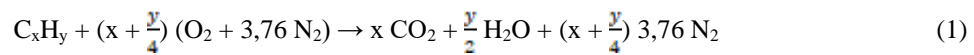
Selanjutnya dilakukan pemodelan boiler, dalam hal ini dimodelkan dalam 2D dengan satu inlet untuk nozel batu bara dan satu inlet untuk nozel udara pembakaran. Kemudian dilanjutkan dengan proses *meshing* pada model tersebut dan dibuat *boundary condition* pada model tersebut serta dilakukan *setup* untuk proses simulasi. Setelah data dimasukkan ke *setup* untuk proses simulasi, dilakukan proses iterasi sampai konvergensi tercapai. Setelah proses konvergensi selesai, dilakukan penampilan data distribusi temperatur berupa kontur pada model boiler tersebut. Terakhir dilakukan analisis pada hasil kontur distribusi temperatur tersebut, dan diberi kesimpulan mana sudut *tilting burner* yang menghasilkan paling sedikit terjadinya *local overheating*.



Gambar 2. Meshing.

## Model

Pembakaran *pulverized coal* di dalam ruang bakar melibatkan beberapa proses yang digabungkan secara erat, termasuk aliran turbulen, perpindahan panas, pengangkutan partikel batu bara, dan reaksi kimia homogen dan heterogen. Aliran turbulen yang dimodelkan dalam penelitian ini menggunakan model k-ε standar, yang telah banyak digunakan dalam industri [11]. Perpindahan panas radiasi dihitung dengan menggunakan model diskrit ordinat (DO) [12], di mana model DO memperhitungkan efek partikular dan sumber panas lokal, dua aspek penting dari simulasi pembakaran batu bara, yang telah banyak digunakan dalam pemodelan pembakaran batu bara. Reaksi pembakaran yang digunakan yaitu model *species transport*, model proses pembakaran yang digunakan *finite-rate/eddy-dissipation* dimana reaksi homogen direpresentasikan sebagai fungsi dari laju pencampuran arus turbulen. Serta pembakaran *volatile matter* dimodelkan menggunakan satu langkah. Data *species transport* seperti ini bergantung pada analisis batu bara seperti analisis *proximate* dan analisis *ultimate* [13]. Reaksi yang digunakan yaitu:



Semua sub-model yang digunakan adalah model umum, banyak digunakan dan didokumentasikan dengan baik. Beberapa referensi dapat ditemukan untuk lebih detail [14].

## Simulasi dan Kondisi Batas

Untuk meningkatkan temperatur uap, *burner* biasanya dimiringkan ke atas selama operasi aktual. Namun, temperatur *reheat steam* dan *flue gas* di ruang bakar dapat naik melebihi nilai pembatasnya jika sudut *tilting* terlalu tinggi. Oleh karena itu, sudut *tilting burner* harus ditetapkan untuk memenuhi berbagai kriteria. Kondisi yang akan digunakan pada penelitian ini yaitu *burner* khususnya yang menyuplai udara pembakaran dimiringkan dalam posisi 0°, +10°, dan +20° dimana dipilih untuk menyelidiki efek dari sudut *tilting burner* pada karakteristik pembakaran ruang bakar terutama distribusi temperatur.

Kondisi batas pada *inlet burner*, yaitu temperatur dan laju aliran di *inlet* udara, ditentukan berdasarkan pada parameter operasi aktual. Kondisi batas pada *wall* dalam model numerik diasumsikan pada *shear condition* adalah *no slip*. Temperatur *wall* pada *water wall tube* diatur ke 1200 K. Distribusi ukuran partikel batu bara dimodelkan menggunakan persamaan *Rosin-Rammler*, dengan asumsi diameter rata-rata 0,000134 m dan parameter sebaran 4,52. Sifat-sifat batu bara disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Sifat batu bara

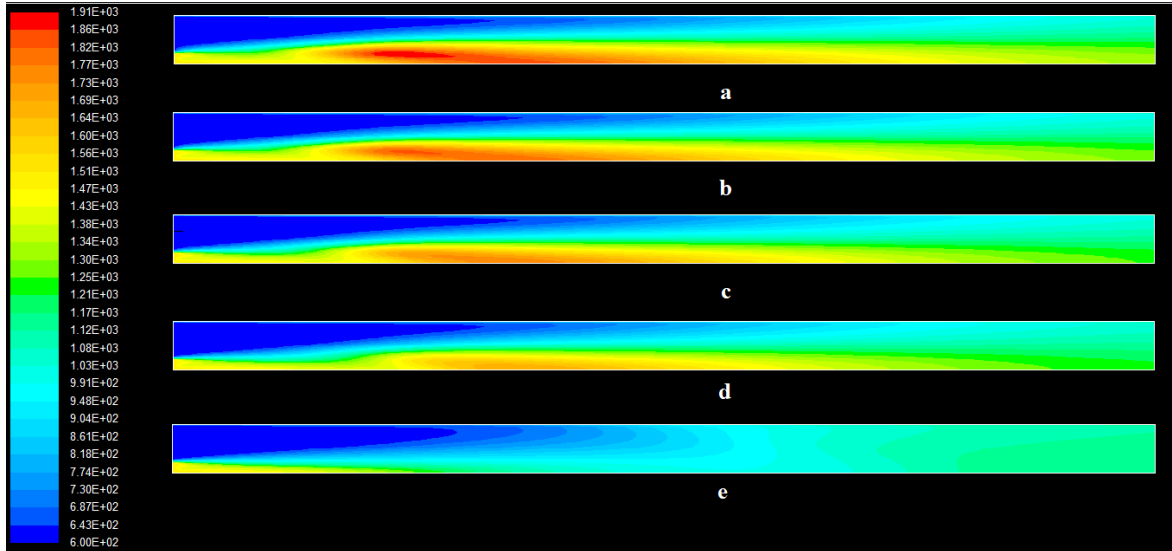
Analisis Proksimat (wt%), <i>as received</i> (ar)	
<i>Volatile matter</i>	31,725
<i>Moisture</i>	36,272
<i>Ash</i>	3,946
<i>Fixed carbon</i>	28,057
<i>High heating value, (kJ/kg)</i>	16774,82
Analisis Ultimat (wt%), <i>as received</i> (ar)	
Karbon	42,361
Hidrogen	3,104
Oksigen	13,514
Nitrogen	0,654
Sulfur	0,149

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kontur Distribusi Temperatur

Perpindahan panas pertama-tama akan terjadi dari *flue gas* ke *water wall tube*. Selanjutnya *flue gas* akan memanasi berbagai *heat exchanger* yaitu *superheater*, *reheater* dan *economizer*. Oleh karena itu temperatur *flue gas* akan semakin turun saat mengalir menuju ke *outlet furnace boiler*. Kontur temperatur pada *furnace* tampak pada Gambar 3 dengan *range colormap* 600 K – 1906 K.

Pada Gambar 3 merupakan gambaran kontur temperatur pada model *furnace boiler* dimana dimodelkan horizontal dari sisi kiri merupakan *inlet* dimana terdapat udara dan batu bara, sedangkan sisi kanan merupakan *outlet*. Temperatur paling tinggi berada di *furnace*, karena disinilah terjadi proses pembakaran partikel batu bara, semakin ke *outlet furnace boiler* temperatur *flue gas* akan semakin turun karena terjadi perpindahan panas dari *flue gas* ke *water wall tube*. Area yang paling panas inilah diprediksikan pembakaran sempurna terjadi pada model ruang bakar *boiler*.

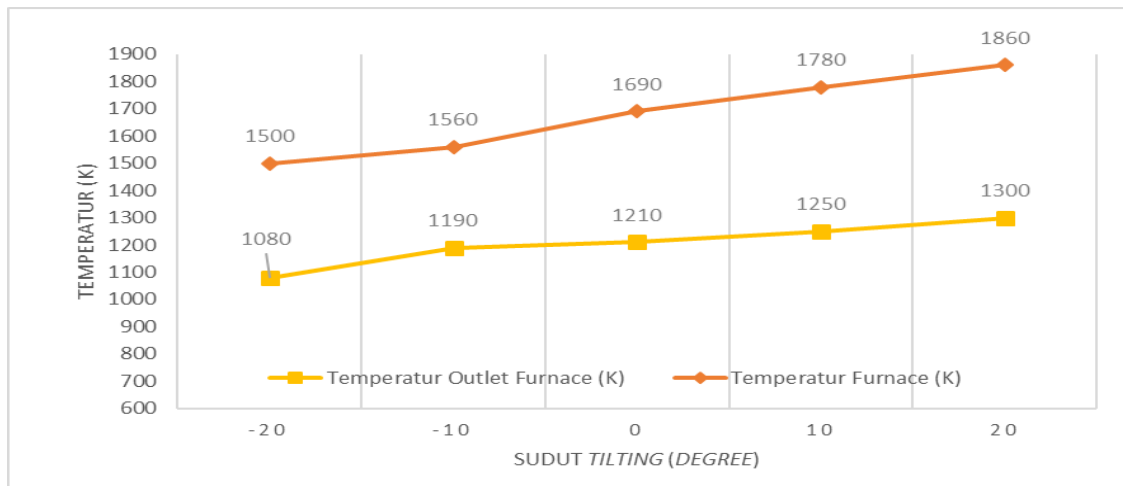


Gambar 3. Kontur Temperatur: (a) sudut *tilting burner* +20°; (b) sudut *tilting burner* +10°; (c) sudut *tilting burner* 0°; (d) sudut *tilting burner* -10°; (e) sudut *tilting burner* -20°

Gambar 3 terlihat adanya pergerakan temperatur pembakaran akibat perubahan sudut *tilting burner* pada *furnace boiler*. Saat sudut *tilting* 0°, panas maksimal yang didapat dari pembakaran tampak berada di posisi jauh dari *inlet furnace*, sehingga mengakibatkan temperatur pembakaran yang terjadi tidak terlalu tinggi jika dibandingkan dengan sudut *tilting* +10° dan sudut *tilting* +20°. Saat sudut *tilting* +10°, posisi pembakaran tampak mendekat ke *inlet furnace* dan memiliki temperatur pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan sudut *tilting* 0°, sehingga terjadi peningkatan juga temperatur *flue gas* di *outlet furnace*. Saat sudut *tilting* +20°, posisi pembakaran lebih mendekat ke *inlet furnace* dengan temperatur pembakaran lebih tinggi dibandingkan dengan sudut *tilting* 0° dan sudut *tilting* +10°, sehingga terjadi peningkatan temperatur *flue gas* juga di *outlet furnace*.

Saat *tilting* -10°, posisi pembakaran semakin menjauh dari *inlet furnace* dan juga temperatur pembakaran yang lebih rendah dari *tilting* 0°, sementara juga terlihat pada *outlet furnace* dimana temperaturnya lebih rendah dibandingkan dengan 0°. Saat *tilting* -20°, posisi panas yang terlihat hanya berada pada dinding *furnace* dekat dengan *inlet furnace*. Hal ini terjadi dikarenakan posisi sudut *tilting* yang semakin ke bawah sehingga mengakibatkan posisi pembakaran yang semakin menurun mendekati dinding *furnace*. Serta dapat dilihat juga temperatur pembakaran di *furnace* lebih rendah dibandingkan dengan sudut variasi lainnya.

Aturan di *furnace* yang berlaku yaitu memiliki temperatur pembakaran maksimal dimana hal ini bergantung pada *material* komponen yang ada di *furnace* seperti halnya *water wall tube*, dan juga *heat exchanger tube* lainnya. Dimana *furnace boiler* yang dimodelkan memiliki temperatur pembakaran maksimal sebesar 1800 K. Serta temperatur *flue gas* di *outlet furnace* harus melebihi 1200 K, yang mana nantinya berpengaruh pada kapasitas uap yang dihasilkan pada *boiler*. Maka dari itu jika dilihat dari Gambar 3, temperatur pembakaran pada saat sudut *tilting* +10° ada area pada ruang bakar yang mendekati dengan temperatur pembakaran maksimal yaitu dengan nilai 1780 K. Begitu pula saat sudut *tilting* +20° banyak area di ruang bakar dengan temperatur pembakaran yang dihasilkan melebihi temperatur pembakaran maksimal yang telah ditentukan sehingga mengakibatkan terjadinya *overheating* pada *furnace* yang mana nantinya juga akan berpengaruh ke *water wall tube* yang bisa berakibat kerusakan seperti terjadi keretakan dikarenakan *overheating* tersebut karena melalui proses *thermal fatigue*. Dilihat dari *outlet furnace*, untuk *tilting* ke bawah seperti -10° dan -20° memiliki temperatur *flue gas* yang rendah dimana nanti akan berdampak pada kapasitas uap yang dihasilkan. Serta untuk *tilting* 0°, +10°, +20° masih memiliki temperatur *flue gas* yang cukup sesuai dengan spesifikasi pada *outlet furnace*.



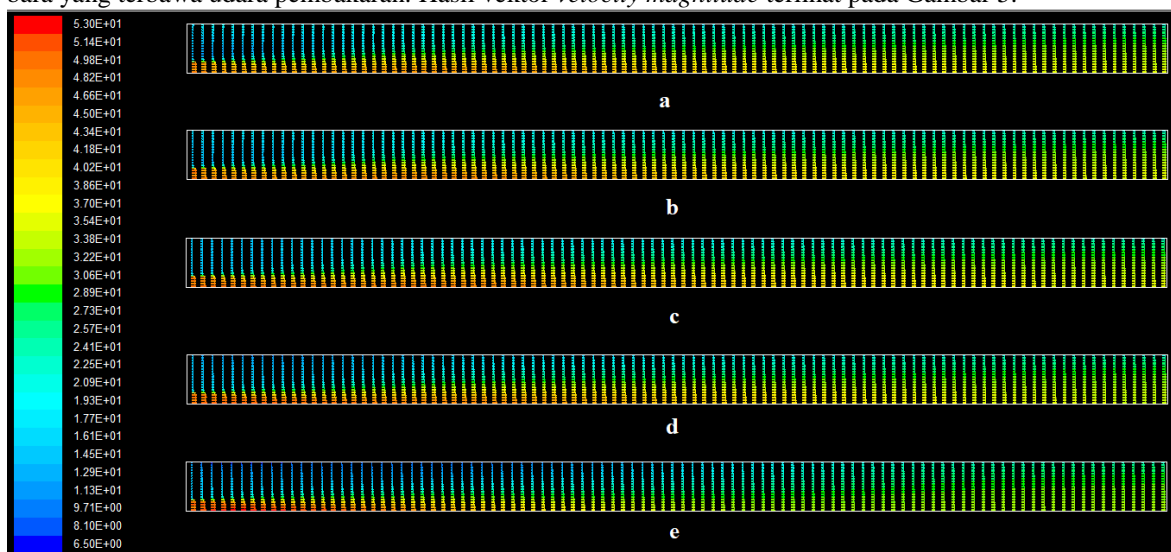
Gambar 4. Pengaruh Perubahan Sudut *Tilting* Terhadap Temperatur

Pada gambar 4 terlihat bahwa dengan *tilting* diarahkan ke atas, maka temperatur pada *furnace* dan *outlet furnace* juga semakin tinggi. *Boiler* dengan batu bara LRC, perubahan temperatur terhadap sudut *tilting* 0°, saat sudut *tilting* +10° akan menaikkan temperatur pada *furnace* 90°C, dan menaikkan temperatur *flue gas* pada *outlet furnace* 40°C. Sedangkan saat sudut *tilting* +20°, akan menaikkan temperatur pada *furnace* 170°C dan menaikkan temperatur *flue gas* pada *outlet furnace* 90°C. Kenaikan pada temperatur *furnace* dan *outlet furnace* dimungkinkan karena adanya banyak partikel batu bara yang terbakar saat sudut *tilting* bergerak ke atas. Sementara saat sudut *tilting* -10° terjadi penurunan temperatur pada *furnace* 130°C, dan penurunan temperatur *flue gas* pada *outlet furnace* 20°C. Sedangkan saat sudut *tilting* -20°, akan menurunkan temperatur pada *furnace* 190°C, dan menurunkan temperatur *flue gas* pada *outlet furnace* 90°C. Penurunan pada temperatur *furnace* dan *outlet furnace* dimungkinkan karena adanya partikel batu bara yang tidak terbakar saat melewati *outlet furnace*.

### Vektor *Velocity Magnitude*

Proses pembakaran partikel batu bara akan menghasilkan temperatur *flue gas* tinggi dimana *flue gas* mengalir menuju ke *outlet boiler*. Pada *furnace boiler*, terdapat lintasan partikel batu bara yang mana dipengaruhi oleh adanya pola pada api. Di *boiler* tangensial adanya *fireball* yang mana dapat membuat lintasan partikel batu bara menjadi lebih panjang, sehingga rentang waktu partikel di area *furnace* akan menjadi lebih lama.

Vektor kecepatan aliran *flue gas* dalam *furnace* diperlukan untuk menganalisis pergerakan partikel batu bara yang dibawa udara pembakaran. Hasil vektor *velocity magnitude* terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Vektor *Velocity Magnitude*: (a) sudut *tilting burner* +20°; (b) sudut *tilting burner* +10°; (c) sudut *tilting burner* 0°; (d) sudut *tilting burner* -10°; (e) sudut *tilting burner* -20°

Gambar 5 merupakan vektor *velocity magnitude* pada *furnace boiler* dengan *range colormap* 6,5 m/s – 53 m/s. Secara umum terlihat terdapat perbedaan vektor di sekitar *inlet*, dan vektor pada *furnace*. Saat *tilting* 0°, arah vektor di *inlet* dengan kecepatan 50 m/s dengan arah vektor ke *furnace*. Saat aliran dari *inlet* terus memasuki *furnace*, aliran ini akan terdorong ke arah horizontal sehingga kecepatan pada arah horizontal semakin cepat. Di *outlet furnace*, jumlah vektor paling dominan berada di dinding *furnace*.

Saat sudut *tilting* -10°, arah vektor di *inlet* atau *burner* mengarah ke dinding *furnace*, sehingga aliran tersebut terpecah di tepi *furnace*. Aliran pada *tilting* -10° memiliki kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan *tilting* 0°.

Saat sudut *tilting* -20°, arah vektor di *inlet* atau *burner* mengarah ke dinding *furnace*, dimana aliran tersebut juga akan terpecah di tepi *furnace* dan makin menurunnya kecepatan. Aliran pada *tilting* -20° memiliki kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan variasi sudut *tilting* lainnya.

Saat sudut *tilting* +10°, arah vektor di *inlet* atau *burner* langsung mengarah ke *furnace*, sehingga aliran tersebut akan semakin terdorong aliran selanjutnya yang keluar dari *burner*. Aliran pada *tilting* +10° memiliki kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan *tilting* 0°.

Saat sudut *tilting* +20°, arah vektor di *inlet* atau *burner* langsung mengarah ke *furnace*, sehingga aliran tersebut akan semakin terdorong aliran selanjutnya yang keluar dari *burner*. Aliran pada *tilting* +20° memiliki kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan *tilting* 0° dan +10°.

Perubahan sudut *tilting* mempengaruhi nilai kecepatan arah vektor di *inlet furnace*. Semakin ke atas *tilting* diarahkan maka kecepatan di arah vektor menuju *furnace* akan menurun. Kecepatan tampak naik lagi saat sudah di tengah *furnace*. Hal ini dikarenakan partikel batu bara yang terbawa ke *furnace* terdorong oleh partikel batu bara yang terbakar selanjutnya dari *inlet*. Oleh karena itu saat *tilting* diarahkan semakin ke atas panas di *furnace* semakin tinggi. Sementara berbanding terbalik saat sudut *tilting* makin ke bawah, dimana terlihat tidak adanya kecepatan yang naik saat di *furnace* dan semakin menurun kecepatannya jika dilihat dari *inlet*. Serta kecepatan dengan nilai yang tinggi semakin dekat dengan *inlet furnace* seiring dengan arah sudut *tilting* ke bawah. Oleh karena itu saat *tilting* diarahkan semakin ke bawah panas di *furnace* juga semakin menurun.

#### 4. KESIMPULAN

1. Semakin ke atas sudut *tilting burner* diarahkan, semakin tinggi juga temperatur *flue gas* pada *outlet furnace* jika dibandingkan dengan sudut *tilting* 0°. Dapat diartikan juga semakin ke atas sudut *tilting burner* juga diprediksi akan lebih mungkin terjadinya *overheating* pada beberapa area di *furnace*.
2. Temperatur pembakaran yang paling sempurna pada *boiler* dengan batu bara LRC sesuai dengan analisis yang telah dilakukan terjadi pada saat sudut kemiringan (*tilting*) 0°.
3. Aliran *flue gas* pada *boiler* dipengaruhi oleh posisi sudut *tilting burner*, saat *tilting* diarahkan ke bawah aliran dari *burner (inlet)* akan mendorong aliran yang sebelumnya keluar dimana aliran ini mengarah ke tepi *furnace* yang mana mendekati posisi *inlet*. Saat *tilting* diarahkan ke atas aliran dari *burner (inlet)* akan mendorong aliran yang sebelumnya keluar sehingga aliran lebih mengarah ke pusat *furnace*.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Indonesia Power atas dukungan pada penelitian ini, kepada PT. CCIT Group Indonesia yang telah meminjamkan aplikasi CFDSoft untuk digunakan pada penelitian ini, dan kepada Bapak Irfan Djunaedi atas diskusinya yang bermanfaat.

#### REFERENSI

1. K. M. Munisamy, M. Z. Yusoff, S. K. Thangaraju, H. Hasan dan A. Ahmad, "Burner Tilting Angle Effect on Velocity Profile in 700 MW Utility Boiler," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 88, 2015.
2. H. Y. Park, S. H. Baek, H. H. Kim, Y. J. Kim, T. H. Kim, H. S. Lim dan D. S. Kang, "Reduction of Main Steam Temperature Deviation in a Tangentially Coal-Fired, Two Pass Boiler," *Fuel*, vol. 166, pp. 509-516, 2016.
3. G. Tang, B. Wu, K. Johnson, A. Kirk, D. Fu dan C. Q. Zhou, "Numerical Study of a Tangentially

- Fired Boiler for Reducing Steam Tube Overheating,” *Applied Thermal Engineering*, 2016.
4. S. K. Thrangaraju, K. M. Munisamy dan S. Baskaran, “Research in Varying Burner Tilt Angle to Reduce Rear Pass Temperature in Coal Fired Boiler,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 822, 2017.
  5. P. Tan, D. Tian, Q. Fang, L. Ma, C. Zhang, G. Chen, L. Zhong dan H. Zhang, “Effects of Burner Tilt Angle on the Combustion and NOX Emission Characteristics of a 700 MWe Deep-Air-Staged Tangentially Pulverised-Coal-Fired Boiler,” *Fuel*, vol. 196, pp. 314-324, 2017.
  6. L. Yan, B. He, F. Yao, R. Yang, X. Pei, C. Wang dan J. Song, “Numerical Simulation of a 600 MW Utility Boiler with Different Tangential Arrangements of Burners,” *Energy & Fuels*, vol. 26, pp. 5491-5502, 2012.
  7. Y. Niu, X. Liu, Y. Zhu, H. Tan dan X. Wang, “Combustion Characteristics of a Four-Wall Tangential Firing Pulverized Coal Furnace,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, pp. 471-477, 2015.
  8. D. Tian, L. Zhong, P. Tan, L. Ma, Q. Fang, C. Zang, D. Zhang dan G. Chen, “Influence of Vertical Burner Tilt Angle on the Gas Temperature Deviation in a 700 MW Low NOX Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler,” *Fuel Processing Technology*, vol. 138, pp. 616-628, 2015.
  9. C. Yu, W. Xiong, H. Ma, J. Zhou, F. Si, X. Jiang dan X. Fang, “Numerical Investigation of Combustion Optimization in a Tangential Firing Boiler Considering Steam Tube Overheating,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 154, pp. 87-101, 2019.
  10. H. Park, M. Faulkner, M. D. Turrell, P. J. Stopford dan D. S. Kang, “Coupled Fluid Dynamics and Whole Plant Simulation of Coal Combustion,” *Fuel*, vol. 89, pp. 2001-2010, 2010.
  11. B. Launder dan D. Spalding, “The Numerical Computation of Turbulent Flows,” *Computer Methods in Applied Mechanics And Engineering*, vol. 3, pp. 269-289, 1974.
  12. J. S. Truelove, “Three-Dimensional Radiation in Absorbing-Emitting-Scattering Media Using the Discrete-Ordinates Approximation,” *J Quant Spectrosc Radiative Transfer*, vol. 39, pp. 27-31, 1988.
  13. J. Zhang, Q. Wang, Y. Wei dan L. Zhang, “Numerical Modeling and Experimental Investigation on the Use Brown Coal and Its Beneficated Semicoke for Coal Blending Combustion in a 600 MWe Utility Furnace,” *Energy&Fuels*, vol. 29, pp. 1196-1209, 2015.
  14. J. R. Fan, X. D. Zha dan K. F. Cen, “Study on Coal Combustion Characteristics in a W-Shaped Boiler Furnace,” *Fuel*, vol. 80, pp. 373-381, 2001.
  15. T. F. Smith, Z. F. Shen dan J. N. Friedman, “Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model,” *J. Heat Transfer*, vol. 104, pp. 602-608, 1982.
  16. S. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York: McGraw-Hill, 1980.