



TESIS-TM185400

**Studi Numerik Pengaruh Kecepatan Udara
Primer Keluaran Pulverizer terhadap
Pembentukan NOx pada Boiler PLTU
Labuan**

**TAUFIK HIDAYAT, ST
NRP. 2111750078018**

Dosen Pembimbing
Prof. DR. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

Program Magister
Bidang Keahlian Manajemen Energi
Kerjasama PT. Indonesia Power
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020



TESIS-TM185400

**Studi Numerik Pengaruh Kecepatan Udara
Primer Keluaran Pulverizer terhadap
Pembentukan NO_x pada Boiler PLTU Labuan**

**TAUFIK HIDAYAT, ST
NRP. 2111750078018**

**Dosen Pembimbing
Prof. DR. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

**Program Magister
Bidang Keahlian Manajemen Energi
Kerjasama PT. Indonesia Power
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

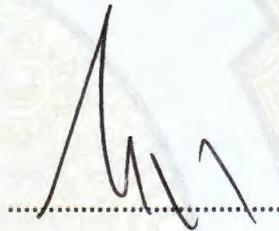
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
TAUFIK HIDAYAT
02111750078018

Tanggal Ujian: 17 Januari 2020
Periode Wisuda: Maret 2020

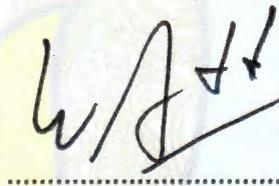
Disetujui oleh:
Pembimbing:

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA
NIP 19600121987011001

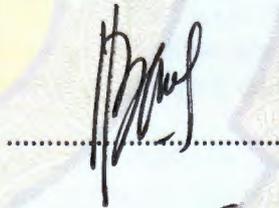


Penguji:

1. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.
NIP 197104051997021001



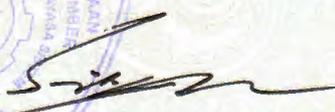
2. Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.
NIP 197301161997021001



3. Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng., Sc.
NIP 196604021989031002




Kepala Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem


Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng., Sc.
NIP 196604021989031002

Halaman ini sengaja dikosongkan

Studi Numerik Pengaruh Kecepatan Udara Primer Keluaran Pulverizer terhadap Pembentukan NO_x pada Boiler PLTU

Labuan

Mahasiswa Nama : Taufik Hidayat, ST
Mahasiswa ID : 02111750078018
Pembimbing : Prof. DR. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRAK

Tantangan yang dihadapi oleh industri kelistrikan di Indonesia saat ini dengan kapasitas pembangkit yang cukup besar. Salah satunya adalah permasalahan variasi dari kalori batubara dan harga bahan bakar. Disamping itu juga berkaitan dengan besarnya kapasitas pembangkit berdampak pada besarnya pelepasan gas NO_x yang sangat berpotensi mengganggu lingkungan. Dengan pemahaman mekanisme optimasi dan setting *pulverizer* dalam hal ini pengaturan *velocity Primary air* yang keluar dari tiap line keluaran *pulverizer* dapat meningkatkan kinerja pembangkit itu sendiri dan mengurangi gas NO_x. Dengan pengaturan *velocity* udara primer di *outlet pulverizer* proses pembentukan *fireball* lebih sempurna yang berefek pada proses pembakaran yang lebih baik. Dengan demikian, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan kondisi pengaturan *velocity primary air* sehingga menyebabkan proses pembakaran yang menghasilkan gas buang dengan kandungan NO_x yang memenuhi kriteria yang berlaku.

Dalam penelitian ini digunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Pembuatan geometri boiler menggunakan *software* Gambit 2.4.6, sedangkan untuk simulasi numerik menggunakan *software* ANSYS Fluent 18.2. Untuk validasi, hasil awal simulasi untuk kondisi *boiler* saat ini dibandingkan dengan data hasil pengukuran aktual. Selanjutnya akan dilakukan simulasi dengan memvariasikan kecepatan udara primer.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengaruh peningkatan *Velocity outlet pulverizer* berbanding terbalik dengan temperatur pembakaran dan pembentukan NO_x di furnace. Temperatur pembakaran Pada Temperatur inlet superheater untuk masing masing adalah model *existing* 1218⁰C, variasi 23 m/s adalah 1433⁰C, variasi 24 m/s adalah 1438⁰C, variasi 26 m/s adalah 1434⁰C, variasi 28 m/s adalah 1257⁰C, variasi 30 m/s adalah 1106⁰C, dan variasi 32 m/s adalah 592⁰C. Fraksi massa NO_x yang terjadi Pada *outlet boiler* untuk adalah model *existing* 0.1991% massa udara, variasi 23 m/s adalah 0.0507% massa udara, variasi 24 m/s adalah 0.671% massa udara, variasi 26 m/s adalah 0.976% massa udara, variasi 28 m/s adalah 0.727% massa udara, variasi 30 m/s adalah 0.000402% massa udara, dan variasi 32 m/s adalah 0.0163% massa udara. Dari hasil simulasi variasi 28 m/s adalah pilihan menjanjikan pembakaran yang lebih baik dan menghasilkan NO_x 64% lebih sedikit bila dibandingkan dengan model *existing* sehingga mengurangi polutan yang dihasilkan oleh PLTU Labuan.

Kata kunci : *Pulverizer, velocity Primary air, fireball, CFD, exhaust gas, NO_x*

Halaman ini sengaja dikosongkan

Numerical Study of the Effect of Primary Air Velocity of Pulverizer Output on NO_x Formation in the Boiler of Labuan Steam Power Plant

Student Name : Taufik Hidayat, ST
Student Identity Number : 02111750078018
Supervisor : Prof. DR. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRACT

The challenges faced by the electricity industry in Indonesia at present with a considerable generating capacity. One of them is the problem of variations in coal calories and fuel prices. Besides that, it also relates to the amount of generating capacity which has an impact on the amount of NO_x gas release which has the potential to disturb the environment. By understanding the mechanism of optimization and setting of the pulverizer in this case the *primary air velocity* settings that coming out of each *pulverizer* output line can improve the performance of the generator itself and reduce NO_x gas. By setting the *primary air velocity* at the outlet the process of forming fireball is more perfect which influences a better combustion process. Thus, the purpose of this research is to obtain the condition of setting the primary air velocity so that it causes the combustion process to produce exhaust gas with NO_x content that meets the applicable criteria.

In this study used the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Making boiler geometry using Gambit 2.4.6 software, while for numerical simulations using ANSYS Fluent 18.2 software. For validation, the initial simulation results for current boiler conditions are compared with actual measurement data. Next will be simulated by varying the primary air speed.

Simulation results show that the effect of increasing the velocity outlet pulverizer is inversely proportional to the combustion temperature and NO_x formation in the furnace. Combustion temperature at superheater inlet temperature for existing model is 1218⁰C, variation 23 m / s is 1433⁰C, variation 24 m / s is 1438⁰C, variation 26 m / s is 1434⁰C, variation 28 m / s is 1257⁰C, variation 30 m / s is 1106⁰C, and variations of 32 m / s are 592⁰C. The NO_x mass fraction that occurs at the boiler outlet for the existing model is 0.1991, the variation of 23 m / s is 0.0507% of air mass, the variation of 24 m/s is 0.671% of air mass, the variation of 26 m/s is 0.976% of air mass, the variation of 28 m/s is 0.727% of air mass, the variation of 30 m/s s is 0.000402% of air mass, and the variation of 32 m/s is 0.0163% of air mass. From the simulation results the variation of 28 m/s is a promising choice for better combustion and produces NO_x 64% less when compared to the existing model thereby reducing pollutants produced by the Labuan PLTU.

Keywords: *Pulverizer, velocity Primary air, fireball, CFD, exhaust gas, NOx*

Halaman ini sengaja dikosongkan

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

1. Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan karunia, rahmat, serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul “Studi Numerik Pengaruh Kecepatan Udara Primer keluaran Pulverizer terhadap Pembentukan NOx Pada Boiler PLTU Labuan”. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan serta dukungan dari beberapa pihak, maka penyusunan tesis ini tidak dapat berjalan sesuai harapan. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:
2. Ibu, istri dan anak-anakku tercinta yang senantiasa memberikan do'a dan dukungan kepada penulis.
3. Prof. DR. Ir. Triyogi Yuwono, DEA Dosen pembimbing yang telah memberikan saran dan motivasi dalam proses penyelesaian tesis ini.
4. Bapak dan Ibu dosen Departemen Teknik Mesin ITS yang telah mendidik penulis selama masa perkuliahan.
5. Seluruh rekan-rekan S2 Management Energi seperjuangan.
6. PT Indonesia Power yang telah memberikan beasiswa dan kesempatan tugas belajar S2.
7. Managemen Indonesia Power PLTU Labuan OMU yang memberikan dukungan kepada penulis.
8. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per-satu atas segala bantuan serta dukungan untuk penyusunan tesis ini.
9. Selain itu penulis berharap semoga tesis ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGHANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Boiler	7
2.1.1 Komponen Boiler	7
2.1.1.1 Furnace.....	7
2.1.1.2 Burner.....	7
2.1.1.3 Steam Drum	10
2.1.1.4 Waterwall	10
2.1.1.5 Steam Reheat dan superheater	11
2.1.1.6 Economizer	11
2.1.1.7 Air Preheater	11
2.2 Teori bahan bakar dan Pembakaran.....	11

2.2.1 Teori Bahan Bakar	11
2.2.2 Teori Pembakaran	15
2.3 Pembentukan NOx	16
2.3.1 Thermal NOx	16
2.3.2 Fuel NOx.....	16
2.3.3 Prompt NOx	18
2.4 Simulasi Numerik CFD Pembakaran Batubara pada Boiler	18
2.4.1 GAMBIT	20
2.4.2 Proses Meshing	20
2.5 Kajian Pustaka Penelitian Terdahulu	21
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Studi Literatur	30
3.2 Pengumpulan data teknis dan data operasi.....	30
3.2.1 Pengambilan Data Operasi dan Pengambilan Sampel	30
3.3 Rancangan Simulasi.....	30
3.3.1 Preprocessing	31
3.3.2 Geometri Boiler.....	31
3.3.3 Meshing.....	32
3.3.4 Processing	33
3.3.5 Injeksi.....	33
3.3.6 Material	34
3.3.7 Cell Zone Condition.....	36
3.3.8 Boundary Condition.....	36
3.3.9 Solution	39
3.3.10 Initialize.....	39
3.3.11 Monitoring residual.....	39

3.3.12 Post Processing	40
3.4. Rencana Penelitian	40
3.5 Validasi Analisa Numerik	40
3.6 Variasi Simulasi data numerik.....	42
BAB IV PEMBAHASAN	45
4.1 Pembahasan Simulasi Data Awal.....	45
4.2 Analisa simulasi data variasi	46
4.2.1 Analisa Aliran Gas Solid.....	46
4.2.2 Analisa <i>Contour Velocity Magnitude</i>	47
4.2.3 Analisa Pembakaran	48
4.2.4 Analisa Kontour temperatur	48
4.2.5 Pengaruh velocity outlet terhadap pola fireball.....	51
4.2.6 Analisa Distribusi contour Fraksi Massa Nox.....	52
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA.....	57
LAMPIRAN	59
BIOGRAFI PENULIS.....	65

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Komponen coal burner PLTU labuan.....	8
Gambar 2.2	Ilustrasi Pembakaran pada Boiler	9
Gambar 2.3	Konfigurasi burner PLTU labuan	10
Gambar 2.4	Kebutuhan excess air dalam pembakaran di boiler (Emerson combustion process technical review 2013).....	14
Gambar 2.5	Vektor kecepatan gas pada inert menengah atas dari saluran udara sekunder untuk enam kasus pembakaran (Abbas,2013).....	22
Gambar 2.6	Skema configurations dari tangentially fired pulverized-coal boiler (Choi, 2009).....	23
Gambar 2.7	Distribusi kecepatan dan vector kecepatan dalam berbagai cross section (Choi, 2009)	24
Gambar 2.8	Distribusi Temperatur pada Boiler (Choi, 2009).....	25
Gambar 3.1	Flow Chart penelitian	29
Gambar 3.2	Geometri Boiler Labuan	31
Gambar 3.3	Meshing Boiler Labuan	32
Gambar 3.4	Boundary condition pada simulasi.....	37
Gambar 3.5	Posisi pengumpanan batubara dan letak sensor temperatur pada PLTU Labuan	41
Gambar 3.6	Perbandingan data actual dan simulasi	42
Gambar 4.1	Distribusi Temperatur Elevasi Burner dan Inlet Superheater	45
Gambar 4.2	Distribusi temperatur elevasi burner dan inlet superheater	46

Gambar 4.3 Vektor velocity magnitude	47
Gambar 4.4 Static temperature potongan melintang boiler	49
Gambar 4.5 Temperatur terhadap ketinggian di Boiler	50
Gambar 4.6 Pola pembentukan fireball pada variasi velocity.....	51
Gambar 4.7 Kontour Massa NOx pada potongan vertical Boiler	53
Gambar 4.8 Fraksi Massa NOx Terhadap Ketinggian Potongan Vertikal Furnace	54
Gambar 4.9 Fraksi Massa NOx Pada Outlet Boiler	54

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Batasan baku mutu Emisi PLTU.....	2
Tabel 2.1 Klasifikasi Batubara Berdasarkan Ranking	12
Tabel 2.2 Komposisi Udara Kering.....	15
Tabel 2.3 Skema operasi burner yang mati dengan operasi muatan penuh dan 20% lebih rendah dan 20% lebih tinggi dari operasi standar kondisi (Abbas 2013)...	23
Tabel 3.1 Model pada simulasi numerik ANSYS Fluent 18.2.....	33
Tabel 3.2 Properties batubara Pada saat performance test.....	34
Tabel 3.3 Properties Fluid Pada Fluent	35
Tabel 3.4 Properties Solid Pada Fluent	35
Tabel 3.5 Properties Combustion Particle Pada Fluent.....	35
Tabel 3.6 Setting Heat Exchanger Pada Fluent.....	36
Tabel 3.7 Setting Input Primer air, secondary air dan batubara Pada Fluent	38
Tabel 3.8 Setting Secondary air Pada Fluent	39
Tabel 3.10 Mass flow udara primer berdasarkan velocity nya	43

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) Labuan berlokasi di Desa Saketi Labuan Pandeglang, Propinsi Banten. PLTU Labuan mempunyai kapasitas 2x300 MW. PLTU Labuan dioperasikan oleh Unit Jasa Pembangkitan (UJP) PLTU Banten 2 Labuan yang dikelola oleh PT Indonesia Power setelah diserahkan terimakan oleh Cengda sebagai pengembangan pembangkit tersebut. Presiden Susilo Bambang Yudhoyono meresmikan PLTU Labuan Unit I pada 28 Januari 2010.

Salah satu komponen utama dari pembangkit adalah Boiler. Boiler adalah suatu perangkat mesin yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Pada PLTU Banten 2 Labuan, Boiler terpasang berjenis watertube boiler dimana Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada didalam pipa-pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan secara kontinyu didalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar. Uap yang dihasilkan boiler adalah uap superheat dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran, dan panas pembakaran yang diberikan. Boiler pada PLTU Labuan mempunyai spesifikasi umum sebagai berikut sub-critical, natural circulation, drum type, single furnace, tangential firing, single reheating, pulverized Coal dan balanced draft

Pulverizer merupakan komponen utama dari boiler di PLTU labuan. Optimasi kinerja *pulverizer* merupakan langkah pertama menuju optimasi program pembakaran yang baik. Pengaturan tiap pulverizer harus dipertimbangkan ketika mencoba mengoptimalkan pembakaran, karena berkaitan kinerja unit secara keseluruhan, pengoperasian, keandalan, dan kapasitas. Tantangan yang dihadapi oleh industri kelistrikan di Indonesia saat ini dengan kapasitas pembangkit yang cukup besar adalah permasalahan variasi dari kalori batubara dan harga bahan bakar juga berkaitan dengan kapasitas pembangkit yang dampaknya terhadap lingkungan juga besar dengan pelepasan gas NO_x ke lingkungan. Dengan pemahaman

mekanisme optimasi dan setting *pulverizer* dalam hal ini pengaturan *velocity Primary air* yang keluar dari tiap line keluaran *pulverizer* dapat meningkatkan kinerja pembangkit itu sendiri dan mengurangi gas NOx. Ketidak ketersediaan *manual book* mengenai pengaturan *velocity* dari *primary air outlet pulverizer* menjadi suatu kendala dalam pengoperasian pembangkit dalam meningkatkan efisiensi *boiler*. Dengan pengaturan *velocity* udara primer di outlet proses pembentukan *fireball* lebih sempurna yang berefek pada proses pembakaran yang lebih baik.

Pemerintah melalui Kementerian Lingkungan Hidup mewajibkan semua pembangkit membatasi kandungan gas buang. Hal ini tertuang dalam peraturan Menteri Negara lingkungan hidup no 21 tahun 2008 tentang Baku mutu emisi sumber tidak bergerak bagi usaha dan/atau kegiatan pembangkit tenaga listrik thermal. Batasan yang ditetapkan oleh Kementerian lingkungan hidup dapat dilihat ditabel 1.

Tabel 1.1 Batasan baku mutu Emisi PLTU

No	Parameter	Kadar Maksimum (mg/Nm ³)		
		Batubara	Minyak	Gas
1	Sulfur Dioksida (SO ₂)	750	650	50
2	Nitrogen Dioksida (NOx) dinyatakan sebagai NO ₂	750	450	320
3	Total Partikulat	100	100	100
4	Opasitas	20%	20	-

Sumber kementerian lingkungan hidup RI tahun 2008

Konsentrasi NOx pada saluran keluar ruang bakar sangat berkurang ketika udara yang tercampur didalam pembakaran dengan rasio stoikiometrik *burner* 0,75 diadopsi dan konsentrasi CO dapat dipertahankan pada tingkat rendah melalui udara yang pembakaran yang dialirkan dengan kecepatan tinggi untuk meningkatkan laju pencampuran udara pembakaran dengan gas buang, yang dapat memberikan solusi optimal untuk selanjutnya lebih rendah emisi NOx di *boiler* berbahan bakar batubara yang ada.

Li et al. (2018) Peningkatan Primary air ratio memiliki pengaruh besar pada kinerja pembakaran. Secara keseluruhan, proses pembakaran menurun dengan meningkatnya *Primary air ratio*. Namun, di wilayah main burner dan wilayah di atas SOFA, karakteristik pembakaran menunjukkan tren parabola dengan Primary air ratio yang meningkat

Babcock and Wilcox (1978) optimalisasi *pulverizer* batubara dicapai melalui kombinasi udara primer, pengaturan temperature kerja dan kecepatan outlet *pulverizer*. Tujuan dari pengoptimalian kerja *pulverizer* batubara adalah untuk meminimalkan aliran cold air ke masing-masing *pulverizer* diatur oleh batasan-batasan berikut:

1. Pertahankan pembebanan *pulverizer* pada kapasitasnya
2. Mengatur distribusi O₂ didalam *furnace*
3. Mengurangi level opacity pada stack

Blondeau et al. (2018) Pengaturan aliran udara dapat meningkatkan keseimbangan pembakaran didalam boiler. Oksigen, laju aliran gas buang, suhu dan ketidak setimbangan NO_x di outlet boiler dapat dikurangi secara signifikan. Pengaturan flow batubara dan udara lebih dalam diperlukan untuk menghitung kesetaraan *Air fuel ratio* dilokal. Sementara untuk *burner* pada keadaan standar rasio kesetaraan berkisar antara 0:9 – 1.05 sebenarnya memiliki range yang lebih luas yaitu 0.65 – 1.25. Melihat rasio rata-rata per tingkat burner, disimpulkan bahwa nilai-nilai yang diharapkan secara global terlalu tinggi dibandingkan dengan yang diukur nilai (> + 14%). Tingkat *burner* di mana pembakaran menjadi global, stoikiometri juga diabaikan.

Penelitian ini menggunakan metode variasi *velocity* mass flow keluaran *pulverizer* dengan beban tertentu dengan cara mengatur *Pressure Pulverizer*. Diharapkan dengan adanya variasi *velocity* ditemukan titik ideal pegoperasian *Pulverizer* yang dapat mengurangi NO_x dan meningkatkan performance boiler.

Al-Abbas et al. (2013) Sirkulasi tangensial gas yang baik menyebabkan peningkatan distribusi nyala. Liu et al (2017) Udara primer yang disuntikkan dengan batubara ke dalam ketel dapat menyebabkan kebakaran batubara dalam bentuk bola api. Dengan kontrol udara sekunder, oksidasi yang lebih besar ke arah dinding air, mengurangi kemungkinan pembentukan terak dan membuat waktu

tinggal batubara lebih lama yang dapat mengurangi karbon dalam fly ash. Namun, lingkaran Fireball menjadi lebih besar yang dapat melewati deviasi dalam kenaikan suhu pada crossover pass.

Chernetskiy et al (2018) Proses pembentukan NO_x terjadi karena tiga mekanisme, yaitu NO_x termal, NO_x cepat dan bahan bakar NO_x. Lia, Debo et al (2017) Emisi NO_x dan suhu di area burner sangat relevan dengan bahan bakar yang digunakan. Jika udara yang disuntikkan ke boiler dapat mengurangi suhu gas buang, ini menyebabkan suhu dan konsentrasi spesies menurun karena rasio udara. Li Zixiang et al. (2018) Salah satu yang memiliki pengaruh besar pada kinerja pembakaran adalah peningkatan udara primer. Dengan peningkatan rasio udara primer suhu pembakaran menurun tetapi tren parabola terjadi pada karakteristik pembakaran area tungku dan di atas SOFA. Xu et al (2000) Penambahan udara diharapkan dapat mengurangi suhu outlet tungku tetapi dapat menghasilkan peningkatan emisi NO_x. Li Zixiang et al (2018) Perbedaan kecepatan yang besar dari udara primer dan sekunder dapat meningkatkan suhu ruang bakar tetapi emisi NO_x dapat meningkat.

Kim et al (2019) Kontrol konsentrasi NO_x dalam boiler dapat dari memperbaiki kelembaban karbon dan korelasi rasio bahan bakar, tetapi juga harus mempertimbangkan desain dan pengoperasian boiler itu sendiri.

Ji et al (2019) Pada daerah *bottom ash*, konsentrasi NO dapat meningkat dengan cepat. Partikel char tidak terbentuk tetapi N volatile yang bereaksi dengan perubahan O₂ menjadi NO yang kemudian dioksidasi menjadi NO_x

Hart et al (2018) Perbandingan antara CFD dan model fisik umumnya sebanding, tetapi dalam beberapa kasus, perbedaan juga ditemukan dalam kondisi tertentu. Li et al. (2019) Salah satu faktor yang memiliki dampak besar pada suhu pembakaran di tungku adalah rasio udara primer. Ini juga mempengaruhi pembentukan NO_x karena pembentukan NO_x sangat tergantung pada suhu pembakaran dan oksidasi dalam tungku.

1.2 Rumusan masalah

Tidak adanya *manual book* untuk pengoperasian *pulverizer* boiler PLTU Labuan menyebabkan ketidakjelasan standard operasi boiler untuk mendapatkan

proses pembakaran yang diinginkan. Proses pembakaran yang tidak sempurna dapat menyebabkan kandungan NO_x pada gas buang diluar standard yg ditentukan.

Salah satu faktor penentu proses pembakaran sempurna dalam hal ini adalah kecepatan udara primer (*velocity primary air*). Kecepatan udara primer yg terlalu besar akan menyebabkan:

- *Excess air* yg berlebihan sehingga banyak energi panas yang diserap udara dan terbuang.
- Pembentukan *Fireball* yang melebar mendekati waterwall tube sehingga mengakibatkan pengikisan (erosi) pada dinding.
- *Primary air fan* berkerja berlebih yang mengakibatkan pemborosan energi.

Sebaliknya apabila velocity Primary air terlalu rendah maka pembakaran tidak sempurna dan menyebabkan pembentukan NO_x yang besar melebihi standar gas buang yang ditentukan.

Oleh sebab itu, dalam penelitian ini akan dilakukan simulasi numerik dengan bantuan perangkat lunak komersial AnsysFluent 18.2 untuk mendapat kecepatan udara primer (*Velocity Primary Air*) yg optimum yg ditandai dengan kandungan NO_x pada gas buang yg memenuhi stadard gas buang yg ditentukan. Sehingga selanjutnya dapat dijadikan standard pengoperasian pulverizer boiler pada PLTU Labuan.

1.3 Batasan Masalah

Dalam menganalisa permasalahan diatas, terdapat beberapa batasan masalah yang diambil dalam penelitian ini, diantaranya:

1. Pengambilan data pembakaran dilakukan pada boiler PLTU Labuan dengan kapasitas terpasang 300 MW.
2. Analisa data batubara dan data operasional yang digunakan pada pembuatan model simulasi adalah data normal operasi PLTU Labuan pada Pembebanan 100% *Maximum Capacity Rate* (MCR).
3. Velocity outlet dianggap sama sepanjang pipa outlet Pulverizer
4. Diameter batubara sudah dalam kondisi sesuai persyaratan minimal operasi.
5. Pengambilan data velocity diwakili oleh *Pressure Pulverizer*
6. Batubara kalorinya pembatasan *blending* 4290 KJ/Kg

8. Unsur yang ada pada *fixed carbon* batubara diasumsikan hanya *carbon*.
9. Unsur sulfur pada batubara diabaikan.
10. Untuk variasi permodelan semua parameter disamakan dengan model acuan kecuali untuk parameter *velocity primary air outlet pulverizer*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dengan adanya penelitian mengenai pengaruh *velocity* udara primer keluaran *pulverizer* ini antara lain:

1. Mendapatkan standar pengoperasian *boiler* dalam Hal ini *pulverizer* sehingga didapatkan pembakaran yang lebih sempurna.
2. Mengurangi pembentukan NO_x dari pola pengoperasian rutin PLTU Labuan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dengan adanya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan standar pengoperasian *boiler* dalam Hal ini *pulverizer* sehingga didapatkan pembakaran yang lebih sempurna.
2. Mengurangi pembentukan NO_x dari pola pengoperasian rutin PLTU Labuan.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Boiler

Boiler atau ketel uap adalah suatu perangkat mesin yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Pada PLTU Banten 2 Labuan, *Boiler* terpasang berjenis *watertube boiler* dimana Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada didalam pipa-pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan secara kontinyu didalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar. Uap yang dihasilkan boiler adalah uap *superheat* dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran, dan panas pembakaran yang diberikan. *Boiler* yang konstruksinya terdiri dari pipa-pipa berisi air disebut dengan *water tube boiler* (boiler pipa air). Dari sisi treatment bahan bakar yang digunakan *Boiler* PLTU Labuan adalah *boiler* bahan bakar padat tipe *pulverized coal boiler*. Tipe geometri *burner* nya adalah *Tangentially-fired*.

2.1.1 Komponen Boiler

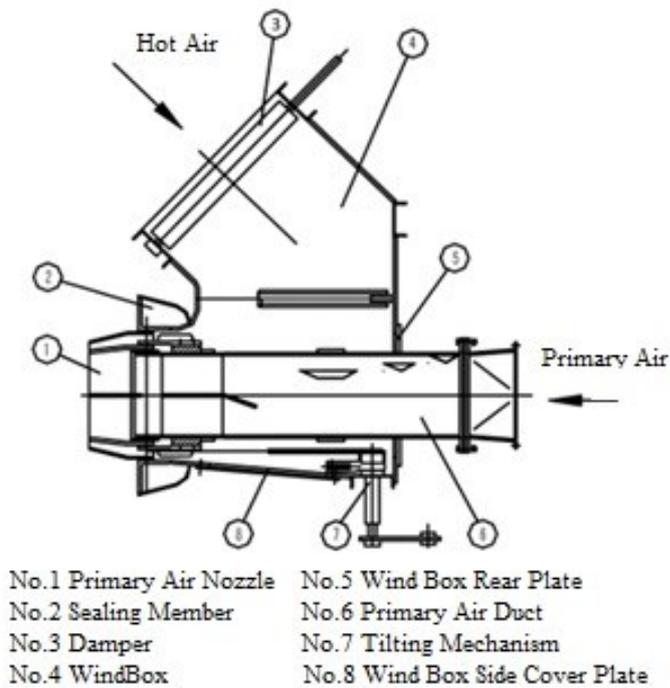
Komponen utama boiler batubara terdiri atas :

2.1.1.1 Furnace (Ruang Bakar)

Furnace atau ruang bakar adalah bagian dari *boiler* yang dibatasi oleh *waterwall tube*. Pada *furnace* ini tempat terjadi proses pembakaran dari bahan bakar. Disinilah terjadinya nyala api dari bahan bakar yang dicampur dengan udara. Di dalam *furnace* ini terjadi perubahan energi kimia menjadi energi panas yang digambarkan oleh lidah api yang keluar dari *burner*.

2.1.1.2 Burner

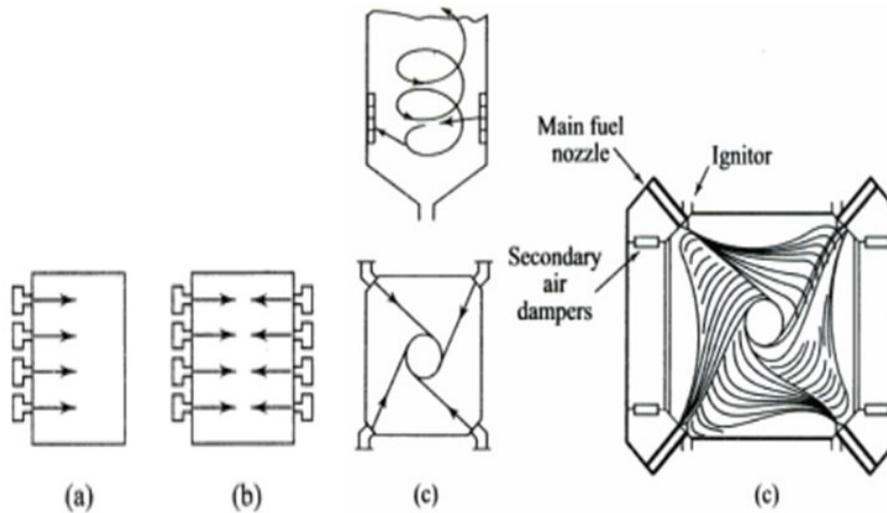
Burner merupakan alat atau saluran pensuplai bahan bakar dan udara ke dalam boiler untuk dibakar di *furnace*.



Gambar 2.1 Komponen coal burner PLTU labuan

Tiap geometri burner berbeda beda, hal ini dikarenakan setiap desain dibuat sedemikian rupa untuk menghasilkan pembakaran yang paling optimal menurut pembuatnya. Penggolongan burner Berdasarkan arah semburan dari lidah api (*flame*) dalam ruang bakar (*furnace*), boiler dapat dibedakan:

- Boiler dengan pembakaran arah dinding depan (*Front-fired*)
- Boiler dengan pembakaran arah depan belakang (*Opposed-fired*)
- Boiler pembakaran arah tangensial (*Tangentially-fired*)



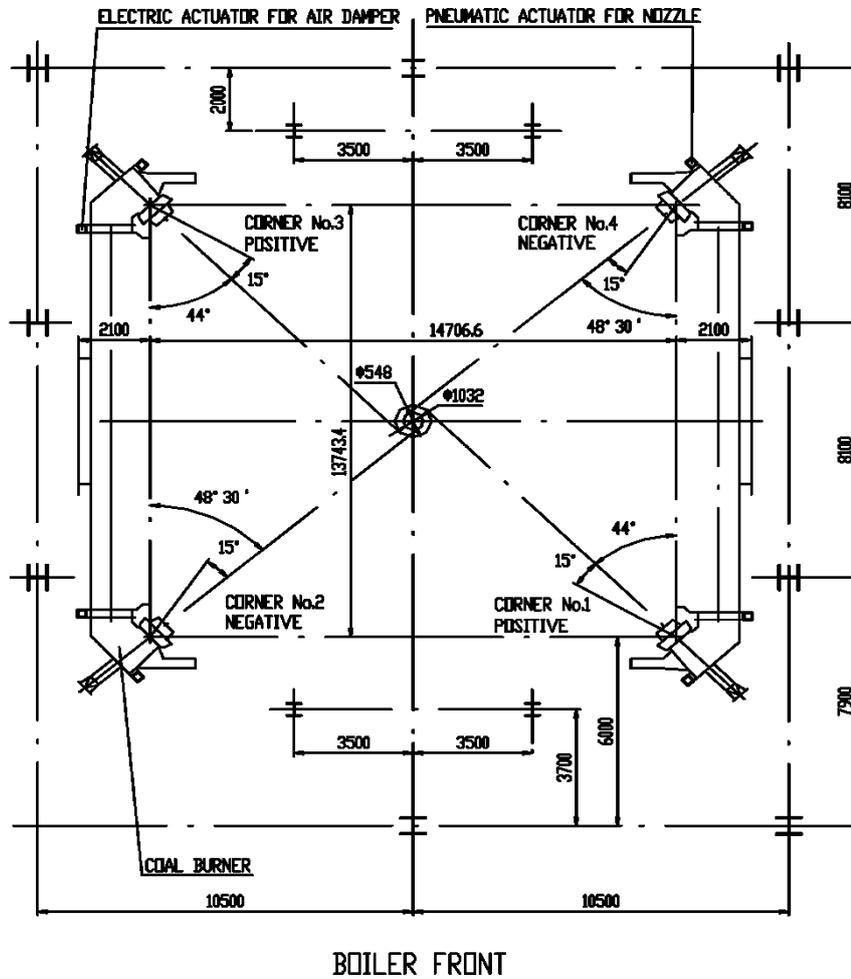
Sumber: Power Plant Engineering 3rd Edition P K Nag

Gambar 2.2 Ilustrasi Pembakaran pada Boiler

Pada *tangentially-fired boiler* mempunyai empat, enam, delapan, atau lebih *corner*, dimana setiap *burner* ditentukan sudutnya terhadap dinding boiler. Ketika dibuat garis memanjang ke titik pusat *furnace*, garis-garis dari *burner* dalam satu *layer* akan membentuk lingkaran semu. Lingkaran hayalan inilah yang nantinya menjadi *fireball* bila terjadi proses pembakaran, sehingga proses pembakaran terjadi di tengah *furnace*. Ilustrasi berbagai tipe boiler ditampilkan pada Gambar 2.2 bagian (c).

Fire-ball di *tangentially-fired boiler* akan membentuk *vortex motion* akan bergerak ke atas sebagai efek turbulensi yang terjadi pada *fireball* tersebut. Hal tersebut akan mengurangi kemungkinan terjadinya erosi dan *overheating* pada dinding ruang pembakaran. Disamping hal itu metode ini mempunyai kelebihan yaitu NOx yang dihasilkan cenderung kecil dan *heat flux* lebih merata di dinding ruang bakar sehingga akan mengurangi kegagalan akibat *thermal stress*. Dengan adanya efek *fire-ball*, waktu terbakar untuk bahan bakar menjadi lebih lama sehingga lebih sesuai untuk bahan bakar yang proses pembakarannya lama seperti batubara. Di samping kelebihanannya metode ini mempunyai kekurangan yaitu terdapatnya zona di boiler yang terjadi pembakaran miskin dan kaya. Bila terjadi

gangguan pada *burner* yang akan mengakibatkan ketidakstabilan lingkaran *fire-ball*.



Gambar 2.3 Konfigurasi Burner PLTU Labuan

2.1.1.3 Steam drum

Steam drum adalah tempat untuk menampung dan memisahkan uap jenuh dari campuran air-uap hasil pemanasan pada *waterwall tube* di *boiler*. Didalam steam drum beberapa injeksi bahan kimia dilakukan untuk menjaga kualitas air di *boiler*.

2.1.1.4 Waterwall

Waterwall tube merupakan tempat terbentuknya campuran air-uap basah pada boiler. *Waterwall tube* menghubungkan *Down comer* dengan *steam drum* yang

berfungsi juga sebagai pembatas ruangan *boiler*. Daerah pembakaran terjadi di area *waterwall* ini.

2.1.1.5 Steam reheater and superheater

Reheater dan *superheater* berfungsi untuk meningkatkan temperatur uap jenuh menjadi uap kering sebelum dialirkan ke turbin uap. Desain *reheater* dan *superheater* biasanya dibagi menjadi beberapa bagian untuk mengoptimalkan proses penyerapan panas dan mengatur temperatur uap yang dihasilkan. Pembagian area tersebut berupa *tube bank* yang terdiri dari *division panel superheater*, *platen superheater*, *final superheater*, *low temperature superheater*.

2.1.1.6 Economizer

Economizer terletak pada bagian akhir *convection pass*. Berfungsi untuk memanaskan awal air pengisi boiler sebelum masuk ke *steam drum*.

2.1.1.7 Air preheater

Air preheater merupakan alat penukar panas yang memanfaatkan temperature gas buang yang masih tinggi untuk memanaskan primary dan secondary Air sehingga meningkatkan efisiensi dari boiler itu sendiri.

2.2 Teori bahan bakar dan Pembakaran

2.2.1 Teori Bahan Bakar

Bahan bakar merupakan suatu materi yang bisa diubah menjadi energi. Biasanya bahan bakar mengandung energi panas yang dapat dilepaskan dan dimanipulasi. Kebanyakan bahan bakar digunakan manusia melalui proses pembakaran (reaksi *redoks*) di mana bahan bakar tersebut akan melepaskan panas setelah direaksikan dengan oksigen di udara. Bahan bakar dapat diklasifikasikan berdasarkan fasenya menjadi 3 yaitu bahan bakar padat, gas dan cair. Bahan bakar yang digunakan didalam pembangkit listrik tenaga uap mayoritas adalah berbentuk bahan bakar padat berupa batubara. Berikut ini beberapa spesifikasi batubara menurut nilai kalor dan kandungan yang terdapat didalamnya.

Tabel 2.1 Klasifikasi Batubara Berdasarkan Ranking

Coall	Rank	Fix Carbon Limit	Volatile Content	GCV Limits
		%	%	Kcal/kg
		dmmf	dmmf	moisture mmf
Anthracite	Meta-Anthracite	≥ 98	< 2	
	Anthracite	92 - 98	2 - 8	
	Semi-Anthracite	86 - 92	8 - 14	
Bituminous	Low Volatile Bituminous	78 - 86	14 - 22	
	Med. Volatile Bituminous	69 - 78	22 - 31	
	High Volatile A Bituminous	< 69	> 31	≥ 7781,31
	High Volatile B Bituminous	< 69	> 31	72 25,62 – 7781,31
	High Volatile C Bituminous	< 69	> 31	63 91,73 – 7225,62
	High Volatile C Bituminous		> 31	58 36,04 – 6391,73
	High Volatile C Bituminous		> 31	58 36,04 – 6391,73
Subbituminous	Subbituminous A Coal			52 79,64 – 5836,04
	Subbituminous B Coal			46 12,81 – 5279,64
	Subbituminous C Coal			35 01,43 – 4612,81
Lignite	Lignite A			< 3501,43
	Lignite B			

Sumber: ASTM D38 8-12, 1998

Dari tabel 2.1 batubara dapat diklasifikasikan menjadi 3 kategori berdasarkan kalorinya yaitu *high rank coal* (HRC), *medium rank coal* (MRC) dan yang terakhir *low rank coal* (LRC). Salah satu contohnya adalah *Anthracite* yang merupakan kategori HRC, Sedangkan *bituminous* dan *sub-bituminous* masuk kategori MRC. Sementara *lignite* yang berkalori rendah masuk ke dalam kategori LRC. Batubara merupakan senyawa hidrokarbon yang terdiri dari unsur-unsur yang membentuk reaksi pembakaran dengan oksigen. Secara umum komposisi batubara terdiri dari beberapa unsur seperti *hidrogen* (H), *carbon* (C), dan *sulfur* (S). Analisa batubara dapat dilakukan untuk menentukan Kandungan *moisture*, Kandungan *ash*, Nilai kalor dan Kandungan *sulfur*. Metode yang digunakan dalam menganalisa suatu batubara ada 2 macam yaitu:

1. Analisis pendekatan (*proximate analysis*)

yaitu analisa yang memberikan data tentang kandungan *volatile matter*, *fix carbon*, *ash* dan *water content*. Disamping hal yang disebutkan sebelumnya Analisa yang dilakukan dari hasil pengujian, biasanya mencantumkan data tentang nilai kalor dan kandungan belerang.

2. Analisis ultimate (*ultimate analysis*)

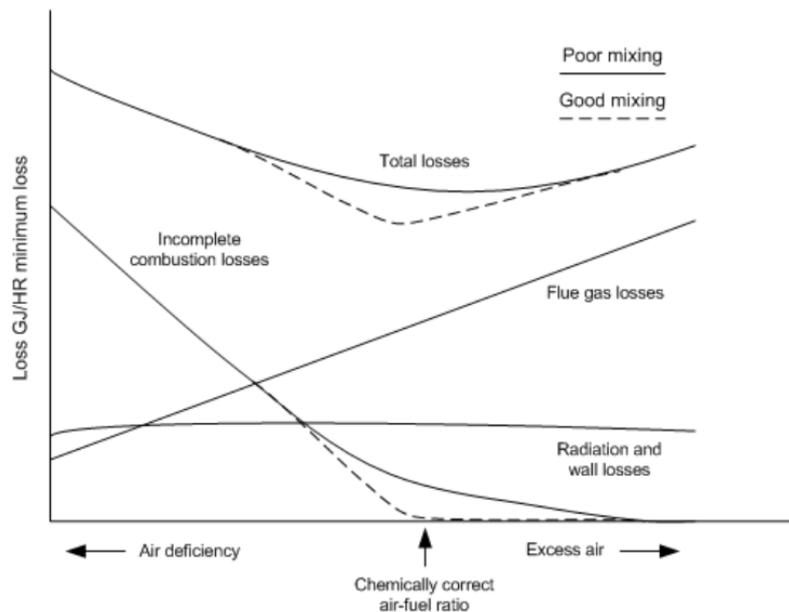
Merupakan analisa yang dapat memberikan data mengenai komposisi bahan bakar dalam presentase untuk nitrogen, oksigen, carbon, abu, sulfur dan hidrogen. *Carbon* disini termasuk *organic carbon* pada substansi batubara dan *carbon* yang muncul sebagai *mineral carbonat*. *Hydrogen* yang terkandung pada batubara termasuk *hydrogen* sebagai *mineral organic* dan *hydrogen* yang berupa air dalam batubara. Nitrogen diasumsikan dalam bentuk *organic matrix* di batubara. Sulfur pada batubara terdapat dalam 3 bentuk, yaitu dalam bentuk campuran *organic sulfur*, *inorganic sulfides* (FeS_2) dan *inorganic sulfates* (Na_2SO_4 , CaSO_4).

2.2.2 Teori Pembakaran

Pembakaran adalah suatu runtutan reaksi kimia antara suatu bahan bakar dan suatu oksidan, disertai dengan produksi panas yang kadang disertai cahaya dalam bentuk pendar. Dalam suatu reaksi pembakaran lengkap, suatu senyawa bereaksi dengan zat pengoksidasi, dan produknya adalah senyawa dari tiap elemen dalam bahan bakar dengan pengoksidasi. Pembakaran sempurna dari suatu bahan bakar dapat diperoleh dengan pencampuran yang tepat antara jumlah bahan bakar dengan oksigen. Bahan bakar padat atau cair, harus berubah dalam fase gas sebelum terbakar, sementara bahan bakar gas akan terbakar dengan sendirinya bila didalamnya terdapat komposisi campuran udara yang tepat. Dalam banyak peristiwa diperlukan adanya pemanasan untuk mengubah bahan bakar padat maupun cair menjadi fase gas.

Kriteria pembakaran yang baik dan sempurna adalah proses pembakaran dapat mengkonversikan keseluruhan energi panas yang terkandung dalam bahan bakar. Pembakaran dengan bahan bakar berlebih ataupun kekurangan, dapat memperbesar potensi adanya sisa bahan bakar yang tidak terbakar maupun pembentukan CO. Berdasarkan hal tersebut, diperlukan adanya komposisi O_2 yang sesuai dengan

adanya *excess air*. *Excess air* berfungsi untuk memastikan terjadinya pembakaran sempurna. Akan tetapi apabila berlebihan *excess air*, juga dapat menambah kerugian panas dan efisiensi dari pembakaran. Hal ini disebabkan oleh energi panas yang dilepaskan dari proses pembakaran semakin banyak yang diserap oleh unsur N_2 di dalam udara yang tidak dapat terbakar.



Gambar 2.4 Kebutuhan Excess Air Dalam Pembakaran Di Boiler (Emerson Combustion Process Technical Review 2013)

Di dalam boiler, udara pembakaran di sediakan oleh 2 fan *boiler* yaitu *Force Draft Fan* (sebagai penyuplai secondary air) dan *Primary Air Fan* (sebagai penyuplai primary air). *Primary air* selain sebagai udara pembakaran juga berfungsi sebagai pengering dan transportasi batubara dari *pulverizer* menuju ruang bakar. Udara pembakaran yang disuplai ke boiler terkandung berbagai unsur selain oksigen, kandungan oksigen dalam udara kering ditampilkan pada Tabel 2.2.

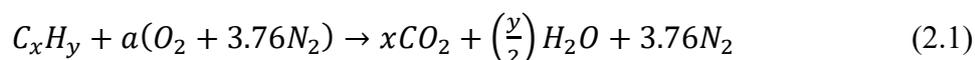
Tabel 2.2 Komposisi Udara Kering

Komponen	Fraksi Mol (%)
Nitrogen	78,08
Oksigen	20,95
Argon	0,93
Karbon dioksida	0,03
Neon, Helium, Metana dll	0,01

Sumber: Moran, 2006

Pembakaran sempurna dapat dicapai dengan mengontrol 4 faktor yang lebih dikenal dengan 3T+O, yaitu:

1. *Temperature*, temperatur yang cukup untuk menyalakan dan menjaga kestabilan penyalaan bahan bakar.
2. *Turbulence*, turbulensi atau pencampuran oksigen dan bahan bakar yang baik. Supaya terjadi pencampuran sempurna, kecepatan gas berkisar 4.5-7.5 m/s.
3. *Time*, waktu yang diperlukan untuk pembakaran yang sempurna. Karena dalam pembentukan reaksi yang sempurna tidaklah sederhana dan menyangkut banyak sekali tahapan reaksi, waktu pembakaran juga dipengaruhi oleh dimensi ruang bakar itu sendiri dalam hal ini adalah boiler.
4. *Oxygen*, gas oksigen adalah salah satu komponen penentu hasil pembakaran. Didalam Proses pembakaran yang disebut sempurna apabila semua komponen yang terdapat di dalam bahan bakar menghasilkan gas CO₂, air (H₂O) dan gas nitrogen (N₂), sehingga tidak ada lagi bahan yang tersisa untuk dapat terbakar. Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara, yang terdiri dari 79% nitrogen dan 21% oksigen, maka reaksi stoikiometri pembakaran hidrokarbon murni C_mH_n dapat ditulis dengan persamaan:



Persamaan diatas telah di sederhanakan, karena cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran yang sempurna dengan rasio ekivalen yang tepat dari udara. Jika

terjadi pembakaran yang tidak sempurna, maka hasil persamaan diatas (gas CO₂ dan H₂O) tidak akan terjadi melainkan akan terbentuk oksidasi parsial dalam bentuk gas CO_x, NO_x dan SO_x. Gas SO_x yang terbentuk apabila gas gas tersebut dibuang ke lingkungan sekitar bereaksi membentuk *acid* yang dapat menimbulkan hujan asam sehingga menimbulkan korosi pada bahan-bahan terutama logam dan tu Nitrogen adalah kandungan terbesar didalam udara, tetapi didalam proses pembakaran nitrogen tidak mengalami proses kimia. Ketika temperatur cukup tinggi nitrogen membentuk senyawa nitrit oksida (NO_x) dan nitrogen oksida (NO) yang merupakan sumber polusi.

2.3 Pembentukan NO_x

NO_x adalah emisi yang berasal dari molekul NO dan NO₂. Ketika keluar dari combustor, kadar NO diatas 90% dan NO₂ dibawah 10% akan tetapi perlahan NO akan teroksidasi dan terbentuklah NO₂ (CCUJ, 2003).

Tiga sumber utama NO_x dalam proses pembakaran:

- NO_x termal
- bahan bakar NO_x
- Prompt NO_x

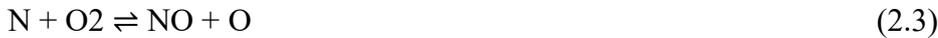
Pembentukan NO_x termal, yang sangat bergantung pada suhu, diakui sebagai sumber yang paling relevan ketika membakar gas alam. Bahan bakar NO_x cenderung mendominasi selama pembakaran bahan bakar, seperti batubara, yang memiliki kandungan nitrogen yang signifikan, terutama ketika dibakar dalam ruang bakar yang dirancang untuk meminimalkan NO_x termal. Kontribusi prompt NO_x biasanya dianggap diabaikan. Sumber keempat, yang disebut feed NO_x, dikaitkan dengan pembakaran nitrogen yang ada dalam furnace, di antara 300 ° C dan 800 ° C, di mana ia dianggap sebagai kontributor kecil.

2.3.1 Thermal NO_x

Thermal NO_x mengacu pada NO yang terbentuk melalui oksidasi nitrogen diatomik pada suhu tinggi yang ditemukan di udara pembakaran. Laju pembentukan terutama fungsi suhu dan waktu tinggal nitrogen pada suhu tersebut. Pada suhu tinggi, biasanya di atas 1600 °C (2900 °F), nitrogen molekul (N₂) dan oksigen (O₂)

dalam udara pembakaran terlepas ke keadaan atomnya dan berpartisipasi dalam serangkaian reaksi.

Tiga reaksi utama yang menghasilkan NO_x termal adalah:



Ketiga reaksi itu reversibel. Zeldovich adalah yang pertama menyarankan pentingnya dua reaksi pertama. Reaksi terakhir nitrogen atom dengan radikal hidroksil, HO, ditambahkan oleh Lavoie, Heywood dan Keck ke mekanisme dan membuat kontribusi yang signifikan terhadap pembentukan termal NO_x.

2.3.2 Fuel NO_x

Diperkirakan bahwa bahan bakar minyak menyebabkan 54% antropogenik NO_x. Sumber utama produksi NO_x dari bahan bakar yang mengandung nitrogen seperti batubara dan minyak tertentu, adalah konversi nitrogen terikat bahan bakar menjadi NO_x selama pembakaran. Selama pembakaran, ikatan nitrogen dalam bahan bakar dilepaskan sebagai radikal bebas dan akhirnya membentuk N₂ bebas, atau NO. Fuel NO_x dapat berkontribusi sebanyak 50% dari total emisi melalui minyak bakar dan sebanyak 80% melalui pembakaran batubara.

Meskipun mekanisme lengkapnya tidak sepenuhnya dipahami, ada dua jalur utama pembentukan. Yang pertama melibatkan oksidasi spesies nitrogen yang mudah menguap selama tahap awal pembakaran. Selama pelepasan dan sebelum oksidasi volatil, nitrogen bereaksi membentuk beberapa perantara yang kemudian dioksidasi menjadi NO_x. Jika volatil berevolusi menjadi atmosfer pereduksi, nitrogen berevolusi dengan mudah dapat dibuat untuk membentuk gas nitrogen, daripada NO_x. Jalur kedua melibatkan pembakaran nitrogen yang terkandung dalam Char coal selama pembakaran bagian arang bahan bakar. Reaksi ini terjadi jauh lebih lambat daripada fase volatil. Hanya sekitar 20% dari arang nitrogen yang akhirnya dipancarkan sebagai NO_x karena banyak dari NO_x yang terbentuk selama proses ini direduksi menjadi nitrogen oleh arang, yang merupakan karbon murni.

2.3.3 Prompt NOx

Sumber ketiga ini dikaitkan dengan reaksi nitrogen atmosfer, N_2 , dengan radikal seperti fragmen C, CH, dan CH_2 yang berasal dari bahan bakar, bukan dari proses termal atau bahan bakar. Terjadi pada tahap awal pembakaran, ini menghasilkan pembentukan spesies nitrogen tetap seperti NH (nitrogen monohydride), NCN (cyanonitrene), HCN (hidrogen sianida), H_2CN (dihydrogen cyanide) dan CN (radikal cyano) yang dapat teroksidasi menjadi NO_x . Dalam bahan bakar yang mengandung nitrogen, Prompt NO_x cepat relatif kecil dan umumnya hanya menarik untuk target emisi yang ketat. mubahan yang mengering pada lingkungan sekitarnya.

2.4 Simulasi Numerik CFD Pembakaran Batubara pada Boiler

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah salah satu metode yang bias digunakan dalam memprediksi aliran fluida, perpindahan panas maupun pembentukan NO_x . Metode yang dipergunakan dalam CFD ini merupakan metode numerik yang menggunakan persamaan matematika yang berhubungan dengan dinamika fluida. Sistem numerik dengan membagi volume sistem baik itu massa atur maupun volume atur menjadi volume yang kecil yang saling terhung satu dengan yang lain dalam hal ini disebut *mesh / grid*. Setiap *grid* mempunyai nodal untuk mengkalkulasikan persamaan konservasi yang memiliki karakter sendiri sebagai volume atur. Persamaan konservasi yang digunakan dalam pemodelan CFD adalah:

1. Persamaan Konservasi Massa

Persamaan konservasi massa untuk aliran *compressible* dan *incompressible* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m.. \quad (2.5)$$

dengan :

S_m = penambahan/pengurangan massa

ρ = massa jenis fluida

t = waktu

\vec{v} = vektor kecepatan total

2. Persamaan Konservasi Momentum

Persamaan konservasi momentum pada arah i dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.6)$$

dengan :

p = tekanan statik total

$\bar{\tau}$ = tensor tegangan geser

\vec{g} = percepatan gravitasi

\vec{F} = *external body force*

Sedangkan tensor tegangan geser dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.7)$$

dengan :

μ = *dynamic viscosity*

u = *velocity*

3. Persamaan Konservasi Energi

Persamaan umum konservasi energi dirumuskan sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla [\vec{v}(\rho E + p)] = -\vec{v}(\sum_j h_j J_j) + S_h \quad (2.8)$$

dengan :

E = energi potensial dan kinetik

h_j = entalpi spesies

J_j = fluks difusi spesies

S_h = sumber energi yang berasal dari reaksi, radiasi, perpindahan panas

2.4.1 GAMBIT

GAMBIT singkatan *Geometly And Mesh Building Intelligent Toolkit*. GAMBIT adalah salah satu dari berbagai software yang dapat membuat model geometri, Perlunya definisi Area atau volume tempat dimana fluida tersebut bergerak serta melakukan proses *meshing* pada area atau volume tersebut. Setelah semuanya dilakukan, model tersebut siap untuk dianalisis menggunakan FLUENT.

GAMBIT menggunakan *Graphical User Inteiface* (GUI) untuk memudahkan pemakainya. Dengan GUI, perintah masukan dapat diberikan dengan hanya menggunakan *mouse*. Grafik user interface di GAMBIT terdiri dari beberapa menu utama, antara lain:

- *Main menu bar*, berguna untuk memilih menu utama di GAMBIT.
- Beberapa alternatif membuat geometri: membuka atau menyimpan *file*, mengimpor geometri dari program lain yang cocok (SOLID WORKS, ACIS, CATIA, CAD, dll), mengeksport *file* ke program lain, dan lain-lain.
- *Graphics window*, berfungsi menampilkan geometri model yang saat itu sedang dibuat.
- *Operation toolpad*, berfungsi untuk memberikan perintah dalam membuat geometri, *meshing*, mendefinisikan zona, dan perintah-perintah operasi yang lain.
- *Command textbox*, menginput perintah selain perintah yang ada pada GUI.
- *Transcript window*, untuk menampilkan semua perintah dan proses yang dilakukan selama menggunakan GAMBIT.
- *Description window*, berfungsi untuk memberikan informasi singkat mengenai fungsi semua tombol GUI dan tampilan pada layar.
- *Global control*, berfungsi untuk mengatur tampilan layar pada GUI.

2.4.2. Proses *Meshing*

Setelah geometri selesai dibuat, perlu dilakukan proses *meshing* (membagi volume menjadi bagian-bagian kecil) agar dapat dianalisis pada program CFD. Ukuran *mesh* yang terdapat pada suatu obyekakan mempengaruhi ketelitian dan daya komputasianalisis CFD. Semakin kecil/halus *mesh* yang dibuat, maka hasil yang

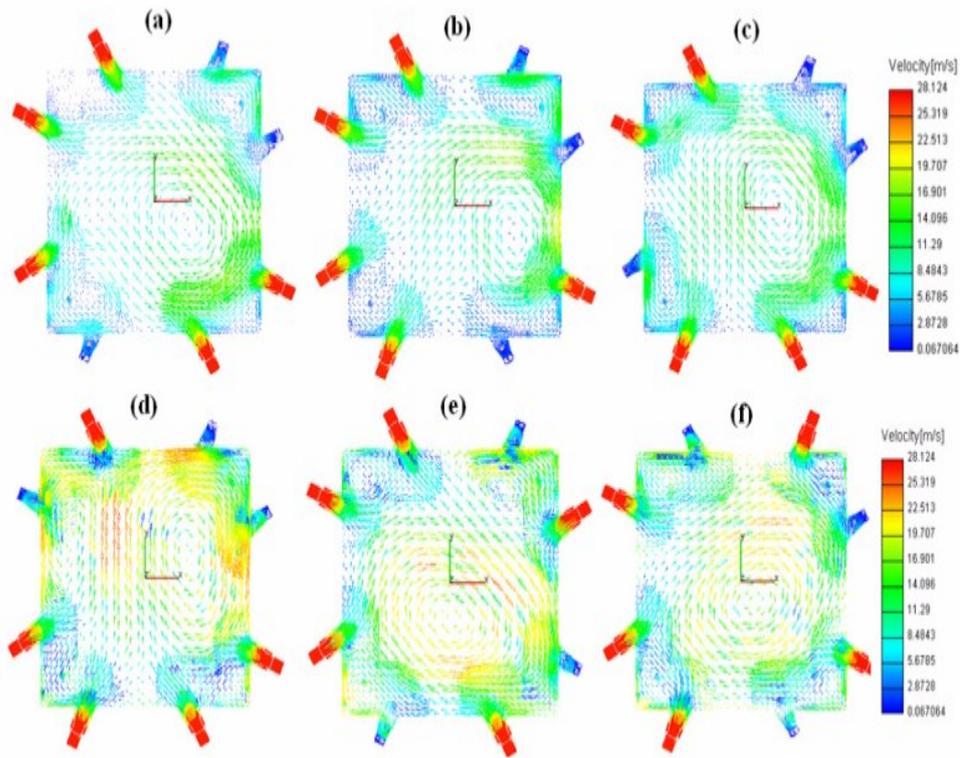
didapatkan akan semakin teliti, namun dibutuhkan daya komputasi yang makin besar.

Konsep pembuatan *mesh* mirip dengan pembuatan geometri. Pembuatan *mesh* dapat dilakukan dengan cara *bottom-up* atau *topdown*. Metoda *bottom-up* dimulai dengan *meshing* garis, dilanjutkan dengan bidang, dan diakhiri dengan volume. Pada metode *top-down*, *meshing* langsung dilakukan pada volume. Ukuran *mesh* seragam disemua tempat pada metode *top-down*.

Proses *meshing* dilakukan dengan menekan tombol perintah *mesh* volume yang ada pada *operation toolpad*. Pertama-tama volume yang diinginkan harus dipilih terlebih dahulu. Kemudian, bentuk yang diinginkan dapat dipilih pada tombol jenis elemen dan tipenya. Terakhir, harus ditentukan juga ukuran dari *mesh* yang diinginkan. Jendela perintah *meshing* terdapat pada *toolpad* operasi *meshing* yang terdapat dipojok kanan atas GUI.

2.5 Kajian Pustaka Penelitian Terdahulu

Audai Hussein Al-Abbas (2013) melakukan penelitian pada boiler dengan beban 500Mwe. Boiler yang digunakan adalah boiler dengan tipe *tangentially pulverized-coal fired* dan mempunyai 8 burner tiap elevasi.



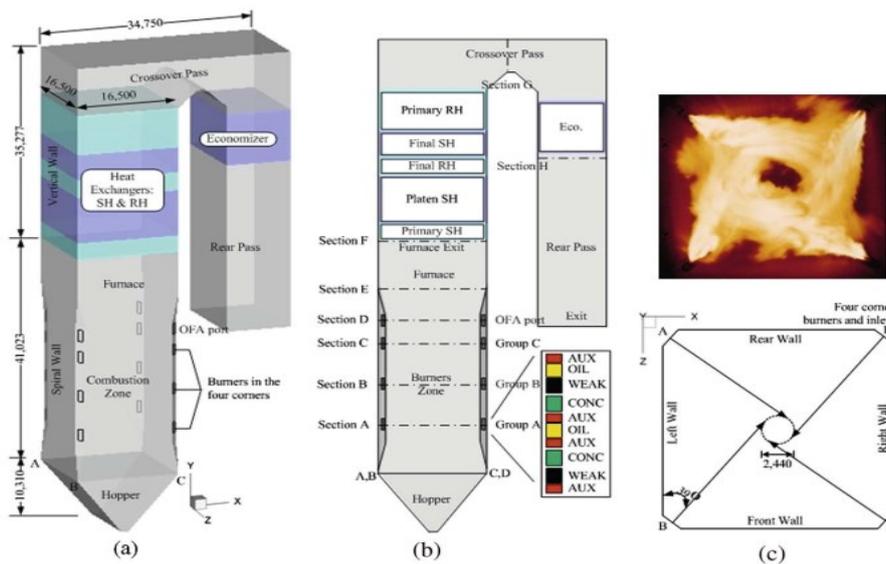
Gambar 2.5 Vektor kecepatan gas pada inert menengah atas dari saluran udara sekunder untuk enam kasus pembakaran (Abbas, 2013).

Gambar 2.5 menampilkan potongan penampang vektor kecepatan gas pada inert menengah atas dari saluran udara sekunder untuk kasus pembakaran (kasus 1-6 seperti yang ditentukan dalam Tabel 2.3) yang bekerja di bawah operasi beban penuh. Menghubungkan gambar 2,3.1 , kasus 3 dan 6 menunjukkan distribusi bidang aliran yang baik di tungku. Dalam dua kasus ini, distribusi tangensial gas vektor kecepatan (*vortex* pusat) kira-kira dekat dengan zona pusat tungku dibandingkan dengan yang lain kasus pembakaran. Sebagai hasilnya, sirkulasi tangensial gas yang baik ini menyebabkan peningkatan distribusi nyala api, seperti terlihat pada Gambar 2.3.1 Sebaliknya, pusaran sentral dalam kasus 2 dan 5 jauh dari posisi sentral tungku dan condong ke arah dinding tungku.

Tabel 2.3 Skema operasi burner yang mati dengan operasi muatan penuh dan 20% lebih rendah dan 20% lebih tinggi dari operasi standar kondisi (Abbas 2013)

Combustion Case No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Burner and Turned off	3,4 and 7	3,4 and 7	3,4 and 8	1,3 and 4	3,5 and 7	2, 4 and 6	3, 4 and 7	3, 5 and 7	3, 4 and 7	3, 5 and 7
Combustion Scenario	Standard operating Condition						Lower By 20%		Higher than 20%	

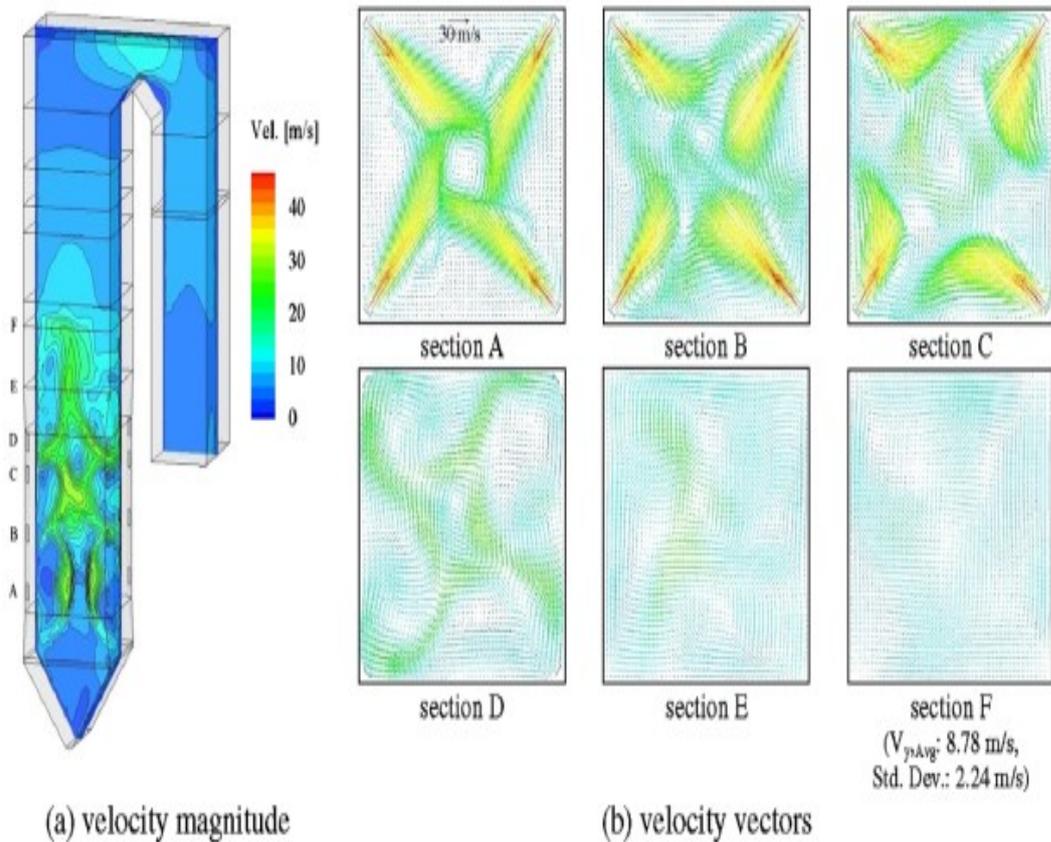
Penelitian lain yang dilakukan oleh Choi dan Kim (2009) melakukan penelitian pada boiler dengan beban 500 Mwe. boiler yang bertipe *tangentially pulverized-coal fired* dan mempunyai 6 elevasi burner. menggunakan Data aktual dari pembangkit kemudian disimulasikan, yang didapatkan dari simulasi tersebut adalah *velocity magnitude*, distribusi temperatur, distribusi spesies dan emisi NOx.



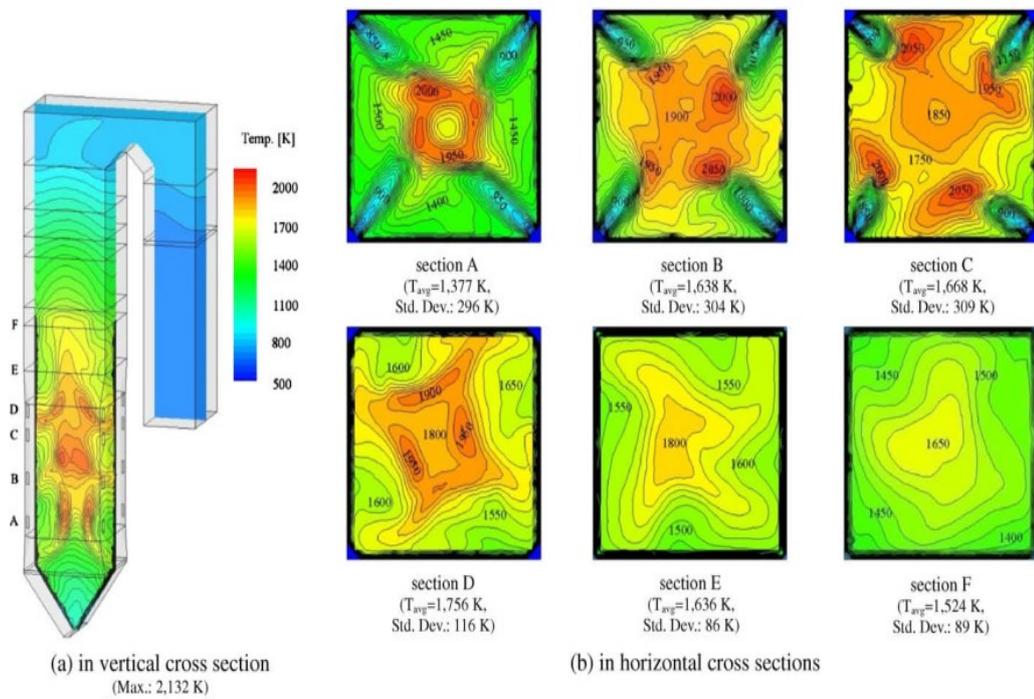
Gambar 2.6 Skema configurations dari tangentially fired pulverized-coal boiler (Choi & Kim, 2009).

Diperlihatkan pada gambar 2.7 distribusi kecepatan dan vector kecepatan di area *furnace* boiler yang berdekatan dengan burner terlihat lebih aktif atau pada bagian layer bawah mempunyai kecepatan yang lebih tinggi daripada didaerah lainnya.

Pada vector kecepatan terlihat pembentukan *fireball*. Aliran membentuk tangensial dan kecepatan aliran tinggi pada saat aliran keluar dari *burner*. Pada *section A* tertinggi dan pada B dan C kecepatannya dikurangi.



Gambar 2.7 distribusi kecepatan dan vector kecepatan dalam berbagai cross section (Choi & Kim, 2009).



Gambar 2.8 Distribusi Temperatur pada Boiler (Choi & Kim, 2009).

Dapat dilihat dari gambar 2.8 distribusi kecepatan aliran pada burner pada bagian A kecepatannya tinggi terbentuknya NOx terjadi di area pusat *fireball* dan kecil. Sedangkan untuk bagian B dan C ketika kecepatan aliran pada burner makin berkurang hingga tidak mencapai titik pusat fireball dan membentuk NOx melebar membesar.

Blondeau et al (2018), dikarenakan kehalusan dari batubara yang dihasilkan oleh pulverizer sudah ada maka kunci dari adalah air fuel ratio yang didefinisikan sebagai:

$$AFR = \frac{m_o}{m_f} \dots\dots\dots 2.6$$

Dimana m_o = flow rate of air

m_f = flow rate of fuel

Air fuel ratio nilainya equivalence dengan λ yang merupakan rasio antara flow rate udara yang di injeksikan dengan flow rate dari udara (oksigen) yang diperlukan untuk membakar bahan bakar.

$$\lambda = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{a,stoichi}} = \frac{AFR}{ARF_{stoichi}} \dots\dots\dots 2.7$$

Apabila nilai $\lambda < 1$ maka didefinisikan sebagai kondisi sub stoichiometric hal ini menyebabkan peningkatan produksi CO dan unburn carbon di bottom ash. Apabila nilai $\lambda > 1$ maka akan menambah excess air yang dapat mengurangi produksi CO dan unburn carbon. λ bisa digunakan dalam skala seluruh furnace maupun untuk tiap masing masing burner.

Produksi NOx termal dalam Furnace bisa sangat berkurang ketika pengaturan bertingkat tiap level udara diterapkan. Tujuan utamanya adalah mengamati dan membatasi temperature tertinggi yang terjadi di furnace dengan demikian konsentrasi NOx pada keluaran furnace bisa dikurangi. Hal lainnya adalah recirculasi gas buang, coal flow yang bertingkat tiap levelnya atau injeksi steam.

Penggunaan Low NOx burner dan pengaturan udara bertingkat pada tiap level burner dapat di aplikasikan untuk pengaturan api. secondary air yang terpisah dari primary air yang membawa partikel batubara yang akan terbakar di furnace mengurangi temperature dari api dimana $\lambda < 1$. Low NOx burner dapat mengurangi NOx kisaran 25 - 50%, metode lainnya yang dapat diaplikasikan adalah pengaturan bahan bakar secara bertingkat dan resirkulasi gas buang. Pengaturan udara bertingkat juga dapat dilakukan dengan cara penambahan udara pada burner di level yang rendah sehingga menambah volume udara yang signifikan ($\lambda < 1$), hal tersebut dapat menurunkan temperature tertinggi api. Pengaturan udara juga dapat diterapkan secara global di *furnace*. Dengan menyuntikkan jumlah sub stoikiometrik udara dalam *layer* pembakar terendah, atmosfer pereduksi global dapat dibuat dalam volume tungku yang signifikan ($\lambda < 1$), sambil menurunkan suhu nyala puncak. Untuk memastikan pembakaran penuh dari partikel batubara. laju aliran udara yang dikurangi ini harus dikompensasikan dengan λ yang lebih tinggi pada tingkat baris burner tertinggi, atau melalui port injeksi Over Fire Air spesifik (port OFA). Pada Boiler dengan kapasitas besar yang ada saat ini, λ keseluruhan

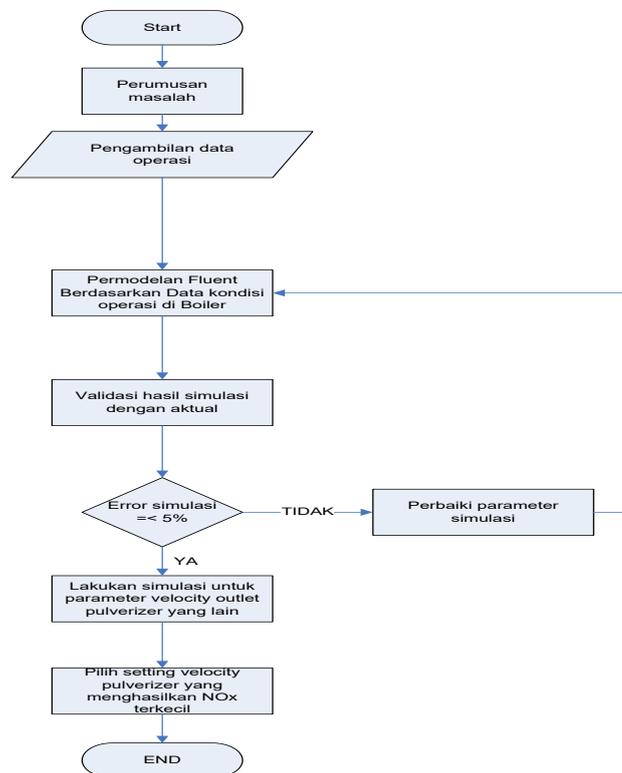
berada dalam kisaran 1.1 - 1.3 harus dicapai di outlet boiler. Ini sesuai dengan konsentrasi excess air dalam gas buang dalam kisaran 2 - 4%. Efisiensi total air flow pada pengurangan NOx tergantung pada beberapa parameter operasional dan desain. Dilaporkan bahwa hal tersebut dapat mengurangi NOx antara 10 dan 70% pengurangan NOx.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan menggunakan simulasi numerik melalui software ANSYS Fluent untuk mengetahui pengaruh *velocity outlet pulverizer* terhadap pembentukan NOx pada gas buang. Metode pelaksanaan pada unit 1 yang berkapasitas 300MW dengan 4 *pulverizer* yang beroperasi dan 1 *standby*. Dalam melakukan penelitian ini berikut flow chartnya.



Gambar 3.1 Flow chart penelitian

Sedangkan untuk tahapan yang dilakukan sebagai berikut:

3.1 Studi Literatur

Dalam memahami permasalahan dan menganalisisnya perlu dilakukan study literatur yang berkaitan dengan permasalahan yang diteliti. Hal tersebut dapat diperoleh dari *papers, e-book, manual book*, Thesis sebelumnya maupun dari halaman internet.

3.2 Pengumpulan Data Teknis dan Data Operasi

Simulasi yang dilakukan yang dilakukan dengan memerlukan data operasi sebagai bentuk validasi. metode perubahan pressure pada *Pulverizer* yang mempengaruhi *velocity outlet pulverizer* terhadap produk NOx yang dihasilkan gas buang. Pengukuran dilakukan pada beban 300 MW dengan variasi *velocity outlet Pulverizer* dengan tidak mengubah parameter yang lain.

3.2.1 Pengambilan Data Operasi dan Pengambilan Sampel

Kegiatan Penelitian akan didapat beberapa metode pengambilan data yaitu:

- a. Pengambilan data Sample

Pengambilan data sample Batubara tiap *outlet pulverizer*

- b. Pengambilan Data DCS (*Distributed control system*)

Pengambilan data DCS dilakukan dengan cara mendownload semua data operasi ketika pengambilan data NOx dan dan Pengaturan *Pressure* Pada *Pulverizer* pada beban 300 MW.

3.3 Rancangan Simulasi

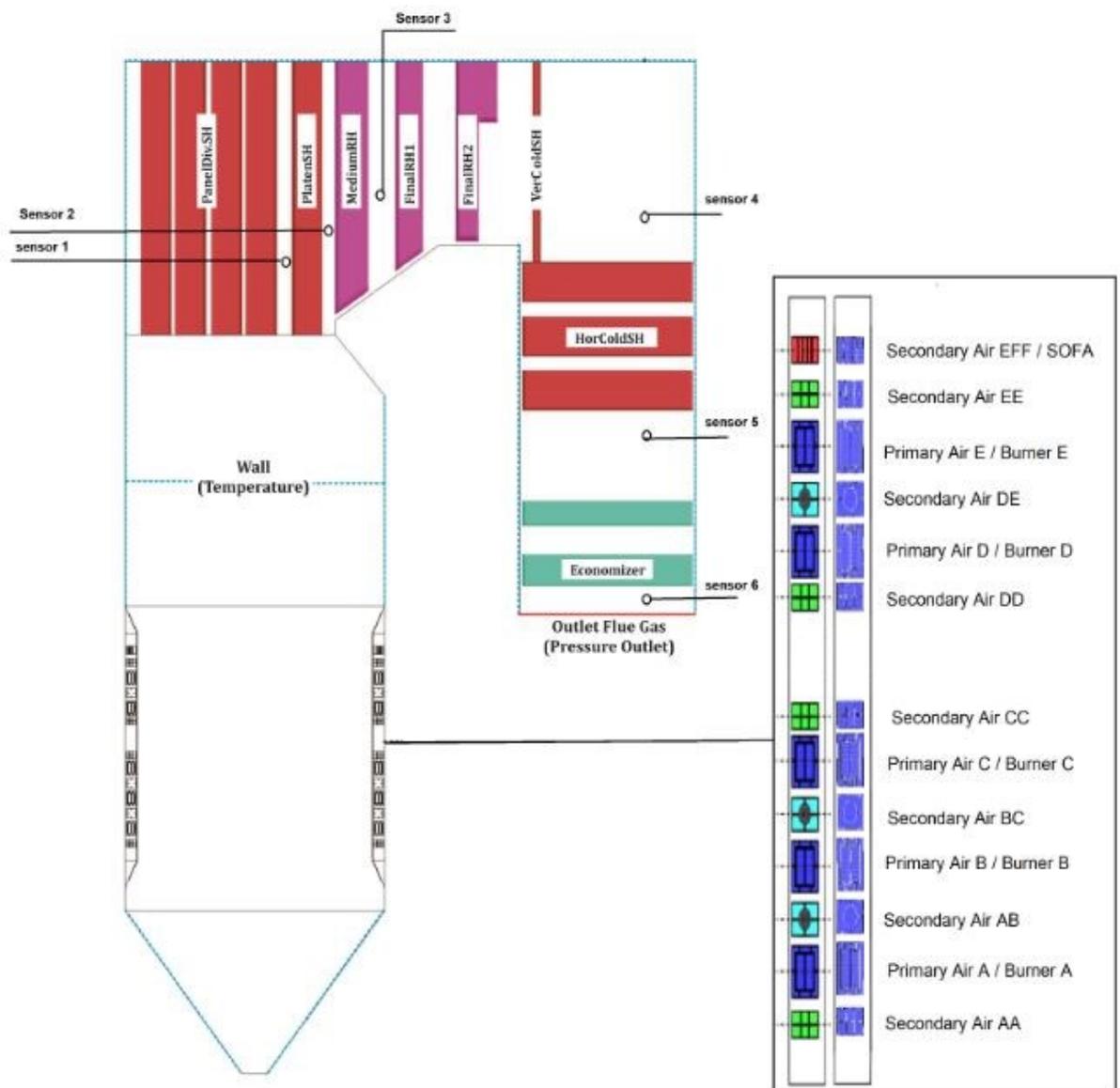
Penelitian ini dilakukan dengan melakukan simulasi numeric menggunakan software *ANSYS Fluent 18.2* untuk *Velocity outlet Pulverizer* terhadap Pembentukan NOx. Untuk membuat model 3D Boiler dilakukan dengan *Software Gambit 2.4.6*. Adapun tahapan tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut

3.3.1 Preprocessing

Preprocessing adalah langkah yang pertama yang dilakukan dalam simulasi numerik. Didalam tahan itu mencakup langkah langkah seperti: pembuatan geometri, pemilihan domain, pembuatan meshing dan menentukan parameter awal yang digunakan.

3.3.2 Geometri Boiler

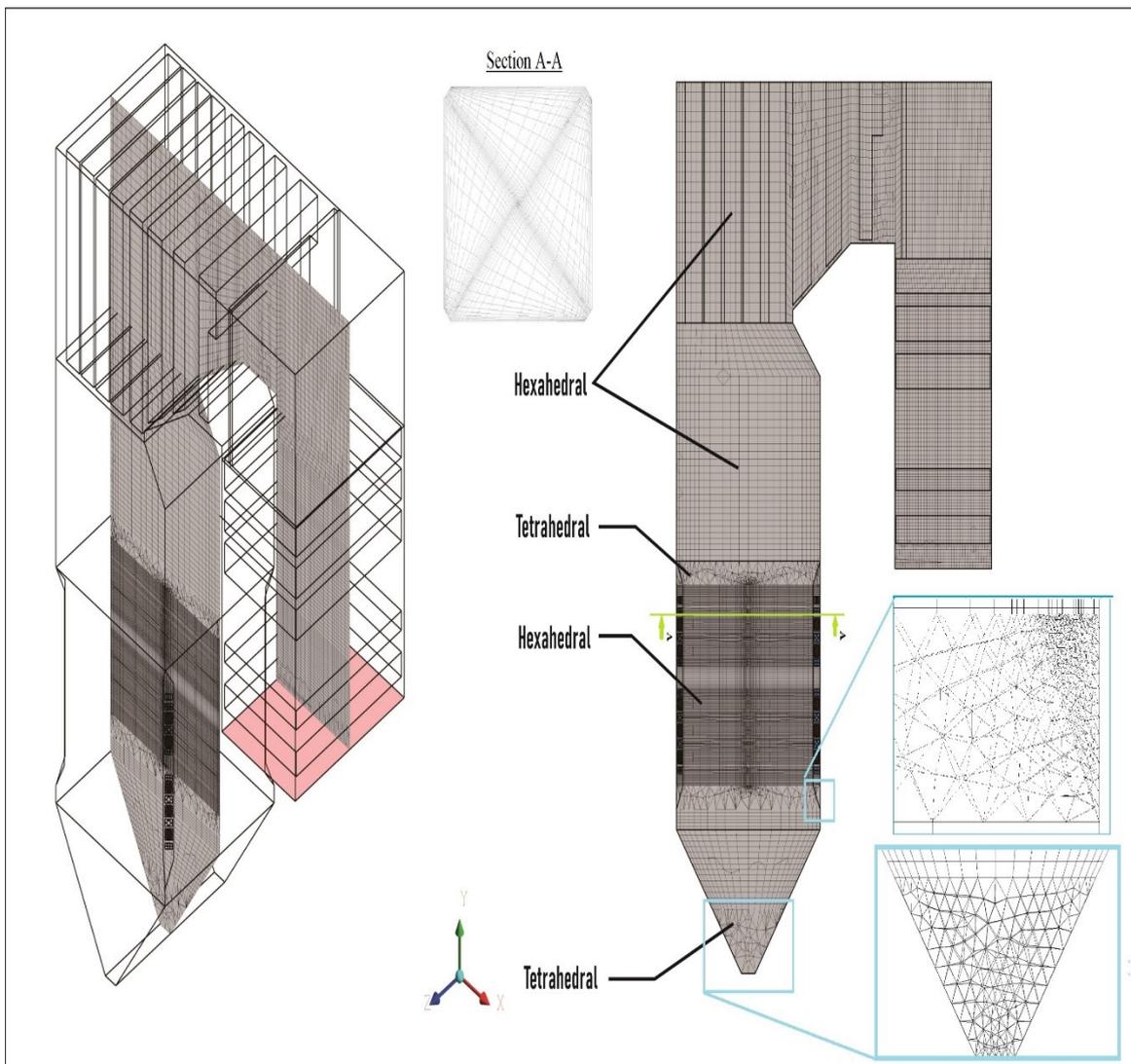
Menerjemahkan geometri aktual boiler kedalam Fluent melalui dengan *software Gambit 2.4.6*.



Gambar 3.2 Geometri Boiler Labuan

3.3.3 Meshing

Setelah geometri selesai dibuat, perlu dilakukan proses *meshing* (membagi volume menjadi bagian-bagian kecil) agar dapat dianalisis pada program CFD. Ukuran *mesh* yang terdapat pada suatu objek akan mempengaruhi ketelitian dan daya komputasi analisis CFD. Semakin kecil/halus *mesh* yang dibuat, maka hasil yang didapatkan akan semakin teliti, namun dibutuhkan daya komputasi yang makin besar. *Nodes* pada *meshing* boiler dengan bentuk *mesh* yang dipilih untuk pemodelan 3D boiler adalah *hexahedral* dan *polyhedral*.



Gambar 3.3 Meshing Boiler Labuan

3.3.4 Processing

Pada *processing* dan *post-processing* proses pembakaran di *boiler* menggunakan *software ANSYS FLUENT 18.2* pada penelitian ini model simulasi digunakan seperti pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Model pada simulasi numerik ANSYS Fluent 18.2

Model	Keterangan	Dasar Pemikiran
Multiphase	Off	Penelitian dilakukan pada flue gas yang terjadi akibat pembakaran
Energy Equation	On	Mencakup perpindahan panas konveksi dan radiasi
Heat Exchanger	Off	
Viscous (model turbulensi)	k-ε standard	Dapat menyelesaikan permasalahan <i>heating</i> , <i>buoyancy</i> , <i>compressibility</i> , dan <i>combustion</i> .
Radiation	Off	
Species	Species Transport (NOx: Thermal NOx)	Karena spesies kimia yang diinjeksikan mempunyai reaksi kimia (pembakaran) yang telah didefinisikan pada material yang digunakan.
Discrete Phase	On	Mendefinisikan injeksi untuk inlet batubara
Solidification	Off	Tidak diperlukan
Acoustic	Off	Tidak diperlukan
Eulerian Wall Film	Off	Tidak diperlukan

3.3.5 Injeksi

Untuk input batubara diletakkan pada burner tiap cornernya dengan 5 elevasi burner akan tetapi hanya 4 yang diinput dikarenakan *burner standby*. Komposisi jenis batubara yang 2 MRC (*Medium Rank Coal*) dan 2 LRC (*Low Rank Coal*) dengan konfigurasi LRC-LRC-MRC-MRC. Untuk Properties Batubara yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.2. Untuk parameter variasi yang dilakukan adalah *velocity* dari masing masing *burner*. Data yang digunakan menggunakan data *performance test* 15 juni 2019 pada PLTU Labuan.

Tabel 3.2 Properties batubara Pada saat performance test

Heating Value	Symbol	Unit	AR	
			LRC	MRC
Higher Heating Value (AR)	He	kcal/kg-f	3,999	4,582
Higher Heating Value (AR)	Hf	kJ/kg-f	16,744	19,183
Ultimate Analysis				
Carbon Content (AR)	MpCF	wt%	43	58
Hydrogen Content (AR)	MpH2F	wt%	3	6
Oxygen Content (AR)	MpO2F	wt%	13	27
Sulfur Content (AR)	MpSF	wt%	0	1
Nitrogen Content (AR)	MpN2F	wt%	1	1
Ash Content (AR)	MpAsF	wt%	9	7
Moisture Content (AR)	MpWF	wt%	30	-
Total		wt%	100	100
Proximate Analysis				
Total Moisture Content (AR)	MFrWF	wt%	30	-
Fixed Carbon Content (AR)	MFrFC	wt%	29	39
Volatile Matter (AR)	MFrVm	wt%	32	38
Ash Content (AR)	MFrAsF	wt%	9	7
Total		wt%	100	84
Carbon Content in Fly Ash	MpCfa	wt %	2	2
Carbon Content in Bottom Ash	MpCfe	wt %	2	2
Fly Ash Split	MpCba	wt %	1	1
Bottom Ash Split		wt %	0	0
Mass of Residue		wt %	0	0
Carbon in Ash		wt %	2	2
Unburn Carbon in Fuel		wt %	0	0
Carbon Burned Content		wt %	43	58

3.3.6 Material

Jenis material yang digunakan pada Simulasi CFD ini terdiri dari Fluid (lihat tabel 4), *Solid, mixture, mixture, water liquid* dan *Combustion particle*. Untuk *Properties Fluid* terdiri dari air, *Carbon-monoxide, carbon Solid* dan *Hydrogen*. *Properties Solid* yang digunakan adalah *Steel* Sedangkan *aluminium* diset default Fluent

(Lihat Tabel 5). Properties dari *Mixture* adalah Coal-lv-volatiles-air, Coal-mv-volatiles-air, Coal-volatiles-air. sedangkan untuk *Combustion Particle* yang digunakan adalah Coal-Particle-lrc dan Coal-Particle-mrc yang berasal dari data batubara yang digunakan oleh kita saat pengambilan data dilakukan yaitu 50% *Medium Rank Coal* (MRC) dan 50% Low Rank Coal (LRC) yang dapat dilihat inputnya pada Tabel 6.

Tabel 3.3 Properties Fluid Pada Fluent

Material Fluid	Air	Carbon-monoxide	Carbon-solid	Hydrogen
Density, Kg/m ³	1.225	1.1233	2000	0.08189
Spesific Heat, j/Kg-K	1006.43	Piecewise-polynomial	Piecewise-polynomial	Piecewise-polynomial
Thermal conductivity, W/m.K	0.0242	0.025	0.0454	0.1672
Viscosity, Kg/m.s	1.79E-05	1.75E-05	1.72E-05	8.41E-06
Molecular Weight, Kg/Kmol	28.966	28.01055	12.01115	2.01594
Reference temperature, C	25	25	24.85	25

Tabel 3.4 Properties Solid Pada Fluent

Material Solid	Density, Kg/m³	Spesific Heat J/Kg.K	Thermal Conductivity W/m.K
Steel	8030	502.48	16.27
Alumunium	2719	871	202.4

Tabel 3.5 Properties Combustion Particle Pada Fluent

Combustion Particle	coal-particle-lrc	coal-particle-mrc
Density, Kg/m ³	1350	1400
Spesific Heat, j/Kg-K	1680	1680
Laten Heat, j/Kg	0	
Vaporation Temperature, °C	126.85	126.85

Volatile component Fraction (%)	46.00393	45.86173
Binary Diffusivity, m ² /s	4.00E-05	4.00E-05
Swelling Coefisient	1.4	1.4
Burnout Stoichiometric Ratio	2.67	2.67
Combustion Fraction, %	40.86205	46.16667
Heat Reaction for Burnout, J/Kg	3.28E+07	3.28E+07
React. Heat Fraction Absorbed by Solid, %	30	30
Devolatization Model, 1/s	50	50

3.3.7. Cell Zone Condition

Cell Zone Condition adalah untuk menggambarkan arah aliran dari particle pada Heat exchanger yang digambarkan sebagai porous media yang mempunyai penyerapan panas tersendiri. Nilai energi di buat negative disebabkan tiap *heat exchanger* menyerap energi panas. Untuk setting heat exchanger dapat dilihat pada tabel 7 dibawah.

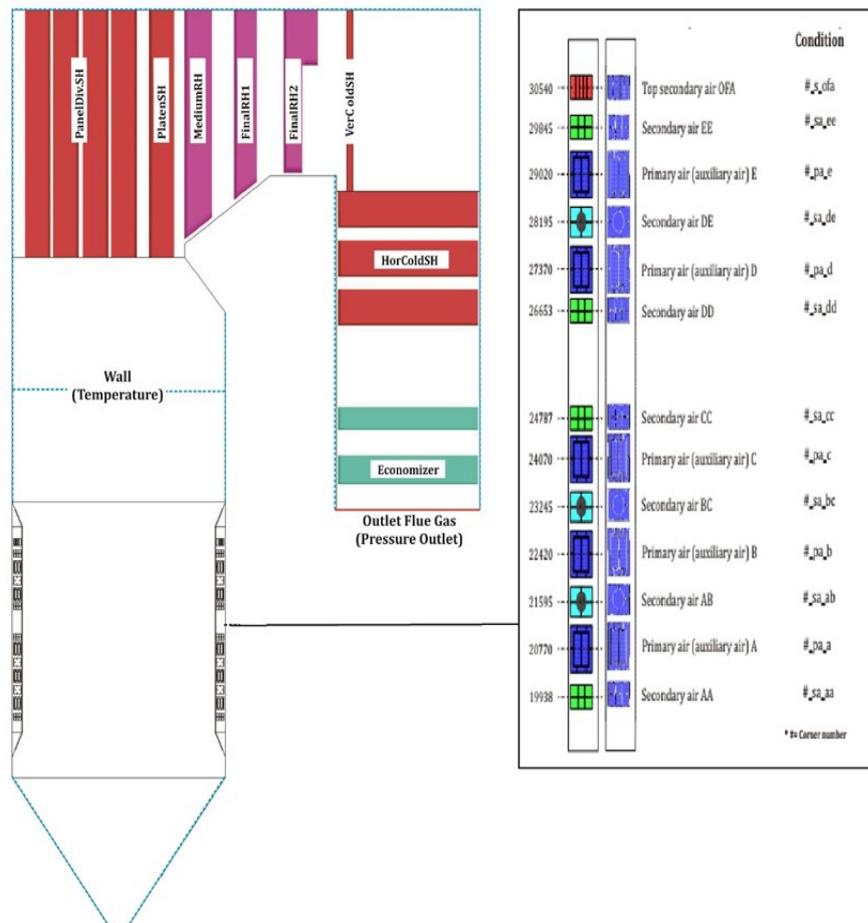
Tabel 3.6 Setting Heat Exchanger Pada Fluent

Heat Exchanger	Inertial Resistant, 1/m			Porosity	Energy, W/m ³
	Arah X	Arah Y	Arah Z		
Panel Division	0	0.1	0.28	0.7451	-42020
Platen Super Heater	0	0.1	0.86	0.8013	-216525
Medium Reheat	0	0.1	0.62	0.8194	-106590
Final Rehaeat 1	0	0.11	0.72	0.9026	-124288.6
Final Rehaeat 2	0	0.12	0.51	0.7272	-109300
Vertical Cold super Heater	0	0	0.23	0.8281	-59222.14
Horizontal Cold super Heater	0	0.35	0	0.8281	-131964.1
Economizer	0	0.52	0	0.7445	-49300

3.3.8. Boundary Condition

Dalam simulasi *boundary condition* dapat digolongkan menjadi 4 tipe, yaitu *wall*, *mass flow inlet*, *pressure outlet* dan *interior*. Pada Gambar 3.4 sebagai *inlet*

adalah udara primer dan udara sekunder digunakan *boundary condition mass-flow-inlet*, Sementara *outlet* boiler menggunakan *pressure outlet*. *Primary air* masuk ke *furnace* melalui burner A, B, C, D dan E, tetapi pada simulasi ini *burner D* standby sehingga *burner D* dapat didefinisikan sebagai *wall*. *Secondary air* masuk ke *furnace* melalui burner AA, AB, BC, CC, DD, DE, EF, dan EFF. Sedangkan *waterwall tube* menjadi *boundary condition* tipe *wall* dengan memasukkan nilai temperatur, yang diasumsikan temperatur air yang mengalir didalam *tube*.



Gambar 3.4 Boundary Condition pada Simulasi.

Pada *setup mass-flow-inlet*, *reference frame* menggunakan *absolut*, metode spesifikasi *mass flow* menggunakan *mass flow rate*, metode spesifikasi arah menggunakan *direction vector* dengan sistem koordinat X, Y, Z, metode spesifikasi

turbulen menggunakan *intensity* and *hydraulic diameter*. Fraksi massa untuk semua *species* adalah nol kecuali untuk O₂ sebesar 0,23. Pengaturan *mass-flowinlet* ditampilkan pada Tabel 8 dan Tabel 9. Pada setup *outlet*, tekanan *outlet* -777.5 Pascal dengan *backflow direction* adalah *normal to boundary*. Temperatur *flue gas* keluar dari boiler 400⁰C. Metode turbulensi *outlet* menggunakan *intensity* dan *viscosity ratio*, nilai *intensity outlet* 5% dan nilai *viscosity ratio* 10. Fraksi massa semua *species* pada *outlet* adalah nol, kecuali untuk O₂ bernilai 0,23.

Tabel 3.7 Setting Input Primer air, secondary air dan batubara Pada Fluent

Air	Mass Flow Rate, Kg/s	Temperature, °C
S OFA	8.6	324.4
SA EE	9.8	324.4
SA E	12.4	324.4
Coal Part E	10.4	52.5
PA E	15.5	52.5
SA DE	13.8	324.4
SA D	4.8	324.4
Coal Part D	0.0	62.3
PA D	0.0	62.3
SA DD	12.4	324.4
SA CC	14.9	324.4
SA C	14.9	324.4
Coal Part C	10.7	52.5
PA C	17.6	52.5
SA BC	13.8	324.4
SA B	13.6	324.4
Coal Part B	9.2	52.3
PA B	30.1	52.3
SA AB	13.6	324.4
SA A	14.6	324.4
Coal Part A	10.9	52.1

PA A	25.9	52.1
SA AA	13.7	324.4

Tabel 3.8 Setting Secondary air Pada Fluent

Momentum	Secondary air dan Primary air
Mass Flow spesification method	Mass Flow rate
Mass Flow rate (Ton/h)	Untuk Nilai tiap Layer Lihat tabel 8
Direction Spesification Method	Normal to Boundary
Turbulance--Spesification Method	Intensity and Viscosity Ratio
Turbulence intensity %	5
turbulance ratio	10
Thermal---Total Temperature, C	Untuk Nilai tiap Layer Lihat tabel 8
Species--O2	0.23

3.3.9. Solution

Metode Solusi yang digunakan dalam simulasi ini adalah algoritma SIMPLEC yaitu *Least Square Cell Based* untuk *Gradient*, *Second Order* untuk Pressure, *Second Order Upwind* untuk momentum, *First Order upwind* untuk *Turbulent kinetic energy*, *Turbulent Dissipation Rate* dan *Pollutant NO*. Sedangkan *second order upwind* digunakan untuk mv_vol, O₂, CO₂, H₂O, N₂, H₂ dan energy.

3.3.10. Initialize

Initialize merupakan perkiraan awal sebelum dilakukan perhitungan sehingga memudahkan dalam mencapai konvergen.

3.3.11. Monitoring residual

Monitoring residual merupakan proses perhitungan iterasi simulasi yang digambarkan dalam bentuk grafik hingga mencapai nilai konvergen. Nilai konvergen dari yang ditetapkan di simulasi ini adalah 10^{-3} yang mempunyai arti apabila semua nilai yang diiterasikan mencapai nilai 10^{-3} maka simulasi di nyatakan konvergen. Namun Apabila nilai tersebut tidak tercapai maka proses validasi dapat

dilakukan ketika nilai iterasi yang dilakukan memiliki parameter yang hampir sama dengan data aktual.

3.3.12. Post Processing

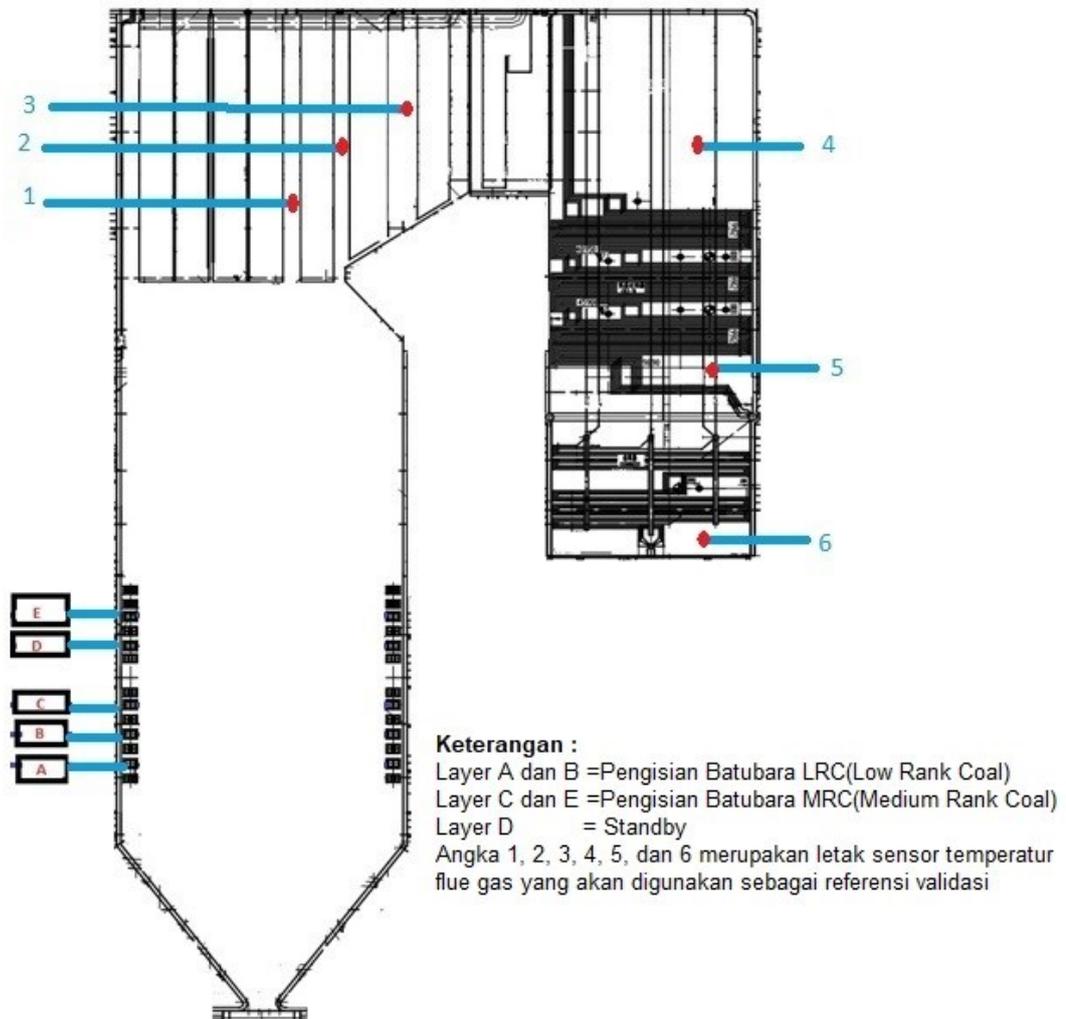
Merupakan Solusi Hasil perhitungan simulasi yang berupa grafik dan data. Dari grafik kita dapat menganalisa apa yang terjadi didalam sistem dalam kasus ini adalah didalam Boiler berupa distribusi temperatur, *velocity contour*, Kadar Nox, *Particle trace* dan sebagainya.

3.4. Rencana Penelitian

Rencana penelitian studi numerik untuk menganalisa pengaruh variasi Pengaturan *velocity outlet Pulverizer* terhadap pembentukan NOx pada PLTU Labuan unit 1 yang beroperasi menggunakan hot blending antara *low rank coal* dan *medium rank coal* dengan komposisi 50% LRC dan 50% MRC dan sudut tilting 0⁰. Sedangkan untuk parameter lain dibuat tidak ada perubahan parameter operasi. Untuk pengaturan batubara dua layer *burner* terbawah menggunakan LRC dan layer atas menggunakan MRC. Berikut gambar 3.4 mengenai pengaturan letak pengumpanan batubara ke boiler sesuai dengan kondisi pada saat performance test tanggal 15 juni 2019.

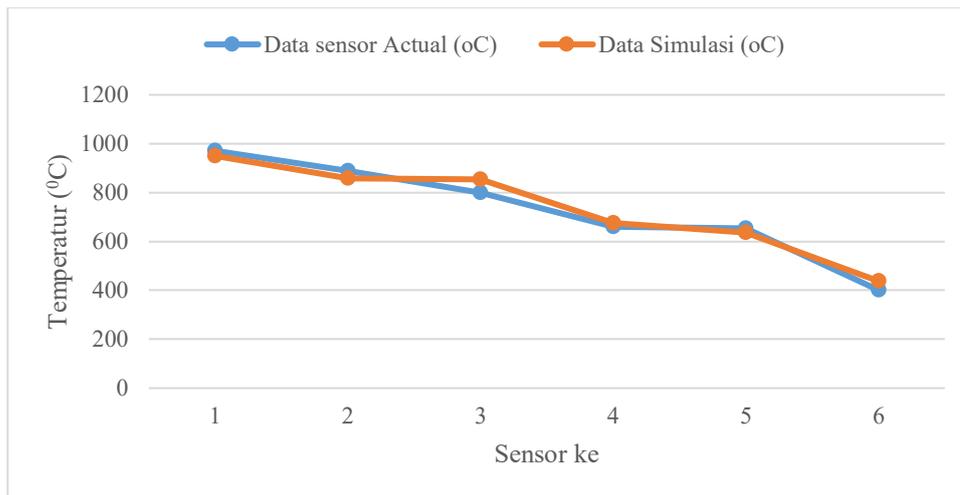
3.5 Validasi Analisa Numerik

Sebelum melanjutkan simulasi ketahap variasi kasus perlu dilakukan Validasi dari data simulasi. Pada penelitian ini dilakukan validasi pada temperatur *flue gas* antara data aktual dibandingkan dengan data simulasi. Perbandingan data aktual operasi terdapat titik temperatur *flue gas* ditampilkan dalam Gambar 3.5. Pengambilan data untuk validasi dengan membuat *iso-point* sesuai dengan titik-titik penempatan sensor sensor di boiler. Derajat keakuratan simulasi dinilai dari *error value* antara data aktual dan data simulasi yang kurang dari 5%.



Gambar 3.5 Posisi pengumpanan batubara dan letak sensor temperatur pada PLTU Labuan

Pengambilan data untuk validasi dengan membuat iso-point sesuai dengan titik-titik penempatan sensor sensor di boiler. Secara umum temperatur dari titik 1 sampai dengan titik 6 mengalami penurunan, Penurunan temperatur ini terjadi karena adanya penyerapan panas pada superheater sampai dengan economizer.



Data sensor						
Actual (°C)	971	889	800	660	654	401
Data Simulasi (°C)	950	859	853	676	636	438
Error	2.2%	3.4%	6.6%	2.4%	2.8%	9.2%

Gambar 3.6 Perbandingan data actual dan simulasi

Dari Gambar 3.6 dapat dilihat error pada sensor 3 dan 6 lebih besar dari 5% sedangkan untuk sensor 1, 2, 4 dan 5 mempunyai nilai error berturut turut 2.16%, 3.37%, 2.75% dan 2.75%. Secara keseluruhan dapat dilihat rata rata error masih dibawah 5% yaitu sebesar 4.43%. Maka simulasi ini dapat dilanjutkan ke variasi yang lainnya.

3.6 Variasi Simulasi data numerik

Di dalam variasi simulasi ini semua parameter dibuat sama seperti data validasi kecuali data velocity output pulverizer. Variasi *velocity output pulverizer* mempengaruhi *mass flow* udara Primer yang dibutuhkan. Berikut Tabel 3.10 data mass flow yang didapat dari beberapa *velocity outlet pulverizer*. Perbandingan *Air fuel ratio* tiap variasi juga ditampilkan untuk mewakili kondisi pembakaran. Pengambilan variasi berdasarkan kemampuan dari *Primary air fan* itu sendiri dan pola minimum operasi. Kemampuan PAF dengan kapasitas 2 x 50% flow maksimum yang dapat dialirkan adalah 400 t/h udara. Maka range maksium velocity primary air pada pulverizer adalah 32 m/s. Sementara untuk batas bawah

pengoperasian pulverizer adalah pressure 3 kPa dengan pressure tersebut flow minimal adalah 100 t/h.

Tabel 3.9 Mass flow udara primer berdasarkan velocity nya

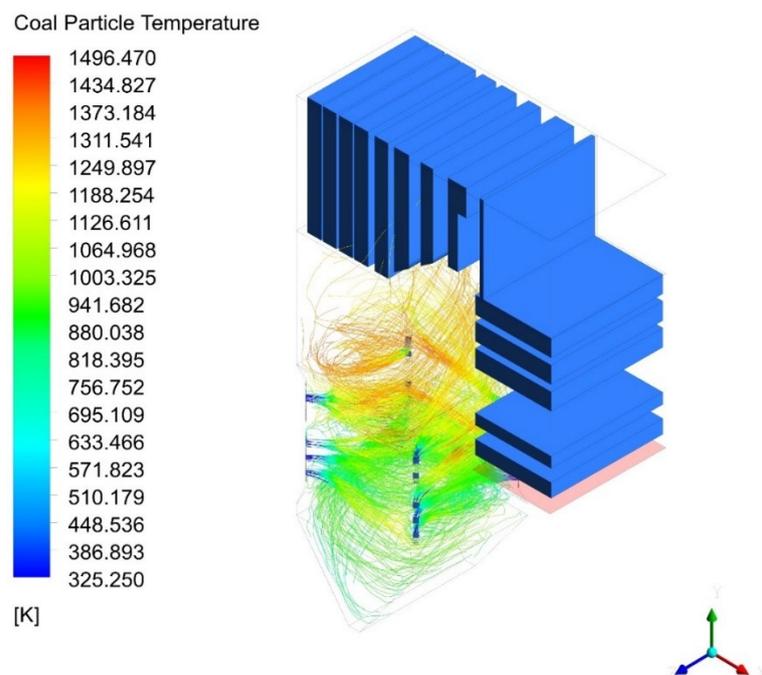
Velocity m/s	Total Primary Air t/h	Secondary Air Flow t/h	Total Air Flow t/h	Coal Flow t/h	Air Fuel Ratio	Penempatan Batubara
23	109.9	643.4	753.3	165.4	1:4.6	LRC pada Burner A dan B, MRC pada Burner C dan E
24	141.7	643.4	785.1	165.4	1:4.7	LRC pada Burner A dan B, MRC pada Burner C dan E
26	205.4	643.4	848.8	165.4	1:5.1	LRC pada Burner A dan B, MRC pada Burner C dan E
28	269.1	643.4	912.5	165.4	1:5.5	LRC pada Burner A dan B, MRC pada Burner C dan E
30	332.8	643.4	976.2	165.4	1:5.9	LRC pada Burner A dan B, MRC pada Burner C dan E
32	396.5	643.4	1,039.9	165.4	1:6.3	LRC pada Burner A dan B, MRC pada Burner C dan E

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV PEMBAHASAN

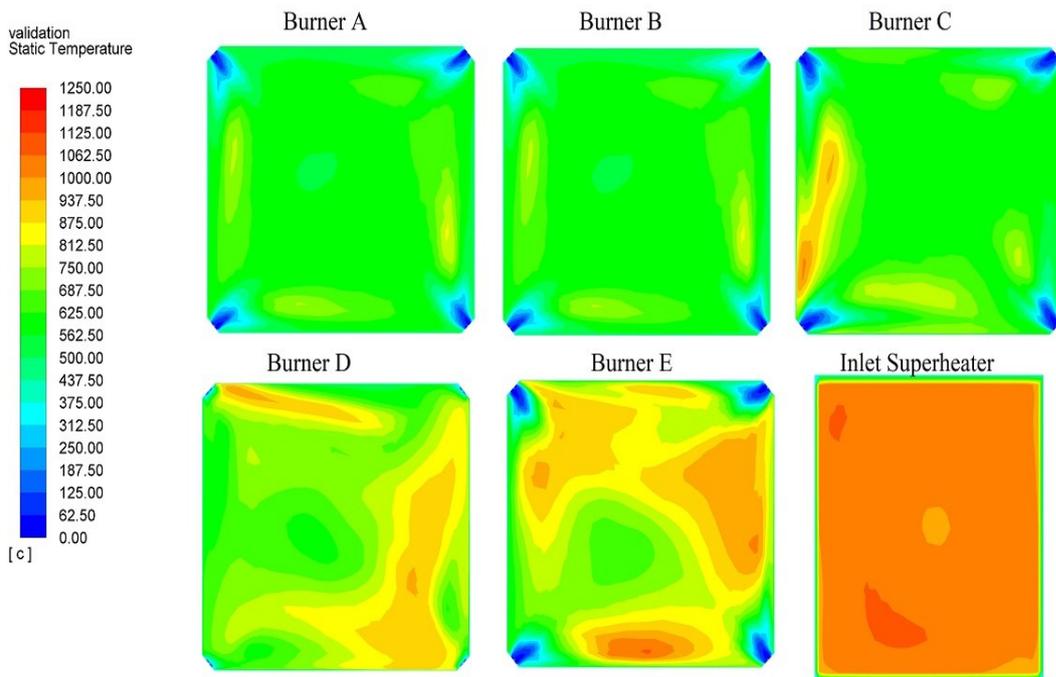
4.1 Pembahasan Simulasi Data Awal

Adapun hasil simulasi numerik yang ditampilkan meliputi data kualitatif dan kuantitatif, yaitu *contour velocity magnitude*, *contour temperature* dan *contour fraksi massa NOx*



Gambar 4.1 Distribusi Temperatur Elevasi Burner dan Inlet Superheater

Pada simulasi untuk validasi terlihat temperature untuk burner A dan B lebih rendah hal tersebut terkait kalori dan resident time dari batubara LRC. Batubara LRC sebagian tidak langsung terbakar ketika memasuki boiler. Berbeda dengan MRC (*burner C dan E*) yang *resident time* nya lebih cepat hal tersebut dapat kenaikan temperatur dari partikel partikel batubara yang divisualkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.2 Distribusi Temperatur Elevasi Burner dan Inlet Superheater

Pada gambar 4.2 besaran *fire ball* tiap *burner* berbeda beda hal tersebut dikarenakan *velocity outlet pulverizer* tiap *burner* berbeda beda dan tiap *level* mempengaruhi satu sama lain. Pada buner C *fireball* cenderung ke satu sudut hal tersebut dikarenakan *burner* diatas level C yaitu *burner* D tidak beroperasi dan arah aliran gas buang tidak seragam akibat penyempitan profile boiler pada *inlet superheater*. Temperatur berdasarkan *elevasi* terus meningkat hingga *inlet superheater* hal tersebut dikarenakan *resident time* LRC seperti yang dijelaskan diatas. Temperatur *inlet superheater* yang dihasilkan dalam pembakaran ini adalah 1218⁰C dengan fraksi massa NOx di *outlet* Boiler sebesar 0.1991% massa udara.

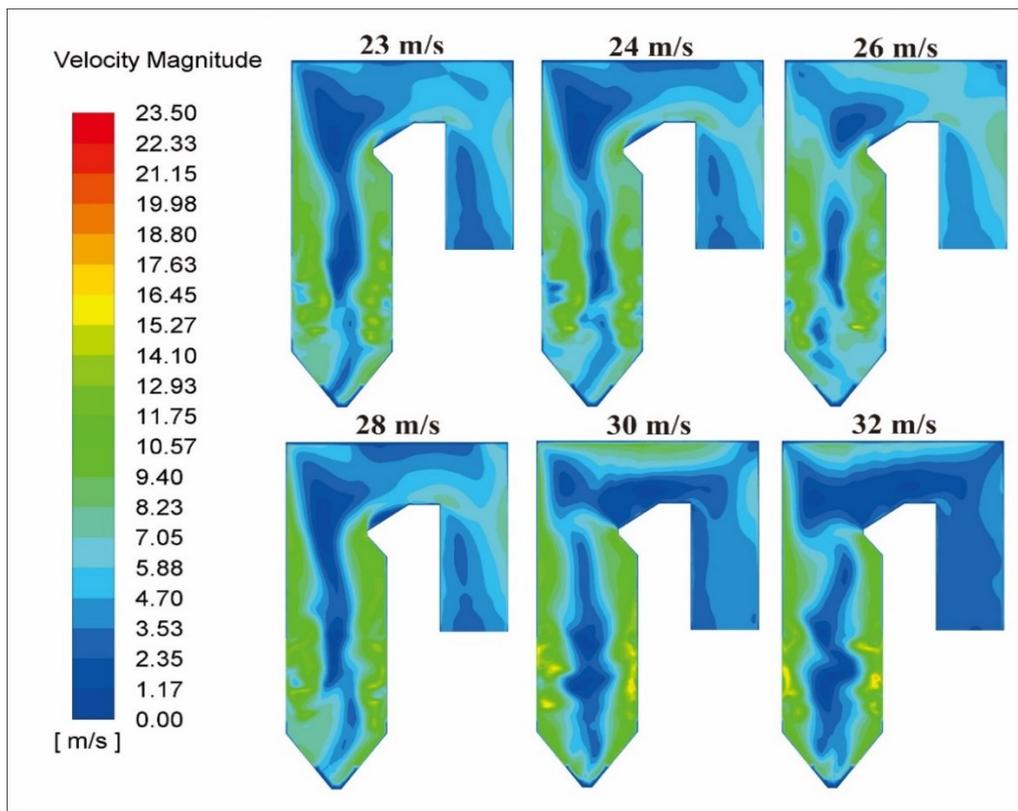
4.2 Analisa Simulasi Data Variasi

4.2.1 Analisa Aliran Gas Solid

Untuk menganalisa pengaruh variasi *velocity outlet pulverizer* pada boiler Pengaruhnya terhadap pembakaran, oleh karena itu pada analisa aliran *contour velocity magnitude* pada boiler.

4.2.2. Analisa Contour Velocity Magnitude

Di dalam boiler proses pembakaran partikel batubara dan udara menghasilkan *flue gas* dengan temperature yang tinggi dengan arah *flue gas* mengalir dari *furnace* menuju ke *outlet boiler*. Didalam *furnace* aliran udara dan partikel batubara yang keluar dari keempat sudut *burner boiler* dan *secondary air* akan membentuk *fireball*, dengan adanya *fireball* lintasan partikel batubara menjadi lebih panjang, yang menyebabkan rentang waktu partikel di area *furnace* akan menjadi lebih lama dengan tujuan batubara benar benar terbakar diarea *furnace*. Hal lain efek dari *fireball* adalah terjadinya distribusi temperature yang lebih merata di area *waterwall tube*. kecepatan aliran fluida didalam *furnace* diperlukan dalam menganalisa pergerakan partikel batubara yang dibawa udara pembakaran. Pengambilan vektor *velocity magnitude* dilakukan dengan membuat potongan melintang penampang vertikal boiler. Hasil *contour velocity magnitude* terlihat pada Gambar 4.3 dengan *range* kecepatan dari batubara variasi antara 0-23,5 m/s untuk semua variasi.



Gambar 4.3 Contour Velocity Magnitude

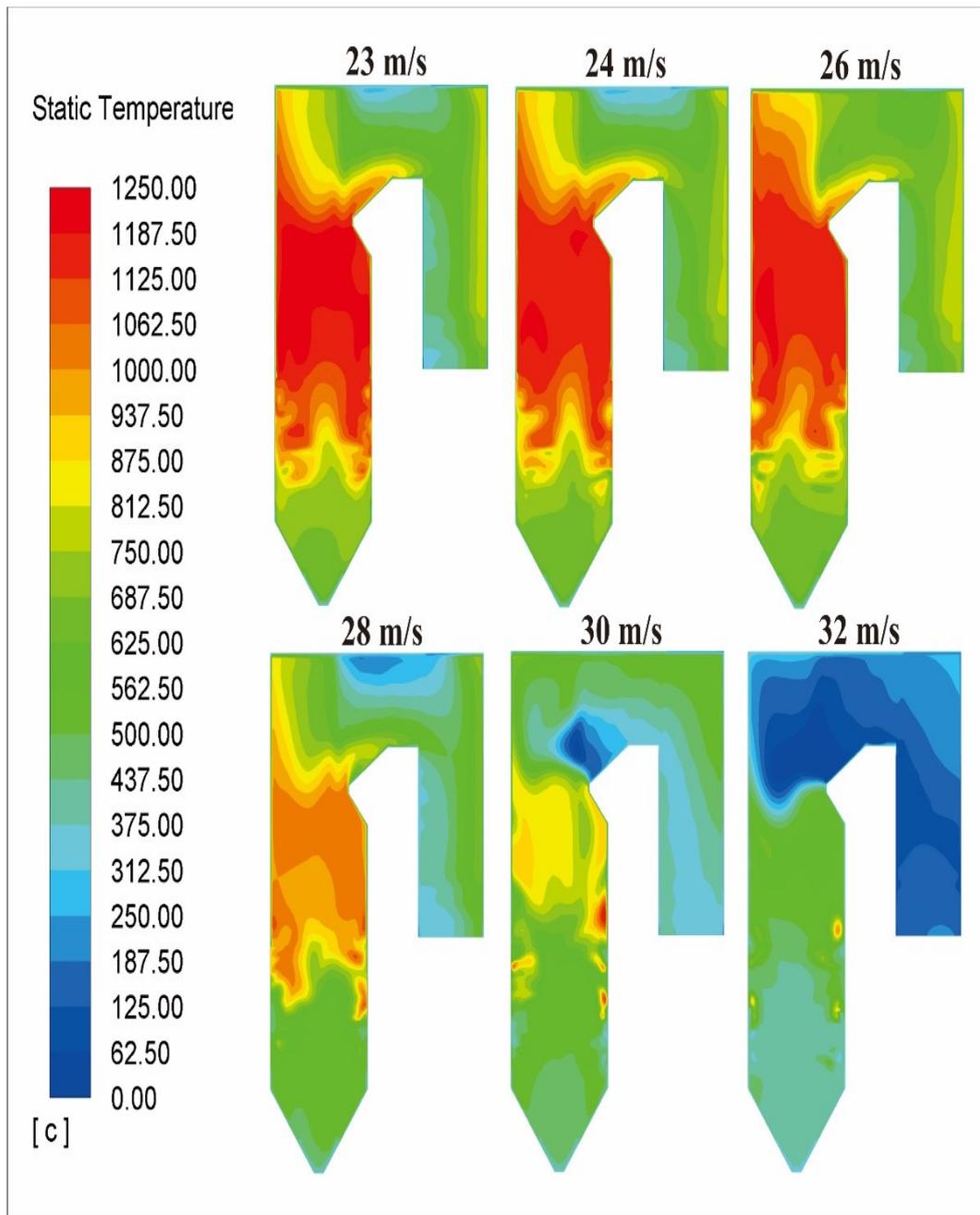
Pada semua simulasi kecepatan flue gas yang rendah berada pada daerah tengah tengah boiler dari *boiler* disebabkan oleh efek *fireball* yang terjadi. Semakin besar diameter fireball semakin luas area yang bertekanan rendah pada pusat furnace karena arah aliran batubara tiap *corner* saling mempengaruhi menjauhi titik tengah *furnace*. Semakin besar *velocity outlet* semakin melebar atau membesar mendekati dinding *waterwall*. Pada area dinding *burner* ada spot yang bertekanan rendah hal tersebut terjadi di area *burner* yang tidak standby. Sedangkan untuk di outlet boiler tekanan rendah disebabkan berkurangnya kecepatan *flue gas* setelah melewati panel *superheater*, *reheat* dan *economizer* sehingga kecepatan aliran berkurang secara bertahap.

4.2.3 Analisa Pembakaran

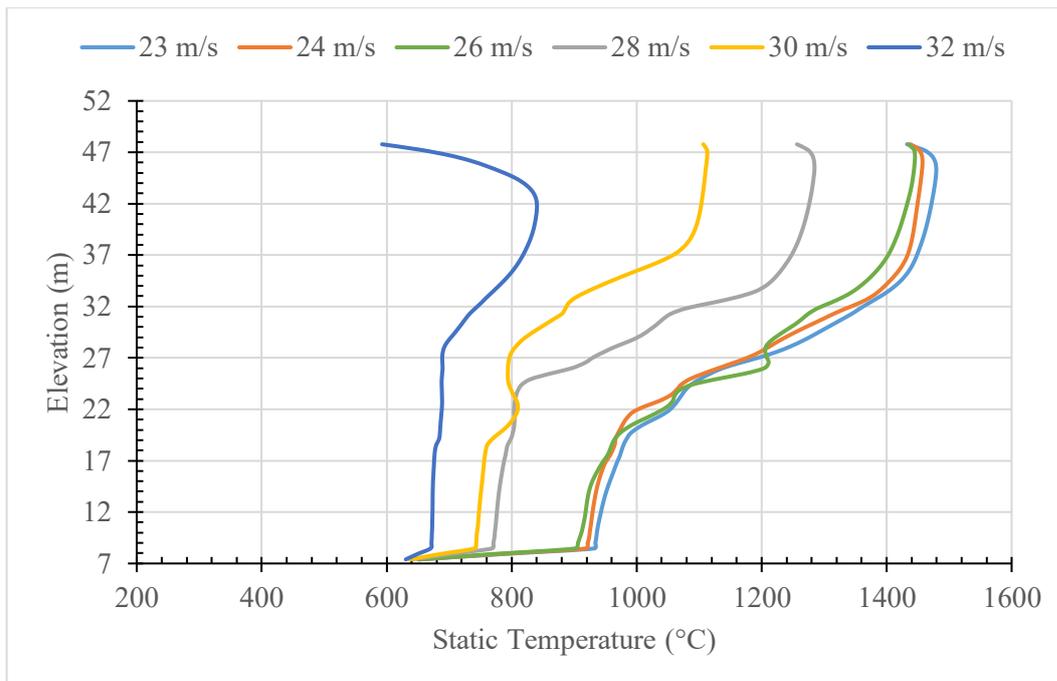
Hasil pembakaran didalam *boiler* salah satunya adalah *flue gas* dengan temperatur yang ditinggi. Dari *flue gas* tersebut terjadi perpindahan panas dengan *wall tube*, *super heater*, *reheat* dan *economizer*. Selain tujuan utama menghasilkan kenaikan temperatur untuk memanaskan air di dalam pembakaran juga menghasilkan produk sampingan seperti O₂, CO₂ dan NO_x. Didalam simulasi ini kita dapat memprediksi hasil proses pembakaran yang terjadi.

4.2.4 Analisa Kontour Temperatur

Analisa Kontour temperatur dari *flue gas* banyak berguna dalam memperkirakan efisiensi. Karena simulasi ini dilakukan pada beban maksimum kenaikan atau penurunan temperatur sangat mempengaruhi besaran pemakaian *desuperheater* baik di area *superheater* maupun area *reheat*. Temperatur tertinggi terjadi pada area *furnace* karena di area ini lah terjadi proses pembakaran perjalanan menuju *outlet boiler* temperatur semakin lama semakin turun dikarenakan adanya penyerapan di *waterwall*, *superheater*, *reheat* dan *economizer*. Pada gambar 4.4 diperlihatkan bahwa *range* pengukuran temperature antara 0°C hingga 1250°C dengan potongan melintang pada *boiler*, dengan *velocity* rendah temperature *Furnace* yang dihasilkan lebih tinggi bila dibandingkan dengan *velocity* yang lebih tinggi.



Gambar 4.4 Static Temperature Potongan Melintang Boiler

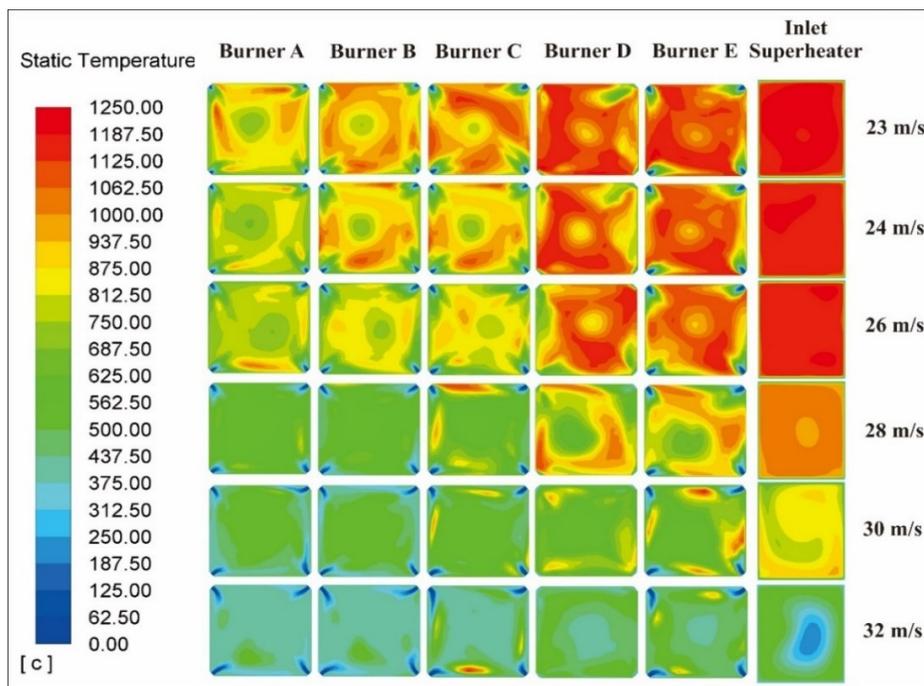


Gambar 4.5 Temperatur Terhadap Ketinggian di Boiler

Pada gambar 4.5 bisa kita lihat temperatur pembakaran terhadap elevasi, Elevasi 7 m merupakan elevasi Pada *Bottom ash* sedangkan Pada elevasi 67 m merupakan elevasi inlet superheater. Pada variasi 23 m/s, 24 m/s, dan 26 m/s temperatur *outlet furnace* tinggi dikarenakan perbandingan udara dan bahan bakarnya sangat timpang 1: 4.6-5.3 sehingga yang menjadikan pembakaran sangat Kaya yang menyebabkan temperatur sangat tinggi. Sedangkan untuk perbandingan udara primer dan udara sekunder adalah 1: 5.8 – 3.2. Sedangkan untuk variasi 28, 30, dan 32 perbandingan udara dan bahan bakar 1: 5.5 -6.3 yang mendekati pembakaran ideal akan tetapi perbandingan udara primer dan udara sekunder 1 : 2.3 – 1.6. Hal tersebut yang menyebabkan temperatur pembakaran menurun dikarenakan temperature udara primer adalah 52.5°C sedangkan udara sekunder 324.4°C. Kondisi secara teoritis perbandingan antara udara Primer dan sekunder untuk pembangkit 300 MW dengan kondisi kalori batubara 4290 Kcal/Kg adalah 1 : 2.6 [7]. Temperatur *inlet superheater* yang diambil pada bagian tengah furnace untuk masing-masing variasi adalah variasi 23 m/s adalah 1433°C, variasi 24 m/s adalah 1438°C, variasi 26 m/s adalah 1434°C, variasi 28 m/s adalah 1257°C, variasi 30 m/s adalah 1106°C, dan variasi 32 m/s adalah 592°C.

4.2.5 Pengaruh velocity outlet terhadap pola fireball

Selain kalori batubara sangat mempengaruhi hasil pembakaran perlu juga diperhatikan *velocity outlet* yang berfungsi menentukan lokasi proses pembakaran terjadi. Kontour melintang area tiap elevasi *burner* dan *inlet superheater* Pada gambar 4.6 dapat menjelaskan pengaruh pembentukan pola *fireball* terhadap *velocity outlet pulverizer*. Apabila pembentukan *fireball* terlalu kecil maka transfer panas ke dinding *wall tube* semakin jauh akan tetapi apabila terlalu melebar dan mendekati dinding tingkat abrasi pada dinding *boiler* meningkat. Terlihat bahwa pengaruh *velocity outlet pulverizer* terhadap temperature pembakaran berbanding terbalik terhadap temperatur pembakaran. Pada gambar 4.6 dapat dilihat Pengaruh semakin besar *velocity outlet Pulverizer* semakin melebar bentuk *fireball* mendekati dinding *waterwall*. Terkait temperatur burner terlihat temperatur pada burner terbawah lebih rendah semakin keatas semakin naik temperaturnya Hal tersebut dikarenakan dua level burner terbawah menggunakan LRC yang mempunyai residen time lebih lama dibandingkan dengan MRC. Hal tersebut menyebabkan sebagian partikel batubara baru terbakar di level burner selanjutnya.

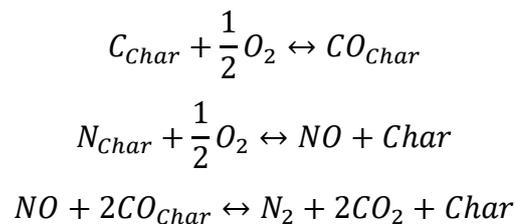


Gambar 4.6. Pola pembentukan fireball pada variasi velocity

4.2.6 Analisa Distribusi contour Fraksi Massa NOx

Kontour Fraksi Massa NOx dapat digunakan untuk memprediksi banyaknya emisi gas buang dan dimana letak terjadinya pembentukan NOx yang dihasilkan dari pembakaran di *boiler*.

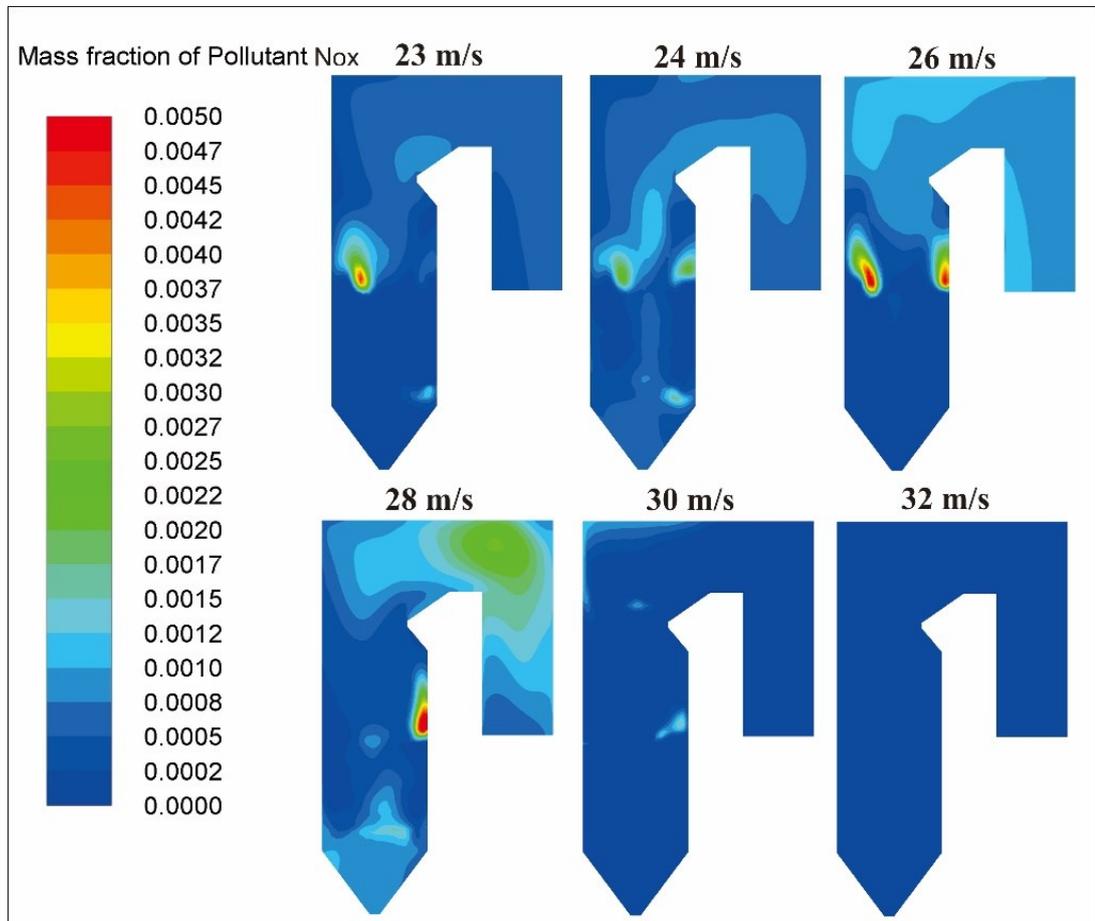
Pada gambar 4.7 untuk kasus variasi 24 m/s dan 28 m/s pada daerah bottom ash, konsentrasi NO dapat meningkat dengan cepat. Partikel char tidak terbentuk tetapi N volatile yang bereaksi dengan perubahan O₂ menjadi NO yang kemudian dioksidasi menjadi NOx. Sehingga fraksi massa NOx pada area tersebut meningkat pada area tersebut (Jie qiang Ji, Leming Cheng, Yang jun Wei, Junfeng Wang, Xin yu Gao, Meng xiang Fang, Qin hui Wang ,2019). Pada Gambar 4.6 dapat dilihat pada burner A pada variasi 24 m/s temperatur keluaran tinggi sehingga dapat terciptanya NOx termal. Sedangkan pada bagian bottom ash terjadi Pembentukan NOx terbesar terjadi akibat nitrogen organik yang terikat secara kimiawi di dalam batubara. Reaksi pembentukan NOx pada permukaan char dideskripsikan pada formula di bawah ini:



Formula tersebut menunjukkan bahwa jumlah NOx yang dihasilkan oleh nitrogen dalam batubara meningkat seiring dengan bertambahnya *residence time* dari partikel yang terbakar. Relasi ini dapat diamati selama reaksi terjadi pada temperature di atas 800 °C. Kenaikan NOx akibat nitrogen pada bahan bakar juga dapat terjadi karena kenaikan kandungan oksigen di dalam nyala api (*flame*) yang berujung pada kondisi miskin bahan bakar (*fuel-lean*).

Pada Variasi 23 m/s , 24 m/s, 26 m/s dan 28 m/s terjadi pembentukan NOx thermal dengan fraksi massa yang tinggi dikarenakan pada sekitar area burner E temperatur dibagian *furnace* mencapai syarat terbentuknya NOx *thermal* yaitu 1204⁰C. Tidak simetrisnya pembentukan fraksi massa NOx di area tersebut dikarenakan adanya penyempitan profile *furnace* ketika memasuki *inlet*

superheater sehingga pembakaran dalam bentuk fireball bergeser ke satu sisi tergantung pada kecepatan dari *primary air velocity*.

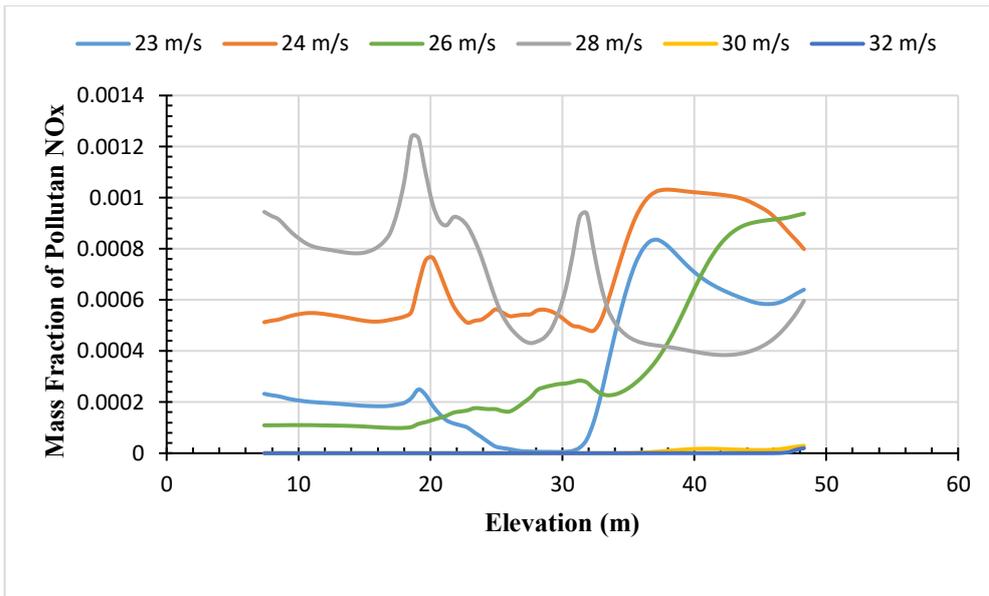


Gambar 4.7 Fraksi Massa NOx pada potongan vertical Boiler

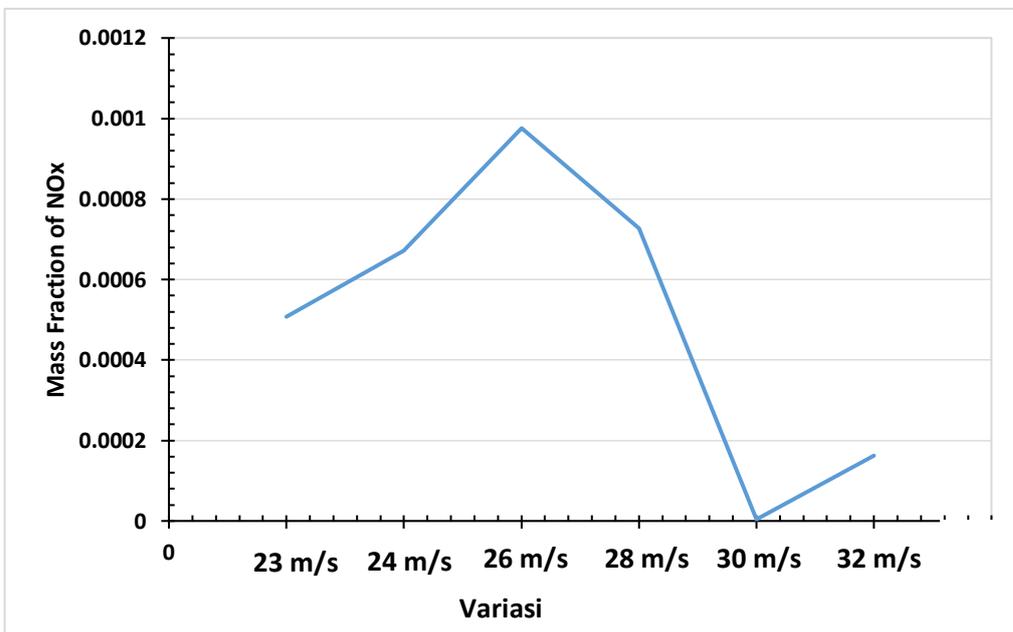
Pada variasi 30 m/s dan 32 m/s pada area *burner* E juga terjadi pembentukan fraksi massa NOx akan tetapi kecil hal tersebut dikarenakan temperatur yang dihasilkan dari pembakaran sangatlah rendah seperti pada grafik 4.5 diatas.

Pada kasus 28 terjadi pembentukan NOx diarea reheat dikarenakan adanya batubara yang belum terbakar diarea furnace dan teroksidasi diarea tersebut membentuk NOx.

Untuk lebih detail mengenai distribusi fraksi massa NOx bisa dilihat pada gambar 4.8 yang menjelaskan besaran fraksi massa NOx terhadap ketinggian pada furnace. Data yang diambil adalah data NOx bagian tengah furnace dari *Bottom ash* hingga *inlet superheater*.



Gambar 4.8. Fraksi Massa NOx Terhadap Ketinggian Potongan Vertikal Furnace



Gambar 4.9 Fraksi Massa NOx Pada Outlet Boiler

Pada Gambar 4.9 menggambarkan fraksi massa NOx pada *outlet boiler* sebelum *air Preheater* tertinggi pada variasi 26 m/s sebesar 0.0976 % massa udara dan terendah pada variasi 30 m/s sebesar 0.000402 % massa udara.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisis data yang disajikan diatas, dapat dirangkum kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan *velocity outlet pulverizer* terhadap suhu pembakaran di *furnace* (tanpa ada perubahan *secondary air*) adalah berbanding terbalik. Semakin besar *velocity outlet pulverizer* semakin turun temperature pembakaran di *furnace*. Temperature pembakaran Pada Temperatur inlet superheater untuk masing masing adalah model *existing* 1218⁰C, variasi 23 m/s adalah 1433⁰C, variasi 24 m/s adalah 1438⁰C, variasi 26 m/s adalah 1434⁰C, variasi 28 m/s adalah 1257⁰C, variasi 30 m/s adalah 1106⁰C, dan variasi 32 m/s adalah 592⁰C
2. Fraksi massa NOx yang terjadi Pada *outlet boiler* untuk adalah model *existing* 0.1991% massa udara, variasi 23 m/s adalah 0.0507% massa udara, variasi 24 m/s adalah 0.671% massa udara, variasi 26 m/s adalah 0.976% massa udara, variasi 28 m/s adalah 0.727% massa udara, variasi 30 m/s adalah 0.000402% massa udara, dan variasi 32 m/s adalah 0.0163 % massa udara
3. Dari analisa hasil simulasi numerik, desain model yang direkomendasikan adalah variasi *velocity outlet pulverizer* dengan kecepatan 28 m/s karena mempunyai mempunyai temperature inlet superheater sedikit diatas model *existing* sehingga pemakaian spray superheater dan reheat hanya menambah sedikit dari model *existing* sedangkan untuk fraksi massa NOx keluaran boiler hanya 35% dari model *existing* .

1.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan hasil dan analisis pengaruh variasi *primary air outlet pulverizer*, maka penulis memberikan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya yaitu sebagai berikut:

1. Pengurangan setting *velocity primary* dapat dilakukan walaupun temperature inlet superheater tinggi akan tetapi hal tersebut dapat diatasi dengan penambahan

pembukaan udara secondary terutama diarea SOFA sehingga pembentukan NOx dapat lebih dikurangi.

2. Setting penempatan Low Rank Calory tidak pada level terbawah melainkan pada level ditengah terkait resident time dari batubara low rank calory itu sendiri.

DAFTAR PUSTAKA

- J J. Blondeau, L. Rijmenans, J. Annendijck, A. Heyer, E. Martensen, I. Popin, A. Wijittongruang, L. Holub (2018). *Burner air-fuel ratio monitoring in large pulverised-fuel boiler*. (<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.02.006>).
- Choeng Ryul Choi, Chang Nyung Kim (2009). *Numerical investigation on the flow, combustion and NOx emission characteristics in a 500MWe tangentially fired pulverized-coal boiler*. (<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.04.001>).
- Audai Hussein Al-Abbas, Jamal Nasera (2013). *Computational Fluid Dynamic Modelling of a 550 MW Tangentially-Fired Furnace under Different Operating Conditions*. (<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.137>).
- Y.C. Liu, W.D. Fan, M.Z. Wu (2017). *Experimental and numerical studies on the gas velocity deviation in a 600 MWe tangentially fired boiler*. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.185>)
- M. Chernetskiy, A. Dekterev, N. Chernetskaya, K. Hanjalić (2018). *Effects of reburning mechanically-activated micronized coal on reduction of NOx: Computational study of a real-scale tangentially-fired boiler*. (<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.132>).
- Debo Li, QiangLv, Yongxin Feng, Chang'an Wang, Xuan Liu, Kai Chen, Kai Xua Jun Zhong Defu Che (2017). *Effects of Coal Blending and Operating Conditions on Combustion and NOx Emission Characteristics in a Tangentially-fired Utility Boiler*. (<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.846>).
- Babcock and Wilcox company (2005). *Steam its Generation and Use 41st Edition*. McDermott Company. Ohio, USA.
- Zixiang Li, Zhengqing Miao, Yan Zhou, Shurong Wen, Jiangtao Li (2018). *Influence of increased primary air ratio on boiler performance in a 660 MW brown coal boiler*. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.001>).
- M Xu, J. L. T Azevedo, M. G Carvalho (2000). *Modelling of the combustion process and NOx emission in a utility boiler*. ([https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00019-3)).

- Zixiang Li, Zhengqing Miao, Xusheng Shen, Jiangtao Li (2018). *Effects of momentum ratio and velocity difference on combustion performance in lignite-fired pulverized boiler.* (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.082>).
- Kim et al (2019). *Empirical Formula to Predict the NOx Emissions from Coal Power Plant using Lab-Scale and Real-Scale Operating Data.*
- Jie qiang Ji, Leming Cheng, Yang jun Wei, Junfeng Wang, Xin yu Gao, Meng xiang Fang, Qin hui Wang (2019). *Predictions of NOx/N2O emissions from an ultra-supercritical CFB boiler using a 2-D comprehensive CFD combustion model.* (<https://doi.org/10.1016/j.partic.2019.04.003>).
- James Hart, Arafat A. Bhuiyan, Jamal Naser (2018). *Aerodynamics of burner jet in a tangentially-fired boiler: A CFD modelling and experiment.*
- Zixiang Li, Zhengqing Miao (2019). *Primary air ratio affects coal utilization mode and NOx emission in lignite pulverized boiler.* (<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.02.030>).
- DONGFANG Boiler Group Co, LTD (2008). 96M-3SM Combustion Equipment Instruction.
- Hachenberg, Niko (2014). *Predictions of NOx emissions in pulverized coal combustion.* (<https://doi.org/10.18297/etd/557>)

Lampiran 1 Data Parameter Coal Flow Pada saat Performance test unit 2

NPIR Test Unit 2

Reporting Period

From 07/17/2019 09:00:00 To 07/17/2019 11:01:00

01 20DEHDSC06-09011A.UNI	@ Ovation Control Builder 6	0 20H10CQ202.U?	S_A LOW SHTR OL FLUE GAS O2 CT
02 20HFB50GC001A101.UNIT	ECF A FEEDRATE FEEDBACK	1 20HNA10CQ201	GAH A OUTL FLUE GAS O2 CT
03 20HFB40GC001A101.UNIT	ECF B FEEDRATE FEEDBACK	1 20H20CQ201.U?	S_B LOW SHTR OL FLUE GAS O2 CT
04 20HFB30GC001A101.UNIT	ECF C FEEDRATE FEEDBACK	1 20H20CQ202.U?	S_B LOW SHTR OL FLUE GAS O2 CT
05 20HFB20GC001A101.UNIT	ECF D FEEDRATE FEEDBACK	1 20HNA20CQ201	GAH B OUTL FLUE GAS O2 CT
06 20HFB10GC001A101.UNIT	ECF E FEEDRATE FEEDBACK	1	
07 FUEL-COAL-FLW-09040A	FUEL COAL FLOW	1	
08 20H10CQ201.UNIT2@WS	S_A LOW SHTR OL FLUE GAS O2 CT	1	

Date-Time	01 MW	02 T/H	03 T/H	04 T/H	05 T/H	06 T/H	07 T/H	08 %	09 %	10 %	11 %	12 %	13 %	14	15	16
7/17 2:00:00	299.268	-0.123	42.889	42.724	42.678	41.978	170.414	0.012	1.851	2.581	0.462	0.397	2.901			
7/17 2:01:00	298.951	-0.123	42.990	42.806	42.536	41.978	170.387	0.012	1.959	2.951	0.492	0.662	3.289			
7/17 2:02:00	299.863	-0.123	42.990	42.706	42.838	41.754	170.414	0.012	2.221	2.755	0.719	0.538	2.833			
7/17 2:03:00	300.418	-0.123	43.131	42.788	42.898	41.955	170.383	0.012	2.131	2.644	0.668	0.834	3.117			
7/17 2:04:00	300.893	-0.123	42.889	42.848	42.578	41.731	170.361	0.014	2.110	3.170	0.588	0.494	3.310			
7/17 2:05:00	300.735	-0.123	42.770	42.990	42.719	41.836	170.412	0.004	2.062	2.558	0.611	0.698	2.957			
7/17 2:06:00	299.585	-0.123	42.811	42.889	42.719	41.873	170.412	0.004	2.182	2.982	0.925	1.143	3.281			
7/17 2:07:00	300.061	-0.123	43.012	42.848	42.678	41.891	170.369	0.010	1.946	2.678	0.643	0.775	2.909			
7/17 2:08:00	299.902	-0.123	42.930	42.866	42.697	41.813	170.395	0.010	2.028	2.732	0.267	0.445	3.001			
7/17 2:09:00	300.219	-0.123	42.870	42.925	42.660	41.831	170.385	0.008	1.948	3.058	0.533	0.805	3.128			
7/17 2:10:00	300.219	-0.123	43.049	43.026	42.536	41.813	170.387	0.008	2.135	2.571	0.388	0.813	3.033			
7/17 2:11:00	301.052	-0.123	42.788	42.889	42.678	41.795	170.433	0.008	2.335	2.974	0.843	1.177	3.289			
7/17 2:12:00	300.735	-0.123	42.971	42.866	42.738	41.836	170.407	0.008	2.051	2.558	0.643	0.939	2.962			
7/17 2:13:00	299.426	-0.123	43.054	42.925	42.957	41.891	170.442	0.008	1.980	2.867	0.672	1.320	3.333			
7/17 2:14:00	300.219	-0.123	43.012	42.788	42.701	41.854	170.351	0.008	2.022	2.833	1.015	1.494	3.033			
7/17 2:15:00	300.100	-0.123	42.889	43.049	42.738	41.854	170.368	0.008	1.936	2.592	0.758	0.872	3.193			
7/17 2:16:00	299.268	-0.123	42.710	42.866	42.678	41.836	170.371	0.008	2.146	3.043	0.798	1.051	3.315			
7/17 2:17:00	299.426	-0.123	43.090	42.889	42.797	41.914	170.390	0.008	1.955	2.497	0.554	0.908	2.886			
7/17 2:18:00	299.268	-0.123	42.870	42.884	42.820	41.914	170.378	0.008	1.944	2.858	0.578	0.946	3.312			
7/17 2:19:00	300.061	-0.123	42.930	42.925	42.678	41.735	170.375	0.008	2.383	2.774	0.700	1.042	3.058			
7/17 2:20:00	299.744	-0.123	42.912	43.044	42.916	41.873	170.366	0.008	1.774	2.516	0.464	0.794	3.247			
7/17 2:21:00	299.426	-0.123	42.944	42.806	42.559	41.795	170.405	0.008	2.364	3.230	0.851	1.404	3.304			
7/17 2:22:00	298.594	-0.123	42.747	42.907	42.637	41.932	170.440	0.008	2.030	2.652	0.407	0.748	3.123			
7/17 2:23:00	297.801	-0.123	42.971	42.948	42.916	41.914	170.424	0.019	2.051	2.951	0.826	1.162	3.500			
7/17 2:24:00	298.792	-0.123	43.072	43.008	42.518	41.854	170.371	0.019	2.106	2.678	0.376	0.803	3.090			
7/17 2:25:00	299.109	-0.123	43.118	43.218	42.779	41.813	170.386	0.008	1.784	2.629	0.597	0.765	3.327			
7/17 2:26:00	298.951	-0.123	42.907	43.159	42.898	41.772	170.438	0.008	2.049	3.037	0.870	1.227	3.384			
7/17 2:27:00	298.594	-0.123	42.747	43.008	42.600	41.772	170.427	0.008	1.887	2.533	0.813	1.059	3.128			
7/17 2:28:00	297.484	-0.123	43.031	42.884	42.719	41.854	170.425	0.025	2.200	2.915	0.702	0.700	3.439			
7/17 2:29:00	298.118	-0.123	42.889	42.806	42.738	42.014	170.427	0.012	2.259	2.573	0.473	1.162	2.972			
7/17 2:30:00	298.118	-0.123	42.811	42.848	42.500	41.813	170.386	0.016	2.156	2.842	0.767	1.280	3.331			
7/17 2:31:00	299.426	-0.123	42.912	42.825	42.838	41.978	170.419	0.012	2.182	2.777	0.777	1.271	3.209			
7/17 2:32:00	299.268	-0.123	42.889	42.761	42.518	41.772	170.397	0.012	1.728	2.491	0.500	0.969	3.338			
7/17 2:33:00	299.902	-0.123	42.971	42.706	42.779	41.914	170.417	0.012	2.192	2.968	0.531	0.698	3.329			
7/17 2:34:00	298.951	-0.123	42.990	42.825	42.697	41.914	170.418	0.012	1.709	2.526	0.731	1.154	3.315			
7/17 2:35:00	298.792	-0.123	42.930	42.806	42.683	41.918	170.395	0.004	2.110	2.854	1.137	1.419	3.441			
7/17 2:36:00	298.792	-0.123	42.848	42.729	42.880	41.854	170.433	0.014	1.902	2.680	0.847	0.815	3.220			
7/17 2:37:00	298.951	-0.123	42.765	42.646	42.738	41.772	170.396	0.014	1.879	2.676	0.653	0.843	3.209			
7/17 2:38:00	298.594	-0.123	43.012	42.788	42.697	41.873	170.421	0.002	2.112	3.132	0.643	0.929	3.411			
7/17 2:39:00	298.277	-0.123	42.889	42.600	42.678	41.831	170.396	0.010	1.582	2.573	0.397	0.592	3.125			
7/17 2:40:00	298.792	-0.123	42.930	42.793	42.779	41.914	170.421	0.010	2.018	2.814	0.777	1.479	3.359			
7/17 2:41:00	298.951	-0.123	42.912	42.747	42.335	41.873	170.376	0.010	1.643	2.575	0.586	0.748	3.085			
7/17 2:42:00	299.109	-0.123	42.907	42.788	42.742	41.854	170.388	0.010	1.824	2.747	0.578	0.800	3.189			
7/17 2:43:00	298.792	-0.123	42.889	42.806	42.523	41.895	170.431	0.010	1.824	3.127	0.416	0.592	3.334			
7/17 2:44:00	299.268	-0.123	42.990	42.784	42.738	41.795	170.416	0.010	1.805	2.543	0.559	0.985	3.065			
7/17 2:45:00	298.396	-0.123	42.999	42.724	42.999	41.836	170.393	0.006	1.952	2.930	0.750	0.843	3.298			

Lampiran 2 Properties Batubara

PT INDONESIA POWER	PT INDONESIA POWER	No. Dokumen: FORM-BUB-18-0505-09					
	INDONESIA POWER INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM	Tanggal: 05 Agustus 2017					
	IN POWER RECORD DOKUMEN	Revisi: 00					
	LAPORAN HASIL PENGUJIAN BAHAN	Halaman: 01					
PTSD/INLRC/MSLB							
KODE CONTOH PELANGGAN	:	PERFORMANCE TEST LRC #2 JULI 2018					
CONTOH	:	Sulawesi					
NAMA PELANGGAN	:	Bidang Efisiensi PT Indonesia Power UJP Banten 2 Labuan					
ALAMAT	:	Jln Raya Laba Terusan Panimbang Ds. Sukamaju Kec. Labuan kab. Pandeglang, Banten 42264					
NAMA LABORATORIUM	:	Laboratorium pengujian PT Indonesia Power UJP Banten 2 Labuan					
ALAMAT	:	Jln Raya Laba Terusan Panimbang Desa Sukamaju Kec. Labuan Kabupaten Pandeglang, Banten 42264 (Rt. 311)					
DITERIMA DARI	:	Bidang Energi Primer					
TGL. DITERIMA	:	170802018					
TGL. PENGULAN	:	180812018					
URAIAN IDENTIFIKASI CONTOH	:	Sampel dalam plastik					
No.	PARAMETER	SATUAN	HASIL PENGUJIAN			METODE TEST	
			AS RECEIVED	AIR DRIED BASIS	DRY BASIS	DRY ASH FREE	#STW
01.	MOISTURE IN ANALYSIS SAMPLE	%W	-	18.80	-		DT900-15
02.	TOTAL MOISTURE	%W	30.17	-	-		Q9000-12
03.	ASH CONTENT	%W	8.43	7.35	9.21		DT900-15
04.	VOLATILE MATTER	%W	35.25	40.47	58.52	58.84	DT900-15
05.	FIXED CARBON	%W	38.12	32.26	48.27	44.35	By difference
06.	GROSS CALORIFIC VALUE	KCal/kg	4280.27	4910.10	8128.98	6752.08	D5865-13
07.	TOTAL SULFUR	%W	0.18	0.20	0.27	0.30	D4038-17
08.	CARBON	%W	43.74	52.47	85.80	72.18	Q8473-16
10.	HYDROGEN	%W	3.32	6.84	4.76	5.58	Q5373-15
11.	NITROGEN	%W	0.81	0.70	0.87	0.98	D5574-15
12.	OXYGEN	%W	13.54	32.25	18.38	21.35	By difference
Labuan, 30 Juli 2018 SPS KIMIA DAN BOP  (NUGROHO HARIADI)							
Hasil uji / analisa yang berhubungan dengan contoh yang diuji dan laporan pengujian tidak dapat digandakan kecuali secara keseluruhan tanpa persetujuan tertulis dari Laboratorium PT. Indonesia Power UJP Banten 2 Labuan							

	PT INDONESIA POWER	No. Dokumen: FORM.DLI.05.05.0002
	INDONESIA POWER INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM	Tanggal: 05 Agustus 2017
	IN POWER RECORD DOKUMEN	Revisi: 00
	LAPORAN HASIL PENGUJIAN BATUBARA	Halaman: 1/1

PT0018MRC0002

KODE CONTOH PELANGGAN : PERFORMANCE TEST MRC 03 JULI 2019
CONTOH : Batubara
NAMA PELANGGAN : Bidang Efisiensi PT Indonesia Power UJP Banten 2 Labuan
ALAMAT : Jln Raya Laba Terusan Panimbang Ds. Sukaraja
 Kec. Labuan kab. Pandeglang, Banten 42264

NAMA LABORATORIUM : Laboratorium pengujian PT Indonesia Power UJP Banten 2 Labuan
ALAMAT : Jln Raya Laba Terusan Panimbang Desa Sukaraja Kec. Labuan Kabupaten Pandeglang , Banten 42264 (Ext. 311)
DITERIMA DARI : Bidang Energi Primer
TGL. DITERIMA : 12/07/2018
TGL. PENGULAN : 18/07/2018
URAIAN / IDENTIFIKASI CONTOH : Sampel dalam plastik

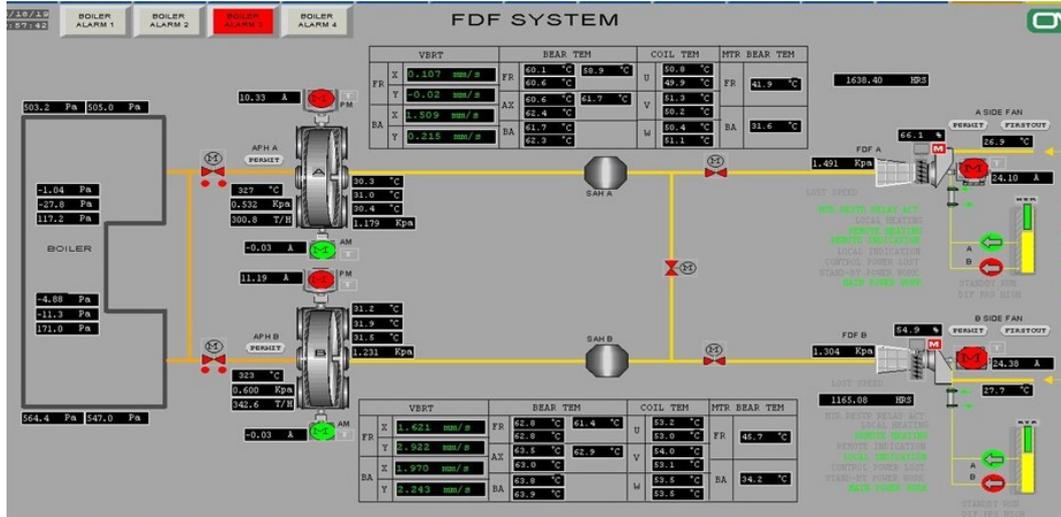
No.	PARAMETER	SATUAN	HASIL PENGUJIAN				METODE TEST
			AS RECEIVED	AIR DRAID BASIS	DRY BASIS	DRY ASH FREE	
01.	MOISTURE IN ANALYSIS SAMPLE	%W	-	12.08	-	-	D7902-15
02.	TOTAL MOISTURE	%W	28.18	-	-	-	D9302-10
03.	ASH CONTENT	%W	8.18	7.52	8.60	-	D7902-15
04.	VOLATILE MATTER	%W	30.42	29.42	42.14	49.28	D7902-15
05.	FIXED CARBON	%W	32.22	40.42	48.28	58.91	By difference
06.	GROSS CALORIFIC VALUE	KCal/kg	4820.78	5802.20	6712.27	7344.19	D9000-13
08.	TOTAL SULPHUR	%W	0.45	0.55	0.62	0.69	D4220-17
09.	CARBON	%W	68.03	68.68	68.67	70.22	D4273-16
10.	HYDROGEN	%W	3.64	3.88	3.08	3.82	D4273-16
11.	NITROGEN	%W	0.73	0.92	1.25	1.15	D4273-16
12.	OXYGEN	%W	10.76	24.32	14.97	18.28	By difference

Labuan, 30 Juli 2018
 SPS KEM, DAN SOP

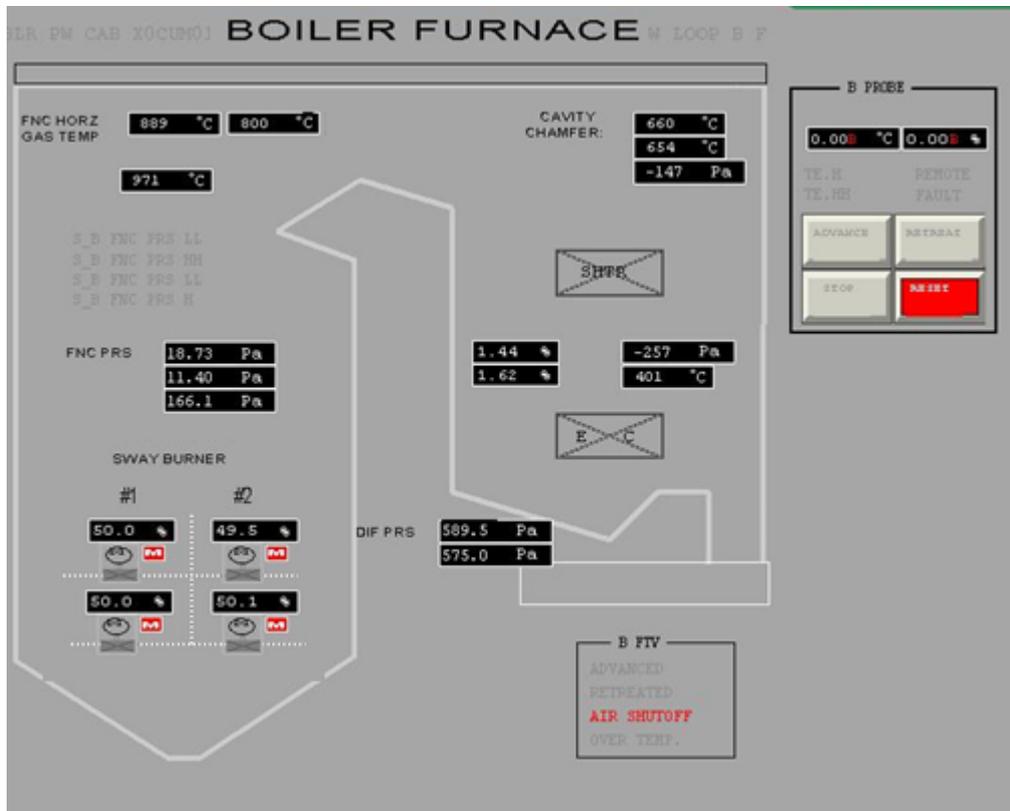
 (NUGROHO HARADI)

Hasil Uji / analisa yang berhalangan dengan contoh yang diuji dan laporan pengujian tidak dapat digandakan kecuali secara keseluruhan tanpa pemotretan bertulis dari Laboratorium PT. Indonesia Power UJP Banten 2 Labuan

Lampiran 3 Parameter DCS



Gambar FDF Penyuplai Udara Secondary



Gambar Parameter Furnace pada DCS

Lampiran Tabel

Tabel Data outlet Udara Primer

MSM A	Coal Flow T/H	Velocity m/s	Temperature °C	Primary Air	PA Flow T/H	MSM D	Coal Flow T/H	Velocity m/s	Temperature °C	Primary Air	PA Flow T/H
Total coal	43.55			PA A	103.7	Total coal	0.16		62.3	PA D	31.62
#1		32.60	52.1			#1		0			
#2		32.60	52.1			#2		0			
#3		32.60	52.1			#3		0			
#4		32.60	52.1			#4		0			
MSM B						MSM E					
Total coal	36.99			PA B	120	Total coal	41.75			PA E	61.89
#1		24.32	52.1			#1		27.425	52.5		
#2		24.32	52.1			#2		27.425	52.5		
#3		24.32	52.1			#3		27.425	52.5		
#4		24.32	52.1			#4		27.425	52.5		
MSM C											
Total coal	42.92			PA C	70.48						
#1		28.28	52.5								
#2		28.28	52.5								
#3		28.28	52.5								
#4		28.28	52.5								

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Taufik Hidayat, dilahirkan di Jakarta pada 5 Desember 1981. Penulis merupakan anak kedua dari Pasangan Bapak Rohmat dan Ibu Rukmini. Penulis seorang memiliki seorang kakak dan enam orang adik. Penulis sudah berkeluarga dengan orang istri dan 2 orang anak putri. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN 01 Tegal parang, Jakarta di tahun 1993, Pendidikan menengah ditempuh di SMPN 104 Jakarta dan Pendidikan atas penulis tempuh di SMUN 60 Jakarta ditahun 1999. Setelah lulus SMU pada tahun penulis melanjutkan Pendidikan tinggi di Universitas Indonesia dengan mengambil jurusan Teknik mesin dan lulus di tahun 2004.

Setelah lulus perguruan tinggi penulis sempat bekerja di beberapa perusahaan kontraktor sebagai estimator, dan tahun 2006 Penulis pindah ke ke perusahaan Co-generation Power Plant diserang sebagai Project and Improvement Engineer. Selanjutnya di tahun 2008 penulis diterima di PT Indonesia Power. Pada saat ini Penulis di tempatkan di Indonesia Power Labuan OMU. Pada 2009- 2018 penempatan di bagian Operasi unit dan 2018- sekarang penulis ditempatkan sebagai Ahli Madya Pengendali Kontrak.