



**TESIS-TM185400**

**STUDI NUMERIK PENGARUH SUDUT *TILT BURNER*  
TERHADAP *REAR PASS TEMPERATURE BOILER* PLTU  
BANTEN 1 SURALAYA PADA KONDISI BATUBARA LRC DAN  
MRC**

**NUGROHO SETYO HUTOMO**

**NRP. 02111750058014**

**DOSEN PEMBIMBING**

**Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D**

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





TESIS-TM185400

**STUDI NUMERIK PENGARUH SUDUT *TILT*  
BURNER TERHADAP REAR PASS  
TEMPERATURE BOILER PLTU BANTEN 1  
SURALAYA PADA KONDISI BATUBARA LRC  
DAN MRC**

**NUGROHO SETYO HUTOMO**  
02111750058014

**DOSEN PEMBIMBING**  
Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D

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

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# LEMBAR PENGESAHAN TESIS

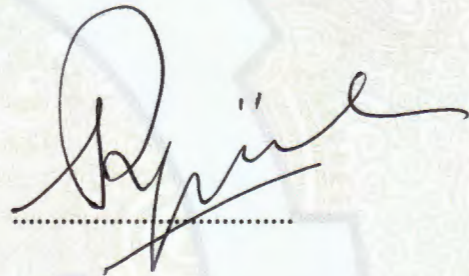
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
**Magister Teknik (MT)**

di  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:  
**NUGROHO SETYO HUTOMO**  
**02111750078014**

Tanggal Ujian: 17 Januari 2020  
Periode Wisuda: Maret 2020

Disetujui oleh:  
**Pembimbing:**

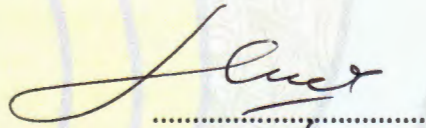


.....

1. Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D  
NIP 197303222001221001

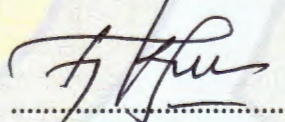
**Penguji:**

1. Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab, MSc.  
NIP 195204171979031002



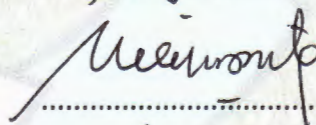
.....

2. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA  
NIP 196508101991021001



.....

3. Dr. Ir. Heru Mirmanto, M.T.  
NIP 196202161995121001



.....


4. Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng., Sc.  
NIP 197805102001121001



.....

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 Sudut *Tilt Burner* Terhadap *Rear Pass Temperature Boiler* PLTU Banten 1 Suralaya pada Kondisi Batubara LRC dan MRC

Nama Mahasiswa : Nugroho Setyo Hutomo  
Mahasiswa ID : 02111750078014  
Pembimbing : Arif Wahjudi, Ph.D

## ABSTRAK

Batubara sebagai bahan bakar utama *boiler* mempunyai pengaruh yang dominan terhadap karakteristik pembakaran dan penyerapan panas di *boiler*. Variasi spesifikasi batubara yang berasal dari berbagai macam suplier yang berbeda memerlukan pengaturan terhadap pola pengoperasian *boiler* agar efisiensi pembakaran dapat ditingkatkan dan kegagalan pada pipa-pipa *boiler* dapat dicegah. Salah satu fasilitas untuk pengaturan pola pembakaran pada *boiler* adalah dengan setting pada sudut *tilt burner*. Pengaturan ini digunakan untuk mengarahkan aliran dan pembentukan *fireball* di area *furnace*. Akan tetapi, pengaturan setting *tilt burner* tersebut sulit untuk dilakukan secara langsung pada saat *boiler* beroperasi karena dapat mempengaruhi kestabilan dan keandalan operasi *boiler*. Oleh karena itu, data simulasi diperlukan untuk memberikan prediksi perubahan setting sudut *tilt burner* terhadap kondisi pembakaran pada *boiler*, khususnya *rear pass temperature*.

Penelitian ini menggunakan metode simulasi numerik pada *software* CFD untuk mengetahui data temperatur pada area *boiler rear pass* serta deviasi temperatur di sisi *left* dan *right* untuk input nilai kalor yang berbeda. Data *output* simulasi selanjutnya diproses dengan metode gabungan *backpropagation neural network-genetic algorithm* (BPNN-GA) untuk mendapatkan setting sudut *tilt burner* pada nilai kalor batubara tertentu yang dapat menurunkan deviasi temperatur *left* dan *right side boiler* dan meminimalkan *boiler rear pass temperature*.

Penelitian menghasilkan sudut *tilt burner* optimal  $+3^{\circ}$  untuk batubara LRC dan  $+14^{\circ}$  untuk batubara MRC-LRC. Sudut *tilt burner*  $+3^{\circ}$  menghasilkan deviasi *rear pass temperature* sebesar 11,94 K dengan temperatur sisi A dan B berturut-turut sebesar 811,99 K dan 823,93 K. Sedangkan deviasi temperatur pada sudut  $+14^{\circ}$  adalah 20,36 K dengan *rear pass temperature* sisi A dan B berturut-turut sebesar 867,4 K dan 887,75 K. Disamping menurunkan deviasi temperatur sisi A dan B, sudut *tilt burner*  $+3^{\circ}$  juga menghasilkan peningkatan pemerataan temperatur pada area *furnace* sebesar 39,95% dan peningkatan penyerapan panas pada susunan *heat exchanger* sebesar 3,66%. Begitu juga pada posisi sudut *tilt burner*  $+14^{\circ}$ , pemerataan temperatur pada area *furnace* meningkat sebesar 56,17% sedangkan penyerapan panas pada susunan *superheater* meningkat sebesar 1,73%.

**Kata kunci** : nilai kalor, *tilt burner*, *rear pass temperature*, pola pembakaran, *fireball*, CFD, BPNN-GA

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



# **Numerical Study Effect of Burner Tilt Angle on the Boiler Rear Pass Temperature on PLTU Banten 1 Suralaya under LRC and MRC Coal Conditions**

Name : Nugroho Setyo Hutomo  
NRP : 02111750078014  
Advisor : Arif Wahjudi, Ph.D

## **ABSTRACT**

As the main fuel, coal plays an important role in the boiler's characteristics of combustion and heat absorption. Variations in coal specifications influenced by differences in suppliers will cause the need for adjustments of the boiler operating pattern so that combustion efficiency can be improved and failure on boiler pipes can be prevented. One of the facilities for setting the combustion pattern on the boiler is the tilt burner angle setting. This setting is used to direct the flow and formation of fireballs in the furnace area. However, it is difficult to be directly conducted in the operating condition because it will affect the boiler's stability and reliability. Therefore, simulation data is required to predict the suitable setting of the tilt burner angle regarding the combustion conditions, especially the rear pass temperature.

This research applied a numerical simulation method using the CFD software to identify the temperature data in the boiler rear pass area and the temperature deviation between the left and right sides based on different heat values. The simulation result then was proceed using the combination of backpropagation neural network and genetic algorithm (BPNN-GA) to obtain the setting of the tilt burner angle based on the certain heat value of coal. This setting of the tilt burner angle is able to minimize the temperature deviation between the left and right sides and the rear pass temperature of the boiler.

The research resulted in the optimal tilt burner angle of  $+3^{\circ}$  for LRC coal and  $+14^{\circ}$  for MRC-LRC coal. The tilt burner angle  $+3^{\circ}$  produced a rear pass temperature deviation of 11.94 K while the side temperatures of A and B equal to 811.99 K and 823.93 K, respectively. In addition, the temperature deviation at the angle of  $+14^{\circ}$  was 20.36 K while the rear pass side temperatures A and B were 867.4 K and 887.75 K, respectively. Besides decreasing temperature deviation of sides A and B, tilt burner angle  $+3^{\circ}$  also increased the uniformity of the temperature in the furnace area by 39.95% and increased heat absorption in the heat exchangers at 3.66%. Likewise, the temperature uniformity of the furnace area at the tilt burner angle of  $+14^{\circ}$  also increased by 56.17% while the heat absorption in the superheater arrangement increased by 1.73%.

**Keywords** : calorific value, tilt burner, rear pass temperature, combustion characteristic , fireball, CFD, BPNN-GA

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **KATA PENGANTAR**

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 Sudut Tilt Burner Terhadap Rear Pass Temperature Boiler PLTU Banten 1 Suralaya pada Kondisi Batubara LRC dan MRC”. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, do’a, dan dukungan dari beberapa pihak, maka penyusunan tesis ini tidak dapat berjalan sesuai harapan. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua : Bapak Sutrisno dan Ibu Sugijarti, mertua : Bapak Sarmana dan Ibu Sunah, keluarga: Istri Astuti, Anak Daffa Adzkie Aqhar dan Rafaz Fazlehaq Aqhar yang senantiasa memberikan do’a, dorongan dan dukungan tanpa henti kepada penulis.
2. Dosen pembimbing Bapak Arif Wahjudi, ST., MT. Ph.D. yang telah memberikan saran, pencerahan, dan motivasi dalam proses penyelesaian tesis ini.
3. Bapak dan Ibu dosen Departemen Teknik Mesin ITS yang telah mendidik penulis selama masa perkuliahan.
4. Seluruh rekan-rekan program S2 Manajemen Energi KKIP yang secara langsung maupun tidak langsung bersinergi ikut membantu dalam proses penulisan tesis ini.
5. Seluruh rekan-rekan Divisi Pengembangan Talenta Kantor Pusat PT Indonesia Power dan Staf Sekretariat Departemen Teknik Mesin atas segala bantuan dan dukungan selama menjalani program S2 Manajemen Energi.
6. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per-satu atas segala bantuan serta dukungan untuk penyusunan tesis ini.

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 TESIS .....   | iii  |
| ABSTRAK .....   | v    |
| KATA PENGANTAR .....  | ix   |
| DAFTAR ISI.....   | xi   |
| DAFTAR GAMBAR .....   | xiii |
| DAFTAR TABEL.....   | xv   |
| BAB 1 PENDAHULUAN .....   | 1    |
| 1.1 Latar Belakang Masalah.....   | 1    |
| 1.2 Perumusan Masalah.....  | 4    |
| 1.4 Tujuan Penelitian.....  | 4    |
| 1.5 Manfaat Hasil Penelitian .....  | 5    |
| BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....   | 7    |
| 2.1 Boiler.....   | 7    |
| 2.2 Pembakaran Bahan Bakar Batubara .....   | 12   |
| 2.3 Simulasi Numerik CFD Pembakaran Batubara pada Boiler .....                    | 14   |
| 2.3 <i>Artificial Neural Network</i> (ANN) dan <i>Genetic Algorithm</i> (GA)..... | 16   |
| 2.4 Penelitian Terdahulu .....  | 20   |
| BAB 3 METODE PENELITIAN.....  | 37   |
| 3.1 Tahapan Penelitian .....  | 37   |
| 3.2 Rancangan Penelitian .....  | 38   |
| 3.3 <i>Flowchart</i> Penelitian .....   | 41   |

|   |     |
|---|-----|
| BAB 4 PEMODELAN DAN OPTIMASI.....   | 43  |
| 4.1 Pemodelan dan Simulasi.....   | 43  |
| 4.2 Validasi Model Simulasi.....  | 53  |
| 4.3 Optimasi Hasil Simulasi .....   | 56  |
| BAB 5 ANALISA DAN PEMBAHASAN .....  | 59  |
| 5.1 Validasi Analisa Numerik.....   | 59  |
| 5.2 Optimasi <i>Burner Tilt Angle</i> Terhadap <i>Rear Pass Temperature</i> .....           | 61  |
| 5.3 Analisa Hasil Optimasi .....  | 66  |
| 5.3.1 Analisa Temperatur .....  | 67  |
| 5.3.2 Analisa Velocity .....  | 74  |
| 5.3.3 Analisa Gas Pembakaran .....  | 78  |
| BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN .....  | 85  |
| 6.1 Kesimpulan.....   | 85  |
| 6.2 Saran .....   | 85  |
| DAFTAR PUSTAKA.....   | 87  |
| LAMPIRAN 1 Data Parameter <i>Performance Test</i> PLTU Banten 1 Suralaya.....               | 89  |
| LAMPIRAN 2 <i>Resume Performance Test</i> PLTU Banten 1 Suralaya.....                       | 93  |
| LAMPIRAN 3 <i>Coal Analysis Report</i> .....  | 95  |
| LAMPIRAN 4 Perhitungan Beban Panas <i>Heat Exchanger</i> dan <i>Waterwall Tube</i><br>..... | 101 |
| LAMPIRAN 5 Perhitungan Udara Pembakaran .....   | 107 |
| BIOGRAFI PENULIS .....  | 109 |

## DAFTAR GAMBAR

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Gambar 1.1  | Deviasi Pada <i>Rear Pass Temperature</i> Boiler.....  | 2  |
| Gambar 2.1  | <i>Typical Coal Fired Boiler for Power Plant</i> .....   | 7  |
| Gambar 2.2  | Ilustrasi <i>Burner</i> dengan Metode <i>Downshot Firing</i> .....   | 9  |
| Gambar 2.3  | Konfigurasi <i>Burner Horizontal Firing</i> .....  | 9  |
| Gambar 2.4  | Ilustrasi <i>Burner</i> pada Boiler <i>Tangential Firing</i> .....   | 10 |
| Gambar 2.5  | Tahapan Proses Pembakaran Partikel Batubara.....   | 14 |
| Gambar 2.6  | Arsitektur <i>Feedforward Neural Network</i> .....   | 17 |
| Gambar 2.7  | Skema <i>Forward Propagation</i> .....   | 18 |
| Gambar 2.8  | Skema Konfigurasi <i>Boiler OB-380</i> .....   | 20 |
| Gambar 2.9  | Kontur Temperatur pada Penampang Melintang <i>Boiler</i> .....   | 21 |
| Gambar 2.10 | <i>General Arrangement</i> dan Penampang Melintang <i>Boiler</i> .....   | 21 |
| Gambar 2.11 | Distribusi Temperatur Gas Pada <i>Boiler</i> .....   | 22 |
| Gambar 2.12 | Distribusi Kecepatan Dalam <i>Boiler</i> .....   | 23 |
| Gambar 2.13 | Distribusi <i>Tube Metal Temperature</i> dan <i>Main Steam Temperature</i> pada <i>Final Superheater</i> ..... | 24 |
| Gambar 2.14 | Skematik Konfigurasi <i>Boiler</i> .....   | 25 |
| Gambar 2.15 | Distribusi Kecepatan dan Temperatur <i>Boiler</i> .....  | 26 |
| Gambar 2.16 | Distribusi Kecepatan dan Temperatur pada Area <i>Inlet Final Reheater Tube Banks</i> .....                     | 26 |
| Gambar 2.17 | Distribusi Temperatur Pada Area <i>Inlet Final Reheater</i> Hasil Simulasi Case 1 – 6.....                     | 27 |
| Gambar 2.18 | Skematik <i>Boiler</i> dan Kontrol Penampang Melintang.....  | 28 |
| Gambar 2.19 | Grafik Plot <i>Rear Pass Temperature</i> Boiler.....   | 29 |
| Gambar 2.20 | Kontur Kecepatan <i>Boiler</i> dengan Batubara LRC.....  | 30 |
| Gambar 2.21 | Kontur Temperatur <i>Boiler</i> .....  | 31 |
| Gambar 2.22 | Skematik Konfigurasi <i>Boiler</i> dan Data Spesifikasi Batubara.....  | 33 |
| Gambar 2.23 | Kontur Distribusi Temperatur dan Temperatur Rata-Rata <i>Boiler</i> pada Berbagai Elevasi.....                 | 34 |
| Gambar 2.24 | Gambar Grafik Perbandingan Distribusi Temperatur <i>Boiler</i> .....   | 35 |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Gambar 3.1 | Skema <i>Surface</i> Yang Akan Dilakukan Analisa .....                                 | 40 |
| Gambar 3.2 | <i>Flowchart</i> Metode Penelitian.....  | 41 |
| Gambar 4.1 | Geometri Boiler PLTU Banten 1 Suralaya (Tampak Samping).....                           | 43 |
| Gambar 4.2 | Domain Pemodelan Simulasi.....   | 44 |
| Gambar 4.3 | <i>Meshing</i> Geometri <i>Boiler</i> .....  | 45 |
| Gambar 4.4 | <i>Burner Arrangement</i> .....  | 48 |
| Gambar 4.5 | Sudut <i>Yaw</i> pada <i>Nozzle Burner</i> dan <i>Auxiliary Air</i> .....              | 50 |
| Gambar 4.6 | Posisi Titik Validasi pada <i>Boiler</i> .....   | 56 |
| Gambar 4.7 | <i>Script ANN Training</i> pada <i>Software MATLAB</i> .....                           | 57 |
| Gambar 4.8 | <i>Script Objective Function</i> dan <i>Genetic Algorithm</i> pada <i>MATLAB</i> ..... | 58 |
| Gambar 5.1 | Nilai $t_{\alpha/2, n-1}$ untuk $\alpha = 5\%$ dan <i>25 Degree of Freedom</i> .....   | 60 |
| Gambar 5.2 | Grafik Kondisi <i>Boiler Rear Pass Temperature</i> pada Variasi Input Batubara.....    | 64 |
| Gambar 5.3 | Kontur Temperatur Pada Area <i>Inlet Boiler Backpass</i> .....                         | 66 |
| Gambar 5.4 | Perbandingan Kontur Distribusi Temperatur Hasil Optimasi.....                          | 68 |
| Gambar 5.5 | Kontur Distribusi Temperatur Pada Penampang Horisontal.....                            | 70 |
| Gambar 5.6 | Grafik Perbandingan <i>Average Temperature</i> pada Setiap Elevasi...72                |    |
| Gambar 5.7 | Perbandingan Kontur Distribusi Temperatur Hasil Optimasi.....                          | 75 |
| Gambar 5.8 | Kontur Distribusi Kecepatan Pada Penampang Horisontal.....                             | 77 |
| Gambar 5.9 | Kontur Distribusi Fraksi Massa O <sub>2</sub> dan CO <sub>2</sub> Hasil Simulasi.....  | 80 |



## DAFTAR TABEL

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Tabel 2.1 | <i>Case Simulasi Variasi Burner Tilt Angle</i> .....                                 | 25 |
| Tabel 2.2 | Pengaruh Sudut <i>Tilting</i> Terhadap Temperatur <i>Boiler</i> .....                | 32 |
| Tabel 2.3 | Setup Numerik Pemodelan.....   | 33 |
| Tabel 3.1 | Rancangan Parameter Penelitian.....  | 39 |
| Tabel 4.1 | <i>Set Up Model</i> pada <i>software</i> ANSYS Fluent .....                          | 46 |
| Tabel 4.2 | <i>Heat Absorption</i> pada Jajaran <i>Heat Exchanger</i> .....                      | 47 |
| Tabel 4.3 | <i>Boundary Condition</i> Untuk <i>Auxiliary Air</i> .....                           | 48 |
| Tabel 4.4 | <i>Setup Inlet Boundary Condition</i> .....  | 49 |
| Tabel 4.5 | Sudut <i>Yaw</i> pada <i>Nozzle Burner</i> dan <i>Auxiliary Air</i> .....            | 51 |
| Tabel 4.6 | Properties Batubara Setup Pemodelan.....   | 52 |
| Tabel 4.7 | <i>Setup Point Properties</i> pada Masing-Masing <i>Coal Burner Injection</i> .....  | 52 |
| Tabel 4.8 | Tabel Nilai Distribusi <i>t</i> .....  | 55 |
| Tabel 5.1 | Data Nilai <i>Sample</i> Hasil Ukur Pada Titik Validasi.....                         | 59 |
| Tabel 5.2 | <i>Resume Rear Pass Temperature</i> pada <i>Variasi Burner Tilt Angle</i> ..         | 62 |
| Tabel 5.3 | Hasil Training Struktur BPNN.....  | 62 |
| Tabel 5.4 | Hasil Optimasi <i>Genetic Algorithm</i> .....  | 63 |
| Tabel 5.5 | Temperatur Output Simulasi.....  | 63 |
| Tabel 5.6 | Nilai <i>Average Temperature</i> pada Setiap Elevasi Hasil Optimasi..                | 73 |
| Tabel 5.7 | Perbandingan Temperatur <i>Flue Gas</i> Melewati Susunan <i>Heat Exchanger</i> ..... | 74 |
| Tabel 5.8 | Data Kuantitatif Fraksi Massa O <sub>2</sub> dan CO <sub>2</sub> .....               | 82 |



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

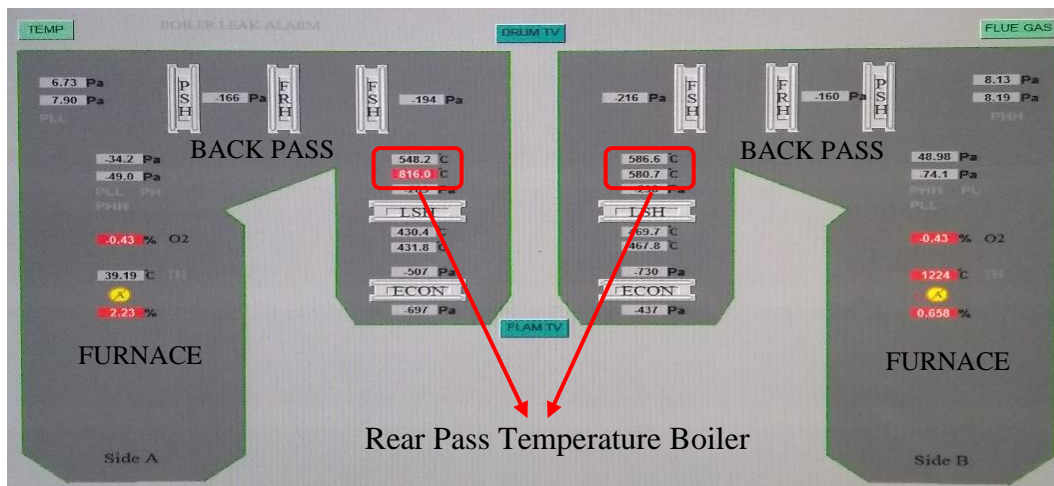
Unit Jasa Pembangkitan Banten 1 Suralaya (UJP BSR) adalah salah satu unit bisnis PT Indonesia Power yang khusus bergerak di bidang Jasa *Operation and Maintenance* (O&M). UJP BSR merupakan salah satu PLTU *Fast Track Program* (FTP) 10.000 MW Tahap 1 milik PT PLN (Persero) yang mempunyai kapasitas daya terpasang 1x625MW. Bahan bakar yang digunakan adalah batubara dengan kalori rendah (*low rank coal*) 3900-4500 KCal/kg (LHV/*Low Heating Value*). Konsumsi rata-rata batubara sebanyak 8.000 ton/hari pada beban penuh 625MW.

Salah satu peralatan utama sebuah pembangkit listrik tenaga uap adalah *boiler*, yang berfungsi untuk memanaskan *demineralized water* menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*) melalui proses perpindahan panas. Sumber panas berasal dari pembakaran batubara di ruang bakar (*furnace*) menuju pipa-pipa air dan uap dengan konstruksi dan konfigurasi tertentu. *Boiler* PLTU Banten 1 Suralaya merupakan produk dari *Shanghai Boiler Works, Ltd.* tipe *Sub-critical Pressure Controlled Circulation Boiler, Single Reheat, Tangential Burner, Pulverized Coal, Balanced Draft*.

Batubara sebagai bahan bakar utama *boiler* PLTU Banten 1 Suralaya saat ini disuplai oleh 10 suplier batubara dengan *range* nilai kalor batubara antara 4.200-4.900 kcal/kg HHV. Batubara tersebut berasal dari berbagai tambang di Sumatera dan Kalimantan. Variasi nilai kalor dan asal tambang tersebut juga menyebabkan variasi karakteristik batubara seperti *Hardgrove Grindability Index* (HGI), *Total Moisture*, *Volatile Matter*, *Ash Content*, *Sulphur*, *Fixed Carbon*. Sayangnya, variasi karakteristik batubara tersebut sangat mempengaruhi pola operasi dan kinerja *boiler* diantaranya efisiensi *boiler*, *exhaust temperature*, *exhaust gas loss*, and *coal combustion*. Kenaikan nilai kalor batubara juga akan meningkatkan *theoretical combustion temperature* dan menurunkan *furnace exit gas temperature* (FEGT). Akibat adanya variasi kinerja, *boiler* memerlukan pengaturan pada pola

pengoperasiannya untuk mendapatkan efisiensi yang optimal serta mencegah *overheating* pada sisi *superheater* dan *reheater* akibat *furnace exit gas temperature* yang terlalu tinggi atau terjadinya *incomplete combustion* pada area *furnace* (Luo, Li, & Wang, 2017).

Selain terjadi variasi kinerja, kondisi parameter operasi *boiler* saat ini juga terjadi deviasi pada *rear pass temperature* boiler dimana temperatur *boiler* sisi B lebih tinggi daripada temperatur sisi A seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1. Perbedaan temperatur tersebut selanjutnya dapat menyebabkan terjadinya deviasi pada temperatur *main steam* maupun *reheat steam* sehingga berpotensi mengakibatkan kerusakan pada pipa-pipa *boiler*.



Gambar 1.1 Deviasi Pada *Boiler Rear Pass Temperature* (sumber : DCS PLTU Banten 1 Suralaya)

Penelitian mengenai variasi sudut *tilt burner* untuk menurunkan *rear pass temperature* pada *boiler* berbahan bakar batubara telah diusulkan oleh Tharangaraju (Tharangaraju, Munisamy, & Baskaran, 2017). Penelitian dilakukan dengan metode numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Sudut *tilt burner* yang tepat akan menghasilkan bentuk *fireball* yang sempurna sehingga distribusi temperatur yang merata di *boiler* dapat diperoleh. Sudut *tilt burner* posisi *downwards* akan menurunkan *rear pass temperature* dan sudut *tilt burner* posisi *upwards* akan menyebabkan kenaikan pada *rear pass temperature*. Sedangkan distribusi temperatur yang paling stabil diperoleh pada posisi sudut *tilt burner*  $0^{\circ}$ .

Posisi *tilt burner upwards* memberikan hasil deviasi distribusi temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan posisi *downwards*.

Penelitian mengenai pembakaran *boiler* juga diusulkan oleh (Fang et al., 2015; Park et al., 2013) dengan metode numerik dengan *software* CFD. Setting posisi sudut *tilt burner* mempengaruhi deviasi temperatur *flue gas* dan *reheat steam*. Terjadinya deviasi temperatur *flue gas* pada area *inlet crossover pass* disebabkan oleh adanya *residual swirling* dari *flue gas* pada area *upper furnace*. Posisi sudut *tilt burner +11°* memberikan hasil paling optimal dimana intensitas *residual swirl* turun sebesar 44% dan kondisi parameter operasi deviasi temperatur *reheat steam* turun dari 22°C menjadi 10°C. Selain itu, setting bias pada posisi sudut *tilt AA damper* (CCOFA : *Close Coupled Over Fire Air*) juga memberikan efek penurunan *residual swirl* dan deviasi temperatur *reheat steam* (Tian, et al., 2015). Pengaturan *yaw angle* pada SOFA (*Separated Over Fire Air*) juga terbukti efektif untuk menurunkan deviasi temperatur *flue gas* tetapi penelitian lebih lanjut mengenai opsi variasi *tilt angle* dari SOFA dan CCOFA damper masih perlu untuk dilakukan (Park, et al., 2013).

Berdasarkan hal-hal yang telah dipaparkan, maka penelitian tentang pengaturan sudut *tilt burner* dan CCOFA damper terhadap *boiler rear pass temperature* dengan variasi nilai kalor batubara di PLTU Banten 1 Suralaya akan diusulkan. Penelitian ini diusulkan untuk menentukan parameter operasi sudut *tilt burner* untuk menyeimbangkan deviasi temperatur *left* dan *right side boiler* dan meminimalkan *boiler rear pass temperature*. Parameter yang divariasikan adalah sudut *tilt burner* dan nilai kalor batubara *input boiler*. Penelitian dilakukan dengan studi numerik menggunakan *software* CFD. Dari beberapa studi literatur maupun pengamatan parameter operasional diambil hipotesa awal bahwa sudut *tilt burner downwards* akan menurunkan *boiler rear pass temperature*. Tetapi sudut *tilt burner* yang terlalu rendah akan mengakibatkan aliran serbuk batubara terlalu ke bawah sehingga *unburn carbon* pada *bottom ash* akan meningkat. Batubara jenis *Medium Rank Coal* (MRC) memerlukan waktu yang lebih lama untuk terbakar sempurna (*complete combustion*) karena mempunyai kadar *carbon* yang lebih tinggi. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan sudut *tilt burner* untuk mengadaptasi perubahan nilai kalor batubara input *boiler*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi sudut *tilt burner* terhadap *rear pass temperature boiler* dengan kondisi batubara LRC dan MRC.
2. Bagaimana pengaruh variasi sudut *tilt burner* terhadap deviasi *rear pass temperature* pada *left side* dan *right side boiler*.
3. Bagaimana pengaturan sudut *tilt burner* yang dapat menyeimbangkan deviasi temperatur *left* dan *right side boiler* dan meminimalkan *rear pass temperature boiler* secara optimal.

## 1.3 Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan masalah yang diambil untuk menganalisa permasalahan di atas yaitu sebagai berikut :

1. Simulasi pembakaran dilakukan pada *boiler* PLTU Banten 1 Suralaya dengan kapasitas terpasang 625 MW.
2. Data analisa batubara dan data parameter operasi yang digunakan adalah data *performance test* PLTU Banten 1 Suralaya pada tanggal 19 Desember 2017 dengan beban 504 MW.
3. Diameter batubara yang digunakan sebagai *input* simulasi dalam kondisi sesuai persyaratan minimal operasi.
4. Unsur yang ada pada *fix carbon* batubara diasumsikan hanya *carbon*.
5. Unsur sulfur pada batubara diabaikan.
6. Arah sudut *burner* pada arah horisontal sesuai data spesifikasi boiler.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh variasi sudut *tilt burner* terhadap *rear pass temperature boiler* dengan kondisi batubara LRC dan MRC.
2. Mengetahui pengaruh variasi sudut *tilt burner* terhadap distribusi deviasi *rear pass temperature* pada *left side* dan *right side boiler*.

3. Mengetahui pengaturan sudut *tilt burner* yang dapat menyeimbangkan deviasi temperatur *left* dan *right side* boiler dan meminimalkan *rear pass temperature boiler* secara optimal.

### **1.5 Manfaat Hasil Penelitian**

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

1. Mengetahui pengaruh sudut *tilt burner* pada karakteristik pembakaran dan penyerapan panas pada boiler, khususnya *rear pass temperature boiler* dengan kondisi batubara LRC dan MRC.
2. Mengetahui pengaruh sudut tilting terhadap deviasi temperature pada *area backpass* dan *rear pass* boiler sisi *left* dan *right*.
3. Menentukan sudut *tilt burner* yang paling optimal untuk nilai kalor batubara tertentu yang dapat menyeimbangkan deviasi temperatur *left* dan *right side boiler* dan meminimalkan *rear pass temperature boiler*.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

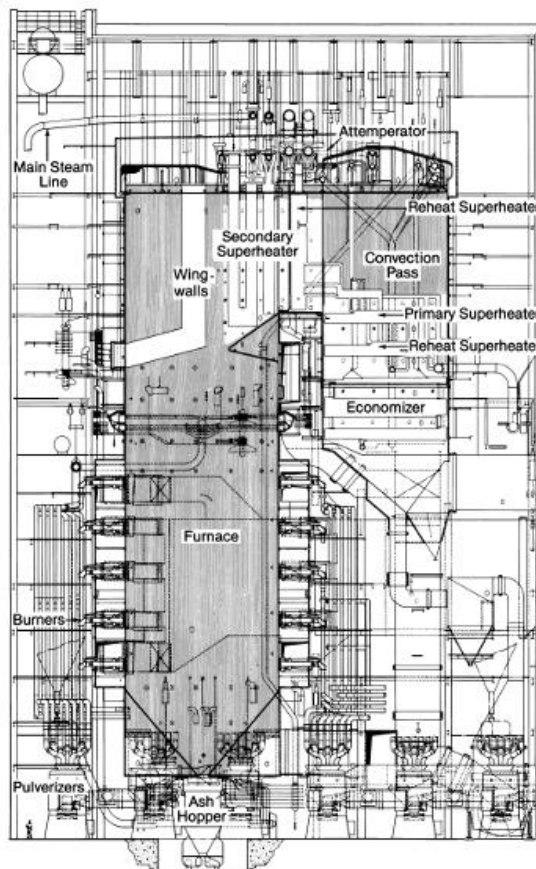


## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Boiler

*Boiler* merupakan peralatan yang berfungsi untuk menghasilkan uap dengan temperatur, tekanan, dan kapasitas tertentu. *Boiler* menggunakan panas dari hasil pembakaran untuk merubah air menjadi uap melalui pipa-pipa dengan susunan konstruksi yang spesifik. Uap yang dihasilkan dimanfaatkan untuk berbagai macam aplikasi, salah satunya adalah untuk pembangkit tenaga listrik. Sebagian besar *boiler* menggunakan batubara, natural gas, dan minyak sebagai bahan bakar. Panas dihasilkan oleh proses pembakaran pada area *furnace* yang berasal dari campuran bahan bakar dan udara pembakaran. Skematik *boiler* berbahan bakar batubara pada aplikasi pembangkit listrik tenaga uap ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 *Typical Coal Fired Boiler for Power Plant* (sumber : Babcock & Wilcock, 2015)

### 2.1.1. Komponen *Boiler*

Komponen utama *boiler* batubara terdiri atas :

#### 1. *Furnace* (Ruang Bakar)

*Furnace* merupakan ruangan terbatas tempat terjadinya proses pembakaran batubara. *Furnace* dibatasi oleh *waterwall tube* tempat mengalirnya air sebagai fluida kerja. *Waterwall tube* tersebut merupakan tempat terjadinya proses pemanasan air menjadi uap. Pada *furnace* terjadi pencampuran batubara dan udara pembakaran, proses penyalaan (*ignition*), serta perpindahan panas secara radiasi dari panas hasil pembakaran. Batubara dan udara pembakaran masuk ke dalam *furnace* melalui *burner*. Dimensi dan geometri *furnace* mempunyai desain yang spesifik berdasarkan karakteristik bahan bakar maupun teknologi *combustion* yang digunakan.

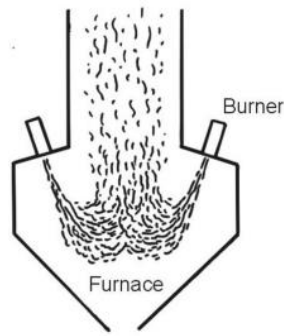
#### 2. *Burner*

*Burner* adalah peralatan yang berfungsi untuk membentuk campuran bahan bakar dan udara yang *uniform* sehingga terjadi proses pembakaran secara efisien. Batubara masuk pada sisi tengah *burner* dan udara pembakaran pada sisi sekelilingnya. Terbentuk aliran turbulen campuran batubara dan udara pembakaran sehingga terjadi kestabilan pembakaran.

Susunan *burner* didesain dengan konfigurasi secara spesifik untuk memperoleh karakteristik bentuk nyala api tertentu. Jenis *burner* berdasarkan arah masuknya batubara terbagi menjadi 3 metode, yaitu :

##### a. *Downshot Firing*

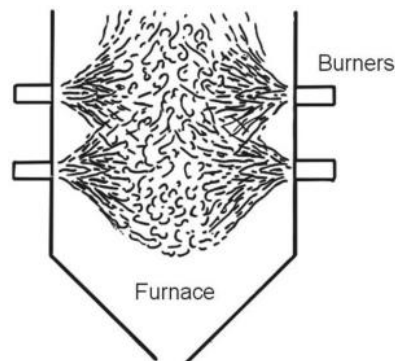
Serbuk batubara diinjeksikan pada area *lower furnace*. Area *lower furnace* didesain dengan *lining refractory* sehingga mempunyai temperatur yang tinggi untuk proses penyalaan. Proses penyalaan awal batubara dan proses pembakaran terjadi selama bahan bakar mengalir naik menuju area *waterwall* pada sisi *upper furnace* seperti ditunjukkan pada gambar 2.2. Konfigurasi ini cocok untuk jenis batubara yang sulit untuk terbakar, dengan kandungan *volatile mater* rendah seperti batubara *anthracite*.



Gambar 2.2 Ilustrasi *Burner* dengan Metode *Downshot Firing* (Chaplin, n.d.)

b. *Horizontal Firing*

Konfigurasi *burner* terpasang pada sisi dinding *furnace*, pada satu sisi *front wall* maupun kedua sisi *front* dan *back wall* seperti ditunjukkan pada gambar 2.3. Serbuk batubara diinjeksikan secara horisontal dengan tingkat *turbulent swirl* yang tinggi untuk menghasilkan pembakaran secara cepat. Masing masing *burner* membentuk nyala api secara individual dan *independent*. Perbandingan batubara dan udara pembakaran pada masing masing *burner* harus tepat untuk menghasilkan pembakaran yang baik.

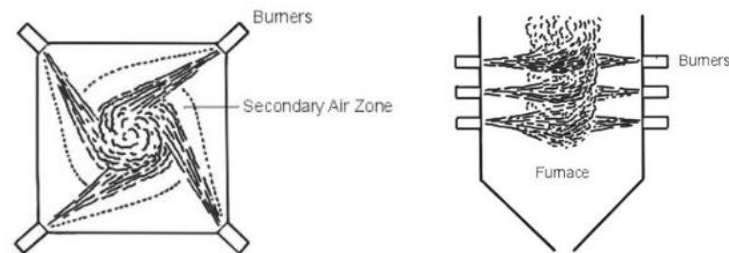


Gambar 2.3 Konfigurasi *Burner Horizontal Firing*(Chaplin, n.d.)

c. *Tangential Firing*

*Burner* tersusun vertikal pada empat sudut *furnace*. Serbuk batubara diinjeksikan pada arah horisontal menuju sisi tengah area *furnace* (membentuk garis tangensial *imaginer* dengan lingkaran di titik tengah

*furnace*). Ilustrasi *tangential firing* dapat digambarkan pada Gambar 2.4. Pencampuran bahan bakar dan udara pembakaran terdistribusi secara merata pada *combustion zone* di dalam *furnace*. Proses penyalaan dan pembakaran yang terjadi lebih teratur membentuk *fireball* pada sisi tengah *furnace*.



Gambar 2.4 Ilustrasi *Burner* pada Boiler *Tangential Firing*(Chaplin, n.d.)

Turbulensi pada *fireball* tersebut menghasilkan *vortex motion* sehingga terbentuk aliran pembakaran ke atas. *Tangential boiler* menghasilkan *heat flux* pada *waterwall tube* yang lebih merata sehingga meminimalkan potensi *overheating* maupun *thermal stress* (Hidayat, 2015).

### 3. *Convection Pass*

Pipa pipa *superheater*, *reheater*, dan *economizer* terletak pada area *flue gas downflow*. Pipa-pipa tersebut terpasang dalam susunan *tube bundle (tube bank)* yang menghubungkan antara *inlet* dan *outlet header*. Pada sisi tersebut perpindahan panas dominan terjadi secara konveksi.

### 4. *Steam drum*

*Steam drum* berfungsi untuk memisahkan uap jenuh dari campuran air-uap hasil pemanasan pada *waterwall tube*. Pada *steam drum* juga terdapat injeksi-injeksi bahan kimia untuk menjaga kualitas air *boiler*. Selain itu, *steam drum* berfungsi sebagai *buffer/reservoir* untuk mengakomodir sedikit perubahan beban unit.

### 5. *Waterwall*

*Waterwall tube* menghubungkan *lower header* dengan *steam drum* yang berfungsi juga sebagai pembatas ruangan *boiler*. Pipa pipa *waterwall* saling

dihubungkan dengan membran membentuk dinding. Pada aliran *waterwall tube* terjadi proses penguapan sehingga terbentuk campuran air dan uap. Campuran air-uap tersebut dipisahkan pada *steam drum* dan mengalir ke area *superheater*. Laju perpindahan panas yang terjadi pada area *waterwall tube* dapat dihitung dengan persamaan 2.1 sebagai berikut :

$$Q = \dot{m}xh_{fg} \quad (2.1)$$

dengan :

$Q$  : laju perpindahan panas pada *waterwall tube* (kW)

$\dot{m}$  : laju aliran massa air pada *waterwall tube* (kg/s)

$h_{fg}$  : *enthalpy* penguapan pada tekanan steam drum (kJ/kg)

#### 6. *Economizer, Steam reheater and superheater*

Posisi *economizer* terletak pada bagian akhir *convection pass*. *Economizer* berfungsi untuk memanaskan air pengisi *boiler* sebelum masuk ke *steam drum*. *Economizer* biasanya tersusun dalam *horizontal tube bundle* dengan konfigurasi yang cukup rapat untuk mengoptimalkan penyerapan panas dengan tetap mempertimbangkan *pressure drop flue gas*. Pada area ini tidak terjadi perubahan fase air pengisi.

*Reheater* dan *superheater* berfungsi untuk meningkatkan temperatur uap jenuh 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 perpipaan tersebut berupa *tube bank/tube bundle*, diantaranya *division panel superheater, platen superheater, final superheater, low temperature superheater*.

Laju perpindahan panas pada area *superheater, economizer, dan reheater* dapat dihitung dengan persamaan 2.2 sebagai berikut :

$$Q = \dot{m}x C_p x \Delta T \quad (2.2)$$

dengan :

$Q$  : laju perpindahan panas pada *heat exchanger tube* (kW)

$\dot{m}$  : laju aliran massa air/uap air pada *heat exchanger tube* (kg/s)

$C_p$  : kalor spesifik air/uap air (kJ/kg.K)

$\Delta T$  : perbedaan temperatur uap/uap air pada sisi masuk dan sisi keluar *heat exchanger* (K)

#### 7. *Air preheater*

*Air preheater* tidak termasuk dalam bagan air dan uap *boiler* tetapi mempunyai peran penting dalam pemanfaatan panas *boiler* sehingga mendukung efisiensi. Pada banyak desain *boiler*, temperatur *flue gas* setelah melewati *economizer* masih cukup tinggi. *Air preheater* memanfaatkan energi panas tersebut untuk memanaskan udara pembakaran (udara primer dan udara sekunder) sehingga pemakaian bahan bakar dapat dikurangi. Udara primer digunakan sebagai udara pengering dan transportasi serbuk batubara ke *burner*. Udara sekunder berfungsi sebagai udara pembakaran.

## 2.2 Pembakaran Bahan Bakar Batubara

Batubara merupakan salah satu bahan bakar yang banyak digunakan dalam industri, khususnya pada pembangkit listrik tenaga uap. Batubara tersusun atas unsur-unsur karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, sulfur serta kandungan *moisture*, *volatile matter*, maupun *ash*. Kandungan tersebut menentukan kualitas dari mineral batubara.

Unsur penyusun batubara pada dasarnya terdiri dari 2 jenis material utama, yaitu:

- a. *Combustible Material*, yaitu bahan atau material yang dapat dibakar/dioksidasi oleh oksigen. Material tersebut umumnya terdiri dari karbon padat (*fixed carbon*), senyawa hidrokarbon, total sulfur, senyawa hidrogen, dan beberapa senyawa lainnya dalam jumlah kecil.
- b. *Non-combustible Material*, yaitu bahan atau material yang tidak dapat dibakar/dioksidasi oleh oksigen. Material tersebut umumnya terdiri dari senyawa anorganik ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  dan senyawa logam lainnya dalam jumlah kecil) yang akan membentuk abu dalam batubara. Kandungan *non-combustible material* ini umumnya tidak diinginkan karena akan mengurangi nilai kalori pembakaran.

Pembakaran pada bahan bakar batubara merupakan proses pelepasan energi panas yang dihasilkan dari reaksi *combustible material* dengan oksida

(oksigen dalam udara). Tujuan utama dari proses pembakaran adalah memaksimalkan pelepasan energi dengan meminimalkan kerugian-kerugian yang mungkin timbul selama proses pembakaran. Faktor-faktor utama yang mempengaruhi proses pembakaran antara lain :

1. *Temperature*, yaitu suhu yang cukup untuk terjadinya penyalaan dan menjaga penyalaan bahan bakar.
2. *Turbulence*, efek turbulensi akan berpengaruh terhadap pencampuran antara serbuk batubara dengan oksigen pada udara. Turbulensi yang baik menghasilkan campuran yang merata sehingga mengurangi kerugian akibat *un-burnt carbon*.
3. *Time*, adalah kecukupan waktu untuk terjadinya tahapan-tahapan proses pembakaran hingga semua *combustible material* bereaksi sempurna dengan oksigen dan melepaskan energi panas.
4. *Oxygen*, merupakan reaktan utama pada reaksi pembakaran sehingga kecukupan oksigen sangat berpengaruh terhadap kesempurnaan pembakaran. Oleh karena itu dalam aplikasinya selalu digunakan *excess air* (oksigen berlebih) untuk menjamin kecukupan oksigen untuk reaksi.

Reaksi utama pada proses pembakaran batubara terdiri dari reaksi *combustible material* (C, H, dan S) dengan oksigen yang menghasilkan produk pembakaran sempurna berupa gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O. Persamaan reaksi pembakaran dapat dituliskan sesuai persamaan 2.3 – 2.5 sebagai berikut :



Pembakaran batubara di ruang bakar *boiler* terjadi melalui beberapa tahapan proses mulai serbuk batubara masuk ke *furnace* hingga terbakar habis. Serbuk batubara dengan ukuran 200 mesh (74 μm) diinjeksikan masuk ke *furnace* melalui *coal burner nozzle* akan melewati beberapa tahapan sebagai berikut (Singer, 1993).

### 1. Drying

*Drying* merupakan proses awal batubara untuk menghilangkan *moisture* yang terkandung pada permukaan ataupun pada pori-pori batubara. Proses pengeringan ini terjadi sebelum batubara bercampur dengan udara pembakaran di *furnace*. Pengeringan dimulai pada saat batubara bercampur dengan *primary air* di mill, sedangkan sisa *moisture* yang terletak dalam pori-pori yang sangat kecil pada batubara akan dikeringkan di dalam *furnace* karena membutuhkan temperatur yang lebih tinggi untuk menguapkan *moisture* tersebut.

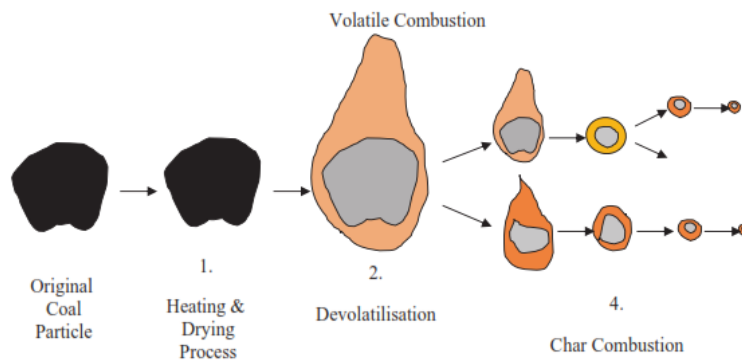
### 2. Devolatilization

Proses ini merupakan proses pemisahan antara *volatile matter* dan *char* atau *fixed carbon*. *Volatile matter* akan mengalami penguapan pada suhu sekitar 900° - 950°C menyisakan *char* yang merupakan karbon padat yang menjadi bahan bakar utama dalam proses pembakaran di *furnace*.

### 3. Char Combustion

*Char combustion* adalah proses pembakaran karbon padat dengan oksigen baik dari udara pembakaran maupun dari gas oksigen hasil *devolatilization*.

Tahapan proses tersebut dapat digambarkan pada gambar 2.6 sebagai berikut.



Gambar 2.5 Tahapan Proses Pembakaran Partikel Batubara(Tian, Witt, Schwarz, & Yang, 2017)

## 2.3 Simulasi Numerik CFD Pembakaran Batubara pada Boiler

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, perpindahan massa maupun fenomena fisik yang berhubungan dengan aliran fluida. Metode



CFD menggunakan metode numerik dalam penyelesaian persamaan matematik yang berhubungan dengan dinamika fluida. Metode yang digunakan adalah *Finite Volume Approach* yaitu membagi volume sistem, baik massa atau volume, menjadi volume-volume kecil yang disebut *grid* atau *mesh*. Setiap *grid* tersebut memiliki sejumlah nodal untuk menerapkan persamaan-persamaan konservasi. Setiap nodal memiliki karakteristik yang spesifik sebagai volume aturnya. Persamaan konservasi yang digunakan dalam pemodelan CFD adalah :

### 1. Persamaan Konservasi Massa

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m \quad (2.6)$$

dengan :

- $S_m$  = penambahan/pengurangan massa
- $\rho$  = 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 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.7)$$

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 :

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.8)$$

dengan :

- $\mu$  = *dynamic viscosity*
- $u$  = *velocity*

### 3. Persamaan Konservasi Energi

Persamaan energi yang digunakan pada software FLUENT adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (2.9)$$

dengan :

$$k_{eff} = \text{effective conductivity } (k + k_t)$$

$$T = \text{temperatur}$$

$$k_t = \text{turbulent thermal conductivity}$$

Persamaan energi didefinisikan sebagai :

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (2.10)$$

dimana  $h$  adalah entalpi sensibel yang dirumuskan sebagai berikut :

a) Untuk gas ideal

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (2.11)$$

b) Untuk incompressible flow

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (2.12)$$

dengan :

$$Y_j = \text{fraksi massa spesies } j$$

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (2.13)$$

dimana :

$$T_{ref} = 298,15 \text{ K}$$

Persamaan (2.9) – (2.13) di atas diterapkan pada setiap *grid/mesh* sehingga diperoleh sebaran temperatur yang membentuk distribusi temperatur pada setiap bagian *boiler*.

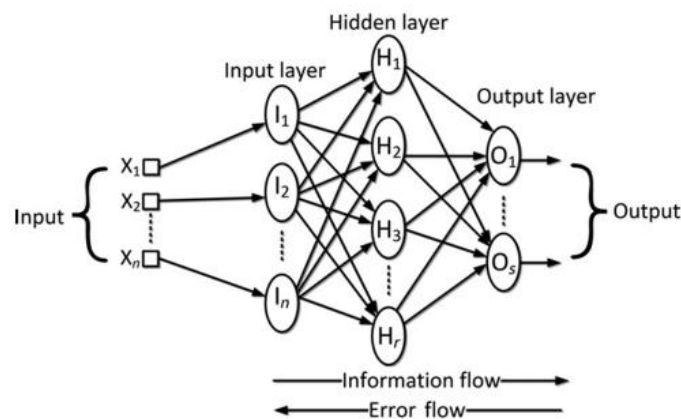
## 2.3 Artificial Neural Network (ANN) dan Genetic Algorithm (GA)

### 2.3.1. Artificial Neural Network (ANN)

Jaringan saraf tiruan (*artificial neural network*) adalah suatu struktur jaringan buatan yang digunakan untuk memproses data secara matematis. ANN bekerja seperti jaringan syaraf biologi yang dapat mempelajari, mengingat, memutuskan, dan menyimpulkan secara otomatis. Pada penelitian ini ANN

digunakan untuk mempelajari hubungan antara parameter setting *tilt burner* dan nilai kalor batubara terhadap kondisi *boiler rear pass temperature*.

Secara umum ANN terdiri dari 3 lapisan utama yaitu *input layer*, *hidden layer* dan *output layer*. Setiap *layer* tersebut memiliki satu atau lebih *node* yang terhubung dengan *node* pada *layer* berikutnya yang dihubungkan dengan suatu garis bobot (*dendrit*). Contoh bentuk arsitektur ANN ditunjukkan pada gambar 2.6. *Input layer* terdiri dari *node* sesuai dengan jumlah variabel proses. *Output layer* merupakan respon dari ANN yang berjumlah sama dengan variabel respon. *Hidden layer* merupakan pehubung antara *input* dan *output layer*. Jumlah *hidden layer* serta *node* di dalamnya bervariasi untuk mendapatkan prediksi respon dengan *error* terkecil.



Gambar 2.6 Arsitektur *Feedforward Neural Network* (Gupta & Raza, 2019)

Terdapat beberapa model ANN yang telah dikembangkan diantaranya jaringan *Kohonen*, *Hassoun*, *Yuille*, *Hebbian*, *Hopfields*, dan *backpropagation*. Model *backpropagation* merupakan model yang paling umum dipakai untuk berbagai tujuan (Bagci dan Isic, 2006).

*Backpropagation Neural Network* (BPNN) merupakan model jaringan saraf tiruan yang bersifat *multipurpose*. Prinsip kerja BPNN adalah dengan mengubah secara berkala nilai bobot dan bias sehingga nilai keluaran yang dihasilkan mendekati target. Proses training pada BPNN terdiri atas 3 tahap, yaitu:

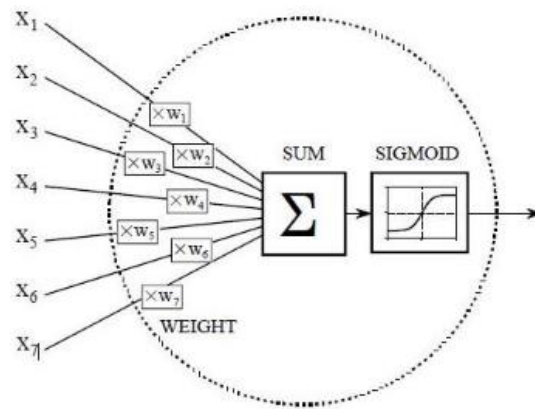
- a. Tahap Propagasi Maju (*forward propagation*)

Skema proses propagasi maju dapat dilihat pada gambar 2.7. Pada proses ini semua nilai input  $x_i$  akan dikalikan dengan bobot dan hasilnya

dijumlahkan untuk dimasukkan dalam fungsi aktivasi. Fungsi aktivasi yang banyak dipakai adalah fungsi *log sigmoidal* (*sigmoid biner*) dan *tan sigmoidal* (*sigmoid bipolar*). Fungsi aktivasi *log sigmoidal* dan *tan sigmoidal* ditunjukkan dengan persamaan 2.10 dan 2.11 berikut :

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2.10)$$

$$f(x) = \frac{2}{1+e^{-x}} - 1 \quad (2.11)$$



Gambar 2.7 Skema *Forward Propagation*(Cilimkovic, n.d.)

b. Tahap Propagasi Mundur (*backward propagation*)

Nilai prediksi ( $y_k$ ) BPPN akan diperoleh dari *output layer* pada proses propagasi maju. Nilai  $y_k$  tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai target untuk menghitung nilai errornya sesuai persamaan 2.12.

$$\delta_k = (t_k - y_k)y_k(1 - y_k) \quad (2.12)$$

Kemudian nilai faktor *error*  $\delta_k$  digunakan untuk mengkoreksi nilai bobot pada setiap *dendrit*. Perhitungan perubahan nilai bobot *dendrit* dari *input layer* menuju *hidden layer* dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.13. *Error* bobot *dendrit* dari *hidden layer* menuju *output layer* dihitung menggunakan persamaan 2.14.

$$\Delta w_{kj} = \alpha \cdot \delta_k \cdot z_j \quad (2.13)$$

$$\Delta v_{ji} = \alpha \cdot \delta_j \cdot z_i \quad (2.14)$$

c. Tahap perubahan bobot

Pada tahap ini dilakukan kalkulasi bobot yang baru pada setiap *dendrit*. Perhitungan tersebut dilakukan dengan menjumlahkan bobot awal pada *forward propagation* dengan hasil kalkulasi perubahan bobot pada tahap *backward propagation*. Kalkulasi bobot yang baru dapat dihitung dengan persamaan 2.15 dan 2.16 berikut.

$$w'_{kj} = w_{kj} + \Delta w_{kj} \quad (2.15)$$

$$v'_{ji} = v_{ji} + \Delta w_{ji} \quad (2.16)$$

Jumlah neuron maupun *hidden layer* yang optimal pada arsitektur BPNN yang paling baik ditentukan dengan cara melakukan training pada BPNN *network* sehingga memperoleh nilai *mean squared errors* (MSE) yang paling kecil. Nilai MSE untuk *networks output*,  $a$ , dan *target input*,  $t$ , dihitung dengan persamaan 2.17 (Wahjudi, Soepangkat, & Arriyani, 2016).

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2 \quad (2.17)$$

### 2.3.1. Genetic Algorithm (GA)

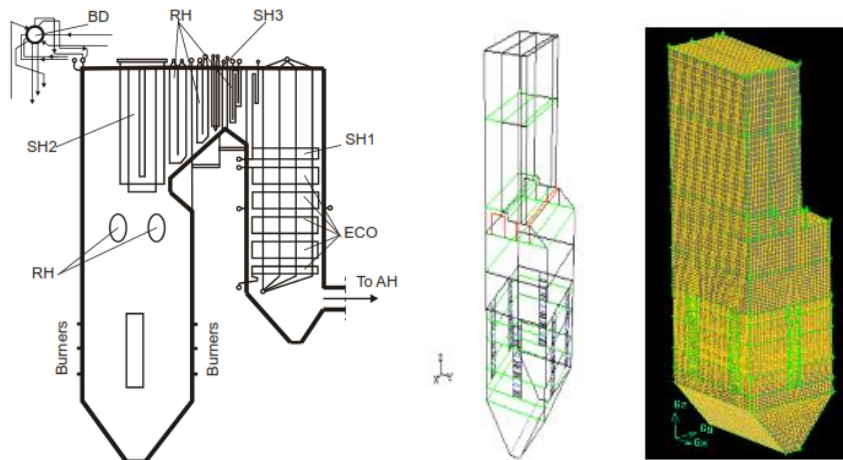
Algoritma genetik merupakan salah satu metode pencarian heuristik yang digunakan untuk berbagai masalah optimasi (Kramer, 2017). Metode GA didasarkan pada teori evolusi dimana setiap spesies dapat beradaptasi dan berkembang menjadi struktur yang kompleks. Proses adaptasi dan perkembangan tersebut dihasilkan melalui perkawinan dan perkembangbiakan. Metode GA meniru mekanisme perkawinan dan perkembangbiakan tersebut untuk menyelesaikan permasalahan optimasi.

Tahapan proses penyelesaian metode GA diawali dengan pembentukan serangkaian solusi awal yang disimbolkan dengan populasi. Nilai pada populasi tersebut menjadi input dalam suatu *fitness function* sehingga menghasilkan output optimasi awal (*fitness value*). Jika nilai solusi sudah mencapai target maka proses optimasi GA dinyatakan selesai. Apabila nilainya masih belum terpenuhi target maka dilakukan pembentukan populasi baru dengan cara seleksi dan regenerasi (proses *copy*, *crossover*, dan mutasi). Populasi baru tersebut digunakan sebagai

input kembali dalam *fitness function*. *Fitness function* disini merupakan produk persamaan dari BPNN.

## 2.4 Penelitian Terdahulu

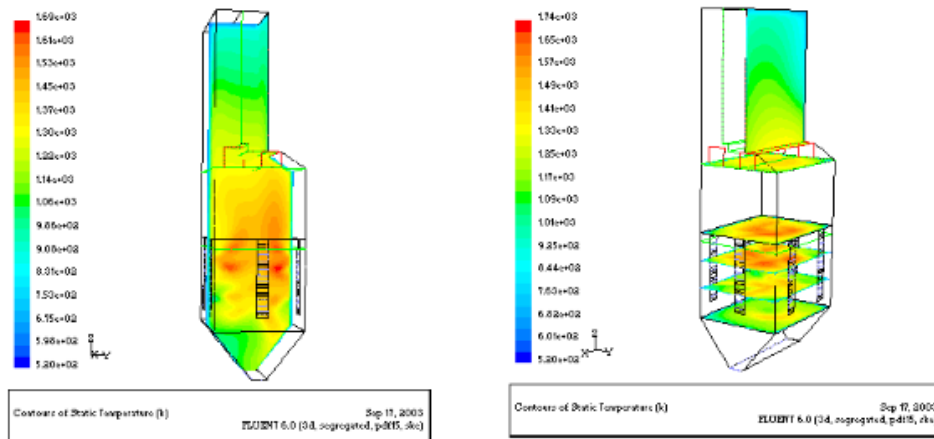
Penelitian mengenai performa *pulverized coal-fired boiler* dengan *tangential burner* dilakukan dengan pendekatan numerikal. Pemodelan *boiler* dilakukan dengan software CFD FLUENT. Pemodelan menggunakan standard  $k-\varepsilon$  model *turbulent flow* dan *SIMPLEC method* untuk *coupling velocity* dan *pressure*. Reaksi kimia pembakaran batubara dimodelkan dengan pendekatan *mixture fraction/PDF*. Perpindahan panas radiasi dihitung dengan cara *simplified P-N model*. *Boiler* yang dimodelkan adalah *utility boiler* tipe OB-380 pada pembangkit listrik “Oslomej”, Republik Macedonia dengan kapasitas 120 MWe. Model 3-D *boiler* dibuat dengan skala penuh. Model geometri melingkupi 86016 *finite volume cells*, 265056 *faces* dan 93192 *nodes*. Skema konfigurasi dan model geometri boiler tersebut dapat dilihat pada gambar 2.7.(Filkoski, 2015)



Gambar 2.8 Skema Konfigurasi Boiler OB-380(Filkoski, 2015)

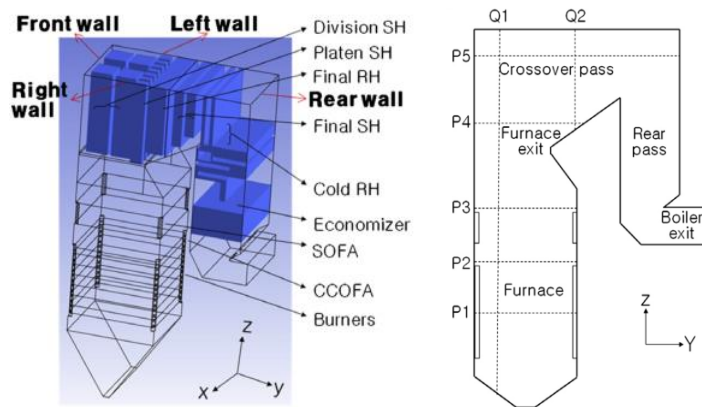
Simulasi tersebut menghasilkan data *flow fields*, vektor kecepatan, jalur aliran partikel, kontur temperatur, profil fluks panas pada dinding *furnace*, kontur *species concentrations* ( $O_2$ ,  $CO_2$ , dsb). Kontur temperatur hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 2.9. Tampak adanya perbedaan temperatur di kedua sisi *boiler* pada area *furnace exit* yang disebabkan oleh adanya kondisi “*after swirl*” pada area tersebut. Temperatur tertinggi dapat mencapai  $> 1300^{\circ}C$  berada pada area *furnace*

*core* dimana terjadi proses pembakaran paling intensif. Posisi nyala api pada area tengah *furnace* menunjukkan bahwa beban panas di permukaan dinding *furnace* pada kondisi berimbang.



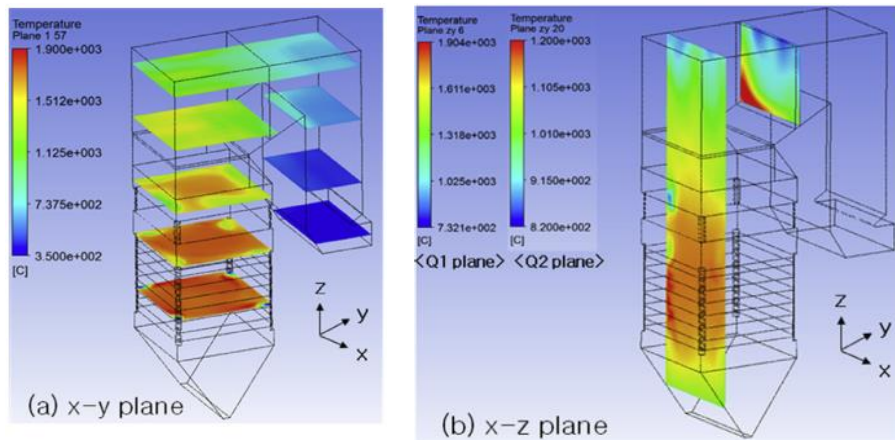
Gambar 2.9 Kontur Temperatur pada penampang melintang *boiler*(Filkoski, 2015)

(Park et al., 2013) melakukan penelitian mengenai deviasi temperatur gas area *crossover pass* pada *tangentially fired pulverized-coal boiler*. Deviasi tersebut disebabkan oleh adanya *residual swirl* yang berasal dari *upper furnace*. Penelitian dilakukan pada boiler kapasitas 800 MW dengan teknologi *Low NO<sub>x</sub> Concentric Firing System* (LNCS). Sudut SOFA *yaw angle* dilakukan variasi pada keempat sudut *nozzle* untuk melihat pengaruhnya terhadap deviasi temperatur pada *crossover pass* terutama di dekat *final superheater*. Susunan *burner* dan *heat exchanger* pada *boiler* serta penampang melintang *boiler* diperlihatkan oleh gambar 2.10.



Gambar 2.10 *General Arrangement* dan Penampang Melintang *Boiler* (Park et al., 2013)

Distribusi temperatur gas hasil simulasi ditunjukkan oleh gambar 2.11. Temperatur gas pada penampang P1 memperlihatkan bentuk *fireball* dimana temperatur pada titik tengah *furnace*. Menuju ke sisi atas, pada penampang P2 dan P3 temperatur gas mengalami penurunan karena bercampur dengan *over fire air* (OFA). Pada penampang P4 terlihat adanya deviasi *gas temperature* dimana sisi *left* mempunyai temperatur lebih tinggi dibandingkan sisi *right*. Sedangkan pada penampang P5 gas temperatur menjadi *uniform* dan rata sepanjang laluan *crossover pass*. Penampang Q1 memperlihatkan terjadinya penurunan temperatur sepanjang aliran gas dari area *furnace* menuju *crossover pass*. Terjadi perpindahan panas pada area *waterwall* dan *division superheater* serta bercampurnya *flue gas* dengan *over fire air* sehingga terjadi penurunan temperatur. Area *crossover pass* khususnya di sekitar *final superheater* tampak terjadi deviasi temperatur gas seperti terlihat pada penampang Q2. Deviasi temperatur gas terlihat sangat signifikan terutama pada sisi kiri bawah penampang.

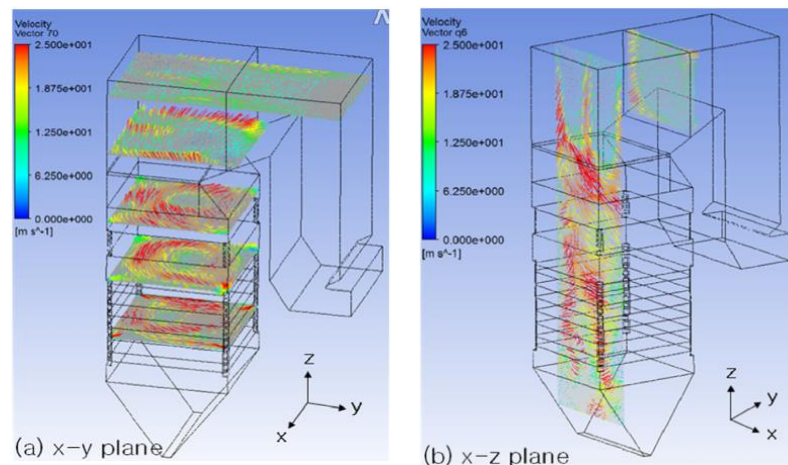


Gambar 2.11 Distribusi Temperatur Gas Pada Boiler(Park et al., 2013)

Injeksi batubara dan udara pembakaran pada elevasi *burner* A-E menyebabkan terjadinya bentuk aliran *fireball* dengan arah rotasi *clockwise*. *Swirling flow* tersebut diperkuat dengan adanya penambahan udara pada CCOFA dan SOFA *nozzle* yang bercampur dengan *flue gas*. *Residual swirling flow* masih terbentuk pada penampang P4 setelah keluar dari area *upper furnace* dimana vektor kecepatan pada sisi *left* lebih tinggi daripada sisi *right*. Sedangkan pada penampang Q2 terlihat bahwa vektor kecepatan pada sisi kiri bawah di dekat bagian bawah *final*



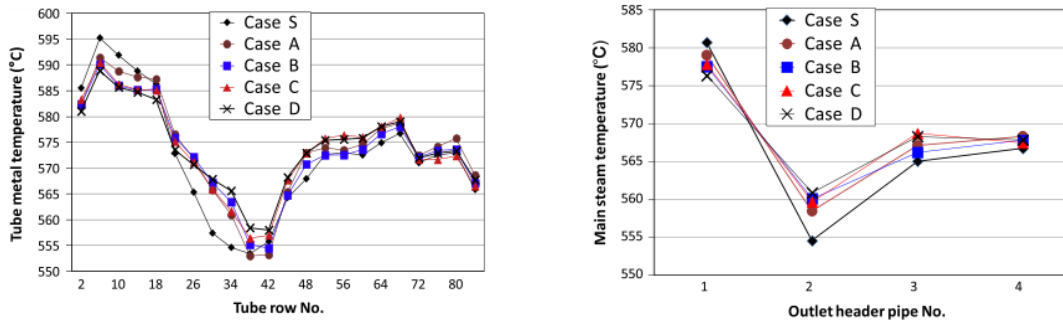
*superheater* lebih tinggi dibandingkan pada area yang lain. Kondisi tersebut menyebabkan temperatur uap *final superheater* pada area sisi kiri bawah *final superheater* menjadi lebih tinggi. Hal ini berpotensi mengakibatkan *tube rupture* pada area tersebut karena *overheating*. Distribusi kecepatan dalam boiler diperlihatkan pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Distribusi Kecepatan Dalam Boiler (Park et al., 2013)

*Residual swirling flow* pada *upper furnace* dapat diminimalkan dengan pengaturan arah injeksi SOFA (*yaw angle*) pada arah negatif. Perubahan sudut SOFA *yaw angle* secara individual pada setiap sudut *nozzle* akan lebih efektif dibandingkan jika dilakukan secara simultan pada keempat sudut *nozzle*. Pengaturan SOFA *yaw angle* yang dilakukan adalah dengan melakukan setting SOFA *yaw angle* secara individual pada masing-masing sudut sebesar  $-15^{\circ}$  (case A-D). Keempat hasil simulasi tersebut kemudian saling dibandingkan datanya dan juga dibandingkan dengan kondisi standar dimana tidak dilakukan perubahan SOFA *yaw angle* (case S). Data distribusi temperatur hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada gambar 2.13 yang menunjukkan distribusi *tube metal temperature* dan *main steam temperature* di area *final superheater*. Trend *tube metal temperature* untuk kelima case menunjukkan data yang sama dimana temperatur pada sisi *left* merupakan yang paling tinggi. Menuju ke titik tengah *boiler*, *tube metal temperature* mengalami penurunan kemudian kembali naik pada sisi *right boiler* tetapi masih lebih rendah dibandingkan sisi *left*. Namun distribusi *tube metal*

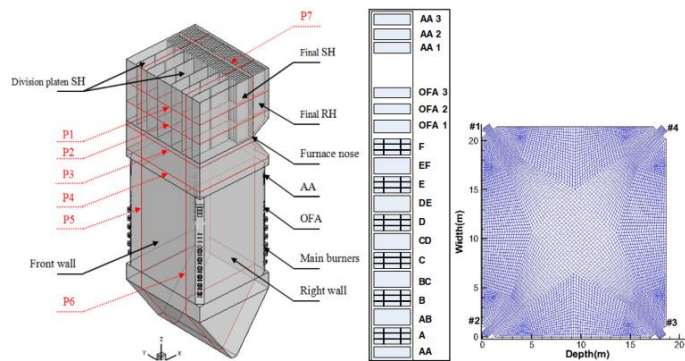
temperature pada case A-D (dengan pengaturan individual yaw angle) menunjukkan distribusi yang lebih merata.



Gambar 2.13 Distribusi *Tube Metal Temperature* dan *Main Steam Temperature* pada *Final Superheater*(Park et al., 2013)

Perbedaan temperatur antara titik maksimum dan minimum pada case D merupakan yang paling baik yaitu sebesar 31<sup>o</sup>C, sementara untuk case yang lain yaitu 42<sup>o</sup>C untuk case S, 39<sup>o</sup>C untuk case A, 36<sup>o</sup>C untuk case B, dan 33<sup>o</sup>C untuk case C. Demikian juga untuk data distribusi *main steam temperature* dimana deviasi temperatur pada case D menurunkan deviasi temperatur menjadi 15<sup>o</sup>C dari kondisi awal (case S) sebesar 26<sup>o</sup>C.

(Fang et al., 2015) melakukan penelitian mengenai pengaruh sudut *vertical tilt burner* terhadap deviasi temperatur gas pada *boiler* kapasitas 700 MW. Konfigurasi *nozzle* pada setiap sudut *boiler* terdiri dari 6 layer *primary air* (PA), 6 layer *secondary air* (SA), 3 layer OFA, dan 3 layer AA *nozzle*. Gambar skematik *boiler* tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.14. Parameter operasi *boiler* menunjukkan nilai temperatur *reheat steam* pada sisi *right* lebih tinggi 20<sup>o</sup>C dibandingkan sisi *left*. Bahkan temperatur pada sisi *right* tersebut melewati batas setting sehingga memerlukan *spray water* untuk mencegah terjadinya *overheating* pada pipa. Diperlukan setting sudut *tilt burner* secara tepat dengan mempertimbangkan temperatur *reheat steam*, *metal temperature*, dan efisiensi *boiler*.



Gambar 2.14 Skematik Konfigurasi Boiler (Fang et al., 2015)

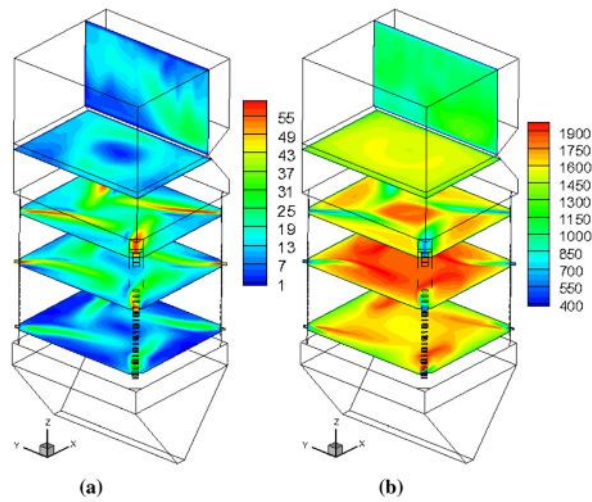
Simulasi dilakukan dengan memvariasikan posisi *burner tilt angle* pada 8 case sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2.1. Case 1-4 dilakukan untuk mengetahui pengaruh posisi *burner tilt angle* ke arah atas terhadap deviasi temperatur *flue gas*. Case 3, 5, dan 6 fokus pada setting bias posisi AA *tilt angle* terhadap deviasi temperatur *flue gas*. Sedangkan case 3, 7, 8 dilakukan untuk mensimulasikan perubahan beban pada 100%, 75%, dan 50% load.

Tabel 2.1 Case Simulasi Variasi Burner Tilt Angle (Fang et al., 2015)

|        | Main burner tilt angle (°) |     |     |     | AA tilt angle (°) |     |     |     |
|--------|----------------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|
|        | #1                         | #2  | #3  | #4  | #1                | #2  | #3  | #4  |
| Case 1 | 0                          | 0   | 0   | 0   | 0                 | 0   | 0   | 0   |
| Case 2 | +4                         | +4  | +4  | +4  | +4                | +4  | +4  | +4  |
| Case 3 | +11                        | +11 | +11 | +11 | +11               | +11 | +11 | +11 |
| Case 4 | +22                        | +22 | +22 | +22 | +22               | +22 | +22 | +22 |
| Case 5 | +11                        | +11 | +11 | +11 | +12               | +16 | +16 | +12 |
| Case 6 | +11                        | +11 | +11 | +11 | +6                | +16 | +16 | +6  |
| Case 7 | +11                        | +11 | +11 | +11 | +11               | +11 | +11 | +11 |
| Case 8 | +11                        | +11 | +11 | +11 | +11               | +11 | +11 | +11 |

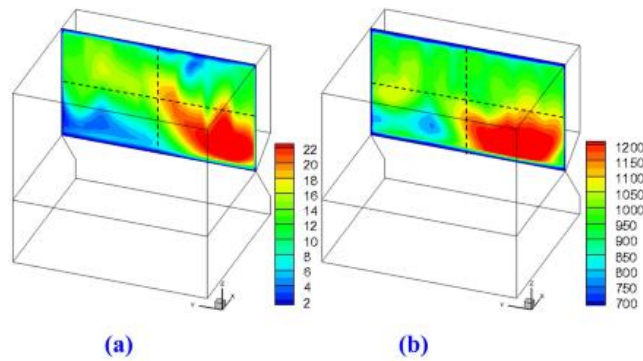
("+" stands for tilting up the burners).

Kontur distribusi kecepatan dan temperatur hasil simulasi case 1 diperlihatkan pada gambar 2.15. Distribusi kecepatan dan temperatur yang terjadi sangat baik sehingga terbentuk *tangential fireball* pada area *furnace*. *Tangential flow* di area *furnace* diperkuat oleh aliran udara masuk dari AA *nozzle* sehingga muncul *residual swirling* pada aliran *flue gas*.



Gambar 2.15 Distribusi Kecepatan dan Temperatur *Boiler* : (a) kecepatan (m/s); (b) temperatur (K) (Fang et al., 2015)

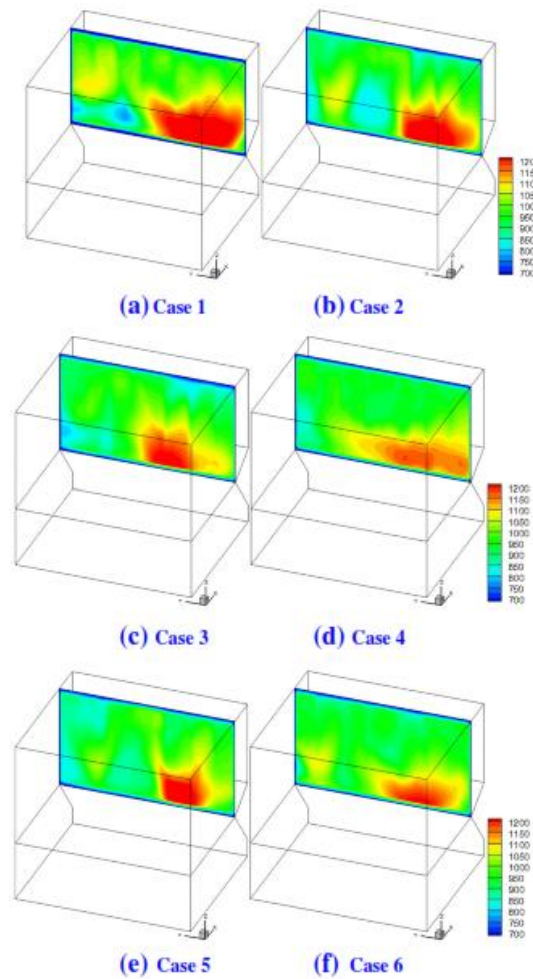
Penampang melintang *crossover pass* (P7) merupakan area masuk untuk susunan pipa *final reheater*. Distribusi kecepatan aliran dan temperatur pada area ini sangat berpengaruh terhadap karakteristik perpindahan panas maupun deviasi temperatur *reheat steam*. Distribusi kecepatan dan temperatur hasil simulasi pada penampang P7 digambarkan pada gambar 2.16. Dari gambar sangat terlihat adanya deviasi yang signifikan baik kecepatan maupun temperatur *flue gas*.



Gambar 2.16 Distribusi Kecepatan dan Temperatur pada Area *Inlet Final Reheater Tube Banks* : (a) kecepatan (m/s); (b) temperatur (K)(Fang et al., 2015)

Hasil simulasi untuk distribusi temperatur pada *case 1-6* dapat dilihat pada Gambar 2.17. Setting sudut *tilt burner* pada posisi *upward* dapat menurunkan deviasi temperatur *flue gas* pada area *final reheater*. Titik optimal didapat pada setting sudut *tilt burner*  $+11^{\circ}$  dimana intensitas *residual swirl flow* turun sebesar

44% dan deviasi temperatur *reheat steam* mengalami penurunan dari 22<sup>o</sup>C menjadi 10<sup>o</sup>C. Setting bias sudut *tilt AA nozzle* yang paling optimal diperoleh pada posisi bias 10<sup>o</sup> dengan setting sudut *tilt burner* +11<sup>o</sup>. Hasil simulasi menunjukkan penurunan deviasi temperatur hingga dibawah 4<sup>o</sup>C dari kondisi awal sebesar 20<sup>o</sup>C (*case 1*).

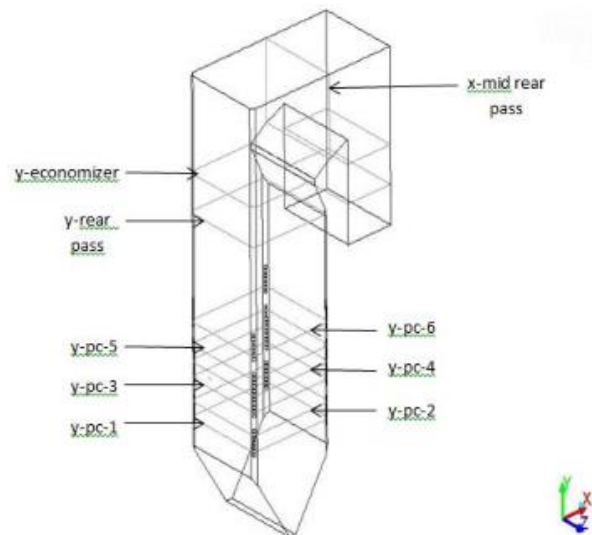


Gambar 2.17 Distribusi Temperatur Pada Area *Inlet Final Reheater* Hasil Simulasi *Case 1 – 6* (Fang et al., 2015)

Penelitian mengenai variasi *burner tilt angle* untuk menurunkan *rear pass temperature boiler* telah dilakukan pada *boiler* kapasitas 700 MW di Manjung, Malaysia. Dilakukan pemodelan *computational fluid dynamics* (CFD) untuk menentukan sudut *tilt burner* yang tepat sehingga dapat menurunkan temperatur pada area *rear pass boiler*. Sudut *tilt burner* pada *tangential boiler* berfungsi untuk mengatur posisi *fireball* pada arah vertikal sehingga diperoleh distribusi temperatur

yang merata di seluruh bagian pipa *boiler*. Setting sudut *tilt burner* yang optimal juga dapat meningkatkan efisiensi *boiler* karena berpengaruh terhadap temperatur *main steam* maupun *reheat steam*. Selain itu juga dapat mengurangi potensi kegagalan *boiler tube* yang disebabkan oleh *hot spot* akibat *overheating* (Tharangaraju, Munisamy, & Baskaran, 2017).

Konfigurasi skematik *boiler* serta penampang melintang yang akan dianalisa diperlihatkan oleh Gambar 2.18. Penampang y-pc 1-6 merupakan titik injeksi serbuk bahan bakar batubara. Selain itu juga diperlihatkan penampang y-*economizer* dan y-*rear pass* untuk mengamati perubahan kontur distribusi di area *rear pass*. Simulasi dilakukan pada 3 setting sudut *tilt burner* yaitu  $0^{\circ}$ (*case 1*),  $+10^{\circ}$ (*case 2*), dan  $-10^{\circ}$ (*case 3*).

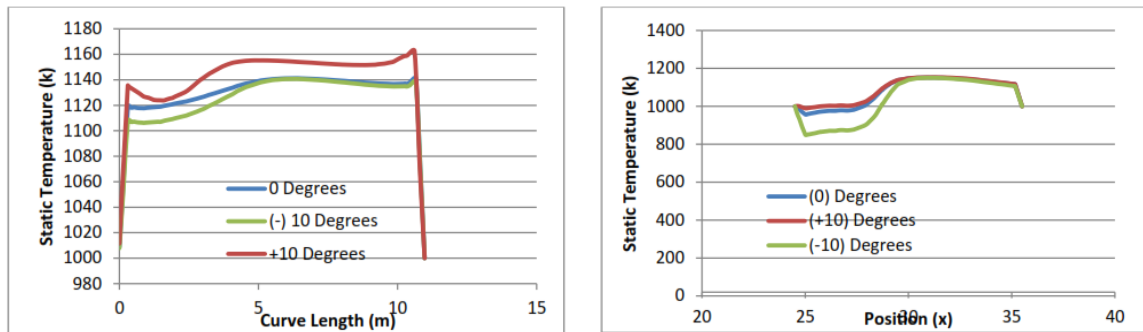


Gambar 2.18 Skematik *Boiler* dan Kontrol Penampang Melintang (Tharangaraju, Munisamy, & Baskaran, 2017)

Dari simulasi didapatkan data *rear pass temperature* tertinggi pada *case 1* ( $+10^{\circ}\text{C}$ ) dan terendah pada *case 3* ( $-10^{\circ}$ ). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa posisi sudut *tilt burner downwards* akan menurunkan *rear pass temperature* dan posisi sudut *tilt burner upwards* akan menyebabkan kenaikan pada *rear pass temperature*. *Flue gas* akan memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai area *rear pass* sehingga lebih banyak panas yang diserap di area *furnace* dan *crossover pass* dan menghasilkan temperatur *flue gas* yang lebih rendah. *Case 1* menghasilkan distribusi temperatur pada area *rear pass* yang lebih stabil dan merata dibandingkan



dengan kedua *case* yang lain. Posisi *tilt burner upwards* memberikan hasil deviasi distribusi temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan posisi *downwards*. Grafik plot *rear pass temperature* hasil simulasi diperlihatkan pada Gambar 2.19.

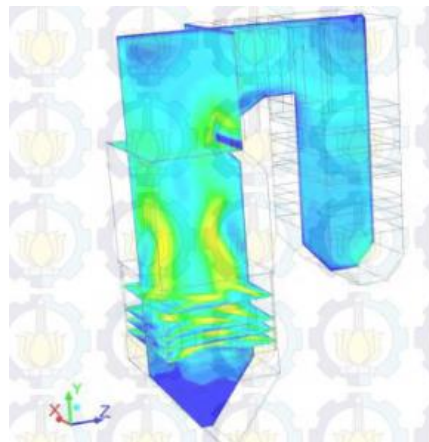


Gambar 2.19 Grafik Plot *Rear Pass Temperature Boiler* (Tharangaraju, Munisamy, & Baskaran, 2017)

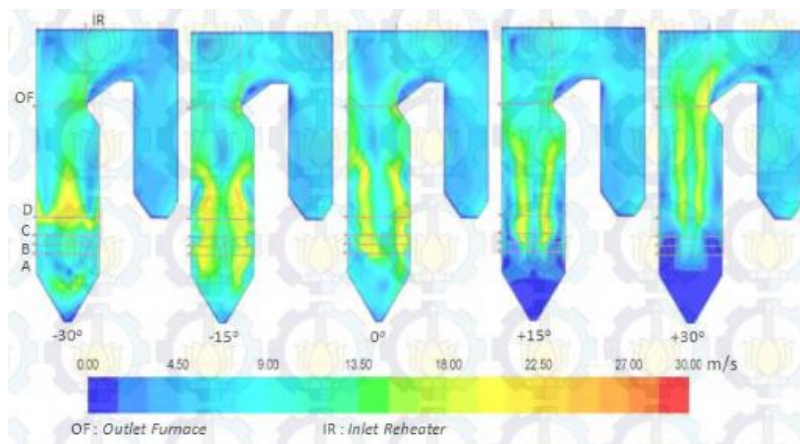
(Hidayat, 2015) melakukan penelitian mengenai karakteristik aliran gas-solid dan pembakaran *tangentially fired pulverized-coal boiler* dengan variasi sudut *tilting* dan nilai kalor batubara. Obyek penelitian yang diambil adalah *boiler* PLTU Pacitan unit 1 dengan kapasitas 315 MWe. Variasi nilai kalor batubara yang digunakan adalah jenis LRC (*Low Rank Coal*) dan MRC (*Medium Rank Coal*) sedangkan sudut *tilting* divariasikan pada  $+30^{\circ}$ ,  $+15^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ ,  $-15^{\circ}$ , dan  $-30^{\circ}$ .

Hasil simulasi yang diperoleh menunjukkan bahwa perubahan sudut *tilting* berpengaruh terhadap vektor dan *magnitude* kecepatan aliran dalam *boiler*. Posisi sudut *tilting* yang semakin rendah akan menghasilkan kecepatan yang dominan pada *bottom ash hopper* sedangkan pada sudut *tilting* yang tinggi kecepatan pada *upper furnace* menjadi lebih dominan. Terjadi tumbukan aliran antara batubara yang keluar dari *burner* di layer atas dengan aliran yang berasal dari sisi *bottom ash hopper* pada setting sudut *tilting downwards*. Hal tersebut menyebabkan perubahan bentuk serta kecepatan *fireball* pada *furnace*. Setting sudut *tilting upwards* aliran dari *burner* layer bawah akan terdorong oleh aliran *burner* pada layer di atasnya. Kondisi ini menimbulkan kecepatan aliran yang tinggi di area *furnace* sehingga berpotensi terjadi *incomplete combustion* pada sebagian partikel batubara. Proses pembakaran masih terjadi pada area di atas *outlet furnace*. Hal tersebut menyebabkan temperatur pada area *superheater* dan *reheater* menjadi lebih tinggi.

Kontur kecepatan hasil simulasi pada variasi sudut *tilt burner* dengan batubara jenis LRC ditampilkan pada gambar 2.20.



(a) Penampang Pada Sudut *Tilting*  $0^{\circ}$



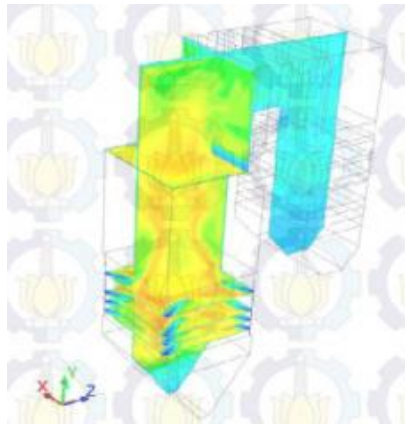
(b) Penampang Vertikal Pada Variasi Sudut *Tilt burner*

Gambar 2.20 Kontur Kecepatan *Boiler* dengan Batubara LRC (Hidayat, 2015)

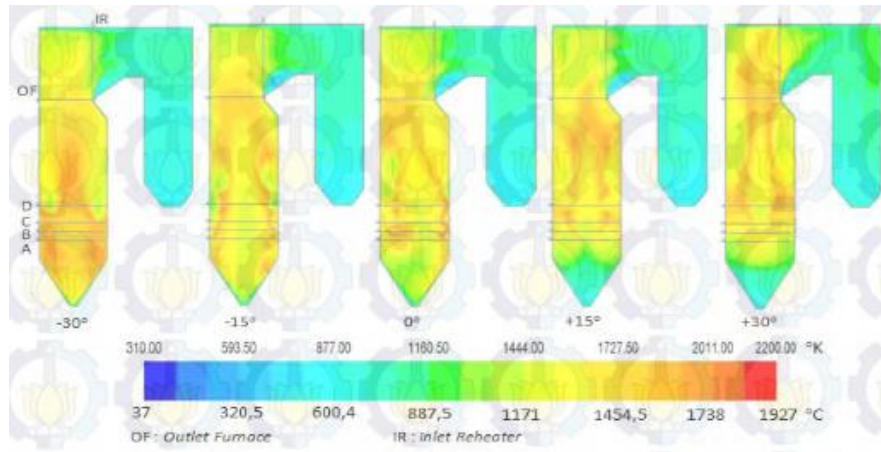
Kontur temperatur hasil simulasi diperlihatkan pada gambar 2.21 untuk kedua jenis batubara LRC dan MRC. Pengaruh perubahan setting sudut *tilt burner* untuk batubara LRC dan MRC menghasilkan kontur temperatur yang identik. Batubara jenis MRC menghasilkan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan batubara jenis LRC sebagaimana ditampilkan pada gambar 2.21. Temperatur tertinggi berada pada area *furnace* yang merupakan tempat dominan terjadinya pembakaran sempurna batubara. Kontur temperatur pada sudut *tilting downwards* memperlihatkan posisi kontur panas yang bergeser ke arah *bottom ash hopper*. Setting sudut *tilting upwards* menghasilkan pergerakan kontur panas yang lebih



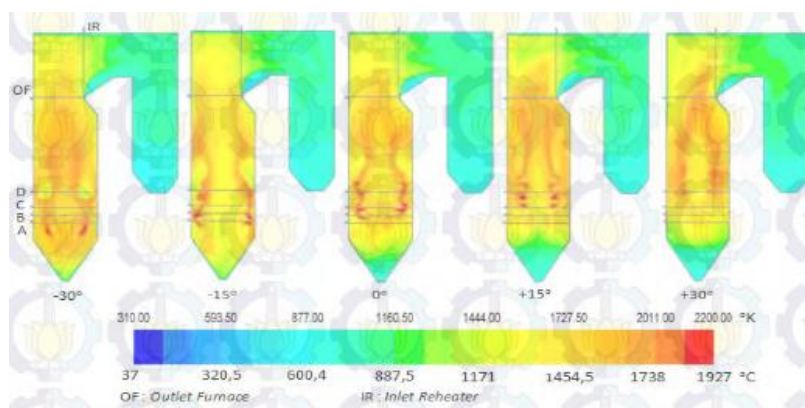
mengarah pada area *upper furnace*, bahkan mencapai area *superheater* untuk sudut tilting  $+30^{\circ}$ .



(a) Penampang Isometrik dengan Sudut *Tilting*  $0^{\circ}$



(b) Penampang Vertikal *Boiler* dengan Batubara Jenis LRC



(c) Penampang Vertikal *Boiler* dengan Batubara Jenis MRC

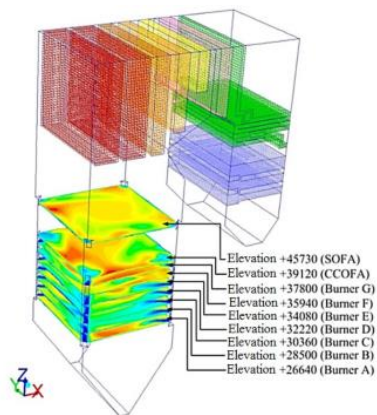
Gambar 2.21 Kontur Temperatur Boiler (Hidayat, 2015)

Arah sudut tilting *downwards* akan menurunkan temperatur *furnace outlet* maupun *inlet reheater*. Perubahan sudut tilting dari  $0^{\circ}$  menjadi  $-15^{\circ}$  memberikan penurunan temperatur sebesar  $15^{\circ}\text{C}$  pada *furnace outlet* dan  $13.48^{\circ}\text{C}$  pada *inlet reheater*. Sedangkan sudut tilting  $-30^{\circ}$  akan menurunkan temperatur *furnace outlet* sebesar  $52.05^{\circ}\text{C}$  dan  $30.32^{\circ}\text{C}$  pada *inlet reheater*. Data tersebut untuk input batubara jenis LRC. Batubara jenis MRC memberikan perubahan temperatur sebesar  $28.81^{\circ}\text{C}$  pada *furnace outlet* dan  $29.19^{\circ}\text{C}$  pada *inlet reheater* untuk sudut  $-15^{\circ}$ . Untuk sudut tilting  $-30^{\circ}$ , terjadi penurunan temperatur sebesar  $25.87^{\circ}\text{C}$  pada *furnace outlet* dan  $25.59^{\circ}\text{C}$  pada *inlet reheater*. Rekapitulasi perubahan temperatur tersebut ditampilkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Pengaruh Sudut *Tilting* Terhadap Temperatur *Boiler* (Hidayat, 2015)

| Tilting       | Perubahan Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) |          |                |          |
|---------------|---|----------|----------------|----------|
|               | LRC   |          | MRC            |          |
|               | Outlet Furnace                              | Inlet RH | Outlet Furnace | Inlet RH |
| $-30^{\circ}$ | -52,05                                      | -30,32   | -29,81         | -29,19   |
| $-15^{\circ}$ | -15   | -13,48   | -25,87         | -25,59   |
| $0^{\circ}$   | 0   | 0        | 0              | 0        |
| $+15^{\circ}$ | 18,3  | 25       | 13,2           | 12,16    |
| $+30^{\circ}$ | 39,8  | 70,74    | 34,51          | 51,36    |

Penelitian mengenai karakteristik pembakaran dan emisi gas buang pada *boiler* tangensial dengan komposisi batubara 70% LRC dan 30% MRC diusulkan oleh Sa'adiyah (Sa'Adiyah, Bangsa, Widodo, & Ikhwan, 2017). Penelitian dilakukan dengan pemodelan CFD dengan obyek boiler 625 MWe di PLTU Banten 1 Suralaya. Konfigurasi *nozzle* boiler tersusun atas 7 elevasi *coal burner* (A-G), *close-coupled over fire air* (CCOFA), dan *separated over fire air* (SOFA). Pemodelan dilakukan dengan variasi suplai batubara 70% LRC dan 30% MRC. *Case 1* menggunakan input batubara MRC pada elevasi *burner* A&C. *Case 2* menggunakan input batubara MRC pada elevasi *burner* E&G dengan kondisi *burner* F *standby*. Skematik konfigurasi *boiler* dan spesifikasi input batubara LRC-MRC diperlihatkan pada gambar 2.22.



**TABLE 1. Coals properties**

| <i>Fluent combusting particle materials</i>       | <b>Lignite-LRC</b>         | <b>coal-mv-MRC</b>         |
|---|----------------------------|----------------------------|
| <i>Density (kg/m<sup>3</sup>)</i>                 | 1350                       | 1400                       |
| <i>C<sub>p</sub> (J/kg K)</i>                     | 1399                       | 1500                       |
| <i>Laten Heat (kJ/kg)</i>                         | 1783,576                   | 1607,731                   |
| <i>Vaporation Temperature (K)</i>                 | 423,15                     | 423,15                     |
| <i>Volatile Component Fraction (%)</i>            | 33,33                      | 33,98                      |
| <i>Binary Difusivity (m<sup>2</sup>/s)</i>        | 0,0004                     | 0,0005                     |
| <i>Swelling Coefficient</i>                       | 2                          | 2                          |
| <i>Combustible Fraction (%)</i>                   | 29,11                      | 36,11                      |
| <i>React. Heat Fraction Absorbed by solid (%)</i> | 30                         | 30                         |
| <i>Devolatilization Model (1/s)</i>               | 20                         | 50                         |
| <i>Combustion Model</i>                           | Multiple surface reactions | Multiple surface reactions |

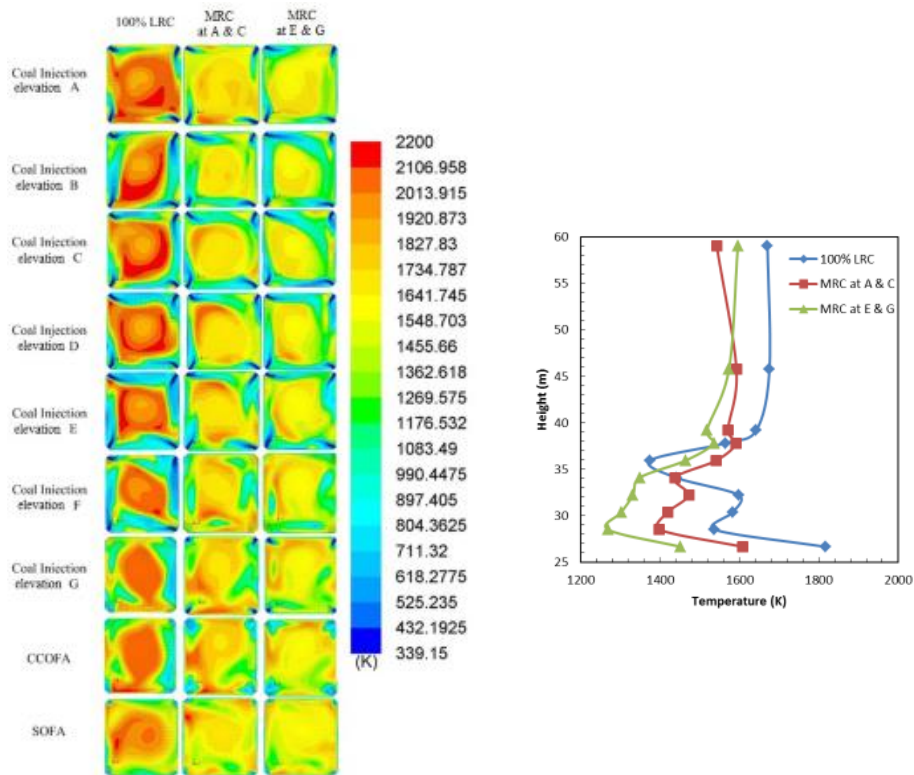
Gambar 2.22 Skematik Konfigurasi *Boiler* dan Data Spesifikasi Batubara (Sa'Adiyah et al., 2017)

Model 3-D *boiler* disimulasikan dengan setup simulasi numerik sebagaimana ditampilkan pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Setup Numerik Pemodelan (Sa'Adiyah et al., 2017)

| <b>Model</b>                      | <b>Information</b>                           |
|-----------------------------------|--|
| <i>Multiphase</i>                 | <i>Off</i>                                   |
| <i>Energy Equation</i>            | <i>On</i>                                    |
| <i>Viscous (turbulence model)</i> | <i>k-ε standard</i>                          |
| <i>Radiation</i>                  | <i>Off</i>                                   |
| <i>Heat Exchanger</i>             | <i>Off</i>                                   |
| <i>Species</i>                    | <i>Species transport (NOx : Thermal NOx)</i> |
| <i>Discrete Phase</i>             | <i>On</i>                                    |
| <i>Solidification</i>             | <i>Off</i>                                   |
| <i>Acoustic</i>                   | <i>Off</i>                                   |
| <i>Eulerian Wall Film</i>         | <i>Off</i>                                   |

Pada *case 1* distribusi temperatur pada area elevasi bawah cenderung tinggi yaitu sekitar 1800-2000 K. Temperatur yang tinggi mendorong terbakarnya batubara LRC yang berada di elevasi atas hingga terjadi *complete combustion*. Sedangkan pada *case 2* panas hasil pembakaran batubara LRC pada elevasi bawah tidak dapat membakar secara sempurna batubara MRC yang ada pada elevasi atas. Konsekuensi dari kondisi tersebut adalah terbakarnya sebagian batubara pada area *upper furnace* sehingga temperatur menjadi lebih tinggi. Hal tersebut tidak diinginkan karena dapat menyebabkan distribusi perpindahan panas pada area *superheater* dan *reheater* menjadi kurang baik. Kontur distribusi temperatur dan temperatur rata-rata pada *case 1* dan *case 2* tersebut ditunjukkan dengan gambar 2.23.



Gambar 2.23 Kontur Distribusi Temperatur dan Temperatur Rata-Rata *Boiler* pada Berbagai Elevasi (Sa'Adiyah et al., 2017)

Grafik distribusi temperatur pada arah x dan y ditampilkan pada Gambar 2.24. *Case 1* dan *2* menunjukkan distribusi temperatur yang lebih baik dibandingkan *standard case* (100% LRC), namun distribusi temperatur yang lebih merata dihasilkan pada kondisi *case 1*.

Dari hasil simulasi diperoleh kesimpulan bahwa penempatan batubara MRC pada elevasi *burner level* bawah (A&C) lebih direkomendasikan karena menghasilkan distribusi temperatur yang baik serta bentuk *fireball steady*.

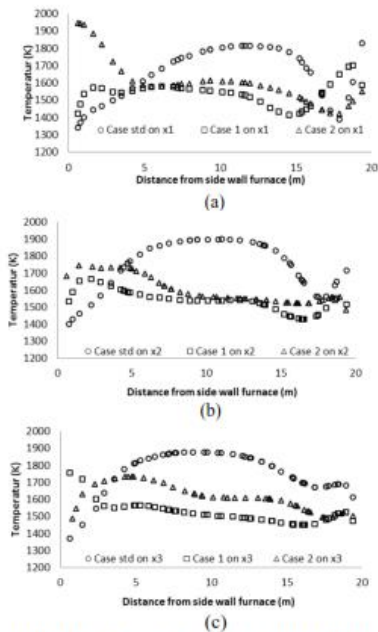


FIGURE 8. Comparison of measurement data at (a)  $x_1 = 3,6575$  m, (b)  $x_2 = 7,315$  m, (c)  $x_3 = 10,9725$  m

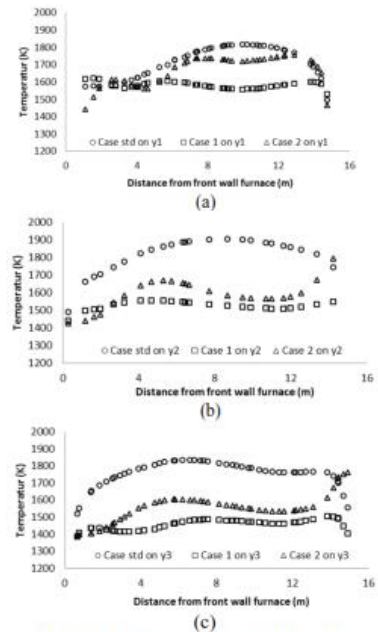


FIGURE 9. Comparison of measurement data at (a)  $y_1 = 4,8895$  m, (b)  $y_2 = 9,779$  m, dan (c)  $y_3 = 14,6685$  m

Gambar 2.24 Gambar Grafik Perbandingan Distribusi Temperatur *Boiler* (Sa'Adiyah et al., 2017)

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, nilai kondisi terbaik dari sudut *tilt burner* tidak ditentukan melalui metode optimasi tetapi hanya diperoleh berdasarkan hasil simulasi dari posisi sudut *tilt burner* yang telah ditentukan sebelumnya. Sedangkan pada penelitian ini, metode optimasi GA digunakan untuk mendapatkan posisi sudut *tilt burner* yang memberikan deviasi *boiler rear pass temperature* terkecil.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB 3**

### **METODE PENELITIAN**

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi numerik menggunakan *software* CFD untuk pemodelan dan analisa pembakaran pada *boiler*. Data temperatur output dari hasil simulasi digunakan sebagai input untuk optimasi dengan metode BPNN-GA (*Backpropagation Neural Network-Genetic Algorithm*). Dengan demikian diperoleh setting sudut *tilt burner boiler* untuk variasi nilai kalor batubara input yang dapat menyeimbangkan deviasi temperatur *left* dan *right side* boiler dan meminimalkan *boiler rear pass temperature* secara optimal.

#### **3.1 Tahapan Penelitian**

Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi kasus dan studi literatur

Studi kasus diambil dari kondisi operasional *boiler* di PLTU Banten 1 Suralaya. Permasalahan yang terjadi adalah kondisi suplai batubara yang bervariasi sehingga memerlukan adaptasi pada pola operasional *boiler*. Dalam hal ini adalah kondisi *boiler rear pass temperature* yang terpengaruh oleh nilai kalor batubara input boiler. Terjadi kenaikan *rear pass temperature* serta deviasi pada sisi *left* dan *right* boiler.

Studi literatur dilakukan untuk membantu menganalisa permasalahan yang terjadi yang berkaitan dengan simulasi numerik menggunakan *software* CFD. Simulasi numerik digunakan dalam analisa pembakaran di boiler PLTU. Studi literatur yang dilakukan berasal dari sumber jurnal, *e-book*, *handbook*, dan tugas akhir (skripsi/thesis/disertasi).

2. Tahap pengumpulan data (Primer dan Sekunder)

Pengumpulan data dilakukan sebagai sumber informasi dalam melakukan perhitungan, membuat pemodelan, dan sebagai validasi proses simulasi. Data-data tersebut meliputi data desain, data operasi, maupun data *performance test*.

### 3. Pemodelan dan Simulasi

Tahapan pemodelan dan simulasi terbagi menjadi tiga proses utama yaitu *preprocessing*, *processing/solving*, dan *postprocessing*. Langkah *preprocessing* meliputi proses pembuatan geometri *boiler*, penentuan domain geometri, *meshing* model geometri. Langkah *processing/solving* dilakukan dengan *software* CFD yang dilakukan yaitu *set up* model simulasi, sistem injeksi bahan bakar, material, *operating* dan *boundary condition*, *solution method*, *initialize*, serta *monitor residual*. Tahapan *postprocessing* dilakukan untuk menampilkan data kualitatif dan kuantitatif hasil dari proses simulasi. Data kualitatif dapat berupa kontur, vektor, *pathlines* dari parameter kecepatan, temperatur, tekanan, dsb. Sedangkan data kuantitatif dapat berupa grafik maupun tabel data.

### 4. Tahap Optimasi

Data kuantitatif hasil simulasi digunakan sebagai input untuk memperoleh titik optimal dari variasi parameter yang dilakukan. Optimasi dilakukan dengan metode gabungan BPNN-GA (*Backpropagation Neural Network-Genetic Algorithm*). BPNN akan *generate* persamaan empiris yang menggambarkan hubungan antara parameter input (variasi input) dengan output data hasil simulasi. GA akan mencari solusi optimal sesuai *requirement* yang dipersyaratkan.

### 5. Analisa dan kesimpulan

Kombinasi hasil simulasi CFD serta optimasi BPNN-GA dilakukan analisa untuk memperoleh rekomendasi terhadap kondisi operasi *boiler*. Dengan demikian akan didapat setting sudut *tilt burner* yang optimal untuk menyeimbangkan deviasi temperatur *left* dan *right side boiler* dan meminimalkan *boiler rear pass temperature*.

## 3.2 Rancangan Penelitian

Beberapa parameter setting operasi *boiler* yang mempengaruhi kondisi pembakaran serta penyerapan panas diantaranya adalah *primary* dan *secondary air flow*, *coal balance velocity*, posisi sudut *tilt burner*, posisi sudut CCOFA dan SOFA *nozzle*, serta jumlah *excess air*. Parameter-parameter setup tersebut telah dilakukan



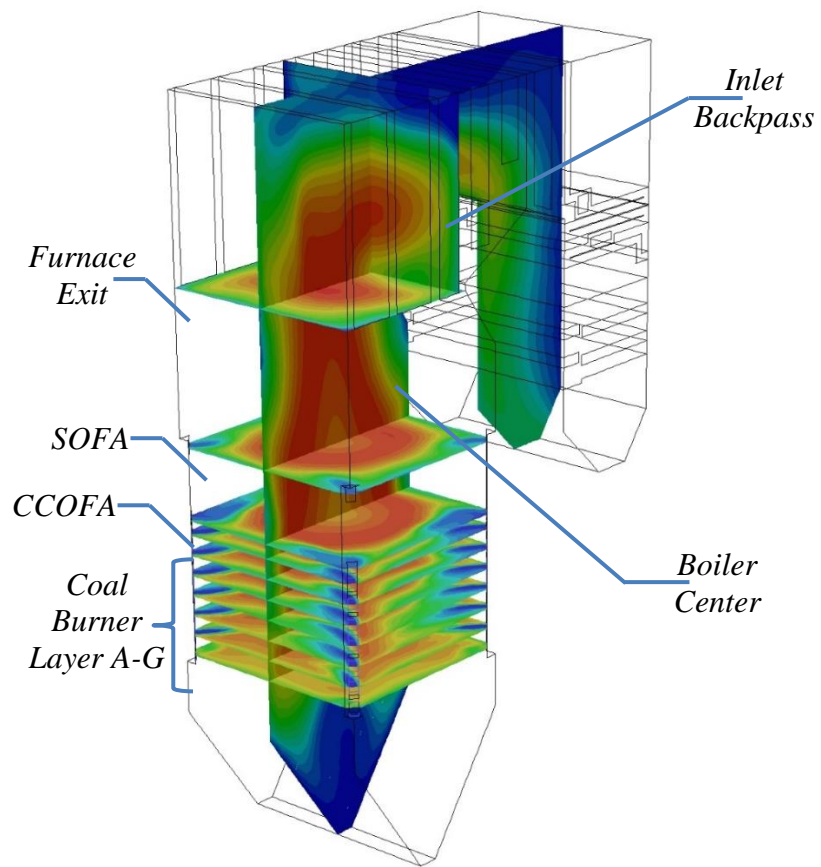
penyesuaian setting oleh bidang operasi kecuali sudut *tilt burner* dan CCOFA-SOFA *nozzle*. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan variasi sudut *tilt burner* untuk mengamati pengaruh sudut *tilt burner* terhadap kondisi pembakaran maupun penyerapan panas di *boiler*.

Sudut *tilt burner* pada *coal burner*, *secondary air nozzle*, dan CCOFA *nozzle* dapat di setting pada *range*  $-30^{\circ}$  hingga  $+30^{\circ}$ . Variasi sudut *tilt burner* pada penelitian ini diambil posisi sudut *tilt burner*  $-30^{\circ}$ ,  $-20^{\circ}$ ,  $-10^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ ,  $+10^{\circ}$ ,  $+20^{\circ}$ ,  $+30^{\circ}$  pada masing-masing kondisi batubara input. Posisi sudut *tilt burner* tersebut dianggap telah mewakili *range* setting operasional sudut *tilt burner*. Parameter respon yang diamati adalah *boiler rear pass temperature* karena posisi tersebut merupakan parameter temperatur yang pertama kali dilakukan pengukuran secara *online* pada area *furnace* hingga *rear pass boiler*. Posisi tersebut dianggap mewakili kondisi pembakaran serta penyerapan panas yang terjadi di *boiler*.

Rancangan parameter yang dilakukan pada penelitian ini ditampilkan pada tabel 3.1 sebagai berikut. Skema *surface* yang akan diamati pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.

Tabel 3.1 Rancangan Parameter Penelitian

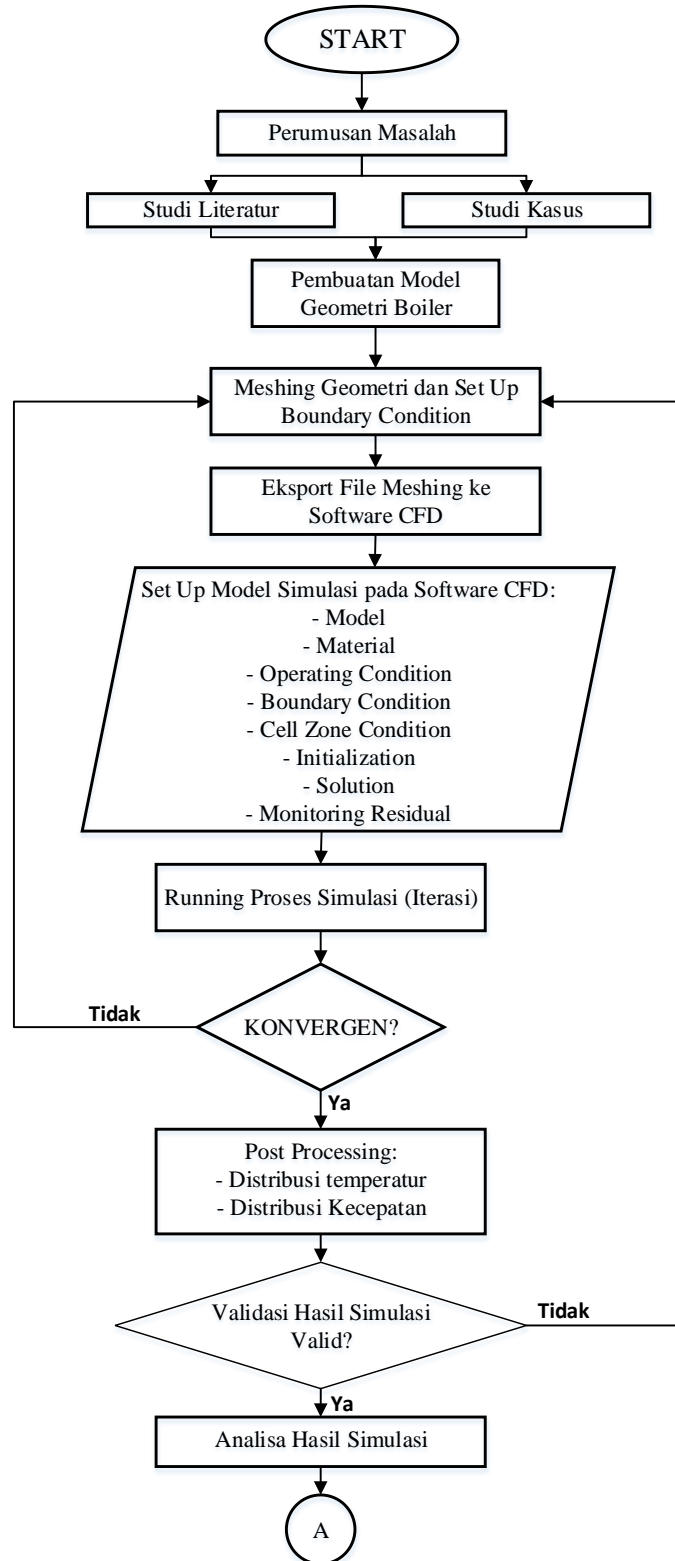
| Variasi Batubara   | Variasi Sudut <i>Tilt Burner</i>  | <i>Result</i>   | <i>Surface</i>         |
|--|---|---|------------------------|
| 1. Full LRC, <i>layer A</i> standby<br>2. MRC pada <i>layer B-C-D</i> dan LRC pada <i>layer E-F-G</i> , <i>layer A</i> standby | $-30^{\circ}$ , $-20^{\circ}$ , $-10^{\circ}$ , $0^{\circ}$ , $+10^{\circ}$ , $+20^{\circ}$ , $+30^{\circ}$ | <i>Contour Temperature</i>                                      | <i>Coal Burner A-G</i> |
|  |   |   | CCOFA                  |
|  |   |   | SOFA                   |
|  |   |   | <i>Furnace Exit</i>    |
|  |   |   | <i>Boiler Center</i>   |
|  |   | <i>Contour Kecepatan</i>  | <i>Coal Burner A-G</i> |
|  |   |   | CCOFA                  |
|  |   |   | SOFA                   |
|  |   |   | <i>Furnace Exit</i>    |
|  |   |   | <i>Boiler Center</i>   |
|  |   | <i>O<sub>2</sub> &amp; CO<sub>2</sub> contour mass fraction</i> | <i>Coal Burner A-G</i> |
|  |   |   | CCOFA                  |
| SOFA   |   |   |                        |
| <i>Furnace Exit</i>  |   |   |                        |



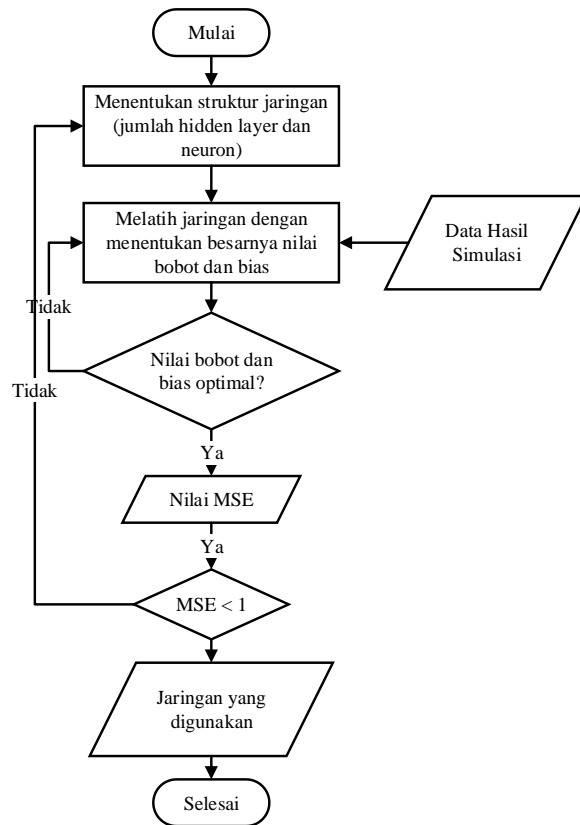
Gambar 3.1 Skema *Surface* Yang Akan Dilakukan Analisa

### 3.3 Flowchart Penelitian

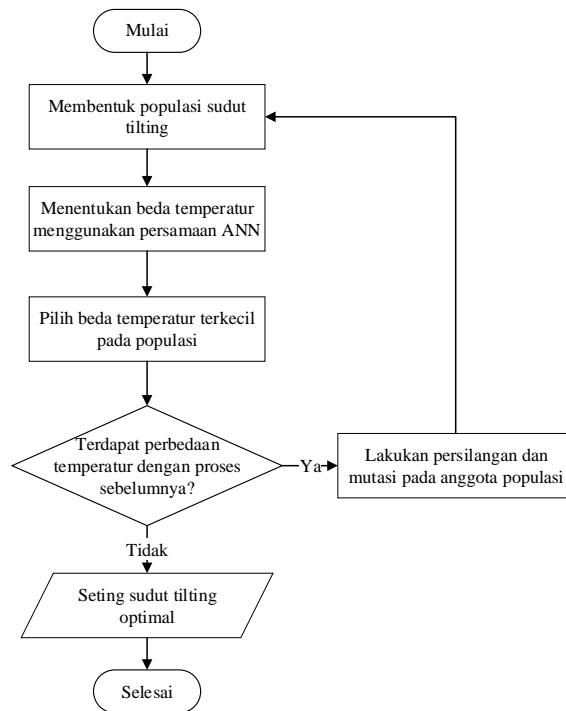
Metodologi pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut ini.



Gambar 3.2 Flowchart Metode Penelitian



a. Artificial Neural Network



b. Genetic Algorithm

Gambar 3.2 Flowchart Metode Penelitian (lanjutan)

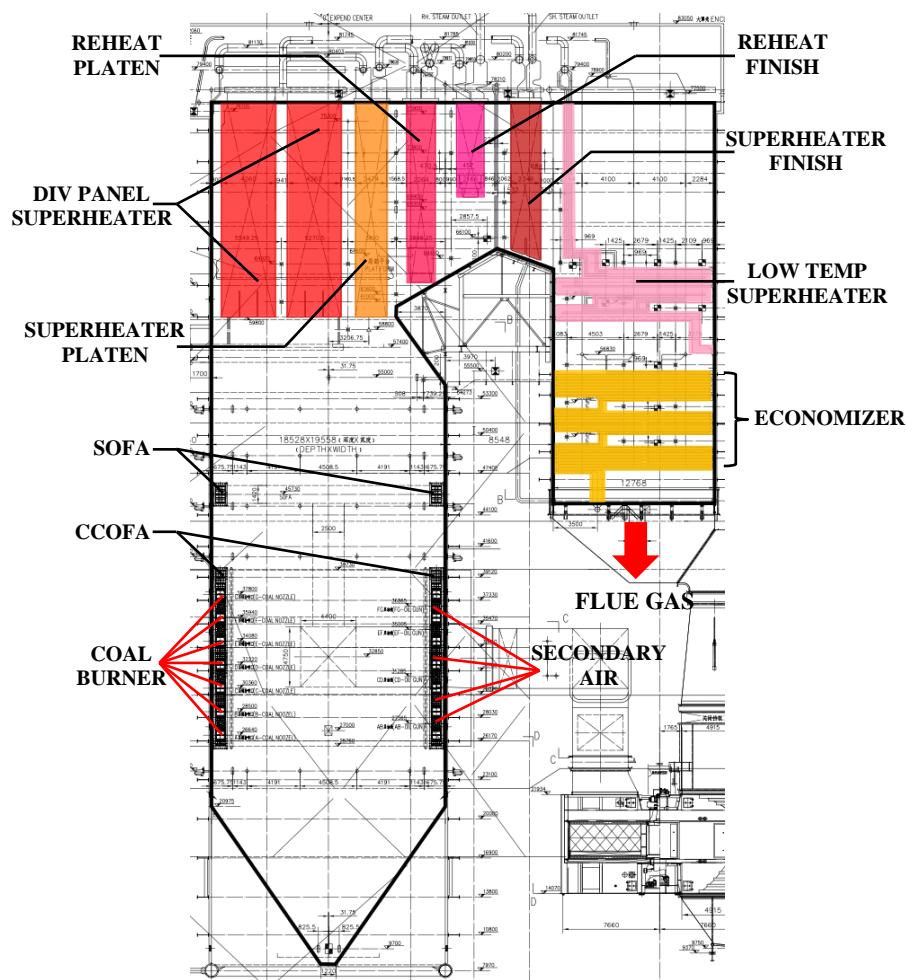
## BAB 4

### PEMODELAN DAN OPTIMASI

#### 4.1 Pemodelan dan Simulasi

##### a. Geometri Model Uji

Model uji yang digunakan pada penelitian ini adalah *boiler* PLTU Banten 1 Suralaya dengan kapasitas 1x625 MW sebagaimana ditampilkan pada gambar 4.1. Geometri model dibuat pada *software* GAMBIT dengan kondisi *full scale*.



Gambar 4.1. Geometri *Boiler* PLTU Banten 1 Suralaya (Tampak Samping)

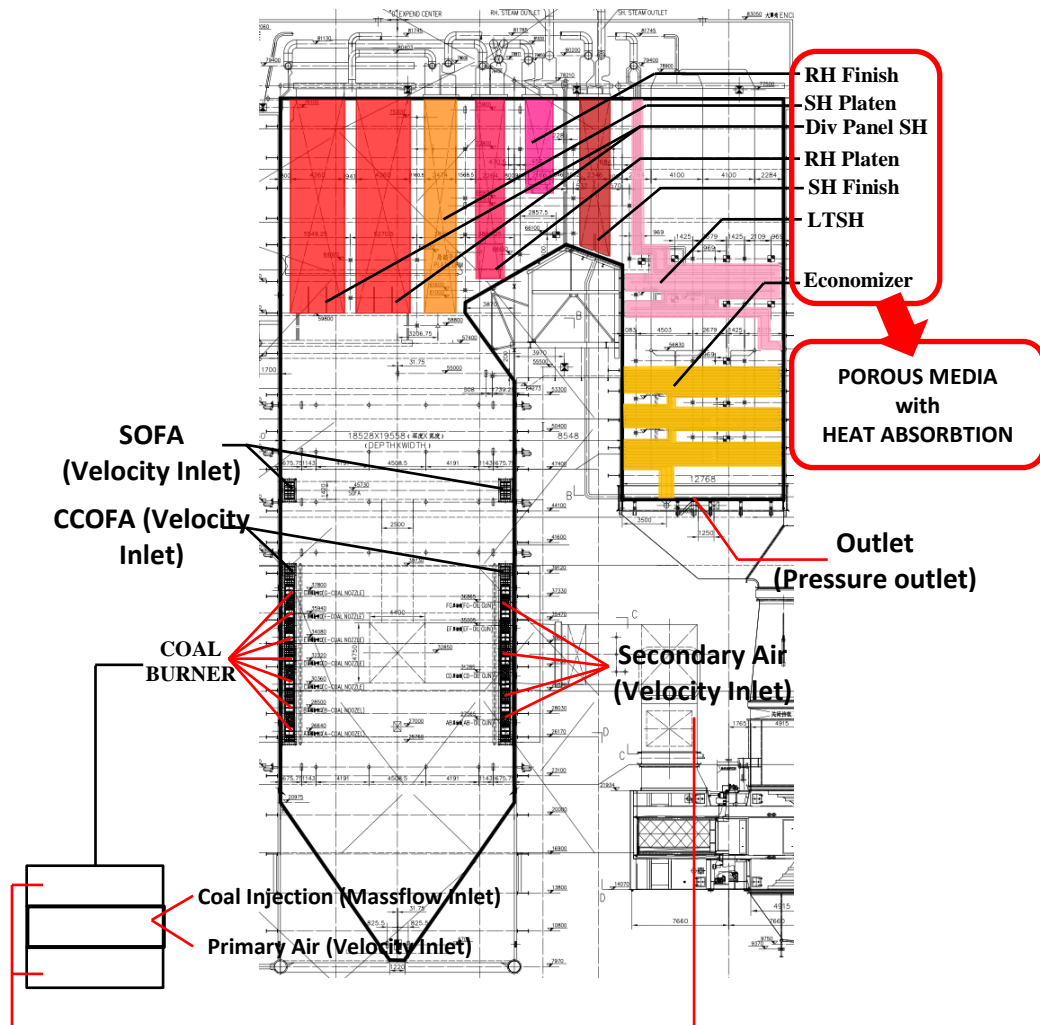
Sumber : *Shanghai Boiler Works, Ltd* (2009)

##### b. Domain Pemodelan

*Domain* pemodelan yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas :

- *Velocity inlet* untuk *primary air*, *secondary air*, SOFA, dan CCOFA *nozzle*.
- *Massflow inlet* untuk *coal injection* dengan *discrete phase injection*
- Susunan *heat exchanger* (*superheater*, *reheater*, *economizer*, LTSH) dimodelkan sebagai *porous media* dengan penyerapan panas (*heat generation* negatif)
- *Waterwall tube* dimodelkan sebagai *wall* dengan *heat flux* negatif.

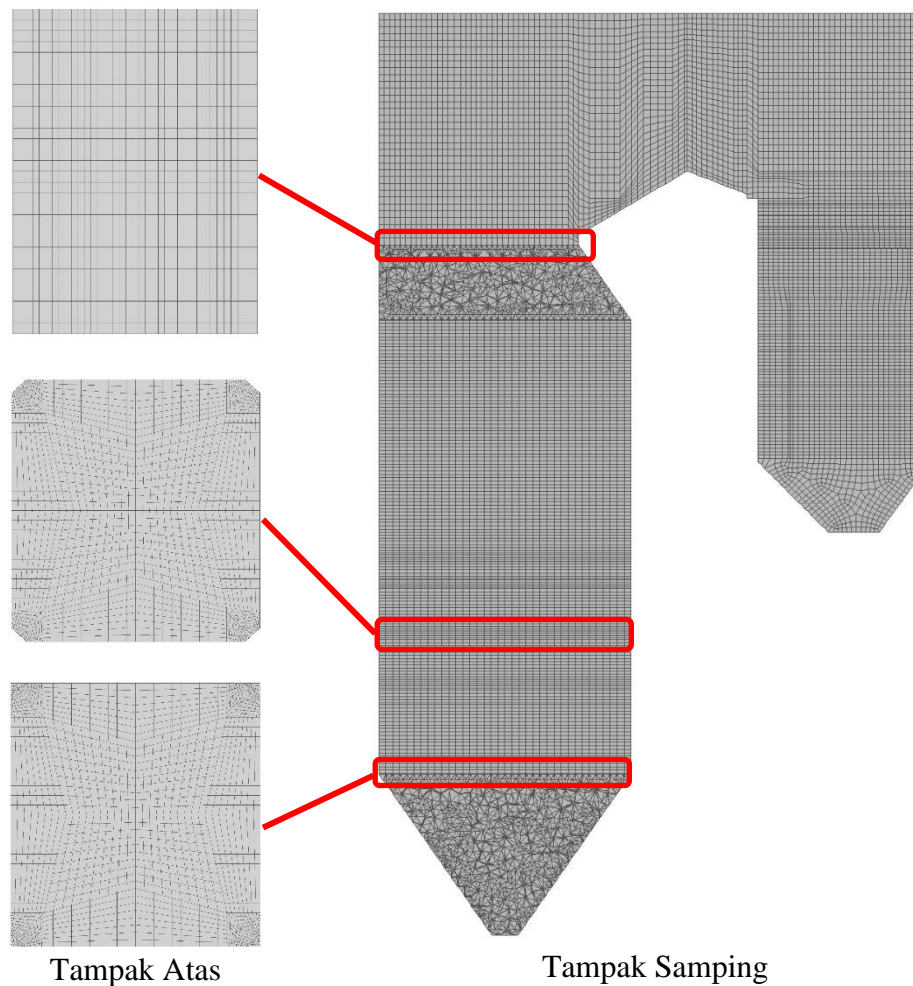
Domain pemodelan secara *general* diperlihatkan pada gambar 4.2 di bawah ini :



Gambar 4.2. Domain Pemodelan Simulasi

c. *Meshing*

Untuk mempermudah diskritisasi domain aliran serta penerapan persamaan pengendali pada domain aliran maka dilakukan proses *meshing* pada domain geometri model uji. *Meshing* merupakan proses pemecahan domain geometri menjadi volume yang lebih kecil. Akurasi hasil simulasi ditentukan oleh pemilihan model *meshing* geometri. Pemilihan model *meshing* dibuat semaksimal mungkin untuk mengikuti prediksi pola aliran yang terjadi. *Meshing* yang digunakan pada pemodelan simulasi terdiri atas 471.333 *nodes* dan 557.331 *cell*. Hasil *meshing* geometri model uji pada penelitian ini ditampilkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3. *Meshing* Geometri Boiler

d. Model

Set up model simulasi yang digunakan pada penelitian ini secara rinci ditampilkan pada tabel 4.1. Setup dilakukan pada software simulasi numerik ANSYS Fluent.

Tabel 4.1. Set Up Model pada software ANSYS Fluent

| Model                               | Set Up                             | Keterangan  |
|-------------------------------------|------------------------------------|---|
| <i>Multiphase</i>                   | <i>Off</i>                         | Fokus penelitian pada aliran <i>flue gas</i> yang dihasilkan dari proses pembakaran   |
| <i>Energy</i>                       | <i>On</i>                          | Penelitian mencakup transfer energi panas   |
| <i>Viscous (Turbulence)</i>         | <i>Realizable k-ε</i>              |   |
| <i>Radiation</i>                    | <i>Off</i>                         | Merujuk pada penelitian Sa'adiyah (2013) dan Candra (2015)  |
| <i>Heat Exchanger</i>               | <i>Off</i>                         | <i>Heat exchanger</i> dimodelkan sebagai <i>porous media</i> dengan penyerapan panas ( <i>heat generation</i> negatif)                |
| <i>Species</i>                      | <i>Species Transport, Reaction</i> | Spesies kimia yang diinjeksikan berupa aliran dengan reaksi kimia (pembakaran) yang telah didefinisikan pada material yang digunakan. |
| <i>Discrete Phase</i>               | <i>On</i>                          | Mendefinisikan injeksi untuk inlet batubara pada <i>burner</i> .  |
| <i>Solidification &amp; Melting</i> | <i>Off</i>                         | Tidak diperlukan  |
| <i>Acoustic</i>                     | <i>Off</i>                         | Tidak diperlukan  |
| <i>Eulerian Wall Film</i>           | <i>Off</i>                         | Tidak diperlukan  |
| <i>Electric Potential</i>           | <i>Off</i>                         | Tidak diperlukan  |

Susunan *superheater*, *reheater*, maupun *economizer* dimodelkan sebagai *porous media* yang mempunyai penyerapan panas (*heat absorption*) negatif. Perhitungan penyerapan panas didasarkan pada perubahan entalpi air/uap pada kondisi masuk dan keluar jajaran *heat exchanger* (detail perhitungan pada



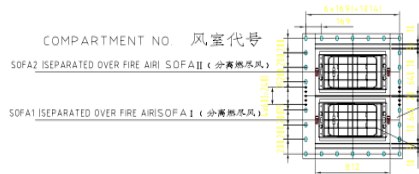
lampiran). Penyerapan panas pada masing-masing jajaran *heat exchanger* ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 *Heat Absorption* pada Jajaran *Heat Exchanger*

| <i>Heat Exchanger</i>            | <i>Heat Transfer (MW)</i> | <i>Heat Absorption Rate (W/m<sup>3</sup>)</i> |
|----------------------------------|---------------------------|---|
| <i>SH Division Panel (Front)</i> | 73,181                    | 51.667,164                                    |
| <i>SH Division Panel (Rear)</i>  | 73,181                    | 51.667,164                                    |
| <i>SH Platen</i>                 | 42,5                      | 51.667,164                                    |
| <i>RH Platen</i>                 | 139,841                   | 232.216,922                                   |
| <i>RH Finish</i>                 | 69,845                    | 232.216,922                                   |
| <i>SH Finish</i>                 | 49,408                    | 90.021,167                                    |
| <i>Low Temp. Superheater</i>     | 85,571                    | 85.059,997                                    |
| <i>Economizer</i>                | 83,499                    | 60.648,392                                    |

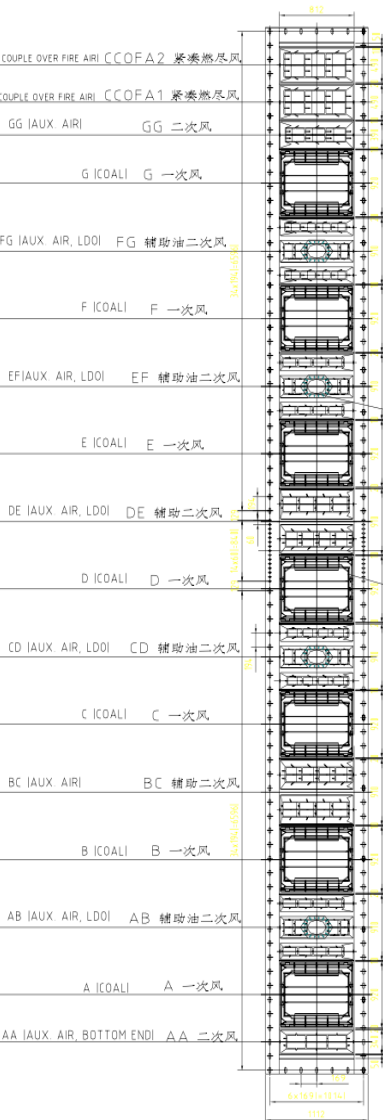
e. *Boundary Condition*

*Boundary condition* merupakan nilai dan kondisi input yang diberikan pada domain aliran untuk mendapatkan simulasi berjalan sesuai dengan fenomena fisik yang terjadi secara aktual. Input data *boundary condition* berasal dari pengukuran di lapangan maupun data perhitungan. *Set up boundary condition* ditampilkan pada Tabel 4.3 sedangkan susunan *coal burner* dan *secondary air nozzle* ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Tabel 4.3 *Boundary Condition* Untuk Auxiliary Air

| Auxiliary Air | Angle (°) | Temperature (°C)                     | Velocity (m/s)    |
|---------------|-----------|--------------------------------------|-------------------|
| AA            | 0         | Data hasil pengukuran instrumentasi  | Hasil perhitungan |
| A             | 0         |                                      |                   |
| AB1           | 4.5       |                                      |                   |
| AB2 (LDO)     | 4.5       | Non aktif (diasumsikan sebagai wall) |                   |
| AB3           | 4.5       | Data hasil pengukuran instrumentasi  | Hasil perhitungan |
| B             | 0         |                                      | Hasil perhitungan |
| BC1           | 4.5       |                                      | Hasil perhitungan |
| BC2           | 15        |                                      | Hasil perhitungan |
| C             | 0         |                                      | Hasil perhitungan |
| CD1           | 15        |                                      | Hasil perhitungan |
| CD2 (LDO)     | 4.5       | Non aktif (diasumsikan sebagai wall) |                   |
| CD3           | 15        | Data hasil pengukuran instrumentasi  | Hasil perhitungan |
| D             | 0         |                                      | Hasil perhitungan |
| DE1           | 15        |                                      |                   |
| DE2           | 4.5       |                                      |                   |
| E             | 0         |                                      |                   |
| EF1           | 4.5       | Non aktif (diasumsikan sebagai wall) |                   |
| EF2 (LDO)     | 4.5       | Data hasil pengukuran instrumentasi  | Hasil perhitungan |
| EF3           | 4.5       |                                      | Hasil perhitungan |
| F             | 0         |                                      | Hasil perhitungan |
| FG1           | -20       | Hasil perhitungan                    |                   |
| FG2 (LDO)     | 4.5       | Non aktif (diasumsikan sebagai wall) |                   |
| FG3           | -20       | Data hasil pengukuran instrumentasi  | Hasil perhitungan |
| G             | 0         |                                      | Hasil perhitungan |
| GG            | -25       |                                      | Hasil perhitungan |
| CCOFA 1 & 2   | -25       |                                      |                   |
| SOFA 1 & 2    | 0         |                                      |                   |



Gambar 4.4. *Burner Arrangement*

*Boundary condition* pada simulasi ini dapat digolongkan menjadi 4 tipe yaitu *wall*, *velocity inlet*, *pressure outlet*, dan *interior*. Udara primer dan udara

sekunder menggunakan *boundary condition velocity-inlet*, sedangkan pada *outlet boiler* menggunakan *pressure outlet*. *Primary air* masuk ke *furnace* melalui *burner layer* A, B, C, D, E, F, dan G tetapi pada simulasi ini *burner* A tidak dioperasikan sehingga didefinisikan sebagai *wall*. *Secondary air* masuk ke *furnace* melalui *burner* AA, AB, BC, CD, DE, EF, FG, GG, CCOFA dan SOFA.

*Reference frame* pada *setup velocity-inlet*, menggunakan *absolut*, metode spesifikasi *velocity* menggunakan *constant velocity magnitude*, metode spesifikasi arah menggunakan *direction vector* dengan sistem koordinat cartesian (X,Y,Z), metode spesifikasi turbulen menggunakan *intensity and hydraulic diameter*. Fraksi massa untuk semua *species* adalah nol kecuali untuk O<sub>2</sub> sebesar 0.23. *Resume* setup untuk *inlet boundary condition* ditampilkan pada Tabel 4.4 sebagai berikut :

Tabel 4.4 *Setup Inlet Boundary Condition*

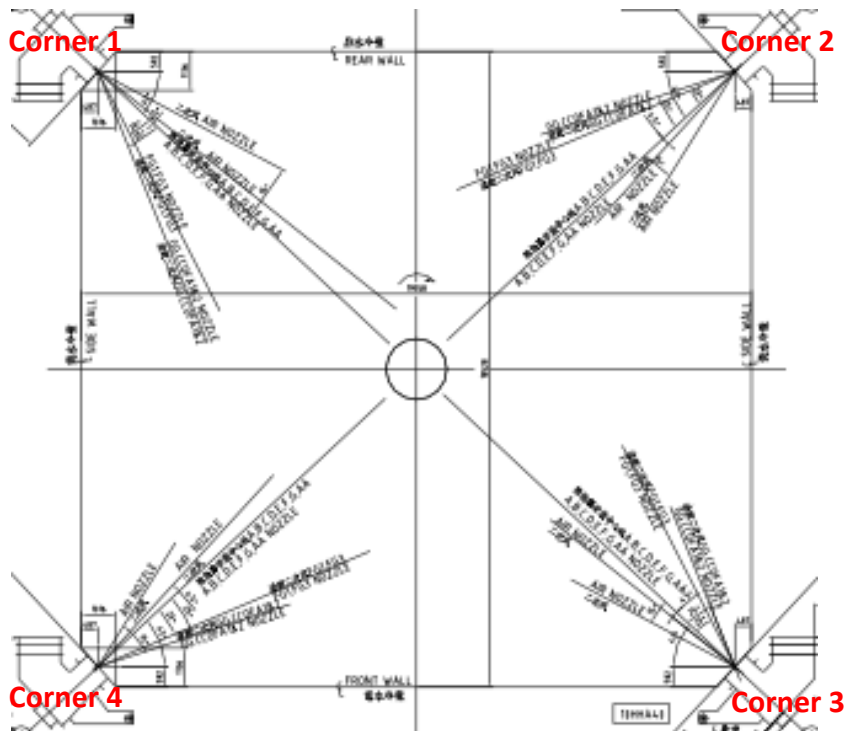
| Burner /Nozzle | Velocity Magnitude (m/s) | Turbulence Int. (%) | Hyd. Dia (mm) | Temperature (K) |
|----------------|--------------------------|---------------------|---------------|-----------------|
| AA             | 14,28313                 | 5                   | 500           | 576,61          |
| A              | (wall)                   | 5                   | 862           | (wall)          |
| AB             | 2.856626                 | 5                   | 690           | 576,61          |
| B              | 19,66176                 | 5                   | 862           | 332,514         |
| BC1            | 14,28313                 | 5                   | 595           | 576,61          |
| BC2            | 14,28313                 | 5                   | 595           | 576,61          |
| C              | 22,42242                 | 5                   | 862           | 330,998         |
| CD             | 14,28313                 | 5                   | 690           | 576,61          |
| D              | 22,08805                 | 5                   | 862           | 332,754         |
| DE1            | 14,28313                 | 5                   | 595           | 576,61          |
| DE2            | 14,28313                 | 5                   | 595           | 576,61          |
| E              | 21,48562                 | 5                   | 862           | 330,13          |
| EF             | 14,28313                 | 5                   | 690           | 576,61          |
| F              | 22,65311                 | 5                   | 862           | 331,72          |
| FG             | 14,28313                 | 5                   | 690           | 576,61          |
| G              | 21,49423                 | 5                   | 862           | 331,569         |
| GG             | 14,28313                 | 5                   | 545           | 576,61          |
| CCOFA1         | 27,10826                 | 5                   | 619           | 576,61          |
| CCOFA2         | 27,10826                 | 5                   | 619           | 576,61          |
| SOFA1          | 27,10826                 | 5                   | 500           | 576,61          |
| SOFA2          | 27,10826                 | 5                   | 500           | 576,61          |

*Outlet boundary condition* tekanan outlet -730 pascal dengan *backflow direction normal to boundary*. Fraksi massa untuk semua *species* adalah nol kecuali untuk O<sub>2</sub> sebesar 0.03. Setup pada *waterwall* menggunakan tipe *stationary wall*

dengan *heat flux* negatif sebesar  $-133.813,2 \text{ W/m}^2$  (data perhitungan terdapat pada lampiran).

f. Injeksi

Distribusi serbuk batubara ke *boiler* dilakukan dengan model injeksi melalui *burner nozzle* yang terdapat pada empat sudut *boiler furnace*. Terdapat 7 *layer coal burner*, yaitu elevasi A – G. Batubara diinjeksikan pada sudut *yaw*  $0^\circ$  sesuai desain *burner* sedangkan sudut *tilt burner* divariasikan sesuai rancangan penelitian. Posisi sudut *yaw* pada masing-masing *nozzle* diperlihatkan pada Gambar 4.5 sedangkan set up injeksi pada model simulasi ditampilkan pada Tabel 4.5.



Gambar 4.5 Sudut *Yaw* pada *Nozzle Burner* dan *Auxiliary Air*

Tabel.4.5 *Set Up* Injeksi pada Model Simulasi

| Parameter                     | <i>Set Up</i>                               | Keterangan   |
|-------------------------------|---|--|
| <i>Injection Type</i>         | <i>Surface</i>                              | Distribusi serbuk batubara berupa kelompok yang melewati nozzle dengan luasan tertentu masuk ke burner |
| <i>Particle Type</i>          | <i>Combusting</i>                           | Reaksi yang terjadi pada partikel yang diinjeksikan adalah reaksi pembakaran                           |
| <i>Material</i>               | <i>coal-mv-mrc (MRC)</i>                    | Sesuai permasalahan yang akan dianalisa  |
|                               | <i>coal-particle (LRC)</i>                  |  |
| <i>Diameter Distribution</i>  | <i>Rossin Ramler</i>                        | Distribusi diameter partikel serbuk batubara tidak memiliki nilai yang tetap                           |
| <i>Devolatilizing Species</i> | <i>coal-mv-mrc_vol (MRC)</i>                | Sesuai permasalahan yang akan dianalisa  |
|                               | <i>coal-particle_vol (LRC)</i>              |  |
| <i>Temperature (K)</i>        | <i>Sesuai data pengukuran instrumentasi</i> | Data DCS PLTU Banten 1 Suralaya  |
| <i>Total Flow Rate (kg/s)</i> | <i>Sesuai data pengukuran instrumentasi</i> | Data DCS PLTU Banten 1 Suralaya  |
| <i>Min Diameter (m)</i>       | 7e-05                                       | Diameter serbuk batubara untuk pulverized-coal boiler  |
| <i>Max Diameter (m)</i>       | 0.0002                                      |  |
| <i>Mean Diameter (m)</i>      | 0.000134                                    |  |
| <i>Spread Diameter</i>        | 4.52  | Tutorial ANSYS Fluent  |

Injeksi batubara dimodelkan dengan mengaktifkan *discrete phase* dan pilihan interaksi pada *interaction with continuous phase*. *Drag law* dimodelkan dalam *spherical* karena partikel batubara diasumsikan berbentuk bulat. *Injection type* dipilih *surface*, karena partikel batubara keluar dari seluruh permukaan *coal burner*, *particle type* merupakan *combusting particle* yang dapat terbakar. *Material* yang diinjeksikan untuk LRC adalah *coal-particle (LRC)* dan untuk MRC adalah *coal-mv-mrc (MRC)*. *Properties* batubara LRC dan MRC ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 *Properties* Batubara Setup Pemodelan

| <i>Properties</i>                                     | <i>coal-particle<br/>(LRC)</i> | <i>coal-mv-mrc<br/>(MRC)</i> |
|---|--------------------------------|------------------------------|
| <i>Density (kg/m<sup>3</sup>)</i>                     | 1250                           | 1400                         |
| <i>Specific Heat (J/kg.K)</i>                         | 1680                           | 1680                         |
| <i>Latent Heat (J/kg)</i>                             | 1783,576                       | 1607,731                     |
| <i>Vaporization Temperature (K)</i>                   | 423,15                         | 423,15                       |
| <i>Volatile Component Fraction (%)</i>                | 33,63                          | 33,29                        |
| <i>Binary Diffusivity (m<sup>2</sup>/s)</i>           | 0,0004                         | 0,0005                       |
| <i>Swelling Coefficient</i>                           | 2                              | 1                            |
| <i>Combustible Fraction (%)</i>                       | 27,51                          | 32,11                        |
| <i>React. Heat Fraction Absorbed by<br/>Solid (%)</i> | 30                             | 30                           |
| <i>Devolatilization Model (1/s)</i>                   | 20                             | 50                           |
| <i>Combustion Model</i>                               | <i>diffusion-limited</i>       | <i>diffusion-limited</i>     |

Diameter distribusi batubara menggunakan *rosin-ramler*, *devolating species* untuk LRC menggunakan *coal-particle\_vol* dan untuk MRC menggunakan *coal-mv-mrc\_vol*. *Setup point properties injection* pada masing-masing *coal burner* ditampilkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 *Setup Point Properties* pada Masing-Masing *Coal Burner Injection*

| <i>Coal<br/>Burner</i> | <i>X-Velocity<br/>(m/s)</i> | <i>Y-Velocity<br/>(m/s)</i> | <i>Z-Velocity<br/>(m/s)</i> | <i>Temperature<br/>(K)</i> | <i>Flowrate<br/>(kg/s)</i> |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| B1                     | 14,3797                     | -13,40929                   | 0                           | 332,514                    | 4,01                       |
| B2                     | -14,3797                    | -13,40929                   | 0                           | 332,514                    | 4,01                       |
| B3                     | -14,3797                    | 13,40929                    | 0                           | 332,514                    | 4,01                       |
| B4                     | 14,3797                     | 13,40929                    | 0                           | 332,514                    | 4,01                       |
| C1                     | 16,39872                    | -15,29057                   | 0                           | 330,998                    | 3,92                       |
| C2                     | -16,39872                   | -15,29057                   | 0                           | 330,998                    | 3,92                       |
| C3                     | -16,39872                   | 15,29057                    | 0                           | 330,998                    | 3,92                       |
| C4                     | 16,39872                    | 15,29057                    | 0                           | 330,998                    | 3,92                       |
| D1                     | 16,15417                    | -15,06401                   | 0                           | 332,754                    | 3,98                       |
| D2                     | -16,15417                   | -15,06401                   | 0                           | 332,754                    | 3,98                       |
| D3                     | -16,15417                   | 15,06401                    | 0                           | 332,754                    | 3,98                       |
| D4                     | 16,15417                    | 15,06401                    | 0                           | 332,754                    | 3,98                       |
| E1                     | 15,71359                    | -14,65316                   | 0                           | 330,13                     | 4                          |
| E2                     | -15,71359                   | -14,65316                   | 0                           | 330,13                     | 4                          |
| E3                     | -15,71359                   | 14,65316                    | 0                           | 330,13                     | 4                          |
| E4                     | 15,71359                    | 14,65316                    | 0                           | 330,13                     | 4                          |
| F1                     | 16,56744                    | -15,44938                   | 0                           | 331,72                     | 3,96                       |
| F2                     | -16,56744                   | -15,44938                   | 0                           | 331,72                     | 3,96                       |
| F3                     | -16,56744                   | 15,44938                    | 0                           | 331,72                     | 3,96                       |

|    |           |           |   |         |      |
|----|-----------|-----------|---|---------|------|
| F4 | 16,56744  | 15,44938  | 0 | 331,72  | 3,96 |
| G1 | 15,71988  | -14,65903 | 0 | 331,569 | 2,10 |
| G2 | -15,71988 | -14,65903 | 0 | 331,569 | 2,10 |
| G3 | -15,71988 | 14,65903  | 0 | 331,569 | 2,10 |
| G4 | 15,71988  | 14,65903  | 0 | 331,569 | 2,10 |

g. *Solution*

Pada simulasi ini digunakan *solution method* dengan algoritma SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation*). Penggunaan solusi ini merujuk pada penelitian Sa'adiyah (2013) dan Hidayat (2015).

h. *Initialization Methods*

*Initialize* merupakan proses pemberian nilai awal iterasi untuk mempermudah dan mempercepat proses konvergensi. Pada simulasi ini digunakan tipe *hybrid initialization*.

i. *Monitor Residual*

*Residual* merupakan batasan nilai yang ditetapkan pada setiap parameter untuk mencapai titik konvergen. Nilai *residual* yang ditetapkan pada simulasi ini adalah  $10^{-3}$  untuk semua parameter kecuali energi dengan nilai *residual*  $10^{-4}$ . Simulasi dinyatakan konvergen setelah nilai *residual* semua parameter lebih kecil dari nilai yang telah ditetapkan.

#### 4.2 Validasi Model Simulasi

Data hasil simulasi memerlukan proses validasi untuk memastikan bahwa model simulasi yang dibuat sudah mendekati kondisi aktual peralatan. Proses validasi dilakukan dengan membuat perbandingan data output simulasi dengan data terukur pada instrumentasi peralatan. Parameter aktual terukur mempunyai nilai yang berubah-ubah meskipun dalam *range* yang rendah. Sementara data output simulasi merupakan data tunggal. Oleh karena itu diperlukan metode untuk melakukan perbandingan nilai rata-rata hasil ukur dengan data tunggal hasil simulasi. Dalam hal ini dilakukan dengan pendekatan statistik.

Jika diasumsikan bahwa nilai rata-rata dari populasi data pengukuran adalah  $\mu$  dan nilai output simulasi adalah  $\mu_0$  maka dapat diambil hipotesa awal bahwa :

$$H_0 : \mu = \mu_0 \tag{4.1}$$

$$H_1 : \mu \neq \mu_0 \tag{4.2}$$

data simulasi dinyatakan valid jika  $\mu = \mu_0$ .

Untuk menguji hipotesa tersebut perlu dihitung nilai *test statistic*  $t_0$  dengan persamaan berikut :

$$t_0 = \frac{\bar{y} - \mu_0}{S / \sqrt{n}} \quad (4.3)$$

dengan :  $S = \text{sample variance}$

$n = \text{jumlah data sample}$

Hipotesa  $H_0$  tidak dapat diterima (*rejected*) jika nilai

$$|t_0| > t_{\alpha/2, n-1} \quad (4.4)$$

dimana  $t_{\alpha/2, n-1}$  adalah nilai distribusi  $t$  pada  $n-1$  *degree of freedom*. Nilai tersebut dapat diperoleh dari Tabel 4.8. Dengan demikian data hasil simulasi dinyatakan valid jika  $H_0$  gagal ditolak.



Tabel 4.8 Tabel Nilai Distribusi  $t$

**II Percentage Points of the  $t$  Distribution\***

| $\nu \backslash \alpha$ | 0.40  | 0.25  | 0.10  | 0.05  | 0.025  | 0.01   | 0.005  | 0.0025 | 0.001  | 0.0005 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1                       | 0.325 | 1.000 | 3.078 | 6.314 | 12.706 | 31.821 | 63.657 | 127.32 | 318.31 | 636.62 |
| 2                       | 0.289 | 0.816 | 1.886 | 2.920 | 4.303  | 6.965  | 9.925  | 14.089 | 23.326 | 31.598 |
| 3                       | 0.277 | 0.765 | 1.638 | 2.353 | 3.182  | 4.541  | 5.841  | 7.453  | 10.213 | 12.924 |
| 4                       | 0.271 | 0.741 | 1.533 | 2.132 | 2.776  | 3.747  | 4.604  | 5.598  | 7.173  | 8.610  |
| 5                       | 0.267 | 0.727 | 1.476 | 2.015 | 2.571  | 3.365  | 4.032  | 4.773  | 5.893  | 6.869  |
| 6                       | 0.265 | 0.727 | 1.440 | 1.943 | 2.447  | 3.143  | 3.707  | 4.317  | 5.208  | 5.959  |
| 7                       | 0.263 | 0.711 | 1.415 | 1.895 | 2.365  | 2.998  | 3.499  | 4.019  | 4.785  | 5.408  |
| 8                       | 0.262 | 0.706 | 1.397 | 1.860 | 2.306  | 2.896  | 3.355  | 3.833  | 4.501  | 5.041  |
| 9                       | 0.261 | 0.703 | 1.383 | 1.833 | 2.262  | 2.821  | 3.250  | 3.690  | 4.297  | 4.781  |
| 10                      | 0.260 | 0.700 | 1.372 | 1.812 | 2.228  | 2.764  | 3.169  | 3.581  | 4.144  | 4.587  |
| 11                      | 0.260 | 0.697 | 1.363 | 1.796 | 2.201  | 2.718  | 3.106  | 3.497  | 4.025  | 4.437  |
| 12                      | 0.259 | 0.695 | 1.356 | 1.782 | 2.179  | 2.681  | 3.055  | 3.428  | 3.930  | 4.318  |
| 13                      | 0.259 | 0.694 | 1.350 | 1.771 | 2.160  | 2.650  | 3.012  | 3.372  | 3.852  | 4.221  |
| 14                      | 0.258 | 0.692 | 1.345 | 1.761 | 2.145  | 2.624  | 2.977  | 3.326  | 3.787  | 4.140  |
| 15                      | 0.258 | 0.691 | 1.341 | 1.753 | 2.131  | 2.602  | 2.947  | 3.286  | 3.733  | 4.073  |
| 16                      | 0.258 | 0.690 | 1.337 | 1.746 | 2.120  | 2.583  | 2.921  | 3.252  | 3.686  | 4.015  |
| 17                      | 0.257 | 0.689 | 1.333 | 1.740 | 2.110  | 2.567  | 2.898  | 3.222  | 3.646  | 3.965  |
| 18                      | 0.257 | 0.688 | 1.330 | 1.734 | 2.101  | 2.552  | 2.878  | 3.197  | 3.610  | 3.922  |
| 19                      | 0.257 | 0.688 | 1.328 | 1.729 | 2.093  | 2.539  | 2.861  | 3.174  | 3.579  | 3.883  |
| 20                      | 0.257 | 0.687 | 1.325 | 1.725 | 2.086  | 2.528  | 2.845  | 3.153  | 3.552  | 3.850  |
| 21                      | 0.257 | 0.686 | 1.323 | 1.721 | 2.080  | 2.518  | 2.831  | 3.135  | 3.527  | 3.819  |
| 22                      | 0.256 | 0.686 | 1.321 | 1.717 | 2.074  | 2.508  | 2.819  | 3.119  | 3.505  | 3.792  |
| 23                      | 0.256 | 0.685 | 1.319 | 1.714 | 2.069  | 2.500  | 2.807  | 3.104  | 3.485  | 3.767  |
| 24                      | 0.256 | 0.685 | 1.318 | 1.711 | 2.064  | 2.492  | 2.797  | 3.091  | 3.467  | 3.745  |
| 25                      | 0.256 | 0.684 | 1.316 | 1.708 | 2.060  | 2.485  | 2.787  | 3.078  | 3.450  | 3.725  |
| 26                      | 0.256 | 0.684 | 1.315 | 1.706 | 2.056  | 2.479  | 2.779  | 3.067  | 3.435  | 3.707  |
| 27                      | 0.256 | 0.684 | 1.314 | 1.703 | 2.052  | 2.473  | 2.771  | 3.057  | 3.421  | 3.690  |
| 28                      | 0.256 | 0.683 | 1.313 | 1.701 | 2.048  | 2.467  | 2.763  | 3.047  | 3.408  | 3.674  |
| 29                      | 0.256 | 0.683 | 1.311 | 1.699 | 2.045  | 2.462  | 2.756  | 3.038  | 3.396  | 3.659  |
| 30                      | 0.256 | 0.683 | 1.310 | 1.697 | 2.042  | 2.457  | 2.750  | 3.030  | 3.385  | 3.646  |
| 40                      | 0.255 | 0.681 | 1.303 | 1.684 | 2.021  | 2.423  | 2.704  | 2.971  | 3.307  | 3.551  |
| 60                      | 0.254 | 0.679 | 1.296 | 1.671 | 2.000  | 2.390  | 2.660  | 2.915  | 3.232  | 3.460  |
| 120                     | 0.254 | 0.677 | 1.289 | 1.658 | 1.980  | 2.358  | 2.617  | 2.860  | 3.160  | 3.373  |
| $\infty$                | 0.253 | 0.674 | 1.282 | 1.645 | 1.960  | 2.326  | 2.576  | 2.807  | 3.090  | 3.291  |

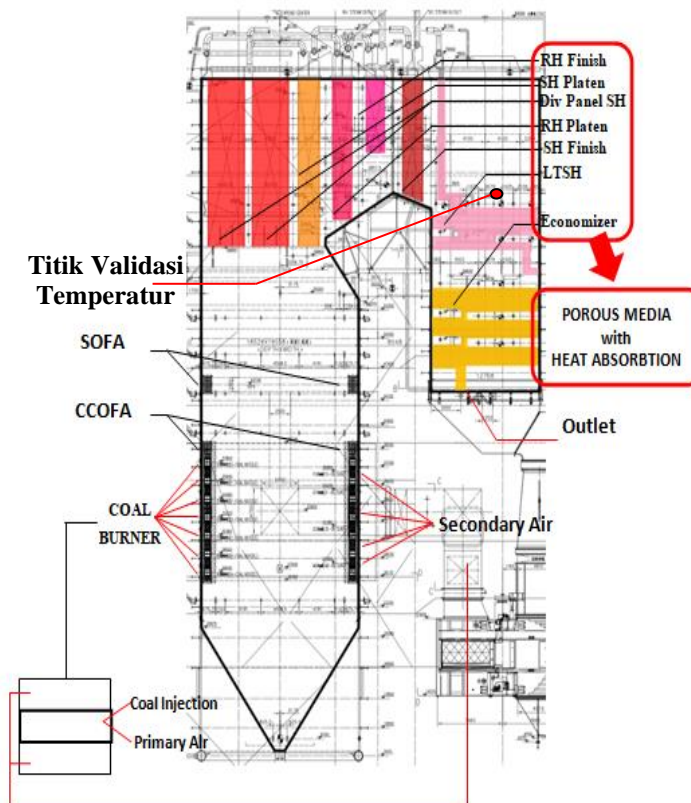
$\nu$  = Degrees of freedom.

\*Adapted with permission from *Biometrika Tables for Statisticians*, Vol. 1, 3rd edition, by E. S. Pearson and H. O. Hartley, Cambridge University Press, Cambridge, 1966.

Sumber : (*Design and Analysis of Experiments - Montgomery - 5th edition, n.d.*)

Data operasional yang digunakan sebagai data validasi diambil berdasarkan data *performance test* yang dilaksanakan pada tanggal 19 Desember 2017 jam 09:40 – 11:40 WIB. Kondisi *coal burner* yang beroperasi B – G (A *standby*) dengan posisi sudut *tilt burner*  $0^{\circ}$ . *Unit load* pada kondisi konstan sekitar

504 MW menggunakan batubara LRC dengan nilai kalor rata-rata 4.093 kcal/kg HHV. Titik validasi yang digunakan adalah posisi *rear pass temperature boiler* (sesuai dengan titik yang akan dianalisa) sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6 Posisi Titik Validasi pada *Boiler*

### 4.3 Optimasi Hasil Simulasi

Selanjutnya data output dari simulasi diproses dengan metode gabungan *backpropagation neural network-genetic algorithm* (BPNN-GA) untuk mendapatkan setting sudut *tilt burner* yang optimal. Pada penelitian ini, ANN digunakan untuk mempelajari hubungan antara parameter setting *tilt burner* dan nilai kalor batubara terhadap kondisi *boiler rear pass temperature*. ANN akan *generate* persamaan empiris (*function*) yang menggambarkan hubungan antara parameter input (variasi input) dengan output data hasil simulasi. Proses ANN training dilakukan dengan software MATLAB. Adapun *script* pada *software* untuk ANN *training* adalah sebagai berikut :

```

% Solve an Input-Output Fitting problem with a Neural
Network
% Script generated by NFTOOL
%
% This script assumes these variables are defined:
%
%   houseInputs - input data.
%   houseTargets - target data.
clear
perf=1e16;
for i=1:1000
    clc
    inputs = [-30 -20 -10 0 10 20 30];
    targets = [134.54122 202.9351 99.98641 97.81519 76.2614
81.44409 71.08948];

% Create a Fitting Network
hiddenLayerSize = [3];
net = fitnet(hiddenLayerSize);

% Set up Division of Data for Training, Validation,
Testing
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;

% Train the Network
[net,tr] = train(net,inputs,targets);

% Test the Network
outputs = net(inputs);
errors = gsubtract(outputs,targets);
performance = perform(net,targets,outputs);
wb = formwb(net,net.b,net.iw,net.lw);
[b,iw,lw] = separatewb(net,wb)

if performance < perf
    genFunction(net, 'RearPassTempFcnB3');
    perf=performance
end;
end
errors
mse=perf

% View the Network
%view(net);

% Plots
% Uncomment these lines to enable various plots.
% figure, plotperform(tr)
% figure, plottrainstate(tr)
% figure, plotfit(targets,outputs)
% figure, plotregression(targets,outputs)
% figure, ploterrhist(errors)

```

**Gambar 4.7 Script ANN Training pada Software MATLAB**

Struktur ANN dengan hasil MSE yang paling rendah merupakan *function* yang paling mendekati hasil output simulasi. Ada 3 fungsi yang akan dioptimalkan secara bersamaan dengan GA, yaitu yaitu deviasi *A-side temperature* terhadap *B-side temperature* (A-B), *A-side temperature* terhadap nilai 813 K (A-813), serta *B-side temperature* terhadap nilai 813 K (B-813). Ketiga fungsi tersebut dioptimalkan secara bersamaan dalam satu *objective function* dengan bobot yang telah ditentukan. Adapun *script* untuk *objective function* dan GA pada *software* MATLAB adalah :

```
function y = ObjectiveFcn(x)

obj1=RearPassTempFcnAB6(x);
obj2=RearPassTempFcnA9(x);
obj3=RearPassTempFcnB18(x);

lamda1=4/10;
lamda2=3/10;
lamda3=3/10;

y=lamda1*obj1.^2+lamda2*obj2.^2+lamda3*obj3.^2;

clc

lb = -30;
ub = 30;

opts = gaoptimset('PlotFcns',@gaplotbestf);
rng(1,'twister') % for reproducibility
IntCon = 1;
[x,fval] = ga(@ObjectiveFcn,1,[],[],[],[],...
    lb,ub,[],IntCon,opts);

Tilt=x
TempA=RearPassTempFcnA3(x)+813
TempB=RearPassTempFcnB4(x)+813
```

Gambar 4.8 Script *Objective Function* dan *Genetic Algorithm* pada MATLAB

## BAB 5

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

#### 5.1 Validasi Analisa Numerik

Validasi dari proses simulasi dilakukan dengan analisa statistik yaitu membandingkan nilai rata-rata *sample* hasil pengukuran instrumentasi pada *boiler* dengan nilai output dari simulasi. Perhitungan validasi berdasarkan persamaan (4.1) – (4.4) dengan nilai *error*  $\alpha$  sebesar 5%. Nilai *sample* hasil pengukuran diambil selama durasi waktu pelaksanaan *performance test* yang ditampilkan dalam tabel 5.1.

Tabel 5.1 Data Nilai *Sample* Hasil Ukur Pada Titik Validasi

| No | A(right) Side Gas Temp (C) | B(left) Side Gas Temp (C) |
|----|----------------------------|---------------------------|
| 1  | 572,82056                  | 563,23212                 |
| 2  | 573,24805                  | 565,34436                 |
| 3  | 572,95367                  | 563,75391                 |
| 4  | 572,47595                  | 564,47504                 |
| 5  | 573,36414                  | 564,69476                 |
| 6  | 568,92975                  | 560,81775                 |
| 7  | 570,72522                  | 562,20197                 |
| 8  | 571,33868                  | 563,27502                 |
| 9  | 572,21191                  | 562,7735                  |
| 10 | 572,90637                  | 561,77374                 |
| 11 | 572,40625                  | 558,57825                 |
| 12 | 566,32867                  | 556,92499                 |
| 13 | 565,31122                  | 556,12817                 |
| 14 | 575,31573                  | 560,19727                 |
| 15 | 576,03357                  | 562,37842                 |
| 16 | 575,50909                  | 560,76495                 |
| 17 | 574,88251                  | 561,36871                 |
| 18 | 575,53143                  | 561,56061                 |
| 19 | 571,28607                  | 557,68573                 |
| 20 | 573,4541                   | 558,1701                  |
| 21 | 574,05621                  | 558,58765                 |
| 22 | 574,61517                  | 558,15814                 |
| 23 | 575,11768                  | 558,18182                 |
| 24 | 574,3291                   | 554,9765                  |
| 25 | 568,10675                  | 553,79681                 |
| 26 | 567,47394                  | 554,07446                 |

Berdasarkan Tabel 4.8, untuk nilai *error*  $\alpha$  sebesar 5% serta jumlah data sebanyak 26 *sample* diperoleh nilai  $t_{\alpha/2, n-1} = 2,060$  sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5.1.

II Percentage Points of the *t* Distribution\*

| $\alpha$<br>$\nu$ | 0.40  | 0.25  | 0.10  | 0.05  | 0.025  | 0.01   | 0.005  | 0.0025 | 0.001  | 0.0005 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1                 | 0.325 | 1.000 | 3.078 | 6.314 | 12.706 | 31.821 | 63.657 | 127.32 | 318.31 | 636.62 |
| 2                 | 0.289 | 0.816 | 1.886 | 2.920 | 4.303  | 6.965  | 9.925  | 14.089 | 23.326 | 31.598 |
| 3                 | 0.277 | 0.765 | 1.638 | 2.353 | 3.182  | 4.541  | 5.841  | 7.453  | 10.213 | 12.924 |
| 4                 | 0.271 | 0.741 | 1.533 | 2.132 | 2.776  | 3.747  | 4.604  | 5.598  | 7.173  | 8.610  |
| 5                 | 0.267 | 0.727 | 1.476 | 2.015 | 2.571  | 3.365  | 4.032  | 4.773  | 5.893  | 6.869  |
| 6                 | 0.265 | 0.727 | 1.440 | 1.943 | 2.447  | 3.143  | 3.707  | 4.317  | 5.208  | 5.959  |
| 7                 | 0.263 | 0.711 | 1.415 | 1.895 | 2.365  | 2.998  | 3.499  | 4.019  | 4.785  | 5.408  |
| 8                 | 0.262 | 0.706 | 1.397 | 1.860 | 2.306  | 2.896  | 3.355  | 3.833  | 4.501  | 5.041  |
| 9                 | 0.261 | 0.703 | 1.383 | 1.833 | 2.262  | 2.821  | 3.250  | 3.690  | 4.297  | 4.781  |
| 10                | 0.260 | 0.700 | 1.372 | 1.812 | 2.228  | 2.764  | 3.169  | 3.581  | 4.144  | 4.587  |
| 11                | 0.260 | 0.697 | 1.363 | 1.796 | 2.201  | 2.718  | 3.106  | 3.497  | 4.025  | 4.437  |
| 12                | 0.259 | 0.695 | 1.356 | 1.782 | 2.179  | 2.681  | 3.055  | 3.428  | 3.930  | 4.318  |
| 13                | 0.259 | 0.694 | 1.350 | 1.771 | 2.160  | 2.650  | 3.012  | 3.372  | 3.852  | 4.221  |
| 14                | 0.258 | 0.692 | 1.345 | 1.761 | 2.145  | 2.624  | 2.977  | 3.326  | 3.787  | 4.140  |
| 15                | 0.258 | 0.691 | 1.341 | 1.753 | 2.131  | 2.602  | 2.947  | 3.286  | 3.733  | 4.073  |
| 16                | 0.258 | 0.690 | 1.337 | 1.746 | 2.120  | 2.583  | 2.921  | 3.252  | 3.686  | 4.015  |
| 17                | 0.257 | 0.689 | 1.333 | 1.740 | 2.110  | 2.567  | 2.898  | 3.222  | 3.646  | 3.965  |
| 18                | 0.257 | 0.688 | 1.330 | 1.734 | 2.101  | 2.552  | 2.878  | 3.197  | 3.610  | 3.922  |
| 19                | 0.257 | 0.688 | 1.328 | 1.729 | 2.093  | 2.539  | 2.861  | 3.174  | 3.579  | 3.883  |
| 20                | 0.257 | 0.687 | 1.325 | 1.725 | 2.086  | 2.528  | 2.845  | 3.153  | 3.552  | 3.850  |
| 21                | 0.257 | 0.686 | 1.323 | 1.721 | 2.080  | 2.518  | 2.831  | 3.135  | 3.527  | 3.819  |
| 22                | 0.256 | 0.686 | 1.321 | 1.717 | 2.074  | 2.508  | 2.819  | 3.119  | 3.505  | 3.792  |
| 23                | 0.256 | 0.685 | 1.319 | 1.714 | 2.069  | 2.500  | 2.807  | 3.104  | 3.485  | 3.767  |
| 24                | 0.256 | 0.685 | 1.318 | 1.711 | 2.064  | 2.492  | 2.797  | 3.091  | 3.467  | 3.745  |
| 25                | 0.256 | 0.684 | 1.316 | 1.708 | 2.060  | 2.485  | 2.787  | 3.078  | 3.450  | 3.725  |
| 26                | 0.256 | 0.684 | 1.315 | 1.706 | 2.056  | 2.479  | 2.779  | 3.067  | 3.435  | 3.707  |
| 27                | 0.256 | 0.684 | 1.314 | 1.703 | 2.052  | 2.473  | 2.771  | 3.057  | 3.421  | 3.690  |
| 28                | 0.256 | 0.683 | 1.313 | 1.701 | 2.048  | 2.467  | 2.763  | 3.047  | 3.408  | 3.674  |
| 29                | 0.256 | 0.683 | 1.311 | 1.699 | 2.045  | 2.462  | 2.756  | 3.038  | 3.396  | 3.659  |
| 30                | 0.256 | 0.683 | 1.310 | 1.697 | 2.042  | 2.457  | 2.750  | 3.030  | 3.385  | 3.646  |
| 40                | 0.255 | 0.681 | 1.303 | 1.684 | 2.021  | 2.423  | 2.704  | 2.971  | 3.307  | 3.551  |
| 60                | 0.254 | 0.679 | 1.296 | 1.671 | 2.000  | 2.390  | 2.660  | 2.915  | 3.232  | 3.460  |
| 120               | 0.254 | 0.677 | 1.289 | 1.658 | 1.980  | 2.358  | 2.617  | 2.860  | 3.160  | 3.373  |
| $\infty$          | 0.253 | 0.674 | 1.282 | 1.645 | 1.960  | 2.326  | 2.576  | 2.807  | 3.090  | 3.291  |

$\nu$  = Degrees of freedom.  
\*Adapted with permission from *Biometrika Tables for Statisticians*, Vol. 1, 3rd edition, by E. S. Pearson and H. O. Harley. Cambridge University Press, Cambridge, 1966.

Gambar 5.1 Nilai  $t_{\alpha/2, n-1}$  untuk  $\alpha = 5\%$  dan 25 *Degree of Freedom*

Data output simulasi pada *A(right) side gas temperature* sebesar 844,30898 K dan *B(left) side gas temperature* sebesar 833,699 K dipergunakan untuk menghitung nilai  $|t_0|$  pada kedua titik validasi tersebut sebagai berikut:

a) *A(right) Side Gas Temperature*

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 844,30898 \\ \bar{y} &= 845,3358 \\ S &= 2,943163 \\ n &= 26 \end{aligned} \quad t_0 = \frac{\bar{y} - \mu_0}{S/\sqrt{n}} = \frac{845,3358 - 844,30898}{2,943163/\sqrt{26}}$$

$$t_0 = 1,77903$$

$$|t_0| < t_{\alpha/2, n-1}$$

b) *B(left) Side Gas Temperature*

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 833,699 \\ \bar{y} &= 833,149 \\ S &= 1,821084 \\ n &= 26 \end{aligned} \quad t_0 = \frac{\bar{y} - \mu_0}{S/\sqrt{n}} = \frac{833,149 - 833,699}{1,821084/\sqrt{26}}$$

$$t_0 = -1,53865$$

$$|t_0| < t_{\alpha/2, n-1}$$

Dari perhitungan di atas diperoleh nilai  $|t_0| < t_{\alpha/2, n-1}$  sehingga hipotesa  $H_0$  gagal ditolak dan hasil simulasi dinyatakan valid. Model simulasi tersebut dapat dipergunakan sebagai referensi simulasi selanjutnya untuk variasi konfigurasi sudut *tilt burner boiler*.

## 5.2 Optimasi *Burner Tilt Angle Terhadap Rear Pass Temperature*

Setelah model dinyatakan valid maka dilakukan simulasi untuk mempelajari pengaruh variasi *burner tilt angle* serta nilai kalor batubara input terhadap kondisi *rear pass temperature*. Kondisi yang diharapkan adalah deviasi temperatur sisi A (*right side*) dan sisi B(*left side*) seminimal mungkin serta nilai temperatur mendekati 813 K (berdasarkan histori pengoperasian). Output hasil simulasi ditampilkan pada Tabel 5.2 berikut :

Tabel 5.2 Resume Rear Pass Temperature pada Variasi Burner Tilt Angle

| <i>Full LRC</i>          |        |         |        |        |        |        |        |
|--------------------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <i>Burner Tilt Angle</i> | -30    | -20     | -10    | 0      | +10    | +20    | +30    |
| <i>A-Side Temp (K)</i>   | 833,13 | 817,01  | 752,38 | 844,31 | 759,93 | 763,68 | 800,06 |
| <i>B-Side Temp (K)</i>   | 998,01 | 920,17  | 820,43 | 833,01 | 828,04 | 851,70 | 846,56 |
| <i>MRC-LRC</i>           |        |         |        |        |        |        |        |
| <i>Burner Tilt Angle</i> | -30    | -20     | -10    | 0      | +10    | +20    | +30    |
| <i>A-Side Temp (K)</i>   | 969,43 | 807,84  | 768,26 | 890,41 | 859,47 | 869,28 | 890,88 |
| <i>B-Side Temp (K)</i>   | 947,54 | 1015,94 | 912,99 | 910,82 | 889,26 | 894,44 | 884,09 |

Dari data tersebut di atas selanjutnya dilakukan optimasi menggunakan metode BPNN-GA (*Back Propagation Neural Network-Genetic Algorithm*). Optimasi dilakukan untuk 3 fungsi, yaitu deviasi *A-side temperature* terhadap *B-side temperature* (*A-B*), *A-side temperature* terhadap nilai 813 K (*A-813*), serta *B-side temperature* terhadap nilai 813 K (*B-813*). Dilakukan uji struktur ANN untuk memperoleh fungsi persamaan yang mempunyai nilai MSE (*mean square error*) terendah. Fungsi tersebut dipergunakan sebagai input pada proses optimasi GA. Resume hasil uji struktur ANN diperlihatkan pada tabel 5.3 sebagai berikut.

Tabel 5.3 Hasil Training Struktur BPNN

| <i>FULL LRC</i> |                            |                      |        |
|-----------------|----------------------------|----------------------|--------|
| Fungsi          | Jumlah <i>Hidden Layer</i> | Jumlah <i>Neuron</i> | MSE    |
| A-B             | 1                          | 9                    | 0,0703 |
| A-813           | 1                          | 10                   | 0,7313 |
| B-813           | 1                          | 12                   | 0,3898 |
| <i>MRC-LRC</i>  |                            |                      |        |
| Fungsi          | Jumlah <i>Hidden Layer</i> | Jumlah <i>Neuron</i> | MSE    |
| A-B             | 1                          | 6                    | 0,7262 |
| A-813           | 1                          | 9                    | 0,2311 |
| B-813           | 1                          | 18                   | 0,0670 |

Fungsi *output* hasil training struktur ANN pada kedua kasus variasi batubara input tersebut dipergunakan sebagai input optimasi GA. Ketiga fungsi dioptimasi secara bersamaan dengan *global optimization tools* sehingga diperoleh titik optimal *burner tilt angle* yang meminimalkan deviasi temperatur sisi A-B serta



mendekati temperatur 813K. Hasil optimasi GA ditampilkan pada tabel 5.4 di bawah ini.

Tabel 5.4 Hasil Optimasi *Genetic Algorithm*

| <i>FULL LRC</i>          |                     |               |
|--------------------------|---------------------|---------------|
| <i>Burner Tilt Angle</i> | Prediksi Temperatur |               |
|                          | <i>A-side</i>       | <i>B-side</i> |
| +3 Degree                | 814,5968 K          | 826,3383 K    |
| <i>MRC- LRC</i>          |                     |               |
| <i>Burner Tilt Angle</i> | Prediksi Temperatur |               |
|                          | <i>A-side</i>       | <i>B-side</i> |
| +14 Degree               | 874.8781 K          | 885.8242 K    |

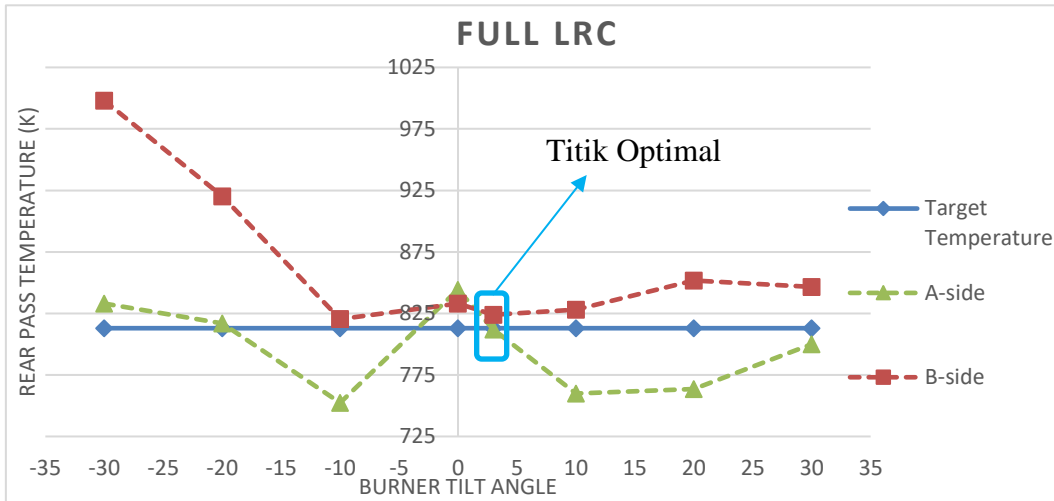
Simulasi dengan variasi *burner tilt angle* hasil optimasi GA dilakukan untuk konfirmasi data. Parameter output simulasi pada kedua titik tersebut dapat dilihat pada tabel 5.5 sebagai berikut :

Tabel 5.5 Temperatur Output Simulasi

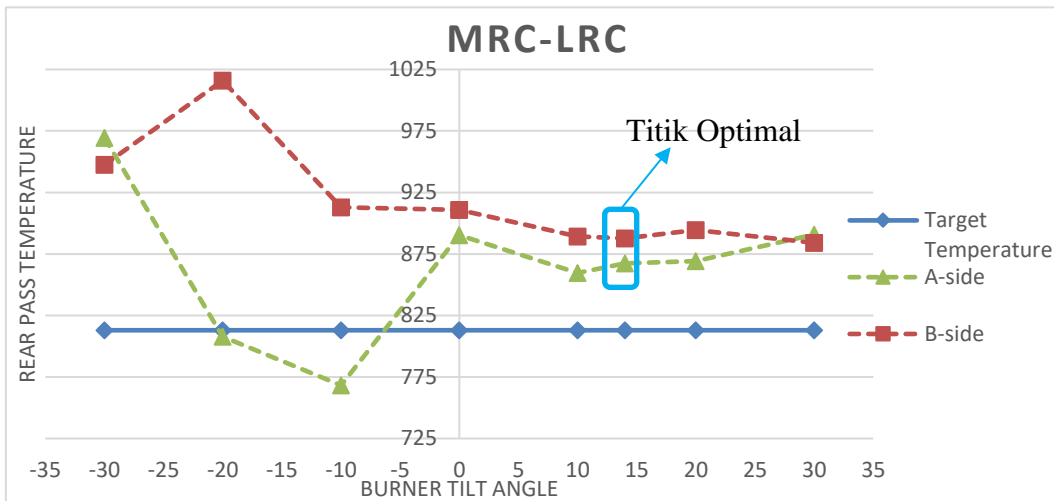
| <i>FULL LRC</i>          |                            |               |
|--------------------------|----------------------------|---------------|
| <i>Burner Tilt Angle</i> | Temperatur Output Simulasi |               |
|                          | <i>A-side</i>              | <i>B-side</i> |
| +3 Degree                | 811,98916 K                | 823,92722 K   |
| Error (%)                | 0,32%                      | 0,29%         |
| <i>MRC- LRC</i>          |                            |               |
| <i>Burner Tilt Angle</i> | Temperatur Output Simulasi |               |
|                          | <i>A-side</i>              | <i>B-side</i> |
| <i>Degree</i>            | 867.39756 K                | 887.75458 K   |
| Error (%)                | 0.86%                      | -0.22%        |

Dari hasil optimasi dan output simulasi, didapatkan posisi *burner tilt angle* paling optimal untuk batubara *full LRC* pada sudut  $+3^{\circ}$  yang menghasilkan deviasi temperatur sisi A(*right side*) dan B(*left side*) sebesar 11,9381 K. Pada sudut tersebut didapatkan selisih temperatur dengan temperatur target (813 K) sebesar 1.01084 K untuk sisi A(*right side*) dan 10.92722 K untuk sisi B(*left side*). Untuk batubara *mixing MRC-LRC*, didapatkan posisi *burner tilt angle* paling optimal pada sudut  $+14^{\circ}$  yang menghasilkan deviasi temperatur sisi A(*right side*) dan B(*left side*) sebesar 20.35702 K. Hasil optimasi sudut  $+14^{\circ}$  pada batubara *mixing MRC-LRC* diperoleh selisih temperatur dengan temperatur target (813 K) sebesar 54.39756 K untuk sisi A(*right side*) dan 74.75458 K untuk sisi B(*left side*). Grafik kondisi *boiler*

rear pass temperature untuk berbagai variasi sudut *tilt burner* pada kondisi batubara *full LRC* maupun *mixing MRC-LRC* ditampilkan pada Gambar 5.2 sebagai berikut.



(a) Kondisi Batubara *Full LRC*



(b) Kondisi Batubara *Mixing MRC-LRC*

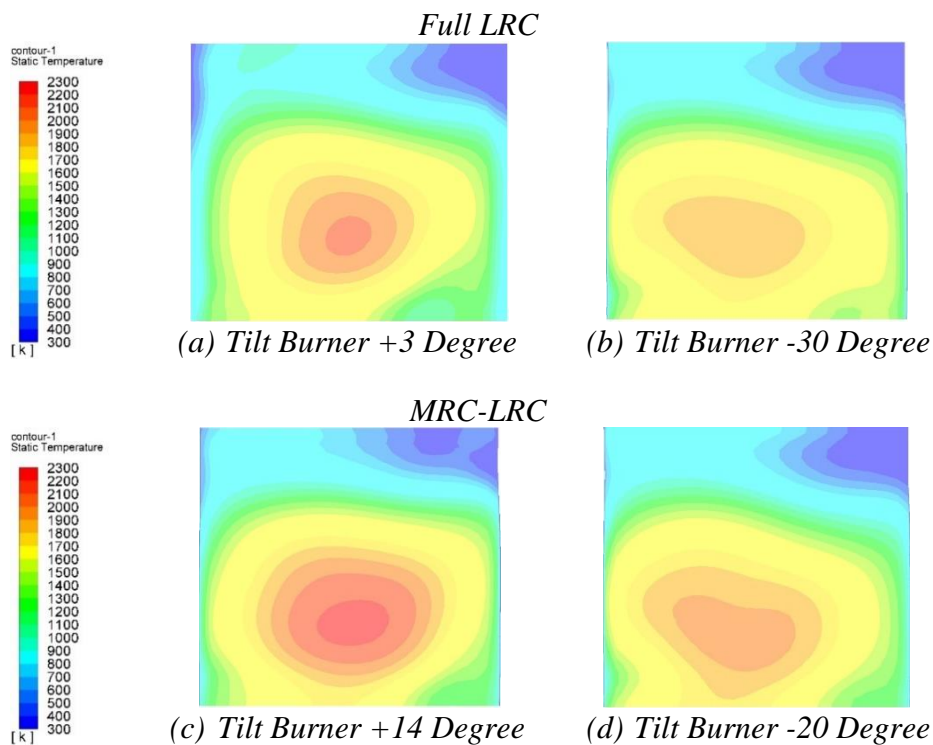
Gambar 5.2 Grafik Kondisi *Boiler Rear Pass Temperature* pada Variasi Input Batubara

Pada grafik 5.2 (a), *A-side rear pass temperature* mengalami trend penurunan baik pada perubahan sudut *tilt burner upwards* maupun *downwards*. Sedangkan *B side rear pass temperature* sedikit turun tetapi kemudian mengalami

kenaikan yang signifikan pada posisi sudut *tilt burner downwards*. Pada sudut *tilt burner upwards*, temperatur mengalami sedikit penurunan pada sudut  $+10^{\circ}$  dan kemudian naik tetapi tidak terlalu signifikan dengan kenaikan sudut *tilt burner*. Deviasi temperatur pada sisi A dan B semakin membesar pada sudut *tilt burner downwards* maupun *upwards*.

Pada kondisi batubara *mixing MRC-LRC* sebagaimana diperlihatkan pada grafik 5.2 (b), *rear pass temperature* menunjukkan nilai yang lebih tinggi hampir pada setiap kondisi sudut *tilt burner*. Hal tersebut disebabkan oleh hasil pembakaran batubara MRC menghasilkan panas yang lebih tinggi. Pada posisi sudut *tilt burner downwards*, nilai *A-side rear pass temperature* mengalami penurunan pada sudut  $-10^{\circ}$  tetapi kembali naik dengan penurunan posisi sudut *tilt burner*. Deviasi temperatur pada sisi A dan B mempunyai trend penurunan dengan kenaikan posisi sudut *tilt burner* dengan puncak deviasi tertinggi pada sudut  $-20^{\circ}$ .

Kondisi deviasi temperatur tersebut kemungkinan disebabkan oleh perubahan *residual swirl* aliran pembakaran akibat adanya perubahan vektor kecepatan pada variasi kondisi sudut *tilt burner*. Kontur temperatur posisi masuk area *backpass* untuk sudut *tilt burner* yang menghasilkan kondisi deviasi temperatur sisi A dan B yang paling tinggi diperlihatkan pada Gambar 5.3. Posisi sudut *tilt burner* yang menghasilkan deviasi temperatur yang lebih baik mempunyai kondisi kontur yang lebih merata pada sisi *left* dan *right*.



Gambar 5.3 Kontur Temperatur Pada Area *Inlet Boiler Backpass*

### 5.3 Analisa Hasil Optimasi

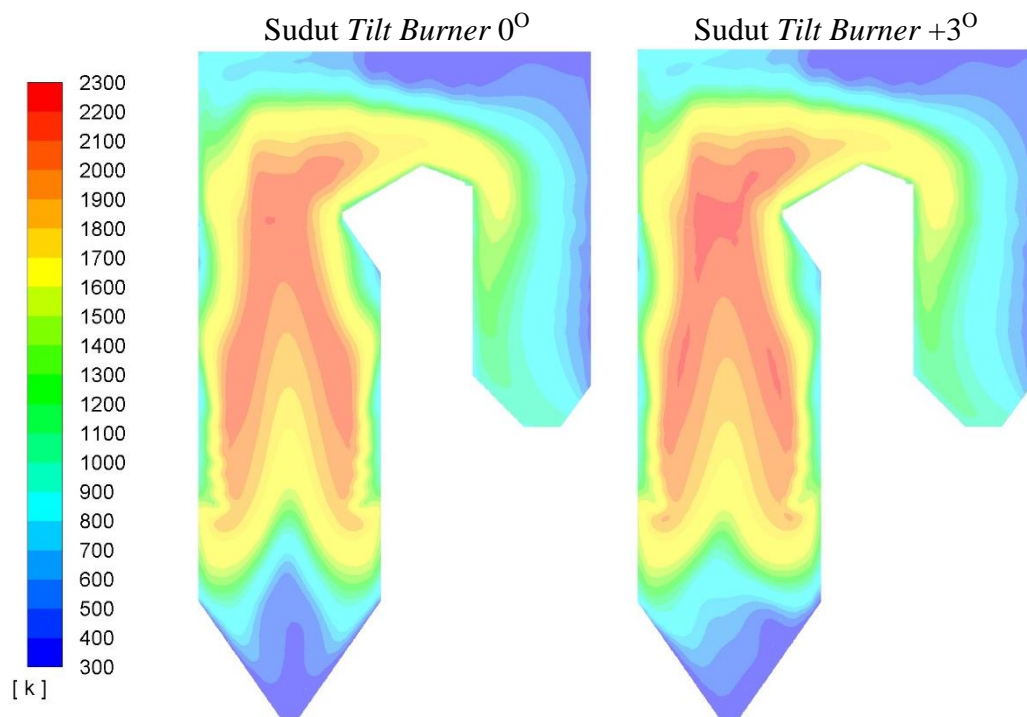
Pada kasus pertama, dilakukan optimasi dengan kondisi batubara input jenis LRC pada semua *layer coal burner* dimana *coal burner layer A* pada posisi *standby*. Pada kasus kedua dilakukan optimasi dengan kondisi batubara input campuran MRC dan LRC. Batubara jenis MRC diinjeksikan pada 3 *coal burner layer* sisi bawah (B, C, D). Batubara jenis LRC diinjeksikan pada 3 *coal burner layer* sisi atas (E, F, G). Simulasi dilakukan dengan memvariasikan posisi sudut *tilt burner*  $-30^{\circ}$ ,  $-20^{\circ}$ ,  $-10^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ ,  $+10^{\circ}$ ,  $+20^{\circ}$ , dan  $+30^{\circ}$ . Spesifikasi batubara yang dipergunakan sesuai dengan hasil analisa laboratorium internal PLTU Banten 1 Suralaya (hasil analisa tercantum pada lampiran). Analisa hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan kondisi pada posisi sudut *tilt burner*  $0^{\circ}$  dengan sudut hasil optimasi untuk masing-masing kasus.

Pengambilan data hasil simulasi dilakukan secara kualitatif (kontur distribusi temperatur, kontur distribusi kecepatan, serta kontur fraksi massa  $O_2$  dan  $CO_2$ ). Selain itu, juga diambil data kuantitatif berupa nilai rata-rata (*average*) untuk

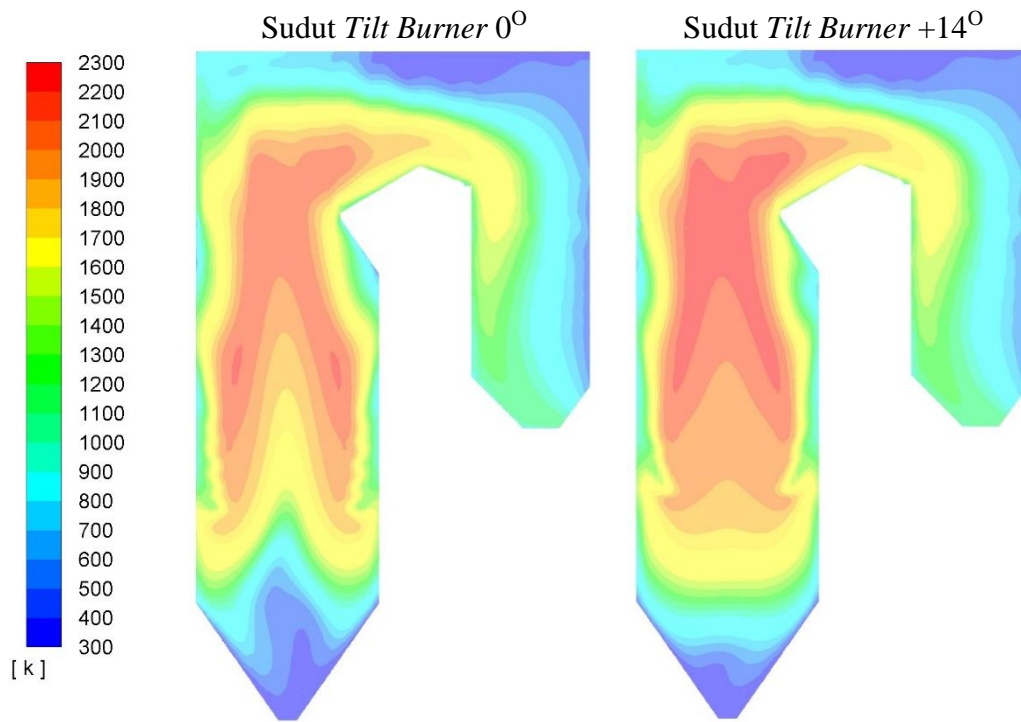
masing-masing parameter tersebut dengan menggunakan metode analisa *iso-surface* seperti ditunjukkan pada gambar 3.6.

### 5.3.1 Analisa Temperatur

Pengamatan pada kontur temperatur dilakukan untuk mempelajari reaksi pembakaran dan penyerapan panas di *boiler*. Hasil kontur distribusi temperatur pada posisi penampang vertikal *boiler center* untuk kondisi kedua kasus ditampilkan pada Gambar 5.4.



(a) Kondisi Batubara Input *Full LRC*



Gambar 5.4 Perbandingan Kontur Distribusi Temperatur Hasil Optimasi

Pada kedua kasus tampak sebaran panas paling tinggi pada area *furnace* tetapi terlihat adanya kenaikan temperatur bahkan pada posisi setelah elevasi *furnace exit*. Kenaikan temperatur terjadi mulai dari bawah menuju *furnace exit* yang ditunjukkan dengan sebaran warna jingga yang semakin dominan. Warna jingga dan merah tampak masih dominan setelah elevasi *furnace exit* (*boiler nose*) yang menggambarkan kondisi temperatur mencapai titik maksimal. Kondisi ini merupakan reaksi serbuk batubara yang belum terbakar pada elevasi *coal burner* dengan penambahan udara pembakaran pada layer CCOFA dan SOFA. Pada area *boiler bottom* temperatur semakin rendah karena serbuk batubara yang terbakar pada area tersebut sangat sedikit sedangkan sudah terjadi penyerapan panas pada area *waterwall*.

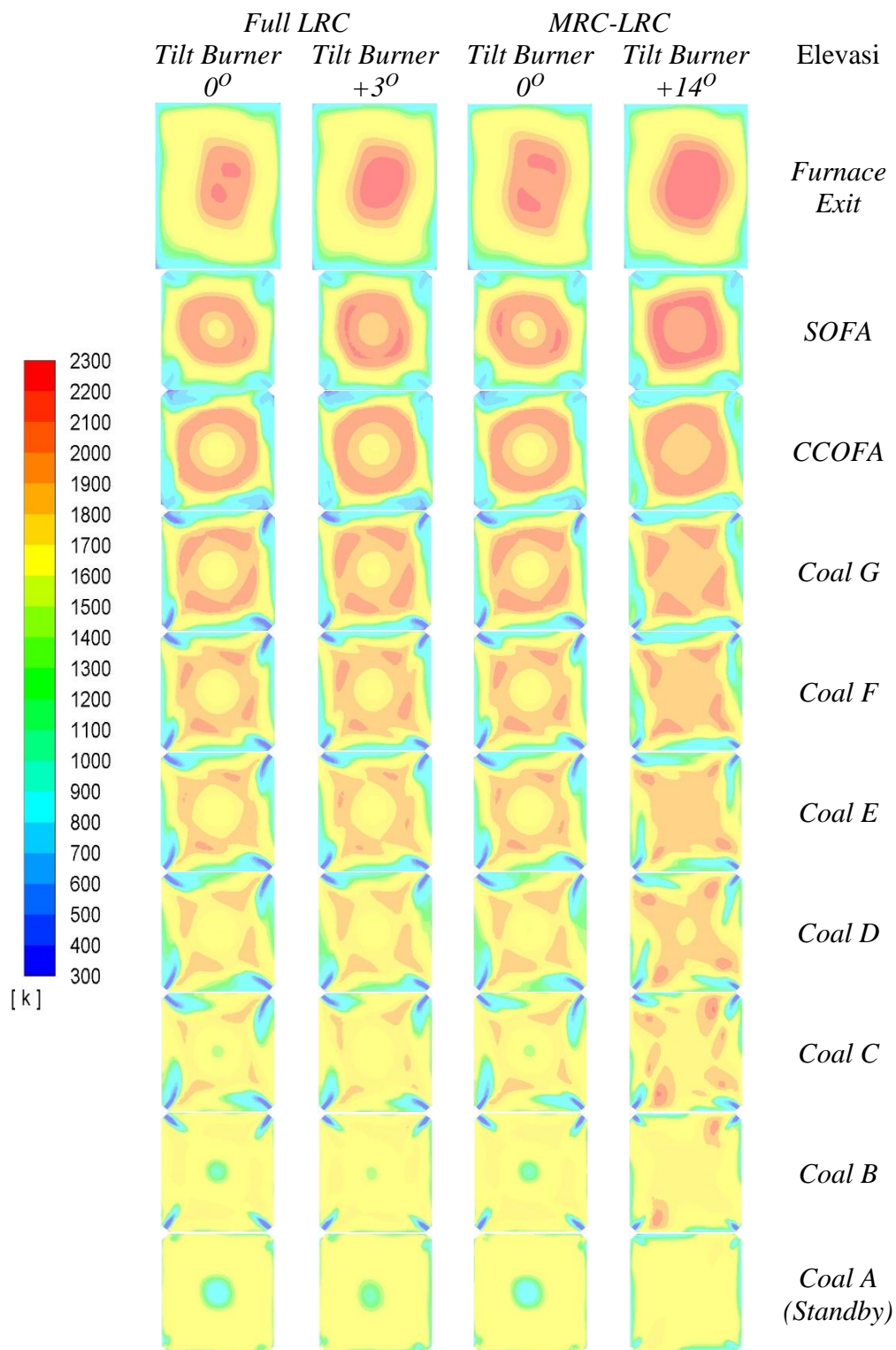
Gambar 5.4 (a) menunjukkan kondisi kontur distribusi temperatur pada kasus I dimana sudut *tilt burner* hasil optimasi ( $+3^{\circ}$ ) terlihat menghasilkan pola temperatur yang lebih tinggi mulai dari elevasi bawah hingga memasuki jajaran *heat exchanger*. Sebaran luasan warna jingga dan merah tampak meningkat dibandingkan posisi sudut *tilt burner*  $0^{\circ}$ . Profil sebaran temperatur pada area *boiler*

*bottom* juga terlihat lebih panas. Selain itu pemerataan temperatur pada area *furnace* untuk posisi sudut *tilt burner* +3° tampak lebih baik yang diperlihatkan dengan sebaran warna jingga yang lebih merata pada elevasi *coal burner*. Hal tersebut dapat menjadi indikasi bahwa proses pembakaran yang terjadi pada sudut *tilt burner* +3° lebih baik daripada posisi 0° untuk kondisi batubara input *full LRC*.

Pada kasus II terlihat perbedaan kontur distribusi temperatur yang cukup signifikan. Sebaran luasan warna jingga dan merah terlihat sangat meningkat pada posisi sudut *tilt burner* +14° mulai dari area *coal burner* hingga *furnace exit*. Kondisi kontur temperatur pada area *furnace* lebih tinggi dan lebih merata. Warna jingga dan merah terlihat lebih dominan. Selain itu, pada elevasi *furnace exit* menuju jajaran *heat exchanger* menghasilkan sebaran temperatur yang lebih tinggi dengan warna merah yang lebih dominan dibandingkan dengan kondisi pada posisi sudut *tilt burner* 0°. Profil warna jingga dan merah semakin dominan pada elevasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan posisi sudut *tilt burner* 0°. Hal tersebut mengindikasikan proses pembakaran yang terjadi pada posisi sudut *tilt burner* +14° lebih baik daripada posisi sudut *tilt burner* 0° untuk kondisi batubara *mixing MRC-LRC*.

Proses perpindahan panas pada area *furnace* terjadi antara gas pembakaran dengan *boiler water* melalui *waterwall tube*. Proses perpindahan panas ini terjadi beriringan dengan proses terbakarnya serbuk batubara. Selanjutnya proses perpindahan panas terjadi pada jajaran *heat exchanger* yaitu *superheater*, *reheater*, dan *economizer*. *Flue gas temperature* akan mengalami penurunan setelah melalui jajaran *heat exchanger* menuju *boiler outlet* yang ditandai dengan perubahan sebaran warna jingga-merah menjadi hijau dan biru.

Pengamatan selanjutnya dilakukan pada masing-masing elevasi *coal burner*, CCOFA, SOFA serta *furnace exit*. Kontur distribusi temperatur pada setiap elevasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.5.



Gambar 5.5 Kontur Distribusi Temperatur Pada Penampang Horisontal

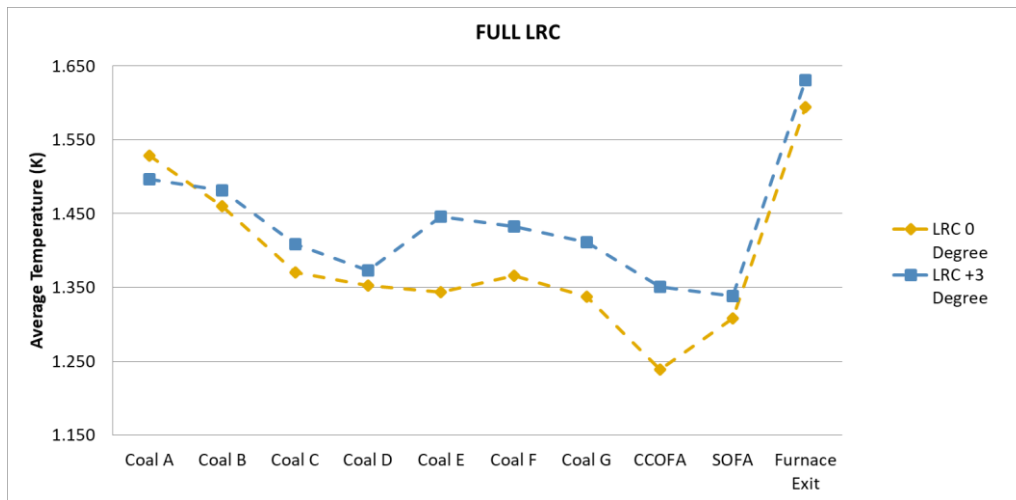
Dari gambar 5.5 di atas terlihat bahwa semakin tinggi elevasi maka warna jingga dan merah akan semakin dominan. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses reaksi pembakaran yang terjadi semakin meningkat karena proses pencampuran



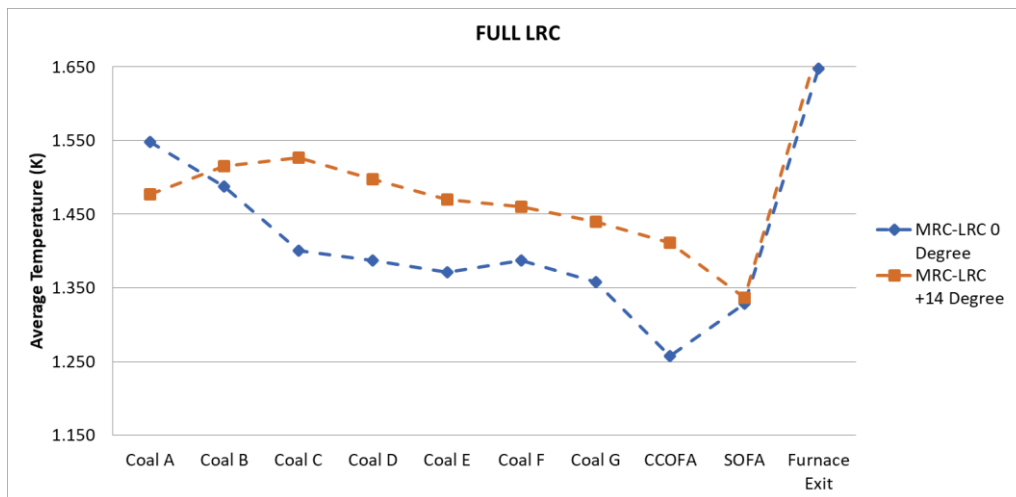
serbuk batubara dan udara pembakaran yang semakin homogen. Aliran *flue gas* membentuk pusaran akibat sudut yang dibentuk oleh *inlet burner* serta *inlet secondary air*. Pusaran tersebut menghasilkan bentuk *fireball* dimana kontur temperatur pada lintasan turbulensi aliran batubara mempunyai temperatur yang lebih tinggi. Area tersebut mempunyai kandungan oksigen dari *primary air* dan *secondary air* yang tinggi sehingga proses oksidasi bahan bakar terjadi lebih sempurna. Temperatur cenderung turun menuju ke titik tengah *boiler* karena pada area ini terjadi proses pembakaran *lean combustion*. Semakin ke atas sebaran temperatur pada area tengah akan meningkat karena terjadinya proses pembakaran lanjutan, tetapi kontur temperatur tertinggi tetap terjadi pada area pusaran *flue gas*.

Kontur temperatur pada kasus I menunjukkan distribusi temperatur yang lebih tinggi pada posisi sudut *tilt burner*  $+3^{\circ}$  dimana sebaran luasan warna jingga-merah tampak lebih besar dibandingkan sudut *tilt burner*  $0^{\circ}$ . Pola *fireball* yang terbentuk hampir sama dengan posisi sudut *tilt burner*  $0^{\circ}$ . Pada kasus II, posisi sudut *tilt burner*  $+14^{\circ}$  menghasilkan sebaran temperatur yang lebih tinggi pada setiap elevasi dibandingkan posisi sudut *tilt burner*  $0^{\circ}$ . Bentuk *fireball* yang terjadi terlihat lebih merata pada setiap elevasi dimana sebaran warna jingga dan merah tampak lebih dominan. Pada kedua kasus tersebut, semakin tinggi elevasi warna jingga dan merah semakin kuat membentuk pola *fireball* karena jumlah *flow inlet primary air* dan *secondary air* yang semakin besar. Pada elevasi *coal burner* G ke atas, pola putaran *fireball* mulai berbalik menghasilkan penurunan *residual swirl*. Kondisi tersebut terbentuk akibat arah sudut *secondary air* pada elevasi FG, GG dan CCOFA yang menghasilkan arah putaran aliran berkebalikan dengan *secondary air* pada elevasi bawah. Namun pada area *furnace exit* masih nampak adanya *residual swirl* untuk semua kondisi di atas.

Analisa selanjutnya dilakukan dengan mengambil data kuantitatif dari nilai *average temperature* pada masing-masing elevasi tersebut. Grafik nilai *average temperature* pada setiap elevasi coal burner A-G hingga *furnace exit* ditampilkan pada Gambar 5.6.



(a) Kondisi Batubara Input *Full LRC*



(b) Kondisi Batubara Input *Mixing MRC-LRC*

Gambar 5.6 Grafik Perbandingan *Average Temperature* pada Setiap Elevasi

Grafik perbandingan temperatur di atas menunjukkan bahwa posisi sudut *tilt burner* hasil optimasi memberikan hasil *average temperature* yang lebih tinggi pada setiap elevasi kecuali elevasi *coal burner A* karena elevasi tersebut pada kondisi *standby*. Kondisi tersebut berlaku baik untuk kasus I maupun kasus II. Pada kasus I, trend temperatur mengalami penurunan hingga *coal burner D* tetapi kemudian mengalami kenaikan temperatur pada *coal burner E*. Pada *coal burner E* hingga *SOFA* nilai *average temperature* mengalami trend penurunan sebelum kemudian naik secara signifikan pada area elevasi *furnace exit*. Hal tersebut kemungkinan disebabkan karena batubara jenis LRC memerlukan waktu yang lebih

lama untuk terbakar karena nilai *total moisture* yang lebih tinggi. Kondisi tersebut menyebabkan proses *drying* menjadi lebih lama. Pada kasus II, temperatur cenderung turun pada elevasi setelah *coal burner C* kemungkinan disebabkan oleh kondisi pembakaran yang terlambat pada elevasi *coal burner* sisi atas dimana pada *coal burner* elevasi atas diinjeksikan batubara jenis LRC. Kedua kasus menunjukkan trend kenaikan temperatur yang signifikan pada elevasi *furnace exit*. Akumulasi serbuk batubara yang belum terbakar secara sempurna pada elevasi bawah akan terbawa pada elevasi yang lebih tinggi. Serbuk batubara tersebut akan bereaksi dengan penambahan udara pembakaran pada elevasi CCOFA dan SOFA menghasilkan temperatur yang tinggi pada area *furnace exit*.

Pemerataan pembakaran pada area *furnace* diamati dengan melakukan perbandingan nilai standard deviasi temperatur dari elevasi *coal burner A-G*. Nilai temperatur rata-rata pada setiap elevasi *coal burner A-G* diperlihatkan pada Tabel 5.6.

Tabel 5.6 Nilai *Average Temperature* pada Setiap Elevasi Hasil Optimasi

| Elevasi                  | <i>Full LRC</i>       |                        | <i>MRC-LRC</i>        |                         |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
|                          | <i>Tilt Burner 0°</i> | <i>Tilt Burner +3°</i> | <i>Tilt Burner 0°</i> | <i>Tilt Burner +14°</i> |
| <i>Coal A</i>            | 1528.859              | 1,496.8962             | 1,548.4974            | 1,476.9846              |
| <i>Coal B</i>            | 1460.2213             | 1,481.6729             | 1,488.1716            | 1,515.1218              |
| <i>Coal C</i>            | 1370.7559             | 1,408.5896             | 1,401.0404            | 1,526.6810              |
| <i>Coal D</i>            | 1352.8188             | 1,372.8307             | 1,387.5508            | 1,497.4988              |
| <i>Coal E</i>            | 1344.0690             | 1,446.0983             | 1,371.4725            | 1,469.9310              |
| <i>Coal F</i>            | 1366.3678             | 1,432.2641             | 1,387.3846            | 1,460.6070              |
| <i>Coal G</i>            | 1,337.8052            | 1,411.3866             | 1,357.7417            | 1,439.5968              |
| <i>CCOFA</i>             | 1,238.4683            | 1,351.1070             | 1,257.3342            | 1,411.1605              |
| <i>SOFA</i>              | 1,308.5125            | 1,338.5074             | 1,329.0829            | 1,336.3876              |
| <i>Furnace Exit</i>      | 1,594.6940            | 1,631.0324             | 1,647.3777            | 1,677.9057              |
| <b><i>St Deviasi</i></b> | <b>72.1361</b>        | <b>43.3149</b>         | <b>70.5522</b>        | <b>30.9250</b>          |

Pada kasus I, nilai *standard deviasi* pada *average temperature* elevasi *coal burner A-G* pada sudut hasil optimasi (+3°) menunjukkan nilai yang lebih baik yaitu sebesar 43.3149 K dibandingkan sudut *tilt burner 0°* sebesar 72.1361 K (turun sebesar 39.95%). Pada kasus II, sudut hasil optimasi (+14°) menurunkan nilai *standard deviasi average temperature* pada elevasi *coal burner A-G* dari 70.5522

K menjadi 30.9250 K (turun sebesar 56.17%). Hal tersebut memberikan gambaran bahwa temperatur area coal burner A-G mempunyai sebaran yang lebih merata pada posisi sudut tilt burner hasil optimasi pada kedua kasus yang mengindikasikan laju proses pembakaran lebih stabil.

Selanjutnya untuk mengetahui proses penyerapan panas pada jajaran *heat exchanger* maka dilakukan pengambilan data *average temperature* pada posisi *boiler outlet*. Data tersebut dibandingkan dengan data pada elevasi *furnace exit* (sebelum masuk jajaran *heat exchanger*) seperti ditampilkan pada Tabel 5.7. *Delta* temperatur pada kedua area tersebut dapat menggambarkan proses penyerapan panas susunan *heat exchanger*.

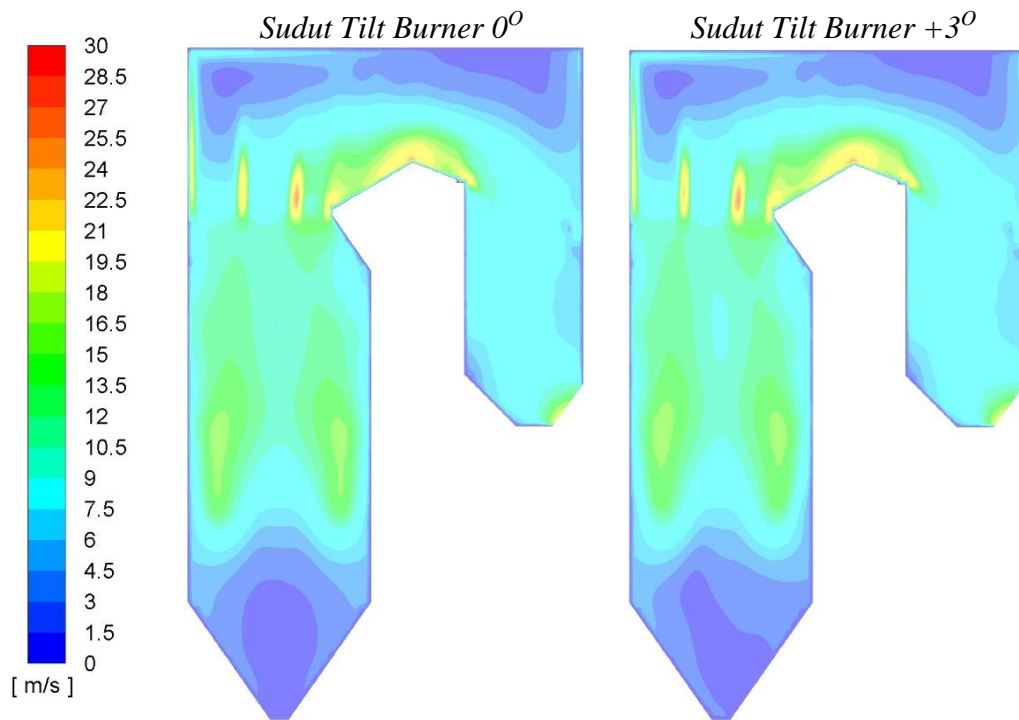
Tabel 5.7 Perbandingan Temperatur *Flue Gas* Melewati Susunan *Heat Exchanger*

| <i>Average Temperature</i> | <i>Full LRC</i>       |                        | <i>MRC-LRC</i>        |                         |
|----------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
|                            | <i>Tilt Burner 0°</i> | <i>Tilt Burner +3°</i> | <i>Tilt Burner 0°</i> | <i>Tilt Burner +14°</i> |
| <i>Furnace Exit (K)</i>    | 1,594.6940            | 1,631.0324             | 1,647.3777            | 1,677.9057              |
| <i>Boiler Outlet (K)</i>   | 690.4791              | 693.6802               | 748.4195              | 763.4173                |
| $\Delta T$ (K)             | 904.2149              | 937.3522               | 898.9582              | 914.4884                |

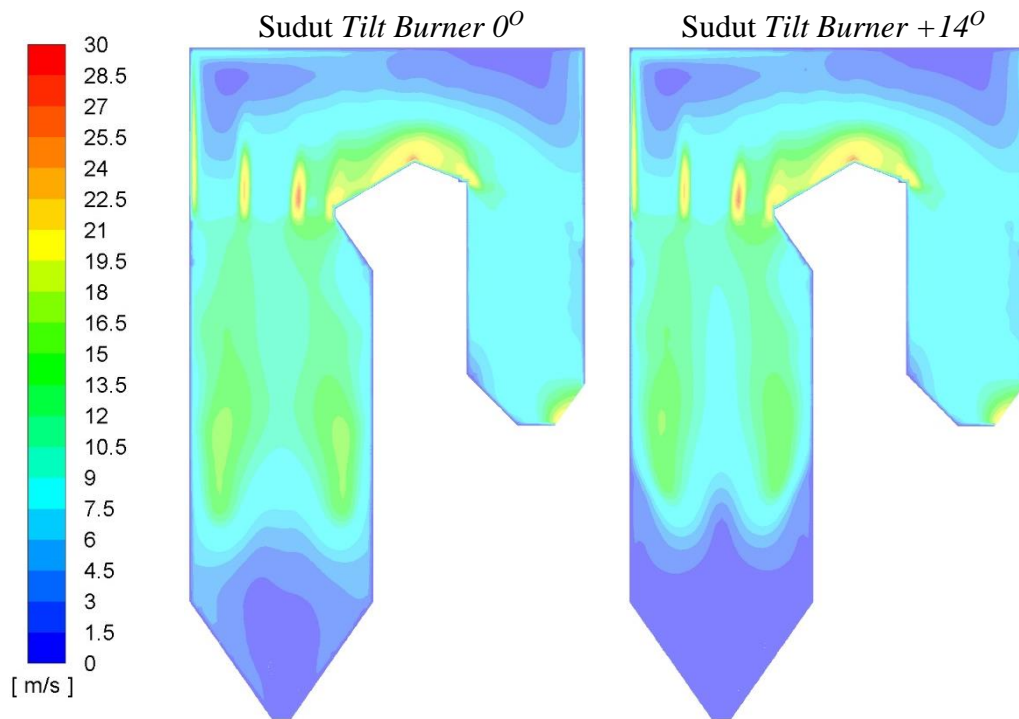
Dari data di atas terlihat bahwa sudut hasil optimasi memberikan penurunan temperatur yang lebih tinggi pada kedua kasus. Pada kasus I, terjadi peningkatan *delta* temperatur dari 904 K menjadi 937 K (naik 3,66%). Pada kasus II, *delta* temperatur meningkat dari 898 K menjadi 914 K (naik 1,73%). Data tersebut mengindikasikan bahwa efisiensi penyerapan panas pada susunan *heat exchanger* mengalami peningkatan pada posisi sudut *tilt burner* hasil optimasi baik pada kasus I maupun kasus II.

### 5.3.2 Analisa Velocity

Analisa kontur distribusi kecepatan dilakukan untuk mengamati pola terbentuknya *fireball* serta aliran *flue gas* pada *boiler*. Kontur distribusi kecepatan pada posisi penampang vertikal *boiler center* untuk kondisi kedua kasus ditampilkan pada Gambar 5.7.



(a) Kondisi Batubara Input *Full LRC*



(b) Kondisi Batubara Input *Mixing MRC-LRC*

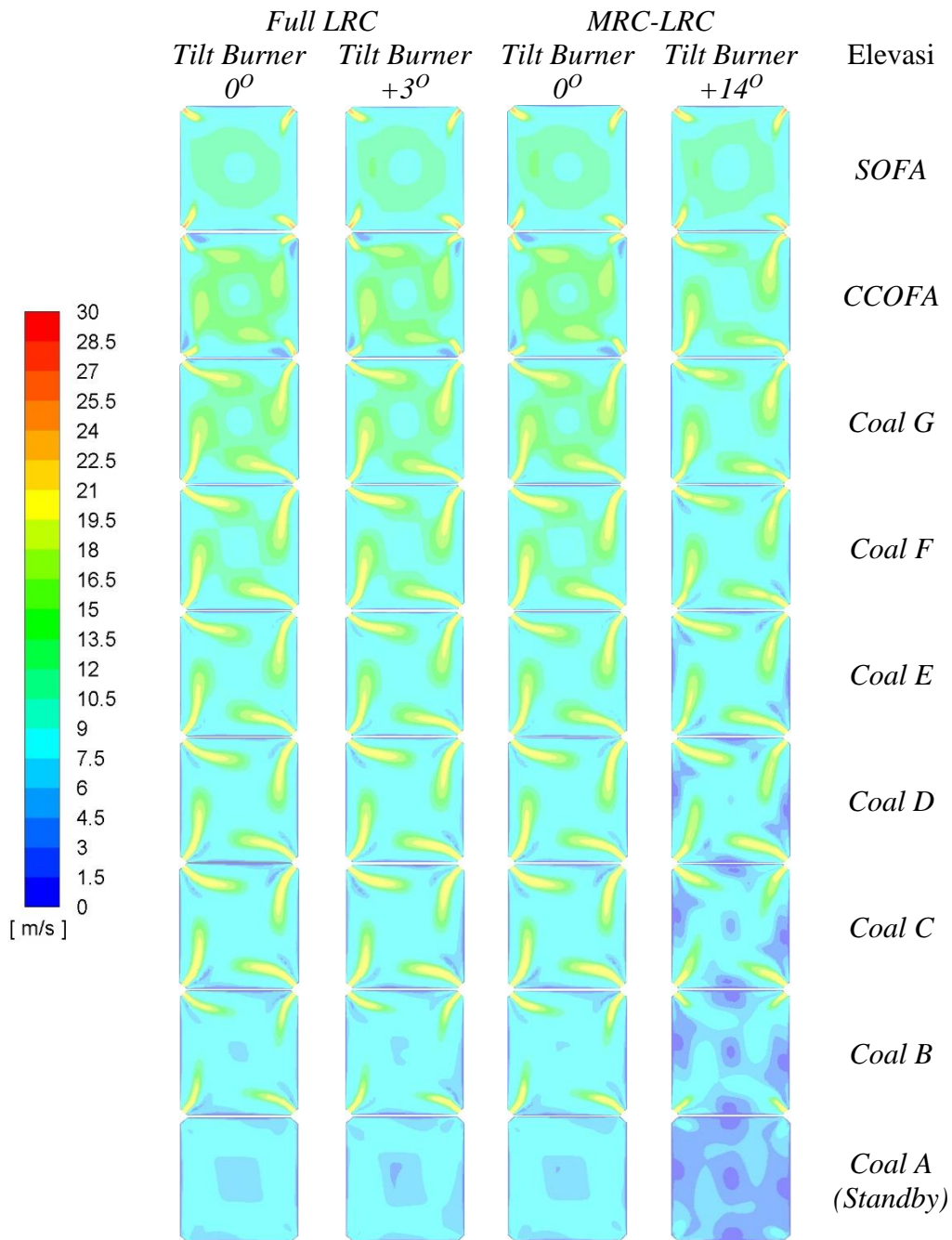
Gambar 5.7 Perbandingan Kontur Distribusi Temperatur Hasil Optimasi

Secara keseluruhan kontur temperatur pada kedua kasus untuk semua posisi sudut *tilt burner* mempunyai pola yang hampir sama. Pada area

*furnace* tampak kecepatan yang tinggi berada pada posisi dekat dengan dinding. Hal tersebut merupakan efek dari pusaran aliran yang terbentuk oleh sudut horisontal *coal burner* dan *secondary air* dimana pada area tengah *boiler* kecepatan aliran cenderung lebih rendah. Sedangkan pada area *backpass* nampak terjadi kenaikan kecepatan akibat perubahan area laluan *flue gas* karena adanya susunan *heat exchanger*.

Pada area *boiler bottom* tampak terjadi perbedaan kontur kecepatan yang dipengaruhi oleh perubahan vektor kecepatan pada arah vertikal *boiler*. Pada posisi sudut *tilt burner upwards* kecepatan aliran di area *boiler bottom* akan cenderung turun. Hal tersebut disebabkan oleh jangkauan kecepatan *inlet primary air* dan *secondary air* yang bergerak ke arah atas sehingga laju aliran pada *boiler bottom* semakin rendah.

Selanjutnya dilakukan pengamatan pada penampang horisontal pada elevasi *coal burner* hingga SOFA untuk mempelajari bentuk *fireball* dan *residual swirl* yang terjadi. Kontur kecepatan pada penampang horisontal ditampilkan pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Kontur Distribusi Kecepatan Pada Penampang Horisontal

Pola kontur kecepatan pada kedua kasus menunjukkan distribusi yang mirip dimana kecepatan pada area inlet menuju titik tengah mempunyai kecepatan yang paling tinggi. Kondisi tersebut membentuk *pattern fireball* yang disebabkan oleh sudut masuk *coal burner* maupun *secondary air*. Bentuk *fireball* semakin menguat pada elevasi *coal burner* yang lebih tinggi. Kontur kecepatan pada elevasi *coal burner* G, CCOFA, dan SOFA tampak pusaran *fireball* mulai melemah karena

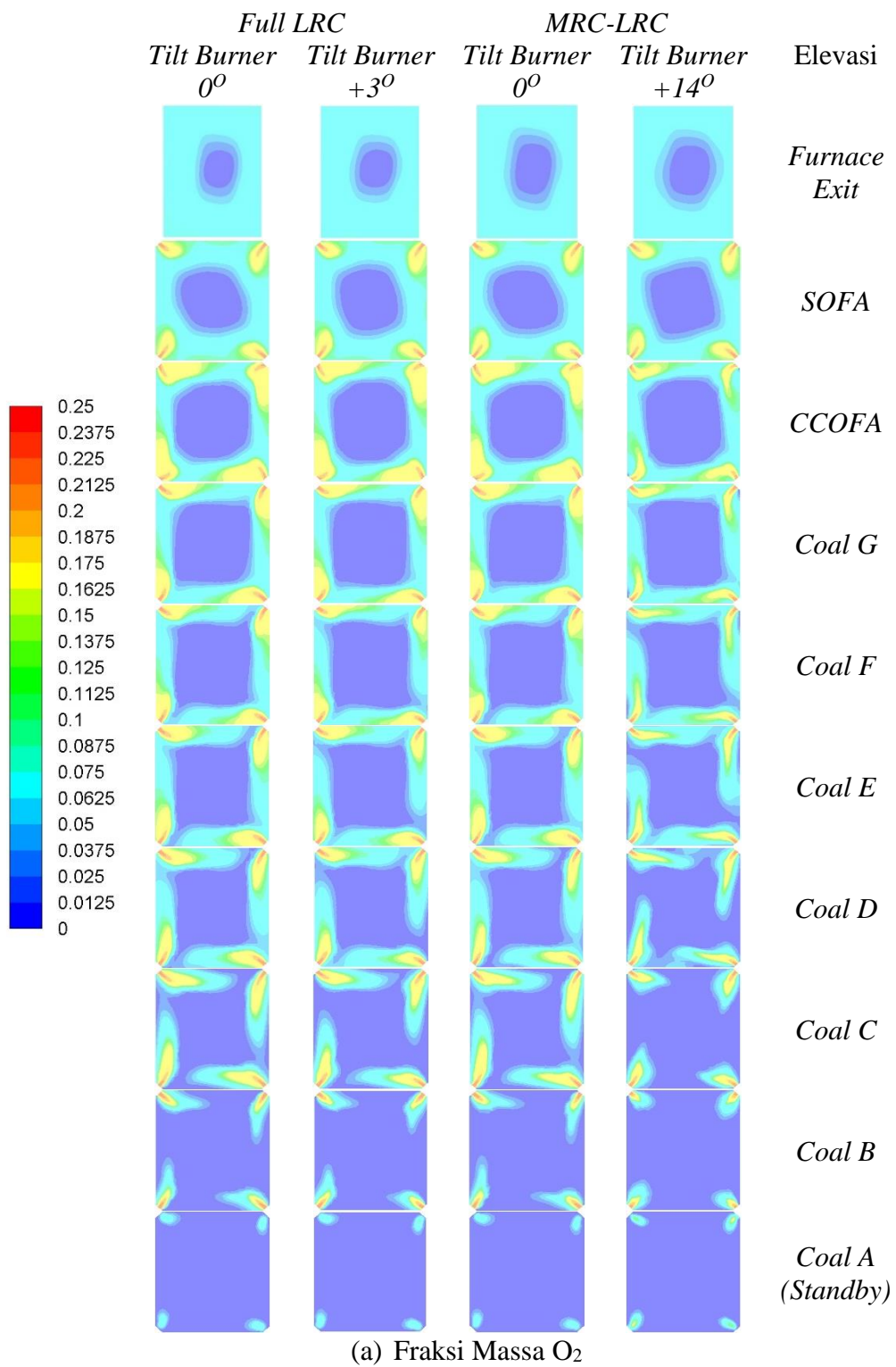
sudut masuk pada elevasi FG, GG, dan CCOFA yang mempunyai arah berkebalikan. Pada elevasi SOFA masih terlihat adanya pola pusaran yang menghasilkan *residual swirl* pada area *upper furnace* dan *boiler backpass*. *Residual swirl* inilah yang kemungkinan menyebabkan terjadinya deviasi temperatur pada kedua sisi *boiler*.

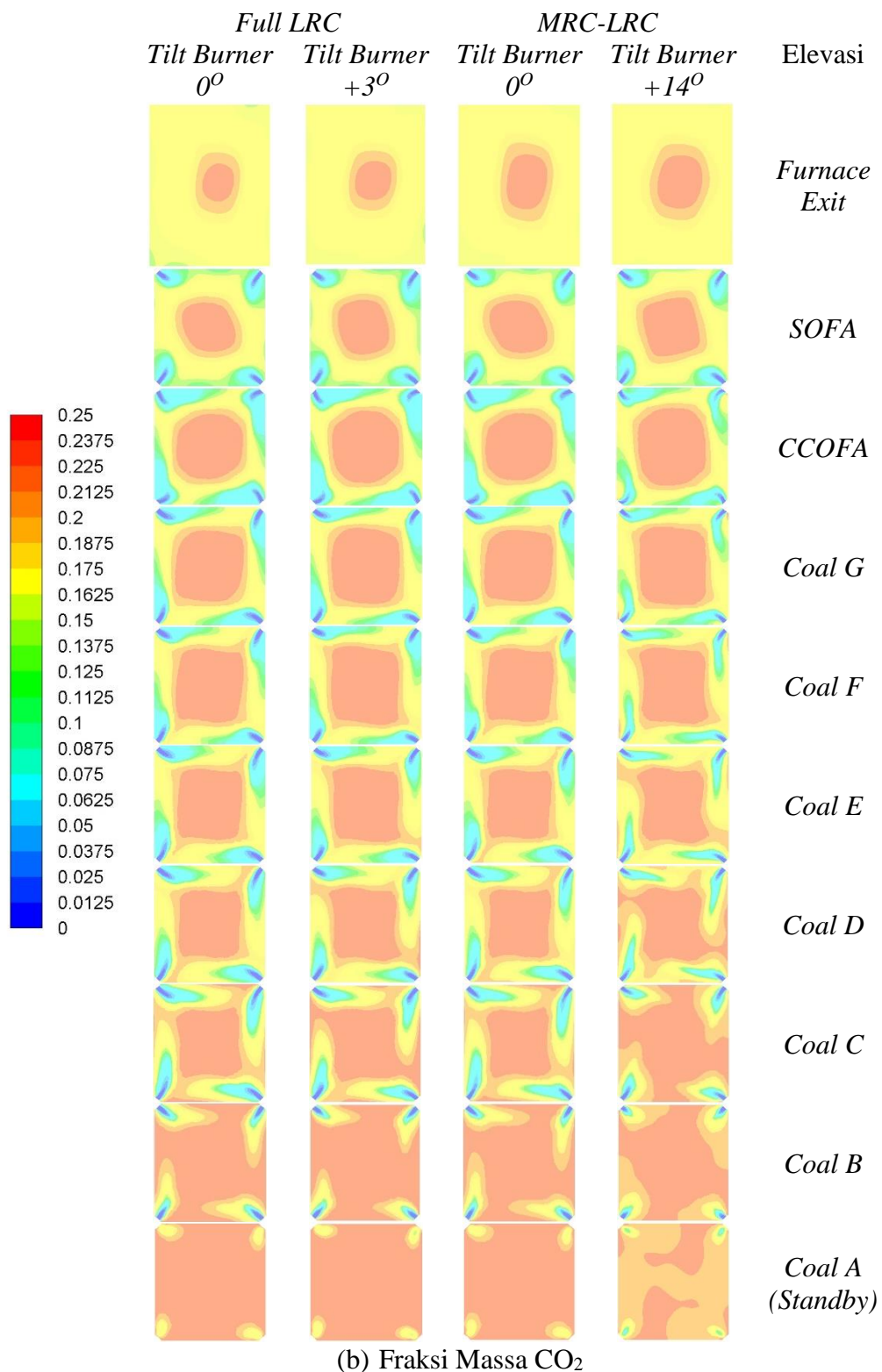
Perbedaan yang terlihat adalah sebaran distribusi kecepatan pada posisi sudut *tilt burner* yang berbeda. Hal tersebut disebabkan berkurangnya *velocity magnitude* pada arah horisontal akibat pergerakan vektor pada arah vertikal karena perubahan sudut *tilt burner*. Pada kasus I, perubahan tersebut tidak nampak secara signifikan karena perubahan sudut *tilt burner* yang relatif rendah menjadi  $+3^{\circ}$ . Pada kasus II, terlihat perbedaan yang cukup signifikan yang ditunjukkan dengan sebaran warna biru muda dan biru tua yang semakin meluas. Kondisi tersebut menunjukkan kecepatan pada arah horisontal mengalami penurunan akibat perubahan vektor kecepatan yang signifikan pada sudut *tilt burner*  $+14^{\circ}$ .

### 5.3.3 Analisa Gas Pembakaran

Untuk memberikan gambaran terhadap proses pembakaran yang terjadi pada area *furnace*, dilakukan analisa fraksi massa  $O_2$  dan  $CO_2$ . Gas  $O_2$  akan menggambarkan kecukupan oksigen pada proses pembakaran serta laju reaksi pembakaran yang terjadi. Gas  $CO_2$  mengindikasikan terjadinya proses pembakaran yang sempurna. Semakin banyak kandungan gas  $CO_2$  yang terbentuk menunjukkan semakin banyak bahan bakar yang terbakar secara sempurna. Gabungan dari kedua parameter tersebut dapat memberikan gambaran reaksi pembakaran *char* pada batubara dengan ikatan oksigen pada *primary air* maupun *secondary air*. Secara umum, kondisi fraksi  $O_2$  yang semakin kecil yang disertai peningkatan fraksi massa  $CO_2$  menunjukkan bahwa laju reaksi pembakaran yang lebih baik. Kondisi tersebut biasanya diikuti oleh naiknya *average temperature* pada elevasi tersebut. Kontur distribusi fraksi massa  $O_2$  dan  $CO_2$  ditampilkan pada Gambar 5.9.







Gambar 5.9 Kontur Distribusi Fraksi Massa O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> Hasil Simulasi

Pada kedua kasus, semua posisi sudut *tilt burner* menghasilkan penurunan fraksi massa CO<sub>2</sub> yang disertai kenaikan fraksi massa O<sub>2</sub> seiring dengan kenaikan

elevasi, tetapi pada elevasi *furnace exit* terjadi perubahan yang cukup signifikan. Fraksi massa CO<sub>2</sub> mengalami peningkatan sebaran luasan warna kuning-jingga yang berarti jumlah fraksi massa gas tersebut meningkat. Fraksi massa O<sub>2</sub> juga terlihat mengalami penurunan yang ditunjukkan dengan peningkatan sebaran luasan warna biru muda dan biru tua. Kondisi tersebut memberikan indikasi terjadinya *late combustion* hingga melewati elevasi *furnace exit*. Pada elevasi *coal burner A* fraksi massa CO<sub>2</sub> tampak sangat dominan karena pada elevasi ini tidak ada injeksi batubara tetapi mendapatkan suplai *secondary air* dari elevasi AA. Sehingga serbuk batubara yang berasal dari *burner* atasnya mendapatkan suplai O<sub>2</sub> yang cukup untuk terbakar sempurna.

Gambar kontur distribusi fraksi massa CO<sub>2</sub> pada kasus I memperlihatkan peningkatan sebaran luasan warna kuning-jingga pada setiap elevasi untuk sudut tilt burner hasil optimasi (+3°). Distribusi fraksi massa O<sub>2</sub> juga terlihat mengalami penurunan yang ditandai luasan warna biru muda-biru tua yang semakin tinggi. Hal tersebut mendukung data bahwa sudut *tilt burner* hasil optimasi menghasilkan *average temperature* yang lebih tinggi pada semua elevasi di area *furnace*.

Gambar kontur distribusi fraksi massa pada kasus II menunjukkan pola yang sama. Peningkatan sebaran luasan warna kuning-jingga pada fraksi massa CO<sub>2</sub> terjadi pada semua elevasi untuk sudut *tilt burner* +14° yang disertai dengan penurunan fraksi massa O<sub>2</sub>. Dengan demikian dapat diambil kesimpulan bahwa sudut hasil optimasi dapat meningkatkan laju reaksi pembakaran pada area *furnace*. Data kuantitatif fraksi massa O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> ditampilkan pada Tabel 5.8.

Tabel 5.8 Data Kuantitatif Fraksi Massa O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>

| Fraksi Massa CO <sub>2</sub> |           |           |                |           |
|------------------------------|-----------|-----------|----------------|-----------|
| Elevasi                      | Full LRC  |           | MRC-LRC        |           |
|                              | 0°        | +3°       | Tilt Burner 0° | +14°      |
| <i>Coal A</i>                | 0.2421886 | 0.2416554 | 0.2434572      | 0.2339911 |
| <i>Coal B</i>                | 0.1966374 | 0.2016105 | 0.1999515      | 0.2070366 |
| <i>Coal C</i>                | 0.1712655 | 0.1781738 | 0.1760632      | 0.1959204 |
| <i>Coal D</i>                | 0.1627515 | 0.1690533 | 0.1685358      | 0.1885738 |
| <i>Coal E</i>                | 0.1582925 | 0.1809877 | 0.1621137      | 0.1817811 |
| <i>Coal F</i>                | 0.1587501 | 0.1714000 | 0.1617823      | 0.1788666 |
| <i>Coal G</i>                | 0.1517484 | 0.1638748 | 0.1545984      | 0.1739350 |
| <i>CCOFA</i>                 | 0.1353624 | 0.1490098 | 0.1378575      | 0.1637952 |
| <i>SOFA</i>                  | 0.1453267 | 0.1505774 | 0.1488589      | 0.1520959 |
| <i>Furnace Exit</i>          | 0.1906963 | 0.1965610 | 0.1993736      | 0.2033452 |
| Fraksi Massa O <sub>2</sub>  |           |           |                |           |
| Elevasi                      | Full LRC  |           | MRC-LRC        |           |
|                              | 0°        | +3°       | Tilt Burner 0° | +14°      |
| <i>Coal A</i>                | 0.0095393 | 0.0105152 | 0.0086149      | 0.0136491 |
| <i>Coal B</i>                | 0.0506318 | 0.0465062 | 0.0478229      | 0.0392590 |
| <i>Coal C</i>                | 0.0740274 | 0.0680282 | 0.0700329      | 0.0502916 |
| <i>Coal D</i>                | 0.0816621 | 0.0763310 | 0.0768824      | 0.0575822 |
| <i>Coal E</i>                | 0.0857109 | 0.0630990 | 0.0827044      | 0.0642544 |
| <i>Coal F</i>                | 0.0853339 | 0.0737342 | 0.0829393      | 0.0672126 |
| <i>Coal G</i>                | 0.0921397 | 0.0809901 | 0.0898836      | 0.0721399 |
| <i>CCOFA</i>                 | 0.1073611 | 0.0948258 | 0.1054028      | 0.0817264 |
| <i>SOFA</i>                  | 0.0988698 | 0.0942487 | 0.0961526      | 0.0928855 |
| <i>Furnace Exit</i>          | 0.0587036 | 0.0535059 | 0.0519960      | 0.0480087 |

Pada kedua kasus terlihat bahwa nilai fraksi massa CO<sub>2</sub> rata-rata pada setiap elevasi mengalami peningkatan yang disertai penurunan nilai fraksi massa O<sub>2</sub> rata-rata untuk posisi sudut *tilt burner* hasil optimasi. Hal tersebut memberikan gambaran bahwa terjadi peningkatan efisiensi pembakaran. Pada kasus I, peningkatan fraksi massa CO<sub>2</sub> bervariasi dengan titik tertinggi pada elevasi *coal burner E* dimana terjadi peningkatan fraksi massa CO<sub>2</sub> sebesar 14.34%. Pada elevasi tersebut fraksi massa O<sub>2</sub> juga mengalami penurunan yang paling tinggi yaitu sebesar 26.38%. Nilai rata-rata kenaikan fraksi massa CO<sub>2</sub> dari elevasi *coal burner A* hingga *furnace exit* adalah sebesar 5,73%. Peningkatan utilitas O<sub>2</sub> pada reaksi pembakaran yang digambarkan dengan penurunan fraksi massa O<sub>2</sub> rata-rata pada area *furnace* memberikan nilai rata-rata sebesar 8.98%. Pada elevasi *coal burner E* juga terjadi peningkatan *average temperature* yang cukup signifikan.

Pada kasus II, fraksi massa CO<sub>2</sub> menunjukkan peningkatan tertinggi pada elevasi CCOFA yaitu sebesar 18.81%. Sedangkan penurunan fraksi massa O<sub>2</sub> tertinggi terjadi pada elevasi *coal burner* C sebesar 28.19%. Perbedaan kondisi tersebut kemungkinan disebabkan oleh perbedaan karakteristik pembakaran antara batubara MRC dan LRC. Pada kasus II, *coal burner* elevasi bawah diinjeksikan dengan batubara MRC dan *coal burner* elevasi atas diinjeksikan dengan batubara LRC. Sudut *tilt burner* hasil optimasi (+14<sup>o</sup>) memberikan peningkatan fraksi massa CO<sub>2</sub> rata-rata sebesar 8.10% dan penurunan fraksi massa O<sub>2</sub> rata-rata sebesar 10.73% pada area *furnace*. Dengan demikian, sudut *tilt burner* hasil optimasi pada kedua kasus mengindikasikan perbaikan pada proses pembakaran di area *furnace*.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB 6

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan pembahasan mengenai keseluruhan penelitian “Studi Numerik Pengaruh Sudut *Tilt Burner* Terhadap *Rear Pass Temperature Boiler* PLTU Banten 1 Suralaya pada Kondisi Batubara LRC dan MRC” didapatkan beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Setting sudut *tilt burner* memberikan pengaruh signifikan pada perubahan nilai *boiler rear pass temperature* baik pada kondisi batubara LRC maupun MRC-LRC.
2. Perubahan setting sudut *tilt burner* mempengaruhi kondisi deviasi pada *boiler rear pass temperature* baik pada posisi *downwards* maupun *upwards*.
3. Proses optimasi menghasilkan sudut *tilt burner* paling optimal  $+3^{\circ}$  untuk batubara LRC dan  $+14^{\circ}$  untuk batubara MRC-LRC. Hasil optimasi meningkatkan pemerataan pembakaran area *furnace* sebesar 39,95% untuk LRC dan 56,17% untuk MRC-LRC. Perpindahan panas susunan *superheater* meningkat 3,66% untuk LRC dan 1,73% untuk MRC-LRC. Efisiensi pembakaran membaik yang ditunjukkan dengan peningkatan utilisasi O<sub>2</sub> sebesar 8,98% untuk LRC dan 10,73% untuk MRC-LRC. CO<sub>2</sub> hasil pembakaran meningkat 5,73% untuk LRC dan 8,1% untuk MRC-LRC.

#### 6.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian ini dan diharapkan dapat memberikan manfaat pada penelitian selanjutnya, diantaranya:

1. Diperlukan adanya data pengukuran temperatur pada aliran *flue gas* masuk dan keluar dari susunan *heat exchanger boiler*.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh sudut SOFA *yaw angle* terhadap *residual swirl* dan deviasi temperatur pada area *backpass* dan *rear pass boiler*.

3. Pengoperasian setting sudut *tilt burner*  $+3^{\circ}$  untuk kondisi batubara input full LRC dan  $+14^{\circ}$  pada batubara input MRC-LRC direkomendasikan apabila kondisi parameter operasi sesuai dengan setup simulasi.



## DAFTAR PUSTAKA

1. Bagci, E., & Isik, B.(2006).Investigation of Surface Roughness in Turning Undirectional GFRP Composites by Using RS Methodology and ANN.*International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 31*, hal. 10-17.
2. Fang, Q., Tian, D., Chen, G., Zhang, C., Tan, P., Ma, L., ... Zhang, D. (2015). Influence of vertical burner tilt angle on the gas temperature deviation in a 700 MW low NO x tangentially fired pulverised-coal boiler. *Fuel Processing Technology, 138*, 616–628.
3. Filkoski, R. V. (2015). *3-D MODELLING OF PULVERISED-COAL COMBUSTION IN POWER BOILER 3-D MODELLING OF PULVERISED-COAL COMBUSTION*. (December 2003).
4. Gupta, T. K., & Raza, K. (2019). Optimization of ANN Architecture : A Review on Nature-Inspired Techniques. *In Machine Learning in Bio-Signal Analysis and Diagnostic Imaging*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816086-2.00007-2>.
5. Hidayat, R. (2015). *Studi Numerik Karakteristik Aliran Gas-Solid dan Pembakaran Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler 315 MWe Dengan Variasi Sudut Tilting dan Nilai Kalor Batubara (Studi Kasus PLTU Pacitan Unit 1)*. Thesis Master. Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
6. Kramer, O. (1999). *Genetic Algorithm Essentials*. University of Oldenburg, Oldenburg.
7. Luo, L.-f., Li, F.-q., & Wang, H.-w. (2017). The Influence of Coal Calorific Value On Power Plant Boiler Operation. *2017 2nd International Conference on Environmental Science and Engineering (ESE)*, 26-30.
8. Montgomery, D. C. (2001). *Design and Analysis of Experiments*, 5<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
9. Park, H. Y., Baek, S. H., Kim, Y. J., Kim, T. H., Kang, D. S., & Kim, D. W. (2013). Numerical and Experimental Investigations on The Gas

- Temperature Deviation in a Large Scale, Advanced Low NO<sub>x</sub>, Tangentially Fired Pulverized Coal Boiler. *Fuel*, hal 641-646.
10. Chaplin R.A. Fossil Fuel Combustion System. *Thermal Power Plants*. Vol. II.
  11. Sa'Adiyah, D., Bangsa, G., Widodo, W., & Ikhwan, N. (2017). Numerical study of flow, combustion and emissions characteristics in a 625 MWe tangentially fired boiler with composition of coal 70% LRC and 30% MRC. *AIP Conference Proceedings*, 1867(October 2017)
  12. Singer, J.G. (1993). *Combustion Fossil Power : A Reference Book on Fuel Burning and Steam Generation 4<sup>th</sup> Edition*. Combustion Engineering Inc. Connecticut.
  13. Tharangaraju, S., Munisamy, K., & Baskaran, S. (2017). Research of Varying Burner Tilt Angle to Reduce Rear Pass Temperature in Coal Fired Boiler. *Fifteenth Asian Congress of Fluid Mechanics* , hal. 1-8.
  14. The Babcock&Wilcock Company.(2015). *Steam : Its Generation and Use 42<sup>nd</sup> Edition*. Charlotte, North Carolina, USA.
  15. Tian, D., Zong, L., Tan, P., Ma, L., Fang, Q., Zhang, C., . . . Chen, G. (2015). Influence of Vertical Burner Tilt Angle on The Gas Temperature Deviation in a 700MW Low NO<sub>x</sub> Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler. *Fuel Processing Technology*, hal. 616-628.
  16. Tian, Z. F., Witt, P. J., Schwarz, M. P., & Yang, W. (2017). Numerical Modelling of Pulverised Coal Combustion. In *Handbook of Multiphase Flow Science and Technology*.
  17. Wahjudi, A., Soepangkat, B. O. P., & Arriyani, Y. F. (2016). Optimization of Cable Ties Injection Molding Process Using Back Propagation Neural Network and Genetic Algorithm (BPNN-GA). *Applied Mechanics and Materials*, 836, 159–164.

## LAMPIRAN 1

Data Parameter *Performance Test* PLTU Banten 1 Suralaya

19 Desember 2017

| <i>PARAMETER</i>                               | <i>UNIT</i> | <i>VALUE</i> |
|--|-------------|--------------|
| <b>COAL</b>                                    |             |              |
| <i>Coal Flow</i>                               | t/hr        | 316.33       |
| <i>HHV</i>                                     | kcal/kg     | 4,093.23     |
| <i>LHV</i>                                     | kcal/kg     | 3,716.69     |
| <i>AIR</i>                                     |             |              |
| <i>Primary Air Fan Flow</i>                    | t/hr        | 966.89       |
| <i>PAH outlet Air Temp average</i>             | °C          | 313.99       |
| <i>PAH outlet Air Press</i>                    | kPa         | 8.49         |
| <i>Secondary Air Fan Flow</i>                  | t/hr        | 1,332.42     |
| <i>SAH outlet Air Temp average</i>             | °C          | 303.61       |
| <i>SAH outlet Air Press</i>                    | kPa         | 0.34         |
| <b>FLUE GAS</b>                                |             |              |
| <i>GAH flue gas outlet Temp</i>                | °C          | 124.71       |
| <i>Desired O2 Frac. in Wet Exh. Gas</i>        |             | 5.31         |
| <b>DRAFT</b>                                   |             |              |
| <i>Inlet Air Primary Air Fan Temp Dry</i>      | °C          | 28.85        |
| <i>Primary Air Fan A Outlet Air Pressure</i>   | kPa         | 9.95         |
| <i>Primary Air Fan B Outlet Air Pressure</i>   | kPa         | 10.88        |
| <i>Secondary Air Fan A outlet Air Pressure</i> | kPa         | 1.21         |
| <i>Secondary Air Fan B outlet Air Pressure</i> | kPa         | 1.09         |
| <i>Eco Gas Inlet Flow</i>                      | (m/s)       | 16.66        |
| <i>Eco Gas Inlet Temperature</i>               | °C          | 445.01       |
| <i>Eco Gas Outlet Enthalpy</i>                 | kcal/kg     | 771.01       |
| <i>Eco Gas Outlet Temperature</i>              | °C          | 347.16       |
| <i>Econ Outlet Gas O2</i>                      | %           | 2.29         |
| <b>STEAM TURBINE</b>                           |             |              |
| <i>Plant load</i>                              | MW          | 504.32       |
| <i>Inlet Steam Pressure</i>                    | MPa         | 15.21        |
| <i>Inlet Steam Temperature</i>                 | °C          | 538.83       |
| <i>HP exhaust press.</i>                       | MPa         | 3.39         |
| <i>HP exhaust temp.</i>                        | °C          | 322.96       |
| <i>Main Steam Flow</i>                         | t/hr        | 1,721.27     |
| <i>Feed Water Flow</i>                         | t/hr        | 1,740.40     |
| <i>Condensate Water Flow</i>                   | t/hr        | 1,709.46     |
| <i>Eco In Feed Water Press</i>                 | MPa         | 17.27        |
| <i>Eco In Feed Water Temp</i>                  | °C          | 271.33       |

|   |         |                |
|---|---------|----------------|
| <i>Drum Pressure</i>                        | MPa     | 16.74          |
| <i>SH out steam Temperature</i>             | °C      | 542.44         |
| <i>SH out steam Pressure</i>                | MPa     | 15.56          |
| <i>Spray SH Flow</i>                        | t/hr    | 45.91          |
| <i>Spray SH Temperature</i>                 | °C      | 178.71         |
| <i>Spray RH Flow</i>                        | t/hr    | 6.80           |
| <i>Spray RH Temperature</i>                 | °C      | 176.89         |
| <b>CONDENSATE</b>                           |         |                |
| <i>Condenser Pressure</i>                   | kPa     | -89.01         |
| <i>CW Outlet Temp</i>                       | °C      | 43.95          |
| <i>CW Inlet Pressure</i>                    | MPa     | 0.06           |
| <i>CW Inlet Temp</i>                        | °C      | 30.19          |
| <b>MOTOR CURRENT (6KV)</b>                  |         |                |
| <i>FDF A CURRENT</i>                        | A       | 73.09          |
| <i>FDF B CURRENT</i>                        | A       | 59.29          |
| <i>IDF A CURRENT</i>                        | A       | 387.53         |
| <i>IDF B CURRENT</i>                        | A       | 285.58         |
| <i>TDFP BP A CURRENT</i>                    | A       | 63.65          |
| <i>TDFP BP B CURRENT</i>                    | A       | 63.73          |
| <i>CONDENSER PUMP A CURRENT</i>             | A       | 228.20         |
| <i>CONDENSER PUMP B CURRENT</i>             | A       | 1.24           |
| <i>CCCWP A CURRENT</i>                      | A       | 0.04           |
| <i>CCCWP B CURRENT</i>                      | A       | 68.58          |
| <i>PAF A CURRENT</i>                        | A       | 183.68         |
| <i>PAF B CURRENT</i>                        | A       | 198.96         |
| <b>CONDENSER</b>                            |         |                |
| <i>Cond Cooling Water Inlet Flow</i>        | t/hr    | 51,325.83      |
| <i>Cond Cooling Water Inlet Pressure</i>    | MPa     | 0.06           |
| <i>Cond Cooling Water Inlet Temperature</i> | °C      | 30.19          |
| <i>Cond Calculated Duty</i>                 | kcal/hr | 663,666,450.48 |
| <i>Cond Main Exit Pressure</i>              | MPa     | 0.01           |
| <i>Cond Main Exit Quality</i>               | %       | 84.48          |
| <i>Gland Seal Condensate Flow</i>           | t/hr    | N/A            |
| <i>Gland Seal Condensate Pressure</i>       | MPa     | N/A            |
| <i>Gland Seal Condensate Temperature</i>    | °C      | N/A            |
| <i>LPHT 8 Drain Outlet Flow</i>             | t/hr    | N/A            |
| <i>LPHT 8 Drain Outlet Pressure</i>         | MPa     | N/A            |
| <i>LPHT 8 Drain Outlet Temperature</i>      | °C      | 59.98          |
| <i>FW turbine steam flow</i>                | t/hr    | 48.44          |
| <i>FW Turbine Main Outlet Pressure</i>      | MPa     | 0.01           |
| <i>FW Turbine Main Outlet Temperature</i>   | °C      | 49.31          |
| <b>BOILER FEED PUMPS</b>                    |         |                |
| <i>BFP Control Valve Outlet Enthalpy</i>    | kJ/kg   | 765.90         |
| <i>BFP Control Valve Outlet Flow</i>        | t/hr    | 1,740.40       |
| <i>BFP Control Valve Outlet Temperature</i> | °C      | 178.58         |

|   |       |          |
|---|-------|----------|
| <i>BFP Control Valve Outlet Pressure</i>      | MPa   | 17.97    |
| <b>DEAERATOR</b>                              |       |          |
| <i>DEA Main Steam Inlet Flow</i>              | t/hr  | 36.08    |
| <i>DEA Aux Steam Inlet Flow</i>               | t/hr  | 0.00     |
| <i>DEA Main BFW Outlet Pressure</i>           | MPa   | 1.05     |
| <b>HP HEATER 1</b>                            |       |          |
| <i>HPHT 1 Extraction Inlet Pressure</i>       | MPa   | 5.47     |
| <i>HPHT 1 Extraction Inlet Temperature</i>    | °C    | 390.83   |
| <i>HPHT 1 Extraction Inlet Flow</i>           | t/hr  | 122.92   |
| <i>HPHT 1 BFW Outlet Temperature</i>          | °C    | 271.07   |
| <i>HPHT 1 Drain Outlet Temperature</i>        | °C    | 244.00   |
| <i>HPHT 1 Drain Cooler Approach</i>           | °C    | 9.37     |
| <i>HPHT 1 Terminal Temperature Difference</i> | °C    | -1.42    |
| <i>ΔT Feedwater Heater</i>                    | °C    | 36.44    |
| <b>HP HEATER 2</b>                            |       |          |
| <i>HPHT 2 Extraction Inlet Pressure</i>       | MPa   | 3.15     |
| <i>HPHT 2 Extraction Inlet Temperature</i>    | °C    | 320.37   |
| <i>HPHT 2 Extraction Inlet Flow</i>           | t/hr  | 90.14    |
| <i>HPHT 2 BFW Outlet Temperature</i>          | °C    | 234.63   |
| <i>HPHT 2 BFW Outlet Pressure</i>             | MPa   | 19.84    |
| <i>HPHT 2 Drain Outlet Temperature</i>        | °C    | 234.57   |
| <i>HPHT 2 Drain Cooler Approach</i>           | °C    | 27.04    |
| <i>HPHT 2 Terminal Temperature Difference</i> | °C    | 1.90     |
| <i>ΔT Feedwater Heater</i>                    | °C    | 27.10    |
| <b>HP HEATER 3</b>                            |       |          |
| <i>HPHT 3 Extraction Inlet Pressure</i>       | MPa   | 1.85     |
| <i>HPHT 3 Extraction Inlet Temperature</i>    | °C    | 463.50   |
| <i>HPHT 3 Extraction Inlet Flow</i>           | t/hr  | 64.05    |
| <i>HPHT 3 BFW Outlet Temperature</i>          | °C    | 207.53   |
| <i>HPHT 3 BFW Outlet Pressure</i>             | MPa   | 19.84    |
| <i>HPHT 3 Drain Outlet Temperature</i>        | °C    | 186.34   |
| <i>HPHT 3 Drain Cooler Approach</i>           | °C    | 7.76     |
| <i>HPHT 3 Terminal Temperature Difference</i> | °C    | 1.06     |
| <i>ΔT Feedwater Heater</i>                    | °C    | 28.95    |
| <b>LP HEATER 5</b>                            |       |          |
| <i>LPHT 5 BFW Outlet Temperature</i>          | °C    | 133.57   |
| <i>LPHT 5 Drain Outlet Temperature</i>        | °C    | 129.88   |
| <i>LPHT 5 Extraction Inlet Enthalpy</i>       | kJ/kg | 3,017.81 |
| <i>LPHT 5 Extraction Inlet Flow</i>           | t/hr  | 108.66   |
| <i>LPHT 5 Extraction Inlet Pressure</i>       | MPa   | 0.32     |
| <i>LPHT 5 Extraction Inlet Temperature</i>    | °C    | 274.84   |
| <i>LPHT 5 Drain Cooler Approach</i>           | °C    | 33.38    |

|   |       |          |
|---|-------|----------|
| <i>LPHT 5 Terminal Temperature Difference</i> | °C    | 2.23     |
| <i>ΔT Feedwater Heater</i>                    | °C    | 37.07    |
| <b>LP HEATER 6</b>                            |       |          |
| <i>LPHT 6 BFW Outlet Temperature</i>          | °C    | 96.50    |
| <i>LPHT 6 BFW Outlet Pressure</i>             | MPa   | 2.88     |
| <i>LPHT 6 Drain Outlet Temperature</i>        | °C    | 53.19    |
| <i>LPHT 6 Extraction Inlet Enthalpy</i>       | kJ/kg | 2,874.89 |
| <i>LPHT 6 Extraction Inlet Flow</i>           | t/hr  | 35.82    |
| <i>LPHT 6 Extraction Inlet Pressure</i>       | MPa   | 0.09     |
| <i>LPHT 6 Extraction Inlet Temperature</i>    | °C    | 199.38   |
| <i>LPHT 6 Drain Cooler Approach</i>           | °C    | -24.57   |
| <i>LPHT 6 Terminal Temperature Difference</i> | °C    | -0.96    |
| <i>ΔT Feedwater Heater</i>                    | °C    | 18.74    |
| <b>LP HEATER 7</b>                            |       |          |
| <i>LPHT 7 BFW Outlet Temperature</i>          | °C    | 77.76    |
| <i>LPHT 7 BFW Outlet Pressure</i>             | MPa   | 2.88     |
| <i>LPHT 7 Drain Outlet Temperature</i>        | °C    | 63.54    |
| <i>LPHT 7 Extraction Inlet Enthalpy</i>       | kJ/kg | 2,648.84 |
| <i>LPHT 7 Extraction Inlet Flow</i>           | t/hr  | 53.04    |
| <i>LPHT 7 Extraction Inlet Pressure</i>       | MPa   | 0.05     |
| <i>LPHT 7 Extraction Inlet Temperature</i>    | °C    | 83.50    |
| <i>LPHT 7 Drain Cooler Approach</i>           | °C    | 2.55     |
| <i>LPHT 7 Terminal Temperature Difference</i> | °C    | 5.74     |
| <i>ΔT Feedwater Heater</i>                    | °C    | 16.77    |
| <b>LP HEATER 8</b>                            |       |          |
| <i>LPHT 8 BFW Outlet Temperature</i>          | °C    | 60.99    |
| <i>LPHT 8 BFW Outlet Pressure</i>             | MPa   | 2.88     |
| <i>LPHT 8 Drain Outlet Temperature</i>        | °C    | 59.98    |
| <i>LPHT 8 Extraction Inlet Enthalpy</i>       | kJ/kg | 2,608.55 |
| <i>LPHT 8 Extraction Inlet Flow</i>           | t/hr  | 29.71    |
| <i>LPHT 8 Extraction Inlet Pressure</i>       | MPa   | 0.02     |
| <i>LPHT 8 Extraction Inlet Temperature</i>    | °C    | 59.83    |
| <i>LPHT 8 Drain Cooler Approach</i>           | °C    | 10.65    |
| <i>LPHT 8 Terminal Temperature Difference</i> | °C    | -1.15    |
| <i>LPHT 8 BFW Inlet Flow</i>                  | t/hr  | 1,709.46 |
| <i>LPHT 8 BFW Inlet Pressure</i>              | MPa   | 2.44     |
| <i>LPHT 8 BFW Inlet Temperature</i>           | °C    | 49.32    |
| <i>ΔT Feedwater Heater</i>                    | °C    | 11.66    |

## LAMPIRAN 2

*Resume Performance Test PLTU Banten 1 Suralaya*

19 Desember 2017

| <b>NO</b> | <b>PARAMETER</b>                               | <b>UNIT</b> | <b>VALUE</b> |
|-----------|--|-------------|--------------|
| 1         | <i>OUTPUT GENERATOR</i>                        | MW          | 504.32       |
| 2         | <i>TURBINE CYCLE HEAT RATE</i>                 | kCal/kWh    | 2,197.96     |
| 3         | <i>EFFISIENSI BOILER HHV(HL)</i>               | %           | 83.30        |
| 4         | <i>EFFISIENSI BOILER LHV(HL)</i>               | %           | 92.38        |
|           | <i>EFFISIENSI BOILER HHV(Input-Output)</i>     | %           | 85.47        |
|           | <i>EFFISIENSI BOILER LHV(Input-Output)</i>     | %           | 94.12        |
|           |  |             |              |
| 5         | <i>Daya Pemakaian Sendiri (PS)</i>             | MW          | 31.06        |
|           |  | %           | 6.16         |
| 6         | <i>PLANT HEAT RATE (PHR-HL)</i>                | kCal/kWh    | 2,638.54     |
|           | <i>PLANT HEAT RATE (PHR-HL) LHV</i>            | kCal/kWh    | 2,379.29     |
|           | <i>PLANT HEAT RATE (PHR-Input Output)</i>      | kCal/kWh    | 2,571.73     |
|           | <i>PLANT HEAT RATE (PHR-Input Output) LHV</i>  | kCal/kWh    | 2,335.16     |
| 7         | <i>Netto PHR (Heat Loss Method)</i>            | kCal/kWh    | 2,811.69     |
|           | <i>Netto PHR (Heat Loss Method) LHV</i>        | kCal/kWh    | 2,535.43     |
|           | <i>Netto PHR (Input-Output)</i>                | kCal/kWh    | 2,740.50     |
|           | <i>Netto PHR (Input-Output) LHV</i>            | kCal/kWh    | 2,488.40     |
| 8         | <i>Netto PHR (Niaga)</i>                       | kCal/kWh    | 2,735.95     |
| 9         | <i>NPHR Commisioning (heat loss) LHV</i>       | kCal/kWh    | 2,160.00     |
| 10        | <i>NPHR Design (heat loss)</i>                 | kCal/kWh    | 2,167.00     |
| 11        | <i>EFFESIENSI NETTO (Heat Loss)</i>            | %           | 30.59        |
|           | <i>EFFESIENSI NETTO (Input-Output)</i>         | %           | 31.38        |
| 12        | <i>EFFESIENSI NETTO (Niaga)</i>                | %           | 31.43        |
| 13        | <i>Condensor Cleanliness Factor</i>            | %           | 84.48        |
| 14        | <i>Effisiensi Mill Air Heater "A" Air Side</i> | %           | 88.00        |
| 15        | <i>Effisiensi Mill Air Heater "B" Air Side</i> | %           | 90.41        |
| 16        | <i>Effisiensi Mill Air Heater "A" Gas Side</i> | %           | 74.36        |
| 17        | <i>Effisiensi Mill Air Heater "B" Gas Side</i> | %           | 70.05        |
| 18        | <i>Effisiensi Main Air Heater "A" Air Side</i> | %           | 84.76        |
| 19        | <i>Effisiensi Main Air Heater "B" Air Side</i> | %           | 87.81        |
| 20        | <i>Effisiensi Main Air Heater "A" Gas Side</i> | %           | 72.48        |
| 21        | <i>Effisiensi Main Air Heater "B" Gas Side</i> | %           | 67.77        |
| 22        | <i>SFC (Heat Loss)</i>                         | kg/kWh      | 0.64         |
| 23        | <i>SFC (Input-Output)</i>                      | kg/kWh      | 0.63         |
| 24        | <i>PEMAKAIAN BB ( Counter )</i>                | Ton         | 316.33       |
| 25        | <i>Jumlah Mill Running</i>                     | Buah        | 6.00         |
| 26        | <i>Nilai Kalor Batu Bara (HHV-As Rcvd)</i>     | kCal/kg     | 4,093.23     |

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*






# LAMPIRAN 3

## Coal Analysis Report

### 1. Mill B

| No.  |  | PARAMETER PENGUJIAN            | SATUAN  | HASIL PEMERIKSAAN |                 |           | METODE TEST   | BATASAN     |
|------|--|--------------------------------|---------|-------------------|-----------------|-----------|---------------|-------------|
|      |  |                                |         | AS RECEIVED       | AIR DRIED BASIS | DRY BASIS | ASTM          | AS RECEIVED |
| 01.  |  | MOISTURE IN ANALYSIS SAMPLE    | %Wt     | -                 | 24,20           | -         | D-5142        | -           |
| 02.  |  | TOTAL MOISTURE                 | %Wt     | 33,79             | -               | -         | D-3302        | <35         |
| 03.  |  | ASH CONTENT                    | %Wt     | 4,21              | 4,82            | 6,36      | D-5142        | <5          |
| 04.  |  | VOLATILE MATTER                | %Wt     | 32,40             | 37,09           | 48,93     | D-5142        | <35         |
| 05.  |  | FIXED CARBON                   | %Wt     | 29,60             | 33,89           | 44,71     | By difference | <30         |
| 06.  |  | GROSS CALORIFIC VALUE (HHV)    | Kcal/Kg | 4264              | 4881            | 6440      | D-5865        | 4000-4500   |
|      |  | GROSS CALORIFIC VALUE (LHV)    | Kcal/Kg | 4091              | 4545            | 6179      |               |             |
| 07.  |  | TOTAL SULPHUR                  | %Wt     | 0,21              | 0,24            | 0,31      | D-4239        | 0,33        |
| 08.  |  | CARBON                         | %Wt     | 45,98             | 52,64           | 69,44     | D-5373        | 46          |
| 09.  |  | HIDROGEN                       | %Wt     | 3,36              | 6,55            | 5,07      | D-5373        | 3,77        |
| 10.  |  | NITROGEN                       | %Wt     | 0,64              | 0,74            | 0,97      | D-5373        | 1,2         |
| 11.  |  | OKSIGEN                        | %Wt     | 11,81             | 35,02           | 17,84     | By difference | -           |
| 10.  |  | SIZING UNDER SIZE :            | -       | -                 | -               | -         | D-409         |             |
|      |  | -70 mm                         | %Wt     |                   |                 |           |               | 98          |
|      |  | -50 mm                         | %Wt     |                   |                 |           |               | 9500%       |
|      |  | -32 mm                         | %Wt     |                   |                 |           |               | 8000%       |
|      |  | -2.38 mm                       | %Wt     |                   |                 |           |               | 2000%       |
| 11.  |  | HGI                            |         | -                 | -               | -         | D-409         | 45-65       |
| 12.  |  | ASH FUSION TEMPERATURE (RED) : |         |                   |                 |           | D-1857        |             |
| 12.1 |  | INITIAL DEFORMATION            | °C      | -                 | -               | -         |               | 1150        |
| 12.2 |  | SOFTENING                      | °C      | -                 | -               | -         |               | 1200        |
| 12.3 |  | HEMISPHERICAL                  | °C      | -                 | -               | -         |               | 1250        |
| 12.4 |  | FLUID                          | °C      | -                 | -               | -         |               | 1300        |




  

|   |  |
|---|--|
| AMU KIMIA<br><br>ADE LESMANA PUTRA | Suralaya, 27 Desember 2017<br>ANALYST<br> OKKY R<br> FANDY |
|---|--|

2. Mill C

| INDONESIA<br><b>POWER</b>                                     |                                |                                  |                   |                 |             |                     |                        |
|---|--------------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|-------------|---------------------|------------------------|
| UJP BANTEN I SURALAYA   |                                |                                  |                   |                 |             |                     |                        |
| <b>LAPORAN HASIL PENGUJIAN</b><br>Nomor : -BB-IUJPBSR/VI/2017 |                                |                                  |                   |                 | No. Dokumen |                     |                        |
|   |                                |                                  |                   |                 | Tanggal     |                     | 19 Mei 2011            |
|   |                                |                                  |                   |                 | Revisi      |                     | 00                     |
|   |                                |                                  |                   |                 | Halaman     |                     | 1 dari 1 halaman       |
| SAMPLE :  |                                | Batubara Performance Test Mill C |                   |                 |             |                     |                        |
| TEMPAT PENGAMBILAN SAMPLE :                                   |                                | -                                |                   |                 |             |                     |                        |
| NAMA PELANGGAN :  |                                |                                  |                   |                 |             |                     |                        |
| DITERIMA DARI :   |                                | Ahmad                            |                   |                 |             |                     |                        |
| TANGGAL PENGAMBILAN SAMPLE :                                  |                                | 19 DESEMBER 2017                 |                   |                 |             |                     |                        |
| TANGGAL DITERIMA :  |                                | 19 DESEMBER 2017                 |                   |                 |             |                     |                        |
| TANGGAL PENGUJIAN :   |                                | 27 DESEMBER 2017                 |                   |                 |             |                     |                        |
| URAIAN IDENTIFIKASI SAMPLE :                                  |                                |                                  |                   |                 |             |                     |                        |
| No.   | PARAMETER PENGUJIAN            | SATUAN                           | HASIL PEMERIKSAAN |                 |             | METODE TEST<br>ASTM | BATASAN<br>AS RECEIVED |
|   |                                |                                  | AS RECEIVED       | AIR DRIED BASIS | DRY BASIS   |                     |                        |
| 01.   | MOISTURE IN ANALYSIS SAMPLE    | %Wt                              | -                 | 25,15           | -           | D-5142              | -                      |
| 02.   | TOTAL MOISTURE                 | %Wt                              | 33,77             | -               | -           | D-3302              | <35                    |
| 03.   | ASH CONTENT                    | %Wt                              | 4,34              | 4,91            | 6,56        | D-5142              | <5                     |
| 04.   | VOLATILE MATTER                | %Wt                              | 32,73             | 36,99           | 49,42       | D-5142              | <35                    |
| 05.   | FIXED CARBON                   | %Wt                              | 29,16             | 32,95           | 44,02       | By difference       | <30                    |
| 06.   | GROSS CALORIFIC VALUE (HHV)    | Kcal/Kg                          | 4253              | 4806            | 6421        | D-5865              | 4000-4500              |
|   | GROSS CALORIFIC VALUE (LHV)    | Kcal/Kg                          | 4079              | 4466            | 6159        |                     |                        |
| 07.   | TOTAL SULPHUR                  | %Wt                              | 0,21              | 0,23            | 0,31        | D-4239              | 0,33                   |
| 08.   | CARBON                         | %Wt                              | 45,04             | 50,90           | 68,01       | D-5373              | 46                     |
| 09.   | HIDROGEN                       | %Wt                              | 3,38              | 6,64            | 5,11        | D-5373              | 3,77                   |
| 10.   | NITROGEN                       | %Wt                              | 0,66              | 0,74            | 0,99        | D-5373              | 1,2                    |
| 11.   | OKSIGEN                        | %Wt                              | 12,60             | 36,58           | 19,03       | By difference       | -                      |
| 10.   | SIZING UNDER SIZE :            | -                                | -                 | -               | -           | D-409               |                        |
|   | -70 mm                         | %Wt                              |                   |                 |             |                     | 98                     |
|   | -50 mm                         | %Wt                              |                   |                 |             |                     | 9500%                  |
|   | -32 mm                         | %Wt                              |                   |                 |             |                     | 8000%                  |
|   | -2.38 mm                       | %Wt                              |                   |                 |             |                     | 2000%                  |
| 11.   | HGI                            |                                  | -                 | -               | -           | D-409               | 45-65                  |
| 12.   | ASH FUSION TEMPERATURE (RED) : |                                  |                   |                 |             | D-1857              |                        |
| 12.1.   | INITIAL DEFORMATION            | °C                               | -                 | -               |             |                     | 1150                   |
| 12.2.   | SOFTENING                      | °C                               | -                 | -               |             |                     | 1200                   |
| 12.3.   | HEMISPHERICAL                  | °C                               | -                 | -               |             |                     | 1250                   |
| 12.4.   | FLUID                          | °C                               | -                 | -               |             |                     | 1300                   |




  

|   |  |  |
|---|--|--|
| AMU KIMIA<br><br>ADE LESMANA PUTRA | Suralaya, 27 Desember 2017<br>ANALYST<br><br>OKKY R | <br>FANDY |
|---|--|--|

### 3. Mill D

| INDONESIA<br><b>POWER</b>                              |                                | UJIP BANTEN I SURALAYA |                                  | No. Dokumen     |           | 19 Mei 2011      |             |
|--|--------------------------------|------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------|------------------|-------------|
| LAPORAN HASIL PENGUJIAN<br>Nomor : -BB-IUJPBSR/VI/2017 |                                |                        |                                  | Tanggal         |           | 19 DESEMBER 2017 |             |
|  |                                |                        |                                  | Revisi          |           | 00               |             |
|  |                                |                        |                                  | Halaman         |           | 1 dari 1 halaman |             |
| SAMPLE   |                                | :                      | Batubara Performance Test Mill D |                 |           |                  |             |
| TEMPAT PENGAMBILAN SAMPLE                              |                                | :                      | -                                |                 |           |                  |             |
| NAMA PELANGGAN   |                                | :                      |                                  |                 |           |                  |             |
| DITERIMA DARI  |                                | :                      | Ahmad                            |                 |           |                  |             |
| TANGGAL PENGAMBILAN SAMPLE                             |                                | :                      | 19 DESEMBER 2017                 |                 |           |                  |             |
| TANGGAL DITERIMA                                       |                                | :                      | 19 DESEMBER 2017                 |                 |           |                  |             |
| TANGGAL PENGUJIAN                                      |                                | :                      | 27 DESEMBER 2017                 |                 |           |                  |             |
| URAIAN/IDENTIFIKASI SAMPLE                             |                                | :                      |                                  |                 |           |                  |             |
| No.  | PARAMETER PENGUJIAN            | SATUAN                 | HASIL PEMERIKSAAN                |                 |           | METODE TEST      | BATASAN     |
|  |                                |                        | AS RECEIVED                      | AIR DRIED BASIS | DRY BASIS | ASTM             | AS RECEIVED |
| 01.  | MOISTURE IN ANALYSIS SAMPLE    | %Wt                    | -                                | 26,55           | -         | D-5142           | -           |
| 02.  | TOTAL MOISTURE                 | %Wt                    | 36,63                            | -               | -         | D-3302           | <35         |
| 03.  | ASH CONTENT                    | %Wt                    | 4,45                             | 5,16            | 7,03      | D-5142           | <5          |
| 04.  | VOLATILE MATTER                | %Wt                    | 31,40                            | 36,39           | 49,54     | D-5142           | <35         |
| 05.  | FIXED CARBON                   | %Wt                    | 27,52                            | 31,90           | 43,43     | By difference    | <30         |
| 06.  | GROSS CALORIFIC VALUE (HHV)    | Kcal/Kg                | 4047                             | 4691            | 6386      | D-5865           | 4000-4500   |
|  | GROSS CALORIFIC VALUE (LHV)    | Kcal/Kg                | 3882                             | 4347            | 6126      |                  |             |
| 07.  | TOTAL SULPHUR                  | %Wt                    | 0,17                             | 0,20            | 0,27      | D-4239           | 0,33        |
| 08.  | CARBON                         | %Wt                    | 42,90                            | 49,72           | 67,70     | D-5373           | 48          |
| 09.  | HIDROGEN                       | %Wt                    | 3,21                             | 6,69            | 5,07      | D-5373           | 3,77        |
| 10.  | NITROGEN                       | %Wt                    | 0,63                             | 0,73            | 0,99      | D-5373           | 1,2         |
| 11.  | OKSIGEN                        | %Wt                    | 12,01                            | 37,50           | 18,95     | By difference    | -           |
| 10.  | SIZING UNDER SIZE :            | -                      | -                                | -               | -         | D-409            |             |
|  | -70 mm                         | %Wt                    |                                  |                 |           |                  | 98          |
|  | -50 mm                         | %Wt                    |                                  |                 |           |                  | 9500%       |
|  | -32 mm                         | %Wt                    |                                  |                 |           |                  | 8000%       |
|  | -2.38 mm                       | %Wt                    |                                  |                 |           |                  | 2000%       |
| 11.  | HGI                            |                        | -                                | -               | -         | D-409            | 45-65       |
| 12.  | ASH FUSION TEMPERATURE (RED) : |                        |                                  |                 |           | D-1857           |             |
| 12.1   | INITIAL DEFORMATION            | °C                     | -                                | -               |           |                  | 1150        |
| 12.2   | SOFTENING                      | °C                     | -                                | -               |           |                  | 1200        |
| 12.3   | HEMISPHERICAL                  | °C                     | -                                | -               |           |                  | 1250        |
| 12.4   | FLUID                          | °C                     | -                                | -               |           |                  | 1300        |




  

|   |  |
|---|--|
| AMU KIMIA<br><br>ADE LESMANA PUTRA | Suralaya, 27 Desember 2017<br>ANALYST<br> OKKY R<br> FANDY |
|---|--|

#### 4. Mill E

| INDONESIA<br><b>PAWIR</b>  |                                |             |                     |                  |           |               |             |
|--|--------------------------------|-------------|---------------------|------------------|-----------|---------------|-------------|
| IUP BANTEN 1 SURALAYA  |                                |             |                     |                  |           |               |             |
| <b>LAPORAN HASIL PENGUJIAN</b><br>Nomor : -/BB-IUJPBSR/VI/2017   |                                | No. Dokumen |                     |                  |           |               |             |
|  |                                | Tanggal     |                     | 19 Mei 2011      |           |               |             |
|  |                                | Revisi      |                     | 00               |           |               |             |
|  |                                | Halaman     |                     | 1 dari 1 halaman |           |               |             |
| SAMPLE : <b>Batubara Performance Test Mill E</b><br>TEMPAT PENGAMBILAN SAMPLE : -<br>NAMA PELANGGAN :<br>DITERIMA DARI : <b>Ahmad</b><br>TANGGAL PENGAMBILAN SAMPLE : <b>19 DESEMBER 2017</b><br>TANGGAL DITERIMA : <b>19 DESEMBER 2017</b><br>TANGGAL PENGUJIAN : <b>27 DESEMBER 2017</b><br>URAIAN IDENTIFIKASI SAMPLE : |                                |             |                     |                  |           |               |             |
| No.  | PARAMETER PENGUJIAN            | SATUAN      | HASIL PEMERIKSAAN * |                  |           | METODE TEST   | BATASAN     |
|  |                                |             | AS RECEIVED         | AIR DRIED BASIS  | DRY BASIS | ASTM          | AS RECEIVED |
| 01.  | MOISTURE IN ANALYSIS SAMPLE    | %Wt         | -                   | 27,22            | -         | D-5142        | -           |
| 02.  | TOTAL MOISTURE                 | %Wt         | 37,52               | -                | -         | D-3302        | <35         |
| 03.  | ASH CONTENT                    | %Wt         | 4,36                | 5,08             | 6,98      | D-5142        | <5          |
| 04.  | VOLATILE MATTER                | %Wt         | 31,17               | 36,31            | 49,89     | D-5142        | <35         |
| 05.  | FIXED CARBON                   | %Wt         | 26,95               | 31,39            | 43,13     | By difference | <30         |
| 06.  | GROSS CALORIFIC VALUE (HHV)    | Kcal/Kg     | 3940                | 4590             | 6306      | D-5865        | 4000-4500   |
|  | GROSS CALORIFIC VALUE (LHV)    | Kcal/Kg     | 3776                | 4243             | 6044      |               |             |
| 07.  | TOTAL SULPHUR                  | %Wt         | 0,17                | 0,20             | 0,27      | D-4239        | 0,33        |
| 08.  | CARBON                         | %Wt         | 42,22               | 49,18            | 67,57     | D-5373        | 46          |
| 09.  | HIDROGEN                       | %Wt         | 3,19                | 6,76             | 5,11      | D-5373        | 3,77        |
| 10.  | NITROGEN                       | %Wt         | 0,61                | 0,71             | 0,98      | D-5373        | 1,2         |
| 11.  | OKSIGEN                        | %Wt         | 11,93               | 38,07            | 19,09     | By difference | -           |
| 10.  | SIZING UNDER SIZE :            | -           | -                   | -                | -         | D-409         |             |
|  | -70 mm                         | %Wt         |                     |                  |           |               | 98          |
|  | -50 mm                         | %Wt         |                     |                  |           |               | 9500%       |
|  | -32 mm                         | %Wt         |                     |                  |           |               | 8000%       |
|  | -2.38 mm                       | %Wt         |                     |                  |           |               | 2000%       |
| 11.  | HGI                            |             | -                   | -                | -         | D-409         | 45-85       |
| 12.  | ASH FUSION TEMPERATURE (RED) : |             |                     |                  |           | D-1857        |             |
| 12.1.  | INITIAL DEFORMATION            | °C          | -                   | -                |           |               | 1150        |
| 12.2.  | SOFTENING                      | °C          | -                   | -                |           |               | 1200        |
| 12.3.  | HEMISPHERICAL                  | °C          | -                   | -                |           |               | 1250        |
| 12.4.  | FLUID                          | °C          | -                   | -                |           |               | 1300        |




  

|   |  |
|---|--|
| AMU KIMIA<br><br>ADE LESMANA PUTRA | Suralaya, 27 Desember 2017<br>ANALYST<br> OKKY R<br> FANDY |
|---|--|

5. Mill F

| INDONESIA POWER              |                                | UJIP BANTEN 1 SURALAYA           |                   | No. Dokumen      |           |               |             |
|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------|------------------|-----------|---------------|-------------|
| LAPORAN HASIL PENGUJIAN      |                                | Nomor : -BB-I/JPBSR/VI/2017      |                   | Tanggal          |           |               |             |
|                              |                                |                                  |                   | 19 Mei 2011      |           |               |             |
|                              |                                |                                  |                   | Revisi           |           |               |             |
|                              |                                |                                  |                   | 00               |           |               |             |
|                              |                                |                                  |                   | Halaman          |           |               |             |
|                              |                                |                                  |                   | 1 dari 1 halaman |           |               |             |
| SAMPLE :                     |                                | Batubara Performance Test Mill F |                   |                  |           |               |             |
| TEMPAT PENGAMBILAN SAMPLE :  |                                | -                                |                   |                  |           |               |             |
| NAMA PELANGGAN :             |                                | -                                |                   |                  |           |               |             |
| DITERIMA DARI :              |                                | Ahmad                            |                   |                  |           |               |             |
| TANGGAL PENGAMBILAN SAMPLE : |                                | 19 DESEMBER 2017                 |                   |                  |           |               |             |
| TANGGAL DITERIMA :           |                                | 19 DESEMBER 2017                 |                   |                  |           |               |             |
| TANGGAL PENGUJIAN :          |                                | 27 DESEMBER 2017                 |                   |                  |           |               |             |
| URAIAN/IDENTIFIKASI SAMPLE : |                                |                                  |                   |                  |           |               |             |
| No.                          | PARAMETER PENGUJIAN            | SATUAN                           | HASIL PEMERIKSAAN |                  |           | METODE TEST   | BATASAN     |
|                              |                                |                                  | AS RECEIVED       | AIR DRIED BASIS  | DRY BASIS | ASTM          | AS RECEIVED |
| 01.                          | MOISTURE IN ANALYSIS SAMPLE    | %Wt                              | -                 | 27,81            | -         | D-5142        | -           |
| 02.                          | TOTAL MOISTURE                 | %Wt                              | 38,87             | -                | -         | D-3302        | <35         |
| 03.                          | ASH CONTENT                    | %Wt                              | 5,13              | 6,06             | 8,39      | D-5142        | <5          |
| 04.                          | VOLATILE MATTER                | %Wt                              | 29,99             | 35,42            | 49,06     | D-5142        | <35         |
| 05.                          | FIXED CARBON                   | %Wt                              | 26,01             | 30,71            | 42,54     | By difference | <30         |
| 06.                          | GROSS CALORIFIC VALUE (HHV)    | Kcal/Kg                          | 3791              | 4476             | 6201      | D-5865        | 4000-4500   |
|                              | GROSS CALORIFIC VALUE (LHV)    | Kcal/Kg                          | 3639              | 4137             | 5953      |               |             |
| 07.                          | TOTAL SULPHUR                  | %Wt                              | 0,14              | 0,17             | 0,23      | D-4239        | 0,33        |
| 08.                          | CARBON                         | %Wt                              | 40,34             | 47,64            | 65,99     | D-5373        | 46          |
| 09.                          | HIDROGEN                       | %Wt                              | 2,96              | 6,61             | 4,84      | D-5373        | 3,77        |
| 10.                          | NITROGEN                       | %Wt                              | 0,65              | 0,76             | 1,06      | D-5373        | 1,2         |
| 11.                          | OKSIGEN                        | %Wt                              | 11,91             | 38,77            | 19,49     | By difference | -           |
| 10.                          | SIZING UNDER SIZE :            | -                                | -                 | -                | -         | D-409         |             |
|                              | -70 mm                         | %Wt                              |                   |                  |           |               | 98          |
|                              | -50 mm                         | %Wt                              |                   |                  |           |               | 9500%       |
|                              | -32 mm                         | %Wt                              |                   |                  |           |               | 8000%       |
|                              | -2.38 mm                       | %Wt                              |                   |                  |           |               | 2000%       |
| 11.                          | HGI                            |                                  | -                 | -                | -         | D-409         | 45-65       |
| 12.                          | ASH FUSION TEMPERATURE (RED) : |                                  |                   |                  |           | D-1857        |             |
| 12.1.                        | INITIAL DEFORMATION            | °C                               | -                 | -                | -         |               | 1150        |
| 12.2.                        | SOFTENING                      | °C                               | -                 | -                | -         |               | 1200        |
| 12.3.                        | HEMISPHERICAL                  | °C                               | -                 | -                | -         |               | 1250        |
| 12.4.                        | FLUID                          | °C                               | -                 | -                | -         |               | 1300        |




  

|   |   |
|---|---|
| AMU KIMIA   | Suralaya, 27 Desember 2017  |
|  | ANALYST   |
| ADE LESMANA PUTRA   |   |
|   | OKKY R      FANDY   |

6. Mill G

| INDONESIA<br><b>POWER</b>    |                                |   |                   |                 |             |               |                  |
|------------------------------|--------------------------------|---|-------------------|-----------------|-------------|---------------|------------------|
| UJIP BANTEN 1 SURALAYA       |                                | LAPORAN HASIL PENGUJIAN<br>Nomor : -/BB-IUJPBSR/VI/2017 |                   |                 | No. Dokumen |               |                  |
|                              |                                |   |                   |                 | Tanggal     |               | 19 Mei 2011      |
|                              |                                |   |                   |                 | Revisi      |               | 00               |
|                              |                                |   |                   |                 | Halaman     |               | 1 dari 1 halaman |
| SAMPLE :                     |                                | Batubara Performance Test Mill G                        |                   |                 |             |               |                  |
| TEMPAT PENGAMBILAN SAMPLE :  |                                | -   |                   |                 |             |               |                  |
| NAMA PELANGGAN :             |                                |   |                   |                 |             |               |                  |
| DITERIMA DARI :              |                                | Ahmad   |                   |                 |             |               |                  |
| TANGGAL PENGAMBILAN SAMPLE : |                                | 19 DESEMBER 2017  |                   |                 |             |               |                  |
| TANGGAL DITERIMA :           |                                | 19 DESEMBER 2017  |                   |                 |             |               |                  |
| TANGGAL PENGUJIAN :          |                                | 27 DESEMBER 2017  |                   |                 |             |               |                  |
| URAIAN IDENTIFIKASI SAMPLE : |                                |   |                   |                 |             |               |                  |
| No.                          | PARAMETER PENGUJIAN            | SATUAN  | HASIL PEMERIKSAAN |                 |             | METODE TEST   | BATASAN          |
|                              |                                |   | AS RECEIVED       | AIR DRIED BASIS | DRY BASIS   | ASTM          | AS RECEIVED      |
| 01.                          | MOISTURE IN ANALYSIS SAMPLE    | %Wt   | -                 | 22,77           | -           | D-5142        | -                |
| 02.                          | TOTAL MOISTURE                 | %Wt   | 32,82             | -               | -           | D-3302        | <35              |
| 03.                          | ASH CONTENT                    | %Wt   | 3,89              | 4,47            | 5,79        | D-5142        | <5               |
| 04.                          | VOLATILE MATTER                | %Wt   | 33,41             | 38,41           | 49,73       | D-5142        | <35              |
| 05.                          | FIXED CARBON                   | %Wt   | 29,88             | 34,35           | 44,48       | By difference | <30              |
| 06.                          | GROSS CALORIFIC VALUE (HHV)    | Kcal/Kg   | 4418              | 5079            | 6576        | D-5865        | 4000-4500        |
|                              | GROSS CALORIFIC VALUE (LHV)    | Kcal/Kg   | 4237              | 4740            | 6307        |               |                  |
| 07.                          | TOTAL SULPHUR                  | %Wt   | 0,25              | 0,29            | 0,37        | D-4239        | 0,33             |
| 08.                          | CARBON                         | %Wt   | 46,89             | 53,91           | 69,80       | D-5373        | 46               |
| 09.                          | HIDROGEN                       | %Wt   | 3,53              | 6,61            | 5,25        | D-5373        | 3,77             |
| 10.                          | NITROGEN                       | %Wt   | 0,66              | 0,76            | 0,99        | D-5373        | 1,2              |
| 11.                          | OKSIGEN                        | %Wt   | 11,96             | 33,97           | 17,80       | By difference | -                |
| 10.                          | SIZING UNDER SIZE :            | -   | -                 | -               | -           | D-409         |                  |
|                              | -70 mm                         | %Wt   |                   |                 |             |               | 98               |
|                              | -50 mm                         | %Wt   |                   |                 |             |               | 9500%            |
|                              | -32 mm                         | %Wt   |                   |                 |             |               | 8000%            |
|                              | -2.38 mm                       | %Wt   |                   |                 |             |               | 2000%            |
| 11.                          | HGI                            |   | -                 | -               | -           | D-409         | 45-65            |
| 12.                          | ASH FUSION TEMPERATURE (RED) : |   |                   |                 |             | D-1857        |                  |
| 12.1.                        | INITIAL DEFORMATION            | °C  | -                 | -               |             |               | 1150             |
| 12.2.                        | SOFTENING                      | °C  | -                 | -               |             |               | 1200             |
| 12.3.                        | HEMISPHERICAL                  | °C  | -                 | -               |             |               | 1250             |
| 12.4.                        | FLUID                          | °C  | -                 | -               |             |               | 1300             |

|  |  |
|--|--|
| <p>AMU KIMIA</p>  <p><b>ADE LESMANA PUTRA</b></p> | <p>Suralaya, 27 Desember 2017<br/>ANALYST</p>  <p><b>OKKY R</b></p>  <p><b>FANDY</b></p> |
|--|--|

## LAMPIRAN 4

### Perhitungan Beban Panas *Heat Exchanger* dan *Waterwall Tube*

#### 1. Beban Panas pada *Division Panel Superheater* dan *Superheater Platen*

Parameter uap pada sisi masuk *Division Panel Superheater* dan sisi keluar *Superheater Platen* adalah sebagai berikut:

- *Steam Inlet Temperature* : 398.576 °C
- *Steam Outlet Temperature* : 518.448 °C
- *Steam Pressure* : 15,21 MPa
- *Steam Inlet Enthalphy* : 2.964 kJ/kg
- *Steam Outlet Enthalphy* : 3.359 kJ/kg
- *Desuperheater Flow* : 0 kg/s
- *Steam Flow* : 478.13 kg/s
- *Volume of Div Panel Superheater (Front)* : 1.416,39 m<sup>3</sup>
- *Volume of Div Panel Superheater (Rear)* : 1.416,39 m<sup>3</sup>
- *Volume of Superheater Platen* : 822,57 m<sup>3</sup>

Maka *transfer* panas yang terjadi antara *flue gas* dengan *steam* dapat dihitung :

$$q_{total} = \text{steam flow} \times \Delta h$$

$$q_{total} = 478,13 \times (3359 - 2964)$$

$$q_{total} = 188.861,569 \text{ kW}$$

Dengan perbandingan volume *heat exchanger* didapatkan beban panas masing-masing *heat exchanger* adalah :

- *Division Panel Superheater (Front)*

$$q = \frac{\text{Volume of Div Panel Superheater (Front)}}{\text{Volume total}} \times q_{total}$$

$$q = \frac{1.416,39}{3.655,35} \times 188.861,569 \text{ kW}$$

$$q = 73.180,855 \text{ kW}$$

sehingga *heat generation* pada *Div Panel Superheater (Front)* adalah:

$$q''' = \frac{q}{\text{Volume of Div Panel Superheater (Front)}} = \frac{73.180,855}{1.416,39} \text{ kW}$$

$$q''' = 51.667,164 \text{ W/m}^3$$

- *Division Panel Superheater (Rear)*

Dengan cara yang sama didapatkan beban panas pada *Division Panel Superheater* adalah :

$$q''' = 51.667,164 \text{ W/m}^3$$

- *Superheater Platen*

Dengan cara yang sama didapatkan beban panas pada *Superheater Platen* adalah :

$$q''' = 51.667,164 \text{ W/m}^3$$

## 2. Beban Panas pada *Reheat Platen* dan *Reheat Finish*

Parameter uap pada sisi masuk *Reheat Platen* dan sisi keluar *Reheat Finish* adalah sebagai berikut:

- *Steam Inlet Temperature* : 322,67 °C
- *Steam Outlet Temperature* : 537,011 °C
- *Steam Pressure* : 3,25 MPa
- *Steam Inlet Enthalphy ( $h_{in}$ )* : 3.043 kJ/kg
- *Steam Outlet Enthalphy ( $h_{out}$ )* : 3.537 kJ/kg
- *Steam Flow ( $\dot{m}_{steam}$ )* : 412,98 kg/s
- *Desuperheater Flow ( $\dot{m}_{spray}$ )* : 1,89 kg/s
- *Desuperheater Temperature* : 176,89 °C
- *Desuperheater Pressure* : 15,65 MPa
- *Desuperheater Spray Enthalphy ( $h_{spray}$ )* : 533,7 kJ/kg
- *Volume of Reheat Platen* : 602,2 m<sup>3</sup>
- *Volume of Reheat Finish* : 300,78 m<sup>3</sup>

Maka transfer panas yang terjadi antara *flue gas* dengan *steam* dapat dihitung :

$$q_{total} = [(\dot{m}_{steam} + \dot{m}_{spray}) \times h_{out}] - [(\dot{m}_{steam} \times h_{in}) + (\dot{m}_{spray} \times h_{spray})]$$



$$q_{total} = [(412,98 + 1,89) \times 3.537] \\ - [(412,98 \times 3.043) + (1,89 \times 533,7)]$$

$$q_{total} = 209.685,843 \text{ kW}$$

Dengan perbandingan volume *heat exchanger* sebagaimana pada point 1 diatas maka didapatkan :

- Beban Panas pada *Reheat Platen* :  $q''' = 232.216,92 \text{ W/m}^3$
- Beban Panas pada *Reheat Finish* :  $q''' = 232.216,92 \text{ W/m}^3$

### 3. Beban Panas pada *Final Superheater*

Parameter uap pada sisi masuk dan sisi keluar *Final Superheater* adalah sebagai berikut:

- *Steam Inlet Temperature* : 518,448 °C
- *Steam Outlet Temperature* : 542,783 °C
- *Steam Pressure* : 15,21 MPa
- *Steam Inlet Enthalphy ( $h_{in}$ )* : 3.359 kJ/kg
- *Steam Outlet Enthalphy ( $h_{out}$ )* : 3.427 kJ/kg
- *Steam Flow ( $\dot{m}_{steam}$ )* : 478,1306 kg/s
- *Desuperheater Flow ( $\dot{m}_{spray}$ )* : 6,35 kg/s
- *Desuperheater Temperature* : 178,71 °C
- *Desuperheater Pressure* : 18,69 MPa
- *Desuperheater Spray Enthalphy ( $h_{spray}$ )* : 766,9 kJ/kg
- *Volume of Final Superheater* : 548,85 m<sup>3</sup>

Maka transfer panas yang terjadi antara *flue gas* dengan *steam* dapat dihitung :

$$q_{total} = [(\dot{m}_{steam} + \dot{m}_{spray}) \times h_{out}] \\ - [(\dot{m}_{steam} \times h_{in}) + (\dot{m}_{spray} \times h_{spray})]$$

$$q_{total} = [(478,1306 + 6,35) \times 3.427] \\ - [(478,1306 \times 3.359) + (6,35 \times 766,9)]$$

$$q_{total} = 49.408,207 \text{ kW}$$

Sehingga beban panas pada *Final Superheater* adalah  $q''' = 90.021,167 \text{ W/m}^3$

#### 4. Beban Panas pada *Low Temperature Superheater* (LTSH)

Perhitungan perpindahan panas pada area LTSH dihitung berdasarkan parameter *flue gas*. Data parameter *flue gas* pada area inlet dan outlet susunan LTSH adalah sebagai berikut :

- *Flue Gas Inlet Temperature* : 566,242 °C
- *Flue Gas Outlet Temperature* : 445,013 °C
- *Flue Gas  $C_p$*  : 1,076 kJ/kg
- *Flue Gas Flow ( $\dot{m}_{fluegas}$ )* : 726,57 kg/s
- *Volume of LTSH* : 1.124,219 m<sup>3</sup>

Perpindahan panas yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan :

$$q = \dot{m}_{fluegas} \times c_p \times \Delta T$$

$$q = 726,57 \times 1,076 \times (566,242 - 445,013)$$

$$q = 94.775,465 \text{ kW}$$

Sehingga beban panas pada LTSH adalah :

$$q''' = \frac{q}{\text{volume of LTSH}} = \frac{94.775,465 \text{ kW}}{1.124,219 \text{ m}^3}$$

$$q''' = 94.775,465 \text{ W/m}^3$$

#### 5. Beban Panas pada *Economizer*

Perhitungan perpindahan panas pada area *Economizer* dihitung berdasarkan parameter *flue gas*. Data parameter *flue gas* pada area inlet dan outlet susunan *Economizer* adalah sebagai berikut :

- *Flue Gas Inlet Temperature* : 445,013 °C
- *Flue Gas Outlet Temperature* : 347,159 °C
- *Flue Gas  $C_p$*  : 1,076 kJ/kg
- *Flue Gas Flow ( $\dot{m}_{fluegas}$ )* : 726,57 kg/s
- *Volume of Economizer* : 1.261,388 m<sup>3</sup>

Perpindahan panas yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan :

$$q = \dot{m}_{fluegas} \times c_p \times \Delta T$$

$$q = 726,57 \times 1,076 \times (445,013 - 347,159)$$

$$q = 76.501,154 \text{ kW}$$

Sehingga beban panas pada LTSH adalah :

$$q''' = \frac{q}{\text{volume of LTSH}} = \frac{76.501,154 \text{ kW}}{1.261,388 \text{ m}^3}$$

$$q''' = 60.648,392 \text{ W/m}^3$$

#### 6. Perhitungan Beban Panas pada *Waterwall Tube*

Beban panas pada *waterwall tube* dihitung berdasarkan efisiensi boiler serta beban panas pada semua susunan *heat exchanger*. Total input panas yang masuk dihitung berdasarkan kalori batubara yang terbakar, yaitu :

$$Q_{total} = \text{fuel firing rate} \times GCV_{coal}$$

$$Q_{total} = 87,872 \times 4.093,228$$

$$Q_{total} = 1.503,467 \text{ MW}$$

Panas yang terserap pada boiler dihitung berdasarkan efisiensi boiler hasil *performace test*.

$$Q_{absorb} = Q_{total} \times \text{boiler efficiency}$$

$$Q_{absorb} = 1.503,467 \times 83,7\%$$

$$Q_{absorb} = 1.258,402 \text{ MW}$$

Sehingga penyerapan panas pada area *waterwall tube* adalah :

$$Q_{waterwall} = Q_{absorb} - Q_{heat exchanger}$$

$$Q_{waterwall} = 1.258,402 - 617,025$$

$$Q_{waterwall} = 641,377 \text{ MW}$$

Dengan luasan *waterwall tube* sebesar 4.793,0773 m<sup>2</sup>, maka *heat flux* pada *waterwall tube* adalah :

$$q'' = \frac{q}{\text{luasan waterwall tube}} = \frac{641,377 \text{ MW}}{4.973,0773 \text{ m}^2}$$

$$q'' = 133.813,155 \text{ W/m}^2$$

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LAMPIRAN 5

### Perhitungan Udara Pembakaran

Udara pembakaran berasal disuplai oleh 2 unit Primary Air Fan (PAF) yang mensuplai primary air dan 2 unit Forced Draft Fan (FDF) yang mensuplai secondary air. Primary air selain sebagai udara pembakaran juga berfungsi sebagai udara transportasi batubara dari pulverizer menuju ke coal burner.

#### 1. Primary Air

Primary air flow pada setiap pulverizer ditampilkan pada table berikut :

| Posisi        | Flow (kg/s)    |            | Luas Penampang(m <sup>2</sup> ) | Massa Jenis(kg/m <sup>3</sup> ) | Kecepatan (m/s) |
|---------------|----------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------|
|               | Per Pulverizer | Per Corner |                                 |                                 |                 |
| Coal Burner A | 0.000          | 0.000      | 0.5929                          | 0.558                           | 0               |
| Coal Burner B | 26.019         | 6.505      | 0.5929                          | 0.558                           | 19.662          |
| Coal Burner C | 29.673         | 7.418      | 0.5929                          | 0.558                           | 22.422          |
| Coal Burner D | 29.230         | 7.308      | 0.5929                          | 0.558                           | 22.088          |
| Coal Burner E | 28.433         | 7.108      | 0.5929                          | 0.558                           | 21.486          |
| Coal Burner F | 29.978         | 7.495      | 0.5929                          | 0.558                           | 22.6531         |
| Coal Burner G | 28.444         | 7.111      | 0.5929                          | 0.558                           | 21.494          |

Perhitungan kecepatan primary air dihitung dengan persamaan berikut :

$$v_{pa} = \frac{\dot{m}_{pa}}{\rho_{pa} \times A_{pa}}$$

Contoh untuk coal burner B, maka kecepatan primary air pada tiap corner :

$$v_{pa} = \frac{\dot{m}_{pa}}{\rho_{pa} \times A_{pa}} = \frac{6,505}{0,558 \times 0,5929} = 19,662 \text{ m/s}$$

#### 2. Secondary Air

Mass flow secondary air adalah 1.332,42 ton per jam (370,117 kg/s) yang disuplai menuju secondary air nozzle, CCOFA, dan SOFA nozzle. Dengan

mengetahui luas area nozzle dan bukaan damper maka dapat dihitung kecepatan secondary air pada masing-masing nozzle.

| Burner /Nozzle | Luas Area (m <sup>2</sup> ) | Velocity Magnitude (m/s) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------|
| AA             | 0.3694                      | 14,28313                 |
| AB             | 0.7388                      | 2.856626                 |
| BC1            | 0.7388                      | 14,28313                 |
| BC2            | 0.7388                      | 14,28313                 |
| CD             | 0.7388                      | 14,28313                 |
| DE1            | 0.7388                      | 14,28313                 |
| DE2            | 0.7388                      | 14,28313                 |
| EF             | 0.7388                      | 14,28313                 |
| FG             | 0.7388                      | 14,28313                 |
| GG             | 0.3694                      | 14,28313                 |
| CCOFA1         | 0.3978                      | 27,10826                 |
| CCOFA2         | 0.3978                      | 27,10826                 |
| SOFA1          | 0.5196                      | 27,10826                 |
| SOFA2          | 0.5196                      | 27,10826                 |

## BIOGRAFI PENULIS



Nugroho Setyo Hutomo, lahir di Klaten pada tanggal 9 November 1984, merupakan putra sulung dari pasangan Bapak Sutrisno dan Ibu Sugijarti, memiliki satu kakak kandung, Rini Setyowati, dan satu adik kandung, Rasjunadi Dananjaya. Penulis menempuh pendidikan formal SD N Demangan 1 Yogyakarta, SLTP N 1 Yogyakarta, SMU N 1 Yogyakarta dan melanjutkan S1 di Jurusan Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada pada tahun 2003. Penulis mulai bekerja di PT Indonesia Power dari tahun 2008 hingga sekarang.

email : [mas.inug@gmail.com](mailto:mas.inug@gmail.com)