

PROYEK AKHIR - VN231837

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK BOILER DENGAN
VARIASI KOMPOSISI BATUBARA DAN BIOMASSA DI
PLTU BERKAPASITAS 400 MW**

HERVIAN QIDAM YULTRIANTO

NRP 2039201024

Dosen Pembimbing

Giri Nugroho, S.T., M.Sc.

NIP 19791029 201212 1 002

Program Studi Teknologi Rekayasa Konversi Energi

Departemen Teknik Mesin Industri

Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



PROYEK AKHIR - VN231837

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK BOILER DENGAN
VARIASI KOMPOSISI BATUBARA DAN BIOMASSA DI
PLTU BERKAPASITAS 400 MW**

HERVIAN QIDAM YULTRIANTO

NRP 2039201024

Dosen Pembimbing

Giri Nugroho, S.T., M.Sc.

NIP 19791029 201212 1 002

Program Studi Teknologi Rekayasa Konversi Energi

Departemen Teknik Mesin Industri

Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



FINAL PROJECT - VN231837

**NUMERICAL STUDY OF BOILER CHARACTERISTICS
WITH VARIATIONS IN COAL AND BIOMASS
COMPOSITION IN A 400 MW POWER PLANT**

HERVIAN QIDAM YULTRIANTO

NRP 2039201024

Advisor

Giri Nugroho, S.T., M.Sc.

NIP 19791029 201212 1 002

Bachelor Program of Energy Conversion

Department of Industrial Mechanical Engineering

Faculty of Vocation

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK BOILER DENGAN VARIASI KOMPOSISI
BATUBARA DAN BIOMASSA DI PLTU BERKAPASITAS 400 MW**

PROYEK AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik (S. Tr. T.) pada
Program Studi S-1 Terapan Teknologi Rekayasa Konversi Energi
Departemen Teknik Mesin Industri
Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **HERVIAN QIDAM YULTRIANTO**

NRP: 2039201024

Disetujui oleh Tim Penguji Proyek Akhir:

1. Giri Nugroho, S.T., M.Sc.
NIP. 19791029 201212 1 002

Pembimbing

2. Dr. Ir. Heru Mirmanto, M.T.
NIP. 1962021 6199512 1 001

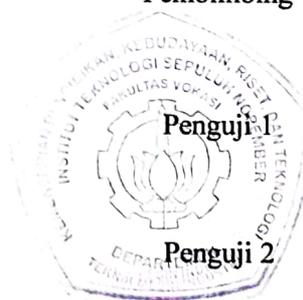
Penguji 1

3. Ir. Joko Sarsetiyanto, M.T.
NIP. 19610602 198701 1 001

Penguji 2

4. Ir. Budi Luwar Sanyoto, M.T.
NIP. 19621114 199003 1 002

Penguji 3



[Handwritten signature of Pembimbing]
.....
[Handwritten signature of Penguji 1]
.....
.....
[Handwritten signature of Penguji 3]
.....

SURABAYA

JULI 2024

APPROVAL SHEET

**NUMERICAL STUDY OF BOILER CHARACTERISTICS WITH VARIATIONS IN COAL
AND BIOMASS COMPOSITION IN A 400 MW POWER PLANT**

FINAL PROJECT

Submitted to fulfil one of the requirements
for obtaining a degree Sarjana Terapan Teknik (S. Tr. T.) at
Undergraduate Study Program of Energy Conversion
Department of Industrial Mechanical Engineering
Faculty of Vocation
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **HERVIAN QIDAM YULTRIANTO**
NRP: 2039201024

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Giri Nugroho, S.T., M.Sc.
NIP. 19791029 201212 1 002

2. Dr. Ir. Heru Mirmanto, M.T.
NIP. 1962021 6199512 1 001

3. Ir. Joko Sarsetiyanto, M.T.
NIP. 19610602 198701 1 001

4. Ir. Budi Luwar Sanyoto, M.T.
NIP. 19621114 199003 1 002

Advisor



Examiner 1

Examiner 2

Examiner 3

.....

SURABAYA

JULY 2023

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

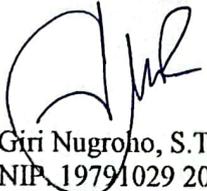
Nama mahasiswa / NRP : Hervian Qidam Yultrianto / 2039201024
Departemen/Prodi : Teknik Mesin Industri, Fakultas / D4 Teknologi Rekayasa
Konversi Energi
Dosen Pembimbing / NIP : Giri Nugroho, S.T., M.Sc. / 19791029 201212 1 002

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK BOILER DENGAN VARIASI KOMPOSISI BATUBARA DAN BIOMASSA DI PLTU BERKAPASITAS 400 MW” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 Juli 2024

Mengetahui
Dosen Pembimbing


Giri Nugroho, S.T., M.Sc.
NIP. 19791029 201212 1 002

Mahasiswa


Hervian Qidam Yultrianto
NRP. 2039201024

v

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersign below:

Student name / NRP : Hervian Qidam Yultrianto / 2039201024
Department / Study Program : Industrial Mechanical Engineering / D4 Energy Conversion
Engineering Technology
Advisor / NIP : Giri Nugroho, S.T., M.Sc. / 19791029 201212 1 002

Hereby declare that Final project with the title “**NUMERICAL STUDY OF BOILER CHARACTERISTICS WITH VARIATIONS IN COAL AND BIOMASS COMPOSITION IN A 400 MW POWER PLANT**” is my own work, original and written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is any discrepancy with this statement, I am willing to accept sanction in accordance with the applicable provision at the Sepuluh Nopember Institute of Technology.

Surabaya, July 29th 2024

Acknowledged
Advisor



Giri Nugroho, S.T., M.Sc.
NIP. 19791029 201212 1 002

Student,



Hervian Qidam Yultrianto
NRP. 2039201024

ABSTRAK

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK BOILER DENGAN VARIASI KOMPOSISI BATUBARA DAN BIOMASSA DI PLTU BERKAPASITAS 400 MW

Nama Mahasiswa / NRP : Hervian Qidam Yultrianto / 2039201024
Departemen : Teknik Mesin Industri, Fakultas Vokasi-ITS
Dosen Pembimbing : Giri Nugroho, S.T., M.Sc.

Abstrak

Beberapa program Energi Baru dan Terbarukan (EBT) yang dirancang PT PLN, salah satu programnya adalah penerapan *Co-firing* pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batubara eksisting. *Co-firing* merupakan penambahan biomassa sebagai bahan bakar pengganti parsial ke dalam *boiler* PLTU batubara. *Co-firing* dijadikan sebagai salah satu *green booster* dalam program percepatan peningkatan penggunaan energy terbarukan. Demi mendukung program tersebut, PLTU PT X berencana mengganti bahan bakar primer yang awalnya batubara menjadi 100% biomassa. Penelitian ini akan membahas mengenai pengaruh *co-firing* biomassa terhadap pembakaran pada *boiler* tipe *pulverized coal* PLTU PT X. Analisis numerik dilakukan pada *Pulverized Coal* (PC) *Boiler* PLTU PT X dengan menggunakan delapan (8) variasi yaitu 100% batubara, *cofiring* biomassa dengan persentase 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30% serta 100% Biomassa. Sehingga untuk mengetahui distribusi temperatur, kecepatan dan daerah yang mengalami turbulensi pada *boiler* dilakukan pemodelan dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) menggunakan *software ANSYS FLUENT*. Hasil penelitian ini menunjukkan dimana kondisi 100% batubara memiliki distribusi kontur temperatur yang paling tinggi kemudian menurun seiring bertambahnya persentase *co-firing sawdust*.

Kata Kunci: *co-firing, biomassa, pulverized coal boiler, CFD*

ABSTRACT

NUMERICAL STUDY OF BOILER CHARACTERISTICS WITH VARIATIONS IN COAL AND BIOMASS COMPOSITION IN A 400 MW POWER PLANT

Student Name / NRP : Hervian Qidam Yultrianto / 2039201024
Department : Industrial Mechanical Engineering, Vocation-ITS
Advisor : Giri Nugroho, S.T., M.Sc.

Abstract

From several New and Renewable Energy (EBT) programs designed by PT PLN, one of the programs is the application of Co-firing in existing coal-fired steam power plants (PLTU). Co-firing is the addition of biomass as a partial replacement fuel into a coal-fired PLTU boiler. Co-firing is used as one of the green boosters in the program to accelerate the use of renewable energy. In order to support the program, PLTU PT X plans to replace primary fuel from coal to 100% biomass. This study will discuss the effect of biomass co-firing on combustion in pulverized coal type boiler PLTU PT X. Numerical analysis was carried out on Pulverized Coal (PC) Boiler PLTU PT X using eight (8) variations namely 100% coal, cofiring biomass with a percentage of 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% and 100% Biomass. So as to determine the distribution of temperature, speed and areas experiencing turbulence in the boiler, modeling is carried out using Computational Fluid Dynamic (CFD) using ANSYS FLUENT software. The results of this study show that the condition of 100% coal has the highest temperature contour distribution and then decreases as the percentage of sawdust co-firing increases.

Keywords: *co-firing, biomass, pulverized coal boiler, CFD*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas taufik serta anugerah-Nya yang tiada tara sehingga penyusunan Proyek Akhir dengan judul “STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK BOILER DENGAN VARIASI KOMPOSISI BATUBARA DAN BIOMASSA DI PLTU BERKAPASITAS 400 MW” berjalan dengan baik dan selesai tanpa adanya kendala sedikitpun. Proposal ini digunakan dalam memenuhi standar kelulusan Departemen Teknik Mesin Industri dengan tujuan menerapkan ilmu yang telah didapat pada masalah yang ada. Tak lupa ucapan terimakasih dipersembahkan kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian proyek akhir ini, khususnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT., sebagai Kepala Departemen Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi – ITS.
2. Ibu Dr. Atria Pradityana, ST., MT., sebagai Koordinator Program Studi Teknik Rekayasa Konversi Energi.
3. Bapak Giri Nugroho, S.T., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan dalam Proposal Proyek Akhir ini.
4. Kedua orang tua tercinta yang selalu mendoakan dan memberi dukungan baik moral maupun material
5. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberi bantuan dan dukungan dalam menyelesaikan Proyek Akhir ini.

Semoga proyek akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan penulis khususnya. Penulis sadar bahwa proyek akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Dengan kerendahan hati kami mohon kritik dan saran yang bersifat membangun guna penyempurnaan proyek akhir ini dan pembelajaran penulis kedepannya.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
APPROVAL SHEET.....	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
STATEMENT OF ORIGINALITY	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT.....	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR SIMBOL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.1.1 Studi Kelayakan Pembakaran Variasi Kelapa Sawit dan Batubara Melalui Simulasi <i>Boiler</i>	5
2.1.2 Pengaruh Sudut <i>Burner</i> terhadap Karakteristik Pembakaran Boiler	7
2.2 Siklus <i>Rankine</i>	8
2.3 <i>Tangentially Fired Pulverized Boiler</i>	10
2.4 Perpindahan Panas pada <i>Boiler</i>	12
2.5 <i>Co-Firing</i> Biomassa pada PLTU di Indonesia	14
2.6 Metode <i>Co-Firing</i> Biomassa	15
2.6.1 <i>Direct Co-Firing</i>	15
2.6.2 <i>Indirect Co-Firing</i>	16
2.6.3 <i>Paralel Co-Firing</i>	16
2.7 Bahan Bakar.....	16

2.7.1	Batubara.....	17
2.7.2	Biomassa	17
2.8	Analisis Batubara	18
2.8.1	<i>Proximate Analysis</i>	19
2.8.2	<i>Ultimate Analysis</i>	20
2.9	Efisiensi <i>Boiler</i>	20
4.3.1	Metode Langsung (<i>Direct Method</i>).....	21
4.3.2	Metode Tak Langsung (<i>Indirect Method</i>)	22
2.10	Proses Pembakaran.....	23
2.11	<i>Computational Fluid Dynamic</i>	24
2.11.1	<i>Governing Equation</i>	24
2.11.2	Formulasi <i>Solver</i>	25
2.11.3	Model Turbulensi	25
2.11.4	Model <i>Species</i>	27
2.11.5	Interaksi <i>Turbulence-Chemistry</i>	27
2.11.6	<i>Solution Control</i>	28
2.11.7	Konvergensi.....	30
2.12	<i>Porous Media</i>	31
BAB III METODE PENELITIAN		33
3.1	Diagram Alir Penelitian	33
3.2	Metode Penelitian.....	34
3.2.1	Studi Literatur.....	34
3.2.2	Pembuatan 3D <i>Design Boiler</i> pada <i>Autodesk Inventor Professional 2021</i>	35
3.2.3	Variasi Data Simulasi.....	36
3.2.4	Metode Komputasi	37
3.2.4.1	<i>Pre-Processing</i>	37
3.2.4.2	<i>Processing</i>	41
3.2.4.3	<i>Post Processing</i>	46
BAB IV PEMBAHASAN DAN ANALISA		49
4.1	Hasil Simulasi Numerik	49
4.2	Validasi Hasil Simulasi	50
4.3	Analisi Numerik Hasil Simulasi.....	52
4.3.1	Distribusi Temperatur.....	52

4.3.2 Distribusi Kecepatan.....	69
4.4 Analisis Efisiensi <i>Performance Test Boiler</i>	71
BAB V PENUTUP.....	73
5.1 Kesimpulan.....	73
5.2 Saran.....	73
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN.....	77
BIODATA PENULIS.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Distribusi Temperatur pada Furnace untuk Masing-Masing Variasi.....	6
Gambar 2.2 Temperatur <i>Iso-Surface</i> dari <i>Case 1</i> dan <i>Case 6</i> (Jiang, Park, and Jeon 2020)	7
Gambar 2.3 Siklus <i>Rankine</i> Ideal.....	8
Gambar 2.4 Siklus <i>Rankine</i> Aktual.....	10
Gambar 2.5 <i>Boiler</i> dan Alat Bantunya.....	11
Gambar 2.6 Ilustrasi Pembakaran dengan <i>Tangentially Fire</i>	12
Gambar 2.7 Hasil Simulasi <i>Adamczyk</i>	13
Gambar 2.8 Peta Pesebaran PLTU yang Sudah Melakukan Metode <i>Co-firing</i>	15
Gambar 2.9 Metode <i>Co-firing</i> pada PLTU	16
Gambar 2.10 Algoritma Komputasi Diskritisasi pada <i>ANSYS Fluent</i>	29
Gambar 2.11 Ilustrasi <i>Porous Media</i>	31
Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Penelitian	34
Gambar 3.2 <i>Design Boiler</i>	35
Gambar 3.3 <i>Design Assembly Boiler</i>	37
Gambar 3.4 Rentang Kualitas <i>Mesh</i>	38
Gambar 3.5 <i>Mashing Boiler</i>	38
Gambar 3.6 <i>Meshing Inlet Burner</i> dan <i>Secondary Air</i>	39
Gambar 3.7 Domain <i>Boiler</i>	40
Gambar 3.8 Domain <i>Inlet Boiler</i>	40
Gambar 3.9 Tampilan Pengaturan Model Simulasi.....	41
Gambar 3.10 Tampilan <i>Injection</i> pada <i>Discrete Phase Model</i>	42
Gambar 3.11 Tampilan <i>Setup</i> Pemilihan Material.....	43
Gambar 4.1 Posisi pengamatan pada Analisis Kualitatif <i>Boiler Fired Pulverized</i>	50
Gambar 4.2 Grafik validasi perbandingan FEGT simulasi terhadap data aktual.....	51
Gambar 4.3 Distribusi Temperatur Kondisi 1 pada <i>Z-Centre Boiler</i>	52
Gambar 4.4 Distribusi Temperatur Kondisi 1 pada Tiap Burner dan FEGT.....	53
Gambar 4.5 Distribusi Temperatur Kondisi 2 pada <i>Z-Centre Boiler</i>	54
Gambar 4.6 Distribusi Temperatur Kondisi 2 pada Tiap Burner dan FEGT.....	54
Gambar 4.7 Distribusi Temperatur Kondisi 3 pada <i>Z-Centre Boiler</i>	55
Gambar 4.8 Distribusi Temperatur Kondisi 3 pada Tiap Burner dan FEGT.....	56
Gambar 4.9 Distribusi Temperatur Kondisi 4 pada <i>Z-Centre Boiler</i>	57

Gambar 4.10	Distribusi Temperatur Kondisi 4 pada Tiap Burner dan FEGT	58
Gambar 4.11	Distribusi Temperatur Kondisi 5 pada <i>Z-Centre Boiler</i>	59
Gambar 4.12	Distribusi Temperatur Kondisi 5 pada Tiap Burner dan FEGT	60
Gambar 4.13	Distribusi Temperatur Kondisi 6 pada <i>Z-Centre Boiler</i>	61
Gambar 4.14	Distribusi Temperatur Kondisi 6 pada Tiap Burner dan FEGT	62
Gambar 4.15	Distribusi Temperatur Kondisi 7 pada <i>Z-Centre Boiler</i>	63
Gambar 4.16	Distribusi Temperatur Kondisi 7 pada Tiap Burner dan FEGT	63
Gambar 4.17	Distribusi Temperatur Kondisi 8 pada <i>Z-Centre Boiler</i>	64
Gambar 4.18	Distribusi Temperatur Kondisi 8 pada Tiap Burner dan FEGT	65
Gambar 4.19	Distribusi Temperatur <i>Flue Gas</i> pada <i>Z-Centre</i>	66
Gambar 4.20	Distribusi Temperatur pada Burner dan FEGT	68
Gambar 4.21	Distribusi Temperatur <i>Flue Gas</i> pada <i>Z-Centre</i>	69
Gambar 4.22	Distribusi Kecepatan <i>Flue Gas</i> pada Masing-Masing Elevasi Burner	70

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter Simulasi untuk Masing-Masing <i>Case</i> (Jiang dkk, 2020).....	5
Tabel 2.2 <i>ASTM Coal Ranking System (ASTM D388 Standard Classification of Coals by Rank)</i>	17
Tabel 2.3 Analisis Sampel Batubara dan Biomassa (Maskur et al. n.d.).....	18
Tabel 3.1 AFR Pembakaran.....	36
Tabel 3.2 Kualitas <i>Mesh</i> pada Model 3D PC <i>Boiler</i>	39
Tabel 3.3 Detail Pengaturan Model Simulasi	41
Tabel 3.4 <i>Species</i> Model.....	41
Tabel 3.5 Ketentuan Peng-injeksian Batubara pada Masing-Masing <i>Corner</i>	42
Tabel 3.6 Data <i>Properties</i> Material <i>Solid</i> dan <i>Fluid</i> Simulasi Numerik	43
Tabel 3.7 <i>Boundary Condition</i>	44
Tabel 3.8 Nilai <i>Heat Generation</i> Tiap HE.....	46
Tabel 4.1 Hasil <i>Mass Balance Flue Gas</i> untuk Seluruh Variasi Kondisi Simulasi.....	49
Tabel 4.2 Perbandingan Rata-Rata FEGT Hasil Simulasi Terhadap Data Aktual	51
Tabel 4.3 Jangkauan Temperatur pada <i>Furnace</i> dan Konfigurasi <i>Heat Exchanger Boiler</i>	67
Tabel 4.4 Jangkauan Temperatur <i>Fire Ball</i> dan FEGT.....	68

DAFTAR SIMBOL

Daftar Notasi

$1/a$: Viscous resistance
A	: Luas permukaan atau luas penampang total, m^2
\vec{A}	: Vektor Permukaan
B	: Barometric pressure, mmHg
c	: Minimum allowance, m
C	: 0,98, konstanta variasi bilangan Reynolds dan rasio D/t
C_2	: Faktor <i>inertial resistance</i>
$C_{p\ steam}$: Mean specific heat <i>uap</i> , J/kg °C
$C_{p\ fg}$: Mean specific heat <i>flue gas</i> , J/kg °C
D	: Diameter, m
F	: Gaya, N
f	: Faktor gesekan
g	: Gaya gravitasi, m/s^2
h	: Koefisien perpindahan kalor secara konveksi, W/m^2K
HHV	: <i>Higher Heating Value</i> , J/kg
H	: Enthalpy, J/kg
ΔH	: Selisih <i>enthalpy</i> , J/kg
K	: Faktor bahan bakar
k	: Konduktivitas termal, $W/(K.m)$
L	: Panjang pipa, m
LHV	: <i>Lower Heating Value</i> , J/kg
\dot{m}	: Laju aliran massa, kg/s
\dot{m}_a	: Laju aliran massa udara, kg/s
\dot{m}_s	: Laju aliran massa uap, kg/s
\dot{m}_{fg}	: Laju aliran massa flue gas, kg/s
Pr	: Prandtl Number
P	: Pressure, pa
ρ	: Massa jenis, kg/m^3
Q	: Debit aliran fluida, m^3/s
q	: Laju perpindahan kalor, W
q'	: Flux <i>laju perpindahan kalor</i> , W/m^2
q''	: Heat generation, W/m^3
Re	: Bilangan Reynolds
R_i	: Laju produksi <i>species i</i> dari reaksi kimia
S_i	: Laju pembentukan <i>species</i>
t	: Waktu, s
T_a	: Temperature ambient, °C
T_f	: Temperature film, °C
T_s	: Temperatur permukaan, °C
T_∞	: Temperatur fluida, °C
Δn	: Tebal porous media, m

ΔT	: Perbedaan temperatur, °C
u	: Kecepatan fluida arah x, m/s
μ	: Viskositas absolut uap, kg/s m
ϑ	: Specific volume uap rata-rata, m ³ /kg
v	: Kecepatan fluida, m/s
V	: Volume, m ³
\vec{v}	: Vektor kecepatan
ν_j	: Viskositas kinematik, m ² /s
w	: Kecepatan fluida arah z, m/s

Daftar Singkatan

AS	: As received
ASTM	: American Standard Testing and Material
CAE	: Computer aided engineering
CFD	: Computational fluid dynamics
DAF	: Dry Ash Free
FC	: Fixed carbon
FVM	: Finite volume method
ITSH	: Intermediate temperature superheater
LCA	: Life cycle assessment
LTSH	: Low temperature superheater
M	: Moisture
PC	: Pulverized coal
PLTU	: Pembangkit listrik tenaga uap
VM	: Volatile matter

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sekretariat Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan mencatat realisasi konsumsi listrik nasional sampai dengan akhir tahun 2021 sebesar 1.122,60 GWh, sedangkan kapasitas terpasang pembangkit tenaga listrik di Indonesia mencapai 74.532,94 MW, dibandingkan dengan tahun 2020 sebesar 72.750,72 MW (Sekretariat Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan 2022). Dari data tersebut dijelaskan juga bahwa sebagian besar pembangkit yang ada di Indonesia masih didominasi pembangkit listrik tenaga *thermal* berbahan bakar batubara mulai yang menggunakan batubara kalori tinggi sampai batubara kalori rendah. Salah satu permasalahan yang muncul dalam pemanfaatan sumber energi pada pembangkit listrik tenaga *thermal* adalah masih banyaknya penggunaan energi fosil, sedangkan sumber energi tersebut sangat terbatas di bumi. Dalam jangka panjang, sumber daya batubara yang tersedia akan semakin langka. Oleh karena itu, diperlukan upaya khusus untuk mengurangi penggunaan bahan bakar ini dan menggantinya dengan bahan bakar alternatif lain yang ramah lingkungan.

Pemerintah menargetkan pencapaian Energi Baru dan Terbarukan (EBT) dalam bauran energy nasional yang tertuang pada Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) dengan target mencapai 23% pada tahun 2025 yang di *break down* menjadi listrik dan non listrik (Lampiran I Perpres Nomor 22 Tahun 2017 n.d.). Menurut data Sekretariat Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan tahun 2022 menyebutkan bahwa penerapan EBT masih jauh dari target yaitu sebesar 15,7%, terdapat deviasi sebesar 7,3% yang harus diimplementasikan dalam 3 tahun kedepan. Dari beberapa program EBT yang dirancang PT PLN, salah satu programnya adalah penerapan *Co-firing* pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batubara eksisting. *Co-firing* merupakan penambahan biomassa sebagai bahan bakar pengganti parsial ke dalam *boiler* PLTU batubara. *Co-firing* dijadikan sebagai salah satu *green booster* dalam program percepatan peningkatan penggunaan energi terbarukan dengan minimum investasi dikarenakan menggunakan fasilitas yang ada pada PLTU eksisting.

Uji coba *co-firing* biomassa telah dilakukan PT PLN terhadap 52 PLTU di Indonesia. PLTU PT X merupakan salah satu PLTU yang masuk dalam prioritas uji coba *co-firing* biomassa tersebut. PLTU PT X memiliki pembangkit berbahan bakar batubara dengan kapasitas sebesar 400 MW. Berdasarkan keterangan dari PLTU PT X, berencana mengganti bahan bakar primer yang awalnya batubara menjadi 100% biomassa. Hal ini dikarenakan usia PLTU PT X sudah tua dan terancam di suntik mati. Kondisi ini menyebabkan pasokan batubara yang diterima PT PLTU PT X semakin berkurang tiap tahunnya dan ini juga memotivasi perusahaan untuk beralih yang semula menggunakan bahan bakar batubara menjadi 100% biomassa. Hal ini membuat penulis melakukan simulasi numerik menggunakan acuan proses pembakaran di dalam *boiler* memvariasikan *co-firing* dengan tujuan memberikan gambaran kepada PLTU PT X

terhadap karakteristik pembakaran yang terjadi di *boiler* dan mampu mengoptimalkan operasi aktualnya.

Penelitian ini akan membahas mengenai pengaruh *co-firing* biomassa terhadap pembakaran pada *boiler* tipe *pulverized coal* PLTU PT X. Kombinasi hembusan batubara, biomassa, dan udara pembakaran menghasilkan pola aliran yang tidak dapat dimonitor secara langsung. Sehingga untuk mengetahui distribusi temperatur, kecepatan dan daerah yang mengalami turbulensi pada *boiler* dilakukan pemodelan dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Aspek yang menjadi tinjauan dalam penelitian adalah distribusi temperatur dan kecepatan *flue gas* serta persentase biomassa yang efektif sehingga dapat diketahui dampak *co-firing* baik dalam aspek, pembakaran, kualitas biomassa maupun emisigas buang hasil pembakaran.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, maka untuk permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh *co-firing* biomassa terhadap distribusi temperature kerja *boiler*?
2. Bagaimana pengaruh *co-firing* biomassa terhadap distribusi kecepatan *flue gas* dalam *boiler*?
3. Bagaimana perbandingan data antara FEGT dari simulasi numerik terhadap data aktual?
4. Bagaimana pengaruh *co-firing* terhadap efisiensi kerja boiler?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian hanya akan melakukan simulasi numerik menggunakan *software* ANSYS Fluent.
2. Biomassa yang digunakan berupa *sawdust* dengan persentase *co-firing* hanya sampai 30% dibandingkan dengan 100% batubara dan 100% *sawdust*.
3. Simulasi numerik pembakaran dilakukan pada kondisi *steady*.
4. Properti udara pembakar (*primary air* dan *Secondary Air*) mengikuti kondisi default pada ANSYS Fluent (*dry air*).
5. Konfigurasi *superheater tube* dan *economizer tube* yang memiliki banyak tube disimplifikasi menjadi geometri yang lebih sederhana dan diasumsikan sebagai porous media agar memudahkan dalam proses *meshing* dan kalkulasi.
6. Simulasi melibatkan area *wall tube*, *high temperature superheater*, *intermediate temperature superheater*, *low temperature superheater*, *economizer 1*, dan *economizer 2* untuk mengetahui distribusi temperatur dan kecepatan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Untuk memperoleh data distribusi temperatur pada PC *boiler* dengan variasi persentase *co-firing* biomassa

2. Untuk memperoleh data distribusi kecepatan pada PC *boiler* dengan variasi komposisi *co-firing* biomassa
3. Melakukan analisis perbandingan data FEGT hasil simulasi numerik terhadap data aktual di lapangan
4. Untuk memperoleh data efisiensi kerja pada *boiler*

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi *insight* positif untuk PLTU PT X dalam usahanya untuk menurunkan emisi gas rumah kaca dengan *co-firing* biomassa.
2. Menambah wawasan untuk Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) khususnya simulasi numeric
3. Penelitian ini dapat dimanfaatkan untuk masyarakat luas, khususnya dalam dunia industri.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

2.1.1 Studi Kelayakan Pembakaran Variasi Kelapa Sawit dan Batubara Melalui Simulasi Boiler

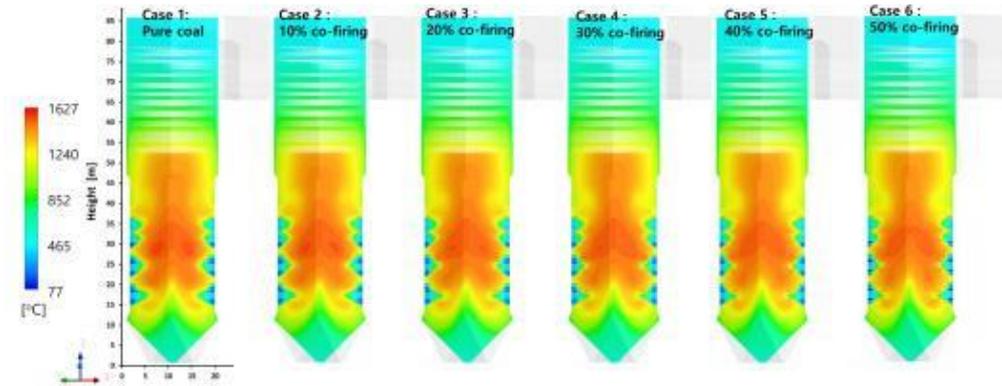
Penyusunan dan pelaksanaan penelitian ini dilakukan dengan mengambil referensi dari penelitian terdahulu yang berjudul “*Feasibility Study of Co-Firing of Torrefied Empty Fruit Bunch and Coal through Boiler Simulation*”. (Jiang, Park, and Jeon 2020) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi persentase *co-firing* menggunakan *torrefied empty fruit bunch* (T-EFB) pada *boiler* dengan tipe *tangentially pulverized coal* kapasitas 500 MW Penelitian tersebut dilakukan berbasis simulasi dengan menggunakan *software* ANSYS FLUENT 17 R1. Model turbulen yang digunakan adalah *k-ε realizable*. Untuk model *species* digunakan *species transport* dengan mengaktifkan *volumetric* menggunakan *finiterate/eddy-dissipation model*. Bahan bakar didefinisikan mempunyai ukuran yang tidak seragam menggunakan *rosin-rammler* dengan *range* 10-150 μm dan rata-rata 75 μm . Penelitian ini menggunakan 6 variasi simulasi yaitu *Case* (1) 100% batubara, *Case* (2) 10% *co-firing*, *Case* (3) 20% *co-firing*, *Case* (4) 30% *co-firing*, *Case* (5) 40% *co-firing*, dan *Case* (6) 50% *co-firing*. Hasil dari simulasi kemudian dibandingkan dengan data hasil eksperimen sebagai validasi.

Tabel 2.1 Parameter Simulasi untuk Masing-Masing *Case* (Jiang dkk, 2020)

Item	Operation Boiler		Simulation Cases			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Combustion type	Pure coal			Co-firing		
T-EFB bleeding ratio (% thermal basis)	0	10	20	30	40	50
Fuel mills in service (burn zone)			A B C D E			
Coal feed rates (kg/s)	51.3	46.2	41.1	35.9	30.8	25.7
Biomass feed rates (kg/s)	-	6.2	12.5	18.7	24.9	31.1
PA ^a flow rate (kg/s)	109.8	110.7	111.6	112.4	113.2	113.8
SA ^a flow rate (kg/s)	276.9	279.3	281.4	283.5	285.4	287.1
OFA ^a flow rate (kg/s)	90.7	91.5	92.2	92.9	93.5	94.0
Temperature of PA (°C)			58.5			
Temperature of SA (°C)			303.5			
Temperature of OFA (°C)			303.5			
Burner zone stoichiometry ratio			0.91			

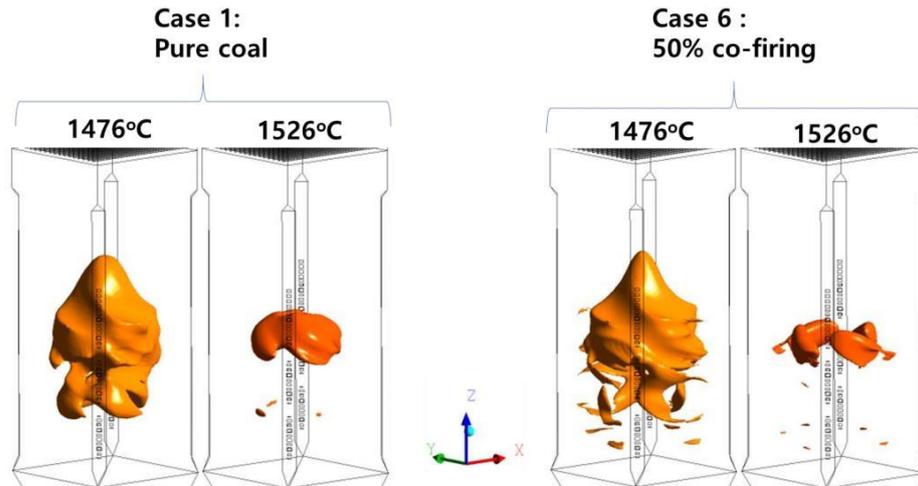
^a primary air (PA), secondary air (SA) and overfire air (OFA) were composed of 79 wt% N₂ and 21% O₂ for all cases.

Berdasarkan pengamatan distribusi temperatur pada *furnace* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.1**. Dapat diketahui bahwa distribusi temperatur untuk masing-masing *Case* terlihat hampir sama, namun terdapat penurunan distribusi temperatur seiring bertambahnya persentase *co-firing* T-EFB dengan batubara. Penurunan temperatur ini terlihat jelas mulai dari OFA *burnout zone* dimana terjadi *gap* sekitar 25°C antara 100% batubara dan 50% *co-firing* T-EFB.



Gambar 2.1 Distribusi Temperatur pada *Furnace* untuk Masing-Masing Variasi (Jiang, Park, and Jeon 2020)

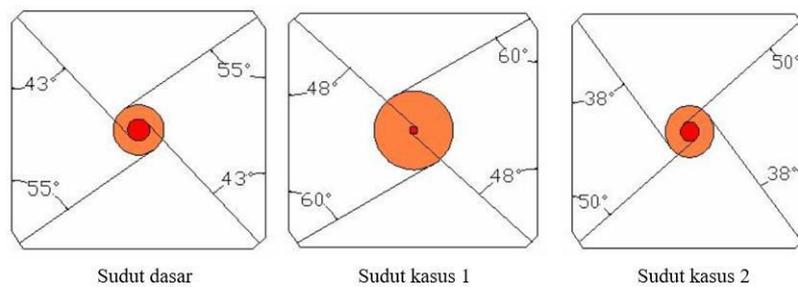
Pengamatan juga dilakukan pada *iso-surface furnace*, dimana dilakukan pengamatan untuk *Case 1* dan *Case 6*. Pengamatan ini dilakukan pada temperatur 1476°C dan 1526°C. Berdasarkan **Gambar 2.2** dapat diketahui bahwa pada zona temperatur 1476°C, *Case 6* (50% *co-firing*) menghasilkan distribusi yang lebih merata pada *furnace*, hal ini ditandai dengan *volume* atau luasan yang lebih melebar pada *Case 6*. Fenomena ini disebabkan karena T-EFB mempunyai *volatile matter* yang lebih tinggi dibandingkan dengan batubara sehingga menyebabkan pembakaran akan berlangsung cepat atau berada di dekat dengan daerah *burner*. Pada zona temperatur 1526°C dapat diketahui bahwa *Case 1* (100% batubara) mempunyai distribusi yang lebih merata dan meluas dibandingkan dengan *Case 6*. Fenomena ini disebabkan oleh semakin rendahnya campuran *co-firing* maka kandungan HCV akan naik dan *volatile* akan turun, hal ini akan berdampak pada waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur tinggi lebih lama yang mengakibatkan distribusi temperatur 1526°C akan berpusat pada bagian tengah *furnace* atau pada daerah terbentuknya *fire ball* akibat *swirl* yang dihasilkan dari pembakaran secara tangensial



Gambar 2.2 Temperatur *Iso-Surface* dari *Case 1* dan *Case 6* (Jiang, Park, and Jeon, 2020)

2.1.2 Pengaruh Sudut *Burner* terhadap Karakteristik Pembakaran Boiler

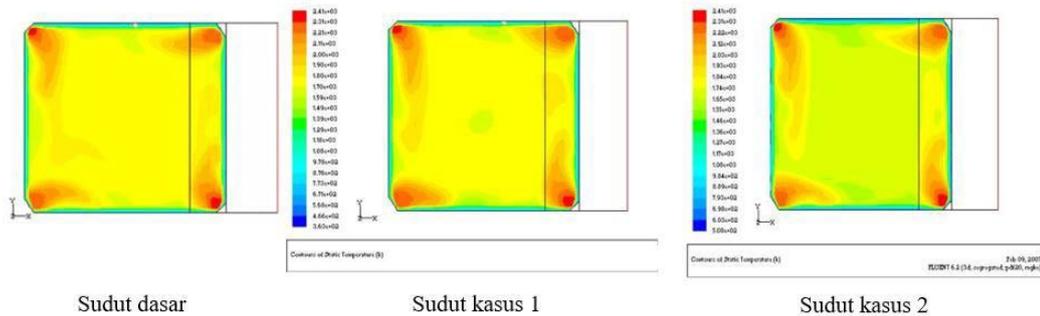
(N.M. Razali 2009) Melakukan analisis numerik mengenai pengaruh sudut pengapian burner terhadap karakteristik pembakaran pada boiler yang menggunakan metode tangensial dengan kapasitas 700 MW. Model pembakaran yang digunakan adalah *non-premixed*, dengan model turbulensi RNG k-epsilon, serta *char burnout* yang diterapkan adalah *kinetic/diffusion-limited*. Sudut pengapian *burner* yang menjadi fokus pengamatan awal adalah 43° dan 55° . Selanjutnya, dilakukan studi kasus dengan membandingkan distribusi suhu dan pola pengapian yang dihasilkan ketika sudut awal diubah, yaitu dengan menambah 5° pada kasus 1 dan mengurangi 5° pada kasus 2.



Gambar 2.3 Tampilan sudut pengapian burner berdasarkan kasus (N.M. Razali 2009)

Kasus 1 menunjukkan ukuran *fire ball* yang lebih besar sehingga bentuk profil temperatur tidak terdistorsi karena proses pencampuran pada pusaran aliran *flue gas*. Dari hasil simulasi tersebut, kasus 1 menunjukkan bahwa penambahan 5° pada sudut pengapian menghasilkan *fire ball* yang lebih besar dan profil pembakaran yang stabil. Sedangkan kasus 2 tidak mengalami perubahan profil

distribusi temperatur. Profil distribusi temperatur dapat dilihat pada **Gambar 2.3**

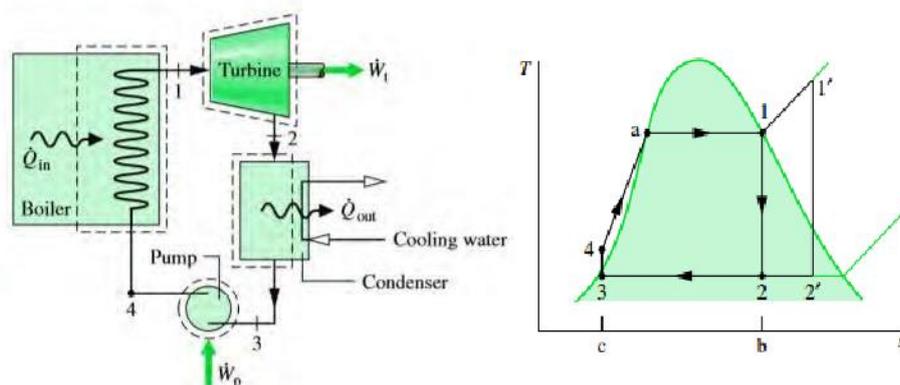


Gambar 2.4 Kontur Temperatur pada masing-masing kasus (N.M. Razali 2009)

Dalam dunia industri, *boiler* menjadi komponen yang sangat penting dalam memproduksi energi dengan jumlah yang sangat besar. Umumnya, *boiler* memiliki desain awal yang dirancang untuk mengikuti jenis dan nilai kalor bahan bakar yang dipakai beserta komposisi bahan bakar tersebut.

2.2 Siklus Rankine

Siklus *rankine* merupakan siklus pembangkit listrik yang paling sederhana. Siklus ini terdiri dari empat komponen utama, yaitu *boiler*, *steam turbin*, *kondensor*, dan pompa. *Boiler* berfungsi sebagai penghasil uap bertekanan yang nantinya uap ini akan diekspansikan ke *steam turbin*. *Steam turbin* akan memutar poros yang dihubungkan ke generator listrik. Uap yang telah diekspansikan oleh *steam turbin* akan dikondensasikan di *kondensor*. Dari *kondensor*, uap yang sudah berubah wujud menjadi air akan dipompa kembali ke dalam *boiler*. Begitulah siklus ini terus berulang.



Gambar 2.5 Siklus Rankine Ideal (Moran and Shapiro, 2003)

Namun, pada realitanya jumlah komponen dari siklus rankine aktual lebih kompleks daripada yang ideal. Seperti **Gambar 2.3** diketahui bahwa dari blok diagram tersebut terdapat beberapa tambahan komponen untuk menaikkan efisiensi siklus.

Masing-masing komponen mempunyai peran sendiri-sendiri dalam menaikkan efisiensi siklus. Komponen yang digunakan antara lain

a. *Superheater*

Sesuai dengan namanya, *superheater* mempunyai fungsi untuk menaikkan temperatur uap yang telah terbentuk di dalam *water wall boiler*. Sehingga didapatkan uap yang mempunyai temperature tinggi agar didapatkan kerja turbin yang besar ketika diekspansikan.

b. *Reheater*

Panas dari pembakaran bahan bakar di dalam bahan bakar sangat besar dan bisa dimanfaatkan untuk berbagai keperluan. Salah satunya dengan *reheater* yang bertujuan untuk menaikkan kembali temperature uap yang tekanannya telah turun setelah diekspansika di turbin pertama.

c. *Closed feedwater system*

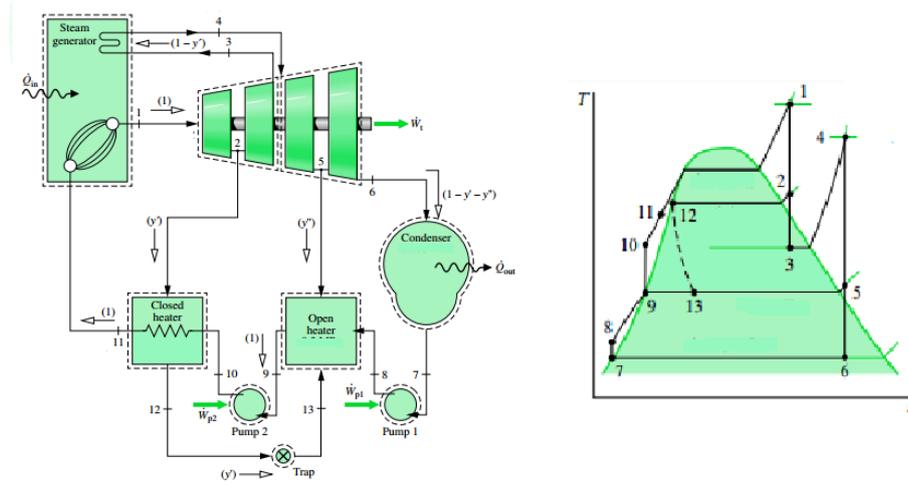
Semakin tinggi temperature fluida kerja yang masuk *boiler* untuk menerima panas maka semakin sedikit panas yang harus diberikan *boiler* kepada fluida kerja untuk merubah fase. Sehingga tugas *Closed feedwater sytem* adalah memindahkan panas dari *steam* yang diambil dari turbin untuk dipindahkan ke fluida kerja melalui kontak tidak langsung. Dengan adanya perpindahan panas ke *feedwater*, maka akan terjadi penurunan temperature uap dan kenaikan temperature *feedwater* yang masuk dan keluar dari *feedwater heater*

d. *Open feedwater system*

Berfungsi sama dengan *closed feedwater system*, tapi *open feedwater system* melakukan dengan kontak langsung / mixing.

e. *Trap*

Berguna untuk menurunkan tekanan dari fluida kerja tapi tidak merubah nilai *enthalpinya*. Sehingga $h_i = h_e$, hal ini terjadi karena kenaikan kecepatan akibat penyempitan dapat diabaikan akibat kembalinya luasan aliran seperti pada saat keadaan masuk. Siklus rankine aktual merupakan siklus rankine yang ada perusahaan. Skema pada gambar 2.4 dapat digambarkan garis kerjanya pada diagram T-S seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 2.6 Siklus Rankine Aktual (Moran and Shapiro, 2003)

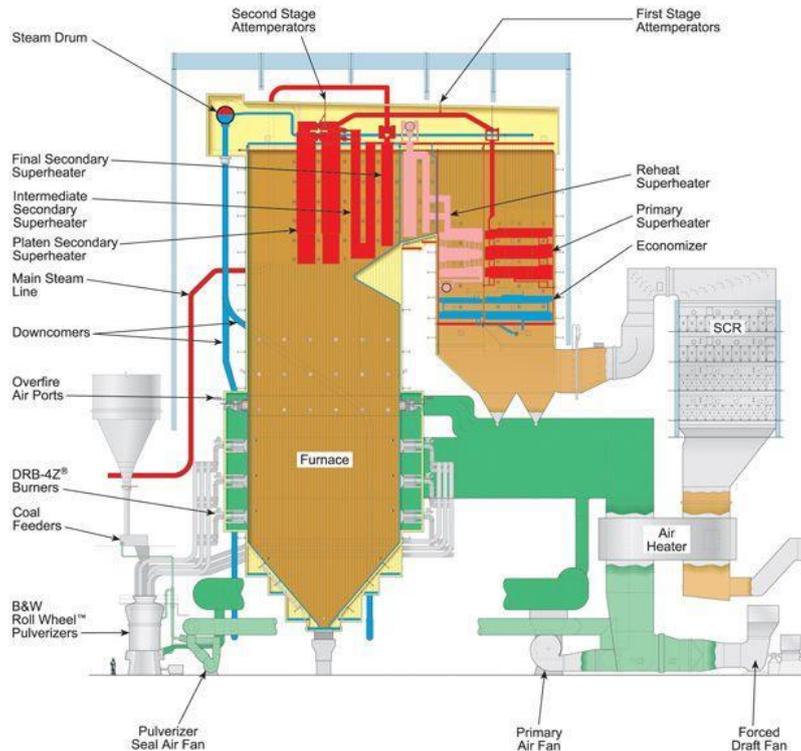
2.3 Tangentially Fired Pulverized Boiler

Boiler atau ketel *steam* adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan *steam*. *Steam* diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar (Eflita Yohana and Askhabulyamin 2017). *Boiler* mengubah energi-energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja. *Boiler* dirancang untuk melakukan atau memindahkan kalor dari suatu sumber pembakaran, yang biasanya berupa pembakaran bahan bakar. Jenis *boiler* pada PLTU beragam tergantung penggunaan dan kapasitas yang diperlukan. *Boiler* dapat dibedakan menjadi 3 yaitu *Pulverizer Coal Boiler (PC)*, *Circulating Fluidized Bed Boiler (CFB)*, dan *Stoker Boiler*

Pulverizer Coal Boiler atau *PC Boiler* merupakan *boiler* dengan metode batubara ditepungkan terlebih dahulu menggunakan *mill pulverizer* sebelum dimasukkan ruang bakar. Prinsip kerja *boiler* ini ialah batubara yang sudah dihaluskan dengan ukuran yang sudah ditentukan yaitu *200 mesh* atau $50-70 \mu\text{m}$ kemudian disemprotkan ke ruang bakar dengan bantuan *primary air fan* sehingga batubara yang halus tadi melayang dan terbakar ditengah-tengah ruang bakar. Pembakaran di dalam ruang bakar tadi akan disuplai *Secondary Air* yang berasal dari *force draft fan* dan diedarkan disetiap sudut *furnance* dengan elevansi tertentu. Tujuan elevansi ini adalah untuk menghasilkan campuran yang homogen yang akan memaksimalkan pembakaran yang sempurna dan membentuk bola api (Ariningtyas 2014).

Di samping itu, untuk prinsip kerja aliran air dan uap pada boiler ialah *feedwater* keluaran *water heater* dialirkan menuju *economizer* Kemudian *feedwater* mengalir menuju *steam drum* untuk dipisahkan kandungan air pada uap jenuh (*saturated steam*). *feedwater* tersebut kemudian mengalir menuju *wall tube boiler* untuk dipanaskan hingga mencapai titik didih air dalam tekanan tertentu yang selanjutnya dialirkan kembali menuju *steam drum*. Uap jenuh (*saturated steam*) tersebut dialirkan menuju

primary superheater dan *secondary superheater* untuk dipanaskan dan mengubah fase uap jenuh (*saturated steam*) menjadi uap kering (*superheated steam*). Uap kering tersebut dialirkan menuju *high pressure turbine* untuk menggerakkan sudu-sudu yang memutar poros (*shaft*).



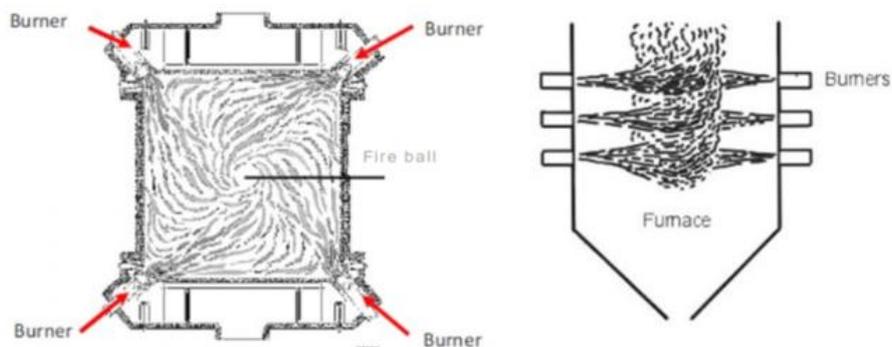
Gambar 2.7 Boiler dan Alat Bantunya(GUSTI AGUNG ALDI BRAHMANTYA HIMAWAN, 2021)

Bagian boiler antara lain :

- a. *Coal Silo*, tempat penyimpanan batubara sebelum masuk ke *pulverizer*
- b. *Pulverizer*, tempat memnghaluskan batubara
- c. *Primary Air Fan*, tempat suplay udara transportasi batubara dari *pulverizer* untuk masuk kedalam *boiler*
- d. *Force Draft Fan*, tempat suplay udara pembakaran di *boiler*
- e. *Air Heater*, tempat pemanas awal udara sebelum masuk ke ruang pembakaran dengan memanfaatkan gas buang hasil pembakaran sebagai pemanas awalnya.
- f. *Steam Drum*, tempat memisahkan *steam* dan air pada uap basah.
- g. *Economizer, tube* yang fungsinya untuk memanaskan air setelah *daerator* menuju *steam drum* melewati *boiler* dengan tujuan memanaskan air untuk menjaga effisiensi pembakaran.
- h. *Furnance*, tempat tungku pembakaran batubara.
- i. *Wall tube, tube* tempat pemanas air dari steam drum yang masih memiliki fasa cair menuju kembali ke *steam drum* dalam fase uap.

- j. *Superheater, tube* tempat pemanasan lanjut uap dari *steam drum* berupa fasa uap jenuh untuk dipanaskan menjadi uap kering sebelum memutar turbin.
- k. *Reheater, tube* tempat pemanasan ulang uap dari HP Turbin yang telah terkena ekspansi untuk dinaikan lagi *temperature* nya.

Penelitian ini berfokus pada studi kasus PT X yang menggunakan *boiler* jenis *tangentially - fired pulverized coal (PC) boiler* dimana jenis *boiler* ini menggunakan empat corner yang dipasangkan dengan lima (5) elevasi *burner*. Setiap *Burner* berada pada sudut tertentu dengan dinding *boiler* dan tiap *Burner* memiliki tingkat elevansi yang berbeda. Hasil pembakaran bahan bakar dan udara pembakaran yang dialirkan menuju *furnace* akan membentuk suatu lingkaran imajiner pada pusat *boiler* yang disebut *fire ball*. Ilustrasi berbagai tipe *boiler* dapat dilihat pada Gambar 2.

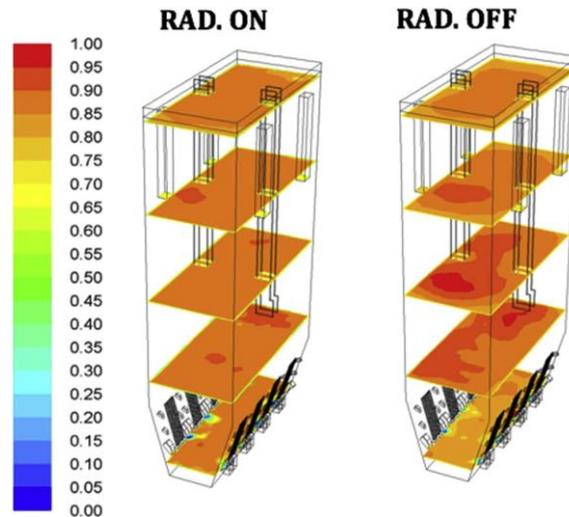


Gambar 2.8 Ilustrasi Pembakaran dengan *Tangentially Fire* (GUSTI AGUNG ALDI BRAHMANTYA HIMAWAN, 2021)

Lingkaran *fire ball* akan membentuk aliran *vortex* yang bergerak ke atas akibat terjadi turbulensi pada *fireball*. Kehadiran *fire ball* dapat meningkatkan waktu pembakaran, sehingga batubara yang cenderung lama terbakar akan mencapai proses pembakaran yang sempurna.

2.4 Perpindahan Panas pada Boiler

Proses perpindahan panas pada boiler terjadi melalui radiasi, konduksi dan konveksi. Dalam pemodelannya digunakan asumsi bahwa proses perpindahan panas hanya terjadi secara konveksi. Menurut Adamczyk et al., (2015), model radiasi pada *boiler* dapat diabaikan berdasarkan penelitiannya dikarenakan tidak terjadi perbedaan yang signifikan antara mengaktifkan dan menonaktifkan model radiasi. Perpindahan panas secara konveksi merupakan proses perpindahan panas yang terjadi pada suatu zat dengan disertai perpindahan partikel-partikel dari zat tersebut. Konveksi umumnya terjadi pada fluida (zat cair dan gas).



Gambar 2.9 Hasil Simulasi Adamczyk(Adamczyk et al., 2015)

$$q = h \cdot A(T_s - T_\infty) \quad (2.1)$$

Nilai koefisien perpindahan panas (h) pada persamaan tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain:

- Kecepatan fluida
- Viskositas fluida
- *Density* fluida
- Kapasitas panas fluida
- Luas permukaan benda

Konveksi yang terjadi pada kompartemen *boiler* berlangsung pada kondisi *steady-state forced turbulent flow*. Kondisi ini dipengaruhi oleh dua bilangan tak berdimensi yaitu bilangan Prandtl dan bilangan Reynolds.

1. Bilangan Prandtl

Bilangan Prandtl adalah sebuah bilangan tak berdimensi yang menyatakan perbandingan antara difusivitas momentum dengan difusivitas termal dari sebuah aliran fluida(Moran and Shapiro, 2003). Berikut persamaanya

$$Pr = \frac{\text{momentum diffusivity}}{\text{thermal diffusivity}} = \frac{\mu/\rho}{k/(c_p\rho)} = \frac{c_p\mu}{k} \quad (2.2)$$

2. Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan sebuah bilangan tak berdimensi yang menyatakan perbandingan antara gaya inersia dengan gaya geser antar partikel yang disebabkan oleh viskositasnya. Bilangan Reynolds dapat digunakan untuk mengetahui rezim aliran dari sebuah fluida yaitu laminar ($Re < 2300$), turbulen ($Re > 2900$), atau transisi ($2300 \leq Re \leq 2900$)(Moran and Shapiro, 2003).

$$Re = \frac{\text{inertial force}}{\text{viscous force}} = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (2.3)$$

Tujuan utama *boiler* adalah untuk menguapkan *feed water* menjadi *main steam*. Hal ini berlangsung pada *heat exchanger* yang terdapat dalam *boiler*. Proses penyerapan panas oleh *heat exchanger* dapat dihitung dengan persamaan:

$$q = \dot{m}_{steam} \cdot C_{p_{steam}} \cdot \Delta T = \dot{m}_{fg} \cdot C_{p_{fg}} \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

$$q'' = \frac{q}{A} \quad (2.5)$$

$$q''' = \frac{q}{Vol} \quad (2.6)$$

Persamaan (2.5) merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung *heat flux*, sedangkan Persamaan (2.6) digunakan untuk menghitung *heat generation* dari susunan *heat exchanger*.

2.5 Co-Firing Biomassa pada PLTU di Indonesia

Co-firing adalah proses pembakaran dua bahan bakar berbeda secara bersamaan. Dengan menggunakan *co-firing*, emisi dari pembakaran bahan bakar fosil dapat dikurangi. *Co-firing* adalah metode lain untuk mengubah biomassa menjadi listrik, yang melibatkan penggantian sebagian batubara dengan biomassa di unit pembangkit listrik tenaga uap. Konsep *co-firing* tersebut dapat mengurangi emisi hasil pembakaran yang terbawa oleh *flue gas*. Biomassa dikatakan netral terhadap CO₂, dengan kata lain tidak menyebabkan penumpukan karbon dioksida di atmosfer dan biomassa sulfur juga lebih sedikit dibandingkan batu bara.

Oleh karena itu, pembakaran batu bara dan biomassa secara bersamaan dapat mengurangi emisi CO₂ dan jumlah polutan nitrogen oksida dan sulfur oksida hasil dari bahan bakar fosil. Selain itu, dalam aspek ekonomi *co-firing* relatif lebih murah dibandingkan dengan batubara sehingga dapat menurunkan biaya operasional bahan bakar pada pembangkit listrik tenaga uap. Dalam proses implementasinya, *co-firing* dapat dilakukan sampai dengan 30% tanpa melakukan modifikasi peralatan atau infrastruktur yang berarti.



Gambar 2.10 Peta Pesebaran PLTU yang Sudah Melakukan Metode *Co-firing* (Bawono, 2021)

Sebagai negara tropis, Indonesia memiliki cadangan sumber daya alam seperti batubara yang dapat digunakan sebagai bahan bakar utama pembangkit listrik tenaga uap. Sebagai perusahaan yang menyediakan dan mengelola tenaga listrik di Indonesia, PLN memegang peranan penting dalam penyelenggaraan sistem pembangkit listrik di Indonesia. Terdapat 52 PLTU batubara di wilayah PLN yang dikelola oleh PT Indonesia Power, PT PLN Nusantara Power dan PT PLN Pembangkitan akan melakukan uji coba *co-firing*. Keuntungan *co-firing* antara lain :

- Efektif dalam menurunkan efek gas rumah kaca dengan biaya yang relatif kecil.
- Biaya *generation unit* (\$/kWh) lebih murah dibandingkan dengan *single combustion* biomassa.
- Mempunyai resiko kecil
- Dapat digunakan pada *boiler* berskala besar.
- Dapat menurunkan emisi pembakaran

2.6 Metode Co-Firing Biomassa

Hingga saat ini, terdapat tiga jenis metode *co-firing* yang telah digunakan dalam *boiler*. Adapun metode pembakaran tersebut adalah sebagai berikut:

2.6.1 *Direct Co-Firing*

Dalam metode ini, biomassa (sebagai bahan bakar tambahan) dimasukkan ke dalam boiler yang sama bersama dengan batubara (sebagai bahan bakar utama). *Direct co-firing* lebih umum digunakan karena paling murah. Dalam *direct co-firing* sendiri, ada dua pendekatan yang bisa dilakukan. Pertama, pencampuran dan p biomassa dan batubara dilakukan secara bersamaan sebelum dimasukkan ke dalam burner. Yang kedua, perlakuan awal biomassa dan batubara dilakukan secara terpisah, kemudian baru diumpankan ke pembakar. Umumnya tidak ada

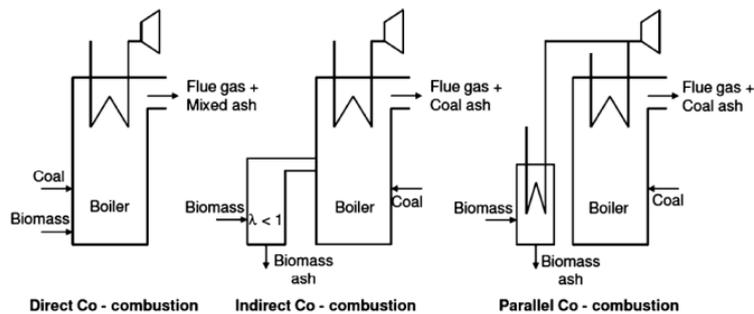
investasi biaya peralatan khusus dengan metode ini, dan merupakan cara pembakaran bersama secara langsung dan hemat biaya.

2.6.2 *Indirect Co-Firing*

Metode ini memerlukan peralatan tambahan seperti biomassa gasifier yang terlebih dahulu digasifikasi menjadi *syngas* di dalam gasifier sebelum akhirnya dimasukkan ke dalam boiler berbahan bakar batubara untuk dibakar. Keuntungan metode ini adalah proses pemurnian gas sintesis dengan gasifikasi meminimalkan dampak polusi akibat pembakaran langsung. Sedangkan, Kekurangan dari *indirect co-firing* adalah biaya investasinya yang tinggi.

2.6.3 *Paralel Co-Firing*

Co-firing paralel terdiri dari tungku dan boiler terpisah untuk biomassa, dimana hasil pembakaran biomassa akan menghasilkan uap yang selanjutnya akan digunakan pada sirkuit *power plant* pembakaran batubara. Pada metode ini memerlukan investasi pembangunan boiler berbahan bakar biomassa yang terpisah, kemudian uap yang dihasilkan dari boiler *bio-pellet* diumpungkan ke dalam sistem uap boiler berbahan bakar batubara eksisting menggunakan *integrated gasification combined cycle (IGCC) system*. Pendekatan ini menggunakan boiler biomassa yang terpisah dari boiler batubara yang memungkinkan pemanfaatan biomassa lebih maksimal, namun biasanya digunakan pada produk sampingan untuk pabrik kertas (kulit kayu, limbah kayu).



Gambar 2.11 Metode *Co-firing* pada PLTU (Bawono 2021)

2.7 Bahan Bakar

Fungsi bahan bakar pada PLTU adalah untuk memanaskan air dalam boiler hingga berubah menjadi uap. Pembangkit listrik tenaga batubara seringkali menggunakan 2 (dua) jenis bahan bakar yaitu batubara sebagai bahan bakar utama dan High Speed Diesel (HSD) sebagai bahan bakar pendukungnya, yang digunakan hanya sebagai pemantik (*ignitor*) pada penyalaan awal dengan bantuan udara panas bertekanan. Namun sekarang sudah dikembangkan metode *co-firing* yang dimana dua bahan bakar dicampur menjadi satu sebelum dibakar di dalam boiler. *Co-firing* memanfaatkan bahan bakar batubara dan biomassa sebagai sumber bahan bakar di boiler.

2.7.1 Batubara

Batubara merupakan bahan organik mudah terbakar yang dihasilkan dari sisa-sisa fosil tumbuhan yang telah diendapkan dan mengalami perubahan fisika dan kimia akibat pengaruh suhu, waktu dan tekanan. Batubara merupakan bahan bakar padat alami yang paling banyak digunakan karena dianggap lebih ekonomis. Perbedaan kondisi di mana batubara tersebut terbentuk akan menimbulkan perbedaan karakteristik pada batubara. Batubara dengan umur lebih tua dan dalam lingkungan bertekanan tinggi akan menghasilkan batubara dengan *fixed carbon* yang tinggi, sedangkan batubara yang berumur lebih muda dan berada di lingkungan yang bertekanan rendah cenderung mengandung lebih banyak *volatile matter* dibandingkan *fixed carbon*.

Perbedaan tipe batubara biasanya diklasifikasikan berdasarkan nilai kalor dan kadar presentase dari *fixed carbon* yang terkandung. Selain itu, faktor *volatile matter*, lama penyalaan dan suhu juga memegang peranan yang penting. *American Standard for Testing and Materials* (ASTM) membuat klasifikasi batubara yang umum digunakan dalam industri, seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut ini:

Tabel 2.2 ASTM Coal Ranking System (ASTM-D388-15 2017)

Kelas	Grup	Fixed Carbon	Volatile Matter	Heating Value	
		wt% dry mmf	wt% dry mmf	kJ/kg	Kcal/kg
Antracite	Meta-anthracite	>98	<2		
	Anthracite	92-98	2-8	32.600-34.000	7.750-8.100
	Semi-anthracite	86-92	8-14	26.700-32.600	6.350-7.750
Bituminous	Low volatile bituminous	78-86	14-22		
	Medium volatile bituminous	69-78	22-31		
	High volatile A bituminous	<69	>31	≥32.600	≥7.750
	High volatile B bituminous			30.200-32.600	7.200-7.750
	High volatile C bituminous			26.700-30.200	6.350-7.200
Sub-Bituminous	Sub-Bituminous A			24.400-26.700	5.800-6.350
	Sub-Bituminous B			22.100-24.400	5.250-5.800
	Sub-Bituminous C			19.300-22.100	4.600-5.250
Lignite	Lignite A			14.700-19.300	3.500-4.600
	Lignite B			≤14.700	≤3.500

*mmf: mineral matter free basis

2.7.2 Biomassa

Biomassa merupakan jenis material organik non-fosil yang dihasilkan dari proses fotosintesis dan dapat terurai oleh mikroorganisme. Biomassa berasal dari

beberapa jenis sumber tumbuhan. Setiap biomassa memiliki karakteristik dan komposisi bebeda-beda. Menurut *European Committee for Standardization*, terdapat dua standar untuk biomassa yaitu klasifikasi dan spesifikasi (EN 14961) dan kualitas (EN 15234). Berdasarkan standar tersebut, jenis biomassa dikelompokkan menjadi:

Tabel 2.3 Analisis Sampel Batubara dan Biomassa (Maskur et al. 2021)

Parameters	Unit	HV B Bituminous	HV C Bituminous	Wood chip	Sawdust	Wood pellet	Rice husk	PKS	EFB pellet
Ultimate									
Carbon	% wt Ar	48,61	43,82	33,49	28,06	47,78	28,06	47,62	41,9
Hydrogen	% wt Ar	3,75	3,37	3,55	3,17	6,07	3,17	5,14	4,6
Nitrogen	% wt Ar	0,63	0,68	0,26	0,15	0,15	0,15	0,26	0,16
Oxygen	% wt Ar	13,95	13,22	27,62	24,8	39,39	24,8	35,87	38,6
HHV (High heating Value)	kCal/kg	4897,00	4199	3093	2694,00	4487,00	2694	4563,00	4048
HGI (Hard. Grind. Index)	Indeks	47	55	26	< 32	< 32	< 32	<32	<32
Bulk Density	kg/m ³	928,4	926,4	-	140,95	643	140,95	632	-
Ash Fusion T. Reduction									
Initial Deformation	°C	1180	1200	1240	1210	>1500	1210	1180	1280
Softening	°C	1190	1220	1260	1250	>1500	1250	1250	1300
Hemispherical	°C	1210	1240	1270	1270	>1500	1270	1290	1310
Fluid	°C	1230	1250	1290	1290	>1500	1290	1310	1320
Ash Fusion T. Oxidation									
Initial Deformation	°C	1190	1210	-	-	-	-	1240	-
Softening	°C	1210	1240	-	-	-	-	1310	-
Hemispherical	°C	1230	1250	-	-	-	-	1340	-
Fluid	°C	1260	1260	-	-	-	-	1360	-
Ash Analysis									
Fe ₂ O ₃	% wt	22,94	12,05	5,11	35,24	5,31	35,24	5,67	3,45
SiO ₂	% wt	46,51	53,69	3,96	26	3,56	26	51,84	32,84
Al ₂ O ₃	% wt	11,24	18,42	0,4	12,12	0,92	12,12	4,21	0,67
CaO	% wt	9,58	4,24	55,73	7,25	61,15	7,25	13,88	35,26
MgO	% wt	4,22	4,25	1,63	6,83	2,11	6,83	7,5	11
MnO ₂	% wt	0,348	0,385	1,87	4,02	0,37	4,02	0,22	2,28
TiO ₂	% wt	0,55	0,81	0,37	2,51	0,34	2,51	0,37	0,11
K ₂ O	% wt	0,67	1,59	19,97	2,06	12,92	2,06	10,5	0,72
Na ₂ O	% wt	0,51	0,79	0,01	0,59	0,82	0,59	0,35	1,02
P ₂ O ₅	% wt	0,139	0,362	1,65	0,23	0,57	0,23	2,33	1,13
SO ₃	% wt	2,59	3,14	2,9	2,62	9,86	2,62	1,97	2,58
Cr ₂ O ₃	%wt	-	-	0,03	-	-	-	-	-
Cl ₂	%	0,02	0,02	0,0378	0,10	0,10	0,10	0,10	0,3

1. *Woody biomass* (tumbuhan/pohon, semak belukar, dll).
2. *Herbaceous biomass* (tumbuhan yang mati setelah habis masa pertumbuhannya. Seperti *grains* dan *cereals* yang menumpang tumbuh pada banyak tumbuhan).
3. *Fruit biomass* (bersumber dari buah-buahan, bagian dari *woody biomass*).
4. *Blend and mixtures* (*blend* adalah mencampurkan biomassa dengan sengaja, *mixture* adalah proses pencampuran biomassa dengan sendirinya)

2.8 Analisis Batubara

Analisa batubara merupakan proses yang sangat penting dalam sebuah industri pembangkitan listrik, dimana proses ini bertujuan untuk mencocokkan dokumen kontrak batu bara yang berasal dari mitra apakah telah sesuai atukah tidak, dan juga

sebagai input data untuk menghitung *heat rate* atau efisiensi dari sebuah pembangkitan listrik.

2.8.1 Proximate Analysis

Proximate analysis merupakan suatu analisis yang dilakukan terhadap sampel batubara. Setelah data ini diketahui, dilakukan analisis untuk mengevaluasi respon terhadap penyalaan dan pembakaran batubara, database perancangan boiler, dan klasifikasi batubara.

a) Volatile Matter

Volatile Matter atau zat terbang merupakan zat aktif yang terdapat pada batubara yang menghasilkan energi atau panas apabila batubara tersebut dibakar sehingga mempercepat proses pembakaran. *Volatile Matter* mengandung hidrokarbon, metana, hidrogen, karbon monoksida, karbon dioksida dan nitrogen. Semakin tinggi kandungan *Volatile Matter* \ batubara maka semakin pendek karakteristik penyalaan api karena batubara semakin mudah terbakar dan cepat terbakar habis.

Persamaan empiris yang dikembangkan oleh (Gungor 2008) adalah sebagai berikut:

$$CH_4 = 0,021 - 0,469V + 0,241VM^2 \quad (2.7)$$

$$H_2 = 0,157 - 0,868VM + 1,388VM^2 \quad (2.8)$$

$$CO_2 = 0,135 - 0,9VM + 1,906VM^2 \quad (2.9)$$

$$CO = 0,428 - 2,653VM + 4,845VM^2 \quad (2.10)$$

$$H_2O = 0,409 - 2,389VM + 4,554VM^2 \quad (2.11)$$

$$Tar = -0,325 + 7,279VM + 12,88VM^2 \quad (2.12)$$

Dengan VM adalah fraksi *volatile matter* dari bahan bakar kering. Dan banyaknya *volatile* nitrogen dan sulfur akan bertambah setiap pertambahan temperatur dalam reaktor.

$$N = 0,001T - 0,6 \left(\frac{kg}{kg \text{ coal}} \right) \quad (2.13)$$

$$S = 0,001T - 0,6 \left(\frac{kg}{kg \text{ coal}} \right) \quad (2.14)$$

b) Fixed Carbon

Fixed Carbon atau karbon tetap adalah zat yang tidak menguap dan tersisa setelah kandungan *moisture*, *volatile matter* (zat terbang) dan kadar abu dihilangkan. Kandungan *fixed carbon* pada batubara berupa karbon yang akan tertinggal di dalam *furnace* setelah proses pembakaran batubara berakhir

c) *Ash Content*

Ash Content atau kadar abu merupakan sisa zat anorganik yang terdapat dalam batubara. Kandungan abu tersebut dihasilkan dari pengotor bawaan dalam proses pembentukan batubara maupun pengotor yang berasal dari proses penambangan. Kandungan abu dapat dikurangi melalui proses pencucian. *Ash Content* dalam batubara yang mayoritas mengandung oksida dan sulfat. Hasil perubahan kimia pada kandungan mineral selama proses *ashing* akan membentuk *ash*.

d) *Moisture Content*

Moisture content atau kandungan air yang terdapat di dalam batubara berpengaruh terhadap kandungan panas per kg batubara. Semua batubara mengandung *Moisture content* dalam jumlah tertentu, yang pada umumnya disebabkan oleh air bawah tanah yang bergabung dalam proses pembentukan batubara serta semprotan-semprotan air pada proses-proses pencucian maupun berasal dari hujan dan salju. Proses menentukan kandungan air terdiri dari beberapa metode, seperti ASTM D-1412, ASTM D-2961, dan ASTM D-3173

2.8.2 *Ultimate Analysis*

Pada analisis ultimat, sifat kimia yang dapat diketahui diantaranya adalah kadar dari unsur-unsur karbon (C), oksigen (O), hidrogen (H), nitrogen (N), dan sulfur (S) yang terkandung dalam batubara yang digunakan sebagai dasar perhitungan kebutuhan udara minimum untuk dapat terbakar secara sempurna, perhitungan *excess air*, perhitungan konsentrasi gas buang seperti NO_x dan SO_x, serta rasio atom hidrogen dan oksigen.

$$C + H + O + N + S + ASH + M = 100\% \quad (2.15)$$

Pengukuran *proximate* dan *ultimate analysis* didasarkan pada beberapa parameter berikut:

- a) *As-received* (apa adanya).
- b) *Air-dry* (kondisi tanpa *moisture*).
- c) *Total dry* (tanpa *moisture* dan *inherent moisture*).
- d) *Dry and ash-free* (tanpa *moisture* dan *ash*).

2.9 Efisiensi boiler

Secara umum, efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara output terhadap input dalam suatu proses. Efisiensi merupakan salah satu persamaan penting dalam termodinamika yang menentukan seberapa baik konversi atau transfer energi berlangsung. PLTU dirancang untuk menghasilkan keluaran berupa energi listrik dalam jumlah tertentu dengan input berupa sejumlah bahan bakar. Jika seluruh komponen

PLTU mempunyai efisiensi yang tinggi maka efisiensi PLTU dikatakan tinggi sehingga biaya operasional PLTU juga akan rendah.

Idealnya energi kimia (input) dapat diubah seluruhnya menjadi energi listrik (output). Namun, pada kenyataannya hal tersebut tidak mungkin terjadi karena berbagai kerugian terjadi hampir di seluruh bagian komponen alat PLTU. Akibat kerugian tersebut, energi listrik yang dihasilkan PLTU selalu lebih kecil dibandingkan energi kimia yang masuk ke sistem PLTU. Untuk perhitungan efisiensi boiler pembangkit listrik berdasarkan pada *American Society of Mechanical Engineers (ASME) PTC 4.1*. Ada 2 (dua) metode yang digunakan, yaitu metode langsung (*direct method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*).

4.3.1 Metode Langsung (*Direct Method*)

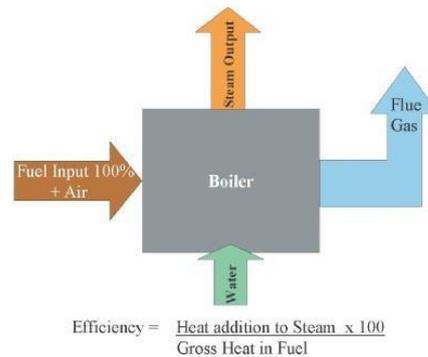
Metode penghitungan efisiensi boiler secara langsung disebut juga dengan “metode input-output”, yaitu metode penghitungan efisiensi secara cepat dengan membandingkan fluida kerja (*water and steam*) dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar. Hanya saja metode langsung ini tidak memberikan penjelasan langsung terhadap rendahnya output tersebut karena kerugian yang mempengaruhi output tersebut tidak dapat dihitung. Nilai efisiensi boiler dapat dievaluasi dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Boiler Efisiensi, } \eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (2.16)$$

Data yang diperlukan untuk pengujian metode langsung ini adalah sebagai berikut:

- a. *Heat Input*
 - Jenis bahan bakar
 - Jumlah bahan bakar
 - Nilai kalor bahan bakar
- b. *Heat Output*
 - Jumlah *steam* yang dihasilkan
 - Tekanan/temperatur *steam*
 - Entalpi *steam*
 - Tekanan/temperatur *feed water*
 - Entalpi *feed water*

$$\text{Boiler Efficiency} = \frac{\text{Heat Output}}{\text{Heat Input}}$$



$$\text{Boiler Efficiency} = \frac{\text{Steam flow rate} \times (\text{steam enthalpy} - \text{feed water enthalpy})}{\text{Fuel firing rate} \times \text{Gross calorific value}} \times 100$$

Gambar 2.12 Diagram Metode Langsung (Ariningtyas n.d., 2014)

$$\text{Boiler efficiency} = \frac{Q \times (H - h)}{q \times GCV} \quad (2.17)$$

Dengan,

q : Jumlah bahan bakar yang digunakan per jam (Kg/Jam)

Q : Jumlah steam yang dihasilkan (Kg/Jam)

GCV : Nilai kalori bahan bakar (Kcal/Kg)

H : Entalpi steam (Kcal/Kg)

h : Entalpi feed water (Kcal/Kg)

4.3.2 Metode Tak Langsung (*Indirect Method*)

Untuk menentukan efisiensi boiler dengan metode tidak langsung (*Indirect Method*), harus dihitung segala bentuk kehilangan (*losses*) energi yang terjadi pada boiler. Kerugian ini berhubungan dengan jumlah bahan bakar yang terbakar. Dengan metode ini akan sangat mudah untuk membandingkan hasil perhitungan boiler pada tingkat beban yang berbeda.

$$\text{Boiler efficiency} = 100 - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \quad (2.18)$$

Dengan,

L1 = *Heat loss* akibat *dry flue gas*

L2 = *Heat loss* akibat evaporasi dari air yang terbentuk karena keberadaan H₂ di dalam bahan bakar (%)

L3 = *Heat loss* akibat keberadaan air dalam bahan bakar

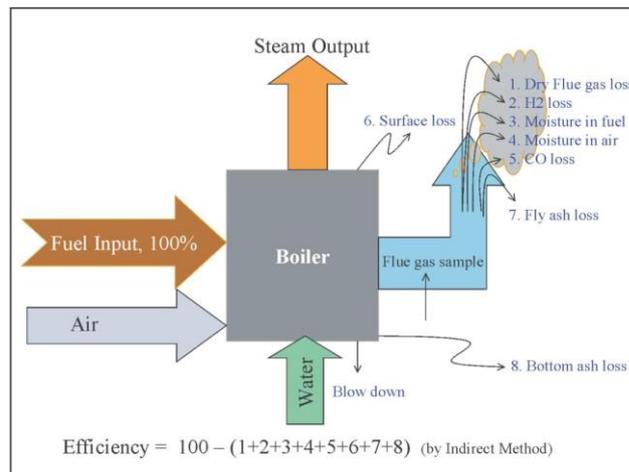
L4 = *Heat loss* akibat keberadaan air dalam udara

L5 = *Heat loss* akibat pembakaran yang tidak sempurna

L6 = *Heat loss* akibat radiasi dan konveksi

L7 = *Heat loss* akibat senyawa tak terbakar di *fly ash* (%)

L8 = *Heat loss* akibat senyawa tak terbakar di *bottom ash* (%)



Gambar 2.13 Indirect Method(Ariningtyas n.d., 2014)

2.10 Proses Pembakaran

Proses pembakaran merupakan suatu proses oksidasi dari sebuah bahan bakar dengan *oxidizer*-nya yang mengubah ikatan kimia yang terikat dalam bahan bakar menjadi energi panas dalam jumlah besar (Yunus A. Cengel and Michael A. Boles 2017). Ketika batubara dibakar, produk yang dihasilkan dari sisa pembakaran itu adalah hidrokarbon, karbon dioksida, hidrogen, belerang, karbon, dan nitrogen. Ketika sistem pembakaran batubara dijalankan terdapat beberapa subsistem yaitu persiapan, *furnace*, sistem transportasi dan distribusi bahan bakar, udara pembakaran, gas buang, abu, maupun panas (Spliethoff 2010). Syarat terjadinya pembakaran diperlukan adanya tiga parameter utama yaitu:

- a) Adanya sumber api (pemicu atau pemantik), Hal ini untuk memicu dan menjaga kelangsungan proses pembakaran. Namun, pada beberapa kasus proses pembakaran tidak menggunakan alat penyala melainkan menggunakan tekanan dan temperatur tinggi yang melebihi temperatur pembakaran bahan bakar, sehingga ketika bahan bakar dan udara dimasukkan maka proses pembakaran akan berlangsung secara langsung dan terus menerus. Untuk mengaktifkan pembakaran pada *boiler* PC, injeksi HSD diperlukan hingga pembakaran melebihi 25% beban listrik yang dioperasikan. Pada saat itu, tekanan dan suhu *furnance* akan meningkat dan bahan bakar (batubara dan biomassa) akan terbakar di properti tersebut dan berlangsung terus kontinu.
- b) Adanya bahan bakar, Hal ini dikarenakan bahan bakar merupakan suatu material yang dikonsumsi ke dalam *furnance* untuk menghasilkan energi. Bahan bakar yang digunakan dalam pembakaran di *furnance* bersumber dari HSD untuk pemantikan pembakaran awal dan bahan bakar utama seperti batubara dan biomassa sebagai pembakaran kontinu.
- c) Adanya udara (oksigen), Udara (oksigen) yang dimanfaatkan bersumber dari *primary air* dan *Secondary Air*. Udara pembakaran merupakan udara kering yang memiliki fraksi massasekitar 23% oksigen (O₂) dan 77% nitrogen (N₂)

dengan sejumlah kecil pengotor seperti argon, helium, neon, dan hidrogen yang dapat diabaikan (Yunus A. Cengel and Michael A. Boles, 2017).

Maka dari itu dapat diasumsikan dalam 4,762 kmol udara terdapat 1 kmol O₂ dan 3,762 kmol N₂. Udara pembakaran merupakan udara kering yang memiliki fraksi massa sekitar 23% oksigen (O₂) dan 77% nitrogen (N₂) dengan sejumlah kecil pengotor seperti argon, helium, neon, dan hidrogen yang dapat diabaikan (Yunus A. Cengel and Michael A. Boles, 2017). Maka dari itu dapat diasumsikan dalam 4,762 kmol udara terdapat 1 kmol O₂ dan 3,762 kmol N₂. Proses pembakaran secara teoritis pada batubara (hidrokarbon) dan udara (O₂ dan N₂) terjadi berdasarkan persamaan berikut:



Di mana konstanta v, w, x, y, dan z secara berturut-turut merupakan nilai dari mol/mol karbon yang terkandung dalam batubara. Sedangkan A merupakan jumlah senyawa O₂ (udara), B merupakan jumlah unsur karbon monoksida (CO), C merupakan jumlah uap air (H₂O), D merupakan jumlah unsur sulfur dioksida (SO₂), dan E merupakan jumlah unsur nitrogen (N₂) untuk mencapai kesetimbangan stoikiometri.

Pembakaran dikatakan sempurna jika semua karbon habis terbakar menjadi karbon dioksida, semua hidrogen menjadi uap air

Apabila pembakaran terjadi secara tidak sempurna, bahan bakar yang tidak terbakar akan menghasilkan produk berupa karbon (C), hydrogen (H₂), karbon monoksida (CO), hidroksida (OH), atau tar.

2.11 *Computational Fluid Dynamic*

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan suatu disiplin ilmu yang mempelajari cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, perpindahan massa, reaksi kimia dan fenomena terkait dengan menyelesaikannya menggunakan persamaan atau model matematika.. Model matematika yang digunakan memuat persamaan diferensial parsial yang mewakili hukum konversi massa, kekekalan momentum, dan kekekalan energi. Persamaan dasar tersebut kemudian diubah menjadi persamaan aljabar dengan menggunakan software CFD yang kemudian disebut persamaan pengendali (*governing equation*), dan dalam dinamika fluida *newtonian* disebut persamaan Navier-Stokes. Untuk menyederhanakan dan mempersingkat waktu perhitungan, persamaan ini dapat dihitung secara numerik dengan menggunakan program komputer.

2.11.1 *Governing Equation*

Governing Equation atau persamaan atur adalah persamaan yang digunakan untuk menyelesaikan proses simulasi dan analisis numerik dalam CFD (Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2021, 2021). Persamaan atur terdiri dari persamaan dasar mekanika fluida, seperti persamaan kekekalan massa, persamaan kekekalan momentum, dan persamaan kekekalan energi. Untuk menggunakan persamaan ini sebagai persamaan governing equation,

software CFD mengubah persamaan dari persamaan diferensial parsial menjadi persamaan aljabar yang akhirnya dapat diselesaikan secara numerik.

2.11.2 Formulasi Solver

ANSYS Fluent 2022 R1 menawarkan tiga format solusi: *Segregated*, *Coupled Implicit*, dan *Coupled Explicit*. Formulasi *solver segregated* menyelesaikan persamaan massa jenis, momentum, dan energi langkah demi langkah. *solver coupled* memiliki perbedaan yaitu, menyelesaikan persamaan-persamaan secara bersamaan. *Solver segregated* umum digunakan untuk kasus-kasus dengan fluida *incompressible* dan *compressible* yang memiliki kecepatan rendah sampai kecepatan menengah ($M < 1$). Sedangkan untuk *solver coupled* dirancang untuk digunakan pada kasus-kasus dengan fluida *compressible* yang memiliki kecepatan tinggi ($M > 1$).

2.11.3 Model Turbulensi

Pengertian dari turbulensi adalah gerakan tiga dimensi secara acak dan tidak stabil pada aliran suatu fluida yang memiliki bilangan Reynolds menengah sampai tinggi (ANSYS 2017). Ada beberapa faktor yang mempengaruhi nilai bilangan Reynolds, seperti viskositas suatu fluida. Viskositas merupakan ukuran yang digunakan untuk menentukan seberapa besar gesekan internal yang ditimbulkan oleh ikatan molekul suatu fluida. Gesekan ini dapat menimbulkan hambatan pada saat fluida mengalir.

Model aliran yang digunakan pada penelitian ini adalah turbulen. Model turbulensi diperlukan karena ketiga persamaan yang disebutkan di atas tidak cukup untuk membuat model aliran yang sempurna. Secara umum ANSYS Fluent menawarkan tiga jenis model viskositas: model *Inviscid*, *Laminar*, dan *Turbulent*. *Inviscid* model merupakan model aliran yang mengabaikan pengaruh viskositas dan perpindahan panas yang terjadi pada aliran fluida. Model aliran laminar mengasumsikan bahwa fluida mengalir dalam kondisi laminar. Di sisi lain, model turbulensi mengasumsikan bahwa aliran fluida berada dalam keadaan turbulen.

Pada simulasi ini juga terdapat 2 jenis pendekatan terhadap model turbulensi, yaitu *Reynolds Averaged-Navier Stokes* (RANS) dan *Large Eddy Simulation* (LES). Pada penelitian kali ini penulis menggunakan pendekatan berdasarkan *Reynolds Averaged-Navier Stokes* (RANS). Berikut model turbulensi berdasarkan pendekatan RANS:

a) Model *Spalart-Allmaras*

Model *Spalart-Allmaras* merupakan model turbulensi dengan model persamaan yang menyelesaikan persamaan transpor viskositas turbulen. Model ini dirancang khusus untuk aplikasi luar angkasa (*aerospace*) yang menggunakan aliran dalam dinding. Model ini mempunyai kelemahan yaitu hanya berlaku untuk aliran dengan bilangan Reynolds yang kecil.

b) Model *k-epsilon*

Model *k-epsilon* merupakan Model ini merupakan model semi empiris yang dikembangkan oleh Launder dan Spalding. Model turbulensi ini cukup lengkap dengan dua persamaan yang memungkinkan penentuan kecepatan turbulen dan skala panjang secara independen. Alasan mengapa model ini banyak digunakan dalam simulasi aliran fluida dan perpindahan panas adalah stabilitas dan akurasi yang memadai. Berikut varian dari model *k-epsilon*:

1. *Standart k-epsilon*: Model ini hanya valid untuk pemodelan dengan *fully turbulent flow*, dimana nilai bilangan Reynolds yang tinggi dan bilangan Prandtl konstan. Pemodelan ini didasarkan pada persamaan *model transport* untuk *turbulence kinetic energy* (k) dan *dissipation rate* (ϵ).
2. *RNG k-epsilon*: Model ini sering disebut dengan *Renormalization Group k- ϵ* . Model ini hampir mirip dengan *Standart k-epsilon*, dengan penambahan beberapa penyempurnaan, yaitu memiliki akurasi untuk aliran yang terhalang secara tiba-tiba. Adanya efek *swirl* pada turbulen, sehingga aliran *swirling* lebih akurat.
3. *Realizable k-epsilon*: Pemodelan ini merupakan salah satu bentuk penyempurnaan model *standart k-epsilon*. Model ini memiliki kemampuan untuk memodelkan viskositas turbulen. Dimana akan menghasilkan pengamatan yang baik pada aliran yang melibatkan putaran, separasi, resirkulasi, dan lapis batas dengan gradien tekanan yang besar.

c) Model *k-omega*

Pemodelan *k-omega* ini menggunakan dua persamaan model transportasi untuk menyelesaikan $k - \omega$. Pemodelan tersebut didasarkan pada persamaan model *transport turbulence kinetic energy* (k) dan *specific dissipation rate* (ϵ). Pemodelan ini mempunyai keuntungan dalam merepresentasikan transisi aliran dari aliran laminar ke aliran turbulen. Model *k-omega* terbagi menjadi dua varian yaitu .

1. Model *k-omega standard*, untuk kasus dengan bilangan Reynolds yang bernilai rendah, dengan persebaran aliran geser (*shear flow*) dan kompresibilitas
2. Model *k-omega SST*, SST sendiri merupakan singkatan dari *Shear Stress Transport*. Model turbulen ini merupakan perpaduan antara *k-omega standard* dengan *k-epsilon* dengan keunggulan pada aliran *free stream*.

d) RSM (*Reynold Stress Model*)

Model turbulen ini merupakan pemodelan paling teliti pada ANSYS Fluent, model RSM mendekati persamaan pada RANS dengan

menyelesaikan persamaan *transport* untuk tegangan Reynolds bersamaan dengan persamaan laju disipasi. Model ini menggunakan 5 persamaan *transport*, lebih banyak dibandingkan dengan model turbulensi lainnya.

2.11.4 Model *Species*

Pengaturan Model *Species* yang ada dalam simulasi antara lain:

a) Model *Species Transport*

Untuk *Species transport*, hasil persamaan konservasi yang dapat menjelaskan konveksi dapat digunakan untuk memodelkan proses pencampuran dan *transport* spesies kimia. Reaksi kimia dengan menggunakan beberapa metode simultan dapat memodelkan reaksi kimia dalam bentuk reaksi *volumetric*, *wall surface*, ataupun *particle surface*. Penelitian ini menggunakan model kimia *volumetrik* sebagai bentuk reaksi kimia antara batubara dan biomassa terhadap udara pemanas.

b) Model *non-premixed combustion*

Model *non-premixed combustion* ini memiliki metode yaitu bahan bakar dan udara pengoksidasi memasuki zona reaksi dalam aliran yang berbeda.

c) Model *Premixed Combustion*

Model *Premixed Combustion* didasarkan pada bagaimana bahan bakar dan udara pengoksidasi mengalami proses pencampuran sebelum memasuki zona pembakaran. Reaksi berlangsung di zona pembakaran, tempat reaktan yang tidak terbakar dan produk pembakaran dipisahkan. Model ini menciptakan nyala api yang mengembang dan berubah bentuk akibat turbulensi.

d) Model *Partially Premixed Combustion*

Pada model ini, terdapat penggabungan antara model *non-premixed combustion* dengan *premixed combustion*. Sistem pembakaran model ini yaitu proses pencampuran api dengan pencampuran bahan bakar tak seragam.

e) Model *Combustion Probability Density Function (PDF)*

Model *Combustion Probability Density Function (PDF)* *Transport* digunakan untuk pemodelan dalam melihat efek kimia hingga tingkat dalam *turbulent flame*. Dengan mekanisme kimia yang tepat, model ini memiliki kelebihan yaitu spesies kinetik seperti CO dan NO_x dapat dikendalikan, kemudian habisnya nyala api dan pengapian dapat diprediksi.

2.11.5 Interaksi *Turbulence-Chemistry*

Pengaturan *Turbulence-Chemistry* merupakan bagian dari model spesies yang mendefinisikan proses interaksi antara unsur kimia bahan bakar yang disimulasikan dan proses turbulensi. Interaksi yang digunakan dalam simulasi adalah:

a) *Laminar Finite-Rate*

Model Laminar Finite-Rate menggunakan persamaan Arrhenius untuk memperhitungkan reaksi kimia dan mengabaikan efek fluktuasi turbulen. Model ini akurat untuk nyala api laminar tetapi umumnya tidak akurat untuk nyala api turbulen. Model aliran laminar ini cocok untuk pembakaran dengan interaksi turbulensi kimia yang kecil dan lambat, seperti api supersonik.

b) *Finite-Rate/Eddy-Dissipation*

Model Finite-Rate/Eddy-Dissipation merupakan tingkatan lanjutan dari model sebelumnya dimana model ini menghitung kedua persamaan yaitu Persamaan Arrhenius dan persamaan campuran kimia, dan mengambil nilai yang lebih kecil dari kedua persamaan itu sebagai variabel yang dipilih.

c) *Eddy-Dissipation*

Model Eddy-Dissipation menggunakan persamaan reaksi kimia sebagai dasar perhitungan yang digunakan. Model ini memerlukan suatu produk untuk menimbulkan reaksi. Dalam penelitian ini menggunakan batubara dan biomassa sebagai bahan baku, dengan menetapkan Proximate Analysis, Ultimate Analysis, serta High Calorific Value menggunakan sistem manajemen direktori “DCS”, dan melakukan penelitian dengan metode eddy dissipation pada PLTU PT X.

d) *Eddy-Dissipation Concept*

Model *eddy-dissipation concept* menggunakan persamaan interaksi turbulensi-kimia yang lebih kompleks serta mekanisme yang lebih detail, sehingga dibutuhkan proses komputasi yang lebih rumit.

2.11.6 *Solution Control*

Terdapat beberapa metode *solution control* yang digunakan pada simulasi, yaitu:

a) *Faktor under relaxation*

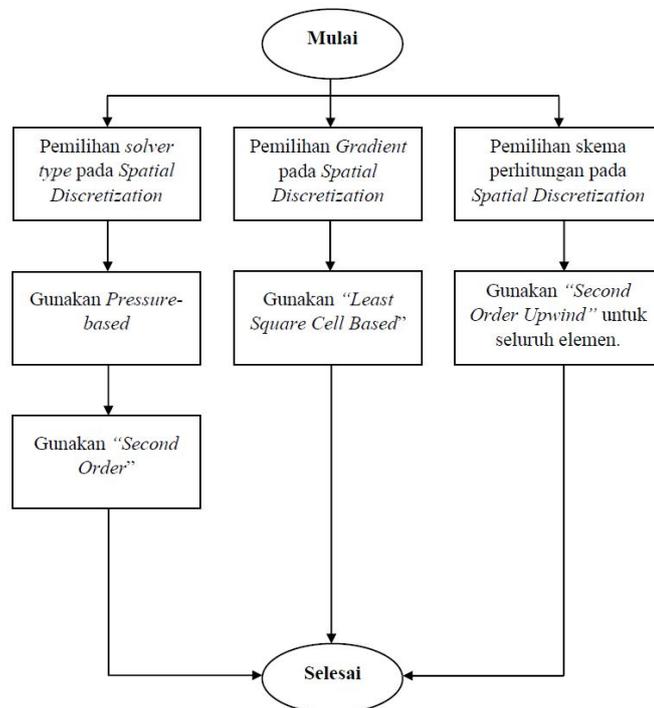
Faktor *under relaxation* merupakan faktor yang berperan dalam menstabilkan proses literasi pada *solver* lain. Namun, berbeda dengan faktor *solver coupled*, faktor *under relaxation* hanya digunakan pada persamaan di luar persamaan *di-coupled*. Karena persamaan *non-linier* yang dikelola ANSYS Fluent 2022 R1, diperlukan faktor *under relaxation* sebagai pengaturnya. Hal ini dapat dicapai dengan mengubah faktor *under relaxation*, yang mengubah \emptyset selama literasi. Secara umum, mengurangi faktor *under relaxation* membantu mempermudah terjadinya konvergensi. Tidak ada persamaan khusus untuk mengurangi faktor *under relaxation*, dan nilai terbaik hanya dapat dicapai melalui pengalaman dan jam terbang yang tinggi.

b) Diskritisasi (Metode Interpolasi)

Software ANSYS Fluent hanya melakukan penghitungan pada titik-titik simpul *mesh* dari geometri, sehingga dalam mendapatkan nilai

yang kontinu pada seluruh domain dilakukanlah interpolasi pada setiap bagian di antara titik simpul *mesh*. Teknik dasar *control volume* digunakan ANSYS Fluent dalam proses konversi dari persamaan atur (*governing equation*) menjadi persamaan matematis yang dapat diselesaikan secara numeris. Persamaan-persamaan atur akan diintegrasikan dari setiap *control volume* untuk menghasilkan persamaan diskret yang akan mewakili setiap jumlah dari basis *control volume*. Suatu *governing equation* yang dilakukan proses diskritisasi dapat ditulis secara sederhana dengan mengasumsikannya ke dalam suatu persamaan *steady state* untuk satuan skalar ϕ .

Tahapan penentuan spasial diskritisasi pada ANSYS Fluent terbagi menjadi tiga (3) jenis sesuai dengan diagram alir yang ditunjukkan pada **Gambar 2.10** berikut:



Gambar 2.14 Algoritma Komputasi Diskritisasi pada ANSYS *Fluent* (ANSYS, 2009)

Gambar 2.10 menjelaskan dasar pemilihan formulasi diskritisasi *solution control* pada ANSYS *Fluent*. Adapun penjelasan dari algoritma komputasi di atas adalah sebagai berikut:

1. *Solver Type*

Pada penelitian kali ini, digunakan *solver type* jenis *pressure-based* dengan formulasi *second order*. Pemilihan *pressure-based* didasarkan pada asumsi fluida kerja yang bersifat inkompresibel dengan tekanan konstan untuk memudahkan

proses komputasi pada saat iterasi. Pemilihan *second order* dipilih untuk meningkatkan akurasi perhitungan (ANSYS, 2009).

2. Gradient Type

Dalam *spatial discretization*, digunakan tipe *gradient* “*Least Square Cell Based*”. Pemilihan formulasi ini didasarkan pada pertimbangan akurasi komputasi yang lebih tinggi dibandingkan metode *Green-Gauss Cell-Based* serta beban komputasi yang lebih ringan dibandingkan *Green-Gauss Node-Based*.

3. Skema Kalkulasi

Skema kalkulasi yang digunakan pada *spatial discretization* adalah “*Second Order Upwind*” untuk seluruh elemen diskritisasi yaitu: momentum, *turbulent kinetic energy*, *turbulent dissipation rate*, vol, O₂, CO₂, CO, H₂O, SO₂, dan *energy*. Skema ini digunakan atas dasar tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan *First Order Upwind* dan berlaku untuk metode *mesh* yang bervariasi.

2.11.7 Konvergensi

Konvergensi digunakan sebagai salah satu syarat dalam melakukan simulasi numerik yang menghasilkan penyelesaian persamaan aljabar yang mempunyai nilai paling mendekati penyelesaian aktual turunan parsial dengan syarat awal dan batas yang sama dengan sistem konvergensi mesh. Ada tiga metode yang biasa digunakan untuk memeriksa derajat konvergensi hasil literasi. Suatu nilai telah mencapai konvergensi apabila grafik sudah membentuk garis lurus atau data telah menghasilkan nilai yang konstan, ketika proses iterasi dilanjutkan nilai tidak akan berubah (Astuti, 2017).

a) Kriteria Konvergensi

Jika nilai sisa sama dengan nol, maka perhitungan awalnya dianggap konvergen. Namun kondisi ini sulit dicapai, sehingga ANSYS Fluent menetapkan kriteria konvergensi ke keadaan defaultnya. Dalam keadaan ini, penghitungan berhenti ketika literasi menghasilkan nilai sisa yang mencapai angka tersebut. Status *default* untuk proses simulasi ini adalah sisa 10^{-3} untuk hampir semua persamaan, kecuali persamaan energi dan radiasi yang bernilai 10^{-6} .

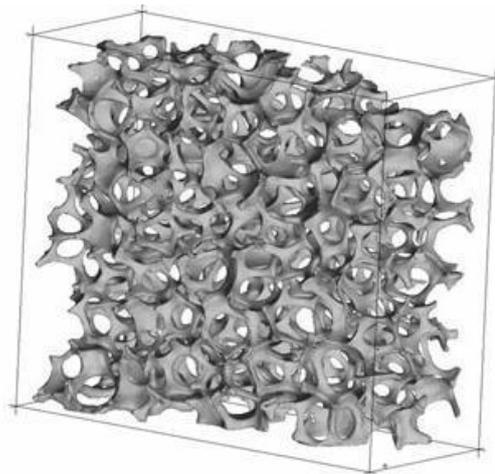
b) Monitor Point

Ketika pencapaian titik konvergensi yang ditetapkan ANSYS Fluent masih sangat sulit untuk dicapai, di mana nilai residual tidak mau turun lagi menuju kriteria konvergensi yang telah ditentukan. Saat nilai *variabel continuity* yang secara dominan mewakili keseluruhan aliran relatif tidak berubah ketika iterasi berjalan terus, maka solusi yang dihasilkan pada iterasi tersebut sudah bisa dikatakan konvergen.

2.12 Porous Media

Pemodelan *porous media* dapat digunakan dalam berbagai kasus untuk aliran melalui filter, *tube bank*, distributor, *packed beds*, plat berlubang, dan sangat fleksibel untuk aliran tunggal dan multifase. Kriteria penggunaan *porous media* adalah tingkat kompleksitas geometri sistem perpipaan di dalam *heat exchanger*. Oleh karena itu, pendekatan dengan menggunakan *porous media* dipilih untuk menyederhanakan proses komputasi. *Porous media* mendefinisikan bentuknya sebagai volume berpori di mana fluida yang mengalir melalui media dapat mewakili perpindahan panas yang dialami oleh susunan pipa *heat exchanger* di dalam boiler.

Porous media dapat dimodelkan dengan persamaan Darcy's law yang merupakan persamaan *pressure drop* dengan menambahkan sumber momentum pada persamaan standar aliran fluida. Terdapat dua (2) sumber momentum, yaitu *viscous resistance* dan *inertial resistance*.

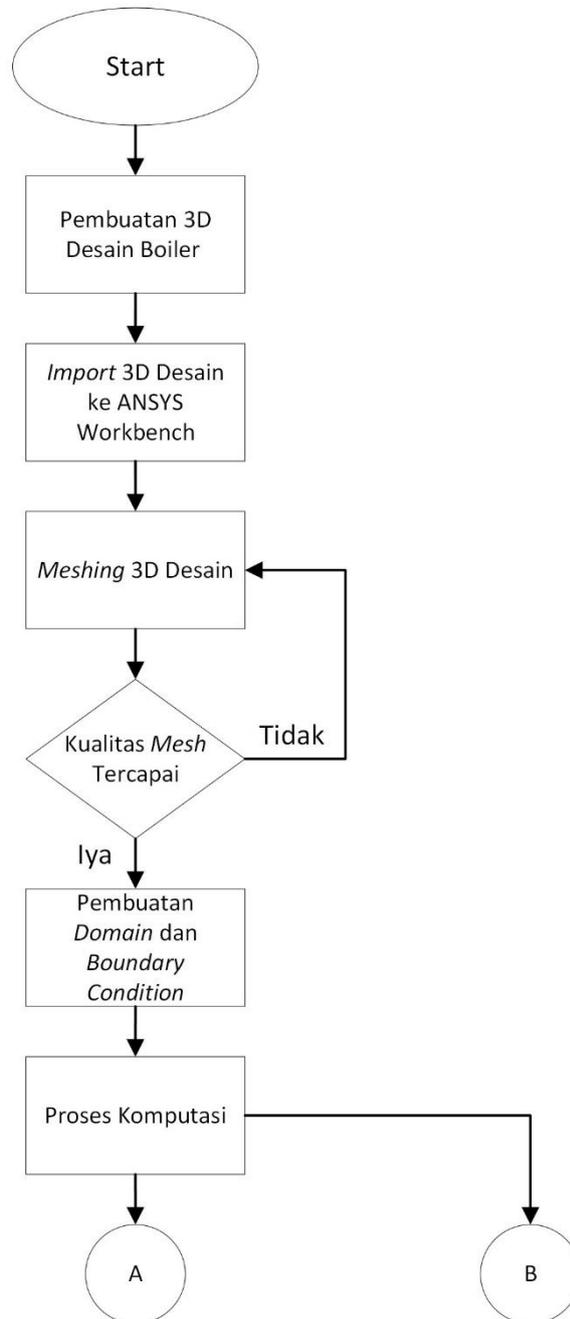


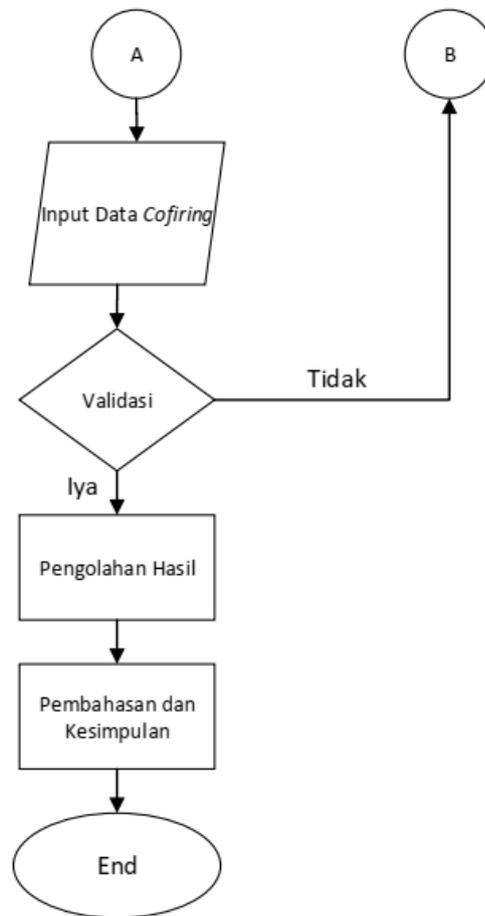
Gambar 2.15 Ilustrasi *Porous Media* (GUSTI AGUNG ALDI BRAHMANTYA HIMAWAN, 2021)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini dapat diilustrasikan dalam **Gambar 3.1**.





Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian

3.2 Metode Penelitian

Metodologi penelitian adalah langkah atau proses sistematis untuk mencapai suatu tujuan penelitian. Metodologi penelitian juga menjadi acuan ketika melakukan kegiatan penelitian. Pada penelitian ini dilakukan analisis numerik terhadap proses pembakaran pada *boiler* PLTU PT X Unit 1 dan 2. Setiap proses yang dilakukan pada penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut :

3.2.1 Studi Literatur

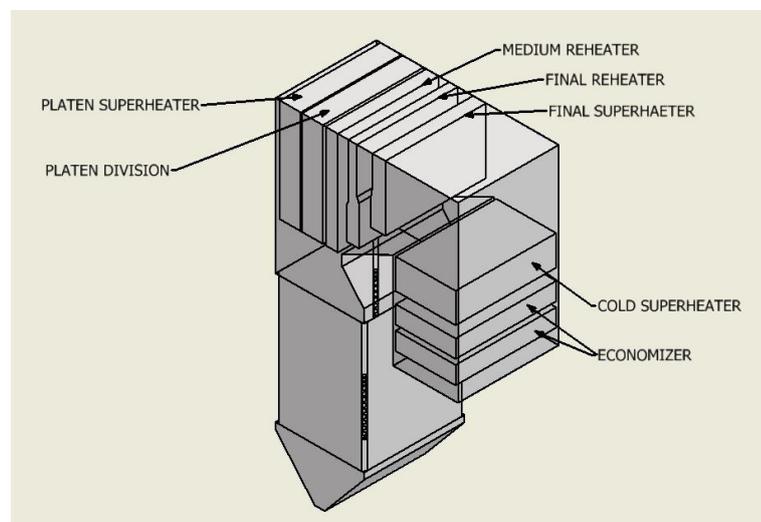
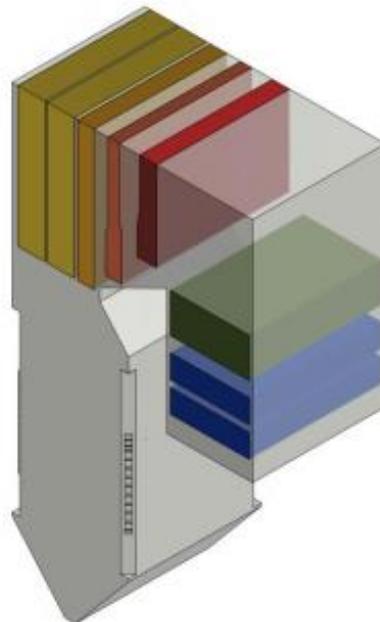
Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang boiler yang akan disimulasikan. Pada tahap penelitian literatur ini, penulis diharapkan dapat memahami proses pembakaran bahan bakar yang digunakan pada pembangkit listrik di Indonesia untuk mengurangi penggunaan energi fosil yaitu batubara dengan cara co-firing biomassa sebagai bahan bakar alternatif. Pemahaman tentang proses-proses yang terjadi di dalam *boiler*, antara lain seperti proses perpindahan panas, proses pembakaran, dan proses yang memegang peranan penting dalam mendukung pemahaman penulis penelitian ini secara keseluruhan.

3.2.2 Pembuatan 3D Design Boiler pada Autodesk Inventor Professional 2021

Merujuk pada spesifikasi teknis PC boiler yang akan digunakan, didapatkan pendekatan model sebagai berikut:

1. Dimensi panjang x lebar x tinggi yaitu (28,161x 15,545 x 51,786) m³
2. Modul pipa penukar panas menggunakan pendekatan media berporos
3. Seluruh *inlet* batubara dan udara pembakar pada PC boiler diasumsikan dengan *geometri face*.

Berdasarkan pendekatan tersebut, dihasilkan model 3D PC boiler sebagai berikut:



Gambar 3.2 Design Boiler

3.2.3 Variasi Data Simulasi

1. Data Input

Dalam penelitian ini, persentase co-firing biomassa merupakan parameter yang akan digunakan dalam proses penginputan data simulasi. Penelitian ini menggunakan 8 variasi. Adapun masing-masing variasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a) 100% batubara pada beban 300 MW.
- b) 5% biomassa berupa *sawdust* dan 95% batubara dengan metode *pre-mixing* atau *direct co-firing* pada beban 300 MW.
- c) 10% biomassa berupa *sawdust* dan 90% batubara dengan metode *pre-mixing* atau *direct co-firing* pada beban 300 MW.
- d) 15% biomassa berupa *sawdust* dan 85% batubara dengan metode *pre-mixing* atau *direct co-firing* pada beban 300 MW.
- e) 20% biomassa berupa *sawdust* dan 80% batubara dengan metode *pre-mixing* atau *direct co-firing* pada beban 300 MW.
- f) 25% biomassa berupa *sawdust* dan 75% batubara dengan metode *pre-mixing* atau *direct co-firing* pada beban 300 MW.
- g) 30% biomassa berupa *sawdust* dan 70% batubara dengan metode *pre-mixing* atau *direct co-firing* pada beban 300 MW.
- h) 100% biomassa berupa *sawdust* pada beban 300 MW.

2. Air-Fuel Ratio (AFR)

Air-Fuel Ratio merupakan perbandingan antara *Mass Flow* udara total yang terdiri dari udara primer dan sekunder, terhadap *Mass Flow* bahan bakar. Berdasarkan perhitungan stoikiometri menggunakan data dari analisis ultimat bahan bakar yang akan digunakan dalam simulasi *co-firing* pembakaran yang berupa batubara dan biomassa dapat diketahui bahwa AFR pembakaran adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1 AFR Pembakaran

<i>Case</i>	<i>Primary Air-to-Coal Ratio</i>	<i>Total Air-to-Coal Ratio</i>
100% batubara	2,1	9,05
<i>Co-firing</i> 5% biomassa	2,1	8,99
<i>Co-firing</i> 10% biomassa	2,1	8,93
<i>Co-firing</i> 15% biomassa	2,1	8,87
<i>Co-firing</i> 20% biomassa	2,1	8,81
<i>Co-firing</i>	2,1	8,74

<i>Case</i>	<i>Primary Air-to-Coal Ratio</i>	<i>Total Air-to-Coal Ratio</i>
25% biomassa		
<i>Co-firing</i> 30% biomassa	2,1	8,68
100% biomassa	2,1	7,81

3.2.4 Metode Komputasi

Pada Penelitian ini dilakukan simulasi menggunakan metode komputasi untuk menganalisis proses pembakaran pada *PC Boiler* dengan variasi *co-firing*. Proses simulasi ini dilakukan menggunakan *software Ansys Fluent*.

3.2.4.1 Pre-Processing

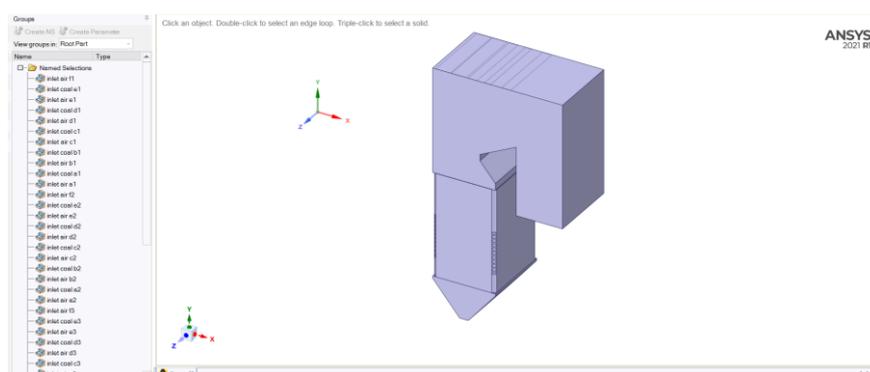
Tahapan *pre-processing* merupakan tahapan awal dalam simulasi. Tahapan *pre-processing* meliputi beberapa tahapan sebagai berikut:

a) Geometry

Merujuk pada spesifikasi teknis *PC boiler* yang akan digunakan, didapatkan pendekatan model sebagai berikut:

1. Dimensi panjang x lebar x tinggi yaitu (28,161x 15,545 x 51,786) m³
2. Modul pipa penukar panas menggunakan pendekatan media berporos
3. Seluruh inlet batubara dan udara pembakar pada *PC boiler* diasumsikan dengan geometri *face*.

Berdasarkan pendekatan tersebut, dihasilkan model 3D *PC boiler* sebagai berikut:

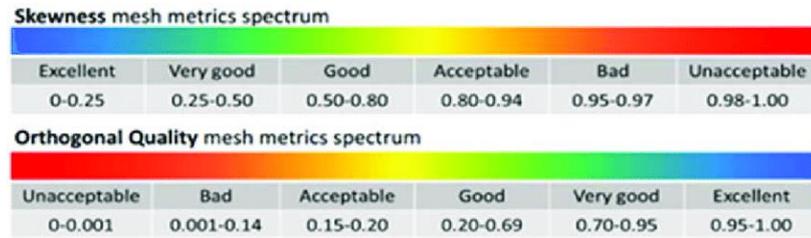


Gambar 3.3 Design Assembly Boiler

b) Meshing

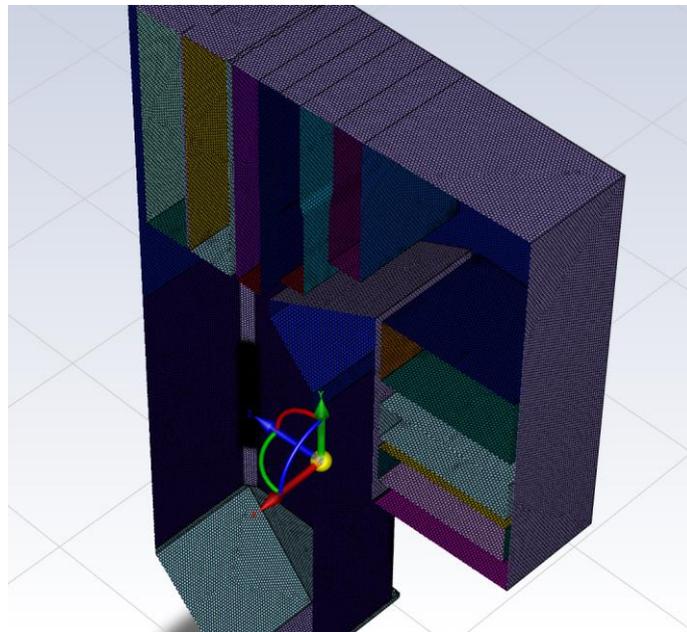
Pada parameter *aspect ratio*, kualitas yang dapat diterima untuk proses *running* bervariasi dari jenis meshnya. Berdasarkan data dari (ANSYS, 2009), nilai *aspect ratio* terbaik memiliki nilai 5:1. Untuk

mesh dengan tipe *hexahedral/quadrilateral/wedge*, nilai *aspect ratio* terbaik dapat ditolerir hingga nilai 10:1, sedangkan nilai maksimal yang dapat diterima yaitu 35:1 untuk seluruh kesatuan mesh pada geometri yang diuji.



Gambar 3.4 Rentang Kualitas Mesh

Fokus pada penelitian ini berupa karakterisasi pembakaran batubara pada *PC Boiler* dengan data distribusi temperatur dan laju aliran *flue gas* nya, sehingga mesh pada bagian *Burner* dibuat lebih detail dengan metode *polyhedral* sedangkan ruangan *boiler* dan modul *heat exchanger* disusun *mesh* menggunakan metode *hexahedral*. *Mesh* pada bagian *Burner* dibuat lebih detail dengan pendekatan metode *body sizing* sebesar 0,2 m pada seluruh geometri *boiler* untuk mendapatkan kualitas mesh serta beban komputasi paling optimal



Gambar 3.5 Meshing Boiler



Gambar 3.6 Meshing Inlet Burner dan Secondary Air

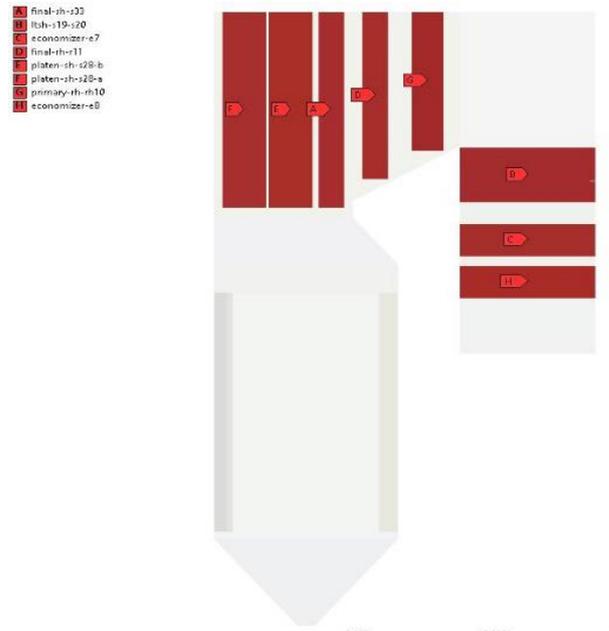
Tabel 3.2 Kualitas Mesh pada Model 3D PC Boiler

No	Parameter	Quality
1	Jenis mesh	<i>Poly-hexcore</i>
2	<i>Maximum skewness equiangular</i>	0,9312318
3	<i>Average skewness equiangular</i>	0,04530803
4	<i>Minimum orthogonal quality</i>	0,079302
5	<i>Average orthogonal quality</i>	0,93048
6	<i>Maximum Aspect Ratio</i>	69,65402
7	<i>Average Aspect Ratio</i>	2,49706
8	Jumlah nodes	6.735.105
9	Jumlah element	2.962.880

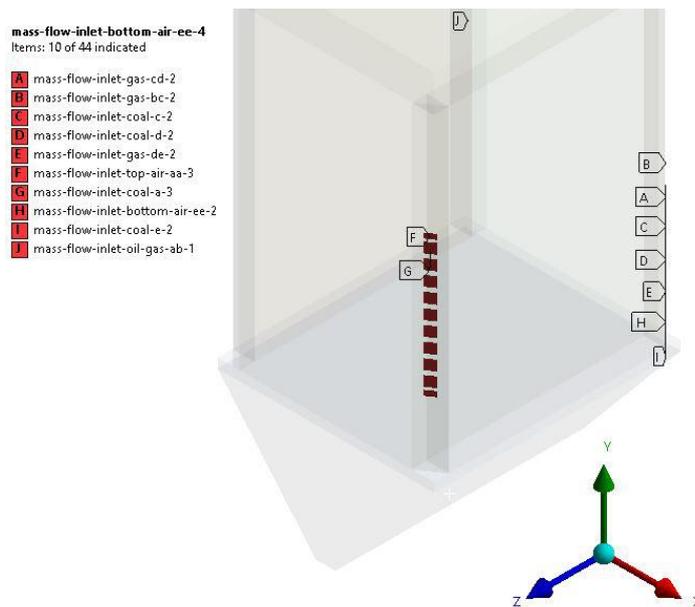
c) Pendefinisian domain

Pada umumnya, proses pembakaran batubara pada PC boiler merupakan mekanisme yang sangat rumit. Proses ini kemudian dipermudah dengan mendefinisikan domain komputasi yang berpengaruh terhadap proses pembakaran yang utama (GUSTI AGUNG ALDI BRAHMANTYA HIMAWAN, 2021). Pembagian computational domain dibagi sebagai berikut:

1. *Domain Modul Heat Exchanger*, terdiri dari 8 domain yaitu: 2 buah *economizer*, 2 *reheater*, 2 *plate superheater*, 1 *LTSH*, dan 1 *final superheater*.
2. *Domain Boundary Condition*, terdiri dari 5 elevasi *Burner* dan 6 elevasi udara pembakar, yang tersebar di 4 *corner*, sehingga terdapat 44 *domain*.



Gambar 3.7 Domain Boiler

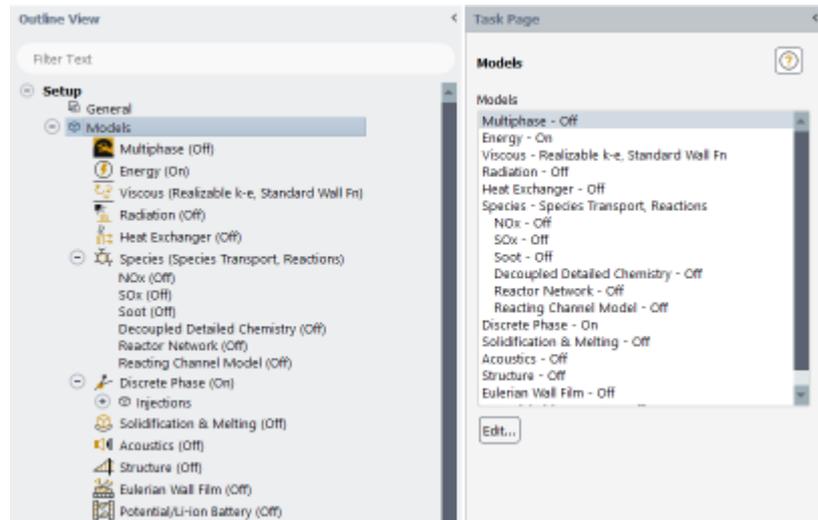


Gambar 3.8 Domain Inlet Boiler

3.2.4.2 Processing

a) Models

Penelitian ini membutuhkan analisis matematis mengenai perpindahan kalor yang berkaitan dengan energi, oleh karena itu *energy equation* diaktifkan. Gambar 3.9 serta Tabel 3.3 menampilkan detail model matematika yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.9 Tampilan Pengaturan Model Simulasi

Tabel 3.3 Detail Pengaturan Model Simulasi

Model	Keterangan	Dasar Pemilihan
<i>Energy Equation</i>	On	Terjadi perpindahan panas pada pipa-pipa heat exchanger (HTSH, ITSH, LTSH, dan Economizer).
<i>Turbulence</i>	K-ε Realizable	Merupakan syarat pembakaran dengan model turbulensi yang merupakan penyempurnaan dari K-ε Standard.
<i>Species Model</i>	Species Transport	Dalam Pembakaran batubara direkomendasikan menggunakan model species transport (ANSYS, 2013).
<i>Discrete Phase Model</i>	On	Inlet PA + bahan bakar didefinisikan sebagai injeksi surface

Sedangkan Species model dapat dijelaskan dalam tabel berikut :

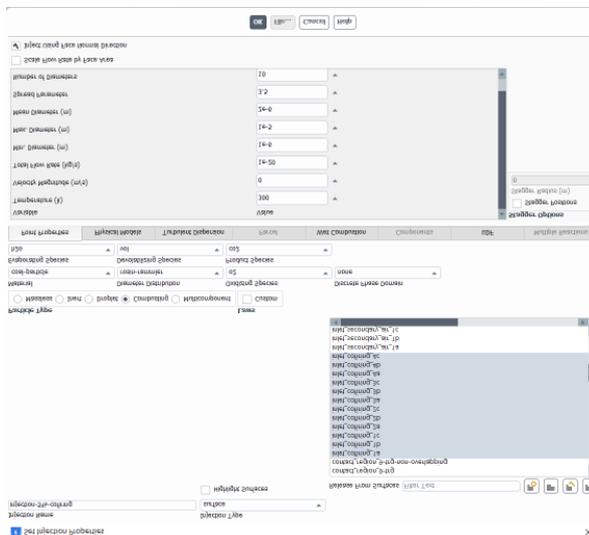
Tabel 3.4 *Species Model*

Model	<i>Species Transport</i>
-------	--------------------------

Turbulent Chemistry Interaction	Finite-Rate/Eddy-Dissipation
Reaction	Volumetric & Particle Surface
Coal MV Particle Surface Reaction	$C<s> + 0,5 O_2 \rightarrow CO$ $C<s> + CO_2 \rightarrow 2 CO$ $C<s> + H_2O \rightarrow H_2 + CO$ $H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$ $CO + 0,5 O_2 \rightarrow CO_2$
Biomass Particle Surface Reaction	$C<s> + 0,5 O_2 \rightarrow CO$ $C<s> + CO_2 \rightarrow 2 CO$ $C<s> + H_2O \rightarrow H_2 + CO$ $H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$ $CO + 0,5 O_2 \rightarrow CO_2$

b) Injeksi

Pasokan bahan bakar batubara ke PC boiler dilakukan dengan menginjeksikan batubara dari *coal Burner* yang terletak di setiap sudut. Terdapat 5 elevasi *coal Burner* pada PC boiler ini, elevasi A sampai dengan E. Masing-masing elevasi terdiri dari 4 *burner*. Bahan bakar dimasukkan dengan sudut tilting 0° (sejajar dengan sumbu horizontal) dengan pendefinisian simulasi menggunakan *normal to boundary*.



Gambar 3.10 Tampilan *Injection* pada *Discrete Phase Model*

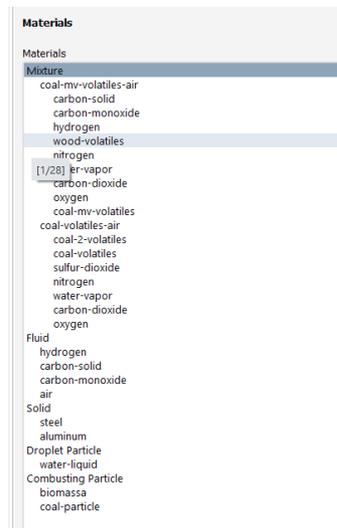
Sedangkan peng-injeksian batubara pada masing-masing corner dapat dijelaskan dalam tabel berikut :

Tabel 3.5 Ketentuan Peng-injeksian Batubara pada Masing-Masing *Corner*

<i>Setting</i>	<i>Corner Coal Injection</i>	Dasar Pemikiran
<i>Injection Type</i>	<i>Surface</i>	Pendistribusian batubara saat memasuki furnace berkelompok melewati sebuah nozzle dengan luasan tertentu
<i>Particle Type</i>	<i>Combusting</i>	Reaksi yang terjadi pada partikel yang diinjeksikan merupakan reaksi pembakaran (penjelasan dari fluent)
Material	<i>Coal MV (MRC) dan Sawdust</i>	Data performance test PLTU PT X
<i>Diameter Distribution</i>	<i>Rossin Ramler</i>	Distribusi diameter partikel batubara tidak memiliki nilai yang tetap (penjelasan dari fluent)
<i>Devolatilizing Species</i>	<i>Coal MV (MRC) dan Sawdust</i>	Data performance test PLTU PT X

c) Material

Pada tahapan ini melibatkan pemilihan data-data properti dari tiga jenis material yaitu *solid*, *fluid* dan *combusting particle*. Gambar 3.11 menampilkan penentuan jenis material.



Gambar 3.11 Tampilan *Setup* Pemilihan Material

Data *properties* material *fluid* dan *solid* yang akan digunakan ditunjukkan pada tabel 3.6

Tabel 3.6 . Data *Properties* Material *Solid* dan *Fluid* Simulasi Numerik

Material Solid

Material Type	Solid	Steel
<i>Density</i>	(kg/m ³)	8030
<i>Specific Heat</i>	(J/kg K)	502,48
<i>Thermal Conductivity</i>	(W/m K)	16,27

Material Fluid

Material Fluid	Hydrogen	Carbon Solid	Carbon Monoxide	Air
<i>Density (Kg/m³)</i>	0,0189	2000	1,1233	<i>Constant</i>
<i>Specific Heat (J/Kg.K)</i>	Piecewise-polynomial	Piecewise-polynomial	Piecewise-polynomial	<i>Constant</i>
<i>Thermal Conductivity (W/m.K)</i>	0,1672	0,0454	0,025	0,0242
<i>Viscosity (Kg/m.s)</i>	8,411e-6	1,72e-5	1,75e-5	1,7894e-5
<i>Molecular Weight (Kg/Kg.mol)</i>	2,01594	12,01115	28,01055	28,966
<i>Reference Temperature (K)</i>	298,15	298	298,17	298,18

d) *Boundary Condition*

Batubara dan biomassa dimasukkan ke dalam *boiler* melalui *nozzle Burner* yang terdapat pada masing-masing *corner*. bahan bakar dimasukkan dengan sudut tilting 0° (sejajar dengan sumbu horizontal) dengan pendefinisian simulasi menggunakan *normal to boundary*.

Tabel 3. 7 *Boundary Condition*

Elevasi	Burner A	Burner B	Burner C	Burner D	Burner E	Secondary Air
Case 1 (100% Batubara)						
<i>Mass Flow (kg/s)</i>	8,206	8,206	8,206	8,206	8,206	18,309
<i>Temperatur (°C)</i>	63,48	63,48	63,48	63,48	63,48	363
<i>O2 (%)</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Case 2 (5% Co-firing)						
<i>Mass Flow (kg/s)</i>	8,211	8,211	8,211	8,211	8,211	18,182
<i>Temperatur (°C)</i>	63,48	63,48	63,48	63,48	63,48	363
<i>O2 (%)</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Elevasi	Burner A	Burner B	Burner C	Burner D	Burner E	Secondary Air
Case 3 (10% Co-firing)						
<i>Mass Flow</i> (kg/s)	8,216	8,216	8,216	8,216	8,216	18,056
Temperatur (°C)	63,48	63,48	63,48	63,48	63,48	363
O2 (%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Case 4 (15% Co-firing)						
<i>Mass Flow</i> (kg/s)	8,220	8,220	8,220	8,220	8,220	17,928
Temperatur (°C)	63,48	63,48	63,48	63,48	63,48	363
O2 (%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Case 5 (20% Co-firing)						
<i>Mass Flow</i> (kg/s)	8,225	8,225	8,225	8,225	8,225	17,801
Temperatur (°C)	63,48	63,48	63,48	63,48	63,48	363
O2 (%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Case 6 (25% Co-firing)						
<i>Mass Flow</i> (kg/s)	8,230	8,230	8,230	8,230	8,230	17,678
Temperatur (°C)	63,48	63,48	63,48	63,48	63,48	363
O2 (%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Case 7 (30% Co-firing)						
<i>Mass Flow</i> (kg/s)	8,236	8,236	8,236	8,236	8,236	17,559
Temperatur (°C)	63,48	63,48	63,48	63,48	63,48	363
O2 (%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Case 8 (100% sawdust)						
<i>Mass Flow</i> (kg/s)	8,289	3,59	3,59	3,59	3,59	15,632
Temperatur (°C)	63,48	63,48	63,48	63,48	63,48	363
O2 (%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

e) Heat Exchanger

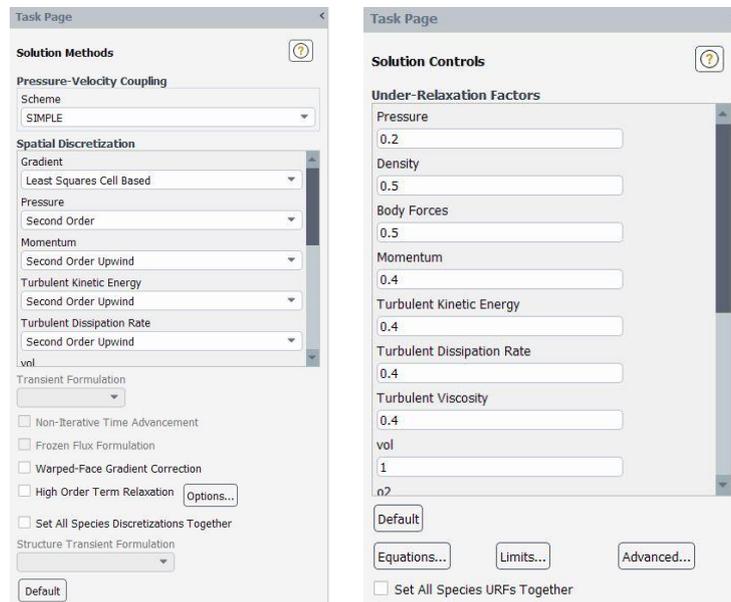
Heat exchanger dimodelkan sebagai *porous* media yang memiliki nilai *heat generation*. *Heat exchanger* menyerap kalor dari *flue gas* untuk mengubah fasa cair dari *feed water* menjadi fasa uap berupa *main steam*. Proses pendefinisian *porous* media dilakukan pada *cell zone condition* dengan mengaktifkan *porous zone* dan *source terms*.

Tabel Tabel 3.8 Nilai *Heat Generation* Tiap HE

<i>Heat Exchanger</i>	<i>Heat Generation (W/m³)</i>	<i>Porosity</i>
<i>Cold Superheater</i>	72138,16813	0,75
<i>Economizer</i>	112066,4128	0,99
<i>Final Reheater</i>	360662,9988	0,93
<i>Final Superheater</i>	60781,9636	0,89
<i>Medium Reheater</i>	100394,4744	0,93
<i>Platen Division</i>	54773,73956	0,77
<i>Platen Superheater</i>	54773,73956	0,77

f) *Solution Method*

Proses *solution method* merupakan proses menentukan metode perhitungan ketika melakukan proses *running* simulasi. Parameter *solution method* yang digunakan adalah menggunakan skema *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation (SIMPLE)* pada *pressure-velocity coupling*. *Spatial Discretization* menggunakan metode *second-order upwind* untuk seluruh jenis persamaan yaitu: momentum, *turbulent kinetic energy*, *turbulent dissipation rate*, vol, O₂, CO₂, CO, H₂O, SO₂, dan *energy*. Proses *solution control* untuk bagian *under-relaxation factor* digunakan penurunan nilai dari kondisi *default* untuk mengurangi potensi *error* dalam komputasi.



(a)

(b)

Gambar 3.11. Pengaturan parameter pada: (a). *Solution Method*; (b) *Solution Control*.

3.2.4.3 Post Processing

Tahapan *post-processing* merupakan tahapan untuk melihat hasil simulasi yang telah dilakukan. Hasil yang diinginkan pada penelitian ini berupa kontur distribusi temperatur dan tekanan, distribusi kecepatan

flue gas, pola api pada *Burner* dari pembakaran *co-firing* batubara dan biomassa, serta data kuantitatif dari FEGT dan *outlet*. Tahapan ini bertujuan untuk mengetahui apakah proses simulasi yang didapatkan memuaskan untuk *output* dari *modelling* dan mengevaluasi perbaikan-perbaikan yang mungkin dilakukan terhadap model tersebut.

BAB IV PEMBAHASAN DAN ANALISA

4.1 Hasil Simulasi Numerik

Simulasi numerik ini dilakukan untuk memperoleh beberapa data yang diperlukan untuk mengetahui karakteristik PC boiler pada kondisi nyata. Pengumpulan data hasil simulasi dilakukan secara kualitatif melalui kontur suhu dan kecepatan aliran secara kuantitatif melalui tabel perbandingan hasil simulasi dan kondisi sebenarnya.

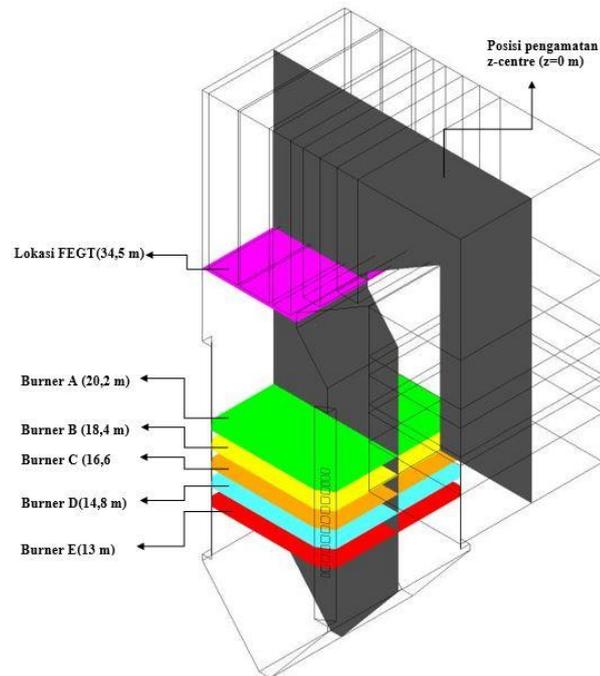
Proses *mass balance* dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara *Mass Flow rate inlet* dengan *Mass Flow rate outlet*. Hal ini dipakai sebagai validasi keabsahan simulasi untuk menentukan suatu hasil yang dapat diterima untuk dianalisis lebih lanjut. Hasil *mass balance* untuk masing-masing variasi dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Hasil *Mass Balance flue gas* untuk Seluruh Variasi Kondisi Simulasi

Variasi	Nilai Kalor (kcal/kg)	Mass Flow Inlet (kg/s)	Mass Flow Outlet (kg/s)	Gap (kg/s)
100% Batubara	4726	650,52173	650,87829	0,35653
5% <i>Co-firing</i>	4719	644,69708	645,33119	0,63411
10% <i>Co-firing</i>	4712	642,27918	641,72424	0,55494
15% <i>Co-firing</i>	4705	639,65178	639,19307	0,45871
20% <i>Co-firing</i>	4698	630,04163	630,12475	0,08312
25% <i>Co-firing</i>	4690	626,07016	626,02811	0,04205
30% <i>Co-firing</i>	4681	621,13707	621,43929	0,06852
100% Sawdust	4603	592,67722	592,78046	0,10324

Berdasarkan hasil *mass balance* pada **Tabel 4.1**, didapatkan perbandingan *Mass Flow inlet* dan *Mass Flow outlet* yang sangat kecil dari jangkauan 0,63411 kg/s hingga 0,04205 kg/s. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat kesalahan simulasi yang tidak terlalu signifikan sehingga tidak berpotensi menyebabkan kesalahan dalam simulasi.

Langkah selanjutnya adalah menentukan lokasi tinjauan kualitatif dari simulasi numerik. Pada penelitian ini, tinjauan dilakukan pada tujuh (7) lokasi yaitu posisi *z-centre*, kelima elevasi *coal burner*, serta daerah *furnace-exit-gas temperature* (FEGT) dari PC boiler. Ilustrasi tinjauan kualitatif dapat dilihat pada Gambar 4.1



Gambar 4.1 Posisi Pengamatan pada Analisis Kualitatif *Boiler Fired Pulverized*

Tujuan pengamatan posisi *z-centre* pada penelitian ini adalah untuk melihat karakteristik aliran gas buang di dalam boiler. Kemudian, tujuan pengamatan posisi lain seperti di area *Burner* adalah untuk mengetahui karakteristik bentuk aliran batubara yang masuk dari inlet *burner*. Sedangkan posisi pengamatan pada FEGT bertujuan untuk memvalidasi aliran flue gas yang akan memasuki wilayah *heat exchanger* pada boiler tersebut.

4.2 Validasi Hasil Simulasi

Sebelum menjalankan proses simulasi pada kondisi yang berbeda, terlebih dahulu dilakukan validasi antara data yang diperoleh dari analisis kualitatif dan kuantitatif berdasarkan literatur. Tujuan dari perbandingan tersebut adalah untuk melihat fenomena aktual yang terjadi pada proses pembakaran *PC boiler*. Berdasarkan tujuan penelitian ini, dilakukan perbandingan beberapa parameter beserta referensi yang digunakan.

- a) Kontur Temperatur dan Kecepatan flue gas pada *PC Boiler*. Analisis ini menggunakan referensi acuan dari (Febyanasari, 2014) dengan tesisnya yang berjudul “Studi Numerik Karakteristik Aliran dan Pembakaran pada *Tangentially Fired Pulverized Coal Boiler* dengan Menggunakan *Oxy-Fuel* pada Kasus *Coal Blending* antara *Medium Rank Coal* (MRC) dan *Low Rank Coal* (LRC)”. Hasil data penelitian beliau menunjukkan terbentuknya fenomena *fire ball* pada masing-masing *Burner* akibat injeksi batubara yang ditembakkan secara tangensial pada tekanan tertentu, sehingga menyebabkan suatu aliran *vortex* pada elevasi *Burner* tersebut. Aliran *vortex* atau *swirl* dari *flue gas* ini kemudian akan naik keatas menuju

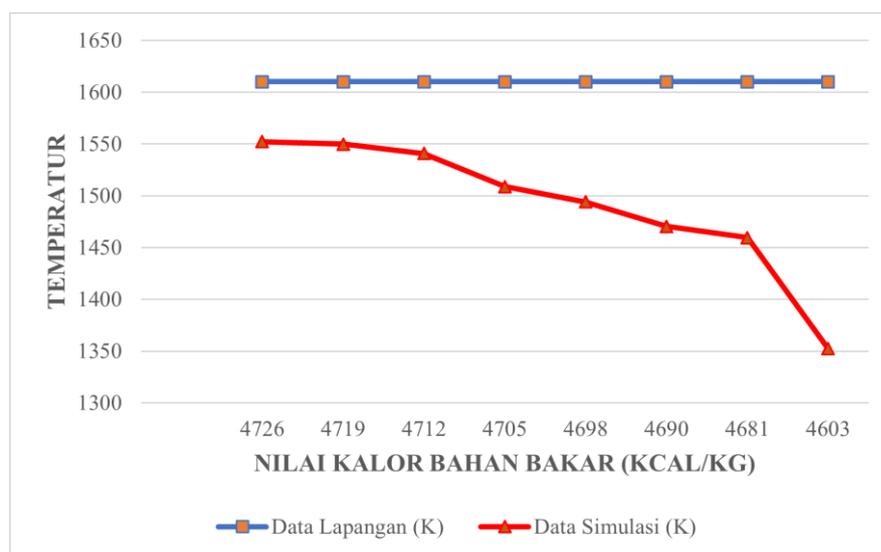
daerah FEGT sebelum akhirnya memasuki wilayah modul *heat exchanger*. Jangkauan temperatur pada furnace boiler berada pada kisaran 1800-2300 K.

- b) *Oxygen Species Mass Fraction*. Berdasarkan (Zhong Shengjun 2009) tentang artikelnya yang berjudul “*Coal Pulverization System: Explosion Prevention and Process Control*”, menyebutkan bahwa kebutuhan oksigen pada campuran batubara dengan *primary air* tidak dapat melebihi 5% untuk mencegah fenomena *auto-ignition* dan ledakan pada pipa aliran *burner*. Sehingga penelitian ini menggunakan *oxygen species mass fraction* sebesar 2% untuk seluruh *burner*.
- c) Validasi FEGT dilakukan dengan acuan referensi berupa data *performance test* yang dijelaskan pada **Tabel 4.2** untuk masing-masing variasi. Nilai kalor batubara Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan hasil komparasi data pada **Tabel 4.2**

Tabel 4.2 Perbandingan Rata-Rata FEGT Hasil Simulasi Terhadap Data Aktual

Variasi	Nilai Kalor (kcal/kg)	Data Lapangan (K)	Data Simulasi (K)	Selisih (K)	% Error
100% Batubara	4726	1610,06	1552,20	57,86	1,80424
5% <i>Co-firing</i>	4719		1549,68	60,38	1,96366
10% <i>Co-firing</i>	4712		1540,69	69,37	2,53239
15% <i>Co-firing</i>	4705		1508,83	101,23	4,54793
20% <i>Co-firing</i>	4698		1493,93	116,13	5,49054
25% <i>Co-firing</i>	4690		1470,37	139,69	6,981
30% <i>Co-firing</i>	4681		1459,55	150,51	7,66549
100% <i>Sawdust</i>	4603		1352,22	257,84	14,4554

Berdasarkan **Tabel 4.2**, dapat dilihat bahwa terdapat suatu perbedaan data atau *gap* yang bervariasi. Kondisi 100% Batubara memiliki *gap* terkecil dengan persentase 1,80424%, sedangkan 100% *Sawdust* memiliki *gap* yang cukup besar dengan persentase 14,4554%



Gambar 4.2 Grafik Validasi Perbandingan FEGT Simulasi Terhadap Data Aktual

Untuk mendapatkan data suhu rata-rata pada FEGT dibuat *isosurface* pada FEGT sesuai dengan tinjauan pada **Gambar 4.2**. Hasil temperatur rata-rata dari simulasi kemudian dibandingkan dengan data temperatur di *Directory Control System* (DCS) dalam bentuk tabel dan di plot ke grafik.. Berdasarkan penelitian (Jiang, Park, and Jeon 2020) acuan *margin of error* yang disimulasi sebesar 0-8%. Berdasarkan hasil *gap* pada **Tabel 4.2** 100% *Sawdust* memiliki *gap* yang cukup besar dengan persentase 14,4554% sehingga tidak masuk dalam range yang diterima

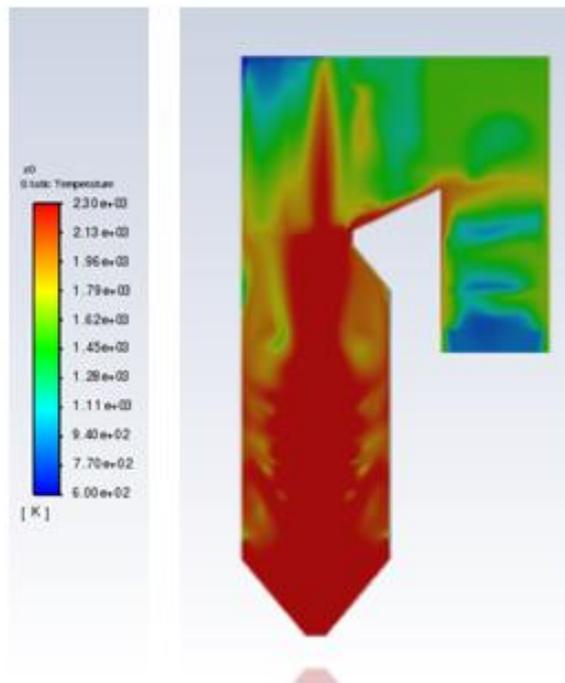
4.3 Analisi Numerik Hasil Simulasi

4.3.1 Distribusi Temperatur

Hasil distribusi temperatur pada *PC boiler* pada penelitian ini ditampilkan untuk lima (8) variasi kondisi *co-firing* batubara berdasarkan besaran Nilai kalornya. Profil temperatur yang diperoleh adalah sebagai berikut:

a) Kondisi 100% batubara

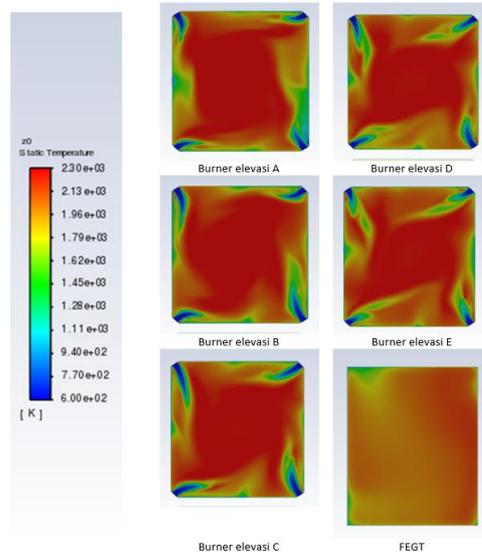
Simulasi kondisi 1 dilakukan pada full batubara kalori 4726 kcal/kg dengan besar *mass flow coal* ialah 223,43 ton/hr dengan *PA-to-coal ratio* 2,1 dan AFR 9,05 ditunjukkan pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3



Gambar 4.3 Distribusi Temperatur Kondisi 1 pada *Z-Centre Boiler*

Berdasarkan **Gambar 4.3**, kondisi 1 memiliki suhu tertinggi dengan kisaran 1900-2300 K pada daerah *furnace*. Panas dari *flue gas* kemudian membentuk aliran *swirl* yang akan naik menuju ke atas akibat efek turbulensi dari injeksi batubara pada *burner* secara tangensial. Temperatur *flue gas* kemudian menurun hingga jangkauan 1300-1700 K pada daerah modul *heat*

exchanger akibat penyerapan panas dan berakhir dengan suhu 600-1200 K pada daerah *boiler outlet*.

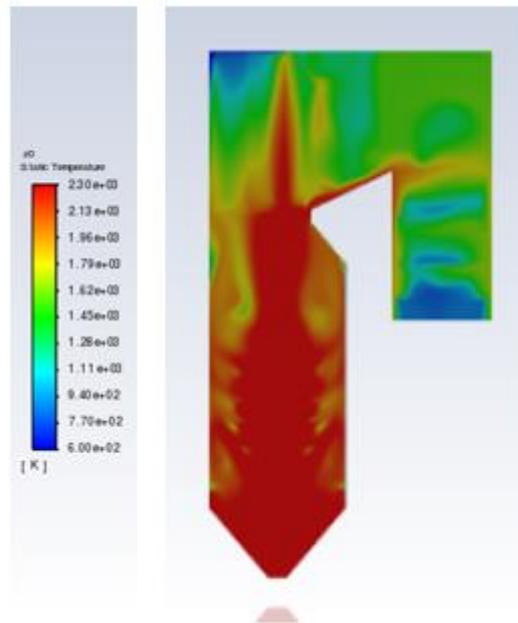


Gambar 4.4 Distribusi Temperatur Kondisi 1 pada Tiap *Burner* dan FEGT.

Gambar 4.4 menjelaskan distribusi temperatur kondisi 1 pada masing-masing *burner* dan FEGT. Dapat dilihat bahwa masing-masing elevasi *burner* memiliki suatu kontur *fire ball* yang terbentuk akibat penembakan batubara secara tangensial dengan tekanan tertentu. Berdasarkan Gambar tersebut, temperatur *fire ball* memiliki jangkauan panas 1700-2300 K diikuti dengan penyerapan kalor pada *walltube boiler*, sehingga temperatur pada dinding berkurang menjadi 1300-1600 K. Pada FEGT memiliki jangkauan temperatur 1500-1750 K.

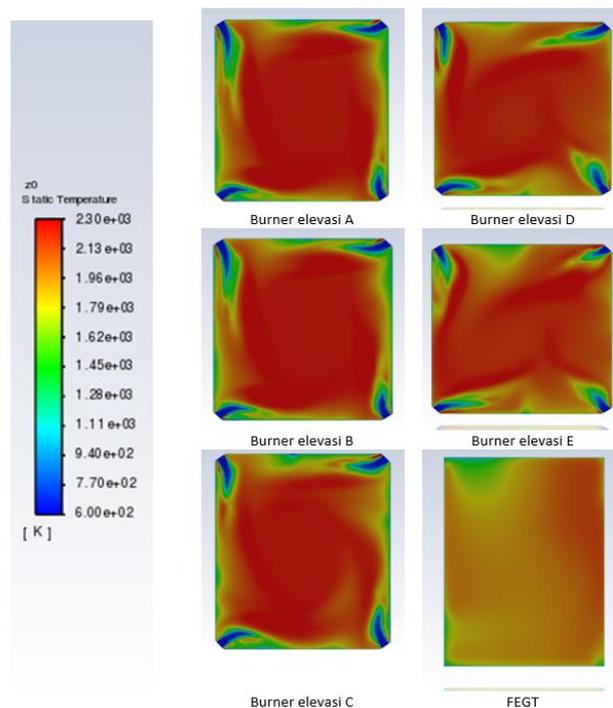
b) Kondisi *co-firing* 5%

Simulasi kondisi 2 dilakukan pada *co-firing* batubara sebesar 5% dengan kalori 4719 kcal/kg dengan besar *mass flow coal* sebesar 223,75 ton/hr dengan *PA-to-coal ratio* 2,1 dan AFR 8,98 ditunjukkan pada **Gambar 4.5** dan **Gambar 4.6**



Gambar 4.5 Distribusi Temperatur Kondisi 2 pada *Z-Centre Boiler*

Berdasarkan **Gambar 4.6**, kondisi 2 memiliki suhu tertinggi dengan kisaran 1800-2300 K pada daerah *furnace*. Kondisi ini cenderung lebih rendah dibandingkan kondisi 1 dengan persebaran kontur temperatur yang lebih rendah pula. Hal ini diakibatkan tambahan campuran biomassa berupa *sawdust* pada batubara sehingga nilai kalor bahan bakar cenderung lebih rendah dibandingkan dengan kondisi 1

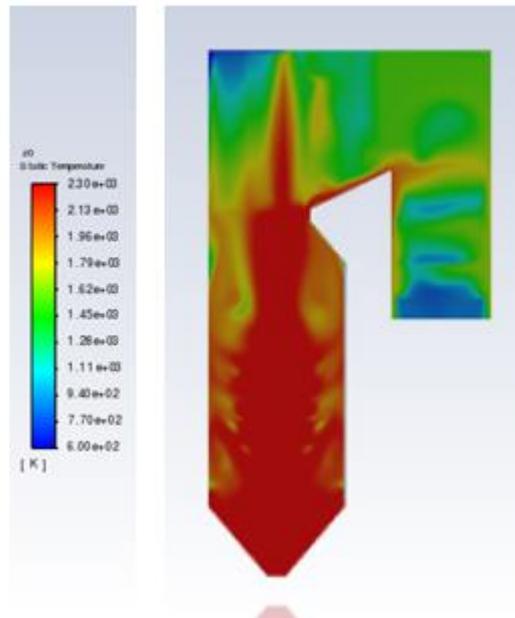


Gambar 4.6 Distribusi Temperatur Kondisi 2 pada Tiap *Burner* dan *FEGT*

Gambar 4.6 menjelaskan distribusi temperatur kondisi 2 pada masing-masing *burner* dan FEGT. Layaknya kondisi 1, masing-masing elevasi *burner* memiliki suatu kontur *fire ball* yang terbentuk akibat penembakan batubara secara tangensial dengan tekanan tertentu. Berdasarkan gambar tersebut, temperatur *fire ball* memiliki jangkauan panas 1700-2300 K dengan jangkauan panas yang lebih rendah dibandingkan kondisi 1 dan diikuti penyerapan kalor pada *walltube boiler*, sehingga temperatur pada dinding berkurang menjadi 1200-1700 K. Pada FEGT memiliki jangkauan temperatur 1500-1750 K.

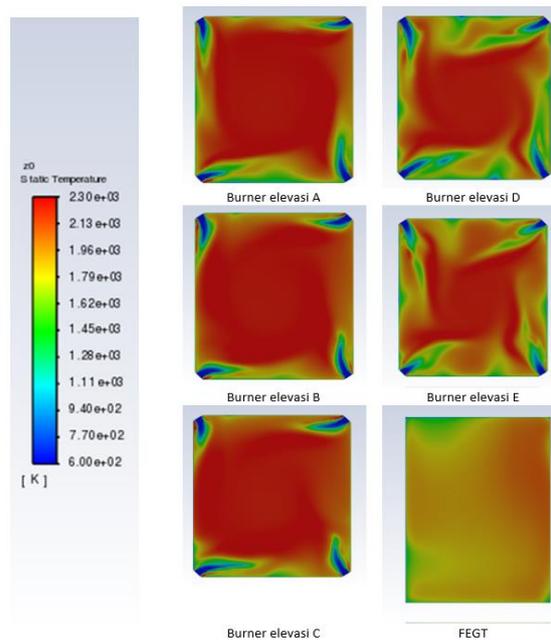
c) **Kondisi *co-firing* 10%**

Simulasi kondisi 3 dilakukan pada *co-firing* batubara sebesar 10% dengan kalori 4712 kcal/kg dengan besar *mass flow coal* ialah 224,09 ton/hr dengan *PA-to-coal ratio* 2,1 dan AFR 8,93 ditunjukkan pada **Gambar 4.7** dan **Gambar 4.8**



Gambar 4.7 Distribusi Temperatur Kondisi 3 pada *Z-Centre Boiler*

kondisi 3 memiliki suhu tertinggi dengan kisaran 1800-2300 K pada daerah *furnace*. Kondisi ini cenderung lebih rendah dibandingkan kondisi 1 dan 2 dengan persebaran kontur temperatur yang lebih rendah pula. Hal ini diakibatkan tambahan campuran biomassa berupa *sawdust* pada batubara sehingga nilai kalor bahan bakar cenderung lebih rendah dibandingkan dengan kondisi 1 dan 2

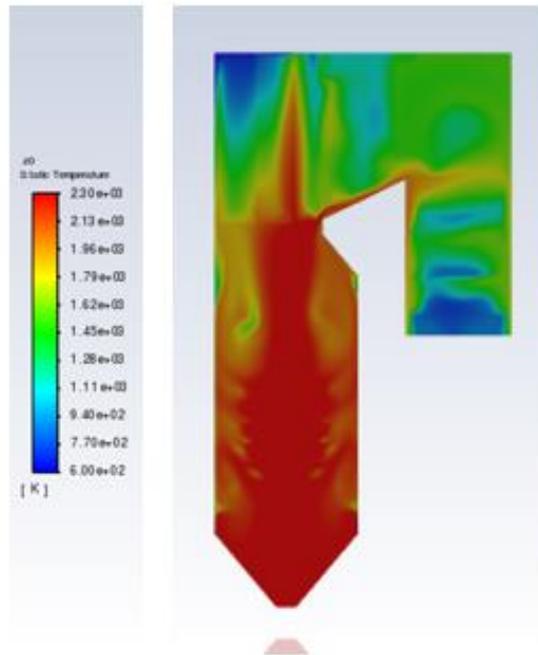


Gambar 4.8 Distribusi Temperatur Kondisi 3 pada Tiap *Burner* dan FEGT

Gambar 4.8 menjelaskan distribusi temperatur kondisi 3 pada masing-masing *burner* dan FEGT. Layaknya kondisi 1 dan 2, masing-masing elevasi *burner* memiliki suatu kontur *fire ball* yang terbentuk akibat penembakan batubara secara tangensial dengan tekanan tertentu. Berdasarkan gambar tersebut, temperatur *fire ball* memiliki jangkauan panas 1700-2300 K dengan jangkauan panas yang lebih rendah dibandingkan kondisi 1 dan 2 diikuti penyerapan kalor pada *walltube boiler*, sehingga temperatur pada dinding berkurang menjadi 1200-1600 K. Pada FEGT memiliki jangkauan temperatur 1500-1750 K.

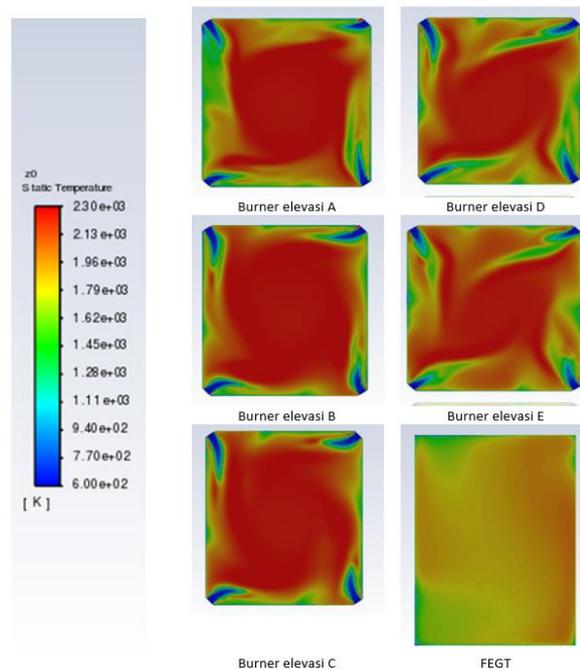
d) Kondisi *co-firing* 15%

Simulasi kondisi 4 dilakukan pada *co-firing* batubara sebesar 15% dengan kalori 4705 kcal/kg dengan besar *mass flow coal* ialah 224,42 ton/hr dengan *PA-to-coal ratio* 2,1 dan AFR 8,87 ditunjukkan pada **Gambar 4.9** dan **Gambar 4.10**



Gambar 4.9 Distribusi Temperatur Kondisi 4 pada *Z-Centre Boiler*

Berdasarkan **Gambar 4.9**, kondisi 4 memiliki suhu tertinggi dengan kisaran 1800-2300 K pada daerah *furnace*. Kondisi ini lebih rendah dibandingkan kondisi 1-3. Temperatur *flue gas* kemudian menurun hingga jangkauan 1300-1800 K pada daerah modul *heat exchanger* dan berakhir dengan suhu 600-1000 K pada daerah *boiler outlet*.

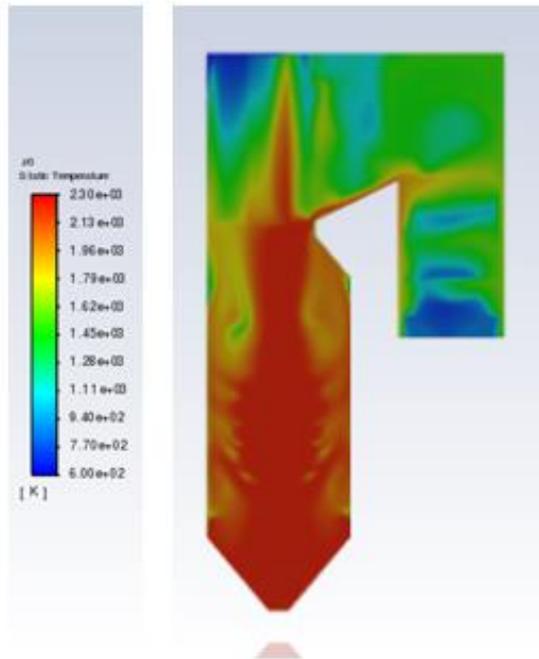


Gambar 4.10 Distribusi Temperatur Kondisi 4 pada Tiap *Burner* dan FEGT

Menurut **gambar 4.10** Layaknya kondisi 1-3, masing-masing elevasi *burner* memiliki suatu kontur *fire ball* yang terbentuk akibat penembakan batubara secara tangensial dengan tekanan tertentu. Berdasarkan gambar tersebut, temperatur *fire ball* memiliki jangkauan panas 1700-2300 K dengan jangkauan panas yang lebih rendah dibandingkan kondisi 1-3 diikuti penyerapan kalor pada *walltube boiler*, sehingga temperatur pada dinding berkurang menjadi 1200-1600 K. Pada FEGT memiliki jangkauan temperatur 1500-1700 K.

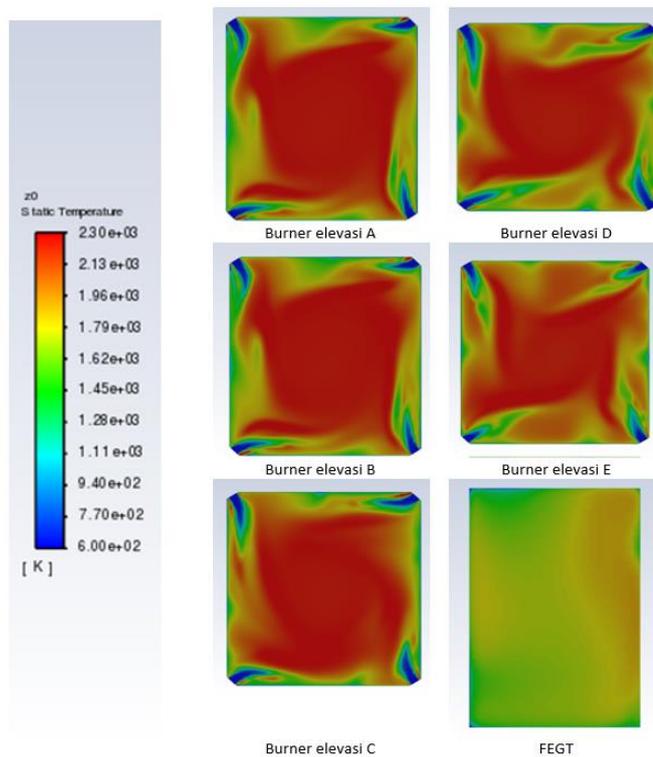
e) **Kondisi *co-firing* 20%**

Simulasi kondisi 5 dilakukan pada *co-firing* batubara sebesar 20% dengan kalori 4698 kcal/kg dengan besar *mass flow coal* sebesar 224,75 ton/hr dengan *PA-to-coal ratio* 2,1 dan AFR 8,81 ditunjukkan pada **Gambar 4.11** dan **Gambar 4.12**



Gambar 4.11 Distribusi Temperatur Kondisi 5 pada *Z-Centre Boiler*

Berdasarkan **Gambar 4.11**, kondisi 5 memiliki suhu tertinggi dengan kisaran 1800-2300 K pada daerah *furnace*. Kondisi ini lebih rendah dibandingkan kondisi 1-4. Temperatur *flue gas* kemudian menurun hingga jangkauan 1300-1800 K pada daerah modul *heat exchanger* dan berakhir dengan suhu 600-1000 K pada daerah *boiler outlet*.

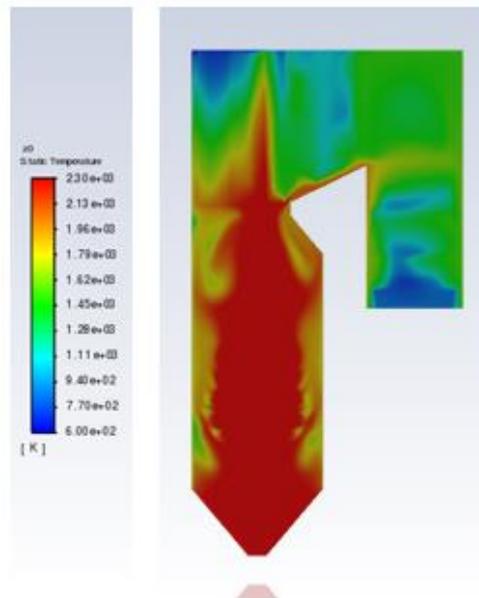


Gambar 4.12 Distribusi Temperatur Kondisi 5 pada Tiap *Burner* dan FEGT

Menurut **gambar 4.12** Layaknya kondisi 1-4, masing-masing elevasi *burner* memiliki suatu kontur *fire ball* yang terbentuk akibat penembakan batubara secara tangensial dengan tekanan tertentu. Berdasarkan gambar tersebut, temperatur *fire ball* memiliki jangkauan panas 1600-2300 K dengan jangkauan panas yang lebih rendah dibandingkan kondisi 1-4, diikuti penyerapan kalor pada *walltube boiler*, sehingga temperatur pada dinding berkurang menjadi 1200-1600 K. Pada FEGT memiliki jangkauan temperatur 1300-1600 K

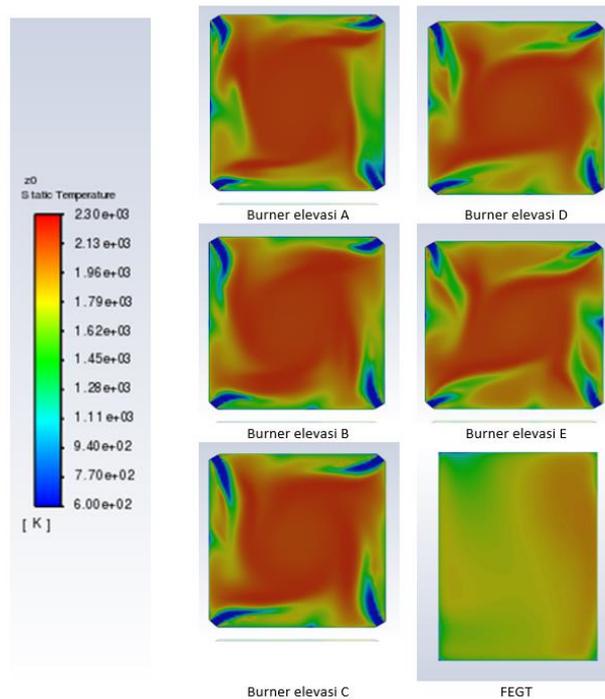
f) Kondisi *co-firing* 25%

Simulasi kondisi 6 dilakukan pada *co-firing* batubara sebesar 25% dengan kalori 4698 kcal/kg dengan besar *mass flow coal* sebesar 225,15 ton/hr dengan *PA-to-coal ratio* 2,1 dan AFR 8,75 ditunjukkan pada **Gambar 4.13** dan **Gambar 4.14**



Gambar 4.13 Distribusi Temperatur Kondisi 6 pada *Z-Centre Boiler*

Berdasarkan **Gambar 4.13**, kondisi 6 memiliki suhu tertinggi dengan kisaran 1800-2100 K pada daerah *furnace*. Kondisi ini lebih rendah dibandingkan kondisi 1-5. Temperatur *flue gas* kemudian menurun hingga jangkauan 1200-1600 K pada daerah modul *heat exchanger* dan berakhir dengan suhu 600-1000 K pada daerah *boiler outlet*.

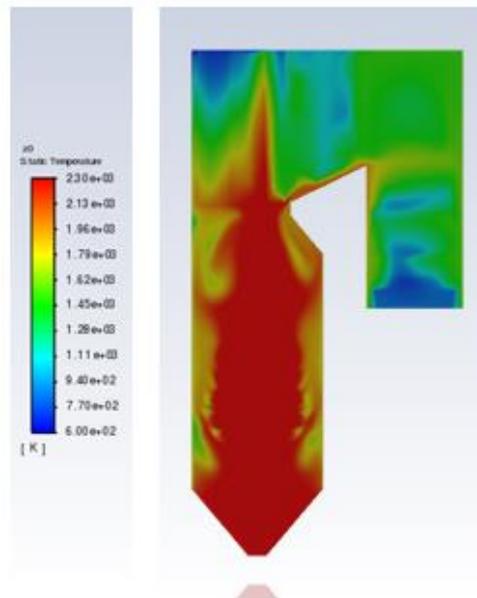


Gambar 4.14 Distribusi Temperatur Kondisi 6 pada Tiap *Burner* dan FEGT

Menurut **gambar 4.14** Layaknya kondisi 1-5, masing-masing elevasi *burner* memiliki suatu kontur *fire ball* yang terbentuk akibat penembakan batubara secara tangensial dengan tekanan tertentu. Berdasarkan gambar tersebut, temperatur *fire ball* memiliki jangkauan panas 1600-2300 K dengan jangkauan panas yang lebih rendah dibandingkan kondisi 1-5, diikuti penyerapan kalor pada *walltube boiler*, sehingga temperatur pada dinding berkurang menjadi 1200-1600 K. Pada FEGT memiliki jangkauan temperatur 1300-1600 K

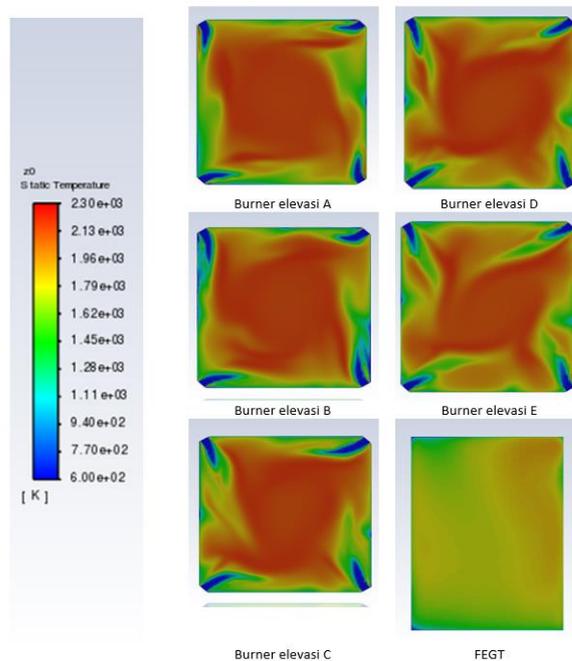
g) Kondisi *co-firing* 30%

Simulasi kondisi 7 dilakukan pada *co-firing* batubara sebesar 30% dengan kalori 4681 kcal/kg dengan besar *mass flow coal* sebesar 225,57 ton/hr dengan *PA-to-coal ratio* 2,1 dan AFR 8,68 ditunjukkan pada **Gambar 4.15** dan **Gambar 4.16**



Gambar 4.15 Distribusi Temperatur Kondisi 7 pada *Z-Centre Boiler*

Berdasarkan **Gambar 4.15**, kondisi 7 memiliki suhu tertinggi dengan kisaran 1500-2100 K pada daerah *furnace*. Kondisi ini lebih rendah dibandingkan kondisi 1-6. Temperatur *flue gas* kemudian menurun hingga jangkauan 700-1500 K pada daerah modul *heat exchanger* dan berakhir dengan suhu 1000-1200 K pada daerah *boiler outlet*.



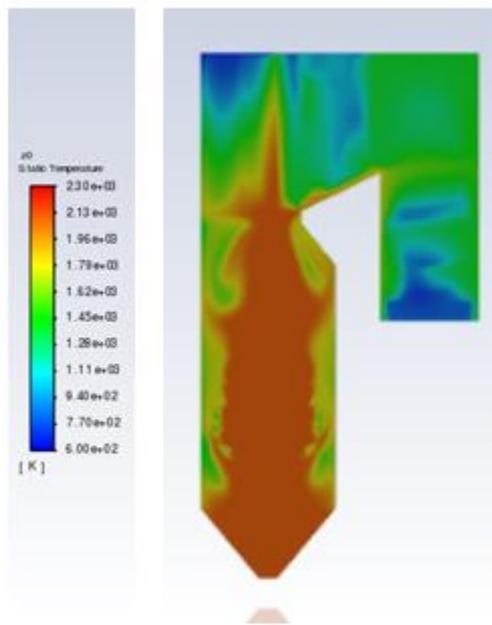
Gambar 4.16 Distribusi Temperatur Kondisi 7 pada Tiap *Burner* dan FEGT

Menurut **gambar 4.16** Layaknya kondisi 1-6, masing-masing elevasi *burner* memiliki suatu kontur *fire ball* yang terbentuk akibat penembakan batubara

secara tangensial dengan tekanan tertentu. Berdasarkan gambar tersebut, temperatur *fire ball* memiliki jangkauan panas 1600-2300 K dengan jangkauan panas yang lebih rendah dibandingkan kondisi 1-6, diikuti penyerapan kalor pada *walltube boiler*, sehingga temperatur pada dinding berkurang menjadi 1200-1600 K. Pada FEGT memiliki jangkauan temperatur 1300-1600 K

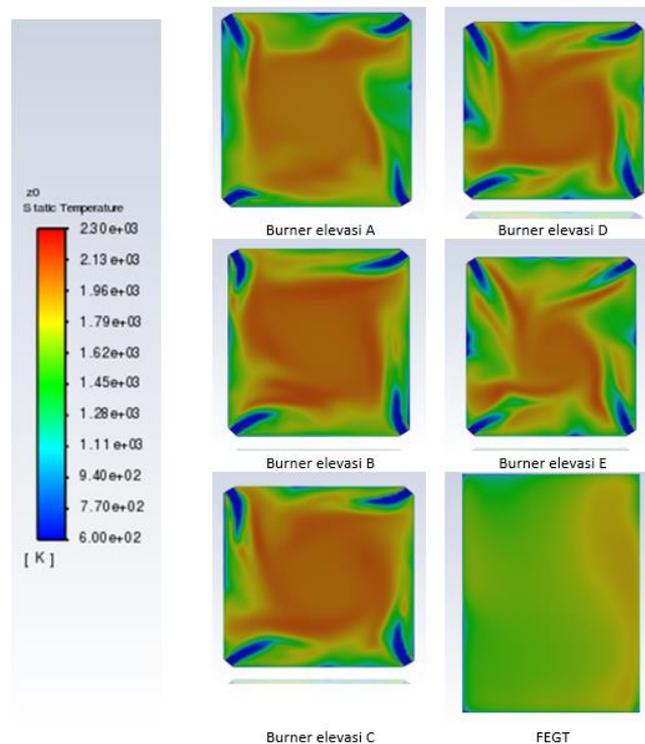
h) Kondisi 100% Sawdust

Simulasi kondisi 8 dilakukan pada 100% *Sawdust* dengan kalori 4603 kcal/kg dengan besar *mass flow coal* ialah 225,57 ton/hr dengan *PA-to-coal ratio* 2,1 dan AFR 7,81 ditunjukkan pada **Gambar 4.17** dan **Gambar 4.18**



Gambar 4. 17 Distribusi Temperatur Kondisi 8 pada *Z-Centre Boiler*

Berdasarkan **Gambar 4.15**, kondisi 7 memiliki suhu tertinggi dengan kisaran 1500-1900 K pada daerah *furnace*. Kondisi ini jauh lebih rendah dibandingkan kondisi 1-7. Temperatur *flue gas* kemudian sangat menurun hingga jangkauan 700-1400 K pada daerah modul *heat exchanger* dan berakhir dengan suhu 800-1200 K pada daerah *boiler outlet*

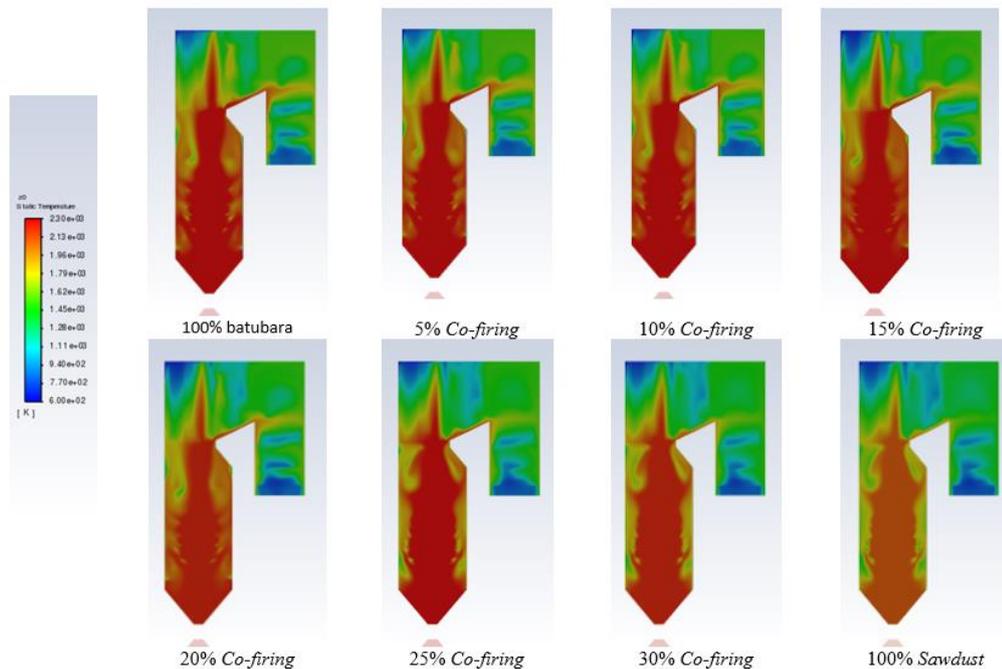


Gambar 4. 18 Distribusi Temperatur Kondisi 8 pada Tiap *Burner* dan FEGT

Menurut **gambar 4.18** Layaknya kondisi 1-7, masing-masing elevasi *burner* memiliki suatu kontur *fire ball* yang terbentuk akibat penembakan batubara secara tangensial dengan tekanan tertentu. Berdasarkan gambar tersebut, temperatur *fire ball* memiliki jangkauan panas 1600-2100 K dengan jangkauan panas yang jauh lebih rendah dibandingkan kondisi 1-7, diikuti penyerapan kalor pada *walltube boiler*, sehingga temperatur pada dinding berkurang menjadi 1200-1600 K. Pada FEGT memiliki jangkauan temperatur 1200-1600 K

1. Perbandingan Distribusi Temperatur *Z-Centre Boiler* tiap Kondisi

Pengamatan temperatur pada *z-centre boiler* atau pada bagian simetri *boiler* dilakukan untuk mengetahui sebaran temperatur yang terjadi dimulai dari pembakaran pada *furnace* sampai *flue gas* keluar dari *boiler*. Detail hasil simulasi ditunjukkan pada **Gambar 4.19**



Gambar 4.19 Distribusi Temperatur *Flue Gas* pada *Z-Centre*

Dari kontur distribusi temperatur diatas terlihat bahwa 100% batubara dengan nilai kalor 4726 kkal/kg mempunyai distribusi temperatur tertinggi dan kontur merah tua dominan pada area *furnance*. Sedangkan 100% *Sawdust* menunjukkan distribusi suhu paling rendah dengan nilai kalor 4603 kkal/kg, ditunjukkan dengan garis kontur orange, kuning, dan hijau pada area *furnance*. Distribusi suhu untuk setiap varian pembakaran menurun seiring dengan penurunan nilai kalor bahan bakar pembakaran dan peningkatan proporsi *sawdust* pada kebutuhan bahan bakar.

Kondisi 1 dengan 100% batubara memiliki jangkauan temperatur tertinggi dengan kisaran 2000-2300 K. jangkauan temperatur akan menurun seiring bertambahnya persentase *co-firing* dalam batubara hingga mencapai 1500-1900 K pada kondisi 8 dengan 100% *Sawdust*. Penurunan temperatur ini disebabkan oleh nilai kalor yang semakin rendah seiring bertambahnya persentase *Sawdust* dalam campuran batubara. Penurunan temperatur ini juga disebabkan oleh menurunnya kandungan *fixed carbon* yang merupakan bahan bakar utama pada proses pembakaran di dalam *furnace*. Hal ini dikarenakan semakin tinggi kadar *fixed carbon*, semakin tinggi pula energi panas yang dihasilkan saat pembakaran. Hal ini karena *fixed carbon* berfungsi sebagai sumber utama energi dalam proses pembakaran

Panas dari *flue gas* kemudian membentuk aliran *swirl* atau *vortex motion* yang menyebabkan *flue gas* naik menuju ke atas akibat turbulensi dari injeksi bahan bakar pada *Burner* secara tangensial. Temperatur *flue gas* kemudian

menurun hingga jangkauan 700-1800 K pada area modul *heat exchanger* untuk kondisi 100% batubara dan 600-1400 K untuk kondisi 100% *Sawdust* karena terjadi proses *heat transfer* secara *forced convection* antara *flue gas* dan *steam* pada jajaran pipa *heat exchanger*. Temperatur kemudian menurun kembali pada modul. Penurunan temperatur kembali terjadi pada konfigurasi *economizer* karena terjadi proses *heat transfer* untuk menaikkan temperatur *feed water* sebelum memasuki *steam drum*. Detail hasil perbandingan temperatur untuk masing-masing kondisi variasi dapat dilihat pada **Tabel 4.3**

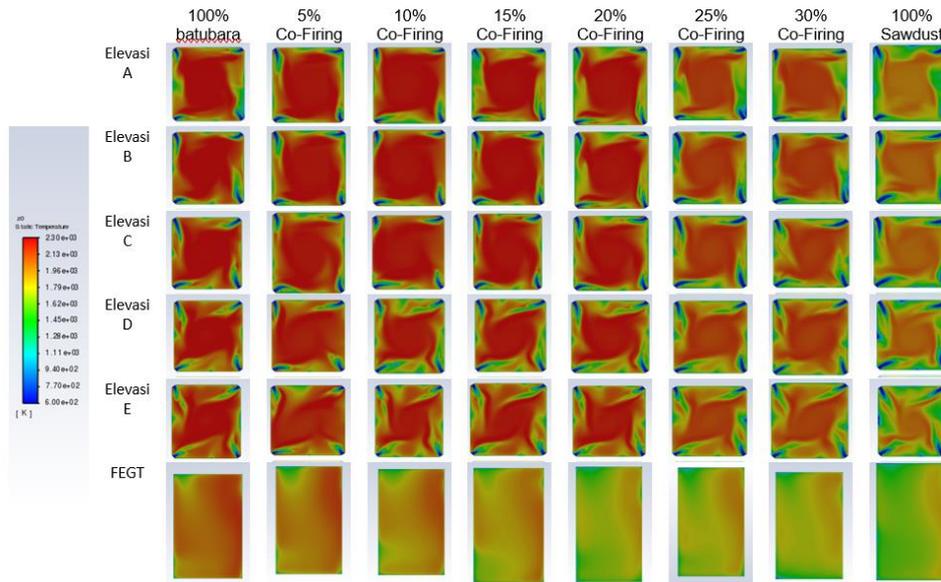
Tabel 4.3 Jangkauan Temperatur pada *Furnace* dan Konfigurasi *Heat Exchanger Boiler*

Kondisi	Jangkauan Temperatur	
	Temperatur (K)	
	<i>Furnance</i>	<i>Modul Heat Exchanger</i>
100% Batubara	1800-2300	1300-1700
5% <i>Co-firing</i>	1800-2200	1300-1700
10% <i>Co-firing</i>	1800-2200	1200-1700
15% <i>Co-firing</i>	1800-2100	1200-1700
20% <i>Co-firing</i>	1800-2000	1100-1700
25% <i>Co-firing</i>	1200-1800	1100-1700
30% <i>Co-firing</i>	1200-1800	1100-1700
100% <i>Sawdust</i>	1000-1500	1000-1700

Dari **Tabel 4.4** dijelaskna bahwa pada kondisi 100% batubara jangkauan temperatur pada area *furnance* dan temperatur pada area dan pada *Modul Heat Exchanger* sangat tinggi sedangkan pada kondisi 100% sawdust jangkauan temperatur pada fenomena fire ball dan temperatur pada area FEGT sangat rendah

2. Distribusi Temperatur pada *Burner Area* dan FEGT

Proses pengamatan distribusi suhu di area burner dan FEGT dilakukan untuk membandingkan suhu hasil simulasi dengan data aktual dari pengujian *commissioning*. Pengamatan di area *burner* menunjukkan bahwa setiap elevasi *burner* membentuk kontur *fire ball* yang dihasilkan oleh penginjeksian batubara secara tangensial.



Gambar 4.20 Distribusi Temperatur pada Burner dan FEGT

Suhu fire ball berkisar antara 1700-2300 K untuk kondisi 100% batubara, dan antara 1300-1800 K untuk kondisi 100% HT-EFB. Penyerapan *walltube* pada *boiler* menyebabkan pengurangan temperatur hingga mencapai 1300-1700 K pada dinding *boiler*. Pada FEGT memiliki jangkauan temperatur 1250-1750 K. Berdasarkan hasil perbandingan diatas, dapat diketahui bahwa kondisi 100% batubara memiliki hasil distribusi temperatur tertinggi dengan kontur merah tua yang mendominasi pada daerah *furnace*. Distribusi temperatur untuk semua variasi komposisi pada *burner* dan FEGT ditunjukkan pada **Tabel 4.4**

Tabel 4.4 Jangkauan Temperatur *Fire Ball* dan FEGT

Kondisi	Jangkauan Temperatur	
	Temperatur (K)	
	<i>Fire ball</i>	FEGT
100% Batubara	1900-2300	1500-1700
5% <i>Co-firing</i>	1900-2200	1400-1600
10% <i>Co-firing</i>	1800-2200	1400-1700
15% <i>Co-firing</i>	1800-2100	1400-1700
20% <i>Co-firing</i>	1800-2000	1400-1700
25% <i>Co-firing</i>	1200-1800	1300-1500
30% <i>Co-firing</i>	1200-1800	1300-1500
100% <i>Sawdust</i>	1200-1500	1200-1500

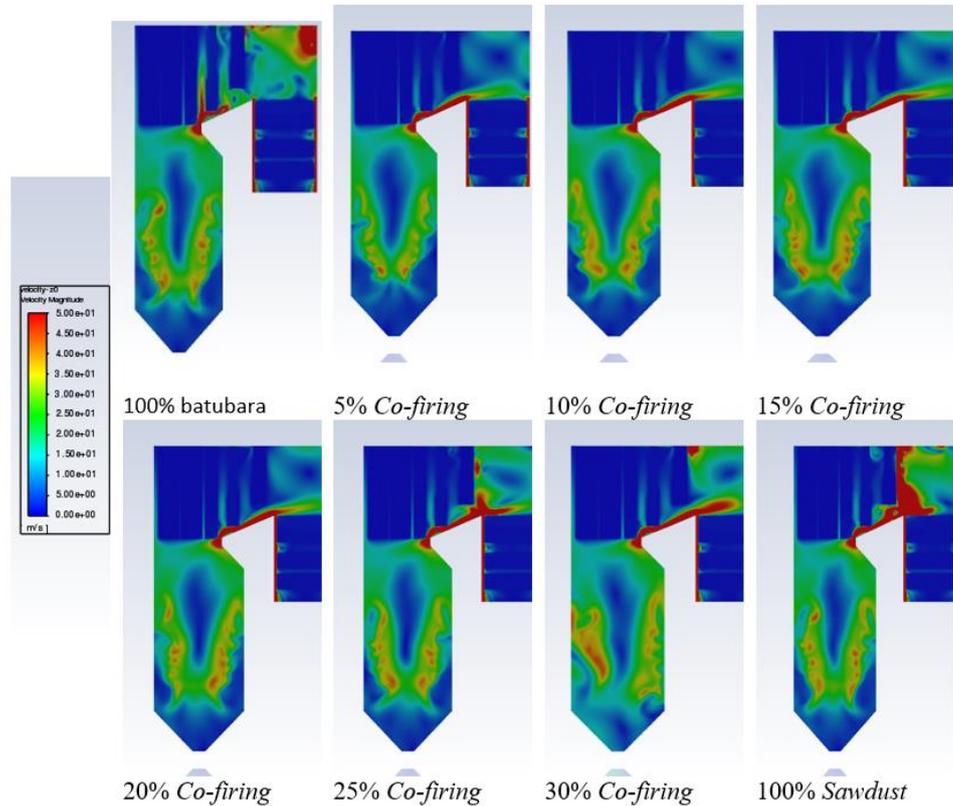
Dari **Tabel 4.4** dijelaskna bahwa pada kondisi 100% batubara jangkauan temperatur pada fenomena *fire ball* dan temperatur pada area FEGT sangat tinggi sedangkan pada kondisi 100% sawdust jangkauan temperatur pada fenomena fire ball dan temperatur pada area FEGT sangat rendah.

4.3.2 Distribusi Kecepatan

Distribusi kecepatan *flue gas* pembakaran batubara dan *Sawdust* diamati untuk memvalidasi distribusi temperatur masing-masing kondisi beserta posisi pembakaran *fire ball* pada tiap *burner*. Fenomena ini terjadi karena penginjeksian bahan bakar dan udara pembakaran ke pusat *furnace*, yang menghasilkan aliran berputar (*swirling flow*). Aliran ini memiliki keunggulan dalam meningkatkan efisiensi pembakaran dibandingkan dengan metode injeksi lainnya, serta menghasilkan distribusi suhu yang lebih merata di dalam boiler. Hal ini tentu sesuai dengan kondisi umum dimana distribusi temperatur pada *boiler* meningkat proporsional terhadap peningkatan kalori batubara.

1. Distribusi Kecepatan *Flue Gas* pada Z-Centre Boiler

Pengamatan distribusi kecepatan *flue gas* pada z-centre boiler untuk semua variasi komposisi ditunjukkan pada **Gambar 4.21**.



Gambar 4.21 Distribusi Temperatur *Flue Gas* pada Z-Centre

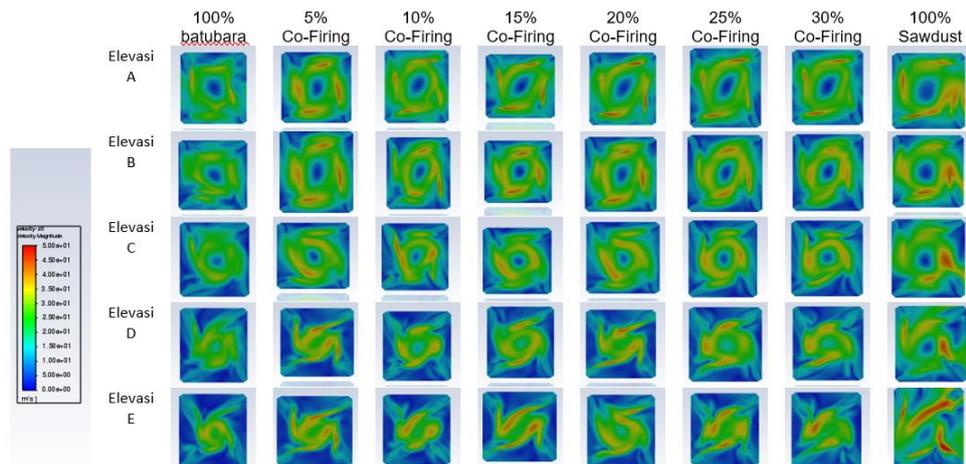
Berdasarkan **Gambar 4.21** *flue gas* membentuk *vortex motion* menuju ke atas yang kemudian akan melewati jajaran *heat exchanger*. Distribusi kecepatan ini menjadi validasi untuk kontur distribusi temperatur. daerah *furnace* memiliki kecepatan yang tinggi pada *radius furnace* disertai kecepatan rendah pada jangkauan 20-45 m/s pada pusat *furnace* untuk kondisi 100% batubara. Bertambahnya persentase *co-firing* akan menaikkan kecepatan *flue*

gas dalam *furnace* hingga jangkauan 30-50 m/s. Hal ini disebabkan *Mass Flow* bahan bakar + *primary air* akan meningkat seiring meningkatnya persentase *co-firing*. Peningkatan *Mass Flow* ini berdasarkan perhitungan kebutuhan bahan bakar dan udara pembakaran untuk menghasilkan *heat transfer* pada *main steam* agar proses *heat transfer* berlangsung secara optimal

Distribusi kecepatan *flue gas* pada *boiler* akan mengalami peningkatan hingga 30-50 m/s pada 100 % batubara dan 35-50 m/s pada 100% *sawdust* pada bagian *nose* akibat penyempitan area distribusi *flue gas*. Kecepatan tinggi pada dinding bagian *back-pass boiler* menandakan terjadinya aliran melewati *gap* antara dinding *boiler* dengan pipa penukar panas. Kecepatan tinggi ini menyebabkan terjadinya perpindahan panas yang tinggi pada daerah *superheater*

2. Distribusi Kecepatan *Flue Gas* pada *Burner Area*

Analisis distribusi kecepatan *flue gas* pada *burner area* dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran *flue gas* berdasarkan tinjauan yang diteliti. *Flue gas* membentuk aliran *swirl* pada seluruh elevasi *burner* masing-masing kondisi uji. Hal ini kemudian memvalidasi terbentuknya kontur *fire ball* pada distribusi temperatur daerah *burner* sebelumnya. Vektor kecepatan menunjukkan arah putaran *counter clock-wise* yang seragam yang akan meningkatkan turbulensi pada *radius fire ball*. Hal ini menjadi validasi terbentuknya *vortex motion* pada *radius fire ball* dan pusat *furnace*.



Gambar 4.22 Distribusi Kecepatan *Flue Gas* pada Masing-Masing Elevasi *Burner*

Elevasi *burner* A memiliki kontur kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan elevasi lainnya dengan jangkauan 20-35 m/s pada 100% batubara dan akan naik seiring bertambahnya persentase *co-firing sawdust* dalam bahan bakar dengan jangkauan 20-45 m/s pada kondisi 100%.

4.4 Analisis Efisiensi *Performance Test Boiler*

Performa dari boiler seperti efisiensi akan menurun seiring dengan bertambahnya usia, pembakaran yang tidak sempurna, pengoperasian dan pemeliharaan yang kurang maksimal. Kualitas bahan bakar dan kualitas air yang rendah juga menyebabkan penurunan efisiensi dari boiler. Uji efisiensi dapat membantu mengetahui seberapa besar efisiensi dari boiler yang digunakan pada sebuah pembangkit dengan menentukan deviasi abnormal. Setiap deviasi abnormal yang diamati dapat diteliti untuk menentukan area masalah untuk tindakan korektif yang diperlukan. Oleh karena itu, perlu untuk mengetahui tingkat efisiensi saat ini untuk evaluasi kinerja, yang merupakan prasyarat untuk tindakan konservasi energi dalam industri pembangkitan tenaga listrik. Ruang lingkup pengujian hanya berada di boiler PLTU PT X dengan menggunakan standart *ASME: PTC-4-1 Power Test Code for Steam Generating Units*. Dalam standar ini, terdapat 2 metode untuk menentukan efisiensi boiler yaitu *direct method* dan *indirect method*. Pada pembahasan kali ini problem solver nya menggunakan *direct method*. Perhitungan efisiensi boiler dengan metode langsung dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini:

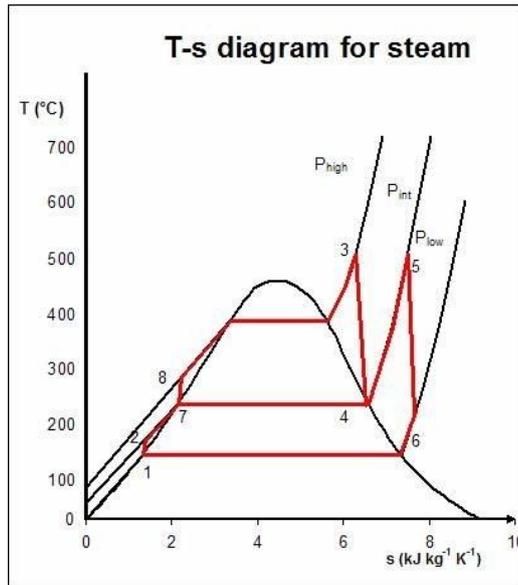
$$\text{Boiler efficiency } (\eta) = \frac{W_t}{Q_{in}} \times 100\%$$

$$\text{Boiler efficiency } (\eta) = \frac{(\dot{m}_s \times (h_s - h_f)) + (\dot{m}_r \times (h_g - h_c))}{q \times GCV}$$

Dimana:

\dot{m}_s	=	Turbin steam flow
\dot{m}_r	=	Reheat steam flow
h_s	=	Turbin steam entalphy
h_f	=	main feed water entalphy
h_g	=	hot reheat steam entalphy
h_c	=	cold reheat steam entalphy
q	=	total coal flow
GCV	=	Gross kalori value

Dengan T-S diagram yang disimulasikan sebagai berikut :



Gambar 4.23 T-s diagram boiler yang disimulasikan

Berikut adalah data dan perhitungan efisiensi *Boiler Performance test* secara *direct method*:

Tabel 4.5 data dan perhitungan efisiensi *Boiler Performance test* secara *direct method*

turbin steam flow	\dot{m}_s	1078647,008	kg/h
hot reheat steam flow	\dot{m}_r	1026184,769	kg/h
Turbin steam entalphy	h_s	817,0390131	kkal/kg
main feed water entalphy	h_f	178,9133911	kkal/kg
hot reheat steam entalphy	h_g	849,2194083	kkal/kg
cold reheat steam entalphy	h_c	740,9	kkal/kg
total coal flow	q	208433	kg/h
heat heating value	GCV	4363,4466	kkal/kg
Boiler efficiency (η)			
		$\frac{(\dot{m}_s \times (h_s - h_f)) + (\dot{m}_r \times (h_g - h_c))}{q \times GCV}$	
Boiler efficiency (η)			
		88%	

Hasil perhitungan efisiensi boiler dengan *Direct Method* didapat sebesar **88%**.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari simulasi dengan topik “Studi Numerik Karakteristik Boiler Dengan Variasi Komposisi Batubara dan Biomassa Di PLTU Berkapasitas 400 MW” yang berfokus pada aliran dari *flue gas* hasil pembakaran batubara dan udara pembakaran beserta karakteristik FEGT, didapatkan beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Distribusi temperatur menunjukkan hasil yang bervariasi berdasarkan nilai dari kalor yang terkandung dalam batubara maupun *co-firing* dengan *sawdust* di mana kondisi 100% batubara memiliki distribusi kontur temperatur yang paling tinggi kemudian menurun seiring bertambahnya persentase *co-firing sawdust*. Kontur temperatur pada elevasi *burner* menunjukkan sebuah aliran berbentuk *fire ball* sesuai harapan dengan temperatur yang terdistribusi merata dan divalidasi oleh aliran *swirl* dari kontur kecepatan pada *burner*.
2. Distribusi kecepatan pada pusat *furnace* cenderung lebih rendah dibandingkan kecepatan aliran pada *radius fire ball*. Distribusi kecepatan pada daerah *burner* menunjukkan pola aliran *swirl* dengan arah *counter clock-wise* seragam sehingga menyebabkan *flue gas* naik ke atas membentuk *vortex*
3. Analisis perbandingan antara data FEGT hasil simulasi numerik terhadap data FEGT aktual dari hasil uji lapangan memperlihatkan hasil kondisi 100% batubara dan *co-firing* 5%-30% menunjukkan perbedaan <8% sehingga perbedaan ini bisa diterima.
4. Analisis efisiensi menggunakan metode langsung (*direct method*) dengan data *performance test boiler* dimana efisiensi yang didapatkan sebesar 88%.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan oleh penulis setelah melakukan penelitian dan diharapkan bermanfaat untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

- a) Perlu dilakukan analisis lebih lanjut mengenai dampak *co-firing* terhadap beberapa problem yang sering terjadi pada operasi boiler seperti *slagging*, *fouling*, *erosi*, dsb.
- b) Simulasi dapat dilakukan dengan menambah titik validasi agar fenomena aktual di lapangan dapat dibandingkan dengan lebih akurat.

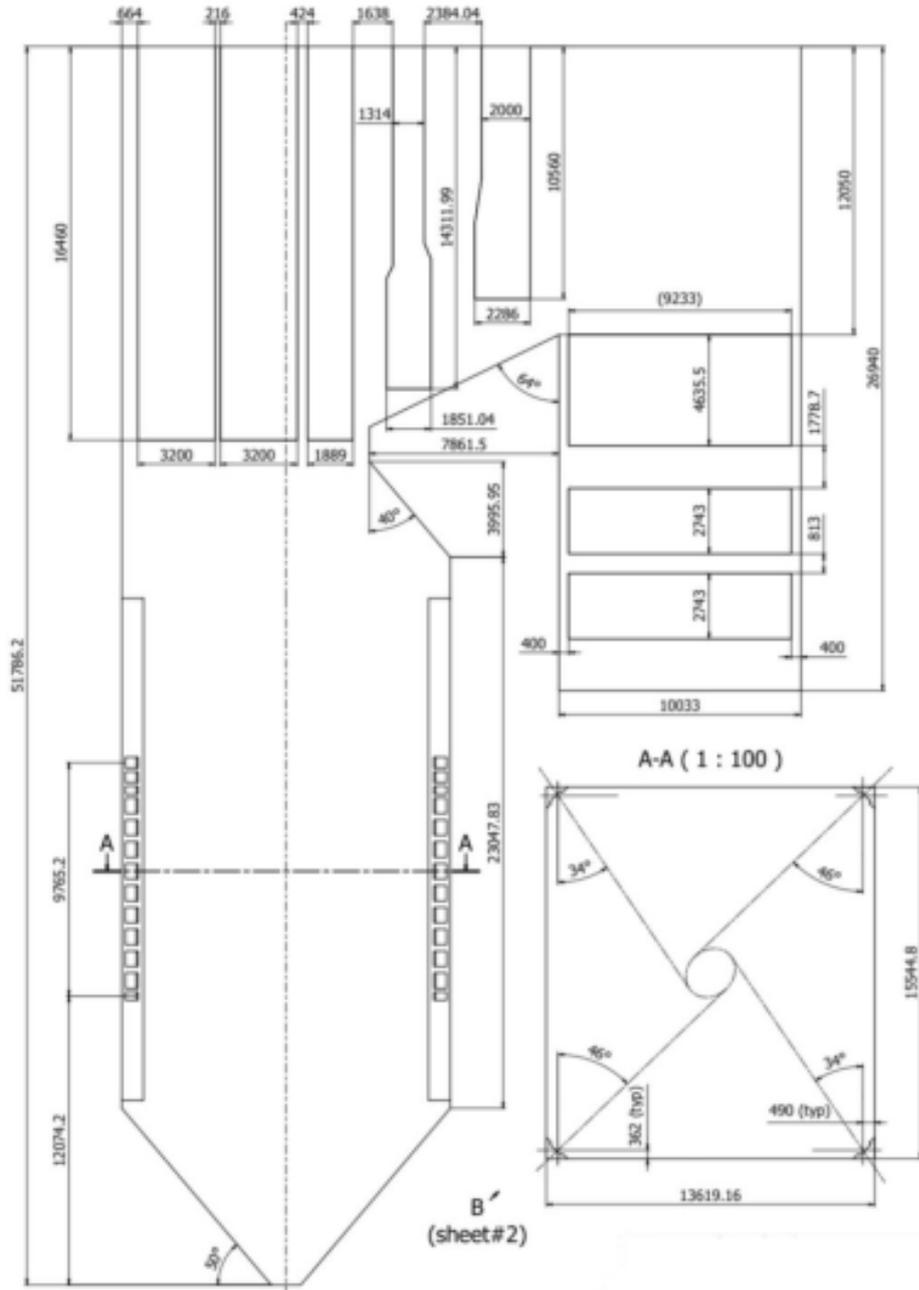
DAFTAR PUSTAKA

- Adamczyk, Wojciech P., Paweł Kozolub, Adam Klimanek, Ryszard A. Białecki, Marek Andrzejczyk, and Marcin Klajny. 2015. "Numerical Simulations of the Industrial Circulating Fluidized Bed Boiler under Air- and Oxy-Fuel Combustion." *Applied Thermal Engineering* 87: 127–36. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.04.056.
- ANSYS. 2009. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. <http://www.ansys.com>.
- ANSYS. 2017. *DIGITAL TWIN 4 Double Vision Replicating Product Performance during Operation 8 Creating a Digital Twin for a Pump Simulating an Operating Pump*.
- Ariningtyas, Nia. 2014. *NUMERICAL STUDY OF IN-FURNACE COAL BLENDING USING MEDIUM AND LOW RANK COAL IN TANGENTIAL BOILER WITH DIFFERENT COAL FEEDING CONFIGURATION*.
- "ASTM-D388-15." 2017.
- Bawono, Andi Agung. 2021. "STRATEGI PASOKAN BIOMASSA BERKELANJUTAN SEBAGAI BAHAN BAKAR COFIRING PLTU BATU BARA PADA PT ADC." *UNIVERSITAS GADJAH MADA*.
- Eflita Yohana, and Askhabulyamin. 2017. "PERHITUNGAN EFISIENSI DAN KONVERSI DARI BAHAN BAKAR SOLAR KE GAS BOILER EBARA HKL 1800 KA." *ROTASI* 14: 7–10.
- Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2021*. 2021. www.SDCpublications.com.
- Gungor, Afsin. 2008. "Two-Dimensional Biomass Combustion Modeling of CFB." *Fuel* 87(8–9): 1453–68. doi:10.1016/j.fuel.2007.08.013.
- GUSTI AGUNG ALDI BRAHMANTYA HIMAWAN. 2021. "KARAKTERISASI NUMERIK PROSES PEMBAKARAN PADA COAL BOILER DENGAN VARIASI NILAI KALOR (STUDI KASUS UP PAITON 1 & 2)."
- Jiang, Yu, Kyeong Hoon Park, and Chung Hwan Jeon. 2020. "Feasibility Study of Co-Firing of Torrefied Empty Fruit Bunch and Coal through Boiler Simulation." *Energies* 13(12). doi:10.3390/en13123051.
- Lampiran I Perpres Nomor 22 Tahun 2017*.

- Maskur, Zainal, Dan Ardi Nugroho, P T Pembangkitan, and Jawa Bali. 2021. *Analisa Karakteristik Biomasa Untuk Cofiring Pada Pembangkit Batubara Di Indonesia*.
- Moran, Michael J, and Howard N Shapiro. 2003. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons, Inc.
- N.M. Razali. 2009. *3rd International Conference on Energy and Environment (ICEE 2009) : 7-8 December 2009, Malacca, Malaysia*. ICEE 2009 Committee, Universiti Tenaga Nasional.
- Sekretariat Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. 2022. *STATISTIK KETENAGALISTRIKAN 2021*.
- Spliethoff, Hartmut. 2010. "Power Generation from Solid Fuels." *Power Systems* 21. doi:10.1007/978-3-642-02856-4.
- Yunus A. Cengel, and Michael A. Boles. 2017. *THERMODYNAMICS An Engineering Approach Fifth Edition*.
- Zhong Shengjun. 2009. *Feature: Coal Pulverization System: Explosion Prevention and Process Control Coal Pulverization System: Explosion Prevention and Process Control*. www.instm.org.uk.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Gambar Teknik *Boiler*



Lampiran 2 Coal calculator masing-masing kondisi

COAL CALCULATOR								
Fuel Samples	100% batubara	5% Co-Firing	10% Co-Firing	15% Co-Firing	20% Co-Firing	25% Co-Firing	30% Co-Firing	100% Sawdust
Proximate Analysis								
Volatile Matter	33,34%	35,41%	37,48%	39,56%	41,63%	43,70%	45,77%	74,78%
Fixed Carbon	33,51%	32,62%	31,74%	30,85%	29,97%	29,08%	28,19%	15,79%
Ash	5,16%	5,01%	4,85%	4,70%	4,55%	4,40%	4,24%	2,10%
Moisture	27,99%	26,96%	25,92%	24,89%	23,86%	22,82%	21,79%	7,32%
Ultimate Analysis								
Carbon (C)	80,46%	79,11%	77,76%	76,40%	75,05%	73,70%	72,35%	53,42%
Hydrogen (H)	4,47%	4,54%	4,61%	4,68%	4,75%	4,82%	4,89%	5,87%
Oksigen (O)	12,63%	14,00%	15,37%	16,74%	18,10%	19,47%	20,84%	40,00%
Nitrogen (N)	1,93%	1,86%	1,78%	1,71%	1,63%	1,56%	1,49%	0,45%
Sulfur (S)	0,51%	0,50%	0,48%	0,47%	0,46%	0,45%	0,43%	0,25%
Calorific Value								
HCV (J/kg)	19786816	19737509	19707267	19657026	19610971	19560729	19510488	19271840
HCV (kcal/kg)	4726	4719	4712	4705	4698	4690	4681	4603

Lampiran 3 Laju bahan Bakar

DATA LAJU BAHAN BAKAR									
Fuel Samples	100% batubara	5% Co-Firing	10% Co-Firing	15% Co-Firing	20% Co-Firing	25% Co-Firing	30% Co-Firing	100% Sawdust	
Metode	Performance test	Simulation	Simulation	Simulation	Simulation	Simulation	Simulation	Simulation	Simulation
Nilai Kalor									
HCV (J/kg)	18267008	19786816	19737509	19707267	19657026	19610971	19560729	19510488	19271840
HCV (kcal/kg)	4363	4726	4719	4712	4705	4698	4690	4681	4603
Bahan Bakar									
Laju Batubara (kg/s)	57,8980556	62,04576986	59,03091607	56,00710474	52,97429588	49,93244927	46,89152053	37,58534181	0
Laju Biomassa (kg/s)	0	0	3,10689032	6,223011637	9,348405155	12,48311232	15,63050684	18,79267091	63,70373851
Temperatur Bahan Bakar (°C)									
Burner Elevasi A	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38
Burner Elevasi B	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38
Burner Elevasi C	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38
Burner Elevasi D	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38
Burner Elevasi E	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38	64,38
Udara Bahan Bakar									
Laju Primary Air (kg/s)	122,5117704	122,5117704	122,5117704	122,5117704	122,5117704	122,5117704	122,5117704	122,5117704	122,5117704
Laju Secondary Air (kg/s)	291,4448886	439,4181535	436,3858779	433,344593	430,2942585	427,2348341	424,2828416	421,4369397	375,1689726
Temperatur Udara Pembakaran (°C)									
Burner Elevasi A	363	363	363	363	363	363	363	363	363
Burner Elevasi B	363	363	363	363	363	363	363	363	363
Burner Elevasi C	363	363	363	363	363	363	363	363	363
Burner Elevasi D	363	363	363	363	363	363	363	363	363
Burner Elevasi E	363	363	363	363	363	363	363	363	363

Lampiran 3 AFR

AFR			
Sampel	Theoretical Air Required	Excess Air	AFR
100% batubara	7,54725	20	9,0567
5% Co-Firing	7,49540525	20	8,9944863
10% Co-Firing	7,4435605	20	8,9322726
15% Co-Firing	7,39171575	20	8,8700589
20% Co-Firing	7,339871	20	8,8078452
25% Co-Firing	7,28802625	20	8,7456315
30% Co-Firing	7,2361815	20	8,6834178
100% Sawdust	6,510355	20	7,812426

Lampiran 4 Kebutuhan Udara Pembakaran

KEBUTUHAN UDARA PEMBAKARAN			
Sampel	Total Air Ratio (kg/h)	PA Rate (kg/h)	SA Rate (kg/h)
100% batubara	2023514,31	441165,9	1582348,41
5% Co-Firing	2012595,06	441165,9	1571429,16
10% Co-Firing	2001643,368	441165,9	1560477,468
15% Co-Firing	1990659,089	441165,9	1549493,189
20% Co-Firing	1979642,076	441165,9	1538476,176
25% Co-Firing	1969011,927	441165,9	1527846,027
30% Co-Firing	1958763,81	441165,9	1517597,91
100% Sawdust	1792152,478	441165,9	1350986,578

SECONDARY AIR			
Sampel	SA Rate (kg/s)	SA per elevasi burner (kg/s)	SA per burner (kg/s)
100% batubara	439,4181535	109,8545384	18,30908973
5% Co-Firing	436,3858779	109,0964695	18,18274491
10% Co-Firing	433,344593	108,3361482	18,05602471
15% Co-Firing	430,2942585	107,5735646	17,92892744
20% Co-Firing	427,2348341	106,8087085	17,80145142
25% Co-Firing	424,2828416	106,0707104	17,67845173
30% Co-Firing	421,4369397	105,3592349	17,55987249
100% Sawdust	375,1689726	93,79224315	15,63204052

PRIMARY AIR			
Sampel	SA Rate (kg/s)	PA per burner (kg/s)	PA per burner (kg/s)
100% batubara	122,5117704	20,41862841	5,104657101
5% Co-Firing	122,5117704	20,41862841	5,104657101
10% Co-Firing	122,5117704	20,41862841	5,104657101
15% Co-Firing	122,5117704	20,41862841	5,104657101
20% Co-Firing	122,5117704	20,41862841	5,104657101
25% Co-Firing	122,5117704	20,41862841	5,104657101
30% Co-Firing	122,5117704	20,41862841	5,104657101
100% Sawdust	122,5117704	20,41862841	5,104657101

Lampiran 5 Modul heat Exchanger

Heat Exchanger	Volume HE (m3)	Diameter Pipa (m)	Panjang Tube (m)	Jumlah Tube	Volume tube (m3)	Porosity	Heat Flux
<i>Cold Superheater</i>	664,1777016	0,057	10,1	6384	164,4499025	0,752400747	72138,16813
<i>Economiser</i>	786,1227338	0,051	1,36	2496	6,93096169	0,991183359	112066,4128
<i>Final Reheater</i>	411,1482662	0,06	11,5	832	27,039168	0,934234994	360662,9988
<i>Final Superheater</i>	374,6552832	0,051	10,04	1886	38,66209736	0,896806213	60781,9636
<i>Medium Reheater</i>	482,5624288	0,06	13,75	864	33,57288	0,930427903	100394,4744
<i>Platen Division</i>	817,46944	0,051	15	6048	185,2307352	0,77340959	54773,73956
<i>Platen Superheater</i>	817,46944	0,051	15	6048	185,2307352	0,77340959	54773,73956
<i>Wall tube</i>							122559,8722

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Hervian Qidam Yultrianto lahir di Kabupaten Kediri provinsi Jawa Timur. Penulis merupakan anak ketiga dari 4 bersaudara. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN Minggiran 2, kemudian melanjutkan SLTP di SMPN 8 Kota Kediri, dan SMAN 2 Pare. Pada tahun 2020, penulis melanjutkan pendidikan Sarjana Terapan di Departemen Teknik Mesin Industri dengan peminatan Konversi Energi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama kuliah penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Departemen Teknik Mesin Industri, selain itu penulis juga melakukan beberapa kegiatan pengabdian masyarakat diantaranya kegiatan kampus mengajar di SMPN 4 Tulungagung. Penulis juga aktif mengikuti kompetisi kompetisi, seperti Liga PKM(Program Kreatifitas Mahasiswa) ITS yang mana penulis lolos sampai tingkat SIMBELMAWA. Untuk mendapatkan pengalaman praktis dari ilmu yang sudah dipelajari, penulis melakukan kegiatan magang industri di PT PLN Nusantara Power UP Paiton Unit 1 & 2 yang mana penulis bertanggung jawab melakukan tugas di divisi Har pemeliharaan 1, selain itu sebagai luaran penulis juga melakukan penelitian mengenai Pemeliharaan dan Perawatan *Coal Feeder* pada PT PLN nusantara power UP Paiton unit 1 & 2. Penulis menyelesaikan Pendidikan sarjana terapan dengan topik Proyek Akhir berjudul: “ Studi Numerik Karakteristik Boiler Dengan Variasi Komposisi Batubara dan Biomassa Di PLTU Berkapasitas 400 MW”.