

**KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA PADA PEMBAKARAN
BATUBARA-*WOODCHIPS* DALAM *FURNACE CIRCULATING
FLUIDIZED BED* SECARA NUMERIK
(STUDI KASUS UP SEBALANG)**

(Tesis)

Oleh

**MOH. ROSIFAUZ AZIS
NPM 2325021004**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA PADA PEMBAKARAN BATUBARA-*WOODCHIPS* DALAM *FURNACE CIRCULATING FLUIDIZED BED* SECARA NUMERIK (STUDI KASUS UP SEBALANG)

Oleh

Moh. Rosifaul Azis

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis batu bara masih menjadi tulang punggung penyedia energi listrik di Indonesia, namun menghasilkan emisi gas rumah kaca yang tinggi. Salah satu solusi untuk mengurangi dampak lingkungan tersebut adalah melalui teknologi *high co-firing*, yaitu pencampuran batubara dengan biomassa seperti *woodchips*. Meskipun implementasi *co-firing* telah dilakukan, masih terdapat keterbatasan dalam pemahaman karakteristik aliran fluida dan pembakaran dalam *furnace* secara menyeluruh, khususnya pada sistem boiler tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik aliran fluida dalam *furnace* CFB PLTU Sebalang melalui pendekatan simulasi numerik menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan model *multiphase Eulerian*, *k-ε turbulence* model, serta *discrete phase* untuk injeksi partikel batu bara. Simulasi dilakukan untuk tiga variasi bahan bakar: 100% batu bara, 90% batu bara + 10% *woodchips*, dan 80% batu bara + 20% *woodchips*. Parameter yang diamati meliputi distribusi temperatur, tekanan, kecepatan udara, dan fraksi volume material padat (pasir) di dalam *furnace*.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan fraksi *woodchips* menurunkan temperatur rata-rata *furnace* dari 945 °C menjadi 810 °C dan tekanan dari 224 Pa menjadi 88 Pa. Kecepatan aliran udara meningkat dari 4,7 m/s menjadi 7,5 m/s, serta terjadi penurunan fraksi volume pasir di zona *dense phase* dari 0,703 menjadi 0,655. Meskipun terdapat perbedaan nilai antara hasil simulasi dan data aktual, tren perubahannya tetap linear dan konsisten. Ketidaksesuaian disebabkan oleh terbatasnya cakupan simulasi yang tidak mencakup efek *induced draft fan* dan area *backpass*.

Implikasi dari temuan ini menegaskan bahwa meskipun *co-firing* dengan *woodchips* berpotensi mengurangi emisi dan mendukung transisi energi bersih, diperlukan pengaturan yang cermat terhadap rasio bahan bakar, distribusi udara, dan sistem pencampuran agar efisiensi pembakaran dan stabilitas aliran tetap optimal. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan strategi operasional PLTU dalam menerapkan *co-firing* secara lebih efektif dan berkelanjutan.

Kata kunci: *co-firing*, *woodchips*, *Circulating Fluidized Bed*, simulasi numerik, fluidisasi.

ABSTRACT

NUMERICAL STUDY OF FLUID FLOW CHARACTERISTICS IN COAL AND WOODCHIP CO-FIRING WITHIN A CIRCULATING FLUIDIZED BED FURNACE (CASE STUDY AT UP SEBALANG)

By

Moh. Rosifaul Azis

Coal-fired power plants remain the backbone of electricity generation in Indonesia but are major contributors to greenhouse gas emissions. One promising solution to mitigate these environmental impacts is the implementation of high co-firing technology, which involves blending coal with biomass such as woodchips. While co-firing has been applied in practice, there remains a knowledge gap regarding the comprehensive understanding of fluid flow and combustion characteristics within the furnace, particularly in Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler systems.

This study aims to analyze the fluid flow characteristics within the CFB furnace at PLTU Sebalang through a numerical simulation approach using Computational Fluid Dynamics (CFD). The simulation employs a multiphase Eulerian model, a $k-\epsilon$ turbulence model, and a discrete phase model for coal particle injection. Simulations were conducted for three fuel compositions: 100% coal, 90% coal + 10% woodchips, and 80% coal + 20% woodchips. The observed parameters include temperature distribution, pressure, air velocity, and the volume fraction of solid materials (sand) within the furnace.

The simulation results indicate that increasing the woodchips fraction reduces the average furnace temperature from 945 °C to 810 °C and the pressure from 224 Pa to 88 Pa. Airflow velocity increases from 4.7 m/s to 7.5 m/s, accompanied by a decrease in sand volume fraction in the dense phase zone from 0.703 to 0.655. Although numerical differences exist between the simulation results and actual data, the overall trend remains linear and consistent. The discrepancies are primarily due to the limited scope of the simulation, which does not account for the effects of the induced draft fan and the backpass area.

These findings imply that although co-firing with woodchips has the potential to reduce emissions and support a cleaner energy transition, careful control of fuel ratio, air distribution, and mixing systems is essential to maintain combustion efficiency and flow stability. The results of this study may serve as a reference for optimizing operational strategies in implementing co-firing technology more effectively and sustainably in coal-fired power plants.

Keywords: *co-firing, woodchips, Circulating Fluidized Bed, numerical simulation, fluidization.*

**KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA PADA PEMBAKARAN
BATUBARA-*WOODCHIPS* DALAM *FURNACE CIRCULATING
FLUIDIZED BED* SECARA NUMERIK
(STUDI KASUS UP SEBALANG)**

Oleh

Moh. Rosifaul Azis

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK**

Pada

**Program Studi Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Tesis : KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA
PADA PEMBAKARAN BATUBARA-
WOODCHIPS DALAM FURNACE
CIRCULATING FLUIDIZED BED
SECARA NUMERIK (STUDI KASUS
UP SEBALANG)

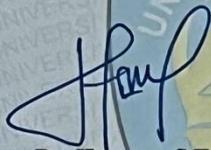
Nama Mahasiswa : **Moh Rosifaul Aeis**
No Pokok Mahasiswa : 2325021004
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

Ketua

Anggota



Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP. 196906202000031001



Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP. 197103311999031003

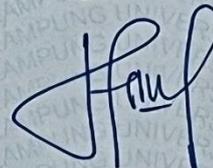
MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



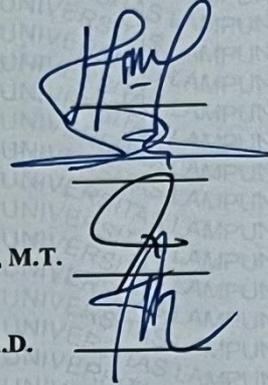
Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, Ph.D.
NIP. 197108171998021003



Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP. 196906202000031001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji
- Ketua : **Dr. Harmen, S.T., M.T**
- Anggota Penguji : **Dr. Amrul, S.T., M.T.**
- Penguji Utama I : **Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.**
- Penguji Utama II : **Prof. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)
NIP. 197509282001121002

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis: **27 Mei 2025**

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sungguh-sungguh bahwa, sejauh pengetahuan saya, naskah tesis ini tidak memuat karya ilmiah orang lain yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di perguruan tinggi mana pun. Selain itu, tidak terdapat ide maupun hasil karya yang telah dipublikasikan oleh pihak lain, kecuali apabila telah dicantumkan secara tertulis dalam kutipan maupun daftar pustaka.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa tesis ini mengandung unsur plagiarisme, saya bersedia menerima sanksi berupa pembatalan gelar Magister serta menjalani proses sesuai ketentuan hukum yang berlaku, sebagaimana diatur dalam Undang-undang Nomor 20 Tahun 2002, Pasal 25 Ayat 2 dan Pasal 70.

Bandar Lampung, 27 Mei 2025

Yang Membuat



Moh. Rosifaul Azis
NPM 2125021004

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Moh. Rosifaul Azis merupakan putra dari seorang buruh bangunan, lahir di Malang pada tanggal 3 Mei 1993. Gelar Sarjana Teknik Mesin diperoleh dari Universitas Muhammadiyah Malang. Dengan pengalaman kerja yang diperoleh selama bertahun-tahun, telah banyak tantangan dan peluang profesional yang ditempuh untuk mengembangkan kemampuan di berbagai sektor industri.

Karier profesional dimulai sebagai *Mechanical Engineer* di PT United Tractors Tbk pada periode 2010 hingga 2011, memberikan pemahaman mendalam terkait industri alat berat. Selain pengalaman di bidang teknik, keterlibatan dalam dunia pendidikan sebagai *Education Mentor* di Lembaga Pendidikan Primagama dari 2011 hingga 2015 turut memperkuat kemampuan komunikasi dan pembimbingan.

Pengalaman teknis semakin berkembang melalui posisi sebagai *Mechanic Engineer* di PT Pama Persada Nusantara dari 2015 hingga 2018, dengan partisipasi dalam berbagai proyek berskala besar. Kompetensi manajerial turut diperoleh saat menjabat sebagai *Branch Manager* di Edulab Indonesia pada 2018, serta dalam peran sebagai *Production Planning Inventory Control* di PT Mega Global Food Industri dari 2018 hingga 2019, yang memperdalam pemahaman terkait strategi produksi dan efisiensi industri.

Sejak Desember 2019 hingga saat ini, aktif berkontribusi di sektor energi nasional sebagai *Assistant Engineering* di PT PLN (Persero), dengan keterlibatan langsung dalam pengembangan dan implementasi proyek-proyek strategis ketenagalistrikan.

Dengan latar belakang pendidikan yang kuat dan pengalaman lintas sektor industri, penulisan tesis ini diharapkan dapat menjadi wujud kontribusi nyata dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan praktik di bidang keteknikan, khususnya dalam mendukung pemanfaatan energi terbarukan dan efisiensi sistem pembangkit listrik.

UCAPAN TERIMAKASIH

Dengan penuh rasa syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tesis ini.

Pertama-tama, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T., selaku Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan, motivasi, serta arahan yang sangat berharga selama masa studi penulis. Penulis juga menyampaikan terima kasih yang tulus kepada Dr. Harmen, S.T., M.T., selaku Pembimbing I sekaligus Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin, yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan dukungan yang sangat berarti selama proses penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku Pembimbing II, atas saran dan masukan yang konstruktif yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini.

Selanjutnya, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Universitas Lampung, khususnya Jurusan Teknik Mesin Program Studi Magister Teknik Mesin, yang telah menyediakan fasilitas dan lingkungan akademik yang kondusif untuk belajar dan berkarya. Penulis juga berterima kasih kepada seluruh civitas akademika, termasuk dosen, staf, dan teman-teman Angkatan 2023, yang telah memberikan dukungan dan inspirasi selama proses studi ini. Kebersamaan dan kolaborasi yang terjalin telah memperkaya pengalaman belajar penulis.

Dengan penuh rasa cinta, hormat, dan ketulusan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua tercinta, Ibu Siti Siam dan Bapak Rohim. Mereka adalah sumber inspirasi, kekuatan, dan semangat yang tak pernah padam dalam setiap langkah hidup penulis. Meski tidak pernah mengenyam pendidikan hingga bangku perkuliahan, mereka tak pernah lelah berjuang dan memberikan yang terbaik demi masa depan anak-anaknya. Doa, pengorbanan, dan dukungan tanpa henti dari mereka adalah anugerah terbesar yang penulis syukuri.

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada saudara-saudara tersayang Churotul Istiqomah, Heri Supriyanto serta adik-adik tercinta, Haris Eka Pradana Putra, Azharuddin Nizam Maulana, dan Hendrik Hendarto. Kehadiran

kalian, dukungan yang tulus, serta keceriaan yang kalian bawa, telah menjadi penyemangat dan motivasi luar biasa dalam perjalanan ini. Kalian semua adalah alasan penulis untuk terus melangkah dan tidak menyerah.

Akhir kata, penulis berharap semoga semua kebaikan yang telah diberikan dapat dibalas oleh Tuhan Yang Maha Esa, dan semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak.

Bandar Lampung, 27 Mei 2025

Penulis

Moh. Rosifaul Azis

MOTTO

*“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya
Dia mendapat (pahala) dari (kebijakan) yang dikerjakannya dan mendapat
(siksa) dari (kejahatan) yang di perbuatnya “*

(Q.S. Al-Baqarah : 286)

*“Maka sesungguhnya Bersama kesulitan itu ada kemudahan.
Sesungguhnya Bersama kesulitan itu ada kemudahan”*

(Q.S. Al-Insyirah : 5-6)

*“Mimpi tidak ditentukan oleh latar belakang, tetapi oleh seberapa besar kemauan
untuk berjuang. Dalam keterbatasan, langkah demi langkah terus diambil meski
harus menempuh jalan yang penuh tantangan. Banyak yang hanya melihat hasil
akhirnya, tanpa tahu betapa beratnya proses yang dilalui. No matter what, the
determination to keep going is what keeps me standing strong.”*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul: **"Karakteristik Aliran Fluida Pada Pembakaran Batubara-Woodchips Dalam Furnace Circulating Fluidized Bed Secara Numerik (Studi Kasus UP Sebalang)."**

Tesis ini disusun sebagai bentuk kontribusi ilmiah dalam mendukung pemanfaatan energi terbarukan melalui penerapan teknologi *co-firing* biomassa pada pembangkit listrik tenaga uap. Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk menganalisis karakteristik aliran fluida, termasuk distribusi temperatur, tekanan, kecepatan udara, dan distribusi material padat, dalam sistem *furnace Circulating Fluidized Bed* (CFB) yang menggunakan campuran batubara dan *woodchips* sebagai bahan bakar. Melalui pendekatan simulasi numerik, diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan gambaran yang lebih mendalam mengenai performa termal dan potensi optimasi sistem pembakaran pada PLTU Sebalang.

Penulis menyadari bahwa penyusunan tesis ini tidak lepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan kontribusi dan motivasi selama proses penelitian berlangsung.

Semoga tesis ini dapat memberikan manfaat, baik sebagai referensi akademik maupun sebagai masukan praktis dalam pengembangan teknologi energi bersih dan

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	vi
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	vii
UCAPAN TERIMAKASIH.....	viii
MOTTO	x
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Manfaat.....	5
1.5 Batasan Masalah.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Bahan Bakar Padat	7
2.1.1 Batu Bara.....	8
2.1.2 Grade Batubara.....	9

2.1.3	Biomassa	11
2.2	<i>Co-Firing</i>	12
2.1.4	Teknologi <i>Co-Firing</i>	13
2.3	<i>Boiler</i>	16
2.3.1	Jenis <i>Boiler</i>	17
2.4	Klasifikasi <i>Fluidized Bed</i>	24
2.4.1	<i>Superficial Gas Velocity</i>	25
2.4.2	<i>Pressure Drop – Persamaan Ergun</i>	25
2.4.3	Kecepatan Transisi ke <i>Turbulent Bed</i> (U_c)	26
2.4.4	<i>Terminal Velocity</i>	26
2.5	Simulasi	27
2.5.1	<i>Software ANSYS</i>	28
2.5.2	<i>OpenFOAM</i>	29
2.5.3	<i>COMSOL Multiphysics</i>	30
2.5.4	<i>CFD++ (Metacomp Technologies)</i>	31
2.6	Persamaan-Persamaan Dasar dalam Simulasi CFD	32
2.6.1	Persamaan Kontinuitas	32
2.6.2	Persamaan Momentum (<i>Navier-Stokes</i>)	33
2.6.3	Persamaan Energi	33
2.6.4	Model Turbulensi Standard $k-\varepsilon$	34
2.6.5	Model <i>Multiphase Eurlian</i>	34
2.6.6	<i>Discrete Phase Model</i> (DPM)	35
2.6.7	Model Reaksi Pembakaran	35
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		37
3.1	Tahapan Penelitian	37

3.2	Tempat dan Waktu Penelitian	38
3.2.1	Tempat Penelitian.....	38
3.2.2	Waktu Penelitian	39
3.3	Langkah-langkah Penelitian.....	40
3.3.1	<i>Pre-processing</i>	40
3.3.2	<i>Processing</i>	43
3.3.3	<i>Post-processing</i>	52
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	54
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		55
4.1	Pengecekan Model Geometri dan Titik Validasi.....	55
4.1.1	Pengecekan Geometri.....	56
4.1.2	Penentuan Titik Validasi	56
4.2	Analisa Karakteristik Fluidisasi	57
4.2.1	Distribusi Temperatur	58
4.2.2	Distribusi Tekanan	62
4.2.3	Distribusi Kecepatan Udara	67
4.2.4	Distribusi <i>Bed Material</i> (Volume Fraksi) Pada <i>Furnace</i>	82
BAB V PENUTUP.....		88
5.1	Kesimpulan.....	88
5.2	Saran.....	89
DAFTAR PUSTAKA.....		91

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian.....	39
Tabel 3. 2 Pemilihan Model Simulasi	44
Tabel 3. 3 Properti Udara PLTU Sebalang	47
Tabel 3. 4 Properti Pasir.....	47
Tabel 3. 5 Properti Karakteristik <i>Woodchips</i> dan Batubara PLTU Sebalang	48
Tabel 3. 6 <i>Setting Properties Boundary</i>	49
Tabel 4. 1 Validasi Distribusi Temperatur	60
Tabel 4. 2 Validasi Distribusi Tekanan.....	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Usia Geologis Batubara.....	9
Gambar 2.2 (A) <i>Grade</i> batubara berdasarkan nilai kalor (B) <i>grade</i> batubara berdasarkan komposisi penyusun	10
Gambar 2.3 Klasifikasi Biomassa	12
Gambar 2.4 Perbandingan biaya pengurangan CO ₂ menggunakan teknologi CCS dan <i>Co-firing</i>	13
Gambar 2.5 Skema Teknologi <i>Co-firing</i>	14
Gambar 2.6 Skema <i>Boiler</i>	17
Gambar 2.7 <i>Boiler</i> Pipa Api	18
Gambar 2.8 <i>Boiler</i> Pipa Air	20
Gambar 2.9 <i>Pulverized Coal Furnace</i>	21
Gambar 2.10 <i>Bubbling Fluidized Bed</i> (BFB).....	23
Gambar 2.11 <i>Circulating Fluidized Bed</i> (CFB)	23
Gambar 2.11 <i>Stoker Boiler</i>	24
Gambar 3. 1 PLTU Sebalang 2 x 100 MW	39
Gambar 3.2 <i>Drawing Boiler</i> PLTU Sebalang.....	41
Gambar 3.3 Skema Simulasi <i>Boiler</i> CFB	42
Gambar 3.4 <i>Meshing</i> Desain Simulasi	43
Gambar 3.5 Monitoring Residual.....	52
Gambar 3.5 Diagram Alir Penelitian	54
Gambar 4.1 <i>Pathline</i> Udara Sepanjang Geometri CFB <i>Boiler</i>	56
Gambar 4.2 Penentuan Titik Validasi	57
Gambar 4.3 Kontur Distribusi Temperatur [A] Batubara 100%, [B] Batubara 90% <i>Woodchips</i> 10%, [C] Batubara 80% <i>Woodchips</i> 20%	59

Gambar 4.4 Grafik Distribusi Temperatur	61
Gambar 4.5 Kontur Distribusi Tekanan [A] Batubara 100%, [B] Batubara 90% <i>Woodchips</i> 10%, [C] Batubara 80% <i>Woodchips</i> 20%	63
Gambar 4.6 Grafik Distribusi Tekanan.....	66
Gambar 4.7 Kontur Distribusi Kecepatan Udara <i>Superficial</i> [A] Batubara 100%, [B] Batubara 90% <i>Woodchips</i> 10%, [C] Batubara 80% <i>Woodchips</i> 20%	69
Gambar 4.8 Sumbu Tengah <i>Furnace</i>	72
Gambar 4.9 Grafik Kecepatan Udara (<i>Superficial</i>) pada elevasi 0 Meter	75
Gambar 4.10 Plot Kontur Distribusi Kecepatan Udara <i>Superficial</i> pada Berbagai Variasi Bahan Bakar di Pusat <i>Furnace</i> pada Elevasi 1 Meter	75
Gambar 4.11 Grafik Distribusi Kecepatan Udara <i>Superficial</i> pada Berbagai Variasi Bahan Bakar di Pusat <i>Furnace</i> pada Elevasi 1 Meter	76
Gambar 4.12 Plot Kontur Distribusi Kecepatan Udara <i>Superficial</i> pada Berbagai Variasi Bahan Bakar di Pusat <i>Furnace</i> pada Elevasi 10 Meter	77
Gambar 4.13 Grafik Distribusi Kecepatan Udara <i>Superficial</i> pada Berbagai Variasi Bahan Bakar di Pusat <i>Furnace</i> pada Elevasi 10 Meter	77
Gambar 4.14 Plot Kontur Distribusi Kecepatan Udara <i>Superficial</i> pada Berbagai Variasi Bahan Bakar di Pusat <i>Furnace</i> pada Elevasi 20 Meter	79
Gambar 4.15 Grafik Distribusi Kecepatan Udara <i>Superficial</i> pada Berbagai Variasi Bahan Bakar di Pusat <i>Furnace</i> pada Elevasi 20 Meter	79
Gambar 4.16 Plot Kontur Distribusi Kecepatan Udara <i>Superficial</i> pada Berbagai Variasi Bahan Bakar di Pusat <i>Furnace</i> pada Elevasi 30 Meter	81
Gambar 4.17 Grafik Distribusi Kecepatan Udara Vertikal pada Berbagai Variasi Bahan Bakar di Pusat <i>Furnace</i> pada Elevasi 30 Meter.....	81
Gambar 4.18 Plot Kontur Distribusi <i>Bed Material</i> dengan Variasi Bahan Bakar	83
Gambar 4.19 Grafik Perbandingan Volume Fraksi untuk Setiap Variasi Bahan Bakar	85

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. <i>Drawing Boiler</i> PLTU Sebalang	95
Lampiran 2. <i>Log Sheet</i> Temperatur Batubara 100%.....	96
Lampiran 3. <i>Log Sheet</i> Temperatur Batubara 90 % + <i>Woodchips</i> 10 %	97
Lampiran 4. <i>Log Sheet</i> Temperatur Batubara 80 % + <i>Woodchips</i> 20 %	98
Lampiran 5. <i>Log Sheet Pressure</i> Batubara 100%	99
Lampiran 6. <i>Log Sheet Pressure</i> Batubara 90 % + <i>Woodchips</i> 10 %.....	100
Lampiran 7. <i>Log Sheet Pressure</i> Batubara 80 % + <i>Woodchips</i> 20 %.....	101
Lampiran 8. <i>Blending Woodchips</i> PLTU Sebalang	102
Lampiran 9. Pengambilan Sampling Bahan Bakar	103
Lampiran 10. Pengambilan Data Parameter.....	104
Lampiran 11. Input Karakteristik / Sifat Bahan Bakar	105

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di era industri 4.0 yang kita hadapi saat ini, kebutuhan akan energi menjadi semakin penting, khususnya energi listrik. Setiap peralatan rumah tangga, bisnis, dan industri memerlukan pasokan energi listrik untuk beroperasi secara optimal. Namun, di Indonesia, mayoritas energi listrik masih dihasilkan dari bahan bakar fosil, seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Meskipun demikian, penerapan energi baru dan terbarukan masih belum mencapai tingkat yang diharapkan. Pada tahun 2025, Indonesia menetapkan target ambisius di mana 23% dari total energi yang digunakan berasal dari sumber energi terbarukan, dengan gas alam 22%, minyak bumi 25%, dan batu bara 30%. Sebagai perbandingan, pada tahun 2020, kontribusi energi terbarukan masih terbilang rendah, dengan hanya mencapai 11,20% dari total produksi energi, sementara gas alam sekitar 19,16%, minyak bumi sekitar 31,60%, dan batu bara mencapai sekitar 38,04%. Dengan demikian, upaya untuk meningkatkan porsi energi terbarukan dalam "bauran energi" nasional menjadi semakin mendesak dalam rangka mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (Pribadi, 2021).

Untuk mencapai target bauran energi nasional pada tahun 2025, diperlukan percepatan dalam pengembangan kapasitas energi baru terbarukan. Salah satu potensi energi terbarukan yang bisa dikembangkan di Indonesia adalah penggunaan biomassa sebagai sumber bahan bakar. Sebagai upaya dalam pengembangan ini, muncul metode *high-cofiring*, di mana bahan bakar biomassa dicampur dengan bahan bakar batubara dalam proses pembakaran di *boiler* pembangkit listrik (PLTU). Kombinasi pembakaran batubara dan biomassa ini dianggap sebagai alternatif yang menjanjikan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca tanpa mengorbankan efisiensi dari proses pembangkitan energi listrik (Wander et al., 2020).

High co-firing menggabungkan sebagian batubara dengan bahan bakar terbarukan pada saat bersamaan dengan rasio tertentu. ini dapat mengurangi pemakaian batubara dan menekan biaya pokok produksi listrik (Xu et al., 2020). Konsep pengganti ini memiliki potensi untuk mengurangi emisi karbon dioksida yang dihasilkan oleh pembakaran batubara atau gas buang. *High Co-firing* dianggap sebagai metode jangka pendek yang paling menjanjikan untuk mencapai tujuan ini, karena memanfaatkan biomassa untuk mengurangi emisi.

Untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil, biomassa dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif yang efektif. Biomassa yang bercampur dengan batubara dimasukkan ke dalam *bunker* batubara, campuran biomassa dan batubara tersebut dialirkan keruang bakar atau *furnace*. Biomassa memiliki kemampuan untuk mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan oleh pembakaran batubara. Selain itu batubara yang dibakar menghasilkan gas CO₂, SO₂ dan NO_x. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa *high co-firing* penggunaan energi alternatif ini menguntungkan bagi dampak lingkungan. Biomassa yang digunakan dalam penelitian ini, menggunakan *woodchip*.

Penggunaan *furnace* tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB) dalam penelitian ini dipilih karena memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan dengan tipe *furnace* lainnya, seperti *pulverized coal (PC) boiler*. Salah satu kelebihan utama CFB adalah kemampuannya dalam membakar berbagai jenis bahan bakar dengan karakteristik yang beragam, termasuk biomassa seperti *woodchips*. CFB juga beroperasi pada temperatur pembakaran yang lebih rendah (sekitar 800–900 °C) sehingga dapat mengurangi pembentukan emisi NO_x secara signifikan. Selain itu, sistem sirkulasi material padat di dalam *furnace* memungkinkan pencampuran bahan bakar yang lebih homogen dan pembakaran yang lebih stabil dan efisien, terutama untuk campuran batubara dan biomassa dalam skenario *high co-firing*. Fleksibilitas dan efisiensi ini menjadikan CFB sebagai pilihan ideal untuk mencapai target pengurangan emisi dan optimalisasi proses pembakaran dalam studi ini.

Sesuai dengan penyampian laporan *Co-Firing* Biomass PT. PLN Nusantara Power pada bulan Desember Tahun 2023. Target MWh *Green Co-Firing* tahun 2023 adalah sebesar 471.674,91 MWh. Sedangkan untuk realisasi MWh *Green Co-Firing* secara korporat PT. PLN Nusantara Power telah memproduksi sebesar 529.662,50 MWh dengan pencapaian 112,29 % terhadap target tahun 2023. Sedangkan untuk target pemakaian biomassa *woodchips* secara kumulatif adalah sebesar 484.877,69 MT dan dapat di realisasikan pemakaian biomassa *woodchips* secara korporat PT. PLN Nusantara Power sebesar 540.713,74 MT dengan pencapaian 111,52 %. Sesuai arahan Direktur Operasi Pembangkit Batubara PT PLN Nusantara Power untuk unit PLTU agar tetap konsisten melakukan penerimaan pasokan biomassa dan memanfaatkannya untuk memproduksi GWh *Green* secara optimal, untuk mencapai target GWh Green korporat tahun 2024 sebesar 1.148,30 GWh atau naik 216,8 % dari realisasi GWh Green korporat pada tahun 2023. PLN Energi Primer Indonesia yang ditunjuk sebagai penyedia biomassa 25 PLTU PT PLN Nusantara Power seluruh Indonesia dengan total volume biomassa 1.088.657,76 MT sesuai target *High co-firing* PLTU PLN NP untuk tahun 2024, atau naik 201,34 % dari realisasi pemakaian biomassa *woodchips* pada tahun 2023 (Indarto, 2024)

PT PLN Nusantara Power UP Sebalang pada tahun 2024 di targetkan dapat melakukan pengujian *High Co-firing* (HCR) biomassa *woodchips* dengan komposisi 100 % batubara, 10 % *woodchips* dan 90 % batubara, 20% *woodchips* dan 80 % batubara pada pengaturan beban ± 85 MW Bruto selama 8 jam (2 jam stabilisasi dan 6 jam pengambilan data. Pengujian *High co-firing* ini agar mengetahui karakteristik fluidisasi yang meliputi karakteristik distribusi temperatur, distribusi tekanan, distribusi kecepatan udara, dan distribusi material jenuh didalam *furnace* dengan simulasi menggunakan aplikasi *ansys fluent*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perbandingan antara hasil simulasi dan data aktual

distribusi temperatur di dalam *furnace*, dan apa faktor-faktor yang mempengaruhi perbedaan tersebut?

2. Bagaimana perbandingan antara hasil simulasi dan data aktual distribusi di dalam *furnace*, serta apa implikasi dari perbedaan ini?
3. Bagaimana distribusi kecepatan udara *superficial* di dalam *furnace* yang dihasilkan dari simulasi, dan apa pengaruhnya terhadap pencampuran bahan bakar dan udara?
4. Bagaimana hasil simulasi volume fraksi material padat dan gas di dalam *furnace*, dan bagaimana hal ini berkontribusi terhadap pemahaman pembakaran secara keseluruhan?

1.3 Tujuan

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka dirumuskan masalah sebagai berikut:

Penelitian ini bertujuan untuk memahami karakteristik aliran yang terjadi selama pengoperasian PLTU Sebalang dengan menggunakan simulasi numerik, di mana rasio campuran bahan bakar antara batubara dan *woodchips* divariasikan. Karakteristik aliran yang dianalisis meliputi berbagai aspek penting, antara lain:

1. Distribusi temperatur pada *furnace*, yang berperan penting dalam memastikan efisiensi pembakaran dan stabilitas termal dalam proses, serta membandingkannya terhadap parameter aktual operasi.
2. Distribusi tekanan pada *furnace*, yang memberikan gambaran mengenai keseimbangan sistem dan pergerakan fluida dalam ruang pembakaran, serta membandingkannya terhadap parameter aktual operasi.
3. Distribusi kecepatan udara *superficial* pada *furnace*, yang sangat memengaruhi pencampuran bahan bakar dan udara, serta kinerja pembakaran secara keseluruhan.
4. Distribusi material bed pada *furnace*, yang mencerminkan pola pergerakan material padat dalam fluidisasi, termasuk interaksi antara bahan bakar dan udara.

1.4 Manfaat

Penelitian ini memiliki manfaat penting dalam menganalisis karakteristik aliran fluidisasi pada *furnace boiler* tipe CFB (*Circulating Fluidized Bed*) dengan mempertimbangkan variasi rasio campuran bahan bakar antara batubara dan *woodchips*. Melalui analisis ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh perbandingan kedua bahan bakar terhadap efisiensi pembakaran, stabilitas aliran, serta performa keseluruhan sistem *boiler*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengoptimalan penggunaan bahan bakar campuran untuk meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan operasi *furnace boiler* CFB

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Pengujian ini menggunakan biomassa *woodchips* dengan nilai kalori 3.202 kCal/kg.
2. Pengujian dilakukan dengan nilai kalori batubara sebesar 3.779 kCal/kg.
3. *Bed material* hanya terdiri dari pasir, sementara limestone tidak diperhitungkan.
4. Sifat pasir yang digunakan memiliki diameter 0,2 mm dan dianggap memiliki properti yang tetap.
5. Ukuran diameter batubara, *woodchips*, dan pasir dianggap konstan.
6. Simulasi karakteristik fluidisasi untuk area *furnace*, *cyclone* tanpa *section area backpass*.
7. *Ratio Co-firing* dilakukan dengan tiga perbandingan bahan bakar yaitu 100% batubara, campuran 10% *woodchips* dan 90% batubara, campuran 20% *woodchips* dan 80% batubara.
8. Pengaturan beban dilakukan pada beban 85 MW dan dilakukan pengujian selama 8 jam (2 jam stabilisasi dan 6 jam pengujian) diluar waktu beban puncak.
9. *Boiler* dalam kondisi *steady state*.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan akhir ini terdiri dari lima bab utama, dengan rincian sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan latar belakang permasalahan, tujuan dan manfaat penelitian, rumusan masalah serta sistematika penulisan laporan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menyajikan berbagai teori yang relevan sebagai dasar acuan penelitian, yang diperoleh dari sumber-sumber ilmiah yang terpercaya

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Di dalam bab ini dijelaskan mengenai lokasi dan waktu pelaksanaan penelitian, alat dan bahan yang digunakan, metode penelitian yang diterapkan, serta tahapan pelaksanaan dan teknik pengamatan yang dilakukan.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi penyajian data hasil penelitian disertai dengan pembahasannya untuk menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan sebelumnya.

BAB V. KESIMPULAN

Bagian akhir ini merangkum kesimpulan yang ditarik berdasarkan analisis data dan pembahasan yang telah dipaparkan pada bab sebelumnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bahan Bakar Padat

Bahan bakar padat adalah jenis material yang berbentuk padat dan utamanya tersusun atas unsur karbon (C) dan hidrogen (H). Ketika kedua unsur ini bereaksi dengan oksigen dalam kondisi suhu yang memadai, akan terjadi proses pembakaran yang melepaskan energi berupa panas. Selain itu, bahan bakar padat juga dapat mengandung ikatan karbon dengan oksigen (O), yang juga berperan dalam proses pembakaran dan pelepasan energi (Basu, 2018).

Karakteristik bahan bakar padat memainkan peran penting dalam proses pembangkitan energi. Ketika bahan bakar padat terbakar, ikatan kimia antara karbon, hidrogen, dan oksigen terurai, melepaskan energi panas yang kemudian dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, termasuk pembangkitan listrik dan proses industri. Penggunaan bahan bakar padat ini memiliki dampak signifikan pada lingkungan dan kesehatan manusia, sehingga penting untuk memahami sifat-sifatnya dan mengelola penggunaannya secara efisien dan berkelanjutan.

Biomassa adalah bahan organik yang berasal dari material tumbuhan, yang pada umumnya masih mempertahankan kandungan air dalam strukturnya meskipun telah mengalami proses pengeringan. Kehadiran oksigen dalam biomassa biasanya terkait erat dengan kandungan air yang masih tersisa dalam material tersebut. Unikinya, meskipun telah mengalami proses pengeringan, biomassa masih mengandung atom oksigen dalam bentuk air. Namun, perlu diperhatikan bahwa jumlah atom oksigen dalam biomassa cenderung memiliki hubungan yang berbanding terbalik dengan konsentrasi karbon yang ada di dalamnya. Dalam konteks ini, semakin tinggi konsentrasi karbon dalam biomassa, semakin rendah kemungkinan adanya kandungan oksigen. Hal ini dapat dijelaskan melalui proses fotosintesis, di mana tumbuhan mengambil karbon dioksida (CO_2) dari udara dan

mengubahnya menjadi karbon organik, sementara oksigen dilepaskan sebagai produk sampingan (Bruce & Tillman, 2008).

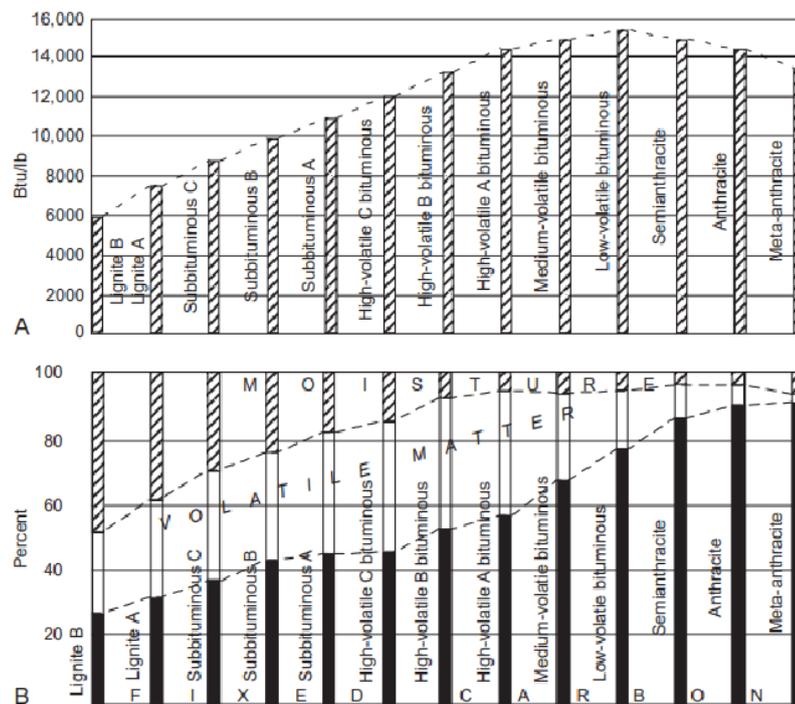
2.1.1 Batubara

Batubara merupakan batuan sedimen yang terbentuk akibat akumulasi material organik seperti sisa tumbuhan dan organisme lainnya yang terjadi dalam rentang waktu jutaan tahun. Proses ini melibatkan serangkaian perubahan fisik dan kimia yang menyebabkan transformasi bahan organik menjadi materi batuan. Komponen organik batubara mencakup karbon, hidrogen, oksigen, dan sedikit belerang, sementara komponen anorganiknya terdiri dari beragam senyawa logam yang membentuk abu. Pembentukan batubara ini merupakan hasil dari proses seperti dekomposisi tumbuhan, pengendapan materi organik, pemadatan, dan berbagai transformasi kimia yang terjadi selama bertahun-tahun (Bruce & Tillman, 2008).

Proses pembentukan batubara tidak terjadi secara instan, melainkan memerlukan rentang waktu yang sangat panjang dan melalui serangkaian tahap yang kompleks. Pada tahap awal, tumbuhan serta organisme yang telah mati mengalami dekomposisi di lingkungan yang minim oksigen, seperti di rawa atau dasar danau. Kondisi ini memperlambat pembusukan total, sehingga material organik tersebut dapat bertahan dalam jangka waktu yang lama. Selain itu, dekomposisi yang terjadi secara perlahan ini menghasilkan material organik yang terakumulasi dan membentuk lapisan-lapisan sedimen.

Material organik yang telah terendapkan ini kemudian terkubur oleh lapisan-lapisan baru dari endapan lainnya. Seiring waktu, tekanan dari lapisan-lapisan yang menumpuk di atasnya menyebabkan kompresi material organik tersebut. Di bawah tekanan tinggi dan suhu tertentu selama jutaan tahun, material ini perlahan-lahan berubah menjadi batubara. Batubara yang terbentuk

molekul-molekul batubara yang lebih kompleks dengan kandungan karbon yang tinggi. Tahapan ini menunjukkan kompleksitas dan proses panjang yang terlibat dalam pembentukan batubara dari sisa-sisa tumbuhan (Orem & Frinkelman, 2003).



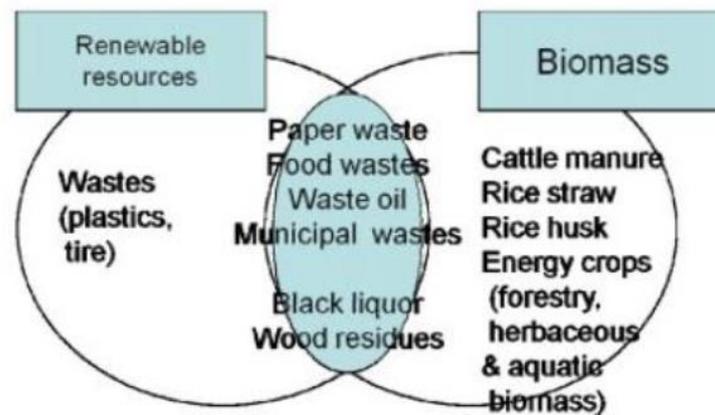
Gambar 2.2 (A) Klasifikasi Batubara Berdasarkan Nilai Kalor
(B) Klasifikasi Batubara Berdasarkan komposisi penyusun
(Bruce & Tillman, 2008)

Proses *coalification*, yaitu perubahan bertahap dari sisa vegetasi menjadi batubara, sangat dipengaruhi oleh perbedaan komposisi kimia dari material tanaman asal. Perbedaan ini mencerminkan jenis vegetasi yang bervariasi dari satu periode geologi ke periode lainnya. Faktor biologis dan kimia tersebut menyebabkan terbentuknya batubara dengan kualitas yang berbeda-beda, yang tercermin dalam variasi tingkat atau grade batubara. Untuk menilai kualitasnya, dapat dilihat melalui komposisi unsur penyusun serta kandungan kalornya, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Dalam gambar tersebut, tergambar dengan jelas hubungan antara nilai kalor dengan persentase *fixed carbon*, *volatile matter*, dan *moisture content* dalam batubara. Untuk mencapai

tingkat nilai kalor yang optimal, batubara perlu memiliki kandungan *fixed carbon* yang tinggi, sementara kandungan *volatile matter* dan *moisture content*-nya perlu diminimalkan. Hal ini karena kandungan *moisture content* dapat secara signifikan memengaruhi efisiensi proses pembakaran batubara, oleh karena itu, upaya untuk menguranginya dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan dari proses tersebut.

2.1.3 Biomassa

Biomassa merupakan bahan organik yang berasal dari tanaman, baik yang dimanfaatkan secara langsung maupun melalui proses tidak langsung, dan memiliki potensi besar sebagai sumber energi berkelanjutan. Sering dikenal sebagai sumber daya hayati atau *bioresource*, biomassa dikategorikan sebagai energi terbarukan karena sifatnya yang dapat diperbarui, tersedia dalam jumlah melimpah, dan penggunaannya tidak menambah emisi karbon bersih ke atmosfer (Basu, 2018). Biomassa mencakup berbagai sumber organik, mulai dari tanaman, pohon, dan rerumputan, hingga limbah kehutanan, residu pertanian, sisa-sisa hewani, serta sampah perkotaan, seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.3. Material ini menyimpan energi di dalam ikatan kimia molekul karbon, hidrogen, dan oksigen. Saat ikatan-ikatan tersebut terurai—baik melalui proses termal, biokimia, maupun mekanis—energi kimia yang tersimpan dilepaskan dalam bentuk gas, cairan, atau padatan, bergantung pada metode dan kondisi konversi yang diterapkan. Selama proses pembakaran, biomassa dapat menghasilkan gas alternatif seperti CH_4 , CO_2 , CO , dan H_2 , sementara juga menghasilkan berbagai produk bio-bahan bakar yang berharga seperti etanol, biodiesel, metanol, minyak nabati, dan minyak pirolisis. Di samping itu, hasil produksi biomassa dalam bentuk padat juga beragam, termasuk arang dan torrefaksi biomassa (Basu, 2018)



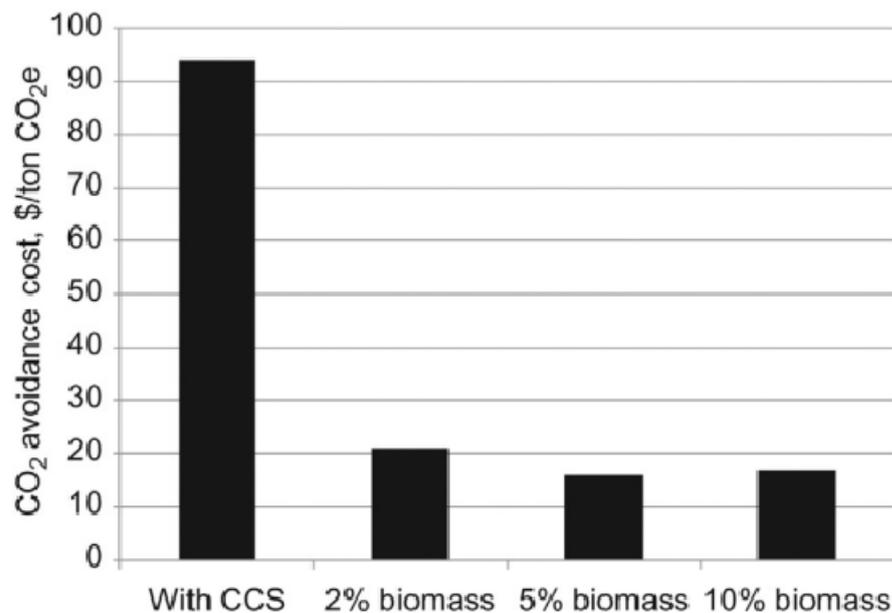
Gambar 2.3 Klasifikasi Biomassa
(Basu, 2018)

2.2 *Co-Firing*

Pembakaran langsung merupakan metode kunci dalam konversi energi biomassa. Pada skala kecil, terutama di pedesaan, proses ini dimanfaatkan sebagai sumber panas rumah tangga—misalnya sebagai bahan bakar kayu untuk memasak. Sementara itu, dalam skala industri, biomassa umumnya dicampur dengan bahan bakar fosil untuk pembangkit listrik, karena belum cukup efisien dijadikan bahan bakar tunggal. Tren pemanasan global mendorong penggunaan biomassa yang dianggap netral karbon—berkat rasio H/C yang tinggi—sebagai alternatif pengganti fosil di sektor pembangkit uap, semen, dan baja. Pembakaran biomassa melepaskan CO₂ dalam jumlah relatif lebih rendah, menjadikannya opsi yang semakin menarik bagi kebutuhan energi besar (Ndibe et al., 2015).

Minat terhadap *co-firing* biomassa meningkat sejalan dengan kebutuhan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dari pembangkit listrik berskala besar. Pemanfaatan *co-firing* biomassa telah terbukti efektif dan lebih ekonomis, menyediakan solusi optimal secara singkat dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dari pembangkit listrik yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar (Xu et al., 2020). Meskipun teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon sedang aktif dikembangkan dan banyak negara mengalokasikan dana besar untuk instalasi percobaan, penerapan komersial yang luas dari teknologi ini tidak

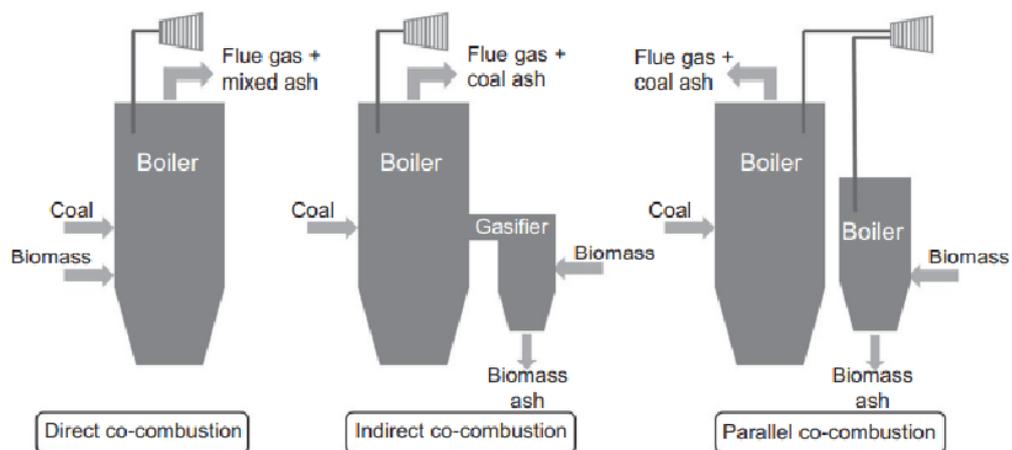
mungkin terjadi dalam waktu dekat. Biaya pembangkitan listrik tetap tinggi, meskipun teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon dapat mengatasi tantangan ini. Pada gambar 2.4 dijelaskan perbandingan biaya antara teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon dengan *co-firing*.



Gambar 2.4 Perbandingan biaya dalam mengurangi emisi CO₂ melalui teknologi CCS dan *Co-firing* (Basu, 2018)

2.2.1 Teknologi *Co-Firing*

Co-firing biomassa telah banyak diaplikasikan di beberapa perusahaan pembangkitan diseluruh dunia dengan mengkombinasikan jenis bahan bakar pada ruang pembakaran. Di pembangkit listrik tenaga uap, *co-firing* biomassa dengan batubara dapat dilakukan melalui tiga metode, yaitu *co-firing* langsung, *co-firing* tidak langsung, dan *co-firing* paralel. Perbedaan yang mendasar dalam tiga metode *co-firing* pada dasarnya berada pada bentuk pemasukan bahan bakar yang akan dikombinasikan dengan biomassa. Bentuk pemasukan kombinasi batubara biomassa dari *coal bunker* atau biomassa *bunker* yang ditransfer ke *coal feeder* dan diteruskan *bunker* atau ruang pembakaran.



Gambar 2.5 Metode Teknologi *Co-firing* (Gil & Rubiera, 2018)

2.2.1.1 *Direct Co-firing*

Co-firing secara langsung menjadi metode paling sederhana, ekonomis, dan umum digunakan untuk menggabungkan biomassa dengan batubara dalam sistem *boiler*, biasanya menggunakan sistem batubara terpulverisasi. Popularitasnya terutama disebabkan oleh investasi awal yang relatif rendah, karena menghindari kebutuhan akan infrastruktur tambahan yang besar dalam konfigurasi yang sudah ada (Roni et al., 2017). Dalam konteks *co-firing* langsung, terdapat dua pendekatan yang mungkin dilakukan. Pendekatan pertama melibatkan pencampuran dan pra-pemrosesan bersamaan biomassa dan batubara sebelum dimasukkan ke dalam ruang pembakaran (biasanya kurang dari 5% dari total energi). Sebaliknya, pendekatan kedua mencakup pemrosesan terpisah antara biomassa dan batubara sebelum keduanya digabungkan dan dimasukkan ke dalam ruang pembakara (Koppejan, 2016). Pada umumnya, kontribusi termal biomassa dalam skenario pembakaran langsung hanya sekitar 10%, disebabkan oleh keterbatasan teknis dan ekonomi (Karampinis et al., 2015). Masalah-masalah ini dapat diminimalkan dengan melakukan torrefaksi pada biomassa, yang bertujuan untuk menyamakan perilakunya dengan batubara, terutama dalam hal kandungan energi dan karakteristik penggilingannya.

2.2.1.2 Indirect Co-firing

Pembakaran tidak langsung, yang sering disebut sebagai pembakaran gasifikasi, merupakan suatu proses yang melibatkan serangkaian langkah kompleks di mana biomassa padat diubah menjadi gas sintesis dalam sebuah unit gasifikasi terpisah sebelum kemudian dibakar dalam pembakar. Langkah ini, yang terjadi sebelum biomassa mencapai titik pembakaran utama, sangat penting dalam mempersiapkan bahan bakar untuk digunakan dalam pembangkit listrik. Setelah melewati proses gasifikasi, gas sintesis yang dihasilkan, yang terdiri dari karbon monoksida, hidrogen, dan gas lainnya, dialirkan ke tungku pembakaran bersama dengan batubara untuk menghasilkan panas. Salah satu keunggulan utama dari pendekatan ini adalah fleksibilitasnya dalam memanfaatkan berbagai jenis biomassa dan meningkatkan proporsi penggunaan biomassa dalam proses pembakaran (Emery & Mosier, 2015).

Selain itu, dengan mengurangi eksposur biomassa langsung ke dalam tungku batubara, pembakaran tidak langsung dapat membantu mengurangi pembentukan *slag* dan mempermudah pengumpulan residu secara terpisah. Namun, hal yang perlu diperhatikan adalah biaya investasi yang cukup besar yang diperlukan untuk mengintegrasikan instalasi gasifier ke dalam sistem pembakaran yang sudah ada. Kendala finansial ini dapat menjadi hambatan bagi adopsi teknologi ini dalam skala yang lebih luas, meskipun memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan proses pembakaran biomassa.

2.2.1.3 Parallel Co-firing

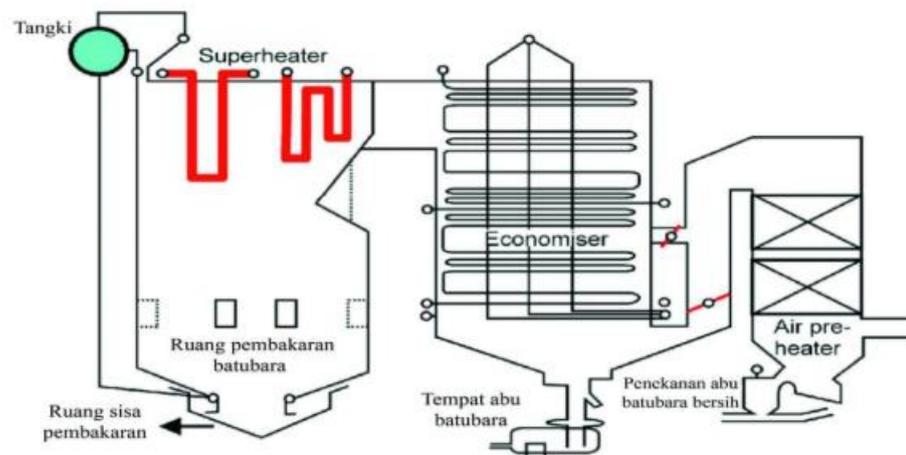
Dalam penerapan pembakaran paralel, biomassa dan batubara dibakar secara terpisah, dengan proses pemberian bahan bakar dan pembakaran yang dilakukan secara independen. Sistem ini lebih handal dan memiliki tingkat risiko yang lebih rendah, karena berfungsi secara paralel dengan unit *boiler* yang ada. Dengan pendekatan ini, akumulasi

deposit biomassa atau korosi pada tabung *boiler* dapat dikurangi, mengingat gas buang dari biomassa tidak berinteraksi langsung dengan permukaan pemanas *boiler*. Walaupun biaya pembakaran paralel lebih tinggi dibandingkan pembakaran langsung, metode ini tetap lebih ekonomis dibandingkan membangun pembangkit listrik biomassa terpisah. Selain itu, metode ini berkontribusi pada peningkatan efisiensi pembakaran dan memungkinkan penggunaan bahan bakar yang mengandung alkali dan klorin tinggi (Gil & Rubiera, 2018). Metode paralel memungkinkan tingkat efisiensi melampaui pembangkit biomassa khusus, tanpa mengganggu operasi *boiler* berbahan bakar batubara. Selain itu, abu atau residu pembakaran masing-masing bahan bakar dihasilkan dalam aliran terpisah dan dapat ditangani secara mandiri.

2.3 *Boiler*

Boiler, sebuah perangkat berbentuk tabung tertutup, memainkan peran sentral sebagai generator uap dalam sistem pembangkit listrik (Woodruff et al., 2004). Proses penghasilan uap terjadi melalui pemanasan air di dalamnya, dimana panasnya dihasilkan dari pembakaran bahan bakar di ruang bakar. Uap yang dihasilkan oleh *boiler* tidak hanya penting untuk menggerakkan turbin pembangkit tenaga, tetapi juga memiliki berbagai aplikasi dalam industri, termasuk sebagai pemanas dan untuk proses pengeringan (Pfeiffelmann & Diederich, 2019).

Dalam konteks pentingnya operasi *boiler* yang sesuai standar, tidak boleh diabaikan. Standar operasi yang ditetapkan oleh pabrik pembuatannya memiliki tujuan utama untuk memastikan keamanan selama penggunaan. Kepatuhan terhadap standar tersebut tidak hanya dapat mengurangi biaya operasional dan perawatan, tetapi juga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan *boiler* secara keseluruhan. Oleh karena itu, menjaga kepatuhan terhadap standar operasi merupakan hal yang sangat penting dalam memastikan kelangsungan operasi dan kinerja *boiler* dengan optimal.



Gambar 2.6 Skema *Boiler* (Subagyo, 2018)

2.3.1 Jenis *Boiler*

Boiler umumnya adalah perangkat yang kompleks, terdiri dari sebuah bejana yang tertutup, dan seiring dengan perkembangannya, biasanya dilengkapi dengan pipa-pipa api maupun pipa air untuk meningkatkan efisiensi dan performa (Subagyo, 2018). Dalam pengelompokannya berdasarkan kelas dan spesifikasinya, *boiler* dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori yang berbeda, masing-masing dengan karakteristik dan fungsi uniknya.

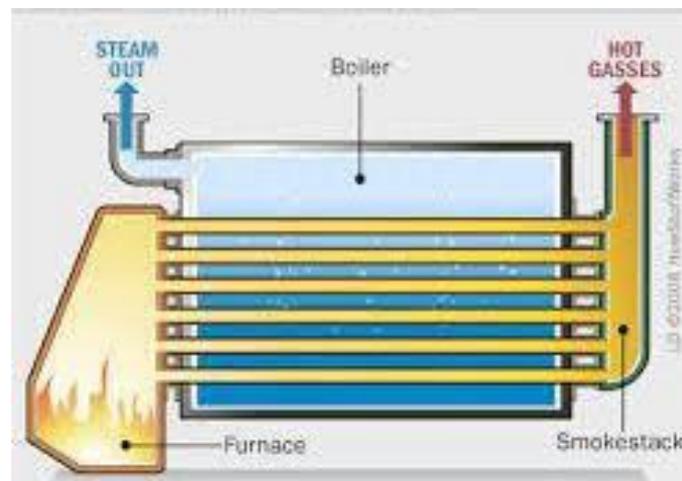
2.3.1.1 Jenis *Boiler* Menurut Fluida Mengalir Dalam Pipa

1. *Boiler* Pipa Api

Dalam konfigurasi pipa api, struktur utamanya terdiri dari serangkaian tabung yang berfungsi sebagai jalur bagi gas panas hasil pembakaran dari ruang bakar. Di sepanjang lorong tabung tersebut, air yang akan diubah menjadi uap ditempatkan di luar permukaan pipa. Desain ini memungkinkan gas panas untuk langsung berinteraksi dengan permukaan tabung pipa, memungkinkan transfer panas yang efisien ke air di

sekitarnya. Dengan demikian, proses absorpsi panas oleh air menjadi lebih efektif, mempercepat proses perubahan fase menjadi uap. Sebagai akibat dari karakteristik ini, meskipun kecepatan produksi uapnya cenderung lebih lambat, pipa api memiliki kapasitas yang lebih besar dalam menyerap panas dan mengubah air menjadi uap, membuatnya menjadi pilihan yang efisien untuk aplikasi yang membutuhkan jumlah uap yang signifikan (Suprianto, 2015).

Pipa api, dengan demikian, tidak hanya berfungsi sebagai sarana untuk mentransfer panas dari gas panas ke air, tetapi juga sebagai elemen kunci dalam memastikan proses produksi uap berjalan dengan efisien. Desainnya yang memungkinkan kontak langsung antara gas panas dan permukaan tabung pipa memfasilitasi transfer panas yang optimal, mempercepat proses pengubahan air menjadi uap. Meskipun kecepatan produksi uapnya mungkin lebih lambat daripada konfigurasi lainnya, kemampuan pipa api untuk menyerap panas dalam jumlah besar menjadikannya pilihan yang cocok untuk aplikasi yang membutuhkan pasokan uap yang konsisten dan besar.

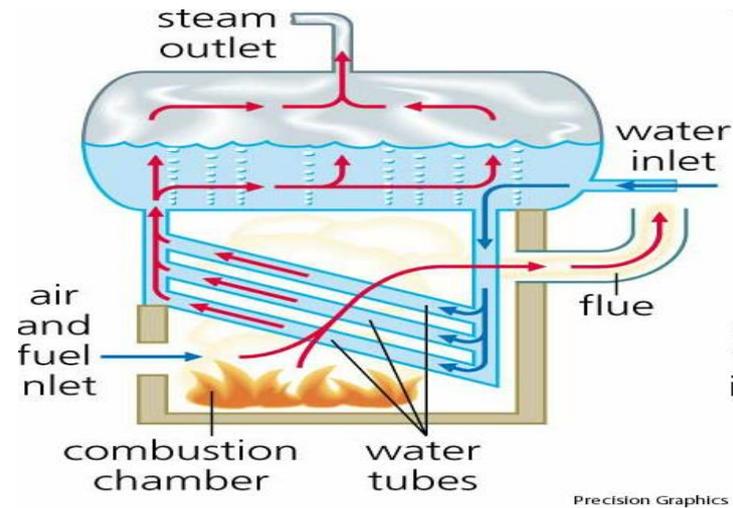


Gambar 2.7 Boiler Pipa Api (Suprianto, 2015)

2. *Boiler* Pipa Air

Dalam konfigurasi pipa air, aliran fluida yang mengalir di dalam pipa adalah air, sedangkan di luar pipa terdapat gas hasil pembakaran, yang umumnya disebut *flue gas*. Pipa air ini dirancang khusus untuk memfasilitasi transfer panas yang efisien antara gas panas dan air di dalam pipa. Ketika gas panas melewati permukaan pipa air, panas tersebut diserap oleh air yang mengelilingi pipa, sehingga mempercepat proses perubahan air menjadi uap. Kecepatan produksi uap yang tinggi menjadi salah satu keunggulan dari konfigurasi pipa air ini. Namun, terdapat kelemahan pada cadangan uap yang terbatas yang dimilikinya. Hal ini disebabkan oleh kapasitas pipa air yang relatif lebih kecil untuk menampung air, bila dibandingkan dengan pipa api (Subagyo, 2018).

Sebagai akibatnya, meskipun pipa air dapat menghasilkan uap dengan cepat, namun kapasitasnya dibatasi oleh volume air yang dapat diakomodasi di dalam pipa. Oleh karena itu, penggunaan pipa air dalam sistem *boiler* biasanya harus dipertimbangkan dengan cermat, terutama ketika ada kebutuhan akan produksi uap dalam jumlah besar dalam waktu singkat. Meskipun memiliki kecepatan produksi uap yang tinggi, namun perlu diingat bahwa kapasitas produksi uap dari pipa air akan mencapai batasnya karena keterbatasan volume air yang dapat ditampung di dalam pipa. Untuk mengatasi hal ini, sering kali diperlukan system tambahan seperti drum uap atau pengatur tekanan untuk menjaga stabilitas suplai uap secara berkelanjutan.



Gambar 2.8 Boiler Pipa Air (Subagyo, 2018)

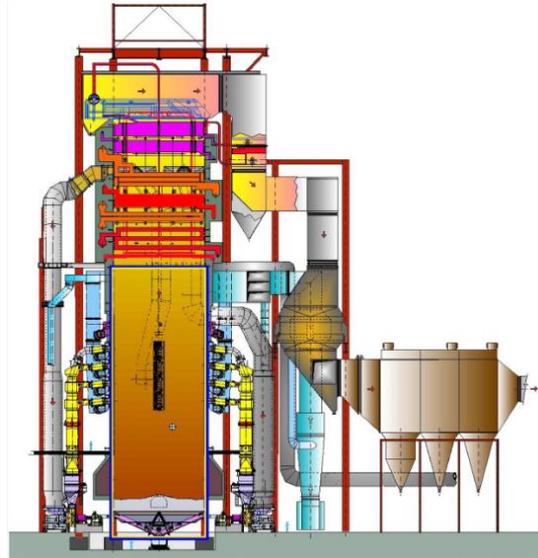
2.3.1.2 Boiler Berdasarkan Sistem Pembakaran

Furnace atau ruang bakar merupakan komponen utama dalam sistem pembakaran di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Fungsi utamanya adalah untuk membakar bahan bakar dan menghasilkan panas yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap. Jenis-jenis furnace pada PLTU dapat diklasifikasikan berdasarkan sistem pembakarannya, yaitu

1. *Pulverized Coal Furnace*

Pulverized coal furnace adalah tipe *furnace* yang paling umum digunakan pada PLTU skala besar. Dalam sistem ini, batubara digiling menjadi serbuk halus menggunakan *pulverizer*, kemudian ditiupkan ke dalam ruang bakar bersama udara pembakaran melalui *burner*. Pembakaran terjadi secara cepat karena luas permukaan partikel batubara yang tinggi, sehingga menghasilkan efisiensi termal yang tinggi dan pembakaran yang stabil (Ganapathy, 2003). Keunggulan dari sistem ini adalah kemampuannya dalam menangani beban tinggi dan respon beban yang cepat. Selain itu, sistem ini cocok digunakan pada batubara dengan kualitas tinggi dan

kadar kelembaban rendah. Namun demikian, pulverized coal furnace memiliki kekurangan dari segi kompleksitas sistem dan biaya investasi awal yang tinggi, terutama untuk peralatan penggiling batubara dan sistem kontrol emisi.



Gambar 2.9 *Pulverized Coal Furnace* (Ganapathy, 2003)

2. *Fluidized Bed Combustion Furnace (FBC Furnace)*

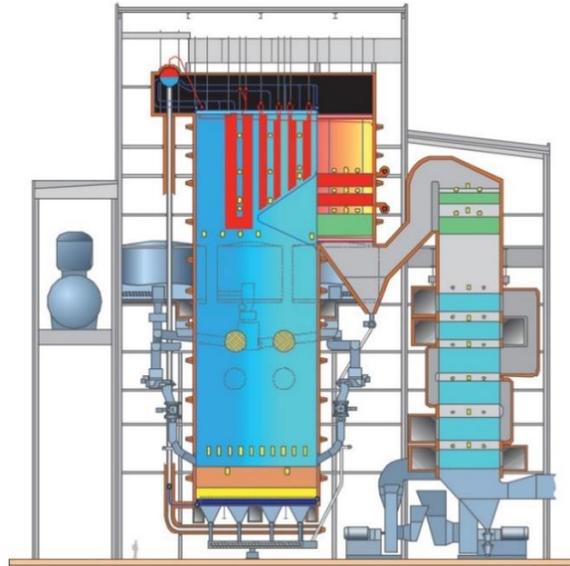
Fluidized bed combustion (FBC) merupakan salah satu teknologi canggih dalam sistem pembakaran boiler yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi pembakaran bahan bakar padat. Teknologi ini memanfaatkan "bed" yang terdiri dari material seperti pasir atau abu yang memiliki sifat fluida ketika terkena aliran udara pembakaran. Material bed yang mengalami fluidisasi, atau perubahan sifat menjadi mirip fluida, memungkinkan partikel-partikelnya terus bergerak dan berinteraksi dengan bahan bakar. Hal ini memastikan bahwa bahan bakar terbakar secara merata dan lebih efisien karena proses pembakaran terjadi di seluruh permukaan partikel bed dan bahan bakar. Efek dari proses ini adalah produksi panas yang lebih stabil,

distribusi suhu yang lebih merata, serta peningkatan efisiensi pembakaran secara keseluruhan.

Keunggulan lain dari FBC adalah dampak lingkungannya yang lebih baik dibandingkan metode pembakaran konvensional. Salah satu keuntungan utama FBC adalah suhu pembakarannya yang lebih rendah, yang secara signifikan mengurangi pembentukan polutan gas seperti nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur dioksida (SO_2), yang biasanya dihasilkan dalam pembakaran pada suhu tinggi. Dengan pengaturan udara pembakaran yang tepat, suasana oksidasi di dalam tungku FBC dapat dikontrol sehingga emisi gas berbahaya berkurang. Selain itu, FBC juga mampu menangani berbagai jenis bahan bakar, termasuk limbah industri dan biomassa, sehingga berpotensi mengurangi jumlah limbah yang perlu ditimbun atau dibakar dengan cara lain.

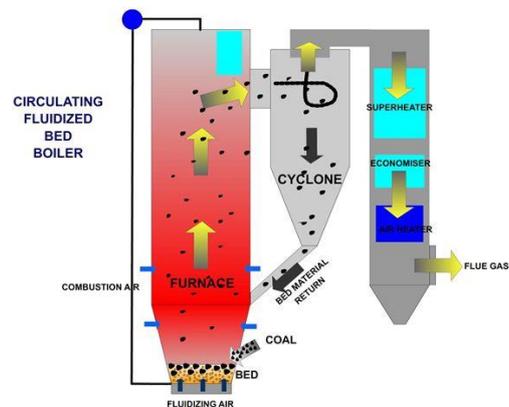
Dalam industri pembangkit listrik dan pengolahan limbah, FBC telah menjadi solusi yang menarik karena efisiensinya yang tinggi dan dampak lingkungannya yang minimal. Dengan kemampuannya mengolah bahan bakar yang lebih bervariasi dan mengurangi emisi gas rumah kaca, FBC menjadi alternatif yang lebih berkelanjutan dan ekonomis. Selain efisiensi energi yang dihasilkan, teknologi ini juga membantu dalam upaya global untuk mengurangi jejak karbon industri, sambil memanfaatkan limbah padat sebagai sumber energi. Oleh karena itu, FBC dianggap sebagai salah satu inovasi teknologi pembakaran yang mendukung produksi energi bersih di masa depan (Basu, 2018). Ada dua tipe *boiler fluidized bed combustion* sebagai berikut

a) *Bubbling Fluidized Bed (BFB)*



Gambar 2.10 *Bubbling Fluidized Bed (BFB)*
(Suprianto, 2015)

b) *Circulating Fluidized Bed (CFB)*

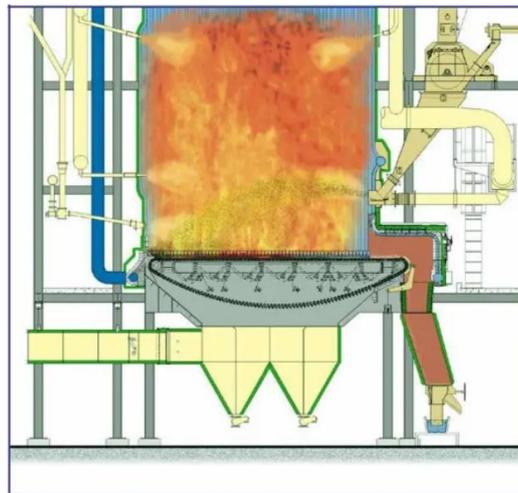


Gambar 2.11 *Circulating Fluidized Bed (CFB)*
(Suprianto, 2015)

3. *Stoker Furnace*

Stoker furnace merupakan sistem pembakaran konvensional yang menggunakan grate atau jeruji untuk mendukung pembakaran batubara dalam bentuk bongkahan atau ukuran kasar. Proses pembakaran terjadi

secara lambat dan berlapis dari bawah ke atas, cocok untuk pembangkit kapasitas kecil hingga menengah. Kelebihan dari sistem ini adalah desainnya yang sederhana dan biaya awal yang relatif rendah, serta kemampuannya dalam menangani berbagai ukuran bahan bakar tanpa proses penggilingan. Akan tetapi, sistem ini memiliki efisiensi pembakaran yang lebih rendah dibandingkan PC atau FBC, serta menghasilkan emisi yang lebih tinggi karena pembakarannya tidak seefisien teknologi modern (Steam, 2011). Selain itu, pengaturan suhu dan distribusi panas di dalam furnace seringkali tidak seragam, yang dapat mengurangi umur pakai peralatan.



Gambar 2. 12 Stoker Boiler (Steam, 2011)

2.4 Klasifikasi *Fulidized Bed*

Teknologi CFB merupakan alternatif yang fleksibel untuk system pembakaran Batubara karena toleransinya terhadap jenis bahan bakar yang bervariasi. Simulasi CFD pada sistem ini menurut penggunaan model transportasi multifase untuk menggambarkan perilaku fluida dan partikel. Model tersebut disesuaikan berdasarkan skala waktu dan ruang sesuai pendekatan mikro, meso dan makro (Hartge et al., 1999).

2.4.1 *Superficial Gas Velocity*

U_{mf} adalah kecepatan udara minimum yang dibutuhkan agar partikel dalam bed berubah dari kondisi diam menjadi kondisi fluidisasi. Saat dicapai, tekanan fluida cukup untuk menyeimbangkan gaya berat partikel sehingga pergerakan antar partikel mulai terjadi (Grace, 1982).

$$Ar = \frac{\rho_g(\rho_p - \rho_g)gd_p^3}{\mu^2} \quad (1)$$

$$Re_{mf} = [27,2^2 + 0,0408 \times Ar]^{0,5} - 27,2 \quad (2)$$

$$U_{mf} = \frac{Re_{mf} \times \mu}{d_p \rho_g} \quad (3)$$

Keterangan:

Ar = Angka Archimides

ρ_g = Densitas gas (kg/m³)

ρ_p = Densitas partikel (kg/m³)

g = Percepatan grafitasi (9,81 m/s²)

d_p = Diameter partikel (m)

μ = Viskositas dinamis gas (Pa.s)

U_{mf} = Kecepatan minimum fluidisasi (m/s)

2.4.2 *Pressure Drop – Persamaan Ergun*

Untuk aliran gas dalam media berpori seperti *bed* partikel, tekanan jatuh sepanjang tinggi *bed* dapat dihitung menggunakan persamaan Ergun yang menggabungkan pengaruh viskositas fluida dan kecepatan aliran terhadap resistansi aliran (Ergun, 1958).

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \times \frac{\mu U}{(\phi d_p)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \times \frac{\rho_g U^2}{\phi d_p} \quad (4)$$

Keterangan:

ΔP = Penurunan tekanan (Pa)

L = Tinggi bed (m)

- ε = Porositas atau *void fraction*
 μ = Viskositas dinamis (Pa.s)
 U = Kecepatan gas Superficial (m/s)
 ϕ = Sferisitas partikel
 d_p = Diameter partikel (m)
 ρ_g = Densitas gas (kg/m³)

2.4.3 Kecepatan Transisi ke *Turbulent Bed* (U_c)

U_c adalah batas kecepatan di mana *bed* berubah dari pola *bubbling* menjadi turbulen, memungkinkan pencampuran optimal antar fase dan meningkatkan efisiensi pembakaran (Grace, 1982).

$$U_c = 3\sqrt{\rho_p d_p} - 0,17 \quad (5)$$

Keterangan:

- U_c = Kecepatan transisi *bubbling* ke *turbulent* (m/s)
 d_p = Diameter partikel (m)
 ρ_p = Densitas partikel (kg/m³)
 $\rho_p d_p$ = nilai berkisar 0,05 - 0,7 kg/m²

Ketika kecepatan udara superfisial mencapai nilai U_c , sistem mulai mengalami transisi dari kondisi *bubbling bed* menuju *turbulent bed*. Dalam keadaan *turbulent bed*, proses fluidisasi berlangsung secara optimal, ditandai dengan turbulensi yang stabil di atas *nozzle* serta pencampuran udara dan bahan bakar yang terjadi secara efisien

2.4.4 *Terminal Velocity*

Kecepatan terminal adalah kecepatan di mana partikel yang bergerak dalam fluida mengalami percepatan hingga mencapai kondisi keseimbangan antara gaya apung (*buoyancy*), tahanan fluida (*drag*), dan gaya gravitasi, termasuk percepatan partikel itu sendiri. Pada dasarnya, kecepatan terminal menggambarkan perbedaan kecepatan relatif antara partikel dan fluida dalam

proses transportasi pneumatik (Basu, 2015). Adapun rumus-rumus yang digunakan untuk menghitungnya adalah sebagai berikut:

$$\frac{d_p U_t \rho_g}{\mu} = \frac{Ar}{18} \text{ untuk } 0 < Re < 0,4 \quad (6)$$

Keterangan:

U_t = Terminal Velocity (m/s)

Ar = Angka Archimides

d_p = Diameter partikel (m)

ρ_g = Densitas gas (kg/m³)

μ = Viskositas gas (Pa.s)

2.5 Simulasi

Simulasi, sebagai teknik yang digunakan untuk menciptakan representasi tiruan yang menyerupai keadaan nyata, memiliki implikasi yang sangat luas dalam berbagai disiplin. Proses simulasi melibatkan penggunaan model angka atau statistik untuk merepresentasikan objek atau proses tertentu dengan tujuan mendapatkan pemahaman yang lebih dalam tentang sifat dari objek tersebut (KKBI, 2016). Dalam konteks era modern, di mana kompleksitas masalah industri semakin meningkat, perangkat lunak simulasi menjadi semakin penting dalam membantu mengatasi tantangan tersebut. Teknologi ini telah terbukti sangat berguna dalam menyelesaikan berbagai masalah yang muncul di berbagai sektor industri, mulai dari manufaktur hingga teknologi informasi.

Dalam ranah teknik, di mana simulasi sering digunakan untuk merancang dan menguji produk serta proses, penting untuk mempertimbangkan berbagai aspek yang berkaitan dengan penggunaan perangkat lunak simulasi. Hal ini termasuk pemilihan perangkat lunak yang sesuai dengan kebutuhan spesifik, pengaturan parameter yang akurat, serta interpretasi yang cermat terhadap hasil simulasi. Dengan

memperhatikan aspek-aspek ini, pengembangan simulasi dapat dilakukan dengan lebih efektif dan akurat, yang pada gilirannya akan meningkatkan efisiensi dan keberhasilan dalam menghadapi berbagai tantangan teknis dan industri.

2.5.1 Software ANSYS

ANSYS adalah salah satu perangkat lunak komputer yang sangat berperan dalam bidang simulasi teknik, khususnya dalam menerapkan konsep-konsep seperti perpindahan panas, pengaruh gaya dan tegangan, serta aliran fluida. Perangkat lunak ini menawarkan alat analisis yang canggih untuk merancang dan memahami perilaku sistem fisik yang kompleks. Dengan fitur-fitur yang kuat, ANSYS memungkinkan penggunaannya untuk mensimulasikan berbagai fenomena fisik, dari perpindahan panas yang terjadi dalam suatu komponen hingga distribusi gaya dan tegangan yang bekerja pada struktur tertentu. Selain itu, perangkat ini juga mampu memodelkan karakteristik aliran fluida dalam sistem, yang membantu insinyur dan perancang dalam mengoptimalkan kinerja sistem tersebut (Schramm, 2021).

Kemampuan simulasi yang komprehensif membuat ANSYS menjadi alat yang sangat berguna dalam pengembangan dan peningkatan desain komponen atau sistem. Perangkat lunak ini memungkinkan analisis mendalam terhadap interaksi antara berbagai elemen dalam suatu sistem, yang sering kali tidak mudah dipahami melalui pendekatan analisis manual. Dengan demikian, ANSYS memberikan wawasan berharga yang dapat digunakan untuk memperbaiki desain sebelum produk diproduksi, menghemat waktu serta biaya, dan meningkatkan kualitas akhir dari sistem yang dihasilkan. Software ini telah menjadi standar dalam banyak industri untuk mendukung proses simulasi berbasis komputer yang lebih efisien dan akurat.

2.5.2 OpenFOAM

OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulator*) adalah perangkat lunak *open-source* yang dirancang untuk simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan berbagai fenomena multifisika lainnya. Dengan arsitektur modular dan fleksibel, OpenFOAM memungkinkan pengguna untuk mensimulasikan berbagai skenario fluida, seperti aliran inkompresibel, kompresibel, aliran multifasa, perpindahan panas, serta reaksi kimia. Fleksibilitas ini berasal dari kemampuan OpenFOAM untuk memodifikasi solver dan fisika dasar simulasi sesuai kebutuhan pengguna. Dalam penelitian dan aplikasi industri, OpenFOAM sering digunakan karena menyediakan solusi gratis tanpa lisensi, yang sangat ideal untuk penelitian akademis dan pengembangan teknologi baru. Sebagai perangkat lunak berbasis komunitas, OpenFOAM terus diperbarui dengan berbagai fitur baru dari kontribusi global para pengguna dan pengembang (Weller et al., 1998).

Meskipun gratis dan kuat dalam fleksibilitas, OpenFOAM memerlukan pemahaman teknis yang mendalam, terutama dalam hal pemrograman dan penyiapan simulasi numerik. Pengguna diharapkan untuk memiliki kemampuan teknis untuk mengonfigurasi simulasi melalui skrip dan kode sumber. Namun, kekurangan ini diimbangi oleh komunitas yang aktif, dokumentasi yang luas, serta banyaknya tutorial yang tersedia. Penggunaannya yang luas di bidang akademis dan industri telah membuktikan efektivitas OpenFOAM dalam berbagai aplikasi, termasuk otomotif, energi, dan teknik kelautan. Banyak studi dan jurnal ilmiah yang memanfaatkan OpenFOAM untuk simulasi fluida skala besar, memperkuat posisi perangkat lunak ini sebagai alat yang andal dalam pengembangan CFD berbasis *open-source*.

2.5.3 COMSOL *Multiphysics*

COMSOL *Multiphysics* adalah perangkat lunak simulasi multifisika yang digunakan untuk memodelkan berbagai fenomena fisika secara bersamaan, seperti dinamika fluida, perpindahan panas, elektromagnetik, dan mekanika struktural. Perangkat lunak ini dikenal dengan antarmukanya yang ramah pengguna dan fleksibilitasnya dalam menyelesaikan masalah yang kompleks (Lienemann et al., 2011). Pengguna dapat memanfaatkan antarmuka berbasis grafis untuk membuat dan mengatur geometri, parameter material, serta batasan fisik untuk berbagai simulasi fisika yang terintegrasi. COMSOL *Multiphysics* memungkinkan penggunaan pendekatan *finite element method* (FEM) untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial yang menggambarkan fenomena fisika dalam bentuk yang terdistribusi dan kompleks. Hal ini menjadikan COMSOL pilihan populer di berbagai bidang penelitian dan industri, termasuk teknik, fisika, bioteknologi, dan desain produk.

Keunggulan utama COMSOL adalah kemampuannya untuk menggabungkan beberapa fisika dalam satu model simulasi. Ini memungkinkan analisis simultan dari interaksi yang terjadi antara berbagai fenomena, seperti efek termal pada struktur mekanik atau pengaruh elektromagnetik pada aliran fluida. Selain itu, COMSOL juga menawarkan modul tambahan yang disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi spesifik, seperti modul akustik, optik, dan kimia. Fitur ini memberikan keluwesan bagi pengguna untuk mengembangkan simulasi yang lebih mendetail. Meski harganya relatif mahal dibandingkan perangkat lunak lain, COMSOL sangat dihargai karena kemampuan integrasinya yang kuat dan hasil simulasi yang akurat, serta kemudahan bagi para peneliti dan insinyur untuk menganalisis dan mengoptimalkan desain mereka melalui simulasi multifisika.

2.5.4 CFD++ (*Metacomp Technologies*)

CFD++ adalah perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dikembangkan oleh *Metacomp Technologies*, dirancang untuk memecahkan masalah fluida yang kompleks dalam berbagai aplikasi industri. Perangkat lunak ini dikenal karena kemampuannya yang canggih dalam menangani berbagai skenario aliran, termasuk aliran subsonik, transonik, supersonik, hingga hipersonik. CFD++ menggunakan metode numerik canggih untuk mensimulasikan aliran fluida dengan presisi tinggi, memungkinkan analisis yang detail terhadap dinamika fluida, perpindahan panas, interaksi fluida-struktur, dan fenomena fisika multifase. Kemampuannya dalam menangani geometri yang kompleks serta menawarkan simulasi skenario fluida di berbagai kondisi fisik menjadikan CFD++ alat yang sering digunakan dalam industri *aerospace*, otomotif, dan energi.

CFD++ menawarkan fleksibilitas melalui antarmuka berbasis grafis yang ramah pengguna serta dukungan terhadap berbagai model turbulensi dan reaksi kimia. Salah satu keunggulan perangkat lunak ini adalah kemampuannya untuk memproses simulasi aliran yang sangat kompleks dengan akurasi tinggi, bahkan pada geometri yang tidak terstruktur atau sangat rumit. Hal ini membuat CFD++ sangat bermanfaat dalam aplikasi seperti desain pesawat, optimasi mesin pembakaran, dan analisis aerodinamika. Dengan akurasi dan efisiensinya, perangkat lunak ini menjadi pilihan favorit dalam proyek-proyek industri yang membutuhkan analisis fluida berkecepatan tinggi dan dalam lingkungan ekstrem. Meskipun merupakan perangkat lunak komersial dengan harga lisensi yang signifikan, CFD++ banyak digunakan oleh para insinyur dan ilmuwan untuk riset dan pengembangan produk canggih.

2.6 Persamaan-Persamaan Dasar dalam Simulasi CFD

Dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), pendekatan yang digunakan berlandaskan pada pemecahan persamaan diferensial parsial yang menggambarkan prinsip-prinsip konservasi dalam mekanika fluida. Persamaan utama yang menjadi dasar perhitungan mencakup konservasi massa (kontinuitas), momentum (*Navier-Stokes*), serta energi. Ketiga persamaan ini merupakan elemen kunci dalam representasi numerik aliran fluida dan transfer panas pada sistem termal seperti *furnace Circulating Fluidized Bed* (CFB). Untuk menggambarkan perilaku aliran yang lebih kompleks, khususnya pada kondisi *multiphase* dan turbulen dalam proses pembakaran batubara dan biomassa, sejumlah model tambahan diterapkan, seperti model turbulensi *k-ε*, pendekatan *Eulerian* untuk *multiphase*, model partikel diskrit (*Discrete Phase Model*), serta model reaksi kimia. Masing-masing model memiliki fungsi tertentu dalam menjelaskan fenomena fisika yang berlangsung di dalam *furnace* PLTU berbasis *co-firing*, sehingga pemahaman terhadap formulasi matematis dan fisik dari persamaan-persamaan tersebut sangat diperlukan.

2.6.1 Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas merupakan dasar dari konservasi massa dalam mekanika fluida. Dalam sistem *multiphase* seperti SFB, persamaan ini menjamin bahwa perubahan massa dalam satu elemen kontrol di kompensasi oleh massa yang masuk dan keluar dari sistem. Hal ini penting untuk memodelkan akurasi distribusi fluida dalam volume fraksi fase gas dan padatan selama proses pembakaran. Persamaan kontinuitas merupakan hukum kekekalan masa, yang menyatakan bahwa massa tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan dalam system tertutup.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (7)$$

Keterangan:

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

\vec{v} = vector kecepatan fluida (m/s)

t = waktu (s)

∇ = operasi divergensi

Persamaan ini berlaku untuk setiap fase pada *system multiphase* seperti udara, batubara, dan *woodchips* dalam *furnace* CFB (Versteed & Malalasekera, 2007).

2.6.2 Persamaan Momentum (*Navier-Stokes*)

Persamaan momentum digunakan untuk memprediksi bagaimana fluida dan partikel bergerak sebagai respon terhadap gaya, seperti tekanan, viskositas, gravitasi, dan interaksi antar fase. Di dalam *furnace* CFB, aliran gas dan pergerakan partikel bahan bakar sangat dipengaruhi oleh gaya-gaya ini, yang pada akhirnya menentukan efisiensi pencampuran dan pembakaran.

Persamaan ini menggambarkan hukum Newton II untuk fluida dan menunjukkan bagaimana momentum fluida berubah akibat gaya eksternal.

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho\vec{g} + \vec{F}_{int} \quad (8)$$

Keterangan:

p = Tekanan Fluida (Pa)

τ = Tensor Tegangan Viskos (N/m²)

\vec{g} = Percepatan Gravitasi (m/s²)

\vec{F}_{int} = Gaya interaksi antar fase (misalnya gaya drag antar gas dan padatan)

Persamaan ini penting untuk memprediksi distribusi kecepatan dan pola sirkulasi partikel padat dalam CFB (Crowe et al., 2011)

2.6.3 Persamaan Energi

Persamaan energi sangat krusial dalam menentukan distribusi temperatur dalam *furnace*, yang mempengaruhi efisiensi pembakaran dan perpindahan panas. Model ini juga memungkinkan simulasi pengaruh reaksi kimia terhadap profil temperatur secara lokal, yang penting dalam sistem *cofiring* biomassa.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}h) = \nabla \cdot (k\nabla T) + S_h \quad (9)$$

Keterangan:

h = Entalpi spesifik (J/kg)

k = Konduktivitas termal (W/mK)

T = Temperatur (K)

S_h = Sumber panas volumetrik (W/m³) dari pembakaran

Persamaan ini esensial dalam menganalisis efisiensi termal *furnace* (Ferziger et al., 2020)

2.6.4 Model Turbulensi Standard $k-\varepsilon$

Model turbulensi $k-\varepsilon$ banyak digunakan dalam simulasi aliran di dalam sistem termal karena dapat secara efektif memperkirakan fluktuasi kecepatan aliran. Turbulensi memainkan peran penting dalam meningkatkan pencampuran udara dan bahan bakar, serta distribusi panas yang merata di dalam *furnace*.

Model $k-\varepsilon$ digunakan untuk menyelesaikan aliran turbulen melalui dua persamaan transport:

Persamaan k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} k) = \nabla \cdot (\mu_t \nabla k) + G_k - \rho \varepsilon \quad (10)$$

Persamaan ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \varepsilon) = \nabla \cdot (\mu_t \nabla \varepsilon) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

Keterangan:

k = Energi kinetik turbulen (m²/s²)

ε = Laju dissipasi energi turbulen (m²/s³)

μ_t = Viskositas turbulen (Pas)

G_k = Generasi energi turbulen akibat gradien kecepatan

C_1, C_2 = Konstanta empiris model ($C_1 = 1,44, C_2 = 1,92$)

Model ini digunakan karena keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi (Lauder & Spalding, 1974)

2.6.5 Model *Multiphase Eurlian*

Model *Eurlian* memperlakukan setiap fase (gas dan padatan) sebagai kontinum dengan persamaan kontinuitas dan momentum masing-masing.

Persamaan kontinuitas untuk fase i :

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_i \rho_i \vec{v}_i = 0 \quad (12)$$

Keterangan:

α_i = fraksi volume fase i

ρ_i = densitas fase i

v_i = kecepatan fase i

Model ini sangat berguna dalam simulasi CFB yang padat partikel seperti pembakaran batubara dan biomassa (Ishii & Habiki, 2011).

2.6.6 *Discrete Phase Model (DPM)*

Model DPM sangat cocok untuk memodelkan partikel dengan konsentrasi rendah seperti injeksi bahan bakar tambahan. Model ini penting untuk mempelajari perilaku partikel individual seperti lintasan, kecepatan, dan pengaruhnya terhadap distribusi temperatur dan pembakaran.

$$\frac{\partial \vec{v}_p}{\partial t} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} C_D \frac{Re_p}{24} (\vec{v} - \vec{v}_p) + \vec{g} \quad (13)$$

Keterangan:

v_p = Kecepatan partikel (m/s)

μ = Viskositas dinamis fluida (Pas)

ρ_p = Densitas partikel (kg/m³)

d_p = Diameter partikel (m)

C_D = Koefisien *drag*

Re_p = Bilangan *Reynolds* partikel

Model ini cocok untuk konsentrasi partikel rendah dan umum dalam simulasi injeksi partikel batu bara / biomassa (Crowe et al., 2011)

2.6.7 Model Reaksi Pembakaran

Model ini digunakan untuk memodelkan reaksi kimia yang terjadi antara bahan bakar (karbon, hidrogen) dengan oksigen. Dengan menggunakan model transpor spesies, simulasi dapat memprediksi laju pembakaran dan emisi gas hasil pembakaran secara akurat.

Model pembakaran *non-premixed* menggunakan transport spesies:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i \quad (14)$$

Keterangan:

Y_i = Fraksi massa spesies i

J_i = Fluks difusi spesies i

R_i = Laju produksi atau konsumsi reaksi spesies i

Model ini digunakan dalam sirkulasi reaksi karbon dan senyawa *volatile* dengan oksigen (Turns, 2012).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Secara umum, metode numerik ini terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu: pra-pemrosesan (*pre-processing*), pemrosesan (*processing*), dan pasca-pemrosesan (*post-processing*).

Penelitian uji *High Co-firing* biomassa menggunakan biomassa jenis *woodchips*. Dalam penelitian ini, variasi komposisi pencampuran biomassa *woodchips* dengan batubara diamati, mulai dari 0% - 100%, 10% - 90%, hingga 20% - 80%. Proses pengumpulan data dilakukan dengan membandingkan hasil operasi pada kondisi uji *high co-firing* dengan saat unit beroperasi menggunakan 100% batu bara. Metode penelitian yang diadopsi adalah metode eksperimental, di mana uji coba *high co-firing* dilakukan langsung secara langsung. Penelitian ini memperhatikan beberapa parameter dan kriteria tertentu yang telah ditetapkan sebelumnya untuk memastikan keberhasilan dan validitas eksperimen.

Analisis dilakukan dalam kondisi isothermal yang didasarkan pada temperatur operasi *boiler* untuk memahami perilaku karakteristik fluidisasi pada *boiler* yang meliputi.

- a. Distribusi Temperatur Pada Ruang *Boiler*. Dilakukan dengan analisis *countur* distribusi temperature pada setiap variasi. Analisis ini bertujuan untuk memahami bagaimana temperatur berubah di sepanjang ruang *boiler*, yang dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis bahan bakar, rasio campuran, dan laju aliran udara.
- b. Distirbusi Tekanan Pada Ruang *Boiler*. Dilakukan dengan analisis *countur* dari tekanan *furnace* pada setiap variasi. Proses ini bertujuan untuk memetakan bagaimana tekanan berubah di sepanjang ruang *boiler*.

- c. Distribusi Kecepatan Udara Pada Ruang *Boiler*. Dilakukan analisis *countur* pada setiap variasi. Analisis ini bertujuan untuk memetakan pola aliran udara di dalam ruang *boiler*, yang sangat penting untuk memahami bagaimana kecepatan udara dapat mempengaruhi proses pembakaran
- d. Distribusi *Material Bed* Pada Ruang *Boiler*. Dilakukan melalui analisis kontur fraksi volume pasir di area depan *furnace* dengan membandingkan variasi campuran bahan bakar. Analisis ini bertujuan untuk memahami bagaimana perubahan dalam komposisi bahan bakar memengaruhi distribusi *material bed*, yang sangat penting untuk memastikan proses pembakaran yang efisien dan optimal.

Dengan menggunakan pendekatan isothermal, kita dapat menilai dampak dari berbagai parameter operasi pada efisiensi pembakaran serta distribusi temperatur di dalam *boiler*. Pendekatan ini juga memungkinkan identifikasi potensi masalah, seperti penumpukan material dan fluktuasi temperatur yang dapat memengaruhi kinerja keseluruhan sistem. Melalui analisis ini, diharapkan dapat diperoleh rekomendasi untuk optimasi proses pembakaran dan peningkatan efisiensi thermal pada *boiler*.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

3.2.1 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PT. PLN (Persero) Unit Pembangkitan Sebalang Lampung Selatan, yang merupakan lokasi yang dipilih untuk mengevaluasi proses penelitian. PLTU tersebut memiliki kapasitas yang signifikan, yaitu 2×110 MW, menjadikannya sebagai lingkungan yang relevan dan representatif untuk analisis yang direncanakan. Dalam pelaksanaan penelitian ini, parameter operasional yang digunakan mengacu pada PLTU Sebalang Unit 1 saat beroperasi dengan 100% batu bara. Pemilihan kondisi operasional ini dianggap penting untuk memberikan pemahaman yang komprehensif tentang efek dan performa bahan bakar batu bara dalam konteks pengoperasian PLTU dengan skala yang sebenarnya. Dengan demikian, data dan observasi yang diperoleh dari penelitian ini akan memberikan wawasan

yang berharga dalam memahami karakteristik dan dinamika operasional PLTU Sebalang serta potensi penggunaan batu bara dalam konteks yang sesungguhnya.



Gambar 3. 1 PLTU Sebalang 2 x 100 MW

3.2.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam rentang waktu yang dimulai pada bulan Maret 2024 dan berlangsung hingga bulan Juli 2024, sebagaimana yang tercantum pada tabel 3.1 yang menyajikan jadwal serta periode pelaksanaan penelitian secara rinci.

Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Bulan				
		Maret	April	Mei	Juni	Juli
1	Studi Literatur	■				
2	Persiapan Alat dan Bahan	■	■			
3	Pengambilan Data Uji		■			
4	Analisa Data Uji			■	■	
5	Penulisan Laporan					■

3.3 Langkah-langkah Penelitian

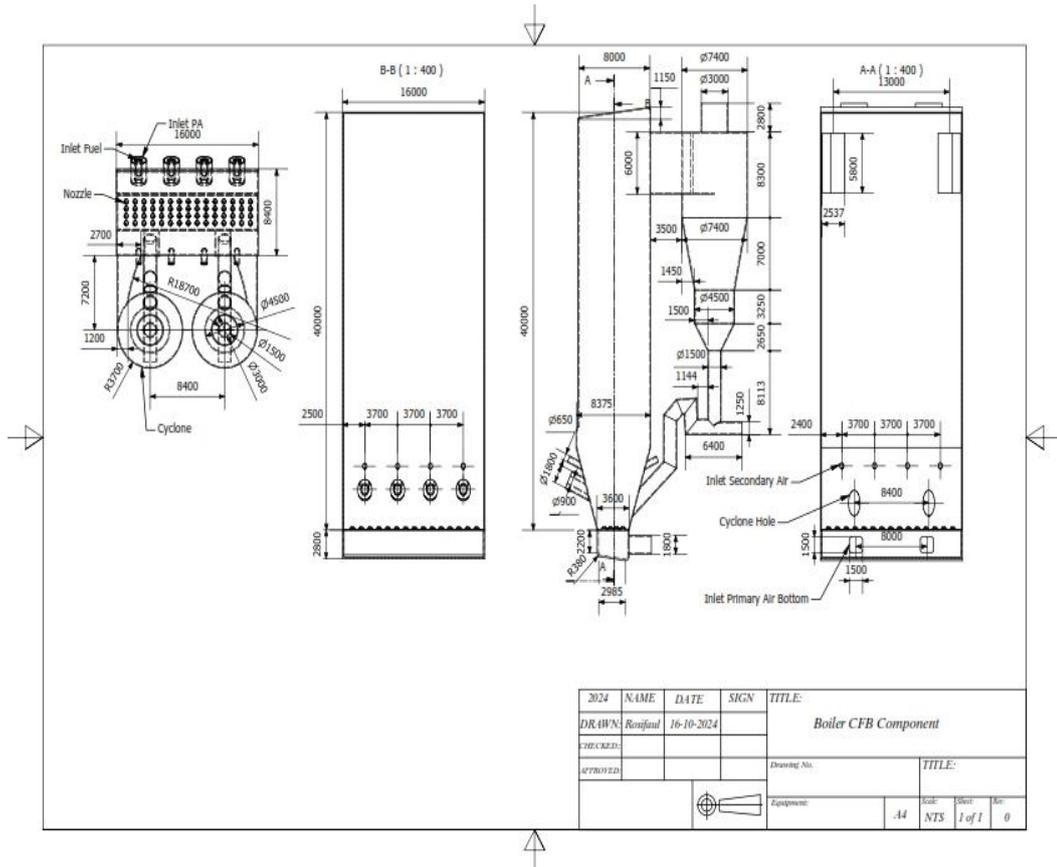
3.3.1 *Pre-processing*

Tahap *pre-processing* mencakup beragam langkah penting yang menjadi fondasi awal bagi analisis pemodelan CFD. Proses ini dimulai dengan pembuatan model fisik dari objek yang akan diuji, dalam hal ini adalah *boiler*, yang mencakup detail geometri dan spesifikasi desain yang diperlukan untuk simulasi. Setelah model selesai, langkah berikutnya adalah pembuatan *mesh* pada domain simulasi. Proses *meshing* ini sangat krusial karena membagi model menjadi elemen-elemen kecil yang memungkinkan analisis numerik dilakukan secara efisien.

Selanjutnya, tahap *pre-processing* juga melibatkan penentuan kondisi batas yang sesuai, seperti kecepatan aliran udara, temperatur, dan tekanan, serta pengaturan parameter-parameter lain yang telah ditentukan untuk simulasi. Setiap kondisi batas ini harus ditetapkan dengan cermat untuk memastikan bahwa hasil analisis mencerminkan kondisi operasi yang sebenarnya di dalam *boiler*. Dengan melakukan semua langkah ini secara sistematis, diharapkan analisis CFD yang dilakukan dapat memberikan hasil yang akurat dan relevan, serta memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai dinamika aliran dan proses pembakaran di dalam sistem *boiler*.

3.3.1.1 Pembuatan Model Uji Benda

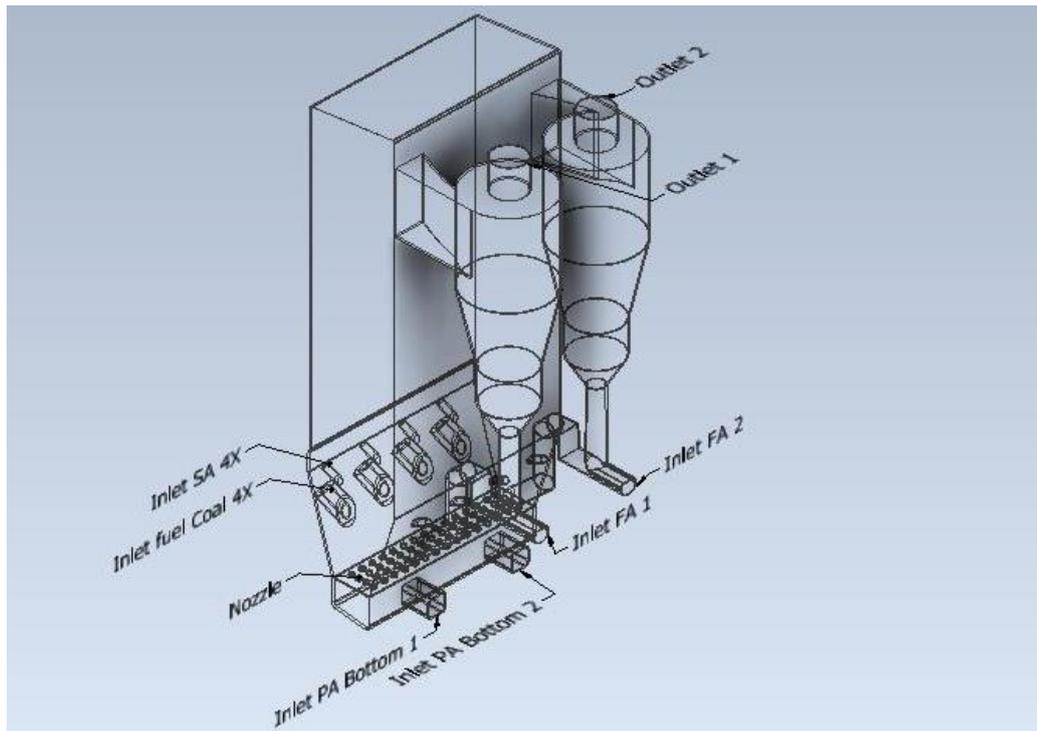
Model *boiler* yang didasarkan pada gambar desain (*drawing*) PLTU Sebalang digambar ulang menggunakan perangkat lunak Inventor, dengan mengacu pada dimensi aktual dengan skala 1:400 satuan milimeter. Dimensi-dimensi ini dapat dilihat secara lebih jelas pada Gambar 3.2 berikut:



Gambar 3.2 Drawing Boiler PLTU Sebalang

3.3.1.2 Domain Simulasi

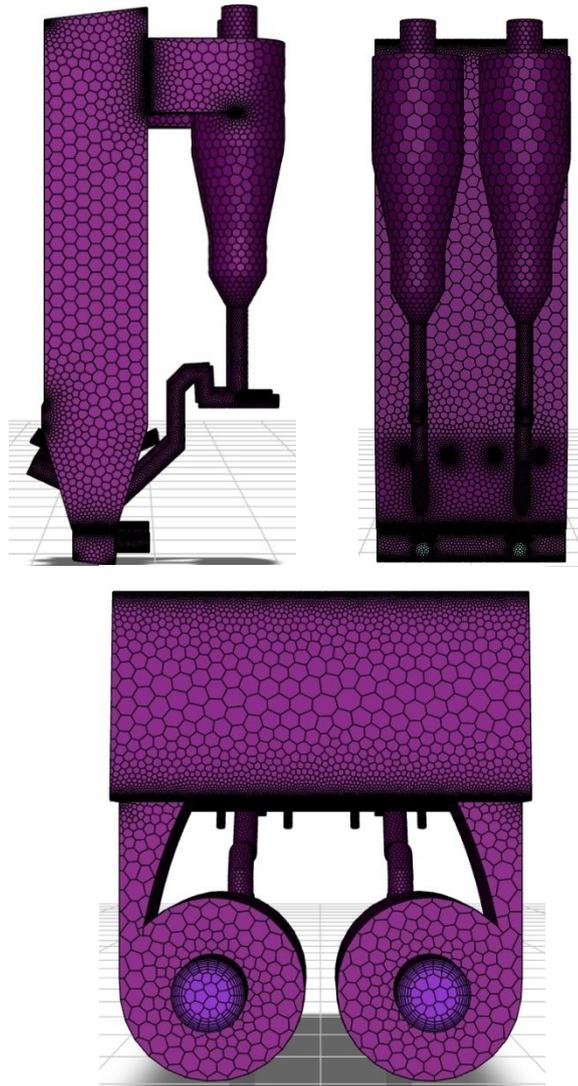
Pada simulasi numerik, mendefinisikan domain pemodelan adalah kunci untuk memperoleh hasil yang valid. Domain ini terdiri dari *inlet flow* massa udara primer di bagian bawah *furnace*, ditambah delapan pipa udara sekunder (empat pada *front furnace* dan empat pada *rear furnace*). Batubara disuntikkan lewat empat pipa khusus, sedangkan *High Pressure Air* dialirkan menggunakan dua pipa yang terpasang di zona *cyclone* dan dasar *furnace*.



Gambar 3.3 Skema Simulasi *Boiler CFB*

3.3.1.3 *Meshing Boiler*

Meshing adalah proses membagi domain menjadi volume-volume kecil untuk memudahkan diskritisasi aliran dan penerapan persamaan pengendali. Agar simulasi akurat, pemilihan *meshing* pada geometri harus disesuaikan dengan perkiraan perubahan pola aliran yang terjadi. Proses *meshing* ini membagi model solid menjadi elemen-elemen kecil, sehingga kondisi batas dan parameter yang dibutuhkan dapat dihitung dengan lebih tepat pada setiap elemen tersebut. *Meshing volume* sebagian besar menggunakan *metode automatic* dengan tipe elemen *polyhedra*, serta pengaturan maksimal ukuran sisi (*maximal face size*) sebesar 1,1 meter. Pengaturan ini menghasilkan total 603.755 *node* dan 166.964 elemen. Visualisasi hasil *meshing* pada *boiler* dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 *Meshing* Desain Simulasi

3.3.2 *Processing*

Hasil *meshing* dan domain dari simulasi numerik diekspor ke *solver* untuk diproses lebih lanjut. Beberapa pengaturan yang dilakukan dalam proses ini mencakup model, material, kondisi batas, kondisi operasi, kondisi kontrol dan pemantauan, serta kondisi awal. Adapun langkah-langkah dalam proses pemrosesan adalah sebagai berikut:

3.3.2.1 Model

Pada langkah ini, dilakukan pemodelan aliran yang mencakup estimasi karakteristik aliran, termasuk pemilihan model *multiphase* dan penentuan model turbulensi yang akan

digunakan. Dalam penelitian ini, model yang dipilih adalah model turbulensi *viscous k-epsilon* standar. Pemilihan model ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh, baik dalam hal kontur tekanan maupun kecepatan, akurat. Detail lebih lanjut mengenai pemodelan ini dapat dilihat pada Tabel 3.2

Tabel 3. 2 Pemilihan Model Simulasi

No	Model	Keterangan	Landasan Pemilihan
1	<i>Multiphase</i>	<i>Eulerian</i>	Penelitian dilakukan terhadap aliran solid-gas, yang melibatkan batubara, biomassa, pasir dan udara
2	<i>Energi Equation</i>	ON	Untuk menentukan kondisi batas temperatur
3	<i>Turbulance</i>	<i>K-epsilon Standard</i>	Dapat mengatasi masalah <i>buoyancy</i> , <i>heating</i> , dan <i>combustion</i> panas
4	<i>Radiation</i>	OFF	Penelitian tidak membahas perpindahan panas
5	<i>Heat Exchanger</i>	OFF	Dapat diabaikan
6	<i>Species</i>	ON	Untuk menentukan karakteristik bahan bakar
7	<i>Discreate Phase Mode</i>	ON	Mendefinisikan injeksi <i>inlet</i> batubara
8	<i>Solidification</i>	OFF	Tidak digunakan
9	<i>Acoustic</i>	OFF	Tidak digunakan
10	<i>Eulerian Wall Film</i>	OFF	Tidak digunakan
11	<i>Steady State</i>	ON	Sesuai Kondisi Operasional

Model *multiphase Eulerian* dipilih karena kemampuannya yang sangat baik dalam memodelkan aliran granular, seperti partikel batubara, pasir, dan biomassa, dalam fase gas. Model *multiphase* lain seperti

Volume of Fluid (VOF) lebih cocok untuk aliran permukaan bebas (*free surface flow*), sementara model *Mixture* lebih tepat untuk aliran homogen yang melibatkan pencampuran fase secara sempurna. Oleh karena itu, pendekatan *Eulerian* lebih akurat dalam menggambarkan interaksi solid-gas yang kompleks di dalam *furnace* CFB.

Model *Energy Equation* diaktifkan (*ON*) untuk memungkinkan perhitungan distribusi temperatur dalam domain simulasi. Ini penting untuk mengetahui profil termal sistem, yang berpengaruh langsung terhadap laju pembakaran, perpindahan panas, dan efisiensi keseluruhan proses.

Untuk menangani aliran turbulen dalam sistem, digunakan model turbulensi *k-ε standard* karena menawarkan kestabilan numerik, efisiensi komputasi, dan keakuratan yang memadai untuk berbagai jenis aliran. Model ini terbukti efektif dalam menangani masalah *buoyancy*, pemanasan (*heating*), dan perpindahan panas akibat turbulensi (*combustion*). Variasi lain seperti *RNG k-ε* dan *realizable k-ε* memang menawarkan akurasi yang lebih tinggi pada kasus-kasus khusus seperti aliran berputar atau separasi aliran, namun membutuhkan waktu komputasi yang lebih tinggi sebesar 10–15% (Sudarmanta et al., 2017). Maka dari itu, *k-ε standard* dipilih sebagai kompromi terbaik antara akurasi dan efisiensi.

Model *Radiation* dimatikan (*OFF*) karena fokus penelitian tidak terletak pada perpindahan panas radiasi, yang umumnya signifikan hanya dalam pembakaran temperatur tinggi atau pada permukaan logam terbuka. Begitu juga dengan *Heat Exchanger* yang tidak diaktifkan karena sistem yang disimulasikan tidak mencakup komponen penukar panas secara eksplisit.

Model *Species* diaktifkan (*ON*) karena diperlukan untuk menghitung distribusi dan reaksi kimia antar komponen bahan bakar, seperti karbon, hidrogen, dan oksigen. Hal ini krusial dalam memahami karakteristik pembakaran, terutama dalam sistem *co-firing* yang melibatkan campuran bahan bakar batubara dan biomassa.

Model *Discrete Phase* juga diaktifkan (*ON*) karena digunakan untuk mendefinisikan injeksi partikel batubara sebagai fase terpisah yang memasuki domain aliran. Model ini membantu melacak lintasan, kecepatan, serta interaksi partikel terhadap aliran utama, sehingga memberikan informasi penting mengenai distribusi partikel bahan bakar di dalam *furnace*.

Sementara itu, model seperti *Solidification*, *Acoustic*, dan *Eulerian Wall Film* tidak digunakan (*OFF*) karena tidak relevan dengan studi ini. *Solidification* biasanya dipakai dalam proses pembekuan logam, *Acoustic* dalam simulasi gelombang suara, dan *Wall Film* untuk film cair pada permukaan, yang semuanya tidak terdapat dalam konfigurasi *furnace* CFB ini.

Model *Steady State* digunakan (*ON*) karena kondisi operasi sistem dianggap stabil secara waktu (*steady*), bukan bersifat transien (*time-dependent*). Hal ini memudahkan perhitungan dan mempercepat proses konvergensi simulasi.

3.3.2.2 Material

Material yang digunakan dalam simulasi *boiler* disesuaikan dengan kondisi aktual di lapangan, yaitu berupa campuran gas dan partikel padat. Pemilihan material ini merujuk pada karakteristik fluida yang umum ditemukan dalam proses pembakaran, sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 3.3 dan 3.4. Untuk memperoleh

nilai massa jenis udara, digunakan rumus gas ideal dengan mempertimbangkan parameter suhu dan tekanan. Adapun perhitungan viskositas udara dilakukan menggunakan persamaan Sutherland, yang memungkinkan estimasi viskositas lebih akurat terhadap variasi suhu. Pendekatan ini bertujuan untuk menghasilkan pemodelan fluida yang representatif dan sesuai dengan kondisi operasional sebenarnya (Sutherland, 1893).

Tabel 3. 3 Properti Udara PLTU Sebalang

Variasi Fuel	Properti Udara		Sumber Boiler	
	Massa Jenis (kg/m ³)	Viskositas (kg/m-s)	Temperatur (°C)	Tekanan (Pa)
100 % Batubara	0,314161829	$4,45021 \times 10^{-5}$	850,63	-325
10 % Biomass + 90 % Batubara	0,316060249	$4,43443 \times 10^{-5}$	843,88	-275
20 % Biomass + 80 % Batubara	0,32054547	$4,39769 \times 10^{-5}$	828,25	-225

Sumber: Data Operasional PLN UP Sebalang, 2024

Tabel 3. 4 Properti Pasir

Properti	Nilai	Rujukan
Massa Jenis (kg/m ³)	2.500	(Sudarmanta et al., 2017)
Diameter (m)	0,0002	(Sudarmanta et al., 2017)
Viskositas (kg/m-s)	0,00103	(Sudarmanta et al., 2017)
<i>Vol of Fraction</i> Awal	0,4	(Zhang et al., 2010)
Ketinggian bed awal (m)	2,3	(Zhang et al., 2010)

Tabel 3. 5 Properti Karakteristik *Woodchips* dan Batubara PLTU Sebalang

Parameter	Unit	<i>Woodchips</i>	Batubara 100 %	Batubara 90 % + WC 10 %	Batubara 80 % + WC 20 %
<i>Proximate Nalaysis</i>					
Total <i>Moisture</i>	%Wt	35,45	38,68	41,60	42,82
<i>Moisture in the Analysis Sample</i>	%Wt				
<i>Ash Content</i>	%Wt	2,38	5,96	5,73	5,19
<i>Volatile Matter</i>	%Wt	49,96	29,05	28,34	28,17
<i>Fixed Carbon</i>	%Wt	12,21	26,30	24,33	23,82
<i>Total Sulfur</i>	%Wt	0,04	0,34	0,25	0,21
<i>Gross Calorific Value</i>	kcal/kg	3.202	3.779	3.555	3.450
<i>Ultimate Analysis</i>					
<i>Carbon</i>	%Wt	32,61	39,27	36,92	36,10
<i>Hydrogen</i>	%Wt	3,17	2,84	2,66	2,65
<i>Nitrogen</i>	%Wt	0,46	0,50	0,36	0,49
<i>Oxigen</i>	%Wt	25,85	12,41	12,45	12,54

Sumber: Data Operasional PLN UP Sebalang, 2024

3.3.2.3 Kondisi Operasi

Kondisi Operasi mengacu pada penetapan kondisi operasi yang umumnya menggunakan perkiraan tekanan pada kondisi STP (*Standard Temperature and Pressure*), yaitu sebesar 1 atm atau 101.325 Pascal. Selain itu,

pengaruh gravitasi juga harus diperhitungkan, dengan gaya gravitasi sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$ yang diarahkan pada sumbu Z, sehingga mempengaruhi aliran fluida dalam simulasi.

3.3.2.4 Boundary Condition

Boundary Conditions adalah penetapan nilai dan keadaan tertentu pada domain aliran agar simulasi benar-benar mencerminkan fenomena fisik yang terjadi. Menentukan batasan ini secara tepat sangat krusial agar model mampu menghasilkan data yang realistis dan dapat dipercaya.

Input nilai yang digunakan untuk *boundary condition* dalam simulasi numerik CFB boiler ini dapat ditemukan dalam Tabel 3.6. Tabel tersebut memberikan rincian parameter yang diperlukan, seperti tekanan, temperatur, massa jenis, viskositas dan lain-lain, sehingga membantu dalam mengatur kondisi awal yang diperlukan untuk analisis yang lebih mendalam. Dengan pengaturan yang tepat, simulasi dapat memberikan hasil yang valid dan relevan untuk evaluasi kinerja boiler.

Tabel 3. 6 *Setting Properties Boundery*

Parameter	Type	Fase	Nilai Input			Satuan
			100% BB	90%BB + 10%WC	80%BB + 20%WC	
<i>Primary Air</i>	<i>Velocity Inlet</i>	Udara	29,01	29,59	30,17	m/s
<i>Secondary Air</i>	<i>Velocity Inlet</i>	Udara	30,17	30,77	31,38	m/s
<i>Coal Inlet</i>	<i>Mass Flow Inlet</i>	Solid	4,99	5,22	5,55	kg/s
<i>FA Inlet</i>	<i>Velocity Inlet</i>	Udara	4,77	4,87	4,96	m/s
<i>Flue Gas Outlet</i>	<i>Pressure Outlet</i>	<i>Mixture</i>	-225	-275	-325	Pa

Sumber: Data Operasional PLN UP Sebalang, 2024

3.3.2.5 Solution

Solusi yang diterapkan dalam penelitian ini menggunakan perangkat lunak *Ansys Fluent*, yang dikenal luas dalam simulasi dinamika fluida dan analisis aliran. Dalam penelitian ini, kami menggunakan pengaturan *default* yang telah ditetapkan dalam perangkat lunak tersebut untuk memastikan akurasi dan konsistensi hasil simulasi.

Untuk tekanan-kecepatan, menggunakan metode *phase coupled SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)*, yang merupakan teknik yang umum digunakan dalam analisis aliran fluida untuk mengatasi masalah ketidakseimbangan antara tekanan dan kecepatan aliran. Selain itu, untuk menghitung gradien, digunakan metode *Least Square Cell Based*, yang memberikan hasil yang lebih akurat dalam representasi gradien aliran. Untuk penghitungan momentum, kami menerapkan metode *First Order Upwind*, yang meskipun sederhana, cukup efektif untuk berbagai kondisi aliran. Pada sisi lain, untuk menentukan Energi Kinetik Turbulen dan Laju Disipasi Turbulen, kami juga menggunakan metode *First Order Upwind*. Penggunaan metode ini memungkinkan simulasi untuk menangkap karakteristik aliran turbulen dengan baik, meskipun dengan pendekatan yang lebih sederhana.

3.3.2.6 Initialize

Langkah perhitungan awal merupakan bagian yang sangat penting dalam proses simulasi, terutama untuk mempermudah pencapaian hasil yang konvergen selama tahap iterasi. Melalui tahapan ini, dilakukan penetapan nilai awal dari variabel-variabel yang terlibat dalam simulasi, seperti tekanan, kecepatan, dan suhu. Proses ini

dikenal sebagai *initialize*, di mana penetapan kondisi awal ini bertujuan untuk meminimalkan kesalahan dan mempersingkat waktu yang dibutuhkan agar simulasi mencapai konvergensi. Dengan memastikan bahwa perhitungan dimulai dari estimasi yang tepat, efisiensi simulasi dapat ditingkatkan, yang berdampak langsung pada kualitas hasil akhir yang diharapkan.

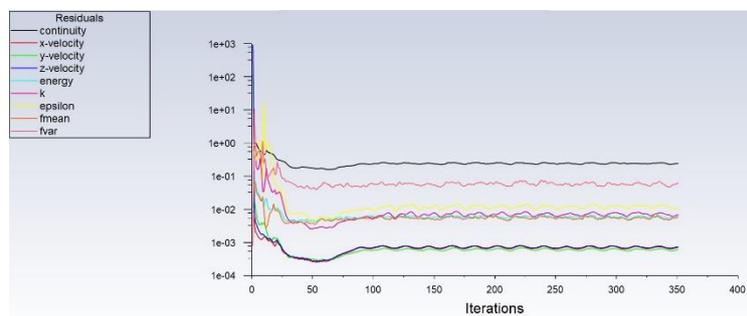
Pada simulasi ini, metode standar *initialize* digunakan karena telah terbukti efektif dalam memberikan estimasi awal yang stabil bagi variabel-variabel aliran. Metode ini sangat penting untuk memastikan bahwa kondisi awal yang diberikan cukup akurat untuk mendorong simulasi berjalan lebih lancar, mengurangi risiko terjadinya instabilitas numerik selama proses iterasi. Dengan estimasi awal yang tepat, diharapkan simulasi dapat menghasilkan data yang lebih akurat dalam waktu yang lebih singkat, mendukung analisis lebih lanjut yang lebih mendalam, serta berkontribusi pada keberhasilan penelitian ini.

3.3.2.7 Monitor Residual

Proses ini merupakan bagian krusial dalam tahap penyelesaian masalah, yang melibatkan iterasi berkelanjutan hingga tercapai kriteria konvergensi yang telah ditetapkan. Pada simulasi ini, kriteria konvergensi diharapkan mencapai nilai 10^{-3} , yang berarti iterasi dianggap berhasil dan konvergen ketika nilai residual turun di bawah angka 10^{-3} . Residual adalah selisih antara nilai yang dihitung dengan nilai yang diharapkan, dan merupakan indikator penting untuk menilai seberapa dekat hasil simulasi dengan solusi yang sebenarnya.

Namun, jika dalam kurun waktu 50 detik *time step* tidak tercapai konvergensi, maka proses simulasi akan

dihentikan untuk dilakukan evaluasi lebih lanjut. Langkah ini penting untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh adalah valid dan dapat dipercaya. Proses validasi ini mencakup analisis terhadap parameter dan pengaturan yang digunakan, serta kemungkinan penyebab kegagalan konvergensi. Dengan pendekatan ini, kami berusaha untuk menjaga kualitas dan akurasi hasil simulasi, sehingga dapat digunakan untuk analisis yang lebih mendalam dalam penelitian ini.



Gambar 3.5 Monitoring Residual

3.3.2.8 Iterasi

Langkah ini merupakan kelanjutan dari proses pemantauan residual, yang berfungsi untuk mengevaluasi kemajuan konvergensi dalam simulasi. Pada tahap ini, perhitungan dilakukan oleh *solver* dengan menggunakan ukuran *time step* antara 0,2 hingga 0,5 detik. Setiap *time step* dirancang untuk menjalani 20 iterasi, yang memungkinkan analisis mendalam terhadap perubahan parameter aliran dalam setiap interval waktu.

3.3.3 *Post-processing*

Setelah simulasi selesai dijalankan, tahap berikutnya adalah *post-processing*. Fase ini sangat penting untuk memvisualisasikan hasil dan menganalisis data yang diperoleh. Dalam *post-processing*, *output* disajikan baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Data kuantitatif

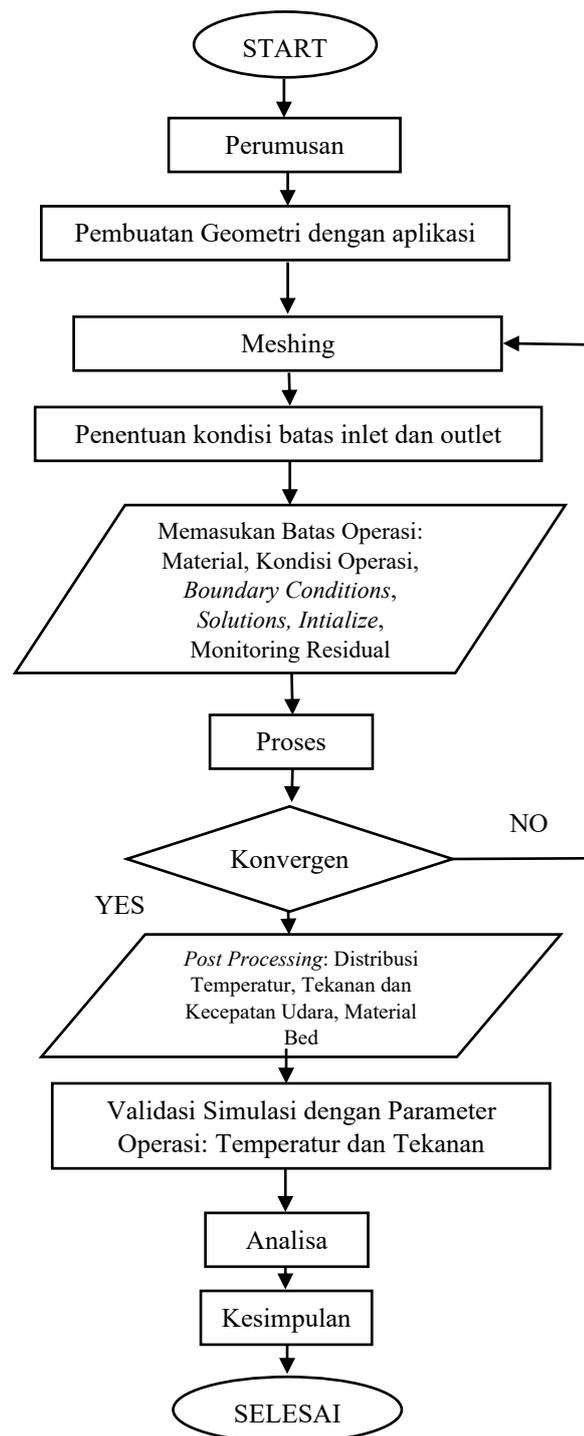
meliputi distribusi tekanan, suhu, dan kecepatan aliran serta volume fraksi. Di sisi lain, data kualitatif menyajikan visualisasi aliran yang mendalam, termasuk *pathlines*, *contour plot*, dan *velocity profile*. Visualisasi ini membantu memahami bagaimana aliran gas-partikel berinteraksi dalam sistem, khususnya dengan variasi kecepatan aliran yang diuji.

Setelah semua data terkumpul dan divisualisasikan, langkah berikutnya adalah melakukan analisis dan perbandingan terhadap hasil yang diperoleh. Proses ini bertujuan untuk mengevaluasi performa sistem dalam berbagai kondisi operasional dan untuk mengidentifikasi potensi masalah yang mungkin terjadi.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Prosedur penelitian numerik pada *boiler* bertipe "*Circulating Fluidized Bed*" (CFB) dapat diringkas melalui beberapa langkah sistematis yang diilustrasikan dalam bentuk diagram alir. Diagram ini berfungsi sebagai panduan visual yang jelas untuk membantu peneliti memahami alur kerja penelitian secara terstruktur, dari awal hingga akhir. Setiap langkah dirancang dengan cermat untuk memastikan penelitian berjalan lancar dan menghasilkan data yang akurat serta relevan dengan tujuan yang telah ditetapkan.

Tahapan penelitian ini dimulai dengan pemodelan awal, yang mencakup pembuatan representasi fisik dan matematis dari *boiler* CFB. Setelah itu, dilakukan pengaturan parameter operasional penting seperti suhu, tekanan, dan laju aliran bahan bakar. Dengan parameter yang telah diatur, simulasi numerik dijalankan menggunakan perangkat lunak khusus untuk memprediksi perilaku sistem. Hasil simulasi kemudian dianalisis secara mendalam guna mengevaluasi pola aliran fluida, distribusi panas, dan efisiensi sistem, yang nantinya menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut dan optimalisasi desain atau operasi *boiler* CFB.



Gambar 3. 6 Diagram Alir Penelitian

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Distribusi temperatur di dalam *furnace* dipengaruhi oleh variasi rasio campuran bahan bakar. Pada penggunaan 100% batu bara, temperatur rata-rata mencapai 945 °C dengan distribusi yang merata terutama di zona tengah *furnace*. Penambahan *woodchips* sebesar 10% menurunkan temperatur menjadi 850 °C, dan pada campuran 20% menjadi 810 °C. Penurunan ini disebabkan oleh nilai kalor *woodchips* yang lebih rendah dibandingkan batu bara serta sifatnya yang cepat terbakar namun menghasilkan energi yang tidak sebesar batubara.
2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tekanan dalam *furnace* menurun seiring peningkatan fraksi *woodchips*. Untuk rasio 100% batu bara, tekanan hasil simulasi adalah 224 Pa dibandingkan data aktual sebesar 60 Pa. Pada campuran 90% batu bara 10% *woodchips*, simulasi menunjukkan 207 Pa dan data aktual 44 Pa, sedangkan untuk campuran 80%–20% diperoleh tekanan simulasi sebesar 88 Pa dan data aktual sebesar 27 Pa. Perbedaan ini disebabkan oleh tidak dimasukkannya efek hisapan dari *induced draft fan* serta tidak dianalisisnya area *backpass* dalam simulasi. Namun demikian, hasil simulasi dan data aktual menunjukkan tren penurunan yang linear dan konsisten, sehingga model dapat digunakan untuk memperkirakan pengaruh rasio bahan bakar terhadap tekanan sistem.
3. Kecepatan aliran udara dalam *furnace* cenderung lebih tinggi pada penggunaan bahan bakar campuran yang mengandung *woodchips*, terutama di titik-titik dekat sumbu vertikal tengah *furnace*. Kecepatan maksimum tercatat sebesar 7,5 m/s untuk campuran 80% batu bara dan 20% *woodchips* pada elevasi 1 meter, sedangkan untuk 100% batu bara hanya mencapai sekitar 4,7 m/s di lokasi serupa. Hal ini mengindikasikan bahwa densitas rendah dari *woodchips* menyebabkan peningkatan kecepatan udara karena partikel *woodchips* lebih mudah terfluidisasi. Selain itu, penambahan proporsi *woodchips* dalam campuran bahan bakar menyebabkan

peningkatan laju massa total bahan bakar yang masuk ke *furnace*, sehingga diperlukan penyesuaian berupa peningkatan laju massa udara (*mass flow rate*) melalui *primary* dan *secondary air fan*. Peningkatan ini secara langsung berkontribusi terhadap naiknya kecepatan udara dalam *furnace* untuk mempertahankan performa pembakaran yang optimal. Namun, peningkatan kecepatan udara juga perlu dikendalikan agar tidak menimbulkan ketidakstabilan aliran atau menyebabkan entrainment partikel yang berlebihan.

4. Volume fraksi pasir (*bed material*) di zona bawah *furnace* mengalami penurunan seiring bertambahnya fraksi *woodchips*. Untuk 100% batu bara, volume fraksi berada di kisaran 0,703–0,667. Pada 90% batu bara 10% *woodchips*, turun menjadi 0,689–0,668, dan pada 80% batu bara 20% *woodchips* menjadi 0,675–0,655. Penurunan ini menunjukkan bahwa partikel ringan *woodchips* meningkatkan pergerakan partikel ke arah atas, mengurangi konsentrasi material padat di zona *dense phase*. Akibatnya, terjadi perubahan pola fluidisasi dari *bubbling* ke arah *turbulent regime*, yang dapat memengaruhi efisiensi perpindahan panas dan kestabilan pembakaran di dalam *furnace*.

5.2 Saran

1. Penggunaan *woodchips* sebagai bahan bakar alternatif dalam sistem *co-firing* perlu disesuaikan dengan karakteristik operasional *furnace*. Disarankan untuk tidak langsung menggunakan rasio tinggi tanpa adanya tahapan pengujian bertahap, karena rasio biomassa yang terlalu besar dapat menurunkan temperatur dan tekanan dalam *furnace* secara signifikan.
2. Jika implementasi dilakukan secara aktual, pengujian bertahap sangat dianjurkan. Namun, untuk mengidentifikasi dampaknya sebelum percobaan langsung, simulasi numerik dapat dimanfaatkan secara efektif dengan memvariasikan rasio campuran, jenis *woodchips*, serta perlakuan awal seperti torefaksi pada *woodchips*. Simulasi ini mampu memberikan gambaran awal terhadap performa sistem, sehingga dapat meminimalkan risiko saat pengujian nyata.

3. Diperlukan sistem pencampuran bahan bakar yang lebih homogen antara batu bara dan *woodchips*, baik dari sisi fisik (ukuran dan distribusi) maupun sistem pengumpan, agar proses pembakaran tetap efisien dan karakteristik aliran tetap stabil.
4. Mengingat peningkatan kecepatan udara pada fraksi *woodchips* yang lebih tinggi, sistem kontrol udara sekunder sebaiknya dirancang ulang agar distribusi udara lebih merata dan tidak menyebabkan tidak teraturnya aliran maupun *backflow* di dalam *furnace*.
5. Perlu dilakukan studi lanjutan yang tidak hanya fokus pada karakteristik aliran dan distribusi, tetapi juga mencakup aspek lingkungan seperti emisi gas buang (SO_2 , NO_x) serta performa efisiensi termal *boiler* secara keseluruhan dengan metode *high co-firing*.
6. Sebagai pelengkap dari simulasi numerik, diperlukan validasi langsung di lapangan dengan melakukan uji coba *high co-firing* skala penuh dengan menambahkan aspek dari efek *induced draft fan* dan area *backpass* untuk memastikan hasil simulasi mencerminkan kondisi aktual, serta untuk menyesuaikan parameter operasional pada kondisi nyata PLTU.

DAFTAR PUSTAKA

- Basu, P. (2006). *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. CRC Pers.
- Basu, P. (2018). *Biomass combustion and cofiring. Dalam Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. Elsevier, 393–413. <https://doi.org/doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00011-X>
- Bruce, G. M., & Tillman, D. A. (2008). Combustion Engineering Issues for Solid Fuels (B. G. M. D. A. Tillman, Ed.). *Elsevier Ltd.* <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- Crowe, C. T., Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M., & Tsuji, Y. (2011). *Multiphase Flows with Droplets and Particles* (2nd ed.). CRC Press
- Emery, I., & Mosier, N. (2015). *Direct emission of methane and nitrous oxide from switchgrass and corn stover: Implications for large-scale biomass storage. GCB Bioenergy*, 7(4), 865–876. <https://doi.org/doi.org/10.1111/gcbb.12196>
- Ergun, S. (1952). *Fluid Flow through Packed Columns*. Chemical Engineering Progress, 48(2), 89–94.
- Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2020). *Computational Methods for Fluid Dynamics* (4th ed.). Springer.
- Fox, R.W., McDonald, A.T., & Pritchard, P.J. (2020). *Introduction to Fluid Mechanics* (9th ed.). Wiley.
- Ganapathy, V. (2003). *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications, and Calculations*. Marcel Dekker.
- Gil, M. V., & Rubiera, F. (2018). *Coal and biomass cofiring. Dalam New Trends in Coal Conversion: Combustion, Gasification, Emissions, and Coking*. Elsevier, 117–140. <https://doi.org/doi.org/10.1016/B978-0-08-102201-6.00005-4>
- Grace, J. R. (1982). *Fluidized bed hydrodynamics. In Handbook of Multiphase Systems*. McGraw-Hill.
- Hartge, E. U., Werther, J., & Heinrich, S. (1999). *Scale-up of fluidized bed reactors – a review*. Chemical Engineering Science, 54(21), 4217–4227.
- Indarto, R. (2024, January 23). *Penyampaian Laporan Co-Firing Biomass PLN Nusantara Power Bulan Desember Tahun 2023*. Direktorat Operasi Pembangkit Batu Bara.
- Ishii, M., & Hibiki, T. (2011). *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow* (2nd ed.). Springer.
- Kajitani, S., Ikeda, K., Hara, S., & Matsunaga, H. (2009). *Development of a numerical model for biomass and coal co-firing in a pulverized coal*

- furnace*. *Fuel*, 88(10), 1929–1934.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.01.002>
- Karampinis, E., Grammelis, P., Agraniotis, M., Violidakis, I., & Karkaras, E. (2015). *Co-Firing of Biomass with Coal in Thermal Power Plants: Technology Schemes, Impacts, and Future Perspectives*. John Wiley & Sons, Ltd, 233–247. <https://doi.org/doi.org/10.1002/9781118957844.ch15>
- KKBI, K. (2016). *Kamus Besar Bahasa Indonesia*.
- Koppejan, J. (2016). *The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing Edited by Sjaak van Loo and Jaap Koppejan*.
- Kumar, A., & Gupta, R. (2018). *Numerical simulation of pressure drop in a circulating fluidized bed combustor: A comparison with experimental data*. *International Journal of Thermal Sciences*, 129, 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.05.014>
- Kunii, D., & Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering (2nd ed.)*. Butterworth-Heinemann.
- Lauder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). *The Numerical Computation of Turbulent Flows*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269–289.
- Lienemann, P., Rolfes, R., & Appel, S. (2011). *Coupled CFD–CSD simulations using COMSOL Multiphysics: Application to a flexible airship structure*. *Computers & Structures*, 639–646.
- Nag, P. K. (2008). *Power Plant Engineering (3rd ed.)*. Tata McGraw-Hill Education.
- Ndibe, C., Grathwohl, S., Paneru, M., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2015). *Emissions reduction and deposits characteristics during cofiring of high shares of torrefied biomass in a 500 kW pulverized coal furnace*. 177-189.
<https://doi.org/doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.017>
- Orem, W. H., & Frinkelman, R. B. (2003). *Coal Formation and Geochemistry*.
- Pfeiffelmann, B., & Diederich, M. (2019). Analysis of combustion, heat and fluid flow in a biomass furnace. *E3S Web Conference*, 5.
- Pribadi, A. (2021, April 8). *Forum Kehumasan Dewan Energi Nasional: Menuju Bauran Energi Nasional Tahun 2025*. Kepala Biro Komunikasi, Layanan Informasi Publik, dan Kerja Sama. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2021/04/09/2838/forum.kehumasan.dewan.energi.nasional.menuju.bauran.energi.nasional.tahun.2025?lang=en>
- Roni, M., Chowdury, S., Mamun, S., & Marufuzzaman, M. (2017). *Biomass Co-Firing Technology with Policies, Challenges, and Opportunities: A Global Review*. <http://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>.
- Schramm, D. (2021). *ANSYS Workbench for Mechanical Engineering*. Springer.

- Smith, J. A., & Brown, R. C. (2020). *Assessment of Thermal Distribution in Process Systems. International Journal of Thermal Sciences*, 150, 499-510. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2019.08.024
- Steam, B. (2011). *Steam: Its Generation and Use (42nd ed.)*. Babcock & Wilcox Company.
- Subagyo, R. (2018). *Sistem pembangkit dan Turbin Uap*. Banjar Baru: Universitas Lambung Mangkurat.
- Sudarmanta, B., Wijayanto, R. M., SYaifudin, A., & Nugroho, G. (2017). *Studi Numerik Pengaruh Diameter Bed Material terhadap Karakteristik Fluidisasi pada Circulating Fluidized Bed Boiler Beban 28,6 MW*. Program Studi Teknik Mesin Universitas Kristen Petra.
- Suprianto, S. (2015). *Pengertian Boiler (ketel uap)*. Artikel Teknologi.
- Sutherland, W. (1893). *The viscosity of Gases and Molecular Force*. *Philosophical Magazine*, 36, 507–531.
- Turns, S. R. (2012). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Versteeg, H.K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamic: The Finite Volume Methode* (2nd ed.). Pearson Education
- Wander, P. R., Bianchi, F. M., Caetano, N. R., Klunk, M. A., & Indrusiak, M. L. S. (2020). *Cofiring low-rank coal and biomass in a bubbling fluidized bed with varying excess air ratio and fluidization velocity*. 203. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117882>
- Wang, X., & Li, Y. (2021). *Analysis of pressure drop in a circulating fluidized bed furnace: Experimental and numerical study*. *Energy*, 233, 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121456>
- Weller, H. G., Tabor, G., Jasak, H., & Fureby, C. (1998). *A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques*. *Computers in Physics*, 12(6), 620–631. <https://doi.org/10.1063/1.168744>
- Woodruff, E. B., Lammers, H. B., & Lammers, T. B. (2004). *Steam Power Operation Eight Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Xu, Y., Yang, K., Zhou, J., & Zhao, G. (2020). *Coal-Biomass Co-Firing Power Generation Technology: Current Status, Challenges and Policy Implications*. School of Management Science and Engineering, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China. <https://doi.org/10.3390/su12093692>
- Zhang, N., Lu, B., Wang, W., & Li, J. (2010). *D CFD Simulation of Hydrodynamics of A 150 MWe Circulating Fluidized Bed Boiler*. 162, 821–828.
- Zhao, Y., & Zhang, L. (2020). *Investigation of pressure distribution in a circulating fluidized bed combustor using computational fluid dynamics*. *Chemical*

Engineering Journal, 392, 123-134.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.123456>