

**PENGARUH VARIASI CAMPURAN BATUBARA DAN BIOMASSA
TERHADAP EFISIENSI BOILER *CIRCULATING FLUIDIZED BED* (CFB)
METODE TIDAK LANGSUNG (*INDIRECT*) DI PLTU UNIT 3 TARAHAH
LAMPUNG**

(Skripsi)

Oleh

NUR FAJAR SIDIK

2117041034



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI CAMPURAN BATUBARA DAN BIOMASSA TERHADAP EFISIENSI BOILER *CIRCULATING FLUIDIZED BED* (CFB) METODE TIDAK LANGSUNG (*INDIRECT*) DI PLTU UNIT 3 TARAHAH LAMPUNG

Oleh

NUR FAJAR SIDIK

Energi listrik merupakan kebutuhan utama dalam kehidupan modern, yang sebagian besar disediakan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara. Penggunaan batubara memberikan dampak signifikan terhadap emisi gas rumah kaca (GRK), terutama karbon dioksida (CO₂). Oleh karena itu, PLTU Tarahan Lampung yang memiliki tipe boiler *Circulating Fluidized Bed* (CFB) menggunakan biomassa sebagai campuran bahan bakar selain batubara sebagai upaya untuk menurunkan emisi gas rumah kaca tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi campuran batubara dan biomassa terhadap efisiensi boiler metode tidak langsung (*indirect method*) di PLTU Unit 3 Tarahan Lampung. Penelitian ini menggunakan komposisi campuran bahan bakar dengan persentase 100% batubara, serta campuran batubara dengan biomassa sebesar 10%, 20%, 30%, dan 40%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi termal boiler menurun seiring meningkatnya proporsi biomassa. Pada bahan bakar 100% batubara, efisiensi mencapai 81,76%, sementara pada 40% biomassa menurun menjadi 78,32% yang disebabkan oleh faktor utama seperti nilai kalor, konsumsi bahan bakar, dan kandungan *moisture* bahan bakar. Campuran optimal untuk mendapatkan emisi CO₂ yang rendah namun tetap menjaga efisiensi pembangkit adalah 80% batubara dan 20% biomassa. Sehingga dengan batas biomassa tidak lebih dari 20% efisiensi pembangkit tetap terjaga namun dengan emisi CO₂ yang rendah. Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan rekomendasi pengelolaan bahan bakar campuran yang mendukung efisiensi energi dan keberlanjutan di PLTU.

Kata kunci: CFB, efisiensi termal, metode tidak langsung, PLTU Tarahan

ABSTRACT

THE EFFECT OF COAL AND BIOMASS MIXTURE VARIATIONS ON THE EFFICIENCY OF CIRCULATING FLUIDIZED BED (CFB) BOILER USING THE INDIRECT METHOD AT COAL POWER PLANT UNIT 3 TARAHAN LAMPUNG

By

NUR FAJAR SIDIK

Electric energy is a primary necessity in modern life, most of which is supplied by Coal Power Plants (CPP). The use of coal has a significant impact on greenhouse gas (GHG) emissions, particularly carbon dioxide (CO₂). Therefore, the CPP Tarahan Lampung, which operates a Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler, utilizes biomass as a co-firing fuel alongside coal in an effort to reduce greenhouse gas emissions. This study aims to analyze the effect of varying coal and biomass mixtures on the boiler efficiency using the indirect method at CPP Unit 3 of the Tarahan Lampung. The research employs different fuel compositions, including 100% coal and coal-biomass mixtures of 10%, 20%, 30%, and 40%. The results indicate that thermal efficiency decreases as the biomass proportion increases. When using 100% coal, the efficiency reaches 81,76%, whereas with 40% biomass, it decreases to 78,32% due to key factors such as calorific value, fuel consumption, and fuel moisture content. The optimal mixture to achieve low CO₂ emissions while maintaining power plant efficiency is 80% coal and 20% biomass. Thus, keeping the biomass proportion below 20% ensures power plant efficiency while reducing CO₂ emissions. These findings provide recommendations for mixed fuel management that supports energy efficiency and sustainability in CPP.

Keywords: CFB, thermal efficiency, indirect method, CPP Tarahan

**PENGARUH VARIASI CAMPURAN BATUBARA DAN BIOMASSA
TERHADAP EFISIENSI BOILER *CIRCULATING FLUIDIZED BED* (CFB)
METODE TIDAK LANGSUNG (*INDIRECT*) DI PLTU UNIT 3 TARAHAH
LAMPUNG**

Oleh

NUR FAJAR SIDIK

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar

SARJANA SAINS

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

Judul Penelitian : Pengaruh Variasi Campuran Batubara dan Biomassa Terhadap Efisiensi Boiler *Circulating Fluidized Bed* (CFB) Metode Tidak Langsung (*Indirect*) di PLTU Unit 3 Tarahan Lampung

Nama Mahasiswa : Nur Fajar Sidik

NPM : 2117041034

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Drs. Pulung Karo-Karo, M.Si.
NIP. 196107231986031003

Antonius Wahyu Nugroho, S.T., M.M.
NIK. 8108059Z

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

Arif Surtiono, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP. 197109092000121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

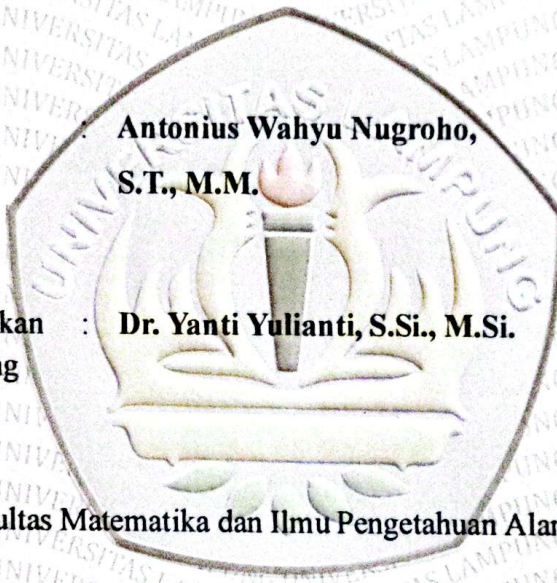
: Drs. Pulung Karo-Karo, M.Si.

Sekretaris

: Antonius Wahyu Nugroho,
S.T., M.M.

Penguji Bukan
Pembimbing

: Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



: Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 19 Maret 2025

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis mengacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan ini tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi dan bertanggung jawab sebatas dengan pemaparan dari skripsi ini.

Bandar lampung, 19 Maret 2025

Yang Menyatakan



Nur Fajar Sidik

NPM. 2117041034

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Nur Fajar Sidik, lahir di Desa Rajabasa Lama, Kec. Labuhan ratu, Kab. Lampung Timur pada tanggal 31 Januari 2003. Penulis merupakan anak tunggal dari pasangan Bapak Ahmad Taufik dan Ibu Sumarmi. Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN 1 Rajabasa Lama pada tahun 2015, SMPN 1 Labuhan Ratu pada tahun 2018 dan SMAN 1 Labuhan Ratu pada tahun 2021.

Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Fisika, FMIPA Universitas Lampung melalui SNMPTN tahun 2021. Selama menempuh pendidikan di Universitas Lampung, penulis aktif tergabung pada organisasi kemahasiswaan. Pada tahun 2022, penulis menjadi anggota pengurus bidang Sosial Masyarakat (Sosmas), Himpunan Mahasiswa Fisika FMIPA Unila, dan menjadi Kepala Bidang Sosmas Himafi FMIPA Unila pada tahun 2023. Kemudian, penulis juga menjadi pengurus Dinas Isu dan Pergerakan (Isper) BEM FMIPA Unila pada tahun 2022 serta anggota Seni Sastra Tim Minat Bakat FMIPA Unila tahun 2022. Selain itu, diluar kampus penulis juga aktif diberbagai komunitas dan organisasi seperti menjadi pengurus bidang Hubungan Masyarakat (Humas) pada organisasi Forum Komunikasi Putra Putri Indonesia Bersatu (FKPPIB) dan organisasi Forum Mahasiswa dan Pemuda Lampung Timur (FORMAPA Lamtim) pada tahun 2022. Penulis juga pada tahun ini aktif di Komunitas Jendela Lampung (KJL). Penulis juga memiliki berbagai pengalaman kerja, antara lain Praktik Kerja Lapangan di PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Tarahan, Lampung Selatan, Lampung, dari 8 Januari hingga 8 Februari 2024. Pada bulan September 2024 hingga sekarang penulis sedang aktif bekerja sebagai pengajar di Bimbingan Belajar Eiksa Edugroup.

Penulis melakukan pengabdian terhadap masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Periode II tahun 2024 di Desa Braja Emas, Kecamatan Way Jepara, Kabupaten Lampung Timur. Pada tahun 2024 penulis mempublikasikan jurnal pengabdian berjudul ***“Sosialisasi Pembuatan Briket Dari Limbah Sekam Padi Sebagai Langkah Energi Ramah Lingkungan di Desa Braja Emas, Kecamatan Way Jepara, Kabupaten Lampung Timur”***. Kemudian, penulis pernah menjadi panitia dalam kegiatan Karya Wisata Ilmiah XXXIII di Pantai Ketapang Bahari, Pesawaran Lampung pada tahun 2022 yang diselenggarakan oleh BEM FMIPA Unila. Selain itu, penulis pernah menjadi anggota peneliti pada penelitian Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) dengan judul ***“Produksi Prototype Pembangkit Energi Listrik Elektrokimia Air Laut Dengan Sistem Otomatisasi Pengisian Air Laut, dan Charging untuk Regenerasi Anoda”*** pada 24 April-30 Juni 2024.

Penulis telah menjadi Ketua Pelaksana kegiatan Musyawarah Nasional Ikatan Himpunan Mahasiswa Fisika Indonesia (IHAMAFI) yang diselenggarakan oleh Himafi FMIPA Unila pada tanggal 1-6 Agustus 2023 dan menjadi Ketua Pelaksana Fisika Peduli di Pantai Ketapang Bahari, Pesawaran, Lampung yang diselenggarakan oleh Himafi FMIPA Unila tahun 2022. Kemudian, penulis juga telah menjadi asisten Praktikum Fisika Dasar I, Praktikum Fisika Dasar II, dan Praktikum Fisika Eksperimen untuk Mahasiswa Jurusan Fisika FMIPA Unila tahun 2023. Penulis juga aktif dalam berbagai perlombaan seperti PKM, ONMIPA Tingkat Universitas, lomba Karya Tulis Ilmiah (LKTI) dan lomba Musabaqah Karya Tulis Ilmiah Al-Our'an (MTQM) tingkat FMIPA Unila tahun 2024, serta lomba Karya Tulis Ilmiah tingkat Nasional tahun 2024. Penulis menjadi juara 1 lomba MTQM dan juara 3 lomba LKTI dalam rangka Dies Natalis FMIPA Unila pada tahun 2024. Penulis juga menjadi peserta dalam lomba Esai Nasional Brawijaya Legislative Class yang diselenggarakan Dewan Perwakilan Keluarga Mahasiswa Universitas Brawijaya PSDKU Kediri pada tahun 2024 serta peserta lomba Esai Hari Guru Nasional tahun 2024. Lalu, penulis menjadi peraih medali emas dalam olimpiade Fisika jenjang mahasiswa dalam *National Youth Science Olympiad* pada tahun 2024.

MOTTO

*“La tahzan innallaha ma'ana, Janganlah engkau bersedih,
sesungguhnya Allah bersama kita”*

(Q.S. At-Taubah: 40)

*“Kamu tidak akan pernah gagal sampai kamu berhenti
mencobanya”*

(Albert Einstien)

*“Kamu hanya orang biasa, tetapi suatu saat kamu akan
menciptakan sesuatu yang luar biasa, entah itu esok atau
lusa”*

(Nur Fajar Sidik)

*“Bacotanmu menjadi penyemangatku, suatu saat aku akan
membungkam mulut yang pernah merendahkan keluargaku”*

(Nur Fajar Sidik)

*“Perbanyak bersyukur dengan apa yang kita punya sekarang,
karena dengan kita bersyukur insyaallah Allah SWT. akan
menambahkan kenikmatan dan rezeki-Nya buat kita”*



PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan rasa syukur kepada Allah SWT dan syafaat Nabi Muhammad SAW, karya ini kupersembahkan untuk

Orangtuaku Tercinta

Bapak Ahmad Taufik dan Ibu Sumarmi

Terimakasih atas segala kasih dan sayang serta dukungan baik materi atau non materi yang telah diberikan kepada aku. Dan terimakasih telah membesarkan, mendidik dan menguatkan aku sampai detik ini kepadaku.

Para Dosen dan Civitas Akademika

Terimakasih telah memotivasi, memberikan dukungan, ilmu dan membimbing hingga dapat menyelesaikan pendidikan di tingkat Universitas sebagai Sarjana.

Almamaterku Tercinta
“UNIVERSITAS LAMPUNG”

KATA PENGANTAR

Segala puji atas rasa syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan nikmat iman, sehat dan ilmu yang bermanfaat kepada penulis. Sehingga, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Campuran Batubara dan Biomassa Terhadap Efisiensi Boiler *Circulating Fluidized Bed* (CFB) Metode Tidak Langsung (*Indirect*) di PLTU Unit 3 Tarahan Lampung”**. Shalawat serta salam penulis hanturkan kepada suri tauladan alam Nabi Muhammad SAW, keluarga, sahabat dan para pengikutnya. Semoga kita semua dapat memperoleh pertolongan beliau di hari akhir kelak. Tujuan dari penulis skripsi ini sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam penyajian skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak untuk perbaikan dari skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat menjadi penambah referensi dan rujukan terhadap pengembangan riset dalam efisiensi boiler di PLTU Tarahan dan pengembangan biomassa sebagai sumber energi bahan bakar.

Bandar lampung, 19 Maret 2025
Penulis

Nur Fajar Sidik

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillahirobbilalamin. Segala puji kehadiran Allah SWT. yang telah memberikan limpahan rahmat, hidayat serta karunia-Nya dan tak lupa iringan sholawat senantiasa kita sanjung agungkan kepada Rasulullah Muhammad SAW., yang insya Allah kita akan mendapatkan syafaatnya diyaumul akhir kelak. Sehingga dalam pengerjaan, penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan judul **“Pengaruh Variasi Campuran Batubara dan Biomassa Terhadap Efisiensi Boiler *Circulating Fluidized Bed* (CFB) Metode Tidak Langsung (*Indirect*) di PLTU Unit 3 Tarahan Lampung”**. Penulis menyadari penulisan skripsi ini dapat tersusun dan terselesaikan dengan adanya bantuan, motivasi dan do'a dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Drs. Pulung Karo Karo, M.Si. selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan saran, masukan, bimbingan, motivasi, semangat dan dukungan selama pengerjaan skripsi kepada penulis.
2. Bapak Antonius Wahyu Nugroho, S.T., M.M. selaku Pembimbing II yang telah memberikan saran, masukan, bimbingan, motivasi, semangat dan dukungan penuh dari awal perkuliahan hingga pengerjaan skripsi kepada penulis.
3. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan arahan, kritik dan saran yang membangun selama pengerjaan skripsi kepada penulis.
4. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.

5. Ibu Dr. Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si., selaku Pembimbing Akademik yang selalu memberikan saran, arahan dan masukan kepada penulis selama perkuliahan.
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
7. Bapak dan Ibu Dosen serta staf Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan banyak ilmu, pengalaman dan motivasi kepada penulis selama perkuliahan.
8. Karyawan PLTU Tarahan Lampung, Bapak Dwi Suprianto, Bapak Ismail, Ibu Paryati, Ibu Dewi Teja Rukmi, Bapak Ikhsan Mulia Hardi, Bapak Deddy Fardiansyah, Bapak Agus Soleh, Ibu Kartika Purwaningrum, Ibu Sari Liza Azura Nst, Ibu Gelistari Putri Sundana, Bapak Fajar Septiadi, Bapak Adi Yusuf, Bapak Ilman Setiawan, Bapak Amin Solichin, Ibu Reni Anggraini dan seluruh staf karyawan PLTU Tarahan Lampung yang telah membantu dan memberikan dukungan penuh selama pengerjaan skripsi kepada penulis.
9. Orang Tua Tercinta penulis yaitu Bapak Ahmad Taufik dan Ibu Sumari. Terimakasih banyak bapak ibu yang telah memberikan semangat, motivasi dan dukungan penuh kepada anakmu tercinta ini dari kecil hingga saat ini. Terimakasih banyak kepada kedua orang tuaku tercinta yang telah membesarkanku dan menyekolahkanku hingga sampai detik ini. Terimakasih banyak atas doa-doamu yang telah menembus langit. Terimakasih atas kasih sayangmu yang melimpah, terimakasih banyak bapak ibu. Aku sayang kalian berdua, sehat-sehat bapak ibu, aku sangat sayang bapak ibu berdua, aku berjanji akan mengangkat derajat keluarga kita dan membanggakan kalian berdua, I Love You bapak ibu tercinta.
10. Kakek-Nenek penulis, Kakek Alm Wagiran, Kakek Alm. Setu, Nenek Sutibah dan Nenek Katirah yang telah memberikan kasih sayang yang melimpah, dukungan, semangat dan motivasi yang tulus bagi penulis dari kecil hingga saat ini.
11. Saudara-saudara penulis, yang telah memberikan semangat, dukungan dan motivasi selama pengerjaan skripsi kepada penulis.

12. Teman sekaligus partner penulis, yaitu Melisa Bitha yang telah memberikan semangat, motivasi, dan dukungan selama perkuliahan dan pengerjaan skripsi kepada penulis.
13. Teman – teman pimpinan Himafi Unila Periode 2023, yang memberikan dukungan agar dapat menyelesaikan skripsi ini.
14. Seluruh teman – teman Jurusan Fisika Angkatan 2021 yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Terima kasih selalu memberikan semangat dan dorongan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Demikian yang dapat penulis sampaikan, masih terdapat banyak kekurangan dan kesalahan dalam penyusunan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini mampu dijadikan sebagai referensi yang bermanfaat. Semoga Allah SWT. selalu memberikan rezeki serta karunia-Nya. Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Bandar lampung, 19 Maret 2025

Penulis

Nur Fajar Sidik

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
 I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
1.5 Batasan Masalah	6
 II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terdahulu.....	7
2.2 Landasan Teori	9
2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)	9
2.2.2 Jenis-Jenis Boiler.....	12
2.2.3 Boiler <i>Circulating Fluidized Bed</i> (CFB)	14
2.2.4 Batubara.....	16
2.2.5 Biomassa.....	20
2.2.6 Pengujian Kualitas Batubara	23

2.2.7 Efisiensi Boiler	28
2.2.8 <i>Performance Test</i> PLTU	35

III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	37
3.2 Alat dan Bahan	37
3.2.1 Alat Penelitian	38
3.2.2 Bahan Penelitian	38
3.3 Prosedur Penelitian	39
3.4 Data yang Diperlukan untuk Perhitungan	40
3.5 Diagram Alir	41
3.5.1 Diagram Alir Penelitian	41
3.5.2 Diagram Alir Preparasi Sampel Bahan Bakar	42
3.5.3 Diagram Alir Analisa TGM, TGA, Sulfur <i>Analyzer</i> dan Kalorimeter	43

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Analisa Penelitian	44
4.1.1 Hasil Analisa Preparasi Sampel Bahan Bakar	44
4.1.2 Hasil Analisa <i>Thermogravimetric Moisture Analyzer</i> (TGM)	46
4.1.3 Hasil Analisa <i>Thermogravimetric Analyzer</i> (TGA)	49
4.1.4 Hasil Analisa Sulfur <i>Analyzer</i>	52
4.1.5 Hasil Analisa Kalorimeter	53
4.2 Hasil Perhitungan Efisiensi Boiler Metode Tidak Langsung	55
4.3 Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi Boiler Metode Tidak Langsung	62
4.4 Strategi Optimalisasi Penggunaan Campuran Batubara dan Biomassa untuk Meningkatkan Efisiensi dan Mengurangi Emisi	65

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan	67
5.2 Saran	68

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Prinsip Kerja PLTU	9
Gambar 2.2 Diagram T-S Siklus <i>Rankine</i> Ideal	10
Gambar 2.3 <i>Fire Tube</i> Boiler	12
Gambar 2.4 <i>Water Tube</i> Boiler	13
Gambar 2.5 Paket Boiler	13
Gambar 2.6 Boiler CFB.....	14
Gambar 2.7 <i>Bag House Filter</i>	15
Gambar 2.8 <i>Electrostatic Precipitators</i>	15
Gambar 2.9 Gambut	17
Gambar 2.10 Lignit	17
Gambar 2.11 Sub- <i>Bituminous</i>	18
Gambar 2.12 <i>Bituminous</i>	18
Gambar 2.13 Antrasit	18
Gambar 2.14 ESSA <i>Drying Oven</i>	24
Gambar 2.15 <i>Thermogravimetric Moisture Analyzer</i> (TGM).....	25
Gambar 2.16 <i>Thermogravimetric Analyzer</i> (TGA).....	26
Gambar 2.17 <i>Sulfur Analyzer</i>	27
Gambar 2.18 Kalorimeter.....	27
Gambar 2.19 Diagram Energi Efisiensi Boiler Metode <i>Indirect</i>	29
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	41
Gambar 3.2 Diagram Alir Preparasi Sampel Bahan Bakar	42
Gambar 3.3 Diagram Alir Analisa TGM, TGA, <i>Sulfur Analyzer</i> dan Kalorimeter	43
Gambar 4.1 Grafik Nilai Efisiensi Boiler Metode Tidak Langsung	61
Gambar 4.2 Grafik Nilai Kalor Bahan Bakar.....	63

Gambar 4.3	Grafik Nilai <i>Moisture</i> Bahan Bakar	64
Gambar 4.4	Grafik Perbandingan Nilai Efisiensi Boiler dengan CO ₂ Gas Buang	66

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Spesifikasi ASTM batubara untuk bahan bakar	19
Tabel 2.2 Kandungan Biomassa	22
Tabel 2.3 Nilai Kalor Biomassa Kayu Karet.....	22
Tabel 3.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian	37
Tabel 3.2 Alat Penelitian	38
Tabel 3.3 Bahan Penelitian.....	38
Tabel 4.1 Hasil Analisa Preparasi Bahan Bakar	44
Tabel 4.2 Data Hasil Preparasi Bahan Bakar 100% Batubara	45
Tabel 4.3 Hasil Analisa TGM	47
Tabel 4.4 Hasil Analisa TGA	50
Tabel 4.5 Hasil Analisa Sulfur <i>Analyzer</i>	52
Tabel 4.6 Hasil Analisa Kalorimeter	53
Tabel 4.7 Data Paramater Untuk Persentase Bahan Bakar 100% Batubara	56
Tabel 4.8 Data Paramater Untuk Persentase Bahan Bakar 10% Biomassa	57
Tabel 4.9 Data Paramater Untuk Persentase Bahan Bakar 20% Biomassa	58
Tabel 4.10 Data Paramater Untuk Persentase Bahan Bakar 30% Biomassa	59
Tabel 4.11 Data Paramater Untuk Persentase Bahan Bakar 40% Biomassa	60
Tabel 4.12 Nilai Efisiensi Boiler Metode Tidak Langsung PLTU Unit 3 Tarahan	61
Tabel 4.13 Nilai Efisiensi Boiler dan CO ₂ dalam Gas Buang	65

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik menjadi salah satu kebutuhan yang harus terpenuhi, karena banyak aktivitas di kehidupan kita harus diaktifkan atau digerakkan oleh energi listrik. Kebutuhan akan listrik bukan hanya daerah perkotaan saja namun daerah pedesaan dan pesisir juga membutuhkan energi listrik (Masnur & Marlina, 2021). Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) adalah pembangkit listrik yang menggunakan energi kinetik dari uap air untuk menghasilkan energi listrik. Siklus yang digunakan di PLTU adalah siklus *rankine* atau siklus tertutup, yang dimana air laut yang di panaskan dan berubah menjadi uap akan di kondensasi di dalam kondensor sehingga kembali menjadi air (Fata & Fajriani, 2019).

Pengadaan energi listrik pada sistem PLTU tidak terlepas dari isu - isu pencemaran lingkungan. Pembangkit listrik yang memanfaatkan energi fosil seperti batubara memiliki kontribusi yang signifikan terhadap kerusakan lingkungan. Menurut Zaky (2024) emisi gas rumah kaca (GRK) di Indonesia khususnya keberadaan gas CO₂ terus meningkat seiring tahun dengan gas keluaran PLTU batubara sebagai salah satu kontribusi emisi utama.

Kenaikan suhu bumi akibat pemanasan global (*global warming*) dari GRK telah mendapat perhatian besar dunia. Hal ini diwujudkan dalam *Paris Agreement* pada tahun 2015 yang menjelaskan bahwa negara-negara sepakat untuk menjaga peningkatan suhu rata-rata global di bawah 2 °C atau bahkan lebih baik lagi, di bawah 1.5 °C. Upaya dari perjanjian Paris ini mengerucut pada program *Net Zero Emissions* (NZE) atau nol bersih emisi. Program NZE yang ditetapkan dalam kesepakatan ini mengharuskan negara-negara industri mencapai nol emisi pada tahun 2050. Oleh karena itu, banyak negara mulai mengatur kebijakan baru terkait

penyediaan energi listrik, terutama dalam mengurangi emisi karbon dari pembangkit listrik konvensional seperti PLTU yang masih mendominasi sistem ketenagalistrikan di banyak negara, termasuk Indonesia (Susiati *et al.*, 2023). Salah satu PLTU yang ingin mengurangi emisi karbon yaitu PLTU Tarahan Lampung.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap Tarahan (PLTU Tarahan) merupakan unit pembangkit yang dikelola oleh PT. PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Tarahan yang bertempat di Tarahan Lampung. PLTU ini dibangun tahun 2001 lalu pembangunan sipil yang telah diresmikan mulai dilakukan pada tanggal 15 September 2004. PLTU Tarahan memiliki 2 unit pembangkit yaitu Unit 3 dan Unit 4 yang memiliki kapasitas sebesar 2 x 100 MW dengan menggunakan bahan bakar batubara yang memiliki nilai kalori rendah yaitu 5000 kcal. Boiler merupakan salah satu komponen penting di PLTU Tarahan Lampung.

Boiler adalah alat yang berfungsi untuk memanaskan air untuk menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi, dengan menggunakan panas dari hasil pembakaran bahan bakar pada ruang bakar (Yuliyani *et al.*, 2019). Boiler merupakan salah satu komponen utama dalam sistem termal yang digunakan untuk menghasilkan uap yang akan digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pembangkit listrik, pemanasan, dan proses industri (Nopriantoko, 2024). Dalam hal kemampuan menghasilkan energi listrik, PLTU Unit Pelaksana Pembangkitan Tarahan Lampung menggunakan sistem boiler tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB) berbahan bakar utama batubara dan bahan campuran berupa biomassa.

Boiler CFB merupakan jenis boiler yang menggunakan teknologi fluidisasi untuk pembakaran bahan bakar. Boiler CFB adalah sebuah boiler di mana bahan bakar dibakar dalam *fast fluidized bed regime*. Boiler CFB dapat dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama adalah loop CFB, sedangkan untuk yang kedua adalah *back-pass* yang terdiri dari *reheater*, *superheater*, *economizer*, dan *air-preheater* (Basu, 2006). Untuk memastikan pembakaran bahan bakar yang optimal dan minimalisasi emisi gas buang maka sangat penting dilakukannya perhitungan efisiensi pada boiler CFB.

Efisiensi pada boiler bisa didapatkan dengan 2 metode yaitu metode langsung (*direct method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*). Pada efisiensi boiler metode langsung yaitu membandingkan kandungan energi dari fluida kerja (air dan uap) dengan kandungan energi dari bahan bakar boiler yang digunakan (Malau, 2016). Sedangkan pada efisiensi boiler metode tidak langsung, analisis dilakukan pada bahan bakar dan gas tumpukan untuk melakukan perhitungan per-unit-basis dari seluruh kehilangan panas yang kemudian dikurangi dari nilai kalor bahan bakar dan persentasenya (LJ Energi Pte Ltd, 2019). Terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan terkait efisiensi boiler metode tidak langsung yang menunjukkan potensi peningkatan efisiensi pada sistem boiler dan berbagai sumber kehilangan panas.

Penelitian Syalsabila *et al* (2023) menyatakan bahwasanya nilai kalori batubara memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi boiler. Pada penelitian Kawiarsa *et al* (2023) menyimpulkan bahwa efisiensi boiler PLTU PT. XYZ unit 2 dengan menggunakan metode tidak langsung dengan bahan bakar batubara 100% adalah 89,39% sedangkan apabila menggunakan bahan bakar cangkang sawit 100% menunjukkan efisiensi sebesar 83,33 % dengan emisi CO₂ yang lebih rendah. Lalu, pada penelitian Hendri *et al* (2017) menyimpulkan bahwa efisiensi boiler pada saat sebelum dilakukan *overhaul* yaitu 82,87% dan naik setelah dilakukan *overhaul* menjadi 83,80%. Kemudian, pada penelitian Nada & Siregar (2023) menyimpulkan bahwa perhitungan efisiensi boiler menggunakan metode kerugian panas atau metode tidak langsung dapat mengidentifikasi adanya kerugian panas yang terdapat pada boiler. Berdasarkan dari beberapa penelitian tersebut menunjukkan bahwa efisiensi boiler metode tidak langsung bergantung pada sumber kehilangan panas dan kualitas bahan bakar. Salah satu bahan bakar utama yang digunakan pada PLTU Tarahan yaitu batubara.

Batubara adalah batuan sedimen yang dapat terbakar berasal dari tumbuhan yang sejak pengendapannya terkena proses fisika dan kimia yang menjadikan kandungan karbonnya kaya (Salahu, 2022). Batubara adalah salah satu bahan bakar fosil yang terbentuk dari endapan (batuan sedimen organik) yang mengandung unsur-unsur C, H₂ dan O₂ sebagai unsur utama (Abdul *et al.*, 2022). Kualitas sumber daya batubara

Indonesia cukup bervariasi baik dalam parameter kalori, kandungan abu, kandungan sulfur, total lengas, dan parameter lainnya. Sebagian besar batubara yang dimiliki Indonesia yaitu sekitar 60% merupakan batubara berkalori sedang dalam kategori *medium rank* (5100 - 6100 kcal/kg ADB), 30% sisanya berkategori *low rank* (<5100 kcal/kg ADB), 7% dalam kategori *high rank* (6100 - 7100 kcal/kg ADB) dan sebanyak 2% termasuk batubara berkategori *very high rank* (>7100 kcal/kg ADB) (Munandar *et al.*, 2018). Selain batubara, terdapat juga bahan bakar terbarukan yang sering digunakan di PLTU Tarahan yaitu berupa biomassa.

Biomassa mengacu pada bahan organik, di mana bahan organik ini pada umumnya berasal dari tumbuhan maupun hewan (Sulasminingsih *et al.*, 2023). Biomassa dimanfaatkan sebagai energi atau bahan dalam jumlah yang besar. Biomassa sangat beragam dan klasifikasinya, namun secara spesifik merujuk pada limbah pertanian seperti jerami, sekam padi, limbah perhutanan seperti serbuk gergaji, tinja, kotoran hewan, sampah dapur, lumpur kubangan, dan sebagainya (Herlambang *et al.*, 2017). Biomassa memiliki kalor yang beragam sesuai dengan jenisnya. Misalnya, sekam padi memiliki kalor sekitar 16,79 MJ/kg, tongkol jagung memiliki kalor 16,66 MJ/kg, dan jerami memiliki kalor sebesar 16,78 MJ/kg (Vassilev *et al.*, 2010). Selain itu, terdapat juga biomassa dari bagian tengah batang kayu karet yang memiliki kalor sebesar $17,595 \pm 0,268$ MJ/kg (Quartey *et al.*, 2022).

Berdasarkan uraian diatas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh campuran batubara dan biomassa terhadap efisiensi boiler metode tidak langsung pada PLTU Unit 3 Tarahan Lampung. Hal itu, dilakukan agar penulis bisa mendapatkan nilai efisiensi boiler yang dihasilkan dengan presentase campuran bahan bakar batubara dan biomassa dengan presentase 100% batubara, 10 % biomassa, 20% biomassa, 30% biomassa dan 40% biomassa di PLTU Unit 3 Tarahan Lampung. Oleh karena itu, penulis mengambil judul “**Pengaruh Variasi Campuran Batubara dan Biomassa Terhadap Efisiensi Boiler *Circulating Fluidized Bed* (CFB) Metode Tidak Langsung (*Indirect*) di PLTU Unit 3 Tarahan Lampung**”. Penulis akan menganalisa efisiensi boiler tipe CFB menggunakan metode tidak langsung di PLTU Unit 3 Tarahan Lampung dengan presentase campuran batubara dan biomassa yang berbeda-beda.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh persentase campuran batubara dan biomassa terhadap efisiensi termal boiler CFB metode tidak langsung di PLTU Unit 3 Tarahan Lampung?
2. Apa saja faktor yang mempengaruhi efisiensi pembakaran saat menggunakan campuran batubara dan biomassa di boiler CFB PLTU Unit 3 Tarahan Lampung?
3. Bagaimana strategi optimalisasi penggunaan campuran batubara dan biomassa untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi di PLTU Unit 3 Tarahan Lampung?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh persentase campuran batubara dan biomassa terhadap efisiensi termal boiler CFB metode tidak langsung di PLTU Unit 3 Tarahan Lampung.
2. Mengidentifikasi faktor yang mempengaruhi efisiensi pembakaran saat menggunakan campuran batubara dan biomassa di boiler CFB PLTU Unit 3 Tarahan Lampung.
3. Mengetahui strategi optimalisasi penggunaan campuran batubara dan biomassa untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi di PLTU Unit 3 Tarahan Lampung.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan diperoleh dari penelitian ini adalah mengetahui nilai efisiensi boiler tipe CFB metode tidak langsung yang dihasilkan oleh PLTU Unit 3 Tarahan Lampung dari campuran bahan bakar batubara dan biomassa dengan presentase yang berbeda-beda. Selain itu, penelitian ini diharapkan mampu melakukan

optimalisasi penggunaan campuran batubara dan biomassa untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi di PLTU Unit 3 Tarahan Lampung.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengambilan data hanya terfokus pada PLTU Unit 3 Tarahan Lampung.
2. Metode yang digunakan yaitu metode tidak langsung.
3. Variasi komposisi campuran batubara dan biomassa berturut-turut yaitu 100% batubara, 10% biomassa, 20% biomassa, 30% biomassa dan 40% biomassa.
4. Tipe boiler yang digunakan yaitu boiler *Circulation Fluidized Bed* (CFB).
5. Pengambilan sampel campuran batubara dan biomassa pada boiler dimulai selama durasi pengujian bahan bakar.
6. Pengambilan data parameter operasi boiler selama 4 jam.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian-penelitian sebelumnya. Beberapa penelitian terkait pengaruh dari bahan bakar batubara dan biomassa terhadap efisiensi boiler di pembangkit listrik tenaga uap digunakan sebagai acuan penelitian agar kemudian dapat dikembangkan kembali untuk penelitian yang akan datang. Sebelumnya, telah dilakukan oleh Kawiarto *et al* (2023) mengenai pengaruh biomassa terhadap efisiensi boiler pada pembangkit CFB batubara dalam sistem *co-firing*. Pada penelitian ini diperoleh design efisiensi boiler PLTU PT. XYZ unit 2 dengan menggunakan bahan bakar batubara 100% adalah 89,39% , artinya dengan menggunakan metoda tidak langsung pada kondisi operasi 6 Juli 2022 efisiensi boiler sebesar 86,27 %, jadi masih mendekati efisiensi desain. Kemudian, dengan bahan bakar cangkang sawit 100% menggunakan metoda tidak langsung, efisiensi boiler PLTU PT. XYZ unit 2 menunjukkan 83,33 %, dengan emisi CO₂ yang lebih rendah. Terjadi penurunan efisiensi sebesar 2,94% (menggunakan metode tidak langsung) antara penggunaan batubara 100% dengan cangkang sawit 100%. Dengan selisih efisiensi boiler yang tidak signifikan tersebut ketika menggunakan bahan bakar 100% cangkang kelapa sawit, artinya secara *technical* desain boiler yang ada sekarang cocok/sesuai untuk digunakan sebagai pembakaran dengan sumber bahan bakar cangkang kelapa sawit.

Penelitian yang dilakukan oleh Hendri *et al* (2017) mengenai analisa efisiensi boiler dengan metode *heat loss* sebelum dan sesudah *overhaul* PT Indonesia Power UBP PLTU Lontar unit 3 mendapatkan hasil bahwa efisiensi boiler pada saat sebelum dilakukan *overhaul* yaitu 82,87% dan naik setelah dilakukan *overhaul* menjadi

83,80%. Kegiatan *overhaul* yang dilakukan dalam lingkup pekerjaan boiler dapat menaikkan sedikit efisiensi boiler yaitu sebesar 0,93%. Jika dibandingkan dengan standar desain terjadi penurunan efisiensi boiler sebesar 10,38% sebelum *overhaul* dan 10,18 % setelah *overhaul*.

Penelitian terkait yang dilakukan oleh Sandi & Effendy (2022) mengenai pengaruh kualitas batubara terhadap efisiensi boiler tipe CFB unit 3 PLTU Jeranjang Lombok Barat dengan metode ASME PTC 4. Penelitian ini menyimpulkan bahwasanya kualitas batubara mempengaruhi terhadap efisiensi boiler. Hasil analisa perbandingan efisiensi boiler dengan variasi kualitas batubara berupa nilai HHV batubara terbesar dari 4125 kcal/kg dengan nilai 83,88% dan nilai efisiensi terendah didapatkan dari 4103 kcal/kg dengan nilai 80,52%. Dengan faktor kerugian panas terbesar karena gas buang kering, *moisture* dari pembakaran H₂, dan *moisture* dari bahan bakar.

Penelitian terkait yang dilakukan oleh Syalsabila *et al* (2023) mengenai analisa efisiensi *thermal* boiler tipe *circulation fluidized bed* di PLTU 3 x 10 MW. Dari penelitian diatas dapat disimpulkan yaitu efisiensi tertinggi yaitu pada tanggal 16 Mei 2023 yaitu 55,95% dengan nilai kalor batubara 5654 kkal/kg sedangkan efisiensi terendah yaitu pada tanggal 16 April 2022 yaitu 36,89% dengan nilai kalor batubara 5618 kkal/kg. Efisiensi boiler dapat dikatakan dalam kondisi yang tidak baik dikarenakan efisiensi aktual lebih kecil dari efisiensi desain sehingga perlu dilakukannya *overhaul* pada boiler guna meningkatkan efisiensi boiler, dimana efisiensi desain boiler sendiri yaitu 90,27%. Nilai kalori batubara memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi boiler. Kualitas kandungan batubara yang digunakan yaitu semakin tinggi kandungan *moisture* (air) didalam batubara maka semakin banyak energi yang diperlukan untuk proses pembakaran batubara. Selain itu semakin rendah kandungan air, maka semakin tinggi nilai kalori batubara tersebut. Semakin tinggi kandungan *fixed carbon* dapat meningkatkan kualitas batubara sedangkan semakin tinggi kandungan sulfur, ash dan *volatile matter* maka menyebabkan semakin menurunnya kualitas batubara.

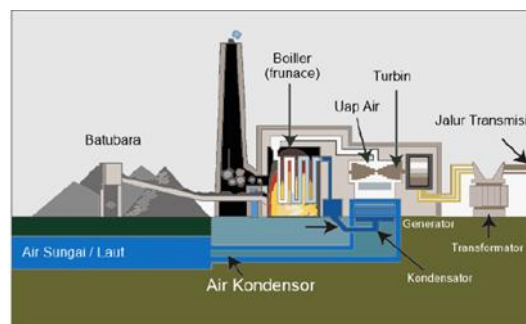
Penelitian terkait yang dilakukan oleh Nada & Siregar (2023) mengenai pengaruh kualitas batubara terhadap efisiensi boiler unit utilitas batubara PT Petrokimia Gresik menggunakan metode *indirect/heat loss* mengacu pada ASME PTC 4. Penelitian ini menyimpulkan bahwa perhitungan efisiensi boiler menggunakan metode kerugian panas (*heat loss*) atau metode tidak langsung (*indirect*) dapat mengidentifikasi adanya kerugian panas yang terdapat pada boiler. Setelah dilakukan perhitungan didapatkan bahwa kualitas batubara mempengaruhi efisiensi boiler, diperoleh hasil analisa perbandingan efisiensi boiler dengan variasi kualitas batubara berupa nilai GCV batubara terbesar yaitu pada GCV 4995 kcal/kg dengan nilai 87,03% dan nilai efisiensi terendah didapatkan pada GCV 4986 kcal/kg dengan nilai 85,62%.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

PLTU adalah jenis pembangkit listrik yang menggunakan uap kering untuk memutar sudu-sudu turbin sebagai alat penggerakannya. Pembangkit listrik semacam ini pada dasarnya berfungsi sebagai pembangkit listrik yang sejajar dengan turbin yang digerakkan oleh energi kinetik dari uap panas dan kering. Pembangkit listrik tenaga uap membakar sejumlah bahan bakar, termasuk batubara, bahan bakar minyak, bahan bakar utama (MFO), solar, dan diesel kecepatan tinggi (HSD), awalnya dimulai dengan udara panas terkompresi (Syahputra, 2020).

PLTU merupakan pembangkit listrik yang menggunakan energi kinetik dari uap air untuk menghasilkan energi listrik. PLTU menggunakan siklus *rankine* yaitu siklus



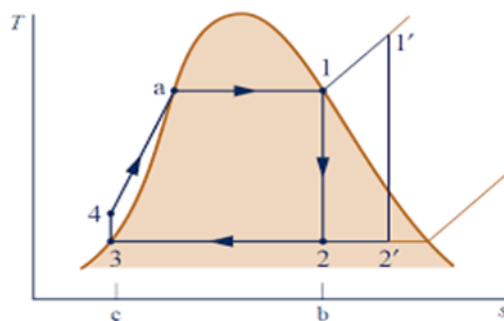
Gambar 2.1 Prinsip Kerja PLTU (Yuniarti & Aji, 2019)

termodinamika yang mengubah panas menjadi kerja dalam proses operasinya. Siklus konversi energi dalam operasi PLTU, yaitu (Yuniarti & Aji, 2019):

1. Konversi energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas dalam bentuk uap bertemperatur dan bertekanan tinggi terjadi pada boiler.
2. Konversi energi panas menjadi energi mekanik untuk memutar generator terjadi pada turbin.
3. Konversi energi mekanik menjadi energi listrik terjadi pada generator.

Berdasarkan **Gambar 2.1** menunjukkan bahwa PLTU bekerja dengan siklus air tertutup atau biasa disebut dengan *siklus rankine*. Siklus *rankine* merupakan siklus air yang digunakan secara berulang-ulang. Siklus kerja dari PLTU jika dideskripsikan adalah sebagai berikut (Yuniarti & Aji, 2019):

1. Air dimasukkan ke dalam boiler.
2. Campuran antara bahan bakar dan udara akan memanaskan air di dalam boiler hingga menjadi uap.
3. Uap yang dihasilkan oleh boiler masuk ke dalam sudu-sudu turbin kemudian memutar turbin. Turbin memiliki satu poros dengan generator, sehingga dengan berputarnya turbin maka generator sudah menghasilkan energi listrik.
4. Uap yang telah melewati turbin kemudian di dinginkan di dalam kondensator, tujuan untuk mendinginkan uap adalah agar uap berubah wujud kembali menjadi air. Proses kondensasi dibantu oleh aliran air baik dari *cooling tower* maupun air yang bisa didapatkan secara langsung dari lingkungan seperti laut.
5. Setelah uap air berubah menjadi cair, air akan di sirkulasi kembali ke dalam boiler dengan bantuan pompa air.



Gambar 2.2 Diagram T-s Siklus *Rankine* Ideal (Saidah & Sinaga, 2023)

Siklus *rankine* merupakan siklus teoritis yang paling sederhana pada siklus ini menggunakan fluida kerja yaitu air dengan prinsip kerja mengubah panas uap menjadi kerja mekanik. Berdasarkan **Gambar 2.2** diketahui bahwa fluida kerja mengalami serangkaian perubahan internal yang meliputi perubahan tekanan maupun perubahan wujud yaitu (Saidah & Sinaga, 2023):

- a. Proses 1-2 ataupun 1'-2 adalah ekspansi reversibel adiabatik yang melalui turbin. Uap keluar dari turbin pada kondisi 2 atau 2' biasanya memiliki dua fase. Proses ini adalah proses ekstraksi turbin menuju kondensor.
- b. Proses 2-3 ataupun 2'-3 adalah pembuangan panas didalam kondensor pada temperatur dan tekanan yang konstan, selama proses ini fluida kerja dalam keadaan campuran dua fase.
- c. Proses 3-4 adalah proses reversibel adiabatik pada pompa. Fluida kerja di pompa dari tekanan kondensat pada kondisi 3 ke cairan sub dingin pada tekanan pembangkit uap hingga mencapai kondisi 4. Garis 3-4 vertikal dalam diagram T-s dikarenakan fluida secara esensial adalah tidak mampat dan pemompaan dilakukan secara reversibel adiabatik. Proses ini adalah proses pemompaan fluida kondensat menuju boiler untuk kemudian dipanaskan.
- d. Proses 4-1 atau 4-1' adalah pemasukan panas pada tekanan yang konstan dalam pembangkit uap, pemasukan panas terjadi sebelum masuk ke dalam boiler. Garis 4-A-1-1' adalah garis tekanan konstan.
- e. Proses 4-A menunjukkan perubahan cairan sub dingin pada kondisi 4 menjadi uap jenuh pada kondisi A. Proses 4-A dalam pembangkit uap disebut dengan ekonomiser.
- f. Proses A-1 adalah pemanasan fase cair jenuh ke fase uap jenuh pada tekanan dan temperatur yang konstan dimana pada proses ini fluida kerja masih berada dalam keadaan campuran dua fase, dan proses A-1 dalam pembangkit uap disebut dengan boiler.
- g. Proses 1-1' dalam siklus *superheat*, menunjukkan pemanasan uap jenuh pada kondisi 1 ke kondisi 1'. Pada kondisi 1-1' dalam pembangkit uap disebut dengan *superheater* atau pemanas lanjut.

Batubara digunakan sebagai sumber energi utama atau bahan bakar utama pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), yang memanaskan air dan menghasilkan

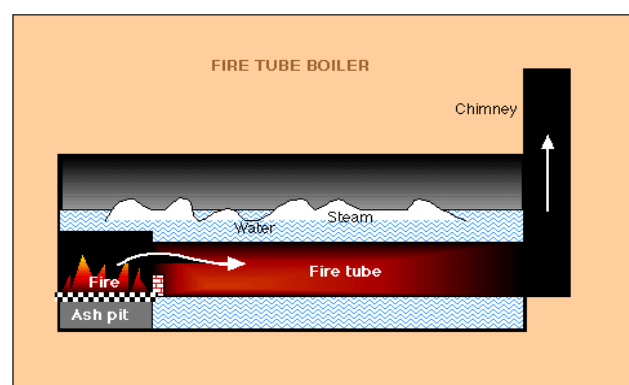
uap, yang kemudian digunakan untuk memutar sudu-sudu turbin. Seperti bahan bakar fosil lainnya, ketika batubara dibakar, abu dan asap tercipta selain energi yang dilepaskan sebagai panas. Polutan dari pembangkit listrik tenaga batubara adalah sumber debu dan asap ini. Kontaminan utama yang dihasilkan pembangkit listrik tenaga batubara diantaranya yaitu hujan asam, efek rumah kaca, radon dan uranium 233. Selain itu, debu hasil pembakaran batubara mengandung zat berbahaya seperti logam berat seperti Pb, Hg, Ar, Ni, Se, dan lain-lain (Syahputra, 2020).

2.2.2 Jenis-Jenis Boiler

Boiler adalah perangkat yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap dengan memanaskan air menggunakan sumber panas eksternal seperti pembakaran bahan bakar fosil atau pemanfaatan energi terbarukan. Boiler bekerja berdasarkan prinsip konduksi panas, di mana panas ditransfer dari sumber panas ke air dalam boiler, menyebabkan air berubah fase menjadi uap. Boiler adalah salah satu komponen utama dalam sistem termal yang digunakan untuk menghasilkan uap yang akan digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pembangkit listrik, pemanasan, dan proses industri. Ada beberapa jenis boiler yang umum digunakan, yaitu *fire-tube* boiler, *water-tube* boiler, paket boiler, boiler CFB dan beberapa jenis lainnya (Nopriantoko, 2024).

1. *Fire tube* boiler

Pada *fire tube boiler* yang ditunjukkan **Gambar 4.3**, gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan boiler ada di dalam shell untuk dirubah menjadi *steam*. *Fire*



Gambar 2.3 *Fire Tube* Boiler (Yunianto & Saryanto, 2018)

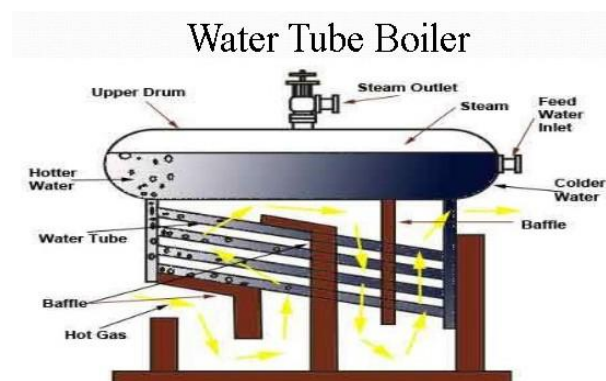
tube boiler biasanya digunakan untuk kapasitas steam yang relatif kecil dengan tekanan steam rendah sampai sedang (Yunianto & Saryanto, 2018).

2. *Water tube* boiler

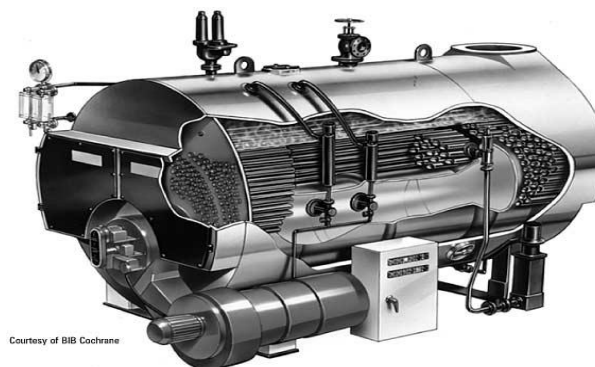
Pada *water tube boiler* yang ditunjukkan **Gambar 2.4**, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk ke dalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakar membentuk steam pada daerah uap dalam drum. Boiler ini dipilih jika kebutuhan steam dan tekanan *steam* sangat tinggi seperti pada kasus boiler untuk pembangkit tenaga (Yunianto & Saryanto, 2018).

3. Paket boiler

Disebut boiler paket sebab sudah tersedia sebagai paket yang lengkap. Pada saat dikirim ke pabrik, hanya memerlukan pipa *steam*, pipa air, suplai bahan bakar dan sambungan listrik untuk dapat beroperasi. Paket boiler dapat ditunjukkan pada **Gambar 2.5** yang biasanya merupakan tipe *shell and tube* dengan rancangan *fire tube* dengan transfer panas baik radiasi maupun konveksi yang tinggi (Yunianto & Saryanto, 2018).



Gambar 2.4 *Water Tube* Boiler (Yunianto & Saryanto, 2018)



Gambar 2.5 Paket Boiler (Yunianto & Saryanto, 2018)

3. boiler CFB

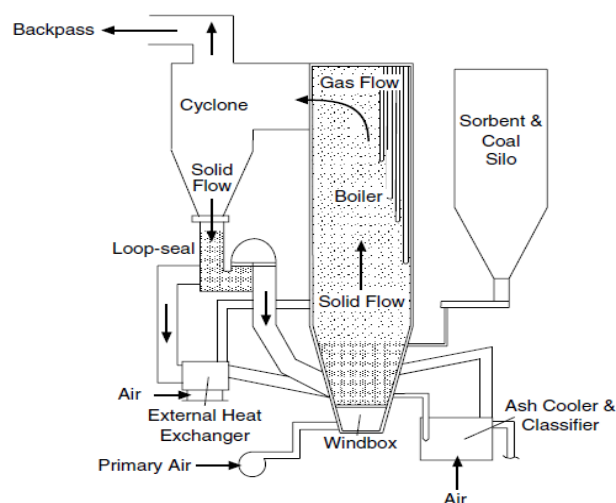
Boiler CFB yaitu boiler yang menggunakan *fluidized bed* untuk pembakaran dan memiliki efisiensi yang lebih tinggi serta kemampuan mengolah bahan bakar yang beragam (Nopriantoko, 2024).

2.2.3 Boiler *Circulating Fluidized Bed* (CFB)

Boiler CFB adalah sebuah boiler di mana bahan bakar dibakar dalam *fast fluidized bed regime*. Boiler CFB merupakan jenis boiler yang menggunakan teknologi fluidisasi untuk pembakaran bahan bakar. Boiler CFB ditunjukkan **Gambar 2.6** dapat dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama adalah loop CFB, sedangkan untuk yang kedua adalah *back-pass* yang terdiri dari *reheater*, *superheater*, *economizer*, dan *air-preheater*. *Back-pass* dari boiler CFB mirip dengan boiler *pulverizer* ataupun *bubbling fluidized bed*. *Loop CFB* mencakup elemen berikut (Basu, 2006):

1. Ruang bakar atau *riser* dari unggun *fast fluidized bed*.
2. Pemisah gas-padat (*cyclone*).
3. *Solid recycle device* (*seal loop*).
4. *External heat exchanger*.

Pada boiler CFB udara pembakaran utama akan memasuki ruang bakar melalui distributor udara atau perapian yang terletak dibagian bawah ruang bakar. Udara



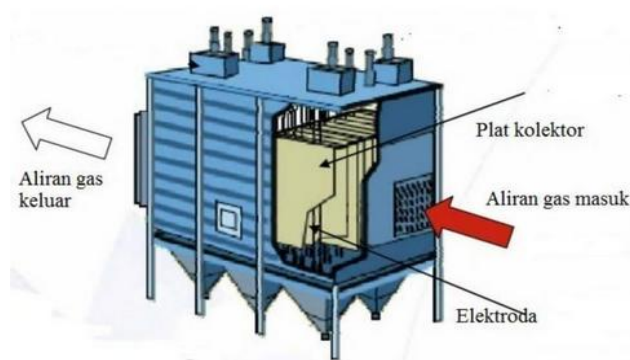
Gambar 2.6 Boiler CFB (Basu, 2006)

sekunder dimasukkan pada ketinggian di atas *bed* untuk menghasilkan pembakaran sempurna. Padatan *bed* harus dicampur dengan baik sepanjang tinggi ruang bakar. Dengan demikian, suhu *bed* hampir seragam berada pada kisaran 800 – 900 °C, meski panas diekstraksi sepanjang ketinggiannya (Basu, 2006). Sebagian besar partikel *flue* gas hasil pembakaran akan masuk kedalam *air quality control*. *Air quality control* PLTU adalah upaya pengelolaan dan pengurangan emisi polutan dari proses pembakaran batubara di PLTU, seperti partikulat, SO₂, NO_x, dan CO₂, menggunakan teknologi seperti *electrostatic precipitators* (ESP) atau *baghouse filter*.

Alat sederhana yang dapat digunakan untuk mengatasi polutan udara adalah *Bag House Filter* yang dapat dilihat pada **Gambar 2.7**. Filter ini mempunyai bentuk seperti kantong berbentuk silinder, yang berfungsi mengumpulkan debu yang mempunyai ukuran mikrometer. Sedangkan, ESP adalah alat pembersih debu yang bekerja dengan cara mengambil debu yang berada di dalam aliran gas dengan



Gambar 2.7 *Bag House Filter* (Suryani et al., 2023)



Gambar 2.8 *Electrostatic Precipitators* (Suryani et al., 2023)

menggunakan energi listrik. ESP dapat dilihat pada **Gambar 2.8**, debu yang bermuatan positif akan terkumpul pada plat yang bermuatan negatif, demikian pula sebaliknya. Partikel debu yang terkumpul dalam bentuk debu kering yang menempel pada plat, selanjutnya dapat dibersihkan dengan menyiramkan plat dengan air (Suryani *et al.*, 2023).

Prinsip kerja boiler CFB ditunjukkan secara skematik dalam **Gambar 2.6** Udara pembakaran primer (biasanya dalam jumlah substoikiometrik) dimasukkan melalui lantai atau kisi dari *furnace* dan udara sekunder dimasukkan dari sisi pada ketinggian tertentu di atas lantai *furnace*. Bahan bakar dimasukkan ke dalam bagian bawah *furnace*, di mana bahan bakar tersebut terbakar untuk menghasilkan panas. Sebagian panas pembakaran diserap oleh permukaan yang didinginkan oleh air atau uap yang terletak di *furnace*, dan sisanya diserap di bagian konvektif yang terletak lebih jauh ke hilir, yang dikenal sebagai *back-pass* (Basu, 2006).

Bahan bakar adalah salah satu komponen paling krusial dalam sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), karena merupakan sumber energi yang akan diubah menjadi energi termal dalam boiler untuk menghasilkan uap. Salah satu bahan bakar utama yang sering digunakan pada PLTU di Indonesia yaitu batubara. Batubara dibakar dalam tungku boiler, menghasilkan panas yang mentransfer energi termal ke air dalam pipa-pipa. Panas tersebut mengubah air menjadi uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin dan generator listrik. Selain itu, terdapat juga bahan bakar lain yang bisa digunakan pada PLTU seperti minyak, gas alam dan biomassa (Nopriantoko, 2024).

2.2.4 Batubara

Batubara merupakan sedimen organik, lebih tepatnya merupakan batuan organik, terdiri dari kandungan bermacam-macam pseudomineral. Tumbuhan merupakan unsur utama pembentuk batubara. Protoplasma adalah sel pengisi tumbuhan hidup yang merupakan zat koloidal yang sebagian besar terdiri dari air dan albumin kompleks atau campuran unsur karbon (C), hidrogen (H₂), oksigen (O₂), sulfur (S) dan nitrogen (N). Albumin hampir tidak memiliki daya tahan terhadap pembusukan,

fungsinya sebagai zat makan atau *nutrient* bagi bakteri penyebab pembusukan. Pembusukan tumbuhan adalah proses peruraian unsur yang merupakan bagian transformasi biokimia dari bahan organik tumbuhan (Marwanza, 2023).

Batubara yang terbentuk dari sisa tumbuhan yang membusuk dan terkumpul dalam suatu daerah dengan kondisi banyak air memerlukan waktu yang panjang dalam proses pembentukannya. Lapisan batubara yang diendapkan pada iklim hangat dan basah biasanya lebih terang dan tebal dibandingkan dengan yang diendapkan pada iklim basah. Lamanya waktu pembentukan batubara ini menentukan mutu dari setiap endapan batubara. Pengklasifikasian batubara di dasarkan pada derajat dan kualitas dari batubara tersebut (Munandar *et al.*, 2018), yaitu:

- a. Gambut. Golongan ini sebenarnya termasuk jenis batubara, tapi merupakan bahan bakar seperti yang ditunjukkan **Gambar 2.9**. Endapan ini masih memperlihatkan sifat awal dari bahan dasarnya tumbuh-tumbuhan.
- b. Lignit. Golongan ini memperlihatkan proses berupa struktur kekar dan gejala pelapisan seperti yang ditunjukkan **Gambar 2.10**. Endapan dapat dimanfaatkan secara terbatas karena panas yang dikeluarkan rendah.



Gambar 2.9 Gambut (Putri & Fadhillah, 2020)



Gambar 2.10 Lignit (Putri & Fadhillah, 2020)



Gambar 2.11 *Sub-Bituminous* (Putri & Fadhillah, 2020)



Gambar 2.12 *Bituminous* (Putri & Fadhillah, 2020)



Gambar 2.13 *Antrasit* (Putri & Fadhillah, 2020)

- c. *Sub-Bituminous*. Golongan ini memperlihatkan warna yang kehitam- hitaman dan sudah mengandung lilin seperti yang ditunjukkan **Gambar 2.11** Endapan ini dapat digunakan untuk pemanfaatan pembakaran yang cukup dengan temperatur yang tidak terlalu tinggi.
- d. *Bituminous*. Golongan ini dicirikan dengan sifat yang padat, hitam, rapuh dengan membentuk bongkah-bongkah prismatic seperti yang ditunjukkan **Gambar 2.12**. Berlapis dan tidak mengeluarkan gas dan air bila dikeringkan. Endapan ini dapat digunakan untuk transportasi dan industri.
- e. *Anthracite*. Golongan berwarna hitam, keras, kilap tinggi, dan pecahannya memperlihatkan pecahan chocoidal seperti yang ditunjukkan **Gambar 2.13**. Endapan ini digunakan pada industri besar yang memerlukan temperatur tinggi.

Tabel 2.1 Spesifikasi ASTM Batubara untuk Bahan Bakar (Munandar *et al.*, 2018)

Klas	Nama	Simbol	Fixed carbon (%)	Volatile matter (%)	Heating value (kcal/kg)
Antrasit	meta-antrasit	ma	>98	>2	7740
	antrasit	an	92-98	2-8	8000
	semi-antrasit	sa	86-92	8-15	8300
Bituminous	<i>low-volatile</i>	ivb	78-86	14-22	8741
	<i>medium volatile</i>	mvb	89-78	22-31	8640
	<i>high-volatile A</i>	hvAb	<69	>31	8160
	<i>high-volatile B</i>	hvBb	57	57	6750-8160
	<i>high-volatile C</i>	hvCb	54	54	7410-8375
Subbituminous	subbituminous A	subA	55	55	6880-7540
	subbituminous B	subB	56	56	6540-7230
	subbituminous C	subC	53	53	5990-6860
Lignite	lignite A	ligA	52	52	4830-6360
	lignite B	ligB	52	52	<5250

Klasifikasi batubara juga dikembangkan oleh ASTM (*America Society for Testing and Material*) yang dapat terlihat pada **Tabel 2.1** diatas. Kualitas batubara berperan penting dalam menentukan kelas suatu batubara. Banyak cara dilakukan untuk mengetahui kualitas atau mutu batubara berkaitan dengan jenis pengujian atau analisis pemanfaatannya. Pada prinsipnya dikenal 2 analisa yaitu analisa proksimat dan analisa ultimat (Sukandarrumidi, 2018).

1. Analisa Proksimat

Analisa proksimat merupakan analisa yang digunakan untuk menentukan kelas batubara (*coal rank*). Analisis proksimat adalah rangkaian yang digunakan untuk mengukur *moisture content*, *ash*, *volatile matter*, *fixed carbon*, total sulfur dan *gross calorific value* (Marwanza, 2003).

- a. Kadar air (*moisture*), yaitu kandungan air yang terdapat pada batubara. Tinggi rendahnya total *moisture* akan tergantung pada peringkat batubara, ukuran distribusi dan kondisi pada saat sampling. Semakin tinggi peringkat suatu batubara semakin kecil porositas batubara tersebut atau semakin padat batubara tersebut. Dengan demikian akan semakin kecil juga *moisture* yang dapat diserap atau ditampung dalam pori batubara tersebut. Kadar air sendiri dapat dibedakan menjadi 3 yaitu kadar air bebas (*air dry losses*), kadar air bawaan (*residual moisture*) dan *moisture in Analysis* (MiAs).

- b. Kadar abu (*ash content*), yaitu kandungan bahan inorganic yang tertinggal atau tidak terbakar sewaktu batubara dibakar pada suhu 815 °C. Abu pada pembakaran batubara dapat dihasilkan dari pengotor bawaan maupun pengotor sebagai hasil penambangannya. Abu yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara dapat berupa *fly ash* maupun *bottom ash*. Semakin tinggi kadar abu pada jenis batubara yang sama, semakin rendah nilai kalorinya.
- c. Zat terbang (*volatile matter*), yaitu komponen-komponen dalam batubara yang dapat lepas atau menguap pada saat dipanaskan di ruang hampa udara pada suhu 900 °C. Kadar *volatile matter* dalam batubara ditentukan oleh peringkat batubara. Semakin tinggi peringkat suatu batubara akan semakin rendah kadar *volatile matter*-nya.
- d. Karbon tertambat (*fixed carbon*), merupakan jumlah karbon yang tertambat pada batubara setelah kandungan-kandungan air, abu dan zat terbangnya dihilangkan.
- e. *Gross calorific value (kalor)* adalah nilai energi yang dapat dihasilkan dari pembakaran batubara. Nilai kalor batubara bergantung pada peringkat batubara. Semakin tinggi peringkat batubara, semakin tinggi nilai kalorinya. Pada batubara yang sama nilai kalori dapat dipengaruhi oleh *moisture* dan juga abu. Semakin tinggi *moisture* atau abu, semakin kecil nilai kalorinya.

2. Analisa Ultimat

Analisa ultimat adalah analisis sederhana yang digunakan untuk mengetahui unsur-unsur pembentuk batubara dengan hanya memperhatikan unsur kimia pembentuk yang penting dan mengabaikan keberadaan senyawa kompleks yang ada di dalam batubara. Unsur-unsur penyusun batubara, yaitu karbon, hidrogen, oksigen, sulfur dan nitrogen (Marwanza, 2003).

2.2.5 Biomassa

Biomassa adalah sumber energi terbarukan yang berasal dari organisme yang ada di bumi seperti tumbuhan, hewan, dan juga manusia. Orang-orang telah menggunakan energi biomassa dari makhluk hidup sejak zaman kuno saat manusia

hidup dalam gua. Awal pertama kali mereka menggunakan energi yaitu dengan membuat kayu api untuk memasak atau menghangatkan badan. Ada berbagai macam sumber energi biomassa, termasuk tanaman pohon, rumput, pertanian, dan limbah perkotaan. Biomassa adalah sumber energi terbarukan tertua yang dikenal manusia. Disebut sebagai sumber energi terbarukan karena energi yang dikandungnya berasal dari matahari (Tumpu *et al.*, 2022). Biomassa memiliki peluang sangat besar untuk dijadikan sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil yang mahal, tidak dapat dibaharui dan merusak lingkungan. Bila dibandingkan dengan bahan bakar fosil lainnya, biomassa ini memiliki beberapa kekurangan seperti nilai kalornya rendah, kandungan air yang tinggi, volume yang besar, bersifat higroskopis, kepadatan rendah, polimorfisme, bentuknya yang tidak seragam dan lain sebagainya (Mangalla *et al.*, 2022).

Secara umum biomassa merupakan bahan yang dapat diperoleh dari tanaman baik secara langsung maupun tidak langsung dan dimanfaatkan sebagai energi atau bahan dalam jumlah yang besar. Biomassa secara spesifik berarti kayu, rumput *napier*, rumput laut raksasa, *chlorella*, serbuk gergaji, serpihan kayu, jerami, sekam padi, sampah dapur, lumpur *pulp*, kotoran hewan, dan lain-lain. Banyak kajian telah menyarankan bahwa energi turunan biomassa akan memberikan sumbangan yang besar terhadap suplai energi keseluruhan karena harga bahan bakar fosil semakin meningkat pada beberapa dekade yang akan datang. Biomassa menjadi salah satu sumber energi dengan jumlah bersih CO₂ yang nol, oleh karenanya tidak berkontribusi pada peningkatan emisi gas rumah kaca. Maka dari itu, berarti biomassa adalah netral karbon (Herlambang *et al.*, 2017).

Biomassa merupakan merupakan sumber energi terbarukan yang dihasilkan dari bahan tanaman. Potensi biomasa sebagai sumber energi di Indonesia yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik, terutama dari limbah pertanian, limbah industri kayu dan kayu hasil tanaman industri. Pada umumnya biomasa dimanfaatkan dengan cara membakar langsung untuk pemanasan ruangan dan atau menghasilkan uap untuk PLTU. Akan tetapi, efisiensinya rendah dan terkendala oleh beberapa faktor antara lain volume sangat besar, transportasi yang mahal, dan menghasilkan emisi hasil pembakaran. Sehingga terakhir ini biomasa diolah dan

dipadatkan untuk meningkatkan kandungan kalorinya, meningkat kesempurnaan pembakaran dengan dibentuk sebagai butiran/ pellet (Suwignyo *et al.*, 2022).

Potensi energi biomassa sangat melimpah di Indonesia, namun belum dapat dimanfaatkan secara optimal. Ini dikarenakan pemakaian bahan bakar fosil masih lebih disukai. Di Eropa dan beberapa negara di Amerika Selatan sudah mulai mengembangkan bahan bakar biomassa. Sumber energi biomassa terutama berasal dari limbah padat atau hasil samping padat dari proses produksi pertanian, perkebunan, kehutanan dan memungkinkan juga memanfaatkan padatan tanah gambut yang sangat melimpah di Indonesia (Suwignyo *et al.*, 2022).

Analisa yang digunakan untuk menentukan kualitas biomassa sama seperti analisa yang dilakukan pada batubara yaitu berupa analisa proksimat dan *ultimate*. Beberapa nilai kandungan yang ada dari beberapa jenis biomassa dapat ditunjukkan pada **Tabel 2.2**. Kemudian pada **Tabel 2.3** ditunjukkan nilai kalor yang terkandung dari bagian-bagian biomassa kayu karet seperti bagian cabang, bagian atas, bagian Tengah dan bagian bawah pohon karet.

Tabel 2.2 Kandungan Biomassa (Vassilev *et al.*, 2010)

No	Jenis Biomassa	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	Ash (%)	Moisture (%)	Kalor (MJ/kg)
1.	Sekam Padi	48,36	5,13	32,79	0,72	12,50	6,80	16,79
2.	Tongkol Jagung	49,32	5,35	44,7	0,63	1,49	7,36	16,66
3.	Kayu Karet	49,50	6,10	44,60	-	-	-	-
4.	Jerami	36,89	5,00	37,89	0,40	19,80	-	16,78
5.	Tempurung Kelapa	47,97	5,88	45,57	0,30	0,50	-	19,45
6.	Kayu Pinus	45,92	5,27	48,24	0,22	0,35	7,99	18,98

Tabel 2.3 Nilai Kalor Biomassa Kayu Karet (Quartey *et al.*, 2022)

No	Bagian Kayu Karet	Kalor (MJ/kg)
1.	Sampel Cabang	17,194 ± 0,132
2.	Sampel Atas	17,225 ± 0,067
3.	Sampel Tengah	17,595 ± 0,268
4.	Sampel Bawah	17,702 ± 0,144

Sumber energi biomassa yang paling populer adalah kayu, sementara sumber-sumber energi biomassa lainnya adalah sampah, limbah, gas TPA, dan bahan bakar alkohol. Biomassa dapat membantu mengurangi impor bahan dan membantu meningkatkan kemandirian energi negara. Beberapa perusahaan menggunakan biomassa sebagai sumber energi salah satunya yaitu PT Pembangkitan Jawa-Bali (PJB) yang menggunakan serbuk kayu bersama batu bara untuk memproduksi listrik di 11 PLTU. Di unit pembangkitan Paiton, Probolinggo, Jawa Timur, total penggunaan serbuk kayu mencapai lebih dari 3800 ton (Suwignyo *et al.*, 2022).

Menurut Kong (2010) biomassa dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif yang diharapkan mampu secara signifikan mengurangi emisi gas rumah kaca. Austria mencatat bahwa tenaga listrik yang dihasilkan dari pembakaran biomassa akan menyebabkan pengurangan emisi gas CO₂, sebanyak 820000 ton/TWh. Jumlah tersebut tidaklah kecil dan berdampak positif bagi perekonomian Austria karena kegiatan investasi dari ECOPOWER istilah mereka untuk energi hijau akan menambah lapangan kerja baik di sektor pembangkitnya, sektor pertanian, pengolahan maupun distribusi biomassa.

2.2.6 Pengujian Kualitas Bahan Batubara

Pengujian kualitas batubara dilakukan untuk mengetahui karakteristik pada batubara. Adapun karakteristik batubara yang diamati yaitu *air dry loss*, *residual moisture*, total sulfur, *ash* dan *calorific value*. Berikut adalah tahapan pengujian kualitas batubara beserta alat yang digunakannya.

a. Preparasi sampel batubara

Preparasi sampel dilakukan sebelum memasuki tahap analisis yang berguna untuk mempersiapkan sampel sesuai dengan parameter yang digunakan (Avicenna *et al.*, 2019). Preparasi sampel harus dilakukan dengan hati-hati agar parameter kualitas dalam hal ini kandungan sulfur batubara yang diukur tidak berubah karena prosedur preparasi yang dipergunakan (Artiningsih *et al.*, 2015). Tahapan preparasi sampel batubara dilakukan menggunakan beberapa alat seperti ESSA *drying oven*, *jaw crusher*, *raymond mill*. ESSA *drying oven* ditunjukkan **Gambar 4.14**. Tahapan preparasi sampel batubara bertujuan



Gambar 2.14 ESSA Drying Oven

untuk mendapatkan nilai *air dry losses* (ADL) yang terkandung pada sampel bahan bakar. ADL adalah kandungan air yang terdapat pada permukaan bahan bakar. Nilai ADL diperoleh dengan cara memasukkan sampel ke dalam ESSA *drying oven* pada suhu ± 40 °C selama ± 16 jam. Nilai ADL dihitung dari selisih berat sampel bahan bakar sebelum dan sesudah dimasukkan ke dalam *oven*. Setelah di *oven*, sampel kemudian dihaluskan dan pada akhir tahap preparasi ini akan diperoleh sampel yang siap digunakan untuk analisa selanjutnya. Nilai ADL dapat dihitung dengan persamaan (2.1).

$$ADL = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100\% \quad (2.1)$$

Pada persamaan ini, M_1 adalah massa *tray* (baki) kilogram (kg), M_2 adalah jumlah dari massa *tray* (baki) dengan massa sampel bahan bakar sebelum dikeringkan pada *oven* dalam kilogram (kg), dan M_3 adalah jumlah dari massa *tray* (baki) dengan massa sampel bahan bakar sesudah dikeringkan pada *oven* dalam kilogram (kg).

Proses pereparasi bahan bakar menggunakan sistem analisa duplo yang artinya 1 jenis sampel bahan bakar dinalisa sebanyak 2 kali analisa. Kemudian untuk mencaro total ADL yang terkandung dalam bahan bakar dapat dihitung dengan persamaan (2.2).

$$ADL_{\text{total}} = \frac{ADL_1 + ADL_2}{2} \quad (2.2)$$

Pada persamaan ini ADL_{total} adalah nilai ADL total yang diperoleh dari bahan bakar dalam satuan persen (%), ADL_1 adalah nilai ADL pertama yang diperoleh dari bahan bakar dalam satuan persen (%), dan ADL_2 adalah nilai ADL kedua yang diperoleh dari bahan bakar dalam satuan persen (%).

b. Pengukuran *residual moisture* batubara

Pengukuran *residual moisture* (RM) dilakukan menggunakan alat *Thermogravimetric Moisture Analyzer* (TGM). *Residual moisture* merupakan air terkondensasi di kapiler, air yang terserap dan air yang terikat dengan gugus polar dan kation, dan air yang timbul disebabkan oleh dekomposisi kimia baik material organik ataupun anorganik (Xianchun *et al.*, 2009). Kemudian nilai dari RM tersebut akan digunakan untuk menghitung nilai *total moisture* (TM). TM dapat dihitung dengan persamaan (2.3).

$$TM = ADL + RM \left(1 - \frac{ADL}{100} \right) \quad (2.3)$$

TGM adalah penganalisis termogravimetri yang dirancang untuk menentukan kadar air (kelembapan) bahan secara langsung menggunakan teknik *loss-on-drying*. Proses analisa pada TGM- berlangsung selama ± 1 jam dengan suhu 100 °C. Hilangnya massa sampel diukur sebagai fungsi suhu *oven* sekaligus mengontrol atmosfer dan laju ventilasi. Instrumen ini terdiri dari komputer, timbangan empat tempat terintegrasi, dan *oven* beberapa sampel yang memungkinkan hingga 16 sampel dianalisis secara bersamaan. TGM dapat ditunjukkan pada **Gambar 2.15**.



Gambar 2.15 *Thermogravimetric Moisture Analyzer* (TGM)

c. Analisa *Thermogravimetric Analysis* (TGA)



Gambar 2.16 *Thermogravimetric Analysis* (TGA)

Thermogravimetric Analysis (TGA) dapat ditunjukkan pada **Gambar 2.16**. Tahapan analisa TGA merupakan tahapan yang berfungsi untuk mendapatkan nilai , *moisture in analysis* (MiAs), hidrogen (H₂), *volatile matter*, oksigen (O₂), karbon (C), dan *ash* dalam sampel batubara. Analisa TGA memberikan informasi mengenai fenomena kimia dan fisika, termasuk kemisorpsi, dehidrasi, dekomposisi, reaksi gas-padat (misalnya oksidasi atau reduksi), penguapan, sublimasi, penyerapan, dan desorpsi. Hasilnya, Tahapan analisa menggunakan alat TGA berlangsung ± 4 jam. TGA dapat mengevaluasi sampel yang menunjukkan penurunan atau peningkatan massa akibat dekomposisi, oksidasi, atau dehidrasi. Instrumen TGA dapat digunakan untuk mengukur massa sampel secara terus menerus seiring perubahan suhu seiring waktu. Perlu disebutkan bahwa, dalam analisis termogravimetri, massa, waktu dan suhu adalah pengukuran dasar yang darinya pengukuran tambahan lainnya dapat diperoleh. Alat analisa termogravimetri terdiri dari timbangan presisi dengan panci sampel yang terletak di dalam *oven* yang suhunya dapat ditingkatkan secara terprogram pada laju konstan untuk menahan reaksi termal (Lungu & Catalin, 2023).

d. Pengukuran kadar sulfur batubara

Pengukuran kadar sulfur dilakukan menggunakan alat *Sulfur Analyzer*. *Sulfur Analyzer* merupakan alat yang digunakan untuk mengukur total sulfur dari suatu bahan tertentu yang dapat ditunjukkan pada **Gambar 2.17**. Alat ini secara khusus dirancang untuk menentukan sulfur dalam berbagai macam bahan



Gambar 2.17 Sulfur *Analyzer*

organik seperti minyak, batubara, kokas dan bahan bakar, serta beberapa bahan anorganik seperti tanah, semen dan batu gamping. Analisis dilakukan pada suhu 1350 °C dalam kondisi sistem yang kaya akan oksigen, kombinasi suhu tungku dan aliran oksigen menyebabkan sampel terbakar. Semua bahan sampel akan mengalami proses oksidasi reduksi dan juga proses destuksi yang menyebabkan sampel terdestruk atau terpecah sehingga sulfur terlepas, kemudian teroksidasi membentuk gas SO_2 . Proses analisa Sulfur *Analyzer* berlangsung 2-3 menit. Proses akhir dari analisis ini merupakan proses perhitungan nilai konsentrasi sulfur didalam sampel yang dihitung oleh operating *software* alat.

e. Pengukuran kadar kalori batubara

Pengukuran kadar kalor batubara dilakukan menggunakan alat kalorimeter. Kalorimeter dapat ditunjukkan pada **Gambar 2.18**. Kalorimeter adalah sebuah



Gambar 2.18 Kalorimeter

alat yang digunakan untuk mengukur jumlah kalor yang dipindahkan ke atau dari suatu benda. Salah satu penggunaan penting dari kalorimeter adalah dalam penentuan kalor jenis zat tertentu. Teknik umum yang dikenal sebagai metode campuran yaitu sampel suatu zat dipanaskan hingga suhu tinggi lalu diukur secara akurat dan dengan cepat di tempatkan pada air dingin dalam kalorimeter (Giancoli, 2001).

2.2.7 Efisiensi Boiler

Siklus *Rankine* diaplikasikan dalam pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Prinsip dasar siklus ini memungkinkan pemanfaatan energi panas untuk menghasilkan energi listrik secara efisien dan berkelanjutan. Pengembangan teknologi dalam siklus *rankine* mencakup upaya meningkatkan efisiensi termal, penggunaan bahan kerja alternatif, dan integrasi dengan sumber energi terbarukan. Dalam keseluruhan, siklus *rankine* adalah dasar bagi sistem pembangkit tenaga termal yang mengubah energi panas menjadi energi mekanis atau listrik. Memahami prinsip dan langkah-langkah dalam siklus ini penting untuk merancang sistem tenaga termal yang efisien dan berkelanjutan. Dalam dunia industri, boiler memainkan peran krusial dalam menghasilkan energi. Efisiensi termal boiler adalah parameter penting dalam menilai kualitas kinerja sebuah boiler (Nopriantoko, 2024).

Terdapat dua metode penghitungan efisiensi pada boiler yaitu:

1. Metode langsung (*direct method*)

Metode langsung merupakan metode yang digunakan dimana perolehan energi fluida kerja (air dan uap) dibandingkan dengan kandungan energi bahan bakar yang digunakan. Masukan energi dihitung berdasarkan pada nilai kalor bahan bakar dan jumlah bahan bakar yang digunakan, sedangkan keluaran energi dihitung berdasarkan jumlah uap yang dihasilkan dan kandungan panas air umpan dan uap (LJ Energi Pte Ltd, 2019).

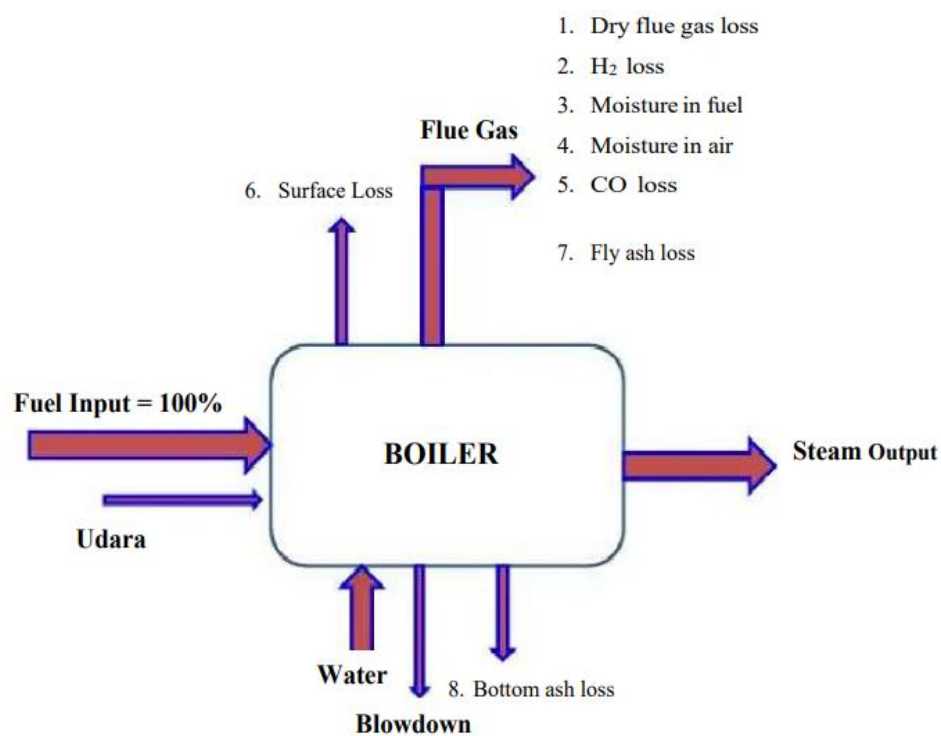
2. Metode tidak langsung (*direct method*)

Metode tidak langsung merupakan analisis dilakukan pada bahan bakar dan gas tumpukan untuk melakukan perhitungan per-unit-basis dari seluruh kehilangan panas (*heat losses*) yang kemudian dikurangi dari nilai kalor bahan bakar dan

persentasenya. Dalam metode ini, efisiensi boiler dihitung dengan mengurangi nilai persentase berbagai rugi-rugi dari 100. Menurut Malau (2016) rumus untuk menghitung efisiensi boiler metode tidak langsung sesuai standar ASME PTC 4-1 dapat ditunjukkan pada persamaan (2.4).

$$\eta = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) \quad (2.4)$$

Efisiensi boiler metode tidak langsung η terukur dalam satuan persen (%), L_1 adalah persentase kehilangan panas akibat gas buang kering, L_2 adalah persentase kehilangan panas akibat penguapan air dalam hidrogen dalam bahan bakar, L_3 adalah persentase kehilangan panas akibat kelembapan bahan bakar, L_4 adalah persentase kehilangan panas akibat uap air pada udara pembakaran, L_5 adalah persentase kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna, L_6 adalah persentase kehilangan panas akibat radiasi dan konveksi, L_7 adalah persentase kehilangan panas akibat karbon yang tidak terbakar pada *fly ash*, dan L_8 adalah persentase kehilangan panas akibat karbon yang tidak terbakar pada *bottom ash*.



Gambar 2.19 Diagram Energi Efisiensi Boiler Metode *Indirect* (Malau,2016)

Diagram energi perhitungan efisiensi boiler metode tidak langsung dapat ditunjukkan pada **Gambar 2.16**. Pada diagram energi perhitungan efisiensi boiler metode tidak langsung dapat dibagi menjadi 3 bagian yaitu:

1. *Input*

Input pada boiler terdiri dari air, udara dan 100% bahan bakar

2. *Output*

Output yang dihasilkan boiler yaitu berupa uap panas yang akan digunakan untuk memutar turbin pada pembangkit.

3. Rugi-rugi panas (*losses*)

Selama proses pembakaran bahan bakar pada boiler terdapat beberapa rugi-rugi panas yaitu *flue gas loss*, *H₂ loss*, *moisture in fuel*, *moisture in air*, *CO loss*, *surface loss*, *fly ash loss*, *bottom ash loss*, dan *blowdown*.

Pada saat ingin melakukan perhitungan efisiensi boiler metode tidak langsung, maka terdapat beberapa kehilangan panas yang harus dihitung terlebih dahulu. Pertama, persentase kehilangan panas gas buang kering. Persentase ini merupakan rugi-rugi yang disebabkan oleh panas yang dibawa oleh gas buang boiler. Persentase ini dipengaruhi oleh massa gas buang kering dalam 1 kg bahan bakar, panas spesifik gas buang, temperatur gas buang, temperatur udara ruang ketel dan nilai kalori bahan bakar. Persentase kehilangan panas akibat gas buang kering (L_1) dapat dihitung dengan rumus pada persamaan (2.5).

$$L_1 = \left(\frac{m \times C_{pf} \times (T_f - T_a)}{GCV_{fuel}} \right) \times 100\% \quad (2.5)$$

Pada persamaan ini, m mewakili massa gas buang kering dalam 1 kg bahan bakar dalam satuan kilogram per kilogram bahan bakar (kg/kg bahan bakar), C_{pf} adalah panas spesifik gas buang dalam satuan kilokalori per kilogram per derajat Celsius (kcal/kg°C) sebesar 0,23 kcal/kg°C, T_f adalah temperatur gas buang dalam satuan Celsius (°C), T_a adalah temperatur udara ruang ketel dalam satuan Celsius (°C), dan GCV_{fuel} adalah nilai kalor bahan bakar dalam satuan kilokalori per kilogram (kcal/kg).

Kedua, persentase kehilangan panas akibat penguapan air dalam hidrogen dalam bahan bakar. Pembakaran hidrogen menyebabkan hilangnya panas karena produk pembakarannya adalah air. Penguapan air menyerap panas dalam bentuk panas laten. Persentase ini dipengaruhi oleh kandungan hidrogen dalam 1 kg bahan bakar, panas spesifik dari *superheated steam*, temperatur gas buang, temperatur udara ruang ketel dan nilai kalor bahan bakar. Persentase kehilangan panas akibat penguapan air dalam hidrogen dalam bahan bakar ini dapat dihitung dengan rumus pada persamaan (2.6).

$$L_2 = \left(\frac{9 \times H_2 \times [584 + C_{ps} \times (T_f - T_a)]}{GCV_{fuel}} \times 100\% \right) \quad (2.6)$$

Pada persamaan ini, H_2 mewakili kandungan hidrogen dalam 1 kg bahan bakar dalam satuan kilogram per kilogram bahan bakar (kg/kg bahan bakar), C_{ps} adalah panas spesifik dari *superheated steam* dalam satuan kilokalori per kilogram per derajat Celsius (kcal/kg°C) sebesar 0,45 kcal/kg°C, T_f adalah temperatur gas buang dalam satuan Celsius (°C), T_a adalah temperatur udara ruang ketel dalam satuan Celsius (°C), dan GCV_{fuel} adalah nilai kalor bahan bakar dalam satuan kilokalori per kilogram (kcal/kg).

Ketiga, persentase kehilangan panas akibat kelembapan bahan bakar. Persentase ini merupakan kehilangan panas akibat uap air (*moisture*) memasuki boiler bersama bahan bakar. Persentase ini dipengaruhi oleh massa uap air dalam 1 kg bahan bakar, panas spesifik dari *superheated steam*, temperatur gas buang, temperatur udara ruang ketel dan nilai kalor bahan bakar. Persentase kehilangan panas akibat kelembapan bahan bakar dapat dihitung dengan rumus pada persamaan (2.7).

$$L_3 = \left(\frac{M \times [584 + C_{ps} \times (T_f - T_a)]}{GCV_{fuel}} \times 100\% \right) \quad (2.7)$$

Pada persamaan ini, M mewakili massa uap air dalam 1 kg bahan bakar dalam satuan kilogram per kilogram bahan bakar (kg/kg bahan bakar), C_{ps} adalah panas spesifik dari *superheated steam* dalam satuan kilokalori per kilogram per derajat Celsius (kcal/kg°C) sebesar 0,45 kcal/kg°C, T_f adalah temperatur gas buang dalam

satuan Celsius ($^{\circ}\text{C}$), T_a adalah temperatur udara ruang ketel dalam satuan Celsius ($^{\circ}\text{C}$), dan GCV_{fuel} adalah nilai kalor bahan bakar dalam satuan kilokalori per kilogram (kcal/kg).

Keempat, persentase kehilangan panas akibat uap air pada udara pembakaran. Persentase ini merupakan uap air di udara yang disediakan untuk pembakaran menjadi sangat panas saat melewati boiler dan keluar bersama gas buang. Persentase ini dipengaruhi oleh massa udara aktual yang disuplai dalam 1 kg bahan bakar, kelembaban, panas spesifik dari *superheated steam*, temperatur gas buang, temperatur udara ruang ketel dan nilai kalor bahan bakar. Persentase kehilangan panas akibat uap air pada udara pembakaran dapat dihitung dengan rumus pada persamaan (2.8).

$$L_4 = \left(\frac{AAS \times \text{humidity factor} \times C_{ps} \times (T_f - T_a)}{GCV_{fuel}} \right) \times 100\% \quad (2.8)$$

Pada persamaan ini, AAS mewakili massa udara aktual yang disuplai dalam 1 kg bahan bakar, *humidity factor* adalah faktor kelembaban dalam satuan kilogram per kilogram udara kering (kg/kg udara kering), C_{ps} adalah panas spesifik dari *superheated steam* dalam satuan kilokalori per kilogram per derajat Celsius (kcal/kg $^{\circ}\text{C}$) sebesar 0,45 kcal/kg $^{\circ}\text{C}$, T_f adalah temperatur gas buang dalam satuan Celsius ($^{\circ}\text{C}$), T_a adalah temperatur udara ruang ketel dalam satuan Celsius ($^{\circ}\text{C}$), dan GCV_{fuel} adalah nilai kalor bahan bakar dalam satuan kilokalori per kilogram (kcal/kg).

Sebelum menghitung persentase kehilangan panas akibat uap air pada udara pembakaran, terlebih dahulu kita menghitung kebutuhan teoritis yang dipengaruhi oleh nilai karbon, hidrogen, oksigen dan sulfur dalam bahan bakar. Kebutuhan udara teoritis yang dapat dihitung dengan rumus pada persamaan (2.9).

$$Kebutuhan\ udara\ teoritis = \frac{[(11,6 \times C) + (34,8(H_2 - \frac{O_2}{8})) + (4,35 \times S)]}{100\ kg / kg\ bahan\ bakar} \quad (2.9)$$

dengan C, H₂, O₂, S adalah nilai karbon, hidrogen, oksigen, sulfur dalam satuan persen (%).

Lalu, menghitung nilai persentase kelebihan udara yang disuplai (EA) dapat dihitung menggunakan rumus pada persamaan (2.10).

$$EA = \frac{\%O_2}{(21 - \%O_2)} \times 100\% \quad (2.10)$$

dengan %O₂ adalah volume O₂ dalam gas buang dalam satuan persen (%). Sehingga akan diperoleh udara aktual yang disuplai udara dalam 1 kg bahan bakar (AAS) yang dapat dihitung menggunakan rumus pada persamaan (2.11).

$$AAS = \left\{ 1 + \frac{EA}{100} \right\} \times \text{kebutuhan udara teoritis} \quad (2.11)$$

Kelima, persentase kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna. Produk yang dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna dapat bercampur dengan oksigen dan terbakar kembali dengan pelepasan energi lebih lanjut. Produk-produk tersebut meliputi CO, H₂, dan berbagai hidrokarbon dan umumnya ditemukan dalam gas buang boiler. Persentase kehilangan panas ini dipengaruhi oleh kandungan karbon dalam 1 kg bahan bakar, nilai kalor bahan bakar, volume CO dan CO₂ dalam gas buang. Persentase ini dapat dihitung menggunakan rumus pada persamaan (2.12).

$$L_5 = \left(\frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \right) \times \left(\frac{5744}{GCV_{fuel}} \right) \times 100\% \quad (2.12)$$

Pada persamaan ini, %CO mewakili volume CO dalam gas buang dalam satuan persen (%), %CO₂ adalah volume CO₂ dalam gas buang dalam satuan persen (%), C adalah kandungan karbon dalam 1 kg bahan bakar dalam satuan kilogram per kilogram bahan bakar (kg/kg bahan bakar), dan GCV_{fuel} adalah nilai kalor bahan bakar dalam satuan kilokalori per kilogram (kcal/kg).

Keenam, persentase kehilangan panas akibat radiasi dan konveksi. Persentase ini dipengaruhi oleh kecepatan angin, luas total penampang boiler, konsumsi bahan bakar per jam, temperatur permukaan boiler, temperatur udara ruang ketel dan kalor bahan bakar. Persentase ini dapat dihitung menggunakan rumus pada persamaan (2.13).

$$L_6 = \frac{\text{Radiation loss} \times A_{total}}{m_f \times GCV_{fuel}} \times 100\% \quad (2.13)$$

Pada persamaan ini, *radiation loss* mewakili kehilangan panas total akibat radiasi dan konveksi dari permukaan boiler ke lingkungan, A_{total} adalah luas penampang boiler dalam satuan meter persegi, m_f adalah konsumsi bahan bakar per jam dalam satuan kilogram per jam (kg/jam), dan GCV_{fuel} adalah nilai kalor bahan bakar dalam satuan kilokalori per kilogram (kcal/kg).

Radiation loss dapat dihitung menggunakan rumus pada persamaan (2.14).

$$\begin{aligned} \text{Radiation loss} = & 0,584 \times \left[\left(\frac{T_s}{55,55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55,55} \right)^4 \right] + 1,957 \times \\ & (T_s - T_a)^{1,25} \times \left[\sqrt{\frac{(196,85 V_m + 68,9)}{68,9}} \right] \end{aligned} \quad (2.14)$$

dengan V_m adalah kecepatan angin dalam satuan meter per detik (m/s), T_s adalah temperatur permukaan boiler dalam satuan Celsius (°C), dan T_a adalah temperatur udara ruang ketel dalam satuan Celsius (°C).

Dan terakhir, sejumlah kecil karbon akan tertinggal dalam abu dan hal ini menyebabkan hilangnya potensi panas dalam bahan bakar. Sampel abu dapat dianalisis untuk mengukur kandungan karbon. Sehingga, persentase kehilangan panas akibat karbon yang tidak terbakar pada *fly ash* dan *bottom ash* dapat dihitung dengan rumus persamaan (2.15) dan persamaan (2.16). Persentase ini dipengaruhi oleh kandungan ash dalam 1 kg bahan bakar, kalori *fly ash*, kalori *bottom ash* dan kalori bahan bakar.

$$L_7 = \left(\frac{\text{Fly ash split} \times \text{Ash} \times GCV_{\text{fly ash}}}{GCV_{\text{fuel}}} \right) \times 100\% \quad (2.15)$$

$$L_8 = \left(\frac{\text{Bottom ash split} \times \text{Ash} \times GCV_{\text{bottom ash}}}{GCV_{\text{fuel}}} \right) \times 100\% \quad (2.16)$$

Pada persamaan ini, *Ash* adalah kandungan abu dalam 1 kg bahan bakar dalam satuan kilogram per kilogram bahan bakar (kg/kg bahan bakar), $GCV_{\text{fly ash}}$ adalah kalor *fly ash* dalam satuan kilokalori per kilogram (kcal/kg), $GCV_{\text{bottom ash}}$ adalah kalor *bottom ash* dalam satuan kilokalori per kilogram (kcal/kg), GCV_{fuel} adalah kalor bahan bakar dalam satuan kilokalori per kilogram (kcal/kg), *Fly ash split* adalah *fly ash* dalam 1 kg bahan bakar dalam satuan kilogram per kilogram bahan bakar (kg/kg bahan bakar), dan *Bottom ash split* adalah *bottom ash* dalam 1 kg bahan bakar dalam satuan kilogram per kilogram bahan bakar (kg/kg bahan bakar).

2.2.8 *Perfomance Test* PLTU

Perfomance Test PLTU adalah kegiatan yang dilakukan untuk memperoleh *raw data* yang digunakan dalam perhitungan *net plat heat rate* suatu unit pembangkit. *Heat rate* adalah nilai jumlah energi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 kWh. Digunakan sebagai acuan keandalan/performa pembangkit. *Perfomance Test* bertujuan sebagai panduan operator dalam melaksanakan kegiatan performance test dan monitoring PLTU sehingga didapatkan nilai performance yang actual dan dapat diketahui *trend* kondisi efisiensi unit (PLN Nusantara Power, 2023).

Menurut Intruksi Kerja PLTU Tarahan tahapan pelaksanaan *Perfomance Test* PLTU yaitu sebagai berikut (PLN Nusantara Power, 2023).

1. Pencatatan Data

- a. Pencatatan data metode *indirect* diambil setiap 15 menit (9 kali pengambilan) selama 240 menit. Adapun data yang di ambil meliputi data DCS, data produksi gross (GGO), data produksi netto, data *coal flow* dan temperatur *flue gas*.

- b. Pada metode *indirect* dilakukan pengambilan data ambient air temperatur *relative humidity* dilakukan 3 kali.
2. Pengambilan Sampel Batubara
Pengambilan sampel batubara dilakukan sebanyak 3 kali pada awal, tengah dan akhir periode *performance test* dengan selang waktu 1 jam.
3. Pengambilan Sampel *Bottom Ash*
 - a. Pengambilan sampel *bottom ash* dapat dilakukan setelah 15 menit pengambilan data selesai.
 - b. Lakukan pengambilan sampel *bottom ash* pada ash ekstraktor.
 - c. Pengambilan sampel sekitar 5 kg.
4. Pengambilan Sampel *Fly Ash*
 - a. Pengambilan sampel *fly ash* dilakukan setelah 15 menit pengambilan data selesai.
 - b. Pengambilan sampel sekitar 1,5 kg.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PT. PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Tarahan berlokasi di Desa Ranggai Tri Tunggal, Kecamatan Katibung, Kabupaten Lampung Selatan Provinsi Lampung. Penelitian ini berlangsung dari bulan Oktober 2024 hingga Januari 2024. Penelitian ini terdiri dari berbagai tahapan, mulai dari wawancara, studi literatur, pengambilan data sampai analisis hasil dan pembuatan laporan akhir. Jadwal pelaksanaan kegiatan digambarkan dalam **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No	Kegiatan	Bulan			
		Oktober	November	Desember	Januari
1.	Melakukan Wawancara, Studi Literatur dan Pembuatan Proposal Penelitian				
2.	Observasi dan Pengambilan Data				
3.	Melakukan Analisa Data				
4.	Pembuatan Laporan Akhir				

3.2 Alat dan Bahan

Dalam pembuatan perangkat pada penelitian ini terdapat alat dan bahan yang digunakan untuk mendukung berjalannya pembuatan perangkat sebagai berikut.

3.2.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada **Tabel 3.2**.

Tabel 3.2 Alat Penelitian

No	Alat Penelitian	Fungsi
1.	<i>ESSA Drying Oven</i>	Sebagai alat untuk mengeringkan sampel batubara agar mendapatkan nilai dari ADL pada sampel bahan bakar.
2.	<i>Jaw Crusher</i>	Sebagai alat untuk menggiling sampel bahan bakar menjadi partikel yang lebih kecil.
3.	<i>Raymond Mill</i>	Sebagai alat untuk menggiling sampel partikel bahan bakar sampai menjadi sebuah sampel dengan sangat halus.
4.	Neraca Analitik	Sebagai alat untuk menimbang atau mengukur berat sampel bahan bakar dengan kapasitas kecil (120 g).
5.	TGM	Sebagai alat untuk mendapatkan nilai RM dan TM dalam sampel bahan bakar.
6.	TGA	Sebagai alat untuk mendapatkan nilai nilai <i>moisture in analysis</i> (MiAs), hidrogen (H ₂), <i>volatile matter</i> , oksigen (O ₂), karbon (C) dan <i>ash</i> dalam sampel bahan bakar.
7.	<i>Sulfur Analyzer</i>	Sebagai alat untuk mendapatkan nilai kadar sulfur yang terkandung dalam sampel bahan bakar.
8.	Kalorimeter	Sebagai alat untuk untuk mendapatkan nilai kadar kalor yang terkandung dalam sampel bahan bakar.
9.	Komputer	Sebagai alat untuk melihat nilai keluaran dari proses analisa yang telah dilakukan.
10.	<i>Software Microsoft Excel 2019</i>	Sebagai alat untuk melakukan analisis data.

3.2.2 Bahan penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3.3 Bahan Penelitian

No	Bahan Penelitian	Fungsi
1.	Sampel Batubara dan Biomassa	Sebagai bahan yang digunakan pada proses analisa kualitas bahan bakar sehingga mendapatkan nilai data parameter bahan bakar.
2.	Data Paramater Operasi Boiler	Sebagai bahan yang dibutuhkan untuk melakukan perhitungan efisiensi boiler metode tidak langsung.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Pengumpulan data dimulai dengan wawancara, studi literatur dan melakukan observasi.
2. Pengambilan parameter operasi pada boiler PLTU Unit 3 Tarahan Lampung.
3. Pengambilan sampel bahan bakar pada boiler PLTU Unit 3 Tarahan Lampung.
4. Dilakukan preparasi sampel bahan bakar batubara dan biomassa.
5. Dilakukan analisa sampel bahan bakar menggunakan alat TGM, TGA, sulfur *analyzer* dan *automatic calorimeter*.
6. Pengumpulan data parameter boiler PLTU Unit 3 Tarahan Lampung
7. Perhitungan efisiensi boiler metode tidak langsung sesuai dengan standar ASME PTC 4-1 menggunakan persamaan (2.4). Sebelum melakukan perhitungan efisiensi boiler, maka terlebih dahulu kita menghitung persentase kerugian energi yang meliputi:
 - a. Persentase kehilangan panas akibat gas buang kering yang dapat dihitung menggunakan persamaan (2.5).
 - b. Persentase kehilangan panas akibat penguapan air dalam hidrogen dalam bahan bakar yang dapat dihitung menggunakan persamaan (2.6).
 - c. Persentase kehilangan panas akibat kelembapan bahan bakar yang dapat dihitung menggunakan persamaan (2.7).
 - d. Persentase kehilangan panas akibat uap air pada udara pembakaran yang dapat dihitung menggunakan persamaan (2.8). Akan tetapi, kita terlebih dahulu menghitung kebutuhan udara teoritis menggunakan persamaan (2.9), menghitung EA menggunakan persamaan (2.10) dan menghitung AAS menggunakan persamaan (2.11).
 - e. Persentase kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna yang dapat dihitung menggunakan persamaan (2.12).
 - f. Persentase kehilangan panas akibat radiasi dan konveksi yang dapat dihitung menggunakan persamaan (2.13). Akan tetapi, kita terlebih dahulu menghitung *radiation loss* menggunakan persamaan (2.14).

- g. Persentase kehilangan panas akibat karbon yang tidak terbakar pada *fly ash* dan *bottom ash* yang dapat dihitung menggunakan persamaan (2.15) dan persamaan (2.16).

3.4 Data yang Diperlukan untuk Perhitungan

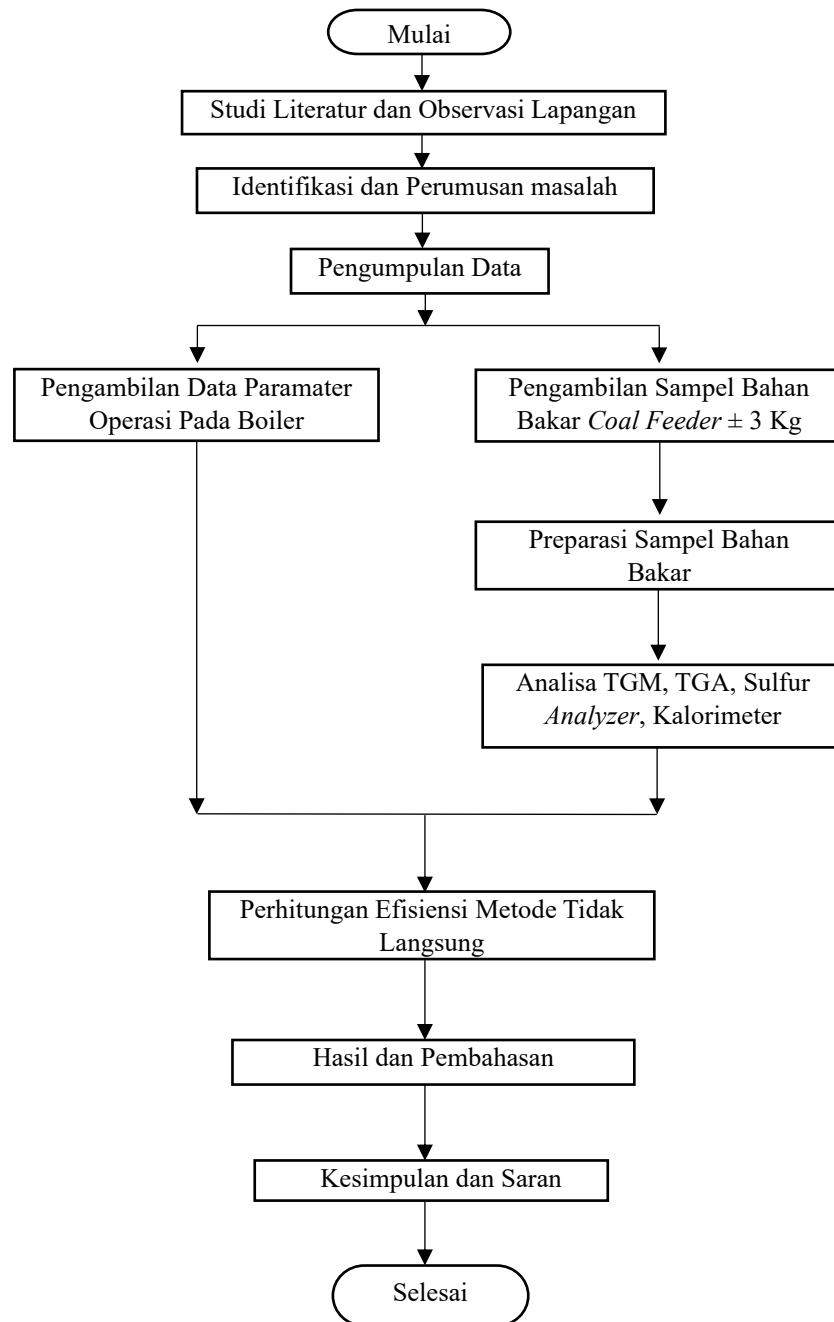
Data yang diperlukan pada penelitian ini meliputi data paramater bahan bakar campuran batubara dan biomassa dari persentase bahan bakar 100% batubara, 10% biomassa, 20% biomassa, 30% biomassa dan 40% biomassa serta data parameter operasi boiler. Adapun data-data yang diperlukan untuk perhitungan efisiensi boiler menggunakan metode tidak langsung yaitu sebagai berikut.

1. Data parameter bahan bakar terdiri dari:
 - a. Analisis ultimat bahan bakar (H_2 , O_2 , S, C).
 - b. Analisis proksimat massa uap air (*moisture*) dan abu (*ash*) (kg/kg bahan bakar).
 - c. Nilai kalor bahan bakar (kcal/kg).
 - d. Nilai kalor *fly ash* (kcal/kg).
 - e. Nilai kalor *bottom ash* (kcal/kg).
2. Data parameter operasi boiler terdiri dari:
 - a. Luas total penampang boiler (m^2).
 - b. Konsumsi bahan bakar per jam (kg/jam).
 - c. Massa gas buang kering (kg/kg bahan bakar).
 - d. Temperatur gas buang ($^{\circ}C$).
 - e. Temperatur udara ruang ketel ($^{\circ}C$).
 - f. Temperatur permukaan boiler ($^{\circ}C$).
 - g. Kelembaban udara (kg/kg udara kering).
 - h. Persentase O_2 , dalam gas buang.
 - i. Persentase CO_2 dalam gas buang.
 - j. Persentase CO dalam gas buang.
 - k. Kecepatan angin (m/s).
 - l. Panas spesifik gas buang (0.23 kcal/kg $^{\circ}C$).
 - m. Panas spesifik dari *superheated steam* (0.45 kcal/kg $^{\circ}C$).
 - n. *Fly ash split* dan *bottom ash split*.

3.5 Diagram Alir

3.5.1 Diagram Alir Penelitian

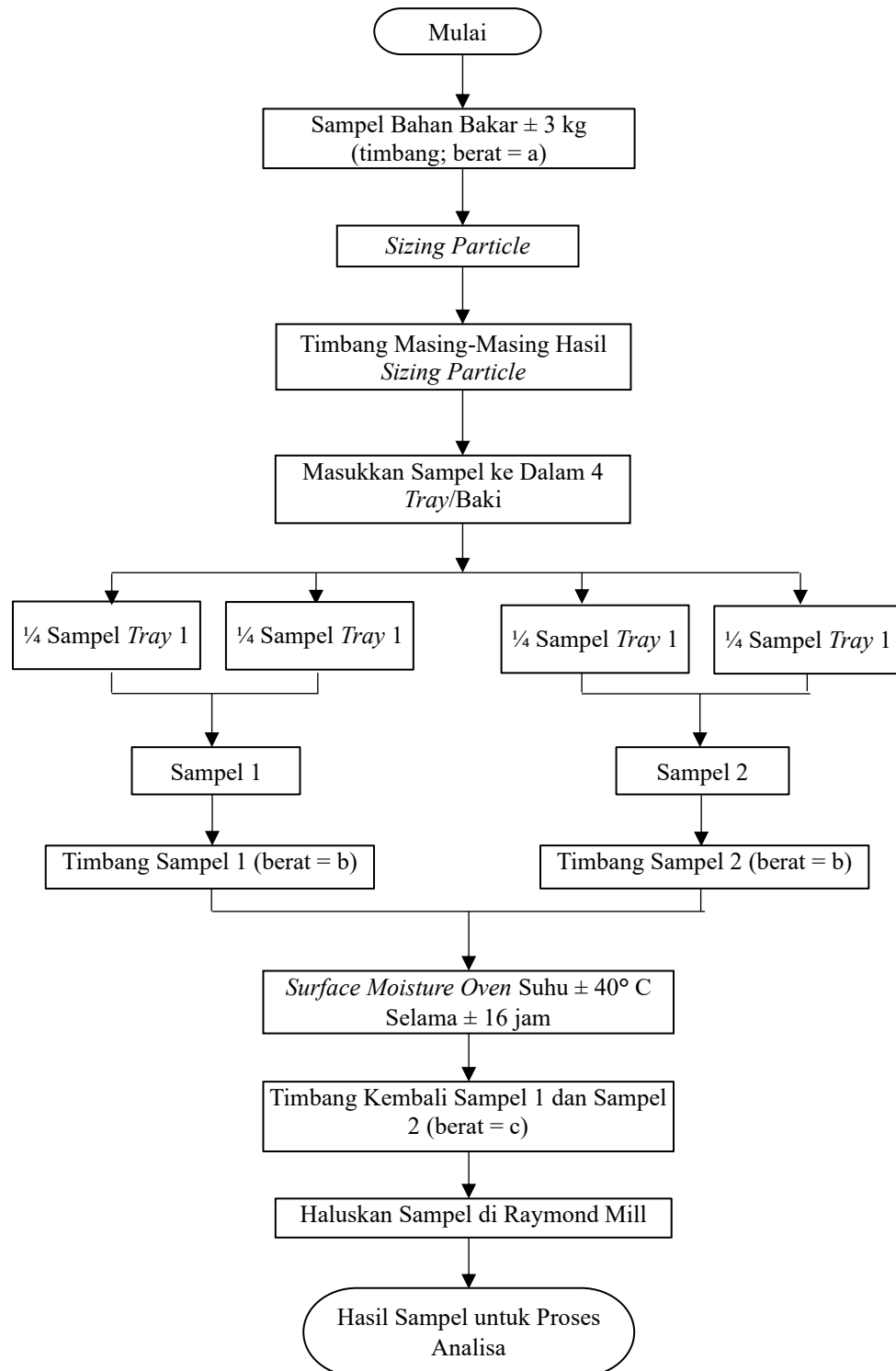
Adapun diagram alir pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.5.2 Diagram Alir Preparasi Sampel Bahan Bakar

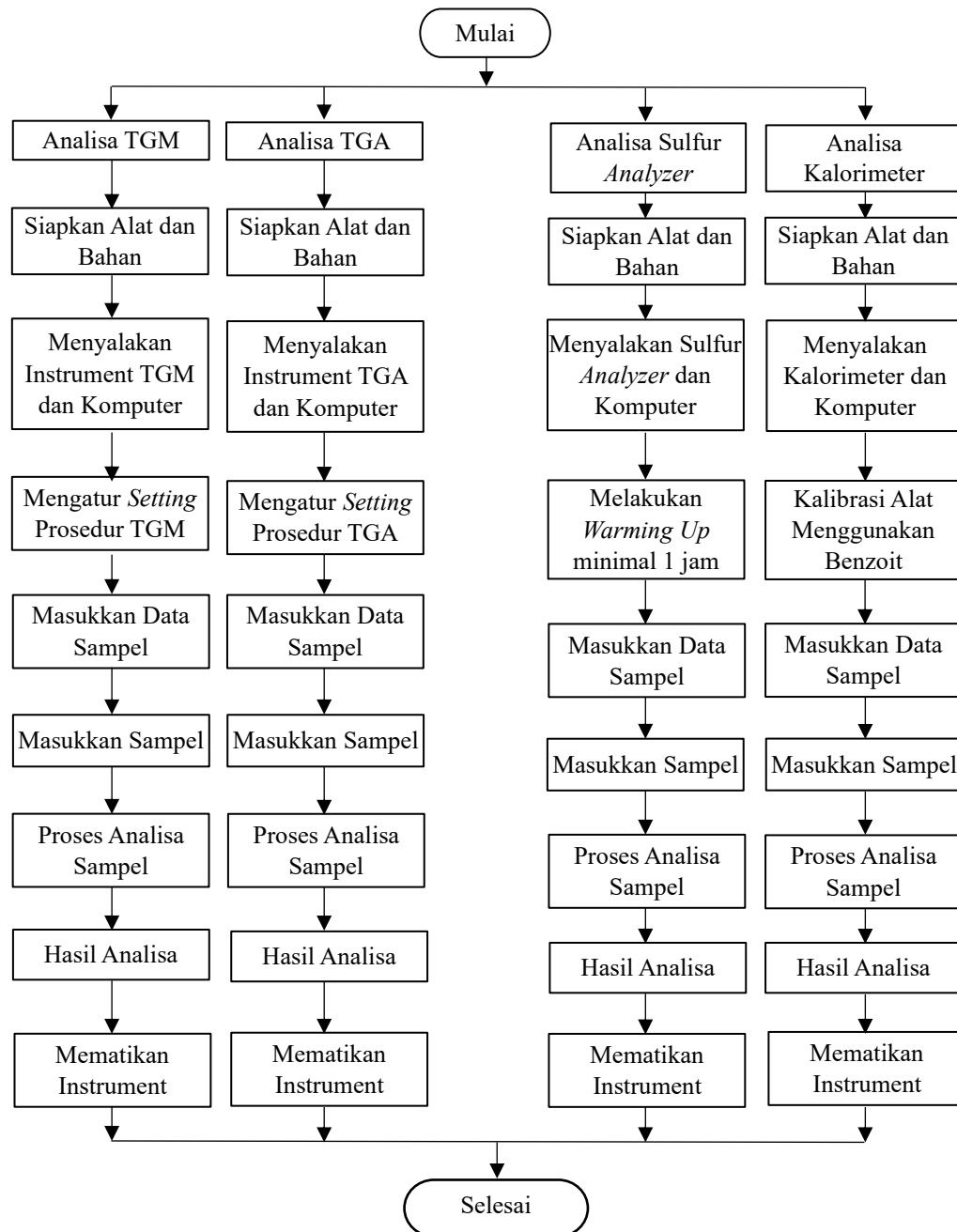
Adapun diagram alir preparasi sampel bahan bakar batubara dan biomassa pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Diagram Alir Preparasi Sampel Bahan Bakar

3.5.3 Diagram Alir Analisa TGM, TGA, Sulfur *Analyzer* dan Kalorimeter

Adapun diagram alir analisa menggunakan alat TGM, TGA, Sulfur *Analyzer* dan Kalorimeter dapat ditunjukkan pada **Gambar 3.3** berikut.



Gambar 3.3 Diagram Alir Analisa TGM, TGA, Sulfur *Analyzer* dan Kalorimeter

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan terkait efisiensi boiler metode tidak langsung di PLTU Tarahan yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Penambahan biomassa ke dalam campuran bahan bakar boiler CFB pada PLTU Unit 3 Tarahan cenderung menurunkan efisiensi termal boiler, terutama pada peningkatan persentase biomassa yang lebih tinggi. Semakin besar proporsi biomassa dalam bahan bakar maka semakin rendah efisiensi boiler yang dihasilkan.
2. Efisiensi pembakaran boiler CFB pada PLTU Unit 3 Tarahan dipengaruhi oleh beberapa faktor utama seperti nilai kalor bahan bakar, konsumsi bahan bakar per jam, dan kandungan *moisture* bahan bakar. Faktor-faktor ini menyebabkan perbedaan nilai efisiensi boiler yang diperoleh dari berbagai campuran bahan bakar.
3. Pada penelitian ini, campuran optimal untuk mendapatkan efisiensi yang optimal dengan emisi CO₂ yang rendah adalah pada komposisi 80% batubara dan 20% biomassa. Campuran ini memberikan keseimbangan terbaik, di mana efisiensi boiler tetap tinggi, yaitu 80,83%, dan kandungan CO₂ dalam gas buang sedikit lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan campuran bahan bakar lainnya. Untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi, strategi optimalisasi yaitu penggunaan proporsi campuran biomassa yang tidak melebihi 20% guna untuk memastikan kandungan karbon dioksida yang cukup bagi proses pembakaran yang efisien.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan terkait efisiensi boiler metode tidak langsung di PLTU Tarahan yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka penulis memberikan beberapa saran yaitu sebagai berikut.

1. Untuk mempertahankan efisiensi boiler yang optimal, disarankan agar penggunaan biomassa dalam campuran bahan bakar tidak melebihi 20%. Proporsi ini menunjukkan keseimbangan terbaik antara efisiensi termal boiler dan pengurangan emisi karbon dioksida, seperti terlihat pada campuran 80% batubara dan 20% biomassa.
2. Untuk meningkatkan efisiensi termal, biomassa yang digunakan sebaiknya dikeringkan terlebih dahulu guna mengurangi kandungan kelembapan.
3. Disarankan untuk melakukan kajian lebih lanjut mengenai jenis biomassa yang paling cocok digunakan sebagai bahan bakar campuran di PLTU Tarahan. Faktor seperti kandungan energi, kadar abu, dan ketersediaan lokal biomassa perlu dipertimbangkan untuk memaksimalkan efisiensi operasional dan keberlanjutan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul., Ali, M.S., Syaiful, A. Z. & dan A Gazali, A. (2022). PENGARUH SENYAWA ALUMINA (Al_2O_3) DAN SILIKA (SiO_2) DALAM KUALITAS BATUBARA. *SAINTIS*, 3(1), 42-49.
- Afrah, B. D., Oktarinasari, E., Putri, R.W., Riady, M.I., Saputri, J.F.D. & Putri, T.M.R. (2024). PEMANFAATAN BIOCHAR LIMBAH KAYU KARET DAN BROWN COAL SEBAGAI BAHAN BAKAR ALTERNATIF. *Jurnal Pertambangan*, 8(3), 115-122.
- Ali, N., Tabi, A.N.M., Zakil, F.A., Fauzai, W.N.F.M. & Hassan, O. (2013). Yield Performance and Biological Efficiency of Empty Fruit Bunch (EFB) and Palm Pressed Fibre (PPF) as Substrates for the Cultivation of *Pleurotus Ostreatus*. *Jurnal Teknologi*, 64(1), 93-99.
- Artiningsih, A., Widodo, S. & Firmansyah, A. (2015). STUDI PENENTUAN KANDUNGAN SULFUR (*SULPHUR ANALYSIS*) DALAM BATUBARA PADA PT GEOSERVICES SAMARINDA KALIMANTAN TIMUR. *Jurnal Geomine*, 2(1), 68-71.
- Avicenna, M.F., Sufriadin., Budiman, A.A. & Widodo, S. (2019). Analisis Mineralogi Dan Kualitas Batubara Desa Kadingeh, Kecamatan Baraka, Kabupaten Enrekang, Sulawesi Selatan. *Jurnal Geomine*, 7(2), 114-123.
- Basu, P. (2006). *Combustion and gasification in fluidized bed*. Boca Raton: CRC Press.
- Fata, S. A. & Fajriani. (2019). ANALISIS SIKLUS UAP PLTU PANGKALAN SUSU PT INDONESIA POWER. *Jurnal Hadron*, 1(1), 9-11.
- Giancoli, D. C. (2001). *Fisika* (Edisi Kelima, Jilid 1). Jakarta: Erlangga.
- Hendri, Suhengki. & Ramadhan, P. (2017). ANALISA EFISIENSI BOILER DENGAN METODE HEAT LOSS SEBELUM DAN SESUDAH OVERHAUL PT. INDONESIA POWER UBP PLTU LONTAR UNIT 3. *Jurnal Power Plant*, 4(4), 218–227.
- Herlambang, S., Rina, S., Santosa, P. B. & Sutiono, H. T. (2017). *Biomassa sebagai sumber energi masa depan*. Yogyakarta: Gerbang Media Aksara.

- Hernowo, P., Astuti, N., Prabowo, M.A. & Sutoyo, Y. (2017). PENGUKURAN NILAI KALOR BIOMASA BAHAN BAKU BIOFUEL. *Jurnal Teknologi*, 6(2). 4-5.
- Kawiarso, Nuryoto. & Irawan, A. (2023). Pengaruh Biomassa Terhadap Efisiensi Boiler Pada Pembangkit CFB Batubara Dalam Sistem *Co-firing*. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 9(3), 281–296.
- Komariah, W. E. (2012). *Peningkatan Kualitas Batubara Indonesia Peringkat Rendah Melalui Penghilangan Moisture Dengan Pemanasan Gelombang Mikro, skripsi*. Depok: Universitas Indonesia.
- Kong, G. T. (2010). *Peran biomassa bagi energi terbarukan*. Jakarta: PT Elek Media Komputindo.
- LJ Energi Pte Ltd. (2019). *Steam and compressed air systems*. Badan Lingkungan Hidup Nasional Singapura.
- Lungu, M. & Catalin, N. M. (2023). *Dasar-dasar dan tantangan bahan oksida*. Newcastle Upon Tyne: Cendekiawan Cambridge.
- Malau, V. (2016). *BOILER EFFICIENCY (ASME PTC 4-1) Performance Test Code*. Jurusan Teknik Mesin dan Industri. Universitas Gadjah Mada.
- Mangalla, L.K., Sisworo, R.R. & Pagiling, L. (2022). *Aplikasi Torefaksi Microwave Sebuah Upaya Perbaikan Energi Biomassa*. Purwodadi: CV Sarnu Untung.
- Marwanza, I. (2023). *Pendekatan geologi dan geostatistik dalam klasifikasi dan estimasi endapan batubara*. Purbalingga: CV Diva Pustaka.
- Masnur. & Marlina. (2022). Sistem Pengendali Energi Listrik Menggunakan Raspberry Pi Pada Smart Building Kampus. *Jurnal Building of Informatics, Technology and Science*, 3(4), 674–678.
- Munandar, A. I., Aprilasani, Z. & Samputra, P. L. (2018). *Industri pertambangan di Indonesia*. Depok: Bypass.
- Nada, F. Q. & Siregar, I. H. (2023). PENGARUH KUALITAS BATU BARA TERHADAP EFISIENSI BOILER UNIT UTILITAS BATU BARA PT PETROKIMIA GRESIK MENGGUNAKAN METODE *INDIRECT/ HEAT LOSS* MENGACU PADA ASME PTC 4. *Jurnal Teknik Mesin*, 11(2), 29–38.
- Nopriantoko, R. (2024). *Rekayasa sistem termal dan energi*. Sukabumi: CV Jejak.

- PLN Nusantara Power. (2023). *Instruksi Kerja (IK): Pelaksanaan Performance Test Unit* (Dokumen No. IKTH-306-14.2.1.1.a.t-001, Revisi 00). PT PLN Nusantara Power.
- Putra., Alief, I.F. & Adiwarman, M. (2024). Analisis Faktor Penurunan Kualitas Batubara Mine Brand BB-53 Pada Stockpile 3 dan Train Loading Station 3 Menuju Pelabuhan Tarahan dan Dermaga Kertapati PT. Bukit Asam, Tbk. *Jurnal Ilmu Teknik dan Sains*, 1(3), 154-158.
- Putri, R. Z. & Fadhillah. (2020). Peningkatan Kualitas Batubara *Low Calorie* Menggunakan Minyak Pelumas Bekas Melalui Proses *Upgrading Brown Coal*. *Jurnal Bina Tambang*, 5(2), 208-217.
- Quartey, G.A., Eshun, J.F. & Marfo, E.D. (2022). Calorific Values of Rubberwood Biomass Along the. *European Journal of Applied Sciences*, 10(5), 11-14.
- Saidah, A. & Sinaga, M. (2023). *Power plant dan aplikasinya*. Yogyakarta: CV Bintang Semesta Media.
- Salahu, H. (2022). PENGARUH BATUBARA TERBAKAR DAN FAKTOR TERHADAP OUTPUT PLTU PADA PT. PEMBANGKIT JAWA BALI SERVICES KECAMATAN TIDORE UTARA. *Jurnal Teknik*, 15(2), 91–101.
- Sandi, R. P. & Effendy, M. (2022). PENGARUH KUALITAS BATUBARA TERHADAP EFISIENSI BOILER TIPE CFB UNIT 3 PLTU JERANJANG LOMBOK BARAT DENGAN METODE ASME PTC 4. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(3), 85–92.
- Sudiro. & Suroto. (2014). PENGARUH KOMPOSISI DAN UKURAN SERBUK BRIKET YANG TERBUAT DARI BATUBARA DAN JERAMI PADI TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN. *Jurnal Sainstech Politeknik Indonusa Surakarta*, 2(2), 1-18.
- Sukandarrumidi. (2018). *Batubara dan pemanfaatannya*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Sulasminingsih, S., Hafiz, F., Sari, K. & Yuninda, S. (2023). Penggunaan Biomassa sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik di Wilayah Pedesaan. *Journal of Optimization System and Ergonomy Implementation (JOSEON)*, 01(01), 42-51.
- Suryani, S., Bannu, Tahir, D. & Heryanto. (2023). *Ilmu Lingkungan*. Purbalingga: Unhas Press.
- Susiati, H., Sriyana., Bahari, M. S., Fepriadi., Birmano, M. D., Priambodo, D., Anggoro, Y. D., Suparman., Lesmana, A. C. & Agus, A. (2023). *Pembangkit listrik tenaga nuklir di Indonesia*. Malang: Unisma Press.

- Suwignya, Mokhtar, A., Suhardi, D., Effendy, M. & Khoirin, N. (2022). *Pembangkit Listrik Tenaga Mini & Mikro Hidro (PLTM & PLTMH)*. Malang: UMM Press.
- Syahputra, R. (2020). *Teknologi pembangkit tenaga listrik*. Jurusan Teknik Elektro. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Syalsabila, J., Hendradinata, Putri, F., Safe'i, Siproni. & Indra, H. B. (2023). ANALISA EFISIENSI THERMAL BOILER TIPE CIRCULATION FLUIDIZED BED DI PLTU 3x10MW. *Machinery Jurnal Teknologi Terapan*, 4(3), 159–166.
- Tumpu, M., Lapian, F.E.L., Mansyur., Pasanda, O.S., Muliawan, I.W., Indrayani, P. & Yasa, I.G.M. (2022). *Energi Hijau*. Makassar: CV Tohar Media.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933.
- Xianchun, Li., Song, Hui., Wang, Qi., Meesri, C., Wall, T. & Yu, J. (2009). Experimental study on drying and moisture re-adsorption kinetics of an Indonesian low rank coal. *Journal of Environmental Sciences Supplement*, Vol. S, p. 127-230.
- Yuliyani, I., Maridjo. & Muhammad, A.M. (2019). Analisis Sistem Ruang Bakar Boiler Jenis *Fluidized Bed Combustion* untuk PLTU Kapasitas 8 MW. *Jurnal Teknik Energi*, 9(1), 1-8.
- Yunianto, Arif. & Suryanto. (2018). *Teknologi dasar otomotif*. Jakarta: Pt Gramedia Widiasarana Indonesia.
- Yuniarti, N. & Aji, I. W. (2019). *Pembangkit tenaga listrik*. Jurusan Pendidikan Teknik Elektro. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Zaky, R. F. & Dessy, A. S. (2024). Upaya Pereduksian Emisi Karbon Dioksida (CO₂) di Indonesia melalui Analisis Integrasi *Power-to-Gas* dengan PLTU Batubara. *Sprocket Journal of Mechanical Engineering (SJoME)*, 5(2), 66–75.