

**ANALISIS KELAYAKAN ENERGI PROSES *CO-FIRING* BATU BARA
DAN *WOODCHIP* PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU)**

(Studi kasus : PT. XYZ)

(SKRIPSI)

Oleh

FERTA JAYA SAPUTRA

2115021033



JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2026

**ANALISIS KELAYAKAN ENERGI PROSES *CO-FIRING* BATU BARA
DAN *WOODCHIP* PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU)**

(Studi kasus : PT. XYZ)

Oleh

FERTA JAYA SAPUTRA

Skripsi

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2026

ABSTRAK

ANALISIS KELAYAKAN ENERGI PROSES *CO-FIRING* BATU BARA DAN *WOODCHIP* PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) (Studi kasus : PT. XYZ)

Oleh

FERTA JAYA SAPUTRA

Batu bara masih menjadi sumber energi utama pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), namun penggunaannya menimbulkan permasalahan lingkungan akibat emisi gas rumah kaca. Peningkatan pemanfaatan energi terbarukan mendorong penerapan teknologi *co-firing* biomassa pada *boiler* berbahan bakar batu bara. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi rasio *co-firing woodchip* terhadap kinerja *boiler*, khususnya ditinjau dari efisiensi *boiler*, *specific fuel consumption* (SFC), dan *heat rate*. Penelitian dilakukan pada *boiler* bertipe *circulating fluidized bed* (CFB) berkapasitas 45 ton uap per jam dengan variasi rasio bahan bakar 100% BB, 95% BB : 5% WC, dan 90% BB : 10% WC. Metode penelitian meliputi pengujian laboratorium untuk analisis *proximate* dan nilai kalor bahan bakar, serta analisis data operasional *boiler*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan rasio *woodchip* menyebabkan penurunan nilai kalor bahan bakar dari 4.259 kkal/kg pada kondisi 100% BB menjadi 3.654 kkal/kg pada rasio 95% BB: 5% WC dan 3.496 kkal/kg pada rasio 90% BB : 10% WC. Rata-rata efisiensi *boiler* tertinggi diperoleh pada rasio 95% BB : 5% WC sebesar 75%, dibandingkan 73% pada kondisi 100% BB dan menurun menjadi 68% pada rasio 90% BB : 10% WC. Nilai SFC dan *heat rate* cenderung meningkat seiring bertambahnya rasio *woodchip*, yang menunjukkan peningkatan konsumsi bahan bakar untuk menghasilkan jumlah uap yang sama. Berdasarkan temuan ini, disimpulkan bahwa penerapan *co-firing* dengan rasio *woodchip* 5% merupakan rasio yang layak dan optimal untuk mengurangi konsumsi batu bara tanpa mengorbankan efisiensi termal *boiler*.

Kata kunci: *co-firing*, *woodchip*, efisiensi *boiler*, *heat rate*, SFC, PLTU.

ABSTRACT

ENERGY FEASIBILITY ANALYSIS OF CO-FIRING COAL AND WOODCHIP PROCESS IN A STEAM POWER PLANT (Case Study: PT. XYZ)

By

FERTA JAYA SAPUTRA

Coal remains the primary energy source in steam power plants (PLTU); however, its utilization causes environmental issues due to greenhouse gas emissions. The increasing use of renewable energy has encouraged the implementation of biomass co-firing technology in coal-fired boilers. This study aims to analyze the effect of variations in woodchip co-firing ratios on boiler performance, particularly in terms of boiler efficiency, specific fuel consumption (SFC), and heat rate. The research was conducted on a circulating fluidized bed (CFB) boiler with a capacity of 45 tons of steam per hour, using fuel ratio variations of 100% coal, 95% coal : 5% woodchip, and 90% coal : 10% woodchip. The research methods included laboratory testing for proximate analysis and fuel calorific value, as well as analysis of boiler operational data.

The results indicate that an increase in the woodchip ratio leads to a decrease in fuel calorific value, from 4,259 kcal/kg under the 100% coal condition to 3,654 kcal/kg at a ratio of 95% coal : 5% woodchip, and further to 3,496 kcal/kg at a ratio of 90% coal : 10% woodchip. The highest average boiler efficiency was achieved at the ratio of 95% coal : 5% woodchip, reaching 75%, compared to 73% at the 100% coal condition, and decreasing to 68% at the ratio of 90% coal : 10% woodchip. The SFC and heat rate values tended to increase with higher woodchip ratios, indicating increased fuel consumption to produce the same amount of steam. Based on these findings, it can be concluded that the application of co-firing with a 5% woodchip ratio is a feasible and optimal option to reduce coal consumption without compromising the thermal efficiency of the boiler.

Key words: co-firing, woodchip, boiler efficiency, heat rate, SFC, steam power plant.

Judul skripsi : Analisis kelayakan energi proses co-firing batu bara dan woodchip pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) (Studi kasus: PT. XYZ)

Nama mahasiswa : Ferta Jaya Saputra

Nomor Pokok Mahasiswa : 2115021033

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II


Dr. Amrul, S.T., M.T.

NIP. 197103311999031003

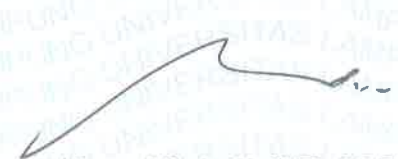

Angga Darma Prabowo, S.T., M.T.

NIP. 199605062024061001

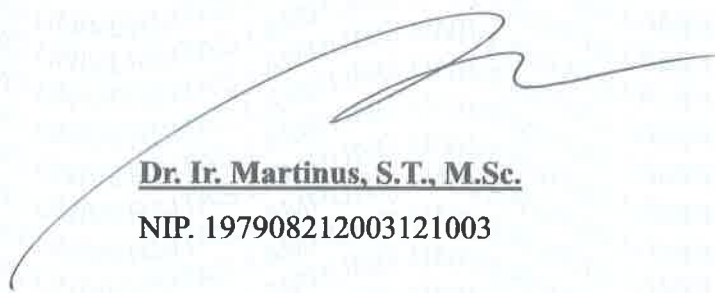
MENGETAHUI

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin


Ahmad Su'udi, S.T., M.T.

NIP. 197408162000121001


Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.

NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim penguji

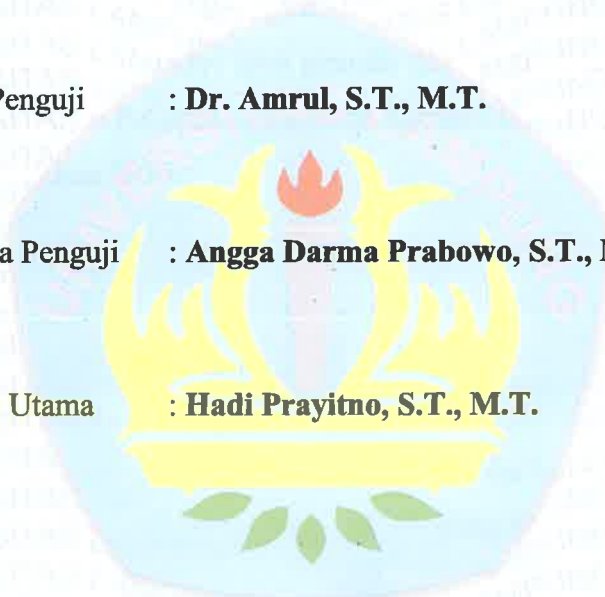
Ketua Penguji : **Dr. Amrul, S.T., M.T.**



Anggota Penguji : **Angga Darma Prabowo, S.T., M.T.**



Penguji Utama : **Hadi Prayitno, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 2 Februari 2026

LEMBAR PERNYATAAN

Skripsi dengan judul “**Analisis Kelayakan Energi Proses *Co-firing* Batu bara dengan *Woodchip* Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) (Studi Kasus: PT. XYZ)**” ini dibuat sendiri oleh penulis dan bukan hasil plagiat sebagaimana diatur dalam pasal 36 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Peraturan Rektor No. 13 Tahun 2019.

Bandar Lampung, 13 Februari 2026

Yang Menyatakan,



Ferta Jaya Saputra

NPM. 2115021033

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Pringsewu, Provinsi Lampung pada tanggal 22 Februari 2002 sebagai anak pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD NEGERI 8 GEDONG AIR hingga tahun 2014, lalu melanjutkan di SMP NEGERI 10 BANDAR LAMPUNG yang diselesaikan tahun 2017 dan SMK 2 MEI BANDAR LAMPUNG yang diselesaikan tahun 2020, hingga pada tahun 2021 penulis mendaftarkan diri sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah menjadi asisten praktikum Teknik Tenaga Listrik dan Metrologi. Selain itu, penulis juga aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai ketua divisi di bidang kerohanian pada tahun 2024. Penulis tergabung dalam tim mekatronik dalam pembuatan mobil hemat energi untuk mengikuti lomba Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE) pada tahun 2023. Penulis berkesempatan mengikuti magang industri dalam program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) selama 4 bulan di PT. Great Giant Pineapple pada tahun 2024. Selain itu, penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di PT. Perkebunan Nusantara I Unit Pagar Alam, Sumatera Selatan pada tahun 2024.

MOTTO

“Diberkatilah orang yang mengandalkan Tuhan, yang menaruh harapannya pada Tuhan.”

(Yeremia 17: 7)

“Serahkanlah perbuatanmu kepada Tuhan, maka terlaksanalah segala rencanamu.”

(Amsal 16: 3)

“Semua orang memiliki masanya masing-masing tak perlu terburu-buru,
tunggulah kesempatan itu akan datang dengan sendirinya”

(Gol D Roger)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Karya tulis ilmiah ini saya persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua saya tercinta Papah Marselinus Yudi Harianto dan Mamah Agnes Mujiati, terima kasih atas kasih sayang dan cintanya, dukungan baik moril maupun materil, serta doa yang tak henti dan pengorbanan yang tak terhingga. Putramu ini tak akan pernah bisa membalas seluruh keringat dan pengorbanan yang Papah dan Mamah berikan.
2. Diri saya sendiri, yang sudah mampu bertahan sampai di titik terakhir ini.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yesus Kristus, karena atas berkat, rahmat, dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyusun dan menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul “**Analisis Kelayakan Energi Proses *Co-firing* Batu bara dan *Woodchip* Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). (Studi kasus: PT. XYZ).**” dengan lancar. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari penyertaan Tuhan yang senantiasa memberikan kekuatan, kebijaksanaan, dan pengharapan kepada penulis dalam setiap proses yang dijalani. Sebagaimana tertulis dalam Injil, “Segala perkara dapat kutanggung di dalam Dia yang memberi kekuatan kepadaku”(Filipi 4: 13), ayat ini menjadi pegangan penulis dalam menghadapi berbagai tantangan selama proses penelitian dan penulisan skripsi.

Penulis menyadari bahwa terselesaikannya skripsi ini juga tidak lepas dari dukungan, bimbingan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yesus Kristus atas penyertaan dan berkat-Nya yang tidak pernah berkesudahan.
2. Kedua orang tua tersayang, papa Yudi Harianto dan mama Agnes Mujiati yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, serta dukungan moral dan material. Tidak lupa kepada adik tercinta, Albertus James Mandala Putra yang selalu memberikan semangat kepada penulis.

3. Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Ahmad Su'udi, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
6. Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing selama perkuliahan dan mengerjakan skripsi ini.
7. Angga Darma Prabowo, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing dalam mengerjakan skripsi ini.
8. Hadi Prayitno, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
9. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah menjadi guru dan mengajarkan dasar pengetahuan yang dibutuhkan kepada penulis.
10. Seluruh staf dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
11. Pihak PT. XYZ yang telah memberikan kesempatan, data, dan dukungan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.
12. Kepada Rega, Komang, Rams, Fathan, Ojan, Fardan selaku rekan seperjuangan dalam penelitian ini.
13. Teman-teman angkatan 2021 yang menemani dan memberikan bantuan selama penulis menginjakkan kaki di bangku perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa isi skripsi ini masih memiliki keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun demi penyempurnaan karya ini. Akhir kata, penulis berharap dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknik mesin dan energi berkelanjutan.

Bandar Lampung, 29 Januari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
COVER	i
ABSTRAK	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
LEMBAR PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
HALAMAN PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR.....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SIMBOL	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan masalah.....	3
1.3. Tujuan penelitian.....	4
1.4. Batasan masalah	4
1.5. Manfaat penelitian.....	5

1.6. Sistematika penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU).....	7
2.1.1. Komponen utama pembangkit listrik tenaga uap.....	9
2.2. <i>Boiler</i>	10
2.2.1. Jenis-jenis <i>boiler</i>	12
2.2.2. Prinsip kerja <i>boiler</i>	13
2.3. Batu bara	14
2.3.1. Peringkat batu bara.....	15
2.3.2. Analisis <i>proximate</i>	16
2.4. Biomassa	17
2.5. <i>Co-firing</i>	20
2.6. Efisiensi <i>boiler</i>	21
2.6.1. Metode langsung (<i>direct method</i>)	22
2.7. Konsumsi spesifik bahan bakar.....	22
2.8. <i>Heat rate</i>	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	24
3.1. Tempat penelitian	24
3.2. Alat dan bahan penelitian	24
3.2.1. <i>Boiler</i>	24
3.2.2. Komputer <i>central control room</i>	25
3.2.3. Batu bara	26
3.2.4. Biomassa <i>woodchip</i>	26
3.3. Teknik pengumpulan data	27
3.3.1. Studi literatur.....	27
3.3.2. Metode observasi	27

3.4. Analisis data	27
3.5. Prosedur penelitian.....	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1. Data Penelitian	29
4.1.1. Hasil pengujian <i>proximate</i> pada masing-masing rasio <i>co-firing</i>	29
4.1.2. Hasil perhitungan pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap efisiensi <i>boiler</i> metode langsung.....	31
4.1.3. Hasil analisis pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap konsumsi spesifik bahan bakar (SFC).	32
4.1.4. Hasil analisis pengaruh rasio terhadap <i>boiler heat rate</i>	33
4.2. Pengaruh <i>co-firing</i> terhadap nilai kalor bahan bakar	34
4.3. Pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap hasil analisis <i>proximate</i> bahan bakar ...	35
4.4. Pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap efisiensi <i>boiler</i>	37
4.5. Pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap nilai <i>specific fuel consumption</i> (SFC)..	43
4.6. Pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap nilai <i>heat rate boiler</i>	49
4.7. Diagram <i>sankey</i>	53
BAB V PENUTUP	56
5.1. Kesimpulan	56
5.2. Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA.....	58
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Sistem <i>boiler</i> pada pembangkit listrik tenaga uap.	8
Gambar 2.2 Siklus komponen utama pembangkit listrik tenaga uap.....	10
Gambar 2.3 Skema <i>boiler</i> pada PT. XYZ.	11
Gambar 2.4 Batu bara sebagai bahan bakar umum pada PLTU.....	15
Gambar 2.5 Bahan bakar biomassa berupa <i>woodchip</i> hasil dari cacahan kayu. ...	19
Gambar 2.6 Metode <i>co-firing</i> biomassa dengan batu bara.	20
Gambar 3.1 <i>Boiler</i> yang digunakan di PT. XYZ.....	24
Gambar 3.2 Unit komputer pada CCR dan <i>equipment</i> DCS di PLTU PT. XYZ. .	25
Gambar 3.3 Bahan bakar batu bara sebagai bahan bakar utama.....	26
Gambar 3.4 Bahan bakar biomassa <i>woodchip</i> yang digunakan dalam <i>co-firing</i> . .	27
Gambar 4.1 Grafik nilai kalor bahan bakar pada masing-masing rasio <i>co-firing</i> . 34	
Gambar 4.2 Grafik pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap hasil analisis <i>proximate</i> bahan bakar.	36

Gambar 4.3 Grafik pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap nilai efisiensi <i>boiler</i> unit 1.	38
Gambar 4.4 Grafik pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap nilai efisiensi <i>boiler</i> unit 3.	40
Gambar 4. 5 Grafik pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap nilai efisiensi rata-rata dari kedua unit <i>boiler</i>	42
Gambar 4.6 Grafik pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap nilai <i>specific fuel consumption</i> (SFC) pada <i>boiler</i> unit 1.	44
Gambar 4.7 Grafik pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap nilai <i>specific fuel consumption</i> (SFC) pada <i>boiler</i> unit 3.	45
Gambar 4.8 Grafik pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap nilai rata-rata <i>specific fuel consumption</i> (SFC) pada kedua unit <i>boiler</i>	48
Gambar 4.9 Grafik pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap nilai <i>heat rate boiler</i> unit 1.	49
Gambar 4.10 Grafik pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap nilai <i>heat rate boiler</i> unit 3.	51
Gambar 4.11 Grafik hasil rata-rata pengaruh rasio <i>co-firing</i> terhadap nilai <i>heat rate</i> pada kedua unit <i>boiler</i>	52
Gambar 4.12 Diagram <i>sankey</i> pada rasio 100% BB.	54
Gambar 4.13 Diagram <i>sankey</i> pada rasio <i>co-firing</i> 95% BB : 5% WC.	54
Gambar 4.14 Diagram <i>sankey</i> pada rasio <i>co-firing</i> 90% BB : 10% WC.	55

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Klasifikasi batu bara berdasarkan ASTM.....	16
Tabel 2.2 Hasil analisa <i>proximate</i> beberapa jenis kayu di Indonesia.....	18
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>boiler</i> di PT. XYZ.	25
Tabel 4.1 Hasil uji <i>proximate</i> dan nilai kalor bahan bakar pada setiap rasio <i>co-firing</i>	30
Tabel 4.2 Data hasil analisis efisiensi <i>boiler</i> unit 1.....	31
Tabel 4.3 Data hasil analisis efisiensi <i>boiler</i> unit 3.....	31
Tabel 4.4 Data hasil analisis SFC pada unit <i>boiler</i> 1.	32
Tabel 4.5 Data hasil analisis SFC pada unit <i>boiler</i> 3.	32
Tabel 4.6 Data hasil analisis <i>heat rate</i> pada unit <i>boiler</i> 1.	33
Tabel 4.7 Data hasil analisis <i>heat rate</i> pada unit <i>boiler</i> 3.	33

DAFTAR SIMBOL

NCV	= jenis bahan bakar dan nilai kalor bahan bakar (kkal/kg)
h_f	= entalpi air umpan (kJ/kg)
h_g	= entalpi uap jenuh (kJ/kg)
HR	= <i>boiler heat rate</i> (kJ/kJ)
q	= jumlah bahan bakar yang digunakan per jam (kg/jam)
Q	= jumlah uap yang dihasilkan per jam (kg/jam)
q_f	= Jumlah bahan bakar yang dipakai (kg)
SFC	= konsumsi spesifik bahan bakar (kg/kg _{steam})
η	= efisiensi termal <i>boiler</i> (%)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Batu bara merupakan sumber energi yang banyak digunakan pada sektor pembangkit listrik di Indonesia. Keunggulan utama batu bara adalah menghasilkan nilai efisiensi yang tinggi dalam proses pembakarannya. Walaupun memiliki tingkat efisiensi yang tinggi, namun penggunaan batu bara dalam jangka panjang dapat menyebabkan permasalahan lingkungan seperti emisi gas rumah kaca. Seiring dengan meningkatnya kesadaran global terhadap perubahan iklim dan kebutuhan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, industri energi mulai mencari solusi alternatif yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Rachmad dkk., 2024).

Menurut data penggunaan energi PT. XYZ, total konsumsi energi pada tahun 2023 adalah sebesar 2.008,95 TJ atau setara dengan 66.352 TOE (*Ton Oil Equivalen*) dari beberapa energi yang digunakan yaitu batu bara, solar, LPG (*liquefied petroleum gas*), bensin, listrik PLN, dan biogas. Dari total konsumsi energi tersebut, 74,22% berasal dari batu bara, dengan kata lain batu bara merupakan *significant energy user* (SEU) dari PT. XYZ. Batu bara digunakan pada *power plant* sebagai sumber energi untuk pembangkitan energi listrik dan *steam*, di mana tipe pembangkitannya adalah *cogeneration plant* (*cogen*). *Cogen* merupakan pembangkit energi yang berteknologi CHP (*combine heat and power*) yaitu pembangkit yang menghasilkan energi listrik dan energi panas. *Cogen* berkapasitas *steam* turbin generator 2x7 MW *extraction condensing* dan 1x4 MW *full condensing* yang *steam*-nya

dibangkitkan oleh 3 unit *boiler* bertipe *coal fired boiler* (CFB) yang berkapasitas 3x45 ton *steam* per jam. (Kristensen dkk., 2023).

Co-firing merupakan salah satu strategi pemerintah Indonesia untuk mendukung transisi energi bersih dan peraturan emisi gas rumah kaca, sebagaimana yang tertuang dalam Undang-Undang Nomor 30 tahun 2007 tentang energi serta diperkuat oleh Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang kebijakan energi nasional (KEN) (Hasan dan Swastika, 2025). *Co-firing* biomassa merupakan teknologi yang memungkinkan pembakaran campuran antara batu bara dengan biomassa (seperti sisa tanaman, kayu, atau limbah organik) pada pembangkit listrik berbahan bakar batu bara. Biomassa, sebagai bahan bakar terbarukan memiliki kandungan karbon netral karena emisi CO₂ yang dihasilkan selama pembakarannya dapat diserap kembali ke tumbuhan selama proses fotosintesis. Dengan menggabungkan biomassa dengan batu bara, *co-firing* bertujuan untuk mengurangi penggunaan batu bara secara signifikan, dengan memanfaatkan infrastruktur pembangkit listrik yang sudah ada (Maskur dan Nugroho, 2021). Berdasarkan data dari PT. PLN (Persero) selama tahun 2024, implementasi *co-firing* biomassa di PLTU menunjukkan perkembangan yang cukup signifikan. Teknologi *co-firing* ini telah diterapkan di 47 PLTU dan berhasil menghasilkan energi hijau sebesar 1,67 juta megawatt *hour* (MWh). Angka ini mengalami peningkatan sekitar 60% dibandingkan tahun sebelumnya. Selain itu, penggunaan biomassa juga berkontribusi dalam pengurangan emisi karbon hingga 1,87 juta ton CO₂ sepanjang tersebut (Arif, 2021).

Penelitian Dwiaji (2023) mengungkapkan bahwa *co-firing* biomassa tidak memberikan dampak signifikan terhadap kinerja peralatan *boiler* namun terdapat penurunan suhu tungku dan perubahan beban yang perlu diperhatikan. *Co-firing* biomassa memiliki potensi besar untuk penghematan energi namun penerapannya masih menghadapi berbagai tantangan, terutama dalam menjaga efisiensi pembakaran dalam *boiler*. Perbedaan karakteristik fisik dan kimia antara biomassa dan batu bara, seperti kadar air yang lebih tinggi serta nilai kalor yang lebih rendah pada biomassa dapat memengaruhi kinerja termal *boiler*. Jika pencampuran tidak dikelola dengan baik, hal ini dapat

menyebabkan penurunan efisiensi pembakaran, peningkatan residu abu, serta gangguan pada operasional (Dwiaji, 2023). Seperti pada penelitian Lubis dan Tambunan (2025) pada PLTU Pangkalan Susu menunjukkan bahwa *co-firing* dengan serbuk gergaji (*sawdust*) meningkatkan *net plant heat rate* (NPHR) dari 3.563 menjadi 3.701 kkal/kWh, serta menaikkan konsumsi bahan bakar dari 120 ton/jam menjadi 124 ton/jam, yang mengindikasikan adanya pengaruh terhadap efisiensi keseluruhan *boiler* (Lubis dan Tambunan, 2025).

Penelitian ini berfokus analisis pengaruh penggunaan *woodchip* dalam pembakaran *co-firing* terhadap efisiensi *boiler* PLTU. Melalui evaluasi parameter efisiensi termal, konsumsi bahan bakar, dan penggunaan energi. Melihat potensi besar biomassa dan meningkatnya kebutuhan energi, khususnya di Indonesia, *co-firing* muncul sebagai salah satu potensi untuk mendukung mengurangi ketergantungan pada batu bara, tetap juga memberikan dampak positif terhadap kinerja peralatan pada PLTU. Saat ini batu bara masih menjadi sumber utama dalam menghasilkan *steam superheated* yang digunakan untuk menggerakkan turbin, yang kemudian mengubah energi panas menjadi energi mekanik, dan selanjutnya menjadi energi listrik. Oleh karena itu, penelitian mengenai pengaruh penerapan *co-firing woodchip* dengan batu bara terhadap efisiensi *boiler* menjadi penting untuk dikembangkan.

1.2. Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah yang diperoleh adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh rasio *co-firing* batu bara dengan *woodchip* terhadap efisiensi kinerja *boiler* pada PLTU PT. XYZ?
2. Bagaimana pengaruh rasio *co-firing* terhadap perubahan nilai *specific fuel consumption* (SFC) selama penerapan *co-firing* batu bara dengan *woodchip* sebagai indikator pengurangan penggunaan batu bara di PLTU?
3. Bagaimana pengaruh rasio *co-firing* terhadap nilai laju kalor (*heat rate*) sebagai indikator efisiensi termal *boiler*?

1.3. Tujuan penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan analisis pengaruh rasio *co-firing* terhadap efisiensi kinerja *boiler*.
2. Melakukan analisis pengaruh rasio *co-firing* terhadap nilai *specific fuel consumption* (SFC) pada *boiler*.
3. Menganalisis pengaruh rasio *co-firing* terhadap perubahan laju kalor (*heat rate*) pada *boiler*.

1.4. Batasan masalah

Adapun batasan-batasan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini jenis biomassa yang digunakan dibatasi hanya pada *woodchip* (serpihan kayu) mentah yang belum mendapat perlakuan termal sebagai bahan *co-firing* yang dicampur dengan batu bara.
2. Rasio *co-firing* yang diteliti dibatasi pada beberapa variasi rasio campuran *woodchip* dan batu bara, yaitu 100% batu bara (*baseline*), 95% batu bara : 5% *woodchip*, dan 90% batu bara : 10% *woodchip*.
3. Penelitian ini dibatasi pada penggunaan nilai kalor hasil pengujian campuran batu bara dan *woodchip* pada masing-masing rasio *co-firing* dalam kondisi *As Received Basis* (ARB).
4. Perhitungan efisiensi *boiler* yang digunakan dalam penelitian ini adalah menggunakan metode langsung (*direct method*) berdasarkan parameter operasional seperti, suhu uap keluar, tekanan kerja *boiler*, jumlah bahan bakar yang digunakan, serta nilai kalor bahan bakar.
5. Lokasi penelitian dibatasi pada sistem *boiler* dengan spesifikasi kapasitas kerja 45 ton/jam uap yang dihasilkan, bertipe *circulating fluidized bed* di PLTU PT. XYZ.
6. Penelitian ini tidak membahas dampak lingkungan (seperti emisi CO₂).

7. Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari pengamatan langsung, pengukuran lapangan, dan/atau data historis operasional *boiler* di perusahaan selama periode tertentu.

1.5. Manfaat penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan gambaran nyata bagi perusahaan tentang seberapa besar pengaruh *co-firing woodchip* terhadap efisiensi *boiler*, sehingga bisa dijadikan dasar untuk pengambilan keputusan operasional di sistem pembangkit.
2. Mendukung upaya perusahaan dalam menjalankan program energi berkelanjutan dengan mengurangi ketergantungan pada batu bara dan mulai beralih ke sumber energi yang lebih ramah lingkungan.
3. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang teknik konversi energi. Melalui penelitian ini dapat memperluas wawasan akademik terkait pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan dalam sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU).

1.6. Sistematika penulisan

Adapun sistematika dari penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang penelitian yang jelas, tujuan penelitian yang ingin dicapai, terdapat batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini agar hasil penelitian lebih terarah, pada manfaat penelitian ini juga berguna sebagai bahan pertimbangan teknologi *co-firing* ke depannya, serta gambaran singkat tentang alur penulisan laporan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan dasar-dasar teori yang mendukung penelitian, mulai dari prinsip kerja PLTU, karakteristik batu bara dan biomassa, hingga konsep teknologi *co-firing* dan efisiensi termal *boiler*, selain itu terdapat ringkasan dari beberapa studi sebelumnya yang relevan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan lokasi/tempat dan waktu penelitian yang dilakukan serta alur tahapan pelaksanaan penelitian ini.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil penelitian berupa pengaruh pencampuran *woodchip* terhadap efisiensi *boiler*, analisis rasio campuran bahan bakar, serta pembahasan mengenai penurunan emisi CO₂ setelah penggunaan teknologi *co-firing*.

V. KESIMPULAN

Bab ini berisikan tentang kesimpulan dan saran yang dapat diambil atau diberikan atas hasil dari penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

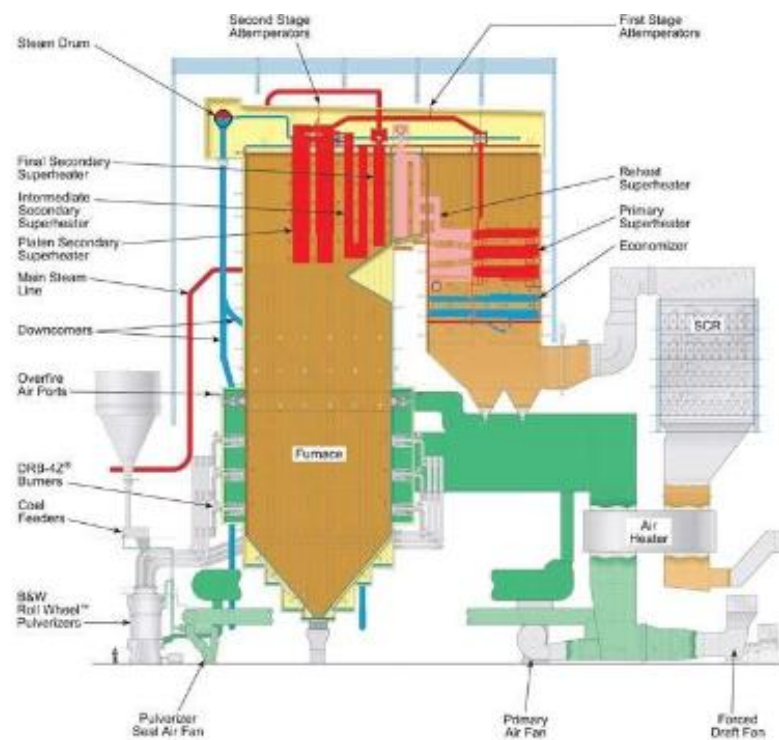
2.1. Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU)

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan pembangkit listrik yang menggunakan energi uap untuk menggerakkan turbin generator yang menghasilkan energi listrik. Uap merupakan sumber energi sekunder pada sistem PLTU, sedangkan bahan bakar yang digunakan untuk memproduksi uap tersebut merupakan sumber energi primer. Bahan bakar yang digunakan dapat berupa batu bara (padat), minyak (cair), biogas (gas). Bentuk utama pembangkit listrik jenis ini adalah generator yang dihubungkan ke turbin di mana untuk memutar turbin diperlukan energi kinetik dari uap panas atau kering (Lewerissa, 2018).

Konversi energi tingkat pertama yang berlangsung dalam PLTU adalah konversi energi primer menjadi energi panas (kalor). Hal ini dilakukan dalam ruang bakar dari ketel uap PLTU. Energi panas ini kemudian dipindahkan ke dalam air yang ada dalam pipa ketel untuk menghasilkan uap yang dikumpulkan dalam drum dari ketel, uap yang dihasilkan akan dialirkan ke turbin uap yang akan mengubah energi kalor menjadi energi mekanik penggerak generator, dan akhirnya energi mekanik dari turbin uap ini dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator. Susunan komponen utama dalam *boiler* pembangkit listrik tenaga uap batu bara ditunjukkan pada Gambar 2.1 (Samsudin dkk., 2022)

Secara umum energi pembangkit listrik tenaga uap yang dikonsumsi ada 2 (dua) kategori, yaitu energi primer dan energi final. Energi primer adalah energi

yang diberikan oleh alam dan belum mengalami proses pengolahan atau konversi lebih lanjut, sedangkan energi final adalah energi yang dapat digunakan oleh pengguna akhir sebagai akibat pengolahan atau konversi energi. Contoh energi primer yang langsung berasal dari alam adalah *fuel gas*, minyak mentah, batu bara, *gheothermal*, angin, matahari, dan lain-lain, sedangkan contoh energi final adalah BBM, *steam* dan listrik. Energi uap yang dihasilkan sebagai konversi dari energi primer (pembakaran batu bara/ *fuel gas*/ *fuel oil* di *boiler*) dan listrik sebagai konversi dari energi primer (*steam* turbin/ gas turbin/ *gas engine*/ *diesel engine*, *PV cell*, dan lain-lain).



Gambar 2.1 Sistem *boiler* pada pembangkit listrik tenaga uap.

Sumber: (Tarsudin dkk., 2019)

Siklus *rankie* adalah salah satu ilmu termodinamika yang dipakai pada PLTU. Siklus *rankie* nyata yang digunakan dalam pembangkitan daya lebih rumit dari pada yang asli. Adapun siklus *rankie* yang nyata digunakan pada saat ini sudah mengandung beberapa modifikasi dan tambahan yang sifatnya menaikkan efisiensi. Siklus *rankie* merupakan siklus daya uap yang dihasilkan untuk

menghitung atau memodelkan proses kerja mesin uap atau turbin uap. Siklus ini bekerja menggunakan fluida air dan mengalami siklus tertutup, dengan kata lain secara konstan air pada akhir proses siklus masuk kembali ke proses awal siklus.

2.1.1. Komponen utama pembangkit listrik tenaga uap

Bagian utama yang terdapat pada suatu pembangkit listrik tenaga uap seperti yang terlihat pada Gambar 2.2, yaitu (Hamzah, 2019):

a. *Boiler*

Peralatan *boiler* berfungsi untuk mengubah air yang masuk (*feed water*) menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*) yang kemudian akan digunakan untuk menggerakkan turbin. Alat ini menghasilkan energi panas dari hasil pembakaran yang terjadi pada ruang bakar (*furnace*). Energi panas yang dihasilkan dari pembakaran di teruskan melalui pipa-pipa *boiler* yang di dalamnya terdapat air yang akan diubah fasenya menjadi uap panas lanjut yang akan digunakan untuk menggerakkan poros turbin.

b. Turbin uap

Fungsi utama turbin uap adalah untuk mengubah energi panas yang terdapat dalam uap menjadi energi putar (energi mekanik). Poros dari turbin disambungkan dengan poros generator sehingga saat turbin berputar, generator juga ikut berputar. Prinsip kerja dari turbin uap didasarkan pada siklus termodinamika *rankine*, di mana uap bertekanan tinggi yang dihasilkan dari *boiler* di arahkan ke dalam turbin, ketika uap memasuki turbin tekanan tinggi dari uap tersebut berubah menjadi energi kinetik. Energi kinetik yang dihasilkan uap menyebabkan sudu-sudu turbin berputar dan diteruskan ke generator melalui poros turbin.

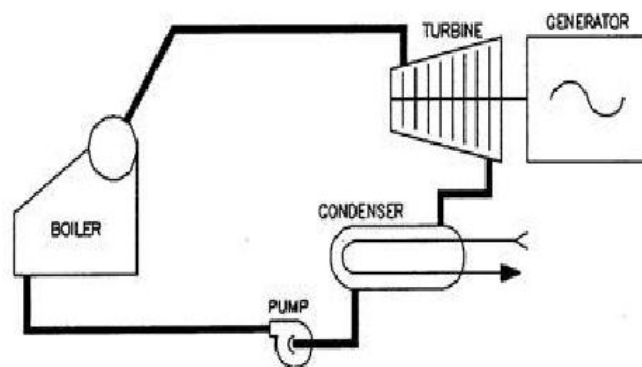
c. Kondensor

Peran kondensor adalah untuk mengubah kembali uap sisa dari turbin (uap yang telah dipakai untuk menggerakkan turbin) menjadi

fase cair. Pada kondensor uap panas yang berasal dari turbin didinginkan menggunakan prinsip perpindahan panas melalui air sebagai media pendingin yang mengalir dalam permukaan pipa. Uap yang bersentuhan dengan permukaan pipa tersebut energi panasnya dilepaskan, menyebabkan uap mengembun dan berubah menjadi air yang akan dipompakan kembali ke dalam *boiler*.

d. Generator

Generator berfungsi untuk mengonversi energi putar yang dihasilkan oleh turbin menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Generator terdiri dari rotor (bagian yang berputar) dan stator (bagian diam) yang bekerja bersama untuk menghasilkan arus listrik.



Gambar 2.2 Siklus komponen utama pembangkit listrik tenaga uap.

Sumber: (Rosyid dan Firmansyah, 2019)

2.2. Boiler

Boiler atau ketel uap komponen penting dalam pembangkit listrik tenaga uap yang berfungsi mengubah air menjadi uap. Proses ini berlangsung dengan memanaskan air yang dialirkan melalui pipa-pipa menggunakan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran tersebut dilakukan secara terus-menerus di dalam ruang bakar, dengan memasukkan campuran bahan bakar dan udara dari luar ke dalam sistem. *Boiler* juga berfungsi sebagai tempat untuk mengubah bahan bakar menjadi energi termal. Komponen-komponennya

menghasilkan panas yang mengubah air menjadi uap di dalam *boiler*. Gas buang hasil pembakaran dialirkan melalui *cyclone*, *air heater*, *economizer*, dan ESP sebelum dilepaskan ke atmosfer melalui cerobong, sementara abu ditampung sebagai *fly ash* dan *bottom ash*.

Air umpan dari *daerator* dipompa melalui LPH dan HPH menuju *boiler* untuk meningkatkan efisiensi pemanasan. Uap bertekanan tinggi yang dihasilkan digunakan untuk memutar turbin yang menggerakkan generator penghasil listrik, dengan sebagai uap diekstraksi untuk kebutuhan proses industri pemasakan nanas. Uap sisa dikondensasikan di *condenser* dan dikembalikan ke *daerator* melalui *condensate pump*, membentuk siklus tertutup. Sistem pendingin menggunakan air dari *water pond* yang diolah di *water treatment station* hingga menjadi *demineralized water*, sedangkan listrik yang dihasilkan generator disalurkan melalui trafo dan *switch gear* ke pabrik serta kebutuhan internal pembangkit.

2.2.1. Jenis-jenis *boiler*

Boiler merupakan komponen utama dalam PLTU yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap bertekanan tinggi melalui proses pembakaran bahan bakar. Berdasarkan desain dan prinsip kerjanya, *boiler* dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis sebagai berikut:

a) *Fire tube boiler* (*boiler* pipa api)

Pada *fire tube boiler*, gas panas hasil pembakaran mengalir melalui pipa-pipa yang dikelilingi oleh air di dalam *shell*. *Boiler* jenis ini umumnya digunakan untuk kapasitas uap yang relatif kecil dengan tekanan rendah hingga sedang 12.000 kg/jam dan tekanan hingga 18 kg/cm².

b) *Boiler water tube* (*boiler* pipa air)

Api dan gas panas hasil pembakaran melintas diluar *tube*, sedangkan air/uap mengalir di dalam *tube*. Cocok dipakai untuk pembangkit uap berkapasitas besar dan bertekanan tinggi.

c) *Stoker boiler*

Stoker boiler menggunakan sistem pembakaran mekanik di mana bahan bakar padat, seperti batu bara, dibakar di atas *grate* atau rantai berjalan. Udara panas ditiupkan dari bawah untuk mendukung proses pembakaran. *Boiler* jenis ini mampu membakar berbagai jenis bahan bakar padat, namun efisiensi termalnya cenderung lebih rendah dibandingkan dengan *boiler* modern lainnya.

d) *Pulverized coal boiler*

Pulverized coal boiler merupakan jenis *boiler* yang paling umum digunakan di PLTU modern. Dalam sistem ini, batu bara digiling menjadi serbuk halus sebelum dibakar di ruang bakar.

e) *Fluidized bed combustion (FBC) boiler*

FBC *boiler* menggunakan prinsip pembakaran di mana bahan bakar padat dibakar dalam lapisan partikel (*bed*) yang mengalami fluidisasi oleh aliran udara dari bawah. Terdapat dua jenis utama FBC *boiler*: *atmospheric fluidized bed (AFBC)* dan *circulating fluidized bed combustion (CFBC)*. *Boiler* jenis ini memiliki keunggulan dalam hal efisiensi pembakaran, fleksibilitas bahan bakar, dan pengendalian emisi yang lebih baik.

2.2.2. Prinsip kerja *boiler*

Boiler menggunakan fluida kerja berupa *steam* yang bersirkulasi dalam sistem tertutup. Konsep siklus tertutup ini mengacu pada pemanfaatan fluida yang sama secara berulang. proses dimulai dari pemanasan awal menggunakan *economizer* yang memanfaatkan panas gas buang untuk meningkatkan efisiensi. Air kemudian dialirkan ke *evaporator* untuk diuapkan menjadi uap jenuh, lalu ke *superheater* untuk diubah menjadi uap panas lanjut yang siap menggerakkan turbin. Udara pembakaran juga dipanaskan di *air heater* untuk mendukung efisiensi pembakaran. Sistem ini dilengkapi *safety valve* untuk menjaga tekanan pada batas aman.

Uap sisa yang dihasilkan dari turbin akan dialirkan ke dalam kondensor untuk didinginkan dengan menggunakan air pendinginan, sehingga uap

tersebut dapat berubah kembali menjadi air. Air kondensat yang diperoleh dari proses kondensasi uap selanjutnya dimanfaatkan kembali sebagai air pengisi *boiler*. Putaran turbin digunakan untuk memutar generator yang terhubung langsung dengan turbin, sehingga ketika turbin berputar, energi listrik dihasilkan dari terminal *output* generator.

2.3. Batu bara

Batu bara merupakan endapan sedimen yang terdiri dari komponen organik dan anorganik, di mana komponen organik disebut *maceral* dan komponen anorganik disebut mineral. Karakteristik komposisi *maceral* dan mineral pada batuan memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas batu bara, terutama terkait dengan parameter abu, sulfur, dan nilai kalori. Secara fisik dan kimia, batu bara adalah zat yang bersifat heterogen, mudah terbakar, dan terdiri dari endapan sedimen yang mengandung bahan organik serta anorganik. Kandungan organik dalam batu bara meliputi karbon, hidrogen, dan oksigen, dengan sedikit kandungan sulfur dan nitrogen. Sementara itu, kandungan anorganik pada batu bara terdiri dari beragam zat pembentuk abu yang tersebar dalam *seam* batu bara, dengan kadar yang bervariasi (Sukandarrumidi, 2014).

Batu bara secara geokimia terbentuk melalui proses pembatu baraan yang dipicu oleh peningkatan temperatur, tekanan, dan faktor waktu, yang menyebabkan persentase karbon dalam bahan induk pembentuk batu bara cenderung meningkat. Sebaliknya, kandungan hidrogen dan oksigen dalam batu bara mengalami penurunan. Proses pembatu baraan ini menghasilkan batu bara dengan berbagai peringkat yang mencerminkan tingkat kematangan organiknya (Saskiyah dkk., 2024).

Gambar 2.4 menunjukkan batu bara yang merupakan bahan bakar fosil yang paling umum digunakan dalam PLTU karena ketersediaannya yang melimpah dan biaya operasionalnya yang relatif rendah. Di Indonesia, batu bara menjadi sumber energi utama untuk pembangkit listrik, menyumbang sekitar 57,22% dari total kapasitas terpasang sebesar 60 GW. Hal ini disebabkan oleh cadangan

batu bara yang besar dan harga lebih murah dibandingkan bahan bakar minyak (Pambudi dkk., 2023).



Gambar 2.4 Batu bara sebagai bahan bakar umum pada PLTU.

Sumber: (Alfaridzi, 2024)

Dalam proses pembangkitan listrik, batu bara dibakar di dalam *boiler* untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang digunakan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik. Efisiensi pembakaran sangat dipengaruhi oleh kualitas batu bara, seperti nilai kalor, kadar air, dan kandungan abu. Analisis *proximate* dan *ultimate* sering digunakan untuk menentukan karakteristik batu bara sebelum digunakan di PLTU (Muhamad & Adnantio, 2023).

2.3.1. Peringkat batu bara

Sistem klasifikasi ASTM (ASTM D388) mengelompokkan batu bara ke dalam empat kategori, yang kemudian dibagi lagi menjadi beberapa grup seperti yang tertera dalam Tabel 2.1 batu bara yang memiliki peringkat tinggi dikategorikan berdasarkan total nilai karbon dan tujuh unsur zat terbang, sedangkan batu bara dengan tingkat rendah diklasifikasikan berdasarkan nilai kalorinya.

Tabel 2.1 Klasifikasi batu bara berdasarkan ASTM.

Kelas/grup	<i>Fixed carbon</i> (%)	Zat terbang (%)	Nilai panas (Btu/lb)
<i>Antrasitik</i>			
<i>Metaantrasit</i>	>98	<2	
<i>Antrasit</i>	92-98	2-8	
<i>Semiantrasit</i>	86-92	8-14	
<i>Bituminous</i>			
<i>Medium volatile</i>	78-86	14-22	
<i>High volatile A</i>	69-78	22-31	>14.000
<i>High volatile B</i>	<69	>31	7.228-14.000
<i>High volatile C</i>			6.394-7.228
<i>Sub bituminous</i>			
<i>Sub bituminous A</i>			5.838-6.394
<i>Sub bituminous B</i>			5.282-5.838
<i>Sub bituminous C</i>			4.614-5.282
<i>Lignitik</i>			
<i>Lignit A</i>			3.502-4.614
<i>Lignit B</i>			<3.502

2.3.2. Analisis *proximate*

Peringkat batu bara adalah posisi batu bara pada peningkatan kandungan karbon dari lignit hingga antrasit. Peringkat ini biasanya berbanding lurus dengan kualitas batu bara. Karakteristik kimia batu bara dapat ditentukan dengan analisis *proximate*, yang terdiri dari beberapa parameter, seperti kelembaban (*moisture*), zat terbang (*volatile matter*), karbon tertambat (*fixed carbon*), dan kadar abu (*ash content*) (Ogara dkk., 2023)

a. *Total moisture*

Total moisture merupakan total jumlah air yang terkandung pada batu bara dalam bentuk *inherent* dan *adherent* pada kondisi saat batu bara diambil contohnya (*as sampeled*) atau kondisi saat batu bara diterima (*as received*).

b. *Volatile matter*

Nilai *volatile matter* (VM) adalah ukuran yang menunjukkan persentase jumlah zat terbang yang terkandung dalam batu bara.

c. *Ash content*

Kadar abu, juga dikenal sebagai *ash content*, adalah abu yang tersisa setelah pembakaran batu bara. Abu ini berasal dari zat anorganik di dalam batu bara atau dari mineral batuan di sekitarnya.

d. *Fixed carbon*

Fixed carbon didefinisikan sebagai jumlah karbon yang terdapat dalam material sisa setelah zat padat dihilangkan dari batu bara.

e. *Calorific value*

Calorific value, juga dikenal sebagai nilai kalori merupakan energi yang dihasilkan dari pembakaran batu bara sebagai hasil dari reaksi *eksoterm* antara senyawa hidrokarbon dan oksigen. *Gross calorific value* (GCV) merupakan nilai kalori yang dihasilkan dari pembakaran batu bara dengan kandungan air dihitung dalam keadaan cair. *Nett calorific value* (NCV) merupakan nilai kalori bersih dari pembakaran batu bara, di mana kalori yang dihasilkan adalah nilai kalori yang aktual.

2.4. Biomassa

Biomassa terbentuk dari spesies hidup seperti hewan dan tanaman, yaitu semua makhluk yang ada saat ini atau yang ada di masa lalu. Biomassa ini terbentuk segera setelah organisme lahir atau benih bertunas. Tidak seperti bahan bakar fosil, biomassa tidak berkembang selama jutaan tahun. Untuk tumbuh, tanaman menggunakan sinar matahari melalui proses fotosintesis untuk memetabolisme karbon dioksida dan air di atmosfer. Biomassa dianggap dapat diperbarui

karena kemampuannya untuk bereproduksi, yang membedakannya dari bahan bakar fosil. Sebagai sumber energi atau bahan kimia, ini adalah salah satu daya tarik utamanya (Basu, 2013).

Salah satu bentuk biomassa yang umum digunakan adalah kayu, yang bisa diproses lebih lanjut menjadi *woodchip* sebagai bahan bakar padat. Untuk mengetahui sifat dasar kayu sebagai sumber energi, dilakukan analisis *proximate* yang mencakup kadar air (*moisture*), zat yang mudah menguap (*volatile matter*), karbon tetap (*fixed carbon*), kandungan abu (*ash content*), serta nilai kalori (*gross caloric value*). Analisis ini sangat diperlukan untuk mengevaluasi potensi energi serta karakteristik termal kayu dalam proses konversi energi seperti pembangkit listrik.

Tabel 2.2 Hasil analisa *proximate* beberapa jenis kayu di Indonesia

No	Nama Kayu	Analisa Proximate				
		<i>Moisture</i> (%)	<i>Volatile Mater</i> (%)	<i>Fixed Carbon</i> (%)	<i>Ash Content</i> (%)	<i>Gross Caloric Value</i> (kkal/kg)
1	Sengon	7,2	74,9	16,46	1,44	4357,7
2	Karet	9,61	72,03	15,85	2,5	4126,54
3	Jati	8,76	67,17	19,9	4,15	4371,11
4	Mahoni	13,8	65,8	48,7	2,24	4244
5	Kaliandra	5,13	83,13	10,83	0,91	4387
6	Gamal	5,62	82,96	10,31	1,11	4351
7	Meranti	11,44	78,61	22,7	1,2	4657,49

Indonesia yang merupakan negara agraris memiliki cukup banyak jenis pohon yang tersebar di seluruh daerah, seperti pada Tabel 2.2 menunjukkan beberapa jenis kayu yang memiliki karakteristik yang berbeda-beda dari beberapa sumber ilmiah. Kayu sengon memiliki kadar air sebesar 7,2% dengan nilai kalor 4357 kkal/kg (Hairul Bahri dkk., 2020). Kayu karet memiliki nilai kadar air sebesar 9,6% dengan nilai kalor sebesar 4126 kkal/kg (Laosena dkk., 2022). Selanjutnya untuk kayu jati memiliki kadar abu yang cukup tinggi sebesar 4,15% dengan kadar air yang cukup tinggi sebesar 8,76% (Rohman dkk.,

2024). Untuk kayu mahoni memiliki kadar air yang paling tinggi sebesar 13,8% (Hendriyana dkk., 2018). Untuk kayu kaliandra dan kayu gamal memiliki karakteristik yang hampir sama, seperti nilai kalor 4387 kkal/kg dan 4351 kkal/kg dan memiliki nilai kadar abu yang paling rendah. Kayu meranti memiliki kadar air yang cukup tinggi, namun memiliki nilai kadar abu yang cukup rendah sebesar 1,2% serta memiliki nilai kalor yang paling besar yaitu sebesar 4567 kkal/kg (Haryanto dkk., 2021).

Woodchip merupakan salah satu sumber energi yang sedang populer dan menarik. *Woodchip* umumnya diproduksi dari limbah kayu dari industri hutan, penebangan pohon, atau sisa-sisa kayu dari pabrik pengolahan kayu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Selain itu kayu yang dimanfaatkan untuk *woodchip* dapat diperoleh dari ranting-ranting pohon yang tidak digunakan atau berserakan penemuan bahan bakar ini memungkinkan penggunaan ranting-ranting yang sebelumnya tidak berguna menjadi lebih bermanfaat (Raharjo dkk., 2024).



Gambar 2.5 Bahan bakar biomassa berupa *woodchip* hasil dari cacahan kayu.

Sumber: (Trojanowski dkk., 2024)

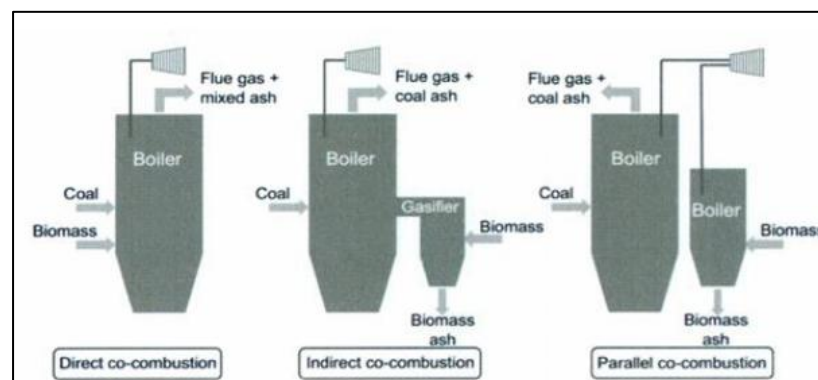
Salah satu keunggulan utama *woodchip* adalah merupakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan. Dibuat dari limbah kayu yang dapat didaur ulang, mengurangi kebutuhan akan bahan bakar fosil yang merusak lingkungan. Dengan penggunaan *woodchip*, ketergantungan pada sumber energi non-terbarukan seperti batu bara dan minyak bumi dapat berkurang.

Woodchip berguna dalam banyak hal, seperti pembangkit listrik dan pemanas ruangan, dengan efisiensi yang tinggi.

2.5. *Co-firing*

Dalam pembangkit listrik, *co-firing* merupakan teknologi pembakaran dua jenis bahan bakar secara bersamaan dalam satu sistem pembakaran. Dalam *co-firing*, biomassa digunakan sebagai bahan bakar tambahan yang secara teknis dapat digunakan tanpa mengubah infrastruktur yang sangat banyak. Dalam upaya menuju sistem energi yang berkelanjutan, teknologi *co-firing* dianggap sebagai pendekatan yang efisien dari segi biaya. *Co-firing* di pembangkitan listrik tenaga uap (PLTU) batu bara memiliki banyak keuntungan, salah satunya adalah potensi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan kontribusinya terhadap penurunan biaya pokok penyediaan (BPP) listrik (Purwadi dkk., 2023)

Salah satu manfaat operasi pembakaran sistem *co-firing* adalah pengurangan emisi gas CO₂, SO_x, dan NO_x dari bahan bakar fosil. Oleh karena itu, sistem *co-firing* sangat cocok untuk digunakan dalam pembangkit listrik tenaga uap yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar. Ada beberapa metode *co-firing* yang dapat diterapkan pada proses pembakaran batu bara dengan biomassa yaitu, *direct co-firing*, *indirect co-firing*, dan *parallel co-firing*. Ketiga metode *co-firing* tersebut seperti yang terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Metode *co-firing* biomassa dengan batu bara.

Sumber: (Ilham & Suedy, 2022)

Metode *direct co-firing* merupakan metode pencampuran bahan bakar sekunder (biomassa) bersama dengan bahan bakar primer (batu bara) yang langsung diumpankan ke dalam ruang bakar *boiler*. *Direct co-firing* adalah metode yang paling murah, paling sederhana, dan paling banyak digunakan. Pembakaran biomassa dan batu bara dibakar dalam tungku *boiler* batu bara dengan menggunakan tungku pembakaran yang sama atau terpisah, tergantung pada karakteristik biomassa yang digunakan (Al-Mansour dan Zuwala, 2010).

Indirect co-firing menggunakan dua sistem pembakaran terpisah di mana gas hasil pembakaran biomassa diarahkan ke *boiler* utama. Metode *indirect co-firing*, gas yang dihasilkan kemudian dimasukkan ke dalam pembakaran dan dibakar bersama batu bara. Proses ini menghasilkan rasio *co-firing* yang sangat tinggi. Salah satu kekurangan *indirect co-firing* adalah biaya investasi yang tinggi.

Metode *parallel co-firing* memungkinkan biomassa dan batu bara dibakar di unit pembakaran yang berbeda dan uapnya digabungkan untuk menggerakkan turbin. *Parallel co-firing* menggunakan *boiler* dan pembakar biomassa yang terpisah. Uap yang dihasilkan dari pembakaran biomassa kemudian digunakan pada sirkuit turbin pembakaran batu bara. Metode ini memungkinkan penggunaan bahan bakar dengan kandungan alkali dan klorin tinggi karena abu dari pembakaran batu bara dan hasil pembakaran biomassa dihasilkan terpisah. Meskipun metode ini membutuhkan investasi yang cukup besar, namun memungkinkan penggunaan biomassa dalam skala yang lebih besar (Ilham dan Suedy, 2022).

2.6. Efisiensi *boiler*

Efisiensi merupakan tingkat kemampuan kerja dari suatu alat. Sedangkan efisiensi *boiler* merupakan prestasi kerja atau tingkat unjuk kerja *boiler* atau ketel uap yang diperoleh dari perbandingan antara energi yang dipindahkan atau diserap oleh fluida kerja *boiler* dan energi kimia dari bahan bakar (Maulana dkk., 2020). Terdapat dua metode dalam pengkajian efisiensi *boiler*

yaitu, metode langsung (*direct method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*) (Maridjo dkk., 2011).

2.6.1. Metode langsung (*direct method*)

Metode langsung (*direct method*) adalah menghitung efisiensi *boiler* dengan membandingkan energi yang terkandung dalam bahan bakar dengan fluida kerja (air dan uap). Ini juga dikenal sebagai metode *input-output* karena hanya memerlukan keluaran (*steam*) dan panas masuk (bahan bakar) untuk mengevaluasi efisiensi. Efisiensi *boiler* ini dapat dievaluasi menggunakan rumus:

$$\text{efisiensi termal boiler } (\eta) = \frac{Q \times (h_g - h_f)}{q \times \text{NCV}} \times 100\% \dots \dots \dots 2.1$$

Di mana,

η = efisiensi termal *boiler* (%)

Q = jumlah uap yang dihasilkan per jam (kg/jam)

q = jumlah bahan bakar yang digunakan per jam (kg/jam)

NCV = nilai kalor bahan bakar (kkal/kg)

h_g = entalpi uap jenuh (kJ/kg)

h_f = entalpi air umpan (kJ/kg)

2.7. Konsumsi spesifik bahan bakar

Specific Fuel Consumption (SFC) merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja *boiler* berdasarkan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan uap. Nilai SFC yang rendah mengindikasikan efisiensi pemanfaatan bahan bakar yang tinggi, sedangkan nilai yang tinggi menunjukkan potensi pemborosan energi atau bahan bakar. Konsumsi spesifik bahan bakar dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut (Alber dan Kiono, 2022).

$$SFC = \frac{q_f}{Q} \dots\dots\dots 2.2$$

Di mana,

SFC = konsumsi spesifik bahan bakar (kg/kg_{steam})

q_f = Jumlah bahan bakar yang dipakai (kg/jam)

Q = Jumlah uap yang dihasilkan per jam (kg/jam)

2.8. Heat rate

Heat rate pada *boiler* adalah jumlah energi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi uap per 1 kJ. *Heat rate* adalah kebalikan dari efisiensi, *heat rate* yang lebih rendah berarti suatu unit *boiler* yang menghasilkan energi uap yang efisien. Pengujian *heat rate* dilakukan untuk mengetahui berapa besar *input* energi panas dari bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi uap sebesar 1 kJ. untuk menghitung *heat rate*, digunakan standar *The American Society of Mechanical Engineers, Performance Test Codes* (ASME PTC 6) on *Steam Turbine* yaitu sebagai berikut (Aziz dan Hasan, 2016).

$$heat\ rate\ boiler\ (HR) = \frac{q \times NCV}{Q \times (h_g - h_f)} \dots\dots\dots 2.3$$

Di mana,

HR = nilai *heat rate boiler* (kJ/kJ)

Q = jumlah uap yang dihasilkan per jam (kg/jam)

q = jumlah bahan bakar yang digunakan per jam (kg/jam)

NCV = nilai kalor kotor bahan bakar (kkal/kg)

h_g = entalpi uap jenuh (kJ/kg)

h_f = entalpi air umpan (kJ/kg)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PLTU PT. XYZ berlokasi di Kecamatan Terbanggi Besar, Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung.

3.2. Alat dan bahan penelitian

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

3.2.1. Boiler

Boiler yang digunakan di PT. XYZ memiliki tipe *circulating fluidized bed* yang berfungsi menghasilkan uap bertekanan tinggi. Adapun spesifikasi *boiler* tersebut disajikan dalam Tabel 3.2, dan *boiler* dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 *Boiler* yang digunakan di PT. XYZ.

Tabel 3.1 Spesifikasi *boiler* di PT. XYZ.

Spesifikasi <i>boiler</i>	
<i>Manufacture</i>	Jinan Boiler Group Co., Ltd.
Model	YG-45/3.82-M
Kapasitas penguapan	45 ton/jam
Tekanan kerja <i>steam drum</i>	4.2 MPa
Kapasitas tekanan uap	3.82 MPa
Kapasitas temperatur uap	450 °C
Temperatur air umpan	150 °C
Konsumsi bahan bakar	7524 kg/h
Nilai kalor rencana batu bara (LHV)	4400 kkal/kg

3.2.2. Komputer *central cotrol room*

Central control room (CCR) atau sistem operasi terpusat merupakan ruangan kontrol untuk memantau, mengendalikan, serta mengordinasikan seluruh aktivitas pembangkitan secara berkelanjutan selama 24 jam. Pada pengoperasiannya dilakukan secara otomatis oleh sistem komputer maupun secara manual yang keduanya sama-sama dikendalikan oleh seorang operator yang berjaga selama 24 jam dengan berganti-gantian (*shifting*). Dalam CCR semua aktivitas dikontrol dan di rekam melalui *distributed control system* (DCS). Komputer pada *central control room* (CCR) dapat di lihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Unit komputer pada CCR dan *equipment* DCS di PLTU PT. XYZ.

3.2.3. Batu bara

Batu bara digunakan sebagai bahan bakar utama dalam proses pembangkitan di PLTU PT. XYZ. Jenis batu bara yang digunakan yaitu *bituminous great C*, yang nilai kalorinya berkisar 4000-4400 kkal/kg. Batu bara yang digunakan sebagai bahan bakar ini dapat di lihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Bahan bakar batu bara sebagai bahan bakar utama.

3.2.4. Biomassa *woodchip*

Biomassa *woodchip* digunakan sebagai bahan bakar tambahan pada proyek *co-firing* ini. *Woodchip* yang digunakan berukuran 3x3 cm, tanpa perlakuan termal, menggunakan campuran beberapa jenis kayu seperti kayu karet, mahoni, dan sengon. *Woodchip* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Bahan bakar biomassa *woodchip* yang digunakan dalam *co-firing*.

3.3. Teknik pengumpulan data

Adapun teknik pengumpulan data yang dilakukan dalam penelitian ini terbagi menjadi beberapa tahapan yaitu:

3.3.1. Studi literatur

Melakukan studi literatur dengan mengumpulkan informasi pada buku dan jurnal serta penelitian yang terdahulu terkait teori dan data-data dalam *co-firing* biomassa serta efisiensi *boiler* pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU).

3.3.2. Metode observasi

Melakukan pengamatan dan pengambilan data secara langsung ke lapangan.

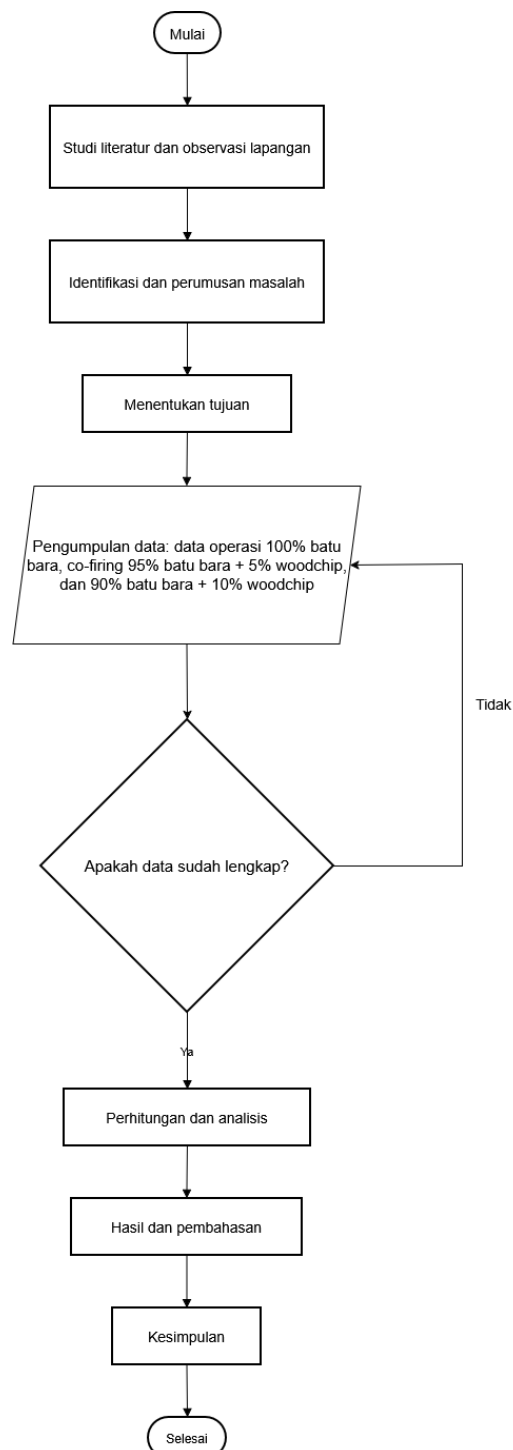
3.4. Analisis data

Metode yang digunakan untuk menganalisis data mencakup perhitungan matematis untuk mengevaluasi kinerja *boiler*. Data yang telah dikumpulkan kemudian dimasukkan ke dalam tabel hasil pengujian dan di analisa dan disajikan dalam bentuk grafik perbandingan energi terhadap rasio *co-firing*. Data *boiler* yang diperoleh dari *central control room* PLTU PT. XYZ kemudian di analisis melalui perhitungan-perhitungan dari beberapa teori yang

digunakan, untuk menghitung nilai efisiensi *boiler* menggunakan Persamaan 2.1. Analisis selanjutnya yaitu menghitung nilai *specific fuel consumption* (SFC) menggunakan Persamaan 2.2, analisis selanjutnya menghitung nilai *heat rate* menggunakan Persamaan 2.3.

3.5. Prosedur penelitian

Adapun prosedur penelitian disajikan dalam bentuk diagram alir berikut:



BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Rasio *co-firing* terbukti berpengaruh signifikan terhadap konsumsi energi dan efisiensi kinerja *boiler* pada kedua unit. Efisiensi meningkat pada rasio 95% BB : 5% WC (74 dan 75%) dibandingkan 100% batu bara (73% dan 64%), namun menurun pada rasio 90% BB : 10% WC (68% dan 70%).
2. Peningkatan rasio *woodchip* menyebabkan kenaikan nilai *specific fuel consumption* (SFC) pada kedua *boiler* dari 0,2121 kg/kg_{steam} dan 0,2381 kg/kg_{steam} (100% BB) menjadi 0,2763 kg/kg_{steam} dan 0,2659 kg/kg_{steam} (10% WC), yang menunjukkan meningkatnya kebutuhan bahan bakar per satuan uap.
3. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan *co-firing* 5% *woodchip* menghasilkan penurunan *heat rate*, yang menandakan peningkatan kinerja termal *boiler*. Namun, pada rasio 10% *woodchip*, *heat rate* kembali meningkat pada kedua unit *boiler*, yang menunjukkan penurunan efisiensi pemanfaatan energi bahan bakar.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian selanjutnya untuk membahas pengaruh penerapan *co-firing woodchip* dengan batu bara terhadap emisi gas buang *boiler*, seperti CO₂, NO_x, SO₂, dan partikulat, pada berbagai variasi rasio *co-firing*. Kajian ini penting untuk melengkapi evaluasi kinerja *boiler* dari aspek lingkungan dan keberlanjutan operasional PLTU.
2. Menetapkan rasio operasional *co-firing* 95% BB : 5% WC sebagai standar produksi bagi perusahaan, karena terbukti menghasilkan kinerja *boiler* paling efisien hingga 77%, *heat rate* terendah, dan SFC yang stabil. Rasio ini dapat dijadikan *baseline* dalam SOP operasi PLTU untuk menekan penggunaan batu bara tanpa menurunkan performa.
3. Melakukan pengujian kualitas bahan bakar secara berkala, baik batu bara maupun *woodchip*, terutama untuk parameter nilai kalor, kadar air, kadar abu, dan *volatile matter*. Fluktuasi kualitas batu bara pada hari tertentu terbukti menyebabkan efisiensi turun hingga 62%.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Mansour, F., & Zuwala, J. (2010). An evaluation of biomass co-firing in Europe. *Biomass and Bioenergy*, 34(5), 620–629. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.004>
- Alber, I. D., & Kiono, B. F. T. (2022). Analisis Pengaruh Perubahan Pembebanan Listrik Terhadap Konsumsi Spesifik Bahan Bakar Pembangkitan, Heat Rate dan Efisiensi Pada Unit 1 PLTU Kendari-3. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 3(3), 179–186. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13371>
- Alfaridzi, R. (2024). *Memahami Batu bara: Definisi, Pembentukan, Fungsi, dan Jenisnya*. SHA Solo. <https://shasolo.com/memahami-batu-bara-definisi-pembentukan-fungsi-jenis/> (diakses 12 Agustus 2025)
- Arif, R. (2021). *Sepanjang 2024, Co-Firing Biomassa di PLTU PLN Hasilkan 1,67 Juta MWh Listrik Hijau*. Ruang Energi. <https://www.ruangenergi.com/sepanjang-2024-co-firing-biomassa-di-pltu-pln-hasilkan-167-juta-mwh-listrik-hijau/> (diakses 8 Agustus 2025)
- Aziz, A., & Hasan, A. (2016). Evaluasi Hate Rate dan Efisiensi suatu PLTU dengan menggunakan Batu bara yang Berbeda dari Spesifikasi Design. *Jurnal Energi Dan Lingkungan (Enerlink)*, 11. <https://doi.org/10.29122/elk.v11i1.1584>
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, pyrolysis and torrefaction practical design and theory* (second). Elsevier.

- Dwiaji, Y. C. (2023). Analisis Pengaruh Co-Firing Biomassa Terhadap Kinerja Peralatan Boiler PLTU Batu bara Unit 1 PT. XYZ. *Journal of Applied Mechanical Engineering and Renewable Energy*, 3(1), 7–15. <https://doi.org/10.52158/jamere.v3i1.445>
- Hairul Bahri, M., Wijayanti, W., Hamidi, N., & Wardana, I. N. G. (2020). The role of alkali metal and alkaline metal earth in natural zeolite on combustion of Albizia Falcataria sawdust. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(2), 219–227. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00323-2>
- Hamzah, L. A. (2019). Analisa Pengaruh Produksi Energi Listrik Terhadap Konsumsi Bahan Bakar Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) NII Tanasa. *Jurnal Fokus Elektroda*, 04(02), 1–5. <https://dx.doi.org/10.33772/jfe>
- Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Kim, S., Lee, S., & Yoo, J. (2021). Valorization of indonesian wood wastes through pyrolysis: A review. *Energies*, 14(5), 1–25. <https://doi.org/10.3390/en14051407>
- Hasan, K., & Swastika, abdul baits. (2025). Co-firing biomassa di Indonesia: memperpanjang, bukan menyelesaikan masalah batu bara. *Centre for Research on Energy and Clean Air*.
- Hendriyana, Nurdini, L., Hari P, B., Trilaksono, G., Suhendar, R., & Satriya Kusuma, G. (2018). Evaluasi Kinerja Gasifier Up-draft dengan Umpan Limbah Biomassa Kayu Mahoni dari Industri Mebel. *Evaluasi Kinerja Gasifier Up-Draft Dengan Umpan Limbah Biomassa Kayu Mahoni Dari Industri Mebel*, 2, 1–7.
- Ilham, M. F., & Suedy, S. W. A. (2022). Effect of Cofiring Using Sawdust on Steam Coal Power Plant Heat Rate Value. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 3(2), 121–127. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13828>
- Kristensen, P., Niwaz, N., & Agency, D. E. (2023). *PT Great Giant Pineapple Lampung Energy Audit Report*. May, 1–7.
- Laosena, R., Palamanit, A., Leungchavanon, M., Kittijaruwattana, J., Nakason, C.,

- Lee, S. H., & Chotikhun, A. (2022). Characterization of Mixed Pellets Made from Rubberwood. *Materials*, 15(3093), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ma15093093>
- Lewerissa, Y. J. (2018). Analisis Energi Pada Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Pltu) Dengan Cycle Tempo. *Jurnal Voering*, 3(1), 23. <https://doi.org/10.32531/jvoe.v3i1.85>
- Lubis, D. P., & Tambunan, U. K. (2025). Variasi Rasio Co-Firing Batu bara Dan Sawdust (Serbuk Gergaji) Terhadap Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *SINERGI Polmed: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN*, 06(01), 28–36. <http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index>
- Maridjo, Hermawan, K., & Nurtanto, bagus dwi. (2011). Evaluasi Kinerja boiler unit 2 PLTU 2 Banten-Labuan menggunakan metoda langsung dan tidak langsung. *Jurnal Teknik Energi*, 1(2), 2–7. <https://doi.org/10.35313/v1i2.1794>
- Maskur, Z., & Nugroho, A. (2021). Analisa Karakteristik Biomasa untuk Cofiring pada Pembangkit Batu bara di Indonesia. *Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan I (SENASTITAN I)*, 394–402.
- Maulana, R., Sappu, frans P., & Maluegha, B. (2020). Unjuk kerja boiler tipe CFB pada unit 2 PLTU Sulut-3 dengan metode langsung. *Jurnal Poros Teknik Mesin Unsrat*, 12(1).
- Muhamad, Z., & Adnantio, J. (2023). EFEKTIVITAS PENGGUNAAN BAHAN BAKAR BATU BARA DALAM MEMPRODUKSI UAP BOILER PLTU BUKIT ASAM UNIT PELABUHAN TARAHAHAN 2 X 8 MW. *Jurnal Teknik Mesin Universitas Bandar Lampung*, 12(1).
- Ogara, E. R., Fadhillah, A., & Ilham, A. (2023). Determination of coal rank and the effect of coal characteristic on caloric value. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 09(02). <https://doi.org/10.23960/jge.v9i2.275>
- Pambudi, A., Sukmana, I., & Risano, Y. (2023). Pengaruh Nilai Spesifik Konsumsi Bahan Bakar (SFC) Terhadap Jumlah Pemakaian Batu bara Di PT Bukit

- Energi Servis Terpadu PLTU Peltar 2x8 MW. *Jurnal Profesi Insinyur Universitas Lampung*, 4(2), 133–142. <https://doi.org/10.23960/jpi.v4n2.109>
- Purwadi, Utomo, M. T. S., & muchammad. (2023). Analisis Ekperimental Co-Firing Biomassa Bonggol Jagung Dengan Batu bara. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, 11(3), 506–511. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/41051>
- Rachmad, R., Irawan, M. I., & Hanoum, S. (2024). Economic Strategies and Efficiency of Power Plants in Indonesia to Achieve Net Zero Emissions. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(6), 213–221. <https://doi.org/10.32479/ijeep.17053>
- Raharjo, I., Hidayat, A., Dzil Ikram, F., & Aldrin, A. (2024). Analisis Kekuatan Rangka Mesin Chipper Kayu Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Gear : Energi, Perancangan, Manufaktur & Material*, 2(1), 15–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.36761/gear.v2i1.3651>
- Rohman, A., Mufarida, N. A., & Kosjoko. (2024). Pengaruh Variasi Temperatur Pirolisis Terhadap Komposisi Uji Proksimat Dari Serbuk Kayu Jati. *National Multidisciplinary Sciences UMJember Proceeding Series*, 3(1), 413–422. <http://proceeding.unmuhjember.ac.id/index.php/nsm>
- Rosyid, H. Al, & Firmansyah, J. (2019). Analisis Kegagalan Material Waterwall tube boiler PLTU Ubon Banten 3 Lontar Unit 3. *Jurnal Power Plant*.
- Samsudin, S., Aziz, N. A., Hairuddin, A. A., & Masuri, S. U. (2022). Deviation of SO₂ and NO₂ from coal combustion to the coal gross calorific value. *AIP Conference Proceedings*, 2496(May). <https://doi.org/10.1063/5.0090828>
- Saskiyah, Hasan, H., & Magdalena, H. (2024). Deashing Batu bara Dengan Metode Leaching Menggunakan NaOH Dan HCL Di PT Bukit Baiduri Energi, Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur. *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, 2(4), 197–209. <https://doi.org/10.61132/venus.v2i4.412>
- Sukandarrumidi. (2014). *Batu bara dan Gambut* (4th ed.). GADJAH MADA UNIVERSITY PRESS, 2014.

Tarsudin, Koswara, E., & Susandi, D. (2019). ANALISIS EFISIENSI BOILER FIVES CHAIL BABCOCK BR 2-39-62 KAPASITAS 55 TON / JAM TEKANAN KERJA 26 BAR. *Seminar Teknologi Majalengka 4.0*, 117–121. <https://doi.org/ISSN : 2528-3820>

Trojanowski, R., Butcher, T., & Fthenakis, V. (2024). The Impact of Fuel Type and Burn Phase on Combustion-Related Emissions and Efficiency of Woodchip-Fired Boilers. *Energy and Fuels*, 38(21), 21308–21321. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c00833>