

**ANALISIS EKONOMI BIAYA OPERASIONAL PADA PENERAPAN
CO-FIRING BATU BARA DENGAN *WOOD CHIPS*
(Studi Kasus: PT. XYZ)**

(Skripsi)

Oleh

REGA MU'ARIF FANNY

2115021039



**FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2026

**ANALISIS EKONOMI BIAYA OPERASIONAL PADA PENERAPAN
CO-FIRING BATU BARA DENGAN *WOOD CHIPS*
(Studi Kasus: PT. XYZ)**

**Oleh
REGA MU'ARIF FANNY**

**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 EKONOMI BIAYA OPERASIONAL PADA PENERAPAN *CO-FIRING* BATU BARA DENGAN *WOOD CHIPS* (Studi Kasus: PT. XYZ)

Oleh:

Rega Mu'arif Fanny

Pembangkit listrik berbasis batu bara telah lama menjadi sumber utama energi, namun penggunaan batu bara murni membawa dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, mencari alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan menjadi salah satu upaya penting dalam memperbaiki ketahanan energi nasional sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem. Salah satu alternatif yang mulai mendapat perhatian adalah metode *co-firing*. Penelitian ini dilaksanakan di PLTU PT. XYZ yang berlokasi di Kecamatan Terbanggi Besar, Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada penerapan proses pembakaran batu bara dan *co-firing* dengan *wood chips* yang sedang diuji coba pada boiler di perusahaan. Penambahan 5% *wood chips* pada skenario kedua menghasilkan rata-rata HPP *steam* sebesar Rp298 per kilogram, mengalami peningkatan sebesar Rp39 atau 15,06% dibandingkan skenario 100% batu bara. Fenomena yang terjadi pada kestabilan energi yang dihasilkan oleh boiler dengan *co-firing wood chips* ini, peningkatan yang dihasilkan dinamis dan tidak stabil (statis) ini diakibatkan *wood chips* yang tidak diberikan perlakuan khusus. Sehingga biaya operasional tersebut masih mengalami pembengkakan biaya yang berpotensi membuat kerugian bagi perusahaan.

Kata Kunci : Pembangkit listrik, *co-firing*, biaya operasional

ABSTRACT

ECONOMIC ANALYSIS OF OPERATIONAL IN THE APPLICATION OF COAL CO-FIRING WITH WOOD CHIPS

(Case Study: PT. XYZ)

By:

Rega Mu'arif Fanny

Coal-fired power plants have long been a major source of energy, but the use of pure coal has a negative impact on the environment. Therefore, finding more environmentally friendly and sustainable alternatives is an important effort in improving national energy security while reducing negative impacts on the ecosystem. One alternative that is gaining attention is the co-firing method. This research was conducted at the PT. XYZ coal-fired power plant located in Terbanggi Besar District, Central Lampung Regency, Lampung Province. The selection of this location was based on the application of coal combustion and co-firing with wood chips, which is currently being tested in the company's boiler. The addition of 5% wood chips in the second scenario resulted in an average steam HPP of Rp298 per kilogram, an increase of Rp39 or 15,06% compared to the 100% coal scenario. The phenomenon observed in the energy stability produced by the boiler with wood chip co-firing shows that the resulting increase is dynamic and unstable (static), attributed to the wood chips not receiving special treatment. Consequently, operational costs continue to rise, potentially leading to losses for the company.

Keywords : *Power plant, co-firing, operational costs*

Judul Skripsi : **ANALISIS EKONOMI BIAYA
OPERASIONAL CO-FIRING BATU BARA
DAN WOOD CHIPS (Studi Kasus: PT. XYZ)**

Nama Mahasiswa : **Rega Mu'arif Fanny**

No. Pokok Mahasiswa : **2115021039**

Jurusan : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI
Komisi Pembimbing

Pembimbing I



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

Pembimbing II



Angga Darma Prabowo, S.T., M.T.
NIP. 199605062024061001

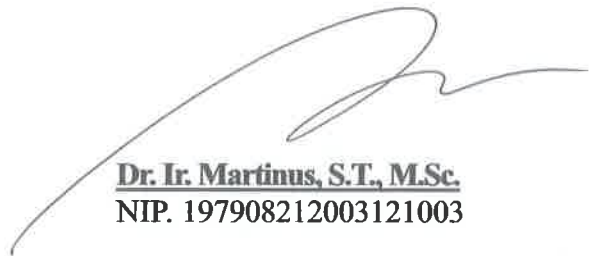
MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin



Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP. 197408162000121001

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin



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. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 02 Februari 2026

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi yang berjudul “**ANALISIS EKONOMI BIAYA OPERASIONAL *CO-FIRING* BATU BARA DAN *WOOD CHIPS*** (Studi Kasus: PT. PT. XYZ)” merupakan hasil karya penulis sendiri dan bukan merupakan hasil plagiat siapa pun sebagaimana yang diatur dalam pasal 36 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor No. 13 tahun 2019.

Bandar Lampung, 13 Februari 2026

Yang Menyatakan



Rega Mu'arif Fanny

NPM. 2115021039

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung, pada tanggal 12 Februari 2023 merupakan anak kedua dari Bapak Eryanto (alm) dengan Ibu Sri Wahyuni. Penulis menempuh Pendidikan dasar di SD Negeri 2 Sawah Brebes (2009-2015), lalu dilanjutkan di MTs Negeri 1 Bandar Lampung (2015-2018), dan SMK Negeri 5 Bandar Lampung (2018-2021), hingga pada tahun 2021 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM). Penulis melaksanakan program Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Banding, Kecamatan Rajabasa, Kabupaten Lampung Selatan pada Januari-Februari 2024. Penulis melaksanakan Kerja Praktik di PT. Perkebunan Nusantara 1 Regional VII Unit Pagaralam, Kelurahan Gunung Dempo, Kecamatan Pagaralam Selatan, Provinsi Sumatera Selatan pada Juni 2024, dengan topik **“Analisis Performansi Pada Mesin Rotary Dryer Terhadap Proses Pengeringan Daun Green Tea PT. Perkebunan Nusantara 1 Regional VII Pagaralam”**.

September-Desember 2024 penulis melaksanakan magang industri (Merdeka Belajar Kampus Merdeka) di PT. Great Giant Pineapple, Kecamatan Terbanggi Besar, Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung di Departemen *Sustainability Farming dan Climate*. Hingga penulis melakukan penelitian di bidang Konversi Energi dengan judul **“Analisis Ekonomi Biaya Operasional Pada Penerapan Co-firing Batu Bara Dengan Wood Chips (Studi Kasus: PT. XYZ)”** di bawah bimbingan Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. dan Bapak Angga Darma Prabowo, S.T., M.T. serta Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. sebagai pembahas.

MOTTO

“Jangan pernah takut gagal, jangan pernah takut di salah pahami. Karena orang yang tidak pernah gagal, yang tidak pernah disalahi oleh orang, tanda bahwa mereka yang tidak pernah berjuang dalam hidup”

(Buya Hamka)

“Tidak ada proses yang mudah untuk tujuan yang indah, kita masih dalam zona perjuangan, takdir milik Allah tapi doa dan usaha milik kita”

“Selalu ada harga dalam sebuah proses. Nikmati saja lelah-lelah itu. Lebarkan lagi rasa sabar itu. Semua yang kau investasikan untuk menjadikan dirimu serupa yang kau impikan, mungkin tidak akan selalu berjalan lancar. Tapi gelombang-gelombang itu yang nanti akan bisa kau ceritakan”

PERSEMBAHAN

Tiada lembar yang paling inti dalam laporan skripsi ini kecuali lembar persembahan, laporan skripsi ini saya persembahkan sebagai tanda bukti kepada orang tua, kakak dan adik, serta teman-teman yang selalu memberi support untuk menyelesaikan skripsi ini. Terlambat lulus atau lulus tidak tepat waktu bukanlah sebuah kejahatan, bukan pula sebuah aib. Alangkah kerdilnya jika mengukur kecerdasan seseorang hanya dari siapa yang paling cepat lulus. Bukankah sebaik-baiknya skripsi adalah skripsi yang selesai? Karena mungkin ada suatu hal dibalik itu semua, dan percayalah alasan saya di sini merupakan alasan yang sepenuhnya baik. Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, tugas akhir ini dipersembahkan kepada :

Orang Tua Saya

Terima kasih mama dan nenek untuk segala do'a dan usaha yang selalu diberikan untuk kesuksesan putranya hingga mampu menyelesaikan pendidikan di tingkat Universitas sebagai Sarjana Teknik Mesin.

Kakak dan Adik

Terima kasih atas segala dukungan yang telah diberikan hingga saya dapat menyelesaikan pendidikan saya di tingkat Sarjana.

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia yang telah memberikan nikmat hidup dan rezeki sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Shalawat serta salam di junjungkan kepada Baginda Rasulullah SAW yang memberikan tuntunan dan syafaatnya kepada umatnya agar berada pada di jalan yang lurus. Skripsi ini dibuat sebagai tanda selesai pelaksanaan tugas akhir. Karya tulis ini diharapkan dapat menjadi pengembangan lebih lanjut. Maka, izinkanlah penulis menyampaikan penghormatan setinggi-tingginya atas jasa orang tua, seluruh dosen Teknik Mesin Universitas Lampung, serta kerabat yang telah rela mengorbankan waktu, tenaga, pikiran bahkan sampai hal-hal materil untuk membantu proses penyelesaian skripsi ini. Untuk itu penulis menyampaikan penghargaan dan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orang tua penulis yang tercinta, Ibu Sri Wahyuni dan Nenek Kosiah yang selalu mendukung, mendidik, mendoakan dan memberikan restu penulis agar tetap semangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi Teknik Mesin.
2. Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ahmad Su'udi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama perkuliahan dan menyelesaikan skripsi.
6. Dr. Amrul, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir dan selama perkuliahan.
7. Angga Darma Prabowo, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir di perkuliahan.
8. Hadi Prayitno, S.T., M.T. selaku Dosen Pembahas yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan dalam penyusunan skripsi ini.

9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang tidak bisa disebutkan satu persatu namanya, terima kasih atas ilmu yang telah diberikan. Semoga kelak ilmu yang telah saya dapatkan bermanfaat.
10. Kakak dan Adik saya, Ega dan Sindy, serta Regina terima kasih banyak sudah hadir menjadi keluarga yang baik dan pengertian.
11. Teman-teman lab Termo yang terdiri dari Ferta, Fathan, Rams, Komang, Fauzan, dan Fardan yang telah membantu, menyemangati, dan memberikan ilmu kepada penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga kita dapat bertemu kembali dikemudian hari.
12. Teman-teman kos Gun yang selalu membantu dan mendukung dalam mengerjakan skripsi ini. Semoga yang sudah lulus dimudahkan jalannya, dan yang masih berjuang dalam tugas akhir dilancarkan penelitiannya.
13. Teman-teman lab Motbak terima kasih atas waktu dan tawa yang telah di berikan selama perkuliahan sehingga akan menjadi cerita yang sangat berkesan.
14. Teman-teman angkatan 2021 terima kasih atas kehadiran kalian yang menjadi suatu kenangan dan kesenangan dalam hidup penulis selama di kampus tercinta ini.
15. Teman-teman KKN terima kasih telah memberikan dukungan, pelajaran dan motivasi hingga penulis bisa mencapai di titik-titik.
16. Kepada sosok yang belum diketahui namanya namun sudah tertulis jelas di *lauhul mahfuz*. Terima kasih sudah menjadi salah satu sumber motivasi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini sebagai upaya memantaskan diri. Semoga kita berjumpa di versi terbaik kita masing-masing.

Penulis menyadari bahwa isi skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca. Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	iii
MENYETUJUI	v
MENGESAHKAN.....	vi
PERNYATAAN PENULIS.....	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
MOTTO.....	ix
PERSEMBAHAN	x
SANWACANA.....	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II.....	6
TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Batu Bara	6
2.2 <i>Co-firing</i>	8
2.3 Biomassa.....	9
2.4 <i>Wood Chips</i> (Serpihan Kayu).....	10
2.5 Konsep Ekonomi Teknik	11
2.6 Ekonomi Makro dan Mikro	13
2.7 Biaya Operasional (<i>Operating Expenditure</i> / OPEX)	14
2.7.1 Komponen-komponen Biaya Operasional.....	15
2.7.2 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Besarnya Biaya Operasional	16

2.7.3	Peran OPEX Dalam Evaluasi Ekonomi <i>Co-firing</i>	17
2.8	Analisis Biaya Perbandingan Operasional (<i>Cost Comparison Analysis</i>).....	18
2.8.1	Perhitungan Untuk Mencari Biaya Operasional.....	19
2.9	Biaya Penyusutan	20
2.9.1	Metode Saldo Menurun (<i>Double Declining Method</i>).....	20
BAB III		21
METODOLOGI PENELITIAN		21
3.1	Tempat Penelitian	21
3.2	Alat Penelitian	21
3.3	Teknik Pengumpulan Data	22
3.3.1	Studi Literatur.....	22
3.3.2	Metode Observasi	22
3.4	Alur Penelitian.....	23
3.5	Analisis Data	24
3.6	Analisis Biaya.....	24
3.6.1	Biaya bahan bakar	25
3.6.2	Biaya pekerja	25
3.6.3	Biaya listrik	25
3.6.4	Biaya perawatan	26
3.6.5	Biaya penyusutan.....	26
3.6.6	Biaya solar	26
BAB IV		27
PEMBAHASAN		27
4.1	Hasil.....	27
4.2	Analisis Harga Pokok Produksi (HPP) <i>Steam</i>	32
4.3	Analisis Biaya Operasional (OPEX)	35
4.4	Analisis Perbandingan Biaya Operasional (CCA).....	38
4.5	Implikasi Ekonomi Penerapan <i>Co-Firing</i>	40
4.5.1	Implikasi biaya jangka pendek	40
4.5.2	Implikasi terhadap stabilitas pasokan energi	41
4.5.3	Prospek ekonomi <i>co-firing</i> di masa depan	41
BAB V		43

PENUTUP	43
5.1 Kesimpulan.....	43
5.2 Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Batu bara dalam bentuk padat sebelum proses penghancuran.	7
Gambar 2.2 Sumber dan jenis-jenis biomassa.	9
Gambar 3.1 Diagram alur penelitian	23
Gambar 4.1 Grafik hasil biaya operasional pada batubara 100%.....	29
Gambar 4.2 Grafik hasil biaya operasional pada co-firing woodchips 5%.....	30
Gambar 4.3 Grafik hasil biaya operasional pada co-firing woodchips 10%.....	31
Gambar 4.4 Grafik batang menampilkan HPP steam untuk setiap hari pengujian pada ketiga rasio co-firing.	33
Gambar 4.5 Grafik batang menampilkan perbandingan rata-rata HPP steam untuk ketiga rasio co-firing.	34
Gambar 4.6 Grafik batang menampilkan perbandingan rata-rata total biaya operasional untuk ketiga rasio co-firing.	35
Gambar 4.7 Grafik batang menampilkan break down biaya operasional untuk setiap hari pengujian pada ketiga rasio co-firing.	37

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Jenis batu bara.....	7
Tabel 4.1 Biaya operasional pembangkit.....	28
Tabel 4.2 Tabel harga pokok produksi (HPP) <i>steam</i>	32

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan kekayaan alam yang melimpah, baik dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui maupun yang tidak dapat diperbaharui. Salah satunya hasil sumber daya alam Indonesia yang menjadi komoditi ekspor terbesar adalah batu bara. Indonesia adalah salah satu penghasil dan pengeksport batu bara terbesar di dunia. Batu bara merupakan pusat dari kebijakan energi Indonesia sejak akhir dekade 1970-an.

Batu bara merupakan sumber energi terpenting yang banyak dimanfaatkan untuk pembangkit listrik bahkan hampir setengah konsumsi batu bara domestik dimanfaatkan sebagai bahan bakar pembangkit listrik, selain itu dimanfaatkan juga sebagai sumber energi utama dalam mendukung operasional kegiatan industri. Keberadaan batu bara masih diandalkan sebagai modal dasar pembangunan sebagai sumber energi utama untuk penyediaan listrik dan penghasil devisa negara. Kondisi tersebut dapat dilihat dari infrastruktur energi di Indonesia yang sebagian besar terdiri dari pembangkit listrik berbahan bakar batu bara, yang menyediakan sekitar 60% dari kapasitas pembangkit listrik nasional (Pahlevi dkk., 2024). Pembangkit listrik berbasis batu bara telah lama menjadi sumber utama energi, namun penggunaan batu bara murni membawa dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, mencari alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan menjadi salah satu upaya penting dalam memperbaiki ketahanan energi nasional sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem. Salah satu alternatif yang mulai mendapat perhatian adalah metode *co-firing*, yaitu proses pembakaran campuran antara

batu bara dan biomassa yang digunakan dalam pembangkit listrik. Proses ini dilakukan dengan menggantikan sebagian batu bara menggunakan biomassa dalam unit pembangkit listrik. Dengan menggabungkan biomassa dan batu bara, diharapkan dapat mengurangi ketergantungan pada batu bara. Biomassa merupakan salah satu pilihan energi alternatif yang efektif dalam rangka pembangunan berkesinambungan pada sektor energi sebagai energi terbarukan yang dapat diperbaharui. Keunggulan pemakaian biomassa pada PLTU adalah memerlukan modal yang sedikit serta pengaruh lingkungan yang lebih rendah dibandingkan menggunakan batu bara murni (Nasution, 2024).

PT. XYZ merupakan salah satu perusahaan besar yang telah memanfaatkan energi dari pembangkit listrik berbasis batu bara untuk mendukung operasi industrinya. Namun, seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya keberlanjutan dan perlindungan lingkungan, PT. XYZ berupaya mengeksplorasi penggunaan teknologi *co-firing* untuk mengurangi ketergantungan mereka pada batu bara murni. *Co-firing* menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan penggunaan batu bara murni, salah satunya dari sisi keekonomian. Namun, terdapat beberapa faktor yang harus di pertimbangkan sebelum menerapkan teknologi ini dalam skala industri, terutama terkait biaya bahan bakar, efisiensi pembakaran, dan kualitas pembangkit listrik (Palupi dkk., 2024). Oleh karena itu sebelum implementasi penuh, diperlukan analisis ekonomi untuk memastikan bahwa metode ini lebih menguntungkan dibandingkan penggunaan batu bara murni.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis biaya operasional pada penerapan *co-firing* batu bara dengan *wood chips* di PT. XYZ. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai perbandingan biaya operasional antara penggunaan batu bara murni dengan campuran batu bara dan *wood chips*. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi bahan pertimbangan bagi perusahaan dalam mengambil keputusan strategi pengelolaan energi yang lebih efisien guna menekan biaya operasional dan meningkatkan profitabilitas.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Apakah terdapat perbedaan signifikan dalam total biaya operasional antara penggunaan batu bara murni dengan *co-firing* batu bara dengan *wood chips* di PT. XYZ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Membandingkan total biaya operasional antara penggunaan batu bara murni dan *co-firing* batu bara dengan *wood chips* di PT. XYZ.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapatkan melalui penelitian ini antara lain :

1. Menjadi referensi bagi industri lain dalam mempertimbangkan penggunaan energi yang lebih berkelanjutan.
2. Berkontribusi pada penelitian akademik terkait *co-firing* sebagai alternatif energi dalam industri manufaktur dan agroindustri.
3. Menambah wawasan penulis dan pembaca mengenai penggunaan *co-firing* batu bara dengan *wood chips*

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini hanya membahas aspek biaya operasional (OPEX) yang berkaitan dengan penggunaan batu bara murni dan *co-firing* batu bara dengan *wood chips*, tanpa mempertimbangkan biaya investasi awal (CAPEX) karena data bersifat rahasia perusahaan.

2. Data yang digunakan merupakan data aktual sekaligus literatur yang dipelajari selama pelaksanaan *project co-firing* di PT. XYZ.
3. Penelitian ini tidak membahas aspek teknis mendalam dari proses pembakaran atau performa *boiler*, dan juga tidak menganalisis dampak lingkungan dari penggunaan bahan bakar.
4. Satuan *output* yang dianalisis dalam perhitungan biaya per unit terbatas pada *output* energi (seperti uap atau listrik) yang dihasilkan dari proses pembakaran.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada laporan tugas akhir ini terdiri lima bab, antara lain sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan ini berisikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan teori-teori tentang batu bara, *co-firing*, biomassa, *wood chips*, konsep ekonomi teknik, dan analisis biaya operasional yang bersumber dari jurnal, buku, dan penelitian-penelitian terdahulu yang digunakan untuk menulis penelitian ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi mengenai tempat penelitian, alat penelitian, teknik pengumpulan data, alur penelitian, analisis data dan teknik pengolahan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi mengenai hasil dari penelitian serta pembahasan menyeluruh tentang analisa biaya operasional pada *co-firing* batu bara dengan *wood chips* dan implikasinya.

BAB V PENUTUP

Berisikan kesimpulan serta saran yang dapat diberikan penulis guna kemajuan pada bidang ilmu akademik.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batu Bara

Batu bara merupakan batuan sedimen yang mudah terbakar, berasal dari sisa-sisa tumbuhan dengan komposisi utama karbon, hidrogen, dan oksigen. Batu bara memiliki warna yang bervariasi dari coklat hingga hitam dan melalui proses fisika dan kimia, kandungan karbonnya dapat meningkat seiring waktu. Proses pembentukan batu bara dapat dimulai dengan induk vegetasi yang mengalami humifikasi. Selama jutaan tahun, terjadi perubahan fisik dan kimiawi yang menyebabkan peningkatan kandungan karbon dalam batu bara (Leadtrees dan Needs, 2025).

Batu bara terdiri dari material organik yang disebut maseral. Jenis tumbuhan, iklim, kontrol ekologi, dan kondisi pada lingkungan pengendapan berpengaruh terhadap pembentukan maseral yang berlangsung pada tahap akumulasi gambut. Berdasarkan morfologi, ukuran, bentuk, struktur dalam, komposisi kimia, intensitas refleksi, relief, warna pantulan, dan tingkat pembatu baraan, maseral dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok, yaitu kelompok maseral *vitrit* (berasal dari serat-serat kayu), *eksinit* atau *liptinit* (berasal dari tumbuhan tingkat rendah), dan *intertinit* (berasal dari kelompok maseral lain yang sudah mengalami proses oksidasi) (Hapsari dkk., 2022). Gambar 2.1 menunjukkan batu bara dalam kondisi alami dengan struktur keras dan permukaan tidak rata.



Gambar 2.1 Batu bara dalam bentuk padat sebelum proses penghancuran.

(Sumber: Habitulloh dkk., 2022).

Batu bara dapat diklasifikasikan ke dalam lima peringkat, meliputi gambut, lignit, sub-bituminus, bituminus, dan antrasit. Peringkat batu bara mencerminkan tingkat metamorfisme yang dicapai oleh tumbuhan (gambut) selama proses pembebanan. Peringkat batu bara dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan yang dialami oleh material pembentuk batu bara dan pada umumnya dapat mencerminkan ke dalam material tersebut. Dalam menentukan kualitas batu bara, dapat dilihat dari hasil pengujian kimia (ultimate dan proksimat) sebagai acuan. Beberapa sifat yang membedakan jenis batu bara seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Jenis batu bara (Sumber : Shintawaty, 2019).

Parameter	Kandungan Kalori (kkal/Kg)	Kandungan Karbon
Antrasit	>7777	86% - 98%
Bituminus	5833 – 7777	68% - 86%
Sub-Bituminus	4611 – 5833	60% - 68%
Lignit	3500 – 4611	25% - 60%
Gambut	<3500	<25%

2.2 Co-firing

Upaya pengurangan penggunaan bahan bakar fosil pada pembangkit listrik dan pencegahan peningkatan emisi gas rumah kaca mendorong upaya peningkatan penggunaan teknologi energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Upaya yang dilakukan antara lain dengan cara pemanfaatan sumber energi biomassa. Secara prinsip kandungan energi pada biomassa umumnya relatif rendah maka campuran bahan bakar biomassa dan batu bara menjadi salah satu alternatif solusi untuk mempertahankan kandungan energi yang diperlukan pada pembakaran. Campuran bahan bakar tersebut dapat melalui metode yang disebut *co-firing* (Sidiq, 2022).

Co-firing biasa dikenal dengan *co-combustion* yang bermakna suatu proses pembakaran dua jenis bahan bakar yang berbeda dalam satu perangkat pembakaran yang sama, biasanya digunakan pada *boiler*. *Co-firing* biomassa merupakan metode dengan biaya yang rendah untuk menciptakan energi yang ramah lingkungan. Bahan bakar *co-firing* biomassa berasal dari potongan kayu, reruntuhan pohon, jenis tanaman energi, beberapa jenis limbah tertentu ataupun sampah yang sudah diolah (Purwadi dkk, 2023). Tujuan *co-firing* adalah untuk mengurangi pemakaian batu bara dengan bahan bakar energi terbarukan dalam perbandingan tertentu dengan tetap mempertimbangkan kualitas bahan bakar sesuai keperluan. Selain itu, diharapkan dengan adanya implementasi *co-firing* pada PLTU, emisi yang dihasilkan oleh pembangkit dapat diturunkan sehingga ramah lingkungan.

Co-firing dianggap sebagai pendekatan jangka yang paling menjanjikan untuk mengurangi CO₂, dengan mitigasi emisi melalui penggunaan biomassa bahan bakar alternatif dapat berasal dari kayu, reruntuhan jenis tanaman energi, beberapa jenis limbah tertentu, ataupun sampah yang sudah diolah. Keuntungan melakukan biomassa pada PLTU antara lain :

- a. Investasi yang relatif rendah.
- b. Dampak lingkungan lebih baik jika dibandingkan dengan yang 100% batu bara.

2.3 Biomassa

Biomassa adalah material organik yang berasal dari tanaman atau binatang. Bahan bakar biomassa mencakup limbah kayu (serbuk gergaji, bekas serutan, serpihan, kulit kayu, perkebunan kayu bakar, residu hutan), limbah pertanian (sekam padi, jerami, pangkasan tanaman perkebunan, tongkol jagung), rerumputan, kotoran hewan dan bahan lainnya. Biomassa dibagi menjadi 2 yaitu biomassa murni yang di dalamnya termasuk kayu, tumbuhan, daun (*lignoselulosa*), tanaman serta sayuran (karbohidrat) dan biomassa limbah yang di dalamnya termasuk limbah padat dan cair (limbah padat kota), kotoran hewan dan manusia, gas yang berasal dari penimbunan (terutama metana), dan limbah pertanian (Maskur dan Nugroho, 2021).



Gambar 2.2 Sumber dan jenis-jenis biomassa.

(Sumber : Tursi, 2019 ; Sorrentino, 2019).

Biomassa merupakan bahan energi yang dapat diperbaharui karena dapat di produksi dengan cepat. Melihat sumber biomassa yang melimpah, sehingga potensi untuk dijadikan sumber energi alternatif sangat besar. Energi biomassa dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil (minyak bumi). Energi biomassa menjadi salah satu bentuk energi yang dapat diperbarui (terbarukan). Sumber daya biomassa dapat digunakan berulang kali dan bersifat tidak terbatas berdasarkan siklus dasar karbon melalui proses fotosintesis. Pemanfaatan limbah sebagai bahan bakar alternatif

dapat memberikan keuntungan yaitu peningkatan efisiensi energi, penghematan biaya, dan menghindari pencemaran lingkungan (Naviza dkk., 2023).

Pada umumnya biomassa yang memiliki nilai ekonomis rendah atau merupakan hasil ekstraksi produk primer. Karena penggunaan bahan bakar biomassa memberikan manfaat yang baik sejauh menyangkut lingkungan. Biomassa menyerap karbon dioksida selama pertumbuhan dan mengeluarkannya selama pembakarannya. Oleh karena itu, biomassa membantu daur ulang karbon dioksida di atmosfer dan tidak berkontribusi pada efek gas rumah kaca.

2.4 *Wood Chips* (Serpihan Kayu)

Menurut *International Energy Agency* (IEA), 10,3% dari produksi energi dunia berasal dari biomassa, menjadikannya salah satu sumber energi terbarukan yang paling penting. Meskipun berbagai alternatif biomassa pada dapat diakses, serpihan kayu adalah pilihan yang umum untuk pembangkitan panas rumah tangga dan industri. Serpihan kayu merupakan bahan baku penting untuk industri pulp dan kertas, biofineri dan fasilitas pembangkit listrik berbasis biomassa. Karakteristik serpihan kayu secara substansial memengaruhi prosedur dan parameter operasional dalam industri *biofuel* dan pulp. Di antara karakteristik kualitas biomassa lainnya (misalnya abu, ukuran partikel), kadar air (*moisture content*) adalah salah satu karakteristik serpihan kayu yang paling signifikan (Rahman dkk., 2024).

Wood chips (serpihan kayu) adalah limbah kayu yang berupa kepingan-kepingan kecil. Biomassa kayu terdiri dari tiga unsur utama yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Selulosa merupakan penyusunan utama tumbuhan yang persentasenya 40% sampai 45% dari berat kayu kering. Saat menggunakan serpihan kayu atau bahan bakar kayu lainnya untuk *cogeneration* atau aplikasi khusus dalam industri, pengurangan kadar air bahan bakar dengan pengeringan menggunakan teknologi telah diselidiki, nilai kalor

terendah bahan bakar kayu adalah 9,72 MJ/kg pada kadar air 40%, namun nilai kalor dapat ditingkatkan menjadi 14,76 MJ/kg setelah mengeringkan bahan bakar hingga kadar air 15%. Minimalisasi kadar abu pada serpihan kayu memiliki dampak signifikan terhadap ekonomi produksi panas dan bahan bakar serta biaya penanganan abu. Studi di negara-negara Eropa Tengah menunjukkan bahwa pengurangan kadar abu pada serpihan kayu penting karena penyimpanan terak setelah pembakaran merupakan masalah lingkungan yang penting. Penyaringan serpihan dapat meningkatkan kualitas serpihan dengan mengurangi kadar abu dan menghilangkan kelas ukuran yang tidak diinginkan (Pedišius dkk., 2021).

2.5 Konsep Ekonomi Teknik

Ekonomi teknik adalah suatu ilmu pengetahuan berorientasi pada pengungkapan dan perhitungan nilai-nilai ekonomis yang terkandung dalam suatu rencana kegiatan teknik (*Engineering*). Ekonomi teknik (*Engineering Economics*) mencakup prinsip-prinsip dan berbagai teknis sistematis untuk pengambilan keputusan ekonomis. Dengan teknik-teknik ini, suatu pendekatan yang rasional untuk mengevaluasi aspek-aspek ekonomis dari berbagai macam alternatif yang berbeda dan dapat dikembangkan. Studi ekonomi teknik membantu dalam mengambil keputusan optimal untuk menjamin penggunaan uang dengan lebih efisien. Studi ekonomi teknik membutuhkan waktu untuk perhitungan-perhitungan yang cermat dan lebih efisien. Tugas ekonomi teknik yaitu menyeimbangkan berbagai tukar rugi di antara tips-tips biaya dan kinerjanya.

Konsep ekonomi teknik adalah untuk memecahkan masalah dalam perbisnisan ekonomi teknik, di mana diperlukan perhitungan teknis dalam permasalahan teknis dari analisis ekonomis. Secara umum analisis ekonomi teknik bisa dikatakan sebagai analisis ekonomi dari suatu investasi teknik. Untuk bisa melakukan evaluasi kinerja ekonomi dibutuhkan estimasi biaya investasi yang harus dikeluarkan saat ini, estimasi biaya-biaya operasional dan perawatan ditahun-tahun mendatang, estimasi nilai sisa sistem atau mesin pada saat sudah

ingin diganti atau sudah tidak digunakan lagi, estimasi lamanya sistem bisa beroperasi (umur ekonomis), dan estimasi tingkat suku bunga (Lutfie dkk., 2023).

Manfaat ekonomi teknik yaitu memahami aspek-aspek ekonomi di dalam teknik, teknik-teknik analisis dalam pengambilan keputusan dan pemilihan-pemilihan alternatif terbaik yang telah memenuhi syarat. Adapun analisis ekonomi banyak digunakan pada waktu melakukan studi kelayakan. Analisis ekonomi dilakukan bertujuan untuk membantu dalam pengambilan keputusan yang optimum sehingga penggunaan dana menjadi ekonomis dan pendapatan yang akan diperoleh menjadi maksimum. Oleh karena itu, analisis ekonomi perlu dilakukan sebelum keputusan diambil, sehingga segala tindakan yang akan dilakukan sudah betul-betul dievaluasi dan layak secara ekonomi dan terhadap aspek lainnya (Collins dkk., 2021).

Ekonomi teknik diperlukan untuk merumuskan, memperkirakan, dan mengevaluasi suatu proyek teknik dalam membuat keputusan. Hal tersebut dikarenakan sumber daya yang ada (manusia, uang, mesin, dan material) sangat terbatas sedangkan banyak alternatif potensial yang tersedia. Ekonomi teknik sangat penting dalam usaha karena dapat diterapkan untuk menangani masalah yang terkait dengan nilai uang terhadap waktu. Terdapat beberapa prinsip-prinsip ekonomi teknik antara lain:

- a. Membuat alternatif-alternatif, artinya pilihan alternatif (keputusan) ada di antara alternatif-alternatif yang telah disusun. Kualitas keputusan dipengaruhi oleh proses penggabungan dan identifikasi alternatif, sehingga alternatif-alternatif perlu diidentifikasi dan kemudian didefinisikan untuk analisis-analisis selanjutnya.
- b. Fokus pada perbedaan-perbedaan. Pertimbangan dalam membuat keputusan hanya pada alternatif-alternatif yang mempunyai perbedaan berarti.
- c. Gunakan sudut pandang yang konsisten. Hasil yang prospektif, ekonomis dan lainnya dari alternatif-alternatif harus dikembangkan secara konsisten dari suatu sudut pandang yang telah ditetapkan.

- d. Gunakan satuan pengukuran yang umum. Hal yang dilakukan untuk mempermudah dalam menganalisis dan membandingkan alternatif-alternatif yaitu dengan menggunakan satuan pengukuran yang umum untuk menghitung hasil yang prospektif.
- e. Pertimbangkan semua kriteria yang relevan. Sebagai bahan pertimbangan dalam memilih alternatif untuk pengambilan keputusan diperlukan satu atau beberapa kriteria. Dalam pengambilan keputusan harus mempertimbangkan baik hasil yang dinyatakan dalam ukuran moneter maupun dinyatakan dalam satuan pengukuran lainnya.
- f. Bentuk ketidakpastian menjadi eksplisit. Risiko dan ketidakpastian yang berkaitan dengan hasil alternatif dimasa yang akan datang harus dikenali dan dipertimbangkan dalam membuat keputusan, serta harus adanya analisis dan perbandingan secara mendalam.
- g. Meninjau kembali keputusan. Keputusan yang diperoleh dari suatu proses penyesuaian kemudian dikembangkan ke tingkat praktis dan evaluasi dengan membandingkan hasil yang diinginkan dengan hasil sebenarnya yang dicapai.

2.6 Ekonomi Makro dan Mikro

Ekonomi makro menjelaskan perubahan ekonomi yang mempengaruhi banyak masyarakat, perusahaan dan pasar. Ekonomi makro dapat digunakan untuk menganalisis cara terbaik untuk memengaruhi target-target kebijaksanaan seperti pertumbuhan ekonomi, stabilitas harga, tenaga kerja dan pencapaian keseimbangan neraca yang berkesinambungan. Ekonomi makro memiliki dua area penelitian yang menjadi ciri khas seperti kegiatan untuk mempelajari sebab dan akibat dari fluktuasi penerimaan negara jangka pendek (siklus bisnis), dan kegiatan untuk mempelajari faktor penentu dari pertumbuhan ekonomi jangka panjang (peningkatan pendapatan nasional). Model makro ekonomi yang ada dan prediksi-prediksi yang ada banyak digunakan oleh pemerintahan dan korporasi besar untuk membantu pengembangan dan evaluasi kebijakan ekonomi dan strategis bisnis-bisnis.

Mempelajari dinamika ekonomi untuk tingkat individu serta peran yang dimainkan oleh setiap agen ekonomi agar mencapai keberhasilan ekonomi makro memberikan landasan untuk memahami konsep ini. Ekonomi mikro adalah bidang ilmu ekonomi yang mempelajari perilaku serta keputusan konsumen di dunia usaha. Ekonomi mikro bertujuan untuk menganalisis bagaimana keputusan serta tindakan individu berdampak pada penawaran dan permintaan jasa serta barang. Tahap ini membantu mengatur nominal dan penentuan pola penawaran serta permintaan pada bermacam jenis jasa dan barang. Akibatnya, bidang ekonomi mikro mempelajari perilaku konsumen dan pasar di industri korporasi atau individu. Konsep ini berperan untuk penentuan harga dan keseimbangan permintaan serta penawaran. Ekonomi mikro membantu menganalisis untuk memahami bagaimana pilihan individu yang berbeda dapat memengaruhi dinamika pasar (Syah dkk., 2025).

2.7 Biaya Operasional (*Operating Expenditure* / OPEX)

Biaya operasional atau *operating expenditure* (OPEX) merupakan seluruh pengeluaran rutin yang diperlukan untuk menunjang proses operasional suatu sistem produksi atau kegiatan industri. Dalam konteks sistem pembangkit energi termal, seperti proses pembakaran bahan bakar batu bara dan *co-firing* dengan biomassa, (OPEX) mencakup beragam pengeluaran, termasuk biaya bahan bakar, pemeliharaan peralatan, serta tenaga kerja, yang semuanya krusial untuk memastikan kelancaran dan optimalisasi proses produksi. Keberlanjutan sistem operasional dalam konteks pembangkit energi sangat bergantung pada pengelolaan OPEX yang efisien serta dapat berpengaruh signifikan terhadap profitabilitas dan kinerja keseluruhan (Koesalamwardi dkk., 2020).

Dalam studi ekonomi teknik, OPEX diklasifikasikan sebagai biaya berulang, yang jelas berbeda dari *Capital Expenditure* (CAPEX), yang dikenal sebagai biaya investasi awal yang sifatnya sekali (*one-time investment*). Sementara CAPEX berfokus pada pengadaan infrastruktur utama dan mesin, OPEX mencakup biaya yang harus dikeluarkan secara berkesinambungan selama umur operasional sistem. Proses perhitungan OPEX menjadi sangat penting

dalam analisis biaya jangka menengah dan panjang, terutama dalam sektor energi yang terus dikembangkan (Losada-Maseda dkk., 2020).

Oleh karena itu, OPEX memiliki peran penting dalam menilai efisiensi dan keberlanjutan suatu sistem energi. Dengan melakukan analisis OPEX yang komprehensif, manajemen dapat membuat keputusan yang lebih baik terkait investasi dan operasional, serta memastikan bahwa batas biaya yang ditetapkan dapat dicapai dan dipertahankan selama umur sistem. Pemahaman ini penting tidak hanya bagi perusahaan energi, tetapi juga untuk memandu kebijakan energi nasional agar dapat lebih responsif terhadap tantangan biaya dan keberlanjutan yang ada di sektor energi modern (Masyithah, 2022).

2.7.1 Komponen-komponen Biaya Operasional

Dalam konteks pembangkit energi termal di industri, komponen biaya operasional dapat dikategorikan menjadi beberapa bagian utama sebagai berikut:

a. Biaya bahan bakar

Komponen biaya ini mencakup seluruh pengeluaran yang berhubungan dengan pembelian dan penggunaan bahan bakar utama pada sistem pembakaran. Dalam sistem pembakaran batu bara, biaya ini berfokus pada total biaya pembelian batu bara. Sebaliknya, pada sistem *co-firing*, biaya mencakup kombinasi antara biaya batu bara dan biaya biomassa, disesuaikan dengan rasio pencampuran bahan bakar yang digunakan. Biaya bahan bakar merupakan komponen paling dominan dalam OPEX dan sangat dipengaruhi oleh harga pasar serta efisiensi pemanfaatan energi dari bahan bakar tersebut (Glushkov dkk., 2020).

b. Biaya Pemeliharaan dan perawatan

Biaya ini mencakup kegiatan rutin perawatan terhadap peralatan seperti *boiler* dan ruang bakar. Penerapan *co-firing* bisa mempengaruhi kebutuhan pemeliharaan, karena karakteristik fisik dan kimia dari bahan bakar biomassa dapat beragam, berisi kadar kelembaban dan sifat abrasif yang berbeda dari batu bara. Oleh

karena itu, pemeliharaan yang tepat harus dipertimbangkan untuk memaksimalkan efisiensi operasional dan memperpanjang umur peralatan.

c. Biaya Tenaga Kerja Operasional

Komponen biaya tenaga kerja mencakup gaji dan tunjangan bagi seluruh staf yang terlibat dalam operasional. Ini termasuk operator, teknisi, dan personel pemeliharaan. Penerapan teknologi baru seperti *co-firing* sering kali memerlukan pelatihan tambahan, yang berkontribusi pada biaya operasional. Oleh karena itu, memperhitungkan kebutuhan untuk pelatihan dan mungkin penambahan personel menjadi sangat penting dalam perhitungan biaya (Sofwan dkk., 2021).

d. Biaya Transportasi dan Penanganan Bahan Bakar

Biaya transportasi dan penanganan bahan bakar mencakup biaya yang terkait dengan pengangkutan, bongkar muat, dan penyimpanan bahan bakar. Biomassa sebagai bahan bakar yang memiliki karakteristik berbeda dengan batu bara (misalnya lebih ringan atau lebih besar volumenya), sehingga penanganan dan memerlukan infrastruktur khusus untuk transportasi. Penanganan bahan bakar yang tidak efisien dapat secara signifikan meningkatkan biaya operasional keseluruhan (Mingaleeva dkk., 2020).

e. Biaya Tambahan

Beberapa sistem pembangkit energi memerlukan utilitas tambahan seperti air, listrik, dan bahan kimia. Meskipun biaya utilitas ini tidak sebesar biaya bahan bakar, komponen ini tetap dihitung sebagai bagian dari total OPEX.

2.7.2 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Besarnya Biaya Operasional

Besarnya OPEX dalam suatu sistem pembakaran energi dipengaruhi oleh sejumlah variabel teknis maupun non-teknis. Faktor-faktor utama yang perlu diperhatikan antara lain:

a. Harga bahan bakar

Fluktuasi harga batu bara dan *wood chips* di pasar sangat memengaruhi komponen biaya bahan bakar. Kenaikan harga bahan bakar akan meningkatkan OPEX secara langsung, sementara pilihan bahan bakar alternatif yang lebih murah dapat menjadi strategi penghematan.

b. Efisiensi sistem pembakaran

Sistem dengan efisiensi tinggi akan menghasilkan energi yang lebih besar dari jumlah bahan bakar yang sama. Sebaliknya, sistem yang kurang efisien mengonsumsi bahan bakar lebih banyak, yang berarti peningkatan biaya operasional.

c. Kualitas bahan bakar

Nilai kalor, kadar air, kadar abu, dan karakteristik pembakaran dari batu bara maupun biomassa akan memengaruhi seberapa efektif bahan bakar tersebut menghasilkan energi, kualitas yang rendah membutuhkan konsumsi yang lebih tinggi untuk mencapai output energi yang sama.

d. Kondisi teknis dan umur peralatan

Peralatan yang sudah tua atau kurang terawat cenderung membutuhkan perawatan lebih intensif dan bisa menurunkan efisiensi operasional, pada akhirnya meningkatkan OPEX.

e. Kebijakan internal dan regulasi

Kebijakan efisiensi energi, kebijakan pengadaan bahan bakar, serta peraturan lingkungan hidup juga dapat mempengaruhi komposisi dan besarnya OPEX.

2.7.3 Peran OPEX Dalam Evaluasi Ekonomi *Co-firing*

Evaluasi biaya operasional (OPEX) berperan penting dalam menilai efektivitas dan efisiensi ekonomi penerapan sistem *co-firing*, khususnya dengan menggunakan *wood chips*. *Co-firing* melibatkan pembakaran campuran biomassa dan batu bara, yang diharapkan dapat mengurangi total OPEX melalui penghematan bahan bakar dan pengurangan emisi.

Hal ini memberikan implikasi terhadap efisiensi energi dan biaya operasional, karena prosedur pembakaran yang efisiensi dapat mengurangi penggunaan energi dan biaya operasional secara keseluruhan. Analisis komparatif antara total OPEX untuk pembakaran batu bara murni dan *co-firing* menawarkan wawasan yang berguna. Penghematan biaya diharapkan muncul dari biaya pengadaan bahan baku, pemeliharaan, dan efisiensi sistem yang dapat diperoleh melalui analisis titik impas (*break-even*) dari perspektif operasional (Souza dkk., 2021).

OPEX juga mendukung pengambilan keputusan manajerial dan teknis untuk keberlanjutan sistem energi di perusahaan. Oleh karena itu, mengoptimalkan OPEX dalam sistem *co-firing* tidak hanya berfungsi dalam konteks penghematan biaya tetapi juga dapat meningkatkan keberlanjutan lingkungan dan daya saing ekonomi perusahaan secara keseluruhan. Evaluasi OPEX dalam *co-firing* dapat memberikan basis yang kuat untuk analisis kelayakan dan keberlanjutan dari sistem energi alternatif, terutama di tengah keterbatasan akses informasi investasi kompleks. Kontribusi terhadap pengambilan keputusan berbasis data ini dapat membawa hasil yang signifikan dalam pengembangan strategi manajemen energi yang lebih efektif di masa depan.

2.8 Analisis Biaya Perbandingan Operasional (*Cost Comparison Analysis*)

Analisis Perbandingan Biaya (CCA) adalah metode penting yang digunakan untuk mengevaluasi biaya operasional antara berbagai alternatif dalam suatu proyek atau aktivitas, yang bertujuan untuk mengidentifikasi pilihan yang paling efisien dan ekonomis. Pendekatan ini khususnya berguna dalam evaluasi proyek di mana data biaya investasi awal (CAPEX) jarang atau tidak tersedia, dan sebaliknya berfokus pada pengeluaran rutin yang terjadi selama fase operasional (Pengeluaran Operasional). Di sektor energi dan pembangkit listrik, CCA berfungsi sebagai alat yang berharga untuk membandingkan biaya yang terkait dengan berbagai bahan bakar, teknologi, atau metodologi

operasional. Contoh ilustrasinya adalah penilaian pembakaran batu bara bersama serpihan kayu, yang memungkinkan analisis terperinci dari total biaya operasional yang terlibat dalam pemanfaatan batu bara murni atau campuran batu bara dan biomassa (Truong dkk., 2022). Biaya perbandingan operasional (CCA) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.1 sebagai berikut:

$$CCA = X_b - X_{bw} \quad 2.1$$

Keterangan:

CCA : *Cost Comparison Analysis*.

X_b : total keseluruhan biaya operasional batu bara.

X_{bw} : total keseluruhan biaya operasional batu bara dan *wood chips*

2.8.1 Perhitungan Untuk Mencari Biaya Operasional

Untuk menganalisis biaya operasional kita perlu mengetahui terlebih dahulu nilai dari biaya masing-masing bagian operasional tersebut. Namun, jika nilai tersebut tidak didapatkan nilai spesifiknya hanya dapat menemukan nilai dari versi penelitian lain yang terdahulu maka dilakukanlah teknik interpolasi. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan nilai dari pendekatan dengan cara rumus interpolasi sehingga mengetahui nilai dari biaya yang mendekati harga nilai aslinya.

Adapun rumus dari interpolasi yang digunakan yaitu sebagai berikut (Hidayah dkk., 2025) :

$$y = y_1 + \frac{(x - x_1)(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \quad 2.2$$

Dimana :

x = Nilai yang dicari hasilnya

y = Hasil nilai estimasi yang dicari

x_1, y_1 = Koordinat titik data pertama (batas bawah)

x_2, y_2 = Koordinat titik data pertama (batas atas)

2.9 Biaya Penyusutan

Penyusutan adalah alokasi sistematis jumlah yang dapat disusutkan dari suatu aset selama umur manfaatnya. Definisi lain, penyusutan adalah pengalokasian harga perolehan aset tetap menjadi beban ke dalam periode akuntansi yang menikmati manfaat dari aset tetap tersebut. Tujuannya sebagai nilai buku aset yang realistis dan mengurangi penghasilan kena pajak.

2.9.1 Metode Saldo Menurun (*Double Declining Method*)

Penyusutan dengan menggunakan metode ini mengasumsikan bahwa nilai yang disusutkan pada tahun-tahun awal (pertama) akan memiliki nilai yang lebih besar, karena estimasi umur ekonomis lebih besar. Adapun rumusnya yang digunakan yaitu:

$$\text{Penyusutan} = \text{Sisa Nilai Buku} \times \text{Tarif Penyusutan} \quad 2.3$$

Tarif penyusutan dipercepat yang digunakan dalam metode saldo menurun (*double decline method*) adalah 200% dari tarif yang digunakan dalam metode garis lurus (*straight line*). Jadi, jika aset tetap memiliki umur ekonomis 5 tahun, berarti tarif penyusutan metode garis lurus adalah 20% ($100\% : 5 \text{ tahun}$), sehingga tarif untuk metode saldo menurun adalah 40% (Setiadi, 2020).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PLTU PT. XYZ yang berlokasi di Kecamatan. Terbanggi Besar, Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada penerapan proses pembakaran batu bara dan *co-firing* dengan *wood chips* yang sedang diuji coba pada *boiler* di perusahaan.

3.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah komputer *Central Control Room* (CCR) atau sistem operasi merupakan ruang kontrol yang berfungsi untuk menyatukan, mengendalikan, dan mengoordinasikan semua aktivitas pembangkit secara terus-menerus selama 24 jam. Pengoperasian CCR dilakukan secara otomatis melalui sistem komputer, tetapi juga dapat dilakukan secara manual. Keduanya dikelola oleh seorang operator yang bertugas secara bergantian (*shifting*) selama 24 jam. Di dalam CCR, semua aktivitas dipantau dan dicatat menggunakan *distributed control system* (DCS). Oleh karena itu, CCR berperan penting dalam kelancaran operasional pemanfaatan dan pengelolaan data yang akurat. Data operasional yang diperoleh dari sistem DCS digunakan sebagai dasar dalam analisis kinerja pembangkit dan perhitungan biaya operasional.

3.3 Teknik Pengumpulan Data

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

3.3.1 Studi Literatur

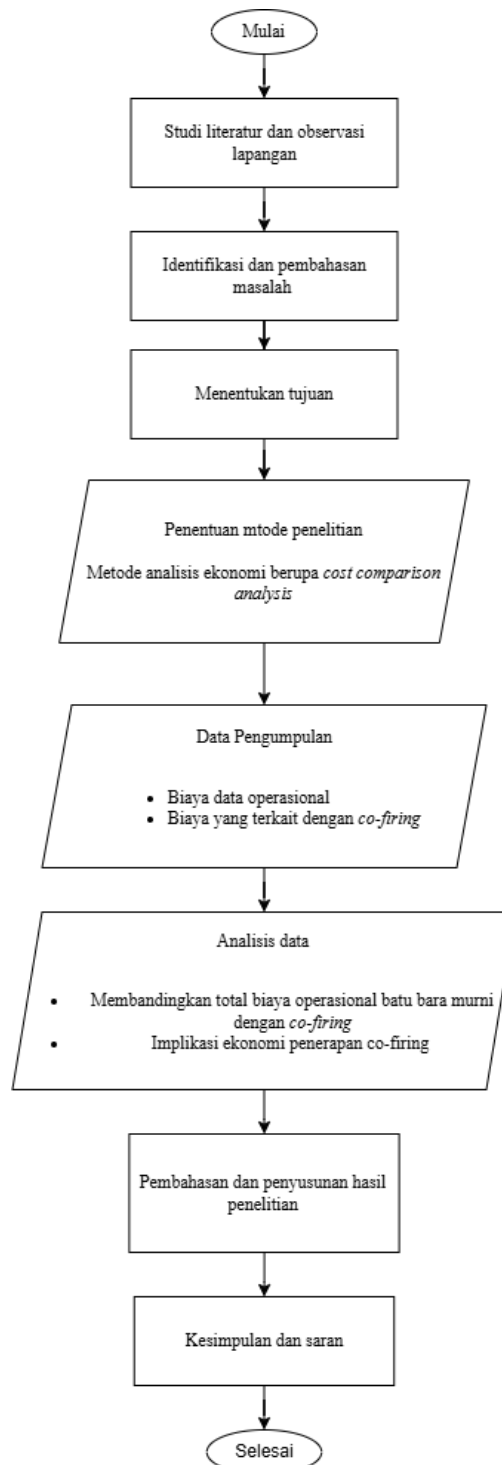
Melakukan studi literatur dengan mengumpulkan berbagai sumber informasi yang relevan, termasuk buku, jurnal ilmiah, artikel penelitian, dan laporan dari studi sebelumnya, yang membahas secara menyeluruh tentang teori dasar, penerapan teknologi *co-firing* biomassa metode perhitungan OPEX, analisis biaya perbandingan operasional, dan *break event point*. Studi literatur ini juga mencakup analisis data teknis dan ekonomi, terutama yang berkaitan dengan jenis dan karakteristik bahan bakar. Selain itu, perbandingan biaya antara penggunaan batu bara murni dan campuran biomassa juga akan dijelaskan.

3.3.2 Metode Observasi

Metode observasi dilakukan selama proses pembakaran batu bara dan *co-firing* dijalankan. Observasi difokuskan pada pengumpulan data operasional yang berkaitan dengan biaya operasional (OPEX), tanpa melakukan intervensi saat dijalankan. Pengamatan dilakukan melalui pemantauan data operasional di *central control room* (CCR), di mana meliputi konsumsi bahan bakar serta pencatatan biaya-biaya yang timbul selama masing-masing skenario pembakaran. Selain itu, observasi juga didukung dengan diskusi bersama pembimbing lapangan dan operator untuk memastikan kesesuaian data yang diperoleh di lapangan. Data hasil observasi digunakan sebagai data pendukung dalam perhitungan total biaya operasional dan analisis perbandingan biaya (*cost comparison analysis*), sehingga diperoleh gambaran yang nyata mengenai dampak ekonomi dari penerapan *co-firing* dibandingkan dengan penggunaan batu bara murni.

3.4 Alur Penelitian

Berikut merupakan diagram alur pelaksanaan penelitian dari awal sampai selesai penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1 di bawah ini:



Gambar 3.1 Diagram alur penelitian

3.5 Analisis Data

Data yang telah diperoleh dari hasil observasi dan studi literatur selanjutnya dianalisis untuk mengetahui perbandingan biaya operasional (OPEX) antara penggunaan batu bara murni dan penerapan *co-firing*. Analisis data difokuskan pada komponen biaya operasional yang relevan, seperti bahan bakar, biaya tenaga kerja, biaya listrik dan biaya pendukung lainnya. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *cost comparison analysis* (CCA).

CCA digunakan untuk membandingkan total biaya operasional dari masing-masing skenario pembakaran. Metode ini dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan 2.1. Hasil perhitungan CCA menunjukkan besarnya selisih biaya operasional yang timbul akibat penerapan *co-firing* dibandingkan dengan kondisi *baseline*.

Selain itu, hasil analisis CCA digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi perubahan biaya operasional pada berbagai rasio *co-firing* batu bara dengan *wood chips*. Perubahan tersebut dianalisis untuk mengidentifikasi kontribusi masing-masing komponen biaya terhadap total OPEX serta kecenderungan peningkatan biaya yang terjadi akibat penambahan biomassa. Hasil analisis ini selanjutnya menjadi dasar dalam pembahasan implikasi ekonomi penerapan *co-firing* pada Bab IV.

Melalui analisis CCA, penelitian ini memberikan gambaran mengenai dampak ekonomi pada penerapan *co-firing* batu bara dengan *wood chips* ditinjau dari perubahan biaya operasional pembangkit.

3.6 Analisis Biaya

Pada biaya operasional dapat diperoleh dengan menghitung sesuai dengan parameternya. Evaluasi dilakukan terhadap komponen biaya utama yang meliputi biaya bahan bakar, tenaga kerja, listrik perawatan, penyusutan dan solar. Berikut biaya parameter yang terdapat pada penelitian ini antara lain:

3.6.1 Biaya bahan bakar

Perhitungan biaya bahan bakar pada penelitian ini dilakukan dengan mengalikan total penggunaan bahan bakar per hari dengan harga satuan masing-masing bahan bakar, sehingga diperoleh nilai biaya harian yang merepresentasikan pengeluaran operasional aktual pada setiap skenario pembakaran. Pendekatan ini digunakan untuk memperoleh biaya operasional aktual yang dikeluarkan pada setiap skenario pembakarannya.

3.6.2 Biaya pekerja

Biaya pekerja merupakan komponen biaya operasional tetap yang dihitung berdasarkan UMR kabupaten Lampung Tengah tahun 2024 dengan asumsi waktu kerja 25 hari/bulan. Upah harian diperoleh dari pembagian UMR bulanan dengan jumlah hari kerja efektif, sehingga mencerminkan biaya tenaga kerja per hari yang dikeluarkan dalam operasi pembangkit. Penelitian ini, biaya pekerja diasumsikan konstan pada setiap skenario pembakaran karena penerapan *co-firing* tidak mengubah jumlah tenaga kerja yang dibutuhkan. Oleh karena itu, kontribusi biaya pekerja terhadap variasi total biaya operasional relatif kecil dibandingkan dengan biaya bahan bakar.

3.6.3 Biaya listrik

Biaya listrik dihitung berdasarkan biaya produksi steam yang diperoleh dari nilai HPP *steam*, kemudian dikalikan dengan persentase energi listrik (50%). Pendekatan ini digunakan dengan asumsi bahwa sebagian energi yang dihasilkan dari proses pembangkitan dialokasikan untuk memenuhi kebutuhan listrik operasional sistem. Dengan demikian, biaya listrik mencerminkan proporsi penggunaan energi internal pembangkit yang berasal dari konversi energi *steam*.

3.6.4 Biaya perawatan

Biaya perawatan pada penelitian ini diperoleh melalui metode interpolasi dari beberapa jurnal yang memiliki karakteristik sistem dan kapasitas pembangkit yang mendekati penelitian, yaitu sekitar 10 MW. Pendekatan interpolasi digunakan untuk menyesuaikan data biaya perawatan dari literatur agar relevan dengan kapasitas dan kondisi operasional pembangkit yang dianalisis. Biaya perawatan mencakup kegiatan pemeliharaan rutin, perbaikan komponen, dan penggantian suku cadang guna menjaga keandalan sistem.

3.6.5 Biaya penyusutan

Biaya penyusutan diperoleh melalui metode interpolasi dari beberapa jurnal yang memiliki spesifikasi pembangkit dan kapasitas mendekati penelitian yaitu 10 MW, sehingga nilai investasi peralatan dapat disesuaikan dengan kondisi sistem yang dianalisis. Perhitungan penyusutan dilakukan menggunakan metode saldo menurun (*double decline method*), yaitu metode yang memberikan beban penyusutan lebih besar pada awal umur aset dan menurun pada periode berikutnya. Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan penurunan nilai peralatan yang lebih cepat pada fase awal operasi akibat intensitas penggunaan yang tinggi. Biaya penyusutan kemudian dikonversikan menjadi biaya harian untuk dimasukkan ke dalam komponen biaya operasional.

3.6.6 Biaya solar

Biaya solar dihitung berdasarkan asumsi harga bahan bakar solar industri sebesar Rp160.000/liter dengan waktu operasi 10 jam/hari. Solar digunakan sebagai sumber energi untuk *shovel* yang berfungsi dalam proses *handling* bahan bakar *co-firing*, seperti pemindahan dan penataan bahan bakar. Perhitungan biaya solar dilakukan dengan mengalikan konsumsi bahan bakar alat berat selama jam kerja dengan harga satuan solar, sehingga diperoleh biaya operasional harian.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan ini yaitu sebagai berikut:

1. Total biaya operasional menunjukkan penggunaan batu bara murni (100% batu bara) menghasilkan rata-rata biaya operasional terendah sebesar Rp612.271.028, sedangkan penambahan *wood chips* sebesar 5% meningkatkan biaya menjadi naik 4,66%, dan penambahan *wood chips* 10% meningkatkan biaya menjadi naik 6,21% dari skenario batu bara murni. Fenomena yang terjadi pada kestabilan energi yang dihasilkan oleh *boiler* dengan *co-firing wood chips* ini, peningkatan yang dihasilkan dinamis dan tidak stabil (statis) ini diakibatkan *wood chips* yang tidak diberikan perlakuan khusus. Sehingga biaya operasional tersebut masih mengalami pembengkakan biaya yang berpotensi membuat kerugian bagi perusahaan.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan oleh penulis untuk pengembangan dan kemajuan dalam bidang penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Diperlukan data yang lebih detail dan terperinci dari sumber atau tempat yang diteliti guna mendapatkan data yang lebih akurat.

2. Dibutuhkan kerja sama yang lebih baik antara pihak yang dimintai sebagai narasumbernya guna mendukung data yang lebih baik dan relevan untuk penelitian kedepannya.
3. Diperlukan sistem analisis yang lebih mendalam terkait bagaimana perkembangan serta potensi dari *co-firing* batu bara dengan *wood chips* melalui segi ekonomi teknik nya.

DAFTAR PUSTAKA

- Desty Rara Retna Kalude, S.T, M.Ars. Andi Andre Pratama Putra, M. A. (2021). *Ekonomi Teknik*. <https://tahtamedia.co.id/index.php/issj/article/view/613>
- Direktorat Bioenergi, United Nations Development Programme, & PT Cagar Bentara Sakti. (2021). Pedoman Investasi Pembangkit Listrik Tenaga Bioenergi.
- Dr. Mukhtar Lutfie, ST., M., & Dr. Firman Menne, S.E., M.Si., Ak., CA Zoel Dirga Dinhi, S.E., M.Si., Ak., C. (2023). “Anlisa Perbandingan Sistem Konvensional dan Syariah Serta Aplikasinya” (hal. 1–50). <https://tahtamedia.co.id/index.php/issj/article/view/308>
- Fania Naviza, Gunardi Djoko Winarno, Wahyu Hidayat, S. B. Y. (2023). Peluang Keanekaragaman Jenis Biomas Untuk Energi Biomas Species Diversity Opportunities For Biomass Energy. *Journal Of Forestry Research*, 6(2), 63–71. <https://doi.org/10.32662/gjfr.v6i2.3055>
- Glushkov, D., Kuznetsov, G., & Paushkina, K. (2020). *Switching Coal-Fired Thermal Power Plant To Composite Fuel For Recovering Industrial And Municipal Waste: Combustion Characteristics, Emissions, And Economic Effect. Energies*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/en13010259>
- Hapsari, C. A., Nurdijat, Gani, R. M. G., & Wibisono, S. A. (2022). Karakteristik Batubara pada Sumur MK-02 Berdasarkan Analisis Proksimat, Ultimat, dan Komposisi Maserat. *Padjadjaran Geoscience Journal*, 6(4), 967–972. <https://doi.org/10.24198/pgj.v6i4.45242>
- Hidayah, T. N., Nisa', A. K., & Wibowo, A. (2025). Implementasi Polinomial Lagrange Dalam Prediksi Jumlah Kelahiran Di Indonesia Menggunakan Microsoft Excel. *De Fermat : Jurnal Pendidikan Matematika*, 8(1 SE-

- Articles), 35–43. <https://doi.org/10.36277/defermat.v8i1.2251>
- Khoiriah Nasution, R., Rijalul Haq, S., Agung Cahyadi, T., & Ernawati, R. (2024). Metode Komparasi *Co-Firing* Menggunakan Biomassa untuk Mengurangi Emisi pada PLTU – Literature Review Rizki. *Jurnal Geomine*, 12, 173–183. <https://jurnal.fti.umi.ac.id/index.php/JG/article/download/1222/653/5378>
- Koesalamwardi, A. B., Eldrian, A., Irene, & Tjahyadi, W. (2020). Kelayakan Finansial Near Zero Energy Building Dengan Peraturan Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral No. 49 Tahun 2018 Mengenai Insentif Energi Terbarukan. *Jurnal Infrastruktur*, 6(1), 69–75. <https://doi.org/10.35814/infrastruktur.v6i1.1421>
- Larasati, S. A., Abidin, Z., & Endaryanto, T. (2019). Analisis Finansial Pemanfaatan Ampas Tebu (Bagasse) Sebagai Bahan Bakar Pembangkit Listrik Di Pt Gunung Madu Plantations. *Jurnal Ilmu Ilmu Agribisnis*, 7(3), 314–322.
- Leadtrees, W., & Needs, W. C. (2025). Analysis Of The Coal And White Leadtree Wood Co-Firing Needs As A Primary Fuel Source In The Anggrek Gorontalo Coal-Steam Electricity Power Plant (PLTU). 39–46. <https://doi.org/10.23917/emit.v25i1.8758>
- Losada-Maseda, J. J., Castro-Santos, L., Graña-López, M. Á., García-Diez, A. I., & Filgueira-Vizoso, A. (2020). Analysis Of Contracts To Build Energy Infrastructures To Optimize The OPEX. *Sustainability (Switzerland)*, 12(17), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su12177232>
- Maskur, Z., & Nugroho, A. (2021). Analisa Karakteristik Biomasa untuk Cofiring pada Pembangkit Batubara di Indonesia. *Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan I (SENASTITAN I)*, 394–402. <https://ejurnal.itats.ac.id/senastitan/article/view/1667>
- Masyithah, I. (2022). Dampak Komponen Biaya Operasional Terhadap Pendapatan Murabahah Bank Kalbar Syariah. *Jurnal Muamalat Indonesia - Jmi*, 2(2), 103–118. <https://doi.org/10.26418/jmi.v2i2.58453>
- Mingaleeva, G., Afanaseva, O., Zunino, P., Nguen, D. T., & Pham, D. N. (2020).

- The Integration Of Hybrid Mini Thermal Power Plants Into The Energy Complex Of The Republic Of Vietnam. *Energies*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/en13215848>
- Misli, Hiendro, A., & Suryadi, D. (2020). Studi Energy Return Of Invesment Pltu (Batubara) Di Kabupaten Bengkayang. Universitas Tanjungpura.
- Pahlevi, R., Thamrin, S., Ahmad, I., & Nugroho, F. B. (2024). Masa Depan Pemanfaatan Batubara sebagai Sumber Energi di Indonesia. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 5(2), 50–60. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.22973>
- Palupi, D. N., Sundari, S., Syahtaria, M. I., & Sianipar, L. (2024). Analisis Dampak Lingkungan dan Keekonomian Pembangkit Listrik Tenaga Co-firing Biomassa dan Baru bara sebagai Upaya Bauran Energi Terbarukan. 5, 1363. <https://doi.org/10.47467/elmal.v5i3.4712>
- Pedišius, N., Praspaliauskas, M., Pedišius, J., & Dzenajavičienė, E. F. (2021). Analysis Of Wood Chip Characteristics For Energy Production In Lithuania. *Energies*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/en14133931>
- Purwadi, T. Utomo, M. (2023). Analisis Ekperimental Co-Firing Biomassa Bonggol Jagung Dengan Batubara. *Jurnal Teknik Mesin S-I*, 11(3), 506–511. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/41051>
- Rahman, A., Marufuzzaman, M., Street, J., Wooten, J., Gude, V. G., Buchanan, R., & Wang, H. (2024). A Comprehensive Review On Wood Chip Moisture Content Assessment And Prediction. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 189). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113843>
- Setiadi. (2020). Jurnal Bisnis Dan Akuntansi Unsurya (Studi Kasus Pada PT Chandra Sakti Utama Leasing Jakarta) Jurnal Bisnis Dan Akuntansi Unsurya. 5(2), 111–121. <https://doi.org/10.35968/jbau.v5i2.434>
- Shintawaty, L. (2019). Perbandingan Biaya Penggunaan Energi Bahan Bakar Batubara Dan Gas Pada Pembangkit Listrik. *Jurnal Desiminasi Teknologi*, 7(2), 99–108. <https://univ-tridianti.ac.id/ejournal/index.php/teknik/article/viewFile/506/483>

- Sidiq, A. N. (2022). Pengaruh Co-Firing Biomassa terhadap Efisiensi Boiler PLTU Batubara. *Kilat*, 11(1), 21–31. <https://doi.org/10.33322/kilat.v11i1.1553>
- Sofwan, A., Febriansyah, M., & Sugeng, S. (2021). Operational Cost Reduction of Gas-Thermal Power Plant Based on Bat Algorithm. *Sinergi*, 25(2), 185. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2021.2.010>
- Souza, A. G. O., De Barbosa, F. S., Esperancini, M. S. T., & Guerra, S. P. S. (2021). Economic Feasibility Of Electrical Power Cogeneration From Forestry Biomass In An Engineered Wood Panel Industrial Facility. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 42(2), 313–320. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.873>
- Syah, A., Yani, F., & Ruslan, D. (2025). Pengaruh Perekonomian Mikro dan Makro terhadap Pertumbuhan Ekonomi Indonesia. 5(1), 367–377. <https://doi.org/10.37481/jmh.v5i1.1201>
- Truong, A. H., Ha-Duong, M., & Tran, H. A. (2022). *Economics Of Co-Firing Rice Straw In Coal Power Plants In Vietnam*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111742>