INSTITUT TEKNOLOGI PLN

SKRIPSI

PENGARUH PENINGKATAN KOMPOSISI *CO-FIRING WOODCHIP* TERHADAP EFISIENSI BOILER TIPE *CIRCULATING FLUIDIZED BED* PADA PLTU BENGKAYANG

DISUSUN OLEH:

ARIF NURHADI

NIM: 202412528

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNOLOGI DAN BISNIS ENERGI

INSTITUT TEKNOLOGI PLN

JAKARTA 2026

PENGARUH PENINGKATAN KOMPOSISI *CO-FIRING WOODCHIP* TERHADAP EFISIENSI BOILER TIPE *CIRCULATING FLUIDIZED BED* PADA PLTU BENGKAYANG

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Guna Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh:

ARIF NURHADI

NIM: 202412528

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNOLOGI DAN BISNIS ENERGI

INSTITUT TEKNOLOGI PLN

JAKARTA 2026

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Nama	: Arif Nurhadi
NIM	: 202412528
Program Studi	: Teknik Mesin
Judul Skripsi	: Pengaruh Peningkatan Komposisi *Co-Firing Woodchip* terhadap Efisiensi *Boiler* Tipe *Circulating fluidized* bed pada PLTU Bengkayang

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam Skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar Sarjana baik di lingkungan Institut Teknologi PLN maupun di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka. Pernyataan ini dibuat dengan penuh kesadaran dan rasa tanggung jawab serta bersedia memikul segala resiko jika ternyata pernyataan ini tidak benar.

Pontianak, Agustus 2026



(Arif Nurhadi)

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Judul tugas akhir	:	Pengaruh Peningkatan Komposisi *Co-Firing Woodchip* terhadap Efisiensi *Boiler* Tipe *Circulating fluidized* bed pada PLTU Bengkayang
Nama mahasiswa	:	ARIF NURHADI
NIM	:	202412528
Program studi	:	S1 Teknik Mesin
Fakultas/Sekolah	:	Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi

Disetujui oleh

Pembimbing I

Dr. Hendri, S.T., M.T
NIDN : 0305058207 Tanda Tangan



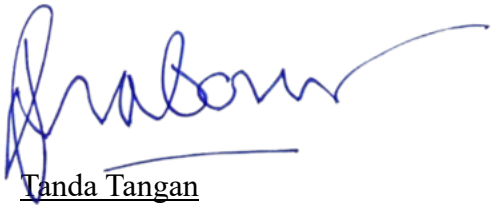
Diketahui oleh

Kepala Program Studi



M Ridwan, S.T., M.T
NIDN : 0315049103 Tanda Tangan

Dekan/Direktur



Dr. Eri Prabowo, S.T., M. M., IPU
NIDN : 0308126604 Tanda Tangan

Tanggal ujian : 22 Agustus 2026 Tanggal lulus : …….

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Judul tugas akhir	:	Pengaruh Peningkatan Komposisi *Co-Firing Woodchip* terhadap Efisiensi *Boiler* Tipe *Circulating fluidized* bed pada PLTU Bengkayang
Nama mahasiswa	:	ARIF NURHADI
NIM	:	202412528
Program studi	:	S1 Teknik Mesin
Fakultas/Sekolah	:	Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi

Disetujui oleh

Ketua Penguji

Eko Sulistiyo, S.T., M.Si
NIDN : 0301027604

Tanda Tangan

Anggota Penguji I

Ir. Roswati Nurhasanah, S.T., M.T
NIDN : 0302018806

Tanda Tangan

Anggota Penguji II/Pembimbing

Dr. Hendri, S.T., M.T
NIDN : 0305058207

Tanda Tangan

Diketahui oleh,

Kepala Program Studi

M Ridwan, S.T., M.T
NIDN : 0315049103

Tanda Tangan

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan ini saya sampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada yang terhormat:

Bapak Dr. Hendri, ST., MT Selaku Dosen Pembimbing

Yang telah memberikan petunjuk, saran-saran serta bimbingannya sehingga Skripsi ini dapat diselesaikan.

Terima kasih juga saya sampaikan kepada:

1. Istri dan anak-anak, dengan keluasan dan kesabaran selama menemani,
2. PT PLN Indonesia Power UBP Singkawang,
3. Bidang Perencanaan dan Sub Bidang Manrisk & Kepatuhan PT PLN (Persero) UIP Kalimantan Bagian Barat

Yang telah mengijinkan pengambilan data dan mendukung pelaksanaan penyusunan skripsi ini.

Pontianak, Agustus 2026



(Arif Nurhadi)

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Institut Teknologi - PLN, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Arif Nurhadi
NIM : 202412528
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Fakultas : Teknologi dan Bisnis Energi
Jenis Karya : **Skripsi**

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Institut Teknologi PLN **Hak Bebas Royalti Non eksklusif (*Non- exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

"PENGARUH PENINGKATAN KOMPOSISI *CO-FIRING WOODCHIP* TERHADAP EFISIENSI *BOILER* TIPE *CIRCULATING FLUIDIZED BED* PADA PLTU BENGKAYANG"

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non eksklusif ini Institut Teknologi PLN berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan **Skripsi** saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Pontianak
Pada tanggal: Agustus 2026
Yang menyatakan,



(Arif Nurhadi)

PENGARUH PENINGKATAN KOMPOSISI *CO-FIRING WOODCHIP* TERHADAP EFISIENSI *BOILER* TIPE *CIRCULATING FLUIDIZED BED* PADA PLTU BENGKAYANG

Arif Nurhadi, 202412528

Dibawah bimbingan Hendri, ST., MT.

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan energi listrik di Indonesia masih didominasi oleh penggunaan batubara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Kondisi ini memicu peningkatan emisi gas rumah kaca yang berdampak pada lingkungan. Salah satu solusi yang diterapkan adalah *co-firing* biomassa, yaitu pencampuran biomassa dengan batubara sebagai bahan bakar alternatif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh peningkatan komposisi co-firing biomassa terhadap efisiensi boiler tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB) pada PLTU Bengkayang.Metode yang digunakan adalah metode tidak langsung (*indirect method*) berdasarkan standar ASME PTC 4.1 dengan pendekatan perhitungan *heat loss*. Data yang digunakan berupa parameter operasi boiler pada kondisi beban 45MW dengan variasi komposisi bahan bakar yaitu 100% batubara, 5% biomassa, dan 10% biomassa. Biomassa yang digunakan berupa *woodchip* dengan nilai kalor lebih rendah dibandingkan batubara.Hasil penelitian diharapkan dapat menunjukkan adanya perubahan efisiensi boiler akibat variasi komposisi *co-firing* biomassa. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai efisiensi pada saat *commissioning* (100% batubara) dan saat operasi co-firing. Hasil penelitian didapatkan, peningkatan persentase komposisi biomassa hingga 10%, menyebabkan efisiensi boiler turun sebesar 0,07% pada komposisi biomassa 5% dan 0,08% pada komposisi biomassa 10%. Namun bertambahnya persentase *Co-Firing* cenderung menurunkan emisi gas buang SO_2 dan NO_2 dan tetap dalam batas baku mutu KLHK.

Kata Kunci: *co-firing biomassa, efisiensi boiler, CFB, heat loss.*

THE EFFECT OF INCREASING WOODCHIP CO-FIRING *COMPOSITION ON BOILER EFFICIENCY (CIRCULATING FLUIDIZED BED) IN BENGKAYANG CFSPP*

Arif Nurhadi, 202412528

Under the Guidance of Hendri, ST ., MT.

ABSTRACT

The increasing demand for electrical energy in Indonesia is still predominantly met through coal utilization in steam power plants. This condition contributes to increased greenhouse gas emissions and adverse environmental impacts. One solution implemented to reduce coal consumption is biomass co-firing, which involves blending biomass with coal as an alternative fuel. This study aims to analyze the effect of increasing biomass co-firing composition on the efficiency of a Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler at the Bengkayang Steam Power Plant.

The boiler efficiency was evaluated using the indirect method based on the ASME PTC 4.1 standard through a heat-loss calculation approach. The data consisted of boiler operating parameters at a constant load of 45 MW under three fuel composition scenarios: 100% coal, 5% biomass co-firing, and 10% biomass co-firing. The biomass used in this study was wood chips, which have a lower calorific value than coal.

The analysis compared boiler efficiency during commissioning using 100% coal with boiler efficiency during biomass co-firing operations. The results showed that increasing the biomass proportion to 5% reduced boiler efficiency by 0.07%, while a 10% biomass composition resulted in a reduction of 0.08%. Despite this slight decrease in boiler efficiency, increasing the biomass co-firing proportion tended to reduce SO_2 and NO_2 emissions. The measured emissions remained within the environmental quality standards established by the Indonesian Ministry of Environment and Forestry. These findings indicate that biomass co-firing can reduce pollutant emissions with only a marginal effect on the efficiency of the CFB boiler.

Key Words: *co-firing biomass, efisiensi boiler, CFB, heat loss.*

DAFTAR ISI

Halaman Judul ii
Pernyataan Keaslian Skripsi iii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING iv
LEMBAR PENGESAHAN TIM PENGUJI v
UCAPAN TERIMA KASIH vi
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS vii
ABSTRAK viii
ABSTRACT ix
DAFTAR ISI x
DAFTAR TABEL xiii
DAFTAR GAMBAR xiv
DAFTAR LAMPIRAN xv
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Tujuan Penelitian 4
1.4 Manfaat Penelitian 4
1.5 Ruang Lingkup Masalah 4
1.6 Sistematika Penulisan 5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7
2.1 Penelitian yang Relevan 7
2.1.1. Pengaruh Operasi *Co-Firing* Biomassa terhadap Efisiensi *Boiler* PLTU Batubara (Agus Noor Sidiq, E-ISSN: 2655-4925) 7
2.1.2. Analisis kelayakan energi proses *Co-Firing* batubara dan *Woodchip* pada Pembangkit Listrik (Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, 2024) 7
2.2 Landasan Teori 8
2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap 8
2.2.2 *Boiler* 10
2.2.2.1 *Boiler Stoker* 11
2.2.2.2 *Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler* 11
2.2.2.3 *Pulverized Coal (PC) Boiler* 12
2.2.3 *Boiler* PLTU Bengkayang 13

2.2.4 Nilai Kalor Batubara 14
2.2.5 Analisis Batubara 15
2.2.6 Studi Metode Operasi *Co-Firing* (Batubara dengan Biomassa) 16
2.2.7 Efisiensi *Boiler* 18
2.2.7.1 Efisiensi Pembakaran 19
2.2.7.2 Efisiensi Termal 20
2.2.8 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi *Boiler* 26
2.2.8.1 Kualitas Bahan Bakar 26
2.2.8.2 Pengaturan Pembakaran 27
2.2.8.3 Desain *Boiler* 27
2.2.8.4 Pemeliharaan dan Perawatan 27
2.2.8.5 Sistem Kontrol dan Otomasi 27
2.2.8.6 Suhu dan Tekanan Operasi 27
2.2.8.7 Kualitas Air 28
2.2.8.8 Sistem Pengeluaran Gas Buang 28
2.2.8.9 Isolasi *Boiler* 28
2.2.8.10 Kondisi Lingkungan 28
2.2.9 Diagram Sankey 28
BAB III METODE PENELITIAN 30
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian 30
3.1.1 Tempat Penelitian 30
3.1.2 Waktu Penelitian 30
3.2 Desain Penelitian 31
3.3 Metode Pengumpulan Data 32
3.4 Metode Analisis Data 33
3.5 Jadwal Penelitian 35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 36
4.1 Hasil 36
4.1.1 Kebutuhan Biomassa *Woodchip* 36
4.1.2 Karakteristik Bahan Bakar Yang Digunakan 38
4.2 Pembahasan 400
4.2.1 Perbandingan Efisiensi *Boiler* dengan Persentase Komposisi Campuran Biomassa 400
4.2.2 Pengamatan parameter operasi co-firing 10% 42

4.2.3 Perhitungan Data 44
4.2.3.1 *Menghitung kehilangan panas dalam gas buang kering* 45
4.2.3.2 *Menghitung kehilangan panas akibat kelembaban dalam bahan bakar* 45
4.3.2.3 *Menghitung kehilangan panas akibat hidrogen dalam bahan bakar* 45
4.3.2.4 *Menghitung kehilangan panas akibat kelembaban dalam udara* 45
4.3.2.5 *Menghitung kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna* 46
4.3.2.6 *Menghitung kehilangan panas akibat karena radiasi* 46
4.3.2.7 *Menghitung kehilangan panas akibat carbon yang tidak terbakar dan terbawa fly ash* 46
4.3.2.8 *Menghitung kehilangan panas akibat carbon yang tidak terbakar dan terbawa bottom ash* 46
4.2.4 Perbandingan efisiensi boiler 47
4.2.5 Diagram Sankey 49
4.2.6 Analisa Heat Loss 51
4.2.6.1 *kehilangan panas dalam gas buang kering* 51
4.2.6.2 *kehilangan panas akibat kelembaban dalam bahan bakar* 53
4.3.6.3 *kehilangan panas akibat hidrogen dalam bahan bakar* 55
4.3.6.4 *kehilangan panas akibat kelembaban dalam udara* 57
4.3.6.5 *kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna* 58
4.3.6.6 *kehilangan panas akibat karena radiasi* 60
4.3.6.7 *kehilangan panas akibat carbon yang tdk terbakar dan terbawa fly ash* 61
4.3.6.8 *Menghitung kehilangan panas akibat carbon yang tidak terbakar dan terbawa bottom ash* 62
4.2.7 Analisa Operasi PLTU 64
4.2.8 Evaluasi Lingkungan 65
BAB V PENUTUP 67
5.1 Kesimpulan 67
5.2 Saran 68
DAFTAR PUSTAKA 69
LAMPIRAN 70
DAFTAR RIWAYAT HIDUP 76

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Spesifikasi *Boiler* PLTU Bengkayang (Wuxi Huangguang Boiler) 13
Tabel 2. 2 GCV untuk berbagai jenis Batubara 185
Tabel 2. 3 Perbandingan Opsi Teknologi *Co-Firing* 187
Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian 355
Tabel 4. 1 Estimasi Total Kebutuhan Biomassa dan Batubara Pengujian *Co-Firing* ... 366
Tabel 4. 2 Komparasi Karakteristik Batubara dan Biomassa *Woodchip* 388
Tabel 4. 3 Parameter desain boiler PLTU Bengkayang 41
Tabel 4. 4 Spesifikasi desain bahan bakar PLTU Bengkayang 41
Tabel 4. 5 Perbandingan karakteristik campuran 5% dan 10% 42
Tabel 4. 6 Data operasi pada pengujian co-firing 10% 43
Tabel 4. 7 Data perhitungan efisiensi boiler PLTU Bengkayang Unit 2 44
Tabel 4. 8 Perbandingan hasil perhitungan Heat Losses 57
Tabel 4. 9 Data Operasi pada Performance test PLTU Bengkayang Unit 2 64
Tabel 4. 10 Baku mutu emisi PLTU Batubara 66
Tabel 4. 11 Pengujian emisi operasi 0% woodchip dan 10% woodchip 66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Prinsip Kerja PLTU 8
Gambar 2. 2 Sistem Udara dan Gas Buang (M.M. EL Wakil, 2015) 10
Gambar 2. 3 Skematik *Boiler Stocker* (Ta'nezuk et al., 2018) 11
Gambar 2. 4 Skematik *Boiler Circulating Fluidezed Bed* (Ta'nezuk et al., 2018) 12
Gambar 2. 5 Skematik *Boiler Pulverized Coal* (Ta'nezuk et al., 2018) 13
Gambar 2. 6 Opsi Skema *Co-Firing* (Livingston, 2016) 166
Gambar 2. 7 Skema Perhitungan Efisiensi *Boiler* secara Metode Langsung 221
Gambar 2. 8 Skema Perhitungan Efisiensi *Boiler* secara Metode Tidak Langsung 222
Gambar 2. 9 Bagan *Boiler* Efisiensi (ASME PTC 4.1, 2008) 266
Gambar 2. 10 Diagram *Sankey* (Hendrayati, 2012). 299
Gambar 3. 1 PLTU Bengkayang (2x50 MW) 30
Gambar 3. 2 Diagram Alir / *Flowchart* Desain Penelitian 322
Gambar 4. 1 Proses *Biomass Mixing* di PLTU Bengkayang 377
Gambar 4. 2 Grafik Pengamatan Operasi (a) Load dan (b) Coal Biomass Flow 43
Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Efisiensi Boiler dalam Berbagai Skema Operasi 47
Gambar 4. 4 Diagram Sankey Commisioning 49
Gambar 4. 5 Diagram Sankey Performance test 100% Coal 49
Gambar 4. 6 Diagram Sankey co-firing 5% woodchip 50
Gambar 4. 6 Diagram Sankey co-firing 10% woodchip 50
Gambar 4. 8 Grafik kehilangan panas akibat gas buang kering 661
Gambar 4. 9 Grafik kehilangan panas akibat kelembaban dalam bahan bakar 663
Gambar 4. 10 Grafik kehilangan panas akibat hidrogen dalam bahan bakar 665
Gambar 4. 11 Grafik kehilangan panas akibat kelembaban dalam udara 667
Gambar 4. 12 Grafik kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna 668
Gambar 4. 13 Grafik kehilangan panas akibat radiasi pada permukaan boiler 60
Gambar 4. 14 Grafik kehilangan panas akibat carbon tdk terbakar dan terbawa fly ash 61
Gambar 4. 15 Grafik kehilangan panas akibat carbon tdk terbakar dan terbawa bottom 62
Gambar 4. 16 Grafik Pengujian emisi co-firing 0% dan 10% 66

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data pengujian pada saat *Commissioning* 70
Lampiran 2 Sampel *Certificate of Sample and Analysis* (COA) Batubara 722
Lampiran 3 Sampel *Certificate of Sample and Analysis* (COA) *Woodchip* 755
Lampiran 4 Daftar riwayat hidup 756

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan listrik global terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan populasi di dunia, di mana pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil, khususnya batubara, masih menjadi sumber utama penyedia energi. Di Indonesia, dominasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara masih sangat tinggi karena ketersediaannya yang melimpah dan biaya operasional yang relatif rendah. Namun demikian, penggunaan batubara secara masif berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca seperti CO_2, SOx, dan NOx yang berdampak pada perubahan iklim global serta degradasi kualitas lingkungan (Irawan et al., n.d.)

Sejalan dengan komitmen dunia untuk menurunkan emisi karbon, pemerintah Indonesia melalui kebijakan energi nasional mulai mendorong peralihan ke energi bersih. Salah satu pendekatan yang diterapkan adalah pemanfaatan biomassa melalui skema co-firing di PLTU yang sudah ada. Inisiatif ini merupakan bagian dari usaha untuk memenuhi target Net Zero Emission (NZE) sekaligus meningkatkan peran energi terbarukan dalam komposisi energi nasional. (Rewindo & Nurhasanah, 2025)

Secara nasional, potensi biomassa sebagai sumber energi terbarukan sangat besar. Data menunjukkan bahwa potensi biomassa di Indonesia mencapai sekitar 57 GW, dengan proyeksi peningkatan pembangkitan bioenergi hingga 15 kali lipat dari 17 TWh pada tahun 2025 menjadi sekitar 260 TWh pada tahun 2050 (JETP Indonesia, 2023) . Ini menunjukkan bahwa biomassa memainkan peran penting dalam membantu pergeseran energi dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Implementasi co-firing biomassa pada PLTU, khususnya dengan teknologi *Circulating Fluidized Bed (CFB)*, menjadi solusi yang relatif mudah diterapkan karena tidak memerlukan perubahan signifikan pada sistem pembakaran. Teknologi

CFB memiliki keunggulan dalam fleksibilitas bahan bakar, efisiensi pembakaran yang tinggi, serta kemampuan mengurangi emisi polutan melalui proses pencampuran bahan bakar yang homogen (Legowo et al., 2024)

Saat ini kita memasuki era industri 4.0 yang mana energi menjadi kebutuhan yang sangat penting khususnya energi listrik. Semua peralatan rumah tangga, perkantoran hingga inudusri membutuhan peran dari energi listrik.

Pada akhir Desember 2025 total kapasitas terpasang unit pembangkit PLN (*Holding* dan *Sub Holding*) mencapai 47.464,24 MW dengan 33.022,84 MW (69,57%) berada di pulau Jawa Persentase kapasitas terpasang per jenis pembangkit yang paling besar yaitu pembangkit berbahan bakar batubara atau PLTU dengan total 21.278,90 MW atau sebesar 26,54% (PLN, 2024). Salah satunya adalah PLTU Bengkayang yang berlokasi di Desa Tanjung Gundul, Kecamatan Sei Raya Kepulauan, Kabupaten Bengkayang, Kalimantan Barat PLTU Bengkayang dengan kapasitas 2x50 MW merupakan salah satu pembangkit listrik yang berbahan bakar batubara. *Commercial Operation Date* (COD) PLTU Bengkayang unit 1 berhasil diselesaikan pada tanggal 18 Desember 2018 dan unit 2 diselesaikan pada tanggal 13 Juli 2019 dengan Daya Mampu Netto (DMN) sebesar 80 MW menggunakan batubara tipe *low rank* berkalori 4.200 kCal/kg dengan konsumsi batubara rata-rata per bulan sebanyak 42.000 Ton (Data Produksi Bahan Bakar PLTU Bengkayang, 2025).

Pemerintah Indonesia sesuai komitmen pada *Paris Agreement* tahun 2016, menargetkan pencapaian Energi Baru Terbarukan (EBT) dalam bauran energi nasional yang tertuang pada Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) mencapai 23% pada tahun 2025 (Perpres, 2017).

Menurut hasil analisis dari Dewan Energi Nasional Republik Indonesia, tujuan untuk mencapai komposisi energi primer nasional pada tahun 2022 untuk energi baru terbarukan, atau disingkat EBT, adalah sebesar 51,3 MTOE (*Mega Tonne of Oil Equivalent*) yang setara dengan 15,69%. Melihat hasil pencapaian komposisi energi primer nasional pada tahun 2022, total penyediaan untuk energi baru terbarukan tercatat sebesar 30,3 MTOE atau 12,30%. Dari informasi tersebut, dapat disimpulkan bahwa target komposisi energi primer nasional untuk tahun 2022 belum terpenuhi, dengan deviasi sebesar 3,39%.

PLN menjalankan inisiatif-inisiatif strategis guna mendukung terwujudnya *Net Zero Emission* dengan melakukan inovasi secara agresif untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dan meningkatkan energi baru terbarukan. Salah satunya melalui co-firing PLTU. *Co-firing* yaitu pencampuran bahan bakar dengan jenis material yang berbeda pada saat bersamaan dan mengkombinasikannya dengan bahan bakar alternatif terbarukan dengan kombinasi rasio tertentu sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar batubara (Febriani & Purwanto, 2021)

Untuk menunjang program tersebut, PLTU Bengkayang telah menjalankan program operasi berbasis co-firing sejak bulan Mei 2023. Bahan campuran yang digunakan adalah biomassa jenis *Woodchip* (serpihan kayu) yang dimanfaatkan dari limbah kayu sekitar Kabupaten Bengkayang dan Kabupaten/Kota lainnya di Kalimantan Barat. Adapun persentase campuran biomassa yang diterapkan di PLTU Bengkayang yaitu secara bertahap mulai dari 5% , 10% dan sampai saat ini sebesar 10% dari total kebutuhan bahan bakar boiler.

Dalam pelaksanaannya, skema pengoperasian co-firing dengan komposisi persentase batubara 90% dan *woodchip* 10% akan berpengaruh dengan skema pengoperasian yang menggunakan 100% batubara. Hal ini akan berpotensi terhadap perbedaan pola operasi unit dan tingkat efisiensi peralatan unit salah satunya boiler.

Oleh karena itu, penulis melakukan penelitian dengan judul ”**PENGARUH PENINGKATAN KOMPOSISI *CO-FIRING WOODCHIP* TERHADAP EFISIENSI BOILER TIPE *CIRCULATING FLUIDIZED BED* PADA PLTU BENGKAYANG”.** Maksud dari penelitian ini adalah seberapa pengaruhnya penggunaan biomassa (*Woodchip*) pada persentase tertentu terhadap efisiensi boiler dengan metoda *in-direct* (*heat-loss*) dan membandingkan antara efisiensi boiler saat *performance test / commissioning* dengan skema 100% batubara. Serta bukan hanya melihat dari sisi kebermanfaatan secara lingkungan, namun tidak mengabaikan dari kinerja peralatan utama yang terpasang di unit PLTU.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah yang akan dibahas dalam proposal skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah peningkatan komposisi *co-firing* biomass dapat mempengaruhi efisiensi boiler?
2. Apakah operasi *co-firing* biomassa 10% mempengaruhi design awal boiler PLTU Bengkayang dengan skema 100% batubara?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh peningkatan persentase komposisi *co-firing* biomassa terhadap efisiensi boiler.
2. Mengetahui pengaruh skema operasi *co-firing* biomassa 10% terhadap design awal boiler PLTU Bengkayang.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini akan dilampirkan baik secara praktis dan secara teoritis, yaitu:

1. Mengetahui faktor - faktor yang mempengaruhi efisiensi boiler pada saat implementasi operasi *co-firing* biomassa 10% sehingga dapat meminimalisir penurunan efisiensi unit.
2. Bagi perusahaan pengelola operasi unit PLTU dengan tipe boiler yang sama, penelitian ini dapat digunakan sebagai gambaran mengenai pengaturan pola operasi dalam operasi co-firing biomassa sehingga dapat meningkatkan efisiensi unti dengan tetap menjaga kehandalan dari boiler.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Pada penelitian ini terdapat batasan masalah yang disebabkan banyaknya pembahasan yang memiliki korelasi dengan topik yang diteliti, agar pembahasan menjadi tidak meluas dan memiliki batasan yang jelas, maka lingkup masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini memilih studi kasus di PLTU Bengkayang unit #2 dan hanya membahas mengenai parameter operasional pada saat operasi skema co-firing biomassa dan saat *performance test* dengan 100% batubara.
2. Parameter operasional yang diambil saat beban 45 MW.
3. Implementasi co-firing biomassa yang digunakan yaitu jenis *Direct Co-firing.*
4. Komposisi campuran bahan bakar *co-firing* yaitu biomassa tipe *woodchip* pada tingkatan 5% dan 10% dengan persentase batubara sesuai persentase mengikuti biomassa.
5. Bahan bakar yang digunakan saat penelitian ini yaitu batubara dengan tipe *low rank* (< 4.200 kCal/kg) dan biomassa jenis *woodchip* (serpihan kayu) dengan nilai kalori dengan rata-rata 4128 kCal/kg.
6. Penelitian ini akan membatasi analisis perhitungan efisiensi boiler melalui metoda tidak langsung (*In-direct method*) sesuai standar ASME PTC 4.1 dengan menggunakan perhitungan konvensional melalui Microsoft Excel.
7. Jenis boiler yang dihitung efisiensi adalah boiler *Coal Fluidized bed* pabrikan Wuxi Huanguang Boiler Co.Ltd

1.6 Sistematika Penulisan

Pokok bahasan yang dibahas dalam tugas akhir ini disusun secara sistematis sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah yang ingin dipecahkan, tujuan penelitian, manfaat yang diharapkan dari penelitian, batasan masalah yang dihadapi, serta sistematika penulisan laporan tugas akhir. Bagian ini memberikan gambaran umum tentang konteks penelitian dan pentingnya topik yang dibahas.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dibahas mengenai teori-teori penunjang yang relevan dengan penelitian yang dilakukan. Teori-teori ini meliputi kajian literatur dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan skema operasi *Co-Firing* dengan menggunakan

sumber energi biomassa pada PLTU dan pengaruhnya. Tinjauan pustaka ini bertujuan untuk memberikan landasan teori yang kuat bagi penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang metode dan langkah-langkah yang digunakan dalam penelitian. Diagram alur penelitian, teknik pengumpulan data, dan metode analisis data dijelaskan dengan cukup rinci. Fokus utama adalah pada parameter operasional PLTU saat menggunakan 100% batubara dan saat skema operasi *Co-Firing* biomassa dengan beberapa persentase komposisi biomassa, termasuk perangkat lunak dan alat analisis yang digunakan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai hasil dari perhitungan efisiensi *Boiler*. Hasil penelitian dianalisis dan dibahas secara mendalam untuk menilai pengaruh dari komposisi *Co-Firing* biomassa terhadap efisiensi *Boiler*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menjelaskan mengenai kesimpulan yang diambil berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan. Kesimpulan ini menjawab tujuan penelitian dan rumusan masalah yang telah ditentukan sebelumnya. Selain itu, disampaikan beberapa saran yang bersifat konstruktif untuk perbaikan dan pengembangan lebih lanjut, baik untuk PLTU Bengkayang maupun penelitian serupa di masa depan.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Penelitian sebelumnya yang relevan merupakan bahan perbandingan dan acuan dalam menyusun penelitian ini. Dengan tujuan agar menghindari adanya kesamaan, plagiarisme dan memperbaharui ilmu pengetahuan yang selalu berkembang. Oleh karena itu, dalam bagian tinjauan pustaka, peneliti menyampaikan beberapa kerangka penelitian dan hasilnya pada berbagai publikasi ilmiah yang memiliki keterkaitan dengan judul penelitian, yaitu:

2.1.1. Pengaruh Operasi *Co-Firing* Biomassa terhadap Efisiensi *Boiler* PLTU Batubara (Agus Noor Sidiq, E-ISSN: 2655-4925)

Penelitian ini membahas biomassa yang menjadi salah satu dari sumber energi terbarukan yang diharapkan mampu mengurangi emisi gas yang berbahaya untuk kehidupan manusia di Bumi. Mengkaji pengaruh campuran biomassa terhadap efisiensi boiler PLTU batubara dengan memperhatikan komposisi dan jenis biomassa serta setting pembakaran yang tepat agar menghasilkan efisiensi boiler yang optimal.

Studi kasus yang dianalisis yaitu di PLTU Suralata Unit 2 dengan campuran rata-rata biomassa hanya sebesar 1%.

2.1.2. Analisis kelayakan energi proses *Co-Firing* batubara dan *Woodchip* pada Pembangkit Listrik ((Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, 2024)

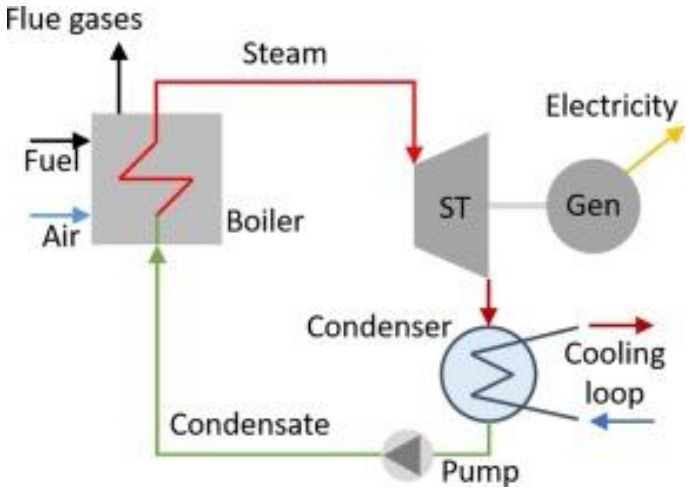
Kajian yang dilakukan menggunakan metoda input-output atau metoda langsung (*direct method*) pada Pembangkit listrik. Dengan skema co-firing 95% batubara dan 5% *whoodchip*,hasil analisis efisiensi kinerja boiler meningkat 74% dibandingkan dengan 100% Batubara 73%.

2.2 Landasan Teori

Dari latar belakang permasalahan dan tinjauan pustaka diatas yang mendasari penelitian, maka akan dijelaskan mengenai dasar-dasar teori yang dijadikan sebagai pedoman pada penyusunan penelitian ini.

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan uap air hasil pembakaran untuk menghasilkan energi listrik. Prinsip kerja PLTU didasarkan pada siklus *Rankine*, yang melibatkan beberapa tahapan utama seperti gambar berikut :



Gambar 2. 1 Prinsip Kerja PLTU (M.M. EL Wakil, 2015)

1. Pemanasan Air di *Boiler*

Air diumpankan ke *Boiler* melalui sistem pompa air umpan. Di dalam *Boiler*, air ini dipanaskan menggunakan panas dari proses pembakaran bahan bakar (seperti batubara, minyak, atau gas). Proses pembakaran ini menghasilkan suhu yang sangat tinggi, yang memanaskan air hingga mencapai titik didih dan berubah menjadi uap. Uap yang dihasilkan memiliki tekanan dan suhu yang sangat tinggi.

2. Pembangkitan Uap

Uap yang dihasilkan kemudian dikumpulkan di *steam drum* sebelum disalurkan ke turbin melalui pipa-pipa uap. Di dalam turbin, uap bertekanan tinggi ini digunakan untuk memutar sudu-sudu turbin. Perputaran sudu-sudu turbin ini mengubah energi termal uap menjadi energi mekanik.

3. Ekspansi Uap di Turbin

Uap mengalir melalui beberapa tahap turbin, masing-masing dengan tekanan yang semakin menurun. Pada setiap tahap, energi kinetik uap dikonversi menjadi energi mekanik atau energi gerak, yang selanjutnya akan digunakan untuk memutar rotor turbin yang terhubung dengan rotor generator. Hasilnya adalah perputaran mekanis yang stabil dan kuat.

4. Produksi Energi Listrik di Generator

Generator yang terhubung dengan turbin mengubah energi mekanik dari perputaran rotor menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Rotor yang berputar di dalam medan magnet stator menghasilkan arus listrik, yang kemudian dikirim ke sistem distribusi melalui transformator.

5. Kondensasi Uap di Kondensor

Uap bekas yang keluar dari turbin memiliki tekanan dan suhu yang lebih rendah. Uap ini kemudian dialirkan ke kondensor, di mana uap tersebut didinginkan dan dikondensasikan kembali menjadi air. Proses pendinginan ini biasanya menggunakan air dari sumber eksternal seperti sungai atau laut. Air hasil kondensasi ini kemudian dipompa kembali ke *Boiler* untuk digunakan ulang, melengkapi siklus Rankine.

6. Siklus Udara dan Gas Buang

Siklus udara dan gas buang pada pembangkit PLTU merupakan sistem yang mendukung proses pembakaran di dalam *Boiler*. Sistem ini merupakan siklus tertutup yang terjadi pada suatu media dalam waktu dan proses yang sama sehingga proses pembakaran dapat dikontrol secara optimal yang nantinya berdampak pada proses pembakaran yang sempurna dan efisien.

Siklus udara di dalam sebuah *Boiler* sangat penting, sebab udara merupakan salah satu unsur penting dalam reaksi pembakaran. Sistem udara pada prinsipnya berfungsi sebagai media transport bahan bakar menujui *Boiler* (*primary fan*) sekaligus menyediakan udara sekunder yang diperlukan untuk

mencapai pembakaran sempurna pada *Boiler* gas dan membuat turbulensi bahan bakar di dalam *furnace* (*secondary fan*).

Sistem gas buang atau *flue gas* merujuk pada komponen penting dalam proses pembakaran di berbagai industri dan fasilitas energi. Sist ini bertugas untuk mengalirkan gas panas yang dihasilkan selama proses pembakaran menuju ke pipa air dan uap serta elemen pemanasan udara. Secara prinsip, skema dari proses kerja antara sistem udara dan gas buang terlihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 2 Sistem Udara dan Gas Buang *(M.M. EL Wakil, 2015)*

Salah satu jenis PLTU yang banyak dijumpai di Indonesia yaitu PLTU yang memanfaatkan batubara sebagai bahan bakar utama untuk menghasilkan panas yang akan digunakan dalam proses produksi uap. PLTU Batubara banyak digunakan di Indonesia karena ketersediaan batubara yang melimpah di Indonesia, dimana Indonesia dikenal sebagai salah satu penghasil batubara terbesar.

2.2.2 *Boiler*

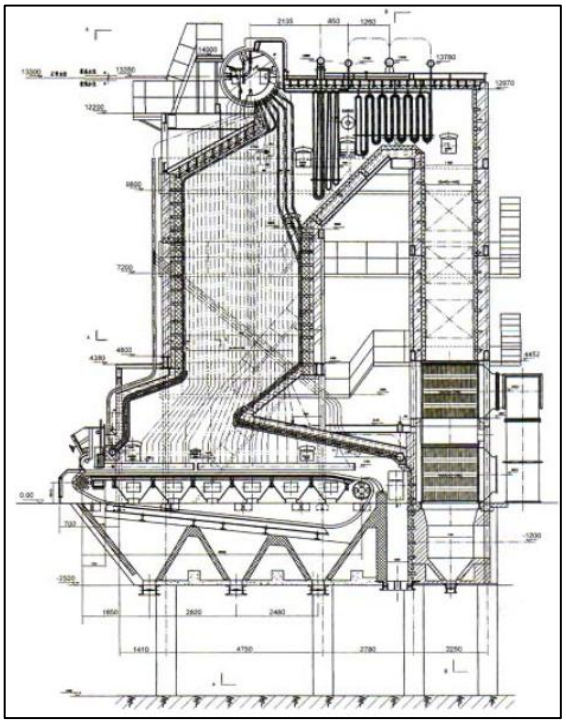
Peralatan utama pada sebuah pembangkit listrik, terutama PLTU salah satunya adalah boiler. Boiler atau disebut ketel uap adalah sebuah alat yang difungsikan untuk menghasilkan uap dengan dua bagian penting yaitu dapur pemanasan (*furnace*) untuk menghasilkan panas yang diperoleh dari proses pembakaran bahan bakar dan *boiler proper* untuk mengubah air menjadi uap bersuhu dan bertekanan tinggi.

Jika dilihat dari tipe pengapiannya, klasifikasi boiler terbagi menjadi beberapa jenis, yaitu:

4.2.3.8 *Boiler Stoker*

Dilengkapi dengan *chain grate* yang berfungsi sebagai media pembakaran bahan bakar. Kemudian udara panas dialirkan dari bawah *chain grate* sehingga bahan bakar mudah terbakar. Boiler ini dapat menggunakan bahan bakar antara lain batubara, limbah kayu maupun sampah. Udara yang digunakan saat proses pembakaran dioperasikan dengan kecepatan dan volume yang kecil dan ukuran boiler ini terbatas sehingga memiliki kemampuan menghasilkan *steam* / uap maksimum sekitar 50-60 kg/s.

.

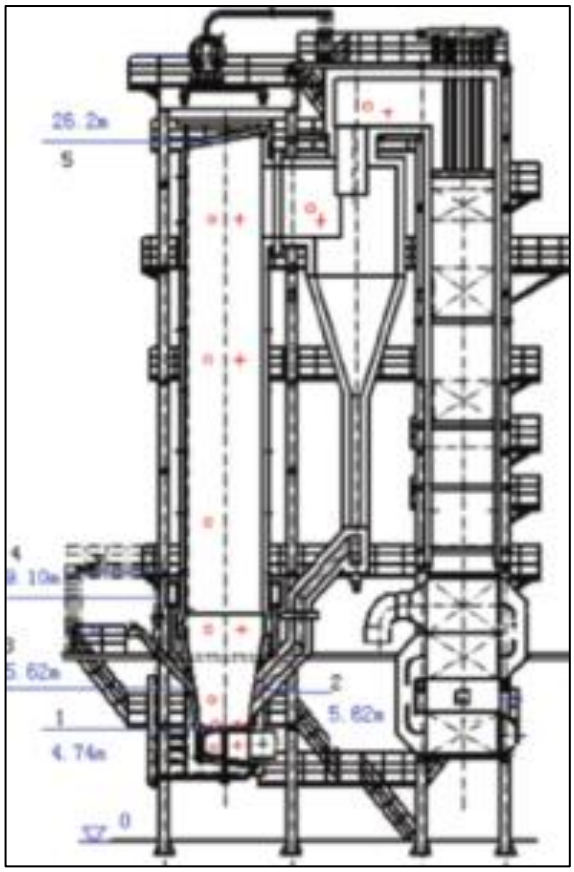


Gambar 2. 3 Skematik Boiler Stoker (Ta'nezuk et al., 2018)

4.2.3.8 *Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler*

Disebut *circulating* karena proses sirkulasi bahan bakar yang belum habis terbakar dari ruang bakar ke *cyclone* kemudian masuk ke *sealpot* dan kembali ke ruang bakar. Sedangkan dinamakan *fluidized* karena udara primer dihembuskan untuk menjaga material *bed* dan batubara tetap berada di dalam *furnace*, dan *bed* adalah material tambahan berupa partikel kecil seperti pasir silika atau batu kapur / *limestone* yang digunakan sebagai media awal transfer panas dari pembakaran bahan

bakar cair ke pembakaran bahan bakar batubara. Teknologi boiler ini mampu mengurangi kebutuhan terhadap sistem *flue gas desulphurization* (FGD) karena sulfur oksida (SOx) dapat ditangkap langsung di ruang bakar. Proses ini terjadi melalui pemanfaatan *bed material* berupa batu kapur sebagai bahan penyerap sulfur. Selain itu, emisi nitrogen oksida (NOx) juga dapat ditekan dengan menjaga suhu tungku tetap rendah dan menerapkan pembakaran bertahap.



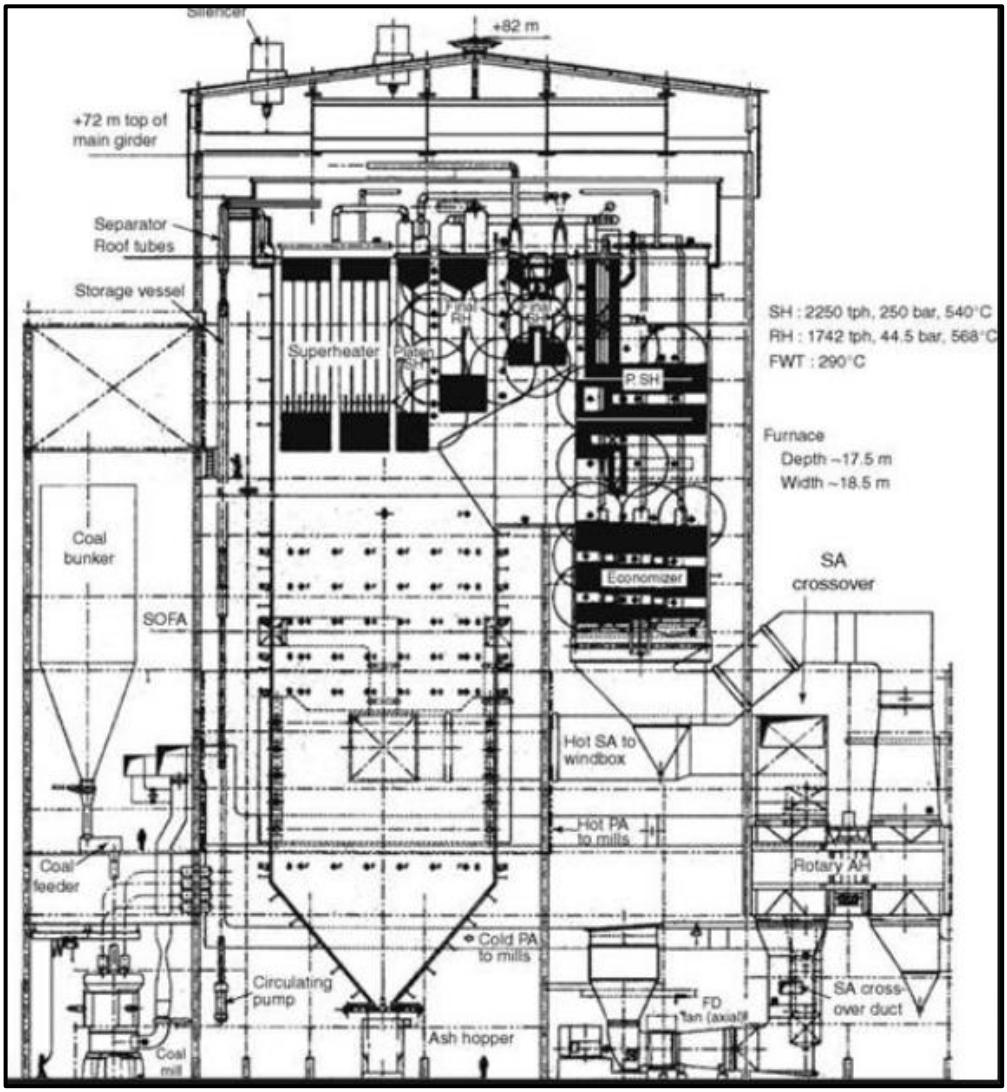
Gambar 2. 4 Skematik Boiler Circulating Fluidezed Bed (Ta'nezuk et al., 2018)

4.2.3.8 *Pulverized Coal (PC) Boiler*

Batubara sebelum masuk ke dalam furnace akan dilakukan penggerusan terlebih dahulu menjadi serbuk melalui peralatan yang disebut *coal mill*. *Boiler* jenis ini merupakan yang paling banyak dipasang pada pembangkit listrik, khususnya di Indonesia. Beberapa keunggulan yang didapat yaitu:

a. Mampu menggunakan beberapa jenis batubara.

b. Sangat sensitif atau merespon dengan cepat terhadap perubahan beban.
c. Menaikan efisiensi thermal.
d. Memiliki kemampuan untuk memasukan bahan bakar melalui burner dalam jumlah yang besar.



Gambar 2. 5 Skematik Boiler Pulverized Coal (Ta'nezuk et al., 2018)

2.2.3 *Boiler* PLTU Bengkayang

Boiler yang di operasikan pada PLTU Bengkayang menggunakan jenis boiler *Circulating Fluidized Bed* (*CFB Boiler*). Spesifikasi CFB boiler PLTU Bengkayang secara lebih detail dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 2. 1 Spesifikasi Boiler PLTU Bengkayang (Wuxi Huanguang Boiler Co.,Ltd, 2009)

Parameter	Keterangan
Pabrikan / *Manufacture*	Wuxi Huanguang Boiler Co.,Ltd
Tipe	*Circulating Fluidized Bed* (*CFB Boiler*).
Main stem flow	240 ton/hour
Main steam outlet pressure	9,8 Mpa.g.
Main steam outlet temperature	540°C
Feed water temperature	215 °C
Drum Pressure	8,96 Mpa.g
AH inlet air temperature	42 °C
AH outlet air temp. (PA/SA)	180 °C
Fuel consumption (calculated)	40 t/h
Coal Quality (Low heat value)	4000 kCal/kg
Thermal efficiency (LHV)	91 %

2.2.4 Nilai Kalor Batubara

Nilai kalor merupakan sebuah ukuran dari energi panas yang terdapat dalam batubara dan merupakan faktor penting dalam menetapkan nilai batubara. Hal ini menggambarkan jumlah panas yang mampu dibuang oleh setiap kilogram batubara saat dibakar secara menyeluruh. Dalam sistem metrik internasional (SI), nilai kalor batubara biasanya diukur dalam satuan kalori per kilogram (kcal/kg). Karakteristik fisik batubara meliputi nilai kalor, kandungan air, materi volatil, dan abu. Di sisi lain, sifat kimia batubara ditentukan oleh kandungan karbon, hidrogen, oksigen, dan sulfur. Nilai kalor batubara berbeda dari satu tambang ke tambang lainnya. Rincian nilai untuk berbagai jenis batubara tersedia dalam Tabel 1 di bawah ini. (Subagyo, 2018)

Tabel 2.2 GCV Untuk Berbagai Jenis Batubara (Subagyo, 2018)

Parameter	Lignit (Dasar Kering)	Batubara India	Batubara Indonesia	Batubara Afrika Selatan
GCV (kcal/kg)	4.500*	4.000	5.500	6.000

*GCV lignit pada ‗as received basis' adalah 2500-3000

2.2.5 Analisis Batubara

Ada dua metode umum yang digunakan untuk mengevaluasi batubara: analisis ultimate dan analisis proximate. Adapun analisis ultimate yaitu memeriksa semua unsur komponen batubara, baik dalam bentuk padat maupun gas, sedangkan analisis proximate hanya memperhatikan karbon tetap, materi volatil, kadar air, dan abu. Pada analisis ultimate membutuhkan peralatan laboratorium yang canggih dan dikerjakan oleh ahli kimia terlatih, sementara analisis proximate dapat dikerjakan dengan peralatan yang lebih sederhana. (Subagyo, 2018)

1. Analisis *Proximate*

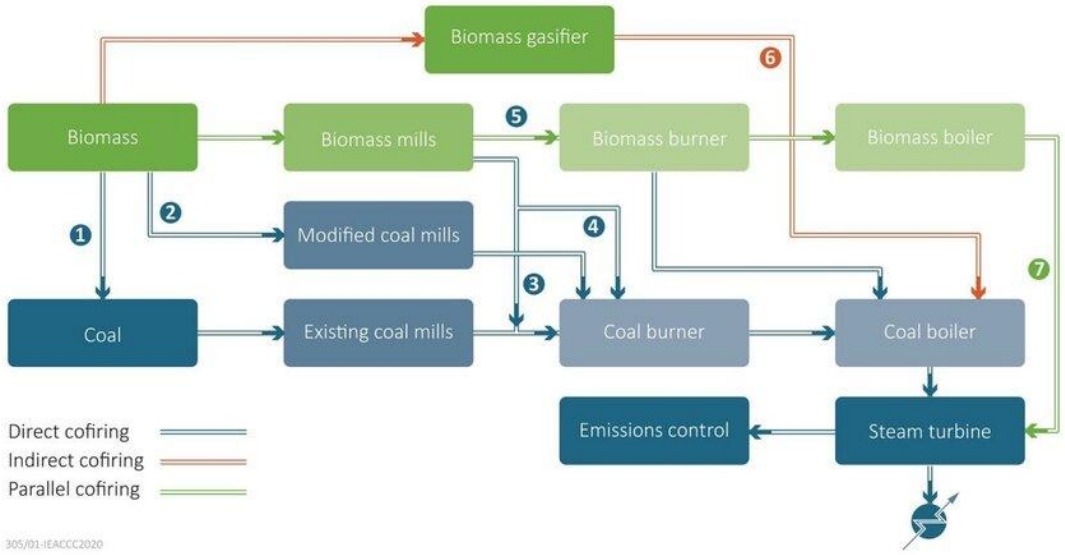
   Analisis proximate memberikan data mengenai presentase berat dari karbon tetap, materi volatil, abu, dan kadar air yang terkandung pada batubara. Dengan jumlah karbon tetap dan materi volatil secara langsung memengaruhi nilai panas batubara. Karbon tetap berperan sebagai kontributor utama panas selama pembakaran, sementara materi volatil yang tinggi menunjukkan kemudahan dalam menghidupkan bahan bakar. Kadar abu juga memiliki signifikansi dalam desain tungku, volume pembakaran, pengendalian polusi, dan pengelolaan sistem abu di tungku.

2. Analisis *Ultimate*

   Analisis ultimate mengevaluasi kandungan kimia elemen seperti karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, dan lainnya. Hal ini bermanfaat untuk menentukan total udara yang diperlukan untuk pembakaran, serta volume dan komposisi gas hasil pembakaran. Adapun informasi ini sangat penting dalam menghitung suhu nyala dan merancang saluran gas buang, dll.

2.2.6 Studi Metode Operasi *Co-Firing* (Batubara dengan Biomassa)

Salah satu strategi untuk mengurangi konsumsi bahan bakar yang berasal dari fossil pada sebuah pembangkit listrik yaitu dengan memodifikasi skema atau pola operasi PLTU dengan konsep pembakaran bersama melalui cara mensubtitusi sebagian batubara dengan bahan bakar *renewable* seperti biomassa dan sebagainya. Subtitusi tersebut diharapkan mampu mengurangi emisi yang dihasilkan pada proses pembakaran yang terbawa oleh gas buang / flue gas. Metode tersebut saat ini dikenal dengan istilah *Co-Firing*, yakni proses pembakaran dengan menggunakan lebih dari satu jenis material bahan bakar dalam suatu sistem pembakaran yang sama. Beberapa opsi pemanfaatan biomassa dan skema *Co-Firing* yang dilakukan pada pembangkit listrik dapat diamati pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 6 Opsi Skema Co-Firing (Livingston, 2016)

Teknologi yang dapat dilakukan dalam proses *Co-Firing* sesuai gambar diatas dijelaskan secara singkat sebagai berikut:

Dalam *Co-Firing* langsung, batubara dan biomassa dibakar dalam *Boiler* yang sama. Biomassa dicampur terlebih dahulu dengan batubara dalam sistem penanganan dan pengangkutan batubara yang ada, dengan rasio *Co-Firing* yang sederhana (biasanya kurang dari 10% biomassa berdasarkan energi), kemudian digiling bersama dan dibakar dalam sistem pembakaran batubara yang ada (Opsi 1

dalam Gambar 2.4). Ini merupakan pendekatan *Co-Firing* yang paling populer karena dapat diterapkan secara relatif cepat dengan investasi modal minimal dan sedikit modifikasi. Investasi utama adalah penyimpanan biomassa dan sistem penanganan I. Pada Opsi 2, biomassa digiling di pabrik batubara yang sudah ada dan dimodifikasi secara terpisah, dan dicampur dengan batubara dalam sistem pembakaran batubara yang sudah ada. Biomassa dapat digiling di mill yang telah di modifikasi untuk meningkatkan rasio *Co-Firing*; hingga 50% berbasis energi dapat dicapai. Setelah ini, ada beberapa cara untuk melakukan pembakaran biomassa. Pada Opsi 3, biomassa diinjeksikan ke dalam pipa yang mengalirkan batubara ke burner. Pada Opsi 4, biomassa disuntikkan ke dalam pembakar batubara yang dimodifikasi. Pada Opsi 5, biomassa disuntikkan ke dalam pembakar biomassa khusus yang baru. Opsi-opsi ini melibatkan tingkat investasi modal yang jauh lebih tinggi dibandingkan Opsi 1 dan 2. Dalam *Co-Firing* tidak langsung (Opsi 6), biomassa digasifikasi dalam gasifier terpisah, dan bahan bakar gas dibakar bersama batubara dalam *Boiler* batubara yang sama. Sistem *Co-Firing* paralel (Opsi 7) memiliki *Boiler* terpisah untuk batubara dan biomassa. Baik *Co-Firing* tidak langsung maupun paralel memungkinkan biomassa dengan rasio tinggi untuk dibakar dan memiliki fleksibilitas bahan bakar yang lebih besar.

Dari beberapa opsi teknologi *Co-Firing* diatas, dapat disimpulkan dan diamati dalam tabel berikut:

Tabel 2. 2 Perbandingan Opsi Teknologi Co-Firing

Opsi Teknologi *Co-Firing*	**Uraian singkat**	**Keterangan**
Direct Co-Firing	Biomassa dicampur melalui peralatan grinding, selanjutnya masuk ke *feeder* (terpisah atau sama), dicampur dengan batubara ke dalam ruang bakar yang sama untuk dilakukan proses pembakaran.	Tidak ada investasi biaya peralatan khusus, metode ini yang paling banyak diadopsi oleh *Pulverized coal Boiler*
Indirect Co-Firing	Memerlukan peralatan tambahan seperti gasifier biomassa, untuk melakukan gasifikasi menjadi syngas kemudian masuk ke *Boiler* batubara	Kelebihan metode ini, dengan proses pemurnian syngas melalui metode gasifikasi akan meminimalkan dampak pencemaran dari pembakaran langsung
Paralel Co-Firing	Uap yang dihasilkan dari *Boiler* biomassa diumpankan ke dalam sistem uap *Boiler* batubara eksisting	Memerlukan investasi pembangunan *Boiler* berbahan bakar biomassa yang terpisah

2.2.7 Efisiensi *Boiler*

Secara umum definisi dari efisiensi adalah suatu usaha yang dilakukan dengan menggunakan input yang seminimal mungkin untuk menghasilkan iutput semaksimal mungkin. Jika dikaitkan dengan peralatan boiler pada sebuah pembangkit listrik, maka efisiensi boiler yaitu kemampuan kerja boiler yang bisa

diperoleh dengan membandingkan antara energi kimia yang dimasukan terhadap energi panas yang dikeluarkan untuk menghasilkan uap dengan nilai tekanan dan nilai temperatur yang dikehendaki.

Efisiensi *Boiler* adalah aspek penting dari operasi *Boiler* dan melibatkan analisis berbagai komponen yang berkontribusi terhadap kinerja keseluruhan sistem. Dua jenis efisiensi yang biasanya dilakukan evaluasi adalah efisiensi pembakaran dan efisiensi termal.

4.2.3.8 Efisiensi Pembakaran

Efisiensi pembakaran mengukur efektivitas burner dalam membakar bahan bakar.

Beberapa parameter kunci yang perlu diperhatikan antara lain:

i. Tingkat oksigen (O_2) berlebih

   Peningkatan kadar oksigen berlebih dalam gas buang menunjukan pembakaran yang lebih lengkap, tetapi terlalu banyak dapat menunjukan ketidakefisienan.

ii. Bahan bakar yang tida terbakar

   Adanya bahan bakar yang tidak terbakar dalam gas buang menunjukan pembakaran yang tidak sempurna. Seiring dengan peningkatan kadar udara berlebih, jumlah bahan bakar yang tidak terbakar biasanya akan menurun, hal ini dapat menyebabkan kehilangan entalpi.

Oleh karena itu sangatlah penting untuk menjaga keseimbangan antara kehilangan bahan bakar yang tidak terbakar dan kerugian entalpi. Efisiensi pembakaran juga berbeda dengan jumlah bahan bakar yang dibakar. Efisiensi pembakaran pada bahan bakar padat lebih rendah dibandingkan bahan bakar gas dan bahan bakar cair.

4.2.3.8 Efisiensi Termal

Efisiensi termal berkaitan dengan efektivitas perpindahan panas dalam *Boiler*, khususnya seberapa efektif energi panas yang di transfer dari proses pembakaran (sisi api) ke air (sisi air). Pembentukan jelaga dan kerak pada pipa *Boiler* menjadi faktor yang dapat mempengaruhi efisiensi termal secara signifikan, karena nantinya akan berpotensi menjadi lapisan isolasi yang mengurangi transfer panas.

Pengukuran efisiensi *Boiler* yang dipilih pada penelitian ini mengacu pada standar internasional yaitu "*The American Society of Mechanical Engineers"* (ASME) PTC 4 tentang "*Performance Test Code*". Berdasarkan standar internasional tersebut, perhitungan efisiensi *Boiler* dapat dilakukan melalui dua metode yaitu:

1. Metode Langsung (*Direct Method*)

   Analisis efisiensi *Boiler* dengan menggunakan metode ini yaitu membandingkan energi yang diperoleh dari fluida kerja (air dan uap) terhadap energi yang terdapat pada bahan bakar *Boiler*. Metode ini juga disebut dengan metode "input-output" sebab hanya membutuhkan output (uap) dan input panas (bahan bakar) untuk melakukan evaluasi efisiensi. Rumus metode ini yaitu:

   $$Boiler\ Efficiency\ (\eta) = \frac{\text{Heat Output}}{\text{Heat Input}}\ x\ 100 \qquad \textbf{(2.1)}$$

   atau

   $$Boiler\ Efficiency\ (\eta) = \frac{\text{Q x (H}-\text{h)}}{\text{q x Gross caloric value}}\ x\ 100 \qquad \textbf{(2.2)}$$

   Dimana:

   H : steam enthalpy kCal/kg)

   q : jumlah bahan bakar yang digunakan (kg/hr)

   Q : jumlah steam yang dihasilkan per jam (kg/hr)

   GCV : nilai panas kotor bahan bakar (Kcal/kg)

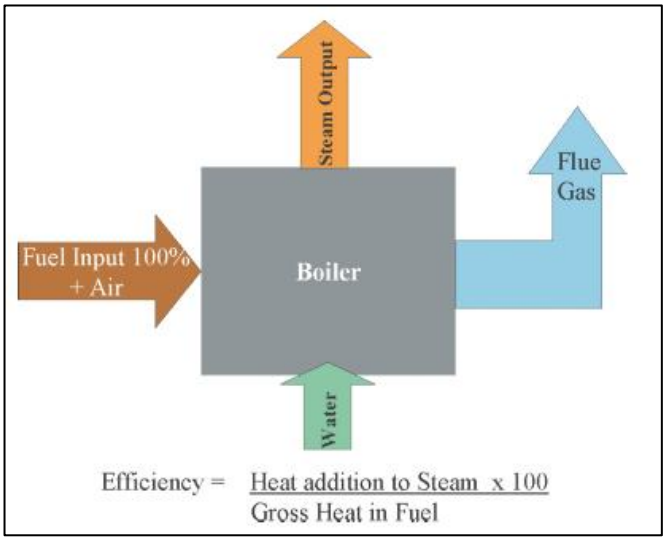
   h : feed water enthalpy (kCal/kg)

   Beberapa parameter yang harus dipantau untuk perhitungan efisiensi *Boiler* dengan menggunakan metode langsung yaitu:

   i. Jumlah steam / uap yang dihasilkan per jam (Q) dalam satuan kg/jam.

ii. Jumlah bahan bakar yang digunakan per jam (q) dalam kg/jam.
iii. Tekanan kerja dalam kg/cm^2.g dan suhu lewat panas dalam ^oC jika ada.
iv. Suhu air umpan dalam ^oC.
v. Jenis bahan bakar dan nilai panas kotor bahan bakar (Gross Caloric Value) dalam kCal/kg bahan bakar

Jika diilustasikan sebuah sketsa sederhana, perhitungan efisiensi menggunakan metode langsung bisa dilihat pada gambar di bawah ini:

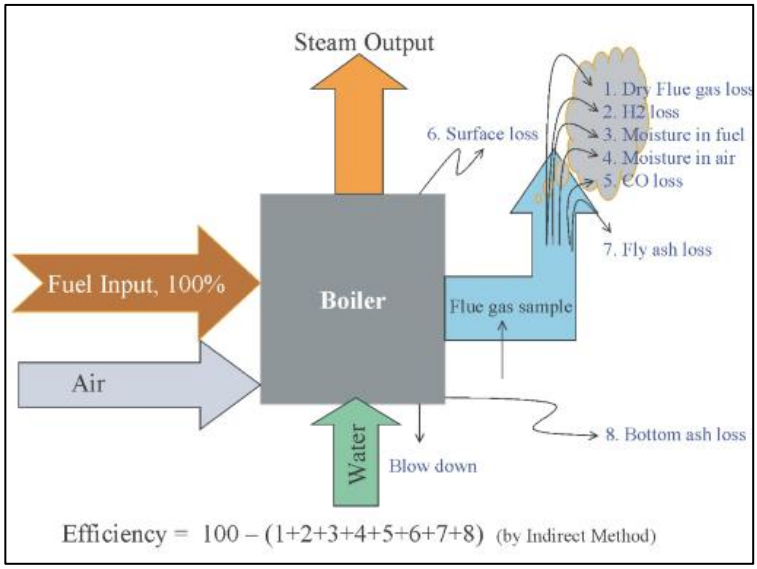


Gambar 2. 7 Skema Perhitungan Efisiensi *Boiler* Metode Langsung

2. Metode tidak langsung (*In-Direct Method*)

Menghitung efisiensi *Boiler* menggunakan metode langsung dinilai kurang akurat, terutama saat mengukut aliran bahan bakar (konsumsi batubara per jam dan juga pengukuran lainnya). Aliran uap, jumlah batubara yang dibakar dan jumlah panas batubara yang dilepaskan cukup sulit untuk dihitung secara akurat, yang menyebabkan hasil perhitungannya masih berupa rasio kasar. Sehingga terdapat metode yang memperhitungkan rugi-rugi panas (*Heat Loss Method*) pada *Boiler*. Kerugian dari metode langsung dapat diatasi dengan metode ini. Efisiensi diperoleh dengan mengurangkan fraksi kehilangan panas dari 100.

Perhitungan efisiensi *Boiler* melalui metode ini, beberapa data yang perlu disiapkan yaitu *coal fired Boiler* dan *fuel analysis*. *Coal fired Boiler* menginformasikan jumlah bahan bakar yang masuk tiap jam, jumlah uap yang dihasilkan tiap jam, tekanan dan suhu *steam output,* suhu *feed water*, kandungan CO_2 dan CO, suhu gas buang, suhu lingkungan, kelembapan udara lingkungan, suhu permukaan *Boiler*, kecepatan angin disekitar *Boiler*, total luas permukaan *Boiler*, nilai dari *gross caloric value bottom ash* dan *fly ash*. Sedangkan pada data *fuel analysis* terdapat data mengenai kadar abu, karbon, hidrogen, nitrogen oksigen, sulfur dan nilai HHV dari bahan bakar yang digunakan (batubara).
Kelebihan dari metode ini yaitu kesalahan dalam perhitungan tidak berdampak perubahan yang signifikan dalam analisis perhitungan efisiensi *Boiler*.



Gambar 2. 8 Skema Perhitungan Efisiensi *Boiler* Metode Tidak Langsung

Secara matematis, rumus metode tidak langsung adalah sebagai berikut:

$$Efisiensi\ Boiler\ (\eta) = 100 - (HL1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \quad \textbf{(2.3)}$$

Masing-masing *heat losses* (L) pada persamaan diatas dijelaskan sebagai berikut:

L1 = Kerugian karena gas cerobong yang kering (*Heat loss due to dry flue gas*)

$$L1 = \frac{\text{m x Cp x (Tf}-\text{Ta)}}{\text{GCV fuel}}\ x\ 100 \quad \textbf{(2.4)}$$

Dimana:

m : massa dari gas buang kering (kg/kg fuel)

Cp : kalor spesifik dari gas buang kering (kCal/kg ^{o}C)

GCV : Nilai kalor batubara (kCal/kg)

Tf : Temperatur gas buang (^{o}C)

Ta : Temperatur ambient (^{o}C)

L2 = Kerugian karena penguapan air yang terbentuk karena H_2 dalam bahan bakar (*Heat loss due to H_2 in fuel*)

Pembakaran H_2 menimbulkan kehialnagn panas, dan hasil pembakarannya adalah air. Air diubah menjadi uap, dan ini membawa panas laten (Patro, 2016)

$$L2 = \frac{9 \text{ x } H2 \text{ x } [584+Cp\ (Tf-Ta)]}{GCV\ fuel}\ x\ 100 \qquad \textbf{(2.5)}$$

Dimana:

H2 : jumlah atom hydrogen dalam bahan bakar (kg/kg fuel)

Cp : Kalor spesifik dari superheated steam (kCal/kg^{o}C)

584 : Panas latent yang berhubungan dengan tekanan parsial dari uap air (kCal/kg)

L3 = Kerugian karena penguapan kadar air dalam bahan bakar (*Heat loss owing to the moisture present fuel*)

Bahan bakar mengalir sebagai uap yang sangat panas dengan kelembapan yang kemudian masuk di *Boiler*. Selain itu, kehilangan kelembapan ini dipersiapkan sebagai panas praktis untuk mengubah kelembapan menjadi titik didih dan sebagai uap super panas untuk mencapai suhu gas buang serta panas laten dari penguapan kelembapan. Kehilangan kelembapan ini dapat diuku sebagai berikut:

$$L3 = \frac{M \text{ x } [584+Cp\ (Tf-Ta)]}{GCV\ fuel}\ x\ 100 \qquad \textbf{(2.6)}$$

Dimana:

M : kelembapan dalam bahan bakar (kg/kg fuel)

L4 = Kerugian akibat kelembapan yang ada di udara (*Heat loss owing to the moisture present in the air*)

Uap dalam bentuk kelembapan pada udara yang masuk, dipanaskan secara berlebihan saat melewati *Boiler*. Sementara itu, panas ini yang naik melalui cerobong harus dianggap sebagai kehilangan *Boiler*.

$$\text{L4} = (\text{AAS x f humadity x Cp (Tf} - \text{Ta)])/(GCV fuel)}\ x\ 100 \qquad \textbf{(2.7)}$$

Dimana:

AAS : Massa aktual udara (kg/kg fuel)

F humadity : setara dengan kg air/kg udara kering adalah faktor kelembapan, dengan nilai 0,024

L5 = Kerugian akibat kelembapan yang ada di udara (*Heat loss due to incomplete combustion*)

Produk yang dihasilkan oleh pembakaran parsial dicampur dengan O_2 dan dibakar kembali dengan pelepasan energi lebih lanjut. Produk yang berbeda termasuk H_2, CO dan hidrokarbon lainnya dan biasanya ditemukan dalam gas cerobong *Boiler*. CO adalah satu-satunya gas yang konsentrasinya dapat diukur dengan tepat dalan penyelidikan *Boiler*.

$$\text{L5} = \frac{\%\text{CO x C}}{\%CO\ x\ \%CO2}\ x\ \frac{5744}{GCV\ Fuel} x\ 100 \qquad \textbf{(2.8)}$$

Dimana:

C : Kandungan karbon dalam bahan bakar (kg/kg)

CO_2 : Volume CO_2 aktual dalam gas buang (%)

CO : Volume CO dalam gas buang yang keluar dari ekonomizer (%)

L6 = Kerugian akibat radiasi dan konveksi (*Heat loss due to radiation and convection)*

Kehilangan panas *Boiler* akibat radiasi dan konveksi dari badan *Boiler* ke area sekitar *Boiler* house.

$$L6 = 0.548 \times \left[\left(\frac{Ts}{55.55}\right)^4 - \left(\frac{Ta}{55.55}\right)^4\right] + 1.957 \times (Ts - Ta)^{1.25} \times \sqrt{\frac{196.85 \times Vm + 68.9}{68.9}} \quad \textbf{(2.9)}$$

Dimana:

Ta : Suhu lingkungan (K)

Vm : Kecepatan angin (m/s)

Ts : Suhu Permukaan (K)

L7 = Kerugian akibat karbon yang tidak terbakar dalam *fly ash* (*Heat loss due to unburnt in fly ash)*

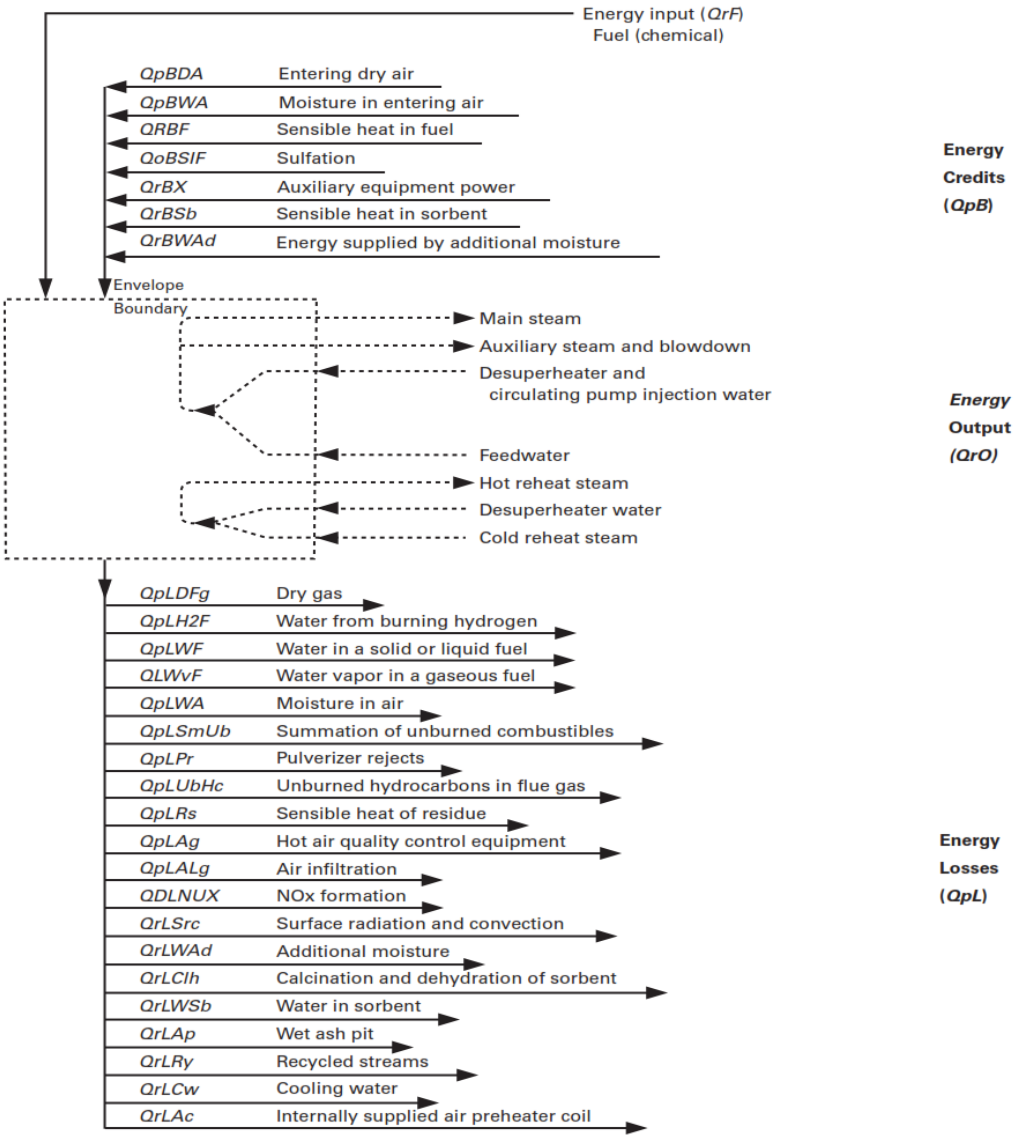
Sejumlah kecil karbon akan hilang dalam abu, dan ini mengakibatkan potensi kehilangan panas dari bahan bakar. Untuk menghitung kehilangan panas ini, sampel abu harus dianalisis untuk kandungan karbonnya. Jumlah abu yang dihasilkan per unit juga harus diidentifikasi. Kehilangan panas akibat abu terbang yang tidak terbakar dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$L7 = \frac{\text{Total fly ash x GCV fly ash}}{Total\ fuel\ burnt\ x\ GCV\ Fuel} x\ 100 \quad \textbf{(2.10)}$$

L8 = Kerugian panas akibat karbon yang tidak terbakar dalam *bottom ash* (*Heat loss due to unburnt in bottom ash)*

$$L8 = \frac{\text{Total bottom ash x GCV bottom ash}}{Total\ fuel\ burnt\ x\ GCV\ Fuel} x100 \quad \textbf{(2.11)}$$

Pengukuran efisiensi *Boiler* diatas, secara rinci dilakukan oleh Unit yang memiliki fungsi pada pengoperasian pembangkit (PLTU) di lingkungan PT PLN (Persero). Untuk memudahkan ilustrasi perihal pengukuran efisiensi *Boiler*, berikut *Energy Balance (Losses) method*:



Gambar 2. 9 Bagan *Boiler* Efisiensi (ASME PTC 4.1, 2008).

2.2.8 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi *Boiler*

Efisiensi *Boiler* sangat penting dalam sistem pembangkit energi dan pemanas karena berhubungan langsung dengan kinerja dan biaya operasional. Beberapa faktor utama yang mempengaruhi efisiensi *Boiler* adalah sebagai berikut:

2.2.8.1 Kualitas Bahan Bakar

Kualitas bahan bakar sangat mempengaruhi efisiensi *Boiler*. Bahan bakar yang tidak berkualitas atau memiliki kadar air dan sulfur yang tinggi dapat

menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna, menghasilkan lebih banyak abu dan gas buang, serta menurunkan efisiensi.

2.2.8.2 Pengaturan Pembakaran

Cara bahan bakar dibakar di dalam *Boiler* mempengaruhi efisiensi. Pembakaran yang tidak sempurna akan menyebabkan kerugian energi. Pengaturan yang tepat dari rasio udara ke bahan bakar dan suhu pembakaran dapat meningkatkan efisiensi.

2.2.8.3 Desain *Boiler*

Desain dan konstruksi *Boiler*, termasuk ukuran, material, dan konfigurasi, mempengaruhi kemampuannya untuk menghasilkan energi secara efisien. *Boiler* yang dirancang dengan baik akan memiliki transfer panas yang lebih baik dan lebih sedikit kehilangan energi.

2.2.8.4 Pemeliharaan dan Perawatan

Boiler yang tidak terawat dengan baik dapat mengalami penurunan efisiensi. Pengendalian korosi, pembersihan berkala dari kerak dan kotoran, serta pemeriksaan komponen secara rutin adalah penting untuk menjaga efisiensi.

2.2.8.5 Sistem Kontrol dan Otomasi

Sistem kontrol yang canggih dapat membantu mengoptimalkan kinerja *Boiler* dengan menyesuaikan parameter operasi sesuai dengan kebutuhan. Kontrol otomatis dapat mengatur suhu, tekanan, dan aliran bahan bakar untuk meningkatkan efisiensi.

2.2.8.6 Suhu dan Tekanan Operasi

Boiler yang beroperasi pada suhu dan tekanan yang tidak optimal dapat mengalami penurunan efisiensi. Menjaga suhu dan tekanan pada level yang tepat sesuai dengan spesifikasi *Boiler* adalah kunci untuk efisiensi.

2.2.8.7 Kualitas Air

Air yang digunakan dalam *Boiler* harus memiliki kualitas yang baik. Air yang mengandung mineral tinggi atau zat pengotor lainnya dapat menyebabkan pembentukan kerak dan korosi, yang pada gilirannya akan menurunkan efisiensi.

2.2.8.8 Sistem Pengeluaran Gas Buang

Efisiensi *Boiler* juga dipengaruhi oleh sistem pengeluaran gas buang. Kehilangan panas melalui gas buang dapat mengurangi efisiensi. Sistem economizer atau heat recovery yang baik dapat membantu memanfaatkan kembali panas dari gas buang untuk meningkatkan efisiensi.

2.2.8.9 Isolasi *Boiler*

Isolasi termal yang baik di sekitar *Boiler* membantu mengurangi kehilangan panas dan meningkatkan efisiensi. *Boiler* yang tidak terisolasi dengan baik dapat kehilangan banyak energi dalam bentuk panas.

2.2.8.10 Kondisi Lingkungan

Kondisi lingkungan sekitar seperti suhu udara dan kelembapan juga dapat mempengaruhi efisiensi *Boiler*. Misalnya, udara dingin dapat mempengaruhi suhu pembakaran dan efisiensi secara keseluruhan.

2.2.9 Diagram Sankey

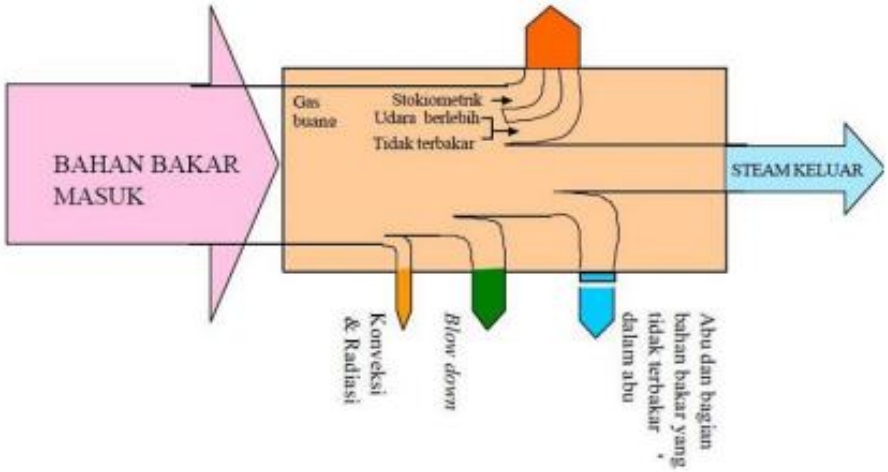
Diagram Sankey pada heat balance adalah alat visual yang digunakan untuk menggambarkan aliran energi dalam sebuah sistem. Diagram ini memberikan representasi grafis dari bagaimana energi, dalam bentuk panas atau sumber energi lainnya, dipindahkan atau dialokasikan di dalam sistem. Proses pembakaran dalam *Boiler* dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir energi. Diagram Sankey biasanya digambarkan dengan aliran energi yang ditunjukkan oleh aliran garis atau panah dengan ketebalan yang proporsional dengan jumlah energi yang dialirkan. Setiap aliran energi terhubung antara input, proses, kehilangan, dan output. Panah yang lebih tebal menunjukkan aliran energi yang lebih besar, sedangkan panah yang

lebih tipis menunjukkan aliran energi yang lebih kecil. Dengan cara ini, Diagram Sankey memberikan gambaran yang jelas dan langsung mengenai bagaimana energi digunakan, disalurkan, dan hilang dalam sistem, memungkinkan identifikasi efisiensi energi dan potensi perbaikan.

Diagram Sankey untuk heat balance sangat berguna dalam analisis sistem energi karena memberikan representasi visual yang mudah dipahami tentang bagaimana energi dipindahkan dan digunakan, serta mengidentifikasi area di mana efisiensi bisa ditingkatkan.

Diagram sankey merupakan keseimbangan energi total yang masuk *Boiler* terhadap yang meninggalkan *Boiler* dalam bentuk yang berbeda. Gambar dibawah ini memberikan penjelasan berbagai kehilangan yang terjadi untuk pembangkit listrik berbahan bakar batubara (Hendrayati, 2012).

Dengan diagram sankey dapat diidentifikasi kehilangan panas karena gas buang, kehilangan panas karena uap dalam gas buang, kehilangan panas karena kandungan air dalam bahan bakar, kehilangan panas karena kandungan air dalam udara, kehilangan panas karena bahan bakar belum terbakar, kehilangan panas karena radiasi dan konveksi. Uji efisiensi *Boiler* dengan metode tidak langsung dapat membantu dalam menemukan penyimpangan infisiensi *Boiler*.



Gambar 2. 10 Diagram Sankey (Hendrayati, 2012).

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1 Tempat Penelitian

Penelitian dan pengumpulan data berlokasi pada PT PLN Indonesia Power, Unit Bisnis Pembangkitan (UBP) Singkawang, yang beralamat di Desa Tanjung Gundul, Kecamatan Sei Raya Kepulauan, Kabupaten Bengkayang, Kalimantan Barat.



Gambar 3. 1 PLTU Bengkayang (2x50 MW)

3.1.2 Waktu Penelitian

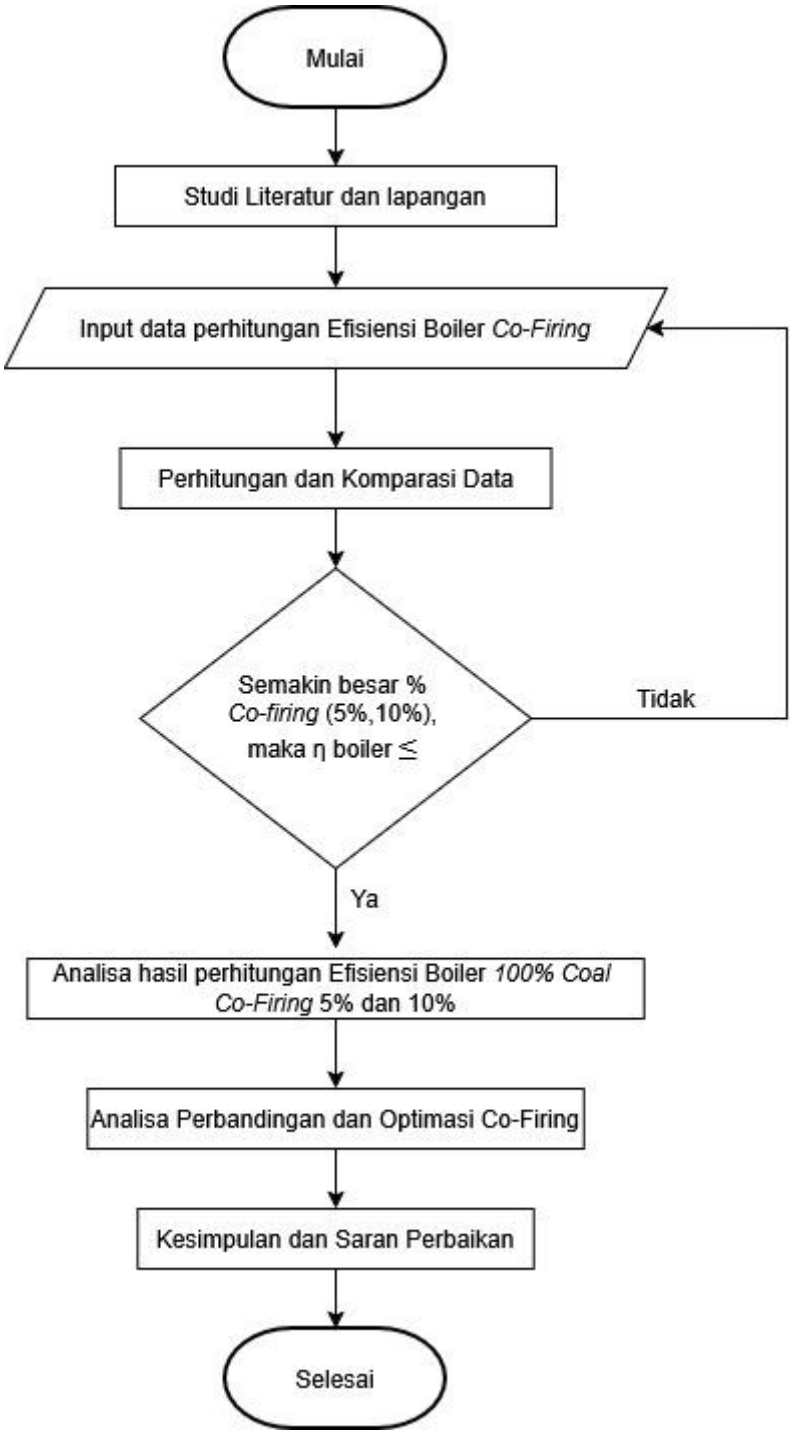
Waktu penelitian dan penulisan skripsi ini terbagi menjadi 4 tahapan yaitu:

1. Periode Persiapan dan Perencanaan
    - Waktu: 1 bulan sebelum mulainya pengambilan data.
    - Kegiatan: Persiapan alat dan bahan, perencanaan metode pengukuran, serta koordinasi dengan pihak PLN Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkit (UBP) Singkawang

2. Periode Pengumpulan Data
    - Waktu: 1 bulan.
    - Kegiatan: Pengumpulan data berdasarkan *log sheet* baik pada saat uji kinerja (comissioning) tahapan performance test boiler dan data pada saat impelemtasi skema co-firing 5% dan 10% meliputi pemantauan konsumsi bahan bakar dan parameter-parameter di boiler.
3. Periode Analisis Data
    - Waktu: 1 bulan setelah selesai pengambilan data.
    - Kegiatan: Pengolahan dan analisis data konsumsi bahan bakar dan operasi *Boiler* yang terkumpul untuk mengidentifikasi efisiensi *Boiler* berdasarkan paramater yang telah ditentukan.
4. Periode Penyusunan Laporan
    - Waktu: 1 bulan setelah analisis data selesai.
    - Kegiatan: Penyusunan laporan hasil penelitian serta perumusan usulan saran pola operasi *Co-Firing* agar tetap mempertahankan kinerja *Boiler*.

3.2 Desain Penelitian

Agar mendapatkan penelitian yang terstruktur, rancangan peneliatian perlu disusun. Pada penelitian ini dibuat diagram alir atau *flowchart* untuk mempermudah dalam penentuan tahapan pembuatam skripsi. Berikut ini diagram alir yang akan digunakan untuk menunjukan langkah kerja pada penelitian ini:



Gambar 3. 2 Diagram Alir / *Flowchart* Desain Penelitian

3.3 Metode Pengumpulan Data

Dalam melakukan penelitian ini, penyusun menggunakan teknik pengumpulan data baik pengamatan langsung maupun pengamatan tidak langsung dengan uraian sebagai berikut:

3.3.1 Metode Pengamatan Langsung

1. Studi literatur *manual book*, *plant design* serta Standar operasioan Prosedur (SOP) serta ketentuan yang ada di Standar ASME PTC 4-2008.
2. Meninjau secara langsung di di lokasi PLTU Bengkayang (2x50 MW) untuk pengambilan data dan memastikan kondisi peralatan *Boiler* apakah terdapat modifikasi atau tidak.
3. Data paramater operasi *Co-Firing Boiler* boiler PLTU Bengkayang baik pada saat skema 5% dan 10% yang diperoleh kemudian dianalisis secara detail untuk mengidentifikasi efisiensi boiler mengacu pada cara perhitungan metoda tidak langsung *(In-direct method)*.

3.3.2 Metode Pengamatan Tak Langsung

1. Dilakukan wawancara dengan operator shift dan pegawai bidang rendal operasi dan pengendalian bahan bakar PLTU Bengkayang untuk mendapatkan pemahaman lebih dalam tentang operasi *Co-Firing*.
2. Mengumpulkan dan menganalisis data riwayat uji kinerja (*commissioning*) saat *performance test Boiler* 100% batubara (*coal firing*) untuk mengetahui hasil efisiensi *Boiler*.
3. Memeriksa dokumen terkait seperti laporan inspeksi serta catatan pemeliharaan untuk mendapatkan data lebih lanjut tentang *history* kondisi boiler PLTU Bengkayang.
4. Melakukan diskusi dan tanya jawab dengan dosen pembimbing dan dosen mata kuliah terkait di Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi PLN.

3.4 Metode Analisis Data

Metoda analisis data yang digunakan penulis pada penelitian ini yaitu:

1. Identifikasi Masalah

   Permasalahan yang ada adalah memastikan apakah peningkatan komposisi co-firing biomassa dapat mempengaruhi efisiensi boiler, dengan mencari hasil perhitungan saat skema 5% dan 10% dan dibandingkan pada saat uji *performance test* boiler pada tahapan *commissioning* proyek PLTU Bengkayang.

2. Kajian Literatur

   Dengan tujuan mendapatkan pemahaman dalam menganalisis permasalahan yang ada, penyusun melakukan kajian / studi literatur yang berkaitan dengan karakteristik boiler *Circulating Fluidized Bed*, analisis efisiensi peralatan boiler sesuai standar ASME PTC 4-2008, dan analisis hasil perhitungan efisiensi boiler dari beberapa penelitian sebelumnya. Kajian atau studi literatur didapatkan dari tugas akhir maupun jurnal yang telah dilakukan publikasi ilmiah.

3. Pengumpulan dan Validasi Data

   Pengumpulan data baik jenis data primer maupun data sekunder mengenai operasi yang diambil antara lain meliputi *temperature*, tekanan dan *mass flow rate* dari batubara dan udara pembakaran diperlukan sebagai parameter input untuk perhitungan simulasi. Kemudian data operasi lainnya yang diperlukan sebagai acuan validasi. Serta data mengenai *Certificate of Sampling and Analysis* (CoA) dari batubara dan biomassa (*Woodchip*) yang digunakan sebagai bahan bakar operasi co-firing.

4. Perhitungan Efisiensi *Boiler*

   Metode tidak langsung atau *In-direct method* digunakan untuk menghitung efisiensi *Boiler* berdasarkan data hasil variasi pada perhitungan pramater yang ada. Kehilangan panas atau *heat loss* yang dihitung meliputi kehilangan panas dalam gas buang, kehilangan panas akibat uap air dalam bahan bakar, perhitungan panas dari kelembapan akibat pembakaran hidrogen dalam bahan bakar, kehilangan panas karena uap air di udara, kehilangan panas sensibel dari abu dasar, kehilangan panas sensibel dari abu terbang, kehilangan panas dari pembentukan CO, kehilangan panas dari Pembentukan NOx, kehilangan panas dari proses radiasi dan konveksi permukaan, kehilangan panas dari air, dan perhitungan panas total dari *Boiler*.

   Selanjutnya penyusun membandingkan data efisiensi *Boiler* saat operasi *Co-Firing* dengan data efisiensi *Boiler* dengan pola operasi 100% *coal firing* pada saat *commissioning (perfromance test)*. Menentukan apakah

ada korelasi antara pola operasi *Co-Firing* dengan pola operasi 100% *coal firing* yang nanti akan disimpulkan pengaruhnya terhadap efisiensi *Boiler*.

5. Analisis dan Kesimpulan

   Melakukan analisis tren dari data operasi 5% dan 10% co-firing biomassa untuk melihat perubahan dalam karakteristik parameter boiler. Mengidentifikasi apakah ada perubahan yang signifikan dalam tingkat komposisi *co-firing biomassa* tersebut.

   Berdasarkan hasil analisis, menyusun usulan strategi pola operasi *co-firing* biomassa untuk mengurangi emisi gas buang atau mencegah dampak negatif dari Gas Rumah Kaca tanpa harus mengorbankan perfomance dari boiler PLTU Bengkayang.

3.5 Jadwal Penelitian

Kegiatan pelaksanaan penelitian, dimulai dari tahapan persiapan penelitian hingga penyelesaian tahapan pelaporan, dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian

No	Uraian Kegiatan	Bulan																							
		Maret				April				Mei				Juni				Juni				Juli			
		M-1	M-2	M-3	M-4	M-1	M-2	M-3	M-4	M-1	M-2	M-3	M-4	M-1	M-2	M-3	M-4	M-1	M-2	M-3	M-4	M-1	M-2	M-3	M-4
1	Studi Literatur																								
2	Penyusunan Proposal Skripsi																								
3	Sidang Proposal																								
4	Pengambilan Data																								
5	Pengolahan Data																								
6	Analisa Data																								
7	Penyusunan Tugas Akhir / Skripsi																								

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

4.1.1 Kebutuhan Biomassa *Woodchip*

Biomassa serpihan kayu atau *woodchip* di sekitar unit PLTU Bengkayang untuk keperluan *Co-Firing* PLTU Bengkayang dilakukan uji bakar aktual oleh personal dari PLN IP UBP Singkawang.

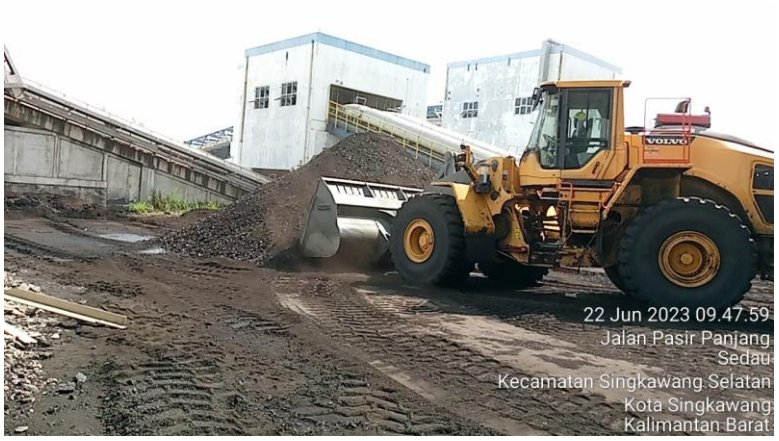
Kalimantan Barat memiliki potensi woodchip yang cukup besar untuk mendukung program co-firing biomassa pada PLTU. Potensi ini ditopang oleh luas hutan produksi, keberadaan HTI, produksi kayu bulat. PLTU Bengkayang telah menerapkan co-firing *woodchip* sejak Juni 2023. Di sisi lain, pengadaan woodchip PLN EPI untuk PLTU Bengkayang menunjukkan kebutuhan biomassa pada kisaran 18.000 sampai 36.000 ton per tahun. Dengan basis produksi kayu bulat Kalbar sebesar 1,70 juta m^3 pada 2023, potensi residu kayu secara teoritis cukup untuk mendukung kebutuhan awal co-firing. Namun, pemanfaatannya harus berbasis limbah legal, terkendali, berkelanjutan, dan tidak mendorong deforestasi

Skema operasi *Co-Firing* biomassa PLTU Bengkayang dilakukan dengan komposisi biomassa bertahap yakni 5% dan 10% dari total *mix fuel flow* 30 ton/jam beban disetting pada 45 *MW Gross* dengan durasi total pengujian 2 jam, sehingga estimasi total kebutuhan biomassa untuk uji *Co-Firing* di PLTU Bengkayang adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Estimasi Total Kebutuhan Biomassa dan Batubara Pengujian Co-Firing

No.	Skenario *Co-Firing* (% Biomassa)	Durasi (Jam)	Biomassa (Ton)	Batubara (Ton)	Total (Ton)
1	0% Bio ; 100% Batubara (Coal flow – 30 ton/jam)	2	0,0	60	60
2	5% Bio ; 95% Batubara	2	3	57	60
3	10% Bio ; 90% Batubara	2	6	54	60

Persiapan *fuel mixing* antara *woodchip* dan batubara dilakukan di *coal yard*. *Coal yard* sebagai penampungan bahan bakar di PLTU Bengkayang dilengkapi dengan *coal shelter*, sehingga cukup terlindungi dari hujan dan cuaca. *Fuel mixing* dilakukan dengan bantuan alat berat untuk mendapatkan campuran yang cukup rata. Alat berat juga digunakan untuk mendorong campuran biomassa dan batubara menuju *Emergency Reclaim Hopper* (ERH) untuk selanjutnya dibawa oleh *belt conveyor* melalui *transfer tower* menuju *coal bunker.* Dari *coal bunker*, campuran batubara dan biomassa akan menuju *coal feeder* sebelum masuk ke dalam *coal mill* untuk dilakukan penggerusan. Dokumentasi proses biomass mixing seperti gambar dibawah ini.



(a)



(b)

Gambar 4. 1 Proses *Biomass Mixing* di PLTU Bengkayang

4.1.2 Karakteristik Bahan Bakar Yang Digunakan

Untuk memahami karakteristik bahan bakar yang digunakan dalam pengujian skema *Co-Firing*, penting untuk melakukan analisis terhadap sifat fisik maupun kandungan kimia dari campuran bahan bakar (batubara dan *woodchip*) melalui uji laboratorium. Uji laboratorium yang diperlukan antara lain *Proximate Analysis*, *Ultimate Analysis*, analisis abu, *Ash Fushion Temperature*, dan *Chlorine Analysis*. Pentingnya dilakukan beberapa analisis diatas selain untuk mengetahui nilai kalor juga untuk mengetahui zat yang terkandung dalam bahan bakar dan zat yang akan terbentuk pada hasil pembakaran sehingga dapat dilakukan analisis mendalam adanya potensi terbentuknya *slagging*, *foulling* serta terjadinya korosi di dalam *Boiler*.

Batubara yang digunakan dalam pengujian *Co-Firing* di PLTU Bengkayang adalah batubara dari Arutmin dengan jenis *Low Rank Coal* (LRC). Data karakteristik batubara dan *woodchip* berdasakan *Certificate of Sampling and Analysis* (COA) ditunjukan pada tabel di bawah ini.

Tabel 4. 2 Komparasi Karakteristik Batubara dan Biomassa Woodchip

Parameter	**Unit**	***Bituminous (Typical)***	***Sub Bituminous (Typical)***	***Batubara PT Kutai Energi***	***Woodchip***
Ultimate					
Carbon	%	48,61	43,82	46,52	44,26
Hydrogen	%	3,75	3,37	3,51	5,09
Nitrogen	%	1,09	0,68	0,86	0,28
Oxygen	%	13,95	13,22	14,35	32,25
Proximate					
Total Moisture	%	24,32	35,84	30,37	16,72
Ash Content	%	7,66	2,96	3,90	1,32
Volatile Matter	%	34,43	30,97	33,32	64.70
Fixed Carbon	%	33,59	30,24	32,41	17,27
Total Sulphur	%	0,63	0,11	0,50	0,09

Gross Caloric Value	kCal/kg	4897	4199	4365	4126
Hardgrove Grindability Index		47	55	57	<32

Dari tabel diatas, terdapat beberapa perbedaan karakteristik antara batubara dengan *woodchip* antara lain:

1. Nilai kalor *woodchip* lebih rendah dari nilai kalor batubara, yang menyebabkan pembakaran campuran antara *woodchip* dengan batubara membutuhkan volume bahan bakar yang lebih banyak untuk memproduksi energi listrik jika dibandingkan dengan menggunakan skema pembakaran coal firing atau 100% batubara.
2. Kandungan sulfur pada *woodchip* lebih rendah dibandingkan dengan batubara, yang berpotensi akan menghasilkan emisi pembakaran lebih rendah. Melalui penambahan biomassa seperti *woodchip* pada pengujian skema operasi *Co-Firing* mampu menurunkan emisi SOx, NO_X dan emisi partikulate sehingga dapat mencapai target baku mutu yang ditetapkan oleh peraturan perundang-undangan.
3. Kandungan *volatile matter* pada *woodchip* lebih tinggi jika dibandingkan dengan batubara, sehingga bahan bakar *woodchip* lebih mudah terbakar. Hal ini menjadikan perhatian ketika melakukan skema operasi *Co-Firing* terutama pada pemantauan temperatur dari boiler. Kandungan volatile matter yang makin tinggi menyebabkan *woodchip* akan lebih cepat terbakar, sehingga membantu mempercepat proses pembakaran di dalam *Boiler* secara menyeluruh.
4. Nilai *Ash Content* dari *woodchip* lebih rendah, sehingga dapat mengurangi jumlah kandungan *ash* atau abu (*bottom ash* dan *fly ash*) yang dihasilkan dari proses pembakaran di dalam *Boiler*.

4.2 Pembahasan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah dijelaskan, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui apakah kenaikan komposisi biomassa pada skema operasi *Co-Firing* mempengaruhi peningkatan efisiensi *Boiler*, dan bagaimana pola operasi *Co-Firing* agar dapat mencegah kerugian-kerugian suatu pembangkit serta memastikan skema operasi *Co-Firing* mempengaruhi desain awal *Boiler* PLTU Bengkayang. Hasil pembahasan yang telah dilakukan menjawab ketiga rumusan masalah tersebut melalui analisis pengamatan parameter operasi beserta evaluasi lingkungan, namun berfokus kepada skema operasi *Co-Firing* 10%. Berikut pembahasannya:

4.2.1 Perbandingan Efisiensi *Boiler* dengan Persentase Komposisi Campuran Bomassa

Bahan bakar yang digunakan pada pengujian efisiensi *Boiler* dari beberapa skema operasi telah dilakukan analisis laboratorium. Perbandingan parameter dari bahan bakar yang digunakan selama pengujian akan dilakukan analisis pengaruh peningkatan persentase komposisi campuran biomassa antara 5% dan 10% terhadap efisiensi *Boiler* PLTU Bengkayang.

Peningkatan komposisi campuran biomassa ini dimaksudkan untuk mendapatkan hasil energi listrik yang lebih ramah lingkungan mengingat skema operasi *Co-Firing* terbukti dapat menurunkan emisi CO_2, NO_x dan SO_x. Sehingga semakin tinggi bahan bakar biomassa yang digunakan makan akan semakin rendah efek gas rumah kaca yang dihasilkan.

Dalam perencanaan peningkatan komposisi campuran biomassa ini harus memperhatikan kondisi desain *Boiler* eksisting, sehingga diharapkan dengan menaikan persentase *Co-Firing* tidak akan mempengaruhi terhadap peralatan. Adapun desain *Boiler* milik PLTU Bengkayang dapat dilihat pada data berikut ini:

Tabel 4. 3 Parmaeter Desain Boiler PLTU Bengkayang

Item	**Rated**
Main steam Flow	240 t/h
Main steam outlet Pres	9,8 MPa.g
Main steam outlet Temp	540 °C
Drum Pressure	9,96 Mpa.g
Feed water Temp	215 °C
AH inlet air Temp	42°C
AH outlet air temp. (PA/SA)	180 °C
Fuel Consumption	40 t/h

Bahan bakar batu bara adalah sejenis *lignit*, dengan spesifikasi yang dijelaskan sebagai berikut:

Tabel 4. 4 Spesifikasi Desain Bahan Bakar PLTU Bengkayang

No	***Description***	***Symbol***	***Unit***	***Design Coal***	***Worst Coal***	***Various range***
1	*Ultimate analysis as received*	C	%	47,65	45,20	41,25 - 49,4
2		H	%	3,36	3,15	3,375 - 4,55
3		O	%	13,00	11,70	7 - 16,25
4		N	%	0,77	0,70	0,375 - 0,975
5		S	%	0,23	0,25	0,1 - 0,23
6		A	%	5,00	4,00	3 - 6
7	*Total Moisture as Received*	M	%	30,00	35,00	25 - 35
8	*Total*	Σ	%	100,00	100,00	15 - 25
9	*Volatile content*	V	%	54	46	42 - 67,8
10	*LHV*	Q	kcal/kg	4200	3900	3800 - 4500

Tabel 4. 5 Perbandingan Karakteristik Campuran 5% dan 10%

Analisa	Parameter (AR)	Commissioning	Performance Test Coal 100%	Performance Test Co Firing : Coal + 5% Woodchip	Performance Test Co Firing : Coal + 10% Woodchip
Ultimate Analysis (%wt)	Carbon	45,66	46,52	44,98	44,99
	Hydrogen	4,86	3,51	3,26	3,21
	Oxygen	25,79	14,35	14,20	13,45
	Nitrogen	0,7	0,86	0,73	0,75
	Sulphur	0,56	0,50	0,25	0,28
Proximate Analysis (%wt)	Ash Content	14,44	3,90	6,07	6,64
	Total Moisture	10,72	30,37	30,96	30,68
	Volatile matter	27,89	33,32	32,19	32,10
	Fixed Carbon	21,58	32,41	30,78	30,58
Gross Calorific Value		**3359**	**4365**	**4379**	**4345**

Dengan Dengan melihat tabel diatas, nilai kalor bahan bakar hingga campuran 10% masih masuk dalam *range design fuel input minimum Boiler* PLTU Bengkayang. Namun, dengan meningkatkan komposisi campuran biomassa ternyata menyebabkan terjadinya penurunan *Gross Caloric Value* bahan bakar Yang mana dapat menyebabkan nilai kalor komposisi biomassa 10% yang menurun menyebabkan pembakaran campuran *woodchip* dan batubara membutuhkan volume bahan bakar yang lebih banyak untuk memproduksi energi listrik yang sama jika dibandingkan dengan pembakaran 100% batubara.

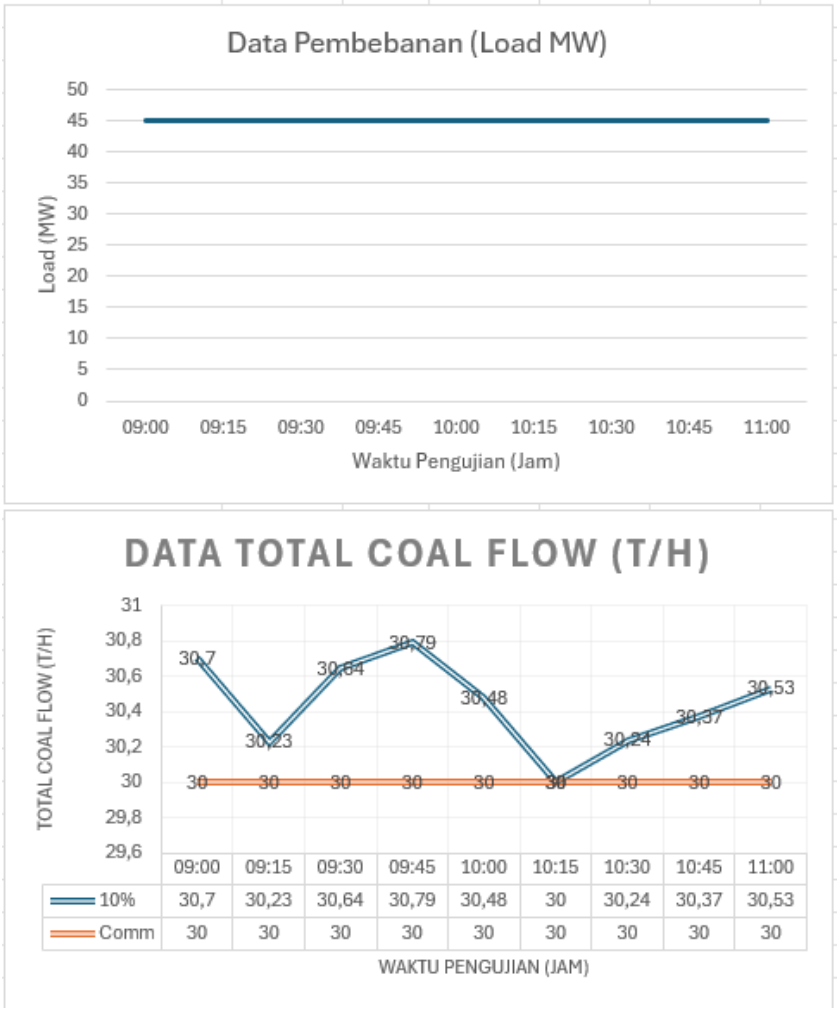
4.2.2 Pengamatan Parameter Operasi *Co-Firing* 10%

Pada sub-bab ini, dilakukan pengamatan parameter operasi *Co-Firing* khusus pada campuran 10% *woodchip* mengingat target bauran energi yang mengharuskan PLTU batubara di Indonesia meningkatkan persentase campuran biomassa. Monitoring data operasi kondisi 90% Batubara dan 10% *woodchip* dilakukan pada *setting* beban 45 MW, parameter operasi utama atau *critical point* yang dimonitor ialah: *coal flow, total air flow, main steam temperature, main steam pressure* dan *main steam flow*.

Tabel 4. 6 Data Operasi Pada Pengujian Co-Firing 10%

No	Parameter	Comm.	Satuan	Waktu Pengambilan Data								
				09:00	09:15	09:30	09:45	10:00	10:15	10:30	10:45	11:00
1	*Load*	45	MW	45	45	45	45	45	45	45	45	45
2	*Coal Flow*	30	T/h	30,7	30,23	30,64	30,79	30,48	30	30,24	30,37	30,53
3	*Total Air Flow*	156.543	m3/h	156.411	156.342	156.401	156.156	155.803	156.369	156.569	156.828	155.289
4	*Main Steam Pressure*	8,2	Mpa	6,69	6,66	6,57	6,62	6,78	6,85	6,84	6,77	6,81
5	*Main Steam Temp*	528,7	℃	512,9	526,72	525,44	525,11	524,28	523,22	522,87	522,81	523,4
6	*Main Steam Flow*	170	T/h	174,17	172	170,87	172,1	172,07	171,13	172,88	172,57	171,94

Dapat dilihat dari tabel diatas bahwa beberapa parameter yang dilakukan pengamatan selama pengujian terlihat normal tidak berbeda jauh deviasinya dengan standar saat dilakukan *commissioning.* Selanjutnya dilakukan analisis parameter operasi *load dan total coal biomass flow* pada pengujian *Co-Firing woodchip* hingga 10% dengan grafik dibawah ini,



Gambar 4. 2 Grafik Pengamatan Operasi (a) Load dan (b) Coal Biomass Flow

Berdasarkan grafik diatas, dapat dilakukan analisis yaitu total *coal biomass flow* ketika operasi 100% batubara dan *Co-Firing* 10% woodchip tidak terdapat perbedaan signifikan dengan rata-rata 30 ton/jam.

Tabel 4. 7 Data perhitungan efisiensi boiler PLTU Bengkayang Unit 2

No	Parameter	Satuan	Commisioning	Performance Test Coal 100%	Performance Test Co Firing : Coal + 5% Woodchip	Performance Test Co Firing : Coal + 10% Woodchip
1	Tanggal Pengujian		15 Agustus 2019	19 Juni 2023	22 Juni 2023	23 Juni 2023
2	Beban Unit #2	MW	45	45	45	45
3	Main Steam Temp	∘C	528,7	528,7	528,7	528,7
4	Steam Pressure	Mpa	8,77	8,77	8,77	8,77
5	Total Moisture	%wt	10,72	30,37	30,96	30,68
6	Moisture in analysis	%wt	10,71	21,66		11,61
7	Ash Content	%wt	14,44	3,90	6,07	6,64
8	Volatile Matter	%wt	27,89	33,32	32,19	32,10
9	Fixed Carbon	%wt	21,58	32,41	30,78	30,58
10	Carbon	%wt	45,66	46,52	44,98	44,99
11	Hydrogen	%wt	4,86	3,51	3,26	3,21
12	Nitrogen	%wt	0,7	0,86	0,73	0,75
13	Sulfur	%wt	0,56	0,50	0,25	0,28
14	Oxygen	%wt	25,79	14,35	14,20	13,45
15	GCV (Gross Calorfic Value)	kCal/kg	3359	4365	4379	4345
16	(%CO_2) in flue gas	%	14,54	12,92	13,29	13,20
17	(%CO) in flue gas	%	0,00000417	0,0000023	0,000002	0,0000024
18	Oxygen in flue gas	%	4,40	6,70	6,55	6,50
19	Flue gas Temp	∘C	121,7	138,79	135,49	133,65
20	Ambient Temp	∘C	28,72	30,30	33,24	33,45
21	Humidity ambient air	kg/kg dry air	0,0133	0,0146	0,0174	0,0176
22	GCV of Fly Ash	kCal/kg	452,5	452,5	452,5	452,5
23	HHV of Bottom Ash	kCal/kg	800	800	800	800
24	Ratio bottom ash to fly ash		10 : 90	10 : 90	10 : 90	10 : 90

4.2.3 Perhitungan Data

Pengujian skema operasi *Co-Firing* dengan menggunakan biomassa 10% *woodchip* dan 90% batubara pada unit #2 PLTU Bengkayang dilakukan selama 2 jam. Hasil mixing batubara dan *woodchip* yang diambil sebelum masuk coal crusher. Untuk memperoleh parameter bahan bakar dilakukan analisis di laboratorium dengan hasil berikut:

4.2.3.1 Perhitungan Data Heat Loss

Menghitung Kehilangan panas dalam gas buang kering (L_1)

$$L1 = \frac{\text{m x Cp x (Tf}-\text{Ta)}}{\text{GCV fuel}}\ x\ 100$$

$$L1 = \frac{5.08 \text{ x } 0{,}242 \text{ x } (140{,}80-30{,}92)}{4345}\ x\ 100$$

L1 = 4,56 %

4.2.3.2 Menghitung kehilangan panas akibat kelembapan (moisture) dalam bahan bakar (L_2)

$$L2 = \frac{\text{M x } [584 + \text{Cp (Tf} - \text{Ta)}]}{\text{GCV fuel}}\ x\ 100$$

$$L2 = \frac{0{,}4136 \text{ x } [584 + 0{,}59\ (140{,}80 - 30{,}92)]}{4345}\ x\ 100$$

L2 = 4,13 %

4.2.3.3 Menghitung kehilangan panas akibat hidrogen (H2) dalam bahan bakar (L_3)

$$L3 = \frac{9 \text{ x H2 x } [584+\text{Cp (Tf}-\text{Ta)}]}{\text{GCV fuel}}\ x\ 100$$

$$L3 = \frac{9 \text{ x } 0{,}0253 \text{ x } [584+0{,}59\ (140{,}80-30{,}92)]}{4345}\ x\ 100$$

L3 = 4,42 %

4.2.3.4 Menghitung kehilangan panas akibat kelembapan dalam udara /moisture in the air (L_4)

$$L4 = \frac{\text{AAS x humidity x Cp x (Tf} - \text{Ta)}}{\text{GCV fuel}}\ x\ 100$$

$$L4 = \frac{4{,}77 \text{ x } 0{,}0152 \text{ x } 0{,}59 \text{ x } (140{,}80 - 30{,}92)}{4345}\ x\ 100$$

L4 = 0,16 %

4.2.3.5 Menghitung kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna / *incomplete combustin* (L_5)

$$L5 = \frac{\%CO \text{ x } C}{\%CO \; x \; \%CO2} \; x \; \frac{5744}{GCV \; Fuel} x \; 100$$

$$L5 = \frac{0{,}000002 \text{ x } 0{,}3806}{0{,}000002 \; x \; 13{,}04} \; x \; \frac{5744}{4345} x \; 100$$

L5 = 0 %

4.2.3.6 Menghitung kehilangan panas karena radiasi pada permukaan boiler (L_6)

Perhitungan kehilangan panas karena radiasi pada permukaan boiler diperkirakan menggunakan grafik ASME PTC 4.1 dan dari data manual book diperoleh untuk L_6 dengahn nilai 0,2%

4.2.3.7 Menghitung kehilangan panas akibat carbon yang tidak terbakar dan terbawa fly ash (L_7)

$$L7 = \frac{\text{Total fly ash x GCV fly ash}}{GCV \; Fuel} x \; 100$$

$$L7 = \frac{0{,}9 \text{ x } 0{,}0470 \text{ x } 452{,}5}{4345} x \; 100$$

L7 = 0,006%

4.2.3.8 Menghitung kehilangan panas akibat carbon yang tidak terbakar dan terbawa *fly ash* (L_8)

$$L8 = \frac{\text{Total bottom ash x GCV bottom ash}}{GCV \; Fuel} x 100$$

$$L8 = \frac{0{,}1 \text{ x } 0{,}0470 \text{ x } 800}{4345} x 100$$

L8 = 0,03%

Menghitung efisiensi *Boiler* (η) dengan pada saat *performance test* dengan *co-firing* 10% *woodchip* yaitu sebagai berikut:

η boiler = 100% - (L_1 + L_2 +L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) %

η boiler = 100% - (4,56 + 4,13 + 4,42 + 0,16 + 0,0012 + 0,20 + 0,006 + 0,03) %

η boiler = 86,50 %

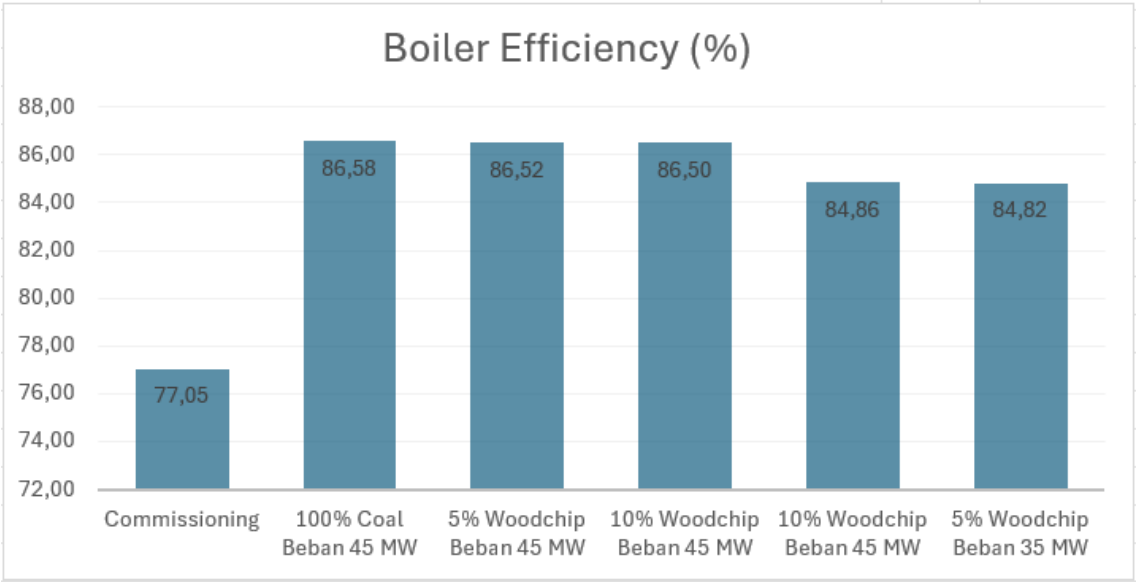
4.2.4 Perbandingan Efisiensi *Boiler*

Dengan menggunakan perhitungan melalui microsoft excel sesuai dengan formula yang disebutkan dalam ASME PTC 4-1 maka didapatkan perbandingan efisiensi *Boiler* sesuai tabel di bawah ini:

Tabel 4. 8 Perbandingan Hasil Perhitungan Heat Losses

Parameter	Satuan	*Commissioning*	*Performance Test Coal 100%*	*Performance Test Co Firing : Coal + 5% Woodchip*		*Performance Test Co Firing : Coal + 10% Woodchip*	
Tanggal Pengujian		15 Agustus 2019	19 Juni 2023	22 Juni 2023		23 Juni 2023	
Beban	MW	45	45	45	35	45	35
Gross Calorific Value	kCal/kg	3359	4365	4379		4345	
L1 - Heat loss due to dry flue gas	%	4,17	4,65	4,51	5,00	4,56	5,00
L2 - Heat loss due to H2 in fuel	%	6,86	4,03	4,16	4,27	4,13	4,27
L3 - Heat loss owing to the moisture present fuel	%	8,3	4,35	4,42	5,48	4,42	5,48
L4 - Heat loss owing to the moisture present fuel	%	0,13	0,16	0,16	0,18	0,16	0,18
L5 - Heat loss owing to the moisture present in the air	%	0,00	0,0007	0,0011	0,00	0,0012	0,0014
L6 - Heat loss due to radiation and convection	%	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
L7 - Heat loss due to unburnt in fly ash	%	0,19	0,006	0,01	0,006	0,006	0,006
L8 - Heat loss due to unburnt in bottom ash	%	3,1	0,02	0,03	0,004	0,03	0,04
Total Heat Losses	%	**22,95**	**13,42**	**13,48**	**15,14**	**13,50**	**15,18**
Efisiensi Boiler	%	**77,05**	**86,58**	**86,52**	**84,86**	**86,50**	**84,82**

Dari tabel perbandingan hasil perhitungan heat losses pada beberapa skema operasi, berikut grafik perbandingan efisiensi *Boiler* pada unit #2 PLTU Bengkayang.

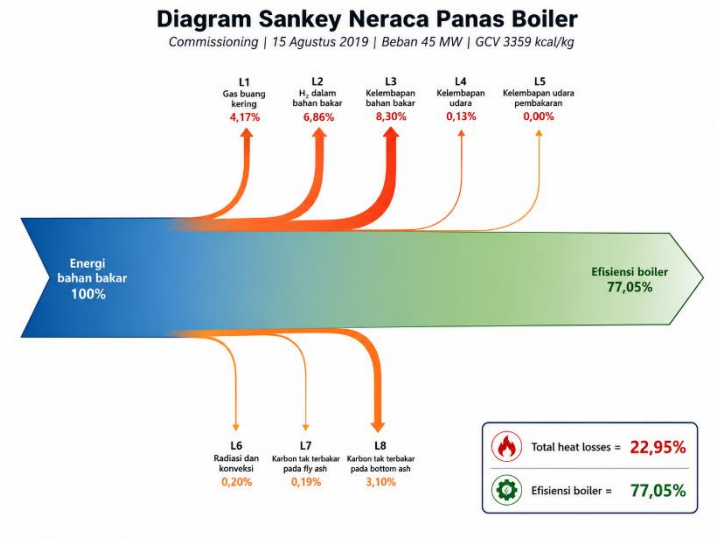


Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Efisiensi Boiler dalam Berbagai Skema Operasi

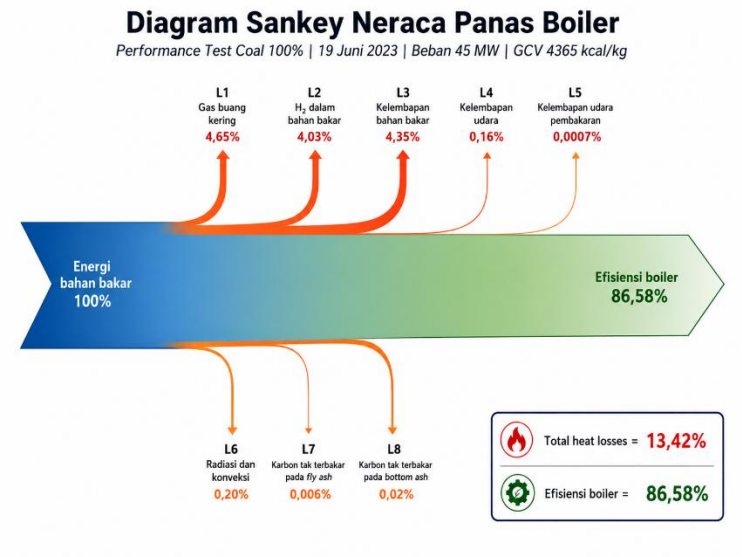
Dengan memperhatikan grafik diatas, pada analisis komposisi campuran *woodchip* 5% pada beban 45 MW nilai efisiensi *Boiler* didapatkan paling tinggi jika dibandingkan dengan campuran 10% beban 45MW. Berturut turut nilai Efisiensi *Boiler* dari campuran 5% dan 10% adalah 86,52 dan 86,50%.

Terjadinya penurunan efisiensi *Boiler* serta pergeseran titik optimum efisiensi *Boiler* dapat disebabkan oleh banyak faktor, salah satunya yaitu kualitas dari bahan bakar yang digunakan semakin menurun. Dengan meningkatkan biomassa, maka *GCV* yang digunakan semakin menurun akibat nilai kalor dari biomassa tersebut (*woodchip*) lebih rendah dibandingkan batubara. Rendahnya nilai kalor *woodchip* dikarenakan jenis kayu yang digunakan berbeda-beda, selain itu proses pengeringan biomassa sangat berpengaruh terhadap *moisture* yang akan mempengaruhi nilai kalor biomassa. Terbukti bahwa nilai total moisture pada *woodchip* lebih tinggi daripada tipikal batubara, sehingga membutuhkan energi dan waktu lebih banyak untuk proses pembakaran. Oleh sebab itu, untuk memperoleh data yang lebih akurat, diperlukan pengujian lebih lanjut dengan memperhatikan karakterisitik pada tiap komposisi campuran biomassa.

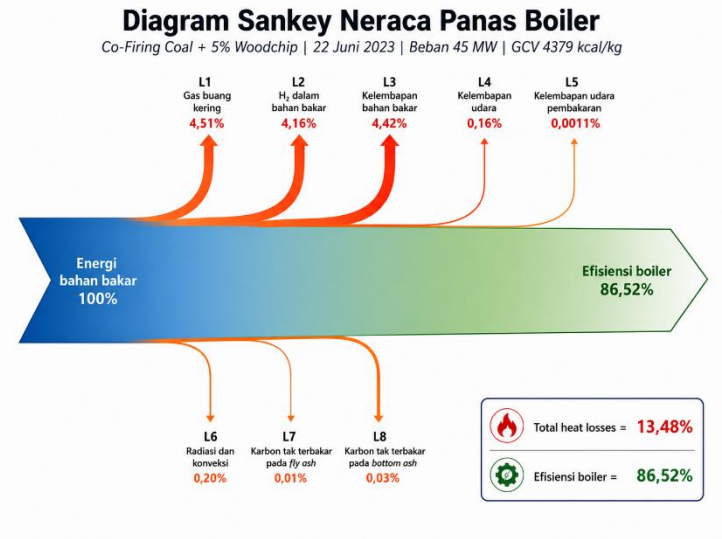
4.2.5 Diagram Sankey



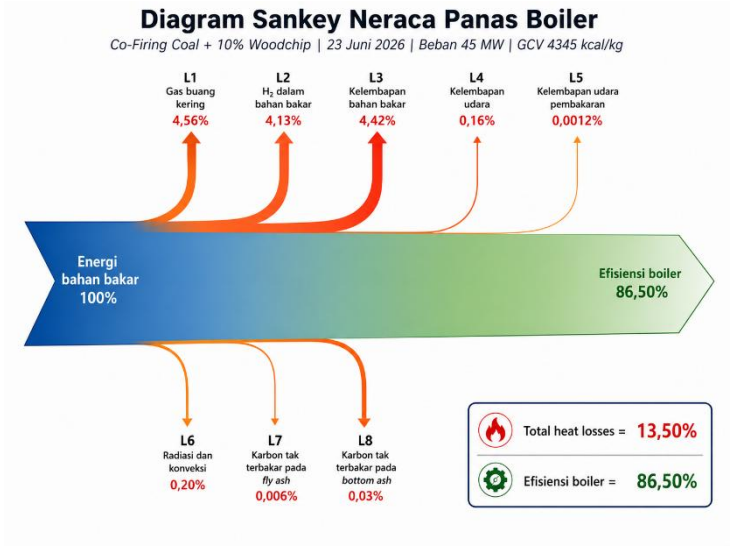
Gambar 4.4 Diagram Sankey Commisioning



Gambar 4.5 Diagram Sankey Performance Test 100% Coal



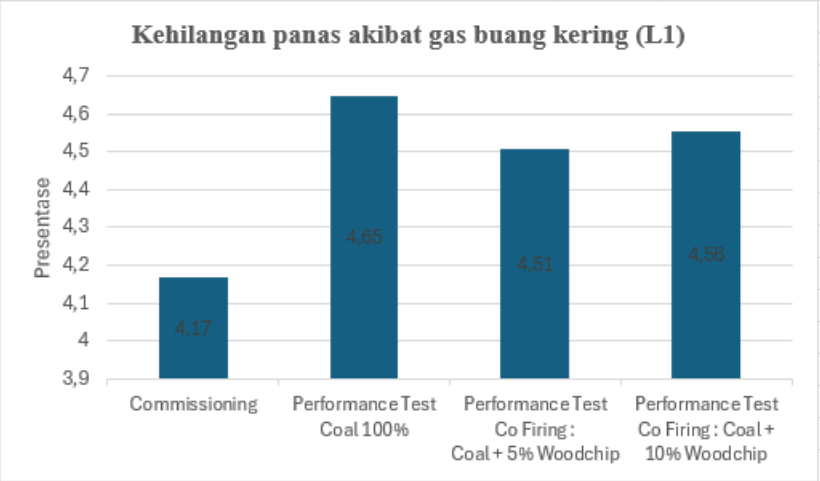
Gambar 4.6 Diagram Sankey *Co-Firing* 5% *Woodchip*



Gambar 4.7 Diagram Sankey *Co-Firing* 10% *Woodchip*

4.2.6 Analisa *Heat Loss*

4.2.5.1 Kehilangan panas akibat gas buang Kering (L_1)



Gambar 4.8 Grafik kehilangan panas akibat gas buang kering (L_1)

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai kehilangan panas akibat gas buang kering atau L1 menunjukkan perbedaan pada setiap kondisi pengujian. Pada kondisi commissioning, nilai L1 sebesar 4,17%. Nilai ini merupakan nilai kehilangan panas paling rendah dibandingkan kondisi pengujian lainnya.

Pada Performance Test dengan bahan bakar 100% batubara, nilai L1 meningkat menjadi 4,65%. Jika dibandingkan dengan kondisi commissioning, terjadi kenaikan sebesar 0,48 poin persentase atau sekitar 11,51% secara relatif. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa panas yang terbawa keluar bersama gas buang kering pada kondisi *Performance Test* 100% batubara lebih besar.

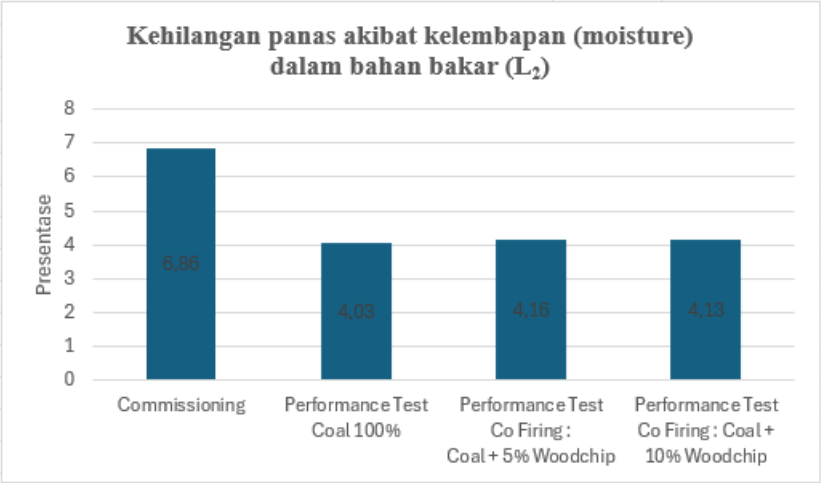
Setelah diterapkan *co-firing* 5% *woodchip*, nilai L1 turun menjadi 4,51%. Dibandingkan dengan kondisi 100% batubara sebesar 4,65%, terjadi penurunan sebesar 0,14 poin persentase atau sekitar 3,01% secara relatif. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan *woodchip* sebesar 5% mampu menurunkan kehilangan panas melalui gas buang kering dibandingkan penggunaan 100% batubara pada kondisi *Performance Test*.

Pada kondisi co-firing 10% *woodchip*, nilai L1 sebesar 4,56%. Nilai tersebut mengalami sedikit peningkatan sebesar 0,05 poin persentase dibandingkan *co-firing* 5% *woodchip*, atau sekitar 1,11% secara relatif. Meskipun mengalami peningkatan, nilai L1 pada *co-firing* 10% *woodchip* masih lebih rendah sebesar 0,09 poin persentase dibandingkan kondisi 100% batubara.

Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan *co-firing woodchip* memberikan perubahan yang relatif kecil terhadap kehilangan panas akibat gas buang kering. Kondisi *co-firing* 5% *woodchip* menghasilkan nilai L1 terendah di antara seluruh kondisi *Performance Test*, yaitu sebesar 4,51%. Sementara itu, peningkatan komposisi *woodchip* dari 5% menjadi 10% menyebabkan L1 sedikit meningkat menjadi 4,56%.

Perubahan nilai L1 pada masing-masing kondisi dapat dipengaruhi oleh temperatur gas buang, temperatur udara masuk, jumlah udara berlebih atau *excess air*, komposisi unsur bahan bakar, serta volume gas hasil pembakaran. Semakin tinggi temperatur dan massa gas buang yang keluar dari boiler, semakin besar energi panas yang terbawa oleh gas tersebut sehingga nilai L1 cenderung meningkat.

4.2.5.2 Kehilangan panas akibat kelembaban (moisture) dalam bahan bakar (L_2)



Gambar 4.9 Grafik kehilangan panas akibat kelembaban dalam bahan bakar (L_2)

Berdasarkan grafik, nilai kehilangan panas akibat kelembapan dalam bahan bakar (L2) menunjukkan perbedaan pada setiap kondisi pengujian. Nilai L2 menggambarkan energi panas yang digunakan untuk memanaskan dan menguapkan kandungan air yang terdapat di dalam bahan bakar. Semakin tinggi kadar moisture bahan bakar, semakin besar energi panas yang diperlukan untuk proses penguapan tersebut sehingga kehilangan panas L2 cenderung meningkat.

Pada kondisi *commissioning*, nilai L2 tercatat sebesar 6,86%. Nilai ini merupakan yang paling tinggi dibandingkan seluruh kondisi *Performance Test*. Tingginya nilai L2 mengindikasikan bahwa bahan bakar pada kondisi *commissioning* memiliki pengaruh kelembapan yang lebih besar terhadap kehilangan panas boiler.

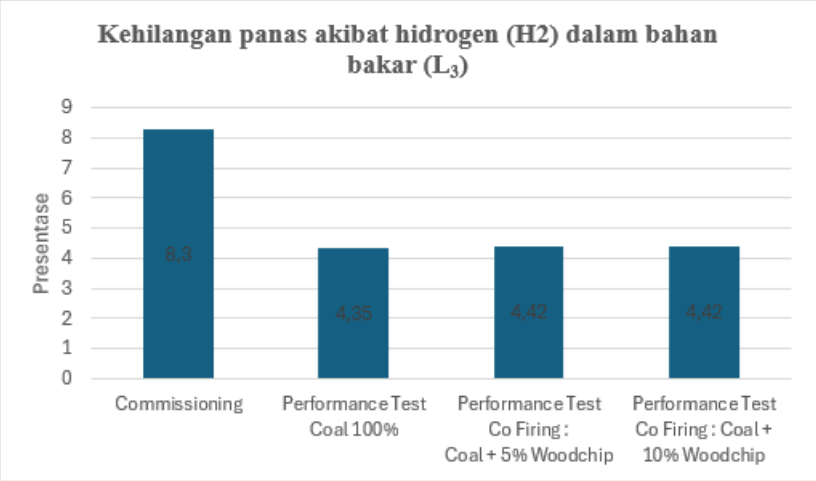
Pada *Performance Test* dengan bahan bakar 100% batubara, nilai L2 turun menjadi 4,03%. Jika dibandingkan dengan *commissioning* sebesar 6,86%, terjadi penurunan sebesar 2,83 poin persentase atau sekitar 41,25% secara relatif. Penurunan ini menunjukkan bahwa kehilangan energi akibat penguapan moisture pada kondisi *Performance Test* 100% batubara jauh lebih rendah dibandingkan saat *commissioning*.

Ketika dilakukan *co-firing* 5% *woodchip*, nilai L2 meningkat menjadi 4,16%. Dibandingkan dengan penggunaan 100% batubara sebesar 4,03%, terjadi peningkatan sebesar 0,13 poin persentase atau sekitar 3,23% secara relatif. Peningkatan ini dapat dikaitkan dengan karakteristik *woodchip* yang umumnya memiliki kadar air lebih tinggi dibandingkan batubara. Penambahan *woodchip* meningkatkan jumlah air yang harus diuapkan selama proses pembakaran sehingga energi panas yang hilang melalui mekanisme ini juga meningkat.

Pada kondisi *co-firing* 10% *woodchip*, nilai L2 sebesar 4,13%. Nilai tersebut sedikit lebih rendah dibandingkan *co-firing* 5% *woodchip* sebesar 4,16%, yaitu turun sebesar 0,03 poin persentase atau sekitar 0,72% secara relatif. Namun, jika dibandingkan dengan kondisi 100% batubara, nilai L2 pada co-firing 10% masih lebih tinggi sebesar 0,10 poin persentase atau sekitar 2,48%.

Secara keseluruhan, nilai L2 pada kondisi *Performance Test* berada pada rentang yang relatif sempit, yaitu 4,03% sampai 4,16%. Kondisi 100% batubara menghasilkan kehilangan panas L2 terendah, sedangkan *co-firing woodchip* menghasilkan nilai L2 sedikit lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan biomassa *woodchip* memberikan pengaruh terhadap kehilangan panas akibat *moisture*, meskipun perubahan yang terjadi relatif kecil.

4.2.5.3 Kehilangan panas akibat hidrogen (H2) dalam bahan bakar (L_3)



Gambar 4.10 Grafik kehilangan panas akibat hidrogen dalam bahan bakar (L_3)

Berdasarkan grafik, nilai kehilangan panas akibat hidrogen (H_2) dalam bahan bakar atau L3 menunjukkan perbedaan yang cukup besar antara kondisi *commissioning* dan kondisi *Performance Test.* Nilai L3 menggambarkan panas yang hilang karena hidrogen dalam bahan bakar bereaksi dengan oksigen membentuk uap air. Uap air tersebut kemudian membawa sebagian energi panas keluar bersama gas buang.

Pada kondisi *commissioning*, nilai L3 tercatat sebesar 8,30%. Nilai ini merupakan yang paling tinggi dibandingkan seluruh kondisi *Performance Test*. Tingginya nilai tersebut menunjukkan bahwa pada saat *commissioning,* kehilangan panas yang berkaitan dengan kandungan hidrogen dalam bahan bakar memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap total heat loss boiler.

Pada *Performance Test* dengan bahan bakar 100% batubara, nilai L3 turun menjadi 4,35%. Jika dibandingkan dengan *commissioning* sebesar 8,30%, terjadi penurunan sebesar 3,95 poin persentase atau sekitar 47,59% secara relatif. Penurunan ini menunjukkan bahwa kehilangan panas akibat hidrogen pada kondisi *Performance Test* jauh lebih rendah dibandingkan kondisi *commissioning*.

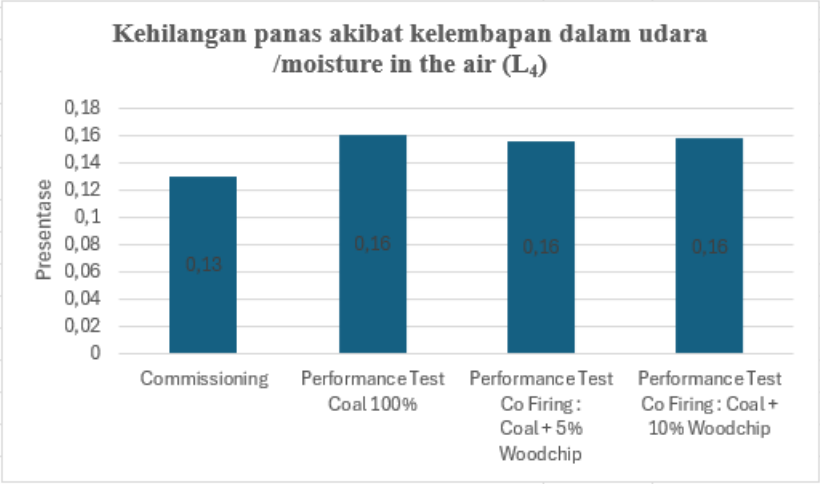
Ketika dilakukan *co-firing* 5% *woodchip*, nilai L3 meningkat sedikit menjadi 4,42%. Dibandingkan kondisi 100% batubara sebesar 4,35%, terjadi peningkatan sebesar 0,07 poin persentase atau sekitar 1,61% secara relatif. Peningkatan tersebut dapat berkaitan dengan karakteristik biomassa *woodchip* yang memiliki komposisi unsur hidrogen berbeda dari batubara. Penambahan *woodchip* dapat menambah jumlah uap air hasil pembakaran sehingga panas yang terbawa bersama uap air juga meningkat.

Pada kondisi co-firing 10% *woodchip*, nilai L3 tetap sebesar 4,42%. Artinya, peningkatan komposisi *woodchip* dari 5% menjadi 10% tidak menyebabkan perubahan nilai L3 berdasarkan data pengujian tersebut. Jika dibandingkan dengan 100% batubara, nilai L3 pada co-firing 10% lebih tinggi sebesar 0,07 poin persentase atau sekitar 1,61% secara relatif.

Secara keseluruhan, nilai L3 pada kondisi Performance Test berada pada rentang yang sangat sempit, yaitu 4,35% sampai 4,42%. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan c*o-firing woodchip* memberikan pengaruh yang relatif kecil terhadap kehilangan panas akibat hidrogen. Kondisi 100% batubara menghasilkan nilai L3 paling rendah, sedangkan kondisi co-firing 5% dan 10% *woodchip* memiliki nilai yang sama, yaitu 4,42%.

Nilai L3 secara umum dipengaruhi oleh kandungan hidrogen dalam bahan bakar, temperatur gas buang, temperatur referensi, jumlah bahan bakar yang dibakar, serta karakteristik pembakaran. Semakin tinggi kandungan hidrogen bahan bakar, semakin banyak air yang terbentuk selama pembakaran. Kondisi tersebut meningkatkan kebutuhan panas untuk memanaskan dan menguapkan air sehingga nilai kehilangan panas L3 dapat meningkat.

4.2.5.4 Kehilangan panas akibat kelembapan dalam udara /*moisture in the air* (L_4)



Gambar 4.11 Grafik kehilangan panas akibat kelembaban dalam udara (L_4)

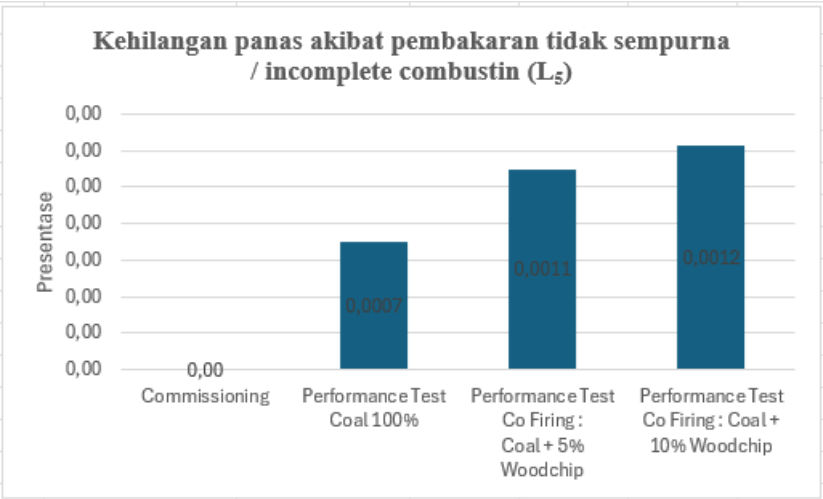
Berdasarkan grafik, nilai kehilangan panas akibat kelembapan dalam udara atau L4 berada pada kisaran yang relatif rendah. Pada kondisi commissioning, nilai L4 sebesar 0,13%. Nilai tersebut meningkat menjadi sekitar 0,16% pada Performance Test 100% batubara, *co-firing* 5% *woodchip,* dan *co-firing* 10% *woodchip.*

Kenaikan dari *commissioning* ke *Performance Test* sekitar 0,03 poin persentase. Sementara itu, perubahan nilai L4 antara kondisi 100% batubara, *co-firing* 5%, dan *co-firing* 10% sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan komposisi *woodchip* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kehilangan panas akibat kelembapan udara.

Nilai L4 terutama dipengaruhi oleh kelembapan udara pembakaran, temperatur udara masuk, jumlah udara pembakaran, serta temperatur gas buang. Karena kondisi lingkungan dan suplai udara pada masing-masing *Performance Test* relatif serupa, nilai L4 juga cenderung stabil.

Secara keseluruhan, kontribusi L4 terhadap total kehilangan panas boiler tergolong kecil. Dengan demikian, *co-firing woodchip* hingga 10% tidak menunjukkan perubahan berarti terhadap L4, sehingga parameter ini bukan faktor utama yang menyebabkan perubahan efisiensi boiler pada variasi komposisi bahan bakar tersebut.

4.2.5.5 Kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna / incomplete combustin (L_5)



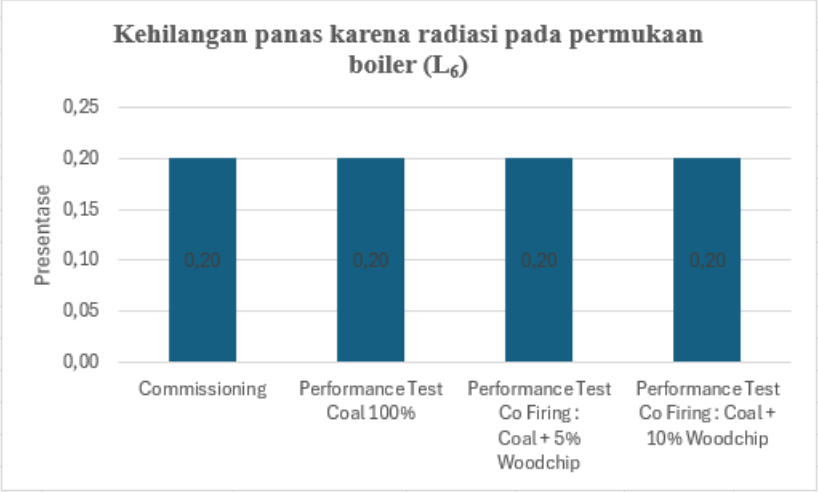
Gambar 4.12 Grafik kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna (L_5)

Berdasarkan grafik, nilai kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna (L5) menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya komposisi *woodchip*. Pada kondisi *commissioning*, nilai L5 tercatat 0,00%. Pada *Performance Test* 100% batubara, nilai L5 sebesar 0,0007%, kemudian meningkat menjadi 0,0011% pada *co-firing* 5% *woodchip* dan 0,0012% pada *co-firing* 10% *woodchip*.

Peningkatan dari 100% batubara ke *co-firing* 5% *woodchip* sebesar 0,0004 poin persentase, sedangkan dari co-firing 5% ke 10% *woodchip* meningkat sebesar 0,0001 poin persentase. Kenaikan ini menunjukkan bahwa penambahan *woodchip* sedikit meningkatkan potensi pembakaran tidak sempurna. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik pembakaran biomassa dan batubara, distribusi udara, pencampuran bahan bakar, ukuran partikel, serta kondisi operasi ruang bakar.

Meskipun menunjukkan tren meningkat, nilai L5 pada seluruh kondisi *Performance Test* sangat kecil, dengan nilai maksimum hanya 0,0012%. Oleh karena itu, kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna memberikan kontribusi yang sangat rendah terhadap total *heat loss* boiler. Secara umum, hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan *co-firing woodchip* hingga 10% masih mampu mempertahankan proses pembakaran pada kondisi yang relatif baik jika ditinjau dari parameter L5.

4.2.5.6 Kehilangan panas karena radiasi pada permukaan boiler (L_6)



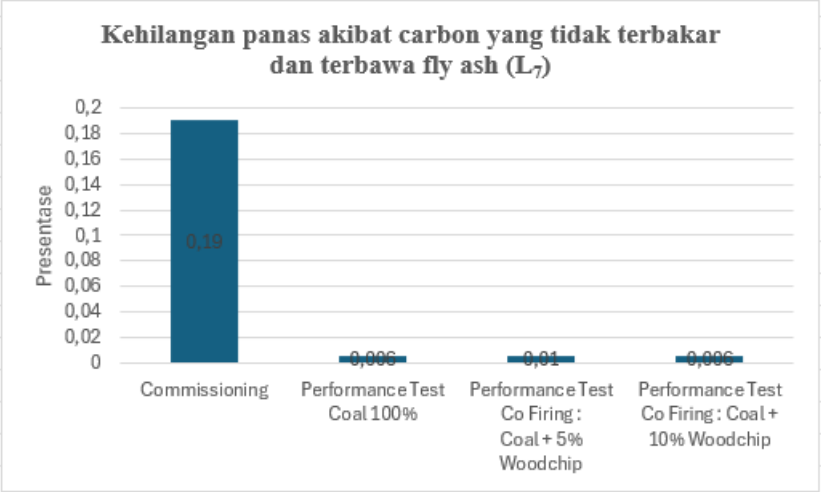
Gambar 4.13 Grafik kehilangan panas akibat radiasi pada permukaan boiler (L_6)

Berdasarkan grafik, nilai kehilangan panas karena radiasi pada permukaan boiler atau L6 menunjukkan nilai yang sama pada seluruh kondisi pengujian, yaitu sebesar 0,20%. Nilai tersebut tidak berubah pada kondisi *commissioning*, *Performance Test* 100% batubara, *co-firing* 5% *woodchip*, maupun *co-firing* 10% *woodchip.*

Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan komposisi bahan bakar tidak memberikan pengaruh terhadap kehilangan panas akibat radiasi boiler. Nilai L6 lebih dipengaruhi oleh faktor fisik dan operasional boiler, seperti temperatur permukaan, luas permukaan boiler, kualitas insulasi, serta temperatur lingkungan.

Secara keseluruhan, kontribusi L6 terhadap total kehilangan panas boiler tergolong kecil dan stabil. Dengan demikian, penerapan *co-firing woodchip* hingga 10% tidak menyebabkan perubahan pada kehilangan panas akibat radiasi, sehingga L6 bukan faktor utama yang memengaruhi perubahan efisiensi boiler pada pengujian tersebut.

4.2.5.7 Kehilangan panas akibat carbon yang tidak terbakar dan terbawa fly ash (L_7)



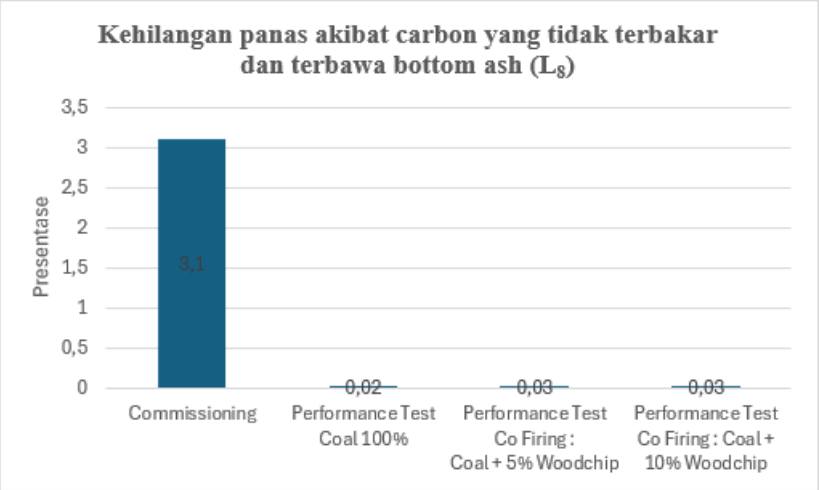
Gambar 4.14 Grafik kehilangan panas akibat carbon tidak terbakar dan terbawa fly ash (L_7)

Berdasarkan grafik, nilai kehilangan panas akibat carbon yang tidak terbakar dalam *fly ash* atau L7 menunjukkan penurunan yang sangat besar dibandingkan kondisi *commissioning*. Pada saat *commissioning*, nilai L7 sebesar 0,19%, sedangkan pada *Performance Test* 100% batubara turun menjadi sekitar 0,006%. Pada *co-firing* 5% *woodchip* nilai L7 sedikit meningkat menjadi sekitar 0,01%, kemudian kembali turun menjadi sekitar 0,006% pada *co-firing* 10% *woodchip*.

Nilai L7 yang sangat rendah pada seluruh kondisi *Performance Test* menunjukkan bahwa proses pembakaran berlangsung cukup sempurna, sehingga hanya sedikit karbon yang terbawa dan tersisa di dalam *fly ash*. Perubahan kecil antara penggunaan 100% batubara, *co-firing* 5%, dan *co-firing* 10% dapat dipengaruhi oleh distribusi udara pembakaran, ukuran partikel bahan bakar, waktu tinggal bahan bakar di *furnace*, temperatur pembakaran, serta karakteristik batubara dan *woodchip*.

Secara keseluruhan, penerapan *co-firing woodchip* hingga 10% tidak meningkatkan kehilangan panas akibat *unburned carbon* secara signifikan. Bahkan pada komposisi 10% woodchip, nilai L7 kembali setara dengan kondisi 100% batubara. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pembakaran boiler CFB masih mampu menjaga kualitas pembakaran dengan baik pada variasi *co-firing* yang diuji, sehingga kontribusi L7 terhadap perubahan efisiensi boiler relatif kecil.

4.2.5.8 Kehilangan panas akibat carbon yang tidak terbakar dan terbawa bottom ash (L_8)



Gambar 4.15 Grafik kehilangan panas akibat carbon tidak terbakar dan terbawa bottom ash (L_8)

Berdasarkan grafik, nilai kehilangan panas akibat carbon yang tidak terbakar dalam bottom ash atau L8 menunjukkan penurunan yang sangat signifikan dibandingkan kondisi commissioning. Pada kondisi commissioning, nilai L8 sebesar 3,10%. Nilai tersebut turun menjadi 0,02% pada *Performance Test* 100% batubara, kemudian sedikit meningkat menjadi 0,03% pada *co-firing* 5% *woodchip* dan tetap 0,03% pada *co-firing* 10% *woodchip.*

Penurunan nilai L8 dari *commissioning* ke seluruh kondisi *Performance Test* menunjukkan bahwa jumlah karbon yang tidak terbakar dan terbuang melalui *bottom ash* menjadi jauh lebih kecil. Hal ini mengindikasikan proses pembakaran yang lebih baik pada kondisi *Performance Test*. Perubahan kecil dari 0,02% menjadi 0,03% setelah penambahan *woodchip* dapat dipengaruhi oleh karakteristik bahan bakar, ukuran partikel, distribusi udara, temperatur furnace, dan waktu tinggal bahan bakar di ruang bakar.

Secara keseluruhan, *co-firing woodchip* hingga 10% hanya memberikan peningkatan L8 yang sangat kecil dibandingkan 100% batubara. Nilai maksimum pada kondisi *co-firing* hanya sebesar 0,03%, sehingga kontribusi L8 terhadap total kehilangan panas boiler tergolong sangat rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa boiler CFB masih mampu mempertahankan pembakaran yang efektif meskipun komposisi *woodchip* ditingkatkan hingga 10%.

4.2.7 Analisa Operasi PLTU

Tabel 4. 9 Data Operasi pada Performance test PLTU Unit 2

No	Parameter	Satuan	Commisioning	Performance Test Coal 100%	Performance Test Co Firing : Coal + 5% Woodchip	Performance Test Co Firing : Coal + 10% Woodchip
1	Tanggal Pengujian		15 Agustus 2019	19 Juni 2023	22 Juni 2023	23 Juni 2023
2	Beban Unit #2	MW	45	45	45	45
3	Main Steam Temp	◦C	528,7	519,6	518,8	516,6
4	Steam Pressure	Mpa	8,77	8,40	6,80	6,73
5	*Total Air Flow*	m3/h	156543	156432	156326	156241
6	*Main Steam Flow*	T/h	170	170	167	165

Supaya Pembangkit tetap mampu mempertahankan 45 MW meskipun efisiensi boiler menurun akibat *co-firing woodchip*, pengoperasian tidak sebaiknya hanya berfokus pada penambahan jumlah bahan bakar. Parameter pembakaran dan siklus steam harus dikendalikan secara terpadu.

Pertama, heat input bahan bakar harus dijaga. Karena nilai kalor *woodchip* lebih rendah, total fuel flow dapat disesuaikan berdasarkan nilai kalor campuran bahan bakar. Kontrol sebaiknya menggunakan pendekatan energi atau thermal input, bukan hanya berdasarkan ton/jam bahan bakar.

Kedua, kadar air *woodchip* perlu dikendalikan. *Woodchip* dengan moisture tinggi akan meningkatkan kehilangan panas akibat penguapan air. Penyimpanan yang terlindung dari hujan, pengaturan ukuran partikel, serta konsistensi kualitas biomassa sangat penting untuk menjaga kestabilan pembakaran.

Ketiga, rasio udara dan bahan bakar harus dioptimalkan. Data menunjukkan total air flow hampir tidak berubah meskipun komposisi bahan bakar berubah. Kondisi ini perlu dievaluasi bersama nilai O_2 *flue gas*. Udara berlebih yang terlalu tinggi akan meningkatkan dry flue gas loss, sedangkan udara terlalu rendah meningkatkan risiko *incomplete combustion* dan *unburned carbon*.

Khusus pada boiler CFB, operator perlu menjaga bed temperature, *differential pressure furnace, primary air, secondary air,* serta sirkulasi material melalui *cyclone*. Parameter tersebut sangat penting karena *co-firing* dapat mengubah karakteristik pembakaran, distribusi temperatur, dan fluidisasi di *furnace*.

Selain itu, *main steam pressure* dan *main steam flow* perlu mendapat perhatian utama. Dari data terlihat bahwa dua parameter ini mengalami penurunan paling jelas saat persentase *woodchip* meningkat. Jika penurunannya semakin besar, turbine heat input dapat berkurang dan pada akhirnya kemampuan unit mempertahankan load akan menurun.

Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa *co-firing* hingga 10% *woodchip* masih memungkinkan unit mempertahankan beban 45 MW, tetapi terjadi penurunan kualitas parameter steam, terutama steam pressure dan main steam flow. Untuk mempertahankan operasi yang optimal, pengendalian harus difokuskan pada nilai kalor dan moisture biomassa, thermal input bahan bakar, *excess air/O_2, temperatur furnace CFB, bed pressure, steam pressure, steam temperature, steam flow*, serta *condenser vacuum*. Optimasi parameter tersebut dapat membantu mempertahankan load tanpa meningkatkan konsumsi bahan bakar secara berlebihan meskipun efisiensi boiler mengalami penurunan.

4.2.8 Evaluasi Lingkungan

Baku mutu emisi pada PLTU mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 15 Tahun 2019 seperti ditunjukan pada tabel di bawah. Pencampuran bahan bakar antara batubara dengan *woodchip* pada skema operasi *Co-Firing* akan berpengaruh pada emisi gas buang yang dihasilkan, untuk itu dilakukan pengujian emisi gas buang untuk mengamati perubahan yang terjadi selama pengujian operasi *Co-Firing.*

Tabel 4. 10 Baku Mutu Emisi PLTU Batubara

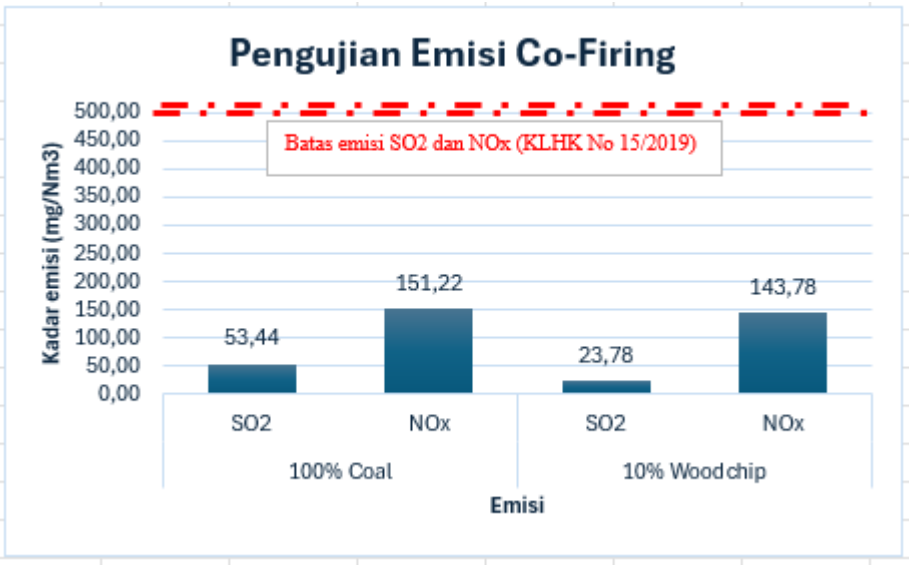
No	Parameter	Kadar Maksimum		
		Batubara (mg/Nm^3)	Minyak Solar (mg/Nm^3)	Gas (mg/Nm^3)
1	Sulfur Dioksida (SO_2)	550	650	50
2	Nitrogen Oksida (NO_x)	550	450	320
3	Partikulat (PM)	100	75	30
4	Merkuri (Hg)	0,03	-	-

Pengujian Pengujian emisi gas buang dilakukan pada area *air heater* menggunakan *flue gas analyzer portable*. Hasil pengamatan emisi gas buang melalui *flue gas monitoring* selengkapnya ditunjukan pada tabel berikut:

Tabel 4. 11 Pengujian Emisi operasi 0% Woodchip dan 10% Woodchip

Pola Operasi	Parameter	Kadar Maksimum	Satuan	Waktu Pengambilan									Rata-Rata
				09:00	09:15	09:30	09:45	10:00	10:15	10:30	10:45	11:00	
100% Coal	SO2	550	mg/Nm^3	73	65	95	31	21	22	28	56	90	**53,44**
	CO2		%	13,5	13,4	13,4	13,6	13,9	13,2	12,7	13,3	13	**13,33**
	Nox	550	mg/Nm^3	151	153	152	153	153	146	147	154	152	**151,22**
10% *Woodchip*	SO2	550	mg/Nm^3	49	49	32	8	17	10	5	9	35	**23,78**
	CO2		%	13	13	13	13	13	13	14	14	14	**13,44**
	Nox	550	mg/Nm^3	147	147	142	146	143	142	142	141	144	**143,78**

Apabila dalam bentuk grafik adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 16 Grafik Pengujian Emisi Co-Firing *0% - 10%*

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, ada beberapa hal yang dapat disimpulkan antara lain :

1. Peningkatan komposisi woodchip cenderung menurunkan efisiensi boiler. Pada beban yang sama sebesar 45 MW, efisiensi boiler pada *co-firing* 5% *woodchip* sebesar 86,52%, sedangkan pada co-firing 10% *woodchip* turun menjadi 86,50%. Penurunan tersebut relatif kecil sehingga penerapan *co-firing* hingga 10% masih dapat dilakukan dengan tetap mempertahankan kinerja boiler.
2. Penurunan efisiensi dipengaruhi oleh karakteristik bahan bakar dan kondisi pembakaran, terutama penurunan *Gross Calorific Value* (GCV) akibat peningkatan komposisi *woodchip*, keseragaman pencampuran bahan bakar yang masih dilakukan secara manual, serta pengaturan excess air. Nilai kalor campuran hingga 10% *woodchip* masih berada dalam rentang desain bahan bakar boiler PLTU Bengkayang. Namun, nilai kalor yang lebih rendah menyebabkan kebutuhan volume bahan bakar meningkat untuk menghasilkan energi listrik yang sama.
3. Penerapan *co-firing* 10% *woodchip* masih mampu mempertahankan beban unit sebesar 45 MW, meskipun terjadi penurunan pada beberapa parameter steam. Oleh karena itu, pengoperasian co-firing perlu disertai pengendalian *thermal input* bahan bakar, *excess air, temperatur furnace, main steam pressure, main steam temperature*, dan *main steam flow* agar kinerja unit tetap optimal.
4. Dari sisi lingkungan, peningkatan komposisi woodchip memberikan dampak positif terhadap emisi. Pada co-firing 10%, emisi SO_2 turun dari 53,44 mg/Nm³ menjadi 23,78 mg/Nm³ atau sekitar 55,5%, sedangkan emisi NOx turun dari 151,22 mg/Nm³ menjadi 143,78 mg/Nm³ atau sekitar 4,9%. Dengan demikian, co-firing 10% woodchip mampu menurunkan emisi dengan penurunan efisiensi boiler yang relatif kecil.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan sebagai tindak lanjut dari penelitian ini antara lain :

1. Sistem pencampuran batubara dan woodchip perlu ditingkatkan agar komposisi bahan bakar lebih homogen. Sistem pencampuran atau feeding yang lebih terkontrol dapat mengurangi variasi kualitas campuran dan membantu menjaga kestabilan proses pembakaran.
2. Selama operasi co-firing, operator perlu mengoptimalkan *fuel flow*, rasio udara dan bahan bakar, *excess air*/O_2, *temperatur furnace*, *bed pressure*, *primary* dan *secondary air, main steam pressure, main steam temperature, serta main steam flow*. Pengendalian tersebut penting untuk mempertahankan beban pembangkit sekaligus meminimalkan penurunan efisiensi boiler.
3. Perlu dilakukan pengujian *co-firing* dalam periode operasi yang lebih panjang dan kontinu untuk mengetahui pengaruhnya terhadap keandalan boiler. Pemeriksaan kondisi furnace waterwall, superheater, dan air heater juga perlu dilakukan secara berkala untuk mengidentifikasi potensi slagging, fouling, dan korosi akibat penggunaan biomassa.
4. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan variasi komposisi *woodchip* yang lebih luas dan data operasi dalam periode yang lebih panjang. Analisis juga dapat dikembangkan dengan menghubungkan efisiensi boiler terhadap *specific fuel consumption, heat rate, unburned carbon, temperatur flue gas, excess air*, serta aspek keekonomian, sehingga dapat diperoleh persentase *co-firing* yang paling optimal dari sisi efisiensi, keandalan, biaya operasi, dan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

American Society of Mechanical Engineers (ASME) *International*. (2008). *United States of America Patent No.* ASME PTC 4.1-8. *Fired Steam Generators - Performance Test and Codes*.

Febriani, S. D. A., & Purwanto, M. R. (2020). *Analysis of Boiler Engine Efficiency Unit* 2 PT. PJB UP Paiton. *Journal of Physics: Conference Series, 1085*, 2-12. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1085/1/012012

Farras Ilham, M., & Suedy, S. W. A. (2022). Pengaruh *Co-Firing* Menggunakan *Sawdust* terhadap Nilai *Heat Rate* PLTU. *Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 3*(2), 121-127.

Sidiq, A. N. (2022). Pengaruh *Co-Firing* Biomassa terhadap Efisiensi *Boiler* PLTU Batubara. *KILAT, 11*(1), 1-11.

Dwiaji, Y. C. (2023). Analisis Pengaruh *Co-Firing* Biomassa Terhadap Kinerja Peralatan *Boiler* PLTU Batubara Unit 1 PT. XYZ. *JAMERE, 3*(1), 8-16.

Ronaldo, R., Riza, A., & Tanujaya, H. (2021). Pengaruh *Air Fuel Ratio* terhadap Distribusi Temperatur *Pulverized Coal Boiler*. *Indonesian Journal of Applied Science and Technology, 2*(2), 44-50. https://doi.org/10.1234/ijast.2021.0202

Menteri Lingkungan dan Kehutanan Republik Indonesia. (2019). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor: P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019, Perihal Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal.

Sudirmanto. (2023). Buku Materi Kuliah Teknik Tenaga Uap dan Gas. Jakarta: ITPLN.

PT. PLN (Persero). (2024). Buku Rencana Kerja dan Anggaran Perusahaan Tahun 2024.

Aprilia, C. A. (2022). Analisis Kelayakan *Biomass Co-Firing* di PLTU Batubara Indonesia. Institut Teknologi Bandung.

LAMPIRAN

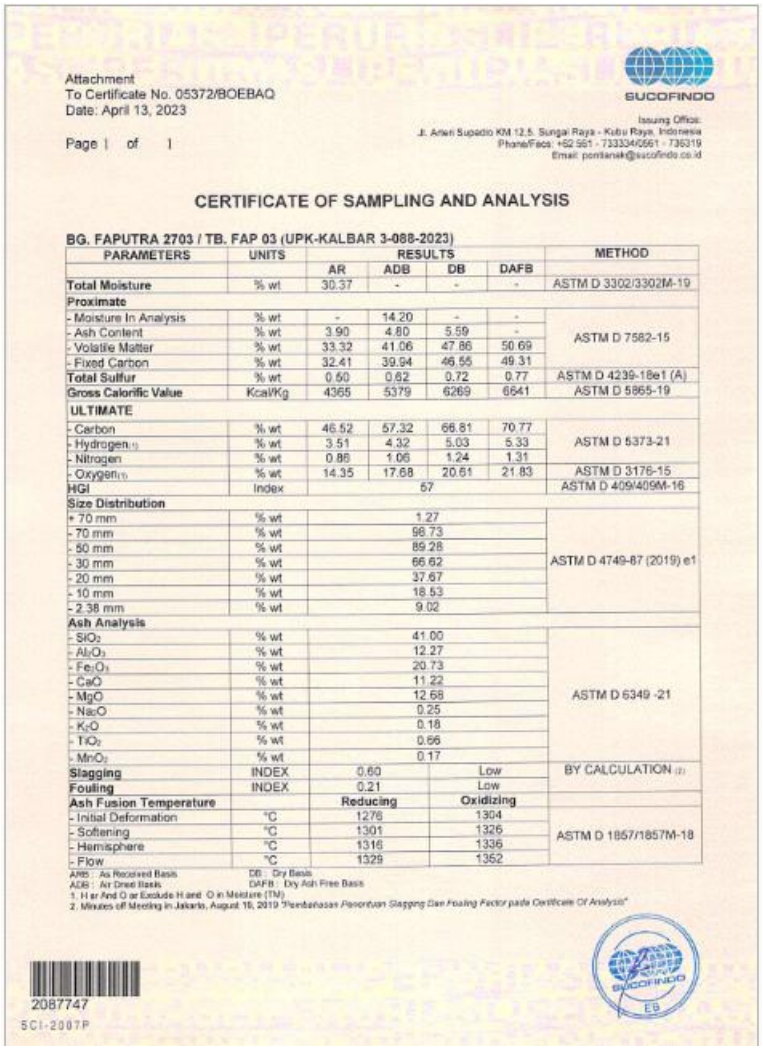
Lampiran 1 Data Pengujian pada saat *Commissioning*

BMCR Boiler Thermal Efficiency Test Data

Parameter name	Unit	BMCR
Main steam pressure	MPa	8.77
Main steam temperature	℃	528.7
Main steam flow	t/h	220.98
Feed water pressure	MPa	10.19
Feed water temperature	℃	222.0
Feed water flow	kg/h	223.53
Amount of Limestone Poured into Furnace	t/h	0
Exhaust gas temperature at APH outlet	℃	121.4/121.7
Air Preheater Inlet Primary Air Temperature	℃	46.1/45.6
Air preheater inlet secondary air temperature	℃	40.5/41.8
Measured slag discharge temperature	℃	404.0
Fuel temperature feed furnace	℃	33.97
O_2 content at air preheater outlet	%	4.40
Co_2 content at air preheater outlet	%	14.54
CO content at air preheater outlet	ppm	4.17
NO_x content at air preheater outlet	ppm	65.5
SO_2 content at air preheater outlet	ppm	397.3
Ambient temperature	℃	28.72
Relative humidity of air	%	25.8
Local atmospheric pressure	kPa	101110
Fuel higher heating value	MJ/kg	13554.3
Ash Content of Fuel (Average Value of Third Party Tests)	%	14.44
Fuel total moisture (Average Value of Third Party Tests)	%	36.09
Fuel moisture analysis in general (Average Value of Third Party Tests)	%	10.72
Fuel volatile (Average Value of Third Party Tests)	%	27.89
Fuel fixed carbon (Average Value of Third Party Tests)	%	21.58
Carbon (Average Value of Third Party Tests)	%	45.66
Hydrogen (Average Value of Third Party Tests)	%	4.85
Nitrogen (Average Value of Third Party Tests)	%	0.70
Sulfur (Average Value of Third Party Tests)	%	0.56
Oxygen (Average Value of Third Party Tests)	%	25.79
Fly ash percentage	%	90
Percentage of large slag	%	10

Fuel content in fly ash	%	0.32
Fuel content of large slag	%	0.26
Dry flue gas heat loss	%	3.8962
Heat loss caused by moisture in fuel	%	6.9878
Heat loss caused by the formation of water by hydrogen combustion	%	6.0005
Loss of moisture in the air	%	-0.0046
Heat loss of unburned carbon in ash	%	0.0842
Surface radiation and convection heat loss	%	0.1
Loss caused by sensible heat of ash	%	0.0888
Loss of carbon monoxide in flue gas	%	0.0015
Loss due to formation of NOx		0.0078
Total Boiler heat loss	%	17.1663
External heat carried by dry air	%	0.6283
External heat carried by moisture in the air	%	-0.0008
External heat carried by sensible heat of fuel	%	0.1533
Total external heat	%	0.7808
Measurement of boiler fuel thermal efficiency	%	83.6145
Corrected fuel calorific value	%	1.20 (Look up the table)
Correction for heat loss due to moisture in fuel	%	0.05 (Look up the table)
Correction for heat loss of unburned carbon in total dry ash	%	0.01 (Look up the table)
Correction of boiler feed temperature heat loss	%	-0.09 (Look up the table)
Correction of incoming heat from fuel	%	-0.002 (Look up the table)
Modified boiler fuel thermal efficiency	%	84.7825

Lampiran 2 Sampel *Certificate of Sample and Analysis* (COA) Batubara



Attachment
To Certificate No. 05372/BOEBAQ
Date: April 13, 2023

Page 1 of 1

SUCOFINDO

Issuing Office:
Jl. Arteri Supadio KM 12,5, Sungai Raya - Kubu Raya, Indonesia
Phone/Fax: +62 561 - 733334/6561 - 736319
Email: pontianak@sucofindo.co.id

CERTIFICATE OF SAMPLING AND ANALYSIS

BG. FAPUTRA 2703 / TB. FAP 03 (UPK-KALBAR 3-088-2023)

PARAMETERS	UNITS	RESULTS				METHOD
		AR	ADB	DB	DAFB	
Total Moisture	% wt	30.37	-	-	-	ASTM D 3302/3302M-19
Proximate						
- Moisture In Analysis	% wt	-	14.20	-	-	ASTM D 7582-15
- Ash Content	% wt	3.90	4.80	5.59	-	
- Volatile Matter	% wt	33.32	41.06	47.86	50.69	
- Fixed Carbon	% wt	32.41	39.94	46.55	49.31	
Total Sulfur	% wt	0.60	0.62	0.72	0.77	ASTM D 4239-18e1 (A)
Gross Calorific Value	Kcal/Kg	4365	5379	6269	6641	ASTM D 5865-19
ULTIMATE						
- Carbon	% wt	46.52	57.32	66.81	70.77	ASTM D 5373-21
- Hydrogen(1)	% wt	3.51	4.32	5.03	5.33	
- Nitrogen	% wt	0.86	1.06	1.24	1.31	
- Oxygen(1)	% wt	14.35	17.68	20.61	21.83	ASTM D 3176-15
HGI	Index	57				ASTM D 409/409M-16
Size Distribution						
+ 70 mm	% wt	1.27				ASTM D 4749-87 (2019) e1
- 70 mm	% wt	98.73				
- 50 mm	% wt	89.28				
- 30 mm	% wt	66.62				
- 20 mm	% wt	37.67				
- 10 mm	% wt	18.53				
- 2.38 mm	% wt	9.02				
Ash Analysis						
- SiO_2	% wt	41.00				ASTM D 6349 -21
- Al_2O_3	% wt	12.27				
- Fe_2O_3	% wt	20.73				
- CaO	% wt	11.22				
- MgO	% wt	12.68				
- Na_2O	% wt	0.25				
- K_2O	% wt	0.18				
- TiO_2	% wt	0.66				
- MnO_2	% wt	0.17				
Slagging	INDEX	0.60		Low		BY CALCULATION (2)
Fouling	INDEX	0.21		Low		
Ash Fusion Temperature		**Reducing**		**Oxidizing**		
- Initial Deformation	°C	1276		1304		ASTM D 1857/1857M-18
- Softening	°C	1301		1326		
- Hemisphere	°C	1316		1336		
- Flow	°C	1329		1352		

AR : As Received Basis DB : Dry Basis
ADB : Air Dried Basis DAFB : Dry Ash Free Basis
1. H ar And O ar Exclude H and O in Moisture (TM)
2. Minutes off Meeting in Jakarta, August 16, 2019 "*Pembahasan Pesentuan Slagging Dan Fouling Factor pada Certificate Of Analysis*"

2087747
SCI-2007P

SUCOFINDO EB

Report No. 15799/EOBOAQ
Date: August 7, 2023

SUCOFINDO
Issuing Office:
Jl. Jend. A. Yani. No. 315 Surabaya 60234, Indonesia
Phone/Faxs: +62 31 8470547/8470563
Email: labsurabaya@sucofindo.co.id

REPORT OF ANALYSIS

CLIENT : **PT. PERUSAHAAN LISTRIK NEGARA (Persero)**
Jl. Duren Tiga Raya No.102 RT.008 RW.001 Duren Tiga
Kec. Pancoran, Kota Jakarta Selatan 12760

THE FOLLOWING SAMPLE (S) WAS/ WERE SUBMITTED AND IDENTIFIED BY CLIENT AS:

TYPE OF SAMPLE : **COAL**
DATE OF RECEIVED : July 12, 2023
DATE OF ANALYSIS : July 13 up to August 7, 2023
TEST REQUIRED : Full analysis
DESCRIPTION OF SAMPLE : Form : Coal
Weight / Volume : ± 2 Kg
Packing : Plastic bag
SAMPLE IDENTIFICATION (STATED BY CLIENT) : **BB MIX 5% WOODCHIP 22/5/23**
UPK SINGKAWANG PLTU BENGKAYANG

We have tested the sample (s) submitted and the following results were obtained:

Parameters	Unit	AR (As Received)	ADB (Air Dried Basis)	Test Method
Total Moisture	% wt	30.96	---	ASTM D3302/D3302M - 22a
Moisture in the Analysis Sample	% wt	---	10.97	ASTM D3173/D3173M - 17a
Ash Content	% wt	6.07	7.83	ASTM D3174 - 12(2018)e1
Volatile Matter	% wt	32.19	41.51	ASTM D3175 - 20
Fixed Carbon	% wt	30.78	39.69	ASTM D3172 - 13(2021)e1
Total Sulfur	% wt	0.25	0.32	ASTM D4239 - 18e1 Method A
Gross Calorific Value	Kcal/Kg	4379	5647	ASTM D5865/D5865M - 19
Ultimate Analysis:				
Carbon	% wt	44.98	57.59	ASTM D5373 - 21 Method A
Hydrogen (*)	% wt	3.26	4.18	
Nitrogen	% wt	0.73	0.93	
Oxygen (*)	% wt	14.20	18.18	ASTM D3176 - 15

(*) Hydrogen and Oxygen do not include H and Ox sample moisture

The Attachment available is an integral part of this certificate.

This Certificate/report is issued under our General Terms and Conditions, copy of which is available upon request or may be accessed at www.sucofindo.co.id

Dept. Of Mineral and Coal Inspection and Testing

SUCOFINDO
Nyoman Ipung Cahyono

71030523001927.01

Report No. 15800/EOBOAQ
Date: August 7, 2023

SUCOFINDO
Issuing Office:
Jl. Jend. A. Yani, No. 315 Surabaya 60234, Indonesia
Phone/Facs: +62 31 8470547/8470563
Email: labsurabaya@sucofindo.co.id

REPORT OF ANALYSIS

CLIENT : **PT. PERUSAHAAN LISTRIK NEGARA (Persero)**
Jl. Duren Tiga Raya No.102 RT.008 RW.001 Duren Tiga
Kec. Pancoran, Kota Jakarta Selatan 12760

THE FOLLOWING SAMPLE (S) WAS/ WERE SUBMITTED AND IDENTIFIED BY CLIENT AS:

TYPE OF SAMPLE : **COAL**
DATE OF RECEIVED : July 12, 2023
DATE OF ANALYSIS : July 13 up to August 7, 2023
TEST REQUIRED : Full analysis
DESCRIPTION OF SAMPLE : Form : Coal
Weight / Volume : ± 2 Kg
Packing : Plastic bag
SAMPLE IDENTIFICATION (STATED BY CLIENT) : **BB MIX 10% WOODCHIP 23/5/23**
UPK SINGKAWANG PLTU BENGKAYANG

We have tested the sample (s) submitted and the following results were obtained:

Parameters	Unit	AR (As Received)	ADB (Air Dried Basis)	Test Method
Total Moisture	% wt	30.68	---	ASTM D3302/D3302M - 22a
Moisture in the Analysis Sample	% wt	---	11.83	ASTM D3173/D3173M - 17a
Ash Content	% wt	6.64	8.45	ASTM D3174 - 12(2018)e1
Volatile Matter	% wt	32.10	40.83	ASTM D3175 - 20
Fixed Carbon	% wt	30.58	38.89	ASTM D3172 - 13(2021)e1
Total Sulfur	% wt	0.28	0.36	ASTM D4239 - 18e1 Method A
Gross Calorific Value	Kcal/Kg	4345	5526	ASTM D5865/D5865M - 19
Ultimate Analysis:				
Carbon	% wt	44.99	57.23	ASTM D5373 - 21 Method A
Hydrogen (*)	% wt	3.21	4.08	
Nitrogen	% wt	0.75	0.96	
Oxygen (*)	% wt	13.45	17.09	ASTM D3176 - 15

(*) Hydrogen and Oxygen do not include H and Ox sample moisture

The Attachment available is an integral part of this certificate.

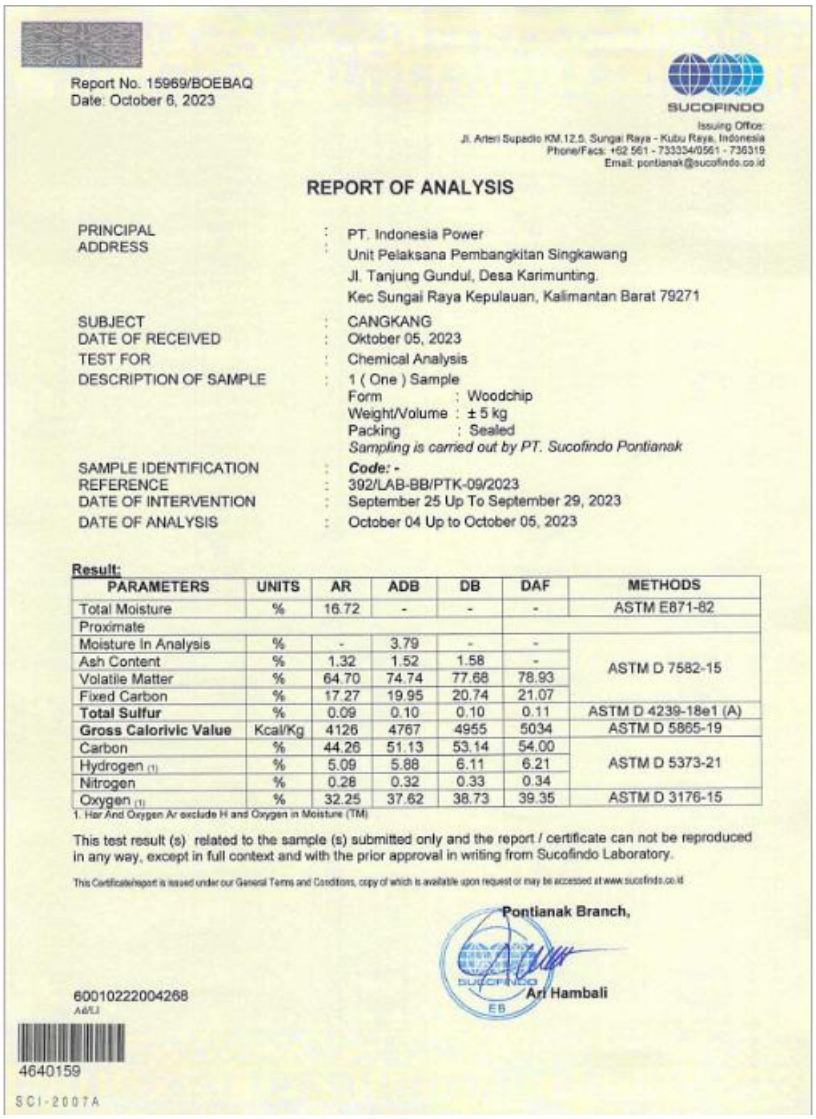
This Certificate/report is issued under our General Terms and Conditions, copy of which is available upon request or may be accessed at www.sucofindo.co.id

Dept. Of Mineral and Coal Inspection and Testing

71030523001927.02

Nyoman Gung Cahyono

Lampiran 3 Sampel *Certificate of Sample and Analysis* (COA) *Woodchip*



Report No. 15969/BOEBAQ
Date: October 6, 2023

SUCOFINDO

Issuing Office:
Jl. Arteri Supadio KM.12,5. Sungai Raya - Kubu Raya, Indonesia
Phone/Facs: +62 561 - 733354/0561 - 736315
Email: pontianak@sucofindo.co.id

REPORT OF ANALYSIS

PRINCIPAL	:	PT. Indonesia Power
ADDRESS	:	Unit Pelaksana Pembangkitan Singkawang Jl. Tanjung Gundul, Desa Karimunting. Kec Sungai Raya Kepulauan, Kalimantan Barat 79271
SUBJECT	:	CANGKANG
DATE OF RECEIVED	:	Oktober 05, 2023
TEST FOR	:	Chemical Analysis
DESCRIPTION OF SAMPLE	:	1 (One) Sample Form : Woodchip Weight/Volume : ± 5 kg Packing : Sealed *Sampling is carried out by PT. Sucofindo Pontianak*
SAMPLE IDENTIFICATION	:	***Code: -***
REFERENCE	:	392/LAB-BB/PTK-09/2023
DATE OF INTERVENTION	:	September 25 Up To September 29, 2023
DATE OF ANALYSIS	:	October 04 Up to October 05, 2023

Result:

PARAMETERS	UNITS	AR	ADB	DB	DAF	METHODS
Total Moisture	%	16.72	-	-	-	ASTM E871-82
Proximate						
Moisture In Analysis	%	-	3.79	-	-	ASTM D 7582-15
Ash Content	%	1.32	1.52	1.58	-	
Volatile Matter	%	64.70	74.74	77.68	78.93	
Fixed Carbon	%	17.27	19.95	20.74	21.07	
Total Sulfur	%	0.09	0.10	0.10	0.11	ASTM D 4239-18e1 (A)
Gross Calorivic Value	Kcal/Kg	4126	4767	4955	5034	ASTM D 5865-19
Carbon	%	44.26	51.13	53.14	54.00	ASTM D 5373-21
Hydrogen (1)	%	5.09	5.88	6.11	6.21	
Nitrogen	%	0.28	0.32	0.33	0.34	
Oxygen (1)	%	32.25	37.62	38.73	39.35	ASTM D 3176-15

1. Har And Oxygen Ar exclude H and Oxygen in Moisture (TM)

This test result (s) related to the sample (s) submitted only and the report / certificate can not be reproduced in any way, except in full context and with the prior approval in writing from Sucofindo Laboratory.

This Certificate/report is issued under our General Terms and Conditions, copy of which is available upon request or may be accessed at www.sucofindo.co.id

Pontianak Branch,

Ari Hambali

60010222004268
AARJ

4640159

SCI-2007A

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Data Personal

NIM	: 202412528
Nama	: Arif Nurhadi
Tempat/ Tgl Lahir	: Purworejo, 21 September 1989
Jenis Kelamin	: Laki-Laki
Agama	: Islam
Status Perkawainan	: Kawin
Program Studi	: S1 Teknik Mesin
Alamat Rumah	: Jln Suka Mulia Komp Sepakat Mulya No 8, Kota Pontianak, Kalimantan Barat Kode Pos 78311
Telp/ HP	: 082152599898
Email	: arif.nurhadi@pln.co.id

Pendidikan

Jenjang	Nama Lembaga	Jurusan	Tahun Lulus
SD	SD Kepatihan, Purworejo	-	2001
SMP	SMP Muhammadiyah, Purworejo	-	2004
SMK	SMK Pembaharuan, Purworejo	Teknik Otomotif	2007
D3	Politeknik Negeri Semarang	Teknik Mesin	2010

Demikian daftar riwayat hidup ini dibuat dengan sebenarnya.

Pontianak, Agustus 2026

(Arif Nurhadi)

INSTITUT TEKNOLOGI-PLN

LEMBAR BIMBINGAN TUGAS AKHIR

Nama Mahasiswa	:	Arif Nurhadi
NIM	:	202412528
Program Studi	:	Teknik Mesin
Nama Dosen Pembimbing	:	Hendri, ST., MT
Judul Tugas Akhir	:	Pengaruh peningkatan komposisi *Co-Firing* Biomassa terhadap efisiensi boiler tipe *circulating fluidized bed* pada PLTU Bengkayang

No	Tanggal	Materi Bimbingan	Tanda Tangan
1	03 April 2026	Pengajuan dan diskusi pemilihan judul skripsi	
2	10 April 2026	Pemaparan Judul dan Batasan Masalah	
3	24 April 2026	Konsultasi Bab 1 – 3 Struktur Penulisan Proposal	
4	01 Mei 2026	Pembahasan Bab 1 – 3 Diskusi terkait tujuan penelitian dan Metode penelitian	
5	08 Mei 2026	Pembahasan Revisi Bab 1 – 3 Perbaikan Flow Chart	
6	15 Mei 2026	Pembahasan Revisi Bab 3 dan Persiapan Sidang Proposal	
7	05 Juni 2026	Revisi setelah siding proposal dan perbaikan Bab 1 Tujuan Penelitian dan Bab 3 Flow Chart	

8	12 Juni 2026	Konsultasi Bab IV Metode Analisis	
9	18 Juni 2026	Pembahasan Bab IV, Perhitungan data dan analisis	
10	25 Juni 2026	Revisi Bab IV Perhitungan data dan Rekapitulasi hasil perhitungan	
11	03 Juli 2026	Revisi Bab IV, Analisis dan pembuatan diagram Sankey	
12	17 Juli 2026	Revisi Bab IV, Analisis data	
13	24 Juli 2026	Pembahasan Bab V Kesimpulan dan Saran	
14	30 Juli 2026	Pembahasan Revisi Bab V Kesimpulan	

Keterangan :

1. Konsultasi minimal 14 (empat belas) kali pertemuan termasuk konsultasi Proposal
2. Meliputi : Konsultasi Judul/Tema, Materi, Metode Penyelesaian, Pengujian, Analisis Hasil, Kesimpulan.
3. Setiap Konsultasi lembar ini harus dibawa dan di Paraf oleh Pembimbing.

INSTITUT TEKNOLOGI PLN	INSTITUT TEKNOLOGI PLN	Kode	FO-PD-A03-2-003-3-008
		Tanggal	10 Februari 2025
	PERBAIKAN NASKAH TUGAS AKHRI	Level	2
		Revisi ke-	3

RINGKASAN PERBAIKAN NASKAH TUGAS AKHIR

Tanggal ujian sidang : SABTU 22 Agustus 2026
Nama mahasiswa : ARIF NURHADI
NIM : 202412528
Program studi : S1 Teknik Mesin
Fakultas/Sekolah : Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi
Judul tugas akhir : PENGARUH PENINGKATAN KOMPOSISI CO-FIRING BIOMASSA TERHADAP EFISIENSI BOILER TIPE CIRCULATING FLUIDIZED BED PADA PLTU BENGKAYANG

Saran perbaikan naskah tugas akhir adalah sebagai berikut:
1. Tambahkan jenis biomassa yang digunakan pada judul
2. Belahketupat pada flowchart gunakan simbol
3. Tabel jangan terpotong ke halaman berikutnya
4. Perbaiki grafik hasil efisiensi

Jangka waktu untuk perbaikan naskah tugas akhir diatas harus diselesikan paling lambat satu minggu setelah tanggal ujian yakni pada tanggal **29 Agustus 2026**

Apabila dalam jangka waktu tersebut mahasiswa tersebut diatas tidak dapat menyelesaikan **REVISI tugas akhirnya**, maka mahsiswa harus kembali mengulang sidang

Mahasiswa **Pembimbing**

ARIF NURHADI **Dr. HENDRI, S.T., M.T**

Tugas akhir telah selesai diperbaiki pada tanggal .....

Mahasiswa **Pembimbing**

ARIF NURHADI **Dr. HENDRI, S.T., M.T**

INSTITUT TEKNOLOGI PLN	INSTITUT TEKNOLOGI PLN	Kode	FO-PD-A03-2-003-3-008
		Tanggal	10 Februari 2025
	PERBAIKAN NASKAH TUGAS AKHRI	Level	2
		Revisi ke-	3

RINGKASAN PERBAIKAN NASKAH TUGAS AKHIR

Tanggal ujian sidang	:	SABTU 22 Agustus 2026
Nama mahasiswa	:	ARIF NURHADI
NIM	:	202412528
Program studi	:	S1 Teknik Mesin
Fakultas/Sekolah	:	Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi
Judul tugas akhir	:	PENGARUH PENINGKATAN KOMPOSISI CO-FIRING BIOMASSA TERHADAP EFISIENSI BOILER TIPE CIRCULATING FLUIDIZED BED PADA PLTU BENGKAYANG

Saran perbaikan naskah tugas akhir adalah sebagai berikut:

Penulisan ikuti pedoman yang update ITPLN, penulisan lembar pengesahan, sub bab bab 1 tambah kebaharuan dan hipotesa, setiap gambar diberi sumber referensi, halaman isi minimal 60,

Flowchart sesuaikan dengan pengukuran (%coal, cofiring 5%dan 10%)

Susunan bab 4 biar lebih terstruktur, dimulai dari data-hingga efisiensi boiler-pembahasana dan analisis (parameter operasi-losses dan efisiensi)-sankey-kajian emisi

Munculkan satu perhitungan efisiensi boiler, sisanya agar dibuatkan tabel

tambahkan analisis pengaruhkarakteristik bahan bakar terhadap %loses di masing-masing variasi bahan bakar

tambahkan evaluasi pola operasi yang harus dijaga agar cofiring tetap dapat dilakukan walaupun efisiensi boiler turun

Rumusan-tujuan-kesimpulan agar diperbaiki, saran dibuat lebih to the point-4, bagian analisis pindahkan ke bab 4 akhir

Jangka waktu untuk perbaikan naskah tugas akhir diatas harus diselesikan paling lambat satu minggu setelah tanggal ujian yakni pada tanggal **29 Agustus 2026**

Apabila dalam jangka waktu tersebut mahasiswa tersebut diatas tidak dapat menyelesaikan **REVISI tugas akhirnya**, maka mahsiswa harus kembali mengulang sidang

Mahasiswa



ARIF NURHADI

Anggota Penguji



Ir. ROSWATI NURHASANAH, S.T., M.T

Tugas akhir telah selesai diperbaiki pada tanggal 26 agustus 2026

Mahasiswa



ARIF NURHADI

Anggota Penguji



Ir. ROSWATI NURHASANAH, S.T., M.T

INSTITUT TEKNOLOGI PLN	INSTITUT TEKNOLOGI PLN	Kode	FO-PD-A03-2-003-3-008
		Tanggal	10 Februari 2025
	PERBAIKAN NASKAH TUGAS AKHRI	Level	2
		Revisi ke-	3

RINGKASAN PERBAIKAN NASKAH TUGAS AKHIR

Tanggal ujian sidang	:	SABTU 22 Agustus 2026
Nama mahasiswa	:	ARIF NURHADI
NIM	:	202412528
Program studi	:	S1 Teknik Mesin
Fakultas/Sekolah	:	Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi
Judul tugas akhir	:	PENGARUH PENINGKATAN KOMPOSISI CO-FIRING BIOMASSA TERHADAP EFISIENSI BOILER TIPE CIRCULATING FLUIDIZED BED PADA PLTU BENGKAYANG

Saran perbaikan naskah tugas akhir adalah sebagai berikut:
1. Berikan contoh perhitungan pada bab 4
2. Masukan contoh perhitungan pada bab 4
3. Perbaiki belah ketupat dan diagramnya
4. Selaraskan rumusan, tujuan dan kesimpulan

Jangka waktu untuk perbaikan naskah tugas akhir diatas harus diselesikan paling lambat satu minggu setelah tanggal ujian yakni pada tanggal **29 Agustus 2026**

Apabila dalam jangka waktu tersebut mahasiswa tersebut diatas tidak dapat menyelesaikan **REVISI tugas akhirnya**, maka mahsiswa harus kembali mengulang sidang

Mahasiswa



ARIF NURHADI

Ketua Penguji



EKO SULISTIYO, S.T., M.Si

Tugas akhir telah selesai diperbaiki pada tanggal .....

Mahasiswa



ARIF NURHADI

Ketua Penguji



EKO SULISTIYO, S.T., M.Si

INSTITUT TEKNOLOGI PLN	INSTITUT TEKNOLOGI PLN	Kode	FO-PD-A03-2-003-3-008
		Tanggal	10 Februari 2025
	PERBAIKAN NASKAH TUGAS AKHIR	Level	2
		Revisi ke-	3

RINGKASAN PERBAIKAN NASKAH TUGAS AKHIR

Tanggal ujian sidang	:	SABTU 22 Agustus 2026
Nama mahasiswa	:	ARIF NURHADI
NIM	:	202412528
Program studi	:	S1 Teknik Mesin
Fakultas/Sekolah	:	Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi
Judul tugas akhir	:	PENGARUH PENINGKATAN KOMPOSISI CO-FIRING BIOMASSA TERHADAP EFISIENSI BOILER TIPE CIRCULATING FLUIDIZED BED PADA PLTU BENGKAYANG

Saran perbaikan naskah tugas akhir adalah sebagai berikut:

Perbaiki judul, diagram alir, berikan contoh perhitungan pada bab 1
Sebaiknya rumusan, tujuan dan kesimpulan, masukkan analisa boiler masing-masing
Serta tambahkan analisa operasi PLTU

Jangka waktu untuk perbaikan naskah tugas akhir diatas harus diselesikan paling lambat satu minggu setelah tanggal ujian yakni pada tanggal **29 Agustus 2026**

Apabila dalam jangka waktu tersebut mahasiswa tersebut diatas tidak dapat menyelesaikan **REVISI tugas akhirnya**, maka mahsiswa harus kembali mengulang sidang

Mahasiswa	Dosen Pembimbing	Ketua Penguji
ARIF NURHADI	Dr. HENDRI, S.T., M.T	EKO SULISTIYO, S.T., M.Si

Tugas akhir telah selesai diperbaiki pada tanggal .....

Mahasiswa	Dosen Pembimbing	Ketua Penguji
ARIF NURHADI	Dr. HENDRI, S.T., M.T	EKO SULISTIYO, S.T., M.Si

cek-019fda286609-202412528_Arif Nurhadi_Skripsi_Turnitin Rev2.pdf

By User Upload

WORD COUNT	12806	TIME SUBMITTED	07-AUG-2026 09:58AM
		PAPER ID	123476208

cek-019fda286609-202412528_Arif Nurhadi_Skripsi_Turnitin Rev2.pdf

ORIGINALITY REPORT

28%
SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	repository.its.ac.id Internet	792 words — 6%
2	repository.itpln.ac.id Internet	312 words — 2%
3	media.neliti.com Internet	133 words — 1%
4	journal.literasisains.id Internet	131 words — 1%
5	123dok.com Internet	107 words — 1%
6	pdfcoffee.com Internet	100 words — 1%
7	ejournal.up45.ac.id Internet	83 words — 1%
8	www.scribd.com Internet	72 words — 1%
9	es.scribd.com Internet	70 words — 1%
10	publikasi.mercubuana.ac.id Internet	61 words — < 1%
11	repository.unhas.ac.id Internet	57 words — < 1%
12	idm.or.id Internet	53 words — < 1%

13	jurnal.polban.ac.id Internet	48 words — < 1%
14	docplayer.info Internet	47 words — < 1%
15	text-id.123dok.com Internet	47 words — < 1%
16	Brundaban Patro. "Efficiency studies of combination tube boilers", Alexandria Engineering Journal, 2016 Crossref	45 words — < 1%
17	repository.unpar.ac.id Internet	44 words — < 1%
18	Faizal Ramadhan, M. Aujul Majdi, Abdulazis Arfi, Suwarno Suwarno. "Evaluation and Assessment of a Superheater-Tube Elbow in a Coal-Based Power Plant Boiler after 10 Years of Operation", Journal of Failure Analysis and Prevention, 2023 Crossref	41 words — < 1%
19	repository.akprind.ac.id Internet	39 words — < 1%
20	repository.itsb.ac.id Internet	36 words — < 1%
21	seminar.uad.ac.id Internet	34 words — < 1%
22	pt.scribd.com Internet	31 words — < 1%
23	repositori.uma.ac.id Internet	31 words — < 1%
24	M. Hasanuzzaman, M.A. Islam, N.A. Rahim, Yuan Yanping. "Energy demand", Elsevier BV, 2020 Crossref	30 words — < 1%
25	www.jurnal.bkstm.org Internet	29 words — < 1%

26	snekti.jurnal-puslitbangpln.id Internet	28 words — < 1%
27	eprints.umm.ac.id Internet	25 words — < 1%
28	ejournal.undip.ac.id Internet	23 words — < 1%
29	www.3an.pl Internet	23 words — < 1%
30	Kemas Ridhuan, Sepit Adya Putra. "KARAKTRISTIK PEMBAKARAN BERBAGAI JENIS BAHAN LIMBAH BIOMASSA DENGAN MENGGUNAKAN PROSES NONKARBONISASI", Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin, 2015 Crossref	22 words — < 1%
31	repository.poliupg.ac.id Internet	22 words — < 1%
32	www.ijsrd.com Internet	22 words — < 1%
33	www.slideshare.net Internet	22 words — < 1%
34	adoc.pub Internet	21 words — < 1%
35	Jonathan Dian, Firza Zulmi Rhamadhan, Ardi Nugroho. "Analysis of Co-firing in Bolok Coal-fired Power Plant Using Woodchips to Support Decarbonization", 2023 6th International Conference on Renewable Energy for Developing Countries (REDEC), 2023 Crossref	20 words — < 1%
36	sumbermaju.weebly.com Internet	20 words — < 1%
37	ejurnal.umri.ac.id Internet	19 words — < 1%
38	jurnal.ubl.ac.id Internet	19 words — < 1%

39	repository.umy.ac.id Internet	19 words — < 1%
40	SYIAR MULYA AHMAD PRATIKNYO, Christiono. "ANALISIS PENGARUH JENIS BAHAN BAKAR B0, B30, B35, DAN B40 TERHADAP EFISIENSI THERMAL PLTD BIAK", ARMATUR : Artikel Teknik Mesin & Manufaktur, 2026 Crossref	18 words — < 1%
41	core.ac.uk Internet	18 words — < 1%
42	fahmy87riset.blogspot.com Internet	18 words — < 1%
43	repository.uniks.ac.id Internet	18 words — < 1%
44	Romi Djafar. "Analisis Termal Pada Boiler PLTU XYZ Menggunakan Metode Langsung Berdasarkan Data Operasi Harian", Jurnal Teknologi Pertanian Gorontalo (JTPG), 2025 Crossref	17 words — < 1%
45	fdocuments.in Internet	17 words — < 1%
46	id.123dok.com Internet	17 words — < 1%
47	mafiadoc.com Internet	17 words — < 1%
48	scholar.unand.ac.id Internet	17 words — < 1%
49	digilib.uin-suka.ac.id Internet	16 words — < 1%
50	teknikkimiaseries.blogspot.com Internet	16 words — < 1%
51	repository.unigal.ac.id:8080 Internet	15 words — < 1%
52	repository.upi.edu Internet	

		15 words — < 1%
53	dokumen.tips Internet	14 words — < 1%
54	newsbeezer.com Internet	14 words — < 1%
55	repo.itera.ac.id Internet	14 words — < 1%
56	repository.ibs.ac.id Internet	14 words — < 1%
57	www.geoenergi.co.id Internet	14 words — < 1%
58	journal.isas.or.id Internet	13 words — < 1%
59	sains.uniku.ac.id Internet	13 words — < 1%
60	eprints.poltektegal.ac.id Internet	12 words — < 1%
61	johannessimatupang.wordpress.com Internet	12 words — < 1%
62	Wan Habibi Rahman Barus, Iphov Kumala Sriwana, Nadiya Maharani, Muhammad Alif Ihsan. "Analisis Sistem Logistik Rantai Pasok Substitusi Bahan Baku PLTU Batu Bara Menggunakan Soft System Methodology (SSM)", JURNAL Al-AZHAR INDONESIA SERI SAINS DAN TEKNOLOGI, 2026 Crossref	11 words — < 1%
63	digilib.uns.ac.id Internet	11 words — < 1%
64	library.polmed.ac.id Internet	11 words — < 1%
65	pontianakpost.jawapos.com Internet	11 words — < 1%

66	ppjp.ulm.ac.id Internet	11 words — < 1%
67	sipora.polije.ac.id Internet	11 words — < 1%
68	djukarna.wordpress.com Internet	10 words — < 1%
69	makassar.tribunnews.com Internet	10 words — < 1%
70	repositori.kemdikbud.go.id Internet	10 words — < 1%
71	repositori.umsu.ac.id Internet	10 words — < 1%
72	repository.trisakti.ac.id Internet	10 words — < 1%
73	repository.ummat.ac.id Internet	10 words — < 1%
74	skornews.co Internet	10 words — < 1%
75	www.aji.or.id Internet	10 words — < 1%
76	www.ekonomisyariah.org Internet	10 words — < 1%
77	ejournal.unesa.ac.id Internet	9 words — < 1%
78	ejurnal.undana.ac.id Internet	9 words — < 1%
79	jurnal.unity-academy.sch.id Internet	9 words — < 1%
80	ojs.ummetro.ac.id Internet	9 words — < 1%

81	repository.iainpare.ac.id Internet	9 words — < 1%
82	repository.unissula.ac.id Internet	9 words — < 1%
83	repository.unsri.ac.id Internet	9 words — < 1%
84	repository.usd.ac.id Internet	9 words — < 1%
85	vinar.vin.bg.ac.rs Internet	9 words — < 1%
86	www.ejournal.pelitaindonesia.ac.id Internet	9 words — < 1%
87	Agus Sugiharto. "Perhitungan Efisiensi Boiler Dengan Metode Secara Langsung pada Boiler Pipa Api", Majalah Ilmiah Swara Patra, 2020 Crossref	8 words — < 1%
88	Akhdiyatul Akhdiyatul, Erick Radwitya, Yudi Chandra. "Analisis Teknis dan Ekonomis Dalam Penggunaan Bahan Bakar Biomassa Di Pusat Listrik Tenaga Uap Studi Kasus di PLTU PT. Suka Jaya Makmur", ELKHA, 2018 Crossref	8 words — < 1%
89	Edy Suryono, Ignatius Henry Adi Nagoro, Dimas Yoga Satria Wicaksana. "Analisis Temperatur Bahan Bakar pada Reaktor Hydrocarbon Crack System Terhadap Hasil Emisi Engine 4A-FE", Automotive Experiences, 2018 Crossref	8 words — < 1%
90	Faqih Alfaruq, Tumiran, Sarjiya. "Evaluation of Co-firing in a Pulverized Coal Boiler Using Multi-Biomass: Sawdust and Rice Husks", 2024 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Computer and Information Technology (ICEECIT), 2024 Crossref	8 words — < 1%
91	Febri Hartanto, Ex Yudha Agus Chrisna, Bekti Nur Mustakim, Ery Perdana. "Optimized Biomass Mixing Strategy to Minimize Derating in a Coal-Fired Steam Power Plant Using RIOT-Based Monitoring", 2025 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP), 2025 Crossref	8 words — < 1%

92	M. Djaeni, P. Bartels, J. Sanders, G. van Straten, A. J. B. van Boxtel. "Multistage Zeolite Drying for Energy-Efficient Drying", Drying Technology, 2007 Crossref	8 words — < 1%
93	ar.scribd.com Internet	8 words — < 1%
94	digilib.unhas.ac.id Internet	8 words — < 1%
95	disperindag.jatimprov.go.id Internet	8 words — < 1%
96	dspace.uii.ac.id Internet	8 words — < 1%
97	journal.yrpipku.com Internet	8 words — < 1%
98	ojs.umada.ac.id Internet	8 words — < 1%
99	rengastama.blogspot.com Internet	8 words — < 1%
100	repository.uinsaizu.ac.id Internet	8 words — < 1%
101	repository.umsu.ac.id Internet	8 words — < 1%
102	repository.unwiku.ac.id Internet	8 words — < 1%
103	Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion, 2010. Crossref	7 words — < 1%
104	Syamsudin Syamsudin, Katsushige Takami, Shoji Kita, Yusup Setiawan, Reza Bastari Imran Wattimena, Andri Taufick Rizaluddin. "Studi Kasus Proyek Co-Benefit Peningkatan Efisiensi Boiler Batubara di Industri Kertas", JURNAL SELULOSA, 2020 Crossref	7 words — < 1%

105	Nahda Alifa Zahira Putri, Ika Yuliani, Sri Widarti. "Pengaruh Pemakaian Jenis Bahan Bakar Terhadap Kinerja Boiler dengan Metode Langsung dan Tidak Langsung", Jurnal Surya Teknika, 2024 Crossref	6 words — < 1%
106	idoc.pub Internet	6 words — < 1%
107	jurnal.poliupg.ac.id Internet	6 words — < 1%
108	riset.unisma.ac.id Internet	6 words — < 1%

EXCLUDE QUOTES	OFF	EXCLUDE SOURCES	OFF
EXCLUDE BIBLIOGRAPHY	ON	EXCLUDE MATCHES	OFF