

TUGAS SARJANA

ANALISIS EFISIENSI TERMAL *BOILER WATERTUBE* DENGAN BERBAGAI VARIASI BAHAN BAKAR

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri
Universitas Bung Hatta

Oleh:

Zulhanif Dandy Ajmi
NPM 2410017211076



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS BUNG HATTA
2026**

SK PEMBIMBING SKRIPSI



UNIVERSITAS BUNG HATTA FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

Lampiran SK Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Bung Hatta

Nomor : 234/SK-Ak-10/FTI/III-2025
Tanggal : 13 Maret 2025
Tentang : Pengangkatan Pembimbing Skripsi
Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri
Semester Genap Tahun Akademik 2024/2025

PEMBIMBING PROPOSAL TUGAS SARJANA DAN SKRIPSI KELAS RPL 2024/2025 PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

NO	NPM	NAMA	PEMBIMBING	KET	NO	NPM	NAMA	PEMBIMBING	KET
1	2430017211121	Andrie Hutabarat	BURMAWI	N	1	2430017211124	Era Pasaribu	IQBAL	N
2	2430017211098	Denna Wahid Nugraha		N	2	2430017211102	Muhammad Sidik Fauzan		N
3	2430017211120	DWI NOVAL HAPOSAN SIMANJUNTAK		N	3	2430017211128	Munfarid		N
4	2430017211050	Hasbi Saleh		P	4	2430017211105	Irfan Hermanto		P
5	2430017211056	Varelli Thareq Aljabar		P	5	2430017211107	Iqbalul Aufa Hudaeni		P
6	2430017211058	Fachri Reza		P	6	2430017211108	David Apriandi		P
NO	NPM	NAMA	PEMBIMBING	KET	NO	NPM	NAMA	PEMBIMBING	KET
1	2430017211057	Sandi Darmawan	EDI SEPTI	N	1	2430017211100	Hendra	SURYADIMAS	N
2	2430017211106	Amelani Putra		N	2	2430017211062	Suglyanto		N
3	2430017211087	TONI ARI ARDIYAWAN		N	3	2430017211067	Roby Gunawan		N
4	2430017211073	Taruna Putra		P	4	2430017211079	Agussrianda utami		N
5	2430017211076	Zulhanif Dandy Ajmi		P	5	2430017211054	Muhammad Iqbal		N
6	2430017211086	Mulyadi		P	6	2430017211053	Iyafudhin		N
					7	2430017211075	Aleksander Panjaitan		N
NO	NPM	NAMA	PEMBIMBING	KET	NO	NPM	NAMA	PEMBIMBING	KET
1	2430017211069	Gilang Ramadhan	IMAN SATRIA	N	1	2430017211068	Muhamin Yusuf Anwar	KAIDIR	N
2	2430017211123	Hilman Hariri Simbolon		N	2	2430017211109	KADARFIN		N
3	2430017211094	Iqbal Nukla Endra		N	3	2430017211055	Limar Dwi Gestian		N
4	2430017211095	Ahmad Hanafiyah		N	4	2430017211119	Aptiansyah Sultan Hasibuan		P
5	2430017211096	Eki Hidayat		N	5	2430017211127	John Perry Pandangan		P
6	2430017211104	LEO SANJAYA PERANGIN ANGIN		P	6	2430017211111	Muhammad Aldi Setia		P
NO	NPM	NAMA	PEMBIMBING	KET	NO	NPM	NAMA	PEMBIMBING	KET
1	2430017211131	Rahmat Defri	HENORA SUHERMAN	N	1	2430017211093	Septyan Dwi Cahyo	WENNY MARTIANA	N
2	2430017211129	Rando Aldeo		N	2	2430017211122	Surya Christ Makromi Manalu		N
3	2430017211115	Rahmat Irfani		N	3	2430017211126	VENDI PRADANA SYAH		N
4	2430017211125	Marshall Latend Ratumbuisang		N	4	2430017211132	Erwin Syafri		N
5	2430017211118	Muhammad Doniko		P	5	2430017211064	Shettya Muhamamah		P
6	2430017211117	Aliif Rifki Fadiah		P	6	2430017211070	Fahdatul Ahmad		P
7	2430017211118	Muhammad Al Anshar		P	7	2430017211072	MITA M PANJAITAN		P
NO	NPM	NAMA	PEMBIMBING	KET	NO	NPM	NAMA	PEMBIMBING	KET
1	2430017211130	Evan Rivaldo	DUSKARDI	N	1	2430017211109	Rino alfarro	RIZKY ARMAN	N
2	2430017211097	Febriyanda Kusuma		N	2	2430017211113	Saharudin		N
3	2430017211112	Freddy sumek		N	3	2430017211088	Muhammad Fauzi		N
4	2430017211090	Marcelinus Alexander Frantinus		P	4	2430017211089	Abdul ul hamdani		P
5	2430017211061	Juan Filbert Puthandjo		P	5	2430017211091	Rokhani		P
6	2430017211095	Harman Imanuddin		P	6	2430017211114	Alfredo M Samosir		P
NO	NPM	NAMA	PEMBIMBING	KET	NO	NPM	NAMA	PEMBIMBING	KET
1	2430017211046	Nofrizal	YOVAL	N					
2	2430017211047	Irwanto		N					
3	2430017211059	Harbi Harlan		N					
4	2430017211071	Eko Prihantoro		N					
5	2430017211110	Mico		N					
6	2430017211049	Umar Wilni hadi kusuma		N					
7	2430017211092	Salman alfaris		P					

Keterangan

P	PROPOSAL KRS	Melaksanakan Sistem Proposal, deadline akhir Semester
N	NON KRS	Tidak harus Seminar di Semester I



: Padang
13 Maret 2025

Prof. Dr.Eng. Reni Desmiarti, S.T., M.T.

Kampus Proklamator I : Jl. Sumatera Ulak Karang Padang, 25133, Telp. (0751) 7051678-7052066, Fax. (0751) 7055475
Kampus Proklamator II : Jl. Bagindo Aziz Chan By Pass Aie Pacah Padang, Telp.(0751) 463250
Kampus Proklamator III : Jl. Gajah Mada No.19, Olo Nanggalo, Padang 25143, Telp.(0751) 7054257, Fax. (0751) 7051341
E-mail : sekretariat.rektor@bunghatta.ac.id, rektorat@bunghatta.ac.id, humas@bunghatta.ac.id

www.bunghatta.ac.id

HALAMAN PENGESAHAN

**"ANALISIS TERMAL BOILER WATERTUBE DENGAN
BERBAGAI VARIASI BAHAN BAKAR"**

*Diajukan untuk memenuhi persyaratan penyelesaian program S-1 Jurusan Teknik
Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Bung Hatta*

Oleh:

Zulhanif Dandy Ajmi

2410017211076

Disetujui Oleh:

PEMBIMBING I



Dr. Ir. Edi Septe, S.M.T.
NIDN.1001096301

DEKAN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI



Prof. Dr. Eng. Reni Desmiarti, S.T., M.T.
NIDN.1012097403

KETUA
JURUSAN TEKNIK MESIN



Prof. Dr. Hendra Suherman, S.T., M.T.
NIDN.1001047101

HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI

**“ANALISIS EFISIENSI TERMAL *BOILER WATERTUBE*
DENGAN BERBAGAI VARIASI BAHAN BAKAR”**

*Diajukan untuk memenuhi persyaratan penyelesaian program S-1 Jurusan Teknik
Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Bung Hatta*

Oleh:

Zulhanif Dandy Ajmi

2410017211076

Disetujui Oleh:

PEMBIMBING I



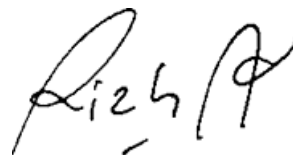
**Dr. Ir, Edi Septe, S.M.T
NIDN.1001096301**

PENGUJI I



**Dr. Yovial M, S.T., M.T
NIDN. 1013036202**

PENGUJI II



**Rizky Arman, S.T., M.T.
NIDN.1026057402**

**PERNYATAAN KEASLIAN ISI
LAPORAN SKRIPSI (TUGAS SARJANA)**

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Zulhanif Dandy Ajmi

Npm 2410017211076

Program Studi : Teknik Mesin

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan SKRIPSI (Tugas Sarjana) yang telah saya buat ini merupakan hasil karya sendiri dan bukan merupakan duplikasi, serta tidak mengutip sebagian atau seluruhnya karya orang lain, kecuali telah disebutkan sumbernya.

Padang, 3 Maret 2026

Zulhanif Dandy Ajmi

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan proposal tugas sarjana dengan judul —Analisis efisiensi thermal boiler *watertube* dengan berbagai variasi bahan bakar

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu Prof. Dr. Eng. Reni Desmiarti, S.T., M.T. sebagai dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Bung Hatta.
2. Bapak Prof. Dr. Hendra Suherman, S.T., M.T. sebagai Kepala Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Bung Hatta.
3. Bapak Dr.Ir.Edi Septe.S,M.T sebagai dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan saran yang sangat berharga dalam penyusunan skripsi ini.
4. Seluruh Dosen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Bung Hatta yang telah memberikan ilmunya kepada penulis, semoga ilmu yang diberikan bermanfaat untuk penulis.
5. Kepada seluruh staff Teknisi Laboratorium Teknik Mesin yang telah membantu penulis selama menjalani perkuliahan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Bung Hatta
6. Rahmi Suryani, S.Pd , Haris Septia Rahman, S.T, Khori Rahmadhani dan Yuneska Carrolline S.TP yang selalu memberikan doa, semangat, motivasi, dan dukungan bagi penulis selama masa perkuliahan hingga penulisan skripsi ini.

7. Rekan-rekan sejawat yang telah memberikan dukungan moral dan bantuan teknis selama proses penyusunan skripsi ini.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan kontribusi baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan dan penyempurnaan skripsi ini di masa mendatang.

Pangkalan Kerinci, 31 Maret 2026



Zulhanif Dandy Ajmi

ABSTRAK

ANALISIS EFISIENSI TERMAL *BOILER WATERTUBE* DENGAN BERBAGAI VARIASI BAHAN BAKAR

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi termal pada *boiler* tipe *watertube* berdasarkan variasi penggunaan bahan bakar biomassa dan padat yang digunakan secara bersamaan dalam proses pembakaran. *Boiler* merupakan peralatan penting dalam industri yang berfungsi menghasilkan uap melalui proses pemanasan air menggunakan energi panas dari pembakaran bahan bakar. Efisiensi termal *boiler* dipengaruhi oleh karakteristik bahan bakar, nilai kalor, serta laju pemakaian bahan bakar yang digunakan dalam sistem pembakaran.

Metode penelitian yang digunakan adalah metode analisis langsung (*direct method*), yaitu dengan membandingkan energi panas yang dihasilkan dalam bentuk uap dengan total energi panas yang masuk dari bahan bakar. Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari data operasional aktual *boiler* selama beberapa hari pengamatan, yang meliputi konsumsi bahan bakar kulit kayu, batubara, dan sludge serta produksi uap yang dihasilkan. Nilai kalor masing-masing bahan bakar digunakan untuk menghitung total energi panas yang masuk ke dalam sistem *boiler*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi komposisi bahan bakar memberikan pengaruh terhadap nilai efisiensi termal *boiler* yang dihasilkan. Bahan bakar batubara memberikan kontribusi energi panas yang lebih besar karena memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan kulit kayu dan *sludge*.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai pengaruh variasi bahan bakar terhadap kinerja *boiler* serta menjadi referensi dalam upaya peningkatan efisiensi energi dan pemanfaatan limbah sebagai sumber energi alternatif dalam sistem pembangkit uap industri.

Kata kunci: efisiensi termal, boiler watertube, variasi bahan bakar, biomassa, batubara.

Abstract

Thermal Efficiency Analysis of a Watertube

Boiler with Various Fuel Variations.”

Boilers are essential equipment in industrial processes that function to generate steam by converting water into vapor using heat energy produced from fuel combustion. The performance of a boiler can be evaluated through its thermal efficiency, which indicates the effectiveness of converting fuel energy into useful steam energy. This study aims to analyze the thermal efficiency of a watertube boiler operating with various fuel combinations.

The research method used in this study is the direct method, which compares the heat energy contained in the produced steam with the total heat energy supplied by the fuel. Operational data were obtained from actual boiler operating conditions over several observation periods, including the consumption rate of bark, coal, and sludge as fuels as well as the amount of steam produced. The calorific value of each fuel was used to determine the total heat energy input to the boiler system.

The results show that variations in fuel composition influence the thermal efficiency of the watertube boiler. Coal provides the largest contribution to heat energy due to its higher calorific value compared to bark and sludge.

This study provides an overview of the influence of fuel variation on boiler performance and can serve as a reference for improving energy efficiency and utilizing industrial waste as an alternative energy source in steam generation systems.

Keywords: *thermal efficiency, watertube boiler, fuel variation, biomass, coal.*

DAFTAR ISI

SK PEMBIMBING.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
LEMBARAN ASISTENSI.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Batasan Masalah	8
1.5 Manfaat Penelitian	9
1.6 Sistematika Penulisan.....	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	14
2.1 Kerangka Teori	15
2.1.1 Penelitian Terdahulu	15
2.2 Bahan Bakar untuk Boiler	17
2.3 Efisiensi Boiler	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	22
3.1 Metode Penelitian	22
3.1.1 Jadwal Penelitian.....	22
3.2 Prosedur Penelitian	23
3.2.1 Data Primer.....	24
3.2.2 Data Sekunder.....	25
BAB IV PEMBAHASAN.....	27
4.1 Gambaran umum.....	22
4.2 Penjabaran Perpindahan Panas Di Boiler	30
4.3 Karakteristik Bahan Bakar Campur	33
4.4 Pembahasan.....	34
4.4.1 Analisis Efisiensi Boiler	44
4.4.2 Pengaruh Jenis Dan Karakteristik Bahan Bakar	45
4.4.3 Pengaruh Kondisi Operasi Boiler	46
4.4.4 Konsistensi Hasil Perhitungan.....	47
4.4.5 Keterbatasan Analisis	47
4.4.6 Energi Masuk Boiler.....	48

4.4.7 Analisis Kontribusi Bahan Bakar Terhadap Efisiensi.....	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	50
5.1 Kesimpulan	50
5.2 Saran	52
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Boiler watertube.....	2
Gambar 2.1 Boiler watertube.....	14
Gambar 3.1 Kalorimeter	23
Gambar 3.2 Weightometer.....	24
Gambar 4.1.1 Name Plate Power Boiler.....	27
Gambar 4.2.1 Bahan Bakar Kulit Kayu & Sludge.....	29
Gambar 4.1.3 Batu Bara	30
Gambar 4.2.1 Ilustrasi Pembakaran Boiler	31

DAFTAR TABEL

Tabel 2.2 Dimensi dan indikator bahan bakar	18
Tabel 3.1 Jadwal kegiatan penelitian.....	23
Tabel 3.2 Jumlah kalori setiap bahan bakar.....	25
Tabel 4.2,1 Spesifikasi Bahan Bakar Pada Boiler	33
Tabel 4.4.1 Data Konsumsi Bahan Bakar.....	35

LEMBAR ASISTENSI

Nama : Zulhanif Dandy Ajmi
Npm : 2410017211076
Judul Skripsi : Efisiensi termal *boiler watertube* dengan berbagai variasi bahan bakar
Dosen Pembimbing : Dr.Ir.Edi Septe.S,M.T

NO	Tanggal	Catatan	Paraf
1	9-06-2025	Perbaiki judul Efisiensi termal boiler watertube dengan berbagai variasi bahan bakar	
2	15-06-2025	Menjelaskan Boiler dengan rinci dan gambarnya di tambahkan	
3	18-06-2025	Menjelaskan bagaimana variasi bahan bakar tersebut	
4	01-08-2025	Tambahkan jurnal yang relevan dengan penelitian	
5	07-08-2025	Bab 3 Buatlah metodologi penelitiannya	
6	14-08-2025	Perbaiki tulisannya dengan lengkap	
7	29-08-2025	Tambahkan pada BAB 2 gambar boiler dan keterangannya	
8	15-09-2025	ACC sidang proposal	
9	01-01-2025	Lengkapi lagi BAB 4, pahami juga hitungannya	

10	20-01-2026	Lampirkan SK pembimbing, ubah judul dari proposal menjadi skripsi, lengkapi Abstrak, update daftar isi,daftar gambar, daftar table.	
11	25-01-2026	Uraikan penjelasan pada penelitian	
12	30-01-2026	ACC untuk sidang skripsi	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Boiler merupakan komponen vital dalam sistem pembangkitan energi termal yang berfungsi untuk mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas melalui proses pembakaran. Energi panas tersebut kemudian digunakan untuk memanaskan air hingga berubah menjadi uap, yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan, seperti menggerakkan turbin pembangkit listrik, proses industri, hingga pemanas ruang. Secara umum, boiler terdiri dari bejana tertutup di mana air dipanaskan hingga menjadi uap dengan bantuan panas dari pembakaran bahan bakar (Kumar & Ghosh, 2020)

Diindustri kertas steam dari *boiler* digunakan banyak hal misalnya sebagai pemanas dari rebusan *pin chip*, sebagai penyalur *Low Pressure steam* pada area yang membutuhkan LP *steam*, dan sebagai penggerak *turbine generator*.

Berdasarkan cara kerja dan konstruksinya, terdapat dua jenis utama *boiler*, yaitu (boiler pipa api) **dan** water tube boiler (boiler pipa air). Dalam *fire tube boiler*, gas hasil pembakaran mengalir di dalam pipa yang dikelilingi air, sedangkan pada *water tube boiler*, air mengalir di dalam pipa-pipa kecil yang dipanaskan oleh gas panas di bagian luar. *Water tube boiler* lebih cocok untuk

kebutuhan tekanan dan kapasitas yang tinggi karena memiliki efisiensi dan kecepatan pemanasan yang lebih baik (Nag, 2021).

Salah satu varian dari *water tube boiler* yang banyak digunakan di sektor industri modern adalah boiler *Circulating Fluidized Bed* (CFB). Boiler tipe CFB menggunakan prinsip pembakaran berlapis *fluida* (*fluidized bed*), di mana partikel bahan bakar dan material inert (seperti pasir halus atau abu) disuspensikan dalam aliran udara berkecepatan tinggi, menciptakan kondisi pembakaran yang merata dan efisien. Sistem ini memungkinkan pembakaran berlangsung pada suhu yang relatif lebih rendah dibandingkan *boiler* konvensional (sekitar 800–900°C), sehingga mengurangi pembentukan NO_x dan memungkinkan pemanfaatan bahan bakar dengan kualitas rendah, seperti limbah biomassa atau batubara kalori rendah. (Basu, 2020)



Gambar1.1. *Boiler watertube* di Pangkalan Kerinci

Keunggulan utama dari *boiler* CFB meliputi (Basu, P. (2020). *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. CRC Press.):

- a. Kemampuan untuk membakar berbagai jenis bahan bakar padat dengan efisiensi tinggi.
- b. Emisi yang lebih rendah karena pembakaran berlangsung pada suhu yang lebih rendah.
- c. Kontrol suhu yang lebih baik dan penyebaran panas yang merata.

- d. Kapasitas yang besar dan stabilitas operasional yang baik dalam beban fluktuatif.

Efisiensi termal pada *boiler*, termasuk tipe CFB, menjadi parameter krusial yang menentukan seberapa besar energi dari bahan bakar yang berhasil dikonversi menjadi energi panas. Semakin tinggi efisiensi termal, semakin sedikit bahan bakar yang dibutuhkan, dan semakin kecil emisi gas buang yang dihasilkan. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi termal boiler merupakan fokus penting dalam rangka efisiensi energi, penghematan biaya operasional, dan pengurangan dampak lingkungan (Sutrisno, 2018).

Berbagai faktor memengaruhi efisiensi termal boiler, mulai dari desain sistem, pengaturan operasi, hingga karakteristik bahan bakar. Salah satu aspek yang sangat berpengaruh adalah jenis bahan bakar yang digunakan. Variasi bahan bakar, baik dari segi komposisi kimia, kandungan air, maupun nilai kalor, dapat mengubah karakteristik pembakaran dan mempengaruhi efisiensi sistem secara keseluruhan (Berbagai faktor memengaruhi efisiensi termal *boiler*, mulai dari desain sistem, pengaturan operasi, hingga karakteristik bahan bakar. Salah satu aspek yang sangat berpengaruh adalah jenis bahan bakar yang digunakan. Variasi bahan bakar, baik dari segi komposisi kimia, kandungan air, maupun nilai kalor, dapat mengubah karakteristik pembakaran dan mempengaruhi efisiensi sistem secara keseluruhan, di industri kertas tentu pengolahannya menggunakan kayu yang sudah dikuliti, jadi kulit kayu tersebut termasuk limbah industri, dan untuk mengurangi limbah industri, kulit kayu tersebut dijadikan bahan bakar di

boiler. dan ada juga limbah *pulp* yang bisa dikategorikan sebagai limbah B3, dan untuk meminimalisir kerusakan lingkungan perusahaan memiliki ide untuk menggunakannya sebagai bahan bakar campuran di *boiler*.

Dalam konteks ini, penelitian mengenai analisis efisiensi termal *boiler watertube* tipe CFB dengan variasi bahan bakar menjadi sangat relevan. Bahan bakar seperti batubara dan kulit kayu memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan bahan bakar alternatif seperti biomassa. Biomassa, yang mencakup limbah pertanian dan kehutanan seperti *sludge* dan kulit kayu, merupakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan, namun memiliki tantangan tersendiri seperti kadar air tinggi dan nilai kalor rendah.

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi dan tekanan global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, industri dituntut untuk beralih ke sistem yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Beberapa studi terdahulu telah membahas efisiensi termal *boiler* dengan pendekatan yang beragam. Misalnya, penelitian Lestari et al. (2021) menunjukkan bahwa rasio udara-bahan bakar yang tepat pada *boiler* berbahan bakar LPG dapat meningkatkan efisiensi termal. Penelitian oleh Simanjuntak (2023) mengungkapkan bahwa campuran fiber dan cangkang sawit lebih efisien dibandingkan fiber tunggal. Namun, masih terdapat kekurangan dalam literatur terkait integrasi antara pendekatan eksperimental dan simulasi numerik, serta studi komprehensif mengenai berbagai variasi bahan bakar pada *boiler* tipe CFB.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi termal *boiler watertube* tipe CFB dengan berbagai variasi bahan bakar, termasuk biomassa dan bahan bakar fosil,. Penelitian ini tidak hanya diharapkan memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi pembakaran yang lebih efisien dan ramah lingkungan, tetapi juga menjadi dasar pengambilan keputusan dalam praktik industri guna mengoptimalkan konsumsi energi.

1.2 Rumusan masalah

1. Bagaimana nilai efisiensi termal *boiler watertube* yang dihasilkan oleh campuran jenis bahan bakar (batubara,kulit kayu,dan *sludge*) berdasarkan data operasional aktual?
2. Berapa besar efisiensi termal yang dihasilkan dari berbagai komposisi campuran batubara, kulit kayu, dan *sludge*?
3. Sejauh mana penambahan biomassa (kulit kayu dan *sludge*) dalam campuran dapat mengurangi konsumsi batubara tanpa menurunkan performa boiler secara signifikan?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menentukan dan mengevaluasi efisiensi termal *boiler watertube* berdasarkan data aktual operasional dengan penggunaan variasi bahan bakar yang digunakan secara bersamaan.

2. Menganalisis kontribusi energi panas dari masing-masing bahan bakar berdasarkan nilai kalor dan laju pemakaiannya terhadap total energi masuk *boiler*.
3. Mengidentifikasi bahan bakar yang memberikan kontribusi energi dominan dan berpotensi mendukung pencapaian efisiensi termal *boiler* yang optimal dan stabil berdasarkan karakteristik nilai kalor dan pola pemakaiannya.

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian ini secara khusus difokuskan pada analisis efisiensi termal dari boiler tipe *watertube* yang beroperasi menggunakan variasi bahan bakar, yakni batubara, kulit kayu, dan *sludge*. Cakupan utama penelitian meliputi perhitungan dan perbandingan efisiensi termal *boiler* berdasarkan data operasional dan karakteristik termofisika dari variasi bahan bakar.
2. Lingkup penelitian dibatasi pada analisis termodinamika dasar menggunakan metode perhitungan efisiensi termal secara langsung dan tidak langsung (direct and indirect method). Parameter-parameter seperti nilai kalor bahan bakar (HHV/LHV), jumlah konsumsi bahan bakar, massa dan suhu fluida kerja, serta losses energi utama menjadi fokus utama dalam perhitungan. Seluruh analisis dilakukan pada kondisi operasi standar *boiler*, tanpa mempertimbangkan variasi desain fisik, ukuran boiler, atau dinamika kontrol sistem pembakaran secara rinci.

3. Adapun hal-hal yang tidak termasuk dalam ruang lingkup penelitian ini antara lain adalah analisis emisi gas buang, pengaruh lingkungan dari masing-masing bahan bakar, serta analisis ekonomi atau biaya operasional dari penggunaan tiap bahan bakar. Selain itu, kerusakan mekanis, umur pakai boiler, dan aspek material dari komponen *boiler* tidak dibahas secara mendalam, karena penelitian ini hanya berfokus pada aspek efisiensi termal sebagai parameter kinerja utama.
4. Dengan ruang lingkup yang spesifik dan terukur ini, penelitian diharapkan tetap terarah dan relevan terhadap tujuan utamanya, yakni memberikan pemahaman yang komprehensif dan berbasis data mengenai pengaruh variasi bahan bakar terhadap efisiensi termal *boiler watertube*.
5. Boiler yang digunakan ialah *boiler* yang berkapasitas 140 bar, dan max produksi *steam* 130 Kg/s

1.5 Manfaat Penelitian

1.5.1 Secara Teoritis

Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan ilmu teknik mesin, khususnya dalam kajian efisiensi termal sistem konversi energi berbahan bakar beragam. Dengan mencampurkan bahan bakar fosil dan limbah industri dalam *boiler watertube*, penelitian ini memperkaya pemahaman tentang pengaruh karakteristik termofisika, seperti nilai kalor, terhadap performa pembakaran. Pendekatan kuantitatif berbasis perhitungan efisiensi dan pengujian empiris menjadikan studi ini relevan sebagai rujukan evaluasi kinerja boiler. Selain itu,

penelitian ini menawarkan model integratif yang jarang dikaji, sekaligus membuka peluang pengembangan lebih lanjut melalui eksperimen, simulasi termal, maupun pemodelan numerik. Temuannya tidak hanya bermanfaat secara teoritis, tetapi juga aplikatif bagi pendidikan, industri, serta mendukung arah kebijakan transisi energi.

1.5.2 Secara Praktis

Secara praktis, penelitian ini bernilai strategis bagi industri berbasis *boiler* multi-bahan bakar, karena menyediakan data analisis efisiensi yang secara actual terjadi di *boiler* . Hasilnya dapat dijadikan patokan dan referensi bagi perusahaan yang bergerak dibidang industri kertas lainnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini disusun secara sistematis dalam lima bab utama untuk memberikan alur pemikiran yang logis dan mudah dipahami. Adapun sistematika penulisannya adalah sebagai berikut:

BAB I – PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang masalah yang mendasari pentingnya penelitian, perumusan masalah yang ingin dijawab, tujuan penelitian, batasan masalah agar penelitian terfokus, serta manfaat penelitian baik dari segi teoritis maupun praktis.

BAB II – TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memuat landasan teori yang relevan dengan topik penelitian, seperti prinsip kerja *boiler watertube*, konsep efisiensi termal, serta karakteristik masing-masing bahan bakar (gas alam, solar, batubara, kulit kayu, dan fiber). Selain itu, bab ini mencakup studi pustaka atau penelitian sebelumnya yang berkaitan sebagai referensi dan pembanding.

BAB III – METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan pendekatan yang digunakan dalam penelitian, termasuk metode analisis, langkah-langkah perhitungan efisiensi termal, *spesifikasi boiler* yang dianalisis, serta data teknis dari masing-masing bahan bakar. Selain itu, dijelaskan pula prosedur pengumpulan dan pengolahan data agar hasil yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

BAB IV – HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil perhitungan efisiensi termal *boiler* untuk setiap jenis bahan bakar. Data yang diperoleh dianalisis secara kuantitatif, kemudian dibahas secara mendalam untuk memahami pengaruh karakteristik bahan bakar terhadap kinerja termal *boiler*. Komparasi antar bahan bakar dilakukan untuk mengetahui mana yang paling optimal dari segi efisiensi.

BAB V – KESIMPULAN DAN SARAN

Bab terakhir ini berisi kesimpulan dari hasil analisis yang telah dilakukan, merangkum temuan utama penelitian. Selain itu, diberikan saran untuk pengembangan penelitian lebih lanjut atau penerapan hasil dalam praktik industri, khususnya dalam pengoperasian *boiler* dengan efisiensi tinggi.