

SKRIPSI

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH

VARIASI BIOMASSA SAWDUST DAN

BATU BARA TERHADAP NILAI

EFISIENSI *BOILER* PEMBANGKIT

LISTRIK TENAGA UAP



Oleh :

M.Daru Fathur R
21036010023

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK & SAINS

UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"

JAWA TIMUR

2025

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMENTAL PERBANDINGAN VARIASI BIOMASSA SAWDUST DAN BATU BARA TERHADAP NILAI EFISIENSI *BOILER* PEMBANGKIT TENAGA UAP

Skripsi ini Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Menyelesaikan Studi Strata Satu Dan Memperoleh Gelar Sarjana di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur.

Oleh :

Nama : M.Daru Fathur R
Npm : 21036010023
Kosentrasi : Konversi Energi

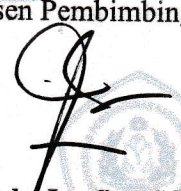
Telah Diuji Dalam Ujian Komprehensif Skripsi
Hari/Tanggal : Kamis, 18 September 2025

Telah Disahkan Oleh :

Dosen Penguji 1

Dosen Pembimbing


Ahmad Khairul Faizin, S.T., M.Sc.
NIP. 199301 20202406 1 001


Radissa Dzaky Issafira, S.T., M.Sc.
NIP. 199404 28202203 2 011

Dosen Penguji 2

Koordinator Program Studi
Teknik Mesin


Ndaru Adyono, S.Si., M.T.
NIP. 199001 25202406 1 001


Dr. T. Ir. Luluk Edahwati, M.T.
NIP. 19640611 199203 2 001

Mengatahui,

Dekan Fakultas Teknik & Sains



Prof. Dr. Dra. Jariyah, MP
NIP. 19650403 199103 2 001



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN" JAWA TIMUR
FAKULTAS TEKNIK DAN SAINS

KETERANGAN REVISI

Mahasiswa di bawah ini:

Nama : M. Daru Fathur R

NPM : 21036010023

Program Studi : ~~Teknik Kimia~~ / ~~Teknik Industri~~ / ~~Teknologi Pangan~~ /
~~Teknik Lingkungan~~ / ~~Teknik Sipil~~ / Teknik Mesin

Telah mengerjakan revisi / ~~tidak ada revisi~~ *) ~~PRA RENCANA (DESAIN)~~ / ~~SEMINAR~~
~~PROPOSAL~~ / SKRIPSI / TUGAS AKHIR Ujian Lisan Periode I, TA . 2025/2026.

Dengan judul : STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH VARIASI BIOMASSA
SAWDUST DAN BATU BARA TERHADAP NILAI EFISIENSI
BOILER PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

Dosen Penguji yang memerintahkan revisi

1. Ahmad Khairul Faizin, S.T., M.Sc

2. Ndaru Adyono, S.Si., M.T

Surabaya, 28 September 2025

Menyetujui,
Dosen Pembimbing

Radissa Dzaky Issafira, S.T., M.Sc
NIP. 199404 28202203 2 011

~~Catatan:~~ *) coret yang tidak perlu

SURAT PERNYATAAN TIDAK PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : M.Daru Fathur R
NPM : 21036010023
Fakultas/Program Studi : Fakultas Teknik & Sains / Teknik Mesin
Judul Skripsi/Tugas akhir : Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Biomassa *sawdust* dan Batu Bara Terhadap Nilai Efisiensi *Boileri* Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Hasil karya yang saya serahkan ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik baik di UPN "Veteran" Jawa Timur maupun di institusi pendidikan lainnya.
2. Hasil karya saya ini merupakan gagasan, rumusan, dan hasil penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan pembimbing akademik.
3. Hasil karya saya ini merupakan hasil revisi terakhir setelah diujikan yang telah diketahui dan disetujui oleh pembimbing.
4. Hasil karya saya ini, tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali yang digunakan sebagai acuan dalam naskah dengan menyebutkan nama pengarang dan mencantumkan dalam daftar Pustaka.

Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya. Apabila di kemudian hari terbukti ada penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima konsekuensi apapun sesuai dengan ketentuan yang berlaku di UPN "Veteran" Jawa Timur.

Surabaya, 26 September 2025

Yang menyatakan,


M.Daru Fathur Rizki

NPM. 21036010023

KATA PENGANTAR

Segala puji kami panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang diberikan, sehingga proposal skripsi ini bisa terselesaikan dengan baik. Dalam penyusunan proposal skripsi ini, kami mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu terselesaikannya proposal skripsi ini. Adapun pihak-pihak tersebut antara lain:

1. Ibu Prof. Dr. Dra Jariyah, MP selaku Dekan Fakultas Teknik dan Sains UPN “Veteran” Jawa Timur.
2. Ibu Dr. Ir. Luluk Edahwati, MT selaku Koordinator Program Studi Teknik Mesin UPN “Veteran” Jawa Timur
3. Ibu Radissa Dzaky Issafira, S.T., M.Sc. Sebagai Dosen Pembimbing yang selalu memberi ilmu, arahan, saran, nasihat, dan semangat kepada penulis.
4. Bapak Ahmad Khairul Faizin, S.T., M.Sc. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan.
5. Bapak Ndaru Adyono, S.Si., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan.
6. Orang tua yang sangat penulis cintai, yang selalu mendukung, mendoakan, dan memberika kasih sayang kepada penulis
7. Teman – teman Teknik Mesin UPN “Veteran” Jawa Timur.

Penulis menyadari bahwa proposoal skripsi ini belumlah dikatakan sempurna. Untuk itu, penulis dengan sangat terbuka menerima kritik dan saran dari pembaca sekalian. Semoga proposal skripsi ini bermanfaat untuk kita semua.

Surabaya, 18 September 2025

M.Daru Fathur Rizki

DAFTAR ISI

SKRIPSI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
KETERANGAN REVISI.....	iii
SURAT PERNYATAAN TIDAK PLAGIAT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR NOTASI	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
<i>ABSTRACT</i>	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Landasan Teori	6
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap	6
2.2.1 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap	8
2.3 Siklus <i>Rankine</i>	9
2.3.1 Siklus <i>Rankine</i> Ideal	10
2.3.2 Siklus <i>Rankine Subcritical</i>	11

2.3.3 Siklus Rankine <i>Supercritical</i>	12
2.4 <i>Boiler</i>	13
2.4.1 Klasifikasi <i>Boiler</i>	15
2.4.3 Komponen Utama <i>Boiler</i>	17
2.5 Batu Bara	19
2.5.1 Klasifikasi Batu Bara	20
2.5.2 Klasifikasi Tingkat Batu Bara di Perusahaan	21
2.6 Biomassa.....	22
2.6.1 <i>Sawdust</i>	23
2.7 <i>Co-firing</i>	24
2.7.1 Jenis Jenis <i>Co-firing</i>	25
2.8 Efisiensi <i>Boiler</i>	28
2.8.1 Metode Langsung (<i>Direct Method</i>)	28
2.7.2 Metode Tidak Langsung (<i>Indirect Method</i>).....	30
2.9 Turbin Heat Rate.....	39
2.10 Plant Heat Rate	40
2.11 Hipotesis	41
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	42
3.1 Tempat/Lokasi Penelitian	42
3.2 Waktu Penelitian.....	42
3.3 Variabel Penelitian.....	42
3.4 Diagram Alir	43
3.5 Alat dan Bahan	44
3.5.1 Alat.....	44
3.5.2 Bahan	47

3.6 Skema Penelitian	49
3.7 Metode Pengambilan Data.....	50
3.8 Metode Pengolahan Data	50
BAB IV PEMBAHASAN.....	52
4.1 Pengaruh Biomassa Terhadap Efisiensi <i>Boiler</i> Metode <i>Direct</i> dan <i>Indirect</i>	52
4.2 Pengaruh Biomassa Terhadap <i>Furnace Exit Gas Temperature, Flue gas</i> dan <i>Coal Flow</i>	54
4.2.1 Pengaruh Biomassa Terhadap <i>Coal Flow</i>	57
4.3 Pengaruh Biomassa Terhadap Emisi	59
4.3.1 Emisi SO_2 dan NO_x	59
4.3.2 Emisi CO_2 dan O_2	61
BAB V KESIMPULAN.....	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Uap.....	7
Gambar 2.2 Diagram Siklus <i>Rankine</i>	10
Gambar 2.3 Skema dan diagram siklus <i>rankine subcritical</i>	12
Gambar 2. 4 Diagram T-s Siklus <i>Rankine Supercritical</i>	13
Gambar 2.5 <i>Boiler</i> Pipa Api.....	15
Gambar 2.6 <i>Boiler</i> Pipa Air	15
Gambar 2.7 Skema <i>Boiler FBB</i>	16
Gambar 2.8 Skema <i>Pulverized Coal Fired Boiler</i>	16
Gambar 2.9 Bagian Bagian Dalam <i>Boiler</i>	17
Gambar 2.10 <i>Steam Drum Boiler</i>	18
Gambar 2.11 <i>Superheater Boiler</i>	18
Gambar 2.12 Ekonomizer <i>Boiler</i>	19
Gambar 2. 13 Skema <i>Direct Co-Combustion</i>	25
Gambar 2. 14 Skema <i>Indirect Co-combustion</i>	26
Gambar 2. 15 Skema <i>Parallel Co-Combustion</i>	27
Gambar 2. 16 Skema <i>Metode Direct</i>	28
Gambar 2. 17 Skema Metode Tidak Langsung.....	31
Gambar 3. 1 Diagram Alir	43
Gambar 3.2 Laptop Pavilion Gaming	44
Gambar 3.3 <i>Boiler</i> PT PLN NP.....	45
Gambar 3.4 Tampilan Monitor CCR	46
Gambar 3.5 Thermogun Cyclops 100L-1F	47
Gambar 3.6 Low Rank Coal (LRC)	47
Gambar 3.7 <i>Sawdust</i>	48
Gambar 3.8 Skema Penelitian	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel Penelitian Terdahulu	5
Tabel 2.2 Jenis Jenis <i>Boiler</i>	15
Tabel 2.3 Kandungan Batu Bara	21
Tabel 2.4 Kandungan Bahan Bakar <i>Sawdust</i>	24
Tabel 3.1 Tabel Komposisi Variasi.....	42
Tabel 3.2 Tabel Komposisi Bahan Bakar	48

DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan	Satuan
M_{coal}	<i>Coal flow</i>	(kg/s)
HHV	<i>High heating value</i>	(Kj/kg)
$\dot{m}_{\text{ms}}$	Laju massa uap utama	(kg/s)
$\dot{m}_{\text{psw}}$	Laju massa air pengumpan	(kg/s)
h_{ms}	Entalpi spesifik utama	(kJ/kg)
h_{fw}	Entalpi spesifik air pengumpan	(kJ/g)
$\dot{m}_{\text{psw}}$	Laju massa SW <i>superheater</i>	(kg/s)
h_{psw}	Entalpi spesifik SW <i>superheater</i>	(kJ/kg)
$\dot{m}_{\text{rs}}$	Laju massa uap <i>reheat</i>	(kg/s)
h_{rso}	Entalpi spesifik uap <i>reheat outlet</i> heater	(kJ/kg)
h_{rsi}	Entalpi spesifik uap <i>reheat inlet</i> heater	(kJ/kg)
$\dot{m}_{\text{rsw}}$	Laju massa SW <i>reheat</i>	(kg/s)
h_{rsi}	Entalpi spesifik uap <i>reheat inlet</i> <i>reheater</i>	(kJ/kg)
h_{rsw}	Entalpi spesifik air semprot <i>reheat</i>	(kJ/kg)
$\dot{m}_{\text{blw}}$	Laju massa blowdown	(kg/s)
h_{blw}	Entalpi spesifik blowdown	(kJ/kg)
h_{rw}	Entalpi spesifik <i>Feedwater</i>	(kJ/kg)
Q_{ms}	Energi masuk menuju uap utama	(kJ/s)
Q_{psw}	Energi masuk menuju <i>superheater</i> SW	(kJ/s)
Q_{rs}	Energi masuk menuju uap <i>reheat</i>	(kJ/s)
Q_{rsw}	Energi masuk menuju <i>reheat</i> SW	(kJ/s)
Q_{blw}	Energi masuk menuju blowdown	(kJ/s)
L_{uc}	<i>Heat Loss</i> karena carbon tidak terbakar	(kJ/kg)
Hdp	Rata rata carbon tidak terbakar	(kg/kg)
Wdp	Berat total <i>dry refuse</i>	(kg/kg)
C_s	<i>Carbon content of refuse</i>	(%)
C_f	<i>Carbon content of fly ash</i>	(%)
C_{ah}	<i>Carbon of eco reduce</i>	(%)
A_{ar}	Kandungan abu	(%)
L_G	<i>Heat Loss</i> karena gas buang	(kJ/kg)
W_g	Laju uap kering ketika keluar AH	(kg/kg)
C_{pg}	Spesifik <i>Heat gas at refrece temp</i>	(kJ/kg)
T_g	<i>Air heater outlet uap temperature</i>	($^{\circ}\text{C}$)
T_r	<i>Refrence Temperature</i>	($^{\circ}\text{C}$)
L_{mf}	<i>Heat Loss</i> karena <i>Moisture</i> bahan bakar	(kJ/kg)
W_{ar}	<i>Moisture Content</i>	(%)
H_g	<i>Enthalphy of steam at AH Outlet</i>	(kJ/kg)

H_{rv}	<i>Enthalphy of water at refrence temperature</i>	(kJ/kg)
L_H	<i>Heat Loss karena hydrogen</i>	(kJ/kg)
H_{ar}	<i>Hydrogen Content</i>	(%)
L_{ma}	<i>Heat Loss karena moisture udara</i>	(kJ/kg)
W_a	<i>Weight of dry air</i>	(kg/kg)
H_r	<i>Entalphy at refrence Temperature air</i>	(kJ/kg)
W_{ma}	<i>Weight of moisture in air</i>	(kg/kg)
θ	<i>Relative Humidity</i>	(%)
P_s	<i>Partial Pressure of saturated vapor</i>	(psi)
P_a	<i>Atmospheric pressure</i>	(psi)
L_{CO}	<i>Heat Loss karena karbon monoksida</i>	(kJ/kg)
CO_2	<i>Carbon dioxide content at outlet AH</i>	(%)
CO	<i>Carbon monoxide content at outlet Ah</i>	(%)
C_b	<i>Weight of carbon burned</i>	(kg/kg)
L_d	<i>Heat Loss karena fly ash sensible</i>	(kJ/kg)
D_A	<i>Weight of dry air</i>	(kg/kg)
X_{pa}	<i>Excees air</i>	(%)
T_a	<i>Weight Theoretical Air</i>	(kg/kg)
B_{ah}	<i>Entering Air Heater Credit</i>	(kJ/kg)
H_{ah}	<i>Entalpi inlet AH</i>	(kJ/kg)
$A\emptyset$	<i>Partial pressure of water vapor in air</i>	(psia)
$\emptyset$	<i>Relative Humidity</i>	(%)
P_s	<i>Saturation pressure of water in air</i>	(psia)
P_{baro}	<i>Baromatic Pressure</i>	(Psi)
B_a	<i>Moisture in air</i>	-

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Kandungan Bahan Bakar	75
Lampiran 2 Data Kandungan Bahan bakar	76
Lampiran 3 Data Efisiensi Boiler.....	76
Lampiran 4 Data Suhu FEGT	77
Lampiran 5 Data Suhu Flue Gas	77
Lampiran 6 Data Laju Aliran Bahan Bakar	77
Lampiran 7 Data Emisi NO _x	78
Lampiran 8 Data Emisi SO ₂	78
Lampiran 9 Data Emisi CO.....	78
Lampiran 10 Data Emisi O ₂	79
Lampiran 11 Data Flow FD Fan	79
Lampiran 12 Data Log Histori Harian	80

ABSTRACT

Metode co-firing merupakan salah satu pendekatan untuk mencampurkan biomassa *sawdust* dengan batubara guna menurunkan emisi dan mendukung transisi energi bersih. Variasi campuran bahan bakar ini memengaruhi efisiensi *boiler*, karakteristik pembakaran, serta emisi yang dihasilkan akibat perbedaan kandungan bahan bakar dan laju alirannya. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi campuran *sawdust* dan batubara dengan persentase biomassa 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, dan 5% terhadap efisiensi *boiler* menggunakan metode perhitungan *direct* dan *indirect*, nilai *flue gas*, *Furnace Exit Gas Temperature* (FEGT), dan laju alir bahan bakar. Pengujian dilakukan pada *boiler* tipe *pulverized coal* dengan beban operasi 600–660 MW. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan persentase *sawdust* menurunkan efisiensi *boiler* baik dengan metode *direct* maupun *indirect* akibat nilai kalor biomassa yang lebih rendah. Penambahan *sawdust* juga menyebabkan penurunan FEGT dan emisi (SO₂, NO_x, dan CO₂) secara signifikan, sedangkan nilai *flue gas* cenderung meningkat seiring peningkatan fraksi biomassa. Temuan ini mengindikasikan bahwa penggunaan *sawdust* dalam rasio tertentu dapat menekan emisi tanpa memengaruhi kinerja pembangkit secara drastis, sehingga berpotensi menjadi bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan.

Kata Kunci : *Co-firing*, *sawdust*, batubara, efisiensi *boiler*, *direct*, *indirect*.

ABSTRAC

Co-firing is an effective approach to blending biomass *sawdust* with coal to reduce emissions and support the clean energy transition. The variation in fuel composition influences *boiler* efficiency, combustion performance, and emission characteristics due to differences in fuel properties and flow rates. This study investigates the effect of *sawdust* and coal blending at biomass ratios of 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, and 5% on *boiler* efficiency using *direct* and *indirect* calculation methods, flue gas characteristics, Furnace Exit Gas Temperature (FEGT), and fuel flow rate. The experiment was conducted on a pulverized coal *boiler* operating under a load of 600–660 MW. Results indicate that increasing the proportion of *sawdust* decreases *boiler* efficiency for both calculation methods due to the lower calorific value of biomass compared to coal. Furthermore, higher *sawdust* ratios significantly reduce FEGT and emissions (SO₂, NO_x, and CO₂), while flue gas levels tend to increase with greater biomass content. These findings suggest that incorporating *sawdust* in specific proportions can reduce emissions without significantly compromising *boiler* performance, making it a promising alternative fuel to enhance environmental sustainability in power generation.

Kata Kunci : *Co-firing, sawdust, coal , boiler efficiency, direct, indirect.*