

ANALISIS PENGARUH *CO-FIRING* MENGGUNAKAN KAYU SENGON TERHADAP PEMBAKARAN PADA BOILER

Maulana Ibnu Atho'atillah¹, Margianto², Nur Robbi³

e-mail: ibnuatillah17@gmail.com

margianto@unisma.ac.id

nurrobby@unisma.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan *co-firing* antara batubara bitumen dan biomassa kayu sengon terhadap performa pembakaran pada boiler. *Co-firing* merupakan metode pencampuran dua jenis bahan bakar yang bertujuan untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil serta mengurangi emisi gas rumah kaca. Percobaan dilakukan dengan mencampurkan 80% batubara bitumen dan 20% serbuk kayu sengon, lalu dilakukan pengujian secara laboratorium untuk menghitung parameter pembakaran seperti nilai kalor (HHV dan LHV), kebutuhan udara teoritis, air-fuel ratio, kesetimbangan panas, dan efisiensi total boiler. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan kayu sengon sebagai biomassa dalam metode *co-firing* memberikan pengaruh terhadap efisiensi boiler. Meskipun nilai efisiensi sedikit menurun dibandingkan pembakaran 100% batubara bitumen, metode ini tetap memiliki keunggulan dalam hal potensi pengurangan emisi dan pemanfaatan limbah biomassa lokal. Penambahan alat bantu seperti *air heater* juga menunjukkan peningkatan efisiensi termal secara signifikan. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan *co-firing* kayu sengon sebagai alternatif bahan bakar ramah lingkungan yang mendukung transisi energi berkelanjutan.

Kata Kunci: *Co-firing, Kayu Sengon, Batubara Bitumen, Efisiensi Boiler, Biomassa*

PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, perhatian terhadap isu lingkungan semakin meningkat seiring dengan tingginya emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh sektor energi. Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar fosil, khususnya batubara, telah diidentifikasi sebagai salah satu sumber utama pencemaran atmosfer dan perubahan iklim. Upaya untuk mengurangi dampak aktivitas energi terhadap lingkungan menjadi agenda mendesak, salah satunya melalui pengembangan teknologi ramah lingkungan.

Salah satu langkah inovatif yang mulai diterapkan adalah *co-firing*, yaitu metode penggabungan bahan bakar fosil dengan biomassa. Kayu sengon (*Paraserianthes falcataria*), yang dikenal sebagai pohon cepat tumbuh dan memiliki kandungan energi cukup tinggi, menjadi kandidat potensial biomassa lokal. Penerapan kayu sengon dalam *co-firing* bukan hanya menawarkan peluang pengurangan konsumsi batubara, tetapi juga meningkatkan keberlanjutan operasi PLTU berkat ketersediaan dan potensi energinya.

Namun, pemanfaatan kayu sengan sebagai bahan bakar alternatif memerlukan kajian komprehensif terhadap proses pembakaran di dalam boiler. Karakteristik fisik dan kimia biomassa dapat memengaruhi stabilitas serta efisiensi pembakaran, yang berdampak pada performa sistem, jumlah emisi yang dihasilkan, serta efisiensi konversi energi. Oleh sebab itu, analisis terhadap parameter-parameter seperti suhu pembakaran, kadar oksigen, volume emisi, dan efisiensi termal menjadi sangat krusial untuk memahami sejauh mana kayu sengan dapat dioptimalkan dalam co-firing.

Dengan latar belakang tersebut, kajian mengenai pemanfaatan kayu sengan dalam sistem co-firing diharapkan dapat berkontribusi pada solusi energi yang lebih ramah lingkungan. Selain itu, potensi biomassa lokal ini membuka peluang untuk pengelolaan sumber daya alam yang efisien tanpa menimbulkan tekanan tambahan pada ekosistem maupun sektor pertanian.

METODE PENELITIAN

1. Metode penelitian

Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan skala laboratorium. Sampel yang diuji meliputi batubara bitumen murni dan campuran 80% batubara – 20% kayu sengan. Parameter yang diukur meliputi:

- Nilai kalor HHV & LHV menggunakan Bomb Calorimeter.
- Komposisi unsur (CHNS) menggunakan alat CHNS Analyzer.
- Laju aliran massa dan kebutuhan udara dihitung berdasarkan data aktual dan analisa termodinamika.

- Efisiensi boiler dihitung dengan metode langsung berdasarkan total energi yang diserap dibandingkan energi input dari bahan bakar.

Peralatan yang digunakan meliputi: ruang pembakaran mini, termokopel, sensor tekanan, dan timbangan analitik. Proses pencampuran bahan bakar dilakukan secara homogen dengan rasio tertentu sebelum dibakar dalam reaktor tertutup.

2. Lokasi dan waktu penelitian

Pengujian berlangsung di Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Mesin Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, Jl. Gajayana No. 50, Dinoyo, Malang, Jawa Timur. Kegiatan penelitian dijadwalkan berlangsung selama dua bulan, dari Oktober hingga November 2024.

3. Variabel penelitian

Penelitian ini mengadopsi tiga tipe variabel sebagai berikut:

a. Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Komposisi bahan bakar yang diujikan, yaitu 100% batubara dengan campuran 80% batubara bitumen dan 20% biomassa serbuk kayu sengan menggunakan metode *co-firing*.

b. Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

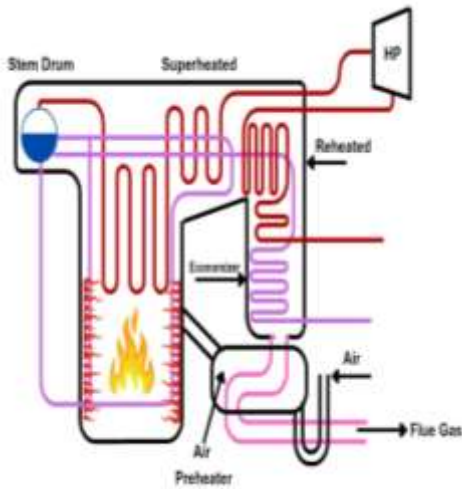
Efisiensi pembakaran boiler yang diukur sebagai respon dari variasi bahan bakar tersebut.

c. Variabel Terkontrol (*Control Variable*)

Parameter operasional seperti suhu boiler tetap dijaga pada 500°C dan tekanan sebesar 205,3 bar, serta

kondisi lain berdasarkan data aktual untuk menjaga konsistensi hasil.

4. Desain Penelitian



Gambar 1 Desain Siklus pada Boiler
Sumber: Dokumen pribadi

5. Alat dan Bahan Penelitian

a. Peralatan:

- 1) Kamar pembakaran berskala laboratorium yang mampu melakukan pembakaran batubara dan biomassa dengan aman dan terkendali.
- 2) Sensor suhu (*thermocouple*) untuk pemantauan suhu secara akurat selama proses pembakaran.
- 3) Timbangan analitik yang digunakan untuk penentuan massa bahan bakar secara presisi.
- 4) Sistem pengambilan data otomatis yang merekam parameter suhu, tekanan, dan variabel relevan lainnya.

b. Bahan Bakar:

- 1) Kayu sengon sebagai biomassa cepat tumbuh yang dipersiapkan dalam bentuk

Efisiensi

$$\text{Boiler}(\%) = \left(\frac{\text{Output Energi (Dalam Uap)}}{\text{Input Energi (Dari Bahan Bakar)}} \right) \times 100\%$$

serbuk kering dengan kadar air kurang dari 10%.

- 2) Batubara bitumen yang memiliki karakteristik meliputi kandungan karbon tinggi, kadar air rendah, volatilitas dan nilai kalor yang cukup untuk dipakai dalam pembangkit listrik.

6. Prosedur Penelitian

a. Persiapan Bahan Bakar

Serbuk kayu sengon dikeringkan secara alami menggunakan sinar matahari agar kadar air berkurang di bawah 10%. Batubara bitumen dihancurkan dan disaring agar ukuran partikelnya serupa dengan biomassa, sehingga homogenitas campuran dapat terjaga.

b. Pencampuran Bahan Bakar

Campuran batubara dan biomassa dengan rasio 80:20 dicampur menggunakan mixer mekanik untuk memastikan penyebaran bahan bakar yang merata sebelum pengujian.

c. Pelaksanaan Eksperimen

Uji coba pembakaran dilakukan dengan volume 1 kg bahan bakar dalam kamar pembakaran laboratorium. Suhu dan tekanan diatur sesuai dengan parameter penelitian, yaitu 500°C dan 205,3

bar. Data suhu pembakaran, tekanan, dan residu abu dikumpulkan untuk evaluasi.

7. Teknik Pengolahan Data

Data hasil pengujian meliputi nilai kalor, massa bahan bakar, massa uap, entalpi, dan parameter pembakaran lain dianalisis untuk menghitung efisiensi boiler menggunakan metode langsung sebagai berikut:

Hasil pengolahan ini akan menggambarkan pengaruh pencampuran biomassa kayu sengon terhadap efisiensi pembakaran pada boiler serta potensi pengurangan emisi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan di Laboratorium Termodinamika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang menggunakan sampel batubara bitumen murni dan campuran bitumen 80% dengan kayu sengon 20%. Analisis laboratorium meliputi pengukuran nilai kalor, analisa unsur CHNS, efisiensi energi, serta parameter penting pembangkit seperti laju aliran massa, temperatur, tekanan, dan transfer panas pada setiap bagian boiler.

1. Analisis Data

a. Nilai Kalor (*High Heating Value* dan *Low Heating Value*)

Berdasarkan hasil pengujian, nilai calor campuran menunjukkan penurunan dibandingkan dengan batubara murni. Penurunan LHV pada campuran bahan bakar biomassa menunjukkan adanya perbedaan karakteristik termal akibat kandungan air dan volatil biomassa. Data dapat disajikan sebagai berikut:

Tabel 1 Hasil Perhitungan HHV dari 2 Bahan Bakar

No.	Bahan Bakar	HHV (kJ/Kg)
1	Batubara Bitumen	28200
2	Bitumen 80% dan Kayu Sengon 20%	27535,75

Tabel 2 Hasil Perhitungan LHV Bahan Bakar

No.	Bahan Bakar	LHV (kJ/Kg)
1	Batubara Bitumen	27102
2	Bitumen 80% dan Kayu Sengon 20%	25337,95

b. Kebutuhan Udara Teoritis dan Udara Aktual

Kebutuhan udara teoritis dan aktual mengalami sedikit perbedaan antara kedua jenis bahan bakar, tercermin dari hasil perhitungan sebagai berikut:

Tabel 3 Hasil Perhitungan Udara Teoritis dan Udara Aktual

No.	Bahan Bakar	A _t	W _{ath}	W _{akt}
1.	Batubara Bitumen	2,35	10.13	12,16
2.	Bitumen 80% + Kayu Sengon 20%	2,34	10.12	12,14

Diketahui bahwa:

W_{ath} udara teoritis Batubara Bitumen (Kg udara)

$\frac{2,35}{0,232} = 10,13$ Kg udara/bahan bakar.

W_{ath} udara teoritis Bitumen 80% dan Kayu Sengon 20% (Kg udara)

$\frac{2,34}{0,232} = 10,12$ Kg udara/bahan bakar.

Agar diperoleh pembakaran yang sempurna maka dibutuhkan udara berlebih. Jadi untuk menentukan besar udara pembakaran yang sebenarnya adalah:

$$(W_a)_{\text{akt Batubara Bitumen}} = 10,13 + (0,2 \times 10,13) = 12,16 \text{ Kg udara/Kg bahan bakar}$$

$$(W_a)_{\text{akt Batubara Bitumen}} = 10,12 + (0,2 \times 10,12) = 12,14 \text{ Kg udara/Kg bahan bakar}$$

c. Laju Aliran Massa Bahan Bakar

Kebutuhan bahan bakar yang diperlukan sebesar 18,1 ton/jam, sehingga dapat dihitung sebagai berikut:

$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}}(W_f) = \frac{18,1 \times 1000}{3600} = 5,027 \text{ Kg/s}$$

Tabel 4 Laju Aliran Massa Bahan Bakar

No.	Bahan Bakar	W_f (Kg/s)
1.	Batubara Bitumen	5,027
2.	Bitumen 80% dan Kayu Sengon 20%	5,027

d. Air Fuel Ratio dan Laju Aliran Massa

Penggunaan campuran kayu sengon menurunkan air fuel ratio dan laju aliran massa uap:

Tabel 5 Laju Aliran dan Air Fuel Ratio pada Pembakaran Bahan Bakar

No.	Bahan Bakar	AFR_{fuel}	W_s (Kg/s)
1.	Batubara Bitumen	9,28	46,68

2.	Bitumen 80% dan Kayu Sengon 20%	8,34	41,93
----	---------------------------------	------	-------

2. Data Perhitungan

- a. Energi Masuk dan Output Panas
Energi yang dihasilkan dari campuran batubara dan kayu sengon juga lebih rendah dibanding batubara murni:

Tabel 6 Perhitungan Kesetimbangan Panas (Q_{in})

No	<i>Co-Firing</i>	Q_{in} (kJ/Jam)
1.	Batubara Bitumen	122634,28
2.	Bitumen 80% dan Kayu Sengon 20%	114654,22

Output panas total pada berbagai titik boiler juga mengalami penurunan.

b. Efisiensi Boiler

Efisiensi total dan efisiensi setelah penambahan air heater ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 7 Hasil Perhitungan Efisiensi Setelah Penambahan Air Heater

No	<i>Co-Firing</i>	Effisiensi Boiler (%)
1.	Batubara Bitumen	97,1
2.	Bitumen 80% dan Kayu Sengon 20%	93,5

Penurunan nilai kalor dan efisiensi yang terjadi setelah penambahan biomassa kayu sengon menandakan karakteristik biomassa memengaruhi performa pembakaran secara signifikan. LHV campuran menjadi lebih kecil karena kandungan air dan volatil biomassa kayu

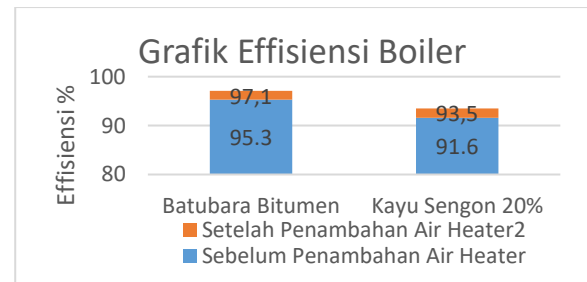
sengon relatif lebih tinggi dibanding batubara bitumen, sehingga energi yang dihasilkan pun menurun.

Kebutuhan udara pada proses pembakaran campuran tidak mengalami perubahan signifikan, namun laju pembentukan uap dan output panas sedikit menurun, mengindikasikan bahwa kapasitas produksi energi campuran biomassa tak setinggi batubara murni pada kondisi pembakaran terkendali.

Dari sisi efisiensi, penggunaan co-firing kayu sengon tetap menghasilkan efisiensi tinggi ($>90\%$), walaupun ada penurunan dibandingkan pembakaran batubara murni. Penurunan efisiensi tersebut masih dalam rentang yang diterima sehingga secara praktis pemanfaatan kayu sengon dapat menjadi pilihan bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan pada unit pembangkit listrik.

Penambahan air heater pada sistem boiler memberikan kontribusi positif dengan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan pada kedua sampel bahan bakar. Meski demikian, campuran dengan biomassa tetap menunjukkan angka efisiensi lebih rendah akibat nilai kalor biomassa yang lebih kecil dan sifat fisik-kimia yang berbeda dari batubara.

Secara keseluruhan, penerapan co-firing kayu sengon pada pembakaran boiler berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap batubara sekaligus menurunkan dampak lingkungan, meskipun dibutuhkan optimasi parameter operasi agar performa termal tidak mengalami penurunan berarti. Penyesuaian komposisi bahan bakar, optimasi proses pengeringan biomassa, serta kontrol ketat pada suhu dan tekanan boiler sangat penting untuk menjaga efisiensi dan keamanan operasi pembangkit.



Gambar 2 Grafik Perbandingan Kalor Sebelum dan Sesudah Penambahan Air Heater

Hasil penelitian ini memperkuat argumentasi bahwa co-firing biomassa dengan batubara, khususnya menggunakan kayu sengon, dapat diaplikasikan secara teknis dalam sistem pembangkit uap dengan menjaga keseimbangan antara efisiensi energi dan tujuan pengurangan emisi lingkungan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pengujian co-firing kayu sengon dengan batubara bitumen pada sistem boiler skala laboratorium, dapat ditarik beberapa simpulan utama:

1. Penambahan Air Heater Efektif Meningkatkan Efisiensi
Penerapan air heater terbukti mampu meningkatkan efisiensi sistem pembakaran, baik saat menggunakan batubara murni maupun campuran batubara dengan biomassa kayu sengon.
2. Efisiensi Tertinggi pada Batubara Murni
Pengukuran menunjukkan bahwa efisiensi boiler tertinggi dicapai pada pembakaran batubara bitumen tanpa campuran, yakni mencapai 97,1% setelah air heater dioperasikan, mengalami kenaikan dari kondisi sebelum penambahan air heater sebesar 95,3%.

3. Efisiensi Co-firing 20% Sengon Tetap Kompetitif

Untuk campuran bahan bakar yang terdiri dari 80% batubara bitumen dan 20% kayu sengon, efisiensi juga meningkat, dari 91,6% menjadi 93,5% setelah dilengkapi air heater. Ini mengindikasikan bahwa implementasi co-firing dengan persentase biomassa sebesar itu masih memberikan kinerja sistem yang baik.

4. Potensi Pengurangan Ketergantungan Batubara

Penggunaan kayu sengon sebagai bahan bakar campuran terbukti dapat mengurangi porsi konsumsi batubara fosil, berkontribusi pada pengembangan energi terbarukan, dan tetap mempertahankan efisiensi pembangkit pada tingkat yang layak secara operasional. Secara keseluruhan, integrasi kayu sengon sebagai biomassa pada co-firing boiler memberikan manfaat lingkungan sekaligus menjamin performa sistem yang kompetitif, sehingga berpotensi menjadi strategi transisi energi yang layak untuk mendukung keberlanjutan sektor pembangkit listrik.

DAFTAR PUSTAKA

Hendri, A. (2017). *Analisis Efisiensi Boiler Pada Industri Energi*.

Sakdillah, A., et al. (2021). *Air-Fuel Ratio dalam Sistem Pembakaran*.

Cengel, Y.A. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach*.

Fin Harini (2019). *Karakteristik Kayu Sengon Sebagai Bahan Bakar Biomassa*.

Muin, S. (1998). *Boiler dan Sistem Uap*.

