

ANALISIS TERMODINAMIKA SISTEM PLTU ANGGREK KAPASITAS 2X25 MW MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR *CO-FIRING* BIOMASSA

Lilis Karim¹⁾, Romi Djafar²⁾, Rian Kadir³⁾, Yunita Djamilu⁴⁾, Moh. Riyandi Badu⁵⁾

^{1,3,5} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Nahdlatul Ulama Gorontalo

^{2,4} Program Vokasi, Universitas Negeri Gorontalo

Email: Liliskarim2001@gmail.com¹⁾

Asal Negara: Indonesia

ABSTRAK

PLTU memegang peranan penting dalam sistem ketenagalistrikan nasional karena mampu menghasilkan listrik dalam skala besar. PLTU Anggrek kapasitas 2x25 MW di Kabupaten Gorontalo Utara merupakan salah satu pembangkit yang telah menerapkan teknologi *co-firing* biomassa lamtoro. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja termodinamika PLTU Anggrek kapasitas 2x25 MW pada dua kondisi, yaitu *existing* (100% batubara) dan *co-firing* (85% batubara + 15% biomassa lamtoro). Metode yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan analisis hukum termodinamika dengan dukungan simulasi *cycle tempo* untuk mengevaluasi efisiensi *boiler* dan siklus pembangkit. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi *boiler* pada kondisi *co-firing* sebesar 82,45% (*direct method*) dan 87,04% (*heat duty method*). Efisiensi siklus pembangkit turun dari 23,336% (*existing*) menjadi 21,652% (*co-firing*) akibat nilai kalor biomassa yang lebih rendah. Dengan demikian, maka dapat disimpulkan bahwa meskipun terjadi penurunan efisiensi, penerapan *co-firing* biomassa lamtoro tetap layak diterapkan sebagai bahan bakar alternatif di PLTU karena mampu menjaga stabilitas operasi dan berpotensi menurunkan emisi karbon.

Kata kunci: PLTU; Termodinamika; *Co-firing*; Biomassa Lamtoro; Efisiensi Siklus

ABSTRACT

Coal-fired power plants (PLTUs) play a crucial role in the national electricity system due to their ability to generate electricity on a large scale. The 2x25 MW Anggrek Steam Power Plant in North Gorontalo Regency is one of the power plants that has implemented Lamtoro biomass cofiring technology. This study aims to analyze the thermodynamic performance of the 2x25 MW Anggrek Steam Power Plant (PLTUs) under two conditions: *existing* (100% coal) and *cofiring* (85% coal + 15% lamtoro biomass). The method employed in this study utilizes thermodynamic law analysis, supplemented by *cycle tempo* simulations, to evaluate boiler and power cycle efficiency. The results show boiler efficiency under *cofiring* conditions of 82.45% (*direct method*) and 87.04% (*heat duty method*). The power cycle efficiency decreased from 23.336% (*existing*) to 21.652% (*cofiring*) due to the lower heating value of the biomass. Therefore, despite the decrease in efficiency, *cofiring* lamtoro biomass remains a feasible alternative fuel in PLTUs because it can maintain operational stability and has the potential to reduce carbon emissions.

Keywords: Steam Power Plant; Thermodynamics; Cofiring; Leucaena Biomass; Power Cycle Efficiency

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk dan aktivitas industri di Indonesia terus meningkat setiap tahun sehingga menyebabkan permintaan energi listrik juga semakin tinggi. Data dari kementerian dan sumber daya mineral (KESDM, 2023) menunjukkan konsumsi listrik nasional tumbuh sebesar 5,4%/tahun dalam satu dekade terakhir

PLTU memegang peranan penting dalam sistem ketenagalistrikan nasional karena mampu menghasilkan listrik dalam skala besar dan beroperasi secara handal. Namun penggunaan batubara menimbulkan dampak negatif, khususnya terhadap lingkungan. Proses pembakaran batubara ini menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah besar yang menjadi salah satu tantangan

utama dalam penggunaan batubara sebagai sumber energi. (1)

Menurut Alberto Manurung (2) *co-firing* memungkinkan pengurangan emisi CO₂ karena biomassa dianggap sebagai bahan bakar netral. Selain itu, kandungan volatil yang lebih tinggi dihasilkan dari pencampuran batubara dan biomassa yang homogen, dapat memungkinkan pembakaran yang lebih mudah dan lebih efektif. (3) Hal ini membuka peluang untuk transisi energi yang lebih ramah lingkungan tanpa harus membangun pembangkit baru. (4)

PLTU Anggrek kapasitas 2x25 MW di Kabupaten Gorontalo Utara merupakan salah satu pembangkit yang telah menerapkan teknologi *co-*

firing. PLTU Anggrek telah menggantikan 5% batubara dengan biomassa jenis kayu lamtoro.(5)

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis termodinamika sistem PLTU Anggrek 2x25 berbahan bakar *co-firing* untuk mengevaluasi kinerja pembangkit, khususnya efisiensi *Boiler* dan sistem secara keseluruhan Dengan menggunakan hukum termodinamika dan dukungan data simulasi cycle tempo.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di PLTU Anggrek 2x25 MW yang berlokasi di kabupaten Gorontalo Utara. Fokus penelitian adalah menganalisis kinerja termodinamika sistem pembangkit pada dua kondisi operasi, yaitu *existing* (100% batubara) dan *co-firing* (85% batubara + 15% biomassa lamtoro)

2.1. Pengumpulan data

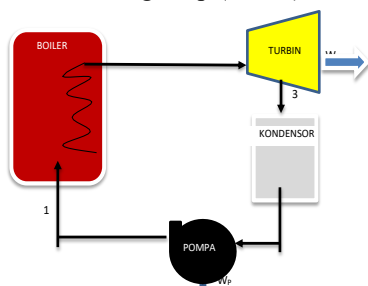
Data diperoleh dari hasil operasional PLTU Anggrek dan studi literatur terkait. Data yang dikumpulkan mencakup karakteristik bahan bakar (batubara dan biomassa lamtoro), termasuk nilai kalor, komposisi unsur, dan kandungan abu.

Tabel 2. 1 komposisi rasio 85% coal dan 15% *co-firing* biomassa lamtoro

Parameter	Unit (Wt)	Coal Existing	Biomassa (Lamtoro)	Co-firing 85% dan 15 %
C	%	71.25	54.48	68.73
H	%	5.28	5.29	5.28
O	%	22.22	39.65	24.84
N	%	1.07	0.52	0.99
S	%	0.18	0.06	0.16
Total	%	100	100	100

2.2 Analisis termodinamika

Siklus *rankine* adalah prinsip dasar dalam termodinamika yang menjadi landasan kerja pembangkit listrik tenaga uap (PLTU).



Gambar 2. 1 Alur siklus *rankine*

Analisis dilakukan menggunakan hukum termodinamika I (konversi energi) dan hukum termodinamika II (Efisiensi dan *entropi*). Perhitungan mencakup efisiensi siklus pembangkit yang dihitung dengan membandingkan energi panas

masuk ke *boiler* dengan daya bersih yang dihasilkan generator, efisiensi *boiler* menggunakan dua pendekatan yaitu *direct method* (perbandingan energi input bahan bakar dan *output* uap), dan *heat duty method* (berdasarkan energi panas yang diserap fluida kerja pada *heat exchanger multiphase streams*).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 analisis termodinamika sistem PLTU Anggrek kapasitas 2x25 MW

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Cycle tempo* untuk memodelkan sistem PLTU Anggrek dengan dua skenario yaitu: sistem *existing* (menggunakan 100% batu bara) dan sistem *co-firing* (menggunakan 85% batu bara dan 15% biomassa kayu lamtoro). Dua skenario tersebut dilakukan untuk melihat bagaimana dampak *co-firing* terhadap kinerja PLTU. Parameter data yang dihasilkan dari pemodelan digunakan sebagai data input dalam proses analisis termodinamika.

3.1.1 Analisis termodinamika sistem existing

Analisis termodinamika pada sistem pembangkit dalam kondisi *existing* dilakukan untuk mengetahui efisiensi konversi energi dari bahan bakar batubara menjadi energi listrik.

Tabel 3. 1 Data parameter pada subsistem PLTU Anggrek 2x25 Mw pada kondisi existing

No	Komponen	Titik aliran	Tekanan (bar)	Suhu (°c)	Enthalpi (kj/kg)	Massa alir (kg/s)
1	Combustor	10	1.025	470.00	375.51	45.000
3	Superheater	2	49.00	262.68	1148.20	110.624
4	High superheater	14	49.00	262.68	2795.04	110.560
5	Masuk steam drum	13	49.00	225.00	967.39	110.560
6	Air preheater	5	49.00	4006.04	4855.82	45.005
11	Steam drum	14	49.00	315.00	2974.79	110.624
12	Valve	15	49.00	470.00	3365.53	110.560
13	Hp turbine (masuk)	17	49.00	470.00	3365.53	110.560
14	Masuk Daerator	26	2.259	124.10	536.38	16.453
17	Keluar daerator	33	2.259	124.10	521.23	110.560
15	Masuk HP1	28	5.000	187.00	2827.80	110.560
28	Keluar HP2	27	5.000	126.10	529.93	110.560
18	Masuk Condensor	16	0.08700	43.11	2634.36	14.204
25	Keluar kondensor	24	0.08700	43.11	2634.36	14.204
21	CWP (pompa)	24	0.08700	43.11	180.54	16.453
22	CCWP	22	1.000	30.00	125.83	1000.000
27	Keluar LP1	40	5.889	98.10	411.46	16.453
26	Keluar LP2	39	5.889	69.00	289.29	16.453
16	Keluar LP3	25	5.889	43.17	181.32	16.453
8	Stack	6	1.033	119.97	4.47	45.005

Tabel 3.1 menjadi dasar dalam melakukan perhitungan efisiensi termal, panas yang diserap *Boiler*, daya yang dihasilkan turbin, energi yang dibuang ke kondensor, dan daya pompa. Dengan mengetahui parameter-parameter ini, maka analisis termodinamika PLTU dalam kondisi operasi normal (tanpa *co-firing*) dapat dilakukan secara menyeluru dan menjadi perbandingan utama saat dianalisis dengan kondisi *co-firing*.

Menghitung energi pompa

$$W_{pompa1} = \dot{m} \times (h_{keluar} - h_{masuk})$$

$$W_{pompa1} = 16.453 \times (181.32 - 180.54) = 12.84$$

menghitung panas yang diserap *Boiler*

$$Q_{Boiler} = \dot{m} \times (h_{keluar Boiler} - h_{masuk Boiler})$$

$$Q_{Boiler} = 110.560 \times (3365.53 - 967.39) = 265.138,36 \text{ Kw}$$

menghitung daya turbin

$$W_{turbin} = \dot{m} \times (h_{masuk turbin} - h_{keluar turbin})$$

$$W_{turbin} = 110.560 \times (3365.53 - 2634.36) = 80.838,16 \text{ kW}$$

menghitung energi yang dibuang kondensor

$$Q_{kondensor} = \dot{m} \times (h_{masuk} - h_{keluar})$$

$$Q_{kondensor} = 16.453 \times (529.93 - 180.54) = 5.748,51 \text{ Kw}$$

Efisiensi siklus pembangkit

$$nth = \frac{\Delta W_{net}}{Q_{in}}$$

$$nth = \frac{80.825,32}{346.348} = 0,23336$$

$$nth = 23,336\%$$

3.1.2 Analisis termodinamika sistem *co-firing*

Analisis termodinamika pada sistem *co-firing* dilakukan untuk mengevaluasi kinerja pembangkit saat sebagian bahan bakar digantikan oleh biomassa lamtoro.

Tabel 3. 2 Data parameter pada subsistem PLTU Anggrek 2x25 Mw pada kondisi *co-firing*

No	Komponen	Titik alir	Tekanan (bar)	Suhu (°c)	Enthalpi (kj/kg)	Massa alir (kg/s)
1	Combustor	10	1.025	3970.48	4810.82	45.000
3	Superheater	2	49.00	262.68	1148.20	110.624
4	High superheater	14	45.00	257.44	2795.04	110.560
5	Economizer	13	49.00	225.00	967.39	110.560
6	Air preheater	5	49.00	3436.94	3083.82	50.166
11	Steam drum	14	49.00	315.00	2974.79	110.624
12	Valve	15	45.00	465.00	3359.04	110.560
13	Masuk turbine	17	45.00	465.00	3359.04	110.560
14	Masuk Daerator	26	2.259	124.10	536.38	16.579
33	Keluar daerator	33	2.259	124.10	521.23	110.560
15	Masuk HP1	28	5.000	187.00	2827.80	110.560
28	Keluar HP2	27	5.000	126.10	529.93	110.560
18	Masuk Condensor	16	0.08700	43.11	2634.36	14.315
24	Keluar kondensor	24	0.08700	43.11	180.54	16.579
21	CWP (pompa)	24	0.08700	43.11	180.54	16.579
22	CCWP	22	1.000	30.00	125.83	1000.000
27	Keluar LP1	40	5.889	98.10	411.46	16.579
26	Keluar LP2	39	5.889	69.00	289.29	16.579
16	Keluar LP3	25	5.889	43.17	181.32	16.579
8	Stack	6	1.033	144.27	-	50.166
					1288.49	

Tabel 3.2 menampilkan parameter operasional utama komponen PLTU Anggrek 2x25 MW saat menggunakan sistem *co-firing*, yaitu kombinasi batubara dan biomassa lamtoro sebagai bahan bakar. Data ini digunakan untuk mengevaluasi bagaimana performa sistem berubah dibandingkan dengan kondisi *existing* (tanpa *co-firing*).

menghitung Energi pompa

$$W_{pompa1} = \dot{m} \times (h_{keluar} - h_{masuk})$$

$$W_{pompa1} = 16.579 \times (181.32 - 180.54) = 12,93 \text{ KW}$$

menghitung panas yang diserap *Boiler*

$$Q_{Boiler} = \dot{m} \times (h_{keluar Boiler} - h_{masuk Boiler})$$

$$Q_{Boiler} = 110.560 \times (3359.04 - 967.39) = 264.420,82 \text{ Kw}$$

menghitung daya turbin

$$W_{turbin} = \dot{m} \times (h_{masuk turbin} - h_{keluar turbin})$$

$$W_{turbin} = 110.560 \times (3359.04 - 2634.36) = 80.120,620 \text{ kW}$$

menghitung energi yang dibuang kondensor

$$Q_{kondensor} = \dot{m} \times (h_{masuk} - h_{keluar})$$

$$Q_{kondensor} = 16.579 \times (529.93 - 180.54) = 5.792,54 \text{ Kw}$$

Efisiensi siklus pembangkit

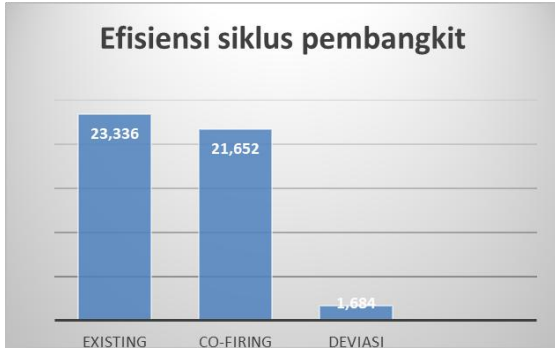
$$nth = \frac{\Delta W_{net}}{Q_{in}}$$

$$nth = \frac{80.107,69}{369.969} = 0,21652$$

$$nth = 21,652\%$$

3.3 Perbandingan efisiensi siklus pembangkit kondisi *existing* dan *co-firing*

Diagram dibawah menunjukkan perbandingan kinerja komponen utama PLTU Anggrek 2x25 MW pada kondisi *existing* dan skenario *co-firing* dengan biomassa lamtoro.



Gambar 3. 1 Diagram perbandingan efisiensi

Berdasarkan diagram diatas, dapat dilihat bahwa efisiensi siklus pembangkit pada kondisi *existing* memiliki nilai sebesar 23,336. Sedangkan pada kondisi *co-firing* dengan biomassa lamtoro nilai efisiensi siklus menurun menjadi 21,652. Hal ini menunjukkan adanya penurunan efisiensi sebesar 1,684 setelah penerapan *co-firing*. Performa sistem pembangkit mengalami penurunan karena nilai kalor biomassa lebih rendah dibanding batubara, sehingga mengurangi efisiensi konversi energi secara keseluruhan. Meskipun demikian, sistem tetap mampu beroperasi stabil dengan efisiensi yang masih dalam batas wajar untuk pembangkit berbasis *co-firing* biomassa. Diagram ini menggambarkan pengaruh nyata penggunaan bahan bakar campuran terhadap kinerja termal pembangkit.

3.4 Evaluasi kinerja boiler menggunakan metode *direct method*

Evaluasi kinerja boiler PLTU Anggrek 2x25 MW dalam skenario *co-firing* dilakukan menggunakan *direct method*. Metode ini menghitung efisiensi termal Boiler berdasarkan perbandingan antara panas yang digunakan untuk menghasilkan uap dengan total energi yang tersedia dari bahan bakar.

$$Boiler\ efficiency = \frac{heat\ output}{heat\ input}$$

$$\eta_{Boiler} = \frac{m_{uap} \times (h_{uap} - h_{air\ masuk})}{m_{bahan\ bakar} \times HHV} \times 100\%$$

$$Q_{output} = 110.560 \times (3359,04 - 967.39) = 264.420,82\ Kw$$

$$Q_{input} = 12.5 \times 25.657,12 = 320.714\ kW$$

$$\eta_{Boiler} = \frac{264.420,82}{320.714} \times 100 = 0.82447\ \text{atau}\ 82.45\%$$

Efisiensi boiler menggunakan perhitungan metode langsung pada kondisi *co-firing* 85% batu bara dan 15% lamtoro adalah 82.45%

3.5 Evaluasi kinerja boiler menggunakan heat duty pada heat exchanger multiphase streams

$$Q_{out} = Q_{Superheater} + Q_{Highsuperheater} + Q_{Economizer}$$

$$Q_{in(fuel)} = m_{fuel} \times HHV + Q_{air\ preheater}$$

$$Q_{out} = 202064.90 + 62355.93 + 205685.42$$

$$Q_{input} = 12.5 \times 25.657,12 + 219343,73$$

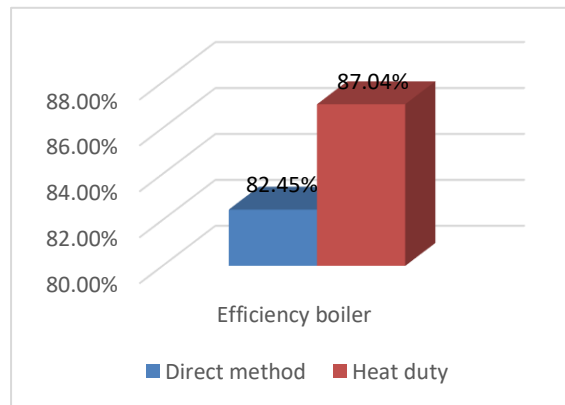
$$Q_{input} = 320.714 + 219343,73$$

$$Q_{input} = 540.057,73\ kw$$

$$\eta_{Boiler} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{470.106,25}{540.057,73} \times 100\% = 0.87047\ \text{atau}\ 87,04\%$$

3.6 perbandingan efisiensi boiler heat duty dengan *direct method*

Kedua metode ini menghitung efisiensi energi termal Boiler, namun berdsarkan pendekatan yang berbeda. Diagram batang Berikut ini memperlihatkan perbandingan efisiensi Boiler PLTU Anggrek berdasarkan dua pendekatan perhitungan.



Gambar 3. 2 perbandingan efisiensi boiler heat duty dengan *direct method*

Gambar 3. 2 menunjukkan perbandingan hasil efisiensi Boiler PLTU Anggrek 2x25 mw menggunakan dua metode perhitungan yang berbeda, yaitu *direct method* dan *heat duty method*. Pada *direct method*, efisiensi Boiler dihitung berdasarkan rasio antara energi yang terkandung dalam bahan bakar. Sedangkan pada metode *heat duty*, efisiensi dihitung dari total energi panas yang diserap oleh fluida kerja dibandingkan total energi input dari bahan bakar, termasuk kontribusi dari preheater dan komponen pendukung lainnya. Dari gambar terlihat bahwa efisiensi yang dihitung menggunakan *heat duty method* lebih tinggi (87,04%) dibandingkan dengan *direct method* (82,45%) Perbedaan ini menunjukkan bahwa *heat duty method* mampu memberikan

gambaran yang lebih menyeluru terhadap performa termal *Boiler*, khususnya pada sistem dengan aliran multiphase seperti *co-firing*.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis termodinamika dan evaluasi performa PLTU Anggrek kapasitas 2x25 MW menggunakan sistem bahan bakar *co-firing* antara batubara dan biomassa lamtoro, maka dapat disimpulkan bahwa

1. Efisiensi pembangkit pada kondisi *existing* (100% batubara) berdasarkan simulasi *cycle tempo* diperoleh sebesar 22,233%. Sedangkan hasil perhitungan termodinamika menghasilkan efisiensi sebesar 23,336%. Nilai ini menunjukkan validasi antara hasil simulasi dan pendekatan manual.
2. Analisis termodinamika menunjukkan bahwa efisiensi siklus pembangkit mengalami penurunan dari 23,336% pada kondisi *existing* (100% batubara) menjadi 21,652% pada kondisi *co-firing* (85% batubara dan 15% biomassa lamtoro). Penurunan ini terjadi akibat lebih rendahnya nilai kalor biomassa lamtoro dibandingkan batubara, yang berdampak pada berkurangnya energi input bersih ke sistem.
3. Kinerja *boiler* pada kondisi *co-firing* masih menunjukkan performa yang baik. Berdasarkan perhitungan menggunakan *direct method*, efisiensi *Boiler* mencapai 82,45%. Sementara dengan *heat duty method*, efisiensinya meningkat menjadi 87,04%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa metode perhitungan memengaruhi hasil evaluasi kinerja termal *Boiler*.

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Optimalisasi rasio campuran perlu dikaji lebih lanjut untuk menemukan proporsi biomassa yang ideal, sehingga dapat meminimalkan penurunan efisiensi sistem sekaligus memaksimalkan manfaat lingkungan.
2. Penambahan analisis exergy dan kajian lebih lanjut mengenai kerugian energi pada tiap komponen pembangkit untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif terhadap performa sistem dalam kondisi *co-firing*.
3. Penggunaan jenis biomassa lain dengan nilai kalor lebih tinggi dapat dipertimbangkan sebagai bahan perbandingan agar diketahui pengaruhnya terhadap efisiensi sistem dan performa termodinamika PLTU.

DAFTAR PUSTAKA

1. Gusti Rianta ST. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) _ Indonesia Re. 2020;
2. Alberto Manurung T. Studi Numerik Co-firing Batubara Dan Biomassa Dengan Variasi Persentase Biomassa Terhadap Performa Pembangkit 400 Mw. 2020.
3. Sidiq AN. Pengaruh Co-Firing Biomassa terhadap Efisiensi Boiler PLTU Batubara. KILAT. 4 April 2022;11(1):21–31.
4. Sianipar RJ, Januar RR, Silalahi SDC. Analisis Pemetaan Potensi dan Realisasi Energi Baru Terbarukan (EBT) dengan Pemodelan Determinan Konsumsi dan Metode Grouping Analysis EBT di Indonesia. Jurnal Energi Baru dan Terbarukan. 31 Juli 2024;5(2):30–49.
5. Yuniahastuti IT, Adi Kusuma Y. Skenario Perbaikan Keandalan Pembangkit Dengan Peramalan Beban Pada PLTU Anggrek Gorontalo. Go-Integratif: Jurnal Teknik Sistem dan Industri. 30 November 2023;4(02):88–98.