

ANALISIS PENGARUH PARAMETER OPERASI TERHADAP KINERJA SISTEM ENERGI TERMAL PADA PLTU TANJUNG ENIM 3X10 MW

Septiani Wulandari¹⁾, Riman Sipahutar²⁾, dan Irwin Bizzy³⁾

^{1,2,3} Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya

^{1,2,3} Jalan Srijaya Negara, Palembang, 30139

E-mail : septianiwulandari80@gmail.com¹⁾, rimansipahutar@ft.unsri.ac.id²⁾, irwin@unsri.ac.id³⁾

ABSTRAK

Sektor pembangkit listrik di Indonesia didominasi oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar fosil batubara. Berdasarkan faktor tersebut pembangkit harus dilakukan peninjauan kembali melalui analisis kinerja sistem termal. Melalui analisis kinerja sistem energi termal pada pembangkit dapat diidentifikasi peluang untuk melakukan penggunaan dan penghematan energi yang lebih efisien. Hasil penelitian didapatkan bahwa nilai kalori batubara sebesar 4531 kCal/kg, 5986 kCal/kg dan 5707 kCal/kg dengan rata-rata efisiensi Boiler metode *direct* 90,8%, 81,7%, 84,1% dan metode *indirect* 62,3%, 71,0%, 69,7%. Efisiensi termal Turbin didapatkan hasil rata-rata 32,5% dan laju perpindahan panas secara keseluruhan pada Condenser yaitu 194,8 kW. Perhitungan analisis *exergi* pada setiap peralatan pembangkit meliputi *Boiler*, Turbin dan *Condenser*. Rata-rata perhitungan *exergi* pada *Boiler* 39,7%, Turbin Uap 87,2%, dan *Condenser* 54,6%. Perhitungan kinerja pembangkit yang meliputi efisiensi siklus termal, *plant heat rate*, rasio kerja dan spesifik *fuel consumption*. Rata-rata perhitungan efisiensi siklus termal 28,34%, *plant heat rate* 5105 kCal/kWh, rasio kerja 0,9992 dan spesifik *fuel consumption* 0,85. Rekomendasi penelitian ini diharapkan dapat mengoperasikan pembangkit sesuai dengan standar tata kelola operasi pembangkit. Mulai dari penggunaan nilai kalori batubara harus berada pada batasan *Manual Book Boiler* yaitu $4500 \leq GHV \leq 5000$ kCal/kg dan parameter kondisi operasi harus dijaga pada setiap peralatan pembangkit sesuai *Manual Book Operasi Pembangkit*.

Kata Kunci: Analisis Energi dan Exergi, Kinerja Pembangkit, Nilai Kalori, Parameter Operasi, PLTU

1. PENDAHULUAN

Sektor pembangkit listrik di Indonesia didominasi oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar fosil Batubara. Penambahan kapasitas pembangkit selama 10 tahun mendatang (periode tahun 2018-2027) di Indonesia adalah 56 GW atau penambahan kapasitas rata-rata mencapai 5,6 GW per tahun. PLTU batubara akan mendominasi jenis pembangkit yang akan dibangun di Indonesia yaitu mencapai 26,8 GW atau 47,8% terdiri dari PLTU Mulut Tambang sebesar 6 GW dan PLTU Non-Mulut Tambang 20,8 MW. Penambahan kapasitas pembangkit tahun 2018-2027 dari sistem interkoneksi Sumatera 14,6 GW dan luar sistem interkoneksi Sumatera 1,3 GW. PLTU batubara akan mendominasi jenis pembangkit termal yang akan dibangun yaitu sebesar 7,3 GW atau 45,9% (PT PLN Persero, 2018).

Pembangkit Listrik Tenaga Uap merupakan salah satu jenis teknologi konversi energi dari bahan bakar fosil menjadi energi termal di dalam ruang bakar dengan memanfaatkan energi termal uap yang dikonversikan menjadi energi mekanik di Turbin uap dan dari energi mekanik dikonversikan menjadi energi listrik di generator. Peralatan utama dari PLTU berbahan bakar batubara adalah *Boiler*, Turbin Uap, Generator dan Kondensor.

Evaluasi pada pembangkit listrik tenaga uap telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti. Studi penelitian tentang "*Performance Analysis of Boiler in Thermal Power Plant*" yang dilakukan oleh (Papireddy, 2018) menyimpulkan bahwa upaya untuk menganalisis kinerja dalam meningkatkan performansi kinerja sistem pembangkit salah satunya dengan menjaga udara yang masuk pada ruang pembakaran, pengendalian tekanan pada *steam*, serta tekanan pada *vacuum condenser* harus diturunkan.

Berdasarkan rekapitulasi pemakaian bahan bakar batubara terdapat kenaikan nilai kalori batubara pada tahun 2022 bahwa nilai tersebut berada pada batasan spesifikasi nilai kalori batubara yakni, nilai kalori batubara aktual (4943 kCal/kg) > nilai kalori batubara spesifikasi (4888 kCal/kg). Oleh karena itu, pembangkit harus dilakukan peninjauan kembali melalui analisis kinerja sistem termal.

Melalui analisis kinerja sistem energi termal pada pembangkit dapat diidentifikasi peluang untuk melakukan penggunaan dan penghematan energi yang lebih efisien. Upaya dalam menganalisis kinerja sistem diperlukannya data parameter operasi pembangkit dan parameter analisa kandungan bahan bakar batubara serta abu pembakaran.

Pada penelitian lain yang berjudul “*Performance Analysis and Efficiency Improvement of Boiler a Review*” bertujuan untuk menghitung efisiensi termal Boiler dengan menggunakan dua metode perhitungan yaitu metode *direct* dan *indirect*. Penelitian ini merupakan hasil nilai kalori batubara yang menjadi parameter penting untuk menentukan efisiensi dalam Boiler. Jika laju panas meningkat maka efisiensi Boiler akan menurun sehingga untuk kinerja Boiler yang maksimal perlu mengatur laju panas yang diinginkan.

Penelitian ini menggunakan metode *direct* dan *indirect* untuk menganalisis efisiensi termal Boiler. Selain itu, menganalisis pengaruh parameter operasi terhadap kinerja sistem energi termal di PLTU TE 3×10 MW.

2. RUANG LINGKUP

Dalam penelitian ini permasalahan mencakup:

1. Cakupan permasalahan.
Cakupan permasalahan yang menjadi acuan dalam penelitian adalah nilai kalori batubara aktual > nilai kalori spesifikasi sehingga diperlukan analisis kinerja sistem energi termal dan seiring bertambahnya waktu operasi dapat menyebabkan penurunan performansi pada pembangkit.
2. Batasan-batasan penelitian.
Batasan-batasan masalah dalam penelitian ini adalah melakukan pengujian laboratorium, seperti uji nilai kalori batubara, uji analisis kandungan ultimate dan *proximate* batubara, uji kandungan gas emisi, uji kandungan abu pembakaran dan mencatat hasil record kondisi operasi pada ruang *distributed control system* (DCS).
3. Rencana hasil yang didapatkan.
Rencana hasil dari penelitian ini yaitu menganalisis efisiensi termal Boiler menggunakan metode *direct* dan *indirect* serta mengevaluasi kinerja sistem energi termal pada pembangkitan PLTU TE 3×10 MW.

3. BAHAN DAN METODE

Metode penelitian pada sistem pembangkit listrik tenaga uap di PLTU TE 3×10 MW sebagai berikut :

3.1 Variabel Penelitian

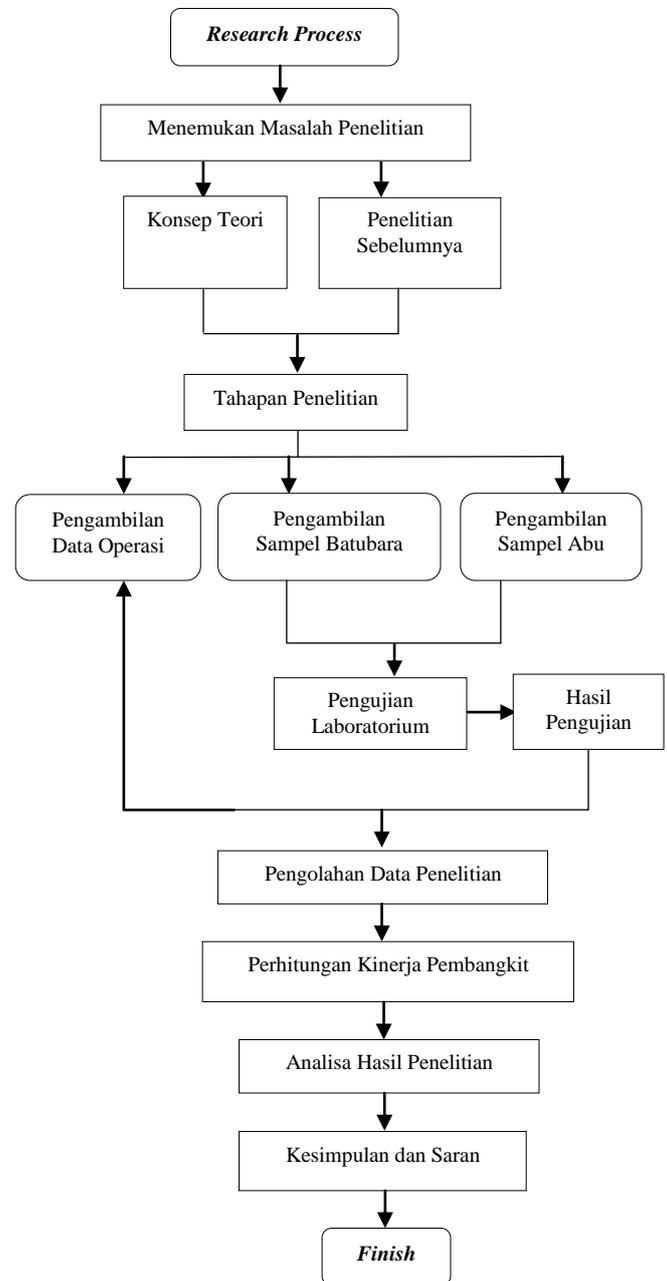
Variabel yang terdapat pada penelitian meliputi data pengamatan Boiler, Turbin Uap dan Condenser.

3.2 Prosedur Pengambilan Data

Pada penelitian ini memiliki proses yang dilakukan secara terstruktur dan sistematis. Adapun prosedur pengambilan data operasi pembangkit meliputi Pengambilan data operasi pembangkit dilakukan pada komputer *distributed control system* (DCS) Parameter data diambil meliputi data kondisi operasi tekanan (MPa), temperatur (°C) dan laju alir massa (T/hr). Pengambilan sampel batubara diambil pada *Coal Feeder* yang beroperasi. Pengambilan sampel abu pembakaran. Pengujian laboratorium dilakukan untuk sampel batubara

dan sampel abu pembakaran. Pengujian sampel batubara meliputi analisis proximate dan ultimate serta analisis nilai kalori batubara serta pengujian sampel kandungan abu pembakaran.

Proses penelitian dapat diamati pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3.3 Persamaan Perhitungan

Persamaan perhitungan untuk menghitung kinerja sistem energi termal pembangkit di PLTU TE 3×10 MW menggunakan metode perhitungan analisis energi dan *exergi*. Tahapan perhitungan kinerja sistem energi termal sebagai berikut:

3.3.1 Persamaan Analisis Energi

Adapun tahapan proses perhitungan menggunakan persamaan analisis energi sebagai berikut:

Persamaan untuk perhitungan efisiensi Boiler dengan metode *direct* dapat dilihat pada persamaan (1) (ASME PTC 4, 2013).

$$\eta_{\text{thermal boiler}} = \left(\frac{\text{Energi Output}}{\text{Energi Input}} \right) \quad (1)$$

Persamaan untuk perhitungan efisiensi Boiler dengan metode *indirect* dapat dilihat pada persamaan (2) (Hougen A, 1943).

$$\eta_{\text{thermal boiler}} = \left(\frac{\text{effectively utilized energy}}{\text{energy input}} \right) \quad (2)$$

Perhitungan efisiensi termal Turbin uap dapat dilihat pada persamaan (3) (Gani dkk, 2022).

$$\eta_{\text{termal turbin}} = \left(\frac{3600}{\text{Heat Rate Turbine}} \right) \quad (3)$$

Perhitungan termal Condenser (*heat transfer rate*) dapat dilihat pada persamaan (4) (Cengel Y, 2007).

$$\dot{Q}_{\text{condenser}} = UA_s \Delta T_{\text{lmF}} \quad (4)$$

Perhitungan efisiensi siklus termal pembangkit dapat dilihat pada persamaan (5) (Moran, 2014).

$$\eta_{\text{thermal rankine cycle}} = \left(\frac{W_{\text{ttotal}} - W_{\text{ptotal}}}{Q_{\text{in}}} \right) \quad (5)$$

Perhitungan kinerja *plant heat rate* pembangkit dapat dilihat pada persamaan (6) (Hasanudin dkk, 2020)

$$\text{Plant Heat Rate} = \frac{\dot{m}_{\text{batubara}} \times \text{HHV}_{\text{batubara}}}{P_{\text{g}} - P_{\text{aux}}} \quad (6)$$

Perhitungan rasio kerja sistem pembangkit tenaga uap dapat dilihat pada persamaan (7) (Nag, 2002)

$$\text{Rasio Kerja} = \frac{W_{\text{net}}}{W_{\text{T}}} = \frac{W_{\text{T}} - W_{\text{p}}}{W_{\text{T}}} \quad (7)$$

Perhitungan *Spesifik Fuel Consumption* (SFC) dapat dilihat pada persamaan (8) (Tahdid dkk, 2022)

$$\text{SFC} = \frac{\text{mbahan bakar (kg)}}{P_{\text{generator}} \text{ (kWh)}} \quad (8)$$

3.3.2 Persamaan Analisis Exergi

Adapun tahapan proses perhitungan menggunakan persamaan analisis exergi sebagai berikut :

Persamaan perhitungan *absolute entropy* batubara dapat dilihat pada persamaan (9) (Bejan A, 1996).

$$s_{DAF} = c \left[\begin{aligned} & 37,1653 - 31,4767 \exp\left(-0,564682 \frac{h}{c+n}\right) \\ & + 20,1145 \frac{o}{c+n} + 54,3111 \frac{n}{c+n} + 44,6712 \frac{s}{c+n} \end{aligned} \right] \quad (9)$$

Perhitungan *exergi* kimia batubara dengan basis *dry ash free* dapat dilihat pada persamaan (10) (Bejan A, 1996).

$$e_{DAF}^{ch} = [(HHV)_{DAF} - T_0 [s_{DAF} + vSO_2SO_2 - vCO_2CO_2 - vH_2OH_2O - vN_2N_2] + [vCO_2e_{CO_2}^{ch} + vH_2Oe_{H_2O}^{ch} + vN_2e_{N_2}^{ch} + vO_2e_{O_2}^{ch}]] \quad (10)$$

Perhitungan *exergi* kimia batubara basis *as received* dapat dilihat pada persamaan (11) (Bejan A, 1996).

$$e_{Ar}^{ch} = \left[0,7918 e_{DAF}^{ch} + \frac{\text{Mass Fraction } H_2O}{BM_{H_2O}} \times e_{H_2O}^{ch}(l) \right] \times m_{\text{batubara}} \quad (11)$$

Perhitungan efisiensi *exergi* Boiler dapat dilihat pada persamaan (12) (Moran, 2014).

$$\eta_{\text{exergy boiler}} = \left(1 - \frac{\text{exergy destruction}}{\text{energy input}} \right) \quad (12)$$

Efisiensi *Exergi* Turbin

Perhitungan efisiensi *exergi* Turbin dapat dilihat pada persamaan (13) (Moran, 2014).

$$\eta_{\text{exergy turbin}} = \left(\frac{W_{\text{cv}}}{e_{\text{finput}} - e_{\text{foutput}}} \right) \quad (13)$$

Efisiensi *Exergi* Condenser

Perhitungan efisiensi *exergi* Condenser dapat dilihat pada persamaan (14) (Moran, 2014).

$$\eta_{\text{exergy condenser}} = \left(\frac{e_{\text{f3}} - e_{\text{f2}}}{e_{\text{f1}} - e_{\text{f4}}} \right) \quad (14)$$

4. PEMBAHASAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada tanggal 16 Maret sampai 16 April 2023 dimulai dari pengambilan sampel, pengujian laboratorium sampel bahan bakar batubara, abu hasil pembakaran dan gas emisi serta pengambilan data kondisi operasi pembangkit dapat dianalisis sebagai berikut :

4.1 Data Hasil Pengujian Batubara

Hasil pengujian bahan bakar batubara untuk analisa ultimate dan proximate serta nilai kalori dilakukan pada tanggal 16 Maret sampai 16 April 2023 didapatkan hasil yang dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1 merupakan pengujian batubara dengan basis (*air-dried*) yang digunakan untuk perhitungan analisis energi pada Boiler. Tabel 2 merupakan pengujian batubara dengan basis *dry ash free* untuk perhitungan analisis *exergi* pada Boiler.

Tabel 1. Data Komposisi Batubara Air-Dried Basis

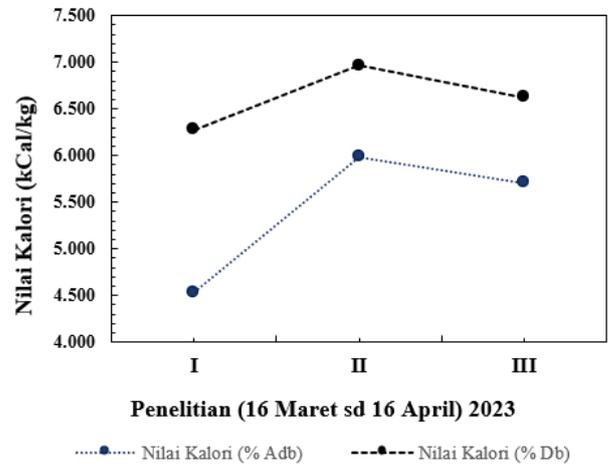
Penelitian I (16 Maret - 22 Maret 2023)					
Analisa Ultimate					
C	H ₂	O ₂	N ₂	S	
(% Adb)					
48,16	6,47	36,67	0,58	0,48	
Analisa Proximate					
Moisture	Abu	VM	FC	Nilai Kalori	
(% Adb)					
27,81	7,64	31,92	32,64	4.531	
Penelitian II (3 - 9 April 2023)					
Analisa Ultimate					
C	H ₂	O ₂	N ₂	S	
(% Adb)					
62,42	6,34	30,29	0,96	0,49	
Analisa Proximate					
Moisture	Abu	VM	FC	Nilai Kalori	
(% Adb)					
14,05	1,82	42,17	41,96	5.986	
Penelitian II (3 - 9 April 2023)					
Analisa Ultimate					
C	H ₂	O ₂	N ₂	S	
(% Adb)					
58,92	5,85	34,20	1,03	0,49	
Analisa Proximate					
Moisture	Abu	VM	FC	Nilai Kalori	
(% Adb)					
13,84	6,57	39,90	39,69	5.707	

Tabel 2. Data Komposisi Batubara Dry-Ash Free

Penelitian I (16 Maret - 22 Maret 2023)					
Analisa Ultimate					
C	H ₂	O ₂	N ₂	S	
(% DAF)					
74,61	5,21	18,55	0,89	0,66	
Analisa Proximate					
Moisture	Abu	VM	FC	Nilai Kalori	
(% DAF)					
27,81	-	44,21	45,20	6.277	
Penelitian II (3 - 9 April 2023)					
Analisa Ultimate					
C	H ₂	O ₂	N ₂	S	
(% DAF)					
72,62	5,54	20,72	1,11	0,57	
Analisa Proximate					
Moisture	Abu	VM	FC	Nilai Kalori	
(% DAF)					
14,05	-	49,06	48,82	6.965	
Penelitian II (3 - 9 April 2023)					
Analisa Ultimate					
C	H ₂	O ₂	N ₂	S	
(% DAF)					
68,38	5,00	25,43	1,19	0,57	
Analisa Proximate					
Moisture	Abu	VM	FC	Nilai Kalori	
(% DAF)					
13,84	-	46,31	46,07	6.624	

Berdasarkan hasil pengujian batubara terdapat kenaikan nilai kalori setiap kali dilakukan penelitian.

Sampel batubara pertama diambil pada tanggal 16 Maret 2023, sampel batubara kedua diambil pada tanggal 3 April 2023, dan sampel ketiga diambil pada tanggal 10 April 2023. Hasil pengujian batubara terdapat pada Gambar 2.



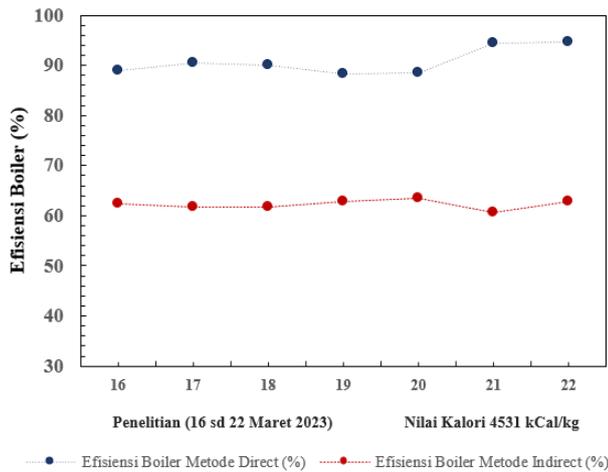
Gambar 2. Grafik Nilai Kalori Batubara

Lokasi pengambilan sampel dilakukan pada tempat yang sama yaitu *Coal Feeder*. Menurut *manual book design spesification* untuk nilai kalori Boiler CFB yaitu 4888 kCal/kg. Berdasarkan Gambar 2 dapat dianalisa bahwa nilai kalori untuk pengambilan sampel kedua dan ketiga mengalami kenaikan yang signifikan >5000 kCal/kg. Kenaikan dan penurunan nilai kalor dapat dianalisa dari persentase kadar abu bahwa semakin rendah kadar abu maka akan semakin tinggi nilai kalori batubara. Hal tersebut sama berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh (Toding dkk, 2019) menyimpulkan bahwa semakin tinggi kadar abu pada jenis batubara yang sama, semakin rendah nilai kalori.

4.2 Data Hasil Pengujian Batubara

Pengujian analisa ultimate dan proximate serta nilai kalori terhadap batubara digunakan untuk dilakukan perhitungan efisiensi Boiler dengan metode langsung (*direct method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*). Perhitungan efisiensi Boiler dengan metode *direct* merupakan perhitungan secara langsung tanpa memperhitungkan kehilangan panas yang terjadi pada Boiler sedangkan metode *indirect* memperhitungkan kehilangan panas yang terjadi pada ruang pembakaran, serta kehilangan panas secara radiasi, konveksi dan konduksi pada Boiler.

Grafik hubungan nilai kalori dan efisiensi Boiler terdapat pada Gambar 3. Nilai kalori pada penelitian pertama yaitu 4531 kCal/kg dengan pengambilan data parameter operasi selama tujuh hari. Berdasarkan perhitungan didapatkan hasil efisiensi Boiler yang fluktuatif dengan rata-rata perhitungan untuk efisiensi Boiler metode *direct* 90,8% dan metode *indirect* 62,3%.

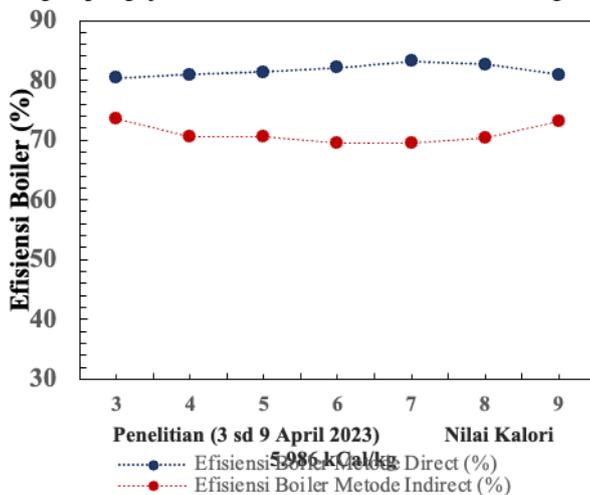


Gambar 3. Grafik Hubungan Nilai Kalori dan Efisiensi Boiler Penelitian Pertama

Parameter operasi berpengaruh besar untuk nilai efisiensi adalah laju alir massa batubara, massa steam dan energi *steam* yang dihasilkan dan data penelitian pertama telah masuk dalam kategori batas spesifikasi desain kondisi operasi *steam* dengan temperatur $\pm 485^{\circ}\text{C}$ dan tekanan $\pm 4,9\text{ MPa}$.

Pada perhitungan efisiensi termal Boiler dengan metode *indirect* faktor yang mempengaruhi nilai efisiensi yaitu temperatur furnace $\pm 815^{\circ}\text{C}$ dikarenakan panas sisa pembakaran masih dapat dimanfaatkan secara efisien untuk memanaskan ruang *economizer* dan laju alir massa *steam* yang dihasilkan tinggi serta laju alir massa *blowdown* rendah $<1\text{ T/h}$. Berdasarkan perspektif pengoperasian, *Boiler* dengan perbedaan temperatur pembakaran yang tinggi dan laju aliran *steam* yang besar maka akan memiliki nilai efisiensi tinggi (Lin dkk, 2020).

Pada penelitian kedua dapat dilihat pada Gambar 4 dengan pengujian nilai kalori batubara 5986 kCal/kg.

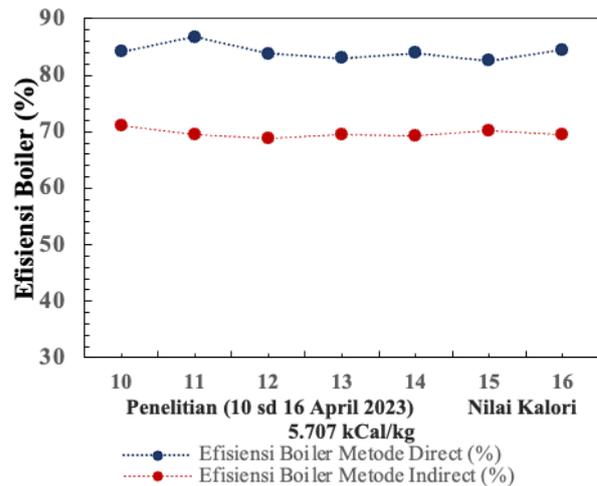


Gambar 4. Grafik Hubungan Nilai Kalori dan Efisiensi Boiler pada Penelitian Kedua

Pada penelitian kedua dilakukan pengambilan data parameter operasi selama 7 hari pada tanggal 3 sampai 9 April 2023, didapatkan hasil efisiensi Boiler dengan rata-rata perhitungan untuk efisiensi Boiler metode *direct* 81,7% dan metode *indirect* 71,0%.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa terdapat kenaikan nilai efisiensi Boiler metode *indirect* dan penurunan nilai efisiensi Boiler dengan metode *direct*. Kenaikan nilai efisiensi pada metode *indirect* dapat dipengaruhi oleh faktor penurunan nilai moisture yang terdapat dalam pengujian analisa proximate batubara. Upaya menurunkan atau mengurangi kadar moisture pada bahan bakar dapat meningkatkan performansi di dalam Boiler (Bhattarai dkk, 2020)

Pada penelitian ketiga yang terdapat pada Gambar 5 dengan pengujian nilai kalori batubara terjadi penurunan yaitu 5707 kCal/kg dengan pengambilan data parameter operasi selama tujuh hari pada tanggal 10 sampai 16 April 2023 didapatkan hasil efisiensi Boiler dengan rata-rata perhitungan untuk efisiensi Boiler metode *direct* 84,1% dan metode *indirect* 69,7%.



Gambar 5. Grafik Hubungan Nilai Kalori dan Efisiensi Boiler pada Penelitian ketiga

Penurunan nilai kalori disebabkan oleh kandungan Carbon (C) dan Hidrogen (H_2) analisa ultimate menurun dan kandungan Abu pada analisa proximate mengalami kenaikan 6,57%. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi Boiler metode *direct* dan *indirect* terlihat fluktuatif disebabkan oleh perubahan konsistensi laju alir massa batubara dengan produksi steam dihasilkan dari proses panas pembakaran batubara.

Penelitian yang dilakukan oleh (Febriani dkk, 2021) dapat disimpulkan bahwa faktor yang berpengaruh dalam kenaikan dan penurunan efisiensi yaitu massa batubara, nilai kalori dan kondisi operasi steam yang dihasilkan.

Penelitian lain dilakukan oleh (Nuraini dkk, 2018) menjelaskan bahwa performansi dari efisiensi Boiler dapat dianalisa dengan membandingkan nilai kalori batubara dan massa batubara pada saat pembakaran dan kondisi operasi steam terkait temperatur dan tekanan serta laju alir massa yang dihasilkan.

4.3 Data Hasil Pengujian Emisi

Berdasarkan hasil gas emisi terdapat pada Tabel 3 menunjukkan bahwa persentase emisi SO₂ dan CO relatif rendah. Hal ini dikarenakan kemampuan dari tipe Boiler CFB yang mempunyai fleksibilitas bahan bakar dengan pengendalian emisi yang lebih rendah dibandingkan tipe Boiler lainnya yang ditunjukkan hasil emisi CO rendah ±2,5%, serta efisiensi penangkapan sulfur yang tinggi dengan ditunjukkan hasil emisi SO₂ ± 0,02%.

Tabel 3. Data Komposisi Gas Emisi

Pengukuran I (Maret 2023)				
CO ₂	CO	O ₂	SO ₂	N ₂
(%)				
7,40	1,79	8,70	0,02	82,10
Pengukuran II (April 2023)				
CO ₂	CO	O ₂	SO ₂	N ₂
(%)				
8,60	2,73	8,60	0,01	80,06

Hasil penelitian ini sama dengan penelitian yang dilakukan oleh (Yuliyani, 2019) yang dapat disimpulkan bahwa pembakaran dengan Boiler tipe CFB memiliki kelebihan yaitu menghasilkan kadar NO_x lebih sedikit dan dapat mengurangi kadar sulfur dioksida (SO₂) yang terbentuk karena reaksi pembakaran akibat kandungan belerang atau senyawa Sulfur di dalam batubara.

4.4 Data Hasil Pengujian Abu Pembakaran

Pengujian abu pembakaran bertujuan menghitung *unburned carbon* atau karbon tidak terbakar. Data komposisi abu dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Komposisi Abu

Parameter	Standard	Results		
		Units	Basis	Value
Ash Analysis				
Silicon Dioxide (SiO ₂)	ASTM D 3682-21	%	DB	59.04
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	ASTM D 3682-21	%	DB	25.04
Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃)	ASTM D 3682-21	%	DB	6.60
Calcium Oxide (CaO)	ASTM D 3682-21	%	DB	2.72
Magnesium Oxide (MgO)	ASTM D 3682-21	%	DB	1.84
Sodium Oxide (Na ₂ O)	ASTM D 3682-21	%	DB	2.11
Potassium Oxide (K ₂ O)	ASTM D 3682-21	%	DB	0.48
Titanium Oxide (TiO ₂)	ASTM D 3682-21	%	DB	0.88
Manganese (Mn ₃ O ₄)	ASTM D 3682-21	%	DB	0.06
Sulphur Trioxide (SO ₃)	ASTM D 5016-16	%	DB	0.46
Phosphorous Pentoxide (P ₂ O ₅)	AS 1038 part 9.3:2013 (Reconfirmed 2018)	%	DB	0.41

Berdasarkan hasil komposisi kandungan persentase abu didapatkan nilai *unburned carbon* sebagai berikut :

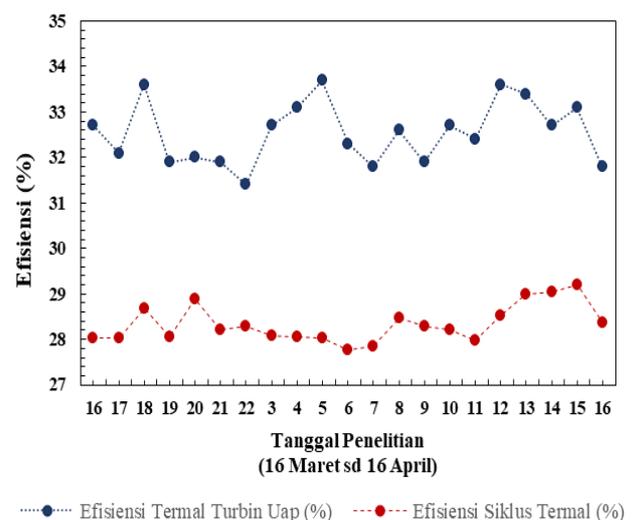
$$\begin{aligned} \% \text{ Unburned Carbon} &= (100 - \sum \text{komposisi abu}) \\ &= (100 - 99,64) \\ &= 0,36 \end{aligned}$$

Perhitungan *unburned carbon* hasil yang didapatkan dalam persentase 0,36%. Hasil tersebut menunjukkan hasil *unburned carbon* yang rendah, hal ini sebabkan karena pada Boiler tipe CFB memiliki mesin pendukung yaitu *Cyclone* yang berfungsi untuk mengalirkan batubara yang belum terbakar dan akan dikembalikan lagi ke ruang pembakaran. Hasil persentase *unburned carbon* yang rendah 0,36% sehingga kerugian panas atau *heat losses* Boiler hanya ± 0,002%.

4.5 Perhitungan Efisiensi Termal Turbin Uap dan Efisiensi Siklus Termal

Berdasarkan hasil perhitungan penelitian terhadap efisiensi termal Turbin dan efisiensi siklus termal pembangkit (siklus Rankine) menunjukkan bahwa hasil nilai yang linier dan semakin baik nilai efisiensi termal Turbin maka semakin baik juga nilai efisiensi siklus termal. Hal ini dikarenakan oleh faktor penggunaan data dalam pengolahan perhitungan menggunakan data kondisi operasi Turbin.

Gambar 6 menunjukkan hasil efisiensi termal Turbin yang fluktuatif disebabkan oleh faktor daya yang dihasilkan tidak konstan dan sering mengalami penurunan <10 MW dan hal ini mempengaruhi terhadap nilai *heat rate* Turbin semakin tinggi. Jika nilai *heat rate* Turbin semakin tinggi maka nilai efisiensi termal Turbin akan semakin rendah. Performa dari Turbin akan semakin tinggi ketika nilai Turbin *heat rate* yang dihasilkan semakin kecil, karena semakin sedikit energi yang dibutuhkan Turbin untuk menghasilkan energi listrik (Gani dkk, 2022).



Gambar 6. Grafik Hubungan Efisiensi Termal Turbin dan Efisiensi Siklus Termal

Efisiensi termal Turbin menyatakan parameter derajat keberhasilan sistem Turbin untuk mengkonversikan energi termal ke energi mekanik yang dinyatakan dalam persentase dan tidak memperhitungkan kerja kompresi pada pompa dan nilai panas pada ekstraksi uap Turbin. Efisiensi siklus termal menyatakan parameter siklus termodinamika yang dapat mengubah panas menjadi kerja dan memperhitungkan panas secara keseluruhan dari *steam* yang dihasilkan sampai kerja total Turbin dan kerja total pompa.

Penelitian ini sama dengan kondisi operasi Turbin uap yang ada di PLTU TE 3×10 MW yang menyatakan bahwa kondisi operasi yang sering mengalami perubahan dan mempengaruhi efisiensi termal Turbin dan efisiensi siklus termal pembangkit dengan rata-rata hasil efisiensi termal Turbin 32,5% dan efisiensi siklus termal 28,3%.

4.6 Analisis Exergi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap

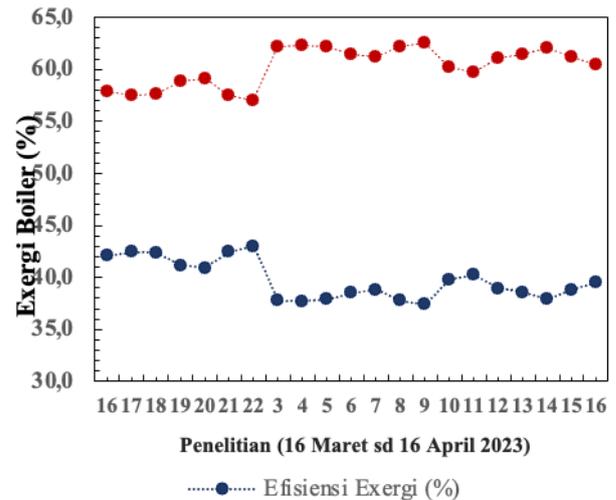
Pada analisis *exergi* yang telah dilakukan perhitungan bahan bakar batubara yang masuk kedalam suatu pembangkit bahwa sebagian dari *exergi* bahan bakar batubara dikembalikan ke lingkungan disekeliling dari instalasi pembangkit dalam bentuk kerja yang dihasilkan dan sebagian besar energi akan dihancurkan oleh *irreversibility* yang terjadi di dalam mesin pembangkit tersebut dan dikeluarkan dari pembangkit melalui air pendingin *Cooling Tower*, emisi gas hasil pembakaran, dan perpindahan kalor yang tidak dapat dihindari dengan lingkungan sekitar.

Irreversibility terjadi pada setiap mesin pembangkit tenaga uap yang menyerap sumber energi dari *exergi* yang dipasok ke pembangkit tersebut. Hal ini terukur melalui *exergi* yang hancur di dalam mesin tersebut dan mesin pembangkit yang menyerap sumber energi terbesar adalah Boiler, dikarenakan cukup banyak di antara *exergi* yang masuk pembangkit bersama dengan bahan bakar dihancurkan oleh *irreversibility* didalam komponen tersebut.

4.6.1 Laju Penghancuran Exergi Terhadap Efisiensi Exergi Boiler

Faktor *irreversibility* dapat ditunjukkan dengan adanya laju penghancuran *exergi* pada Boiler, dikarenakan hal ini terdapat pada sumber *irreversibility* di dalam Boiler yaitu perpindahan kalor *irreversibility* yang terjadi antara gas-gas panas hasil pembakaran dengan fluida kerja dari siklus tenaga uap yang mengalir melalui pipa Boiler dan proses pembakaran di *furnace*.

Grafik hubungan efisiensi *exergi* dan laju penghancuran *exergi* terdapat pada Gambar 7 didapatkan rata-rata efisiensi *exergi* Boiler 39,7% dan laju penghancuran *exergi* 60,3%. Grafik persentase tersebut dapat dianalisa bahwa semakin besar nilai laju penghancuran *exergi* maka semakin kecil hasil efisiensi *exergi* pada Boiler.



Gambar 7. Grafik Hubungan Efisiensi Exergi dan Laju Penghancuran Exergi Boiler

Hasil efisiensi *exergi* Boiler di PLTU TE 3×10 MW merujuk pada hasil yang tidak terlalu berbeda secara signifikan pada penelitian dilakukan oleh (Nasruddin dkk, 2015) yang menyatakan bahwa efisiensi *exergi* dari Boiler adalah sebesar 40,17%. Hal ini menunjukkan bahwa laju penghancuran *exergi* jauh lebih signifikan yang berasal dari kerugian yang dialami pembangkit tenaga uap.

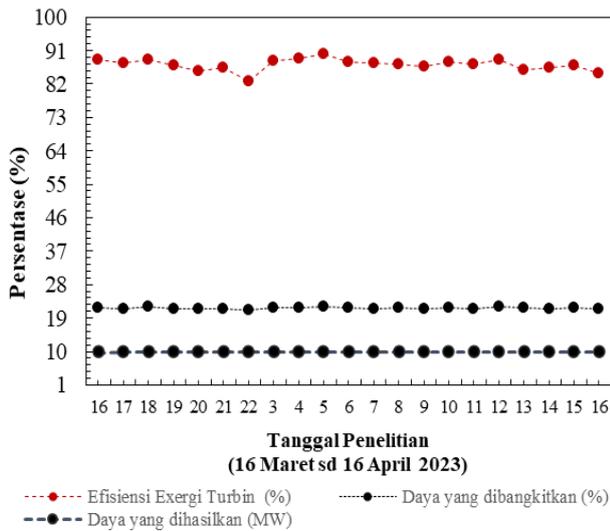
Hasil efisiensi *exergi* dan laju penghancuran *exergi* dapat diasumsikan bahwa jumlah *exergi* yang dipasok untuk menghasilkan kualitas energi pada Boiler sebesar 39,7% dari *exergi* bahan bakar yang tersisa untuk memanfaatkan gas panas hasil pembakaran ke pipa (Moran M, 2014).

4.6.2 Daya yang dihasilkan Terhadap Efisiensi Exergi Turbin

Pada Gambar 8 menunjukkan hasil dari perhitungan daya Turbin yang dihasilkan terhadap efisiensi Turbin yang dibangkitkan bahwa hasil penelitian tersebut menunjukkan nilai efisiensi *exergi* Turbin uap rata-rata 87,2% terhadap daya yang dihasilkan rata-rata 9,98 MW persentase 21,7% dari jumlah persentase *exergi* output.

Hasil dari perhitungan efisiensi *exergi* Turbin yang menunjukkan bahwa efisiensi *exergi* Turbin > efisiensi *exergi* Boiler dikarenakan prinsip dari Turbin adalah untuk menghasilkan kerja sehingga tidak banyak energi yang hancur. Kerja Turbin merupakan *exergi* power yang digunakan dalam perhitungan untuk mencari laju pemusnahan *exergi* Turbin.

Berdasarkan hasil dari penelitian persentase laju penghancuran *exergi* Turbin rata-rata 3,2% terhadap efisiensi *exergi* Turbin 87,2% yang ditunjukkan pada Gambar 8.

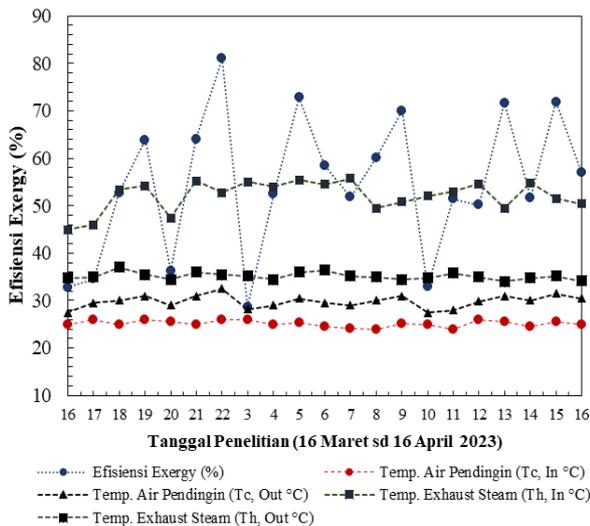


Gambar 8. Grafik Hubungan Efisiensi Exergi dan Laju Penghancuran Exergi Turbin

Hasil dari efisiensi *exergi* Turbin pada PLTU TE 3×10 MW tidak berbeda jauh dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh (Fauzi Zakaria dkk, 2018) yang menyatakan bahwa efisiensi *exergi* tertinggi terjadi pada temperatur lingkungan 28°C dengan efisiensi 94,69% dan terendah terjadi pada temperatur lingkungan 31°C dengan efisiensi 93,60%. Nilai rata-rata efisiensi *exergi* dari Turbin uap yaitu 94,08%.

4.6.3 Pengaruh Temperatur Fluida Terhadap Efisiensi Exergi Condenser

Hubungan temperatur fluida dapat mempengaruhi terhadap nilai efisiensi *exergi* terdapat pada Gambar 9. Pada perhitungan efisiensi *exergi* didapatkan nilai rata-rata 54,6% dengan parameter kondisi operasi Condenser yang meliputi temperatur exhaust steam $T_{h,in} = 52,1^\circ\text{C}$, $T_{h,out} = 35,2^\circ\text{C}$. Temperatur air pendingin $T_{c,in} = 25,2^\circ\text{C}$, $T_{c,out} = 29,8^\circ\text{C}$.



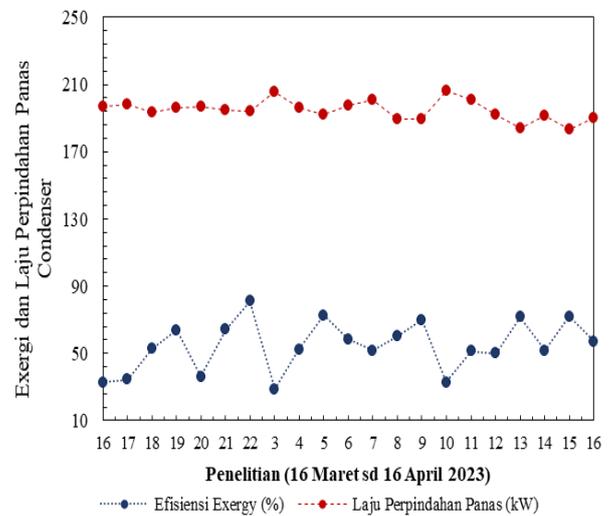
Gambar 9. Pengaruh Temperatur Fluida Terhadap Efisiensi Exergy Condenser

Berdasarkan perhitungan dan grafik bahwa hasil efisiensi *exergi* Condenser dipengaruhi oleh temperatur fluida air pendingin $T_{c,out}$ pada saat fluida telah mengalami proses perpindahan kalor dari temperatur awal ke temperatur akhir. Semakin tinggi temperatur air pendingin keluar Condenser maka semakin tinggi juga efisiensi *exergi* Condenser.

Penelitian kinerja *exergi* Condenser di Pembangkit dilakukan oleh (Orjuela dkk, 2020) dapat disimpulkan bahwa untuk temperatur antara $(27-35)^\circ\text{C}$ didapatkan hasil efisiensi *exergi* Condenser mencapai (20-65)%. Peningkatan efisiensi *exergi* juga ditunjukkan dengan peningkatan temperatur air pendingin secara rata-rata 2°C .

4.6.4 Hubungan Laju Perpindahan Panas dan Efisiensi Exergi Condenser

Grafik hubungan laju perpindahan panas yang dapat mempengaruhi efisiensi *exergi* Condenser terdapat pada Gambar 10 yang memberikan nilai laju perpindahan panas secara rata-rata 194,8 kW dan efisiensi *exergi* 54,6%. Pada grafik terlihat hasil yang fluktuatif dan dapat dianalisis bahwa semakin rendah nilai laju perpindahan panas maka hasil efisiensi *exergi* Condenser semakin tinggi. Penelitian yang sama juga dilakukan oleh (Orjuela dkk, 2020) menjelaskan bahwa pengaruh kehilangan panas terhadap efisiensi Condenser dengan hasil yang diperoleh menunjukkan hubungan negatif antara kehilangan panas dan efisiensi *exergi*.



Gambar 10. Pengaruh Temperatur Fluida Terhadap Efisiensi Exergy Condenser

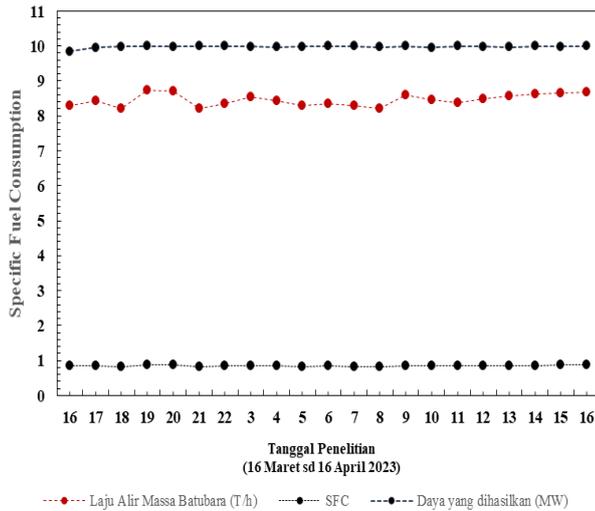
4.7 Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Parameter lain yang digunakan untuk menghitung kinerja pembangkit listrik tenaga uap meliputi SFC (*specific fuel consumption*), *plant heat rate* pembangkit, dan rasio kerja pembangkit.

4.7.1 Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap

SFC merupakan parameter yang digunakan sebagai ukuran ekonomi pemakaian bahan bakar terhadap daya listrik yang dihasilkan. Hasil perhitungan penelitian yang terdapat pada Gambar 11 memberikan hasil SFC dengan rata-rata 0,85 dengan pemakaian batubara per jam sebesar 8,45 T/h serta daya listrik yang dihasilkan sebesar 9,98 MW.

Pengaruh laju alir massa batubara terhadap daya yang dihasilkan serta SFC dapat dilihat melalui grafik yang terdapat pada Gambar 11.



Gambar 11. Laju Alir Massa Batubara dan Daya yang dihasilkan Terhadap SFC

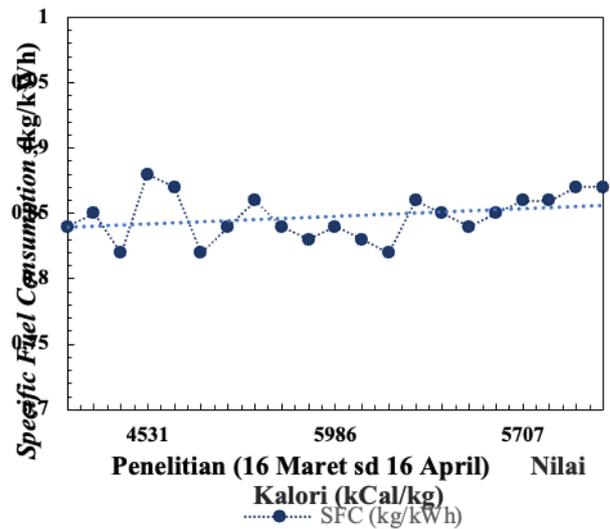
Tabel 5 yang menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai kalori batubara maka hasil SFC juga semakin rendah.

Tabel 5. Nilai Kalori Batubara Terhadap SFC

Nilai Kalori (kCal/kg)	SFC (kg/kWh)
4531	0,85
5986	0,84
5707	0,86

Penelitian yang sama dilakukan oleh (Syahputera dkk, 2018) menyimpulkan bahwa hubungan antara SFC dengan nilai kalori batubara yang digunakan dalam pembangkitan listrik adalah semakin tinggi nilai kalori batubara maka konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) berada dalam batasan $range < 1$, kondisi ini termasuk dalam kategori baik yang artinya semakin sedikit bahan bakar yang dipakai untuk menghasilkan 1 kWh listrik. Sehingga didapatkan hasil nilai terendah SFC yaitu 0,84 pada nilai kalori batubara paling tinggi 5986 kCal/kg.

Kenaikan dan penurunan hasil SFC disebabkan oleh nilai kalori batubara dapat dilihat melalui Grafik pada Gambar 12.



Gambar 12. Nilai Kalori Batubara Terhadap Specific Fuel Consumption

4.7.2 Pengaruh Nilai Kalori Batubara dan Daya yang dihasilkan Terhadap Plant Heat Rate

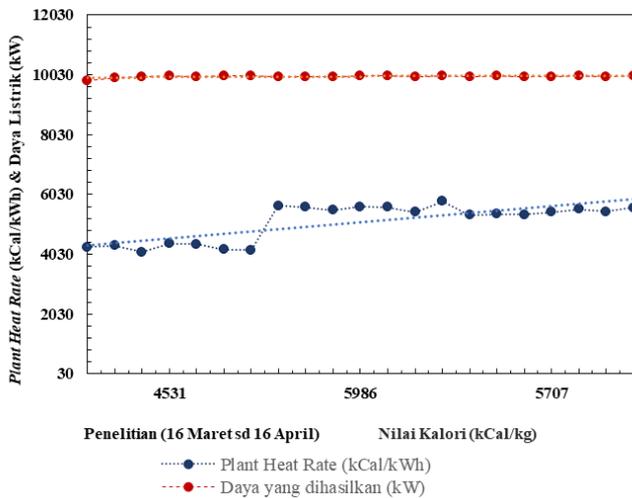
Berdasarkan hasil perhitungan *plant heat rate* dapat dianalisa bahwa semakin tinggi nilai kalori maka *plant heat rate* yang dihasilkan juga semakin tinggi. Hal ini sama dengan penelitian yang dilakukan oleh (Sahid dkk, 2016) yang menyimpulkan bahwa *heat rate* memang tidak selamanya sesuai dengan pemakaian batubara yang digunakan. Sesuai fakta bahwa pemakaian batubara yang memiliki nilai kandungan kalori tinggi belum tentu menghasilkan *plant heat rate* yang rendah. Begitu juga sebaliknya, penggunaan batubara dengan nilai kalori rendah belum tentu menghasilkan nilai *plant heat rate* yang tinggi.

Hasil perhitungan ditunjukkan pada Gambar 12 dan ditabulasi pada Tabel 6. Tingginya nilai *plant heat rate* sangat mempengaruhi keandalan suatu unit pembangkit. Jika nilai *heat rate* semakin rendah maka pembangkit semakin efisien dalam pengoperasian dikarenakan energi panas yang dibutuhkan untuk membangkitkan energi listrik semakin kecil.

Tabel 6. Rata-rata Hasil Perhitungan Plant Heat Rate

Nilai Kalori (kCal/kg)	Plant Heat Rate (kCal/kWh)	Daya yang dihasilkan (kW)
4531	4263	9966
5986	5608	9986
5707	5445	9984

Kebutuhan energi yang semakin kecil akan menurunkan pemakaian batubara sehingga biaya produksi listrik suatu unit pembangkit semakin rendah. Pengaruh nilai kalori dan daya yang dihasilkan terhadap *plant heat rate* dapat dilihat pada Gambar 13.

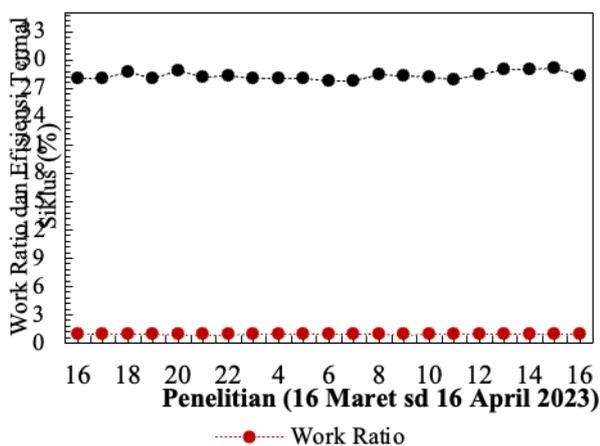


Gambar 13. Pengaruh Nilai Kalori dan Daya yang dihasilkan Terhadap Plant Heat Rate

4.7.3 Rasio Kerja Pembangkit

Parameter lain untuk mengukur kinerja pembangkit tenaga uap ada rasio kerja pembangkit yang merupakan rasio hasil kerja bersih terhadap hasil kerja positif (Nag, 2002). Gambar 14 merupakan grafik hubungan rasio kerja pembangkit dan efisiensi siklus termal yang menunjukkan bahwa rata-rata rasio kerja pembangkit 0,9992 dengan rata-rata efisiensi siklus termal 28,3%.

Perhitungan rasio kerja pembangkit juga dilakukan oleh (Nag, 2002) dalam Buku *Power Plant Engineering, 2nd Edition* yang mendapatkan hasil rasio kerja dengan rata-rata 0,9937.



Gambar 14. Hubungan Rasio Kerja Pembangkit dan Efisiensi Siklus Termal

5. KESIMPULAN

Kinerja sistem energi termal merupakan evaluasi sistem pembangkit dengan menganalisis dari proses pembakaran bahan bakar batubara menjadi energi termal yang dikonversi menjadi energi mekanik dan

menghasilkan energi listrik. Upaya dalam menganalisis kinerja sistem pembangkit diperlukan data parameter pengujian bahan bakar dan kondisi operasi pembangkit.

Penelitian yang dilakukan pada tanggal 16 Maret sampai 16 April 2023 didapatkan hasil nilai kalori batubara sebesar 4531 kCal/kg, 5986 kCal/kg dan 5707 kCal/kg dengan rata-rata efisiensi Boiler metode *direct* 90,8%, 81,7%, dan 84,1% serta metode *indirect* 62,3%, 71,0%, dan 69,7%.

Efisiensi termal Turbin didapatkan hasil rata-rata 32,5% dan laju perpindahan panas secara keseluruhan pada Condenser yaitu 194,8 kW. Perhitungan analisis *exergi* pada setiap peralatan pembangkit meliputi Boiler, Turbin dan Condenser. Rata-rata perhitungan *exergi* pada Boiler 39,7%, Turbin Uap 87,2%, dan Condenser 54,6%. Perhitungan kinerja pembangkit yang meliputi efisiensi siklus termal, *plant heat rate*, rasio kerja dan *specific fuel consumption*. Rata-rata perhitungan efisiensi siklus termal 28,34%, *plant heat rate* 5105 kCal/kWh, rasio kerja 0,9992 dan *specific fuel consumption* 0,85.

6. SARAN

Pada penelitian diharapkan dapat mengoperasikan pembangkit sesuai dengan standar tata kelola operasi pembangkit. Mulai dari penggunaan nilai kalori batubara harus berada pada batasan *Manual Book Boiler* yaitu $4500 \leq GHV \leq 5000$ kCal/kg. Parameter kondisi operasi harus dijaga pada setiap peralatan pembangkit sesuai *Manual Book Operasi Pembangkit* meliputi kondisi operasi Boiler dengan tekanan steam maksimal 5,3 MPa dan temperatur maksimal 485°C. Laju alir massa batubara sebesar 8,29 T/h. Laju alir volume udara *primary* 28900 m³/h dan *secondary* 41600 m³/h. Turbin dengan tekanan main steam 4,9 MPa dan temperatur main steam 475°C. Condenser dengan tekanan *exhaust steam* 0,009 MPa dan temperatur 43,83°C. *Fluida* air pendingin masuk condenser dengan kondisi temperatur 25°C. Upaya untuk menjaga unit pembangkit tetap memiliki keandalan dalam performansi diharapkan dapat mengoperasikan pembangkit pada beban > 9 MW.

7. DAFTAR PUSTAKA

- ASME PTC 4. (2013). Fired Steam Generators. An American National Standard. The American Society of Mechanical Engineers.
- Bejan A., Tsatsaronis G., & Moran M. (1996). Thermal Design and Optimization. U.S.A: John Wiley and Sons Inc.
- Bhattarai D, Jha N, Budathoki P, & Sedhai B. (2020). Performance Analysis and Optimization of Boiler Effect Efficiency by Reducing Moisture Content of Sugarcane Bagasse. International Journal of Advanced Engineering. Vol. 05, No. 02, March 2020. Institute of Engineering, Tribhuvan University.
- Cengel Y. (2007). Heat Transfer A Practical Approach 2nd Edition. NewYork: McGraw-Hill Education.

- Fauzi Zakaria M., Effendy M. (2018). Analisa Energi Dan Eksergi Turbin Uap Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Unit 2 Tanjung Awar-Awar. Universitas Negeri Surabaya. Surabaya.
- Febriani S., Purwanto M. (2021). Analysis of Boiler Engine Efficiency Unit 2 PT. PJB UP Paiton. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing.
- Gani F., Apridialianti A., & Slameto. (2022). Analisis Kinerja Turbin Uap Unit 1 Di Cirebon Power. Jurnal Energi. Jurusan Teknik Konversi Energi. Politeknik Negeri Bandung.
- Haldkar A., Kumar Sharma A., Ranjan R., & Bajpai V. (2013). Parametric Analysis of Surface Condenser for Thermal Power Plant. Gyan Ganga Institute of Engg. & Tech., Jabalpur, M.P., India.
- Hasanudin L., Gunawan Y., & Lolok A. (2020). Heat Rate System Analysis In The Steam Power Plant In Niitanasa Using Environmentally Friendly Low-Calorie Fuels. Matter: International Journal of Science and Technology.
- Hougen A., Watson M., & Ragatzm A. (1943). Chemical Process Principles. NewYork: Jhon Wiley & Sons, Inc. Chapman and Hall Limited.
- Komarudin., Saputro A., & Wahuningsih E. (2020). Analisis Kenaikan *Plant heat rate* PLTU Sebelum Perbaikan Berkala Terhadap Kondisi Testing Komisioning. Universitas Dian. Jakarta.
- Lin W, Chen L, Bing J., & Yue G. (2020). Design-Based Thermal Efficiency Correction Method for Hot Water Boiler. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Moran M., Shaphiro H., & Boettner M. (2014). Fundamentals of Engineering Thermodynamics Eight Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Nag, P. (2002). Power Plant Engineering, 2nd Edition. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Nasruddin., Satrio P. (2015). Analisa Energi, Exergi dan Optimasi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Super Kritis 660 MW. Universitas Indonesia. Depok, Indonesia.
- Nuraini A., Salmi S., & Aziz H. (2018). Efficiency and Boiler Parameters Effects in Sub-critical Boiler with Different Types of Sub-bituminous Coal. Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Mechanical Engineering. Shiraz University.
- Orjuela Abril, M.S., Rojas Suarez, J.P., & Pabon Leon, J.A. (2020). Analysis of The Energetic and Exergetic Performance in Condensers of Thermal Generation Plant. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing.
- Papireddy., Ananth S., & Kumar V. (2018). Performance Analysis of Boiler in Thermal Power Plant. Malla Reddy College of Engineering Maisammaguda. India.
- PT. PLN Persero. (2018). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2018-2027. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- Purseth S., Dansena J. (2021). Performance Analysis and Efficiency Improvement of Boiler A Review. Jindal University Raigarh, Chhattisgarh India.
- Sahid., Prasetyo B. (2016). Heat Rate Pembangkit Listrik Tenaga Uap Paiton Baru (Unit 9) Berdasarkan Performance Test Tiap Bulan dengan Beban 100%. Jurnal Teknik Energi Vol.12 No. 2. Politeknik Negeri Semarang, Semarang.
- Syahputera M., Kamal D., & Ekayuliana A. (2018). Analisis Pengaruh Nilai Kalori Batubara Terhadap Konsumsi Bahan Bakar Dan Biaya Produksi Listrik. Seminar Nasional Teknik Mesin. Politeknik Negeri Jakarta. Jakarta.
- Tahdid., Ridwan K., & Rezatantia, T. (2022). Efisiensi Termal Dan Specific Fuel Consumption (SFC) Water Tube Boiler Berdasarkan Rasio Udara Bahan Bakar Diesel Dan LPG Untuk Memproduksi Saturated Dan Superheated Steam. Politeknik Negeri Sriwijaya.
- Toding A, Triantoro A. (2019). Analisis Perbandingan Kualitas Batubara di Lokasi Penambangan dan Stockpile di PT Firman Ketaun Perkasa. Jurnal Himasapta. Vol. 4, No. 1, April : 1–10. Universitas Lambung Mangkurat. Banjarmasin. Kalimantan Selatan.
- Yuliyani I., Maridjo., & Abdul M. (2019). Analisis Sistem Ruang Bakar Boiler Jenis Fluidized Bed Combustion untuk PLTU Kapasitas 8 MW. Politeknik Negeri Bandung. Bandung.