

ANALISIS RUGI-RUGI *HEAT RATE* PLTU BANTEN 3 LONTAR AKIBAT DEVIASI PARAMETER PADA KONDISI AKTUAL MENGUNAKAN ANALISIS GAP

*Heat Rate Losses Analysis of Banten 3 Lontar PLTU due to Deviation Parameter on
Actual Condition using Gap Analysis*

Teguh Wahyudi^{1*}, Yuriadi Kusuma¹

¹ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Mercu Buana, Jakarta Barat, Indonesia.

* Email Korespondensi : wahyuditeguh604@gmail.com

Artikel Info - : Diterima : 29-05-2023; Direvisi : 25-08-2023; Disetujui : 02-09-2023

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu jenis teknologi konversi energi untuk membangkitkan listrik dari bahan fosil. Kinerja suatu unit PLTU akan mulai menurun seiring dengan bertambahnya usia unit tersebut. Selain faktor usia, penurunan kinerja juga dapat diakibatkan karena deviasi parameter operasi yang dapat menyebabkan rugi-rugi *heat rate*. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kinerja PLTU Banten 3 Lontar unit 2 dengan cara menganalisis rugi-rugi *heat rate* akibat deviasi parameter sesuai keadaan aktual dan menghitung penghematan biaya serta kemungkinan perbaikannya. Metodologi penelitian yang digunakan adalah metode evaluasi dimana data aktual parameter operasi akan dibandingkan dengan data *baseline*. Perbandingan tersebut akan menghasilkan nilai deviasi yang kemudian digunakan untuk mendapatkan nilai *heat loss*, kerugian biaya dan rekomendasi perbaikan pada pembangkit. Data *baseline* didapatkan dari persamaan interpolasi pengujian komisioning pada 3 beban variasi berbeda. Dari penelitian diketahui terjadi peningkatan *nett plant heat rate* (NPHR) dengan rata-rata 561 kCal/kWh. Peningkatan NPHR terjadi karena adanya rugi-rugi *heat rate*, dimana penurunan efisiensi HP turbin menjadi penyebab utama dengan rata-rata *losses* sebesar 87,96 kCal/kWh atau 24,53 % dari total *losses*. Dengan asumsi bahwa semua rugi-rugi *heat rate* selama pengujian dapat diperbaiki maka rata-rata potensi penghematan energi per harinya adalah 8.604,802 kCal/kWh sedangkan rata-rata penghematan biaya sebesar Rp1.534.046.000/bulan.

Kata Kunci: Analisis Gap, Rugi-Rugi *Heat Rate*, Kondisi Aktual, Deviasi Parameter

ABSTRACT

Steam power plant (PLTU) is one type of energy conversion technology to generate electricity from fossil materials. The performance of a PLTU unit will begin to decline as the unit ages. In addition to age, performance degradation can also be caused by deviation of operating parameters, which can cause heat rate losses. The purpose of this study is to determine the performance of PLTU Banten 3 Lontar unit 2 by analyzing heat rate losses due to parameter deviations according to actual conditions and calculating cost savings and possible improvements. The research methodology used is an evaluation method where the actual data of operating parameters will be compared with the baseline data. The comparison will produce a deviation value, which is then used to obtain the value of heat loss, cost loss, and improvement recommendations for the plant. Baseline data is obtained from the interpolation equation of commissioning testing at 3 different variation loads. From the study, it is known that there was an increase in Nett Plant Heat Rate (NPHR) with an average of 561 kCal / kWh. The increase in NPHR occurred due to heat rate losses, where the decrease in turbine HP efficiency was the main cause, with an average loss of 87.96 kCal / kWh or 24.53% of total losses. Assuming that all heat rate losses during testing can be corrected, the average potential energy savings per day is 8,604,802 kCal/kWh, while the average cost savings are Rp1,534,046,000/month.

Keywords: Deviation Analysis, Heat Rate Losses, Actual Condition, Deviation Parameter

1. Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu jenis teknologi konversi energi untuk membangkitkan listrik dari bahan fosil [1]. *Heat rate* adalah ukuran efisiensi kinerja pada sebuah pembangkit yang umumnya menggunakan satuan kCal/kWh. Semakin kecil nilai *heat rate* maka semakin rendah konsumsi batu bara spesifik dan semakin kecil biaya produksi listrik [2]. Rugi-rugi pada *heat rate* pada pembangkit umumnya disebabkan oleh deviasi parameter dan usia peralatan. Rugi-rugi ini berakibat pada menurunnya efisiensi dan meningkatnya *heat rate* [3]. Untuk mengembalikan/melampaui desain *heat rate* perlu dilakukan perbaikan atau modifikasi peralatan. Penggunaan energi listrik pada PLTU Banten 3 Lontar lebih besar digunakan untuk sistem motor listrik dan tata udara. Peluang konservasi energi yang dapat dilakukan dari hal tersebut adalah memodifikasi perancangan filter harmonisa dan juga sistem pengasutan arus mula [4]. Dari penelitian yang dilakukan Parapa pada dampak perubahan parameter *closed feedwater heater* terhadap *heat rate losses* pada PLTU kapasitas 110 MW diketahui bahwa perubahan parameter pada *closed feedwater heater* sangat mempengaruhi kinerja dari sistem PLTU dari sisi teknis maupun biaya [5]. Gap analisis adalah suatu analisis perbandingan perbedaan kinerja aktual suatu peralatan dengan kinerja potensial yang bisa dicapai. Dari penelitian sebelumnya yang telah dilakukan Fahlevy dkk. pada analisa performa Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) kapasitas 740 MW terhadap pola operasi dan pembebanan menggunakan *heat rate gap analysis* diketahui bahwa setiap perubahan pola operasi dan penyimpangan parameter akan mempengaruhi *heat rate* [6].

Parameter yang umum digunakan untuk mengevaluasi kinerja pembangkit umumnya dibagi menjadi 5 bagian yaitu *operator controllable*, kinerja turbin, kinerja boiler, kualitas bahan bakar dan parameter lain-lain. Parameter *operator controllable* terdiri dari *temperature flue gas outlet air pre heater* (APH), persentase O₂ di *outlet APH*, temperatur *main steam*, tekanan *main steam*, temperatur *hot reheat*, debit air *spray to desuperheater*, presentase *spray superheater*. Parameter kinerja turbin terdiri dari APH *leakage*, APH *effectiveness*, FDF *inlet temperature*, *mill air outlet temperature*, *unburn carbon*. Parameter kinerja turbin terdiri dari turbin, *efficiency* (HP, IP, LP), *final temperature of feedwater*, *condensor vaccum*, *terminal temperature different* (TTD) dan *drain cooler approach* (DCA) pada *heater 1, 2, 3, 5, 6, 7 dan 8*. Parameter kualitas batu bara terdiri *moisture in fuel* dan *hydrogen in fuel*. Parameter lain-lain terdiri dari persentase *auxiliary power* dan *flow make up water* [7].

Tidak semua parameter kinerja pembangkit tersedia di lapangan. Terdapat beberapa parameter yang perlu diolah untuk mendapatkan data parameter yang dicari seperti APH *leakage*, APH *effectiveness*, turbin *efficiency* (HP, IP, LP) dan TTD DCA *heater 1, 2, 3, 5, 6, 7 dan 8*. Kinerja APH sangat dipengaruhi oleh APH *leakage*[8]. Pengoperasian *sector plate* dapat menentukan presentase *leakage* APH[9]. Efisiensi turbin dihitung secara isentropik dengan melihat *pressure* dan *temperature inlet outlet* tiap turbin. Penggunaan sistem ekstraksi pada turbin mempengaruhi efisiensi turbin [10]. TTD DCA merupakan parameter yang digunakan sebagai parameter kinerja dari *feedwater heater*. Rugi-rugi *heat rate* yang diakibatkan oleh tiap parameter akan menimbulkan dampak terhadap biaya operasi. Secara matematis kerugian biaya akibat *losses heat rate* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) [7].

$$\text{Chr} = \text{Coc} \times \text{Npc} \times \text{Ahl} \quad (1)$$

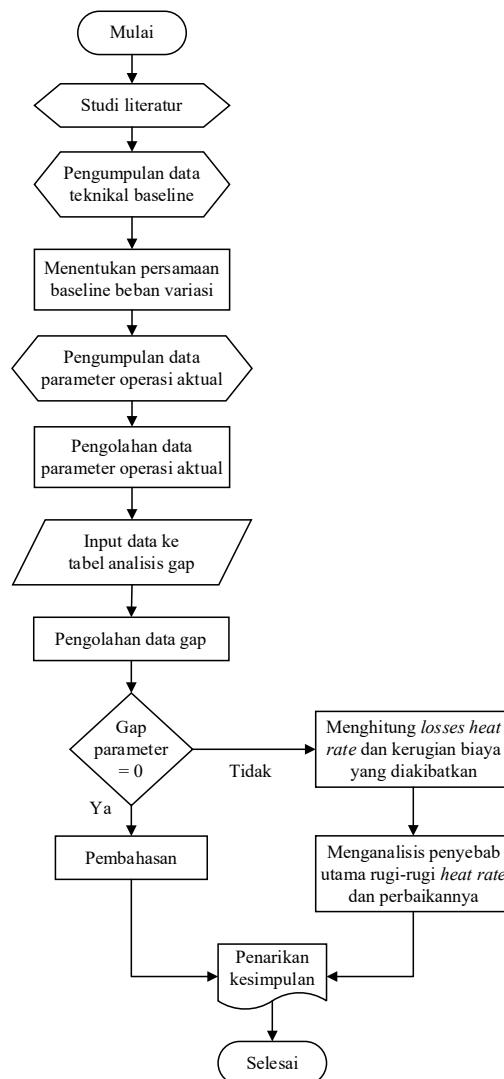
dimana:

<i>Cost heat rate</i> (Chr)	= biaya dari kehilangan <i>heat rate</i> per bulan (Rp/jam)
<i>Cost of coal</i> (Coc)	= harga batu bara (Rp/kCal)
<i>Net capacity factor</i> (Npc)	= kapasitas bersih maksimum pembangkit (MW)
<i>Net corrected factor</i> (Ncf)	= faktor kapasitas bersih pembangkit (%)
<i>Actual heat loss</i> (Ahl)	= <i>heat rate</i> (kCal/kWh)

Setelah mendapatkan nilai Ahl dari analisis gap, perhitungan kerugian biaya dapat dilakukan menggunakan persamaan (1). Komponen Coc dapat diketahui dari bagian manajemen yang membidangi *coal handling system*.

Studi kasus penelitian ini dilakukan di unit 2 PLTU Banten 3 Lontar yang mengacu pada kondisi aktual dengan segala kendala di lapangan yang terjadi. Waktu pengambilan data yang relatif lebih baru dengan metode pengambilan data yang dilakukan 2 jam sekali selama satu minggu memberikan keakuratan data lebih tinggi serta kesimpulan yang mencapai saran perbaikan terhadap *losses* membuat penelitian ini merupakan penelitian yang baru. Kajian terkait rugi-rugi *heat rate* pada kondisi aktual masih belum banyak dilakukan. Oleh karena itu dilakukan penelitian mengenai hal tersebut. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah: 1). Menetapkan persamaan interpolasi *baseline* kinerja pembangkit yang diambil dari data komisioning. 2). Membandingkan kinerja aktual sekarang dengan *baseline*. 3). Menghitung besarnya potensi energi dari perbaikan kinerja pembangkit. 4). Menghitung potensi penghematan biaya dari perbaikan kinerja pembangkit. 5). Mengetahui kemungkinan penyebab utama dan perbaikan dari menurunnya kinerja pembangkit.

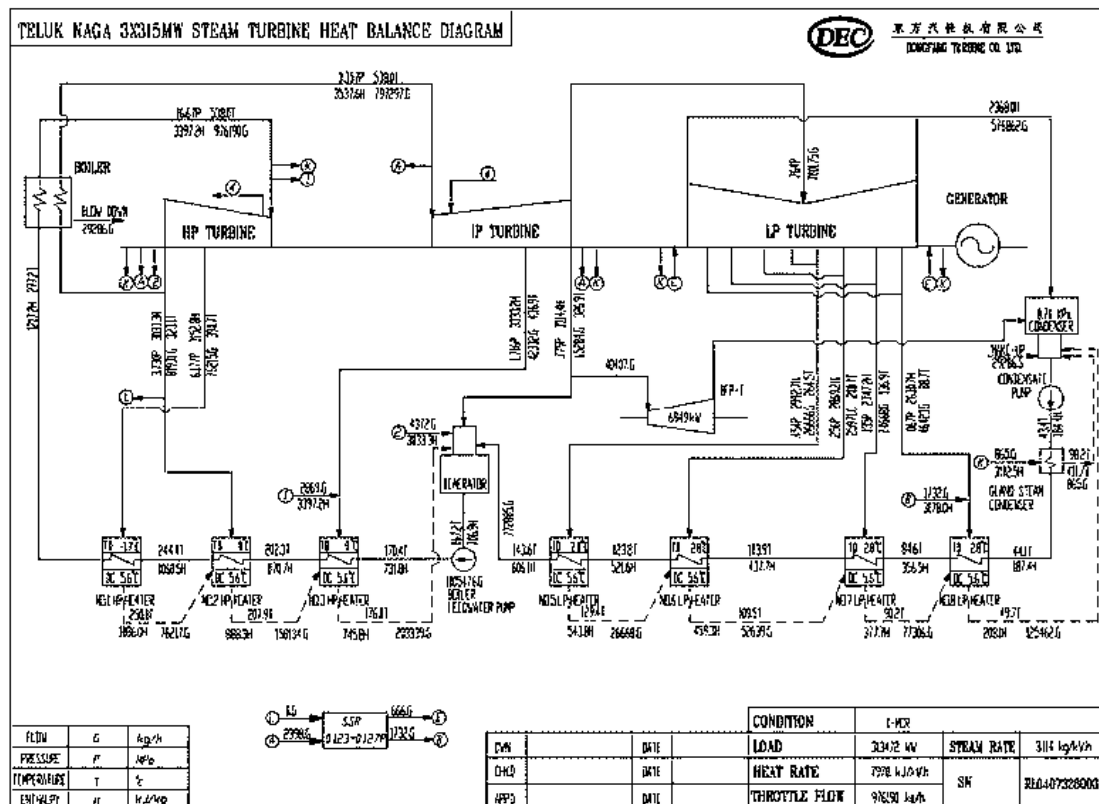
2. Metode Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian Rugi-Rugi *Heat Rate*

Berdasarkan Gambar 1 Penelitian diawali dengan melakukan studi literatur yang didalamnya termasuk melakukan wawancara dengan operator *distribution control room (DCS)*, *supervisor* dan *supervisor senior* operasi serta tim *Engineering* bidang efisiensi. Kemudian dilanjutkan pengumpulan data primer dan sekunder. Data primer diambil dari *trending history operation DCS* setiap 2 jam sekali dari tanggal 14 sampai 20 Februari 2023. Pengumpulan data sekunder berupa sampel batu bara diambil dari laboratorium batu bara dan data referensi *baseline* diambil dari hasil *commissioning test turbin dan boiler performance* pada tiga variasi *gross load* yang berbeda [11].

Langkah selanjutnya adalah mencari persamaan interpolasi setiap parameter dari data referensi *baseline*. Interpolasi setidaknya dilakukan pada tiga variasi pembebanan yang berbeda [12]. Interpolasi setiap parameter dengan perubahan *gross load* dinyatakan layak apabila $R^2 > 75\%$. Karena tidak semua parameter memiliki korelasi dengan *gross load* maka pada parameter tersebut nilai *baseline* dapat diambil dari rata-rata nilai pada tiga variasi bebannya. Dari persamaan interpolasi tersebut, diperoleh nilai *baseline* yang sesuai pada setiap perubahan beban aktual. Setelah mendapatkan nilai *baseline*, dilanjutkan proses perbandingan dengan cara mencari deviasi parameter antara nilai *baseline* dengan data aktual yang didapatkan dari lapangan. Deviasi didapatkan dengan melihat selisih antara nilai *baseline* dengan data aktual. Setelah nilai deviasi didapatkan, nilai deviasi dibagi dengan nilai acuan perubahan parameter/*change* lalu dikali dengan nilai persentase acuan perubahan *heat rate* yang dapat dilihat pada buku EPRI/ASME. Dari perhitungan tersebut diketahui persentase rugi-rugi *heat rate*, nilai rugi-rugi *heat rate* dan besar kerugian finansial yang diakibatkan. Semua data akan dikali dua dengan asumsi rugi-rugi *heat rate* berlangsung selama 2 jam. Nilai yang didapatkan akan ditotal menjadi satu tabel rugi-rugi harian pada setiap tanggal pengujian, kemudian dibuat rata-rata rugi-rugi *heat rate* dan finansialnya. Selanjutnya dicari parameter utama yang menyebabkan rugi-rugi *heat rate* lalu dianalisis penyebab utama rugi-rugi yang terjadi dan perbaikan yang dapat dilakukan. Diagram sistem yang akan dianalisis dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Heat Balance PLTU Lontar

Adapun satuan data parameter yang diambil dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Satuan Parameter

No	Parameter	Satuan
1	Flue Gas Outlet APH	°C
2	O ₂ Inlet APH	%
3	Main Steam Temperature	°C
4	Main Steam Pressure	Bar
5	Hot Reheat Temperature	°C
6	SH Spray	°C
7	Air Pre Heater Leakage	%
8	Air Pre Heater Effectiveness	%
9	FDF Inlet Temperature	°C
10	Mill Air Outlet Temperature	°C
11	HP Turbine Efficiency	%
12	IP Turbine Efficiency	%
13	LP Turbie Efficiency	%
14	Final Temperature of FW Heater	°C
15	Condensor Vaccum	kPa
16	TTD HPH 1	°C
17	TTD HPH 2	°C
18	TTD HPH 3	°C
19	TTD LPH 5	°C
20	TTD LPH 6	°C
21	TTD LPH 7	°C
22	DCA HPH 1	°C
23	DCA HPH 2	°C
24	DCA HPH 3	°C
25	DCA LPH 5	°C
26	DCA LPH 6	°C
27	DCA LPH 7	°C
28	Moisture in Fuel	%
29	H in Fuel	%
30	Auxiliary Power	%
31	Make Up Water of Flow MS	%

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

3.1 Persamaan Interpolasi Baseline

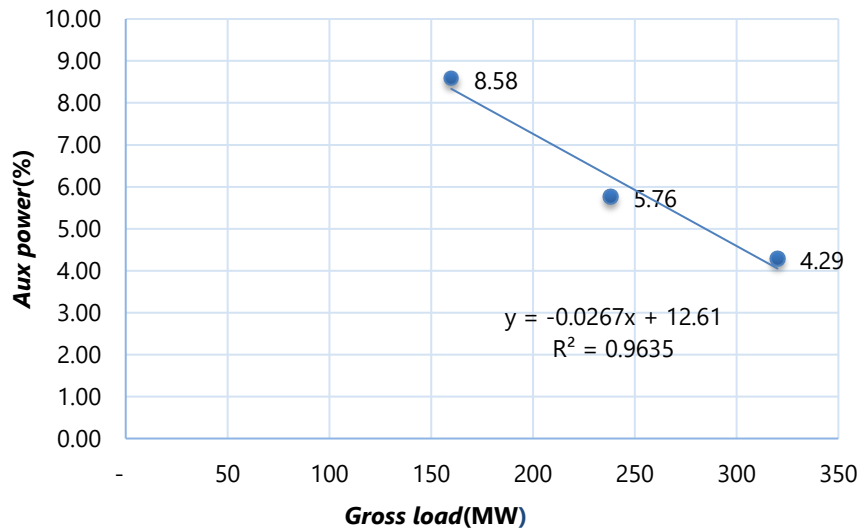
Dikarenakan referensi data komisioning yang didapatkan hanya dilakukan pada tiga variasi beban yaitu 50%, 75% dan 100% BMCR maka persamaan interpolasi hanya menggunakan tiga titik uji. Untuk membuat persamaan interpolasi yang baik dibutuhkan setidaknya data referensi tiap parameter pada tiga beban yang berbeda dengan $R^2 > 0,75$. Persamaan interpolasi dapat dicari menggunakan grafik scatter pada layout trendline and equation pada microsoft excel.

Tabel 2. Referensi Baseline

No	Parameter	50%	75%	100%
1	Gross load (MW)	160	238	320
2	Aux power (%)	8,58	5,76	4,29

Jika diketahui data referensi *baseline* seperti pada Tabel 2 maka persamaan interpolasi yang terbentuk pada diagram scatter microsoft excel akan seperti pada Gambar 3. Persamaan interpolasi yang

terbentuk adalah $-0,0267x + 12,61$, dengan x adalah nilai *gross load*. R^2 merupakan tingkat kelinearan data dengan nilai antara 0-1. Semakin tinggi nilai R^2 maka semakin bagus persamaan tersebut.



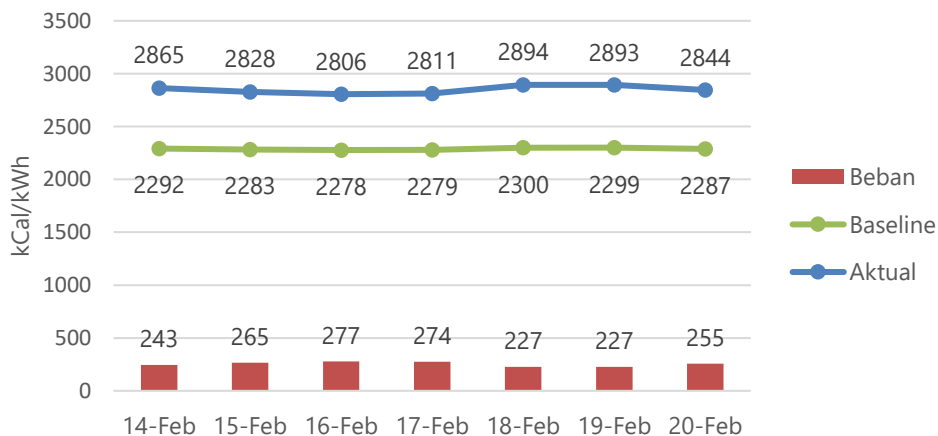
Gambar 3. Interpolasi Data *Aux power* dengan *Gross Load*

3.2 Perbandingan Kondisi Aktual dengan *Baseline*

Kondisi aktual dibanding *baseline* dapat diidentifikasi dengan membandingkan NPHR-nya. Gap antar NPHR menunjukkan terjadinya perubahan performa pada unit. Toleransi peningkatan NPHR *baseline* dengan aktual dapat dicari dengan menghitung koreksi dari faktor pemakaian *make up water*, *aux power*, dan kualitas batu bara.

Tabel 3. Data koreksi NPHR

Parameter	Persentase Koreksi (%)	Dampak Terhadap HR (%)
<i>Make up water</i>	4,98	1,841
<i>Aux power</i>	0,01	0,011
<i>Coal moisture</i>	-1,67	-0,284
<i>Coal hydrogen</i>	2,19	2,632
Total		4,2%



Gambar 4. Perbandingan Kondisi Aktual dengan *Baseline*

Dari perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan grafik seperti terlihat pada Gambar 4. Dimana dapat kita lihat bahwa aktual NPHR lebih tinggi dibandingkan *baseline* NPHR. Hal ini menunjukkan telah terjadi penurunan performa pada unit. Dari grafik dapat kita hitung rata-rata peningkatan NPHR sebesar 561 kCal/kWh atau 19,7% dari rata-rata aktual NPHR. Dari Tabel 3 diketahui bahwa toleransi normal gap NPHR adalah 4,2%. Maka dapat disimpulkan bahwa unit pembangkit tidak dalam kondisi normal karena peningkatan NPHR melebihi batas toleransi, perlu dilakukan identifikasi lebih lanjut untuk mengetahui faktor penyebab peningkatan NPHR.

3.3 Rugi-Rugi Heat Rate dan Biaya

Data rugi-rugi *heat rate* dapat dilihat pada Tabel 4 sebagai berikut.

Tabel 4. Contoh Perhitungan Rugi-Rugi Heat Rate

Parameter	Base	Act	Deviasi	Factor		Losses %HR	kCal/kWh	Rp(Juta)/jam
				Change	%HR			
Flue gas outlet APH [°C]	144,34	173,25	28,91	5,55	0,350	1,823	41,37	2,459

Dari data deviasi parameter seperti yang ditampilkan pada Tabel 4 dapat dihitung kerugian biaya untuk setiap parameter operasi dengan cara sebagai berikut.

Diketahui suhu *flue gas*:

Aktual : 173,25 °C

Baseline : 144,34 °C

Maka terdapat selisih antara aktual dan *baseline* sebesar 28,91°C. Sedangkan mengacu kepada standar EPRI setiap gap suhu *flue gas* sebesar 5,55°C akan menaikkan *heat rate* sebesar 0,350%. Sehingga persentase *losses* HR dapat kita hitung $(28,91^{\circ}\text{C} / 5,5^{\circ}\text{C} \times 0,350) = 1,823\%$. Diketahui NPHR *baseline* adalah 2269,66 kcal/kwh, maka kenaikan *heat rate* akibat deviasi suhu *flue gas* dapat kita hitung $(1,823\% \times 2269,66 \text{ kcal/kwh}) = 41,39 \text{ kcal/kwh}$. Untuk perhitungan biaya yang bisa dihemat, kita bisa lengkapi dengan data-data seperti terlihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Acuan Perhitungan Kerugian Biaya

Item	Unit	Nilai
Asumsi harga batu bara	Rp/kg	940
HHV batu bara saat <i>performance test</i>	kcal/kg	4234,28
Harga batu bara	Rp/kcal	0,222
Net power capacity	MW	315,00
Net capacity factor	%	85%

Dampak deviasi parameter terhadap biaya bisa dihitung dengan menggunakan rumus (1) yaitu $0,22 \text{ Rp/Kcal} \times 315.000 \text{ kW} \times 85\% \times 41,39 \text{ kCal/kWh}$. Maka kerugian energi karena perbedaan suhu *flue gas* terhitung sebesar Rp 2.459.054 per jam. Hasil perhitungan rata-rata *losses heat rate* selama pengujian dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Rata-Rata Losses Heat Rate

No	Parameter	Rata-rata kerugian	
		Energi [kCal/kWh]	Biaya [Juta/bulan]
1	<i>NPHR</i>	560,56	23989,97
2	<i>Identified heat loss</i>	358,533	15344,05
3	<i>Unidentified heat loss</i>	202,02	
A	Operator controllable	96,26	4119,63
1	<i>Flue gas outlet APH</i>	51,70	2212,39
2	<i>O₂ inlet APH</i>	-9,66	-413,40
3	<i>Main steam temperature</i>	3,77	161,34
4	<i>Main steam pressure</i>	1,75	74,76
5	<i>Hot reheat temperature</i>	1,16	49,69
6	<i>SH spray</i>	47,55	2034,85
B	Kinerja boiler	36,58	1565,45
1	<i>Air pre heater leakage</i>	3,15	134,78
2	<i>Air pre heater effectiveness</i>	34,51	1476,74
3	<i>FDI inlet temperature</i>	-0,44	-18,68
4	<i>Mill air outlet temperature</i>	-0,64	-27,38
C	Kinerja turbin	142,96	6118,17
1	<i>HP turbine efficiency</i>	87,96	3764,51
2	<i>IP turbine efficiency</i>	27,10	1159,60
3	<i>LP turbine efficiency</i>	-3,82	-163,34
4	<i>Final temperature of FW heater</i>	-2,03	-87,01
5	<i>Condensor vacuum</i>	19,70	843,00
6	<i>TTD HPH 1</i>	-0,76	-32,73
7	<i>TTD HPH 2</i>	0,06	2,68
8	<i>TTD HPH 3</i>	-1,01	-43,29
9	<i>TTD LPH 5</i>	-0,45	-19,28
10	<i>TTD LPH 6</i>	-0,12	-5,00
11	<i>TTD LPH 7</i>	0,00	0,04
12	<i>DCA HPH 1</i>	2,73	116,80
13	<i>DCA HPH 2</i>	4,50	192,43
14	<i>DCA HPH 3</i>	5,17	221,35
15	<i>DCA LPH 5</i>	5,21	223,10
16	<i>DCA LPH 6</i>	-1,54	-65,72
17	<i>DCA LPH 7</i>	0,26	11,02
D	Kualitas batubara	53,74	2299,98
1	<i>Moisture in fuel</i>	-6,50	-278,05
2	<i>H in fuel</i>	60,24	2578,03
E	Lain-lain	28,99	1240,81
1	<i>Auxiliary power</i>	0,06	2,66
2	<i>Make up water of flow MS</i>	28,93	1238,15

Dengan asumsi bahwa semua rugi-rugi *heat rate* dapat diperbaiki dan rata-rata nilai parameter aktual operasi pembangkit sama seperti keadaan ketika pengujian maka dapat kita ketahui rata-rata potensi penghematan energi dan penghematan biaya sebagai berikut:

a) Rata-rata potensi penghematan energi adalah 358,53 kCal/kWh. Dengan rincian sebagai berikut:

1. Kerugian karena faktor *operator controllable*: 96,26 kCal/kWh
2. Kerugian karena menurunnya kinerja *boiler*: 36,58 kCal/kWh
3. Kerugian karena menurunnya kinerja turbin: 142,96 kCal/kWh

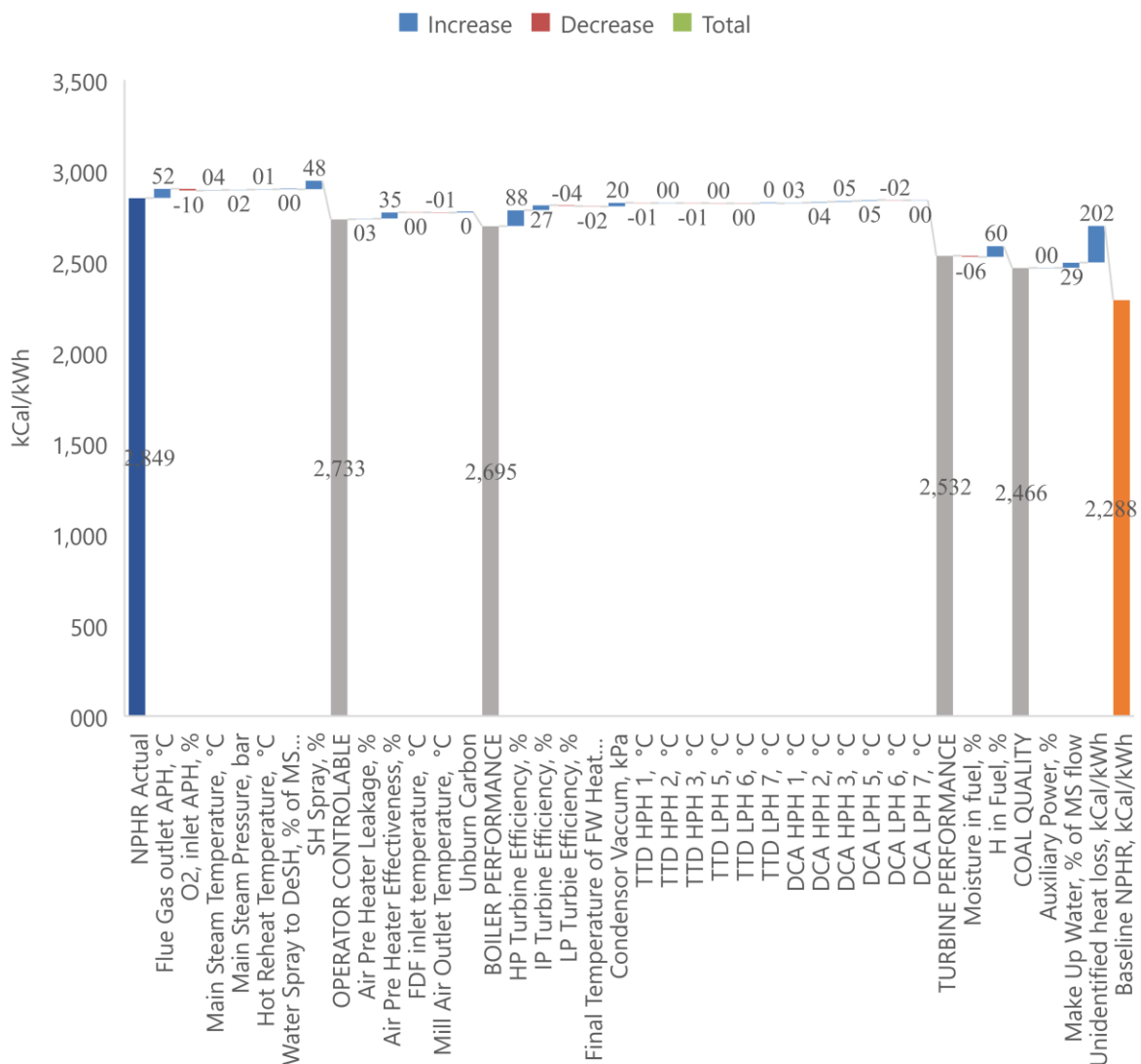
4. Kerugian karena menurunnya kualitas batu bara: 53,73 kCal/kWh
5. Kerugian karena faktor lainnya sebesar: 28,99 kCal/kWh

b) Rata-rata penghematan biaya sebesar Rp15.344.046.000/bulan. Dengan rincian sebagai berikut:

1. Kerugian karena faktor *operator controlable*: Rp 4.119.631.000 per bulan.
2. Kerugian karena menurunnya kinerja *boiler*: Rp 1.565.453.000 per bulan.
3. Kerugian karena menurunnya kinerja turbin: Rp 6.118.173.000 per bulan.
4. Kerugian karena menurunnya kualitas batu bara: Rp 2.299.981.000 per bulan.
5. Kerugian karena faktor lainnya sebesar: Rp 9.596.702.000 per bulan.

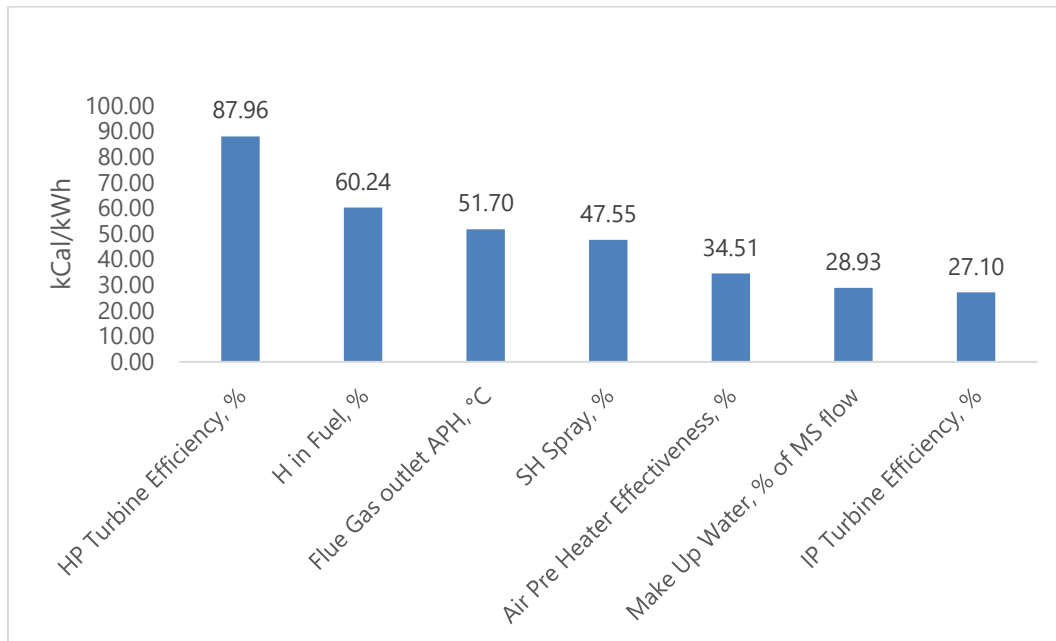
3.4 Perbaikan Kinerja

Banyak faktor yang menyebabkan penurunan kinerja suatu pembangkit. Selain masalah umur pembangkit, penurunan kinerja juga diakibatkan oleh kurangnya mitigasi kerusakan yang berujung pada rusaknya peralatan. Oleh karena itu pengujian rutin perlu dilakukan sebagai langkah mitigasi untuk mempermudah analisis penurunan kinerja.



Gambar 5. Diagram Pareto Heat Loss

Dari Gambar 5 dapat diketahui parameter yang mengalami peningkatan dan penurunan rugi-rugi *heat rate*. Parameter-parameter teratas yang mengalami peningkatan pada diagram *Pareto* dapat dikelompokkan menjadi parameter yang berkontribusi besar pada rugi-rugi *heat rate*. Berikut tujuh parameter teratas yang menyebabkan rugi-rugi *heat rate*.

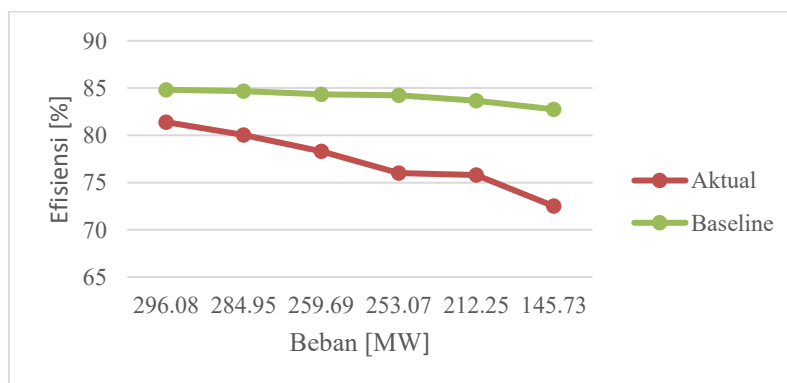


Gambar 6. Tujuh Parameter Teratas Penyebab *Heat Loss*

Dari Gambar 6 dapat kita ketahui bahwa penyebab utama penurunan kinerja unit adalah efisiensi HP turbin dengan jumlah *losses* sebesar 87,96 kCal/Kwh atau 24,53% dari total rugi-rugi. Mayoritas parameter penyumbang *heat loss* memiliki korelasi dengan beban pembangkit. Hal ini sejalan dengan data dari diagram Gambar 4 dimana perubahan beban pembangkit linier terhadap rugi-rugi *heat rate* dikarenakan penyebab utama rugi-rugi *heat rate* adalah parameter yang memiliki korelasi kuat dengan *gross load*. Adapun identifikasi penyebab penurunan efisiensi HP turbin sebagai berikut.

3.4.1. Perubahan *Gross Load*

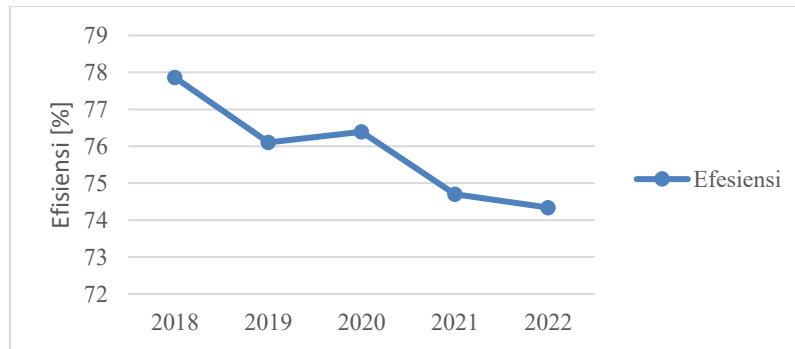
Efisiensi HP turbin berbanding lurus dengan perubahan *gross load* pembangkit, dimana semakin tinggi *gross load* maka semakin tinggi pula efisiensi turbin HP. Pengaruh perubahan *gross load* terhadap efisiensi HP turbin dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Efisiensi Turbin di Setiap *Gross Load*

3.4.2. Lifetime

Lifetime merupakan faktor lain penyebab rugi-rugi *heat rate* pada HP turbin. Umumnya pada 5 tahun pertama penurunan kinerja turbin tidak akan terlalu besar selama perawatan berkala dilakukan dengan baik. Namun setelah 5 tahun, penurunan kinerja turbin akan terlihat. Penurunan efisiensi HP turbin unit 2 PLTU Banten 3 Lontar dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Penurunan Efisiensi Turbin per Tahun

3.4.3. Solid Particles of Nozzle Block

Dari buku *heat rate improvement reference manual* halaman 2-29 pada *heat rate logic tress-turbin losses* dapat kita identifikasi penyebab menurunnya efisiensi HP berdasarkan deviasi parameter pada Tabel 7.

Tabel 7. Deviasi Parameter Efisiensi Turbin HP

Parameter	75%BMCR		Keterangan
	Base	Act	
Beban	238,83	236,07	
Pressure inlet	13,532	14,11	Naik
Temperature inlet	536,408	525,74	Turun
Flow	735,021	916,43	Naik
Pressure outlet	2,882	3,65	Naik
Temperature outlet	328,079	342,94	Naik
Pressure ratio	4,7: 1	3,9: 1	Turun

Dari Tabel 7 Dapat kita analisis beberapa perubahan parameter aktual dibanding *baseline*. Dari bagan *turbin losess* dapat kita ketahui bahwa terdapat 4 faktor yang menyebabkan peningkatan *flow area* yang diikuti penurunan *pressure ratio*, *penurunan* efisiensi, dan penurunan tekanan *inlet*. Empat faktor tersebut yaitu *spill strip or packing leakage*, *erosion of turbin satges*, *solid particles of nozzle block*, dan *mechanical blade damage*. Dari empat faktor tersebut diketahui bahwa terjadinya peningkatan tekanan pada *downstream* dan peninkkatan rasio tekanan *inlet throttle* terjadi karena *solid particles of nozzle block*. Rekomendasi perbaikan pada penurunan efisiensi HP turbin dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Rekomendasi Perbaikan pada Penurunan Efisiensi Turbin HP

Penyebab deviasi	Rekomendasi perbaikan
Perubahan <i>gross load</i>	Memaksimalkan kinerja turbin dengan mengatur parameter turbin agar mendekati dengan parameter <i>baseline</i>
<i>Life time</i> turbin	Memaksimalkan program perawatan periodik pada turbin untuk menahan laju penurunan efisiensi
<i>Solid particle of nozzle block</i>	<ol style="list-style-type: none"> Perbaiki kualitas air Lakukan pengecekan <i>leaks</i> pada <i>condensor</i> Lakukan perencanaan pengecekan <i>blades</i> pada <i>overhaul</i> terdekat

4. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diketahui untuk menetapkan persamaan interpolasi *baseline* yang baik dibutuhkan setidaknya data parameter komisioning pada tiga beban yang berbeda. Rata-rata perbedaan NPHR sebesar 561 kCal/kWh atau 19,7%. Toleransi gap NPHR aktual dibanding *baseline* sebesar 4,2%. Dapat disimpulkan pembangkit tidak dalam kondisi normal karena peningkatan NPHR melebihi batas toleransi. Penyebab utama deviasi adalah rugi-rugi *heat rate* yang diakibatkan oleh penurunan efisiensi HP turbin dengan rata-rata *losses* sebesar 87,96 kCal/kWh atau 24,53% dari total *losses*. Rekomendasi perbaikan kinerja HP turbin adalah memaksimalkan kinerja turbin dengan mengatur parameter turbin agar mendekati dengan parameter *baseline*, maksimalkan program perawatan periodik pada turbin untuk menahan laju penurunan efisiensi, memperbaiki kualitas air, melakukan pengecekan *leaks* pada kondensor, dan melakukan perencanaan pengecekan *blades* pada *overhaul* terdekat. Rata-rata potensi penghematan energi dari perbaikan *heat rate* adalah 358,53 kCal/kWh sedangkan rata-rata penghematan biaya sebesar Rp. 15.344.046.000 per bulan. Semakin kecil rentang waktu pengambilan data akan meningkatkan keakuratan nilai kerugian energi dan biaya.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim operasi PLTU Banten 3 Lontar, tim Engineering efisiensi serta tim Laboratorium atas dukungan dalam pengumpulan data.

6. Daftar Pustaka

- [1] F. D. Pratama and Y. J. Pribadi, "Penerapan Siklus Rankine pada Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sederhana Sebagai Media Pembelajaran," *Publikasi Online Mahasiswa Tek. Mes. Univ. 17 Agustus 1945 Surabaya*, vol. 4, no. 2, pp. 1–10, 2021.
- [2] A. H. Sahid and D. Hendrawati, "Analisa Heat Rate dengan Variasi Beban pada PLTU Paiton Baru (Unit 9)," *EKSERGI: J. Tek. Energi*, vol. 10, no. 1, pp. 23–28, 2014.
- [3] M. Syukrillah, K. H. Khwee, and A. Hiendro, "Analisis Perhitungan Efisiensi Energi di Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBM) PT. Harjohn Timber Kubu Raya," *J. Tek. Elektro Univ. Tanjungpura*, vol. 2, no. 1, 2019.
- [4] F. Anagra, "Audit Energi & Peluang Penghematan Energi," *JTE: J. Tek. Elektro, Univ. Mercu Buana*, vol. 11, no. 1, pp. 32–38, 2020.
- [5] H. B. P. Parapa, "Dampak Perubahan Parameter Closed Feedwater Heater terhadap Heat Rate Losses pada PLTU Kapasitas 110 MW," *CYCLOTRON: J. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 1–4, 2021.
- [6] M. R. Fahlevy, D. Mardiansah, and D. P. Jannus, "Analisa Performa PLTGU Kapasitas 740 MW terhadap Pola Operasi dan Pembebanan Menggunakan Heat Rate Gap Analysis," in *Prosiding Sem. Nas. Tek. Mes. PNJ*, pp. 1199–1207, 2019.
- [7] J. Tsou and F. Daniel, *Heat Rate Improvement Reference Manual*. 1998.
- [8] N. Maulana Wardoyo, E. Prabowow, and Nasikin, "Analisis Air Leakage Terhadap Unjuk Kerja Air Preheater A Sebelum dan Sesudah Overhaul di PLTU Adipala 1 X 660 MW PT. PLN (Persero)," *J. Power Plant*, vol. 8, no. 2, pp. 110–119, 2020.
- [9] N. K. Gothwal, A. K. Mishra, and S. K. Mehar, "Performance Analysis of Air Pre-heater," *International J. of Trend in Res. and Dev.*, vol. 5, no. 2, pp. 526–528, 2018.
- [10] V. Medica-Viola, V. Mrzljak, N. Anđelić, and M. Jelić, "Analysis of Low-Power Steam Turbine with One Extraction for Marine Applications," *Nase More: International J. of Maritime Science and Tech.*, vol. 67, no. 2, pp. 87–95, 2020.
- [11] E. Saputro and A. Mursadin, "Analisis Efisiensi Turbin Uap Unit 1 di PT. PJB UBJOM PLTU Pulau Pisau Kalimantan Tengah," *JTAM Rotary: J. Tugas Akhir Mahasiswa Rotary*, vol. 3, no. 1, pp. 57–67, 2021.
- [12] A. Setyono and S. Novianto, "Penerapan Interpolasi Linier untuk Deteksi Garis Lurus pada Citra Gambar," *J. Techo.COM: Tekno. dan Informasi*, vol. 12, no. 3, pp. 143–149, 2013.