

## ANALISA EKSERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP XYZ KAPASITAS 1070 MW MENGGUNAKAN PEMODELAN CYCLE TEMPO

Putro Adi Nugroho<sup>1</sup>, Berkah Fajar T.K.<sup>2</sup>, Eflita Yohana<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: [putroadinugroho2@gmail.com](mailto:putroadinugroho2@gmail.com)

### Abstrak

Peningkatan performa PLTU merupakan salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi dampak kerusakan lingkungan, mengurangi konsumsi bahan bakar sehingga PLTU bekerja dengan kondisi lebih baik dan mendapatkan keuntungan lebih baik. PLTU yang beroperasi pada performa yang buruk hanya akan menyebabkan kerugian dan berpotensi merusak lingkungan karena emisinya lebih buruk, dan konsumsi bahan bakarnya lebih banyak. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai efisiensi eksergi dan energi pada PLTU XYZ yang memiliki kapasitas produksi sebesar 1070 MW. Dengan mengetahui data efisiensi pembangkit ini, maka performa pembangkit dapat diidentifikasi dan dapat dilakukan peningkatan performa berdasarkan data efisiensi yang diperoleh. Software yang digunakan dalam penelitian ini adalah software Cycle-Tempo. Analisa dilakukan pada tiga kondisi variasi beban yaitu beban 50%, 75% dan 100%. Dari hasil penelitian ini, didapatkan nilai efisiensi pembangkit pada kondisi 50% sebesar 38.76%, kondisi 75% sebesar 40,75% dan kondisi 100% sebesar 41,82%. Destruksi eksergi terbesar terjadi pada boiler dan reheater untuk kondisi 50% sebesar 661.18 MW dengan persentase destruksi eksergi 51.33%, kondisi 75% sebesar 938.28 MW dengan persentase destruksi eksergi 50.07% dan kondisi 100% sebesar 1214.59 MW dengan persentase destruksi eksergi 49.35%. Nilai destruksi eksergi terkecil pada CEP pada kondisi 50% sebesar 1.44 MW dengan persentase destruksi eksergi 0.11%, kondisi 75% sebesar 1.46 MW dengan persentase destruksi eksergi 0.08% dan kondisi 100% sebesar 1.48 MW dengan persentase destruksi eksergi 0.06%. Nilai energi losses terbesar pada komponen boiler kondisi 50% sebesar 935.68 MW, kondisi 75% sebesar 1340.6 MW dan kondisi 100% sebesar 1738.9 MW.

**Kata kunci** : cycle tempo; destruksi eksergi; eksergi; energi; energy losses; pltu

### Abstract

*Improving power plant performance is one way to increase efficiency, reduce the impact of environmental damage, reduce fuel consumption so that the powerplant works in better conditions and earns better profits. Steam power plants that operate at poor performance will only cause losses and have the potential to damage the environment because they have worse emissions and consume more fuel. The purpose of this study was to determine the value of exergy and energy efficiency at power plant XYZ which has a production capacity of 1070 MW. By knowing the efficiency data of this generator, the performance of the generator can be identified and performance improvements can be made based on the efficiency data obtained. The software used in this research is Cycle-Tempo software. The analysis was carried out on three load variations conditions, namely 50%, 75% and 100% load. From the results of this study, the efficiency value of the power plant at 50% was 38.76%, 75% was 40.75% and 100% was 41.82%. The largest exergy destruction occurred in boilers and reheaters for 50% conditions of 661.18 MW with a percentage of exergy destruction of 51.33%, 75% conditions of 938.28 MW with a percentage of exergy destruction of 50.07% and 100% conditions of 1214.59 MW with an exergy destruction percentage of 49.35%. The smallest exergy destruction value at CEP at 50% condition was 1.44 MW with an exergy destruction percentage of 0.11%, 75% condition was 1.46 MW with an exergy destruction percentage of 0.08% and 100% condition was 1.48 MW with an exergy destruction percentage of 0.06%. The greatest value of energy losses in the boiler component at 50% condition is 935.68 MW, 75% condition is 1340.6 MW and 100% condition is 1738.9 MW.*

**Keywords** : cycle tempo; energy; energy losses; exergy; exergy destruction; power plant

### 1. Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga uap telah menjadi salah satu teknologi paling dominan dan efisien dalam menghasilkan energi listrik dalam jumlah besar [1]. Pembangkit Listrik Tenaga Uap XYZ merupakan bagian integral dari infrastruktur energi nasional, yang berperan penting dalam memenuhi permintaan energi yang terus meningkat. Oleh karena itu, perbaikan efisiensi operasional dan peningkatan performa keseluruhan pembangkit listrik ini akan memiliki dampak signifikan pada ekonomi, lingkungan, dan keberlanjutan sistem energi secara keseluruhan.

Aljundi melakukan penelitian mengenai pengaruh temperature lingkungan terhadap efisiensi eksergi dan energi pada PLTU menggunakan REFROP [2]. Kumar dkk. melakukan simulasi dan optimasi tentang siklus PLTU dengan menganalisa eksergi dan energi terhadap variasi kondisi uap yaitu subkritis, superkritis, dan ultra superkritis [3]. Rudiyanto dkk. melakukan analisa eksergi pada PLTU dengan beban 100% dengan metode empiris dan secara spesifik menganalisa pengaruh tekanan boiler terhadap efisiensi eksergetik dari boiler dengan menggunakan EES [4]. Mohammed melakukan studi tentang pengaruh jumlah feedwater heater terhadap efisiensi PLTU dengan perhitungan empiris [5]. Rajeev dkk. melakukan penelitian tentang analisa eksergi dan energi pada PLTU dengan memvariasikan temperature udara, temperature cooling water dan tekanan condenser terhadap efisiensinya [6]. Pachaiyappan dan Prakash melakukan penelitian tentang usaha peningkatan efisiensi boiler PLTU dengan optimasi udara pembakaran [7]. Karakurt dan Gunes melakukan analisa performa PLTU pada *part load condition* dan melakukan variasi tekanan dan temperatur pada turbin HP [8].

Dalam penelitian ini, akan dilakukan simulasi berdasarkan data operasional dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap XYZ dengan menggunakan pemodelan Cycle Tempo pada kondisi beban 50%, 75% dan 100%. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang tingkat kerugian energi yang terjadi pada setiap tahap siklus pembangkitan, serta mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang mempengaruhi performa keseluruhan sistem. Dengan demikian, penelitian ini akan memberikan kontribusi yang berarti dalam upaya mencari solusi untuk meningkatkan efisiensi operasional, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, dan mengurangi dampak lingkungan dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap XYZ. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat menjadi referensi penting bagi industri energi dan pembangkit listrik dalam upaya mereka untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan operasional.

## 2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan Cycle Tempo untuk menganalisis eksergi dan energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap XYZ dengan kapasitas 1070 MW. Pendekatan pemodelan Cycle Tempo digunakan sebagai alat bantu untuk mensimulasikan dan memodelkan kinerja sistem pembangkit listrik dari sudut pandang termodinamika. Data yang dapat digunakan sebagai bahan analisa dan input parameter program dapat menggunakan data heat mass balance sebagai data masukan. Data ini akan mencakup parameter operasional seperti suhu, tekanan, laju aliran massa, dan karakteristik operasional lainnya yang relevan. Data dan skema yang telah didapat dari diagram *heat mass balance* selanjutnya dibuat model sirkuit yang akan mencakup semua komponen penting dalam siklus pembangkit listrik, termasuk boiler, turbin, kondensor, dan sistem lainnya. Model cycle tempo yang telah dirancang lalu diimplementasikan dengan menginput parameter operasional dari data yang telah dikumpulkan untuk melakukan simulasi sistem secara komprehensif.

### 2.1 Governing Equation

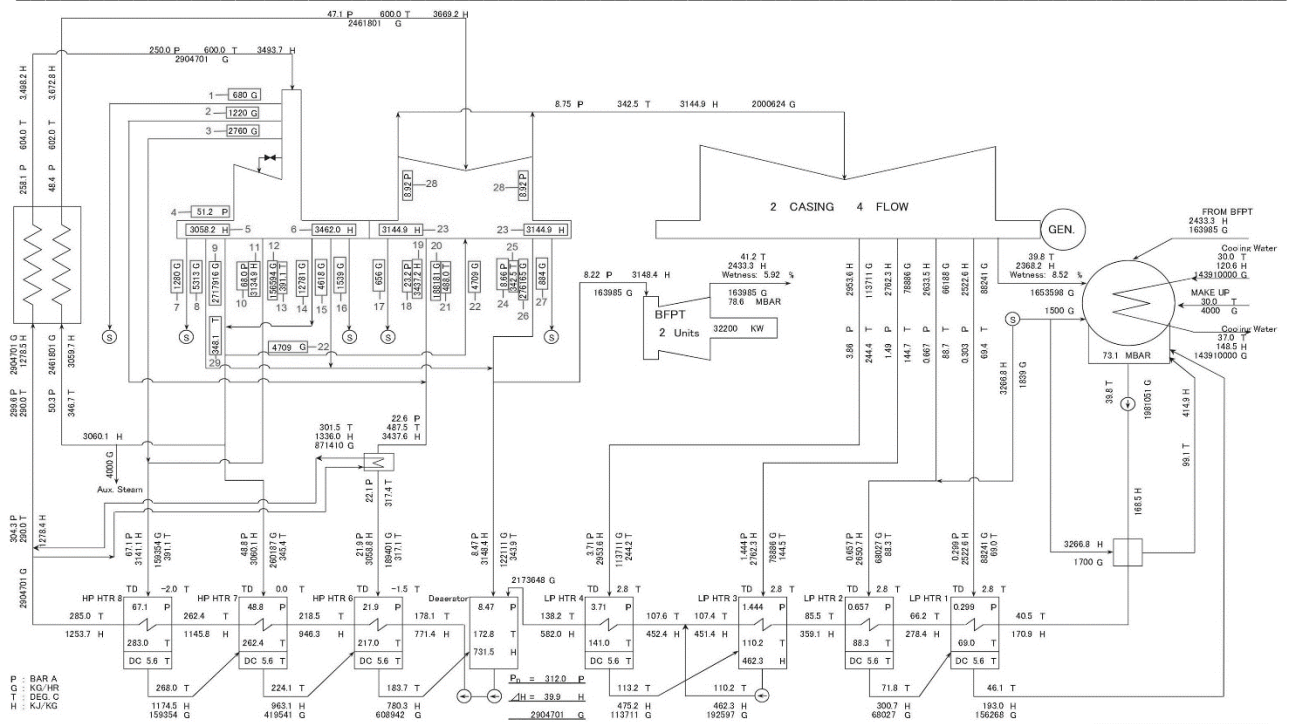
Persamaan pembangun yang digunakan dalam kasus perhitungan eksergi pada PLTU XYZ dapat ditunjukkan melalui tabel berikut

**Tabel 1.** Governing Equation [9]

Item	Persamaan
Kondisi Tunak	$\dot{m}_i = \dot{m}_e$ (1)
Kesetimbangan Eksergi pada Sistem Massa Atur	$(E_2 - E_1) = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q - [W - P_0(V_2 - V_1)] - T_0 S_{gen}$ (2)
Perubahan Eksergi	$(E_2 - E_1) = (U_2 - U_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1)$ (3)
Perpindahan Eksergi Mendampingi Kalor	$E_q = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q$ (4)
Perpindahan Eksergi Mendampingi Kerja	$E_w = W - P_0(V_2 - V_1)$ (5)
Eksergi Setiap State	$E_i = \dot{m}_i [(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)]$ (6)
Destruksi Eksergi	$\dot{E}_D = \dot{E}_i - \dot{E}_e$ (7)
Efisiensi Eksergi	$\eta = \frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_F} = 1 - \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_F}$ (8)

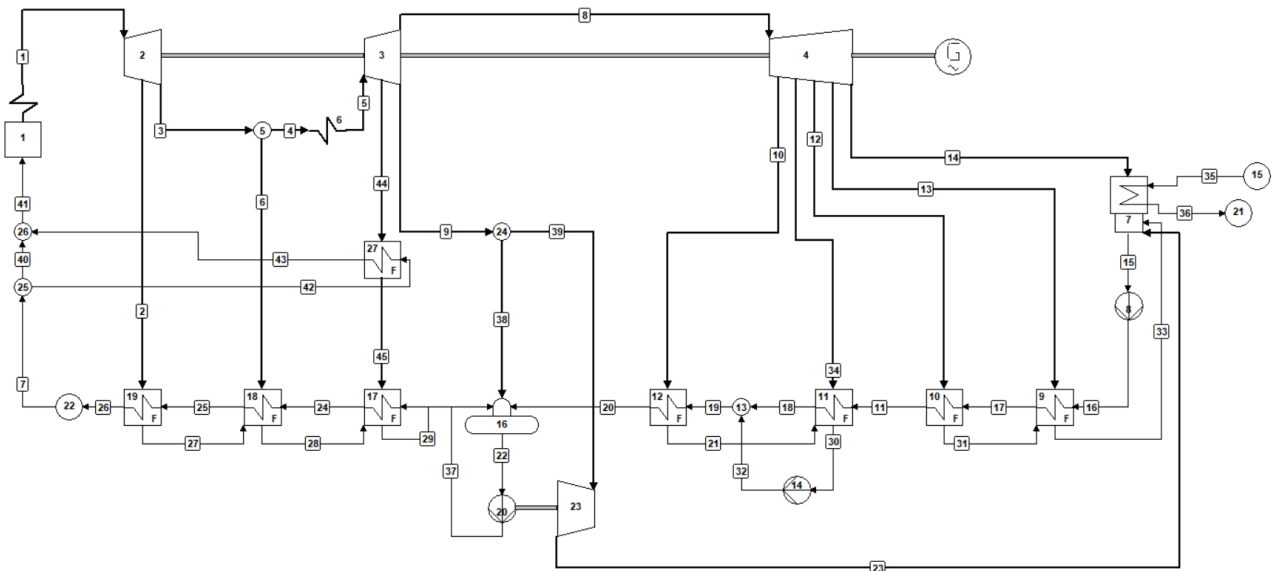
### 2.2 Data dan Parameter

Skema sistem dibuat berdasarkan skema dari heat mass balance diagram. Pada heat mass balance ini terdapat data data parameter penting yang perlu digunakan dalam kalkulasi yaitu komponen yang digunakan, kondisi fluida yaitu temperatur, tekanan, entalpi dan laju aliran massa. Pada data heat mass balance diagram, terdapat banyak percabangan pipa dan komponen minor seperti *steam seal* dan *gland steam condenser*.



Gambar 1. Heat Mass Balance Diagram PT.XYZ pada Load 100%.

Dari data heat mass balance ini, dibuat pemodelan pada cycle tempo dengan membuat sirkuit yang sama namun dengan penyederhanaan. Penyederhanaan dilakukan untuk mempermudah proses kalkulasi mencapai kondisi yang konvergen. Percabangan pipa yang sangat kompleks, jalur steam seal dan komponen minor seperti gland steam condenser dieliminasi. Namun penyederhaan sistem juga harus dilakukan pertimbangan sehingga program valid atau sudah merepresentasikan kondisi aslinya. Skema PLTU XYZ ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 1. Skema Sistem PLTU XYZ

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Validasi

Untuk membuktikan bahwa metode dan pemodelan simulasi sudah benar maka dilakukan validasi dengan membandingkan hasil simulasi dengan data *heat mass balance*. Parameter yang dapat dijadikan sebagai pembanding adalah *mass flow rate* dan *entalpi* [6].

**Tabel 2** Perbandingan *Mass Flow Rate* dari *Cycle Tempo* dan Data HMB

Komponen	<i>Massflow</i> ( <i>Cycle Tempo</i> )	<i>Massflow</i> (HMB)	Error (%)	Entalpi ( <i>Cycle Tempo</i> )	Entalpi (HMB)	Error (%)
Boiler	788.30	806.86	2.30	3498.15	3498.20	0.00
HPT outlet	745.18	762.00	2.21	3059.73	3059.70	0.00
Reheater	674.50	683.83	1.36	3669.16	3672.80	0.10
IPT outlet	558.90	555.73	0.57	3156.82	3144.90	0.38
LPT outlet	465.50	459.30	1.35	2368.16	2368.20	0.00
Condensor	532.90	550.00	3.11	166.70	168.50	1.00
CEP	532.90	550.00	3.11	170.10	170.90	0.47
LPH 1	532.90	550.00	3.11	277.60	278.40	0.29
LPH 2	532.90	550.00	3.11	358.32	359.10	0.22
LPH 3	532.90	550.00	3.11	450.78	451.40	0.14
LPH 4	584.50	603.80	3.20	581.46	582.00	0.09
Deaerator	788.30	806.86	2.30	731.46	731.50	0.01
HPH 6	788.30	806.86	2.30	946.30	946.30	0.00
HPH 7	788.30	806.86	2.30	1145.80	1145.80	0.00
HPH 8	788.30	806.86	2.30	1253.38	1253.70	0.03
Boiler inlet	788.32	806.86	2.30	1278.52	1278.50	0.00

Jika melihat data perbandingan tersebut, *massflow rate* pada sistem sudah sesuai dengan *massflow rate* pada HMB yaitu dengan error setiap titik dibawah 5% dan nilai error entalpi dibawah 1%. Perbedaan ini terjadi karena adanya penyederhanaan skema pemodelan dari kondisi asli. Itu artinya, program yang dibuat sudah valid dan mewakili kondisi aslinya.

### 3.2 Perbandingan Net Plant Efficiency terhadap Variasi Beban 50%, 75% dan 100%.

Untuk mengetahui kondisi kerja paling optimal dari pembangkit, maka perlu dilakukan pengujian pada kondisi kerja yang berbeda. Pada penelitian ini, 3 kondisi kerja disimulasikan untuk mendapat data efisiensi. 3 kondisi kerja ini adalah kondisi beban yang sering dialami oleh pembangkit yaitu 50%, 75% dan 100%. Output data net plant efficiency dari simulasi *Cycle Tempo* pada kondisi beban tersebut ditunjukkan pada tabel berikut.

**Tabel 3.** Perbandingan Net Plant Efficiency terhadap Variasi Beban 50%, 75% dan 100%.

Load	Net Energy Efficiency	Gross Energy Efficiency	Net Exergy Efficiency	Gross Exergy Efficiency
50%	40.64%	41.39%	38.81%	39.52%
75%	42.46%	42.56%	40.5%	40.59%
100%	43.13%	43.21%	41.13%	41.21%

Berdasarkan data hasil perhitungan software *Cycle Tempo*, efisiensi energi dan eksergi dari pembangkit naik seiring dengan kenaikan beban yang mana hal ini sesuai dengan penelitian dari Hasananto dkk. tentang analisa PLTU terhadap beban dengan *software Gatecycle* [10]. Peningkatan efisiensi ini terjadi karena bahan bakar yang digunakan dimaksimalkan sepenuhnya dalam proses konversinya menjadi energi listrik, komponen utama seperti turbin, generator dan kondensor beroperasi lebih efisien karena operasinya mendekati kondisi desain dan perbandingan kehilangan termal dengan konversi listrik yang lebih rendah pada beban tinggi, serta stabilitas operasional yang lebih baik pada kondisi beban tinggi.

### 3.3 Efisiensi Eksergi Komponen PLTU XYZ pada Kondisi Beban 50%, 75% dan 100%.

Hasil dari data data output dari *cycle tempo* antara lain efisiensi eksergi, destruksi eksergi dan energi losses pada setiap komponen. Efisiensi eksergi dari komponen PLTU XYZ pada masing-masing kondisi beban 50%, 75%, dan 100% akan dibandingkan dan dievaluasi. Temuan-temuan ini akan memberikan wawasan tentang sejauh mana efisiensi eksergi PLTU XYZ berubah dengan perubahan tingkat beban operasionalnya.

**Tabel 4.** Efisiensi Eksergi Komponen pada kondisi Beban 50%, 75% dan 100%.

Komponen	Efisiensi Eksergi (%)		
	Load 50%	Load 75%	Load 100%
Pembangkit	38.81	40.5	41.13
Boiler	45.44	47.09	47.91
High Pressure Turbine	93.8	93.67	95.92
Reheater	50.59	50.03	50
Intermediate Pressure Turbin	95.97	96.16	96.15
Low Pressure Turbine	92.15	92.01	91.13
Condenser	78.49	77.7	76.14
Condensate Extraction Pump	10.97	15.4	20.85
Low Pressure Heater 1	80.07	76.55	75.21
Low Pressure Heater 2	86.83	87.06	86.3
Low Pressure Heater 3	88.22	88.94	89.17
Low Pressure Heater 4	86.16	87.4	87.86
Deaerator	86.64	88.23	89.09
Boiler Feed Pump Turbine	80.87	80.94	85.33
Boiler Feed Pump	32.07	34.41	36.11
High Pressure Heater 6	94.68	95.23	95.23
High Pressure Heater 7	94.87	96.16	96.5
High Pressure Heater 8	96.29	96.5	96.82
Desuperheater	69.02	82.91	82.67

### 3.4 Destruksi Eksergi Komponen PLTU XYZ pada Kondisi Beban 50%, 75% dan 100%.

Besarnya destruksi eksergi pada suatu sistem dapat menjadi evaluasi sistem untuk mencapai kondisi operasi yang lebih baik. Penentuan lokasi terjadinya kerusakan eksergi terbesar diperoleh dengan memprosentase besar eksergi destruksi pada masing masing komponen terhadap eksergi destruksi total yang terjadi.

**Tabel 5.** Destruksi Eksergi Komponen pada kondisi Beban 50%, 75% dan 100%.

Komponen	Beban 50%		Beban 75%		Beban 100%	
	Destruksi Eksergi (MW)	Presentase Destruksi Eksergi(%)	Destruksi Eksergi (MW)	Presentase Destruksi Eksergi(%)	Destruksi Eksergi (MW)	Presentase Destruksi Eksergi(%)
Boiler	617.97	43.55	857.74	42	1095.4	41.15
High Pressure Turbine	11.48	0.81	17.40	0.85	14.543	0.55
Reheater	109.23	7.7	177.94	8.71	246.99	9.28
Intermediate Pressure Turbine	6.76	0.48	9.81	0.48	13.24	0.50
Low Pressure Turbine	17.04	1.20	26.00	1.27	38.65	1.45
Condenser	8.97	0.63	13.92	0.68	20.5	0.77
Condensate Extraction Pump	1.45	0.1	1.47	0.07	1.49	0.06
Low Pressure Heater 1	0.477	0.03	1.28	0.06	2.21	0.08
Low Pressure Heater 2	0.41	0.03	0.72	0.04	1.19	0.04
Low Pressure Heater 3	0.60	0.04	0.95	0.05	1.32	0.05
Low Pressure Heater 4	1.40	0.10	2.13	0.10	3.00	0.11
Deaerator	1.63	0.12	2.50	0.12	3.52	0.13
Boiler Feed Pump Turbine	0.96	0.07	2.54	0.12	3.16	0.12
Boiler Feed Pump	2.75	0.19	7.07	0.35	11.76	0.44



High Pressure Heater 6	1.22	0.09	1.98	0.10	2.98	0.11
High Pressure Heater 7	1.33	0.09	1.82	0.09	3.12	0.10
High Pressure Heater 8	5.25	0.42	7.46	0.40	9.41	0.38
Desuperheater	2.02	0.14	1.71	0.08	2.17	0.08

Berdasarkan data eksergi tersebut, destruksi eksergi banyak terjadi pada boiler dan reheater. Boiler menyumbang kerugian eksergi dari 41% sampai 43.5%. Reheater menyumbang kerugian eksergi 7.7% sampai 9.28%. Dan pada komponen LPT destruksi eksergi cenderung jauh lebih besar yaitu 1.2% sampai 1.5% dibandingkan HPT dan IPT sehingga perlu dilakukan usaha peningkatan efisiensi.

#### 4. Kesimpulan

Pada PLTU XYZ, efisiensi pembangkit paling baik diperoleh pada load 100% dan efisiensi pembangkit paling buruk diperoleh pada load 50%. Pada load 50%, efisiensi eksergi yang diperoleh sebesar 38.807%, load 75% sebesar 40.499% dan load 100% sebesar 41.132%. Secara umum, efisiensi eksergi pembangkit dipengaruhi oleh suhu dan tekanan uap, suhu pendinginan pada condenser, penggunaan teknologi pengolahan panas lanjut seperti reheater dan desuperheater. Semakin tinggi suhu dan tekanan uap yang beroperasi pada sistem, semakin tinggi efisiensi termal pembangkit. Kemampuan pendinginan pada condenser yaitu pertukaran panas antara kondensat dengan cooling water yang semakin baik juga meningkatkan efisiensi sistem. Nilai efisiensi eksergi pada PLTU XYZ yang paling tinggi diperoleh oleh komponen HPH 8 yaitu pada operasi load 50%, 75% dan 100% masing masing sebesar 96.29%, 96.5% dan 96.82%. Sedangkan efisiensi eksergi paling rendah diperoleh oleh komponen CEP yaitu pada operasi load 50%, 75% dan 100% masing masing sebesar 10.97%, 15.39% dan 20.85%. Destruksi eksergi yang menyumbang besar pada keseluruhan destruksi eksergi sistem berasal dari komponen boiler reheater dan turbin. Dimana pada load 100%, boiler memiliki destruksi eksergi sebesar 1095 MW (41.15%), reheater 246.99MW(9.28%) dan turbin 66.44 MW (2.5%).

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] O. J. Khaleel, F. Basim Ismail, T. Khalil Ibrahim, and S. H. bin Abu Hassan, "Energy and exergy analysis of the steam power plants: A comprehensive review on the Classification, Development, Improvements, and configurations," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, no. 3, p. 101640, May 2022, doi: 10.1016/J.ASEJ.2021.11.009.
- [2] I. H. Aljundi, "Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan," *Appl Therm Eng*, vol. 29, no. 2–3, pp. 324–328, Feb. 2009, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2008.02.029.
- [3] P. R. Kumar, V. R. Raju, and N. R. Kumar, "Simulation and parametric optimisation of thermal power plant cycles," *Perspect Sci (Neth)*, vol. 8, pp. 304–306, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.PISC.2016.04.060.
- [4] B. Rudiyanto *et al.*, "Energy and Exergy Analysis of Steam Power Plant in Paiton, Indonesia," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Jul. 2019. doi: 10.1088/1755-1315/268/1/012091.
- [5] M. Kamil Mohammed, W. Hussein Al Doori, A. Hussain Jassim, T. Khalil Ibrahim, and A. Tawfeeq Al-Sammarraie, "Energy and Exergy Analysis of the Steam Power Plant Based On Effect the Numbers of Feed Water Heater," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences Journal homepage*, vol. 56, pp. 211–222, 2019, [Online]. Available: [www.akademiabaru.com/arfmts.html](http://www.akademiabaru.com/arfmts.html)
- [6] V. R. et al., Vishnu Rajeev et al., "Energy and Exergy Analysis of a 3×500 MW Coal Fired Thermal Power Plant using Cycle-Tempo," *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, vol. 10, no. 3, pp. 3861–3870, 2020, doi: 10.24247/ijmperdjun2020368.
- [7] R. Pachaiyappan and J. Dasa Prakash, "Improving the Boiler Efficiency by Optimizing the Combustion Air," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 787, pp. 238–242, Aug. 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.787.238.
- [8] A. S. Karakurt and Ü. Güneş, "Performance analysis of a steam turbine power plant at part load conditions," *Journal of Thermal Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 1121–1128, Apr. 2017, doi: 10.18186/thermal.298611.
- [9] H. S. B. M. D. D. MJ Moran, *Introduction to thermal systems engineering: thermodynamics, fluid mechanics, and heat transfer*. John Wiley, 2002.
- [10] N. Hasananto, D. B. Darmadi, and L. Yuliati, "Modelling of load variation effect on the steam power plant heat rate and performance using Gatecycle," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1034, no. 1, p. 012048, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1034/1/012048.