

Eksergi dan energi losses turbin unit 1 PLT Gunung Salak paska *re-blading*

Achriyan Widayana

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana, Indonesia

Article Info

Article history

Received Februari 12, 2021

Revised April 15, 2021

Accepted September 22, 2021

Keywords

Exergy

Energy

Efficiency

Turbine

Re-Blading

ABSTRACT

Strategy of maintenance management PT. Indonesia Power to support the reliability of the generating unit is replacing rotor turbine blades, which is commonly referred to as re-blading. There are indications that the transfer of exergy and energy that is not optimal in the rotor turbine Unit 1 of Mount Salak Geothermal Power Plant has resulted in Unit 1 being unable to full load (60 MW) after re-blading. The analysis of exergy flow and energy identification is used to determine the magnitude of exergy and energy losses that occur in the steam turbine system. Based on the data calculations that have been done, the value losses exergy and energy in 2020 is 53.12 MWe and 53.10 MW of the total energy entering the turbine area of 370.3 MW. The accuracy of the data with the data commissioning shows that the energy efficiency value that occurs at this time (after re-blading) has increased by 0.93% with Irreversibility of 52.63 MW. The opportunity for improvement can be done by increasing the efficiency of the ejector, so that the percentage of NCG in the condenser that is sucked by the ejector will increase and result in a better pressure in the condenser (vacuum).

This is an open access article under the [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Corresponding Author

Achriyan Widayana,

Jurusan Teknik Mesin,

Fakultas Teknik,

Universitas Mercu Buana,

Jl. Meruya Selatan No. 1, Kembangan, Jakarta Barat 11650, Indonesia

Email: widayana.achriyan@gmail.com

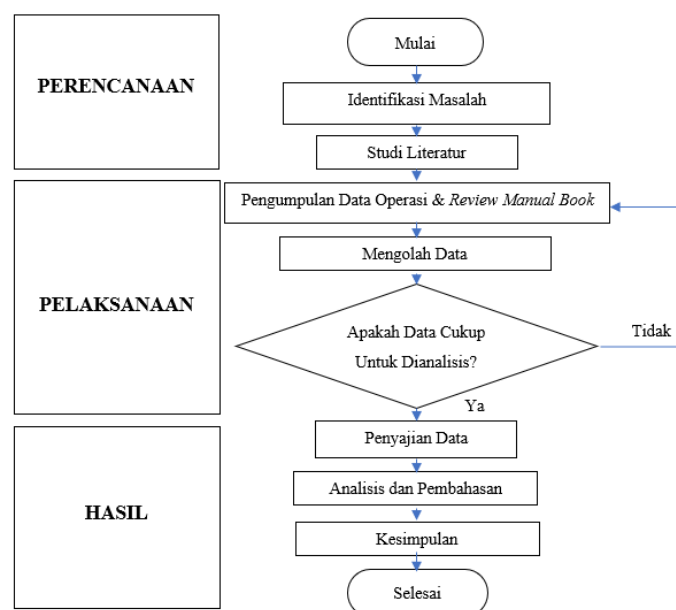
1. PENDAHULUAN

Akselerasi pembangunan suatu negeri berakibat pula pada peningkatan kebutuhan akan energi listrik. Sampai saat ini, kebutuhan energi listrik masih mengandalkan pemakaian tenaga tidak terbarukan seperti minyak bumi, batu bara, serta gas alam, padahal persediaannya di alam makin menipis [1]. Energi terbarukan merupakan salah satu solusi tepat untuk menanggulangi permasalahan lingkungan pada zona industri energi. Panas bumi merupakan salah satu energi terbarukan yang pada saat ini banyak dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik. Secara geologis, Indonesia terletak di antara pertemuan 3 lempeng tektonik utama yakni Lempeng Eropa- Asia, India- Australia, serta Pasifik yang mempunyai potensi besar untuk dikembangkan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) [2]. Sangat disayangkan potensi yang dimiliki sebesar 28.100 MW apabila pemanfaatan sumber daya energinya masih sangat kecil yaitu kurang lebih 1.197 MW atau 4% dari total kemampuan yang ada [3]. Hal ini menjadi sangat menarik untuk diteliti dikarenakan permintaan dan tekanan pasar terus mendorong untuk meningkatkan keandalan dan ketersediaan pasokan listrik yang stabil di luar kebutuhan perbaikan atau jadwal pemeliharaan (*Periodic or Corrective Maintenance*). Tuntutan akan pasokan listrik yang stabil dengan periode operasi jangka panjang, menyebabkan *management* perusahaan mengambil langkah cepat perbaikan sebagai strategi *maintenance management* guna menunjang keandalan unit pembangkit [4].

Turbin uap Unit 1 PLTP Gunung Salak telah beroperasi sejak tahun 1997 (*lifetime* lebih dari 22 tahun). Penurunan kinerja turbin akibat *scaling* faktanya merupakan masalah umum pada pembangkit listrik tenaga panas bumi. *Scaling* yang terjadi pada PLTP dipengaruhi oleh perubahan fase uap dari keadaan *saturated* ke *superheated*. Dampaknya adalah kerugian ekonomi, kehilangan energi dan biaya pemeliharaan turbin yang lebih tinggi penyebab utama kerusakan *rotor* turbin [5]. Dalam rangka mempertahankan kinerja turbin, pada tahun 2019 *rotor* turbin unit 1 dilakukan penggantian *blade rotor* turbin (*re-blading*), 10 *row* dari 12 *row* sisi *governor* (Gov) dan *generator* (Gen). Adanya indikasi transfer eksergi dan energi yang tidak maksimal pada *rotor* turbin Unit 1 PLTP Gunung Salak mengakibatkan Unit 1 tidak mampu *full load* (60 MW) pasca dilakukan *re-blading*. Perubahan keluaran daya listrik sebuah pembangkit listrik tenaga panas bumi berkaitan dengan kondisi *steam* dari sumur produksi. Konsistensi produksi daya listrik menyebabkan keuntungan dari perusahaan pun akan tetap. Sebaliknya penurunan daya listrik dapat menimbulkan kerugian, sehingga harus diantisipasi. Mengacu pada permasalahan tersebut, analisis efisiensi *thermal* berdasarkan hukum termodinamika digunakan untuk menganalisis efisiensi turbin hasil pekerjaan *re-blading*. Selain itu, digunakan analisis energi dan eksergi dengan melakukan identifikasi aliran eksergi. Menentukan besarnya kerugian eksergi dan energi (*losses*) yang terjadi pada sistem turbin uap. Mendapatkan besar energi panas yang mampu dikonversi oleh turbin hasil pekerjaan *re-blading*. Validasi data menggunakan data *commissioning* setelah *up-rating* (2005) digunakan untuk membuktikan apakah *re-blading* tahun 2019 menjadi penyebab ketidakmampuan unit 1 beroperasi normal (60MW).

2. METODE DAN BAHAN

Metode penelitian menggunakan analisis *scientific* dengan menggunakan data aktual pada keadaan unit operasi dimana nilainya sesuai dari parameter operasi.



Gambar 1: Flowchart Penelitian

A. Studi Literatur

Pelaksanaan studi ini diawali dengan melakukan studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk meningkatkan pemahaman peneliti terhadap topik penelitian yang akan diambil. Studi literatur dilakukan dengan mempelajari pengetahuan pendukung seperti efisiensi *thermal* PLTP, eksergi, dan lain-lain. Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan beberapa bahan referensi berupa jurnal ilmiah terkait perkembangan penelitian yang telah dilaksanakan sebelumnya.

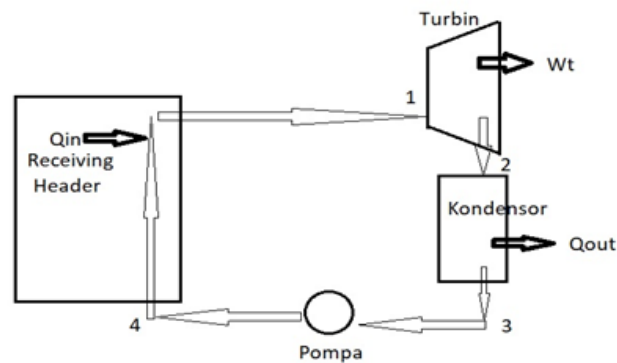
B. Asumsi

Menyederhanakan sistem untuk dianalisis merupakan keharusan yang dilakukan. Salah satu langkah utamanya adalah penentuan asumsi-asumsi umum seperti yang telah dijelaskan sebelumnya mengenai NCG (*Non Condensable Gas*). NCG diasumsikan murni CO₂, nilainya didapat dari nilai rata-rata kandungan NCG yakni % dari massa uap. Uap panas bumi diklasifikasikan mempunyai komposisi sama dengan uap air. Semua sistem diasumsikan sistem *control volume* yang *steady*.

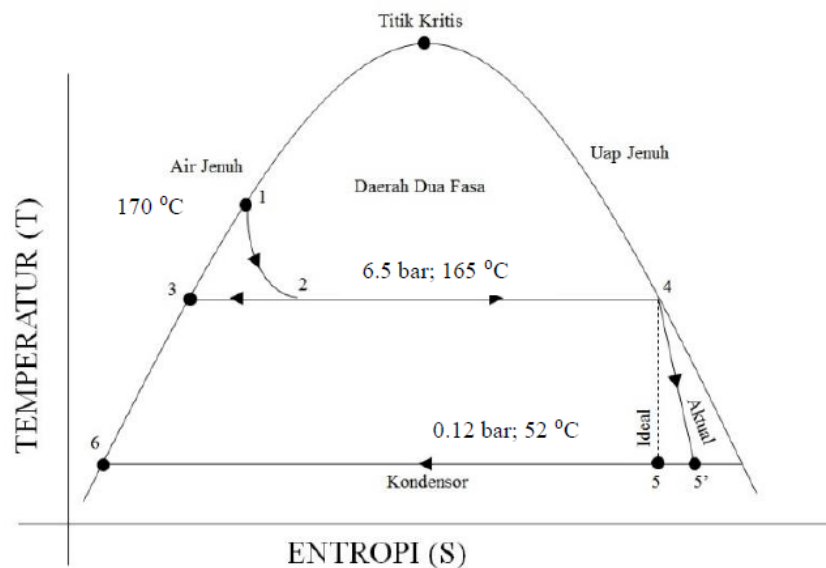
C. Data Yang Digunakan

Parameter operasi dari *logsheet* harian operasi, tidak lengkapnya penggunaan alat ukur *portable* untuk dilakukan pada parameter yang dibutuhkan secara langsung. Pemilihan data perhitungan pada tanggal 5 September (2018-2020) kondisi unit sedang beroperasi normal pada maksimal daya kerjanya. Setelah diteliti dengan data dari 6 bulan terakhir (Januari - Agustus 2020), dapat diasumsikan sama dan seragam pada kondisi normal operasi. Data teknik *Turbine Operation / Maintenance Manual Book (Volume 1- book 1)* Gunung Salak *Geothermal Power Plants Units 1 and 2*. Beberapa data perbandingan yang didapat dari PT. Star Energy Company sebagai penyedia uap panas bumi pada PLTP Gunung Salak juga digunakan sebagai validasi data. Validasi data, disesuaikan pula dengan data *up-rating* dari beban 55 MW ke 60 MW (Agustus 2005).

D. Perhitungan Efisiensi *Thermal* Turbin



Gambar 2: Sistem Pembangkit Listrik Panas Bumi [6]



Gambar 3: Diagram T-S untuk siklus penguapan tunggal (*Single Flash Cycle*)

1. Mencari nilai entalpi (h_3) dan entropi (s_3) pada tekanan uap masuk turbin (P_1) dengan menggunakan (*Table A-6 Properties of Superheated Water Vapor*).
2. Mencari nilai entalpi fluida (h_f), entalpi uap (h_g), dan entalpi campuran (h_{fg}) pada tekanan keluar turbin (P_2) dengan menggunakan (*Table A-5 Properties of Saturated Water (Liquid - Vapor): Pressure Table*).
3. Mencari nilai entropi fluida (s_f), entropi uap (s_g), dan entropi campuran (s_{fg}) pada tekanan keluar turbin (P_2) dengan menggunakan (*Table A-5 Properties of Saturated Water (Liquid - Vapor): Pressure Table*).
4. Menghitung Kualitas Uap Turbin.

Menghitung kualitas uap turbin dapat dilakukan dari perhitungan interpolasi entropi masuk turbin yaitu:

$$X_4 = \frac{S_4 - S_{f5}}{S_{fg5}} \quad (1)$$

5. Menghitung Kerja Turbin Isentropik. Kerja turbin isentropik (kerja turbin ideal) adalah dimana uap mengalami ekspansi isentropik yang mencapai keadaan ideal pada turbin sehingga entropi tetap. Rumus perhitungan kerja turbin isentropik yaitu:

$$w_{ts} = h_4 - h_5 \quad (2)$$

6. Menghitungkan entalpi isentropik h_5 yaitu dengan cara berikut:

$$h_5 = h_{f5} + X_5 \cdot h_{fg5} \quad (3)$$

7. Menghitung kerja turbin aktual:

$$w_{ta} = h_4 - h_{5s} \quad (4)$$

8. Mencari entalpi *outlet* turbin *actual* (h_{5s}) didapat dari persamaan:

$$h_{5s} = \frac{h_4 - A \left[1 - \left(\frac{h_{f5}}{h_{g5} - h_{f5}} \right) \right]}{1 + \frac{A}{h_{g5} - h_{f5}}} \quad (5)$$

Di mana [7], $A = 0,425 \times (h_4 - h_5)$

9. Mencari nilai entalpi pada kondisi gas/uap dicari dari persamaan:

$$\begin{aligned} h_{fg5s} &= h_{g5s} - h_{f5s} \\ h_{g5s} &= h_{fg5s} + h_{f5s} \end{aligned} \quad (6)$$

10. Menghitung nilai efisiensi isentropik turbin:

$$\eta_{isentropik} = \frac{w \text{ turbin aktual}}{w \text{ turbin Isentropis}} \times 100\% \quad (7)$$

11. Menghitung daya turbin:

$$\text{Isentropik: } W_{ts} = \eta_t \cdot \dot{m}_5 \cdot (h_4 - h_5) \quad (8)$$

$$\text{Aktual: } W_{ta} = \eta_t \cdot \dot{m}_{5s} \cdot (h_4 - h_{5s}) \quad (9)$$

12. Konsumsi nilai uap spesifik turbin (*Turbine Steam Rate*):

$$\text{Turbine Steam Rate} = \frac{\dot{m}}{\dot{W}} \quad (10)$$

13. Menghitung *Heat Rate Turbine*:

$$\text{Heat Rate Turbine} = \text{Theoretical Steam Rate(TSR)} \times h_4$$

$$\text{TSR} = \frac{1}{h_4 - h_5} \quad (11)$$

Jika entalpi h dalam kJ/kg, maka $\text{TSR} = 3600 / (h_4 - h_5)$ kg/kWh

Jika entalpi h dalam Btu/lb, maka $\text{TSR} = 2454 / (h_4 - h_5)$ lb/HPh

14. Menghitung Efisiensi *Thermal* Turbin:

$$\eta_{Th} = \frac{3600}{\text{Heat Rate Turbin}} \times 100\% \quad (12)$$

Dimana daya turbin *isentropic* P_{ts} (W), daya turbin *actual* P_{ta} (W), kerja turbin kondisi ideal w_{ts} (W), kerja turbin kondisi aktual w_{ta} (kJ/kg), efisiensi turbin η_t (%), efisiensi *thermal* turbin η_{Th} (%), *steam flow inlet turbine* \dot{m} (kg/s) [*main steam* sampai *steam ejector*], entalpi keadaan 4 h_4 (Joule/kg), entalpi keadaan 5s aktual h_{5s} (Joule/kg), entalpi keadaan 5 isentropik h_5 (Joule/kg).

E. Perhitungan Eksergi dan Efisiensi Eksergi.

Specific exergy bisa didapat dari persamaan [8][9]:

$$e = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (13)$$

Eksergi total aliran fluida didefinisikan [10]:

$$e = m [(h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0)] \quad (14)$$

Analisis eksergi turbin meliputi:

$$\Sigma X_2 = \Sigma X_4 + W_t + I_{\text{Turbin}} \quad (15)$$

$$\dot{m}_2 e_2 = \dot{m}_4 e_4 + W_t + I_{\text{Turbin}}$$

Jumlah eksergi masuk turbin yang sudah terekspansi dalam turbin (ΣX_2) adalah sama dengan eksergi keluar turbin (ΣX_4) ditambah kerja turbin nyata dan *irreversibility* (I_{Turbin}). Merinci persamaan eksergi sebagai berikut:

$$\Sigma X_2 = \dot{m}_2 [(h_2 - h_0) - T_0 (s_2 - s_0)] \quad (16)$$

$$\Sigma X_4 = \dot{m}_4 [(h_4 - h_0) - T_0 (s_4 - s_0)]$$

Eksergi *loss* pada setiap unit dengan persamaan sebagai berikut [11]:

$$E_{\text{loss}} = E_{\text{input}} - E_{\text{output}} \quad (17)$$

Definisi umum dari setiap volume kontrol atau efisiensi sistem eksergi, menurut [12] dan [13] dapat dijelaskan dengan persamaan) adalah sebagai berikut:

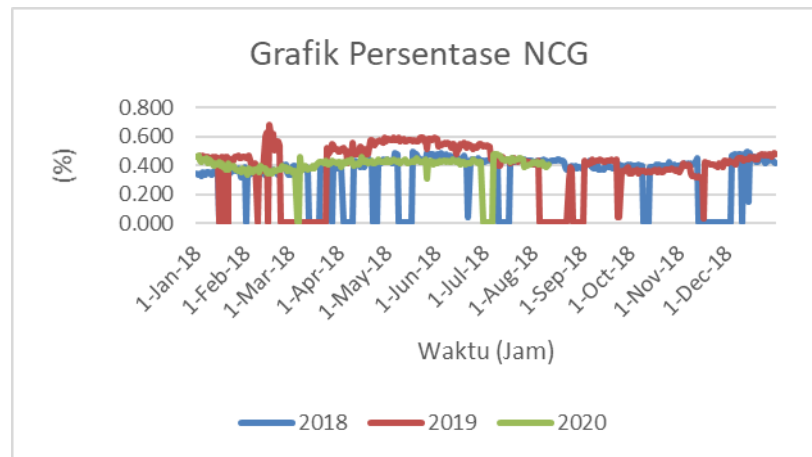
$$\eta_x = \Sigma \text{output} / \Sigma \text{input} \quad (18)$$

Sehingga, efisiensi eksergi turbin (η_{xt}) didefinisikan:

$$\eta_{xt} = \Sigma X_4 / \Sigma X_2 \quad (19)$$

3. HASIL DAN DISKUSI

Non-Condensable Gas (NCG) merupakan gas alami yang terkandung dalam uap yang dihasilkan oleh sumur produksi. Gas ini tidak mampu dikondensasikan di dalam kondensor sehingga akan mempengaruhi tekanan di dalam kondensor. Data ini sangat penting kita gunakan sebagai acuan dan untuk mempermudah analisis pada kondisi tekanan dan temperatur kondensor yang sama pada sistem turbin uap. Melalui data ini, optimalisasi suatu Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) mampu diketahui. Besarnya pengaruh NCG terhadap kondisi tekanan di dalam kondensor, tentunya sangat membantu untuk mendapatkan *baseline* kinerja terbaik suatu PLTP [14].



Gambar 4: Grafik Persentase Kandungan NCG Berdasarkan Jam Operasi

3.1. Referensi Lingkungan

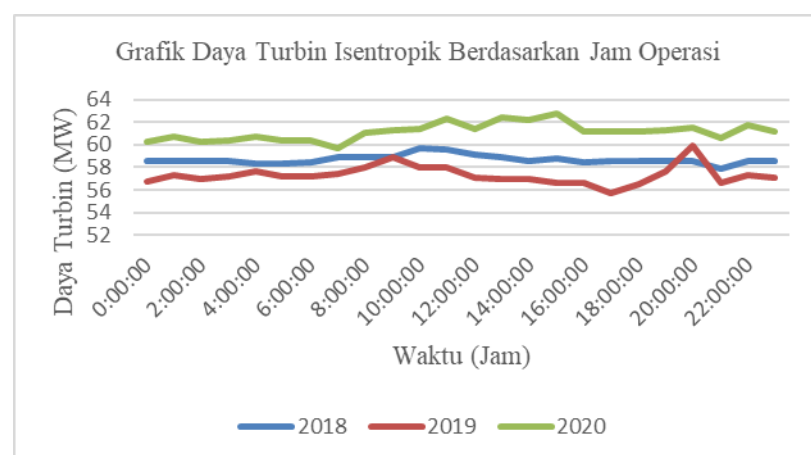
Ketinggian tempat-tempat tertentu menentukan tekanan, begitu pula suhu dan kelembapan. Kondisi ini merupakan faktor penting dalam analisis eksergi. Lingkungan diasumsikan sebagai sistem yang sangat besar, sederhana, dan dapat dimampatkan, dimodelkan sebagai *reservoir* termal dengan temperatur yang seragam dan konstan, T_0 , dan tekanan P_0 [15].

Tabel 1: Referensi Lingkungan

Parameter	Value	Unit
<i>Altitude</i>	± 800	<i>meter above sea level (MASL)</i>
<i>Pressure</i>	± 912	mbar
<i>Temperature</i>	20-26	$^{\circ}\text{C}$
<i>Relative Humidity</i>	34-75	%

3.2. Efisiensi *Thermal Turbine*

Data-data aktual yang didapatkan dari *logsheet online* PLTP Gunung Salak serta telah divalidasi menggunakan parameter lokal *on site*. Nilai dari setiap parameter hampir sama setiap jamnya dikarenakan beban yang dihasilkan dioperasikan sesuai dengan Rencana Operasi Harian (ROH) 60 MW sesuai dengan beban yang dikehendaki jaringan PLN.

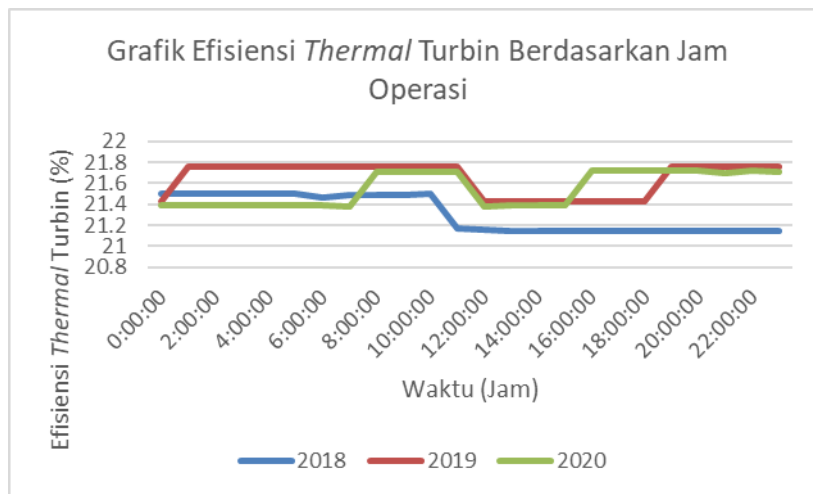


Gambar 5: Grafik Daya Turbin Isentropik Berdasarkan Jam Operasi

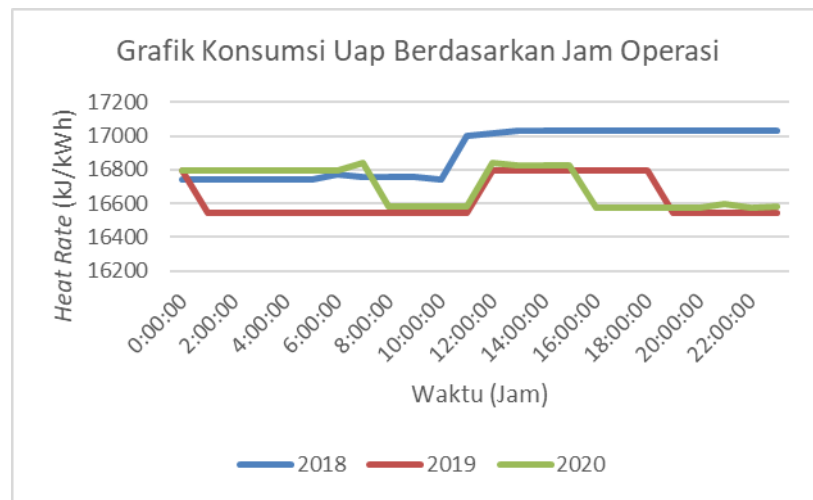
Data kinerja turbin tersebut dipadukan dengan hasil perhitungan eksergi dan energinya. Hasil perhitungan eksergi dan energi menggunakan referensi lingkungan sesuai dengan Tabel 1 pada temperatur lingkungan 24°C keadaan gas ideal.

Berdasarkan data hasil perhitungan, maka didapatkan nilai daya isentropik, efisiensi *thermal* turbin dan nilai konsumsi uap. Nilai daya turbin sangat dipengaruhi oleh kerja turbin yang mana dipengaruhi juga oleh nilai entropi dan entalpi uap masuk dan keluar turbin. Nilai daya yang dihasilkan turbin pada tahun

2018, 2019, dan 2020 mengalami fluktuasi sesuai pada Gambar 5 yaitu 58,86 MW pada tahun 2018 sebagai nilai maksimumnya, kemudian menurun dikarenakan tekanan kondensor mengalami peningkatan sehingga daya isentropiknya menjadi 56,7 MW pada tahun 2019, dan pada tahun 2020 mengalami kenaikan yang sangat signifikan mencapai 62,76 MW. Pada tahun 2020 (Setelah *re-blading*), *flow* dan temperatur *main steam* yang masuk area turbin mengalami peningkatan. Akan tetapi, tekanan kondensor masih sama seperti di tahun sebelumnya (2019). Hal ini menyebabkan nilai dari kinerja turbin mengalami peningkatan sehingga efisiensi isentropiknya juga ikut meningkat. Indikasi adanya kenaikan daya turbin ini menandakan proses transfer energi dan eksergi yang berlangsung pada turbin tahun 2020 seharusnya akan mengalami peningkatan akibat dari meningkatnya daya turbin pada tahun tersebut.



Gambar 6: Efisiensi Thermal Tubin Berdasarkan Jam Operasi

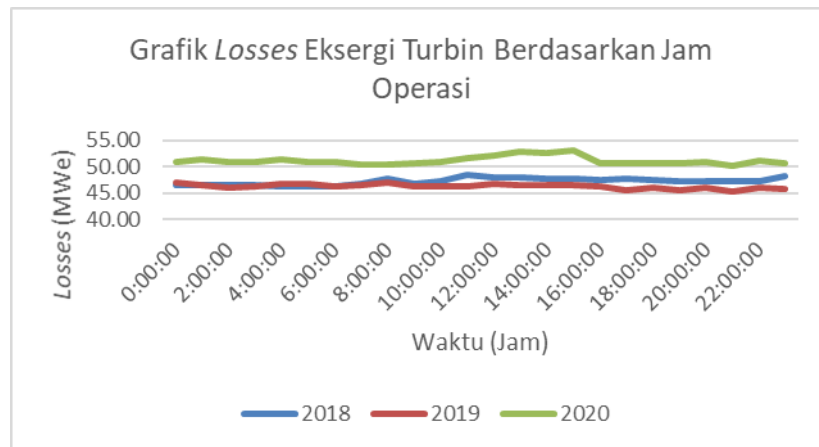


Gambar 7: Konsumsi Uap Berdasarkan Jam Operasi

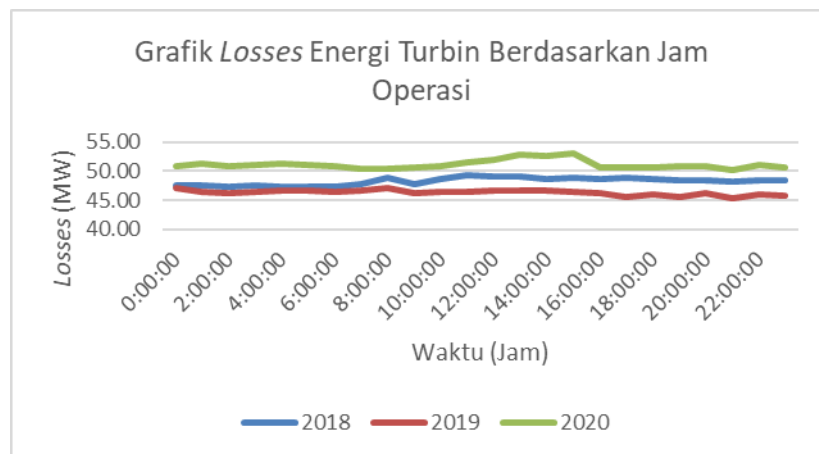
Penguat bukti bahwa *re-blading* bukan menjadi faktor ketidakmampuan unit 1 *full load*, maka perlu dilakukan identifikasi dengan parameter lainnya seperti efisiensi *thermal*, nilai konsumsi uap, *irreversibility*, dan juga *losses* yang terjadi pada proses turbin uap ini. Meningkatnya efisiensi *thermal* pada turbin akan menyebabkan nilai dari konsumsi uap turbin semakin kecil, begitu pula sebaliknya (berbanding terbalik). Hal ini dibuktikan pada grafik konsumsi uap, Ketika nilai efisiensi *thermal* menurun maka konsumsi uapnya akan meningkat. Gambar 6 menyatakan bahwa antara tahun 2017,2018, dan 2020 terjadi kenaikan nilai efisiensi *thermal* maksimum 21,5% pada tahun 2018; 21,76% pada tahun 2019, dan turun menjadi 21,72% pada tahun 2020. Grafik efisiensi *thermal* menyatakan *trending* yang sesuai dengan *trending* konsumsi uap pada setiap tahunnya.

Losses eksergi dan energi merupakan rugi-rugi yang terdapat pada proses dan kondisi lingkungan saat ini. Berdasarkan kepada Gambar 8, *losses* eksergi pada tahun 2020 merupakan *losses* tertinggi apabila dibandingkan dengan *losses* pada tahun 2018 dan 2019 dengan nilai 53,10 MW. Sedangkan, Gambar 9. *losses* energi pada tahun 2020 merupakan *losses* tertinggi apabila dibandingkan dengan *losses* pada tahun 2018 dan 2019 dengan nilai 53,12 MWe Semakin besarnya *losses* energi ini dikarenakan adanya kenaikan

jumlah *flow*, *pressure* dan *temperature* uap. Artinya, jumlah energi terkandung di dalam uap meningkat akan tetapi tidak diikuti dengan kenaikan jumlah energi yang dikonversi menjadi kerja oleh turbin, akibatnya energi hanya terbuang ke kondensor.



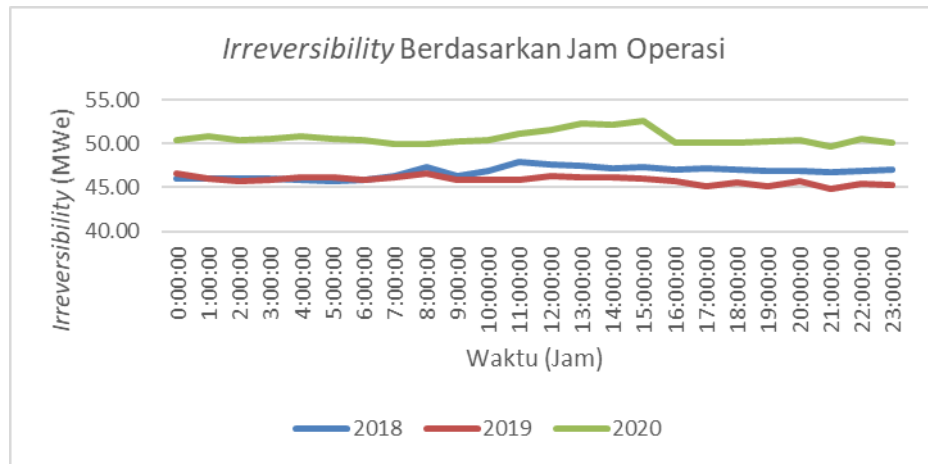
Gambar 8: Losses Eksergi Turbin Berdasarkan Jam Operasi



Gambar 9: Losses Energi Turbin Berdasarkan Jam Operasi

Analisis dari jumlah *losses* energi dan eksergi yang telah dipaparkan dalam bentuk grafik memang menunjukkan nilai yang lebih tinggi dari tahun sebelum dilakukan *re-blading*. Meningkatnya energi yang terbuang ke kondensor seharusnya mengakibatkan tingkat kevakuman di dalam kondensor seharusnya naik (semakin jelek) jika dibandingkan dengan kondisi sebelum dilakukan *re-blading*, tetapi hal ini tidak terjadi pada sistem turbin uap yang telah dianalisis. Dikarenakan hal tersebut, nilai kinerja turbin juga perlu dilakukan validasi terhadap nilai *irreversibility turbine*. *Irreversibility* merupakan nilai eksergi yang hancur atau eksergi yang dikonversi menjadi kerja yang mana nilai ini sangat dipengaruhi oleh besaran eksergi yang masuk dan keluarnya.

Irreversibility merupakan nilai eksergi yang hancur atau eksergi yang dikonversi menjadi kerja yang mana nilai ini sangat dipengaruhi oleh besaran eksergi yang masuk dan keluarnya. Gambar 10 menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai *irreversibility* yang terjadi pada tahun 2019 sesuai dengan penurunan *losses* akibat penurunan parameter *flow* dan temperatur uap pada tahun tersebut. Tahun 2020 turbin mengalami *losses* tertinggi jika dibandingkan dengan tahun 2019 maupun 2018, namun nilai *irreversibility* juga semakin meningkat. Fakta ini membuktikan bahwa ternyata efisiensi *thermal* turbin mengalami kenaikan sesuai pada grafik efisiensi *thermal* turbin terhadap jam operasi.



Gambar 10: Irreversibility Turbin Berdasarkan Jam Operasi

Hasil dari analisis penelitian ini memaparkan kenaikan nilai eksergi yang diikuti dengan nilai *irreversibility*, *losses*, dan nilai efisiensi *thermal* membuktikan bahwa pada tahun 2020 turbin Unit 1 PLTP Gunung Salak seharusnya mampu menghasilkan daya yang lebih tinggi dari keadaan saat ini. Parameter-parameter tersebut telah membuktikan bahwa *re-blading* pada tahun 2019 bukan penyebab ketidakmampuan unit 1 PLTP Gunung Salak *Full Load* (60MW).

3.3. Diskusi Peluang Perbaikan

Tabel 2: Perbandingan Data Kinerja Turbin Setelah *up-rating* Dengan Kondisi Setelah *re-blading* 2019

Parameter	Satuan	After Uprating	2018	2019	2020
Daya Output Generator	MW	60,2	60,3	60,2	58,3
Aliran Uap	T/h	425	445,35	431,34	447,1
Temperatur Uap	°C	164,5	161	165,71	164
Tekanan Uap	barg	5	6,7	6,3	6,41
Turbin Exhaust	°C	49,8	55,5	59,45	54,8
Tekanan Kondensor	bara	0,12	0,14	0,14	0,14
Temp. Masuk Kondensor	°C	28,2	28	29,3	28,7
FCT Yang Beroperasi	Jumlah	5 in HS	4 in HS 5 in LS	4 in HS 5 in LS	4 in HS 5 in LS
Losses Eksergi	MWe	46,86	47,28	46,34	51,16
Losses Energi	MW	47,94	48,30	46,33	51,15
Irreversibility	MW	46,373	46,76	45,85	50,67
Waste Energy	MWe	102,96	103,23	101,30	112,06
Efisiensi Eksergi	%	84,1	84,49	84,31	84,01
Efisiensi Energi	%	84,8	85,86	86,00	85,73

Keterangan: HS = *High Speed Operation*; LS = *Low Speed Operation*

Memastikan unit pembangkit tetap beroperasi sesuai kapasitas nominal merupakan salah satu acuan untuk perbaikan yang lebih baik. Selain itu juga perlunya acuan efisiensi penggunaan energi masukan ke dalam sistem untuk berproduksi sesuai kapasitas terpasang. Turbin sebagai peralatan utama, berfungsi sebagai alat konversi energi dari uap menjadi energi mekanik berupa putaran yang kemudian diteruskan menjadi energi listrik oleh generator.

Kondisi operasi unit pembangkit melebihi kapasitas nominal awal akan tercapai apabila nilai efisiensi pada turbin meningkat. Apabila dibutuhkan, maka akan sangat mampu untuk mencapai kondisi tersebut, tentunya dengan kajian-kajian lebih lanjut [16]. Data *commissioning* pada awal beroperasi tahun 1994 merupakan data ketika unit masih berkapasitas nominal 55 MW. Sehingga untuk keakuratan perbandingan dengan kondisi terkini, dipilih data hasil *performance test* saat unit selesai di *up-rating* menjadi berkapasitas 60 MW, yaitu pada tahun 2004-2005.

Peluang perbaikan pada penelitian ini dapat dilakukan dengan mengurangi kapasitas *flow* uap yang masuk ke turbin dengan mengurangi pembukaan *control valve* (CV) 1 dan 2, sehingga *flow* uap akan masuk ke area *ejector* sebagai *motive steam ejector*. Penambahan *motive steam ejector* akan meningkatkan kemampuan *ejector* dalam membantu penarikan jumlah NCG di dalam kondensor. Berkurangnya jumlah NCG akan membuat tekanan di dalam kondensor semakin bagus. Ketika kondisi vakum di dalam kondensor semakin bagus (semakin kecil), maka daya dan efisiensi turbinnya akan semakin bagus kemudian konsumsi uap akan semakin sedikit seperti yang dibuktikan pada grafik analisis hasil perhitungan. Analisis ini berdasarkan hasil dari Tabel 2 yang menyatakan bahwa efisiensi energinya mengalami peningkatan sebesar 0,93% dari hasil data *commissioning*.

Kemampuan turbin dalam mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik semakin meningkat setelah dilakukan *re-blading*. Seharusnya *output* generatornya juga mengalami peningkatan. Pernyataan tersebut berdasarkan adanya kenaikan nilai *irreversibility*, penurunan konsumsi uap, meningkatnya daya turbin secara isentropik, serta naiknya nilai efisiensi energi dan *losses* yang dihasilkan. Data penelitian melaporkan bahwa adanya perbedaan jumlah *motive steam ejector*. Adanya penurunan *flow motive steam ejector* rata-rata pada tahun 2018 sebesar 26,4 Ton/h dengan tekanan kondensornya 0,14 sedangkan pada tahun 2019 menurun menjadi 21,3 Ton/h dengan tekanan kondensor sama dengan tahun 2018 (0,14 bara). Tahun 2020 mengalami hal yang sama dengan tahun 2019, menurunnya *motive flow ejector* mengakibatkan uap yang seharusnya menjadi *motive steam ejector* masuk ke area turbin. Penurunan *motive steam ejector* dari 26,4 Ton/h (2018), menjadi 18,7 Ton/h pada tahun 2020 mengakibatkan kapasitas, tekanan dan temperatur *flow steam* masuk turbin meningkat. Hal ini berdampak kepada naiknya tekanan dan *temperature exhaust* turbin. Adanya kenaikan energi uap masuk turbin ternyata mampu dikonversi dengan baik oleh turbin hasil *re-blading*. Hal ini telah dibuktikan dalam analisis data dengan cara melakukan validasi data *commissioning*. Nilai efisiensi energinya meningkat 0,93% dari data *commissioning*. Dari hasil analisis yang telah dilakukan menyatakan bahwa *re-blading* yang dilakukan pada tahun 2019 bukan penyebab tidak mampunya unit 1 beroperasi normal pada beban 60 MW.

4. KESIMPULAN


Analisis data menunjukkan kinerja turbin dalam mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik (putaran) menurun setelah dilakukan *re-blading*. Efisiensi *thermal* maksimum 21,5% pada tahun 2018; 21,76% pada tahun 2019, dan turun menjadi 21,72% pada tahun 2020. Nilai *losses* energi pada tahun 2020 merupakan *losses* tertinggi apabila dibandingkan dengan *losses* pada tahun 2018 dan 2019, dengan nilai tertingginya sebesar 53,10 MW dari total energi yang masuk ke area turbin sebesar 370,3 MW. Besar energi panas yang mampu dikonversi oleh turbin hasil *re-blading* tahun 2019 ditunjukkan oleh nilai *irreversibility* turbin, yaitu sebesar 52,63 MW dari total energi yang masuk ke area turbin sebesar 370,3 MW. Energi dari *supply* uap yang tidak mampu dikonversi menjadi kerja hanya terbuang ke kondensor. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan diketahui bahwa *re-blading* pada tahun 2019 bukan menjadi penyebab ketidakmampuan unit 1 beroperasi normal pada beban 60 MW. Validasi data dengan data *commissioning* memperlihatkan bahwa nilai efisiensi energi yang terjadi pada saat ini (setelah *re-blading*) mengalami peningkatan 0,93 %. Artinya, seharusnya turbin mampu beroperasi secara normal dengan kapasitas (60 MW).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. ULUM, N. Nurrohman, E. Ambarita, and Y. Sirodz Gaos, "Energy and Exergy Analysis of Mount Salak Geothermal Power Plant Unit 1-2-3," *International Journal of Technology*, vol. 8, no. 7, p. 1217, Dec. 2017, doi: 10.14716/ijtech.v8i7.740.
- [2] ESDM, *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2016*, FINAL EDITION. 2016.
- [3] P. Suharmanto, A. N. Fitria, and S. Ghaliyah, "Indonesian Geothermal Energy Potential as Source of Alternative Energy Power Plant," *KnE Energy*, vol. 1, no. 1, p. 119, Nov. 2015, doi: 10.18502/ken.v1i1.325.
- [4] R. Adiprana, D. S. Purnomo, and I. E. Lubis, "Kamojang Geothermal Power Plant Unit 1-2-3 Evaluation and Optimization Based on Exergy Analysis," in *Proceedings World Geothermal Congress*, pp. 19–25, Apr. 2015.

- [5] D. S. Purnomo, T. Haryono, and Masitoh, "Derating Prediction Due to Scaling at Kamojang Geothermal Turbine Using Nozzle Blocking Ratio Calculation," in *2020 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP)*, Sep. 2020, pp. 142–146. doi: 10.1109/ICT-PEP50916.2020.9249825.
- [6] H. N. Shapiro, M. J. Moran, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, *Fundamentals of engineering thermodynamics, 5th ed., SI version*, 5th ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.
- [7] Balqis, "Optimasi Daya Listrik Pada PT Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang, Jawa Barat," *Jurnal Teknik Pomits*, vol. 1, pp. 1–6, 2012.
- [8] V. Mrzljak, I. Poljak, and T. Mrakovčić, "Energy and exergy analysis of the turbo-generators and steam turbine for the main feed water pump drive on LNG carrier," *Energy Conversion and Management*, vol. 140, pp. 307–323, May 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.03.007.
- [9] S. Adibhatla and S. C. Kaushik, "Energy and exergy analysis of a super critical thermal power plant at various load conditions under constant and pure sliding pressure operation," *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, no. 1, pp. 51–65, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.07.030.
- [10] J. Orović, V. Mrzljak, and I. Poljak, "Efficiency and Losses Analysis of Steam Air Heater from Marine Steam Propulsion Plant," *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 3019, Nov. 2018, doi: 10.3390/en11113019.
- [11] K. C. Amrita and G. Nugroho, "Analisis Thermal Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi PT. Indonesia Power UPJP Kamojang," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 7, no. 2, Feb. 2019, doi: 10.12962/j23373539.v7i2.35846.
- [12] F. Baldi, F. Ahlgren, T.-V. Nguyen, M. Thern, and K. Andersson, "Energy and Exergy Analysis of a Cruise Ship," *Energies*, vol. 11, no. 10, p. 2508, Sep. 2018, doi: 10.3390/en11102508.
- [13] F. Baldi, H. Johnson, C. Gabriellii, and K. Andersson, "Energy and exergy analysis of ship energy systems – the case study of a chemical tanker," *International Journal of Thermodynamics*, vol. 18, no. 2, p. 82, Jun. 2015, doi: 10.5541/ijot.5000070299.
- [14] W. Yamin, I. G. B. N. Makertiharta, and J. Rizkiana, "Evaluation on Energy Efficiency Improvement in Geothermal Power Plant with The Application of Load-based Gas Removal System and Cooling Water Pump Control System," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 14, no. 1, Jun. 2020, doi: 10.22146/jrekpros.54656.
- [15] Kwambai, "Exergy Analysis of Olkaria I Power Plant Kenya. Geothermal Training Program," Reykjavik, 2005.
- [16] M. G. Q., Z. A. , Z. Shah, N. Ahmad, and W. Raza, "The Theoretical Framework of the Modified Organic Rankine Cycles for Improved Energy and Exergy Performances," *International Energy Journal*, vol. 20, pp. 169–180, 2020.

BIODATA PENULIS

	<p>Nama: Achriyan Widayana Tempat, tanggal Lahir: Semarang, 09 Juni 1995 Alamat: Jl. Ngesrep Timur No.24C, kec. Banyumanik, kota Semarang Pekerjaan: Mahasiswa / Pegawai PT. Indonesia Power</p>
---	---