

## **Studi Kasus Peningkatan Daya Dan Efisiensi Turbin Air Setelah *Overhaul* Pada PLTA Kapasitas 175 MW**

**Rachman Hakim<sup>1)</sup>, Wahyu Hidayat<sup>1, \*)</sup>, Wirawan Pisen<sup>1)</sup>, Dede Furqon Nurjaman<sup>1)</sup>,  
Damawidjaya Biksono<sup>1)</sup>, Deny Bayu Saefudin<sup>1)</sup>, Een Teryana<sup>2)</sup>, Ervana Ikhwan<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Fakultas Teknologi Manufaktur, Teknik Mesin, Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia

<sup>2)</sup>Fakultas Teknik, Teknik Elektro, Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia

\*) *Corresponding author:* [wahyu.hidayat@lecture.unjani.ac.id](mailto:wahyu.hidayat@lecture.unjani.ac.id)

(Received: 7 May 2024 • Revised: 27 May 2024 • Accepted: 29 May 2024)

### **Abstract**

*Hydropower plants (HPPs) harness renewable energy from water, with power output fluctuating depending on water availability, head height, and water flow. As operational hours increase, HPP efficiency tends to decrease due to operational errors, irregular maintenance, or unit disruptions. Therefore, scheduled maintenance is crucial to prolonging equipment lifespan, particularly for water turbines. Post-maintenance evaluation of turbine power and efficiency involves search parameters such as flow rate ( $Q$ ), head ( $H$ ), and density ( $\rho$ ). After determining potential hydraulic power, turbine output is compared against standards to assess efficiency. For instance, the efficiency of the Saguling HPP turbine reaches approximately 91.17% according to the Manual Handbook Operation & Maintenance standard, with a unit power output of 174.14 MW based on Contractual Operation Characteristics. Following maintenance, there is a significant increase in turbine power and efficiency, from 170 MW to 175 MW and from an average efficiency of 88.49% to 93.64%, respectively. Therefore, planned and structured maintenance can enhance the performance and efficiency of hydropower plants.*

### **Abstrak**

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) memanfaatkan sumber energi terbarukan dari air, dengan daya yang berfluktuasi tergantung pada ketersediaan air, tinggi jatuh, dan debit air. Seiring dengan meningkatnya jam operasi, efisiensi PLTA cenderung menurun karena kesalahan pengoperasian, kurangnya pemeliharaan yang teratur, atau gangguan pada unit. Oleh karena itu, pemeliharaan yang terjadwal menjadi krusial untuk menjaga umur pakai peralatan, khususnya pada turbin air. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui perbedaan performa turbin air sebelum dan setelah dilakukan *overhaul*. Evaluasi daya dan efisiensi turbin dilakukan pasca pemeliharaan dengan mencari parameter seperti debit ( $Q$ ), *Head* ( $H$ ), dan massa jenis ( $\rho$ ). Setelah menetapkan daya hidrolis potensial, output turbin dibandingkan dengan standar untuk menilai efisiensinya. Efisiensi turbin PLTA Saguling mencapai sekitar 91,17% sesuai dengan standar Manual Handbook Operation & Maintenance, dengan daya produksi satu unit pembangkit mencapai 174,14 MW menurut Karakteristik Operasi Dikontrak. Setelah pemeliharaan, terjadi peningkatan yang signifikan pada daya dan efisiensi turbin, dari 170 MW menjadi 175 MW, dan dari rata-rata efisiensi 88,49% menjadi 93,64%. Oleh karena itu, pemeliharaan yang terencana dan terstruktur dapat meningkatkan kinerja dan efisiensi PLTA.

**Keywords:** *increasing turbine efficiency, turbine efficiency, turbine power, PLTA*

## PENDAHULUAN

Penggunaan energi fosil merupakan sumber energi utama di Indonesia saat ini dari tahun ke tahun semakin meningkat. Energi fosil dalam bentuk batu bara dan gas alam menjadi tulang punggung sumber energi tak terbarukan untuk menghasilkan energi listrik [1]. Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan dalam kehidupan sehari-hari. Sumber energi listrik berasal dari pembangkit, baik yang berasal dari bahan bakar fosil ataupun dari energi terbarukan. Diperlukan sumber energi baru terbarukan serta peningkatan efisiensi untuk sistem yang sudah ada dalam pemanfaatan energi [2]. PLTA dan energi *geothermal* termasuk energi yang dapat diperbarui, ramah lingkungan, dan bersih karena emisi CO<sub>2</sub> yang rendah merupakan salah satu pembangkit listrik yang menggunakan energi terbarukan (Renewable Energy) [3]. Pada PLTA terdapat turbin air yang berfungsi untuk mengubah energi potensial air menjadi energi kinetik untuk memutar generator agar menghasilkan listrik. Seiring berjalannya waktu, unjuk kerja turbin air akan mengalami penurunan secara signifikan jika tidak dilakukan pemeliharaan dengan baik [4]. Energi terbarukan memiliki peran yang penting untuk transisi energi bersih. Negara yang mengembangkan teknologi transformasi energi terbarukan merasa memiliki tanggung jawab atas lebih dari 33,3 % pengurangan gas emisi karbondioksida antara tahun 2020 sampai dengan tahun 2030 [5]. PLTA penting untuk mengurangi emisi karbon dan meningkatkan fleksibilitas sistem energi. Peningkatan ketersediaan dan keamanan sangat diperlukan untuk meminimalkan gangguan produksi. Berbagai komponen seperti turbin air, generator, dan pengatur kecepatan memengaruhi efisiensi dan biaya produksi energi listrik [6]. Pembangkit bersumber energi terbarukan marak dibangun, seperti terlampir pada Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Peran EBT ditargetkan minimal sebesar 23% dari total kebutuhan energi pada tahun 2025 [7]. Contoh lain dalam penerapan sistem yang ramah lingkungan adalah sistem kogenerasi. Sistem kogenerasi menghasilkan energi termal selain energi listrik. Energi termal didapatkan dengan menggunakan gas yang tidak terpakai pada temperatur yang masih tinggi [8]. Untuk menghindari kerugian finansial yang signifikan akibat penggantian bagian turbin yang tererosi atau retak, umumnya dilakukan *retrofitting* (perbaikan & pemeliharaan) pada material turbin air. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan umur layanan, serta memastikan fungsi yang lancar dan efisien [9]. Turbin air merupakan bagian kritis dari setiap PLTA untuk mencapai efisiensi dengan mempertahankan kondisi operasionalnya. Setelah beberapa tahun beroperasi, kinerja dan efisiensi turbin air dapat menurun karena beberapa alasan seperti kavitasi, erosi, kelelahan, dan cacat material. Untuk mengatasi masalah ini, pemeriksaan dan pemeliharaan rutin dari turbin air dilakukan untuk mencapai target *output* energi yang diinginkan [10]. Efisiensi turbin mengalami penurunan akibat beberapa faktor seperti sering terjadinya derating (penurunan beban) atau trip (unit shutdown), faktor lamanya pemeliharaan, kesalahan dalam pengoperasian, dan perawatan serta faktor-faktor lain. Untuk menjaga performa, dilakukan pemeliharaan periodik untuk mencegah terjadinya penurunan performa melewati standar yang telah ditentukan dan memperpanjang masa pengoperasian unit pembangkit. Aktifitas pemeliharaan yang dilakukan dalam suatu pembangkit tenaga listrik dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu pemeliharaan rutin dan pemeliharaan non rutin [11]. Pada pemeliharaan periodik berdasarkan hours based dihitung dari jam operasi pembangkit selama unit tersebut masuk kedalam jaringan atau sering disebut EOH (Equivalent Operation Hours). Untuk interval pemeliharaan periodik pada PLTA berdasarkan time based maintenance yaitu 8.000 jam s/d 10.000 jam untuk *Annual Inspection* (AI) , 18.000 jam s/d 25.000 jam untuk *General Inspection* (GI) dan 35.000 jam s/d 45.000 jam untuk *Major Inspection* (MI). Dengan adanya pemeliharaan yang tepat, maka efisiensi dari turbin bisa tetap terjaga dan *life cycle* dari pembangkit juga bisa semakin lama.

## METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode observasi dan kuantitatif, dimana untuk menganalisa efisiensi dan kinerja suatu pembangkit dibutuhkan beberapa parameter yang akan digunakan sebagai perhitungan dari efisiensi dan kinerja dari suatu pembangkit. Pada PLTA data yang dibutuhkan untuk menghitung efisiensi dan daya berupa *Head*, debit air, pembukaan *guide vane*, putaran turbin, dan *generator load*. Data debit dan daya yang dihasilkan oleh turbin air didapatkan dari *power house* berdasarkan alat ukur yang terpasang. Nilai koefisien *head losses* minor ( $k$ ) didapatkan dari data spesifikasi instalasi pipa *penstock* UBP Saguling. Pada prinsipnya PLTA mengolah air menjadi listrik dengan memanfaatkan perubahan energi, yaitu energi potensial air diubah menjadi energi kinetis dengan adanya *head*, lalu energi kinetis ini berubah menjadi energi mekanis dengan adanya aliran air yang menggerakkan turbin, lalu energi mekanis ini berubah menjadi energi listrik melalui perputaran rotor pada generator. Jumlah energi listrik yang bisa dibangkitkan dengan sumber daya air tergantung pada dua hal, yaitu jarak *head* (tinggi air) dan berapa besar jumlah air yang mengalir (debit). Untuk menghitung aliran fluida pada pipa *penstock* digunakan Persamaan Bernoulli.

$$\rho_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = \rho_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (1)$$

Persamaan Bernoulli ini merupakan salah satu penerapan dari hukum kelestarian massa, dan pada prinsipnya adalah energi padadua titik yang dianalisa harus sama. Untuk aliran *steady* dan fluida inkompresibel (energi di dalam pipa diabaikan) maka menggunakan persamaan:

$$\left(\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z\right)_1 - HL = \left(\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z\right)_2 \quad (2)$$

Untuk mengetahui jenis aliran pada pipa *penstock*, maka dapat di ketahui dengan menghitung besarnya bilangan Reynolds pada pipa *penstock*. Bilangan Reynolds adalah bilangan tak berdimensi yang menyatakan perbandingan gaya-gaya inersia terhadap gaya-gaya kental. Fungsi dari bilangan Reynold itu sendiri adalah untuk mengetahui jenis suatu aliran fluida yang ada di dalam pipa. Dibawah ini merupakan batasan nilai/harga bilangan Reynold untuk aliran *internal flow* dan disertai dengan jenis alirannya:

- $Re < 2300$  maka alirannya adalah laminar
- $2300 < Re < 4000$  maka alirannya adalah transisi
- $Re > 4000$  maka alirannya adalah turbulen

Persamaan yang digunakan untuk menentukan bilangan Reynolds adalah:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (3)$$

Persamaan untuk menghitung daya hidrolis pada turbin air adalah:

$$P_H = \rho \cdot Q \cdot g \cdot (H - H_{L\ Total}) \quad (4)$$

Besarnya daya hidrolis dipengaruhi oleh besarnya *head losses*. Pada *head losses* ini terdapat dua jenis, yaitu *major head losses* dan *minor head losses*. *Head losses* total merupakan penjumlahan dari *major head losses* dan *minor head losses*.

$$H_{L\ Total} = H_{L\ Major} + H_{L\ Minor} \quad (5)$$

*Major head losses*, merupakan kerugian energi yang diakibatkan oleh gesekan fluida terhadap kekasaran permukaan bahan pipanya [2]. Persamaan untuk menghitung *Head Losses Major* tersebut adalah:

$$H_{L\ Major} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (6)$$

Sedangkan *minor head losses* merupakan rugi-rugi energi yang diakibatkan karena terdapat belokan-belokan atau sambungan pada sistem perpipaan [2]. Persamaan untuk menghitung *minor head losses* adalah:

$$H_{L\ Minor} = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (7)$$

Efisiensi pada turbin merupakan perbandingan dari daya turbin dibagi daya hidrolis, maka untuk menghitung efisiensi dari turbin dapat menggunakan persamaan:

$$\eta_T = \frac{P_T}{P_H} \times 100\% \quad (8)$$

Langkah penelitiannya seperti dijelaskan pada gambar 1.

### Penjelasan Diagram Alir

#### 1. Studi Literatur

Dimulai dengan mengumpulkan jurnal dan literatur mengenai efisiensi dan daya pada turbin air serta pengaruhnya terhadap debit air yang masuk. Pada tahap ini juga mempelajari dari buku *Manual Hand book Operation & Maintenance* tentang standar - standar yang dipakai dalam pengoperasian dan pemeliharaan turbin.

#### 2. Parameter Peralatan

Pada tahap ini menentukan parameter - parameter yang akan digunakan dalam perhitungan efisiensi dan daya pada turbin francis setelah dilakukan pemeliharaan periodik. Dalam menentukan parameter-parameter tersebut mengacu pada buku *Manual Hand book Operation & Maintenance*.

#### 3. Mengumpulkan Data Spesifikasi Peralatan

Setelah menentukan parameter - parameter yang akan digunakan, kemudian mencari data spesifikasi peralatan yang akan digunakan dalam menghitung daya dan efisiensi turbin francis. Pengumpulan spesifikasi ini juga mengacu pada buku *Manual Hand book Operation & Maintenance*.

#### 4. Melakukan Perhitungan

Pada tahap ini, setelah data spesifikasi dan parameter telah ditentukan maka mulai untuk menghitung *head losses* dan efisiensi sebelum dilakukan pemeliharaan periodik. Hasil dari perhitungan ini kemudian nanti akan di bandingkan dengan hasil perhitungan setelah dilakukan

pemeliharaan periodik.

5. Mengumpulkan data Setelah Pemeliharaan

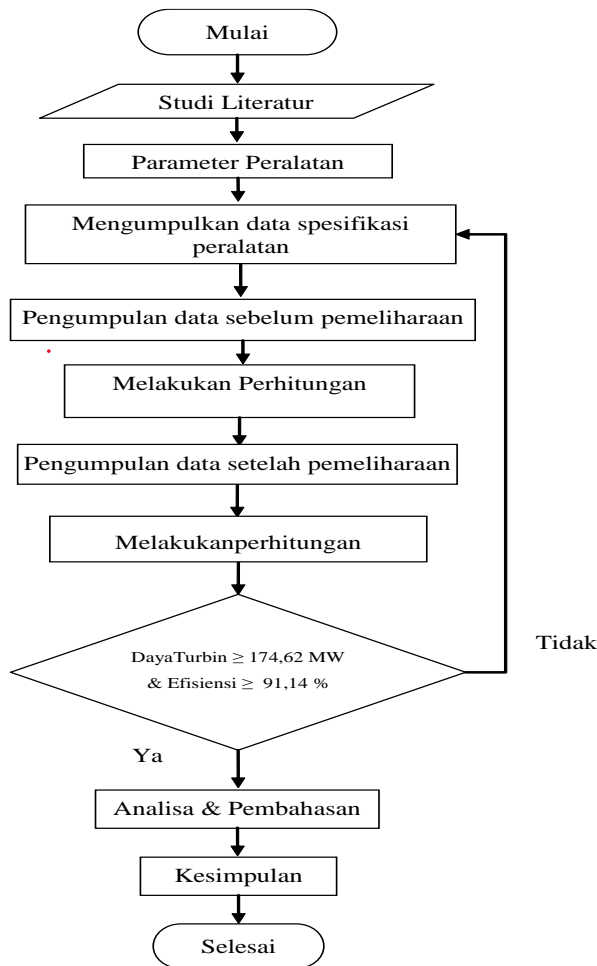
Setelah pemeliharaan selesai dikerjakan, maka akan dilakukan pengujian, berupa *individual test*, *running test*, dan *output test*. Dari pengujian-pengujian tersebut maka dicatat data-data yang akan digunakan dalam perhitungan pasca pemeliharaan periodik.

6. Analisa & Pembahasan

Pada tahap ini dilakukan analisa dan pembahasan apakah turbin tersebut masih layak beroperasi atau tidak. Jika turbin masih layak operasi maka hal-hal apa saja yang harus diperhatikan agar efisiensi dan daya tetap terjaga.

7. Kesimpulan

Setelah dilakukan pengujian dan perhitungan analisa terhadap daya dan efisiensi dari turbin francis maka bisa ditarik kesimpulan. Apakah turbin tersebut masih layak untuk dioperasikan atau tidak. Tentunya dengan pertimbangan-pertimbangan lain seperti waktu pengerjaan dan biaya yang akan dikeluarkan.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem PLTA memiliki dua hal yang sangat penting yaitu debit air dan ketinggian jatuh air (*head*). Semakin besar debit air dan semakin tinggi *head* tersebut bisa dipastikan energi yang akan didapatkan sangat besar. Berdasarkan data yang didapat dari PLTA Saguling untuk ketinggian jatuh air (*head*) PLTA Saguling yaitu 355,7 m dan daya yang dihasilkan mencapai 175,18 MW. Sedangkan debit yang digunakan untuk menghasilkan daya 175 MW adalah 54 m<sup>3</sup>/s.

Tabel 1. *Out Flow* PLTA Saguling

No	Daya (MW)	Debit (m <sup>3</sup> /s)	No	Daya (MW)	Debit (m <sup>3</sup> /s)
1	5	2	19	95	29
2	10	3	20	100	31
3	15	5	21	105	33
4	20	6	22	110	34
5	25	8	23	115	36
6	30	9	24	120	37
7	35	11	25	125	39
8	40	12	26	130	40
9	45	14	27	135	42
10	50	16	28	140	43
11	55	17	29	145	45
12	60	19	30	150	47
13	65	20	31	155	48
14	70	22	32	160	50
15	75	23	33	165	51
16	80	25	34	170	53
17	85	26	35	175	54
18	90	28			

Dari data Tabel 1 dapat dilakukan perhitungan besarnya nilai *head losses* total pada aliran pipa penstock dari daya minimal sampai ke daya maksimal.

### 1. Spesifikasi Pipa:

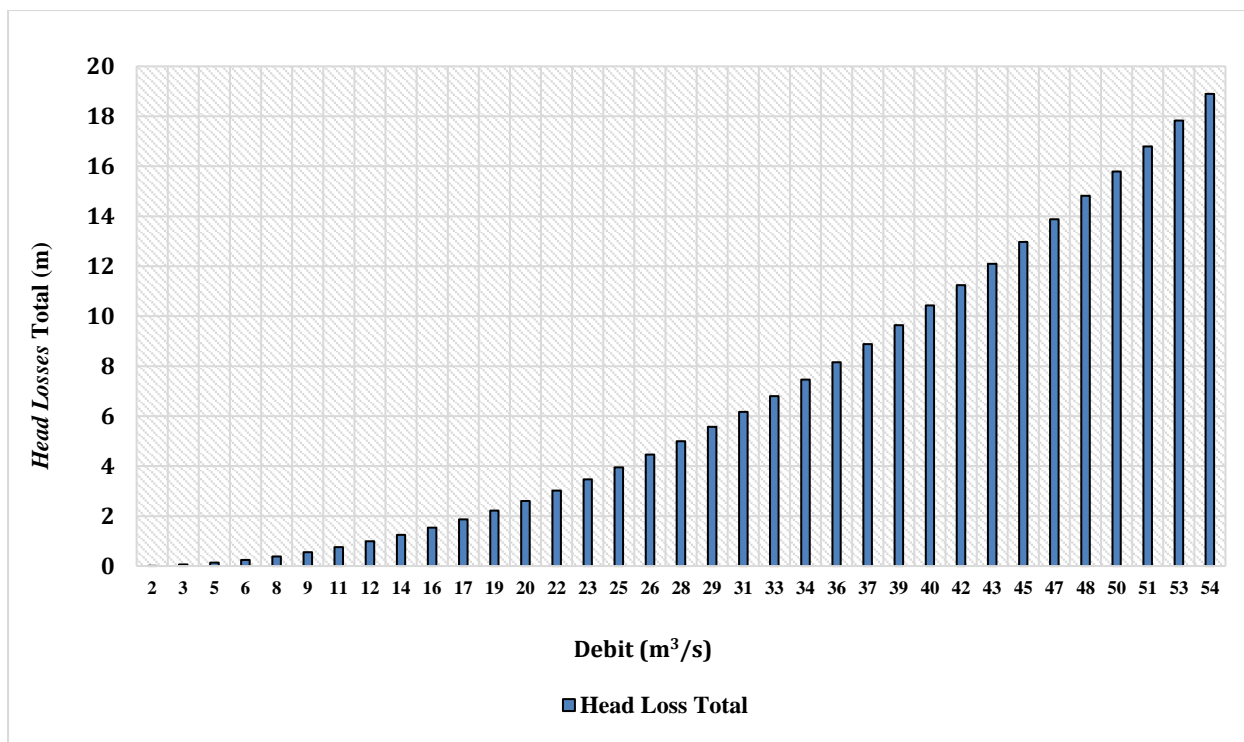
Material : *Cast Iron*  
 Diameter : 4,3 meter dan 2,54 meter

### 2. Instalasi Pipa diameter 4,3 meter

Panjang : 1814,5 meter  
*Elbow* : 50°  
*Elbow* : 40°  
*Elbow* : 33°  
*Elbow* : 13°  
*Elbow* : 17°  
 Katup : *Buterfly Valve* (1 Buah)  
 Penyempitan diameter : Dari 4,3 meter ke 2,54 meter

3. Instalasi Pipa diameter 2,54 meter
  - Panjang : 26,24 meter
  - Elbow : 90° (1 Buah)
  - Katup : *Buterfly Valve* (1 Buah)
  
4. Fluida kerja
  - Jenis : Air
  - Temperatur : 25° C
  - Masa jenis : 997 [kg/m<sup>3</sup>]
  - Viskositas dinamis : 0,000891 [kg/(m.s)]

Besarnya *head losses* total pada pipa penstock dengan daya minimum 5 MW yaitu 0,0161 m, sedangkan besarnya *head losses* untuk daya maksimum 175 MW yaitu sebesar 18,89 m (Tabel 2). Besarnya total *head losses* total pada pipa penstock selain berkolerasi dengan daya memiliki korelasi juga dengan debit. Semakin kecil debit yang mengalir di dalam pipa penstock maka semakin kecil *head losses* total yang dihasilkan dan semakin besar debit yang mengalir di dalam pipa penstock maka semakin besar *head losses* total yang ditimbulkan.



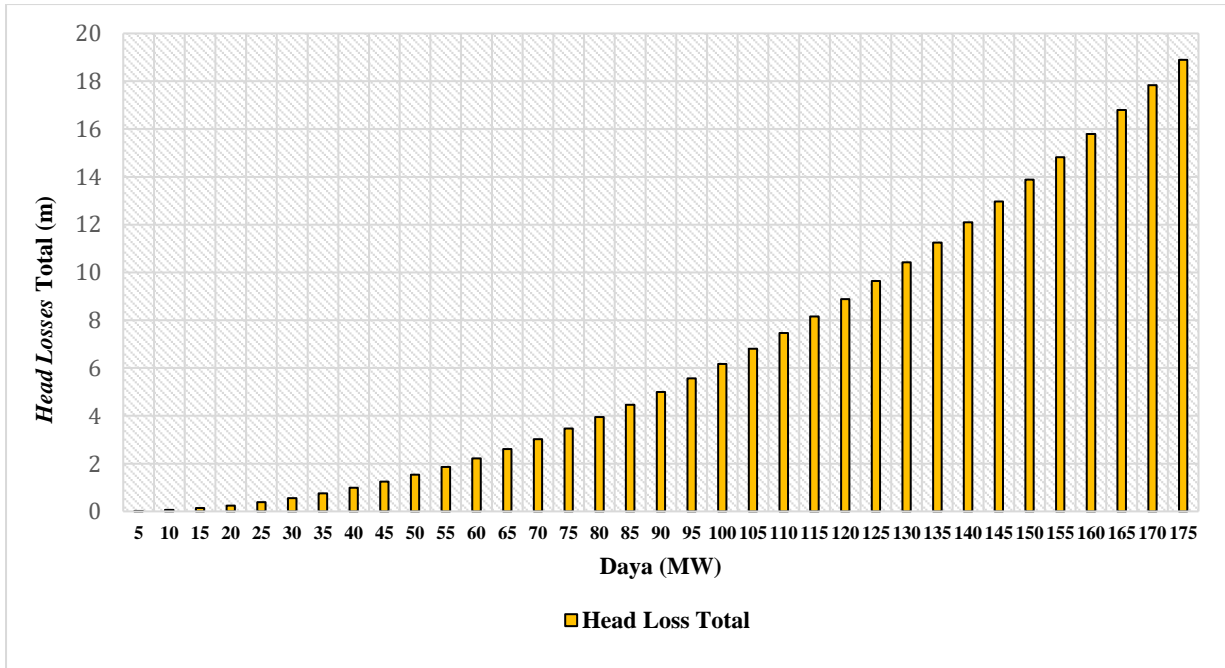
Gambar 2. Grafik *Head Losses* Total Terhadap Debit

Dari data-data yang disajikan pada Tabel 2 dapat dilihat pada Gambar 3, semakin besar daya yang dihasilkan maka semakin besar *head losses* total yang ditimbulkan. Nilai *head losses* total yang tinggi akan berkorelasi dengan menurunnya nilai daya aktual turbin air yang dihasilkan.

Tabel 2. *Head Losses* Total

Daya (MW)	<i>Minor Head Losses</i> (m)	<i>Major Head Losses</i> (m)	<i>Head Losses</i> Total (m)
5	0,004	0,012	0,016
10	0,013	0,049	0,062
15	0,029	0,109	0,138
20	0,052	0,194	0,246
25	0,082	0,304	0,386
30	0,118	0,437	0,555
35	0,161	0,595	0,756
40	0,210	0,777	0,987
45	0,266	0,983	1,249
50	0,329	1,213	1,542
55	0,398	1,469	1,867
60	0,473	1,748	2,221
65	0,555	2,051	2,606
70	0,644	2,379	3,023
75	0,739	2,731	3,470
80	0,841	3,107	3,948
85	0,950	3,508	4,458
90	1,065	3,933	4,998
95	1,186	4,382	5,568
100	1,314	4,856	6,169
105	1,450	5,353	6,803
110	1,590	5,875	7,464
115	1,739	6,421	8,159
120	1,893	6,991	8,884
125	2,055	7,586	9,641
130	2,222	8,206	10,428
135	2,396	8,849	11,245
140	2,577	9,516	12,093
145	2,764	10,208	12,972
150	2,958	10,924	13,882
155	3,158	11,664	14,822
160	3,365	12,430	15,795
165	3,579	13,219	16,798
170	3,799	14,031	17,830
175	4,026	14,869	18,895

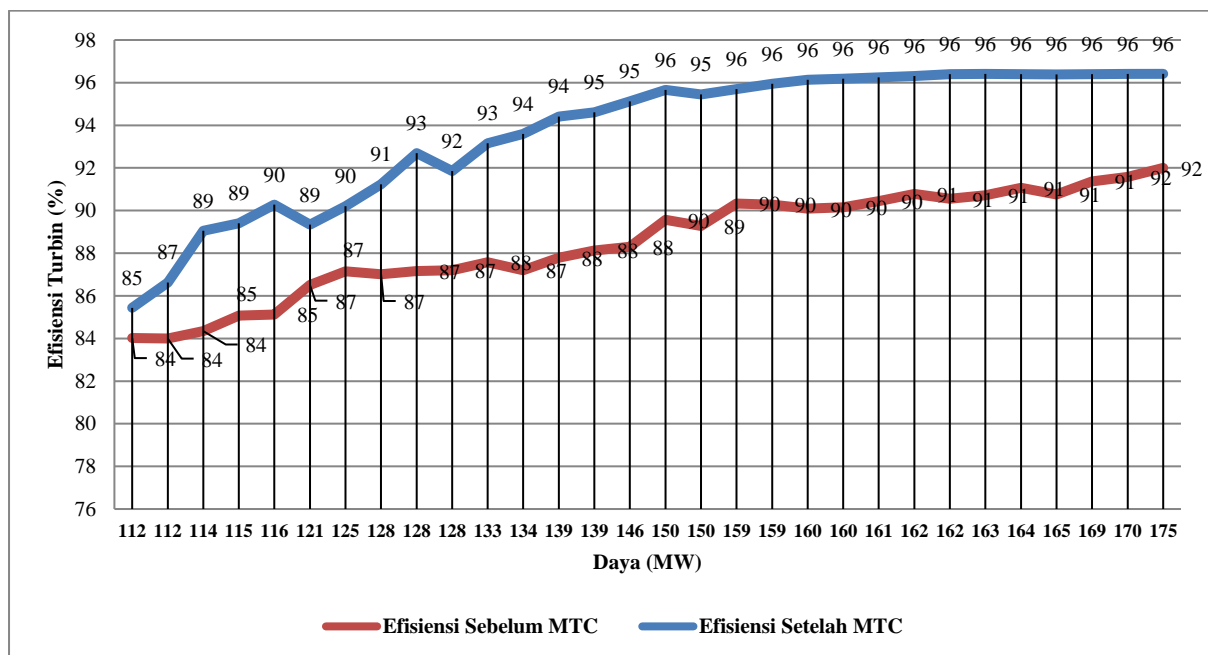




Gambar 3. Grafik *Head Losses* Total Terhadap Daya

Besarnya efisiensi turbin air berbanding lurus dengan daya yang dihasilkan (tabel 3). Pada Gambar 4 dapat dilihat nilai efisiensi turbin air pada daya 109 MW berkisar di 85 % sedangkan pada daya 175 MW efisiensi mencapai 96 %. Nilai efisiensi ini lebih tinggi dari pada sebelum dilakukan pemeliharaan yang hanya berkisar antara 91% s/d 92 %.

Semakin besar daya yang dibangkitkan semakin besar pula selisih debit air yang dibutuhkan, sehingga efisiensinya semakin meningkat pada daya yang lebih tinggi. Seperti yang terlihat pada Gambar 4. Besarnya nilai efisiensi berbanding lurus dengan besarnya daya yang di bangkitkan oleh turbin air. Semakin kecil efisiensi semakin kecil pula daya yang dibangkitkan oleh turbin air.



Gambar 4. Grafik Efisiensi Turbin Terhadap Daya

Tabel 3. Efisiensi Turbin Air Sebelum dan Setelah Pemeliharaan

No	Daya Sebelum Pemeliharaan (MW)	Efisiensi Sebelum Pemeliharaan (%)	Daya Setelah Pemeliharaan (MW)	Efisiensi Setelah Pemeliharaan (%)
1	112	83,99	109	85,44
2	112	84,00	113	86,63
3	114	84,35	117	89,05
4	115	85,07	119	89,41
5	116	85,12	121	90,27
6	121	86,50	123	89,34
7	125	87,15	129	90,20
8	128	87,01	134	91,23
9	128	87,16	134	92,69
10	128	87,20	139	91,85
11	133	87,58	149	93,16
12	134	87,20	152	93,59
13	139	87,79	159	94,41
14	139	88,13	160	94,61
15	146	88,30	165	95,12
16	150	89,56	168	95,66
17	150	89,28	169	95,45
18	159	90,33	170	95,70
19	159	90,28	171	95,94
20	160	90,09	172	96,13
21	160	90,15	172	96,19
22	161	90,44	174	96,23
23	162	90,78	174	96,31
24	162	90,55	175	96,39
25	163	90,72	175	96,40
26	164	91,06	175	96,39
27	165	90,76	175	96,39
28	169	91,37	175	96,40
29	169	91,25	175	96,40
30	170	91,58	175	96,41
<b>Average</b>		<b>88,49</b>		<b>93,65</b>

Selain debit air, besarnya nilai efisiensi pada turbin air juga di pengaruhi oleh beberapa faktor kerugian seperti gesekan aliran fluida dengan dinding pipa ataupun instalasi pipa. Faktor kerugian tersebut bisa bersifat mayor ataupun minor. Faktor kerugian tersebut biasa disebut *head losses*. Besarnya *head losses* yang dihasilkan akan sangat berpengaruh pada efisiensi turbin air. Semakin besar *head losses* semakin besar pula penurunan daya hidrolis atau daya potensial yang bisa dibangkitkan untuk mengasilkan daya pada turbin air. Semakin besar daya yang dibangkitkan, semakin besar pula debit yang dibutuhkan.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian tentang studi kasus perhitungan daya dan efisiensi turbin francis, dapat disimpulkan bahwa seiring dengan peningkatan jam operasional pembangkit, efisiensi turbin air akan mengalami penurunan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi turbin terendah tercatat pada daya 112 MW dengan nilai efisiensi 83,99%, sedangkan efisiensi tertinggi terjadi pada daya 170 MW dengan nilai efisiensi 91,58% sebelum dilakukan pemeliharaan periodik. Setelah dilakukan pemeliharaan, efisiensi turbin terendah terjadi pada daya 109 MW dengan nilai efisiensi 85,44%, sementara efisiensi tertinggi tercatat pada daya 175 MW dengan nilai 96,41%. Tingkat pemakaian air memiliki keterkaitan yang berbanding terbalik dengan efisiensi turbin, dimana semakin tinggi efisiensi turbin, semakin sedikit debit air yang dibutuhkan. Sebaliknya, semakin rendah efisiensi turbin, maka semakin besar debit air yang dibutuhkan. Temuan ini menggarisbawahi rumusan masalah dan tujuan penelitian yang diusung dalam penelitian ini.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Kami menghaturkan banyak terima kasih kepada Universitas Jenderal Achmad Yani melalui Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) yang telah memberikan hibah dana penelitian dan kepada Unit Bisnis Pembangkitan (UBP) Saguling atas keramahan serta kemudahan dalam pengambilan data untuk penelitian yang kami lakukan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. S. Ningrum, A. Mindaryani, M. Hidayat, and S. Wahyu, "Pemodelan Matematis Dan Penyelesaian Numeris Pada Absorpsi CO<sub>2</sub> Dalam Biogas Menggunakan Kolom Bahan Isian Dengan Larutan Methyldiethanolamine (MDEA)," *J Teknol*, vol. 7, no. 1, pp. 26–39, Nov. 2019, doi: 10.31479/jtek.v7i1.41.
- [2] W. Hidayat, D. Biksono, and D. Zulpian, "Pengujian Kinerja Pompa Sentrifugal Multistage Berkapasitas 118,5 KW pada PLTP Berdasarkan Standar ISO 9906," *Jurnal Rekayasa Hijau*, vol. 5, no. 2, pp. 101–113, Jul. 2021, doi: 10.26760/jrh.v5i2.101-113.
- [3] S. Wahyu, Y. Daud, T. Rahadinata, and S. S. Ningrum, "Identifikasi Potensi Sistem Panasbumi Berdasarkan Korelasi Data Geologi Dan Data Gravitasi Dengan Menggunakan Teknik Filtering First Horizontal Derivative (FHD) - Second Horizontal Derivatif (SVD)," *J Teknol*, vol. 7, no. 1, pp. 40–53, Nov. 2019, doi: 10.31479/jtek.v7i1.37.
- [4] Basori, W. Setyadi, and R. Ferdiana, "Analisis Unjuk Kerja Turbin Air Pada Pusat Listrik Tenaga Air (Plta) Dengan Kapasitas 70 MW," *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 3, pp. 131–134, Oct. 2016.
- [5] A. N. Sonjaya, F. S. Nugroho, and M. V. Vindiawan, "Perencanaan Turbin Pelton Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Kapasitas 100 watt," *J Teknol*, vol. 11, no. 1, pp. 100–109, Nov. 2023, doi: 10.31479/jtek.v11i1.266.
- [6] R. Li *et al.*, "Dynamic maintenance planning of a hydro-turbine in operational life cycle," *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 204, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.ress.2020.107129.
- [7] H. A. Kurniawan and J. Windarta, "Overview Penyediaan Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Air Berdasarkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 2, no. 3, pp. 133–143, Oct. 2021, doi: 10.14710/jebt.2021.10045.

- [8] W. Hidayat, W. Pisenso, A. Asri, and H. Widianoro, “Karakterisasi Kinerja Stratified Thermal Energy Storage Tank Menggunakan Difuser Radial Plat dengan Variasi Debit Aliran,” *Rekayasa Energi Dan Mekanika*, vol. 2, no. 1, pp. 22–33, Apr. 2022.
- [9] Y. K. Yadav, M. Kumar, A. K. Singh, and Siddhartha, “A treatise on retrofitting of hydro-turbine materials,” *Mater Today Proc*, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.134.
- [10] R. kumar and S. K. Singal, “Operation and Maintenance Problems in Hydro Turbine Material in Small Hydro Power Plant,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 2323–2331. doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.284.
- [11] Y. Ian Arianto and Wahyono, “Sistem Pengoperasian Dan Sistem Perawatan Pt. Pjb Up Brantas Plta Sutami Malang,” *Eksergi Jurnal Teknik Energi*, vol. 13, no. 3, pp. 74–77, 2017, [Online]. Available: <http://www.polines.ac.id>,