

Evaluasi Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Desa Tepal, Kabupaten Sumbawa pada Kondisi Beban Puncak

Afrianto¹, Mukhtar Hadi², Mietra Anggara³, Imam Syaukani⁴, Putri Indah Kencana⁵

^{1,3}Teknik Mesin, Universitas Teknologi Sumbawa, Sumbawa, Nusa Tenggara Barat

^{2,4,5}Teknik Sistem Energi, Universitas Teknologi Sumbawa, Sumbawa, Nusa Tenggara Barat

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 Desember 2025

Revised: 22 Januari 2026

Accepted: 24 Januari 2026

Keywords:

PLTMH
Turbine Crossflow
Beban Puncak
Kinerja Pembangkit

Published by

Impressio : Jurnal Teknologi dan Informasi
Copyright © 2025 by the Author(s) | This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ABSTRACT

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Desa Tepal, Kabupaten Sumbawa, yang menggunakan turbin crossflow, khususnya pada kondisi beban puncak. Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif melalui pengukuran langsung parameter hidrolik dan elektrikal, meliputi debit air, tinggi jatuh efektif, tegangan, arus, frekuensi, serta kondisi beban generator tiga fasa. Daya teoritis dihitung berdasarkan parameter hidrolik dan efisiensi komponen sistem, sedangkan daya aktual ditentukan dari hasil pengukuran tegangan dan arus generator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada debit aktual sebesar $0,03 \text{ m}^3/\text{detik}$ diperoleh daya listrik teoritis generator sebesar $5,73 \text{ kW}$, sementara hasil pengukuran lapangan menunjukkan daya listrik aktual mencapai $19,1 \text{ kW}$ pada kondisi beban puncak. Ketidaksesuaian yang signifikan antara daya teoritis dan daya aktual ini mengindikasikan adanya keterbatasan dalam estimasi debit serta pengaruh dominan karakteristik beban, ketidakseimbangan arus antar fasa, dan sistem kendali beban terhadap kinerja pembangkit. Jika dibandingkan dengan potensi daya berdasarkan debit desain turbin, PLTMH Desa Tepal belum beroperasi pada kondisi optimal. Hasil penelitian ini memberikan dasar evaluasi untuk perbaikan sistem kendali dan pengelolaan beban PLTMH agar operasi pembangkit lebih efisien dan andal.

This study aims to evaluate the performance of the Micro Hydropower Plant (MHP) in Tepal Village, Sumbawa Regency, which utilizes a crossflow turbine, particularly under peak load conditions. The research method employs a quantitative descriptive approach through direct measurements of hydraulic and electrical parameters, including water discharge, effective head, voltage, current, frequency, and the load conditions of a three-phase generator. The theoretical power is calculated based on hydraulic parameters and system component efficiencies, while the actual power is determined from measured generator voltage and current. The results show that at an actual discharge of $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$, the theoretical electrical power of the generator is 5.73 kW , whereas field measurements indicate that the actual electrical power reaches 19.1 kW under peak load conditions. The significant discrepancy between theoretical and actual power indicates limitations in discharge estimation as well as the dominant influence of load characteristics, phase current imbalance, and the load control system on plant performance. When compared to the power potential based on the turbine design discharge, the Tepal Village MHP has not yet been operating under optimal conditions. These findings provide a basis for evaluating improvements in the load control system and load management to ensure more efficient and reliable plant operation.

Corresponding Author

Afrianto

Teknik Mesin, Universitas Teknologi Sumbawa

Jl. Raya Olat Maras Batu Alang, Pernek, Kec. Moyo Hulu, Kabupaten Sumbawa, Nusa Tenggara Bar. 84371

Email: afrianto@uts.ac.id

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan salah satu bentuk pemanfaatan energi terbarukan yang paling sesuai untuk wilayah pedesaan dan daerah terpencil di Indonesia (Virgine & Setiabudy, 2019). Ketersediaan sumber daya air yang melimpah, karakteristik operasi yang relatif stabil, serta biaya operasional yang rendah menjadikan PLTMH sebagai solusi strategis dalam mendukung elektrifikasi pedesaan dan peningkatan kesejahteraan Masyarakat (Butchers et al., 2018; Shafiullah et al., 2021). Namun demikian, keberhasilan implementasi PLTMH tidak hanya ditentukan oleh potensi sumber daya air, tetapi juga oleh kinerja aktual sistem pembangkit dalam memenuhi kebutuhan beban listrik masyarakat.

Dalam praktiknya, banyak PLTMH skala kecil yang telah beroperasi menunjukkan adanya ketidaksesuaian antara daya teoritis yang dihitung berdasarkan parameter desain dengan daya listrik yang terukur pada sisi keluaran generator. Ketidaksesuaian ini sering kali dipengaruhi oleh faktor-faktor operasional, seperti variasi debit aktual, rugi-rugi energi pada sistem aliran, ketidakseimbangan beban antar fasa, serta keterbatasan sistem pengendalian beban. Kondisi tersebut menjadi semakin krusial pada periode beban puncak, di mana tuntutan daya listrik masyarakat meningkat dan stabilitas operasi pembangkit sangat menentukan keandalan pasokan energi.

PLTMH Desa Tepal, Kabupaten Sumbawa, yang menjadi objek kajian dalam penelitian ini, merupakan contoh PLTMH skala kecil yang melayani beban masyarakat pedesaan dengan pola konsumsi dominan pada malam hari. Meskipun secara desain menggunakan turbin crossflow yang memiliki fleksibilitas operasi pada rentang debit tertentu, hasil pengamatan lapangan menunjukkan masih adanya permasalahan pada kondisi beban puncak, seperti fluktuasi tegangan, ketidakseimbangan arus antar fasa, serta perbedaan yang signifikan antara daya teoritis dan daya aktual pembangkit. Kondisi ini menunjukkan bahwa evaluasi kinerja PLTMH tidak dapat hanya mengandalkan pendekatan desain, tetapi perlu dilakukan berdasarkan kondisi operasi aktual.

Berdasarkan celah penelitian (*research gap*) tersebut, penelitian ini menawarkan pendekatan evaluasi kinerja PLTMH yang mengaitkan aspek hidrolik dan elektrikal secara simultan pada kondisi beban puncak. Evaluasi dilakukan melalui pengukuran langsung parameter hidrolik dan listrik generator untuk mengidentifikasi tingkat kesesuaian antara potensi daya air dan daya listrik yang dihasilkan pembangkit. Pendekatan ini menjadi kebaruan penelitian, karena tidak hanya menilai kinerja berdasarkan kapasitas desain atau simulasi, tetapi menekankan pada respons nyata sistem turbin-generator terhadap kondisi operasi lapangan.

Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengelola PLTMH dalam melakukan evaluasi kinerja, pengelolaan beban, serta perbaikan sistem kendali agar operasi pembangkit lebih efisien dan andal. Selain itu, secara kebijakan, temuan penelitian ini relevan sebagai masukan dalam perumusan strategi pengembangan dan pengelolaan PLTMH berbasis energi desa, khususnya dalam meningkatkan keberlanjutan dan keandalan pasokan listrik di wilayah pedesaan.

KAJIAN TEORI

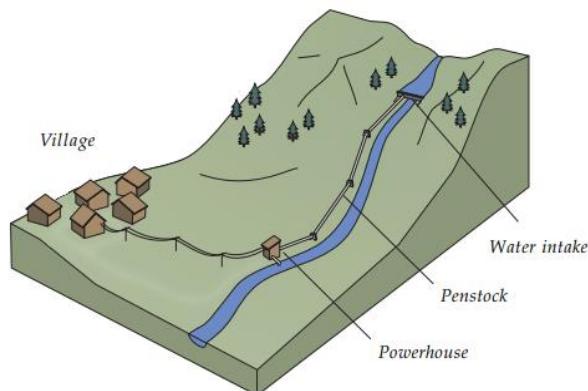
Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

PLTMH merupakan sistem pembangkit listrik tenaga air berskala kecil dengan kapasitas daya umumnya kurang dari 100 kW (Azriana et al., 2024; Sinaga et al., 2025). Energi listrik dihasilkan melalui konversi energi potensial air akibat perbedaan tinggi (head) dan debit aliran menjadi energi mekanik pada turbin, yang selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik oleh generator (Bayu et al., 2024; Shofiyah et al., 2023). Secara umum, daya teoritis PLTMH dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$P_t = \rho g Q H$$

di mana P_t adalah daya teoritis (W), ρ adalah massa jenis air (kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), Q adalah debit aliran (m^3/s), dan H adalah tinggi jatuh efektif (m). Daya listrik yang

dihasilkan akan lebih kecil dari daya teoritis akibat adanya rugi-rugi pada turbin, sistem mekanik, dan generator.



Gambar 1. Skema PLTMH (Tapia Córdoba et al., 2019)

Dalam sistem PLTMH nyata, daya listrik yang dihasilkan selalu lebih kecil dibandingkan daya hidrolik akibat adanya rugi-rugi energi pada setiap tahapan konversi, mulai dari aliran air di penstock, turbin, transmisi mekanik, hingga generator (Adhau et al., 2012; Mohibullah et al., 2004). Oleh karena itu, kinerja PLTMH tidak hanya ditentukan oleh besarnya potensi energi air, tetapi juga oleh efisiensi komponen sistem dan kondisi operasi aktual pembangkit. Secara teoritis, perbedaan antara daya hidrolik, daya mekanik turbin, dan daya listrik generator menjadi indikator utama dalam mengevaluasi kinerja PLTMH dan mengidentifikasi sumber-sumber kehilangan energi dalam sistem.

Turbin Crossflow

Turbin crossflow merupakan salah satu jenis turbin impuls yang banyak diaplikasikan pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) karena memiliki konstruksi yang sederhana, biaya perawatan yang relatif rendah, serta mampu beroperasi secara stabil pada rentang debit yang cukup lebar (Todorov et al., 2021). Karakteristik utama turbin ini adalah aliran air yang melewati sudu sebanyak dua kali, yaitu pada saat masuk dan keluar dari runner, sehingga pemanfaatan energi kinetik air menjadi lebih optimal dibandingkan beberapa jenis turbin lainnya (Sritram & Suntivarakorn, 2021).

Kinerja dan efisiensi turbin crossflow dipengaruhi oleh berbagai parameter operasional dan geometris, seperti debit air, kecepatan putar turbin, sudut dan jumlah sudu, serta kualitas aliran masuk. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ketidaksesuaian antara kondisi operasi aktual dengan titik desain turbin dapat menyebabkan penurunan efisiensi yang signifikan dan berdampak langsung pada daya mekanik yang ditransmisikan ke generator (Tesfay et al., 2025). Selain itu, studi perbandingan turbin pada sistem mikrohidro berbasis aliran vortex juga mengungkapkan bahwa turbin crossflow cenderung menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan turbin propeller pada debit rendah, khususnya ketika dimensi turbin dan jumlah sudu disesuaikan dengan karakteristik aliran dan tinggi head yang tersedia (Sritram & Suntivarakorn, 2021).



Gambar 2. Turbine Crossflow

Penurunan efisiensi ini berkontribusi langsung terhadap berkurangnya daya mekanik yang tersedia pada poros turbin dan berpotensi memperbesar selisih antara daya teoritis dan daya aktual pembangkit. Dengan demikian, dalam evaluasi kinerja PLTMH, turbin crossflow tidak hanya dinilai

berdasarkan kapasitas desainnya, tetapi juga berdasarkan kemampuannya mempertahankan efisiensi pada kondisi operasi aktual, khususnya saat terjadi variasi debit dan perubahan beban Listrik.

Generator pada Sistem PLTMH

Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik. Pada PLTMH, generator yang umum digunakan adalah generator sinkron atau generator induksi tiga fasa. Kinerja generator sangat dipengaruhi oleh ketebalan kecepatan putar, keseimbangan beban antar fasa, serta sistem pengendalian tegangan dan frekuensi.

Daya listrik keluaran generator tiga fasa dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi$$

di mana P adalah daya aktif (W), V_L adalah tegangan saluran (V), I_L adalah arus saluran (A), dan $\cos \varphi$ adalah faktor daya. Ketidakseimbangan tegangan dan arus antar fasa dapat menyebabkan penurunan daya efektif serta meningkatkan rugi-rugi sistem.



Gambar 3. Generator PLTMH Tepal

Dalam kondisi operasi nyata PLTMH, ketidakseimbangan beban antar fasa sering terjadi akibat distribusi beban yang tidak merata pada jaringan konsumen. Secara teoritis, ketidakseimbangan ini dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi pada generator, penurunan efisiensi sistem, serta fluktuasi tegangan dan frekuensi. Akibatnya, daya listrik yang terukur pada sisi keluaran generator tidak selalu merepresentasikan daya mekanik yang disuplai turbin secara proporsional.

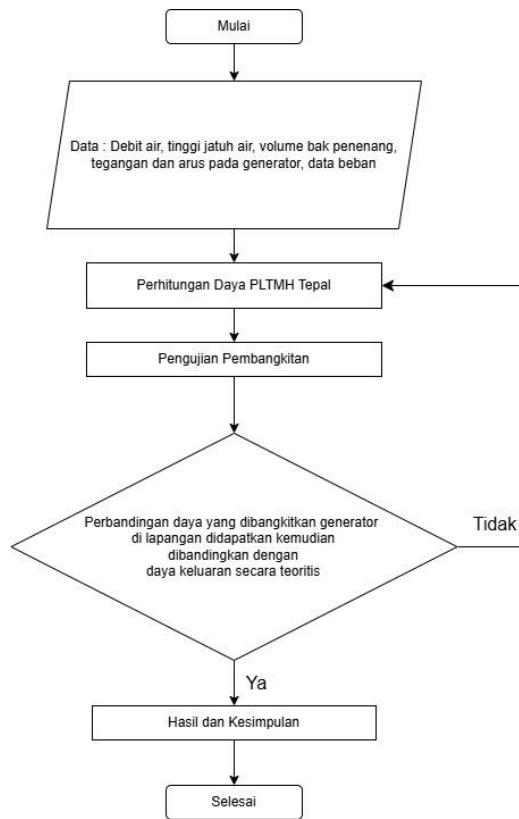
Oleh karena itu, selisih antara daya teoritis yang dihitung berdasarkan parameter hidrolik dan daya listrik aktual generator dapat dipahami sebagai hasil interaksi kompleks antara efisiensi turbin, karakteristik generator, dan kondisi beban listrik. Pemahaman teoritis ini menjadi dasar analitis dalam penelitian untuk mengevaluasi kinerja PLTMH Desa Tepal, khususnya pada kondisi beban puncak yang menuntut respons sistem secara maksimal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan eksperimental lapangan, yaitu melalui pengukuran langsung dan perhitungan parameter teknis Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Desa Tepal. Metode ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja PLTMH dengan membandingkan daya listrik aktual generator yang diperoleh di lapangan dengan daya keluaran secara teoritis berdasarkan parameter hidrolik dan spesifikasi sistem.

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian disusun secara sistematis sebagaimana ditunjukkan pada diagram alir (flowchart) penelitian, yang terdiri dari beberapa tahap utama sebagai berikut.

**Gambar 4. Flowchart Metodelogi Penelitian**

1. Pengumpulan Data Awal

Tahap awal penelitian dimulai dengan pengumpulan data teknis sistem PLTMH Desa Tepal. Data yang dikumpulkan meliputi:

- Debit air aliran (Q)
- Tinggi jatuh air efektif (head)
- Volume bak penenang
- Tegangan dan arus pada generator tiga fasa
- Data beban listrik pada kondisi operasi

Pengumpulan data ini dilakukan untuk memperoleh parameter dasar yang digunakan dalam perhitungan daya teoritis dan daya aktual PLTMH.

**Gambar 5. Penstock dan Saluran Pembawa PLTMH Tepal**

2. Perhitungan Daya PLTMH Desa Tepal

Berdasarkan data debit air dan tinggi jatuh air yang diperoleh, dilakukan perhitungan daya teoritis PLTMH menggunakan persamaan daya hidrolik. Selanjutnya, daya mekanik turbin dan daya listrik generator dihitung dengan mempertimbangkan efisiensi masing-masing komponen sistem, meliputi efisiensi turbin crossflow, penstock, transmisi mekanik, dan generator.

Perhitungan ini bertujuan untuk memperoleh gambaran daya keluaran PLTMH secara teoritis yang seharusnya dapat dihasilkan oleh sistem.

3. Pengujian Pembangkit

Tahap berikutnya adalah pengujian PLTMH secara langsung pada kondisi operasi nyata, khususnya saat beban puncak. Pada tahap ini dilakukan pengukuran:

- Tegangan fasa ke netral pada generator
- Arus pada masing-masing fasa generator
- Kondisi operasi beban dan ballast load

Pengujian dilakukan untuk memperoleh nilai daya aktual generator yang dihasilkan pada saat pembangkit beroperasi melayani beban masyarakat.



Gambar 6. Power House PLTMH Tepal

4. Perbandingan Daya Aktual dan Daya Teoritis

Daya aktual generator yang diperoleh dari hasil pengukuran lapangan kemudian dibandingkan dengan daya keluaran PLTMH yang dihitung secara teoritis. Perbandingan ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara kinerja aktual pembangkit dengan potensi daya yang tersedia dari sumber air.

Apabila terdapat selisih antara daya teoritis dan daya aktual, maka dilakukan analisis untuk mengidentifikasi kemungkinan penyebabnya, seperti rugi-rugi sistem, efisiensi komponen, ketidakseimbangan beban antar fasa, serta pengaruh sistem ballast load.

5. Hasil dan Kesimpulan

Tahap akhir penelitian adalah penyajian hasil analisis dan penarikan kesimpulan berdasarkan perbandingan daya aktual dan daya teoritis PLTMH Desa Tepal. Hasil penelitian ini digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja pembangkit serta rekomendasi perbaikan sistem agar PLTMH dapat beroperasi secara lebih optimal.

HASIL PENELITIAN

Desa Tepal terletak di Kecamatan Batu Lanteh, Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat, Indonesia. Desa ini merupakan salah satu dari enam desa di Kecamatan Batu Lanteh, yaitu Desa Semongkat, Batudulang, Tangkampulit, Baturrotok, Baodesa, dan Tepal. Mayoritas penduduk Desa Tepal berasal dari suku asli Sumbawa dengan mata pencaharian utama sebagai petani, terutama pada komoditas unggulan perkebunan kopi. Jumlah penduduk mencapai sekitar ±1.872 jiwa (Badan Pusat Statistik Kabupaten Sumbawa, 2024). Saat ini, sekitar 282 rumah tangga telah dilayani oleh Pembangkit

Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) lokal berkapasitas 40 kW.

Data spesifikasi teknis yang didapatkan dilapangan yaitu terlihat pada Tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis PLTMH Tepal

No	Uraian Spesifikasi	Parameter	Nilai
1	Intake	Lebar	80 cm
		Tinggi	80 cm
2	Saluran Pembawa	Lebar	85 cm
		Tinggi	75 cm
		Panjang	20 M
3	Bak Penenang	Panjang	4 m
		Lebar	2 m
		Tinggi	1 m
4	Penstock (plat besi)	Panjang	195 m
		Diameter	58 cm
		Tebal	3 mm
		Efisiensi	95 %
5	Turbin	Tipe/Model	Crossflow T-14-300
		Diameter runner	225 mm
		Lebar runner	70 mm
		Debit desain	200 L/detik (0,2 m ³ /detik)
		Net head	33,5 m
6	Transmisi Mekanik	Efisiensi	70 %
		Jenis	Transmisi belt & pulley
		Belt	Flat-belt 65 × 2678 mm, GT 20
		Efisiensi	98 %
7	Generator	Rasio	2 : 1
		Tipe/Jenis	MJL 200 SB4
		Putaran	1500 rpm
		Kapasitas	50 kVA / 40 kW
		Tegangan	3 fasa 400/220 V
		Frekuensi	50 Hz
		Faktor daya	0,8
		Efisiensi	89 %

Data pengukuran yang dilakukan pada PLTMH Tepal tanggal 14 September 2025, pukul 17.00 WITA untuk pengukuran waktu pengisian air bak penenang dan pukul 19.45 WITA untuk pengukuran Tegangan, Arus dan Frekuensi pada generator, seperti yang terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Hasil Pengukuran Tegangan, Arus, dan Frekuensi PLTMH Tepal

No.	Uraian	Hasil Pengukuran
1.	Tegangan Fasa Pada Generator	V_{R-N} : 225,4 Volt V_{S-N} : 228,2 Volt V_{T-N} : 224,3 Volt
2.	Arus Pada Generator	I_R : 37,5

	I _S : 35,5
	I _T : 32,7
3. Frekuensi Pada Generator	50 Hz
4. Waktu Pengisian Air Bak Penenang	4 Menit

PEMBAHASAN

Perhitungan Debit Air (Q)

Dalam perhitungan debit air (Q) pada PLTMH Tepal dilakukan dengan cara perhitungan volume dari dimensi bak penenang dengan pengukuran waktu pengisian air pada bak sebagai berikut :

Volumen bak penenang :

$$\begin{aligned}
 V &= P \times L \times T \\
 V &= 400 \times 200 \times 100 \\
 V &= 8.000.000 \text{ cm}^3 \\
 V &= 8 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Waktu Pengisian Air t = 4 menit = 240 Detik

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{V}{t} \\
 Q &= \frac{8}{300} = 0,03 \text{ m}^3/\text{detik}
 \end{aligned}$$

Perhitungan Daya PLTMH Tepal

Perhitungan daya pada PLTMH Tepal menggunakan debit air pengisian bak penenang 0,03 m³/detik dan debit air desain turbin 0,2 m³ /detik, dengan net head 33,5 meter, efisiensi turbin crossflow (η_{tb}) 70 %, efisiensi dari pipa pesat (η_{pp}) 95 %, efisiensi transmisi mekanik (η_{tm}) 98 % dan efisiensi generator (η_g) 89 %.

1. Perhitungan Daya berdasarkan Debit Air Pengisian Bak Penenang

- Besar Daya Hidrolik

$$\begin{aligned}
 P_h &= 9,81 \cdot Q \cdot H \\
 P_h &= 9,81 \times 0,026 \times 33,5 \\
 P_h &= 9,86 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

- Besar Daya Mekanik Turbin

$$\begin{aligned}
 P_{tb} &= \eta_{pp} \cdot \eta_{tb} \cdot P_h \\
 P_{tb} &= 0,95 \times 0,7 \times 9,86 \\
 P_{tb} &= 6,57 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

- Besar Daya Elektrik Generator

$$\begin{aligned}
 P_{outBP} &= \eta_{tm} \cdot \eta_g \cdot P_{tb} \\
 P_{outBP} &= 0,98 \times 0,89 \times 6,57 \\
 P_{outBP} &= 5,73 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan daya berdasarkan debit air pengisian bak penenang (P_{outBP}) didapatkan kapasitas daya yang mampu dihasilkan oleh besar daya hidrolik yaitu 9,86 kW, kemudian besar daya berdasarkan oleh mekanik turbin 6,57 kW dan besar total daya yang dihasilkan oleh generator yaitu 5,73 kW.

2. Perhitungan Daya Berdasarkan Debit Air Desain Turbin

- Besar Daya Hidrolik

$$P_h = 9,81 \cdot Q \cdot H$$

$$P_h = 9,81 \times 0,2 \times 33,5$$

$$P_h = 65,7 \text{ kW}$$

- Besar Daya Mekanik Turbin

$$P_{tb} = \eta_{pp} \cdot \eta_{tb} \cdot P_h$$

$$P_{tb} = 0,95 \times 0,7 \times 65,7$$

$$P_{tb} = 43,7 \text{ kW}$$

- Besar Daya Elektrik Generator

$$P_{outDT} = \eta_{tm} \cdot \eta_g \cdot P_{tb}$$

$$P_{outDT} = 0,98 \times 0,89 \times 43,7$$

$$P_{outDT} = 38,1 \text{ kW}$$

Sedangkan perhitungan daya berdasarkan debit desain Turbin (P_{outDT}) didapatkan kapasitas daya yang mampu dihasilkan oleh besar daya hidrolik yaitu 65,7 kW, kemudian besar daya berdasarkan oleh mekanik turbin 43,7 kW dan besar total daya yang dihasilkan oleh generator yaitu 38,1 kW

3. Perhitungan Kapasitas Daya Yang Dihasilkan Generator

$$P_{outG} = (V_{R-N} \cdot I_R \cdot \cos \varphi) + (V_{S-N} \cdot I_S \cdot \cos \varphi) + (V_{T-N} \cdot I_T \cdot \cos \varphi)$$

$$P_{outG} = (225,4 \times 37,5 \times 0,8) + (228,2 \times 35,5 \times 0,8) + (224,3 \times 32,7 \times 0,8)$$

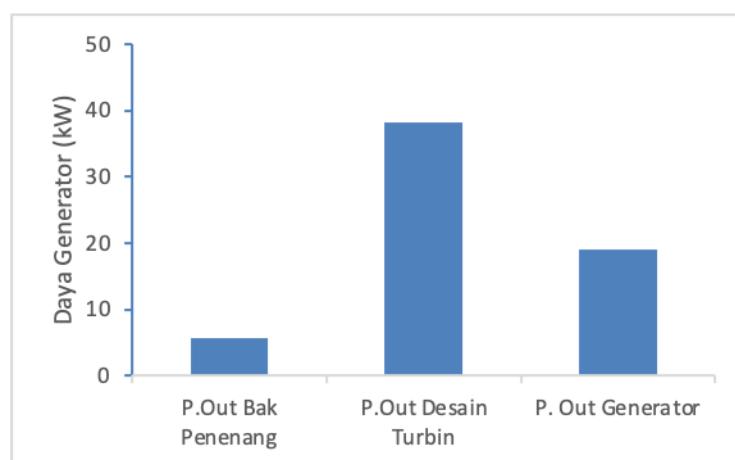
$$P_{outG} = 6,762 + 6,480 + 5,867$$

$$P_{outG} = 19.109 \text{ Watt}$$

$$P_{outG} = 19,1 \text{ Kw}$$

Daya keluaran generator sebesar 19,1 kW mencerminkan kinerja aktual PLTMH Tepal pada kondisi operasi nyata dengan debit air sekitar 0,03 m³/detik. Nilai ini menunjukkan bahwa kinerja pembangkit tidak hanya ditentukan oleh debit air, tetapi juga dipengaruhi oleh dinamika beban dan kondisi operasional sistem.

Perbedaan arus antar fasa mengindikasikan ketidakseimbangan beban yang berpotensi menurunkan efisiensi dan kestabilan tegangan. Oleh karena itu, nilai daya aktual ini dapat dijadikan indikator evaluasi kinerja sekaligus dasar perbaikan pengelolaan beban dan efisiensi operasi PLTMH Tepal.



Gambar 7. Perbandingan Daya Luaran Generator

Debit Debit air merupakan parameter fundamental yang menentukan potensi daya pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Pada penelitian ini, debit air PLTMH Tepal ditentukan melalui metode pengisian bak penenang dengan pendekatan volume dan waktu pengisian, yang umum digunakan pada pembangkit mikrohidro skala kecil karena kesederhanaannya serta kesesuaianya dengan keterbatasan instrumen pengukuran di lapangan (Rumbayan & Rumbayan, 2023).

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa volume bak penenang sebesar 8 m^3 dengan waktu pengisian 240 detik menghasilkan debit aktual sebesar $0,03 \text{ m}^3/\text{detik}$. Nilai ini secara signifikan lebih kecil dibandingkan debit desain turbin sebesar $0,2 \text{ m}^3/\text{detik}$, yang mengindikasikan bahwa PLTMH Tepal tidak beroperasi pada kondisi desain optimal. Temuan ini konsisten dengan kondisi lapangan yang menunjukkan adanya pengaruh faktor musiman, keterbatasan pasokan air, serta potensi kehilangan debit akibat kebocoran dan sedimentasi pada saluran pembawa sebelum air mencapai bak penenang.

Secara teoritis, debit aktual yang lebih kecil dari debit desain akan menyebabkan turbin *crossflow* bekerja pada kondisi partial load, sehingga daya keluaran sistem diperkirakan menurun. Berdasarkan debit pengisian bak penenang sebesar $0,026 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan tinggi jatuh efektif (net head) 33,5 m, diperoleh daya hidrolik sebesar 9,86 kW. Setelah memperhitungkan efisiensi pipa pesat (95%), turbin *crossflow* (70%), transmisi mekanik (98%), dan generator (89%), daya listrik teoritis yang dihasilkan generator diperkirakan sebesar 5,73 kW. Penurunan daya pada setiap tahapan konversi ini merupakan karakteristik umum sistem PLTMH akibat adanya rugi-rugi hidraulik, mekanik, dan elektrik.

Namun demikian, Pengukuran langsung menunjukkan daya listrik aktual PLTMH Tepal pada beban puncak sebesar 19,1 kW, jauh lebih besar dari daya teoritis berdasarkan debit bak penenang, menandakan bahwa perhitungan teoritis belum sepenuhnya mencerminkan dinamika sistem nyata. Hal ini disebabkan debit efektif turbin lebih besar dari pengukuran bak penenang akibat fluktuasi aliran dan bypass intake, serta karakteristik turbin *crossflow* yang toleran terhadap variasi debit tetap menghasilkan daya signifikan meski di luar kondisi desain.

Dari perspektif sistem tenaga, daya listrik aktual yang lebih besar juga dapat dipengaruhi oleh dinamika beban. Pada kondisi beban puncak, peningkatan permintaan daya menyebabkan generator menarik daya mekanik lebih besar dari turbin, yang dalam jangka pendek dapat dipenuhi melalui energi kinetik sistem dan fluktuasi debit sesaat. Kondisi ini menunjukkan adanya ketidakseimbangan antara daya hidrolik yang dihitung secara statis dan daya listrik yang diukur secara dinamis, yang berimplikasi pada potensi deviasi frekuensi dan tegangan apabila tidak dikendalikan dengan baik.

Temuan ini sejalan sekaligus memperluas hasil penelitian terdahulu (Sritram & Suntivarakorn, 2021) menunjukkan bahwa kinerja turbin *crossflow* pada debit rendah sangat dipengaruhi oleh geometri turbin, jumlah bilah, dan karakteristik aliran. Penelitian ini menambahkan bukti empiris bahwa pada sistem PLTMH yang beroperasi di lapangan, faktor dinamika beban dan metode pengukuran debit turut berperan penting dalam menentukan kesenjangan antara daya teoritis dan daya aktual. Dengan kata lain, evaluasi kinerja PLTMH tidak dapat hanya mengandalkan pendekatan desain atau simulasi, tetapi perlu mempertimbangkan respons sistem terhadap kondisi operasi nyata.

Perhitungan daya berdasarkan debit desain turbin sebesar $0,2 \text{ m}^3/\text{detik}$ menunjukkan potensi daya listrik teoritis sebesar 38,1 kW, jauh lebih besar dibandingkan daya yang dihasilkan pada kondisi operasi aktual. Kesenjangan ini menegaskan bahwa kapasitas terpasang PLTMH Tepal saat ini belum dimanfaatkan secara optimal, baik akibat keterbatasan debit air maupun ketiadaan sistem kendali yang adaptif terhadap perubahan beban dan debit.

Berdasarkan analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa meskipun debit air merupakan faktor utama dalam penentuan daya PLTMH, kinerja aktual sistem sangat dipengaruhi oleh dinamika operasi, karakteristik beban listrik, serta keterbatasan metode pengukuran debit. Temuan ini menegaskan perlunya penerapan sistem kendali adaptif otomatis yang mampu menyesuaikan bukaan aliran dan pembebanan generator secara real-time, sehingga konversi energi air menjadi energi listrik dapat berlangsung lebih optimal sekaligus menjaga stabilitas frekuensi dan tegangan (Chauhan & Syal, 2024; Hadi et al., 2025). Dengan pendekatan ini, energi air yang tersedia dapat dikonversi lebih optimal menjadi energi listrik, sekaligus menjaga stabilitas frekuensi, tegangan, dan efisiensi pembangkitan. Implementasi

sistem kendali adaptif yang terintegrasi dengan monitoring berbasis IoT (Ginting et al., 2018; Sumarna et al., 2023) memungkinkan pemantauan real-time debit, beban, dan performa turbin-generator, sehingga penyesuaian operasional dapat dilakukan secara cepat dan akurat untuk memaksimalkan kinerja PLTMH dalam berbagai kondisi operasi.

PENUTUP

Berdasarkan analisis debit dan daya, kinerja PLTMH Tepal sangat dipengaruhi oleh ketersediaan debit air dan kemampuan sistem menyesuaikan diri terhadap perubahan beban. Pada debit aktual sekitar 0,03 m³/detik, daya hidrolik tercatat 9,86 kW, daya mekanik turbin 6,57 kW, dan daya listrik teoritis generator 5,73 kW, menandakan turbin beroperasi di bawah kondisi desain. Sementara itu, pengukuran langsung menunjukkan daya listrik aktual mencapai 19,1 kW, yang dipengaruhi oleh dinamika beban dan respons generator, sehingga menegaskan kompleksitas interaksi subsistem hidrolik dan elektrikal.

Secara praktis, optimalisasi kinerja PLTMH memerlukan sistem kendali adaptif yang mampu menyesuaikan bukaan guide vane dan beban generator secara real-time sesuai debit dan beban, serta strategi pengelolaan beban yang mempertahankan titik operasi mendekati optimum. Pendekatan ini dapat meningkatkan efisiensi, stabilitas frekuensi, dan daya keluaran pembangkit. Penelitian ini terbatas pada pengukuran lapangan dalam satu periode operasional, sehingga penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi kinerja sepanjang variasi musiman dan kondisi beban yang berbeda.

REFERENSI

- Adhau, Mrs. S. P., Moharil, R. M., & Adhau, P. G. (2012). Estimation of micro hydro power plant capacity from potential sites. *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2012.6484339>
- Alam, Md. A., Hossain, M. K., Islam, M. A., & Al Mansur, A. (2024). Renewable Energy Mixed Optimal Hybrid Micro-Grid Design for the Southern Part of Bangladesh. *2024 6th International Conference on Sustainable Technologies for Industry 5.0 (STI)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/STI64222.2024.10951068>
- Azriana, J., Sativa, O., Syubb'an, T. M., Abdillah, W., Abdullah, N., & Ihsan, A. (2024). Menyinari Masa Depan: Strategi Optimalisasi Pembangkit Listrik Mikrohidro untuk Kesejahteraan Desa Selamat, Aceh Tamiang. *Jurnal Mardika, Masyarakat Berdikari Dan Berkarya*, 2(1), 10–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.55377/mardika.v2i1.9637>
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Sumbawa. (2024). *Kecamatan Batulan teh Dalam Angka 2024*.
- Bayu, I. D. G. N. E., Sukerayasa, I. W., & Partha, C. G. I. (2024). Potensi PLTMH di Bendungan Sidan, Desa Belok Sidan, Kabupaten Badung. *Jurnal SPEKTRUM*, 11(1), 138–148.
- Butchers, J., Williamson, S., Booker, J., Tran, A., Gautam, B., & Karki, P. B. (2018). A Study of Technical, Economic and Social Factors Affecting Micro-Hydropower Plants in Nepal. *2018 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/GHTC.2018.8601895>
- Chauhan, P., & Syal, P. (2024). Performance Enhancement of Micro Hydro Power Plant with Improved Load Controller. *2024 IEEE 65th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTUCON62997.2024.10830805>
- Ginting, S., Simatupang, J. W., Bukhori, I., & Kaburuan, E. R. (2018). Monitoring of Electrical Output Power-Based Internet of Things for Micro-Hydro Power Plant. *2018 International Conference on Orange Technologies (ICOT)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICOT.2018.8705786>
- Hadi, M., Afrianto, & Syaukani, I. (2025). Perencanaan dan Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Indonesia : Tinjauan Literatur. *Impression : Jurnal Teknologi Dan Informasi*, 4(2), 258–270. <https://doi.org/10.59086/jti.v4i2.983>
- Mohibullah, M., Radzi, A. M., & Hakim, M. I. A. (2004). Basic design aspects of micro hydro power plant and its potential development in Malaysia. *PECon 2004. Proceedings. National Power and Energy Conference, 2004.*, 220–223. <https://doi.org/10.1109/PECON.2004.1461647>

- Rumbayan, M., & Rumbayan, R. (2023). Feasibility Study of a Micro Hydro Power Plant for Rural Electrification in Lalumpe Village, North Sulawesi, Indonesia. *Sustainability*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/su151914285>
- Shafiullah, G. M., Masola, T., Samu, R., Elavarasan, R. M., Begum, S., Subramaniam, U., Romlie, M. F., Chowdhury, M., & Arif, M. T. (2021). Prospects of Hybrid Renewable Energy-Based Power System: A Case Study, Post Analysis of Chipendeke Micro-Hydro, Zimbabwe. *IEEE Access*, 9, 73433-73452. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078713>
- Shofiyah, O., Gunandar, C. M., & Ariyanti, V. T. D. (2023). Efektivitas Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro sebagai Penyedia Energi Baru Terbarukan Berbasis Komunitas. *Social, Ecology, Economy for Sustainable Development Goals Journal*, 1(1), 63-77.
- Sinaga, R., Roza, I., & Yanie, A. (2025). Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH). *(Journal of Electrical and System Control Engineering*, 8, 246-253.
- Sritram, P., & Suntivarakorn, R. (2021). The Efficiency Comparison of Hydro Turbines for Micro Power Plant from Free Vortex. *Energies*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/en14237961>
- Sumarna, Z. F., Sartika, N., Kamelia, L., Setiawan, A. E., Nurhayati, & Yusuf, T. (2023). Implementation of Micro Hydro Power Plant Monitoring System Based on Internet of Things. *2023 9th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICWT58823.2023.10335467>
- Tapia Córdoba, A., Gutiérrez Reina, D., & Millán Gata, P. (2019). An Evolutionary Computational Approach for Designing Micro Hydro Power Plants. *Energies*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/en12050878>
- Tesfay, A. H., Weldemariam, S. A., & Gebrelibanos, K. G. (2025). Design and Development of Crossflow Turbine for Off-Grid Electrification. *Energies*, 18(19). <https://doi.org/10.3390/en18195108>
- Todorov, G., Obretenov, V., Kamberov, K., Ivanov, T., Tsalov, T., & Zlatev, B. (2021). Concept and Physical Prototyping of Micro Hydropower System Using Vertical Crossflow Turbine. *2021 6th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/EFEA49713.2021.9406242>
- Triasdian, Y., Pamingotan, H., Triatmodjo, B., Sriwijaya, R., Mahardika, M., & Muflikhun, M. A. (2020). A Study Analysis of Micro-Hydro Powerplant (MHPP) Potential from Cooling of Steam Turbine. *2020 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP)*, 33-37. <https://doi.org/10.1109/ICT-PEP50916.2020.9249919>
- Virgine, R. M., & Setiabudy, R. (2019). Study of Feasibility Planning Micro Hydro Power Plant in Kampung Mului, Paser. *2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, 163-168. <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011085>