



Journal Title

Evaluasi Potensi dan Kinerja Teknis Sistem PLTMH Kaskade di Desa Blado Wetan

Andrik Sunyoto^{1*} [✉] **Imam Marzuki²** ^{ID} **Muhammad Nabil Haq³** ^{ID} **Sudik Budi Prabowo⁴** ^{ID} **Bagas Wahyu Dimas Pratama⁵** ^{ID} **Khafidz Zainal Arifin⁶** ^{ID} **Ridho Ilyasin⁷** ^{ID} **Muchammad Hafid⁸** ^{ID} **Malik Subarka⁹** ^{ID} **Muhammad Fathur Rozaq¹⁰** ^{ID} **Ahmad Izzuddin¹¹** ^{ID} **Hartawan Abdillah¹²** ^{ID} **Mas Ahmad Baihaqi¹³** ^{ID} **Hermin Arista¹⁴** ^{ID} **Ary Analisa Rahma¹⁵** ^{ID} **Nanang Hermawan¹⁶** ^{ID}

¹andriksunyoto@upm.ac.id, ²imam@upm.ac.id, ³muhammadnabilhaq0@gmail.com,
⁴sudikbudiprabowo02@gmail.com, ⁵bagaswahyudp@gmail.com,
⁶khafidzzainalarifin@gmail.com, ⁷ridhoilyasin46@gmail.com,
⁸muchammadhafid110601@gmail.com, ⁹malikavero@gmail.com,
¹⁰fathurrozaq950@gmail.com, ¹¹ahmadizzuddin@upm.ac.id, ¹²hartawanabdillah@upm.ac.id,
¹³baihaqi@upm.ac.id, ¹⁴herminarista@upm.ac.id, ¹⁵aryanalisa@upm.ac.id,
¹⁶hermawann012@gmail.com

Correspondence Author: andriksunyoto@upm.ac.id

^{1,2,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Panca Marga, 67216, Indonesia

^{3,4,5,6} Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Panca Marga, 67216, Indonesia

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Submitted: 04-09-2026

Revised: 16-09-2026

Accepted: 25-09-2026

Published: 28-09-2026

This study aims to evaluate the technical performance and energy potential of river flow utilized by five micro-hydro power plant units with a total installed capacity of fifteen kilowatts arranged in a cascade system in Blado Wetan Village. The primary problem faced by community partners, including a mosque, public street lighting, and a boarding school, is poor electrical power quality, characterized by significant Vage drops and frequency instability. The method applied in this service activity focuses on technical data collection and quantitative analysis, measuring river hydrologic parameters, Vage, current, frequency, and active power across various gate openings and load variations during daily operational hours. The results reveal that the average system generation efficiency is fifty points thirty-eight percent, showing a severe performance disparity due to cascade hydraulic losses between upstream units reaching eighty-four points ninety-five percent efficiency and downstream units dropping to four points eighty-five percent. During peak operational hours, the total active load absorption reaches only two point ninety-one kilowatts or nineteen points forty-three percent of the total nominal capacity, indicating an under-utilized condition caused by self-imposed load restrictions by residents to prevent under-Vage damage. Vage drops range



TEKIBA :

Jurnal Teknologi dan Pengabdian Masyarakat



SINTA
Science and Technology Index

E-ISSN : 2776-947X



License: This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



Keywords:

between one hundred sixty-four and one hundred ninety-eight Vs, while frequency drops between thirty-three and forty-two Hz, driven by manual gate controls, uncalibrated mechanical pulley transmission ratios, lack of lubrication maintenance, and absence of protection systems. The main contribution to partners is a set of data-driven technical recommendations, including mechanical pulley ratio recalibration, implementation of automatic load governors, capacitor bank installation, preventive lubrication schedules, and hybrid integration with local wind energy to optimize the remaining twelve point zero eight kilowatts of unutilized capacity.

River Flow Potential, Micro-Hydro, Renewable Energy, Under-Utilized, Energy Conversion Efficiency

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT) berbasis potensi lokal terus menjadi strategi utama dalam mewujudkan kemandirian energi dan pemerataan akses listrik di kawasan perdesaan [1], [2], [3]. Di antara berbagai jenis EBT, Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan salah satu teknologi terapan yang paling relevan untuk wilayah dengan topografi berbukit dan ketersediaan aliran sungai yang stabil [3], [4]. Desa Blado Wetan memiliki potensi hidrologi yang sangat strategis untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan [5], [6], [7]. Berdasarkan hasil observasi, potensi aliran sungai di wilayah tersebut telah dimanfaatkan dengan mengoperasikan 5 units PLTMH berkapasitas masing-masing 3 kW dan total dari semuanya adalah 12 kW untuk memenuhi kebutuhan listrik harian masyarakat setempat.

Meskipun infrastruktur fisik telah tersedia, operasional PLTMH di Desa Blado Wetan menghadapi tantangan teknis dalam menjaga kualitas dan kontinuitas

pasokan daya. Pengoperasian pembangkit berfokus pada periode sore hingga pagi hari, dimulai dari pukul 16.00 WIB, memasuki masa beban puncak pada pukul 17.15 WIB, hingga berakhir pada pukul 06.30 WIB. Berdasarkan data awal di lapangan, profil konsumsi energi masyarakat menunjukkan dinamika peningkatan beban yang signifikan, berawal dari 166 W hingga 176 W pada awal pengoperasian dan melonjak hingga mencapai 196 W hingga 200 W per titik sambungan pada malam hari. Fluktuasi beban yang dinamis pada rentang jam operasional tersebut sering kali memicu ketidakstabilan frekuensi dan tegangan [8], [9]. Kondisi ini diperparah oleh skema pengaturan frekuensi dan pembagian beban yang masih mengandalkan mekanisme kontrol manual sederhana berbasis instrumen lokal [10], [11]. Ketidakmampuan sistem kendali konvensional dalam merespons lonjakan beban secara real-time berisiko merusak peralatan elektronik milik warga serta

memperpendek usia pakai komponen utama generator [12], [13].

Berbagai kegiatan pengabdian masyarakat terdahulu mengenai pengembangan PLTMH perdesaan umumnya menitikberatkan fokus pada aspek pembangunan infrastruktur sipil, pemeliharaan fisik turbin, atau pembentukan lembaga pengelola air desa. Beberapa pendekatan teknologi tepat guna yang belakangan diterapkan mulai menyentuh penggunaan penstabil frekuensi elektronik maupun instrumen pengukur sederhana [14], [15], [16]. Namun, intervensi yang telah dilakukan sebagian besar masih terisolasi pada sistem pembangkit tunggal dan belum menyentuh otomasi manajemen beban terintegrasi pada skema multipool turbin yang beroperasi secara bersamaan pada jam-jam beban puncak [17]. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, kegiatan pengabdian masyarakat ini melakukan analisa guna mengetasi energi potensial dari aliran air yang dapat diubah menjadi energi listrik yang disesuaikan dengan kurva beban aktual Desa Blado Wetan. Analisis ini dirancang untuk mendasari integrasi respons regulasi beban otomatis terhadap variasi konsumsi energi harian, sehingga fluktuasi dan lonjakan beban tidak lagi memicu penurunan frekuensi operasional.

Berbagai kajian mengenai PLTMH sebelumnya umumnya masih berfokus pada evaluasi sistem pembangkit tunggal (stand-alone system) dan belum menyentuh analisis kuantitatif mendalam mengenai dinamika interaksi hidraulik-kelistrikan pada skema kaskade yang beroperasi secara simultan di sepanjang

jalur sungai tunggal. Pengabdian ini memformulasikan skema pemetaan terpadu yang memadukan profil debit-head kaskade dengan kurva pembebanan riil mitra secara real-time. Kebaruan analitis ini ditranslasikan menjadi solusi konkret bagi mitra pengelola dalam bentuk panduan rekomendasi teknis berbasis data, yang meliputi preskripsi rekalisasi rasio transmisi puli mekanis untuk menjaga frekuensi nominal 50 Hz, pemetaan matriks ambang batas pembebanan aman disertai spesifikasi proteksi under-Vage, serta dokumen standar prosedur pemeliharaan preventif pelumasan komponen warehouse guna meminimalkan rugi gesek dan memulihkan efisiensi pembangkitan di unit hilir.

Sudi-studi terdahulu umumnya mengasumsikan ketersediaan debit air konstan tanpa mempertimbangkan interaksi hidraulik antar-turbin. Akibatnya, kajian terdahulu belum mampu menjelaskan dinamika efek kaskade, di mana ekstraksi energi kinetik oleh unit hulu secara langsung mengubah momentum, meningkatkan turbulensi, dan menurunkan ketersediaan head efektif bagi unit-unit di hilirnya pada jalur sungai yang sama. Guna mengatasi keterbatasan literatur tersebut, konfigurasi 5 units PLTMH kaskade di Desa Blado Wetan menjadi objek kajian yang sangat krusial dan memiliki urgensi teknis tinggi. Penelitian menggunakan pendekatan evaluasi analitis-kuantitatif terpadu yang memetakan hubungan kausalitas antara fenomena hidraulik kaskade dengan penurunan kualitas daya listrik di tingkat pengguna.

2. METODE

Kegiatan pengabdian masyarakat ini dilaksanakan di Desa Blado Wetan dengan menerapkan pendekatan Participatory Action Research (PAR) yang memadukan observasi lapangan, pengambilan data teknis secara langsung, penerapan teknologi tepat guna, serta evaluasi berbasis partisipasi masyarakat lokal [18]. Rangkaian pengambilan data dan pendampingan lapangan berlangsung selama kurun waktu satu bulan yaitu Agustus 2026), dengan pengukuran parameter hidrologi dan kelistrikan terfokus secara real-time selama 14 jam operasional harian dari pukul 16.00 WIB hingga 06.00 WIB. Tahapan pelaksanaan pengabdian terbagi menjadi empat langkah utama.

2.1 Observasi

Pengamatan lapangan dilakukan untuk mendokumentasikan skema dan karakteristik operasional harian PLTMH di lokasi penelitian. Data yang dikumpulkan meliputi.

- 1) Siklus operasional PLTMH
- 2) Kondisi PLTMH dan warehouse
- 3) Kondisi pembebanan pada setiap waktu

Pendekatan PAR diterapkan untuk memastikan bahwa proses evaluasi dan perumusan rekomendasi tidak berjalan secara sepihak, melainkan melibatkan partisipasi aktif dari mitra pengelola lokal (pengelola sistem Dayat), pengurus Masjid Siti Aminah, serta perwakilan masyarakat pengguna. Bentuk nyata keterlibatan mitra dalam setiap tahapan meliputi:

- 1) Mitra memetakan riwayat fluktuasi beban, jadwal operasional harian, serta inventarisasi kerusakan peralatan akibat tegangan rendah.
- 2) Operator lokal mendampingi tim pengabdian dalam pengoperasian pintu air, pencatatan logbook tegangan/frekuensi, serta pengukuran debit air di sepanjang saluran kaskade.
- 3) Mitra dilibatkan dalam diskusi kelompok terarah (Focus Group Discussion / FGD) untuk merumuskan draf prosedur pemeliharaan mekanis, batas pembebanan aman, dan skema jadwal pelumasan komponen warehouse.

2.2 Pengukuran

Pengambilan data primer dilakukan secara berkala selama kurun waktu operasional harian pada panel utama pembangkit serta titik pengamatan debit air. Parameter yang diukur meliputi:

- 1) Debit air
- 2) Tegangan start dan beban puncak
- 3) Daya output dan kondisi beban

Pengambilan data teknis dilakukan pada 5 units lokasi PLTMH kaskade (PLTMH 1 hingga PLTMH 5) serta area warehouse. Pengukuran instrumen dilakukan sebanyak 5 kali pengulangan untuk setiap variasi pembukaan pintu air (20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%) serta rentang waktu operasional guna menjamin akurasi data. Spesifikasi instrumen ukur yang digunakan meliputi:

- 1) Current Meter digital (kecepatan aliran v , ketelitian 0,01 m/s), pita ukur/mistar ukur (lebar saluran b =

0,60 m, kedalaman air $h = 0,04 \text{ m}$ - 0,32 m, head efektif $H = 0,30 \text{ m}$).

- 2) Digital Multimeter True-RMS (tegangan V , ketelitian 0,5%), Tang Ampere / Clamp Meter digital (arus I), dan Digital Tachometer Optik (kecepatan putar poros/puli generator rpm).

- 1) Potensi Daya Hidro

$$P_p = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (1)$$

P_p = Potensi daya hidro teoretis (Watt)

ρ = Massa jenis air (1000 kgm^{-3})

g = Percepatan gravitasi ($9,81 \text{ ms}^{-2}$)

Q = Debit air hasil pengukuran (m^3)

H = Beda tinggi jatuh (m) [19]

- 2) Daya Beban

$$P_b = V \cdot I \cdot \cos \theta \quad (2)$$

V = Tegangan (V)

I = Arus (Ampere)

2.3 Analisis Data

Data yang diperoleh dari hasil pengukuran diolah menggunakan persamaan dasar hidro-elektrik untuk mengevaluasi efisiensi dan potensi pembangkitan.

$\cos \rho$ = Faktor daya [20]

- 3) Efisiensi dan %tase pembebanan

Membandingkan daya listrik nyata yang dihasilkan terhadap potensi daya hidro teoretis dari aliran sungai.

$$\eta = \left(\frac{P_p}{P_b} \right) \times 100\% \quad (3)$$

Mengukur %tase beban aktual masyarakat terhadap total kapasitas terpasang nominal 5 units PLTMH

$$\% \text{pembebanan} = \left(\frac{P_b}{\sum P_p} \right) \times 100\% \quad [21] \quad (4)$$

3. HASIL

3.1 Kondisi PLTMH dan Karakteristik Pembebanan Desa Blado Wetan

Desa Blado Wetan memiliki potensi energi terbarukan lokal berbasis aliran sungai yang telah dimanfaatkan secara mandiri untuk mendukung kebutuhan listrik masyarakat. Berdasarkan hasil observasi dan pendataan awal di lapangan, infrastruktur kelistrikan di lokasi ini didukung oleh 5 unit PLTMH yang masing-masing memiliki kapasitas 3 kW, sehingga total kapasitas potensi pembangkitan secara keseluruhan mencapai 15 kW. Kelima unit mikrohidro tersebut disiagakan untuk menyuplai energi listrik ke beberapa fasilitas umum dan kawasan pemukiman bernilai strategis di Desa Blado Wetan. Pola distribusi dan alokasi

pembebanan dari kelima unit PLTMH ini dibagi secara khusus untuk melayani pusat kegiatan masyarakat dan keagamaan. Secara rinci, 1 unit PLTMH dialokasikan untuk menyuplai kebutuhan listrik Masjid Siti Aminah, 1 unit PLTMH dimanfaatkan khusus untuk Penerangan Jalan Umum (PJU) guna menjamin keselamatan transportasi warga pada malam hari, serta 3 unit PLTMH sisanya dikhususkan untuk menopang kebutuhan daya listrik di kawasan pondok pesantren. Karakteristik beban terhubung pada fasilitas-fasilitas tersebut umumnya berupa peralatan penerangan, kipas angin, sound system, unit speaker, serta AC yang terpasang di area Masjid Siti Aminah.



Gambar 1. Kondisi Tegangan PLTMH

Operasional pembangkit tidak berlangsung selama 24 jam penuh, melainkan menerapkan skema jadwal harian teratur yang disesuaikan dengan pola aktivitas warga. Operasional harian dimulai pada pukul 16.00 WIB untuk persiapan awal menyalakan sistem penerangan. Masa beban puncak mulai terdeteksi pada pukul 17.15 WIB seiring meningkatnya aktivitas keagamaan dan penerangan pemukiman, dan terus berlangsung hingga berakhir pada pukul 06.30 WIB di pagi hari. Meskipun secara teknis mampu menyuplai kebutuhan daya harian, sistem kelistrikan PLTMH di Desa Blado Wetan masih menghadapi tantangan serius terkait regulasi parameter tegangan output. Pembangkit belum memenuhi kriteria standar normal kelistrikan nasional. Pada kondisi operasional yang dianggap optimal sekalipun, level tegangan yang terukur di lapangan berada pada rentang fluktuasi yang sangat lebar dan

tidak stabil, yaitu antara 164 hingga 176 V pada awal *running*. Fluktuasi tegangan yang ekstrem ini berisiko tinggi memicu kerusakan fatal pada peralatan elektronik sensitif milik warga seperti AC, sound system, maupun lampu penerangan.

Selain persoalan regulasi tegangan, sistem kelistrikan eksisting juga dicirikan oleh minimnya kendali proteksi teknis dan pemeliharaan mekanis yang belum optimal. Pembangkit belum dilengkapi dengan sistem proteksi otomatis yang memadai untuk mengantisipasi gangguan seperti hubung singkat, arus lebih, maupun lonjakan tegangan. Kondisi ini diperparah oleh manajemen perawatan rutin yang masih terbatas, terutama terkait dengan pelumasan pada komponen mekanis turbin dan bearing generator yang kurang terjadwal dengan baik, sehingga mempercepat laju keausan material dan menurunkan efisiensi konversi daya



Gambar 2. Kondisi Warehouse PLTMH

Keterbatasan fisik dan keandalan sistem tersebut berdampak pada tingginya ketergantungan mitra terhadap sumber energi lain. Di luar jam operasional utama yaitu sebelum pukul 17.15 WIB dan setelah pukul 06.30 WIB, seluruh fasilitas dan kawasan mitra mengandalkan pasokan listrik konvensional dari jaringan utilitas utama. Apabila terjadi gangguan

3.2 Potensi Energi

Kondisi PLTMH dengan saluran air yang terbuat dari besi dan memiliki penghalang air dibagian hulu untuk mengatur kecepatan air. Selain untuk pengaturan kecepatan, palang air ini juga memastikan bahwa air tidak sepenuhnya menuju turbin

teknis atau kerusakan mendadak pada unit PLTMH, sistem pasokan dari mikrohidro tidak memungkinkan untuk dijadikan suplai cadangan secara langsung. Hal ini menegaskan pentingnya analisis dan pemetaan teknis untuk mengevaluasi keandalan serta merumuskan strategi optimalisasi bagi keberlangsungan PLTMH Desa Blado Wetan di masa mendatang. yang berpotensi merusak jika terlalu besar dan juga memastikan air mengalir dengan lancar untuk dapat dimanfaatkan pada kegiatan lain oleh masyarakat sekitar. Berikut adalah pengukuran potensi energi air yang dapat dikonversi menjadi energi listrik.

Tabel 1 Pengukuran Parameter Hidrologi dan Perhitungan Daya Hidrolik Teoretis

	Lebar Saluran (m)	Tinggi Muka Air (m)	Tinggi Jatuh Air (m)	Kecepatan Aliran (m/s)	Kondisi Pintu Air	Debit (m ³ /s)	Potensi (W)	Keterangan
PLTMH 1	0.60	0.040	0.30	1.0	20%	0.0240	60.04	1. Lokasi paling utara
		0.110		1.6	50%	0.1056	264.28	2. Untuk beban listrik pesantren
		0.280		2.2	100%	0.3696	924.60	
PLTMH 2	0.60	0.040	0.30	1.0	20%	0.0240	60.04	1. Lokasi kedua dari utara
		0.110		1.7	50%	0.1122	280.79	2. Untuk beban listrik pesantren
		0.290		2.3	100%	0.4002	1000	
	0.60	0.050	0.30	1.1	20%	0.0330	82.54	

PLTMH 3			0.120	1.8	50%	0.1296	324.20	1. Lokasi ketiga dari utara
			0.320	2.4	100%	0.4608	1152	2. Untuk beban listrik pesantren
PLTMH 4	0.60	0.30	0.050	1.1	20%	0.0330	82.54	1. Lokasi kedua dari selatan
			0.120	1.9	50%	0.1368	342.21	2. Untuk bebdan PJU
			0.320	2.5	100%	0.4800	1200.74	
PLTMH 5	0.60	0.30	0.060	1.2	20%	0.0432	108.05	1. Lokasi paling selatan
			0.120	1.9	50%	0.1368	342.21	2. Untuk Masjid Siti Aminah
			0.320	2.5	100%	0.4800	1200.74	

Fakta di lapangan menunjukkan bahwa potensi daya teoretis air pada kondisi pembukaan pintu 100% menghasilkan daya kisaran 0,92 kW hingga 1,20 kW. Namun, kondisi riil di lapangan membuktikan bahwa PLTMH 5 mampu mengangkat beban induktif berat seperti unit AC di Masjid Siti Aminah, *sound system*, dan penerangan. Hal ini dapat terjadi karena di dalam warehouse telah terpasang sistem transmisi rasio puli mekanis. Puli ini secara nyata menaikkan rasio kecepatan putar dari poros turbin ke poros generator, sehingga daya tergenerasi dari generator dapat optimal untuk memenuhi beban terpasang harian.

Pengukuran riil mengonfirmasi adanya penurunan parameter aliran dari hulu (selatan) ke hilir (utara). PLTMH 5 yang terletak di titik paling hulu menerima aliran tertinggi, sedangkan PLTMH 1 di titik paling hilir mengalami penurunan aliran akibat efek hambatan dan ekstraksi energi oleh unit-unit di atasnya.. Meskipun

pembangkit mampu beroperasi menyuplai beban puncak pada pukul 17.15–06.30 WIB, pengukuran listrik di panel menunjukkan bahwa tegangan riil berada pada rentang 192 - 198 V. Terjadinya penurunan tegangan dari standar 220 V ini disebabkan oleh penyesuaian rasio puli mekanis yang masih diatur secara manual tanpa adanya pengatur beban otomatis, sehingga saat beban puncak menyala bersamaan, putaran generator sedikit terbebani.

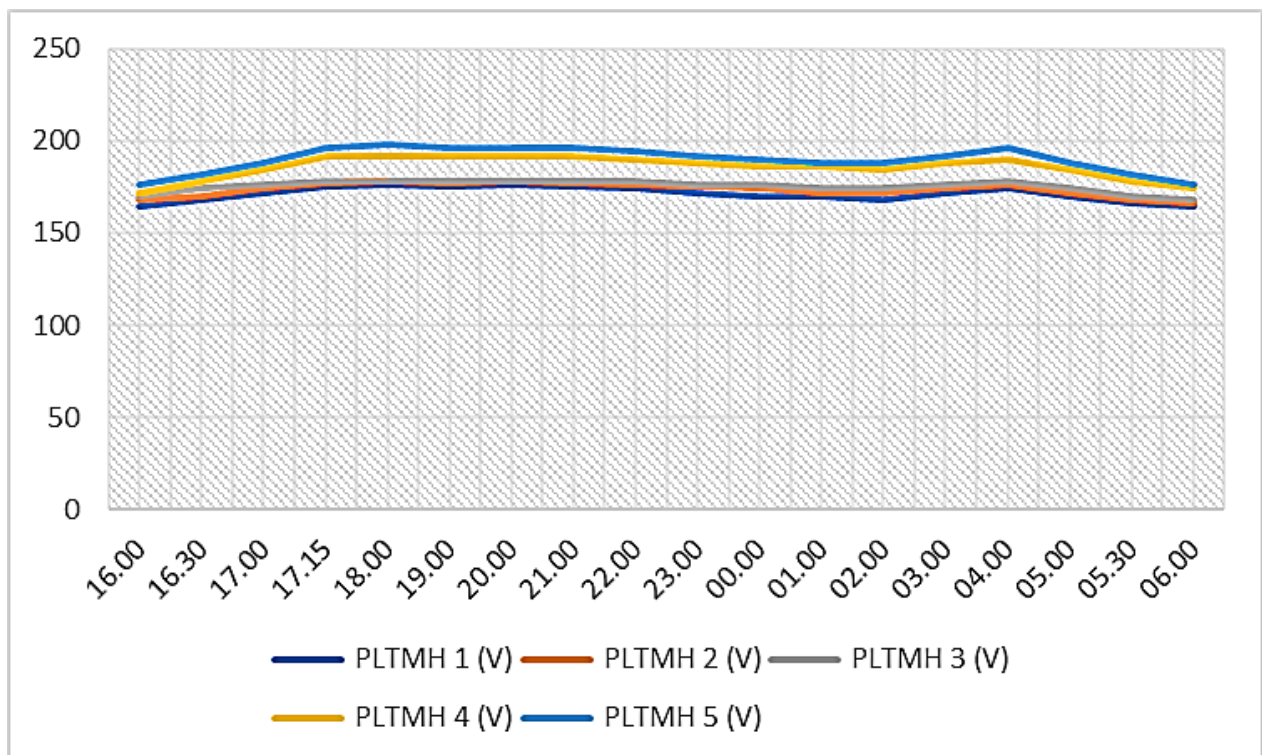
3.3 Daya Pembangkit dan Beban

Berdasarkan pengamatan dan pengukuran teknis secara real-time selama durasi operasional 14 jam dari pukul 16.00 WIB hingga 06.00 WIB, diperoleh gambaran fluktuasi parameter tegangan pada kelima unit pembangkit. Profil stabilitas tegangan output dari masing-masing unit PLTMH beserta tren dinamikanya disajikan secara terperinci pada Tabel 2 dan Gambar 1.

Tabel 2. Pengukuran Stabilitas Tegangan

Jam	PLTMH 1 (V)	PLTMH 2 (V)	PLTMH 3 (V)	PLTMH 4 (V)	PLTMH 5 (V)
16.00	164	168	170	172	176
16.30	168	170	174	178	182
17.00	172	174	176	184	188
17.15	175	177	178	192	196
18.00	176	178	178	192	198

19.00	175	177	178	192	196
20.00	176	178	178	192	196
21.00	175	177	178	192	196
22.00	174	176	178	190	194
23.00	172	175	176	188	192
00.00	170	174	176	186	190
01.00	170	172	174	186	188
02.00	168	172	174	184	188
03.00	172	174	176	188	192
04.00	174	176	178	190	196
05.00	170	172	174	184	188
05.30	166	168	170	178	182
06.00	164	166	168	174	176



Gambar 1. Grafik Stabilitas Tegangan

Pada fase awal operasional pukul 16.00 WIB, seluruh unit mencatatkan level tegangan terendah harian, yaitu berkisar antara 164V pada PLTMH 1 hingga 176 V pada PLTMH 5. Kondisi ini terjadi karena pembangkit baru memulai fase pengoperasian dengan penyesuaian debit awal pada pintu air, sementara

pembebanan penerangan masyarakat baru mulai terhubung secara bertahap. Memasuki pukul 17.15 WIB hingga 21.00 WIB yang merupakan masa beban puncak, terjadi peningkatan tegangan yang signifikan hingga mencapai batas optimal operasional harian. Puncak stabilitas tegangan tercatat pada pukul 18.00 WIB, di

mana PLTMH 5 mencapai nilai tertinggi sebesar 198 V, diikuti oleh PLTMH 4 sebesar 192V, PLTMH 3 sebesar 178 V, PLTMH 2 sebesar 178 V, dan PLTMH 1 sebesar 176 V. Kenaikan tegangan ini dipicu oleh pengaturan manual pembukaan pintu air oleh pengelola lokal untuk mengimbangi melonjaknya penggunaan beban listrik pada jam-jam utama aktivitas warga. Setelah pukul 21.00 WIB, nilai tegangan mengalami penurunan secara perlahan seiring berkurangnya aktivitas warga, sebelum kembali mengalami sedikit lonjakan sekunder pada pukul 04.00 WIB di kisaran 174 V hingga

196 V akibat peningkatan penggunaan listrik untuk persiapan aktivitas Subuh. Pembangkit akhirnya kembali ke level tegangan awal antara 164 V hingga 176 V pada pukul 06.00 WIB menjelang penghentian operasional harian

Guna mengevaluasi keandalan penyaluran energi pada masing-masing unit pembangkit, dilakukan kalkulasi daya aktif berdasarkan hasil pengukuran tegangan, arus, dan faktor daya pada berbagai variasi jenis beban. Rincian hasil pengukuran serta kalkulasi parameter daya listrik pada kelima unit PLTMH disajikan secara menyeluruh pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengukuran dan Perhitungan Daya Pembangkit dan Beban

No	Tegangan (V)	Tegangan Nominal (V)	Arus (A)	Cosphi	Daya Aktif (W)	Frekuensi (Hz)	Daya Nominal (W)	Daya Semu (VA)	Beban
PLTMH 1	176	220	0.31	0.85	45.90	33	57,97	54,56	Lampu
	175	220	0.74	0.85	110.50	33	138,38	129,5	Lampu
	175	220	0.67	0.85	99.45	33	125,29	117,25	Lampu
PLTMH 2	178	220	0.14	0.85	21.25	33	26,18	24,92	Lampu
	177	220	0.07	0.85	10.20	36	13,09	12,39	Lampu
	178	220	0.11	0.85	17.00	36	20,57	19,58	Lampu
PLTMH 3	178	220	2.57	0.85	388.45	36	480,59	457,46	Lampu
	178	220	0.56	0.78	78.00	36	96,096	99,68	Speaker
	178	220	0.90	0.71	113.60	40	140,58	160,2	Kipas
PLTMH 4	192	220	2.08	0.85	340.00	40	388,96	399,36	Lampu
	196	220	3.67	0.85	612.000	42	686,29	719,32	Lampu
PLTMH 5	196	220	1.53	0.71	213.00	42	238,986	299,88	Kipas
	196	220	0.51	0.68	68.00	42	76,296	99,96	Pompa
	198	220	0.76	0.78	117.00	42	130,416	150,48	Speaker

Unit PLTMH berkisar antara 33 Hz hingga 42 Hz, yang mana nilai ini secara signifikan masih berada di bawah standar frekuensi nominal kelistrikan. Rendahnya nilai frekuensi ini berkorelasi langsung dengan putaran generator yang belum mencapai speed nominalnya akibat keterbatasan pengaturan debit air dan rasio transmisi mekanis di lapangan. Kondisi ini secara sistematis menyebabkan penurunan tegangan output pada rentang 175 V hingga 198 V. Pengukuran objektif

pada poros generator menggunakan *Tachometer* menunjukkan bahwa kecepatan putar aktual generator di lapangan hanya mampu mencapai 990 rpm hingga 1.260 rpm. Secara matematis, besaran putaran poros terukur tersebut berbanding lurus secara linier dengan frekuensi gelombang keluaran, di mana kecepatan 990 rpm menghasilkan frekuensi 33 Hz dan 1.260 rpm menghasilkan frekuensi 42 Hz.

Akumulasi penyerapan daya aktif terbesar tercatat pada PLTMH 5 yang melayani fasilitas Masjid Siti Aminah dengan total daya tergenerasi mencapai 1.010 W, serta PLTMH 3 (580,05 W) untuk area pondok pesantren. Karakteristik beban yang terhubung juga memberikan pengaruh mendasar terhadap kualitas daya. Beban resistif murni berupa penerangan lampu mencatatkan faktor daya yang relatif stabil sebesar 0,85, sedangkan penggunaan beban induktif seperti speaker, kipas angin, dan pompa air pada PLTMH 3 dan PLTMH 5 menyebabkan penurunan faktor daya hingga mencapai titik terendah 0,68 - 0,71.

Penurunan faktor daya akibat pembebanan induktif tersebut berdampak pada penarikan arus listrik yang lebih tinggi dari generator untuk menghasilkan daya aktif yang sama. Sebagai contoh, pada PLTMH 5 beban kipas angin memerlukan arus sebesar 1,53 A untuk daya aktif 213 W

akibat nilai $\cos\phi$ 0,71. Tinggi penarikan arus pada pembebanan induktif tanpa kompensasi kapasitor ini memicu pemanasan berlebih pada kumparan generator dan mempercepat terjadinya penurunan tegangan. Kondisi tersebut menegaskan pentingnya penerapan penyeimbang beban dan perbaikan faktor daya guna menjaga keandalan operasional 5 units PLTMH Desa Blado Wetan.

3.4 Efisiensi Pembangkit

Guna mengukur sejauh mana potensi energi hidrologi aliran sungai dapat dikonversi menjadi energi listrik berguna, dilakukan analisis efisiensi pembangkitan pada masing-masing unit. Efisiensi ini diperoleh dari perbandingan antara daya listrik aktif aktual yang tergenerasi terhadap potensi daya hidro teoretis air pada kondisi pembukaan pintu air 100%. Hasil pengukuran dan kalkulasi efisiensi kelima unit PLTMH disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Pengukuran dan Perhitungan Daya Pembangkit dan Beban

	Potensi Daya Air (W)	Daya Listrik (W)	Efisiensi
PLTMH 1	924,60	255.85	27.67%
PLTMH 2	1000.00	48.45	4.85%
PLTMH 3	1152.70	580.05	50.32%
PLTMH 4	1200.74	340.00	28.32%
PLTMH 5	1200.74	1010.00	84,11%
Rata-Rata			39.05 %

Nilai efisiensi pembangkitan menunjukkan disparitas yang sangat tajam antara unit yang berada di posisi hulu (selatan) dengan unit di posisi hilir. Rata-rata efisiensi konversi energi dari kelima unit PLTMH Desa Blado Wetan berada

pada angka 39,05%. Angka ini mengindikasikan bahwa sistem pembangkitan eksisting telah bekerja cukup baik pada titik hulu, namun membutuhkan penataan ulang pada distribusi jalur aliran air serta perbaikan

regulasi pembebanan di titik hilir agar potensi daya hidro yang terbuang dapat dimanfaatkan secara lebih merata dan efisien.

3.5 Persentase Pembebanan

%tase pembebanan digunakan untuk mengukur sejauh mana daya terpasang

$$\% \text{pembebanan} = \left(\frac{P_b}{\sum P_p} \right) \times 100\%$$

$$\% \text{pembebanan} = \left(\frac{2914.35}{5 \text{ Unit PLTMH } 3 \text{ kW}} \right) \times 100\% = \left(\frac{2234.35}{15000} \right) \times 100\% = 14.90\%$$

Total akumulasi penyerapan daya aktif aktual oleh seluruh fasilitas lokasi penelitian pada jam puncak operasional hanya mencapai 2234.35 W. Apabila dibandingkan dengan total kapasitas nominal terpasang dari kelima unit PLTMH sebesar 15.000 W, maka tingkat pembebanan sistem secara keseluruhan baru mencapai 14,90%. Angka ini

nominal pembangkit dimanfaatkan secara riil oleh masyarakat pengguna. Nilai ini dihitung melalui perbandingan antara total beban aktif aktual terhubung terhadap total kapasitas terpasang nominal 5 unit PLTMH.

mengindikasikan bahwa kapasitas pembangkit eksisting berada dalam kondisi under-utilized atau belum tercover secara optimal oleh pembebanan masyarakat. Kondisi under-utilized sebesar 85,10% dari sisa kapasitas yang belum terpakai ini sebenarnya menyimpan potensi besar yang dapat dioptimalkan.

4. PEMBAHASAN

4.1 Pembebanan dan Kebutuhan Integrasi Energi Terbarukan

Hasil kalkulasi pembebanan menunjukkan bahwa total akumulasi penyerapan daya aktif aktual oleh masyarakat hanya mencapai 2,91 kW. Apabila dibandingkan dengan total kapasitas nominal terpasang dari kelima unit PLTMH sebesar 15 kW, tingkat pembebanan sistem secara keseluruhan baru mencapai 19,43. Rendahnya %tase pembebanan ini mengindikasikan bahwa kapasitas pembangkit berada dalam kondisi under-utilized akibat pembatasan penggunaan daya secara mandiri oleh masyarakat. Warga enggan mengoperasikan beban-beban listrik berdaya besar secara bersamaan guna menghindari risiko kerusakan perangkat

akibat drop tegangan. Kondisi under-utilized sebesar 80,57% dari sisa kapasitas yang belum terpakai ini sebenarnya menyimpan potensi besar yang dapat dioptimalkan apabila kualitas daya berhasil dipulihkan.

Guna menjaga kontinuitas pasokan energi saat debit air sungai menurun pada musim kemarau, direkomendasikan opsi pengembangan sistem hibrida di masa depan. Berdasarkan fenomena meteorologis lokal kawasan Probolinggo, wilayah timur seperti daerah Gading dan Gending memiliki karakteristik pergerakan angin lokal yaitu angin Gending yang relatif kuat sekitar 17 – 31 km/jam pada periode bulan juni hingga september. Integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) skala mikro diusulkan

sebagai studi pengembangan berbasis literatur untuk melengkapi pasokan daya hidro. Opsi hibrida ini difungsikan sebagai skema rekomendasi pengembangan jangka panjang untuk meningkatkan keandalan sistem, tanpa mengklaim adanya keterujian pengukuran energi angin secara langsung pada lokasi mitra saat ini.

4.2 Tegangan Nominal dan Regulasi Frekuensi

Permasalahan mendasar pada jaringan distribusi kelistrikan PLTMH Desa Blado Wetan adalah belum terpenuhinya standar kriteria tegangan nominal. Berdasarkan pengukuran di lapangan, level tegangan tergenerasi sepanjang operasional 14 jam berada pada rentang yang tergolong rendah, yaitu antara 164 V hingga 198 V. Ketidakstabilan tegangan ini bersumber dari ketiadaan sistem kontrol otomatis berupa pengatur beban elektronik atau Electronic Load Governor (ELG). Pengaturan debit air dan penyelarasan daya selama ini masih mengandalkan penyesuaian manual melalui pintu air. Keterbatasan respons kontrol manual ini menyebabkan sistem tidak mampu mengompensasi fluktuasi penarikan arus saat beban puncak terjadi.

Sebagai bentuk rekomendasi perbaikan berbasis data bagi mitra pengelola, diperlukan dua langkah teknis utama. Pertama, melakukan recalibrasi rasio diameter puli transmisi (D_t/D_g) secara presisi agar rasio putaran turbin ke generator mampu mempertahankan kecepatan nominal 1.500 rpm (50 Hz) pada kondisi beban puncak. Kedua, mengusulkan penerapan Electronic Load Governor (ELG) sebagai sistem kontrol

otomatis berbasis pengalihan beban (ballast load) untuk menggantikan sistem kontrol manual pintu air (sistem Dayat). Langkah perbaikan ini dirumuskan sebagai panduan teknis yang diserahkan kepada mitra agar kestabilan frekuensi dan tegangan nominal 220 V dapat dipulihkan secara bertahap.

4.3 Sistem Proteksi dan Risiko Kualitas Daya Listrik

Pengamatan teknis pada panel kontrol kelistrikan mengonfirmasi bahwa seluruh unit PLTMH belum dilengkapi dengan instalasi sistem proteksi terstandar. Pembangkit tidak memiliki gawai pengaman arus lebih seperti MCB terkalibrasi, under-Vage relay, maupun pemutus sirkuit otomatis. Ketidadaan instrumen proteksi ini menimbulkan potensi bahaya dan risiko keselamatan yang tinggi bagi peralatan generator maupun perangkat elektronik milik konsumen. Saat terjadi lonjakan arus akibat hubung singkat atau pembebanan berlebih, tidak ada mekanisme pemutus arus otomatis yang bekerja dengan cepat. Kondisi ini menyebabkan seluruh komponen jaringan berada dalam ancaman kerentanan operasional secara terus-menerus.

Untuk memitigasi risiko kerusakan permanen (burnout) pada peralatan mitra, diusulkan formulasi rekomendasi instalasi proteksi bertingkat. Rekomendasi ini mencakup pemasangan relai under-Vage yang diatur pada ambang batas aman 180 V, serta pengadaan panel distribusi berkapasitansi pengaman yang terkalibrasi. Selain itu, direkomendasikan insersi bank kapasitor (capacitor bank) pada titik-titik beban induktif utama

(seperti Masjid Siti Aminah) guna memutus penarikan arus reaktif dan menaikkan faktor daya ($\cos\phi$) mendekati 0,85–0,90. Seluruh spesifikasi teknis proteksi ini disajikan sebagai draf panduan keselamatan kelistrikan bagi pengelola lokal.

4.4 Manajemen Pemeliharaan Mekanis dan Efisiensi Transmisi

Selain kendala regulasi daya dan kelistrikan, performa eksisting PLTMH Desa Blado Wetan sangat dipengaruhi oleh kualitas pemeliharaan komponen mekanis warehouse. Observasi lapangan menunjukkan belum tersusunnya manajemen pemeliharaan preventif secara terstruktur dan berkala. Komponen-komponen bergerak seperti bearing, roda gigi transmisi, dan poros kincir air jarang mendapatkan tindakan pelumasan yang memadai. Pengabaian jadwal pelumasan ini memicu akumulasi gaya gesek mekanis

5. KESIMPULAN

Evaluasi teknis pada lima unit mikrohidro kaskade di Desa Blado Wetan berhasil mengkuantifikasi parameter hidrologi dan kelistrikan yang menjadi akar permasalahan penurunan kualitas daya bagi mitra pengguna. Temuan utama menunjukkan rata-rata efisiensi konversi energi sistem sebesar 39,05 %, dengan disparitas yang signifikan antara unit hulu lima sebesar 84,11 % dan unit hilir dua sebesar 4,85 % akibat penurunan tinggi jatuh air efektif dan akumulasi rugi hidraulik kaskade. Total penyerapan daya aktif aktual oleh masyarakat pada jam puncak operasional tercatat hanya sebesar 2.234,35 W atau 14,90 % dari total kapasitas terpasang nominal 15 kW, yang

yang tinggi pada setiap titik tumpuan poros. Akibatnya, sebagian energi kinetik yang dihasilkan oleh aliran air terbuang menjadi panas dan getaran mekanis.

Kurangnya pelumasan ini berdampak langsung pada penurunan efisiensi konversi energi mekanis dari turbin ke generator. Gesekan yang tinggi mempercepat keausan fisik pada komponen transmisi, meningkatkan keterlambatan respon putaran, dan memperberat beban kerja poros turbin. Hal ini berkontribusi nyata terhadap penurunan efisiensi pembangkitan di unit hilir seperti PLTMH 1 sebesar 27,67% dan PLTMH 2 sebesar 4,85%. Penerapan pemeliharaan berkala melalui pelumasan teratur dan penggantian komponen aus secara rutin merupakan langkah mutlak untuk memulihkan efisiensi transmisi mekanis dan menjaga stabilitas putaran generator.

membuktikan kondisi kurang terkelola sebesar 85,10 % akibat mekanisme pembatasan beban mandiri oleh warga guna mencegah kerusakan perangkat dari fenomena penurunan tegangan. Terpuruknya kualitas daya berupa penurunan tegangan berkisar 164 V hingga 198 V dan frekuensi operasional berkisar 33 Hz hingga 42 Hz terverifikasi bersumber dari putaran generator yang tidak mencapai batas nominal berkisar 990 hingga 1.260 RPM akibat ketidaksesuaian rasio puli empat banding satu, keterlambatan kontrol manual sistem lokal, minimnya pelumasan komponen ruang transmisi, serta ketiadaan gawai proteksi terstandar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada semua pihak yang telah turut andil dalam penelitian ini, baik dari institusi pemerintahan desa Blado Wetan, Citivas Akademika Universitas Panca Marga, dan masyarakat Blado

Wetan yang telah memberikan bantuan dalam menyelesaikan penelitian ini. Serta pada Takmir Masjid Siti Aminah Blado Wetan, PAC GP Ansor Banyuanyar sebagai penggerak pemuda sadar energi.

REFERENSI

- [1] A. Nugraha Barsei and J. Sabtohadhi, "Analisis Pemangku Kepentingan dalam Pengembangan Energi Terbarukan: Studi Kasus PLTS Desa Muara Enggelam," *Inov. J. Polit. dan Kebijak.*, vol. 20, no. 1, pp. 41–54, 2022, doi: <https://doi.org/10.33626/inovasi.v20i1.641>
- [2] I. Sitepu, D. E. Saragih, and Y. L. Br Sitepu, "Kajian Pengembangan Energi Terbarukan Berbasis Surya Sebagai Strategi Pembangunan Wilayah Berkelanjutan Di Kota Pematangsiantar," *J. Reg. Plan.*, vol. 7, no. 1, pp. 49–58, 2025, doi: <https://doi.org/10.36985/cvpwse.05>
- [3] I. K. D. Dwipayana, J. Mareta, and A. F. A. Reksa, "Membangun Kesejahteraan melalui Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Berbasis Masyarakat di Desa Baturotok, Kabupaten Sumbawa," *J. Masy. Indones.*, vol. 49, no. 2, pp. 215–226, 2024, doi: <https://doi.org/10.14203/jmi.v49i2.1369>
- [4] M. A. Razi and M. S. Kamarullah, "Analisis Potensi Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Kota Lhokseumawe: Studi Pustaka," *JPTE J. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 15, no. 1, pp. 26–37, 2026, doi: <https://doi.org/10.23887/jjpte.v15i1.116585>
- [5] A. Sudibyo, A. Nugroho, and B. Fazzry, "Analisis Potensi Energi Baru Terbarukan Sebagai Energi Alternatif Pengganti Energi Fosil Di Wilayah Probolinggo Timur," *J. Mema (Jurnal Mesin dan Manufaktur)*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2025, doi: <https://doi.org/10.66865/w74d0s18>
- [6] N. R. Sari, S. Sudarti, and Y. Yushardi, "Analisis Pemanfaatan PLTMH Di Pondok Pesantren Nahdlatut Thalibin Kabupaten Probolinggo," *JUPE J. Pendidik. Mandala*, vol. 7, no. 2, pp. 443–449, 2022, doi: <https://doi.org/10.58258/jupe.v7i2.3509>
- [7] S. Badrie, "Perjuangan Pesantren Blado Wujudkan Swasembada Energi dengan Kincir Air," *Energindo*. [Online]. Available: <https://energindo.co.id/perjuangan-pesantren-blado-wujudkan-swasembada-energi-dengan-kincir-air/>
- [8] A. S. Setiyoko, D. Sasmita, A. Pambudi, and H. A. Widodo, "Optimasi Kinerja dan Efisiensi PLTMH Melalui Penerapan Sistem Stabilisasi Tegangan," *J. Cakrawala Marit.*, vol. 8, no. 1, pp. 78–88, 2024, doi: <https://doi.org/10.35991/jcm.v8i1.38>

- [9] R. wisnu Prayoga, Y. Shalahuddin, and F. Yumono, "Simulasi Pengaruh Pertambahan Beban Terhadap Kestabilan Tegangan dan Frekuensi pada PLTMH Off-Grid 85 kVA Menggunakan MATLAB Simulink," *ALINIER J. Artif. Intell. Appl.*, vol. 6, no. 2, pp. 149–158, 2025, doi: <https://doi.org/10.36040/alinier.v6i2.16121>
- [10] M. Ali, H. Nurohmah, and M. A. Haikal, "Optimasi SMES untuk Load Frequency Control pada PLTMH Menggunakan ICA dan BA," *J. JEETech J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 101–111, 2025, doi: <https://doi.org/10.32492/jeetech.v6i1.6110>
- [11] N. J. Prasetyo, W. P. Muljanto, and N. P. Agustini, "Rancang Bangun Sistem Pengendalian Frekuensi PLTMH Pakistaji Berbasis Mikrokontroller Ardunio," *Magnetika*, vol. 7, no. 2, pp. 390–399, 2023, doi: <https://doi.org/10.30736/je.v2i2.85>
- [12] A. Faisal, S. Anisah, and I. A. Tama, "Studi Perbandingan Output Daya Aktual dan Teoritis pada PLTMH," *Impr. J. Teknol. dan Inf.*, vol. 4, no. 3, 2025, doi: <https://doi.org/10.59086/jti.v4i3.1164>
- [13] F. Zikra, R. Rauf, and Budiman, "Studi Analisa Governor Terhadap Sistem Pembebanan pada Generator PLTM Gumanti 3 PT. Supraco Mitra Energie," *J. MESIL (Mesin Elektro Sipil)*, vol. 6, no. 2, pp. 129–141, 2025, [Online]. Available: <https://jurnal.ceredindonesia.or.id/index.php/mesil/article/view/1413>
- [14] M. David, P. Sukusno, and Muslimin, "Desain dan Analisa PLTMH Sebagai Supply Power di Area Settling Pond di Coal Mining Open Pit dengan Memanfaatkan Air Proses Mine Dewatering," *Pros. Semin. Nas. Tek. Mesin Politek. Negeri Jakarta*, pp. 628–638, 2025. <https://prosiding.pnj.ac.id/index.php/sntm/article/view/4457>
- [15] Afrianto, M. Hadi, M. Anggara, I. Syaukani, and P. I. Kencana, "Evaluasi Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Desa Tepal, Kabupaten Sumbawa pada Kondisi Beban Puncak," *Impr. J. Teknol. dan Inf.*, vol. 4, no. 3, 2025. doi: <https://doi.org/10.59086/jti.v4i3.1320>
- [16] H. Widodo, U. Mudjiono, S. E. Poetro, M. B. Rahmat, and R. A. A. T. Azhiim, "Desain Pintu Air Otomatis Berbasis Mikrokontroller untuk Meningkatkan Efisiensi PLTMH di Desa Kalianan, Probolinggo," *J. Cakrawala Marit.*, vol. 8, no. 1, 2025, doi: <https://doi.org/10.35991/jcm.v8i1.23>
- [17] V. Retriani, "Penerapan Metode Running Test dalam Sistem Perawatan Genset C32 PT. Surya Toto," *Cyclotr. J. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 01, pp. 27–35, 2026, doi: <https://doi.org/10.30651/ct.v9i01.29406>
- [18] M. D. A. R. Sari and N. A. Habibah, "Pemberdayaan Masyarakat Desa Tepal Melalui Inovasi Pemanfaatan Limbah Kulit Kopi sebagai Sumber

- Energi Alternatif Berkelanjutan,” J. Islam. Community Dev., vol. 5, no. 2, pp. 62–75, 2025. doi: <https://doi.org/10.15642/jicd.2025.5.5.2.62-75>
- [19] A. Alfian, T. Hasanuddin, and S. Aiyub, “Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro pada Sungai Batee Iliet Samalanga Bireuen,” J. Litek J. List. Telekomun. Elektron., vol. 8, no. 1, pp. 53–58, 2024, doi: <https://doi.org/10.30811/litek.v20i2.28>
- [20] T. Sukendar, R. Sinambela, M. Awaludin, and A. G. Gani, “Analisa Faktor Daya Menggunakan Capacitor Bank untuk Meningkatkan Kualitas Daya Listrik di Wisma Nusantara Internasional,” JSI J. Sist. Inf. Univ. Suryadarma, vol. 11, no. 2, pp. 257–266, 2024. doi: <https://doi.org/10.35968/jsi.v11i2.1259>
- [21] J. M. Huwae, M. A. F. Haurissa, and H. L. Latupeirissa, “Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Transformator Daya 30 MVA PLTMG Ambon Peaker 30 MW,” J. Fortech, vol. 6, no. 1, 2025, doi: <https://doi.org/10.56795/fortech.v6i1.6101>