Impression: Jurnal Teknologi dan Informas, Vol. 4 (2) (2025)
Published by: Lembaga Riset Ilmiah – YMMA Sumut
Impression: Jurnal Teknologi dan Informasi
Journal homepage: https://jurnal.risetilmiah.ac.id/index.php/jti

Perencanaan dan Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Indonesia : Tinjauan Literatur

Mukhtar Hadi[1], Afrianto[2], Imam Syaukani [3]
[1,3] Teknik Sistem Energi, Universitas Teknologi Sumbawa, Sumbawa, Nusa Tenggara Barat
[2]Teknik Mesin, Universitas Teknologi Sumbawa, Sumbawa, Nusa Tenggara Barat

A R T I C L E I N F O

Article history:
Received: 17 Juni 2025
Revised: 14 Juli 2025
Accepted: 27 Juli 2025

Keywords:
Mikro Hidro
Optimasi Energi
Perencanaan Energi
PLTMH

Published by
Impression: 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 meninjau perencanaan dan optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Indonesia, dengan fokus pada aspek teknis, ekonomi, dan sosial. Berdasarkan tinjauan literatur, perencanaan yang matang sangat penting untuk memastikan pemanfaatan potensi lokal secara optimal, mencakup pemilihan lokasi, debit, head, serta turbin yang sesuai. Optimasi teknologi, seperti sistem stabilisasi tegangan dan pintu air otomatis, terbukti meningkatkan efisiensi sistem. Namun, penerapan teknologi canggih seperti AI dan smart grid masih terbatas. Penelitian ini mengidentifikasi gap dalam integrasi aspek sosial-ekonomi dan teknologi, serta menyarankan pengembangan model perencanaan yang lebih adaptif dan integrasi teknologi terbaru untuk meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi PLTMH di masa depan.

This study reviews the planning and optimization of Micro-Hydro Power Plants (MHPP) in Indonesia, focusing on technical, economic, and social aspects. Based on the literature review, effective planning is crucial to ensure the optimal utilization of local resources, including site selection, flow rate, head, and appropriate turbine selection. Optimization technologies, such as voltage stabilization systems and automatic gate systems, have proven to enhance system efficiency. However, the application of advanced technologies like AI and smart grids remains limited. This study identifies gaps in the integration of socio-economic aspects and technology, and recommends the development of a more adaptive planning model and the integration of cutting-edge technologies to enhance the sustainability and efficiency of MHPPs in the future.

Corresponding Author:
Mukhtar Hadi
Teknik Sistem Energi, Universitas Teknologi Sumbawa
Jl. Raya Olat Maras Batu Alang, Pernek, Kec. Moyo Hulu, Kabupaten Sumbawa, Nusa Tenggara Bar. 84371
Email: mukhtar.hadi@uts.ac.id

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), seiring dengan kondisi geografis yang kaya akan sumber daya air seperti sungai-sungai berarus deras yang tersebar di berbagai wilayah, terutama di daerah pegunungan dan terpencil. PLTMH dinilai sebagai salah satu solusi energi terbarukan yang ramah lingkungan dan sangat sesuai untuk wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik utama (Setiawan & Wicaksono, 2021). Selain tidak menimbulkan emisi karbon, PLTMH dapat diimplementasikan dengan skala kecil hingga menengah, serta memungkinkan partisipasi aktif masyarakat lokal dalam pembangunan dan pengelolaan sistemnya.

Dalam hal transisi energi dan upaya pemerataan akses listrik, PLTMH memegang peran strategis sebagai alternatif sumber energi terbarukan yang dapat diandalkan di komunitas pedesaan. Penggunaannya sejalan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan (SDG 7), yakni menyediakan akses energi bersih, terjangkau, dan andal untuk semua. Namun, kenyataannya, meskipun potensi pengembangan sangat besar, implementasi PLTMH di Indonesia masih menghadapi tantangan serius, terutama pada aspek perencanaan teknis dan keberlanjutan proyek.

Salah satu masalah utama adalah lemahnya tahapan perencanaan awal proyek PLTMH, yang mencakup kajian potensi debit air tahunan, estimasi beban listrik lokal, serta analisis lokasi secara geoteknik. Banyak proyek PLTMH dibangun tanpa didukung oleh studi kelayakan teknis yang memadai, sehingga menimbulkan kesenjangan antara kapasitas sistem dengan kebutuhan nyata masyarakat (Putri et al., 2022). Selain itu, pendekatan optimasi sistem seperti pemilihan turbin, penyesuaian kapasitas generator, dan efisiensi jaringan distribusi sering kali diabaikan. Hal ini berdampak pada kinerja sistem yang tidak maksimal, meningkatnya biaya operasional, dan bahkan kegagalan operasional dalam beberapa tahun pertama (Nugroho & Pranowo, 2020).

Rendahnya kapasitas teknis masyarakat lokal dalam mengoperasikan dan memelihara sistem juga menjadi penyebab lain kegagalan keberlanjutan proyek PLTMH. Belum adanya pelatihan teknis berkelanjutan, lemahnya model kelembagaan lokal pengelola energi, serta minimnya strategi pembiayaan jangka panjang memperparah masalah ini. Kegagalan tersebut berpotensi menyebabkan pemborosan sumber daya alam dan investasi yang tidak berdampak jangka panjang.

Dari sisi penelitian, studi tentang PLTMH di Indonesia sebagian besar masih bersifat deskriptif dan fokus pada analisis teknis jangka pendek, seperti potensi debit air atau desain turbin. Belum banyak studi yang mengintegrasikan perencanaan dan optimasi sistem secara holistik, mulai dari tahap survei awal, desain sistem, implementasi, hingga pengelolaan pasca-pembangunan berbasis masyarakat (Fathurrohman et al., 2023). Di sisi lain, penelitian tentang pendekatan inovatif seperti pemanfaatan perangkat lunak simulasi, integrasi dengan sistem energi hybrid, atau strategi manajemen berbasis komunitas masih sangat terbatas dan menjadi celah yang perlu dijawab.

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata terhadap penguatan literatur dan praktik pengembangan PLTMH di Indonesia. Studi ini akan meninjau tren perencanaan dan metode optimasi terkini yang relevan untuk diterapkan dalam proyek PLTMH, serta menyajikan rekomendasi strategis yang berbasis bukti untuk mendukung pengembangan sistem PLTMH yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat digunakan oleh pengambil kebijakan, LSM, pengembang energi, dan komunitas lokal dalam menyusun kebijakan serta desain teknis yang lebih matang dan berorientasi jangka panjang.

URAIAN TEORI

PLTMH adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi kinetik dari aliran air untuk menghasilkan energi listrik. Sebagai sumber energi terbarukan, PLTMH memanfaatkan aliran sungai kecil atau saluran air dengan kapasitas daya yang relatif kecil, umumnya di bawah 100 kW, yang menjadikannya pilihan yang ideal untuk daerah-daerah terpencil yang belum terhubung dengan jaringan listrik utama (Rathore & Soni, 2020). Dalam sistem PLTMH, energi mekanik yang terkandung dalam aliran air diubah menjadi energi listrik melalui turbin yang digerakkan oleh aliran air tersebut.

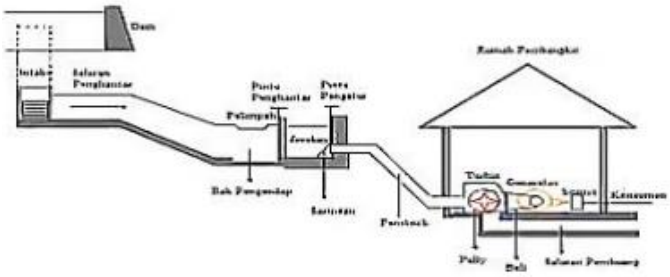
Komponen utama dalam PLTMH meliputi sumber air (seperti sungai, saluran irigasi, atau air terjun), turbin atau generator hidro untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, serta sistem distribusi listrik yang menyampaikan hasil energi tersebut ke pengguna (Güngör & Inal, 2019). Untuk memastikan efisiensi sistem, pemilihan lokasi yang tepat menjadi hal yang sangat penting, karena variabel seperti debit air, head (perbedaan ketinggian), dan kestabilan aliran air sangat mempengaruhi potensi daya yang dihasilkan. Oleh karena itu, perencanaan lokasi yang cermat harus dilakukan untuk mengoptimalkan penggunaan potensi air yang ada

Perencanaan PLTMH

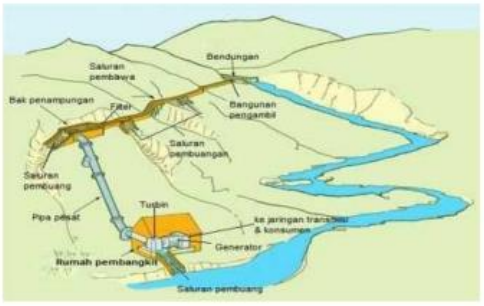
Perencanaan PLTMH mencakup berbagai aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan yang harus dipertimbangkan untuk memastikan kelayakan dan keberlanjutan proyek. Pemilihan lokasi yang tepat adalah langkah pertama yang sangat krusial. Faktor-faktor seperti debit air, perbedaan ketinggian (head), serta kestabilan aliran air harus dipertimbangkan dengan seksama. Selain itu, infrastruktur pendukung seperti akses jalan dan jaringan distribusi listrik juga harus diperhitungkan dalam tahap perencanaan (Pandey & Patil, 2017).

Langkah berikutnya dalam perencanaan adalah desain sistem hidraulik, yang meliputi pemilihan jenis turbin dan kapasitas generator yang sesuai dengan kondisi aliran air. Pemilihan turbin yang tepat sangat memengaruhi kinerja dan efisiensi PLTMH. Misalnya, turbin Pelton digunakan untuk kondisi dengan head yang tinggi dan debit air rendah, sedangkan turbin Kaplan lebih cocok digunakan pada kondisi dengan head rendah dan debit air yang tinggi (Manoharan & Krishna, 2016). Perencanaan yang matang juga mencakup analisis ekonomi untuk memperkirakan biaya investasi awal, biaya operasional, serta potensi pendapatan dari penjualan listrik yang dihasilkan.

Perencanaan desain PLTMH dapat terlihat seperti Gambar 1 dan 2. Desain harus sesuai dengan keadaan alam dan potensi daya yang dibangkitkan. Perencanaan PLTMH meliputi : intake, bak penampung, pipa pesat, power house, turbin generator.



Gambar 1 Model Perencanaan PLTMH (Murtadlo, 2021)



Gambar 2 Skema PLTMH *(Sofyan & Sudana, 2022)*

Optimasi PLTMH

Optimasi PLTMH berfokus pada upaya untuk meningkatkan efisiensi operasional dan ekonomi dari pembangkit. Salah satu aspek yang sangat penting dalam optimasi adalah pemilihan turbin yang sesuai dengan karakteristik aliran air yang ada. Pemilihan turbin yang tepat akan memastikan pembangkit beroperasi pada efisiensi maksimal dan menghasilkan daya yang optimal (Zhu & Zhao, 2014).

Selain itu, manajemen sumber daya air yang efektif sangat penting dalam menjaga kontinuitas suplai air ke turbin. Dengan menggunakan teknik pemodelan hidrologi, dapat diprediksi pola aliran air di masa depan, yang memungkinkan perencanaan untuk mengelola debit air secara efisien sepanjang tahun (Sarker & Islam, 2018). Optimasi juga mencakup analisis biaya siklus hidup (Life Cycle Costing, LCC), yang digunakan untuk menilai biaya investasi, biaya operasional, dan potensi pendapatan dari proyek PLTMH dalam jangka panjang (Jung & Lee, 2015).

Disamping itu, Optimasi PLTMH yang berfokus pada peningkatan efisiensi dan kestabilan sistem operasional melalui teknologi yang canggih. Salah satu terobosan penting dalam optimasi adalah penggunaan sistem kendali otomatis untuk menjaga kualitas daya yang dihasilkan. Meskipun beberapa penelitian sudah memperkenalkan teknologi seperti stabilisasi tegangan dan pengaturan debit air, teknologi terbaru seperti *AI-based control systems* dan *machine learning* belum banyak diterapkan. Teknologi ini dapat memberikan keuntungan besar dalam memprediksi dan menyesuaikan aliran air secara otomatis, serta membantu dalam pemeliharaan proaktif sistem. Selain itu, *smart grid* dapat

mengatur distribusi daya secara lebih dinamis dan efisien, yang akan meningkatkan kinerja keseluruhan sistem PLTMH, terutama pada sistem hibrida yang menggabungkan beberapa sumber energi terbarukan

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *narrative review* untuk mengumpulkan dan menganalisis literatur yang relevan mengenai perencanaan dan optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Indonesia. Pendekatan ini dipilih karena mampu menyajikan gambaran komprehensif terkait perkembangan penelitian, praktik, serta tantangan yang dihadapi dalam implementasi PLTMH, khususnya dalam konteks lokal Indonesia. Dengan mengedepankan sintesis tematik, *narrative review* memungkinkan pemahaman yang lebih mendalam terhadap isu-isu teknis maupun sosial yang mempengaruhi keberhasilan proyek PLTMH.

Proses pengumpulan literatur dilakukan dengan menelusuri artikel dari beberapa basis data utama seperti Google Scholar, SINTA, dan Garuda. Rentang waktu publikasi yang dipertimbangkan mencakup tahun 2019 hingga 2025 agar mencakup temuan dan tren terbaru dalam pengembangan PLTMH. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi "PLTMH," "microhydro," "perencanaan," "optimasi," dan "Indonesia." Dari hasil pencarian tersebut, dilakukan penyaringan artikel berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Artikel yang dipilih untuk dianalisis adalah yang secara eksplisit membahas aspek teknis dan sosial dalam perencanaan PLTMH, mengusulkan atau mengevaluasi metode optimasi sistem, serta menyajikan studi kasus PLTMH yang dilaksanakan di wilayah Indonesia. Sementara itu, artikel yang bersifat opini, tidak menyajikan data atau pendekatan ilmiah, maupun yang tidak relevan dengan konteks PLTMH di Indonesia, dikeluarkan dari proses analisis.

Dari proses seleksi tersebut, diperoleh sebanyak 18 artikel yang memenuhi kriteria untuk dianalisis lebih lanjut. Analisis dilakukan secara tematik guna mengidentifikasi pola-pola utama dalam literatur yang tersedia. Tiga tema besar yang muncul dalam proses analisis mencakup perencanaan dan desain teknis sistem PLTMH, pendekatan optimasi untuk meningkatkan efisiensi sistem, serta isu sosial dan keberlanjutan yang berperan dalam keberhasilan implementasi proyek PLTMH. Dengan menggabungkan temuan dari berbagai studi tersebut, penelitian ini mampu menyajikan sintesis yang komprehensif mengenai potensi dan tantangan dalam pengembangan PLTMH di Indonesia, serta solusi strategis yang dapat diterapkan untuk mendorong perencanaan dan pengelolaan yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Melalui pendekatan *narrative review* ini, diperoleh pemahaman yang lebih utuh terhadap dinamika pengembangan PLTMH di Indonesia, termasuk di dalamnya aspek teknis, sosial, dan kelembagaan. Hasil kajian ini diharapkan tidak hanya berkontribusi terhadap penguatan literatur ilmiah, tetapi juga memberikan arah praktis bagi pengambil kebijakan, pengembang energi terbarukan, dan komunitas lokal dalam mendesain proyek PLTMH yang lebih tepat guna dan berdampak jangka panjang.

HASIL PENELITIAN

Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH), berkat kondisi geografisnya yang kaya akan sumber daya air, seperti sungai-sungai dan air terjun di berbagai wilayah. PLTMH menjadi solusi yang sangat relevan, khususnya untuk memenuhi kebutuhan listrik di daerah-daerah terpencil yang belum terjangkau oleh jaringan listrik utama. Berbagai penelitian terkait PLTMH di Indonesia telah dilakukan untuk mengeksplorasi potensi, tantangan, dan solusi teknis untuk mengoptimalkan sistem ini. Tabel 1 menyajikan beberapa penelitian yang mengkaji PLTMH yang ada di Indonesia.

Tabel 1 Review Lokasi Studi Kasus Penelitian PLTMH di Indonesia

Ref.	Lokasi Studi Kasus PLTMH
(Likadja et al., 2019)	Desa Bolok, Kupang, Nusa Tenggara Timur

(Suatan et al., 2020)	Desa Panji, Gianyar, Bali
(Maridjo et al., 2020)	Sungai Cilaki, Garut, Jawa Barat
(Murtadlo, 2021)	Embung Kuniran, Kecamatan Sine, Ngawi, Jawa Timur
(Azizah & Purbawanto, 2021)	Desa Marden, Kecamatan Padureso, Kebumen, Jawa Tengah
(Birahmatihi et al., 2021)	Desa Kawinda To'I, Bima, NTB
(Sofyan & Sudana, 2022)	Desa Sidoharjo, Pekalongan, Jawa Tengah
(Normansyah, 2022)	Desa Benius, Kapuas Hulu, Kalimantan Barat
(Likadja et al., 2022)	Kecamatan Karera, Sumba Timur, NTT
(Shofiyah et al., 2023)	Anggi, Pegunungan Arfak, Papua Barat
(Putra et al., 2023)	Sungai Yeh Kis, Banjar Lebah, Tabanan, Bali
(Nurhidayat et al., 2024)	Danau Situ Rawa Badung, Bali
(Prasetyo et al., 2024)	Desa Sesela Lombok, NTB
(Bayu et al., 2024)	Desa Blok Sidan, Badung, Bali
(Azriana et al., 2024)	Desa Selamat, Aceh Tamiang, Aceh
(Widodo et al., 2025)	Desa Kalianan, Probolinggo, Jawa Timur

PEMBAHASAN

Bagian ini membahas hasil tinjauan literatur terkait perencanaan dan optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Indonesia. Pembahasan dibagi menjadi dua bagian utama yaitu : hasil review penelitian perencanaan dan optimasi PLTMH di Indonesia.

Review Perencanaan PLTMH di Indonesia

Dalam kajian Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Indonesia, perencanaan yang matang menjadi landasan utama untuk keberhasilan implementasi proyek. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pemilihan lokasi yang sesuai, analisis teknis, serta studi kelayakan ekonomi adalah aspek yang sangat penting dalam merancang PLTMH yang efisien dan berkelanjutan. Salah satu contoh penelitian adalah yang dilakukan oleh (Likadja et al., 2019). Penelitian ini memanfaatkan air buangan kondensor PLTU untuk merancang PLTMH dengan pendekatan hidrologi, yang melibatkan pemilihan turbin Cross-flow untuk memaksimalkan penggunaan debit dan head yang tersedia. Pendekatan serupa juga ditemukan dalam penelitian (Likadja et al., 2022), yang menggabungkan analisis teknis dengan perhitungan kelayakan ekonomi, guna menilai kelayakan finansial dari pembangkit mikrohidro.

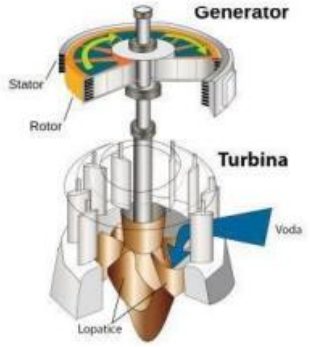
Sementara itu, perencanaan PLTMH yang dilakukan di Embung Kuniran, Ngawi, Jawa Timur (Murtadlo, 2021) dan Sungai Cilaki, Garut, Jawa Barat (Maridjo et al., 2020) menyoroti pentingnya perhitungan yang akurat terkait debit air dan head untuk memilih jenis turbin yang sesuai. Di Embung Kuniran (Murtadlo, 2021), meskipun head yang tersedia rendah (3 m), PLTMH dapat menghasilkan daya listrik yang signifikan dengan pemilihan turbin Kaplan yang sesuai dengan debit besar yang ada (Murtadlo, 2021). berbeda dengan pendekatan yang dilakukan oleh (Maridjo et al., 2020) dalam studi di Sungai Cilaki, yang menunjukkan bahwa pemilihan turbin Francis adalah solusi optimal dengan head yang lebih tinggi 60 m dan debit 2,33 m^3/s (Maridjo et al., 2020). Kedua penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan turbin sangat dipengaruhi oleh kondisi aliran air di lokasi masing-masing

Tabel 2 Review Penelitian Perencanaan PLTMH

Ref.	Debit air (m^3/s)	Head (m)	Jenis Turbin	Estimasi kapasitas (Kw)
(Likadja et al., 2019)	0.834	8.2	*Cross-flow*	47.26
(Suatan et al., 2020)	1,32	16	-	176
(Maridjo et al., 2020)	2.33	60	*Francis*	1090.56
(Murtadlo, 2021)	123.9	3	*Kaplan*	2918.35

(Azizah & Purbawanto, 2021)	7	7	*Proppller*	385
(Birahmatihi et al., 2021)	1	-	-	196.2
(Sofyan & Sudana, 2022)	1.317	6	*Kaplan*	69.71
(Normansyah, 2022)	2.5	5	*Propeller*	84
(Likadja et al., 2022)	1.687	15	*Cross-flow*	20.44
(Shofiyah et al., 2023)	0.3	58	-	32.1
(Putra et al., 2023)	0.381	8.2	*Cross-flow*	15.516
(Prasetyo et al., 2024)	0.6	-	-	0.2
(Bayu et al., 2024)	1.75	20.25	*Francis*	290.83
(Azriana et al., 2024)	0.8	9	*Cross-flow*	27.6
(Sinaga et al., 2025)	0.5	-		3

Terkait pemilihan turbin, meskipun banyak studi menunjukkan keberhasilan dalam pemilihan turbin yang tepat, seperti turbin Kaplan di Embung Kuniran (Murtadlo, 2021) atau turbin Francis di Sungai Cilaki (Maridjo et al., 2020), masih terdapat tantangan dalam penerapan turbin yang tepat dengan mempertimbangkan debit dan head secara holistik. Perbedaan karakteristik aliran air, seperti kecepatan aliran yang sangat rendah atau variabilitas debit yang tinggi, tidak selalu diterjemahkan dengan tepat dalam desain turbin, yang bisa mengurangi efisiensi energi yang dihasilkan. Konsistensi hasil yang diperoleh dari penelitian ini masih terbatas pada beberapa kondisi ideal, dan penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi pendekatan yang lebih fleksibel.



Gambar 3 Turbin Kaplan *(Sofyan & Sudana, 2022)*

Tidak hanya aspek teknis yang diperhatikan, tetapi analisis kelayakan ekonomi juga menjadi komponen penting dalam perencanaan PLTMH. Berbagai penelitian menekankan pentingnya menggunakan parameter ekonomi seperti NPV (Net Present Value), IRR (Internal Rate of Return), dan BCR (Benefit-Cost Ratio) untuk menentukan apakah investasi dalam PLTMH layak dilakukan. Sebagai contoh, kajian ekonomi di Desa Panji menunjukkan bahwa proyek PLTMH di desa tersebut layak dari segi finansial (Suatan et al., 2020).

Penelitian (Suatan et al., 2020) menunjukkan perbedaan pendekatan dengan fokus utama pada analisis ekonomi yang lebih mendalam. Dalam penelitian ini, berbagai parameter ekonomi seperti NPV, IRR, dan BCR digunakan untuk mengevaluasi kelayakan proyek, sedangkan dalam (Birahmatihi et al., 2021), teknologi hibrida yang menggabungkan PLTMH dan PLTS lebih ditekankan sebagai solusi untuk meningkatkan ketahanan energi. Penelitian ini menekankan pentingnya integrasi sumber energi terbarukan untuk menghasilkan pembangkit yang lebih andal dan lebih tahan terhadap fluktuasi cuaca dan musim.

Gambar 4 Air Terjun dari Bendungan Sungai Oi Marai pada ulan kering yang berada didepan rumah pembangkit
(Birahmatihi et al., 2021)

Dalam aspek analisis ekonomi, meskipun ada beberapa penelitian yang mengevaluasi kelayakan finansial proyek PLTMH melalui parameter seperti NPV, IRR, dan BCR (Suatan et al., 2020), perhitungan ini sering kali tidak memasukkan faktor-faktor eksternal, seperti fluktuasi harga energi atau dampak sosial dari keberadaan PLTMH di daerah terpencil. Oleh karena itu, hasil-hasil ini lebih menunjukkan kelayakan jangka pendek daripada menilai keberlanjutan proyek dalam jangka panjang.

Lebih lanjut, penelitian (Shofiyah et al., 2023) mengangkat aspek sosial dan keberlanjutan dengan menyoroti kontribusi PLTMH terhadap pengurangan emisi CO2 dan penghematan biaya listrik. Hal ini berbeda dengan penelitian (Normansyah, 2022), yang menekankan biaya pembangunan serta kapasitas daya listrik yang dihasilkan, dengan memperhitungkan biaya investasi yang dibutuhkan.

Secara keseluruhan, perencanaan PLTMH di Indonesia menunjukkan banyak variasi dalam metodologi yang digunakan. Beberapa penelitian berfokus pada aspek teknis dan desain, seperti pemilihan turbin dan analisis hidrologi (seperti yang dilakukan penelitian (Maridjo et al., 2020) dan (Murtadlo, 2021)), sementara yang lainnya lebih menekankan pada analisis ekonomi untuk menilai kelayakan proyek (seperti yang dilakukan penelitian (Likadja et al., 2022) dan (Suatan et al., 2020)). Di sisi lain, beberapa penelitian juga mengeksplorasi teknologi hibrida, yang menggabungkan PLTMH dengan pembangkit tenaga surya atau teknologi lain untuk meningkatkan efisiensi dan ketahanan energi (seperti dalam penelitian (Azizah & Purbawanto, 2021)). Pendekatan yang berbeda ini menunjukkan bahwa PLTMH dapat dirancang untuk menyesuaikan dengan kondisi lokal, baik dari segi sumber daya alam maupun kebutuhan sosial-ekonomi masyarakat setempat.

Review Optimasi PLTMH di Indonesia

Setelah sistem PLTMH dibangun, tahap selanjutnya adalah optimasi untuk memastikan bahwa sistem tersebut beroperasi dengan efisiensi yang maksimal dan dapat memberikan pasokan listrik yang stabil. Pada tahap ini, teknologi stabilisasi tegangan menjadi sangat penting untuk menjaga kualitas listrik yang dihasilkan. Penelitian yang dilakukan di Desa Kalianan, Probolinggo (Setiyoko et al., 2025), mengembangkan teknologi stabilisasi tegangan menggunakan Stavolt (stabilizer tegangan) untuk menanggulangi fluktuasi tegangan yang dapat merusak perangkat elektronik. Pemasangan Stavolt berhasil meningkatkan kestabilan tegangan dari PLTMH yang aman bagi perangkat elektronik warga desa (Setiyoko et al., 2025). Namun, hasil ini masih terbatas pada penerapan di satu lokasi, dan belum diuji pada variasi kondisi geografi dan sosial-ekonomi yang lebih luas. Ini menunjukkan bahwa stabilisasi tegangan bisa menjadi solusi lokal yang efektif, namun perlu pengujian lebih lanjut untuk memastikan keberhasilannya dalam skala nasional.

Tabel 3 menunjukkan penelitian optimasi PLTMH yang merinci beberapa pendekatan, namun seperti pada bagian perencanaan, ada ketergantungan yang kuat pada kondisi lokal dan parameter teknis yang bervariasi. Sebagian besar penelitian ini menunjukkan optimasi berdasarkan satu jenis sumber daya atau teknologi, sementara penelitian lebih lanjut yang menggabungkan berbagai sumber energi terbarukan menunjukkan keberhasilan, tetapi belum cukup terbukti dalam konteks daerah terpencil dengan kondisi geografis yang sulit diakses.

Tabel 3 Review Penelitian Optimasi PLTMH

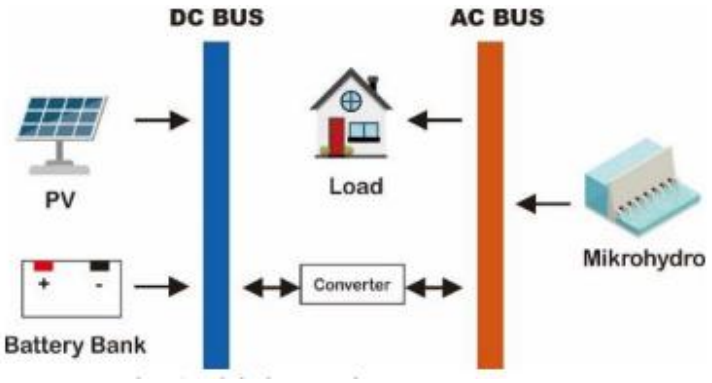
Ref.	Aspek Optimasi	Diskripsi Optimasi
(Likadja et al., 2019)	*Electrical*	Pemilihan turbin, optimasi daya
(Suatan et al., 2020)	-	Analisis ekonomi
(Maridjo et al., 2020)	*Mechanical*	Pemilihan turbin Francis
(Murtadlo, 2021)	*Mechanical*	Pemilihan turbin Kaplan untuk head rendah
(Azizah & Purbawanto, 2021)	*Electrical*	Sistem hibrida PLTMH dan PV
(Birahmatihi et al., 2021)	*Electrical*	Sistem hibrida PLTMH dan PV
(Sofyan & Sudana, 2022)	*Electrical*	Pemilihan turbin Kaplan
(Normansyah, 2022)	*Mechanical*	Pemilihan turbin Propeller
(Likadja et al., 2022)	*Mechanical*	Pemilihan turbin Crossflow
(Shofiyah et al., 2023)	*Electrical*	Penghematan energi
(Putra et al., 2023)	*Mechanical*	Pemilihan turbin
(Nurhidayat et al., 2024)	*Electrical*	Sistem hibrida PLTMH, PV, Angin
(Prasetyo et al., 2024)	*Electrical*	Sistem hibrida PLTMH dan PV
(Bayu et al., 2024)	*Mechanical*	Pemilihan turbin
(Azriana et al., 2024)	*Electrical*	Penyediaan listrik
(Widodo et al., 2025)	*Electrical*	Sistem kontrol pintu air otomatis
(Setiyoko et al., 2025)	*Electrical*	Stabilitas tegangan
(Sinaga et al., 2025)	*Mechanical*	Desain sistem

Selain itu, penelitian lain di Desa Kalianan, Probolinggo, Jawa Timur (Widodo et al., 2025) mengembangkan pintu air otomatis berbasis mikrokontroler, yang memungkinkan penyesuaian debit air secara dinamis untuk menjaga kestabilan daya yang dihasilkan. Sistem otomatis ini terbukti efektif dalam menstabilkan output listrik, memastikan keberlanjutan operasional PLTMH, dan mengurangi kerusakan peralatan elektronik di rumah tangga. Meskipun solusi ini memberikan keuntungan dalam kestabilan output listrik, perangkat mikrokontroler yang digunakan dalam desain ini belum sepenuhnya mempertimbangkan fluktuasi lingkungan yang dapat mempengaruhi akurasi sistem kontrol. Hal ini bisa menjadi masalah jika diterapkan dalam wilayah dengan variabilitas curah hujan yang tinggi, yang dapat mengganggu kestabilan sistem. Oleh karena itu, meskipun teknologi ini menawarkan solusi inovatif, dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan desain dan menguji keandalannya dalam kondisi lapangan yang lebih beragam.

Gambar 5 Kondisi PTMH Desa Kalianan dan Desain Pintu air Otomatis (Setiyoko et al., 2025; Widodo et al., 2025)

Optimasi juga mencakup aspek integrasi energi terbarukan, seperti yang terlihat pada pengembangan sistem hibrida di Desa Merden, Kebumen, Jawa Tengah (Azizah & Purbawanto, 2021) dan Desa Kawinda To'I, Bima, NTB (Birahmatihi et al., 2021). Penelitian menunjukkan bahwa dengan menggabungkan PLTMH dan PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya), sistem hibrida mampu menyediakan pasokan listrik yang lebih andal dan berkelanjutan. Di Desa Merden, sistem hibrida yang dioptimalkan dengan perangkat lunak HOMER dapat menghasilkan lebih dari 1,3 juta kWh per tahun,

dengan biaya pembangkitan sekitar $0,056/kWh (Azizah & Purbawanto, 2021). Simulasi serupa di Desa Kawinda To'i juga menunjukkan hasil yang positif, di mana kombinasi PLTMH dan PLTS menyuplai lebih dari 50% kebutuhan listrik, dengan PLTMH menyumbang 59% dari total produksi energi .



Gambar 6 Blok diagram system PLTMH *(Azizah & Purbawanto, 2021)*

Selain itu, sistem pembangkit listrik off-grid berbasis PLTMH, PLTS, dan angin yang dirancang untuk Danau Rawa Badung, Bali (Nurhidayat et al., 2024) menggunakan software HOMER menunjukkan potensi besar dalam menyediakan energi terbarukan dengan biaya yang relatif rendah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi berbagai sumber energi terbarukan dapat menghasilkan 321,436 kWh per tahun dengan LCOE (Levelized Cost of Energy) yang kompetitif, yaitu IDR 5,884/kWh (Nurhidayat et al., 2024).

PEMBAHASAN

Gap Penelitian Perencanaan dan Optimasi PLTMH

Meskipun kajian perencanaan dan optimasi PLTMH sudah cukup banyak, masih terdapat gap yang signifikan, khususnya dalam integrasi kedua aspek tersebut dalam satu kerangka penelitian yang komprehensif. Perencanaan masih didominasi oleh kajian deskriptif dan studi kasus tanpa pendekatan kuantitatif yang mendalam. Sebaliknya, optimasi banyak menggunakan simulasi dan algoritma tanpa memperhatikan konteks sosial dan implementasi lapangan secara menyeluruh.

Secara keseluruhan, baik perencanaan maupun optimasi memiliki peran penting dalam pengembangan PLTMH yang sukses. Perencanaan yang matang memastikan bahwa sistem PLTMH dibangun dengan memanfaatkan potensi lokal secara optimal, baik dari sisi teknis (seperti debit dan head) maupun dari sisi ekonomi (seperti kelayakan finansial). Perencanaan yang baik juga mencakup pemilihan turbin yang sesuai dengan kondisi sumber daya yang ada, serta desain sistem yang dapat memenuhi kebutuhan daya secara stabil.

Pada bagian perencanaan, mayoritas penelitian yang ada cenderung berfokus pada analisis potensi sumber daya air dan pemilihan turbin yang sesuai dengan kondisi hidrologi setempat. Beberapa penelitian, seperti yang dilakukan di Desa Bolok, Kupang Barat, NTT (Likadja et al., 2019), dan Embung Kuniran, Ngawi (Murtadlo, 2021)menunjukkan bagaimana debit air dan head dihitung untuk memilih jenis turbin yang tepat dan menentukan kapasitas pembangkit listrik yang dapat dihasilkan. Namun, masih terdapat gap yang signifikan dalam hal integrasi parameter lainnya, seperti analisis keberlanjutan sumber daya air dalam jangka panjang, serta pertimbangan sosial-ekonomi masyarakat setempat. Sebagian besar studi di bidang perencanaan lebih menekankan pada aspek teknis dan ekonomi, namun tidak banyak yang membahas dampak sosial dan lingkungan dalam konteks keberlanjutan jangka panjang.

Sebagai contoh, meskipun di Desa Merden, Kebumen (Azizah & Purbawanto, 2021) dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak HOMER untuk merencanakan sistem pembangkit hibrida antara

PLTMH dan panel surya (PLTS), aspek partisipasi masyarakat dan keterlibatan warga lokal dalam perencanaan dan pengelolaan PLTMH masih terbatas. Padahal, pengelolaan PLTMH sangat bergantung pada keterlibatan masyarakat lokal dalam menjaga keberlanjutan operasionalnya. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menggali peran aktif masyarakat dalam pemeliharaan serta pembagian tugas dan tanggung jawab yang akan mempengaruhi kelangsungan hidup PLTMH dalam jangka panjang.

Selain itu, gap lain yang perlu dicatat adalah dalam hal penyesuaian desain PLTMH dengan perubahan iklim. Sebagian besar perencanaan PLTMH mengasumsikan kondisi sumber daya air yang tetap sepanjang waktu, namun perubahan iklim dapat mempengaruhi pola hujan dan debit air secara signifikan. Perencanaan yang lebih adaptif terhadap perubahan iklim menjadi penting, namun hal ini jarang dibahas dalam literatur yang ada. Misalnya, studi di Desa Sidoharjo, (Sofyan & Sudana, 2022) meskipun memperhitungkan debit dan head sungai, tidak mencakup faktor-faktor perubahan cuaca yang bisa mempengaruhi ketersediaan sumber daya air.

Sementara itu, di bidang optimasi, sebagian besar penelitian fokus pada stabilisasi tegangan dan pengaturan debit air untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem PLTMH. Sebagai contoh, penelitian yang dilakukan di Desa Kalianan, Probolinggo yang menerapkan (Setiyoko et al., 2025; Widodo et al., 2025) Stavolt (stabilizer tegangan), serta penggunaan pintu air otomatis berbasis mikrokontroler, menunjukkan potensi besar dalam mengoptimalkan kinerja PLTMH, terutama untuk mengatasi fluktuasi tegangan dan debit air yang tidak terkontrol. Namun, meskipun ada beberapa inovasi dalam teknologi stabilisasi tegangan, gap yang jelas adalah kurangnya penerapan teknologi canggih seperti sistem kontrol berbasis AI atau machine learning untuk memprediksi dan menyesuaikan aliran air secara otomatis.

Selain itu, penelitian dalam optimasi lebih banyak menyoroti teknologi sistem tunggal untuk mengatasi fluktuasi daya, sedangkan integrasi teknologi multiple untuk optimasi secara menyeluruh masih sangat terbatas. Misalnya, beberapa penelitian dalam bidang optimasi PLTMH hanya berfokus pada stabilisasi tegangan tanpa mempertimbangkan sistem pengelolaan energi terbarukan secara terintegrasi, seperti penggabungan PLTMH dengan sistem panel surya atau energi angin secara lebih holistik. Hal ini membatasi kemampuan sistem untuk beradaptasi dengan perubahan kondisi lingkungan dan permintaan energi.

Di sisi lain, meskipun optimasi PLTMH di Desa Kawinda To'i, Nusa Tenggara Barat (Birahmatihi et al., 2021)dan Danau Rawa Badung (Nurhidayat et al., 2024) menunjukkan keberhasilan dalam integrasi sistem hibrida, yang melibatkan PLTMH dengan PLTS dan energi angin, masih ada gap dalam penerapan teknologi simbiosis lebih lanjut, misalnya, pengelolaan energi dengan smart grid untuk efisiensi distribusi energi. Smart grid dapat membantu dalam mengatur distribusi daya secara lebih dinamis, yang mungkin meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan, namun penggunaan teknologi ini masih jarang ditemui dalam penelitian-penelitian optimasi PLTMH yang ada.

Secara keseluruhan, gap penelitian antara perencanaan dan optimasi PLTMH di Indonesia terletak pada beberapa area kunci. Perencanaan masih kurang memperhatikan aspek keberlanjutan sumber daya air dan dampak sosial-ekonomi jangka panjang, serta belum cukup adaptif terhadap perubahan iklim. Di sisi lain, dalam optimasi, meskipun sudah ada sejumlah penelitian yang menerapkan teknologi stabilisasi tegangan dan pengaturan debit air, namun belum banyak penelitian yang mengintegrasikan teknologi smart grid ataupun machine learning pada optimasi sistem PLTMH.

Lebih lanjut, penelitian mengenai integrasi berbagai sumber energi terbarukan dan penggunaan teknologi canggih untuk pengelolaan energi secara real-time juga masih sangat terbatas.

Oleh karena itu, untuk mengisi gap ini, penelitian di masa depan perlu memperluas cakupan perencanaan dengan melibatkan aspek sosial, ekonomi, dan dampak lingkungan, serta memanfaatkan teknologi baru dalam optimasi sistem untuk memastikan bahwa PLTMH yang dikembangkan tidak hanya efisien secara teknis tetapi juga berkelanjutan dalam jangka panjang.

Rekomendasi Penelitian Berkutnya

Penelitian berikutnya perlu fokus pada integrasi teknologi canggih seperti smart grid, AI-based control systems untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas PLTMH. Selain itu, keberlanjutan sumber daya air dan dampak jangka panjang terhadap ekosistem perlu lebih diperhatikan, terutama dalam menghadapi perubahan iklim. Penelitian juga harus mengembangkan model yang melibatkan partisipasi aktif masyarakat dalam pengelolaan PLTMH, serta mengeksplorasi dampak sosial dan ekonomi jangka

panjang dari keberadaan PLTMH, seperti peningkatan pendapatan masyarakat dan pemberdayaan ekonomi lokal.

Selain itu, penelitian ke depan harus memperluas cakupan penerapan PLTMH hibrida, yang menggabungkan energi mikrohidro, surya, dan angin untuk meningkatkan kapasitas dan kestabilan sistem. Fokus pada daerah dengan tantangan geografis dan sosial yang berbeda juga penting, termasuk daerah dengan akses terbatas ke energi. Terakhir, pengembangan model bisnis baru untuk pendanaan dan pengelolaan PLTMH, seperti kemitraan publik-swasta atau crowdfunding, dapat mempercepat adopsi dan skala implementasi PLTMH secara luas, memberikan solusi energi terbarukan yang lebih inklusif dan berkelanjutan

PENUTUP

Studi ini memberikan tinjauan mengenai perencanaan dan optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Indonesia, dengan fokus pada penerapan teknologi terbaru dan tantangan implementasinya. Perencanaan yang matang sangat penting untuk memaksimalkan potensi sumber daya lokal, khususnya dalam hal debit air dan head yang bervariasi di berbagai daerah.

Kekuatan utama pada studi ini adalah pada identifikasi diversifikasi pendekatan dalam perencanaan dan optimasi, yang mencakup teknis, ekonomi, dan sosial. Pemilihan turbin yang tepat sesuai kondisi aliran air berperan penting dalam meningkatkan kapasitas daya dan keberlanjutan operasional. Namun, masih terdapat kekurangan dalam penerapan analisis ekonomi yang lebih mendalam, khususnya dalam mempertimbangkan faktor eksternal seperti fluktuasi harga energi dan dampak sosial-ekonomi terhadap masyarakat.

Dalam hal optimasi, teknologi seperti stabilisasi tegangan dan sistem hibrida PLTMH dengan PLTS menunjukkan bahwa penggunaan teknologi terkini dapat meningkatkan keandalan dan ketahanan energi. Namun, terbatasnya penerapan sistem ini di berbagai lokasi serta kebutuhan untuk menguji keandalan sistem hibrida dalam kondisi variabel menjadi tantangan yang perlu diatasi. Keterbatasan penelitian ini adalah kurangnya uji coba yang lebih luas di lapangan untuk menilai keberhasilan implementasi teknologi di berbagai daerah dengan kondisi geografis yang berbeda

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah untuk mengembangkan model perencanaan yang lebih fleksibel dengan integrasi teknologi baru seperti smart grid dan AI, serta melakukan uji coba teknologi hibrida di berbagai daerah untuk menguji keberlanjutan dan ketahanan energi secara lebih menyeluruh.

REFERENSI

Azizah, A. N., & Purbawanto, S. (2021). Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PV dan Mikrohidro) Terhubung Grid (Studi Kasus: Desa Merden, Kecamatan Padureso, Kebumen). *Jurnal Listrik, Instrumentasi Dan Elektronika Terapan*, *2*, 6–10.

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

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), 138–1484.

Birahmatihi, E., Natsir, A., & Muljono, A. B. (2021). Perencanaan Penyediaan Daya Listrik Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTMH dan PLTS) di Desa Kawinda To'i Menggunakan HOMER. *Jurnal Dielektrika*, *8*, 8–14

Fathurrohman, M., Rachman, M. A., & Surya, R. (2023). Strategi Optimalisasi Sistem PLTMH di Wilayah Terpencil: Studi Kasus di Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Energi Terbarukan Indonesia*, 12(1), 45–56.

Güngör, S., & Inal, H. (2019). The potential and technological status of small hydroelectric power plants in Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *41*(24), 3029–3037. https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1621975

Jung, C. W., & Lee, Y. J. (2015). Cost-benefit analysis and financial feasibility of small hydropower projects in the context of South Korea. *Energy Economics*, *48*, 180–190. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.11.021

Likadja, F. J., Odja, M. O., Pella, S. I., & Ina, W. T. (2022). Studi Tekno Ekonomi Perencanaan Pembangkit Listrik Mikro Hidro (PLTMH) di Kecamatan Karera, Kabupaten Sumba Timur. *Jurnal Media Elektro*, *XI*(2), 201–215.

Likadja, F. J., Sampeallo, A., & Amaral, C. R. D. N. R. (2019). Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Memanfaatkan Outlet Kondensor PLTU II NTT di Desa Bolok Kecamatan Kupang Barat, Kabupaten Kupang. *Jurnal Media Elektro*, *8*(2), 155–163.

Manoharan, S., & Krishna, C. (2016). Optimization of micro-hydro power systems for rural applications: A review. *Energy*, *97*, 326–338. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.048

Maridjo, Slameto, Wibawa, D. S., & Lutfy, A. (2020). Studi Perencanaan Turbin Air PLTMH di Sungai Cilaki, Garut. *Jurnal Energi*, *10*, 29–35.

Murtadlo, I. (2021). Analisis Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Embung Kuniran, Kecamatan Sine, Kabupaten Ngawi. *Jurnal Teknik Energi*, *10*(3), 1–8.

Nugroho, A., & Pranowo, D. (2020). Analisis Kegagalan Operasional PLTMH di Indonesia: Faktor Teknis dan Sosial. *Jurnal Teknik Elektro dan Energi*, 8(2), 89–98.

Normansyah. (2022). Kajian Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Benuis di Desa Benuis, Kecamatan Selimbau, Kabupaten Kapuas Hulu. *Indonesian Journal of Mechanical Engineering Vocational*, *2*, 44–148.

Nurhidayat, A., Arief, Y. Z., & Wilyanti, S. (2024). Analisa Pemodelan Microgrid PLTH Off-Grid di Danau Situ Rawa Badung Berbasis HOMER. *Jurnal Media Elektro*, *13*, 97–109.

Pandey, M. A., & Patil, V. (2017). Site selection and planning of small hydropower plants. *Energy Procedia*, *105*, 2072–2077. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.401

Prasetyo, R. B., Rahman, F. U., & Muljono, A. B. (2024). Desain Sistem Pembangkit Listrik Optimal On-Grid Tenaga Surya, Bayu dan PLTMH Menggunakan Software HOMER Di Desa Sesela. *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, *5*, 47–59.

Putra, W. E., Sukerayasa, I. W., & Giriantari, I. A. D. (2023). Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Sungai Yeh Dikis Banjar Lebah, Kabupaten Tabanan. *Jurnal SPEKTRUM*, *10*, 14–25.

Rathore, N., & Soni, S. (2020). A review of microhydro power systems for rural electrification: status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *121*, 109722. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109722

Putri, D. A., Hidayat, R., & Syarifudin, M. (2022). Studi Perencanaan Pembangkit Mikrohidro Berbasis Masyarakat di Kabupaten Lebak. *Jurnal Sains dan Teknologi Energi*, 10(3), 111–120. Setiawan, B., & Wicaksono, A. (2021). Potensi dan Tantangan Pengembangan Energi Mikrohidro di Indonesia. *Jurnal Rekayasa Energi*, 15(2), 67–75.

Sarker, M. N. I., & Islam, M. T. (2018). Modeling and optimization of small hydro power systems for sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 1552–1560. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.083

Setiyoko, A. S., Pambudi, D. S. A., Widodo, H. A., Azhiim, R. A. A. T., Imanuel, P. C., & Lembang, M. Y. D. (2025). Optimasi Kinerja dan Efisiensi PLTMH Melalui Penerapan Sistem Stabilisasi Tegangan di Desa Kalianan, Probolinggo. *Jurnal Cakrawala Maritim*, *8*, 78–88.

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.

Sofyan, Moh., & Sudana, I. M. (2022). Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Berdasarkan Debit Air dan Kebutuhan Energi Listrik. *Jurnal Listrik, Instrumentasi, Dan Elektronika Terapan (JuLIET)*, *3*, 31–39.

Suatan, R. A., Giriantari, I. A. D., & Sukerayasa, I. W. (2020). Kajian Ekonomi Rencana PLTMH di Desa Panji. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, *19*, 263–270.

Widodo, H. A., Mudjiono, U., Poetro, J. E., Rahmat, M. B., & Azhiim, R. A. A. T. (2025). Desain Pintu Air Otomatis Berbasis Mikrokontroler untuk Meningkatkan Efisiensi PLTMH di Desa Kalianan, Probolinggo. *Jurnal Cakrawala Maritim*, *8*(1), 52–63.

Zhu, Y., & Zhao, J. (2014). Life cycle cost analysis of microhydro power systems. *Energy*, *76*, 89–99. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.035